BỘ CÔNG THƯƠNG
TRƯỜNG ĐẠI HỌC CÔNG NGHIỆP THÀNH PHỐ HỒ CHÍ MINH

ĐỒNG PHÚ HẢO

NÂNG CAO HIỆU QUẢ MÔI TRƯỜNG VÀ KINH TẾ CỦA SẢN XUẤT LÚA NƯỚC BẰNG THAN SINH HỌC THEO HƯỚNG PHÁT TRIỂN BỀN VỮNG

Ngành : QUẢN LÝ TÀI NGUYÊN VÀ MÔI TRƯỜNG
Mã ngành : 9850101

LUẬN ÁN TIẾN SĨ

THÀNH PHỐ HỒ CHÍ MINH, NĂM 2026

BỘ CÔNG THƯƠNG
TRƯỜNG ĐẠI HỌC CÔNG NGHIỆP THÀNH PHỐ HỒ CHÍ MINH

ĐỒNG PHÚ HẢO

NÂNG CAO HIỆU QUẢ MÔI TRƯỜNG VÀ KINH TẾ CỦA SẢN XUẤT LÚA NƯỚC BẰNG THAN SINH HỌC THEO HƯỚNG PHÁT TRIỂN BỀN VỮNG

Ngành: Quản lý Tài nguyên và Môi trường
Mã ngành: 9850101

Phản biện 1:
Phản biện 2:
Phản biện 3:

NGƯỜI HƯỚNG DẪN:
1. Phó Giáo sư, Tiến sĩ Nguyễn Thanh Bình
2. Tiến sĩ Lê Hoàng Anh

LỜI CAM ĐOAN

Tôi cam đoan luận án này là công trình nghiên cứu của riêng tôi. Kết quả trình bày trong luận án là trung thực và chưa được các tác giả công bố trong bất kì công trình nào. Các trích dẫn về bảng biểu, kết quả nghiên cứu của những tác giả khác; tài liệu tham khảo trong luận án đều có nguồn gốc rõ ràng và theo đúng quy định.

Tác giả luận án

Đồng Phú Hảo

TÓM TẮT LUẬN ÁN TIẾN SĨ

Sản xuất lúa nước hiện tại chưa đảm bảo tính bền vững về môi trường và kinh tế, trong khi than sinh học từ phụ phẩm nông nghiệp có tiềm năng cải thiện chất lượng đất, giảm phát thải CH_4 và nâng cao hiệu quả kinh tế. Nghiên cứu này đánh giá hiệu quả tổng hợp của than sinh học từ vỏ trấu và thân cành nhãn trong canh tác lúa nước qua các thí nghiệm nhà lưới và thực địa. Nghiên cứu đã thực hiện thông qua bốn nội dung chính, từ khảo sát hiện trang đến đánh giá hiệu quả than sinh học ở các quy mô khác nhau. Kết quả cho thấy than sinh học mang lại hiệu quả môi trường rõ rệt với chỉ số hiệu quả môi trường (Environmental efficiency Index - ENI) tăng 13-23% (than trấu) và 7-18% (than nhãn), đặc biệt hiệu quả trên đất phèn. Than sinh học cải thiện chỉ số chất lượng đất (Soil Quality Index - SQI) và chỉ số chất lượng hạt (Grain Quality Index - GQI), giảm phát thải CH_4, và hạn chế tích lũy kim loại nặng, trong đó than trấu thể hiện ưu thế hơn. Về kinh tế, than nhãn liều thấp (10 tấn/ha) đạt chỉ số hiệu quả kinh tế (Economic efficiency Index - ECI) >100% ngay cả khi chưa tính tín chỉ carbon, trong khi than trấu cần cơ chế tín chỉ carbon để khả thi. Trong kịch bản có tín chỉ carbon, tất cả công thức than sinh học đều vượt đối chứng, với than nhãn 20 tấn/ha đạt hiệu quả cao nhất trên đất phèn. Tuy nhiên, hiệu lực cải tạo đất của than sinh học có xu hướng giảm sau vài vụ, đặc biệt trên đất xám, cần đánh giá dài hạn. Nghiên cứu khẳng định than sinh học từ phụ phẩm địa phương là giải pháp khả thi tích hợp hiệu quả môi trường, kinh tế và phát triển nông nghiệp bền vững, đồng thời góp phần giảm phát thải khí nhà kính và ổn định an ninh lương thực. Kết quả này có ý nghĩa quan trọng trong bối cảnh biến đổi khí hậu toàn cầu, khi nông nghiệp vừa phải thích ứng với những thay đổi môi trường khắc nghiệt vừa cần giảm thiểu tác động tiêu cực đến hệ sinh thái, đồng thời đảm bảo an ninh lương thực cho dân số ngày càng tăng và kiểm soát ô nhiễm kim loại nặng từ hoạt động nông nghiệp.

Từ khóa: Than trấu, than nhãn, sản xuất lúa nước, hiệu quả kinh tế, phát thải CH_4

ĐIỂM NỔI BẬT CỦA LUẬN ÁN

1. Than sinh học từ vỏ trấu cho hiệu quả cải thiện môi trường vượt trội, nâng chỉ số ENI từ 13-23%, đặc biệt hiệu quả trên đất phèn do nâng pH, giảm kim loại trao đổi và tăng tích lũy carbon hữu cơ.
2. Than sinh học từ thân cành nhãn cho hiệu quả kinh tế cao hơn, đặc biệt trong điều kiện có tín chỉ carbon, với chỉ số ECI tăng rất cao ở công thức CT5 (20 tấn/ha) trên đất phèn.
3. Phát thải khí metan (CH_4) giảm rõ rệt ở cả điều kiện nhà lưới và thực địa, nhờ than sinh học ức chế vi sinh vật sinh methane và thúc đẩy quá trình methane oxidation.
4. Than sinh học giúp giảm tích lũy kim loại nặng trong đất và hạt lúa, đặc biệt là Cd và Zn, trong vụ đầu tiên trên cả đất phèn và đất xám.
5. Cơ chế tín chỉ carbon giúp chuyển đổi toàn bộ mô hình từ lỗ sang có lãi, đặc biệt hiệu quả ở công thức sử dụng than nhãn và than trấu liều cao.
6. Đất phèn phản ứng tích cực nhất với than sinh học, cả về hiệu quả môi trường lẫn kinh tế, nhờ điều kiện axit và nghèo dinh dưỡng phù hợp với đặc tính cải tạo của than.
7. Tác dụng than sinh học giảm dần theo thời gian, đặc biệt trên đất xám do hiện tượng rửa trôi và hoạt tính sinh học suy giảm.
8. Mô hình canh tác lúa nước sử dụng than sinh học đóng vai trò trong kinh tế tuần hoàn, tăng hiệu quả sử dụng phụ phẩm nông nghiệp và đóng góp vào mục tiêu phát thải ròng bằng 0.

ABSTRACT

Current paddy rice production lacks environmental and economic sustainability, while biochar derived from agricultural residues has the potential to improve soil quality, reduce CH_4 emissions, and enhance economic efficiency. This study evaluates the comprehensive effectiveness of biochar from rice husk and longan branches in paddy rice cultivation through greenhouse and field experiments. The research was conducted through four main components, from baseline surveys to evaluating biochar effectiveness at different scales. Results demonstrate that biochar significantly improves environmental efficiency, with the ENI increasing by 13-23% for rice husk biochar and 7-18% for longan biochar, particularly effective on acid sulfate soils. Biochar enhances SQI and GQI, reduces CH_4 emissions, and limits heavy metal accumulation, with rice husk biochar showing higher performance. Economically, low-dose longan biochar (10 tons/ha) achieves an ECI greater than 100% even without carbon credits, whereas rice husk biochar requires carbon credit mechanisms for viability. Under carbon credit scenarios, all biochar treatments outperform controls, with longan biochar at 20 tons/ha achieving the highest efficiency on acid sulfate soils. However, the soil amelioration effectiveness of biochar tends to decline after several cropping seasons, particularly on grey soils, requiring long-term evaluation. The study confirms that biochar from local agricultural residues is a viable solution integrating environmental efficiency, economic benefits, and sustainable agricultural development, while contributing to greenhouse gas emission reduction and food security stabilization. These findings have significant implications in the context of global climate change, where agriculture must simultaneously adapt to harsh environmental changes, minimize negative impacts on ecosystems, ensure food security for an increasingly populous world, and mitigate heavy metal pollution from industrialization activities.

***Keywords**:* Rice husk biochar, longan biochar, paddy rice production, economic efficiency, methane emissions

HIGHLIGHTS

1. Rice husk biochar demonstrates superior environmental improvement efficiency, increasing ENI by 13–23%, particularly effective on acid sulfate soils through pH enhancement, reduced exchangeable metals, and increased organic carbon accumulation.
2. Longan branch biochar provides higher economic efficiency, especially under carbon credit conditions, with ECI increasing >200% in treatment CT5 (20 tons/ha) on acid sulfate soils.
3. Methane (CH_4) emissions significantly reduced under both greenhouse and field conditions, as biochar inhibits methanogenic microorganisms and promotes methane oxidation processes.
4. Biochar helps reduce heavy metal accumulation in soil and rice grains, particularly Cd and Zn, during the first season on both acid sulfate and grey soils.
5. Carbon credit mechanisms transform all models from loss to profit, particularly effective in treatments using longan biochar and high-dose rice husk biochar.
6. Acid sulfate soils respond most positively to biochar, both biologically and economically, due to acidic and nutrient-poor conditions that align with biochar's ameliorative properties.
7. Biochar effects diminish over time, especially on grey soils due to leaching and declining biological activity.
8. Paddy rice cultivation models using biochar play a role in the circular economy, enhancing agricultural residue utilization efficiency and contributing to net-zero emission targets.

LỜI CÁM ƠN

Tôi xin gửi lời tri ân sâu sắc đến Ban Giám hiệu, Viện Đào tạo Quốc tế và Sau đại học, cùng Viện Khoa học Công nghệ và Quản lý Môi trường - Trường Đại học Công nghiệp Thành phố Hồ Chí Minh, đã tạo điều kiện thuận lợi về học thuật, cơ sở vật chất và môi trường nghiên cứu chuyên nghiệp, giúp tôi có thể triển khai và hoàn thành đề tài một cách hiệu quả.

Tôi đặc biệt biết ơn Hội đồng Khoa học và các chuyên gia phản biện, những người đã dành thời gian quý báu để đánh giá, nhận xét và đóng góp những ý kiến sâu sắc, giúp tôi hoàn thiện luận án với góc nhìn khoa học toàn diện và khách quan hơn.

Với lòng biết ơn sâu sắc, tôi xin tri ân chân thành đến PGS.TS. Nguyễn Thanh Bình - Trường Đại học Công nghiệp Thành phố Hồ Chí Minh và TS. Lê Hoàng Anh - Khoa Môi trường, Trường Đai học Khoa học Tự Nhiên, Đại học Quốc gia Thành phố Hồ Chí Minh. Quý Thầy đã không quản ngại thời gian, tâm huyết và công sức để tận tình hướng dẫn, đồng hành và hỗ trợ tôi xuyên suốt quá trình nghiên cứu đầy thử thách. Sự uyên bác trong học thuật, tinh thần tận tâm trong giảng dạy cùng những định hướng khoa học quý báu từ Quý Thầy là nguồn động lực lớn lao, giúp tôi vượt qua những khó khăn và hoàn thành luận án Tiến sĩ này.

Tôi cũng xin bày tỏ lòng biết ơn sâu sắc đến gia đình và những người thân yêu - những người luôn là điểm tựa tinh thần vững chắc, không ngừng động viên, khích lệ và đồng hành cùng tôi trong suốt chặng đường học tập nhiều thử thách.

Cuối cùng, tôi xin gửi lời cảm ơn chân thành đến các bạn sinh viên và cộng sự tại Viện Khoa học Công nghệ và Quản lý Môi trường - Trường Đại học Công nghiệp Thành phố Hồ Chí Minh, những người đã trực tiếp hoặc gián tiếp hỗ trợ tôi trong quá trình thực hiện nghiên cứu này.

Một lần nữa, tôi xin chân thành tri ân tất cả sự hỗ trợ quý báu đã giúp tôi hoàn thành chặng đường đầy ý nghĩa này!

MỤC LỤC

LỜI CAM ĐOAN i
TÓM TẮT LUẬN ÁN TIẾN SĨ ii
ABSTRACT iv
LỜI CÁM ƠN vi
MỤC LỤC vii
DANH MỤC HÌNH ẢNH xii
DANH MỤC BẢNG BIỂU xv
DANH MỤC CÁC TỪ VIẾT TẮT xviii
MỞ ĐẦU 1
1. Đặt vấn đề 1
2. Mục tiêu nghiên cứu 3
2.1 Mục tiêu tổng quát 3
2.2 Mục tiêu cụ thể 3
3. Đối tượng và phạm vi nghiên cứu 4
4. Ý nghĩa khoa học và thực tiễn 4
4.1 Ý nghĩa khoa học 4
4.2 Ý nghĩa thực tiễn 5
5. Những đóng góp mới của luận án 5
6. Các giả thuyết khoa học cần kiểm tra 7
CHƯƠNG 1 TỔNG QUAN VỀ CÁC VẤN ĐỀ NGHIÊN CỨU 9
1.1 Tổng quan tính bền vững trong sản xuất lúa nước 9
1.1.1 Nguồn gốc, đặc điểm sinh thái và canh tác lúa nước 9
1.1.2 Hiệu quả kinh tế trong sản xuất lúa nước 10

1.1.3 Tính bền vững trong sản xuất lúa nước.....13
1.2 Các vấn đề cơ bản trong sản xuất lúa nước toàn cầu.....15
1.2.1 Vấn đề an ninh lương thực trong sản xuất lúa nước.....15
1.2.2 Sản xuất lúa nước và phát thải khí nhà kính.....17
1.2.3 Sản xuất lúa nước và chất lượng môi trường đất (ô nhiễm kim loại nặng).....21
1.2.4 Sản xuất lúa nước và vấn đề thoái hóa đất.....23
1.2.5 Sản xuất lúa nước và các vấn đề năng suất, chất lượng sản phẩm.....24
1.3 Than sinh học và các ảnh hưởng của than sinh học đến sản xuất lúa nước.....27
1.3.1 Giới thiệu chung về than sinh học.....27
1.3.2 Ảnh hưởng của than sinh học đến phát thải khí nhà kính CH_4 từ lúa nước.....28
1.3.3 Ảnh hưởng của than sinh học đến chất lượng môi trường đất.....30
1.3.4 Ảnh hưởng của than sinh học đến năng suất thực vật và lúa nước.....30
1.4 Các vấn đề sản xuất lúa nước ở Việt nam.....33
1.4.1 Một số loại đất trồng lúa nước ở Việt Nam.....33
1.4.2 Sản xuất lúa nước ở Việt Nam và đồng bằng sông Cửu Long.....35
1.4.3 Sản xuất lúa nước ở các vùng ven thành phố Hồ Chí Minh.....37
1.5 Tín chỉ carbon và một số chỉ số tích hợp cho đất lúa.....38
1.6 Nhận xét và vấn đề cần được tiếp tục nghiên cứu.....39
CHƯƠNG 2 NỘI DUNG VÀ PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU.....42
2.1 Nội dung nghiên cứu.....44
2.1.1 Nội dung 1: Khảo sát hiện trạng chất lượng môi trường đất và hiệu quả kinh tế trong sản xuất lúa nước vùng nghiên cứu.....44
2.1.2 Nội dung 2: Đánh giá ảnh hưởng của than sinh học lên các yếu tố môi trường và năng suất lúa trên các loại đất trồng lúa chính quy mô nhà lưới.....44

2.1.3 Nội dung 3: Đánh giá sự ảnh hưởng của than sinh học lên các yếu tố môi trường và năng suất lúa ở mô hình thí nghiệm quy mô thực địa 44

2.1.4 Nội dung 4: Đánh giá hiệu quả môi trường, kinh tế của các mô hình thí nghiệm và đề xuất các giải pháp nâng cao tính bền vững trong canh tác lúa nước ..45

2.2 Phương pháp nghiên cứu.....45

2.2.1 Nội dung 1: Khảo sát hiện trạng chất lượng môi trường đất và hiệu quả kinh tế trong sản xuất lúa nước vùng nghiên cứu 45

2.2.2 Nội dung 2: Đánh giá sự ảnh hưởng của than sinh học lên các yếu tố môi trường và năng suất lúa trên các loại đất trồng lúa chính quy mô nhà lưới.....52

2.2.3 Nội dung 3: Đánh giá sự ảnh hưởng của than sinh học lên các yếu tố môi trường và năng suất lúa ở mô hình thí nghiệm quy mô thực địa 55

2.2.4 Nội dung 4: Đánh giá hiệu quả môi trường, kinh tế của các mô hình thí nghiệm và đề xuất các giải pháp nâng cao tính bền vững trong canh tác lúa nước ..59

CHƯƠNG 3 KẾT QUẢ NGHIÊN CỨU VÀ THẢO LUẬN 61

3.1 Hiện trạng chất lượng môi trường đất và hiệu quả kinh tế trong sản xuất lúa nước vùng nghiên cứu 61

3.1.1 Chất lượng môi trường đất của các loại đất đặc trưng canh tác lúa nước trong mùa khô và mùa mưa 61

3.1.2 Hiệu quả kinh tế của các mô hình sản xuất lúa nước.....65

3.1.3 Một số thảo luận.....66

3.1.4 Tiểu kết nội dung 1 69

3.2 Ảnh hưởng của than sinh học lên các yếu tố môi trường và năng suất lúa trên các loại đất chính quy mô nhà lưới 70

3.2.1 Một số tính chất của đất và than sinh học trước thí nghiệm 70

3.2.3 Ảnh hưởng của than sinh học đến sinh trưởng, năng suất lúa 76

3.2.4 Ảnh hưởng của than sinh học đến phát thải CH_4 77

3.2.5 Các chỉ số sau thí nghiệm.....79
3.2.6 Các mối tương quan 83
3.2.7 Một số thảo luận.....86
3.2.8 Tiểu kết nội dung 2 89
3.3 Ảnh hưởng của than sinh học lên các yếu tố môi trường và năng suất lúa ở mô hình thí nghiệm quy mô thực địa 91
3.3.1 Đánh giá một số tính chất của đất, than sinh học trước thí nghiệm.....91
3.3.2 Ảnh hưởng của than sinh học đến chất lượng đất.....92
3.3.3. Ảnh hưởng của than sinh học đến sinh trưởng, năng suất lúa 97
3.3.4 Ảnh hưởng của than sinh học đến phát thải khí CH_4.....99
3.3.5 Các chỉ số chất lượng.....101
3.3.6 Các mối tương quan 105
3.3.7 Một số thảo luận.....111
3.3.8 Tiểu kết nội dung 3 118
3.4 Hiệu quả môi trường và kinh tế của các mô hình thí nghiệm.....120
3.4.1 Hiệu quả môi trường ở các mô hình thí nghiệm 120
3.4.2. Hiệu quả kinh tế 128
3.4.3 Một số thảo luận.....132
3.4.4 Tiểu kết Nội dung 4.....134
3.5 Thảo luận chung và đề xuất giải pháp nâng cao tính bền vững trong canh tác lúa nước.....136
3.5.1 Các chỉ số môi trường (ENI) và chỉ số kinh tế (ECI) 136
3.5.2 Hiệu quả môi trường 138
3.5.3 Hiệu quả kinh tế 140
3.5.4 Tính bền vững của mô hình 141

3.5.5 Đề xuất một số giải pháp nâng cao tính bền vững trong canh tác lúa nước ..142
KẾT LUẬN VÀ KIẾN NGHỊ.....146
1. Kết luận 146
2. Kiến nghị.....148
DANH MỤC CÔNG TRÌNH ĐÃ CÔNG BỐ CỦA NGHIÊN CỨU SINH.....150
TÀI LIỆU THAM KHẢO.....151
PHỤ LỤC.....1
Phụ lục 1: Các bảng trình bày chi tiết các công thức thí nghiệm của tất cả các thí nghiệm trong luận án.....1
Phụ lục 2: Bản đồ vị trí lấy mẫu khảo sát và sơ đồ bố trí thí nghiệm của tất cả các thí nghiệm trong luận án.....2
Phụ lục 3: Các bảng trình bày các yếu tố cấu thành kết quả tính toán hiệu quả kinh tế mô hình sản xuất lúa trên các loại đất khác nhau.....7
Phụ lục 4: Các bảng trình bày kết quả phân tích tính chất, thành phần kim loại nặng trong hạt; PCA/FA và trọng số của các thông số đất và hạt sau thí nghiệm của tất cả các thí nghiệm trong luận án 11
Phụ lục 5: Mẫu phiếu khảo sát hiện trạng canh tác lúa nước.....20
Phụ lục 6: Danh sách thông tin 400 hộ nông dân được khảo sát 22
Phụ lục 7: Hình ảnh thực hiện các thí nghiệm trong luận án 33
LÝ LỊCH TRÍCH NGANG CỦA NGHIÊN CỨU SINH.....37

DANH MỤC HÌNH ẢNH

Hình 2.1 Khung nghiên cứu thể hiện mối liên hệ giữa các nội dung nghiên cứu và mục tiêu nghiên cứu của luận án 42

Hình 3.1 Chỉ số chất lượng đất (SQI, a) và chỉ số ô nhiễm kim loại nặng trong đất (HPIs, b) của các loại đất canh tác lúa trong hai mùa 63

Hình 3.2 Mối tương quan giữa chỉ số chất lượng đất (SQI) và chỉ số ô nhiễm kim loại nặng trong đất (HPIs) của các loại đất trong hai mùa 64

Hình 3.3 Diễn biến phát thải CH_4 của thí nghiệm trồng lúa nước trên đất phù sa (a), đất mặn (b), đất xám (c) và đất phèn (d) bị ảnh hưởng bởi than sinh học 77

Hình 3.4 Tổng lượng phát thải CH_4 của thí nghiệm trồng lúa nước sử dụng than sinh học trên đất phù sa, đất mặn, đất xám và đất phèn. 78

Hình 3.5 Chỉ số chất lượng đất (SQI, a) và chỉ số chất lượng hạt lúa (GQI, b) của các loại đất sau thí nghiệm sử dụng than sinh học 80

Hình 3.6 Chỉ số nhiễm kim loại nặng trong đất (HPIs, a) và nhiễm kim loại nặng trong hạt (HPIg, b) của các loại đất sau thí nghiệm sử dụng than sinh học 81

Hình 3.7 Mối tương quan giữa SQI với HPIs (a), HPIg (b), GQI (c), tổng phát thải CH_4 (d), năng suất hạt (e) và tổng sinh khối (f) 83

Hình 3.8 Mối tương quan giữa HPIs với HPIg (a), tổng phát thải CH_4 (b), năng suất hạt (c) và tổng sinh khối (d).....85

Hình 3.9 Diễn biến phát thải CH_4 ở vụ 1 (a), vụ 2 (b) và tổng lượng phát thải CH_4 cả hai vụ (c) trên đất phèn sau thí nghiệm sử dung than sinh học.....99

Hình 3.10 Diễn biến phát thải CH_4 ở vụ 1 (a), vụ 2 (b) và tổng lượng phát thải CH_4 cả hai vụ (c) trên đất xám sau thí nghiệm sử dụng than sinh học.....100

Hình 3.11 Chỉ số chất lượng đất phèn (SQI, a) và chỉ số chất lượng hạt lúa (GQI, b) sau thí nghiệm sử dụng than sinh học.....101

Hình 3.12 Chỉ số ô nhiễm kim loại nặng trong đất (HPIs, a) và nhiễm kim loại nặng trong hạt (HPIg, b) của đất phèn sau thí nghiệm 102

Hình 3.13 Chỉ số chất lượng đất xám (SQI, a) và chỉ số chất lượng hạt lúa (GQI, b) sau thí nghiệm sử dụng than sinh học.....103

Hình 3.14 Chỉ số ô nhiễm kim loại nặng trong đất (HPIs, a) và nhiễm kim loại nặng trong hạt (HPIg, b) của đất xám sau thí nghiệm sử dụng than sinh học104

Hình 3.15 Mối tương quan SQI với HPIs (a) và HPIg (b) sau thí nghiệm trên đất phèn sử dụng than sinh học 105

Hình 3.17 Mối tương quan SQI với GQI (a) và SQI với tổng lượng phát thải CH_4 (b) trên đất phèn sau thí nghiệm sử dụng than sinh học 107

Hình 3.18 Mối tương quan SQI với HPIs (a) và HPIg (b) trên đất xám sau thí nghiệm sử dụng than sinh học 108

Hình 3.19 Mối tương quan SQI với năng suất hạt (a) và tổng sinh khối (b) trên đất xám sau thí nghiệm sử dụng than sinh học.....109

Hình 3.20 Mối tương quan SQI với GQI (a) và SQI với tổng lượng phát thải CH_4 (b) trên đất xám sau thí nghiệm sử dụng than sinh học.....110

Hình 3.21 Hiệu quả chất lượng đất (SQI, a) và chất lượng hạt (GQI, b) của các công thức nghiên cứu trên bốn loại đất thí nghiệm trong nhà lưới 121

Hình 3.22 Hiệu quả về chỉ số nhiễm kim loại trong đất (HPIs, a) và trong hạt (HPIg, b) của các công thức nghiên cứu trên bốn loại đất thí nghiệm trong nhà lưới.....122

Hình 3.23 Phần trăm giảm phát thải CH_4 của các công thức nghiên cứu trên bốn loại đất thí nghiệm trong nhà lưới 123

Hình 3.24 Hiệu quả chất lượng môi trường đất (SQI) và chất lượng hạt (GQI) của các công thức nghiên cứu trên hai loại đất thí nghiệm trong thực địa...124

Hình 3.25 Hiệu quả cải thiện ô nhiễm kim loại nặng trong môi trường đất (HPIs) và nhiễm kim loại nặng trong hạt (HPIg) của các công thức nghiên cứu trên hai loại đất thí nghiệm trong thực địa.....126

Hình 3.26 Hiệu quả giảm phát thải CH_4 của các công thức nghiên cứu trên hai loại đất thí nghiệm trong thực địa.....127

Hình 3.27 Hiệu quả kinh tế của tổng hai vụ sản xuất theo hai kịch bản.....131

Hình 3.28 Chỉ số hiệu quả môi trường (ENI) và hiệu quả kinh tế (ECI) tương đối của các công thức sử dụng than sinh học (CT2-CT5) so với đối chứng (CT1) trong điều kiện nhà lưới và ngoài thực địa, trên bốn loại đất khác nhau.....136

Các hình Phụ lục:

Hình 2.1 Vị trí lấy mẫu đất phù sa canh tác lúa nước.....2

Hình 2.2 Vị trí lấy mẫu đất mặn canh tác lúa nước.....3

Hình 2.3 Vị trí lấy mẫu đất xám canh tác lúa nước.....4

Hình 2.4 Vị trí lấy mẫu đất phèn canh tác lúa nước.....5

Hình 2.5 Sơ đồ bố trí thí nghiệm canh tác lúa nước.....6

DANH MỤC BẢNG BIỂU

Bảng 1.1 Phát thải CH4 trong một số nghiên cứu tại Việt Nam.....17

Bảng 2.1 Tổng hợp các chỉ tiêu cần phân tích 48

Bảng 3.1 Tính chất của đất phù sa, mặn, xám và phèn canh tác lúa trong hai mùa .61

Bảng 3.2 Hàm lượng trao đổi các nguyên tố trong đất phù sa, mặn, xám và phèn canh tác lúa trong hai mùa.....62

Bảng 3.3 Hàm lượng trao đổi các kim loại nặng trong đất phù sa, mặn, xám và phèn canh tác lúa trong hai mùa.....63

Bảng 3.4 Hiệu quả kinh tế (đồng/ha) trong sản xuất lúa trên các loại đất khác nhau 65

Bảng 3.5 Tính chất của các loại đất và các loại than sinh học trước thí nghiệm.....71

Bảng 3.6 Tính chất của các loại đất sau thí nghiệm sử dụng than sinh học 72

Bảng 3.7 Tính chất của các loại đất sau thí nghiệm sử dụng than sinh học (tt).....73

Bảng 3.8 Hàm lượng một số kim loại trao đổi trong các loại đất sau thí nghiệm sử dụng than sinh học.....74

Bảng 3.9 Thành phần của một số kim loại nặng trao đổi của các loại đất sau thí nghiệm sử dụng than sinh học 75

Bảng 3.10 Sinh trưởng, năng suất lúa (kg/m2) trên các loại đất sau thí nghiệm sử dụng than sinh học.....76

Bảng 3.11 Tính chất của đất phèn, đất xám và vật liệu trước thí nghiệm 91

Bảng 3.12 Tính chất của đất phèn sau thí nghiệm sử dụng than sinh học.....93

Bảng 3.13 Thành phần một số kim loại, bao gồm kim loại nặng trao đổi (mg/kg) của đất phèn sau thí nghiệm sử dụng than sinh học.....94

Bảng 3.14 Tính chất của đất xám sau thí nghiệm sử dụng than sinh học.....95

Bảng 3.15 Thành phần một số kim loại, bao gồm kim loại nặng trao đổi (mg/kg) của đất xám sau thí nghiệm sử dụng than sinh học 96

Bảng 3.16 Sinh trưởng và năng suất lúa (kg/m2) trên đất phèn sau thí nghiệm sử dụng than sinh học 97

Bảng 3.17 Sinh trưởng và năng suất lúa (kg/m2) trên đất xám sau thí nghiệm sử dụng than sinh học 98

Bảng 3.18 Hiệu quả kinh tế của mô hình thí nghiệm sản xuất lúa trên đất phèn bổ sung than sinh học quy mô thực địa thông qua hai kịch bản khác nhau. TC = tín chỉ. 128

Bảng 3.19 Hiệu quả kinh tế của mô hình thí nghiệm sản xuất lúa trên đất xám bổ sung than sinh học quy mô thực địa thông qua hai kịch bản khác nhau. TC = tín chỉ. 130

Các bảng phụ lục:

Bảng 1.1 Công thức cho thí nghiệm canh tác lúa quy mô nhà lưới 1

Bảng 1.2 Công thức cho thí nghiệm canh tác lúa quy mô thực địa 1

Bảng 3.1 Hiệu quả kinh tế mô hình sản xuất lúa trên đất phèn 7

Bảng 3.2 Hiệu quả kinh tế mô hình sản xuất lúa trên đất phù sa.....8

Bảng 3.3 Hiệu quả kinh tế mô hình sản xuất lúa trên đất mặn 9

Bảng 3.4 Hiệu quả kinh tế mô hình sản xuất lúa trên đất xám 10

Bảng 4.1 Kết quả phân tích PCA/FA và trọng số của các thông số của đất ứng với các loại đất trong hai mùa (Nội dung 1 - khảo sát).....11

Bảng 4.2 Kết quả phân tích PCA/FA và trọng số của các thông số đất sau thí nghiệm bị ảnh hưởng bởi các loại than sinh học 12

Bảng 4.3 Tính chất của hạt bị ảnh hưởng bởi các loại than sinh học sau thí nghiệm 13

Bảng 4.4 Kết quả phân tích PCA/FA và trọng số của các thông số hạt lúa sau thí nghiệm bị ảnh hưởng bởi các loại than sinh học 14

Bảng 4.5 Thành phần của một số kim loại nặng trao đổi trong hạt của các loại đất sau thí nghiệm bị ảnh hưởng bởi các loại than sinh học.....14

Bảng 4.6 Kết quả phân tích PCA/FA và trọng số của các thông số đất phèn.....15

Bảng 4.7 Tính chất hạt trên đất phèn bị ảnh hưởng bởi than sinh học sau thí nghiệm 16

Bảng 4.8 Kết quả phân tích PCA/FA và trọng số của các thông số hạt của đất phèn 16

Bảng 4.9 Thành phần một số kim loại nặng của hạt trên đất phèn sau thí nghiệm ..17

Bảng 4.10 Kết quả phân tích PCA/FA và trọng số của các thông số đất xám.....17

Bảng 4.11 Tính chất hạt trên đất xám ảnh hưởng bởi than sinh học sau thí nghiệm 18

Bảng 4.12 Kết quả phân tích PCA/FA và trọng số của các thông số hạt lúa đất xám 18

Bảng 4.13 Thành phần một số kim loại nặng của hạt trên đất xám sau thí nghiệm .19

DANH MỤC CÁC TỪ VIẾT TẮT

Từ viết tắt	Tiếng Anh	Tiếng Việt
BVTV		Bảo vệ thực vật
CEC	Cation Exchangeable Capacity	Khả năng trao đổi Cation
CT		Công thức
CO_2e	Carbon dioxide equivalent	Cacbon dioxide tương đương
ĐBSCL		Đồng bằng sông Cửu Long
DAP	Di Amon Photphat	Phân hỗn hợp
EC	Electrical Conductivity	Độ dẫn điện
ECI	Economic Efficiency Index	Chỉ số hiệu quả kinh tế
ENI	Environmental Efficiency Index	Chỉ số hiệu quả môi trường
FA	Factor Analysis	Phân tích nhân tố
FAO	Food and Agriculture Organization	Tổ chức Lương thực và Nông nghiệp Liên Hợp Quốc
GQI	Grain Quality Index	Chỉ số chất lượng hạt
HPI	Heavy Pollution Index	Chỉ số ô nhiễm kim loại nặng (nói chung)
HPIg	Heavy Pollution Index in Grain	Chỉ số nhiễm kim loại nặng trong hạt lúa
HPIs	Heavy Pollution Index in Soil	Chỉ số ô nhiễm kim loại nặng trong đất
OC	Organic Carbon	Carbon hữu cơ trong đất
PCA	Principle Component Analysis	Phân tích thành phần chính
QCVN		Quy chuẩn Việt Nam
SQI	Soil Quality Index	Chỉ số chất lượng đất
TCVN		Tiêu chuẩn Việt Nam
TP. HCM		Thành phố Hồ Chí Minh
TrĐ		Trao đổi

MỞ ĐẦU

1. Đặt vấn đề

Hai trụ cột then chốt của sản xuất lúa nước hiện đại là hiệu quả môi trường và hiệu quả kinh tế. Về môi trường, các thách thức bao gồm suy thoái chất lượng đất canh tác, tích lũy kim loại nặng trong đất, và phát thải khí nhà kính góp phần vào biến đổi khí hậu toàn cầu. Về kinh tế, hiệu quả được quyết định bởi sự cân đối giữa chi phí đầu vào (giống, phân bón, kỹ thuật canh tác, lao động) và đầu ra sản xuất (năng suất, sản lượng, giá trị thương phẩm). Mối tương tác giữa hai yếu tố này đóng vai trò quyết định trong việc đánh giá tính bền vững của hệ thống sản xuất lúa nước, không chỉ tại Việt Nam mà còn trên phạm vi toàn cầu. Tuy nhiên, hiện nay hệ thống canh tác lúa nước tại nhiều khu vực không còn mang tính bền vững do phụ thuộc quá mức vào phân bón hóa học và thuốc bảo vệ thực vật, dẫn đến thoái hóa và ô nhiễm môi trường đất. Ngoài ra, việc đốt bỏ phụ phẩm nông nghiệp như rơm rạ và vỏ trấu sau thu hoạch không chỉ gây lãng phí tài nguyên sinh khối mà còn góp phần gia tăng phát thải CO_2, CH_4 và các khí nhà kính khác. Chi phí đầu vào ngày càng tăng trong khi giá lúa không ổn định khiến lợi nhuận của người nông dân ngày càng giảm. Các giải pháp thân thiện môi trường hạn chế càng làm trầm trọng thêm tính bền vững trong sản xuất lúa nước.

Lúa nước là cây trồng chiếm vị trí hàng đầu trong các loại cây lương thực góp phần cung cấp năng lượng để duy trì sự sống cho con người. Lúa giữ vai trò quan trọng trong việc đảm bảo an ninh lương thực và nguồn hàng xuất khẩu chủ lực của nước ta. Lúa là cây trồng nuôi sống khoảng 50% dân số trên thế giới và khoảng 90% ở một số nước khu vực Châu Á [1]. Nông nghiệp là ngành chịu tác động của biến đổi khí hậu, trong đó sản xuất lúa nước cũng góp phần vào quá trình biến đổi khí hậu thông qua phát thải khí nhà kính như khí methane. Trung bình hằng năm lượng CH_4 trong không khí tăng từ 0,8 - 1,0%. Canh tác lúa nước là một trong những nguồn phát thải lớn các khí nhà kính quan trọng [2] [3]. Bên cạnh đó, trong canh tác lúa nước, nông dân đã làm tăng đáng kể các nguyên tố vi lượng kim loại nặng trong đất.

Trong phân bón vô cơ và các chế phẩm bảo vệ thực vật thường phát hiện các kim loại như As, Pb, Hg, Cd; một số mẫu có nồng độ tương đối lớn, đòi hỏi theo dõi và quản lý chặt chẽ khi sử dụng trong canh tác [4]. Việc đa số nông dân bón phân vượt khuyến nghị không những lãng phí đầu vào mà còn góp phần vào suy giảm chất lượng đất, gia tăng rủi ro ô nhiễm và phát thải khí nhà kính [5]. Như vậy, ngoài những mặt tích cực mang lại cho con người thì việc canh tác lúa nước còn làm tăng lượng khí nhà kính và theo thời gian các kim loại nặng tích lũy dần trong đất, nguy cơ gây nên thoái hóa đất và các hệ quả liên quan đến môi trường. Đây là một thách thức rất lớn cho sự bền vững môi trường trong sản xuất lúa nước. Song song đó, quá trình canh tác nếu áp dụng các biện pháp kỹ thuật thuật, quản lý không phù hợp sẽ làm cho đất bị thoái, bạc màu nhanh chóng, đất bị chua hóa, nghèo chất dinh dưỡng, làm suy giảm sức sản xuất của đất từ đó giảm năng suất và chất lượng nông sản. Hiệu quả sản xuất kém đồng nghĩa với việc thiếu cạnh tranh về giá cả dẫn đến thu nhập của nông hộ cũng bị giảm. Điều này là một trở ngại để đạt hiệu quả về kinh tế.

Hiệu quả kinh tế phụ thuộc vào nhiều yếu tố tác động trong quá trình sản xuất như điều kiện tự nhiên, kinh tế - xã hội, trình độ kỹ thuật, lao động, thị trường tiêu thụ, chính sách, … Để cải thiện và nâng cao các hiệu quả kinh tế và môi trường thì sử dụng than sinh học là một giải pháp khả thi cho vấn đề này. Than sinh học là sản phẩm được nhiệt phân yếm khí từ các loại sinh khối hữu cơ giàu carbon có tác dụng tốt trong việc cải thiện tính chất đất và nâng cao suất cây trồng. Với cấu trúc tơi xốp, diện tích bề mặt lớn và độ hấp phụ các chất cao nhờ đó chúng được sử dụng để cải tạo môi trường đất, nâng cao sức sản xuất của đất qua việc làm giảm tính chua, tăng độ phì nhiêu của đất [6]. Ngoài ra, theo Hùng, et al. [7] bón than sinh học trong canh tác lúa không chỉ làm giảm phát thải khí CH_4 mà còn cho năng suất cao. Trong sản xuất nông nghiệp đều thải ra một lượng lớn phế phụ phẩm như vỏ trấu, rơm rạ, … Đây là nguồn nguyên liệu khổng lồ luôn luôn tồn tại và ngày càng gia tăng. Tổng sản lượng phụ phẩm hằng năm ở nước ta có thể đạt tới 8 - 11 triệu tấn. Riêng đồng bằng sông Cửu Long có khoảng 24,3 triệu tấn rơm rạ; 4,86 triệu tấn vỏ

trấu [8]. Đây là nguồn nguyên liệu rất lớn có thể tái sử dụng để sản xuất than sinh học.

Tính bền vững là một khái niệm dùng để chỉ khả năng duy trì một hiện trạng nào đó trong tương lai của một hệ thống. Trong nông nghiệp, tính bền vững nhấn mạnh đến vấn đề sản xuất đảo bảo sử dụng hợp lý tài nguyên và bảo vệ môi trường. Mục đích của nông nghiệp bền vững là kiến tạo một hệ thống bền vững về mặt sinh thái, có tiềm lực về mặt kinh tế, có khả năng thỏa mãn những nhu cầu của con người mà không làm hủy hoại đất đai, không gây ô nhiễm môi trường [9]. Tuy nhiên, hiện trạng canh tác lúa nước ở Việt Nam và các tỉnh khu vực phía Nam đang gặp phải những vấn đề cơ bản có ảnh hưởng đến tính bền vững môi trường và hiệu quả kinh tế. Việc hạn chế phát thải khí CH_4 đồng thời cải thiện mức độ ô nhiễm môi trường đất trồng lúa góp phần vào sự phát triển bền vững cho các vùng trồng lúa nước ta. Sử dụng than sinh học để đáp ứng các yêu cầu này là một giải pháp tối ưu, cùng lúc mang lại nhiều ích lợi. Xuất phát từ những yêu cầu khoa học và thực tiễn nêu trên, đề tài "***Nâng cao hiệu quả môi trường và kinh tế của sản xuất lúa nước bằng than sinh học theo hướng phát triển bền vững***" được thực hiện.

2. Mục tiêu nghiên cứu

2.1 Mục tiêu tổng quát

Mục tiêu tổng quát của nghiên cứu này là đánh giá hiệu quả tổng hợp của than sinh học từ phụ phẩm nông nghiệp (vỏ trấu và thân cành nhãn) trong canh tác lúa nước thông qua các chỉ tiêu về chất lượng đất, giảm phát thải khí nhà kính, hạn chế ô nhiễm kim loại nặng và hiệu quả kinh tế, từ đó đề xuất giải pháp ứng dụng bền vững than sinh học trong sản xuất nông nghiệp thích ứng với biến đổi khí hậu.

2.2 Mục tiêu cụ thể

- Đánh giá được hiện trạng chất lượng môi trường đất và hiệu quả kinh tế trong sản xuất lúa nước của một số loại đất chính (đất phù sa, đất mặn, đất xám và đất phèn) tại vùng ven thành phố Hồ Chí Minh (huyện Củ Chi cũ) và một số tỉnh lận cận như Tiền Giang, Vĩnh Long (nay là Đồng Tháp).

- Khảo sát được sự ảnh hưởng của than sinh học từ phụ phẩm nông nghiệp (than trấu và than nhãn) đến phát thải khí CH_4, chất lượng môi trường đất và năng suất lúa nước trên một số loại đất chính (đất phù sa, đất mặn, đất xám và đất phèn).

- Đánh giá mức độ cải thiện hiệu quả môi trường và kinh tế trong sản xuất lúa nước của than sinh học (than trấu và than nhãn).

- Xây dựng và đề xuất các giải pháp nâng cao chất lượng môi trường và hiệu quả kinh tế cho sản xuất lúa nước bằng than sinh học (than trấu và than nhãn) từ phụ phẩm nông nghiệp.

3. Đối tượng và phạm vi nghiên cứu

- Giới hạn không gian: Đề tài lựa chọn bốn loại đất chính (đất xám, đất phèn, đất mặn, và đất phù sa) trên các cánh đồng trồng lúa tại vùng ven thành phố Hồ Chí Minh (huyện Củ Chi cũ), tỉnh Tiền Giang cũ (nay là Đồng Tháp) và Vĩnh Long làm điểm nghiên cứu. Bốn nhóm đất phù sa, mặn, xám và phèn được chọn vì là những nhóm đất canh tác lúa nước chủ yếu tại ĐBSCL và Đông Nam Bộ, có tính chất hóa học đa dạng và tương phản rõ rệt, đảm bảo tính đại diện và khả năng khái quát hóa kết quả cho toàn vùng. Mẫu đất trên các loại đất này cũng được lấy về cho việc thiết lập một nội dung nghiên cứu trong nhà lưới.

- Giới hạn thời gian: Thời gian thực hiện đề tài từ năm 2022 đến năm 2025.

- Giới hạn đối tượng: Đề tài lựa chọn than trấu và than nhãn trong các thí nghiệm nghiên cứu. Đất trồng lúa trong các nghiên cứu là đất phù sa, đất mặn, đất phèn và đất xám dựa vào tiêu chuẩn phân hạng đất của FAO (2006) [10].

4. Ý nghĩa khoa học và thực tiễn

4.1 Ý nghĩa khoa học

Đề tài góp phần làm sáng tỏ vai trò của than sinh học từ phụ phẩm nông nghiệp (trấu và thân cành nhãn) trong cải thiện chất lượng đất, kiểm soát ô nhiễm kim loại nặng, giảm phát thải khí nhà kính (CH_4) và nâng cao hiệu quả sản xuất lúa nước trên các loại đất kém bền vững như đất phèn và đất xám. Nghiên cứu đã xây dựng

được mối quan hệ có ý nghĩa thống kê giữa chỉ số chất lượng đất (SQI) và chỉ số ô nhiễm kim loại nặng (HPI), từ đó khẳng định rằng cải tạo đất bằng than sinh học không chỉ mang lại lợi ích nông học mà còn góp phần kiểm soát rủi ro môi trường.

Đồng thời, đề tài mở rộng hiểu biết về cơ chế tác động khác nhau của các loại than sinh học theo từng loại đất và điều kiện mùa vụ, cung cấp cơ sở khoa học cho việc lựa chọn vật liệu phù hợp với từng điều kiện thổ nhưỡng cụ thể. Việc tích hợp các chỉ tiêu về sinh trưởng cây trồng, chất lượng đất, kim loại nặng, phát thải CH_4 và hiệu quả kinh tế trong cùng một nghiên cứu là một đóng góp khoa học liên ngành có tính hệ thống cao, hướng đến phát triển mô hình nông nghiệp thích ứng với biến đổi khí hậu và giảm phát thải bền vững.

4.2 Ý nghĩa thực tiễn

Đề tài cung cấp cơ sở khoa học và thực tiễn cho việc ứng dụng than sinh học từ trấu và thân cành nhãn - hai phụ phẩm nông nghiệp sẵn có như một giải pháp cải tạo đất hiệu quả, thân thiện môi trường và phù hợp với điều kiện canh tác lúa nước tại Việt Nam, đặc biệt trên các vùng đất phèn và đất xám kém bền vững. Kết quả nghiên cứu chỉ ra rằng việc sử dụng than sinh học không chỉ nâng cao năng suất và chất lượng lúa, mà còn giảm phát thải khí CH_4 - một khí nhà kính quan trọng, đồng thời hạn chế tích lũy kim loại nặng trong đất và cây trồng.

Thông qua các mô hình thí nghiệm thực địa và nhà lưới, đề tài góp phần xây dựng kịch bản canh tác thích ứng với biến đổi khí hậu, đồng thời chỉ ra hiệu quả kinh tế cao của một số công thức bón than sinh học, đặc biệt trong bối cảnh tích hợp tín chỉ carbon. Kết quả này có thể được sử dụng để xây dựng chính sách hỗ trợ, hướng dẫn nông dân áp dụng rộng rãi mô hình canh tác thân thiện môi trường, thúc đẩy kinh tế tuần hoàn trong nông nghiệp và góp phần vào mục tiêu phát thải ròng bằng 0 của quốc gia.

5. Những đóng góp mới của luận án

* Bộ chỉ số tích hợp đa chiều có tính ứng dụng cao trong đánh giá hiệu quả canh tác lúa nước:

- Lần đầu tiên tại Việt Nam xây dựng và áp dụng bộ chỉ số tích hợp đa chiều gồm SQI + HPIs + HPIg + Phát thải CH_4 + ENI + ECI để đánh giá đồng thời và định lượng hiệu quả của than sinh học trên cả hai phương diện môi trường và kinh tế trong canh tác lúa nước.

- Bộ chỉ số này cho phép so sánh trực tiếp các giải pháp cải tạo đất, hỗ trợ ra quyết định cho nông dân và nhà quản lý trong bối cảnh canh tác bền vững và thị trường tín chỉ carbon.

* So sánh thực nghiệm hai nguồn than sinh học bản địa trên đa địa hình đất: Nghiên cứu đánh giá đồng thời than trấu và than nhãn trên bốn loại đất (phù sa, mặn, xám, phèn), cung cấp bằng chứng về tính chọn lọc hiệu lực theo loại đất (các nghiên cứu trước đây thường chỉ thử một loại than trên một loại đất). Kết quả cho phép đề xuất than phù hợp với đất.

* Thiết kế thí nghiệm kép: từ nhà lưới ra thực địa, kết nối giữa ngắn hạn và dài hạn

- Lần đầu tiên áp dụng thiết kế thí nghiệm kép - kết hợp đồng thời thí nghiệm nhà lưới (điều kiện kiểm soát) và thí nghiệm thực địa (điều kiện sản xuất thực tế) trên bốn nhóm đất trồng lúa đặc trưng khu vực phía Nam, cho phép đánh giá đồng thời cơ chế tác động ngắn hạn và độ bền hiệu lực dài hạn của than sinh học. Đây là hướng tiếp cận chưa được thực hiện trong các nghiên cứu trước đây tại Việt Nam, tạo cơ sở khoa học tin cậy để nhân rộng ứng dụng than sinh học trong sản xuất lúa.

- Phân tích suy giảm hiệu lực theo mùa vụ cho thấy tính ổn định tác động qua thời gian, đây là chỉ dẫn quan trọng cho chu kỳ áp dụng trong thực tế.

* Phát hiện mối tương quan có ý nghĩa thống kê giữa SQI và HPIs: Lần đầu tiên chỉ ra mối liên hệ nghịch chiều có ý nghĩa giữa SQI và mức tích lũy kim loại nặng ở điều kiện ruộng lúa Việt Nam: nâng cao SQI (thông qua cải tạo bằng than sinh học) giúp giảm tích lũy kim loại nặng, đây là một cơ sở khoa học quan trọng để mở rộng biện pháp cải tạo đất không chỉ vì năng suất mà còn để giảm rủi ro độc tố.

* Xây dựng các chỉ số tổng hợp ENI và ECI để đo lường hiệu quả môi trường và kinh tế: Phát triển hai chỉ số mới (Environmental efficiency Index - ENI; Economic efficiency Index - ECI) để đánh giá tổng hợp tác động từng công thức than sinh học dưới hai kịch bản tín chỉ carbon.

* Lồng ghép kịch bản tín chỉ carbon vào phân tích kinh tế: Mô phỏng kịch bản tín chỉ carbon để đánh giá ảnh hưởng của chính sách carbon tới tính khả thi kinh tế của các phương án áp dụng than sinh học, từ đó giúp định hướng cơ chế khuyến khích nông dân chuyển đổi sang canh tác ít phát thải.

* Đóng góp lý thuyết và thực tiễn trong quản lý canh tác lúa nước:

- Về lý thuyết: Mở rộng hiểu biết về vai trò đa chức năng của than sinh học - vừa là vật liệu hấp phụ/giảm ô nhiễm, vừa là nguồn mang dinh dưỡng, và ảnh hưởng đến chu trình CH_4 trong đất lúa.

- Về thực tiễn: Đề xuất quy trình chọn loại than, liều lượng, và lịch áp dụng phù hợp từng kiểu đất; chứng minh rằng sử dụng than bản địa rẻ tiền (trấu, nhãn) có thể đồng thời cải thiện năng suất, giảm ô nhiễm và giảm phát thải.

6. Các giả thuyết khoa học cần kiểm tra

Giả thuyết 1: Sản xuất lúa nước trên vùng đất phèn có chất lượng đất thấp nhất và mức độ nhiễm kim loại cao nhất trong lúc có hiệu quả kinh tế thấp nhất trong các loại đất nghiên cứu.

Giả thuyết 2: Chất lượng đất (chỉ số chất lượng đất và chỉ số ô nhiễm kim loại nặng trong đất) của đất phèn và đất xám được cải thiện nhiều hơn khi sử dụng than sinh học so với các loại đất khác.

Giả thuyết 3: Sử dụng than sinh học từ vỏ trấu và thân cành nhãn có thể làm hạn chế phát thải khí CH_4 trên đất xám nhiều hơn trên các loại đất khác.

Giả thuyết 4: Than sinh học cải thiện sinh trưởng và phát triển của cây lúa trên đất phèn và đất xám tốt hơn hai loại đất còn lại.

Giải thuyết 5: Hiệu quả của than sinh học trên đất phèn kéo dài hơn trên đất xám

Giả thuyết 6: Hiệu quả kinh tế do than sinh học mang lại trong sản xuất lúa nước cao hơn trên đất phèn so với trên đất xám.

CHƯƠNG 1 TỔNG QUAN VỀ CÁC VẤN ĐỀ NGHIÊN CỨU

1.1 Tổng quan tính bền vững trong sản xuất lúa nước

1.1.1 Nguồn gốc, đặc điểm sinh thái và canh tác lúa nước

Lúa nước là loại cây lương thực có tên khoa học là *Oryza sativa* với bộ nhiễm sắc thể 2n = 24, đây là loại cây thảo mộc có thể sinh sống và chịu đựng nhiều điều kiện môi trường khác nhau như ngập úng nhiều tháng, đất xám, đất phèn và các loại đất có vấn đề khác. Ngành trồng lúa ở nhiều khu vực ẩm của Châu Á nhiệt đới và á nhiệt đới có thể bắt đầu khoảng 10.000 năm trước [11]. Về mặt phân loại thực vật, cây lúa thuộc họ *Gramineae* (hòa thảo), tộc *Oryzeae*, chi *Oryza*. *Oryza* có khoảng 20 loài phân bố chủ yếu ở vùng nhiệt đới ẩm của Châu Phi, Nam và Đông Nam Châu Á, Nam Trung Quốc, Nam và Trung Mỹ và một phần ở Úc Châu [11]. Dựa vào điều kiện môi trường canh tác, đặc biệt là nước có thường xuyên ngập ruộng hay không mà phân biệt nhóm lúa rẫy hoặc lúa nước. Rễ lúa thuộc dạng rễ chùm, rễ phát triển theo chiều ngang vào giai đoạn đẻ nhánh và ở giai đoạn trổ bông thì phát triển xuống sâu. Thân lúa được cấu tạo bởi các đốt kế tiếp nhau, hình thành kể từ khi cây phân hóa đốt, đốt vươn dài ra kế tiếp nhau tạo thành thân, phần cuối của thân là bông lúa [12]. Hạt lúa là cơ quan sinh sản duy trì sự phát triển nòi giống cây lúa, hạt lúa bao gồm các bộ phân là vỏ trấu, râu, mày trấu và hạt gạo.

Cây lúa phát triển mạnh trong phạm vi nhiệt độ giới hạn 20-30^{0}C [13]. Ánh sáng ảnh hưởng rất lớn đến sinh trưởng, phát triển của cây lúa, lượng bức xạ trung bình từ 250-300 cal/cm^2/ngày thì cây lúa sinh trưởng tốt. Để đạt năng suất lúa thì công tác thủy lợi phải thực hiện tốt, ruộng lúa đảm bảo chủ động được nước tưới. Đất trồng lúa cần giàu dinh dưỡng, nhiều hữu cơ, tơi xốp, thoáng khí, tầng canh tác dày để rễ ăn sâu, bám chặt vào đất và huy động nhiều dinh dưỡng nuôi cây. Loại đất thịt hay đất thịt pha sét (pH = 5,5-7,5) là thích hợp đối với cây lúa. Tuy nhiên, có những giống lúa có thể thích nghi được điều kiện đất đai khắc nghiệt như phèn, mặn, khô hạn, ngập úng.

Ở khu vực phía Nam, với điều kiện khí hậu nhiệt đới gió mùa, nhiệt độ cao quanh năm nên lúa được gieo trồng cả vụ chính Đông Xuân, Hè Thu và vụ Mùa. Lúa nước được gieo sạ theo hình thức sạ hàng bằng công cụ gieo hàng kéo tay hoặc liên hợp với máy kéo và sạ lan bằng tay. Làm cỏ cho ruộng lúa: Ruộng lúa được làm cỏ ở các thời điểm 10-15 ngày sau khi sạ, tiếp tục theo dõi làm cỏ ở thời điểm lúa trổ và trước lúc thu hoạch. Dinh dưỡng và bón phân cho lúa: cây lúa cần nhiều loại dưỡng chất để phát triển nhưng có loại dưỡng chất chính cần dùng nhiều là N, P, K [13]. Đạm là chất tạo hình cây lúa, giúp lá xanh tốt, tăng kích thước lá thân. Lân thúc đẩy việc sử dụng và tổng hợp chất đạm trong cây, kích thích rễ phát triển, nở bụi mạnh, kết nhiều hạt, giúp lúa chín sớm và tập trung hơn. Kali giúp cho quá trình vận chuyển và tổng hợp các chất trong cây chủ yếu tập trung trong rơm rạ. Thời điểm thích hợp nhất để thu hoạch là lúc 80% số hạt trên bông của các bụi lúa đã chín vàng. Bảo quản lúa ở những nơi khô ráo và thoáng. Nếu bảo quản thời gian < 3 tháng, độ ẩm thóc đạt 13-14% và bảo quản > 3 tháng, độ ẩm phải dưới 13%.

Nhìn chung, cây lúa nước được gieo trồng ở nhiều nơi trên thế giới nhưng thích hợp với điều kiện khí hậu nhiệt đới ẩm gió mùa và cận nhiệt như ở nước ta. Ngoài mục tiêu sản lượng, cây lúa và hệ thống sản xuất lúa đóng vai trò then chốt trong mô hình phát triển bền vững nhằm đảm bảo an ninh lương thực, tạo sinh kế cho nông dân và cung cấp nguồn phụ phẩm cho chuỗi giá trị tuần hoàn (phân hữu cơ, than sinh học, năng lượng sinh khối). Khi kết hợp với các biện pháp quản lý bền vững như quản lý nước, tối ưu phân bón và ứng dụng vật liệu cải tạo đất (than sinh học). Vì vậy, hệ canh tác lúa không chỉ duy trì năng suất mà còn giảm phát thải khí nhà kính, hạn chế nguy cơ ô nhiễm và tăng giá trị kinh tế cho nông dân, góp phần vào mục tiêu phát triển nông nghiệp carbon thấp và tăng cường khả năng thích ứng với biến đổi khí hậu.

1.1.2 Hiệu quả kinh tế trong sản xuất lúa nước

Hiệu quả kinh tế được xem như một chuẩn để đánh giá hoạt động của một hệ thống sản xuất, phản ánh trình độ sử dụng các nguồn lực có hạn để đạt được kết quả cao nhất với chi phí thấp nhất. Trong đó, kết quả sản xuất là toàn bộ sản phẩm hoặc giá

trị bằng tiền của toàn bộ sản phẩm mà nông hộ sản xuất thu được trong khoảng thời gian hay một kỳ sản xuất nhất định. Chi phí sản xuất là toàn bộ các khoản chi phí bỏ ra để tổ chức và tiến hành quá trình sản xuất. Trong nông nghiệp, đó là các chi phí dịch vụ làm đất, giống, phân bón, thuốc nông dược, công lao động và một số chi phí khác. Như vậy, quá trình sản xuất đạt hiệu quả khi hộ nông dân thu được kết quả cao nhất với lượng yếu tố đầu vào kể trên là thấp nhất. Bản chất của hiệu quả kinh tế chính là sự chênh lệch giữa kết quả sản xuất thu được với chi phí sản xuất cần phải bỏ ra để có được kết quả đó. Vì vậy, mọi hoạt động sản xuất cần phải đảm bảo được chỉ tiêu hiệu quả kinh tế nhất định của nó.

Hiệu quả kinh tế (*Economic Efficiency* - EE) được nghiên cứu từ rất sớm bởi Farrell [14] là thước đo kết quả tổng hợp của nhà sản xuất và bằng với tích số của hiệu quả kỹ thuật (*Technical Efficiency* - TE) và hiệu quả phân bổ (*Alocative Efficiency* - AE) hay EE = TE x AE. Hiệu quả của sản xuất nông nghiệp nói chung và hiệu quả trong sản xuất lúa nói riêng cũng được xem xét trên ba phương diện trên: (i) *Hiệu quả kỹ thuật* là số lượng sản phẩm có thể đạt được trên một đơn vị chi phí đầu vào hay nguồn lực sử dụng vào sản xuất trong những điều kiện cụ thể về kỹ thuật hay công nghệ áp dụng vào nông nghiệp. Hiệu quả kỹ thuật liên quan đến phương diện vật chất của sản xuất. Nó chỉ ra rằng một đơn vị nguồn lực sử dụng vào sản xuất đem lại bao nhiêu đơn vị sản phẩm. (ii) *Hiệu quả phân bổ* là chỉ tiêu hiệu quả trong đó các yếu tố giá sản phẩm và giá đầu vào được tính để phản ánh giá trị sản phẩm thu thêm trên một đồng chi phí chi thêm về đầu vào hay nguồn lực. Thực chất của hiệu quả phân bổ là hiệu quả kỹ thuật có tính đến các yếu tố về giá của đầu vào và giá của đầu ra. (iii) *Hiệu quả kinh tế* là mục tiêu cơ bản của người sản xuất và là thước đo mức độ thành công của người sản xuất trong việc lựa chọn yếu tố đầu vào và đầu ra tối ưu. Như vậy, để đạt được hiệu quả kinh tế trong canh tác lúa nước cần phải đạt được cả hiệu quả kỹ thuật lẫn hiệu quả phân bổ.

Trong một nghiên cứu của [15] đã nhấn mạnh rằng, yếu tố chất lượng đất có ảnh hưởng đáng kể đến hiệu quả kinh tế trong sản xuất nông nghiệp. Một nghiên cứu khác của Trewin, et al. [16] về hiệu quả sản xuất lúa ở bang Java (Indonesia) chỉ ra

rằng hai yếu tố góp phần cải thiện năng suất lúa là việc áp dụng kỹ thuật sản xuất phù hợp và tăng cường sử dụng hiệu quả các yếu tố đầu vào, đặc biệt là phân bón theo đúng quy trình khuyến cáo bởi cơ quan khuyến nông. Đây là hai yếu tố quan trọng không chỉ đối với năng suất mà còn đối với chất lượng lúa. Ở trong nước, một số nghiên cứu cho thấy hiệu quả kinh tế trong sản xuất lúa nước chưa đạt như mong đợi. Để đo lường hiệu quả kỹ thuật trong sản xuất lúa và xác định các yếu tố ảnh hưởng đến hiệu quả kỹ thuật trong sản xuất lúa của nông hộ ở Việt Nam, thông qua hệ thống dữ liệu về mức sống dân cư ở Việt Nam cho thấy các yếu tố quan trọng có tác động tích cực đến mức độ hiệu quả kỹ thuật là lao động chuyên sâu trong canh tác lúa, thủy lợi và học vấn. Các yếu tố này đóng vai trò quan trọng trong việc làm thay đổi hệ số TE, trong khi các chính sách nông nghiệp đã không giúp nông hộ trồng lúa hiệu quả hơn [17]. Bên cạnh đó, một so sánh hiệu quả kinh tế vụ Hè Thu và Thu Đông tại ĐBSCL cho thấy hiệu quả kinh tế đạt được trong cả hai vụ Hè Thu và Thu Đông chỉ ở khoảng 57% [18]. Mức hiệu quả này tương đối thấp do nông dân khó có thể lựa chọn được đầu vào tối ưu dựa trên giá cả đầu vào và đầu ra trên thị trường. Khoản lợi nhuận trung bình bị thất thoát do kém hiệu là rất lớn tương ứng vụ Hè thu và Thu Đông (4,8 và 3,6 triệu đồng). Điều đó cho thấy có sự chênh lệch lớn trong kỹ thuật canh tác và hiệu quả sử dụng đầu vào giữa các nông hộ. Một nghiên cứu khác tại Cần Thơ cũng kết luận tương tự, hiệu quả kinh tế trong sản xuất lúa tương đối thấp khoảng 53,1% [19]. Đáng chú ý nhiều nông hộ thường sử dụng lượng phân bón cao hơn khuyến cáo (nên chi phí này chiếm hơn 59% tổng chi phí sản xuất lúa) do thói quen bón phân theo tập quán canh tác truyền thống. Hành vi này không chỉ làm tăng chi phí sản xuất, giảm hiệu quả kinh tế mà còn gây hại cho môi trường đất. Gần đây, Dũng, et al. [20] đã ghi nhận hiệu quả kinh tế trong sản xuất lúa của nông hộ ĐBSCL ở vụ Hè Thu và Đông Xuân đạt ở mức khá lần lượt là 77,9% và 82,8%. Các yếu tố về giá giống, giá phân bón và chi phí thuốc nông dược trong cả hai mùa vụ tác động tiêu cực làm giảm lợi nhuận sản xuất lúa, nói cách khác nông hộ chưa sử dụng hợp lý giống, phân, thuốc ứng với sự thay đổi của giá cả thị trường, sử dụng nhiều giống, phân, thuốc trong canh tác lúa làm tăng chi phí và giảm lợi nhuận.

Qua một số nghiên cứu một số nghiên cứu trong và ngoài nước cho thấy, việc phân tích hiệu quả kinh tế trong sản xuất nông nghiệp nói chung và sản xuất lúa nói riêng ở cấp quy mô nông hộ là rất hữu ích nên rất được quan tâm. Các nghiên cứu trên cho thấy sản xuất lúa của nông hộ sẽ đạt hiệu quả kinh tế khi nông hộ đạt được cả hiệu quả kỹ thuật (kỹ thuật sản xuất) lẫn hiệu quả phân bổ (lựa chọn các yếu tố đầu vào). Nói cách khác, hiệu quả kinh tế trong sản xuất lúa được đo lường bằng tích số số giữa hiệu quả kỹ thuật và hiệu quả phân bổ.

1.1.3 Tính bền vững trong sản xuất lúa nước

Bền vững là khả năng duy trì một trạng thái. Trong hệ sinh thái học, từ "bền vững" lý giải cách thức hệ thống sinh học duy trì được sự đa dạng giống loài và phát triển theo thời gian. Theo báo cáo của Ủy ban Thế giới về Môi trường và Phát triển Development [21] "PTBV là sự phát triển nhằm thỏa mãn các nhu cầu của hiện tại mà không phương hại đến khả năng đáp ứng nhu cầu của các thế hệ tương lai". Tại Hội nghị môi trường toàn cầu (1992) Rio de Janeiro đã đưa ra khái niệm "Phát triển bền vững là sử dụng hợp lý và có hiệu quả các nguồn tài nguyên, bảo vệ môi trường một cách khoa học đồng thời với sự phát triển kinh tế". Từ những nhận định nêu trên, có thể hiểu "Phát triển bền vững là sự phát triển trong đó có kết hợp chặt chẽ, hài hòa giữa ba mặt kinh tế, xã hội và môi trường nhằm thỏa mãn được nhu cầu cầu xã hội hiện tại nhưng không tổn hại tới sự thỏa mãn các nhu cầu của thế hệ tương lai".

Trong ngành nông nghiệp, theo Ủy ban kỹ thuật của FAO: "Nền nông nghiệp bền vững bao gồm việc quản lý có hiệu quả nguồn lực để thỏa mãn nhu cầu ngày càng tăng của con người mà vẫn duy trì hay làm tăng thêm chất lượng của môi trường và bảo tồn tài nguyên thiên nhiên" [22]. Theo Khoa, et al. [23] "Nông nghiệp bền vững là sự quản lý và bảo tồn cơ sở tài nguyên thiên nhiên; định hướng thay đổi công nghệ và thể chế theo một phương hướng sao cho đạt đến sự thỏa mãn một cách liên tục những nhu cần ngày càng tăng của con người cả cho hiện tại và mai sau". Nông nghiệp bền vững có tác dụng rất lớn nhằm: (i) đáp ứng nhu cầu xã hội về sản phẩm nông nghiệp; cung ứng hàng hóa cho xuất khẩu; sử dụng có hiệu quả các nguồn lực:

ruộng đất, lao động, nguồn lực khác… (ii) giải quyết, nâng cao đời sống của người dân; xóa đói giảm nghèo; (iii) sử dụng đúng các nguồn tài nguyên thiên nhiên mà không làm tổn hại hệ sinh thái và môi trường; giúp cho quá trình sản xuất được tiến hành lâu dài. Như vậy, nông nghiệp bền vững là một nền nông nghiệp về mặt kinh tế phải bảo đảm được tăng trưởng và đạt hiệu quả lâu dài cho cả tương lai; về mặt tài nguyên môi trường, không làm cạn kiệt tài nguyên, không làm suy thoái và huỷ hoại môi trường.

Bền vững môi trường trong nông nghiệp là phải khai thác hợp lý, sử dụng tiết kiệm và hiệu quả tài nguyên thiên nhiên, phòng ngừa, ngăn chặn, xử lý và kiểm soát có hiệu quả ô nhiễm môi trường. Để đạt bền vững về môi trường thì sản xuất nông ngiệp cần duy trì độ màu mỡ của đất, hạn chế suy thoái đất và các nguồn tài nguyên thiên nhiên; Giảm thiểu việc sử dụng các nguồn không tái sinh được và nguồn đầu vào của sản xuất phải mua từ bên ngoài; Tái sử dụng các phế phụ phẩm nông nghiệp góp phần sử dụng hiệu quả tài nguyên và bảo vệ đất; Sử dụng phân bón và thuốc bảo vệ thực vật một cách hợp lý nhằm giảm tồn dư thuốc bảo vệ thực vật trong đất và nguồn nước; Hạn chế ô nhiễm của không khí, giảm thiểu phát thải khí nhà kính; Sử dụng có hiệu quả và hạn chế ô nhiễm của nguồn nước. Bên cạnh đó, bền vững kinh tế trong nông nghiệp là sự phát triển đảm bảo tăng trưởng, phát triển ổn định lâu dài về mặt kinh tế của nông nghiệp, góp phần tích cực vào phát triển kinh tế của quốc gia, cộng đồng. Mục tiêu của bền vững về kinh tế trong nông nghiệp được thể hiện ở các tiêu chí sau: Gia tăng sản lượng, làm tăng giá trị sản phẩm hàng hóa, chất lượng sản phẩm phù hợp với yêu cầu ngày càng cao của thị trường, đảm bảo tiêu chuẩn về vệ sinh an toàn thực phẩm; Sử dụng hiệu quả các nguồn lực lao đông, vốn, lựa chọn hình thức sản xuất phù hợp để sử dụng hợp lý nguồn tài nguyên và tăng năng suất.

Nông nghiệp là ngành sản xuất vật chất cơ bản, sử dụng đất để trồng trọt và chăn nuôi, khai thác cây trồng và vật nuôi làm tư liệu và nguyên liệu lao động chủ yếu để tạo ra lương thực, thực phẩm và một số nguyên liệu cho công nghiệp. Trong cơ cấu ngành trồng trọt thì sản xuất lúa nước chiếm tỷ trọng khá cao, theo Tổng cục Thống

kê 2020 cả nước có 7279 nghìn ha lúa được gieo trồng. Việc sản xuất lúa nước đóng vai trò quan trọng để đảm bảo an ninh lương thực trong nước và tạo nguồn hàng xuất khẩu. Tuy nhiên, hiện nay việc canh tác lúa cũng đang đối diện với nhiều thách thức để đạt được mục tiêu bền vững như đã trình bày.

1.2 Các vấn đề cơ bản trong sản xuất lúa nước toàn cầu

1.2.1 Vấn đề an ninh lương thực trong sản xuất lúa nước

Trên thế giới có khoảng trên 100 quốc gia trồng lúa nhưng tập trung nhiều nhất ở Trung Quốc, Ấn Độ, Indonesia, Bangladesh, Việt Nam, Thái Lan và một số quốc gia châu Á khác. Sản phẩm trồng lúa thu được quan trọng nhất là hạt gạo, là nguồn lương thực căn bản của trên 36 quốc gia và cung cấp từ 20 đến 70% nguồn năng lượng quan trọng mỗi ngày cho 50% dân số thế giới, đặc biệt tại các nước châu Á. Theo Timsina, et al. [24] một người trung bình cần 3.200 calo mỗi ngày thì một hecta lúa có thể nuôi 2.055 người/ngày hoặc 5,63 người/năm. Thành tựu lớn nhất của nông nghiệp Việt Nam là ngành sản xuất lúa phát triển đã góp phần quan trọng trong xóa đói giảm nghèo; đảm bảo an ninh lương thực quốc gia; thúc đẩy xuất khẩu, tăng thu ngoại tệ; góp phần tăng trưởng kinh tế; ổn định chính trị, xã hội và tăng vị thế của Việt Nam trên trường quốc tế. Đóng góp quan trọng nhất vào tốc độ tăng diện tích và sản lượng lúa cả nước là khu vực ĐBSCL. Sản lượng lúa năm 2018 của cả nước là 44,0 triệu tấn, trong đó riêng ĐBSCL cung cấp 24,4 triệu tấn. Vùng này được xem là vựa lúa lớn nhất của nước ta, nơi cung cấp trên 50% sản lượng gạo quốc gia và cũng là nơi cung cấp khoảng 90% khối lượng gạo xuất khẩu [25]. Hiện nay, tổng diện tích lúa nước vùng ĐBSCL khoảng 1,9 triệu ha, phân bố trên tổng diện tích 3,8 triệu ha [26].

Sản xuất lúa phát triển, Việt Nam Những kết quả đạt được trong sản xuất và xuất khẩu lúa, gạo của nước ta là thành tựu được quốc tế ghi nhận, tuy vậy diện tích trồng lúa ngày càng suy giảm và năng suất lúa ở Việt Nam còn thấp so với tiềm năng vốn có. Năm 2016, diện tích lúa đạt 7.737,1 nghìn ha thì năm 2020 diện tích giảm còn 7.277,8 nghìn ha, giảm 5,9% so với năm 2016 và giảm 7% so với năm

2015. Bình quân giai đoạn 2016-2020, diện tích diện tích lúa giảm 1,4%/năm Kê [27]. Do diện tích giảm nên sản lượng lúa giảm. Năm 2016, sản lượng lúa đạt 43,16 triệu tấn, đến năm 2020 còn 42,69 triệu tấn, giảm 5,3% so với năm 2015. Tính chung giai đoạn 2016-2020, sản lượng lương lúa đạt 216,1 triệu tấn, bình quân giảm 1,1%/năm [27]. Đó là một trong những thách thức cần phải được giải quyết không chỉ đảm bảo an ninh lương thực mà còn vì sự phát triển bền vững. Để duy trì diện tích và sản lượng lúa, trong suốt thời gian dài, nông dân đã tăng mùa vụ trồng từ 1-2 vụ/năm lên 2-3 vụ/năm. Quá trình tăng vụ kéo dài khiến sâu bệnh phát triển, ô nhiễm môi trường, đất đai ngày càng suy thoái. Đất không được nghỉ và tái tạo nên chất dinh dưỡng trong đất cạn kiệt là một trong những nguyên nhân chính dẫn tới năng suất giảm dần, hiệu quả kinh tế từ trồng lúa ngày càng thấp trong những năm gần đây.

Ảnh hưởng biến đổi khí hậu tác động xấu tới sản xuất nông nghiệp nói chung và sản xuất lúa nói riêng. Theo đánh giá của Ngân hàng Phát triển châu Á (ADB), nếu nhiệt độ bình quân tăng lên 1^0C thì năng suất lúa sẽ giảm 10% và điều này vô cùng quan trọng với những quốc gia bị ảnh hưởng nghiêm trọng bởi biến đổi khí hậu như nước ta. Bên cạnh đó, nhu cầu lương thực hàng năm trên thế giới rất lớn và ngày một tăng do sự gia tăng dân số toàn cầu [28]. Theo dự báo tổng dân số toàn thế giới đến năm 2050 có thể đạt đến 9,8 tỷ người [29]. Nhu cầu năng lượng của mỗi cá nhân tăng lên cũng gây áp lực cho nhu cầu lương thực toàn cầu. Nhu cầu lương thực cá nhân cũng như dân số thế giới tăng trong những năm tới là cơ sở để FAO [30] dự báo rằng đến năm 2050 nhu cầu lương thực toàn thế giới sẽ tăng lên 70% so với năm 2005/2007. Giải pháp thông thường để đảm bảo nhu cầu lương thực là mở rộng diện tích và tăng năng suất trên một đơn vị diện tích canh tác bằng nhiều cách khác nhau [31]. Phần đất hiện tại đang canh tác cây lương thực trên thế giới có thể đang giảm xuống vì nhiều lý do khác nhau như phát triển các khu công nghiệp, đô thị, giao thông. Mặt khác, phần diện tích mở rộng mới lại liên quan đến chuyển đổi đất từ đất rừng sang đất nông nghiệp. Cách làm này sẽ thúc đẩy nhanh tiến trình biến đổi khí hậu. Như vậy, nâng cao năng suất cây lương thực trên diện tích đất hiện

đang canh tác là giải pháp được chấp nhận với tính khả thi cao. Tuy nhiên, việc nâng cao năng suất cây trồng lại đi kèm theo các hệ lụy về môi trường [32].

1.2.2 Sản xuất lúa nước và phát thải khí nhà kính[1]

Canh tác lúa nước góp phần vào quá trình biến đổi khí hậu thông qua phát thải CH_4. Trong nông nghiệp, canh tác lúa ngập nước là một trong những nguồn thải thải CH4 lớn nhất [33]. Phát thải CH_4 từ ruộng lúa chiếm khoảng 10% khí thải CH_4 toàn cầu [34] và tập trung ở các vùng đất trồng lúa có tưới. Đất trồng lúa được tưới tiêu chiếm 60% tổng diện tích lúa trên toàn thế giới, nhưng tạo ra 78% CH_4 phát thải [35]. Khí CH_4 phát thải từ các hệ thống lúa nước ở Việt Nam chiếm 57,5% [36] của tổng lượng phát thải KNK của toàn nền sản xuất nông nghiệp quốc gia.

Bảng 1.1 Phát thải CH_4 trong một số nghiên cứu tại Việt Nam

TT	Loại hình canh tác	Tính chất	Phát thải CH_4	Tổng phát thải quy đổi * (tấn CH_4/ha/năm)	Tài liệu tham khảo
1	Nhà lưới, ngập nước liên tục trong chậu thí nghiệm trên 2 loại đất ĐB sông Hồng	Có bón phân:			[37]
		Đất phù sa	15733 (mg/m^2/vụ)	2435	
		Đất bạc màu	18050 (mg/m^2/vụ)	2793	
		Không bón phân:			
		Đất phù sa	20032 (mg/m^2/vụ)	3100	
		Đất bạc màu	23293 (mg/m2/vụ)	3604	
2	Trên ruộng ngập nước với 4 loại đất tại Thái Bình	Đất mặn 2 vụ lúa	542,6 (kg/ha/năm)	4198	[38]
		Đất phù sa 2 vụ lúa	593,7 (kg/ha/năm)	4594	
		Phù sa 2 lúa 1 màu	666,1 (kg/ha/năm)	5154	
		Đất phèn	740,8 (kg/ha/năm)	5732	
3	Thực nghiệm trên ruộng lúa tại Tiền Giang	Ngập khô xen kẽ	64,29 kg/ha/vụ	995	[39]
		1 Phải 5 Giảm	292,01 kg/ha/vụ	4519	
		Tưới truyền thống	348,44 kg/ha/vụ	5392	
4	Canh tác 2 vụ	Đạm urê màu trắng			[40]

[1] Các kết quả này đã được tổng hợp và công bố trên một tạp chí khoa học: **Đồng Phú Hảo**, Nguyễn Thanh Bình*, Lê Hoàng Anh. "Phát thải khí metan (CH_4) trong sản xuất lúa nước tại Việt Nam: hiện trạng và giải pháp". *VNU Journal of Science: Earth and Environmental Sciences*, Vol. 39, No. 1 (2023) 28-41. https://doi.org/10.25073/2588-1094/vnuees.4909 nằm trong danh mục Hội đồng Giáo sư, Phó Giáo sư nhà nước. Bài báo này đã tổng quan và phân tích các vấn đề được đề cập trong phần này nhằm làm sáng tỏ những khía cạnh quan trọng liên quan đến các vấn đề nghiên cứu của Luận án.

	thu tại 4 điểm thí nghiệm với hình thức bón phân khác nhau	Vụ Mùa	443-506 kg/ha/vụ	6885-7830	
		Vụ Xuân	231,2-486,5 kg/ha/vụ	3578 -7528	
		Đạm vàng urea 46A+			
		Vụ Mùa	437-573 kg/ha/vụ	6762-8867	
		Vụ Xuân	158,7-473,2 kg/ha/vụ	2456-7322	
5	Canh tác trên ruộng với 3 mô hình dùng rơm rạ tại Cần Thơ	Cày vùi rơm rạ	190 kg/ha/vụ	2940	[41]
		Phun nấm Tricoderma lên rơm và cày vùi	180 kg/ha/vụ	2785	
		Đốt rơm rạ	155 kg/ha/vụ	2399	
6	Phòng thí nghiệm tại Cần Thơ kết hợp than sinh học	Than trấu	747±17 mg/kg	1555	[42]
		Không than trấu	932±17 mg/kg	1442	
7	Canh tác lúa trên ruộng ở 2 chế độ nước khác nhau tại Huế	Ngập thường xuyên			[43]
		Vụ Hè Thu	360,6 kg/ha	5580	
		Vụ Đông Xuân	345,9 kg/ha	5353	
		Ngập khô xen kẽ			
		Vụ Hè Thu	197,5 kg/ha	3056	
		Vụ Đông Xuân	192,6 kg/ha	2980	
Lượng phát thải trung bình				4856	

** Các giá trị trong cột này được tính lại dựa vào kết quả của nghiên cứu tương ứng. Các giả thuyết để tính giá trị này là 1 năm 2 vụ lúa (lấy trung bình) và tổng diện tích lúa ở Việt Nam khoảng 7737.1 nghìn ha (theo Bộ Tài nguyên môi trường 2016).*

Bảng 1.1 cho thấy lượng CH_4 phát thải hằng năm biến động từ 995 đến 8867 (tấn CH_4/ha/năm), với giá trị trung bình là 4856 (tấn CH_4/ha/năm). Tổng lượng phát thải do Bộ Tài nguyên Môi trường công bố năm 2020 là 49,693 nghìn tấn CO_2e 1987 (tấn CH_4/ha/năm). Như vậy lượng phát thải CH_4 có biến động rất lớn, phụ thuộc vào các điều kiện khác nhau (loại đất, kỹ thuật sử dụng, mùa vụ, nhiệt độ, mức độ ngập nước…). Lượng phát thải CH_4 thấp ở các mô hình canh tác lúa áp dụng kỹ thuật tưới ngập khô xen kẻ và sử dụng than sinh học, tương ứng chỉ chiếm 20,5% và 32% so với phát thải trung bình. Mô hình canh tác tưới truyền thống, sử dụng phân đạm ure trắng, canh tác trên đất phù sa 2 lúa 1 màu và đất phèn có mức phát thải cao nhất.

Trong ruộng lúa bị ngập nước, CH_4 là sản phẩm cuối cùng của quá trình phân hủy các vật chất hữu cơ bởi VSV trong điều kiện yếm khí. Một phần khí CH_4 tạo ra sẽ bị oxy hóa bởi các VSV methanotrophs trong lớp đất mặt xung quanh rễ cây, phần còn lại phát thải vào khí quyển chủ yếu bằng con đường khuếch tán qua hệ thống mạch thông khí. Sự phát thải CH_4 phụ thuộc vào tính chất lý hoá và sinh học đất, kỹ thuật canh tác cũng như đặc điểm thời tiết khí hậu. Khí CH_4 phát sinh trong đất ở vùng rễ lúa, được vận chuyển thông qua hệ mô khí của lá và thân cây lúa. Khí đi từ đất vào các lỗ hút của rễ, qua thân, bẹ lá, lá và thoát ra khí quyển. Lượng khí CH_4 phát tán thông qua hệ mô khí của thân cây lúa chiếm 90% tổng lượng phát thải CH_4 của đất lúa ngập nước [44].

Phát thải CH_4 trong canh tác lúa nước phụ thuộc vào nhiều yếu tố khác nhau. Việc kiểm soát nhiệt độ, chế độ nước tưới, phân bón và các kỹ thuật canh tác phù hợp sẽ góp phần làm giảm lượng CH_4. Các giống lúa khác nhau có ảnh hưởng đáng kể đến CH_4 do có sự biến đổi lớn về thành phần và hàm lượng các chất tiết ra từ rễ. Các đặc điểm sinh lý học của rễ tương quan thuận và có ý nghĩa với năng suất hạt, trong khi chiều dài rễ, hoạt động oxy hóa của rễ, tổng số rễ và diện tích bề mặt hấp thụ tích cực tương quan nghịch và có ý nghĩa với tổng CH_4 phát thải [45]. Tuy nhiên, cây lúa có thể tăng cường sản xuất CH_4 bằng cách cung cấp cơ chất cho quá trình phân hủy các sản phẩm hữu cơ nhờ các vi khuẩn lên men mê-tan (quá trình tạo methanogenesis) thông qua việc sản xuất ra rễ và chất tiết ra từ rễ có chứa cacbohydrat và axit amin. Các chất dinh dưỡng này kích thích các hoạt động của VSV và dẫn đến sự gia tăng CH_4 phát thải. Hơn 90% tổng lượng CH_4 thải ra vào giai đoạn đầu sinh trưởng của cây lúa đến trước khi thu hoạch và thay đổi trong suốt thời kỳ sinh trưởng cây lúa. Lý giải điều này có thể do mức độ phát sinh methanogenesis thấp trong giai đoạn này. Việc bón phân hữu cơ làm tăng dinh dưỡng trong đất, gia tăng đáng kể các hoạt động của VSV, nhất là methanogens chiếm ưu thế trong đất trồng lúa, do đó lượng phát thải CH_4 cũng gia tăng. Trong sản xuất lúa, quản lý nước và phân đạm cũng là những những yếu tố dẫn đến phát thải KNK. Mô hình kết hợp quản lý tưới khô xen kẻ với bón phân đạm theo bảng so

màu lá cho kết quả lượng phát thải CH_4 giảm 31% so với đối chứng, đạt 176,2 kg/ha/vụ so với đối chứng 252,20 kg/ha/vụ [46]. Về mặt quản lý nước, tưới tiêu có kiểm soát có thể làm giảm CH_4 vì trong điều kiện ngập nước liên tục gây ra hạn chế ôxy, từ đó thúc đẩy các hoạt động tạo methanogenesis giải phóng nhiều CH_4 phát thải [39]. Kỹ thuật quản lý nước tưới theo 1P6G cũng góp phần tăng năng suất và giảm phát thải CH_4. Việc áp dụng kỹ thuật tưới theo 1P6G trong thí nghiệm đã giảm 5,9 tấn CO_2tđ ha/vụ. Kỹ thuật 1P6G tạo ra 1 tấn lúa chỉ phát thải 0,2 tấn CO_2tđ/ha/vụ trong khi đối chứng phát thải 1,1 tấn CO_2 tđ ha/vụ. [39].

Phát thải khí CH_4 từ đất lúa ngập nước phụ thuộc nhiều vào tính chất đất. Nghiên cứu của Xiong, et al. [47] cho rằng đất có tỷ lệ cấp hạt cát cao cho phát thải khí CH_4 cao hơn đất tỷ lệ cấp hạt cát thấp. Tương tự, kết quả nghiên cứu của Brye, et al. [48] cho thấy đất sét cho phát thải khí CH_4 theo mùa thấp hơn đất cát đến 23%. Ở Trung Quốc, tác giả Huang, et al. [49] kết luận rằng phát thải khí CH_4 phụ thuộc tuyến tính vào hàm lượng cấp hạt cát trong đất, và không phụ thuộc vào hàm lượng C hữu cơ trong đất; loại đất cũng không có vai trò ảnh hưởng đến phát thải khí CH_4. Tuy nhiên, Yao, et al. [50] kết luận rằng tỷ lệ phát thải CH_4 có mối liên hệ chặt với lượng C hữu cơ dễ tiêu trong đất. Biện pháp quản lý nước ngập liên tục đã tạo nên môi trường đất trở nên yếm khí dẫn đến phát thải khí CH_4 cũng cao, đặc biệt khi giữ mực nước ngập liên tục 15 cm thì phát thải khí CH_4 tăng 27,5-33,0% [51]. Đất phù sa có tiềm năng phát thải CH_4 thấp hơn đất bạc màu từ 12,8-14,0 %. Cường độ phát thải CH_4 cao nhất vào giai đoạn từ khi lúa đẻ nhánh tối đa đến kết thúc phân hoá đòng [38]. Như vậy, sản xuất lúa nước ở Việt Nam nói riêng và cả thế giới nói chung đang gặp các vấn đề về phát thải khí nhà kính, đặc biệt là khí CH_4. Đây là loại khí có tiềm năng gây hiệu ứng nhà kính gấp khoảng 22-25 lần khí CO_2.

Ngày nay, mục tiêu phát thải ròng bằng không hay Net Zero là mục tiêu quốc gia để cân bằng lượng khí CO_2 thải ra mà có thể hấp thụ hoặc loại bỏ khỏi khí quyển. Mục tiêu này nhằm giảm thiểu tác động của biến đổi khí hậu và bảo vệ môi trường. Theo báo cáo của Ủy ban Liên chính phủ về Biến đổi Khí hậu (IPCC, 2021) [52], việc đạt được Net Zero vào giữa thế kỷ này là cần thiết để hạn chế sự nóng lên toàn cầu dưới

1.5^0C so với mức trước công nghiệp. Điều này đòi hỏi sự chuyển đổi mạnh mẽ sang các nguồn năng lượng tái tạo và cải thiện hiệu quả sử dụng năng lượng [53]. Hơn nữa, việc đạt được Net Zero không chỉ là một mục tiêu về môi trường mà còn liên quan đến các vấn đề kinh tế và xã hội, trong đó có lĩnh vực nông nghiệp đặc biệt là trong canh tác lúa nước.

Tín chỉ carbon là một công cụ tài chính cho phép các quốc gia, doanh nghiệp hoặc tổ chức mua hoặc bán quyền phát thải CO_2. Một tín chỉ carbon thường tương đương với 1 tấn CO_2 mà một tổ chức có thể phát thải. Hệ thống tín chỉ carbon giúp khuyến khích giảm lượng khí thải bằng cách tạo ra một thị trường cho việc giao dịch quyền phát thải. Vì vậy, việc áp dụng tín chỉ carbon có thể tạo ra động lực cho việc sản xuất giảm thiểu khí thải. Theo báo cáo của Chương trình Môi trường Liên hợp quốc (UNEP, 2021), các hệ thống tín chỉ carbon có thể giúp các quốc gia đạt được mục tiêu khí hậu của họ một cách hiệu quả và linh hoạt hơn. Việc giao dịch tín chỉ carbon cho phép các doanh nghiệp có thể bù đắp lượng khí thải của mình bằng cách đầu tư vào các dự án giảm phát thải ở nơi khác. Điều này không chỉ giúp giảm chi phí trong sản xuất mà còn thúc đẩy phát triển bền vững.

1.2.3 Sản xuất lúa nước và chất lượng môi trường đất (ô nhiễm kim loại nặng)

Để tăng năng suất cây trồng, người ta thường sử dụng các loại phân hoá học như đạm (N), lân (P_2O_5), kali (K_2O). Những loại phân này được xem là chìa khóa của sản xuất nông nghiệp trong giai đoạn công nghiệp hóa nếu bón ở mức độ phù hợp. Tuy nhiên, đa phần nông dân trồng lúa bón phân với tỷ lệ vượt mức được khuyến nghị [5] dẫn đến cây trồng không sử dụng hết, phần còn lại các phân bón này được giữ lại trong đất. Một số phân bón hoá học gây ô nhiễm môi trường đất như phân lân. Phân super lân thường có 5% axít tự do (H_2SO_4), làm cho môi trường đất chua. Các dạng phân hóa học đều là các muối của các acid cho nên khi chúng hòa tan thường gây chua cho môi trường đất [54]. Cây trồng hút dinh dưỡng từ phân lân chủ yếu ở dạng ion $H_2PO_4^-$ và $H_2PO_4^{2-}$. Trong giới hạn pH ở những đất trồng trọt có 2 dạng ion này và trong môi trường chua ion $H_2PO_4^{2-}$ chiếm phần trội hơn. Trong đất chua, do các hoạt tính Al^{3+}, Fe^{2+}, Mn^{2+} tăng lên, chúng kết hợp với các ion $H_2PO_4^{2-}$

tạo thành những hợp chất lân khó tiêu. Bên cạnh đó, trong các loại phân lân cũng còn chứa một lượng các kim loại nặng khác như As, Cd, Pb cũng là nguyên nhân làm tích luỹ các kim loại này trong đất. Đối với phân đạm, một loại phân mang lại hiệu quả quan trọng nhất cho năng suất cây trồng, tuy nhiên nó cũng rất dễ gây ô nhiễm cho môi trường đất do tồn dư của nó nếu sử dụng với liều lượng cao. Khi bón N, cây chỉ sử dụng khoảng 40-50% lượng phân trong đất [55], một phần sẽ bị rửa trôi, phần còn lại giữ lại trong đất sẽ gây ô nhiễm. Khi bón N vào đất thường trong đất tồn tại 2 dạng: NH_4 và NO_3^-, cây trồng hấp thu cả 2 dạng này, nếu cây hấp thu nhiều N, trong cây sẽ tồn lưu cao NO_3^- trong lá, quả, hạt vượt quá mức giới hạn sẽ gây hại cho người tiêu dùng. Lượng N tồn dư trong đất dạng NO_3^- dễ bị rửa trôi xuống sông, suối hoặc trực tiếp đi xuống nước ngầm gây ô nhiễm nước ngầm. Quá trình nitrat hoá cũng làm tăng tính chua của môi trường đất do trong đất tồn tại HNO_3.

Bên cạnh đó, các loại phân có nguồn gốc hữu cơ như phân xanh, phân chuồng, phân vi sinh có thành phần là C, H, O, N cùng với các hợp chất hữu cơ từ xác động thực vật phân hủy thành chất mùn là nguồn dinh dưỡng tốt cho đất. Tuy nhiên, sự phân hủy xác hữu cơ trong điều kiện yếm khí do không xử lý kịp hoặc kỹ thuật không đúng sẽ tạo các chất độc hại và mùi thối, trãi qua thời gian các kim loại nặng cũng được tích lũy dần gây tác động xấu đến môi trường đất. Hamdan, et al. [56] cho rằng một số kim loại nặng như As, Cd và Pb đã tích lũy trong hạt va thân cây lúa vượt quá tiêu chuẩn cho phép của MFR 1985. Tập quán canh tác con người dẫn đến tồn lưu kim loại nặng trong đất và cây lúa [57]. Thạnh, et al. [58] ghi nhận đất phèn có hàm lượng As Hg, Cd, Pb, khi đánh giá lưu tồn, không vượt ngưỡng cho phép theo quy chuẩn Việt Nam QCVN 03:2008/BTNMT so với đầu chu kỳ trong thí nghiệm trồng lúa ở nhà lưới; kết quả của sự biến động hàm lượng kim loại nặng trong đất ở các nghiệm thức không được bón phân xỉ thép thậm chí thấp hơn ở các nghiệm thức được bón phân xỉ thép. Một kết luận của Thư, et al. [59] cho rằng hàm lượng Cu, Zn tổng số ở mức thấp đến trung bình và có xu hướng giảm theo độ sâu.

Theo nghiên cứu khác trên đất nông nghiệp cho rằng hàm lượng kim loại nặng trên đất trồng lúa có xu hướng cao hơn trên đất trồng màu [60].

Như vậy, không thể phủ nhận vai trò quan trọng của phân bón hóa học trong việc thúc đẩy năng suất của cây lúa nhưng việc sử dụng chúng trong thời gian dài và với số lượng luôn vượt mức khuyến nghị đã dẫn đến nhiều vấn đề môi trường nhất là tồn lưu các kim loại nặng trong đất.

1.2.4 Sản xuất lúa nước và vấn đề thoái hóa đất

Thoái hóa đất đai là vấn đề toàn cầu quan trọng của thế kỷ 21 bởi vì tác động có hại của nó đến khả năng sản xuất nông nghiệp, môi trường và ảnh hưởng của nó đến an ninh lương thực cũng như chất lượng cuộc sống. Theo Conacher [61] thì giải thích thoái hóa đất là một quá trình mà trong đó giá trị của môi trường bị ảnh hưởng bởi sự kết hợp của các quá trình do con người tác động lên đất. Thoái hóa đất còn được xem là bất cứ sự thay đổi hoặc xáo trộn nào gây nên với đất mà thấy là độc hại hoặc không mong muốn [62]. Đất thoái hóa có thể ở các mức độ khác nhau, một khi ở mức độ nặng là thành phần đất bị thay đổi đáng kể và rất khó để hồi phục trong thời gian ngắn hoặc không thể hồi phục được. Nguyên nhân gây thoái hóa đất có thể do các yếu tố tự nhiên và tác động của con người, trong đó các biện pháp quản lý bảo vệ đất, việc sản xuất luân canh, tăng vụ để tăng năng suất đã dẫn đến suy giảm độ phì nhiêu của đất và khả năng sản xuất của đất cũng bị suy giảm [55]. Sự thoái hoá các đặc tính vật lý, sinh học và hoá học của đất dẫn đến khả năng sản xuất của đất bị suy giảm như (i) sự suy giảm chất hữu cơ của đất cùng với sự suy giảm hoạt tính sinh học của đất (ii) sự thoái hoá các đặc tính vật lý của đất do chất hữu cơ của đất bị mất đi (cấu trúc đất, tính thoáng khí và khả năng giữ nước của đất có thể bị ảnh hưởng; (iii) sự thay đổi hàm lượng dinh dưỡng dẫn đến thiếu, hoặc đạt đến mức độ gây độc của các chất dinh dưỡng đối với sinh trưởng của cây trồng, (iv) tích luỹ các chất độc ví dụ như sự tích luỹ các chất gây ô nhiễm, sử dụng phân bón không đúng.

Hệ sinh thái đất có khả năng tự điều chỉnh và lập lại cân bằng giữa các quần thể sinh vật đất, giữa vòng tuần hoàn vật chất và dòng năng lượng và cũng nhờ đó mà

hệ sinh thái đất giữ được ổn định mỗi khi chịu tác động của các nhân tố ngoại cảnh. Sự tự điều chỉnh của hệ sinh thái đất tuy có giới hạn nhất định, nếu sự thay đổi vượt quá giới hạn này thì dẫn đến hậu quả là chúng bị ô nhiễm, giảm độ phì và giảm tính năng sản xuất. Việc chuyển vùng đất trồng lúa thành ao nuôi tôm kéo dài trong thời gian 5 đến 10 năm đã làm tăng độ mặn của đất, đất cạn kiệt hàm lượng Ca, K, Mg và C hữu cơ và gây thoái hóa đất ảnh hưởng đáng kể đến năng suất lúa [63]. Theo Ali [64] tình trạng thoái hóa đất do thay đổi công nghệ trong nông nghiệp nhằm tăng sản lượng lương thực. Sử dụng máy xới đất, phân bón hóa học và thuốc trừ sâu, đối với đất và chất lượng đất trồng lúa tại cho thấy những thay đổi đáng kể về kết cấu đất, mật độ khối và cấu trúc, tỷ lệ xói mòn, gia tăng độ chua và độ mặn của đất, sự cạn kiệt Ca, Mg, K, N, P, Zn, và C hữu cơ trong ruộng lúa hai vụ được tưới so với ruộng lúa một vụ tưới bằng mưa. Đất thoái hóa về mặt vật lý đất được nhận định rất nghiêm trọng do do tập quán canh tác độc canh có từ lâu của nông dân vùng này và đốt bỏ rơm rạ sau khi thu hoạch, không bón phân hữu cơ và sử dụng máy cày để làm đất sau mỗi vụ trong điều kiện đất ướt [65].

1.2.5 Sản xuất lúa nước và các vấn đề năng suất, chất lượng sản phẩm

Mỗi một giai đoạn sinh trưởng và phát triển của cây lúa đều liên quan mật thiết đến yếu tố cấu thành năng suất. Do đó, quản lý tốt khâu chăm sóc ở tất cả các giai đoạn phát triển của cây lúa là điều hết sức cần thiết để nâng cao hiệu suất và năng suất cây lúa. Năng suất lúa được tạo thành bởi các yếu tố, đó là: số bông/đơn vị diện tích và khối lượng 1000 hạt.

Số bông trên đơn vị diện tích có ảnh hưởng thuận với năng suất, hình thành bởi 3 yếu tố: số nhánh hữu hiệu, điều kiện ngoại cảnh và biện pháp kỹ thuật (mật độ cấy, tưới nước, bón phân...). Số bông có thể đóng góp 74% năng suất, trong khi đó số hạt và khối lượng hạt đóng góp 26% [66]. Số hạt trên bông tùy thuộc vào số hoa được phân hóa và số hoa bị thoái hóa. Hai yếu tố này bị ảnh hưởng bởi giống lúa, kỹ thuật canh tác và điều kiện thời tiết. Ở các giống lúa cải thiện, số hạt trên bông từ 80 - 100 hạt đối với lúa sạ hoặc 100 - 120 hạt đối với lúa cấy là tốt trong điều kiện ĐBSCL [13]. Mặt khác, năng suất còn phụ thuộc vào yếu tố di truyền, việc lựa chọn

các hạt giống có trọng lượng, số hạt/bông có hiệu quả ở các thế hệ đầu có ý nghĩa quyết định đến năng suất. Hệ số di truyền cao được ước tính cho trọng lượng 1.000 hạt [67]. Tỉ lệ hạt chắc tuỳ thuộc số hoa trên bông, đặc tính sinh lý của cây lúa và chịu ảnh hưởng lớn của điều kiện ngoại cảnh.

Trọng lượng hạt thường thể hiện bằng trọng lượng của 1000 hạt với đơn vị là gram. Phần lớn các giống lúa, trọng lượng 1000 hạt thường khoảng 20-30g. Trong lượng hạt chủ yếu do đặc tính di truyền của giống và điều kiện môi trường quyết định. Theo Uga, et al. [68] khối lượng 1.000 hạt là yếu tố cuối cùng tạo năng suất lúa, yếu tố này ít biến động so với các yếu tố khác, ít chịu tác động của điều kiện môi trường và phụ thuộc chủ yếu vào giống. Nếu áp dụng kỹ thuật canh tác không hợp lý, bón phân thiếu cân đối sẽ làm cho cây yếu, dễ đổ, hạt lép lửng, năng suất hạt giảm rõ rệt. Khối lượng 1.000 hạt ở lúa chịu tác động rất ít bởi các yếu tố môi trường. Để tăng khối lượng hạt, trước lúc trổ bông, cần bón nuôi đòng để làm tăng kích thước vỏ trấu. Sau khi trổ bông, cần tạo điều kiện cho cây sinh trưởng tốt để quang hợp được tiến hành mạnh mẽ, tích luỹ được nhiều tinh bột thì khối lượng hạt sẽ cao.

Ngoài ra, các điều kiện vi khí hậu cũng tác động đến năng suất. Theo Chen, et al. [69] ánh sáng sẽ ảnh hưởng đến hiệu suất quang hợp và từ đó cũng tác động đến chất lượng của hạt. Tác giả chỉ ra rằng cường độ ánh sáng nếu giảm trong giai đoạn làm đòng là nguyên nhân trực tiếp làm giảm năng suất và sự thay đổi chất lượng ánh sáng có thể là yếu tố chính làm giảm chất lượng hạt. Mật độ gieo trồng và các điều kiện vi khí hậu có ảnh hưởng đến năng suất lúa [70]. Ở mật độ độ trồng cao từ 26,5 - 36,2 cây/m^2 cho năng suất hạt cao hơn 8,02 - 8,83 tấn/ha so với mật độ trồng 11,9 -36,2 cây/m^2. Giải thích điều này do mật độ trồng cao các điều kiện vi khí hậu như độ ẩm, nhiệt độ, cường độ ánh sáng tác động tốt đến bông từ đó nâng cao năng suất hạt. Theo mô phỏng kịch bản biến đổi khí hậu nhiệt độ trung bình năm trên toàn quốc đến 2030 tăng 0,6 - 0,8^oC và đến 2050 mức tăng 1,3 - 1,7^oC; lượng mưa năm có xu thế tăng ở hầu hết cả nước, phổ biến từ 5 -10% (2030) và tăng 5 -15% (2050). Với sự thay đổi về nhiệt độ và lương mưa như vậy đã ảnh hưởng đến năng

suất lúa tương ứng sẽ giảm khoảng 800 kg/ha (2030) và giảm mạnh 1800 kg/ha (2050) [71].

Phụ phẩm nông nghiệp là sản phẩm sản sinh từ quá trình sản xuất nông nghiệp, có thể là vỏ trấu, mùn cưa, rơm rạ, xơ dừa, … Đây là nguyên liệu khổng lồ đang tồn tại và ngày càng gia tăng. Tổng sản lượng phế thải sinh khối cả nước hằng năm đạt từ 8-11 triệu tấn. Riêng ĐBSCL sản lượng trấu thu gom được từ 1,4-1,6 triệu tấn [72]. Nhu cầu gạo dự kiến sẽ vẫn mạnh mẽ trong vài thập kỷ tới do sự tăng trưởng kinh tế và dân số ở châu Phi và châu Á. Năm 2020, tổng lượng tiêu thụ gạo là 450 triệu tấn, tăng 6,6% so với 422 triệu tấn vào năm 2007. Nhìn chung, ngành sản xuất lúa gạo sẽ vẫn duy trì ổn định trong một thời gian dài, dẫn đến phụ phẩm từ cây lúa vẫn ở mức cao. Với sản lượng lúa 2018 cả nước trên 44 triệu tấn [25], nếu tính tỉ lệ thu hoạch là 1,0 và tỉ lệ giữa trọng lượng trấu trên trọng lượng hạt là 0,2 thì cả nước có trên 44 triệu tấn rơm rạ và trên 8,8 triệu tấn trấu, đây là nguồn nguyên liệu rất lớn.

Hiện tượng đốt rơm rạ ngay trên đồng ruộng là biện pháp xử lý vừa không đem lại hiệu quả kinh tế mà còn gây lãng phí, làm ô nhiễm môi trường, gia tăng khí nhà kính CO_2, CO, NO_x và làm ảnh hưởng đến môi trường đất. Vùi rơm rạ vào đất là việc hoàn trả lại cho đất một phần các nguyên tố dinh dưỡng mà cây đã lấy đi từ đất. Tuy nhiên điều này có thể bị ảnh hưởng bởi mầm bệnh từ vụ trước để lại. Bên canh đó, rơm rạ tươi phân hủy trong điều kiện ngập nước thường sản sinh ra các axit hữu cơ gây ra ngộ độc cho rễ lúa hay làm giảm khả năng hấp thụ dưỡng chất, ảnh hưởng đến sự sinh trưởng và năng suất của lúa. Trong môi trường đất ô nhiễm, các yếu tố quan trọng nhất ảnh hưởng đến tính di động của kim loại nặng là pH, chất hấp phụ, sự hiện diện của các hợp chất hữu cơ và vô cơ, bao gồm cả axit humic và fulvic, các dịch tiết từ rễ cây và chất dinh dưỡng. Phản ứng oxi hóa khử có thể huy động hoặc cố định các kim loại, tùy thuộc vào từng kim loại và môi trường. Vì vậy, trong canh tác lúa, việc vùi phụ phẩm hoặc sử dụng phân compost chứa nhiều chất hữu cơ trong môi trường ngập nước có tính khử có thể làm cho các kim loại nặng trở nên linh động hơn. Than sinh học được xem là một trong những giải pháp hữu hiệu cùng lúc giải quyết được hai vấn đề: vừa tận dụng dụng rơm rạ, trấu và các

phụ phẩm từ nông nghiệp trả lại hữu cho đất; vừa hạn chế phát thải CH_4 và góp phần cải tạo đất, từ đó nâng cao năng suất cây trồng.

1.3 Than sinh học và các ảnh hưởng của than sinh học đến sản xuất lúa nước

1.3.1 Giới thiệu chung về than sinh học

Than sinh học là vật liệu giàu carbon hữu cơ, có thể được sản xuất từ các chất hữu cơ như phụ phẩm nông nghiệp, sinh khối thực vật, hoặc các loại phân động vật, chất thải hữu cơ [73]. Than sinh học được sản xuất bằng quá trình nhiệt phân sinh khối hữu cơ trong điều kiện thiếu oxy. Với bản chất là hệ carbon hữu cơ có các đặc tính vượt trội, khi đưa vào đất, than sinh học có tác dụng như một chất cải tạo đất, giúp nâng cao lượng mùn, tăng cường hoạt động vi sinh vật, khả năng giữ nước, giữ ẩm, chất dinh dưỡng, từ đó tác động tích cực đến sức khỏe nền đất canh tác [73].

Than trấu được nhiệt phân ở nhiệt độ < 760°C thì có 75,6 % thành phần nước, chất hữu cơ dễ bay hơi có thể cháy và phân hủy; 24,4 % chất vô cơ không bị phân hủy trong khoảng nhiệt độ từ 34,9°C đến 765,8°C [74]. Các nguyên tố chủ yếu trong than trấu theo khối lượng là C (11,9 % đến 47,6 %), than vỏ trấu chủ yếu là dạng vật liệu mao quản trung bình, độ rỗng trung bình hấp phụ và giải hấp phụ N_2 là 3,33 nm và 14,4 nm. Rơm cũng là nguồn nguyên liệu để tạo ra than sinh học, hàm lượng dao động từ 28% - 35% [75]. Ngoài ra, than sinh học từ vật liệu khác như xơ dừa, thân cành nhãn cũng được nghiên cứu nhằm nâng cao sức sản xuất của đất, đến sinh trưởng và năng suất cây lúa [76]. Áp dụng than sinh học cũng được xem là một lợi ích kép được chứng minh từ việc tái chế chất thải từ sinh khối nông nghiệp và cải tạo đất nhiễm mặn, có thể áp dụng trên toàn thế giới để phát triển bền vững [77].

Thông thường, than sinh học được tạo ra ở khoảng nhiệt độ từ 300 đến 800^oC, hàm lượng carbon trong than sinh học là 79,6% và năng suất carbon là 49,9% [78]. Về mặt hóa học, than sinh học là vật liệu có tỷ lệ O/C từ 0,2 đến 0,6 [79], 75,6 % nước, chất hữu cơ dễ bay hơi có thể cháy và phân hủy; 24,4 % chất vô cơ không bị phân hủy trong khoảng nhiệt độ từ 34,9°C đến 765,8°C. Các nguyên tố chủ yếu O (30,4 % đến 49,3 %), Si (20,6 % đến 38,0 %) và K (0,7 % đến 1,4 %) [74]. Các yếu tố

chính quyết định đặc tính của than sinh học là: (i) loại chất hữu cơ dùng để nhiệt phân, (ii) môi trường nhiệt phân (ví dụ nhiệt độ, khí) (iii) chất bổ sung trong quá trình nhiệt phân. Nguồn hữu cơ cung cấp cho hun than có ảnh hưởng rất lớn đến chất lượng, hàm lượng dinh dưỡng và chất dễ tiêu. Một đặc tính chung quan trọng của than sinh học là có độ bền rất cao trong môi trường đất. Theo Skjemstad, et al. [80] và Swift [81], than sinh học có thời gian di trú trong đất (soil mean residence time) lên tới hàng ngàn năm. Như vậy việc chuyển sinh khối cây trồng (ví dụ rơm, vỏ trấu, lá, tàn dư thực vật…) sang dạng than sinh học và bón vào đất có thể là cách hữu hiệu cố định carbon vào đất và từ đó làm giảm phát thải khí nhà kính. Sự tương tác giữa đất và than sinh học dựa vào diện tích bề mặt riêng, phụ thuộc bởi nguyên liệu sinh khối và điều kiện sán xuất. Diện tích bề mặt riêng và vi lỗ của than sinh học tăng theo nhiệt độ. Cùng nguyên liệu nhưng công nghệ sản xuất khác nhau sẽ cho ra các loại than sinh học khác nhau, than sinh học sản xuất ở nhiệt độ thấp ($<450^0$C) có diện tích bề mặt riêng <10 m^2/g. Vi lỗ (đường kính < 2nm) có ảnh hưởng đến việc tăng diện tích bề mặt.

1.3.2 Ảnh hưởng của than sinh học đến phát thải khí nhà kính CH_4 từ lúa nước

Nhiều nghiên cứu trên thế giới ghi nhận rằng than sinh học có khả năng làm giảm phát thải khí CH_4. Nghiên cứu sử dụng than sinh học cho một thí nghiệm ngoài đồng trên đất trồng lúa ở Trung Quốc [82] kết luận rằng than sinh học có thể làm giảm phát thải khí CH_4 từ 29,7 đến 15,6% khi so với công thức không sử dụng than sinh học. Ở Nhật Bản Pratiwi and Shinogi [83] ghi nhận rằng than sinh học khi sử dụng ở mức 2 đến 4% làm giảm phát thải khí CH_4 trong đất trồng lúa nước lên đến 54,9%, so với không sử dụng than sinh học. Mức độ giảm phát thải khí CH_4 có tỷ lệ thuận với mức độ sử dụng than sinh học. Các lý do làm giảm phát thải CH_4 của than sinh học bao gồm (i) làm tăng pH của đất từ đó làm tăng quá trình ôxi hóa sinh học CH_4, (ii) tỷ lệ C/N của than sinh học cao và (iii) tỷ lệ phần C hữu cơ dễ tiêu của than sinh học thấp. Tương tự, nghiên cứu của Liu, et al. [84] cũng báo cáo rằng than sinh học có tác dụng làm giảm phát thải khí CH_4 từ đất trồng lúa nước đến 40% khi

so sánh với không sử dụng than sinh học. Lý do giải thích cho quan sát này là do pH của đất tăng lên sau khi sử dụng than sinh học.

Ảnh hưởng của than sinh học đến phát thải CH_4 còn phụ thuộc vào tính chất đất như hàm lượng chất hữu cơ trong đất và thành phần cơ giới của đất. Trong một nghiên cứu của Huang, et al. [85] báo cáo rằng lượng CH_4 phát thải bị ảnh hưởng bởi hàm lượng C hữu cơ và thành phần cát trong đất, thành phần cơ giới (tỷ lệ sét-cát) và hàm lượng C chất hữu cơ có vai trò quan trọng trong quá trình phát thải CH_4. Hai yếu tố này có sự liên hệ với nhau. Trong đất có thành phần cơ giới nhẹ (đất có tỷ lệ cát cao) thường có hàm lượng C hữu cơ tổng số thấp và ngược lại đối với đất có thành phần cơ giới nặng. Trên đất có thành phần cơ giới nhẹ có thể có lượng phát thải CH_4 cao hơn đất có thành phần cơ giới nặng [48]. Do đó các tính chất về thành phần cơ giới và hàm lượng carbon hữu cơ trong đất có khả năng ảnh hưởng khác nhau đến sinh trưởng và phát thải CH_4 khác nhau. Mặt khác, vì than sinh học là vật liệu hữu cơ, nên khi bón vào đất sẽ làm tăng hàm lượng C trong đất cũng như làm thay đổi các tính chất đất.

Các nghiên cứu trong nước về ảnh hưởng của than sinh học đến phát thải khí CH_4 còn rất hạn chế. Một nghiên cứu nhằm kiểm tra tác động tương tác của than sinh học và phân bò đối với phát thải khí CH_4 từ đất nhiễm mặn trồng lúa và các hoạt động sinh methanogenic và methanotrophic để xác định các cơ chế tiềm năng phát thải ghi nhận lượng phát thải CH_4 thấp từ đất nhiễm mặn được tăng lên khi bổ sung phân bò và việc bổ sung than sinh học có thể giảm thiểu ảnh hưởng của phân bò. Cân bằng các hoạt động sinh methanogenic và methanotrophic có thể đóng vai trò là một cơ chế chính trong việc xác định lượng khí thải CH_4 từ đất nhiễm mặn được bổ sung thêm phân bò và than sinh học [86]. Ngoài ra, Nam, et al. [42] cho rằng bổ sung than sinh học có tác dụng giảm phát thải CH_4 từ đất trong điều kiện ngập nước liên tục. Nhìn chung, các nghiên cứu về ảnh hưởng của than sinh học đến phát thải CH_4 nói chung và phát thải CH_4 trên đất trồng lúa nói riêng còn tương đối ít, do đó cần nghiên cứu thêm về vấn đề này là điều cần thiết hiện nay.

1.3.3 Ảnh hưởng của than sinh học đến chất lượng môi trường đất

Than sinh học cung cấp các nguyên tố có lợi cho quá trình phát triển và trưởng thành của cây trồng giúp cải thiện hàm lượng dinh dưỡng dễ tiêu và tăng khả năng giữ dinh dưỡng và giữ nước trong đất [87]. Trong than sinh học có các axit humic chứa các hóc-môn có khả năng tăng trưởng cây trồng. Tác dụng của than sinh học đối với sinh trưởng và năng suất cây trồng còn cao hơn nếu bón kết hợp với phân khoáng [88]. Than sinh học được cho là có khả năng hấp thu các amoni từ dung dịch đất. Sự cố định đạm lên bề mặt than sinh học giúp làm giảm lượng đạm bị mất do thấm xuống đất, than sinh học có khả năng làm giảm sự bay hơi amoniac, bởi vì nó làm giảm amoni có trong dung dịch đất và làm tăng pH của đất, cả hai điều kiện giúp không hình thành amoniac và bay hơi. Việc cải thiện môi trường đất do than sinh học có liên quan đến tổng lượng cation trao đổi, ví dụ như nồng độ K trao đổi và liều lượng P dễ tiêu trong đất tăng lên do sử dụng than sinh học [89]. Một ghi nhận khác về than sinh học sản xuất từ rơm lúa, cây tre và cành cây kết hợp với các loại phân hữu cơ khi bón vào đất làm tăng năng suất lúa đến 130% tùy vào liều lượng bón. Nghiên cứu khác trên đất xám bạc màu cũng báo cáo rằng bón than sinh học sản xuất từ vỏ trấu làm tăng năng suất lúa lên 9-10% [91]. Than sinh học được sản xuất từ vỏ trấu và rơm lúa khi bón vào đất xám bạc màu cho năng suất lúa nước cao hơn so với đối chứng và cao hơn công thức bón phân chuồng từ 1,9-2,9 tạ/ha [92]. Nghiên cứu này cũng quan sát thấy than sinh học có tác dụng làm tăng các chỉ số chất lượng đất như CEC, pH và các nguyên tố dinh dưỡng trong đất. Ngoài ra, theo một ghi nhận của Mai [93] chỉ ra rằng các chỉ số về độ phì đất cũng tăng lên như pH, carbon hữu cơ, N, P và độ xốp đất sau khi được bón than sinh học. Một số các nghiên cứu khác về tính chất của than sinh học từ các loại sinh khối khác nhau [94], từ rơm và vỏ trấu ở các mức nhiệt phân khác nhau [95], về phương pháp sản xuất than sinh học quy mô nhỏ [96], cũng đã được công bố chính thức.

1.3.4 Ảnh hưởng của than sinh học đến năng suất thực vật và lúa nước

Than sinh học góp phần cải thiện dinh dưỡng dễ tiêu của cây trồng do có tác dụng làm tăng khoảng 1,2 đơn vị pH trong đất và giảm nhôm di động trong đất chua, tại

các vùng đất nhiệt đới bị khoáng hóa mạnh do thâm canh cao. Ngoài ra, than sinh học còn tăng khả năng giữ dinh dưỡng trong đất. Nếu trộn một lượng lớn than sinh học từ cây gỗ cứng vào đất thì CEC có thể tăng 50% so với đối chứng nhưng với một lượng than sinh học nhỏ thì vẫn tăng CEC trong đất trong khi đó bón tro than thì cũng không tăng khả năng giữ dinh dưỡng của đất. Than sinh học tăng cường khả năng giữ nước, ổn định cấu trúc đất và làm giảm mức độ thấm sâu của các chất trong đất vì có thể nâng cao lượng nước dễ tiêu cho cây trồng và giảm xói mòn đất. Những đặc tính lý hóa học của các loại đất nghèo hữu cơ thường được cải thiện bằng các hình thức canh tác gắn liền với việc sử dụng chất hữu cơ như phân xanh, chất thải hữu cơ và các chất mùn từ than. Than sinh học có thể hạn chế sự thấm sâu các chất gây ô nhiễm trong đất nông nghiệp. Điều này có thể do bởi khả năng hút bám của than sinh học đối với các chất hòa tan như là Al^{3+}, NO_3^-, PO_4^{3-}, ….

Một số công trình nghiên cứu của các tác giả nước ngoài chỉ ra rằng bón than sinh học góp phần nâng cao năng suất của lúa. Điển hình là nghiên cứu của Dong, et al. [97] cho thấy khi kết hợp than sinh học rơm rạ vào ruộng lúa đã làm tăng năng suất lúa lên 19,8% - 21,6%. Ngoài việc nâng cao năng suất lúa, bổ sung than sinh học còn có khả năng giữ N trong ruộng lúa, hàm lượng NO_3- trong đất 121,2–135,7%. Sử dụng than sinh học cũng tác động đến đặc tính vật lý của đất và sự sinh trưởng của cây lúa. Cụ thể than sinh học có thể làm giảm mật độ khối và tăng độ dẫn nước do tăng thể tích lỗ rỗng cũng như hàm lượng nước sẵn có trong đất. Chiều cao chồi của cây lúa cao hơn đáng kể trong đất được bổ sung 4% than sinh học so với ở đất đối chứng [98]. Wang, et al. [99] cũng nhận định tương tự khi bổ sung than sinh học thúc đẩy tăng trưởng cây lúa từ đó tăng năng suất lúa, độ pH của đất, carbon hữu cơ trong đất, tổng lượng nitơ đồng thời làm giảm mật độ đất trong chu kỳ sinh trưởng của cây lúa. Hiệu quả khi sử dụng than sinh học làm tăng đáng kể tỷ lệ nảy mầm của hạt giống, sự sinh trưởng phát triển và năng suất cây trồng. Biểu hiện lá xanh hơn trong suốt giai đoạn sinh trưởng mặc dù lượng bón phân khoáng ở các công thức là như nhau. Điều này có thể do việc bón thêm than sinh học đã làm tăng độ xốp của đất, thay đổi pH đất tạo điều kiện thuận lợi cho sự phát triển của bộ rễ; tạo

môi trường thuận lợi cho các vi sinh vật có ích hoạt động quanh vùng rễ phát triển; giữ và duy trì các chất dinh dưỡng cung cấp từ phân bón được lâu hơn quanh vùng rễ giúp cho lúa hấp thu được nhiều hơn và cung cấp thêm một lượng dinh dưỡng nhất định có ở trong than[76]. Bên cạnh đó, bón than sinh học có thể giúp gia tăng hàm lượng hữu cơ và các chất dinh dưỡng trong đất rõ rệt từ đó góp phần tăng sinh khối và năng suất cây bắp [100]. Nhìn chung, than sinh học có vai trò quan trọng trong việc cải thiện môi trường, hạn chế phát thải CH_4 và các khả năng nâng cao năng suất lúa nước. Tuy nhiên, các hiệu quả này lại được quyết định bởi loại vật liệu sử dụng sản xuất than sinh học cũng như điều kiện áp dụng. Ở Việt Nam còn ít các nghiên cứu về than sinh học trên nền đất trồng lúa nước. Mức độ cải thiện năng suất, hạn chế phát thải CH_4 và cải tạo môi trường đất của than sinh học cũng chưa được chứng thực.

Mặc dù than sinh học được công nhận rộng rãi về tiềm năng cải tạo đất và cô lập carbon, việc triển khai ứng dụng trên quy mô lớn vẫn đối mặt với nhiều thách thức cần được giải quyết một cách khoa học. Một trong những trở ngại chính là chi phí sản xuất và đầu tư ban đầu. Quá trình nhiệt phân để sản xuất than sinh học đòi hỏi công nghệ và trang thiết bị chuyên dụng, cùng với chi phí năng lượng vận hành đáng kể, dẫn đến giá thành sản phẩm còn cao, gây khó khăn cho việc tiếp cận của người sản xuất nông nghiệp, đặc biệt tại các quốc gia đang phát triển. Bên cạnh đó, việc kiểm soát và ổn định chất lượng sản phẩm là một thách thức kỹ thuật quan trọng. Các đặc tính lý hóa của than sinh học, như diện tích bề mặt riêng, độ pH, và khả năng trao đổi cation, phụ thuộc mật thiết vào các biến số trong quá trình sản xuất, bao gồm loại nguyên liệu sinh khối đầu vào và các thông số nhiệt phân (nhiệt độ, tốc độ gia nhiệt). Sự không đồng nhất này gây khó khăn trong việc xây dựng các quy trình ứng dụng chuẩn hóa và dự báo chính xác hiệu quả của sản phẩm trên các loại đất khác nhau.Về mặt môi trường, tác động dài hạn của than sinh học đến hệ sinh thái đất vẫn là một lĩnh vực cần được tiếp tục nghiên cứu sâu hơn. Mặc dù các lợi ích ngắn hạn đã được chứng minh, việc tích lũy than sinh học trong đất qua nhiều năm có thể gây ra những thay đổi không lường trước về cân bằng dinh dưỡng,

hoạt động của vi sinh vật, và chu trình sinh địa hóa của các nguyên tố. Cần có các nghiên cứu dài hạn để đánh giá toàn diện các rủi ro tiềm tàng và đảm bảo tính bền vững của giải pháp này. Mặt khác, sự thiếu hụt một khung pháp lý và các tiêu chuẩn kỹ thuật thống nhất trên toàn cầu đang cản trở sự phát triển của thị trường than sinh học. Việc thiếu các quy định rõ ràng về kiểm định chất lượng, chứng nhận sản phẩm và hướng dẫn sử dụng an toàn làm giảm lòng tin của người tiêu dùng và tạo ra rào cản thương mại, hạn chế tiềm năng nhân rộng của công nghệ.

1.4 Các vấn đề sản xuất lúa nước ở Việt nam

1.4.1 Một số loại đất trồng lúa nước ở Việt Nam

Việt Nam, với nền văn minh lúa nước lâu đời, sở hữu một hệ thống đất đai đa dạng, phản ánh sự khác biệt về điều kiện hình thành và quá trình sử dụng. Trong canh tác lúa nước, các nhóm đất chính đóng vai trò quyết định đến năng suất và phương thức canh tác, bao gồm: đất phù sa, đất mặn, đất xám, đất phèn và một số loại đất khác. Mỗi nhóm đất mang những đặc tính lý hóa, sinh học riêng biệt, từ độ phì nhiêu, thành phần cơ giới, cấu trúc, độ pH, đến hàm lượng các chất dinh dưỡng và độc tố. Việc hiểu rõ và quản lý hiệu quả các đặc tính này là chìa khóa để khai thác tiềm năng nông nghiệp một cách bền vững.

Đất phù sa *(Fluvisols)* được xem là nhóm đất có giá trị nông nghiệp cao nhất, là nền tảng cho các vựa lúa lớn của Việt Nam. Đất được hình thành từ sản phẩm bồi tụ của các hệ thống sông, đất phù sa có tầng canh tác dày, thành phần cơ giới cân đối từ thịt trung bình đến thịt nặng, tạo nên cấu trúc viên tốt, giúp giữ nước và dinh dưỡng hiệu quả, đồng thời đảm bảo độ thoáng khí cho bộ rễ. Độ phì tự nhiên cao, với hàm lượng chất hữu cơ (OM) thường >2.5%, đạm tổng số (>0.15%), lân và kali tổng số ở mức từ khá đến giàu. Độ pH của đất thường dao động trong khoảng trung tính đến hơi chua (pH 5.5 - 7.0), tạo môi trường tối ưu cho hệ vi sinh vật đất hoạt động và quá trình hấp thu dinh dưỡng của cây lúa. Đất phù sa tập trung chủ yếu tại hai đồng bằng lớn nhất nước là Đồng bằng sông Hồng ở miền Bắc và Đồng bằng sông Cửu Long (ĐBSCL) ở miền Nam. Mặc dù màu mỡ, việc thâm canh lúa liên tục có thể

làm suy giảm hàm lượng hữu cơ và mất cân bằng dinh dưỡng. Do đó, các biện pháp quản lý bền vững như luân canh với cây họ đậu, trả lại rơm rạ cho đất, và áp dụng các quy trình canh tác tiên tiến là rất cần thiết để duy trì độ phì của đất.

Đất mặn *(Salic Fluvisols*) hình thành ở các vùng duyên hải, chịu ảnh hưởng trực tiếp bởi quá trình xâm nhập của nước biển, tạo ra một môi trường canh tác đầy thách thức. Nồng độ muối hòa tan cao là yếu tố giới hạn chính. Đặc tính cơ bản là sự tích tụ của các loại muối hòa tan (NaCl, Na_2SO_4), thể hiện qua chỉ số độ dẫn điện của dịch chiết bão hòa (ECe) thường > 4 dS/m [4]. Nồng độ muối cao làm tăng áp suất thẩm thấu của dung dịch đất, khiến cây lúa không thể hút nước và dinh dưỡng. Ion Na^+ với hàm lượng lớn còn phá vỡ cấu trúc đất, làm đất bị nén chặt, giảm khả năng thấm và thoát nước. Đất mặn trải dài dọc theo đường bờ biển của cả nước. Tuy nhiên, diện tích tập trung lớn nhất là ở các tỉnh thuộc ĐBSCL như Bến Tre, Trà Vinh, Sóc Trăng, Bạc Liêu, Cà Mau và Kiên Giang. Canh tác trên đất mặn phụ thuộc rất lớn vào nguồn nước ngọt, xây dựng hệ thống đê bao ngăn mặn, chủ động thủy lợi để rửa mặn, áp dụng kỹ thuật cày ải phơi đất và quan trọng nhất là lựa chọn các giống lúa chịu mặn chuyên biệt.

Đất xám (*Acrisols*) là loại đất đã trải qua quá trình rửa trôi (eluviation) mạnh mẽ, được hình thành trên nền đá mẹ axit hoặc phù sa cổ. Đặc điểm nổi bật là thành phần cơ giới nhẹ (cát pha, thịt nhẹ) là đặc trưng chính, khiến đất có khả năng giữ nước và dinh dưỡng rất kém. Tầng đất mặt thường mỏng, nghèo chất hữu cơ (<1.5%) và dinh dưỡng. Đất thường chua (pH < 5.5), kéo theo hàm lượng nhôm di động (Al^{3+}) cao, gây độc cho bộ rễ cây lúa. Nhóm đất này có diện tích lớn, phân bố chủ yếu ở các vùng có địa hình lượn sóng hoặc bậc thềm như vùng Đông Nam Bộ, Duyên hải Nam Trung Bộ và các tỉnh vùng trung du, miền núi phía Bắc. Cải tạo đất xám là một quá trình lâu dài, tập trung vào việc tăng cường chất hữu cơ, bón vôi để nâng pH và khử độc nhôm.

Đất phèn (*Thionic fluvisols*) là một trong những nhóm đất có nhiều yếu tố hạn chế nhất, hình thành trong điều kiện ngập nước yếm khí. Đất chứa vật liệu sinh phèn là

khoáng pyrite (FeS_2). Khi tiếp xúc với không khí, pyrite bị oxy hóa, tạo ra axit sunfuric (H_2SO_4) làm pH đất giảm đột ngột. Môi trường axit này hòa tan các hợp chất chứa nhôm và sắt, tạo ra các độc tố Al^{3+}, Fe^{2+} ở nồng độ cao, gây hại trực tiếp đến rễ lúa và cố định lân. Việt Nam là một trong những quốc gia có diện tích đất phèn lớn trên thế giới. Nhóm đất này tập trung với quy mô lớn và mức độ ảnh hưởng nghiêm trọng nhất tại ĐBSCL, đặc biệt là ở các vùng trũng như Đồng Tháp Mười, Tứ giác Long Xuyên và bán đảo Cà Mau. Quản lý đất phèn thực chất là quản lý nước. Nguyên tắc cơ bản là giữ mực nước ngầm cao để hạn chế oxy hóa. Các biện pháp cải tạo như lên liếp, rửa phèn, bón vôi liều lượng lớn và sử dụng các loại phân lân dễ tiêu [101].

Ngoài các nhóm đất chính, lúa nước còn được trồng trên các loại đất đặc thù khác. Đất than bùn tập trung chủ yếu ở các vùng trũng ngập nước thường xuyên như vùng U Minh Thượng (Kiên Giang) và U Minh Hạ (Cà Mau). Đất này có hàm lượng hữu cơ rất cao (>20%) nhưng ở dạng khó phân giải, nghèo dinh dưỡng khoáng, thường rất chua và đi kèm độc tố hữu cơ, phèn tiềm tàng. Đất bạc màu do xói mòn chủ yếu xuất hiện ở vùng đồi núi dốc của Trung du và miền núi phía Bắc, Duyên hải miền Trung, nơi thảm thực vật bị suy giảm và canh tác không hợp lý. Đặc điểm là tầng canh tác rất mỏng, trơ sỏi đá, nghèo kiệt dinh dưỡng và khả năng giữ ẩm cực kỳ kém. Canh tác đòi hỏi giải pháp nông-lâm kết hợp và chống xói mòn triệt để [102].

1.4.2 Sản xuất lúa nước ở Việt Nam và đồng bằng sông Cửu Long

Theo số liệu của Tổng cục Thống kê Việt Nam năm 2023 [103], sản lượng lúa cả nước đạt 43,50 triệu tấn, tăng 837 nghìn tấn so với năm 2022 (42,66 triệu tấn). Năng suất lúa cả nước năm 2023 đạt 61,1 tạ/ha, tăng 1,1 tạ/ha so với năm 2022 (60,0 tạ/ha). Diện tích gieo trồng lúa năm 2023 đạt 7.119 nghìn ha, tăng nhẹ 10,4 nghìn ha so với năm 2022 (7.109 nghìn ha), cho thấy xu hướng diện tích đã dần ổn định sau giai đoạn giảm liên tục từ năm 2016 đến 2022. ĐBSCL tiếp tục là vùng sản xuất lúa trọng điểm của cả nước. Diện tích gieo trồng lúa của vùng năm 2023 đạt 3.839 nghìn ha, chiếm 53,9% tổng diện tích gieo trồng lúa cả nước. Sản lượng lúa vùng ĐBSCL năm 2023 đạt 24,16 triệu tấn, chiếm 55,5% tổng sản lượng lúa cả

nước, cao hơn so với mức 23,54 triệu tấn năm 2022. Năng suất lúa bình quân toàn vùng năm 2023 đạt 62,9 tạ/ha, cao hơn 1,8 tạ/ha so với mức bình quân chung cả nước, tiếp tục khẳng định vai trò vựa lúa quốc gia của vùng. Trong đó, lúa đông xuân có sản lượng cao nhất với 20,19 triệu tấn năm 2023, đóng góp khoảng 46,4% tổng sản lượng lúa cả năm [103].

Địa hình của vùng ĐBSCL tương đối bằng phẳng, độ cao trung bình là 3-5m, có khu vực chỉ cao 0,5-1m so với mặt nước biển. Vùng này được hình thành từ những trầm tích phù sa và bồi dần theo thời gian thay đổi mực nước biển; qua từng giai đoạn kéo theo sự hình thành những giồng cát dọc ven biển. Trầm tích nguồn gốc từ sông và biển đã hình thành những vạt đất phù sa phì nhiêu dọc theo đê ven sông lẫn một số giồng cát ven biển và đất phèn trên trầm tích đầm mặn trũng thấp như vùng Đồng Tháp Mười, tứ giác Long Xuyên – Hà Tiên, tây nam sông Hậu và bán đảo Cà Mau. Khí hậu của đồng bằng mang tính chất gió mùa cận xích đạo, tổng lượng bức xạ đạt 150 -160 kcl/cm^2/năm phân bố đều trong năm. Nhiệt độ trung bình hàng năm 27-28^{0}C, chênh lệch nhiệt độ ngày và đêm thấp, ít có bão hoặc nhiễu loạn thời tiết. Có hai mùa rõ rệt, mùa mưa tập trung từ tháng 5-10, lượng mưa chiếm tới 90% tổng lượng mưa của cả năm. Các yếu tố khí hậu của vùng thích hợp cho các sinh vật sinh trưởng và phát triển và là tiền đề cho việc thâm canh, tăng vụ.

Đất đai trong vùng bao gồm các nhóm đất sau: (i) *Nhóm đất phù sa* phân bố chủ yếu ở vùng ven và giữa hệ thống sống Tiền và sông Hậu với diện tích 1,2 triệu ha chiếm 29,7% diện tích đất tự nhiên toàn vùng và khoảng 1/3 diện tích đất phù sa của cả nước. Nhóm đất này có độ phì cao và cân đối, thích hợp đối với nhiều loại cây trồng lúa, cây ăn quả, màu, cây công nghiệp ngắn ngày; (ii) *Nhóm đất phèn* phân bố ở vùng Đồng Tháp Mười và Hà Tiên, vùng trũng trung tâm bản đảo Cà Mau với tổng diện tích 1,2 triệu ha chiếm 40% diện tích toàn vùng; (iii) *Nhóm đất xám*, phân bố chủ yếu dọc biên giới Campuchia, trên các bậc thềm phù sa cổ vùng Đồng Tháp Mười, diện tích trên 134 nghìn ha chiếm 3,4% diện tích toàn vùng với tính chất đất nhẹ, tơi xốp và độ phì thấp. Tuy nhiện, hiện nay do ảnh hưởng của biến đổi khí hậu cùng tập quán canh tác của người dân đã làm gia tăng diện tích đất nhiễm phèn,

mặn trong vùng. Diện tích đất phèn tăng do cấu trúc tầng đất và quá trình sử dụng cải tạo chưa hợp lý; diện tích nhiễm mặn tăng do tác động thủy triều và thông qua hoạt động dẫn mặn vào nội đồng để nuôi tôm. Đây cũng là trở ngại cho việc sử dụng hiệu quả đất nhiễm phèn, mặn tại khu vực này. Đồng bằng nằm ở hạ lưu sông Mê Kông với 2 nhánh sông Tiền và sông Hậu có tổng lượng nước sông Cửu Long khoảng 500 tỷ m^3 [104] trong đó sông Tiền chiếm 79% và sông Hậu chiếm 21%. Chế độ thuỷ văn thay đổi theo mùa. Mùa mưa nước sông lớn từ tháng 9 - 10 làm ngập các vùng trũng Đồng Tháp Mười, Tứ giác Long Xuyên. Vào mùa này, nước sông mang nhiều phù sa bồi đắp cho đồng bằng. Mùa khô, lượng nước giảm nhiều, làm cho thuỷ triều lấn sâu vào đồng bằng làm vùng đất ven biển bị nhiễm mặn nghiêm trọng.

1.4.3 Sản xuất lúa nước ở các vùng ven thành phố Hồ Chí Minh

Thành phố Hồ Chí Minh (TP. HCM) có diện tích tự nhiên là 2.095 km^2 [105], đứng thứ 5/6 tỉnh vùng Đông Nam Bộ, và 7/8 tỉnh của vùng kinh tế trọng điểm phía Nam; dân số trung bình đạt 9,04 triệu người [105], đứng đầu cả nước với gần 9,0% số dân cả nước, và lao động đang làm việc là 4,54 triệu người, trong đó riêng khu vực nông nghiệp chiếm 2,2%. Với vị trí chuyển tiếp từ Nam Trung Bộ và ĐBSCL, về mặt tự nhiên của TP. HCM có khá nhiều nét khá tương đồng với vùng châu thổ này.

Địa hình của TP. HCM có đặc điểm là địa hình đồng bằng thấp, bề mặt tương đối bằng phẳng và bị chia cắt bởi mạng lưới sông ngòi, kênh rạch dày đặc; địa hình có xu hướng thấp dần từ tây bắc xuống đông nam với độ dốc nhỏ. Đất đai TP HCM được chia thành 4 nhóm chính: nhóm đất phèn, đất phù sa, đất sám và đất mặn. *Đất phèn* chiếm phần lớn diện tích chiếm 27,5% tổng diện tích tự nhiên [106], loại đất phèn trung bình đang được khai thác để trồng lúa, đất phèn nhiều hay phèn mặn được khai thác trồng mía, dứa, lạc. *Đất phù sa* ít bị nhiễm phèn chiếm diện tích nhỏ khoảng 12,6% tổng diện tích tự nhiên, đây là nhóm đất thích hợp cho việc trồng lúa, trong đó có 5,6 nghìn ha phù sa ngọt trồng lúa cho năng suất cao. *Nhóm đất sám* phát triển trên nền phù sa cổ chiếm 19,3% thích hợp trồng cây công nghiệp, cây thực phẩm. *Nhóm đất mặn* chiếm 12,2% được khai thác để trồng rừng. Trong cơ cấu

sử dụng đất với tổng số diện tích đất của thành phố thì diện tích đất sử dụng cho mục đích nông nghiệp chiếm tỉ trọng cao nhất chiếm 31,8% (theo cục thống kê TP. HCM). Phần lớn đất nông là đất trồng cây hằng năm trong đó chủ yếu là đất trồng lúa và cây hoa màu.

Với những điều kiện tự nhiên thuận lợi như trên cùng với sự tập trung dân cư đông có trình độ cao đã giúp TP. HCM trở thành trung tâm kinh tế lớn của cả nước phát triển mạnh ở tất cả các lĩnh vực trong đó có ngành nông nghiệp. Phát triển nông nghiệp của TP. HCM với sản phẩm chính là cây lương thực có hạt, rau đậu, hoa, cây cảnh; chăn nuôi. Nông nghiệp của thành phố hiện nay vừa khai thác thế mạnh về quỹ đất sản xuất nông nghiệp, về thị trường và nhu cầu lương thực, thực phẩm,… vừa giải quyết việc làm, tăng thu nhập và giữ gìn môi trường sinh thái cho thành phố có vị thế kinh tế đứng đầu cả nước. Như vậy, với những nét khá tương đồng về điều kiện đất đai, khí hậu, hệ thống thủy văn, tập quan canh tác, ... giữa vùng ĐBSCL và các huyện vùng ven TP. HCM nên đề tài nghiên cứu sản xuất lúa tại TP. HCM như là một trường hợp điển hình và có thể áp dụng ra các tỉnh thành xung quanh. Mặt khác, trong định hướng chuyển phát triển nông nghiệp của TP. HCM theo hướng nông nghiệp công nghệ cao tập trung tại các huyện vùng ven, trong đó có một số vùng có diện tích đất nông nghiệp đặc thù đã định hướng chuyên trồng lúa như Củ Chi và Bình Chánh cũ.

1.5 Tín chỉ carbon và một số chỉ số tích hợp cho đất lúa

Tín chỉ carbon (carbon credit) là đơn vị chứng nhận có thể giao dịch trên thị trường, đại diện cho việc giảm thiểu hoặc loại bỏ một tấn khí CO_2 tương đương (CO_2-eq) khỏi khí quyển, được phát triển như một cơ chế kinh tế nhằm khuyến khích các hoạt động giảm phát thải khí nhà kính theo Nghị định thư Kyoto và Thỏa thuận Paris [107]. Thị trường tín chỉ carbon toàn cầu được chia thành hai loại chính: thị trường bắt buộc, nơi các doanh nghiệp phải tuân thủ hạn ngạch phát thải do chính phủ quy định, và thị trường tự nguyện, nơi các tổ chức và cá nhân tự nguyện mua tín chỉ carbon để bù trừ lượng khí thải của mình. Trong bối cảnh đó, lĩnh vực nông nghiệp nói chung và canh tác lúa nước nói riêng đóng góp khoảng 10-12% tổng lượng khí

metan toàn cầu và 1,5% tổng phát thải khí nhà kính do hoạt động của con người gây ra. Việc tham gia vào thị trường tín chỉ carbon mang lại lợi ích kép cho nông dân: vừa tăng thu nhập từ việc bán tín chỉ carbon (ước tính thêm 50-200 USD/ha/năm tùy thuộc vào mức giảm phát thải và giá thị trường), vừa cải thiện hiệu quả sử dụng tài nguyên và giảm chi phí đầu vào như nước và phân bón [108]. Tuy nhiên, việc triển khai các chương trình tín chỉ carbon trong canh tác lúa nước ở quy mô nhỏ lẻ vẫn đối mặt với nhiều rào cản như chi phí cao cho giám sát và xác minh phát thải (MRV - Monitoring, Reporting, and Verification), thiếu kiến thức kỹ thuật của nông dân, và sự phức tạp trong quy trình đăng ký dự án. Do đó, cần có sự hỗ trợ mạnh mẽ từ chính phủ, các tổ chức quốc tế và khu vực tư nhân trong việc xây dựng chính sách khuyến khích, phát triển công nghệ giám sát phát thải chi phí thấp, tổ chức nông dân thành hợp tác xã để tăng quy mô dự án, và nâng cao năng lực cho cộng đồng nông dân nhằm tận dụng tối đa tiềm năng của thị trường tín chỉ carbon trong việc thúc đẩy canh tác lúa bền vững và thích ứng với biến đổi khí hậu.

Chỉ số chất lượng đất (Soil Quality Index - SQI) là công cụ định lượng tổng hợp được sử dụng rộng rãi để đánh giá khả năng của đất trong việc duy trì năng suất cây trồng và bền vững môi trường, đặc biệt quan trọng trong hệ thống canh tác lúa nước [109]. SQI được xây dựng dựa trên tập hợp các chỉ tiêu vật lý, hóa học và sinh học của đất, cho phép so sánh chất lượng đất giữa các vùng canh tác khác nhau và theo dõi biến động chất lượng đất theo thời gian. Bên cạnh đó, chỉ số ô nhiễm kim loại nặng (Heavy Metal Pollution Index - HPI) được phát triển để định lượng mức độ tích lũy kim loại độc hại trong đất, vấn đề ngày càng trở nên nghiêm trọng ở các vùng trồng lúa do sử dụng nước tưới nhiễm bẩn, phân bón hóa học và hoạt động công nghiệp [110].Việc kết hợp đánh giá cả SQI và HPI cung cấp cái nhìn toàn diện về chất lượng đất trồng lúa, góp phần đảm bảo bền vững cho môi trường.

1.6 Nhận xét và vấn đề cần được tiếp tục nghiên cứu

Sản xuất lúa nước đóng vai trò quan trọng đảm bảo an ninh lương thực quốc gia và tạo nguồn hàng xuất khẩu. Tuy nhiên, việc sản xuất lúa ở Việt Nam nói riêng và cả thế giới nói chung đang gặp các vấn đề về phát thải khí nhà kính, đặc biệt là khí

CH_4. Đây là loại khí có tiềm năng gây hiệu ứng nhà kính gấp khoảng 22-25 lần khí CO_2. Mặt khác, môi trường đất canh tác lúa nước cũng bị ô nhiễm sau thời gian sử dụng. Nguyên nhân chủ yếu là do nông dân sử dụng các loại phân bón chưa phù hợp làm cho đất tích lũy kim loại vượt quá tiêu chuẩn cho phép. Việc đất canh tác lúa nước bị bạc màu và từ đó làm giảm năng suất lúa cũng là một trong các vấn đề quan trọng của nền sản xuất lúa vì năng suất giảm đồng nghĩa với thu nhập cũng giảm theo. Do đó có thể nhận thấy vấn đề sản xuất lúa nước hiện nay còn thiếu tính bền vững. Việc sản xuất ngày hôm nay có thể ảnh hưởng đến các thế hệ tương lai ở các mặt (i) làm phát thải khí nhà kính từ đó đẩy nhanh quá trình biến đổi khí hậu, (ii) gây ô nhiễm môi trường đất, (iii) đất thoái hóa bạc màu và hiệu quả kinh tế của việc canh tác lúa sẽ xuống thấp. Việc hạn chế các ảnh hưởng này và cải thiện năng suất lúa nước là điều cần thiết, từ đó nâng cao tính bền vững môi trường và kinh tế của loại hình sản xuất nông nghiệp này.

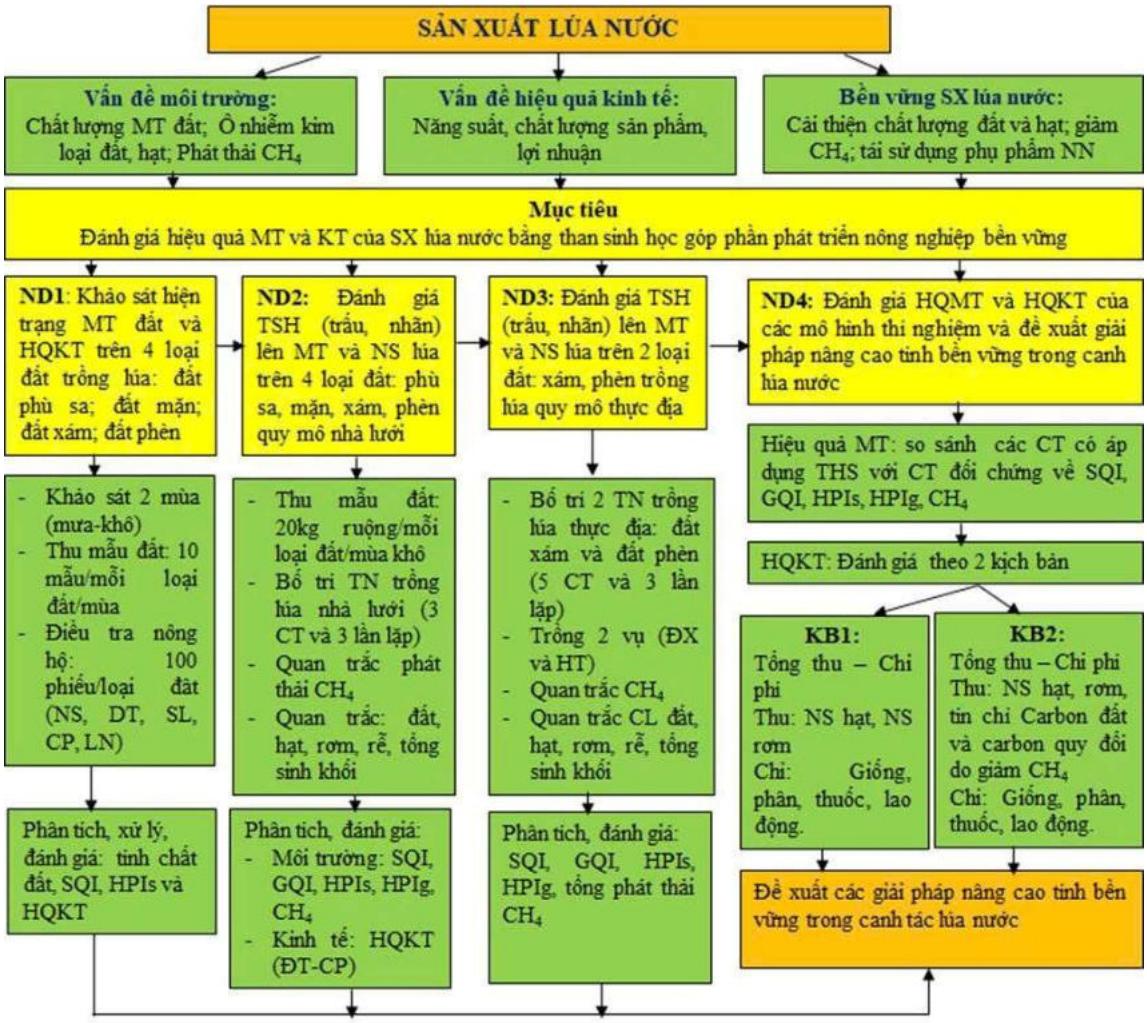
Than sinh học được sử dụng nhưng một giải pháp cho các vấn đề này. Than sinh học có vai trò quan trọng trong việc cải thiện môi trường, hạn chế phát thải CH_4 và các khả năng nâng cao năng suất lúa nước. Tuy nhiên, các hiệu quả này lại được quyết định bởi loại vật liệu sử dụng sản xuất than sinh học cũng như điều kiện áp dụng. Ở Việt Nam còn ít các nghiên cứu về than sinh học trên nền đất trồng lúa nước. Mức độ cải thiện năng suất, hạn chế phát thải CH_4 và cải tạo môi trường đất của than sinh học cũng chưa được chứng thực. Việc áp dụng than sinh học từ một số phụ phẩm nông nghiệp để nâng cao tính bền vững môi trường và kinh tế của sản xuất lúa nước là cần thiết và cấp bách hiện nay góp phần đạt được mục tiêu bền vững trong sản xuất nông nghiệp.

Qua tổng quan tài liệu, có thể nhận thấy năm khoảng trống nghiên cứu quan trọng chưa được giải quyết thỏa đáng trong các công trình hiện có. Khoảng trống *thứ nhất về vật liệu than sinh học:* hầu hết các nghiên cứu trong và ngoài nước tập trung vào than trấu hoặc than tre/gỗ, trong khi than từ cành nhãn, phụ phẩm nông nghiệp phổ biến tại Đồng bằng sông Cửu Long và Đông Nam Bộ nhưng thường bị bỏ phí chưa được nghiên cứu so sánh đối chứng trực tiếp với than trấu trên cùng điều kiện canh

tác, dẫn đến thiếu cơ sở khoa học để lựa chọn vật liệu than phù hợp với điều kiện địa phương. *Thứ hai, về đối tượng đất đặc thù*: các nghiên cứu quốc tế thường thực hiện trên đất thoái hóa nói chung, thiếu dữ liệu thực nghiệm so sánh phản ứng của than sinh học trên các loại đất có vấn đề đặc trưng của Việt Nam, đặc biệt là đất phèn (nhiễm Al^{3+}, Fe^{3+}, pH thấp) và đất xám (nghèo dinh dưỡng, CEC thấp, giữ nước kém) hai loại đất chiếm diện tích lớn và có tính chất hóa học đối lập nhau tại vùng Đồng bằng sông Cửu Long. *Thứ ba* về ô nhiễm kim loại nặng: mặc dù đã có một số nghiên cứu về khả năng hấp phụ kim loại nặng của than sinh học trong điều kiện phòng thí nghiệm, nhưng bằng chứng thực nghiệm về hiệu quả giảm tích lũy kim loại nặng trong đất và hạt lúa dưới điều kiện canh tác thực địa vẫn còn rất hạn chế, đặc biệt trên các loại đất có hàm lượng Fe và Al cao như đất phèn và đất xám. *Thứ tư, về tính tích hợp đánh giá:* đa số nghiên cứu chỉ đánh giá đơn lẻ hoặc hiệu quả môi trường hoặc năng suất kinh tế, chưa có cách tiếp cận tích hợp bằng bộ chỉ số định lượng đồng thời cả hiệu quả môi trường (ENI) và hiệu quả kinh tế (ECI) trong bối cảnh thị trường tín chỉ carbon đang hình thành tại Việt Nam, dẫn đến thiếu công cụ đánh giá toàn diện để hỗ trợ chính sách canh tác bền vững. *Cuối cùng*, *về tính bền vững dài hạn:* phần lớn các nghiên cứu chỉ theo dõi hiệu quả của than sinh học trong một vụ hoặc một năm canh tác, thiếu dữ liệu đánh giá sự suy giảm hiệu lực cải tạo đất theo thời gian qua nhiều vụ canh tác, đặc biệt trên các loại đất có điều kiện hóa học khắc nghiệt như đất phèn và đất xám tại điều kiện nhiệt đới ẩm. Năm khoảng trống nghiên cứu nêu trên chính là cơ sở khoa học để hình thành sáu câu hỏi nghiên cứu và các giả thuyết khoa học được kiểm chứng trong luận án, đồng thời khẳng định tính cấp thiết và đóng góp mới của nghiên cứu này trong bối cảnh phát triển nông nghiệp bền vững tại Việt Nam.

CHƯƠNG 2 NỘI DUNG VÀ PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

Nghiên cứu trong luận án này chia thành bốn nội dung chính, có mối liên kết chặt chẻ, hữu cơ với nhau. Hình 2.1 mô tả tổng thể khung nghiên cứu cho luận án này.



Hình 2.1 Khung nghiên cứu thể hiện mối liên hệ giữa các nội dung nghiên cứu và mục tiêu nghiên cứu của luận án

Nghiên cứu này được thực hiện thông qua bốn nội dung chính (ND1-ND4), nhằm đánh giá toàn diện hiệu quả môi trường và kinh tế của việc ứng dụng than sinh học trong canh tác lúa nước, từ đó đề xuất giải pháp phát triển nông nghiệp bền vững tại Đồng bằng sông Cửu Long.

Nội dung 1 (ND1) tập trung khảo sát hiện trạng môi trường đất và hiệu quả kinh tế canh tác lúa trên bốn loại đất điển hình gồm: đất phù sa, đất mặn, đất xám và đất phèn. Các thông số được khảo sát bao gồm tính chất lý hóa đất, khí phát thải, năng suất, chi phí và lợi nhuận từ sản xuất lúa ở hai mùa vụ (mùa khô và mùa mưa). Kết quả là cơ sở để xác định đặc điểm nền và lựa chọn địa điểm triển khai thí nghiệm.

Nội dung 2 (ND2) thực hiện các thí nghiệm nhà lưới nhằm đánh giá tác động của hai loại than sinh học (từ vỏ trấu và thân cành nhãn) đến chất lượng đất, phát thải khí metan và năng suất lúa trên cả bốn loại đất nêu trên. Mỗi công thức được bố trí ba lần lặp để đảm bảo độ tin cậy thống kê. Chỉ số chất lượng đất (SQI), chỉ số chất lượng hạt (GQI), chỉ số ô nhiễm kim loại nặng (HPI), cùng phát thải CH_4 là các tiêu chí chính để phân tích hiệu quả môi trường.

Nội dung 3 (ND3) triển khai các thí nghiệm ngoài thực địa trên hai loại đất đại diện cho nhóm đất kém bền vững là đất xám và đất phèn. Năm công thức (CT1 đến CT5) được bố trí trên mỗi loại đất, lặp lại ba lần, trong hai vụ sản xuất (Đông Xuân và Hè Thu). Các chỉ tiêu theo dõi bao gồm chất lượng đất, phát thải khí nhà kính, sinh khối rễ, rơm, năng suất và chất lượng hạt. Kết quả từ ND3 phản ánh mức độ phù hợp của than sinh học khi áp dụng trong điều kiện thực tế sản xuất.

Nội dung 4 (ND4) là bước tổng hợp và đánh giá hiệu quả tổng thể của các công thức sử dụng than sinh học. Hiệu quả môi trường được phân tích dựa trên các chỉ số: SQI, GQI, HPIs và lượng khí CH_4 phát thải, để xây dựng chỉ số hiệu quả môi trường (ENI). Hiệu quả kinh tế được đánh giá thông qua chỉ số (ECI) qua hai kịch bản: Kịch bản 1 (KB1) tính thu - chi theo phương pháp truyền thống, trong khi Kịch bản 2 (KB2) bổ sung thêm giá trị từ tín chỉ carbon và lượng carbon tích lũy trong đất nhờ ứng dụng than sinh học. Phân tích kinh tế trong hai kịch bản được xây dựng dựa trên các khoản chi cho giống, phân bón, thuốc và lao động, đối chiếu với lợi nhuận thực tế thu được.

Thông qua bốn nội dung trên, nghiên cứu không chỉ đánh giá cụ thể hiệu quả môi trường và kinh tế của than sinh học mà còn cung cấp cơ sở khoa học để đề xuất các

giải pháp nâng cao tính bền vững trong canh tác lúa nước, hướng đến mô hình nông nghiệp thích ứng với biến đổi khí hậu và bảo vệ tài nguyên đất lâu dài.

2.1 Nội dung nghiên cứu

2.1.1 Nội dung 1: Khảo sát hiện trạng chất lượng môi trường đất và hiệu quả kinh tế trong sản xuất lúa nước vùng nghiên cứu

Nội dung này được thực hiện với mục tiêu đánh giá hiện trạng chất lượng và mức độ ô nhiễm kim loại trong đất lúa và hiệu quả kinh tế trong sản xuất lúa nước tại huyện Củ Chi cũ, thành phố Hồ Chí Minh với đất xám và đất phèn; thị xã Bình Minh - tỉnh Vĩnh Long cũ với đất phù sa; huyện Gò Công Đông - tỉnh Tiền Giang cũ với đất mặn.

2.1.2 Nội dung 2: Đánh giá ảnh hưởng của than sinh học lên các yếu tố môi trường và năng suất lúa trên các loại đất trồng lúa chính quy mô nhà lưới

Nội dung này được thực hiện với mục tiêu: Đánh giá ảnh hưởng của than sinh học sản xuất từ phụ phẩm nông nghiệp đến phát thải khí CH_4, chất lượng môi trường đất và năng suất lúa nước. Bốn loại đất bao gồm đất phèn, đất xám, đất mặn và đất phù sa là những loại đất chính trong sản xuất lúa ở Việt Nam được chọn cho nội dung này. Lúa được trồng trên 4 loại đất và được quan trắc phát thải CH_4, chất lượng đất, hiện trạng kim loại nặng trong đất và hạt lúa, sinh trưởng và năng suất lúa. Các số liệu trong mô hình thí nghiệm này được sử dụng để đánh giá ảnh hưởng của than sinh học đến phát thải khí CH_4, chất lượng môi trường đất, kim loại nặng trong đất và hạt lúa, sinh trưởng và năng suất lúa. Sau khi đánh giá, 2 loại đất có vấn đề sẽ được chọn để tiến hành bố trí thí nghiệm quy mô thực địa ở nội dung 3.

2.1.3 Nội dung 3: Đánh giá sự ảnh hưởng của than sinh học lên các yếu tố môi trường và năng suất lúa ở mô hình thí nghiệm quy mô thực địa

Từ kết quả nghiên cứu của nội dung 2, về các đặc tính hóa học, hiện trạng kim loại nặng, khả năng phát thải, sinh trưởng và năng suất lúa vẫn còn hạn chế sau khi dùng than sinh học ở liều lượng thấp xuất hiện trên đất xám và đất phèn. Do đó, ở nội dung này, đất phèn và đất xám được chọn lại để thực hiện một mô hình thí nghiệm

quy mô thực địa. Nội dung này được thực hiện với mục tiêu: Đánh giá ảnh hưởng của than sinh học đến phát thải khí CH_4, chất lượng môi trường đất và năng suất lúa nước trong 2 vụ liên tục. Việc đánh giá ảnh hưởng của than sinh học đến phát thải khí CH_4, chất lượng môi trường đất, kim loại nặng trong đất, sinh trưởng và năng suất lúa sẽ làm tiền đề để đánh giá hiệu quả của môi trường và kinh tế của mô hình thí nghiệm sản xuất lúa nước áp dụng than sinh học ở nội dung 4.

2.1.4 Nội dung 4: Đánh giá hiệu quả môi trường, kinh tế của các mô hình thí nghiệm và đề xuất các giải pháp nâng cao tính bền vững trong canh tác lúa nước

Các kết quả của nội dung 1, 2 và 3 được tổng hợp để đánh giá hiệu quả môi trường và kinh tế của việc sử dụng than sinh học cho sản xuất lúa. Nội dung này được thực hiện với hai mục tiêu: Đánh giá hiệu quả về môi trường và kinh tế trong sản xuất lúa nước của than sinh học và đề xuất các giải pháp nâng cao chất lượng môi trường và kinh tế cho sản xuất lúa nước thông qua việc áp dụng than sinh học từ phụ phẩm nông nghiệp. Sau khi phân tích các kết quả ở nội dung 1, 2 và 3, các giải pháp nâng cao tính bền vững môi trường và kinh tế trong canh tác lúa nước được đề xuất.

2.2 Phương pháp nghiên cứu

2.2.1 Nội dung 1: Khảo sát hiện trạng chất lượng môi trường đất và hiệu quả kinh tế trong sản xuất lúa nước vùng nghiên cứu

Để tiến hành khảo sát hiện trạng của chất lượng môi trường đất và hiệu quả kinh tế trong sản xuất lúa nước. Nghiên cứu đã tiến hành tổng hợp các nguồn thông tin của khu vực, bản đồ sử dụng đất, báo cáo ngành nông nghiệp địa phương và các khảo sát chuyên đề. Kết quả cho thấy, ở xã Thái Mỹ, huyện Củ Chi (nay là xã Củ Chi, thành phố Hồ Chí Minh) có đất xám và ở xã Tân Thạnh Đông, huyện Củ Chi (nay là xã Phú Hòa Đông, thành phố Hồ Chí Minh) có đất phèn; xã Kiểng Phước, huyện Gò Công Đông, tỉnh Tiền Giang (nay là xã Gia Thuận, tỉnh Đồng Tháp) có đất mặn; xã Nguyễn Văn Thảnh, thị xã Bình Minh, tỉnh Vĩnh Long (nay là xã Mỹ Thuận, tỉnh Vĩnh Long) có đất phù sa; tất cả các loại đất này đều đang canh tác lúa và đều chiếm ưu thế về diện tích hơn với các loại đất khác. Mặt khác, bốn loại đất này cũng là bốn loại đất phổ biến ở Việt Nam nói chung đồng thời là bốn loại đất đang gặp

nhiều vấn đề nhất hiện nay, đặc biệt dùng để canh tác lúa nước trong bối cảnh biến đổi khí hậu đang diễn ra hiện nay. Đối tượng khảo sát được lựa chọn trên cơ sở phù hợp với mục tiêu nghiên cứu, bao gồm các hộ gia đình và cá nhân đang trực tiếp sử dụng bốn loại đất này đang canh tác lúa có ảnh hưởng lớn đến môi trường đất và tiềm năng phát triển hiệu quả kinh tế. Do đó, việc khảo sát tại các loại đất ứng với các địa phương nói trên đã được mang tính đại diện và được thực hiện điều tra xã hội học ngẫu nhiên bằng phiếu phỏng vấn tại 4 khu vực có các loại đất xám, phù sa, phèn và mặn trồng lúa, tổng cộng 400 phiếu (mỗi khu vực khảo sát với số lượng là 100 phiếu nhằm đảm bảo tính phổ rộng và kết quả sau tính toán có ý nghĩa về mặt thống kê) nhằm xác định hiện trạng sản xuất lúa nước (phiếu điều tra được thể hiện trong Phụ lục 5). Dữ liệu được xử lý bằng Excel, tổng hợp các kết quả để đánh giá hiện trạng canh tác lúa, tiềm năng sinh khối ở vùng nghiên cứu. Hiệu quả kinh tế được tính toán dựa vào các chi phí đầu vào và năng suất đầu ra từ khảo sát.

Thu thập mẫu đất và phân tích các thành phần hóa học:

* Lấy mẫu đất: Tất cả các mẫu đất của các loại đất được thu thập trong mùa mưa và mùa khô (mùa mưa bắt đầu từ tháng 7 đến tháng 9 và mùa khô bắt đầu được tính từ cuối tháng 10 năm trước đến hết tháng 01 năm kế tiếp). Phương pháp lấy mẫu được dựa trên TCVN 7538-1:2006/BKHCN về Chất lượng đất - Lấy mẫu; Phần 1 - Hướng dẫn lập chương trình lấy mẫu và TCVN 7538-2:2005/BKHCN về Chất lượng đất - Lấy mẫu; Phần 2 - Hướng dẫn kỹ thuật lấy mẫu. Trên mỗi loại đất thu 20 mẫu tương ứng với 10 ruộng khác nhau (10 mẫu được lấy trong mùa mưa và 10 mẫu được lấy trong mùa khô) tại các khu vực nghiên cứu, mẫu đất được lấy ở tầng canh tác (0 - 15 cm) và từ 5 điểm chéo góc, mỗi mẫu lấy 3 kg đất tươi. Đất sau khi lấy được phơi khô trong không khí, nghiền và rây qua rây 2 mm để chuẩn bị phân tích hóa học.

Đất phù sa: 20 mẫu đất được thu thập hoàn toàn ngẫu nhiên tại 10 ruộng lúa (10 mẫu được lấy trong mùa mưa và 10 mẫu được lấy trong mùa khô) ở xã Nguyễn Văn Thảnh, thị xã Bình Minh, tỉnh Vĩnh Long (nay là xã Mỹ Thuận, tỉnh Vĩnh Long)

(10°07'51.6"N 105°50'23.4"E). Bản đồ 10 ruộng lấy mẫu được trình bày ở Hình 2.1, Phụ lục 2. Các cánh đồng lúa tại đây thuộc loại đất phù sa *(Fluvisols)* theo thuộc hệ thống phân loại WRB [111].

Đất mặn: 20 mẫu đất được thu thập hoàn toàn ngẫu nhiên tại 10 ruộng lúa (10 mẫu được lấy trong mùa mưa và 10 mẫu được lấy trong mùa khô) ở xã Kiểng Phước, huyện Gò Công Đông, tỉnh Tiền Giang (nay là xã Gia Thuận, tỉnh Đồng Tháp) (10°23'30.9"N 106°45'57.6"E). Bản đồ 10 ruộng lấy mẫu được trình bày ở Hình 2.2, Phụ lục 2. Các cánh đồng lúa tại đây này thuộc loại đất mặn *(Salic Fluvisols)* theo thuộc hệ thống phân loại WRB [111].

Đất xám: 20 mẫu đất được thu thập hoàn toàn ngẫu nhiên tại 10 ruộng lúa (10 mẫu được lấy trong mùa mưa và 10 mẫu được lấy trong mùa khô) ở xã Thái Mỹ, huyện Củ Chi (nay là xã Củ Chi, thành phố Hồ Chí Minh), (10°58'33.8"N 106°24'18.2"E). Bản đồ 10 ruộng lấy mẫu được trình bày ở Hình 2.3, Phụ lục 2. Các cánh đồng lúa tại đây này thuộc loại đất xám (*Gleyic Acrisols*) theo thuộc hệ thống phân loại [111].

Đất phèn: 20 mẫu đất được thu thập hoàn toàn ngẫu nhiên tại 10 ruộng lúa (10 mẫu được lấy trong mùa mưa và 10 mẫu được lấy trong mùa khô) ở xã Tân Thạnh Đông, huyện Củ Chi (nay là xã Phú Hòa Đông, thành phố Hồ Chí Minh), (10°55'56.7"N 106°35'19.5"E). Bản đồ 10 ruộng lấy mẫu được trình bày ở Hình 2.4, Phụ lục 2. Các cánh đồng lúa tại đây thuộc loại đất phèn hoạt động *(Thionic Fluvisols)* theo thuộc hệ thống phân loại [111].

* Các chỉ tiêu hóa học cần phân tích:

Bảng 2.1 Tổng hợp các chỉ tiêu cần phân tích

TT	Chỉ tiêu	Đơn vị	Mục đích	Phương pháp	Ghi chú
1	pH	-	Xác định độ axit, ảnh hưởng trực tiếp đến lúa và khả năng hấp thu dinh dưỡng.	Đo bằng máy đo pH	TCVN 5979:2007
2	EC	dS/m	Đánh giá mức độ mặn của đất, ảnh hưởng đến quá trình hút nước.	Đo bằng máy đo EC. Tỷ lệ trích đất:nước 1:5 (w/v)	TCVN 8567:2010
3	CEC	cmol(+)/kg	Xác định khả năng giữ và cung cấp dinh dưỡng.	Phương pháp tách chiết $BaCl_2$	[112]
4	Độ chua trao đổi	cmol(+)/kg	Đánh giá tổng lượng axit có thể trao đổi trong đất.	Phương pháp chuẩn độ	[112]
5	P dễ tiêu	mg/kg	Phốt pho thường bị Fe, Al cố định trong đất phèn, cần xác định mức độ sẵn có cho lúa.	Phương pháp Mehlich-1 P	TCVN 8661: 2011 [112]
6	NH_4^+	g/kg	Xác định nguồn cung cấp nitơ cho lúa.	Phương pháp so màu bằng máy UV-VIS	[113]
7	H^+ trao đổi	cmol(+)/kg	Đo lượng ion H^+ góp phần tạo độ chua của đất.	Phương pháp chuẩn độ	[112]
8	OC	%	Xác định lượng chất hữu cơ trong đất, ảnh hưởng đến độ phì nhiêu.	Phương pháp Walkley Black	TCVN 8941:2011
9	Cl^-	g/kg	Một trong những ion chính gây nhiễm mặn, ảnh hưởng đến khả năng hút nước của lúa.	Phương pháp chuẩn độ	[114]
10	SO_4^{2-}	g/kg	Thành phần đặc trưng trong đất phèn, liên quan đến quá trình oxy hóa pyrite.	Phương pháp đo độ đục	[115]
11	Fe trao đổi	mg/kg	Gây độc, làm kết tủa lân, ảnh hưởng đến hấp thu dinh dưỡng.	Phương pháp tách chiết bằng $BaCl_2$ và đo bằng thiết bị ICP-OES (Inductively Coupled Plasma Spectroscopy Optical Emission Spectrometer)	[112]
12	Al trao đổi		Ion độc gây ức chế rễ cây, thường xuất hiện nhiều trong đất phèn.		
13	Mn trao đổi		Gây ngộ độc cho cây khi tích tụ ở mức cao.		
14	Ca trao đổi		Trung hòa độ chua, cải thiện cấu trúc đất.		
15	Mg trao đổi		Cần thiết cho quang hợp, nhưng có thể bị cạnh tranh với Ca, K.		
16	K trao đổi		Dinh dưỡng quan trọng, giúp lúa chịu hạn và nhiễm mặn tốt hơn.		
17	Na trao đổi		Xác định mức độ nhiễm mặn của đất, ảnh hưởng đến sinh trưởng của lúa.		
18	Cd trao đổi		Dễ gây độc ở nồng độ cao, đo các kim loại này ở dạng trao đổi sẽ phản ánh khả năng gây độc và tích tụ vào lúa làm giảm năng suất và chất lượng hạt lúa.		
19	Cu trao đổi				
20	Pb trao đổi				
21	Co trao đổi				
22	Ni trao đổi				
23	Zn trao đổi				

Tính toán các chỉ số và phân tích thống kê

* Tính chỉ số chất lượng đất (SQI)

Các trọng số trong tính (SQI) được tính toán theo phương pháp phân tích thành phần/nhân tố chính [116] sử dụng cách tính như Phương trình 2.1.

$$SQI = \sum_{i=1}^{n} w_i \, s_i \qquad (2.1)$$

Trong đó n là số lượng các thông số đất; w_i là trọng số của tham số thứ i và s_i là giá trị của tham số thứ i. w_i được xác định bằng cách sử dụng phân tích thành phần/nhân tố chính và s_i được xác định thông qua phương trình 2 và 3. Mười bảy thông số đất đã phân tích được chia thành hai nhóm là "cao tốt hơn" và "thấp tốt hơn". Các thông số trong nhóm "cao tốt hơn" bao gồm pH, Ca, K, Mg, P dễ tiêu, CEC, NH_4-N, OC; các thông số trong nhóm "thấp tốt hơn" gồm phần còn lại. Đối với nhóm "cao tốt hơn", s_i được xác định theo phương trình 2.2 như sau (Phương trình 2).

$$s_i = \frac{x_i - x_{min}}{x_{max} - x_{min}} \qquad (2.2)$$

Với các thông số trong nhóm "ít tốt hơn", s_i được xác định theo phương trình 2.3.

$$s_i = \frac{x_{max} - x_i}{x_{max} - x_{min}} \qquad (2.3)$$

Trong đó x_i, x_{min}, và x_{max} lần lượt là giá trị được phân tích, giá trị nhỏ nhất và giá trị lớn nhất của tham số i.

Trọng số của nhân tố (FW) được tính dưới dạng $\frac{e_i}{Sum}$, trong đó e_i là giá trị riêng của nhân tố i và Sum là tổng giá trị riêng của tất cả các nhân tố còn lại sau PCA/FA. Trọng số của các thông số được tính dưới dạng $\frac{FW_i}{\sum_{i=1}^{n} FW_i}$; trong đó FW_ilà trọng số của nhân tố của tham số thứ i; n là tổng số các thông số.

* Tính toán chỉ số chất lượng hạt (GQI)

Các trọng số trong tính GQI được tính toán bằng phương pháp phân tích thành phần chính/phân tích nhân tố (PCA/FA) theo phương trình 2.4.

Trong đó, n là số lượng tham số hạt, w_i là trọng số của tham số thứ i và s_i là điểm của tham số thứ i. Giá trị của w_i được suy ra từ kết quả của phương pháp PCA/FA, trong khi s_i được xác định bằng cách sử dụng phương trình 5 hoặc 6 của tổng cộng 9 thông số hạt. Nhóm "càng nhiều càng tốt" bao gồm N, P, K, Na, Ca và Mg trong khi các thông số còn lại thuộc nhóm "ít hơn là tốt hơn".

$$GQI = \sum_{i=1}^{n} w_i \, s_i \qquad (2.4)$$

Đối với các thông số thuộc nhóm "càng nhiều càng tốt", giá trị của s_i được tính bằng phương trình 2.5.

$$\frac{x_i - x_{min}}{x_{max} - x_{min}} \qquad (2.5)$$

Các thông số "ít hơn là tốt hơn" sẽ được tính giá trị của si bằng phương trình 2.6.

$$\frac{x_{max} - x_i}{x_{max} - x_{min}} \qquad (2.6)$$

Trong đó, x_i đại diện cho giá trị của tham số i được phân tích, x_{min} và x_{max} lần lượt là giá trị tối thiểu và tối đa của tham số đó.

Trọng số của nhân tố (FW) được tính dưới dạng $\frac{e_i}{Sum}$, trong đó e_i là giá trị riêng của nhân tố i và *Sum* là tổng giá trị riêng của tất cả các nhân tố còn lại sau PCA/FA. Trọng số của các thông số được tính dưới dạng $\frac{FW_i}{\sum_{i=1}^{n} FW_i}$; trong đó FW_i là trọng số của nhân tố của tham số thứ i; n là tổng số các thông số.

* Tính toán chỉ số ô nhiễm kim loại (HPI)

Chỉ số ô nhiễm kim loại nặng trong đất (HPIs) và nhiễm kim loại nặng trong hạt (HPIg) được tính toán bằng phương pháp của Le and Nguyen [117] được thể hiện trong phương trình sau (phương trình 2.7):

$$\text{HPI} = \frac{\sum_{i=1}^{n} Q_i W_i}{\sum_{i=1}^{n} W_i} \qquad (2.7)$$

Trong đó n là số lượng kim loại nặng được kiểm tra; *Wi* bằng 1/*S*i; Si là tiêu chuẩn chất lượng trong đất hoặc trong hạt của kim loại thứ *i*; *Qi* = (*Vi/Si*)*100; V*i* là nồng độ đo được của kim loại thứ i. Si được tính theo giới hạn tối đa cho phép của kim loại nặng trong đất và cây trồng đã được các cơ quan quản lý tiêu chuẩn như Tổ chức Y tế Thế giới (WHO), Tổ chức Lương nông Liên Hiệp Quốc (FAO) và hướng dẫn tiêu chuẩn Châu Âu [118] như thể hiện trong đất và trong thực vật với µg/g = mg/kg: Cd = 3, Co = 50, Cu = 100, Ni = 50, Pb = 100, Zn = 300; Cd = 0.10, Co = 50.00, Cu = 73.00, Ni = 67.00, Pb = 0.30, Zn = 100.

Tiêu chuẩn phân hạng của HPI được tuân thủ theo nghiên cứu của Mohan, et al. [119]: Low (mức thấp/chấp nhận được) = 25-50, Moderate (trung bình) = 51-100; High (cao/rất cao) > 100.

* Phân tích thành phần chính/nhân tố (PCA/FA)

Phân tích PCA/FA bằng phần mềm JMP Pro để xác định trọng số (w_i) của các thông số đất riêng lẻ theo quy trình được mô tả bởi Nguyen, et al. [116]. Các nhân tố có giá trị riêng lớn hơn 1 được giữ lại để ước tính trọng số của các thông số đất có tải lượng cao (> 0,5) với hệ số tương ứng.

* Phân tích phương sai và tương quan

Các số liệu được xử lý thống kê suy luận và mô tả (tùy theo từng trường hợp cụ thể). Thống kê mô tả bao gồm việc tính giá trị trung bình, giá trị cao nhất, thấp nhất cũng như sai số chuẩn bằng phần mềm Excel. Phân tích tương quan được dùng để khảo sát mối liên hệ giữa các chỉ số và thông số đất nghiên cứu bằng phần mềm SigmaPlot.

Phân tích phương sai (ANOVA) hai chiều bằng phần mềm JMP Pro để đánh giá các ảnh hưởng đơn lẻ hoặc tương tác giữa các loại đất và mùa đến các thông số đất. Kết quả phân tích phương sai nếu có ý nghĩa thống kê thì trắc nghiệm *Tukey's* Honest

Significant Difference *test* được sử dụng để phân hạng trung bình của các công thức. Phân tích tương quan đa biến giữa chỉ số chất lượng đất (SQI) với các chỉ số kim loại nặng trong đất (HPIs) được áp dụng để xác định mối tương quan giữa 2 chỉ số này của các loại đất khác nhau.

* Hiệu quả kinh tế

Hiệu quả kinh tế của sản xuất lúa nước khu vực khảo sát áp dụng theo nghiên cứu của Thanh [120] gồm các chỉ tiêu tổng chi phí đầu tư, doanh thu, lợi nhuận, tỷ suất lợi nhuận: Tổng chi phí (TCP): là tất cả các khoản đầu tư mà nông hộ bỏ ra trong quá trình sản xuất và thu hoạch lúa, gồm: chi phí giống, phân bón, thuốc bảo vệ thực vật, chi phí lao động, chi phí thu hoạch. TCP = Chi phí lao động + Chi phí vật chất + Chi phí khác. Doanh thu (DT): Doanh thu sản xuất lúa hữu cơ là toàn bộ số tiền đã thu được do bán sản phẩm của nông hộ. DT = Giá bán × Tổng sản lượng Lợi nhuận (LN): lợi nhuận sản xuất lúa là phần còn lại của tổng giá trị sản phẩm trừ đi tổng chi phí sản xuất lúa. LN = Giá trị tổng sản phẩm – tổng chi phí.

2.2.2 Nội dung 2: Đánh giá sự ảnh hưởng của than sinh học lên các yếu tố môi trường và năng suất lúa trên các loại đất trồng lúa chính quy mô nhà lưới

Không gian nghiên cứu: Thí nghiệm được thực hiện với quy mô nhà lưới tại Vườn thực nghiệm - Trường Đại học Công nghiệp, Thành phố Hồ Chí Minh.

Vật liệu thí nghiệm:

* Đất thí nghiệm: Đất thực hiện thí nghiệm quy mô nhà lưới là các loại đất (đất phù sa, đất mặn, đất xám và đất phèn) được lấy tại các điểm như Nội dung 1. Đất thí nghiệm được thu trong khoảng thời gian vụ Đông Xuân. Lấy mẫu đất: Phương pháp lấy mẫu được dựa trên TCVN 7538-1:2006/BKHCN về Chất lượng đất - Lấy mẫu; Phần 1 - Hướng dẫn lập chương trình lấy mẫu và TCVN 7538-2:2005/BKHCN về Chất lượng đất - Lấy mẫu; Phần 2 - Hướng dẫn kỹ thuật lấy mẫu. Trên mỗi ruộng được chọn, mẫu đất được lấy từ 5 điểm chéo góc đến độ sâu 15 cm. Để thực hiện thí nghiệm này có 5 ruộng được xác định thu mẫu đất theo 5 điểm chéo góc trên mỗi ruộng, mỗi điểm lấy 4 kg đất tươi, sẽ có 20 kg đất cho mỗi ruộng, tổng cộng 5

ruộng sẽ thu 200 kg đất. Đất sau khi được lấy, được phơi khô trong không khí, nghiền và rây qua rây 2 mm để chuẩn bị bố trí thí nghiệm.

* Than sinh học: Than trấu và than nhãn được lựa chọn làm vật liệu cho thí nghiệm này vì những lý do thực tiễn và khoa học rõ ràng: cả hai đều là phụ phẩm bản địa phổ biến, dễ thu gom và có chuỗi cung ứng ổn định ở vùng nghiên cứu, thuận lợi cho thử nghiệm quy mô và khả năng nhân rộng; về mặt tính chất, than trấu (nguồn gốc vỏ lúa) và than nhãn (nguồn gốc gỗ cành) đại diện cho hai kiểu cơ chế tác động bổ sung, than trấu thường giàu tro/silica, khả năng nâng pH và hấp phụ ion mạnh, phù hợp cho xử lý đất phèn, trong khi than nhãn có cấu trúc ligno-cellulosic bền vững hơn, C ổn định và đặc tính giữ nước khác biệt; việc so sánh hai loại này giúp làm sáng cơ chế tác động hóa học lên SQI, HPI và CH_4; đồng thời lựa chọn này giảm thiểu cạnh tranh sử dụng phụ phẩm có giá trị cao khác (ví dụ rơm cho chăn nuôi/ủ phân, bã mía cho năng lượng). Than trấu và than nhãn được mua tại các cửa hàng gần khu vực thí nghiệm. Mẫu than đã giã nhỏ và sàng qua rây 5mm. Trước khi áp dụng vào các ô thí nghiệm, hai loại than sinh học này đã được thu thập trong ba mẫu để tiến hành phân tích hóa học tương tự như mẫu đất. Tính chất của các loại than được phân tích và trình bày ở Bảng 3.5.

* Giống lúa áp dụng trong thí nghiệm này là giống theo địa phương đang canh tác: Giống lúa OM5451, ưu điểm của giống lúa này có thể trồng được quanh năm và phù hợp với hầu hết các tỉnh thành phía Nam, với đặc tính nổi bật như khả năng chịu đựng với môi trường khắc nghiệt, chống lại sâu bệnh và nấm phát triển.

Thiết lập thí nghiệm: Thí nghiệm được thiết lập theo kiểu hai yếu tố hoàn toàn ngẫu nhiên ba lần lặp lại. Yếu tố 1 là các loại đất khác nhau (bốn loại đất), và yếu tố hai là than sinh học (không sử dụng than, than trấu và than thân cành nhãn, Bảng 1.1 - Phụ lục 1). Tổng cộng có 12 công thức nghiên cứu và 36 chậu thí nghiệm. Tỷ lệ than sinh học áp dụng cho thí nghiệm này là 10 tấn/ha, nằm trong khoảng tỷ lệ áp dụng bởi Zhang, et al. [121]. Mỗi chậu có kích thước cao 27 cm x đường kính 16 cm có thể chứa 4 kg đất. Than sinh học được áp dụng cho công thức 2 và 3 với tỷ lệ

10 tấn/ha tương ứng 25g/4kg đất. Lượng đất cho vào chậu được tính tương đương với đất khô kiệt, bằng cách xác định lượng nước còn lại trong đất thông qua việc sấy khô đất ở 105°C qua đêm. Sau đó lượng nước này được khấu trừ vào lượng đất thực tế cân vào các chậu. Cách làm này cũng được áp dụng cho việc xác định khối lượng các loại than cho mỗi chậu thí nghiệm. Các biện pháp kỹ thuật khác đều áp dụng giống nhau cho tất cả các công thức thí nghiệm. Tưới ngập nước toàn bộ chậu thí nghiệm và giữ mức nước ngập 5 cm và tưới bổ sung ít nhất 1 lần/ngày. Than sinh học (than nhãn và than trấu) sẽ được áp dụng một lần và được trộn đều từng chậu. Các chậu thí nghiệm được trồng lúa trong 4 tháng (bắt đầu được tính từ cuối tháng 10 năm 2023 đến hết tháng 01 năm 2024). Thí nghiệm được tiến hành trong nhà lưới với điều kiện nhiệt độ ngày/đêm khoảng 28 ± 2°C/22 ± 2°C, độ ẩm tương đối duy trì 60-80% và chu kỳ sáng 12-14 giờ/ngày. Chế độ tưới là giữ ngập liên tục (mực nước 5 cm) để mô phỏng ruộng ngập truyền thống. Đất trong thí nghiệm được giữ ở trạng thái nguyên sinh nhằm bảo tồn cộng đồng vi sinh đất bản địa vì mục tiêu nghiên cứu là đánh giá hiệu lực của than sinh học trên phát thải CH_4. Phân bón nền được bón theo khuyến cáo kỹ thuật (N 80 kg/ha; P_2O_5 40 kg/ha; K_2O 40 kg/ha).

Quan trắc thí nghiệm:

* Đất: Sau khi kết thúc thí nghiệm, phần đất khi đã tách rễ ra được gom lại, trộn đều với nhau khoảng 0,5 kg được thu. Đất được chuyển về phòng thí nghiệm, phơi khô trong không khí và nghiên qua ray 2mm để phân tích. Đất trước và sau thí nghiệm được phân tích hóa học các chỉ tiêu như Nội dung 1 (Bảng 3.5, 3.6, 3.7, 3.8 và 3.9).

* Rễ: Lấy phần đất ở tầng mặt 0-10 cm bao gồm rễ và đặt trên tấm nilon sạch. Rễ được tách ra khỏi đất, ngâm phần rễ trong nước để tách đất ra dễ hơn và rửa sạch tất cả phần đất bám vào rễ. Cắt rễ tách ra khỏi thân lá, sau đó cắt phần rễ thành từng phần nhỏ khoảng 2 cm, cân khối lượng ướt. Sau đó bỏ vào bọc kín, đánh số thứ tự.

* Rơm: Rơm được cắt tách ra khỏi rễ, sau đó tách phần hạt lúa ra. Rửa sạch phần thân lá và dùng kéo cắt ra thành từng đoạn khoảng 10 cm. Tiến hành cân trọng

lượng tươi các sinh khối lúa sau khi thu hoạch, ghi chú lại trọng lượng của bọc kín. Chuyển các sinh khối lúa vào phòng thí nghiệm, sấy khô và cân trọng lượng khô.

* Năng suất hạt: Lúa nằm trong từng chậu sẽ được gặt để riêng, tuốt lấy hạt, đem cân tươi từng chậu. Lúa của các chậu thu được phơi khô đến độ ẩm 14%, quạt sạch, sau đó cân để tính năng suất khi khô. Cũng trong từng chậu mẫu đó, phần rơm rạ được lấy từ mặt đất trở lên. Rơm thu được từ mỗi chậu đem cân tươi từng chậu để tính năng suất tươi. Sau đó phơi khô và cân lại để tính năng suất rơm khi khô và độ ẩm thất thoát khi phơi. Năng suất rơm khô được tính từ năng suất rơm tươi sau khi trừ hàm lượng nước.

* Quan trắc phát thải khí CH_4: Phát thải khí CH_4 được quan trắc theo phương pháp buồng kín (closed chamber) của [122]. Buồng kín được sử dụng đo CH_4 cho thí nghiệm nhà lưới dạng có dạng hình trụ, đường kính 18 cm, chiều cao 120 cm. Đặt buồng chính giữa chậu, nắp kín khít với miệng chậu, đảm bảo mực nước trong chậu bên trong buồng bằng với mực nước bên ngoài trước khi đóng buồng. Không che phủ hoàn toàn ánh sáng cho cây trong thời gian ngắn đo. Tần suất đo phát thải khí nhà kính là khoảng 7 đến 10 ngày một lần. Hút khí từ buồng kín bằng xilanh. Buồng có thể tích xác định được chụp lên bề mặt mỗi chậu, dán keo để đảm báo mặt tiếp xúc giữa buồng chụp và mặt chậu được kín, hút khí ở thời điểm 0 phút, 10 phút, 20 phút và 40 phút sau khi chụp buồng trên chậu, lưu khí trong ống thuỷ tinh trung tính, kín, thể tích 20 ml đã được hút chân không. Mẫu khí được trong thời điểm từ 8 - 11h sáng và đo khí CH_4 bằng máy sắc ký khí (Model GC–SRI 8610C).

Tính toán và phân tích số liệu: Thực hiện tương tự như Nội dung 1.

2.2.3 Nội dung 3: Đánh giá sự ảnh hưởng của than sinh học lên các yếu tố môi trường và năng suất lúa ở mô hình thí nghiệm quy mô thực địa

Không gian nghiên cứu:

Thí nghiệm trên đất phèn hoạt động: Thí nghiệm được tiến hành tại ruộng lúa ở xã Tân Thạnh Đông (nay là xã Phú Hòa Đông), huyện Củ Chi (cũ), thành phố Hồ Chí Minh, Việt Nam (10°55'35.7" N 106°35'24.9" E). Các cánh đồng lúa được chọn

trong thí nghiệm này thuộc loại đất phèn hoạt động (*Thionic fluvisols)* theo thuộc hệ thống phân loại WRB [111].

Thí nghiệm trên đất xám: Thí nghiệm được thực hiện trên cánh đồng canh tác lúa có diện tích 180 m^2 (10.59497°N, 106.24001°E) tại xã Thái Mỹ (nay là xã Củ Chi), huyện Củ Chi cũ, thành phố Hồ Chí Minh. Cánh đồng lúa trong thí nghiệm này thuộc loại đất xám gley (*Gleyic Acrisols*) theo thuộc hệ thống phân loại WRB [111].

Các cánh đồng của cả hai khu vực có lịch sử hơn 20 năm trồng lúa liên tục, mỗi năm trồng 2 vụ. Nằm trong vùng khí hậu nhiệt đới gió mùa với hai mùa rõ rệt: mùa mưa từ tháng 5 đến tháng 11 và mùa khô từ tháng 12 đến tháng 4 năm sau. Tổng lượng mưa trong khu vực dao động từ 1800 đến 2000 mm và nhiệt độ trung bình thay đổi trong khoảng 27 đến 28°C [123].

Vật liệu thí nghiệm:

* Đất thí nghiệm: Thí nghiệm thiết lập tại khu vực xã Tân Thạnh Đông cũ (nay là xã Phú Hòa Đông) thuộc loại đất phèn hoạt động (*Thionic Fluvisols)*. Đất này có thành phần cơ giới nặng, chua, hàm lượng mùn và đạm tổng số giàu đến rất giàu, kali đạt mức trung bình thấp đến trung bình và lân thường nghèo. Các độc chất như sulfate, sắt và nhôm trong tầng đất mặt thường ở mức trung bình đến trung bình thấp. Loại đất này được đánh giá chung là có độ phì trung bình đến trung bình thấp và ẩn chứa độc tố khá cao do có phèn tiềm tàng sâu. Cánh đồng lúa khu vực này đang luân canh hai vụ lúa/năm. Thí nghiệm thiết lập tại khu vực xã Thái Mỹ cũ (nay là xã Củ Chi) thuộc loại đất xám gley (*Gleyic Acrisols*) có thành phần cơ giới nhẹ, chua và có hàm lượng dinh dưỡng trung bình thấp. Các yếu tố dinh dưỡng trong đất thường không cân đối, hữu cơ và đạm khá đến rất giàu, song lân và kali lại nghèo. Hiện tại khu vực này người dân đang canh tác luân canh hai vụ lúa và một vụ bắp.

* Than sinh học: Hai loại than sinh học là than trấu và than nhãn tiếp tục được lựa chọn và có nguồn gốc như được mô tả trong nội dung 2. Kết quả phân tích thành phần hóa học của than được thể hiện trong Bảng 3.11.

* Giống lúa áp dụng trong hai thí nghiệm này là giống theo địa phương đang canh tác. Thí nghiệm trên đất phèn hoạt động: Giống lúa Đài Thơm 8, đặc trưng giống lúa này là lá cứng và xanh, hạt dài, màu vàng tươi và có khả năng kháng một số loại sâu bệnh ở mức trung bình. Thí nghiệm trên đất xám: Giống lúa OM 5451, ưu điểm của giống lúa này có thể trồng được quanh năm với đặc tính nổi bật như khả năng chịu đựng với môi trường khắc nghiệt, chống lại sâu bệnh và nấm phát triển.

* Thiết lập thí nghiệm: Thí nghiệm trên ruộng được thiết lập theo kiểu khối đủ ngẫu nhiên bao gồm 5 công thức với 3 lần nhắc lại, tương ứng là 15 ô cơ sở. Công thức 1 không bổ sung than sinh học, công thức bổ sung 12 kg than trấu, công thức 3 bổ sung 24 kg than trấu, công thức 4 bổ sung 12 kg than nhãn, công thức 5 bổ sung 24 kg than nhãn (Bảng 1.2 - Phụ lục 1). Các tỷ lệ than sinh học áp dụng cho thí nghiệm này tương đương 10 và 20 tấn/ha, nằm trong khoảng tỷ lệ áp dụng bởi Zhang, et al. [121]. Kích thước của mỗi ô cơ sở (4m x 3m) là 12 m^2 [121]. Giữa các ô cơ sở sẽ được xây một mương dẫn nước nhỏ (chiều rộng khoảng 1m) để vừa ngăn cách các ô cơ sở vừa tưới tiêu cho các ô cơ sở. Sơ đồ bố trí thí nghiệm được trình bày ở Hình 2.5 - Phụ lục 2.

* Than sinh học được áp dụng một lần vào đầu vụ lúa thứ nhất. Than sinh học được rải đều trên diện tích bề mặt đất của từng ô cơ sở, sau đó than sẽ được vùi vào đất tầng 0 - 10 cm bằng cuốc tay. Các loại phân khác như phân hữu cơ và vô cơ được áp dụng như Luu and Nguyen [124] và kinh nghiệm địa phương (N = 80 kg/ha, P_2O_5 = 40 kg/ha và K_2O = 40 kg/ha trên mỗi vụ). Tất cả ô thí nghiệm được quản lý đồng nhất theo khuyến nghị kỹ thuật địa phương như quản lý nước giữ mực 3-5 cm giai đoạn sinh trưởng, tháo bớt nước 7-10 ngày trước thu hoạch. Làm cỏ bằng cách nhổ tay, chỉ phun hóa học khi vượt ngưỡng gây hại theo khuyến cáo kỹ thuật địa phương (thí nghiệm này không phun hóa học).

Quan trắc thí nghiệm:

Năng suất hạt được quan trắc bằng cách dùng một khung mẫu có kích thước 1m^2 (1m x 1m) định vị lên phần diện tích lúa đã chín trên mỗi ô thí nghiệm (năm khung

mẫu/ô thí nghiệm). Lúa nằm trong các khung sẽ được gặt để riêng, tuốt lấy hạt, đem cân tươi từng khung. Lúa của 15 ô thu được phơi khô đến độ ẩm 14%, quạt sạch, sau đó cân để tính năng suất khi khô (tạ/ha). Cũng trong năm khung mẫu đó, phần rơm rạ được lấy từ mặt đất trở lên. Rơm thu được từ mỗi ô đem cân tươi từng ô sau đó để tính năng suất tươi. Sau đó phơi khô và cân lại để tính năng suất rơm khi khô và độ ẩm thất thoát khi phơi. Năng suất rơm khô được tính từ năng suất rơm tươi sau khi trừ hàm lượng nước. Trên mỗi ô hình vuông đo năng suất hạt, chọn lại 2 điểm, mỗi điểm có diện tích là 20cm × 20cm để thu năng suất rễ. Đất toàn bộ diện tích của 2 điểm này được đào lên đến độ sâu 15cm. Rễ từ các mẫu đất này được tách riêng, rửa sạch, phơi khô và cân lấy trọng lượng.

Lấy mẫu đất: Đất từ các mẫu ở trên sau khi đã tách rễ được gom lại theo từng ô thí nghiệm. Tổng cộng có 15 mẫu đất trong 15 ô thí nghiệm được lấy sau thí nghiệm. Trước thí nghiệm toàn bô ruộng lúa được chia thành 3 phần; mỗi phần được lấy 1 mẫu đất từ 5 điểm chéo gốc trong phần đó. Tổng công các mẫu đất trước và sau thí nghiệm được xử lý và phân tích các thông số như được mô tả ở nội dung 1 và được thể hiện trong Bảng 3.11, 3.12, 3.13, 3.14 và 3.15.

Quan trắc phát thải khí CH_4: Phát thải khí CH_4 được quan trắc theo phương pháp buồng kín (closed chamber) của [122]. Buồng kín dùng để cho CH_4 trong thí nghiệm này có dạng hình hộp vuông có diện tích đáy 2,5 m^2. Chiều cao buồng 1,2 m theo chiều cao cây lúa để không bóp ngạt ngọn cây. Đóng vành buồng vào đất trước ngày đo (tối thiểu 1-2 ngày), cắm sâu 5-10 cm để kín khí, tránh rò rỉ và nước tràn vào xung quanh khi đóng nắp. Khi đóng nắp, bên trong buồng sẽ chứa cây và nước, đảm bảo mực nước trong buồng bằng mực nước ngoài ruộng. Tần suất đo phát thải khí nhà kính là một tuần 1 lần. Tổng số lần quan trắc khí thải cho 2 vụ lúa liên tục 20 lần. hút khí từ buồng kín bằng xilanh. Buồng có thể tích xác định được chụp lên bề mặt ruộng để thu khí, hút khí ở thời điểm 0, 10, 20 và 40 phút sau khi chụp buồng trên đất, lưu khí trong ống thuỷ tinh trung tính, kín, thể tích 20 ml đã được hút chân không. Mẫu khí được trong thời điểm từ 8-11h sáng và đo khí CH_4 bằng máy sắc ký khí (Model GC–SRI 8610C).

Tính toán và phân tích số liệu: Thực hiện tương tự như Nội dung 1.

2.2.4 Nội dung 4: Đánh giá hiệu quả môi trường, kinh tế của các mô hình thí nghiệm và đề xuất các giải pháp nâng cao tính bền vững trong canh tác lúa nước

Dựa trên kết quả của nội dung 1, 2 và 3 để đánh giá hiệu quả kinh tế và môi trường, từ đó đánh giá hiệu quả của các mô hình thực nghiệm. Hiệu quả kinh tế của mô hình sản xuất lúa nước ở quy mô thực địa được tính bằng hiệu số giữa giá trị tổng sản phẩm thu được và tổng chi phí. Trong đó, giá trị tổng sản phẩm là nguồn thu vào từ việc bán hạt lúa và rơm; tổng chi phí bao gồm các khoản chi từ vật chất và lao động như ở nội dung 1. Mặt khác, nội dung này có thêm phần thu từ việc giảm phát thải CH_4 và tích lũy carbon trong đất dựa vào nguyên tắc tín chỉ carbon nên hiệu quả kinh tế trong nội dung này được đánh giá dựa trên 2 kịch bản. Kịch bản 1 chỉ tính thu nhập từ bán hạt và rơm, phương pháp tính hiệu quả kinh tế thể hiện như nội dung 1. Kịch bản 2 bổ sung giá trị tín chỉ carbon trong đất và carbon quy đổi dựa trên lượng CH_4 giảm phát thải. Lượng C tích lũy/ha trong độ dày tầng đất 15 cm được tính theo phương trình 2.8 dưới đây.

$$CT = BD * OC * D * 100 \qquad (2.8)$$

Trong đó CT là lượng carbon hữu cơ tích lũy trong đất tính theo đơn vị (tấn/ha); BD là dung trọng của đất (g/cm^3); OC là lượng carbon hữu cơ trong đất (%) từ kết quả phân tích; D là chiều sâu mẫu đất (cm); 100 là hệ số chuyển đổi để có kết quả là tấn/ha. Tính tín chỉ carbon được tính bằng CO_2e theo phương trình 2.9.

$$Tín\ chỉ\ carbon\ từ\ đất = CT_{TSH} - CT_{ĐC} * \frac{44}{12} \qquad (2.9)$$

Trong đó, CT_{TSH} là lượng carbon tích lũy của các công thức có sử dụng than sinh học; $CT_{ĐC}$ là lượng carbon tích lũy của công thức không sử dụng than sinh học. Tín chỉ carbon thu được từ giảm phát thải CH_4 được tính theo phương trình 2.10.

$$ECO_2e = \left(CH_{4_{ĐC}} - CH_{4_{TSH}}\right) * 25 \qquad (2.10)$$

Trong đó, $CH_{4_{ĐC}}$ là lượng CH_4 phát thải từ công thức đối chứng (CT1); $CH_{4_{TSH}}$ là lượng CH_4 phát thải của các công thức có sử dụng than sinh học; 25 là hệ số chuyển đổi từ CH_4 sang CO_2e (GWP_{100}); E_CO_2e là lượng CO_2 tương đương giảm phát thải được tính cho 1 ha. Một tín chỉ carbon được tính tương đương 1 tấn CO_2e tích lũy trong đất hoặc 1 tấn CO_2e giảm phát thải CH_4 từ việc áp dụng than sinh học.

Chỉ số hiệu quả môi trường (Environmental Efficiency Index - ENI):

$$ENI = \frac{ENI_{SQI}+EN\ _{GQI}+ENI_{HPIs}+ENI_{HPIg}+EMI_{CH4}}{5} \quad (2.11)$$

Trong đó các ENI được tính từ:

$$ENI_{thành\ phần} = \frac{x_i - x_{đc}}{x_{đc}}\ x\ 100 \quad (2.12)$$

Trong đó x_i là giá trị các chỉ số SQI, HPIs, GQI, HPIg, và lượng phát thải CH_4 của các công thức có sử dụng than sinh học, và $x_{đc}$ là các chỉ số đó của công thức đối chứng không sử dụng than sinh học.

Chỉ số hiệu quả kinh tế (Economic Efficiency Index – ENI):

$$ECI = \frac{x_{i\ chuẩn} - x_{đc\ chuẩn}}{x_{đc\ chuẩn}}\ x\ 100 \quad (2.13)$$

Các $x_{i\ chuẩn}$, $x_{đc\ chuẩn}$ tương ứng là hiệu quả kinh tế của các công thức có sử dụng than sinh học và đối chứng sau khi đã được chuẩn hoá:

$$x_{chuẩn} = \frac{x_i - x_{min}}{x_{max} - x_{min}}\ x\ 100 \quad (2.14)$$

Trong đó x_i, x_{min} và x_{min} tương ứng là giá trị hiệu quả kinh tế của công thức, hiệu quả kinh tế nhỏ nhất, hiệu quả kinh tế lớn nhất của tất cả các công thức nghiên cứu trong cùng 1 loại đất.

CHƯƠNG 3 KẾT QUẢ NGHIÊN CỨU VÀ THẢO LUẬN

3.1 Hiện trạng chất lượng môi trường đất và hiệu quả kinh tế trong sản xuất lúa nước vùng nghiên cứu

3.1.1 Chất lượng môi trường đất của các loại đất đặc trưng canh tác lúa nước trong mùa khô và mùa mưa

3.1.1.1 Các thông số chất lượng đất và kim loại trong đất của các loại đất

Bảng 3.1 Tính chất của đất phù sa, mặn, xám và phèn canh tác lúa trong hai mùa

Mùa	Loại đất	pH	EC (dS/m)	CEC (cmol(+)/kg)	NH_4^+ (mg/kg)	P dễ tiêu (mg/kg)	OC (%)	Cl^- (g/kg)	SO_4^{2-} (g/kg)
Mưa	Phù sa	$5,89^{a}$ ± 0,13	$0,42^{cd}$ ± 0,02	$8,82^{c}$ ± 0,50	$69,13^{b}$ ± 1,86	$19,49^{d}$ ± 2,83	$3,46^{b}$ ± 0,08	$1,03^{d}$ ± 0,06	$0,90^{d}$ ± 0,05
	Mặn	$5,65^{abc}$ ± 0,06	$0,47^{c}$ ± 0,04	$9,11^{c}$ ± 1,11	$63,60^{b}$ ± 3,73	$23,33^{d}$ ± 1,09	$3,45^{b}$ ± 0,09	$2,22^{b}$ ± 0,22	$1,39^{c}$ ± 0,04
	Xám	$5,65^{bc}$ ± 0,08	$0,25^{e}$ ± 0,02	$6,62^{d}$ ± 0,21	$68,10^{b}$ ± 3,77	$38,99^{b}$ ± 1,17	$2,08^{c}$ ± 0,02	$0,92^{d}$ ± 0,05	$0,44^{e}$ ± 0,02
	Phèn	$5,8^{ab}$ ± 0,14	$0,6^{b}$ ± 0,07	$10,0^{bc}$ ± 0,47	$70,6^{b}$ ± 2,10	$18,1^{d}$ ± 3,03	$4,2^{a}$ ± 0,14	$1,0^{d}$ ± 0,15	$2,1^{b}$ ± 0,15
Khô	Phù sa	$5,00^{e}$ ± 0,03	$0,41^{cd}$ ± 0,02	$9,62^{c}$ ± 0,42	$89,93^{a}$ ± 3,92	$31,81^{c}$ ± 2,78	$3,54^{b}$ ± 0,13	$1,44^{c}$ ± 0,04	$0,98^{d}$ ± 0,09
	Mặn	$5,42^{cd}$ ± 0,04	$0,91^{a}$ ± 0,05	$11,47^{a}$ ± 0,32	$86,24^{b}$ ± 1,14	$30,99^{c}$ ± 3,17	$3,51^{b}$ ± 0,11	$2,88^{a}$ ± 0,17	$1,41^{c}$ ± 0,05
	Xám	$5,34^{d}$ ± 0,07	$0,33^{de}$ ± 0,01	$8,55^{c}$ ± 0,37	$71,42^{b}$ ± 2,99	$53,84^{a}$ ± 1,48	$2,24^{c}$ ± 0,08	$0,86^{d}$ ± 0,02	$0,47^{e}$ ± 0,07
	Phèn	$4,63^{f}$ ± 0,07	$0,70^{b}$ ± 0,04	$11,77^{a}$ ± 0,50	$86,02^{a}$ ± 3,81	$43,78^{b}$ ± 2,27	$4,25^{a}$ ± 0,21	$1,98^{b}$ ± 0,12	$3,85^{a}$ ± 0,13

Ghi chú: Dữ liệu ở các bảng trong mục này được trình bày dưới dạng trung bình (TB) và SE (sai số chuẩn của giá trị trung bình với n = 10). EC: Độ dẫn điện, CEC: Khả năng trao đổi cation, TrĐ: Trao đổi.

Vào mùa mưa, đất phèn và đất phù sa có pH cao nhất (5,80 và 5,89) trong khi đất mặn và đất xám ổn định ở mức khoảng 5,65 (Bảng 3.1). Mùa khô, đất phèn chua mạnh nhất (4,63) và phù sa thấp hơn (5,00). Đất mặn luôn có EC lớn nhất (mưa 0,47; khô 0,91 dS/m), còn đất xám thấp nhất (0,25-0,33 dS/m). Về CEC, đất phèn mùa khô đạt cao nhất (11,77 cmol(+)/kg), mùa mưa giảm nhẹ (10,0), trong khi đất xám thấp nhất cả hai mùa (6,62-8,55). Hàm lượng NH_4^+ và P dễ tiêu cao ở mùa khô, đất phèn NH_4^+ - 86,02 mg/kg và P - 43,78 mg/kg. Đất phù sa NH_4^+ - 89,93 mg/kg,

đất xám P cao nhất 53,84 mg/kg. OC cao nhất ở đất phèn cả trong mùa mưa và mùa khô và thấp nhất ở đất xám. Nồng độ Cl^- và SO_4^{2-} lớn nhất ở đất mặn (2,22-2,88 và 1,39-1,41 g/kg), tiếp đến là đất phèn, trong khi các đất khác duy trì mức thấp.

Bảng 3.2 Hàm lượng trao đổi các nguyên tố trong đất phù sa, mặn, xám và phèn canh tác lúa trong hai mùa

Mùa	Loại đất	Độ $chua_{TrĐ}$	$H^+_{TrĐ}$	$K_{TrĐ}$	$Na_{TrĐ}$	$Ca_{TrĐ}$	$Mg_{TrĐ}$	$Al_{TrĐ}$	$Fe_{TrĐ}$	$Mn_{TrĐ}$
		(cmol(+)/kg)		(mg/kg)						
Mưa	Phù sa	3,00^{cd} ± 0,21	1,06^{c} ± 0,10	1994,00^{b} ± 136,56	748,39^{d} ± 31,39	342,36^{e} ± 13,84	95,55^{c} ± 2,79	130,46^{e} ± 2,89	30,43^{e} ± 0,86	21,36^{e} ± 0,32
	Mặn	2,70^{d} ± 0,21	1,33^{c} ± 0,19	1649,64^{c} ± 33,59	832,89^{d} ± 28,78	443,34^{cde} ± 29,25	441,75^{a} ± 21,90	434,91^{d} ± 6,38	39,41^{d} ± 0,57	46,71^{c} ± 0,77
	Xám	1,32^{f} ± 0,12	0,71^{d} ± 0,09	424,68^{f} ± 30,99	119,09^{g} ± 3,20	407,70^{de} ± 42,77	91,03^{c} ± 1,39	19,08^{f} ± 0,35	16,45^{f} ± 0,35	25,03^{de} ± 0,25
	Phèn	3,5^{b} ± 0,27	1,7^{b} ± 0,11	1078,1^{e} ± 44,17	573,4^{e} ± 48,66	501,2^{cd} ± 27,53	219,0^{b} ± 9,69	909,5^{b} ± 44,56	99,6^{b} ± 2,33	72,4^{b} ± 1,74
Khô	Phù sa	3,30^{bc} ± 0,09	1,31^{c} ± 0,04	2.232,31^{a} ± 122,1	1.053,05^{c} ± 37,24	498,55^{cd} ± 55,24	100,90^{c} ± 9,85	168,82^{e} ± 3,45	41,97^{cd} ± 1,81	25,62^{de} ± 2,89
	Mặn	2,91^{cd} ± 0,10	1,92^{b} ± 0,05	1.885,96^{bc} ± 89,17	2.563,45^{a} ± 1,58	512,14^{bc} ± 22,96	467,19^{a} ± 18,04	817,33^{c} ± 11,09	44,87^{c} ± 1,05	52,44^{c} ± 1,52
	Xám	1,87^{e} ± 0,04	1,04^{c} ± 0,07	622,29^{f} ± 28,81	413,61^{f} ± 12,49	750,54^{a} ± 33,32	96,44^{c} ± 2,45	21,16^{f} ± 0,90	18,03^{f} ± 0,51	30,00^{d} ± 0,84
	Phèn	5,63^{a} ± 0,13	3,58^{a} ± 0,08	1.360,97^{d} ± 101,32	3.307,81^{b} ± 53,92	614,97^{b} ± 50,98	214,23^{b} ± 14,88	1.320,81^{a} ± 18,96	132,47^{a} ± 2,27	90,57^{a} ± 5,22

Trong cả hai mùa, đất phèn thể hiện độ $chua_{TrĐ}$ và $H^+_{TrĐ}$ cao nhất (mưa 3,50 và 1,70; khô 5,63 và 3,58 cmol(+)/kg), kèm theo nồng độ $Al_{TrĐ}$ lớn nhất (mưa 909,5; khô 1.320,8 mg/kg), cho thấy tính axit mạnh và nguy cơ ngộ độc nhôm cao (Bảng 3.2). Ngược lại, đất xám có độ chua thấp nhất (mưa - 1,32; khô - 1,87 mg/kg) và $Al_{TrĐ}$ rất thấp (mưa - 19,1; khô - 21,2 mg/kg), phản ánh khả năng chua hạn chế. Về cation kiềm, $K_{TrĐ}$ cao nhất ở đất phù sa mùa khô (2.232,3 mg/kg) và đất mặn mùa khô (1.886,0 mg/kg), trong khi $Na_{TrĐ}$ cao ở đất phèn - 3.307,8 mg/kg) và đất mặn mùa khô - 2.563,5 mg/kg, phản ánh nguy cơ mặn và kiềm quá mức. Đất xám có $Ca_{TrĐ}$ cao nhất trong mùa khô (750,5 mg/kg), $Mg_{TrĐ}$ tập trung chủ yếu ở đất mặn (441,8-467,2 mg/kg).

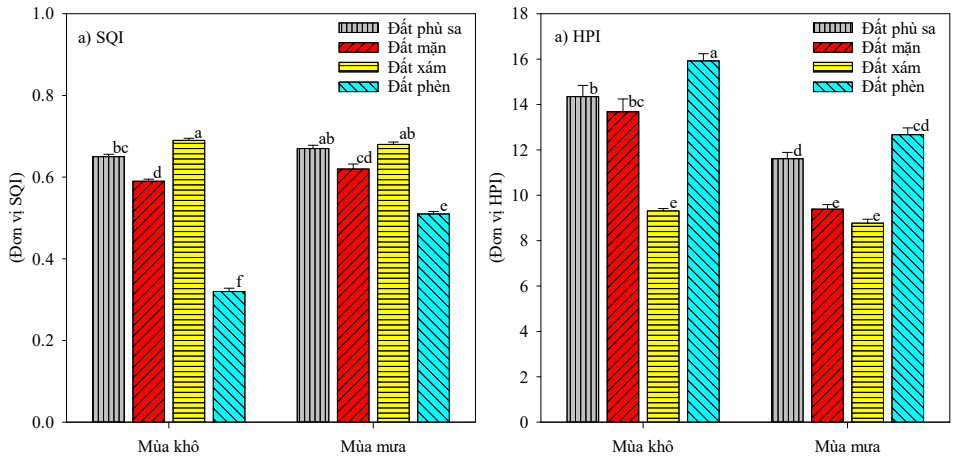
Bảng 3.3 Hàm lượng trao đổi các kim loại nặng trong đất phù sa, mặn, xám và phèn canh tác lúa trong hai mùa

Mùa	Loại đất	$Cd_{TrĐ}$	$Cu_{TrĐ}$	$Pb_{TrĐ}$	$Co_{TrĐ}$	$Ni_{TrĐ}$	$Zn_{TrĐ}$
Mưa	Phù sa	$0,31^{d}$±0,01	$11,51^{d}$±0,16	$2,52^{d}$±0,15	$24,21^{b}$±0,65	$1,26^{d}$±0,09	$2,85^{c}$±0,64
	Mặn	$0,23^{e}$±0,01	$4,75^{f}$±0,04	$1,74^{e}$±0,19	$24,87^{d}$±0,55	$1,88^{c}$±0,15	$5,98^{a}$±0,23
	Xám	$0,23^{e}$±0,01	$7,87^{e}$±0,11	$0,41^{g}$±0,03	$20,84^{ab}$±0,29	$0,80^{e}$±0,05	$1,65^{cd}$±0,12
	Phèn	$0,3^{c}$±0,01	$15,3^{b}$±0,16	$5,1^{c}$±0,37	$22,4^{c}$±0,52	$1,0^{de}$±0,06	$4,7^{b}$±0,65
Khô	Phù sa	$0,39^{b}$±0,02	$12,93^{c}$±0,51	$7,18^{b}$±0,35	$25,83^{a}$±0,27	$2,92^{b}$±0,29	$2,43^{c}$±0,61
	Mặn	$0,38^{bc}$±0,02	$5,01^{f}$±0,45	$1,26^{ef}$±0,04	$25,70^{a}$±0,29	$3,33^{a}$±0,13	$6,69^{a}$±0,52
	Xám	$0,23^{e}$±0,00	$10,39^{d}$±0,36	$0,74^{fg}$±0,02	$25,68^{a}$±0,31	$0,98^{de}$±0,05	$1,14^{d}$±0,07
	Phèn	$0,44^{a}$±0,01	$24,73^{a}$±1,15	$8,75^{a}$±0,21	$25,30^{ab}$±0,29	$1,99^{c}$±0,15	$4,70^{b}$±0,25

Trong mùa mưa, đất phèn có hàm lượng $Cu_{TrĐ}$ (15,3 mg/kg), $Pb_{TrĐ}$ (5,1 mg/kg) và $Zn_{TrĐ}$ (4,7 mg/kg) cao hơn đáng kể so với các loại đất khác, trong khi đất mặn và đất xám có nồng độ thấp nhất ở hầu hết các nguyên tố (Bảng 3.3). Đất phù sa có $Co_{TrĐ}$ cao (24,21 mg/kg), chỉ sau đất mặn (24,87 mg/kg). Sang mùa khô, hàm lượng kim loại nặng tăng ở đất phèn với mức $Cu_{TrĐ}$ (24,73 mg/kg) và $Pb_{TrĐ}$ (8,75 mg/kg) cao nhất, có ý nghĩa thống kê ($p \leq 0,05$). $Cd_{TrĐ}$ cũng tăng ở đất phèn (0,44 mg/kg) - mùa khô. Đất mặn có $Ni_{TrĐ}$ cao nhất (3,33 mg/kg), còn đất xám tiếp tục duy trì mức thấp nhất ở phần lớn kim loại nặng.

3.1.1.2 Các chỉ số chất lượng và sự tương quan giữa các chỉ số của các loại đất

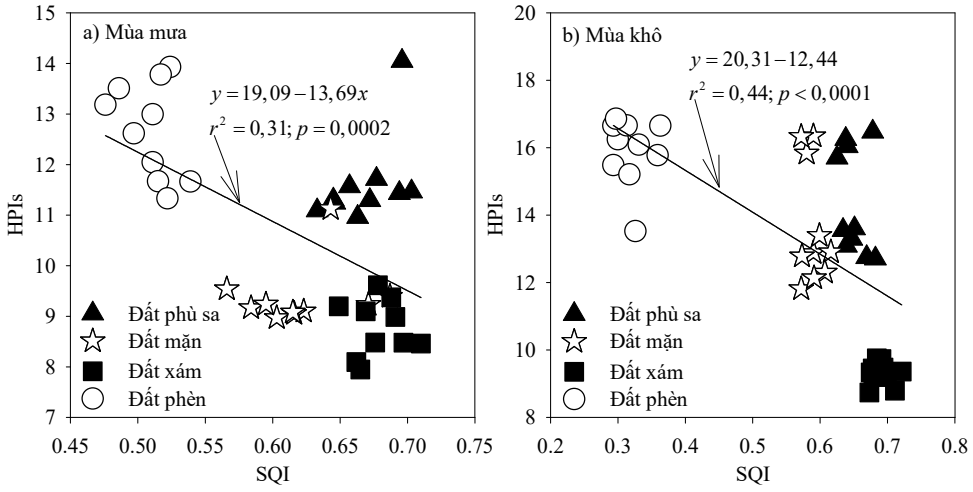
***** *Chỉ số chất lượng đất và chỉ số kim loại nặng trong đất của các loại đất*



Hình 3.1 Chỉ số chất lượng đất (SQI, a) và chỉ số ô nhiễm kim loại nặng trong đất (HPIs, b) của các loại đất canh tác lúa trong hai mùa

Dựa trên các kết quả từ PCA/FA (Bảng 4.1, Phụ lục 4), chỉ số chất lượng đất (SQI) của 4 loại đất đã được tính toán và hiển thị trong Hình 3.1a. SQI trong mùa khô, đất xám và đất phù sa có chất lượng đất cao nhất (lần lượt khoảng 0,69 và 0,65), tiếp theo là đất mặn (0,59) và đất phèn thấp nhất (0,32), với các ký tự chữ cái cho thấy sự khác biệt có ý nghĩa thống kê giữa các loại đất. Sang mùa mưa, SQI tăng ở hầu hết các loại đất, đất phù sa (0,67), đất xám (0,68) và đất mặn (0,62) trong khi đất phèn chỉ đạt 0,52 và vẫn thấp hơn đáng kể so với các nhóm còn lại. Ở hình 3.1b, HPIs phản ánh mức độ ô nhiễm kim loại nặng cao nhất ở đất phèn (15,92 trong mùa khô và 12,68 trong mùa mưa), kế tiếp là đất phù sa (14,35 - mùa khô; 11,61 - mùa mưa), đất mặn (13,68 - mùa khô; 9,39 - mùa mưa) và thấp nhất ở đất xám (9,31 - mùa khô; 8,77 - mùa mưa). Nhìn chung, giá trị HPIs cả 2 mùa ở các loại đất đều khác biệt có ý nghĩa thống kê với xác suất $p \leq 0,05$. Mùa mưa làm giảm nhẹ chỉ số HPIs ở tất cả các loại đất, đồng thời nâng cao hoặc duy trì SQI ở các đất có khả năng đệm tốt hơn, trong khi đất phèn vẫn thể hiện chất lượng thấp và ô nhiễm cao bất chấp sự cải thiện chút ít theo mùa. Các kết quả này ủng hộ giả thuyết khoa học thứ nhất là "Sản xuất lúa nước trên vùng đất phèn có chất lượng đất thấp nhất và mức độ nhiễm kim loại cao nhất trong các loại đất nghiên cứu".

***** *Tương quan giữa chỉ số chất lượng đất (SQI) và chỉ số ô nhiễm kim loại nặng trong đất (HPIs) của các loại đất*



Hình 3.2 Mối tương quan giữa chỉ số chất lượng đất (SQI) và chỉ số ô nhiễm kim loại nặng trong đất (HPIs) của các loại đất trong hai mùa

Hình 3.2 cho thấy mối tương quan nghịch giữa hai chỉ số SQI và HPI trong cả 2 mùa. Khi giá trị SQI tăng cao thì giá trị HPI giảm trong cả hai mùa, với hệ số xác định là 0.31 và 0.44 cho mùa mưa và mùa khô, có ý nghĩa thống kê. Điều này cho thấy khi chất lượng đất tăng lên thì mức độ ô nhiễm kim loại nặng giảm xuống. Mặt khác, trong ùa mưa (Hình 3.2a), đất phèn tập trung ở vùng SQI thấp (0,48-0,55) nhưng HPIs tương đối cao (12-14), cho thấy đất này có chất lượng đất kém, trong lúc hàm lượng kim loại nặng tích tụ cao do thiếu biện pháp rửa trôi và xử lý cơ lý. Ngược lại, đất xám đạt SQI cao nhất (0,64-0,72) nhưng HPIs thấp nhất (8-9,5), phản ánh chất lượng môi trường đất tốt. Đất phù sa và đất mặn rơi vào vùng trung gian cả về SQI (0,55-0,65) và HPIs (9-12), cho thấy cân bằng tương đối. Mùa khô (Hình 3.2b), toàn bộ các điểm dữ liệu dịch chuyển sang giá trị HPIs cao hơn, trong đó đất mặn và phù sa duy trì SQI trung bình nhưng HPIs tăng lên 13-17, cho thấy nguy cơ ô nhiễm gia tăng vào mùa này, đất xám vẫn có HPIs thấp nhất (9 - 10), khẳng định tính ổn định sinh hóa, đất phèn tiếp tục ô nhiễm cao (15-17) đồng thời SQI không tăng. Giá trị HPI thấp hơn trong mùa mưa cho thấy các kim loại nặng đã bị rửa trôi do nước mưa trong lúc hiệu quả này không tim thấy trong mùa khô.

3.1.2 Hiệu quả kinh tế của các mô hình sản xuất lúa nước

Bảng 3.4 Hiệu quả kinh tế *(đồng/ha)* trong sản xuất lúa trên các loại đất khác nhau

Mùa vụ	**Loại đất**	**Tổng thu** ***(1)***	**Tổng chi** ***(2)***	**Hiệu quả kinh tế** ***[(1) – (2)]***
Hè Thu	Phèn	36.560.000	29.041.275	7.518.725
	Phù sa	48.666.000	30.672.360	17.993.640
	Mặn	64.880.000	26.329.000	38.551.000
	Xám	42.950.000	25.973.350	16.976.650
Đông Xuân	Phèn	44.880.000	31.721.700	17.993.640
	Phù sa	59.692.000	38.363.000	21.329.000
	Mặn	77.660.000	34.636.500	43.023.500
	Xám	62.060.000	37.282.300	24.777.700

Ghi chú: $Tổng\ thu = Lúa + Rơm$; $Tổng\ chi = Vật\ chất + Lao\ động$; *Trong đó: Vật chất: giống, đạm, lân, kali, DAP, vôi (dùng cho đất phèn)*; *Lao động: làm đất, gieo xạ, chăm sóc, thu hoạch. Các yếu tố cấu thành kết quả của Bảng 3.4 được trình bày cụ thể trong các Bảng 3.1, 3.2, 3.3 và 3.4, Phụ lục 3.*

Kết quả cho thấy đất mặn đạt hiệu quả kinh tế cao nhất trong cả hai vụ, đặc biệt là trong vụ đông xuân (43,02 triệu đồng/ha) và hè thu (38,55 triệu đồng/ha), dù thường bị đánh giá là đất khó canh tác. Hiệu quả kinh tế cao trên loại đất này là do khu vực này được trồng lúa ST25 có giá cao hơn các loại giống khác. Đất phù sa xếp thứ hai với hiệu quả ổn định: 21,33 triệu đồng/ha vụ đông xuân và 17,99 triệu đồng/ha vụ hè thu. Đây là vùng đất lý tưởng cho canh tác lúa, ít cần cải tạo và dễ đạt hiệu suất cao. Đất xám, dù nghèo dinh dưỡng, vẫn đạt hiệu quả tương đối tốt, nhất là vụ đông xuân (24,78 triệu đồng/ha) và hè thu (16,98 triệu đồng/ha). Đất phèn có hiệu quả thấp nhất trong các loại đất có thể do chi phí cải tạo cao và tính chất đất hạn chế. Các kết quả này ủng hộ giả thuyết khoa học thứ nhất là sản xuất lúa nước trên vùng đất phèn có hiệu quả kinh tế thấp nhất trong các loại đất nghiên cứu. Hiệu quả kinh tế sản xuất lúa không phản ánh chính xác chất lượng đất vì hiệu quả kinh tế còn phụ thuộc và các biện pháp kỹ thuật cánh tác áp dụng, cũng như điều kiện thời tiết khu vực trồng lúa. Trong lúc đó chất lượng đất là một thành phần điều kiện môi trường cho cây lúa phát triển.

3.1.3 Một số thảo luận

***** *Chất lượng môi trường đất của các loại đất chính canh tác lúa nước*

Đất phù sa canh tác lúa nước tại Vĩnh Long (cũ) giàu dinh dưỡng đa lượng (N, K^+) cao hơn so với các loại đất còn lại. Cation trao đổi (CEC) cao, hỗ trợ tốt cho quá trình trao đổi và cung cấp dinh dưỡng cho cây lúa. Kết quả nghiên cứu cũng phù hợp với kết quả nghiên cứu của Long [125]. Kim loại trong đất phù sa thường ở mức thấp do đất được bồi tụ và rửa trôi tự nhiên. Đây là loại đất có tiềm năng sản xuất lúa tốt nhất nhờ đặc tính ổn định và cân bằng giữa các chỉ tiêu hóa học. Đất mặn tại Tiền Giang (cũ) có độ mặn trung bình, hàm lượng Na^+ và Cl^- lớn, gây ảnh hưởng xấu đến sự hấp thụ nước và dinh dưỡng của cây trồng. Chất hữu cơ thấp, các nguyên tố vi lượng thiết yếu thường thiếu hụt, pH dao động từ acid nhẹ đến trung tính (5,42). Kết quả nghiên cứu cũng phù hợp với kết quả nghiên cứu của Tan [126]. Tuy nhiên, kim loại có xu hướng tích tụ cao hơn (Ni và Zn) so với đất phù sa, đặc biệt ở khu vực bị xâm nhập mặn lâu năm. Đất mặn cần cải tạo bằng cách rửa

mặn, bón hữu cơ, và kiểm soát nước tốt để tăng hiệu quả sản xuất. Đất xám tại Củ Chi nghèo dinh dưỡng dẫn đến hạn chế khả năng hấp thụ dinh dưỡng của cây lúa. Hàm lượng CEC thấp (8,55 cmol(+)/kg), tương đồng với kết quả nghiên cứu của Tan[126]. Trong khi kim loại không đáng kể nhưng dễ bị rửa trôi do cấu trúc đất thô. Tuy nhiên chỉ số chất lượng đất (SQI) của loại đất này ở mức khá cao, tương đồng với đất phù sa. Điều này là do đất xám có hàm lượng các nguyên tố có khả năng gây độc như Al, Fe, mà Mn ở mức thấp làm tăng chỉ số SQI. Đất phèn tại Củ Chi (cũ) có pH thấp (4,63), hàm lượng kim loại trao đổi như Fe, Mn, Al cao, gây độc cho cây trồng nếu không được cải tạo. Mức độ chất hữu cơ và dinh dưỡng thấp, đặc biệt là khả năng trao đổi cation bị hạn chế bởi các ion độc. Điều này đã dẫn đến chỉ số SQI của loại đất này thấp nhất trong các loại đất nghiên cứu. Các kết quả nghiên cứu cũng phù hợp với kết quả nghiên cứu của Dung[127]. Đất phèn là loại đất nhiều thách thức nhất, cần cải tạo liên tục bằng các biện pháp như bón vôi, kiểm soát nước và sử dụng phân hữu cơ để giảm độc tố và nâng pH.

Từ các chỉ tiêu hóa học trên, chỉ số chất lượng đất (SQI) và chỉ số ô nhiễm kim loại nặng trong đất (HPIs) của các loại đất được tính toán, phản ánh mối tương quan giữa chất lượng đất và mức độ nhiễm kim loại. Khi chất lượng đất tăng (SQI cao), mức độ ô nhiễm kim loại nặng trong đất có xu hướng giảm (HPIs thấp). Cơ chế khoa học giải thích cho mối liên hệ nghịch này là do đất có chất lượng cao thường có pH ổn định, giàu chất hữu cơ và có CEC lớn, và các nguyên tố gây độc thấp. Những yếu tố này góp phần làm giảm tính di động và khả dụng sinh học của kim loại nặng thông qua các quá trình hấp phụ, tạo phức, trao đổi ion hoặc kết tủa. Ngoài ra, hệ sinh vật đất trong môi trường lành mạnh cũng hoạt động hiệu quả hơn, góp phần vào quá trình bất hoạt kim loại, từ đó làm giảm chỉ số HPIs. Mặt khác, mối tương quan giữa SQI và HPIs ở mùa khô mạnh hơn so với mùa mưa có thể được lý giải bởi sự ổn định của độ ẩm và ít chịu ảnh hưởng của các yếu tố gây rửa trôi hoặc pha loãng như mưa lớn đối với các nguyên tố kim loại nặng. Trong điều kiện khô hơn, các đặc tính nội tại của đất có ảnh hưởng rõ hơn đến tính di động của kim loại nặng, từ đó phản ánh chính xác hơn mối quan hệ giữa SQI và HPIs.

** Hiệu quả kinh tế của các mô hình sản xuất lúa đại trà*

Đất phèn tại Củ Chi (cũ) đã cho lợi nhuận của vụ Hè Thu thu lãi 7,519 triệu đồng/ha, trong khi vụ Đông Xuân đạt 13,158 triệu đồng/ha, cao hơn 75%. Nguyên nhân chính là do năng suất và giá lúa vụ Đông Xuân thường cao hơn nhờ điều kiện thời tiết và nhu cầu thị trường vào dịp cuối năm. Tỷ suất lợi nhuận (lợi nhuận/tổng chi) vụ Đông Xuân đạt khoảng 41,5%, vượt trội so với 25,9% của vụ Hè Thu. Tỷ suất này cho thấy hiệu quả kinh tế vụ Đông Xuân vượt trội, nên khuyến khích nông hộ ưu tiên bố trí cơ cấu diện tích theo vụ này nếu khả năng nước tưới ổn định. Đối với đất phèn thì việc bón vôi là bước cần thiết để nâng pH, giảm độc tính Al^{3+} và cải thiện năng suất [128]. Tuy nhiên, chi phí vôi chiếm hơn 25% chi vật chất, cần xem xét phối hợp với các nguồn cải tạo đất khác (than sinh học) để giảm liều lượng và chi phí. Sự chênh lệch lợi nhuận giữa hai vụ cho thấy bón đạm, lân, kali, DAP và đóng vai trò quyết định, đặc biệt trong vụ Đông Xuân. Nghiên cứu thêm về áp dụng kỹ thuật tưới luân phiên có thể giúp giảm chi và tiết kiệm nước, đồng thời duy trì năng suất [129]. Ngoài ra, chi phí cho việc chăm sóc cao, đặc biệt trong giai đoạn phòng trừ dịch hại, cho thấy tiềm năng ứng dụng cơ giới hóa một phần hoặc sử dụng thuốc BVTV sinh học để giảm công chăm sóc, nâng cao hiệu quả kinh tế bền vững.

Tương tự, trên đất phù sa tại Vĩnh Long (cũ) cũng cho thấy lợi nhuận của vụ Hè Thu thu lãi 17,994 triệu đồng/ha, trong khi vụ Đông Xuân đạt 21,239 triệu đồng/ha, kéo theo lợi nhuận tuyệt đối tăng và tỷ suất lợi nhuận lần lượt đạt 58,6% và 55,6%. Nguyên nhân chính là do năng suất vụ Đông Xuân thường cao hơn nhờ điều kiện thời tiết và nhu cầu thị trường vào dịp cuối năm. Đất phù sa Vĩnh Long (cũ) có hàm lượng cơ giới nhẹ, giàu hữu cơ, ít gặp vấn đề chua mặn, nên năng suất cao và chi phí cải tạo thấp hơn so với các loại đất khác [130]. Mặt khác, tận dụng phụ phẩm như rơm rạ để phát triển chuỗi giá trị rơm (than sinh học, ủ vi sinh, làm phân compost) giúp không chỉ tăng doanh thu mà còn cải thiện độ phì đất cho các vụ tiếp theo. Bên cạnh đó, hiệu quả kinh tế của đất mặn tại Tiền Giang (cũ) đạt tổng doanh thu 64,88 triệu đồng/ha (vụ Hè Thu), lợi nhuận 38,55 triệu đồng/ha; vụ Đông Xuân

với doanh thu 77,66 triệu đồng/ha, lợi nhuận 43,02 triệu đồng/ha. Mặc dù lợi nhuận tuyệt đối vụ Đông Xuân cao hơn, vụ Hè Thu lại có hiệu quả cao hơn do chi phí đầu vào thấp hơn. Kết quả này phản ánh lợi nhuận giảm dần khi đẩy mạnh đầu tư vào phân bón và lao động, tương tự các ghi nhận về giảm lợi nhuận khi áp dụng mật độ phân bón cao ở vùng đồng bằng [131].

Cuối cùng, đất xám ở Củ Chi (cũ) cũng thể hiện hiệu quả kinh tế rõ rệt ở vụ Hè Thu với tổng thu 42,95 triệu đồng/ha, lợi nhuận 16,98 triệu đồng/ha; vụ Đông Xuân cho tổng thu 62,06 triệu đồng/ha, lợi nhuận 24,78 triệu đồng/ha. Mặc dù giá lúa và năng suất vụ Đông Xuân cao hơn, phản ánh hiện tượng đầu tư thêm vốn không luôn đem lại lợi nhuận biên lớn như một thực trạng đã được quan sát ở nhiều nơi trong ĐBSCL [132]. Đất xám canh tác lúa ở Củ Chi (cũ) thuộc nhóm đất xám trên phù sa cổ (Acrisols), đặc trưng bởi độ chua cao (pH 4,5-5,5), nghèo dinh dưỡng và hàm lượng hữu cơ thấp. Do đó, cần tối ưu phân bón như áp dụng, kết hợp phân hữu cơ (phân compost, phân chuồng ủ hoai) hoặc than sinh học (trấu và nhãn) để giảm chi phí vô cơ và cải tạo dần tính chất đất.

3.1.4 Tiểu kết nội dung 1

Đất phù sa có tính chất cân bằng, thích hợp cho canh tác đa dạng cây trồng. Đất mặn giàu dinh dưỡng vô cơ nhưng hàm lượng muối cao. Ngược lại, đất xám nghèo dinh dưỡng, đặc biệt là K^+, C, và Zn nhưng có hàm lượng các nguyên tố gây độc như Al, và Fe thấp. Ngược lại, đất phèn có độ axit cao, chứa Al^{3+} và Fe gây độc. Những điều này đã dẫn đến chỉ số SQI của đất phù sa và đất xám cao tương đương nhau. Đất phèn là loại đất có mức ô nhiễm kim loại nặng nghiêm trọng nhất và chất lượng đất thấp nhất. Đất phù sa và đất mặn có mức độ ô nhiễm kim loại nặng trung bình, đất xám có mức độ ô nhiễm kim loại nặng thấp nhất. Hai chỉ số SQI và HPIs ở bốn loại đất có mối tương quan nghịch trong cả hai mùa và thay đổi tùy thuộc vào loại đất. Mối tương quan nghịch giữa SQI và HPIs trên cả bốn loại đất cho thấy các loại đất có chất lượng cao hơn có xu hướng tích lũy kim loại nặng thấp hơn, gợi ý rằng cải thiện chất lượng đất có thể đồng thời góp phần hạn chế ô nhiễm kim loại nặng, tuy nhiên cần có thêm bằng chứng thực nghiệm để xác nhận mối quan hệ này.

.

Hiệu quả kinh tế của canh tác lúa khác biệt theo mùa vụ và loại đất. Đất mặn đạt hiệu quả cao nhất ở cả hai mùa, đặc biệt vụ đông xuân (43,02 triệu đồng/ha). Đất phù sa duy trì hiệu quả ổn định hơn. Đất xám cải thiện rõ vào vụ đông xuân, trong khi đất phèn cho hiệu quả thấp nhất, nhất là vụ hè thu. Vụ đông xuân nhìn chung cho hiệu quả kinh tế cao hơn vụ hè thu. Các kết quả khẳng định vai trò của cải tạo đất và kỹ thuật canh tác trong nâng cao hiệu quả và tính bền vững sản xuất lúa. Trước bối cảnh chi phí vật tư nông nghiệp ngày càng gia tăng và yêu cầu cải thiện bền vững chất lượng đất canh tác lúa, việc lựa chọn giải pháp vật liệu đầu vào phù hợp có ý nghĩa đặc biệt quan trọng. Than sinh học, đặc biệt là than trấu và than vỏ nhãn có thể được ứng dụng vào canh tác lúa - điều này cho phép tận dụng hiệu quả các phụ phẩm nông nghiệp sẵn có tại địa phương, qua đó giảm phụ thuộc và chi phí sử dụng vật tư vô cơ. Hai loại than này có tính ổn định cao, khả năng cải thiện pH, tăng khả năng giữ dinh dưỡng và hấp phụ kim loại nặng, góp phần nâng cao chất lượng đất canh tác. Lựa chọn than trấu và than nhãn thay vì các loại than khác giúp tăng tính khả thi kinh tế và khả năng nhân rộng trong điều kiện sản xuất thực tế.

3.2 Ảnh hưởng của than sinh học lên các yếu tố môi trường và năng suất lúa trên các loại đất chính quy mô nhà lưới

3.2.1 Một số tính chất của đất và than sinh học trước thí nghiệm

Bảng 3.5 Tính chất của các loại đất và các loại than sinh học trước thí nghiệm

Các chỉ tiêu	Đơn vị	Đất phù sa	Đất mặn	Đất xám	Đất phèn	Than trấu	Than nhãn
Chất lượng đất							
pH	-	5,20±0,03	5,83±0,05	5,58±0,02	4,41±0,13	8,47±0,12	7,37±0,12
EC	dS/m	0,45±0,02	1,48±0,08	0,24±0,03	1,14±0,02	0,34±0,03	0,21±0,01
CEC	cmol(+)/kg	12,07±0,13	11,56±0,29	9,72±0,04	13,85±0,23	22,53±0,53	19,43±0,73
Độ $chua_{TrĐ}$		3,29±0,29	2,6±0,06	1,73±0,02	5,52±0,07	4,06±0,41	2,77±0,65
$H^+_{TrĐ}$		0,48±0,00	0,84±0,04	0,42±0,03	1,85±0,07	2,56±0,08	1,92±0,21
OC	%	4,10±0,28	3,13±0,05	2,55±0,08	4,46±0,10	33,70±0,86	63,71±1,61
Cl^-	g/kg	0,86±0,06	2,26±0,04	0,78±0,05	1,14±0,15	-	-
SO_4^{2-}		0,42±0,02	1,05±0,09	0,42±0,01	1,25±0,11	7,33±0,51	0,72±0,06
NH_4^+	mg/kg	57,4±2,51	81,54±1,82	129,04±13,11	82,78±3,49	2,72±0,09	1,92±0,21
P dễ tiêu		25,34±2,68	8,19±0,60	22,72±1,61	5,82±0,59	2.260,30±72,15	546,89±16,90
$K_{TrĐ}$		285,61±7,24	973,74±70,94	268,64±33,29	276,15±24,01	10.840,04±114,98	1.018,47±9,55
$Na_{TrĐ}$		580,81±8,52	1.899,9±72,70	336,82±37,48	478,20±20,49	2.242,73±115,59	1.331,94±120,28
$Ca_{TrĐ}$		656,15±13,34	499,06±11,92	221,02±22,75	709,24±42,84	2.712,69±168,21	3.184,01±164,72
$Mg_{TrĐ}$		276,95±7,31	627,69±10,14	93,57±3,03	251,45±11,88	463,00±26,75	302,41±4,09
$Al_{TrĐ}$		81,29±4,48	108,54±7,84	46,10±1,73	170,29±6,62	22,69±4,92	26,2±1,59
$Fe_{TrĐ}$		43,94±8,48	46,76±13,39	22,85±0,05	87,38±8,51	51,32±3,96	66,95±2,41
$Mn_{TrĐ}$		29,33±0,26	33,79±0,45	19,42±0,34	28,55±0,52	67,22±0,77	51,35±2,11
Kim loại nặng trong đất							
$Cd_{TrĐ}$	mg/kg	0,24±0,00	0,19±0,02	0,19±0,02	0,24±0,00	0,49±0,05	0,43±0,00
$Cu_{TrĐ}$		12,81±0,15	4,78±0,23	10,01±0,04	27,12±1,01	2,75±0,37	0,66±0,08
$Pb_{TrĐ}$		0,38±0,07	0,11±0,00	0,39±0,16	0,69±0,02	-	-
$Co_{TrĐ}$		26,76±0,27	25,35±0,34	15,27±0,30	26,98±0,47	65,97±0,60	65,60±0,37
$Ni_{TrĐ}$		1,69±0,09	1,26±0,07	0,79±0,02	1,53±0,03	1,16±0,09	2,27±0,28
$Zn_{TrĐ}$		2,63±0,09	0,75±0,24	2,02±0,68	6,96±0,79	10,63±1,02	11,33±0,42

Ghi chú: Dữ liệu được trình bày dưới dạng trung bình ± SE (sai số chuẩn của giá trị trung bình với n = 3). TrĐ: Trao đổi.

Đất phù sa, đất mặn và đất xám đều có pH trung bình (5,20-5,83), thích hợp cho lúa, trong khi đất phèn chua mạnh (pH = 4,41) làm kém sinh trưởng (Bảng 3.5). Than trấu (pH = 8,47) và than nhãn (pH = 7,37) mang tính kiềm, thích hợp cải tạo đất chua. Về EC, đất mặn (1,48 dS/m) và đất phèn (1,14 dS/m) có muối hòa tan cao, dễ ngộ độc muối, còn phù sa (0,45 dS/m) và xám (0,24 dS/m) phù hợp hơn. CEC cao nhất ở đất phèn (13,85 cmol(+)/kg) và rất thấp ở đất xám (9,72), trong khi than trấu và nhãn lần lượt đạt CEC 22,53-19,43, lý tưởng cho cải tạo dinh dưỡng. Đất xám

giàu NH_4^+ nhất (129,04 mg/kg), còn phù sa và phèn thấp hơn; than trấu và nhãn gần như không chứa NH_4^+, chủ yếu cải tạo cấu trúc. Than trấu cung cấp P dư (2.260 mg/kg), gấp hàng trăm lần đất phèn (5,82) và đất mặn (8,19). OC của đất phèn (4,46 %) tương đương phù sa, nhưng than trấu và nhãn vượt trội (33,7-63,7 %). Đất mặn tập trung K^+ và Na^+ cao (Na 1.900 mg/kg) dễ gây ngộ độc, còn than trấu bổ sung Kali hiệu quả (10.840 mg/kg). Đất phèn chứa Al và Fe cao (170,3 và 87,4 mg/kg) có thể độc hại, còn Mn trong các mẫu cân bằng. Hàm lượng kim loại nặng (Cd, Cu, Pb, Zn, Co, Ni) ở đất đều thấp nhưng đất phèn có Cu và Zn cao nhất (27,1 và 6,96 mg/kg), cần giám sát. Cả hai loại than sinh học đề chứa rất ít kim loại nặng, an toàn cho cải tạo.

3.2.2 Tính chất của các loại đất sau thí nghiệm sử dụng than sinh học

Bảng 3.6 Tính chất của các loại đất sau thí nghiệm sử dụng than sinh học

Loại đất	Công thức	pH	EC (dS/m)	CEC (cmol(+)/kg)	NH_4^+ (mg/kg)	P dễ tiêu (mg/kg)	OC (%)
Phù sa	CT1	$5,39^{f}\pm0,04$	$0,79^{b}\pm0,10$	$12,55^{abc}\pm0,32$	$199,18^{de}\pm9,77$	$45,58^{efg}\pm1,22$	$4,73^{ab}\pm0,27$
	CT2	$5,46^{ef}\pm0,07$	$0,71^{b}\pm0,38$	$12,95^{abc}\pm9,10$	$187,25^{de}\pm2,86$	$55,06^{bc}\pm0,08$	$5,24^{ab}\pm0,07$
	CT3	$5,79^{cd}\pm0,03$	$0,73^{b}\pm0,10$	$11,79^{cd}\pm0,78$	$190,11^{e}\pm2,43$	$55,56^{b}\pm0,84$	$5,33^{a}\pm0,10$
Mặn	CT1	$6,10^{ab}\pm0,09$	$1,38^{a}\pm0,16$	$10,36^{def}\pm0,76$	$280,52^{a}\pm11,31$	$43,29^{fg}\pm1,55$	$3,71^{e}\pm0,09$
	CT2	$6,20^{a}\pm0,11$	$1,36^{a}\pm0,17$	$10,46^{de}\pm0,59$	$285,54^{a}\pm7,75$	$48,26^{def}\pm0,85$	$4,27^{cd}\pm0,26$
	CT3	$5,98^{bc}\pm0,06$	$1,29^{a}\pm0,15$	$13,46^{ab}\pm0,19$	$286,11^{a}\pm3,27$	$48,83^{cdef}\pm4,34$	$4,04^{de}\pm0,14$
Xám	CT1	$5,66^{de}\pm0,04$	$0,78^{b}\pm0,05$	$8,84^{f}\pm0,21$	$240,95^{b}\pm21,75$	$51,31^{bcde}\pm1,72$	$2,29^{f}\pm0,09$
	CT2	$6,10^{ab}\pm0,06$	$0,67^{b}\pm0,01$	$10,42^{de}\pm0,23$	$212,83^{cde}\pm3,86$	$62,97^{bcd}\pm2,41$	$2,61^{f}\pm0,17$
	CT3	$6,06^{ab}\pm0,06$	$0,67^{b}\pm0,08$	$10,17^{ef}\pm0,71$	$231,77^{bc}\pm8,86$	$54,22^{a}\pm1,16$	$2,32^{f}\pm0,10$
Phèn	CT1	$4,86^{g}\pm0,04$	$1,24^{a}\pm0,08$	$12,47^{abc}\pm0,70$	$233,63^{bd}\pm5,04$	$39,41^{g}\pm2,37$	$4,83^{ab}\pm0,09$
	CT2	$5,03^{g}\pm0,08$	$1,22^{a}\pm0,05$	$13,68^{a}\pm0,25$	$193,09^{de}\pm4,23$	$51,01^{bcde}\pm2,31$	$4,79^{abc}\pm0,32$
	CT3	$4,92^{g}\pm0,05$	$1,24^{a}\pm 0,14$	$11,98^{bc}\pm0,54$	$217,25^{bcd}\pm9,45$	$49,04^{cdef}\pm1,27$	$4,87^{ab}\pm0,29$

Ghi chú: Dữ liệu trong các bảng ở mục này được trình bày dưới dạng trung bình ± SE (sai số chuẩn của giá trị trung bình với n = 3). Trên mỗi thông số có gắn cùng chữ cái khác biệt không có ý nghĩa thống kê. CT1: không sử dụng than sinh học, CT2: than trấu, CT3: than nhãn. EC: Độ dẫn điện, CEC: Khả năng trao đổi cation. TrĐ: Trao đổi.

Bảng 3.6 cho thấy các đặc tính hóa học đất thay đổi đáng kể theo loại đất và công thức xử lý. Nhìn chung, CT1 cho kết quả thấp nhất về pH, CEC và OC, đặc biệt trên đất phèn và đất xám. Ngược lại, CT2 (than trấu) cải thiện rõ rệt các chỉ tiêu quan

trọng, nhất là trên đất phèn – đất có pH thấp và ô nhiễm kim loại cao. Về pH, đất phèn có giá trị thấp nhất (4,86–5,03), trong khi đất mặn và xám đạt cao hơn (~6,1) và đều khác biệt có ý nghĩa thống kê. Than sinh học, nhất là than trấu, giúp nâng pH hiệu quả. CEC và OC tăng mạnh ở CT2 và CT3 đều khác biệt có ý nghĩa thống kê giữa các công thức và các loại đất, cho thấy khả năng giữ dinh dưỡng và cải thiện độ phì được cải thiện đáng kể, đặc biệt ở đất nghèo dinh dưỡng như đất xám. Tóm lại, than sinh học, đặc biệt từ trấu, cải thiện mạnh mẽ các tính chất hóa học đất, nhất là trên đất phèn và xám - những vùng đất hạn chế về độ phì và pH. CT2 cho thấy tiềm năng ứng dụng cao trong phục hồi đất và nâng cao hiệu quả canh tác lúa.

Bảng 3.7 Tính chất của các loại đất sau thí nghiệm sử dụng than sinh học (tt)

Loại đất	Công thức	Cl^-	SO_4^{2-}	Độ $chua_{TrĐ}$	$H^+_{TrĐ}$	$K_{TrĐ}$	$Na_{TrĐ}$
		(g/kg)		(cmol(+)/kg)		(mg/kg)	
Phù sa	CT1	1,10^{cd}±0,08	0,55^{de}±0,10	3,20^{c}±0,12	1,37^{abc}±0,07	296,74^{d}±8,66	760,24^{cd}±3,68
	CT2	1,09^{cd}±0,07	0,40^{e}±0,04	2,66^{cd}±0,33	1,23^{bc}±0,12	325,93^{d}±41,06	620,96^{e}±31,58
	CT3	1,09^{cd}±0,10	0,44^{e}±0,05	2,73^{cd}±0,03	1,17^{bc}±0,18	302,15^{d}±8,75	635,94^{de}±30,63
Mặn	CT1	2,76^{a}±0,42	1,20^{b}±0,09	2,50^{de}±0,12	1,70^{bc}±0,06	1.222,02^{b}±45,52	2.441,35^{a}±30,85
	CT2	2,55^{a}±0,13	0,81^{cd}±0,02	2,23^{defg}±0,26	1,47^{ab}±0,03	1.453,84^{a}±83,98	2.510,56^{a}±104,47
	CT3	2,49^{a}±0,03	0,91^{c}±0,04	2,37^{def}±0,18	1,10^{a}±0,30	1.496,18^{a}±76,76	2.462,98^{a}± 49,27
Xám	CT1	0,98^{d}±0,07	0,52^{e}±0,07	2,03^{efg}±0,12	0,77^{de}±0,03	254,81^{d}±14,04	386,85^{f}±11,54
	CT2	0,90^{d}±0,05	0,51^{e}±0,08	1,76^{fg}±0,14	0,77^{de}±0,03	303,30^{d}±11,74	352,56^{f}±11,71
	CT3	0,94^{d}±0,02	0,66^{cde}±0,16	1,67^{g}±0,17	0,67^{e}±0,03	285,57^{d}±10,14	342,59^{f}±16,00
Phèn	CT1	1,67^{cd}±0,17	1,60^{a}±0,10	5,17^{a}±0,20	1,30^{a}±0,06	479,37^{c}±33,66	987,92^{b}±41,43
	CT2	1,45^{cd}±0,09	1,29^{b}±0,16	4,03^{b}±0,43	1,47^{ab}±0,07	516,72^{c}±15,12	862,45^{bc}±53,98
	CT3	1,46^{cd}±0,05	1,29^{b}±0,05	4,23^{b}±0,09	1,67^{cd}±0,13	496,63^{c}±25,24	891,50^{bc}±68,96

Nồng độ Cl^- và SO_4^{2-} giảm đáng kể nhất khi áp dụng CT2 và CT3 trên đất mặn (Cl^- 2,55-CT3; 2,49-CT3 ; SO_4^{2-} 0,81-CT2; 0,91-CT3 g/kg so với CT1) có ý nghĩa thống kê, trong khi đất phù sa, phèn và đất xám có giá trị thấp hơn (Bảng 3.7). Việc sử dụng than sinh học ở CT2 và CT3 cũng làm cho giảm độ $chua_{TrĐ}$ và $H^+_{TrĐ}$ trên các loại đất so với CT1. $K_{TrĐ}$ dao động đáng kể, cao nhất ở đất mặn (trên 1200 mg/kg), thấp nhất ở đất xám và phù sa. CT2 và CT3 nâng cao lượng K trao đổi đáng kể, đặc biệt ở đất mặn và đất phèn. $Na_{TrĐ}$ cũng cao nhất ở đất mặn (trên 2400 mg/kg), thấp nhất ở đất xám (<400 mg/kg) đều có ý nghĩa thống kê. Nhìn chung, CT2 và CT3 giúp giảm Cl^-, SO_4^{2-} và $Na_{TrĐ}$ trên các loại đất, đặc biệt ở đất mặn và đất phèn, đồng

thời góp phần cải thiện độ chua và nâng cao lượng K trao đổi, cho thấy vai trò tích cực của than sinh học trong cải thiện chất lượng đất sau thí nghiệm.

Bảng 3.8 Hàm lượng một số kim loại trao đổi trong các loại đất sau thí nghiệm sử dụng than sinh học

Loại đất	Công thức	$Ca_{TrĐ}$	$Mg_{TrĐ}$	$Al_{TrĐ}$	$Fe_{TrĐ}$	$Mn_{TrĐ}$
Phù sa	CT1	$645,47^{c}\pm19,85$	$142,29^{cd}\pm2,63$	$79,77^{e}\pm0,77$	$30,43^{d}\pm2,22$	$16,18^{cd}\pm0,46$
	CT2	$663,99^{c}\pm15,03$	$170,29^{c}\pm7,02$	$69,85^{f}\pm2,51$	$31,07^{de}\pm1,37$	$14,66^{cd}\pm0,73$
	CT3	$675,78^{c}\pm24,56$	$162,66^{c}\pm3,90$	$75,68^{ef}\pm1,55$	$31,83^{de}\pm0,42$	$13,62^{d}\pm1,08$
Mặn	CT1	$491,69^{d}\pm14,17$	$93,49^{a}\pm2,69$	$107,20^{c}\pm4,12$	$51,96^{c}\pm1,20$	$37,43^{a}\pm1,14$
	CT2	$504,47^{d}\pm27,54$	$106,31^{a}\pm6,09$	$98,85^{d}\pm2,36$	$50,43^{c}\pm0,93$	$37,09^{a}\pm0,84$
	CT3	$522,52^{d}\pm12,02$	$105,32^{a}\pm6,01$	$99,68^{cd}\pm4,54$	$51,65^{c}\pm0,85$	$36,13^{a}\pm1,62$
Xám	CT1	$223,64^{e}\pm9,50$	$712,66^{e}\pm18,15$	$52,94^{g}\pm1,90$	$26,73^{def}\pm0,72$	$20,05^{b}\pm0,52$
	CT2	$225,15^{e}\pm5,27$	$716,02^{de}\pm10,51$	$50,61^{h}\pm1,07$	$24,86^{ef}\pm0,23$	$19,84^{b}\pm1,07$
	CT3	$228,28^{e}\pm16,14$	$690,92^{de}\pm46,60$	$43,92^{gh}\pm2,01$	$23,08^{f}\pm1,10$	$18,00^{bc}\pm0,43$
Phèn	CT1	$690,08^{c}\pm1,86$	$270,55^{b}\pm14,54$	$193,75^{a}\pm2,92$	$89,83^{a}\pm3,29$	$35,86^{a}\pm0,70$
	CT2	$750,19^{b}\pm27,53$	$275,56^{b}\pm7,16$	$171,74^{b}\pm2,95$	$80,23^{b}\pm2,91$	$34,99^{a}\pm1,90$
	CT3	$819,98^{a}\pm38,36$	$268,88^{b}\pm5,49$	$173,52^{b}\pm1,73$	$85,59^{ab}\pm4,96$	$34,68^{a}\pm2,06$

Bảng 3.8 cho thấy trên đất phù sa, $Ca_{TrĐ}$ tăng dần từ 645,47 mg/kg (CT1) lên 675,78 mg/kg (CT3), trong khi $Mg_{TrĐ}$ cao nhất ở CT2 (170,29 mg/kg), còn $Al_{TrĐ}$ thấp nhất ở CT2 (69,85 mg/kg) so với CT1 (79,77 mg/kg) và đều có ý nghĩa thống kê. Đất mặn cho thấy xu hướng tương tự với $Ca_{TrĐ}$ tăng từ 491,69 mg/kg (CT1) lên 522,52 mg/kg (CT3) và $Al_{TrĐ}$ giảm nhẹ từ 107,20 mgkg (CT1) xuống khoảng 99 mg/kg (CT2, CT3). Đất xám có hàm lượng $Mg_{TrĐ}$ nổi bật nhất (712,66 mg/kg) và biến động $Ca_{TrĐ}$ (223,64-228,28 mgkg), trong khi $Al_{TrĐ}$ thấp nhất ở CT3 (43,92 mg/kg). Trên đất phèn, $Ca_{TrĐ}$ cao nhất ở CT3 (819,98 mg/kg) so với 690,08 mg/kg (CT1), còn $Al_{TrĐ}$ giảm từ 193,75 mg/kg (CT1) xuống khoảng 172 mg/kg (CT2, CT3). Như vậy, than sinh học đã ảnh hưởng mạnh lên $Ca_{Trđ}$, $Al_{Trđ}$ đặc biệt trên đất phèn và đất xám và đều khác biệt có ý nghĩa thống kê giữa các loại đất và các công thức.

Bảng 3.9 Thành phần của một số kim loại nặng trao đổi của các loại đất sau thí nghiệm sử dụng than sinh học

Loại đất	Công thức	$Cd_{TrĐ}$	$Cu_{TrĐ}$	$Pb_{TrĐ}$	$Co_{TrĐ}$	$Ni_{TrĐ}$	$Zn_{TrĐ}$
Phù sa	CT1	$0,30^{bcd}$±0,03	$12,86^{c}$±0,85	$0,38^{b}$±0,04	$19,60^{d}$±0,40	$1,93^{a}$±0,08	$4,42^{c}$±0,18
	CT2	$0,31^{bcd}$±0,01	$10,80^{de}$±0,63	$0,28^{c}$±0,02	$18,32^{d}$±0,52	$1,82^{ab}$±0,10	$3,62^{d}$±0,12
	CT3	$0,31^{bc}$±0,03	$11,75^{cd}$±0,26	$0,28^{c}$±0,03	$18,26^{d}$±0,87	$1,81^{ab}$±0,10	$3,31^{d}$±0,03
Mặn	CT1	$0,25^{d}$±0,02	$4,78^{h}$±0,22	$0,11^{d}$±0,01	$25,26^{ab}$±1,33	$1,31^{ef}$±0,09	$0,90^{f}$±0,09
	CT2	$0,26^{cd}$±0,02	$4,84^{h}$±0,09	$0,12^{d}$±0,00	$23,31^{bc}$± ,24	$1,25^{f}$±0,04	$0,88^{f}$±0,11
	CT3	$0,26^{cd}$±0,02	$4,26^{h}$±0,61	$0,11^{d}$±0,01	$23,04^{bc}$±1,12	$1,18^{fg}$±0,06	$0,82^{f}$±0,01
Xám	CT1	$0,15^{e}$±0,02	$9,94^{ef}$±0,46	$0,42^{b}$±0,00	$14,08^{e}$±0,30	$1,00^{g}$±0,05	$2,26^{e}$±0,15
	CT2	$0,16^{e}$±0,01	$8,74^{fg}$±0,20	$0,40^{b}$±0,02	$12,58^{ef}$±0,08	$0,77^{h}$±0,02	$2,00^{e}$±0,08
	CT3	$0,17^{e}$±0,01	$8,09^{g}$±0,91	$0,38^{b}$±0,01	$11,41^{f}$±0,96	$0,73^{h}$±0,02	$2,10^{e}$±0,17
Phèn	CT1	$0,35^{ab}$±0,01	$27,12^{a}$±1,04	$0,69^{a}$±0,02	$27,18^{a}$±1,28	$1,69^{bc}$±0,03	$7,12^{a}$±0,40
	CT2	$0,37^{a}$±0,00	$25,39^{b}$±0,24	$0,65^{a}$±0,02	$22,51^{c}$±0,44	$1,47^{de}$±0,06	$6,42^{b}$±0,05
	CT3	$0,40^{a}$±0,02	$25,92^{ab}$±0,54	$0,70^{a}$±0,04	$24,51^{bc}$±1,03	$1,55^{cd}$±0,04	$6,88^{ab}$±0,13

Hàm lượng kim loại nặng chịu ảnh hưởng rõ rệt bởi cả loại đất và công thức xử lý, với các xu hướng giảm tích lũy đáng chú ý khi có sử dụng than sinh học (Bảng 3.9). So sánh giữa các loại đất, đất phèn thể hiện mức độ ô nhiễm kim loại nặng cao nhất, với hàm lượng trao đổi của các nguyên tố như Cd, Cu, Pb và Zn đều vượt trội so với các loại đất khác, khác biệt có ý nghĩa thống kê. Điều này phản ánh bản chất phèn chua, giàu kim loại dễ hòa tan và dễ tích lũy trong điều kiện yếm khí. Ngược lại, đất xám có nồng độ kim loại nặng thấp nhất ở hầu hết các chỉ tiêu, đặc biệt là Ni và Zn, cho thấy nguy cơ ô nhiễm thấp hơn. Đất mặn và đất phù sa có hàm lượng trung bình, nhưng cũng cho thấy hiệu quả cải thiện khi sử dụng than sinh học. Về hiệu quả của các công thức xử lý, CT2 và CT3 đều giúp làm giảm hàm lượng một số kim loại, nổi bật nhất là Pb và Zn và khác biệt có ý nghĩa thống kê. Trên đất phù sa, Pb giảm từ 0,38 mg/kg (CT1) xuống còn 0,28 mg/kg ở CT2 và CT3. Trên đất xám, Pb giảm từ 0,42 (CT1) xuống 0,40 (CT2) và 0,38 (CT3). Xu hướng giảm cũng được ghi nhận với Zn và Co, đặc biệt khi dùng than trấu. Theo từng kim loại, Pb và Zn cho thấy khả năng giảm ổn định ở tất cả các loại đất sau khi xử lý than sinh học, đặc biệt rõ rệt ở đất phèn và đất phù sa. Cu và Co cũng giảm nhẹ ở nhiều điều kiện, tuy nhiên đất phèn vẫn duy trì mức cao. Với Cd và Ni, hiệu quả xử lý chưa thực sự rõ ràng, cho thấy việc kiểm soát hai kim loại này còn phụ thuộc vào các yếu tố khác.

3.2.3 Ảnh hưởng của than sinh học đến sinh trưởng, năng suất lúa

Bảng 3.10 Sinh trưởng, năng suất lúa (kg/m^2) trên các loại đất sau thí nghiệm sử dụng than sinh học

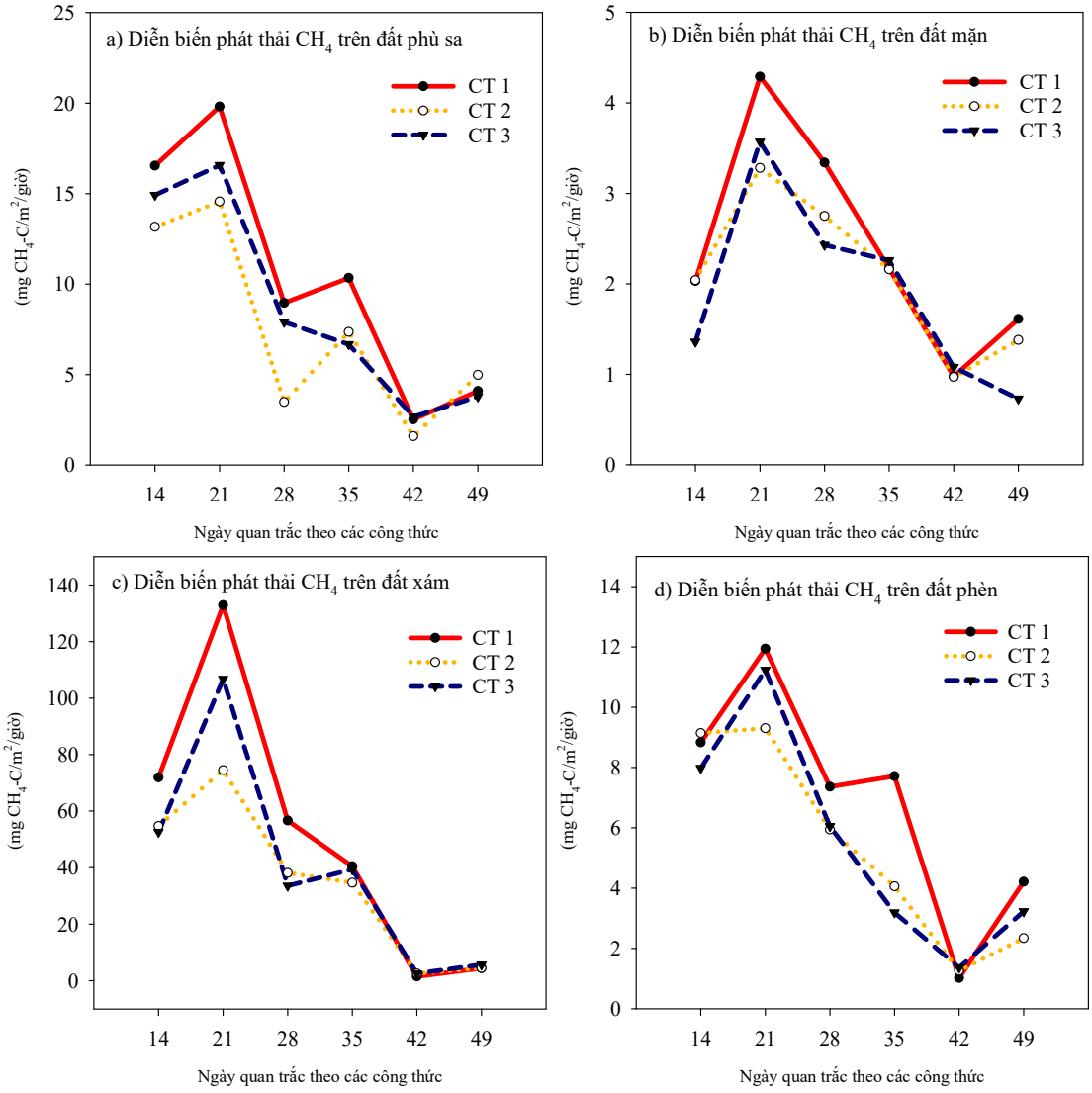
Loại đất	Công thức	Rễ	Rơm	Hạt	Tổng sinh khối
Phù sa	CT1	0,83^{a}±0,07	1,20^{a}±0,06	0,69^{a}±0,04	2,72^{a}±0,03
	CT2	0,68^{a}±0,05	1,26^{a}±0,08	0,76^{a}±0,04	2,69^{a}±0,08
	CT3	0,66^{a}±0,06	0,99^{b}±0,07	0,66^{a}±0,04	2,31^{b}±0,03
Mặn	CT1	0,40^{b}±0,04	0,92^{b}±0,09	0,31^{c}±0,02	1,63^{b}±0,11
	CT2	0,49^{ab}±0,03	0,92^{b}±0,02	0,42^{b}±0,02	1,83^{b}±0,07
	CT3	0,61^{a}±0,07	1,28^{a}±0,08	0,62^{a}±0,00	2,52^{a}±0,10
Xám	CT1	0,50^{b}±0,08	0,65^{b}±0,04	0,40^{b}±0,07	1,56^{b}±0,08
	CT2	0,78^{a}±0,02	1,12^{a}±0,03	0,56^{ab}±0,04	2,47^{a}±0,06
	CT3	0,77^{a}±0,06	1,12^{a}±0,05	0,65^{a}±0,08	2,55^{a}±0,07
Phèn	CT1	0,35^{b}±0,02	0,88^{b}±0,03	0,65^{a}±0,04	1,18^{b}±0,04
	CT2	0,44^{a}±0,01	1,18^{a}±0,06	0,57^{ab}±0,02	2,18^{a}±0,05
	CT3	0,45^{a}±0,03	1,07^{ab}±0,08	0,48^{b}±0,03	2,01^{b}±0,04

Ghi chú: Dữ liệu trong bảng ở mục này được trình bày dưới dạng trung bình ± SE (sai số chuẩn của giá trị trung bình với n = 3). Trên mỗi thông số có gắn cùng chữ cái khác biệt không có ý nghĩa thống kê. CT1: không sử dụng than sinh học, CT2: than trấu, CT3: than nhãn. EC: Độ dẫn điện, CEC: dung tích trao đổi cation.

Bảng 3.10 cho thấy đất phù sa có tổng sinh khối cao nhất, dao động từ 2,31–2,72 kg/m², phản ánh điều kiện canh tác thuận lợi và độ phì cao. Đất xám đứng thứ hai (1,56–2,55 kg/m²), nhờ hiệu quả cải thiện khi có bổ sung than sinh học. Đất mặn cũng cho tổng sinh khối cải thiện đáng kể (1,63–2,52 kg/m²), đặc biệt khi sử dụng than nhãn. Trong khi đó, đất phèn cho năng suất thấp nhất (1,18–2,18 kg/m²), do điều kiện đất bất lợi nhưng vẫn cho thấy tiềm năng cải thiện khi áp dụng than. Xét theo công thức xử lý trong từng loại đất, CT1 (không xử lý) cho năng suất hạt và tổng sinh khối thấp nhất ở hầu hết các loại đất. Trên đất phù sa, CT2 cho năng suất hạt cao nhất (0,76 kg/m²), trong khi CT3 lại thấp hơn, phản ánh rằng than trấu thích hợp hơn than nhãn về việc thúc đẩy năng suất được tốt hơn. Đối với đất mặn, CT3 vượt trội với tổng sinh khối cao nhất (2,52 kg/m²) và năng suất hạt (0,62 kg/m²), cho thấy than nhãn phù hợp cải tạo mặn. Trên đất xám, CT2 và CT3 đều cải thiện đáng kể so với CT1, trong đó CT3 năng suất hạt cao hơn (0,65 kg/m²), cho thấy

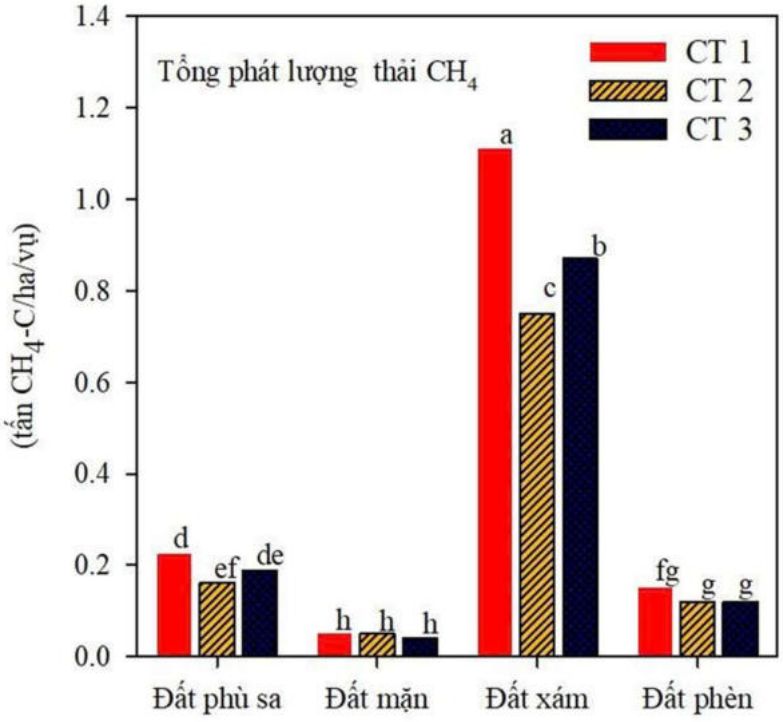
hiệu quả tương đương của hai loại than. Trên đất phèn, cả CT2 và CT3 đều cải thiện tốt hơn CT1, đặc biệt CT2 đạt năng suất hạt cao nhất (0,57 kg/m²), phản ánh tác động tích cực của than trấu trong điều kiện phèn chua. Nhìn chung, dữ liệu thể hiện xu hướng nhất quán: việc bổ sung than sinh học (đặc biệt là CT2 và CT3) giúp tăng năng suất hạt và tổng sinh khối lúa trên tất cả các loại đất, với mức độ khác nhau tùy điều kiện đất đai. Kết quả này phù hợp với giả thuyết khoa học số 4 "Than sinh học cải thiện sinh trưởng và phát triển của cây lúa trên đất phèn và đất xám tốt hơn hai loại đất còn lại".

3.2.4 Ảnh hưởng của than sinh học đến phát thải CH_4



Hình 3.3 Diễn biến phát thải CH_4 của thí nghiệm trồng lúa nước trên đất phù sa (a), đất mặn (b), đất xám (c) và đất phèn (d) bị ảnh hưởng bởi than sinh học

Hình 3.3 cho thấy hàm lượng CH_4 đều biến thiên theo xu hướng chung: tăng nhanh và đạt đỉnh vào khoảng 21 ngày sau gieo, sau đó giảm dần đến cuối vụ ở cả bốn loại đất. Sau 42 ngày sau gieo, tỷ lệ phát thải CH_4 giảm xuống ổn định không tương đối giống nhay ở các công thức thí nghiệm. Trên đất xám, phát thải CH_4 cao nhất (đỉnh 132 mg CH_4/m^2/giờ ở CT1), gần gấp ba lần CT2 và CT3 (khoảng 30-40 mg CH_4-C/m^2/giờ) và giảm dần đến cuối chu kỳ (ngày 49). Trên đất phù sa, CH_4 phát thải đạt đỉnh ở ngày 21, đạt đỉnh với CT1 lên tới 19,81 mg CH_4-C/m^2/giờ cao hơn so với CT2 và CT3 (14-16 mg CH_4-C/m^2/giờ) rồi giảm mạnh đáng kể. Trên đất phèn, CH_4 phát thải ở mức trung bình, với sự khác biệt rõ rệt giữa CT1 (cao nhất) và CT3 (thấp nhất) ở giai đoạn giữa vụ. Trên đất mặn, phát thải thấp nhất với CT1 khoảng đạt đỉnh khoảng 4,3 mg CH_4-C/m^2/giờ, trong khi CT2 và CT3 chỉ khoảng 1-3 mg CH_4-C/m^2/giờ. Sau ngày 21, tất cả các công thức giảm dần và ổn định ở mức thấp từ sau ngày 35. Tổng thể, CT1 luôn cho phát thải CH_4 cao nhất, trong khi CT3 giúp kiểm soát phát thải tốt hơn, đặc biệt trên đất xám và đất phù sa.



Hình 3.4 Tổng lượng phát thải CH_4 của thí nghiệm trồng lúa nước sử dụng than sinh học trên đất phù sa, đất mặn, đất xám và đất phèn.

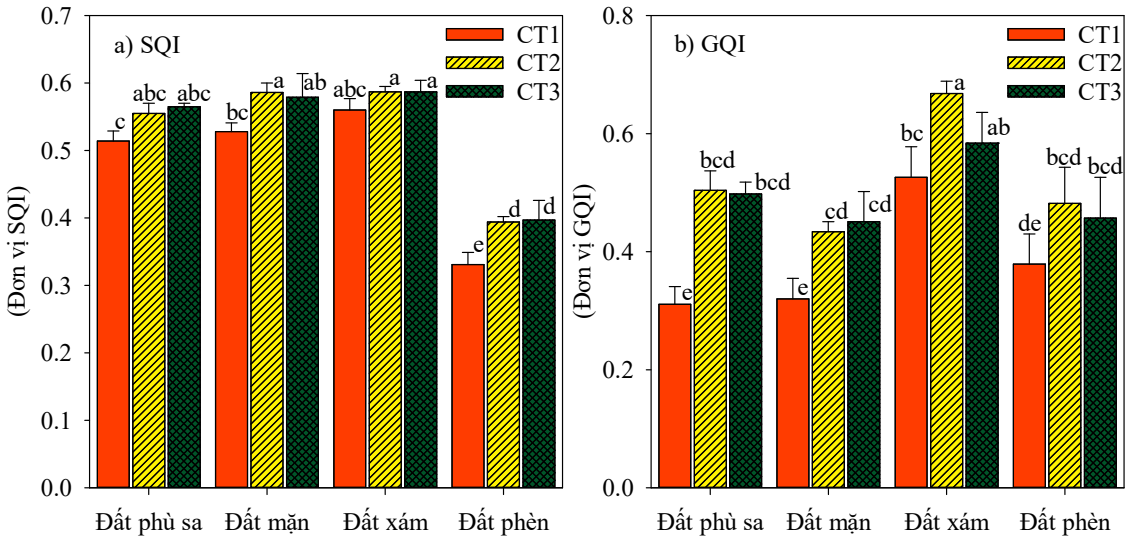
Ghi chú: Trên mỗi thông số có gắn cùng chữ cái khác biệt không có ý nghĩa thống kê. CT1: không sử dụng than sinh học, CT2: than trấu, CT3: than nhãn.

Hình 3.4 cho thấy CT2 và CT3 đều có lượng phát thải giảm đáng kể so với đối chứng. Trên đất phù sa, CT1 đạt 0,22 tấn CH_4-C/ha/vụ, trong khi CT2 và CT3 chỉ khoảng 0,16-0,19 tấn/ha (chênh lệch có ý nghĩa thống kê). Đất mặn có mức phát thải thấp nhất (< 0,06 tấn/ha). Đất xám, CT1 phát thải 1,10 tấn CH_4-C/ha/vụ, CT2 giảm mạnh còn 0,75 tấn/ha/vụ, CT3 ở mức 0,88 tấn/ha. Than trấu tỏ ra hiệu quả hơn trong việc giảm phát thải CH_4 trên đất xám do cấu trúc thoáng khí, các chất hữu cơ không được bảo vệ bởi các khoáng sét tạo điều kiện thuận lợi cho nhóm vi sinh vật methanogene sử dụng, dẫn đến giảm phát thải mạnh hơn so với các loại đất còn lại. Trên đất phèn, CT1 phát thải 0,15 tấn/ha, CT2 -CT3 đều giảm xuống 0,12 tấn/ha. Các kết quả nghiên cứu này còn cho thấy than sinh học phát huy tác dụng mạnh nhất trên đất xám, phù hợp với giả thuyết khoa học số 3 "Sử dụng than sinh học từ vỏ trấu và thân cành nhãn có thể làm hạn chế phát thải khí CH_4 trên đất xám nhiều hơn trên các loại đất khác".

3.2.5 Các chỉ số sau thí nghiệm

Trong các hình, trên mỗi thông số có gắn cùng chữ cái khác biệt không có ý nghĩa thống kê. CT1: không sử dụng than sinh học, CT2: than trấu, CT3: than nhãn.

3.2.5.1 Chỉ số chất lượng đất và chỉ số chất lượng hạt của các loại đất



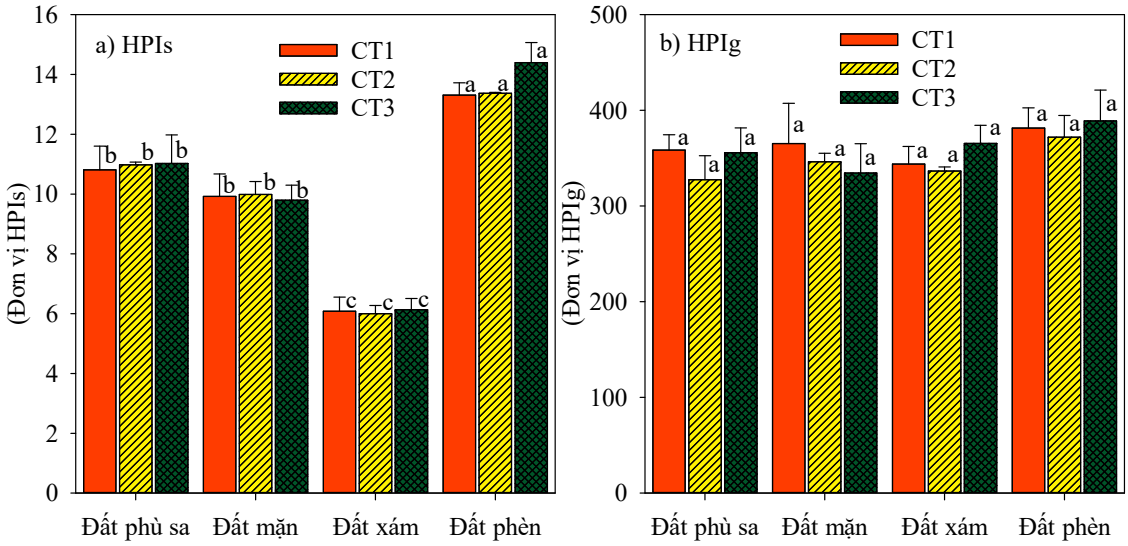
Hình 3.5 Chỉ số chất lượng đất (SQI, a) và chỉ số chất lượng hạt lúa (GQI, b) của các loại đất sau thí nghiệm sử dụng than sinh học

Dựa trên kết quả từ PCA/FA (Bảng 4.2, Phụ lục 4), SQI của 4 loại đất đã được tính toán và hiển thị trong Hình 3.5a. Trên đất phù sa, SQI của CT1 là 0,51, thấp hơn so với CT2 (0,55) và CT3 (0,56), cho thấy cả than trấu và than nhãn đều cải thiện chất lượng đất rõ rệt. Tương tự, trên đất mặn, SQI tăng từ 0,53 (CT1) lên 0,59 (CT2) và 0,58 (CT3). Đất xám có giá trị SQI cao nhất, dao động từ 0,56 (CT1) đến 0,59 (CT2 và CT3), phản ánh hiệu quả nổi bật của than sinh học trên loại đất này. Ngược lại, đất phèn có giá trị SQI thấp nhất, chỉ đạt 0,33 (CT1), tăng lên 0,39 (CT2) và 0,40 (CT3). Nhìn chung, CT3 đạt giá trị SQI cao hơn CT2, nhưng sự khác biệt không đáng kể về mặt thống kê. Đất phù sa, đất mặn và đất xám đều có SQI cao hơn đáng kể so với đất phèn và do đó than sinh học có tác dụng thấp nhất trên đất phèn. Kết quả này cho thấy một phần giả thuyết khoa học số 2 trong nội dung "Chỉ số chất lượng đất của đất phèn và đất xám được cải thiện nhiều hơn khi sử dụng than sinh học so với các loại đất khác" được chứng minh.

Tương tự, GQI cũng được tính dựa trên các kết quả phân tích các thành phần trong hạt (Bảng 4.3, Phụ lục 4) kết hợp phương pháp PCA/FA (Bảng 4.4, Phụ lục 4) và được hiển thị trong Hình 3.5b. GQI ở các loại đất tương đồng nhau và việc sử dụng

than sinh học đều cho GQI cao hơn có ý nghĩa thống kê so với không sử dụng than sinh học. Trên đất phù sa, GQI của CT1 là 0,31, thấp hơn so với CT2 và CT3 (cả hai đạt 0,50), cho thấy việc sử dụng than sinh học đã cải thiện đáng kể chất lượng hạt lúa. Tương tự, trên đất mặn, GQI của CT1 đạt 0,32, tăng lên 0,43 ở CT2 và 0,45 ở CT3. Đối với đất xám, GQI đạt giá trị cao nhất trong tất cả các loại đất, với CT1 đạt 0,53, trong khi CT2 và CT3 lần lượt đạt 0,67 và 0,58. Kết quả này chứng tỏ hiệu quả rõ rệt của than trấu trong việc nâng cao chất lượng hạt lúa trên loại đất này. CT2 đạt giá trị GQI cao hơn so với CT3, đặc biệt trên đất xám. Kết quả này khẳng định vai trò tích cực của than sinh học trong việc cải thiện chất lượng hạt lúa.

3.2.5.2 Chỉ số ô nhiễm kim loại nặng trong đất và nhiễm kim loại nặng trong hạt

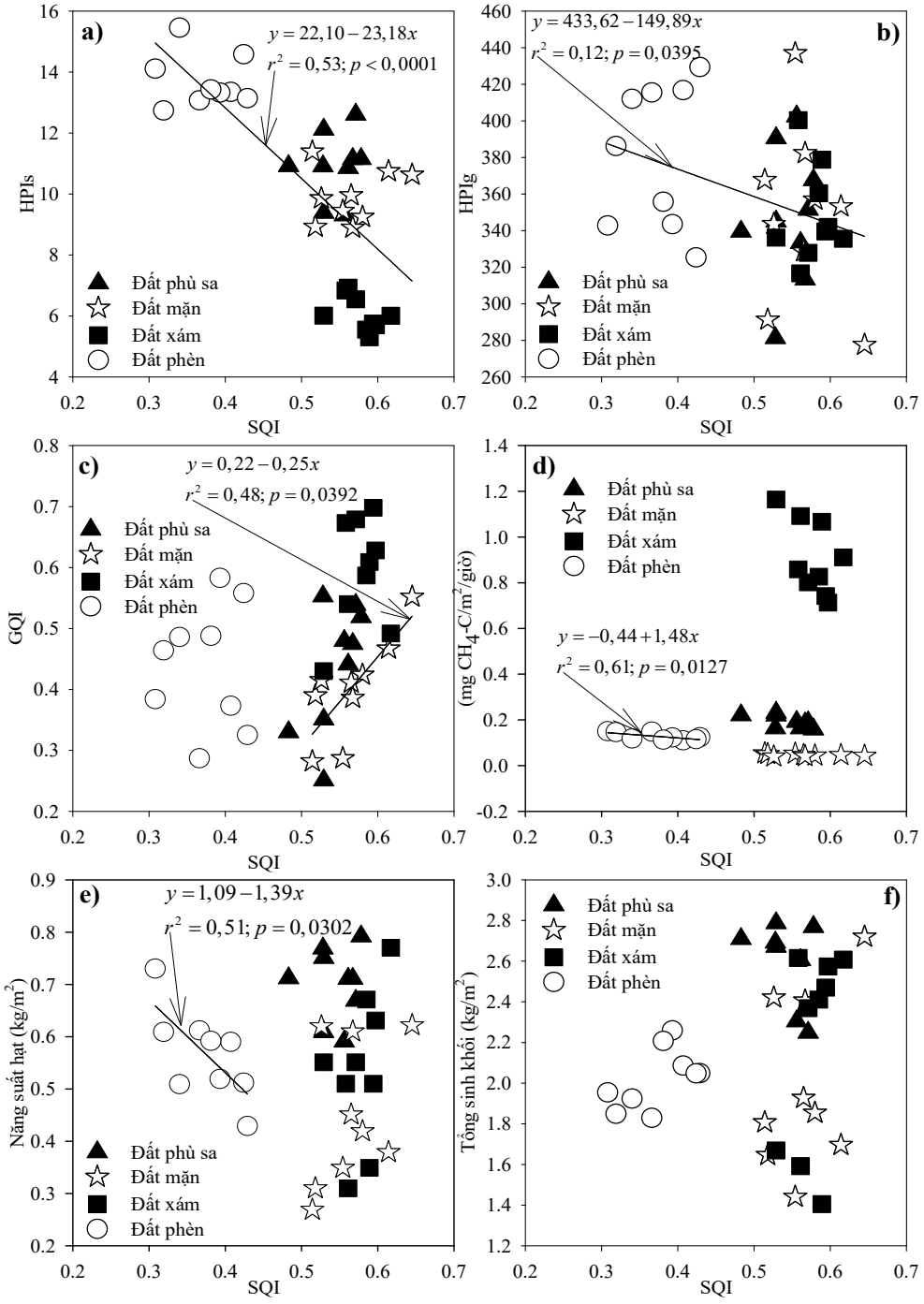


Hình 3.6 Chỉ số nhiễm kim loại nặng trong đất (HPIs, a) và nhiễm kim loại nặng trong hạt (HPIg, b) của các loại đất sau thí nghiệm sử dụng than sinh học

Trên đất phù sa, giá trị HPIs của cả ba công thức tương đối đồng đều dao động từ 10,81-11,0. Kết quả tương tự cũng được quan sát trên đất mặn, với HPIs dao động trong khoảng 9,92-9,98 và không có sự khác biệt giữa các công thức. Đối với đất xám, giá trị HPIs thấp hơn đáng kể, chỉ đạt khoảng 6,0-6,14. Điều này cho thấy mức độ ô nhiễm kim loại nặng ở đất xám thấp hơn so với đất phù sa và đất mặn và việc sử dụng than sinh học không làm thay đổi chỉ số này. Ngược lại, đất phèn có giá trị HPIs cao nhất trong các loại đất, đạt dao động 13,31-14,0 phản ánh mức độ ô nhiễm kim loại nặng nghiêm trọng trên đất phèn. Kết quả cho thấy việc sử dụng than sinh học (than trấu và than nhãn) với liều lượng 10 tấn/ha không làm giảm chỉ số ô nhiễm kim loại nặng trên tất cả các loại đất nghiên cứu và không có sự khác biệt có ý nghĩa thống kê giữa các công thức (Hình 3.6a). Kết quả này không ủng hộ giả thuyết khoa học số 2 đã đặt ra với nội dung "Chỉ số ô nhiễm kim loại nặng trong đất của đất phèn và đất xám được cải thiện nhiều hơn khi sử dụng than sinh học so với các loại đất khác". Điều này có thể do lượng than sinh học sử dụng còn thấp nên khả năng hấp phụ các kim loại nặng có trong 4 loại đất bị hạn chế, đặc biệt là đất phèn và đất xám. Hình 3.6b cho thấy giá trị HPIg (được tính dựa trên các kết quả phân tích các thành phần kim loại nặng trong hạt tại Bảng 4.5, Phụ lục 4) dao động từ khoảng 327,48 đến 365,34 và không có sự khác biệt có ý nghĩa thống kê giữa các công thức trên các loại đất. Việc sử dụng than sinh học, dù là than trấu hay than nhãn, với liều lượng 10 tấn/ha không làm thay đổi đáng kể HPIg trên tất cả các loại đất. Điều này có thể cho thấy hiệu quả cố định kim loại nặng của than sinh học chưa đủ mạnh trong ngắn hạn, hoặc các yếu tố nội tại của đất đã hạn chế khả năng giảm sự tích lũy kim loại nặng vào hạt lúa. Mặt khác cây lúa cũng tự phát triển các cơ chế nhằn hạn chế quá trình hút, vận chuẩn và tịch lũy các kim loại nặng trong hạt, làm giảm ảnh hưởng của than sinh học.

3.2.6 Các mối tương quan

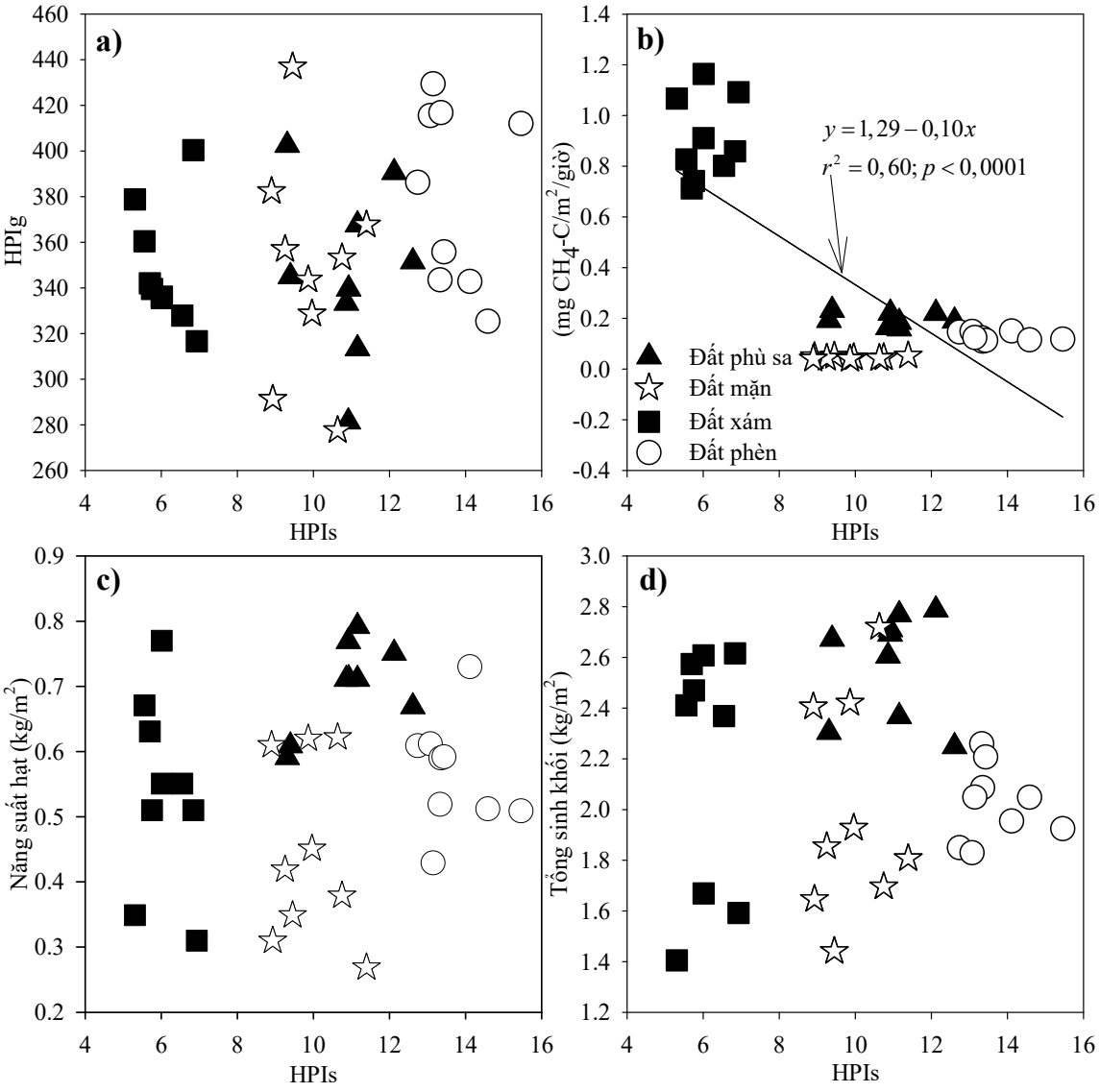
3.2.6.1 Mối tương quan giữa chỉ số chất lượng đất với chỉ số ô nhiễm kim loại nặng trong đất, chỉ số nhiễm kim loại nặng trong hạt, chỉ số chất lượng hạt, tổng phát thải CH_4, năng suất hạt và tổng sinh khối



Hình 3.7 Mối tương quan giữa SQI với HPIs (a), HPIg (b), GQI (c), tổng phát thải CH_4 (d), năng suất hạt (e) và tổng sinh khối (f)

Hình 3.7a cho thấy mối tương quan nghịch mạnh, mỗi giá trị SQI tăng làm HPIs giảm mạnh. Dữ liệu từ đất phèn tập trung ở vùng SQI thấp - HPIs cao, trong khi đất xám nằm ở vùng SQI cao - HPIs thấp, đất mặn và đất phù sa ở mức trung bình. Điều này khẳng định sức mạnh của SQI trong dự báo ô nhiễm kim loại nặng trong đất. Hình 3.7b cũng cho thấy mối tường quan hệ nghịch mạnh giữa SQI và HPIg và có ý nghĩa thống kê, SQI tăng tương ứng HPIg giảm. Sự phân bố của các loại đất cũng phản ánh xu hướng tương tự như SQI và HPIs. Mặt khác, Hình 3.7c chỉ cho thấy GQI tăng khi SQI tăng trên đất mặn có ý nghĩa thống kê. Các loại đất còn lại có các điểm phân tán không đồng đều, phản ánh SQI không làm ảnh hưởng đến GQI. Bên cạnh đó, mối tương quan nghịch thể hiện rõ tại Hình 3.7d cho thấy SQI tăng đi kèm với giảm phát thải CH_4 thấp ở các loại đất, đặc biệt giảm mạnh ở đất phèn có ý nghĩa thống kê. Hình 3.7e cho thấy năng suất hạt giảm khi SQI tăng trên đất phèn. Các loại đất còn lại có các điểm phân tán không đồng đều, phản ánh SQI không có mối liên hệ chặt với năng suất hạt. Không quan sát được mối tương quan có ý nghĩa nào tại Hình 3.7f, các điểm dữ liệu phân tán không tuân theo xu hướng tuyến tính rõ ràng, cho thấy tổng sinh khối không chịu ảnh bởi SQI.

3.2.6.2 Mối tương quan giữa chỉ số ô nhiễm kim loại nặng trong đất với chỉ số nhiễm kim loại nặng trong hạt, tổng phát thải CH_4, năng suất hạt và tổng sinh khối



Hình 3.8 Mối tương quan giữa HPIs với HPIg (a), tổng phát thải CH_4 (b), năng suất hạt (c) và tổng sinh khối (d)

Hình 3.8 cho thấy không có mối tương quan có ý nghĩa thống kê giữa HPIs trong đất và HPIg, năng suất hạt, và tổn sinh khối lúa. Đặc biệt Hình 3.8b cho thấy mối tương quan nghịch rõ ràng giữa HPIs với tổng phát thải CH_4, mỗi giá trị HPIs tăng thì làm giảm phát thải CH_4 ở các loại đất và có ý nghĩa thống kê. Điều này cho thấy tình trạng ô nhiễm kim loại nặng trong đất có vai trò quan trọng trong việc ảnh hưởng đến mức độ phát thải khí nhà kính CH_4 trong các ruộng lúa nước. Đất bị ô

nhiễm kim loại nặng là điều kiện không phù hợp để các nhóm vi khuẩn methanogen hoạt động, từ đó làm giảm phát thải khí methane.

3.2.7 Một số thảo luận

***** *Ảnh hưởng của than sinh học đến tính chất hóa học các loại đất*

Than sinh học, bao gồm than trấu và than nhãn (được sử dụng trong nghiên cứu này có độ kiềm cao do chứa hàm lượng Ca^{2+}, K^{+}, Mg^{2+} cao nên khi bón vào đất phèn sẽ trung hòa các axit tự do và trao đổi, nâng pH đất. Cơ chế này tương tự hiệu ứng kiềm hóa, trong đó các cation kiềm từ than sinh học trung hòa axit tự do và trao đổi trong đất, góp phần nâng pH mà không cần sử dụng vôi vô cơ truyền thống. Do đó pH đất phèn và đất xám sau khi bón than trấu và than nhãn đều tăng đáng kể so với đối chứng. Bón than sinh học có xu hướng tăng pH đất, đồng thời làm giảm độ chua trao đổi nhờ tăng khả năng đệm axit của đất [133, 134]. Than sinh học vừa giải phóng trực tiếp một phần P nội tại vừa gián tiếp cải thiện tính chất hóa học đất đồng thời nhờ việc tăng pH từ đó làm tăng P dễ tiêu. Ở đất phèn do có pH thấp, tiếp theo là đất xám khiến P dễ bị cố định, nên hiệu ứng làm tăng P dưới tác động than sinh học càng thể hiện rõ rệt qua kết quả trong nghiên cứu này. Than sinh học có khả năng giải phóng P nội sinh và thúc đẩy quá trình hòa tan apatit, làm tăng P khả dụng so với nền đất ban đầu [135]. Than trấu được sử dụng trong nghiên cứu này có chứa hàm lượng $K_{TrĐ}$ cao nên khi bón than, $K_{TrĐ}$ từ than được tự do giải phóng vào dung dịch đất, cải thiện $K_{TrĐ}$ đáng kể, đặc biệt trên đất xám vốn có CEC thấp và khả năng giữ K kém [136]. Từ đó, giá trị CEC trong đất xám cũng tăng lên khi sử dụng than sinh học giúp đất xám nâng khả năng giữ dinh dưỡng và ổn định pH hơn tương tự như nghiên cứu của Kabir, et al. [137]. Các ion Al^{3+} và Fe^{3+} dễ hòa tan và gây độc cho lúa, than sinh học có tác dụng khống chế Al và Fe trao đổi qua hai cơ chế chính: (i) tăng pH làm kết tủa hydroxide Al và Fe, (ii) hấp phụ trực tiếp lên bề mặt carbon xốp và các nhóm chức [133, 138]. Do đó, lượng $Al_{TrĐ}$ và $Fe_{TrĐ}$ trong đất phèn, xám giảm mạnh sau bón than, đặc biệt với CT3 và CT2. Từ các yếu tố trên, SQI là chỉ số được tổng hợp và tính toán nên cải thiện ở từng thành phần sẽ dẫn đến tăng SQI chung. Kết quả cho thấy khi áp dụng than sinh học, chất lượng các loại đất đều tăng

đặc biệt tăng cao nhất là đất xám, tiếp theo là đất mặn, đất phù sa thấp nhất là đất phèn. Ngoài ra, sự sụt giảm CEC của đất xám ở CT1 từ 9,72 xuống 8,84 cmol(+)/kg sau thí nghiệm chủ yếu do rửa trôi cation trên nền đất cơ giới nhẹ trong điều kiện ngập nước liên tục, không phải sai số phân tích vì độ lặp lại mẫu (n = 3) đạt mức chấp nhận. Về P dễ tiêu cao trong than trấu (2.260 mg/kg), nguy cơ phú dưỡng nguồn nước được hạn chế do P bị cố định bởi Fe^{3+}/Al^{3+} trong điều kiện ngập liên tục. Mặc dù than nhãn có OC đầu vào cao (63,7%), mức tăng carbon trong đất không vượt trội hơn than trấu vì cấu trúc ligno-cellulosic tích hợp chậm vào phức hệ keo đất nghèo sét, trong khi than trấu giàu silica tạo cầu nối khoáng-hữu cơ hiệu quả hơn.

***** *Ảnh hưởng của than sinh học đến chất lượng hạt lúa, các thành phần kim loại, các chỉ số HPI trong đất và hạt lúa*

Than sinh học nhãn và trấu cải thiện khả năng giữ ẩm và cân bằng dinh dưỡng (N, P, K), giúp hạt lúa tích luỹ protein và tinh bột đều hơn, từ đó nâng cao chất lượng hạt bất kể loại đất [139]. Kết quả cũng cho thấy than sinh học làm giảm hàm lượng Zn, Co và Cu trao đổi trong đất phèn và xám mạnh nhất so với không sử dụng than sinh học là do bề mặt xốp và nhóm chức axit hữu cơ của than sinh học tạo phức chelate và hấp phụ mạnh với Zn^{2+}, Co^{2+} và Cu^{2+}, làm giảm đáng kể hàm lượng trao đổi của chúng trong đất [140]. Mặt khác, HPIs và HPIg được sử dụng để đánh giá mức độ ô nhiễm kim loại nặng trong đất và nhiễm kim loại trong hạt. Đất phèn có chỉ số SQI thấp nhất, do chứa các cation kim loại gây độc cao như Al và Fe, dẫn đến HPIs cao nhất so với các loại đất khác. Mặc dù than sinh học giảm khả năng trao đổi của một số kim loại nặng nhưng dẫn đến các chỉ số HPIs và HPIg không khác biệt có ý nghĩa thống kê. Nhìn chung HPIs và HPIg có xu hướng giảm khi SQI tăng do than sinh học có khả năng hấp phụ kim loại nặng, làm giảm sự di chuyển và tích tụ của chúng [141].

** Ảnh hưởng của than sinh học đến khả năng giảm phát thải CH_4 các loại đất*

Việc bổ sung than sinh học, như than trấu và than nhãn, có khả năng tác động đến các điều kiện môi trường đất, làm thay đổi quá trình phân giải yếm khí và ảnh hưởng đến tổng lượng phát thải CH_4 [142]. Khi sử dụng than sinh học, tổng phát thải CH_4 trên đất xám giảm từ 1,11 tấn CH_4-C/ha/vụ (CT1) xuống còn 0,75 tấn (CT2) và 0,87 tấn (CT3), tương ứng mức giảm 32% và 22% so với đối chứng (Hình 3.4). Mức giảm phát thải lớn trên đất xám có thể liên quan đến việc than sinh học cải thiện pH đất xám vốn có pH thấp và CEC kém, tạo điều kiện bất lợi cho hoạt động của vi khuẩn sinh CH_4 vốn hoạt động tối ưu trong môi trường pH trung tính đến kiềm nhẹ. Trên đất phèn và đất mặn, mức giảm phát thải thấp hơn có thể do pH ban đầu đã bị chi phối bởi các yếu tố đặc thù như Fe^{2+}, SO_4^{2-} và độ mặn cao, làm hạn chế hiệu quả kiềm hóa của than sinh học và chế hoạt động của vi sinh vật hiếu khí. Đất phèn với tính axit cao và các đặc tính hóa học khác như ô nhiễm các kim loại gây độc nên có lượng phát thải thấp nhất trong các loại đất. Khi bổ sung than trấu vào đất phèn, các tác động chính bao gồm việc cải thiện khả năng thoáng khí trong đất do đó giảm sự hoạt động của vi khuẩn methanogen - tác nhân chính sản sinh CH_4 [142]. Mặc dù khả năng hấp phụ chất hữu cơ của than nhãn không bằng than trấu, nhưng than nhãn vẫn làm giảm đáng kể lượng chất hữu cơ có sẵn để vi khuẩn yếm khí phân giải, từ đó làm giảm lượng CH_4 phát thải. Than nhãn có khả năng cải thiện độ thoáng khí và khả năng thoát nước của đất nên đã giảm phát thải CH_4 mang lại hiệu quả trên đất xám mặc dù hiệu quả không cao bằng than trấu. [143]. Trong điều kiện thực địa, phát thải CH_4 thường duy trì cao từ tuần thứ 3 đến tuần thứ 5 và giảm nhẹ đến tuần thứ 7 do rễ lúa liên tục tiết hợp chất hữu cơ cung cấp cơ chất cho vi khuẩn sinh CH_4. Tuy nhiên, trong thí nghiệm nhà lưới (Hình 3.3), phát thải đạt đỉnh vào ngày 21 và giảm nhanh sau đó do thể tích đất và nước bị giới hạn, lượng chất hữu cơ nền thấp và không có sự bổ sung cơ chất liên tục, khiến cơ chất cho vi khuẩn sinh CH_4 bị cạn kiệt sớm hơn so với thực địa. Mặc dù có sự khác biệt về thời điểm đỉnh phát thải, xu hướng CT2 và CT3 luôn thấp hơn CT1 nhất quán trên cả bốn loại đất, khẳng định hiệu quả ức chế CH_4 của than sinh học là ổn định trong điều kiện thí nghiệm nhà lưới.

** Ảnh hưởng của than sinh học đến sinh trưởng và năng suất lúa các loại đất*

Than sinh học như than trấu và than nhãn có khả năng cải thiện các tính chất hóa học của các loại đất nghiên cứu, đặc biệt là trên đất phèn, dẫn đến những tác động tích cực lên sự sinh trưởng và năng suất cây trồng [144]. Khi áp dụng vào sản xuất lúa, những cải thiện này không chỉ ảnh hưởng đến các yếu tố hóa học của đất mà còn làm tăng tổng sinh khối cây lúa [145]. Bổ sung than trấu và nhãn đã cho thấy hiệu quả rõ hơn ở các loại đất, đặc biệt trên đất phèn và đất xám. Đồng thời việc cải thiện pH từ đó làm giảm các nguyên tố gây độc như Al và Fe trên đất phèn và cải tạo hàm lượng dinh dưỡng trên đất xám là những nguyên nhân làm cho sinh trưởng và năng suất lúa được cải thiện nhờ sử dụng than sinh học.

3.2.8 Tiểu kết nội dung 2

Nghiên cứu cho thấy các công thức thí nghiệm có ảnh hưởng khác biệt đáng kể đến tính chất hóa học, sinh trưởng và năng suất lúa, khả năng giảm phát thải CH_4, chỉ số chất lượng đất (SQI), chỉ số chất lượng hạt, chỉ số ô nhiễm kim loại nặng trong đất (HPIs), chỉ số nhiễm kim loại nặng trong hạt (HPIg). So với công thức đối chứng, các công thức sử dụng than sinh học làm tăng giá trị pH và làm giảm độ chua các loại đất nghiên cứu. Áp dụng than sinh học cải thiện mức P dễ tiêu và K trao đổi của đất, thể hiện bằng mức tăng có ý nghĩa so với đối chứng. Việc tăng P dễ tiêu đạt được cao nhất trên đất phèn và K trao đổi trên đất xám so với các loại đất còn loại. Giá trị CEC của được cải thiện mạnh mẽ do sử dụng than sinh học trên đất xám so với các loại đất khác. Lượng Al và Fe trao đổi trong đất cũng giảm xuống do sử dụng than sinh học, và mức độ giảm xuống mạnh nhất trên đất xám và đất phèn. Kết quả nghiên cứu cũng cho thấy sử dụng than sinh học đã làm tăng chỉ số chất lượng đất (SQI) trên tất cả các loại đất và tâng cao nhất trên đất phèn. Chỉ số chất lượng hạt cũng tăng cao hơn khi sử dụng than sinh học và không có sự phân biết giữa các loại đất. Nghiên cứu này cũng cho thấy than sinh học không ảnh hưởng về mặt thống kê đến chỉ số ô nhiễm kim loại năng trong đất (HPIs) và nhiễm kim loại nặng trong hạt lúa (HPIg), tuy nhiên ảnh hưởng cao/thấp so với các loại đất khác là đất phèn có mức độ ô nhiễm kim loại nặng cao nhất và thấp nhất là đất xám. Tuy nhiên,

than sinh học làm giảm hàm lượng Zn, Co và Cu trao đổi trong đất mạnh so với không sử dụng than sinh học. Điều này cho thấy than sinh học có ánh hưởng cụ thể trên từng loại nguyên tố kim loại nặng trong đất. Than sinh học cũng đã làm giảm lượng phát thải CH_4 từ quá trình sản xuất lúa, và mức độ giảm mạnh nhất trên đất xám, kế đến là đất phèn và đất nhiễm mặn. Cuối cùng than học đã làm tăng tổng sinh khối cấy lúa, đặc biệt trên đất xám và đất phèn. Những kết quả này cho thấy than sinh học phát huy tác dụng mạnh trên đất xám và đất phèn. Đây là hai loại đất được lựa chọn cho nội dung tiếp theo của luận án này để kiểm tra hiệu quả của than sinh học trong điều kiện thực tế.

3.3 Ảnh hưởng của than sinh học lên các yếu tố môi trường và năng suất lúa ở mô hình thí nghiệm quy mô thực địa

3.3.1 Đánh giá một số tính chất của đất, than sinh học trước thí nghiệm[2]

Bảng 3.11 Tính chất của đất phèn, đất xám và vật liệu trước thí nghiệm

Các thông số	Đất phèn	Đất xám	Than trấu	Than nhãn
pH	6,14 ± 0,13	5,58 ± 0,02	8,47 ± 0,12	7,37 ± 0,12
EC	0,30 ± 0,02	0,24 ± 0,03	0,34 ± 0,03	0,21 ± 0,11
CEC	7,66 ± 0,44	9,72 ± 0,04	22,53 ± 0,53	19,43 ± 0,73
Độ chua$_{TrĐ}$	4,83 ± 0,67	2,73 ± 0,02	4,06 ± 0,41	2,77 ± 0,65
$H^+_{TrĐ}$	2,91 ± 0,33	2,91 ± 0,33	2,56 ± 0,58	1,92 ± 0,21
OC	5,56 ± 0,05	1,55 ± 0,08	33,70 ± 0,86	63,71 ± 1,61
Cl^-	1,22 ± 0,01	0,78 ± 0,05	-	-
SO_4^{2-}	4,33 ± 0,22	0,42 ± 0,01	7,33 ± 0,51	0,72 ± 0,06
NH_4^+	356,85 ± 26,90	80,33 ± 1,67	2,72 ± 0.09	1,92 ± 0,21
P dễ tiêu	33,73 ± 3,99	22,72 ± 2,70	2260,30 ± 72,15	546,89 ± 16,90
$K_{TrĐ}$	1170,00 ± 140,17	501,97 ± 10,54	10840,04 ± 114,98	1018,47 ± 9,55
$Na_{TrĐ}$	1665,03 ± 67,18	320,16 ± 11,20	2242,73 ± 115,59	1331,94 ± 120,28
$Ca_{TrĐ}$	1871,44 ± 206,51	221,02 ± 27,5	2712,69 ± 168,21	3180,01 ± 164,72
$Mg_{TrĐ}$	482,77 ± 30,34	97,57 ± 3,03	463,00 ± 26,75	302,41 ± 4,09
$Al_{TrĐ}$	737,63± 77,41	24,77 ± 3,06	22,69 ± 4,92	26,28 ± 1,59
$Fe_{TrĐ}$	151,67 ± 28,28	23,04 ± 0,19	51,32 ± 3,96	66,95 ± 2,41
$Mn_{TrĐ}$	45,58 ± 2,87	19,42 ± 0,34	67,22 ± 0,77	51,35 ± 2,11
$Cd_{TrĐ}$	0,28 ± 0,02	0,19 ± 0,02	0,49 ± 0,05	0,43 ± 0,00
$Cu_{TrĐ}$	22,33 ± 0,27	8,36 ± 0,19	2,75 ± 0,37	0,66 ± 0,08
$Pb_{TrĐ}$	14,45 ± 0,09	0,57 ± 0,05	-	-
$Co_{TrĐ}$	28,07 ± 0,06	24,46 ± 0,50	65,97 ± 0,60	65,60 ± 0,37
$Ni_{TrĐ}$	3,72 ± 0,23	0,79 ± 0,02	1,61 ± 0,09	2,27 ± 0,28
$Zn_{TrĐ}$	2,97 ± 0,35	2,02 ± 0,68	10,61 ± 1,02	11,33 ± 0,42

Ghi chú: Dữ liệu trong bảng này được trình bày dưới dạng trung bình ± SE (sai số chuẩn của giá trị trung bình với n = 3). TrĐ: trao đổi. EC - dS/m. CEC, Độ

[2] Tác giả đã công bố 02 bài báo khoa học ở nội dung này, gồm:
1. **Hao Phu Dong**, Binh Thanh Nguyen*, Anh Hoang Le, Gai Dai Dinh. "Seasonal variation-dependent biochar impacts on coastal acid-sulfate soil in paddy fields and the consequences on rice growth and yield," Geoderma Regional 39 (2024) e00878. https://doi.org/10.1016/j.geodrs.2024.e00878. Xếp hạng Q1 thuộc danh mục Web of Science, Impact factor = 3.3, công bố các kết quả liên quan đến thí nghiệm quy mô thực địa trên đất phèn trồng lúa (tính chất của đất phèn và than sinh học trước thí nghiệm).
2. **Hao Phu Dong**, Binh Thanh Nguyen*, Thia Hong Le, My Hoang Nguyen, and Anh Hoang Le. "Agricultural byproduct-derived biochar for mitigating trace metal risks from soil to rice to public health: implications for sustainable management," Integrated Environmental Assessment and Management, 2025. https://doi.org/10.1093/inteam/vjaf024. Xếp hạng Q1 thuộc danh mục Web of Science, Impact factor = 8.4, công bố các kết quả liên quan đến thí nghiệm quy mô thực địa trên đất xám trồng lúa tập trung vào các thành phần kim loại nặng và chỉ số ô nhiễm kim loại nặng trong đất - HPIs (tính chất các thành phần kim loại, kim loại nặng của đất xám và than sinh học trước thí nghiệm nằm trong phụ bảng của bài báo).

chua$_{TrĐ}$, $H^+_{TrĐ}$ - cmol(+)/kg. OC - %. Cl^-, SO_4^{2-} - g/kg. P dễ tiêu, NH_4^+, $K_{TrĐ}$, $Na_{TrĐ}$, $Ca_{TrĐ}$, $Mg_{TrĐ}$, $Al_{TrĐ}$, $Fe_{TrĐ}$, $Mn_{TrĐ}$, $Cd_{TrĐ}$, $Cu_{TrĐ}$, $Pb_{TrĐ}$, $Co_{TrĐ}$, $Ni_{TrĐ}$, $Zn_{TrĐ}$ - mg/kg.

Bảng 3.11 cho thấy than trấu và than nhãn có khả năng cải tạo đáng kể tính chất hóa học của đất phèn và đất xám, với pH kiềm (8,47 và 7,37 so với 6,14 và 5,58) và CEC cao gấp khoảng 2-3 lần (22,53 và 19,43 so với 7,66 và 9,72 cmol(+)/kg). Hai loại than sinh học này không chỉ trung hòa độ chua trao đổi mà còn gia tăng khả năng giữ các cation dinh dưỡng. Hàm lượng OC của than nhãn (63,7 %) và than trấu (33,7 %) vượt trội so với đất phèn và đất xám (5,6 và 1,6 %), cùng với lượng P dễ tiêu và $K_{TrĐ}$ rất cao (2.260 và 10.840 mg/kg trên than trấu; 547 và 1.018 mg/kg trên than nhãn) cho thấy than sinh học là nguồn dinh dưỡng ổn định, góp phần cải thiện cấu trúc đất và cung cấp dinh dưỡng cho lúa nước. Mặc dù hàm lượng một số kim loại như Co, Mn, Fe trên than sinh học cao hơn đất, các kim loại nặng Cd, Cu, Pb, Ni, Zn đều ở mức thấp và không vượt ngưỡng an toàn, cho thấy than sinh học ít tiềm ẩn ô nhiễm hơn.

3.3.2 Ảnh hưởng của than sinh học đến chất lượng đất

Dữ liệu trong các bảng ở mục này được trình bày dưới dạng trung bình ± SE (sai số chuẩn của giá trị trung bình với n = 3). CT1: không sử dụng than sinh học, CT2: than trấu - 10 tấn/ha, CT3: than trấu - 20 tấn/ha, CT4: than nhãn - 10 tấn/ha, CT5: than nhãn - 20 tấn/ha. EC: Độ dẫn điện, CEC: Khả năng trao đổi cation. TrĐ: Trao đổi.

3.3.2.1 Thí nghiệm trên đất phèn[3]

Bảng 3.12 Tính chất của đất phèn sau thí nghiệm sử dụng than sinh học

Các thông số	CT1	CT2	CT3	CT4	CT5
Vụ 1					
pH	4,53^{c}±0,01	4,94^{a}±0,06	4,95^{a}±0,05	4,79^{ab}±0,06	4,73^{bc}±0,10
EC (dS/m)	0,43^{a}±0,01	0,41^{a}±0,02	0,38^{a}±0,03	0,41^{a}±0,00	0,41^{a}±0,01
CEC (cmol(+)/kg)	8,94^{a}±0,90	10,39^{a}±0,21	10,38^{a}±0,27	9,35^{a}±0,53	10,17^{a}±0,42
NH_4^+ (mg/kg)	132,82^{a}±5,34	111,40^{b}±0,01	106,05^{b}±6,31	111,33^{b}±4,03	116,14^{b}±5,04
P dễ tiêu (mg/kg)	7,17^{b}±0,06	7,38^{b}±0,31	8,68^{a}±0,18	6,96^{bc}±0,07	6,58^{c}±0,14
OC (%)	5,74^{c}±0,07	5,99^{ab}±0,07	6,17^{a}±0,01	5,85^{bc}±0,04	6,08^{a}±0,03
Cl^- (g/kg)	1,28^{a}±0,01	1,23^{a}±0,01	1,24^{a}±0,03	1,27^{a}±0,01	1,31^{a}±0,01
SO_4^{2-} (g/kg)	4,44^{a}±0,09	4,47^{a}±0,05	4,24^{a}±0,25	4,55^{a}±0,10	4,28^{a}±0,16
Độ $chua_{TrĐ}$ (cmol(+)/kg)	6,83^{a}±0,23	5,66^{b}±0,01	5,10^{c}±0,24	5,62^{bc}±0,15	5,67^{c}±0,07
$H^+_{TrĐ}$ (cmol(+)/kg)	3,12^{a}±0,08	2,53^{bc}±0,04	2,25^{c}±0,18	2,48^{bc}±0,24	2,75^{ab}±0,04
Vụ 2					
pH	5,57^{a}±0,19	5,75^{a}±0,18	5,98^{a}±0,08	5,89^{a}±0,13	5,84^{a}±0,13
EC (dS/m)	0,42^{a}±0,05	0,33^{ab}±0,02	0,28^{b}±0,02	0,28^{b}±0,01	0,27^{b}±0,01
CEC (cmol(+)/kg)	8,70^{a}±0,26	9,37^{a}±0,06	9,32^{a}±0,57	9,22^{a}±0,18	8,86^{a}±0,13
NH_4^+ (mg/kg)	125,64^{c}±2,64	140,15^{ab}±6,28	150,39^{a}±4,17	127,45^{bc}±2,31	128,36^{bc}±3,55
P dễ tiêu (mg/kg)	7,56^{a}±0,49	8,53^{a}±0,47	8,55^{a}±0,15	8,24^{a}±0,26	8,34^{a}±0,23
OC (%)	5,34^{c}±0,19	5,65^{bc}±0,21	6,17^{ab}±0,11	6,12^{ab}±0,20	6,38^{a}±0,07
Cl^- (g/kg)	1,31^{a}±0,02	1,35^{a}±0,08	1,25^{a}±0,01	1,25^{a}±0,01	1,27^{a}±0,01
SO_4^{2-} (g/kg)	3,85^{a}±0,20	3,82^{a}±0,25	3,75^{a}±0,29	3,89^{a}±0,40	3,36^{a}±0,19
Độ $chua_{TrĐ}$ (cmol(+)/kg)	5,03^{a}±0,16	4,87^{a}±0,05	4,53^{a}±0,48	4,58^{a}±0,06	4,08^{a}±0,16
$H^+_{TrĐ}$ (cmol(+)/kg)	1,73^{b}±0,18	2,11^{a}±0,13	1,70^{b}±0,06	1,82^{ab}±0,03	1,78^{ab}±0,12

Việc bổ sung than sinh học từ trấu ở tỷ lệ 10 tấn/ha (CT2) và 20 tấn/ha (CT3) đã cải thiện đáng kể một số chỉ tiêu hóa học của đất sau hai vụ: pH tăng từ 4,53 (đối chứng) lên 4,94-4,95 ở vụ 1 và tiếp tục gia tăng ở vụ 2 (CT3 đạt 5,98 so với 5,57), chứng tỏ hiệu quả trung hòa độ chua (Bảng 3.12). Hàm lượng OC cao hơn rõ rệt ở các công thức có than (vụ 1: 6,08-6,17 % so với 5,74 %; vụ 2: đạt tối đa 6,38 %), cho thấy khả năng tích lũy carbon hữu cơ trong đất. P dễ tiêu tăng đáng kể ở vụ 1 (CT3: 8,68 - 7,17 mg/kg) nhưng không khác biệt thống kê ở vụ 2, khi so với đối chứng. Ngược lại, NH_4^+ giảm trong vụ 1 (CT3: 106,05 - 132,82 mg/kg), tăng mạnh tại vụ 2 (CT3: 150,39 - 125,64 mg/kg) khi so với đối chứng, phản ánh cơ chế hấp

[3] Tác giả đã công bố 01 bài báo khoa học ở nội dung này: **Hao Phu Dong**, Binh Thanh Nguyen*, Anh Hoang Le, Gai Dai Dinh. "Seasonal variation-dependent biochar impacts on coastal acid-sulfate soil in paddy fields and the consequences on rice growth and yield," Geoderma Regional 39 (2024) e00878. https://doi.org/10.1016/j.geodrs.2024.e00878. Xếp hạng Q1 thuộc danh mục Web of Science, Impact factor = 3.3, công bố các kết quả liên quan đến thí nghiệm quy mô thực địa trên đất phèn trồng lúa.

phụ của than. Độ chua$_{TrĐ}$ và $H^{+}_{TrĐ}$ giảm rõ ở vụ 1 ($H^{+}_{TrĐ}$ CT3: 2,25 cmol(+)/kg; độ chua$_{TrĐ}$ CT3: 5,10) nhưng không khác biệt có ý nghĩa thống kê ở vụ 2. Các chỉ tiêu EC, Cl^{-} và SO_4^{2-} không khác biệt có ý nghĩa thống kê giữa các công thức.

Bảng 3.13 Thành phần một số kim loại, bao gồm kim loại nặng trao đổi (mg/kg) của đất phèn sau thí nghiệm sử dụng than sinh học

Các thông số	CT1	CT2	CT3	CT4	CT5
Vụ 1					
$K_{TrĐ}$	2254,66^{b}±3,82	2642,37^{ab}±1,09	2823,63^{a}±6,82	2336,86^{b}±102,31	2310,88^{b}±90,74
$Na_{TrĐ}$	1471,66^{a}±2,94	1308,83^{ab}±1,03	1215,01^{b}±4,50	1335,56^{ab}±27,09	1267,44^{b}±20,08
$Ca_{TrĐ}$	1978,74^{c}±57,38	1981,94^{bc}±61,51	2087,20^{abc}±21,88	2290,57^{ab}±23,10	2339,70^{a}±125,54
$Mg_{TrĐ}$	474,87^{a}±5,01	470,89^{a}±2,78	505,51^{a}±6,05	485,11^{a}±8,12	498,62^{a}±11,03
$Al_{TrĐ}$	1695,36^{a}±45,44	1562,83^{ab}±14,32	1517,28^{b}±35,33	1471,55^{b}±12,24	1564,46^{ab}±54,80
$Fe_{TrĐ}$	351,77^{a}±17,97	252,71^{c}±12,44	229,55^{c}±14,86	277,56^{bc}±23,13	308,35^{ab}± 12,28
$Mn_{TrĐ}$	41,85^{a}±1,48	39,10^{ab}±5,61	33,08^{b}±1,49	41,20^{ab}±0,58	39,91^{a}±1,43
$Cd_{TrĐ}$	0,41^{a}±0,02	0,37^{ab}±0,01	0,34^{ab}±0,01	0,33^{b}±0,02	0,33^{b}±0,02
$Cu_{TrĐ}$	21,83^{a}±0,68	19,74^{ab}±0,30	18,29^{b}±0,48	20,68^{ab}±0,58	21,54^{a}±0,92
$Pb_{TrĐ}$	14,81^{z}±0,42	13,52^{ab}±0,28	13,09^{b}±0,28	14,35^{ab}±0,24	13,83^{ab}±0,28
$Co_{TrĐ}$	26,95^{a}±0,11	26,91^{a}±0,92	27,42^{a}±0,12	27,93^{a}±0,37	28,12±0,35
$Ni_{TrĐ}$	3,94^{a}±0,21	3,51^{ab}±0,09	3,32^{b}±0,04	3,37^{b}±0,06	3,22^{b}±0,01
$Zn_{TrĐ}$	4,22^{a}±0,23	4,00^{ab}±0,21	3,80^{b}±0,06	3,96^{b}±0,08	3,34^{b}±0,15
Vụ 2					
$K_{TrĐ}$	365,28^{b}±43,73	436,16^{ab}±7,85	500,66^{a}±39,88	416,29^{b}±4,88	374,92^{b}±7,10
$Na_{TrĐ}$	889,01^{a}±229,71	678,59^{ab}±84,99	610,03^{ab}±133,94	497,76^{ab}±21,09	489,38^{b}±33,22
$Ca_{TrĐ}$	615,93^{a}±38,60	650,33^{a}±20,58	616,24^{a} ±40,55	686,54^{a}±11,91	625,15^{a}±16,75
$Mg_{TrĐ}$	249,63^{a}±18,35	267,00^{a}±17,60	234,95^{a}±5,65	252,16^{a}±4,84	248,87^{a}±4,39
$Al_{TrĐ}$	634,77^{a} ±9,02	540,87^{c} ±5,96	524,21^{c}±6,88	584,13^{c}±7,52	519,60^{c}±8,00
$Fe_{TrĐ}$	50,65^{a}±3,56	38,32^{ab}±2,19	33,64^{ab}±10,08	32,69^{b}±1,98	24,68^{b}±1,66
$Mn_{TrĐ}$	26,54^{a} ±0,58	26,52^{a} ±0,44	26,43^{ab}±0,15	25,50^{b} ±0,23	24,79^{c} ±0,69
$Cd_{TrĐ}$	0,24^{a}±0,00	0,24^{a}±0,00	0,24^{a}±0,00	0,24^{a}±0,00	0,23^{a}±0,01
$Cu_{TrĐ}$	19,78^{a}±0,27	17,93^{ab}±0,17	17,51^{ab}±0,54	18,92^{b}±0,22	18,49^{b}±0,41
$Pb_{TrĐ}$	1,60^{a}±0,08	1,52^{ab}±0,08	1,37^{ab}±0,03	1,33^{ab}±0,07	1,29^{b}±0,04
$Co_{TrĐ}$	26,53^{a}±0,17	26,72^{a}±0,04	26,82^{a}±0,05	27,10^{a}±0,20	26,11^{a}±0,74
$Ni_{TrĐ}$	1,87^{a}±0,04	1,73^{ab}±0,05	1,40^{cd}±0,05	1,59^{bc}±0,05	1,36^{d}±0,01
$Zn_{TrĐ}$	2,62^{a}±0,12	2,43^{a}±0,13	1,94^{bc}±0,05	2,19^{ab}±0,12	1,71^{c}±0,07

Kết quả ở Bảng 3.13 cho thấy than sinh học, đặc biệt ở liều lượng cao (CT3 và CT5), làm thay đổi đáng kể hàm lượng các nguyên tố trong đất. Trong vụ 1, CT3 thể hiện hiệu quả vượt trội khi làm tăng mạnh hàm lượng các cation trao đổi như K_{tr}Đ (2823,63 mg/kg), Ca_{tr}Đ (2087,20 mg/kg) và Mg_{tr}Đ (505,51 mg/kg), so với CT1. Đồng thời, CT3 giúp giảm rõ rệt các kim loại nặng trao đổi như Cd, Pb, Zn, Ni, cho thấy hiệu quả cố định kim loại độc. Trong vụ 2, xu hướng biến đổi vẫn được

duy trì, với hàm lượng $K_{TrĐ}$, $Ca_{TrĐ}$, $Mg_{TrĐ}$ cao nhất ở CT3, cho thấy tác động tích lũy của than sinh học sau hai vụ. Các nguyên tố gây độc như Al và Fe trao đổi trong đất cũng giảm xuống trong cả hai vụ lúa khi áp dụng than sinh học. CT5 cũng thể hiện xu hướng tương tự, nhưng mức biến động không rõ bằng CT3. Nhìn tổng thể hiệu quả của than sinh học giảm xuống trong vụ lúa 2 so với vụ 1.

3.3.2.2 Thí nghiệm trên đất xám[4]

Bảng 3.14 Tính chất của đất xám sau thí nghiệm sử dụng than sinh học

Các thông số	CT1	CT2	CT3	CT4	CT5
Vụ 1					
pH	5,78^{b}±0,06	6,11^{ab}±0,06	6,33^{a}±0,04	6,06^{ab}±0,08	6,17^{a}±0,13
EC (dS/m)	0,16^{a}±0,02	0,16^{ab}±0,00	0,13^{b}±0,01	0,13^{b}±0,01	0,16^{a}±0,01
CEC (cmol(+)/kg)	6,56^{b}±0,30	7,68^{ab}±0,47	8,23^{a}±0,18	6,73^{ab}±0,48	7,07^{ab}±0,09
NH_4^+ (mg/kg)	44,33^{a}±2,28	31,20^{b}±1,65	18,47^{c}±0,46	29,68^{b}±0,64	33,61±1,80
P dễ tiêu (mg/kg)	21,28^{b}±0,64	22,31^{b}±0,19	25,85^{a}±0,85	23,39^{ab}±1,18	23,10^{ab}±0,52
OC (%)	1,52^{b}±0,05	1,79^{a}±0,03	1,83^{a}±0,06	1,80^{a}±0,03	1,84^{a}±0,09
Cl^- (g/kg)	0,66^{a}±0,05	0,69^{a}±0,04	0,71^{a}±0,07	0,74^{a}±0,05	0,66^{a}±0,03
SO_4^{2-} (g/kg)	0,37^{a}±0,01	0,32^{a}±0,03	0,32^{a}±0,05	0,35^{a}±0,05	0,38^{a}±0,02
Độ $chua_{TrĐ}$ (cmol(+)/kg)	2,27^{a}±0,16	1,96^{ab}±0,06	1,65^{b}±0,10	2,08^{ab}±0,04	2,04^{ab}±0,08
$H^+_{TrĐ}$ (cmol(+)/kg)	1,75^{a}±0,08	1,37^{ab}±0,08	1,16^{b}±0,12	1,26^{b}±0,06	1,28^{b}±0,10
Vụ 2					
pH	6,06^{a}±0,06	6,21^{a}±0,04	6,30^{a}±0,04	6,12^{a}±0,05	6,22^{a}±0,04
EC (dS/m)	0,16^{a}±0,03	0,14^{a}±0,01	0,15^{a}±0,01	0,15^{a}±0,03	0,13^{a}±0,01
CEC (cmol(+)/kg)	7,55^{a}±0,12	8,29^{a}±0,22	8,34^{a}±0,05	8,32^{a}±0,69	8,48^{a}±0,16
NH_4^+ (mg/kg)	41,01^{a}±2,42	50,37^{a}±5,03	44,40^{a}±2,05	43,25^{a}±0,11	48,12^{a}±4,22
P dễ tiêu (mg/kg)	22,40^{b}±0,29	29,61^{a}±1,19	33,07^{a}±0,54	30,78^{a}±0,53	31,32a±0,46
OC (%)	1,54^{c}±0,01	1,76^{a}±0,04	1,78^{a}±0,02	1,88^{a}±0,09	1,80^{a}±0,02
Cl^- (g/kg)	0,87^{a}±0,10	0,96^{a}±0,02	0,90^{a}±0,04	1,06^{a}±0,09	0,99^{a}±0,04
SO_4^{2-} (g/kg)	0,46^{a}±0,06	0,36^{a}±0,02	0,42^{a}±0,06	0,34^{a}±0,07	0,39^{a}±0,02
Độ $chua_{TrĐ}$ (cmol(+)/kg)	2,38^{a}±0,14	2,20^{ab}±0,15	1,98^{b}±0,01	2,29^{ab}±0,17	2,00^{b}±0,00
$H^+_{TrĐ}$ (cmol(+)/kg)	1,21^{a}±0,08	1,21^{a}±0,11	1,16^{a}±0,09	1,11^{a}±0,07	1,23^{a}±0,14

Việc bón than sinh học đã làm tăng pH của đất xám so với đối chứng và làm giảm độ chua của đất, đặc biệt trong vụ 1 với CT3 và CT5 có hiệu quả rõ nhất, phản ánh hiệu quả cải thiện độ chua của than sinh học (Bảng 3.14). Cùng với đó, các công

[4] Tác giả đã công bố 01 bài báo khoa học ở nội dung này: **Hao Phu Dong**, Binh Thanh Nguyen*, Thia Hong Le, My Hoang Nguyen, and Anh Hoang Le. "Agricultural byproduct-derived biochar for mitigating trace metal risks from soil to rice to public health: implications for sustainable management," Integrated Environmental Assessment and Management, 2025. https://doi.org/10.1093/inteam/vjaf024. Xếp hạng Q1 thuộc danh mục Web of Science, Impact factor = 8.4, công bố các kết quả liên quan đến thí nghiệm quy mô thực địa trên đất xám trồng lúa tập trung vào các thành phần kim loại nặng sau thí nghiệm (nằm trong phụ bảng của bài báo) và chỉ số ô nhiễm kim loại nặng trong đất (HPIs).

thức có than sinh học, đặc biệt ở liều cao, cũng làm tăng CEC - yếu tố quan trọng quyết định khả năng giữ dinh dưỡng của đất. Hàm lượng OC và P dễ tiêu đều có xu hướng tăng đáng kể khi áp dụng các công thức bón than, trong đó CT3 thường đạt giá trị cao nhất. Điều này cho thấy than sinh học góp phần cải thiện dinh dưỡng khoáng và nền hữu cơ cho đất xám - vốn là loại đất nghèo dinh dưỡng. Tuy nhiên, than sinh học làm giảm NH_4^+ trong vụ 1 và không có ảnh hưởng đáng kể đến các ion Cl^- và SO_4^{2-}. Các ảnh hưởng của than sinh học mạnh nhất ngay trong vụ lúa thứ nhất, và yếu hơn ở vụ lúa thứ 2 trên ruộng thực tế.

Bảng 3.15 Thành phần một số kim loại, bao gồm kim loại nặng trao đổi (mg/kg) của đất xám sau thí nghiệm sử dụng than sinh học

Các thông số	CT1	CT2	CT3	CT4	CT5
Vụ 1					
$K_{TrĐ}$	510,59^{b}±5,74	627,86^{ab}±27,82	705,12^{a}±45,27	536,26^{b}±23,60	538,31^{b}±9,95
$Na_{TrĐ}$	324,91^{a}±35,72	301,79^{a}±20,38	298,44^{a}±7,48	328,61^{a}±17,07	276,61^{a}±6,45
$Ca_{TrĐ}$	168,09^{b}±3,44	187,22^{a}±5,88	191,71^{a}±2,43	187,72^{a}±3,67	187,22^{a}±2,22
$Mg_{TrĐ}$	79,77^{a}±2,36	83,41^{a}±1,84	83,78^{a}±3,03	80,65^{a}±1,27	79,36^{a}±2,68
$Al_{TrĐ}$	21,64^{a}±0,36	19,91^{ab}±0,29	15,11^{c}±0,48	19,50^{b}±0,36	16,97^{c}±0,31
$Fe_{TrĐ}$	18,43^{a}±0,41	17,78^{ab}±0,28	16,35^{ab}±0,47	17,53^{ab}±0,70	15,95^{b}±0,68
$Mn_{TrĐ}$	20,12^{ab}±0,27	20,02^{ab}±0,41	19,13^{b}±0,29	19,49^{b}±0,12	19,56^{ab}±0,06
$Cd_{TrĐ}$	0,18^{a}±0,00	0,17^{ab}±0,00	0,17^{b}±0,00	0,17^{ab}±0,00	0,17^{ab}±0,00
$Cu_{TrĐ}$	8,49^{a}±0,26	8,29^{a}±0,43	7,70^{a}±0,41	8,27^{a}±0,26	7,90^{a}±0,42
$Pb_{TrĐ}$	0,71^{a}±0,03	0,67^{ab}±0,03	0,58^{ab}±0,02	0,59^{ab}±0,05	0,56^{b}±0,02
$Co_{TrĐ}$	25,44^{a}±0,85	25,43^{a}±0,77	24,95^{a}±0,74	25,22^{a}±0,16	25,07^{a}±0,31
$Ni_{TrĐ}$	0,64^{a}±0,01	0,64^{a}±0,02	0,68^{a}±0,02	0,59^{a}±0,02	0,65^{a}±0,02
$Zn_{TrĐ}$	0,82^{a}±0,14	0,95^{a}±0,30	0,57^{a}±0,02	0,75^{a}±0,27	0,64^{a}±0,09
Vụ 2					
$K_{TrĐ}$	507,82^{b}±12,29	563,35^{b}±10,95	647,32^{a}±14,72	521,42^{b}±35,20	571,63^{ab}±29,80
$Na_{TrĐ}$	253,39^{a}±21,05	247,88^{a}±8,39	258,82^{a}±7,63	255,25±7,02	245,92^{a}±12,00
$Ca_{TrĐ}$	151,57^{b}±5,01	165,07^{ab}±3,14	169,50^{a}±0,48	166,25^{ab}±4,23	173,90^{a}±3,31
$Mg_{TrĐ}$	77,23^{a}±0,36	75,89^{a}±0,77	78,05^{a}±0,71	76,44^{a}±1,61	77,55^{a}±1,65
$Al_{TrĐ}$	21,88^{a}±0,90	19,10^{b}±0,36	18,63^{b}±0,28	20,31^{ab}±0,37	18,68^{b}±0,34
$Fe_{TrĐ}$	18,32^{a}±0,25	17,04^{a}±0,28	17,00^{a}±0,20	17,67^{ab}±0,28	17,80^{ab}±0,32
$Mn_{TrĐ}$	20,47^{a}±0,18	20,42^{a}±0,42	20,97^{b}±0,16	19,74^{ab}±0,13	20,56^{ab}±0,49
$Cd_{TrĐ}$	0,18^{a}±0,00	0,18^{ab}±0,00	0,17^{b}±0,00	0,17^{ab}±0,00	0,18^{ab}±0,00
$Cu_{TrĐ}$	8,83^{a}±0,11	8,12^{a}±0,15	8,11^{a}±0,25	8,27^{a}±0,19	8,22^{a}±0,21
$Pb_{TrĐ}$	0,63^{ab}±0,02	0,57^{b}±0,02	0,65^{a}±0,00	0,57^{b}±0,01	0,60^{ab}±0,01
$Co_{TrĐ}$	26,76^{a}±0,18	26,42^{a}±0,54	27,13^{a}±0,21	25,55^{a}±0,17	26,61^{a}±0,63
$Ni_{TrĐ}$	0,65^{a}±0,02	0,66^{a}±0,02	0,65^{a}±0,01	0,60^{a}±0,02	0,62^{a}±0,01
$Zn_{TrĐ}$	0,57^{ab}±0,11	0,24^{ab}±0,04	0,20^{b}±0,03	0,62^{ab}±0,13	0,70^{a}±0,13

Các nguyên tố trao đổi như K^+, Ca^{2+} và Mg^{2+} có nồng độ tăng lên trong đất xám ở CT3 và CT5, phản ánh hiệu quả cải thiện dinh dưỡng của than sinh học. Đối với các kim loại nặng trao đổi, CT3 và CT5 có xu hướng làm giảm hàm lượng Cd^{2+}, Pb^{2+}, Cu^{2+}, Zn^{2+} và Ni^{2+}, đặc biệt là Cd^{2+} so với đối chứng. Đây là kết quả phản ánh khả năng hấp phụ và cô lập kim loại nặng của than sinh học, từ đó góp phần làm giảm nguy cơ ô nhiễm đất. Tương tự, các nguyên tố có khả năng gây độc như Fe, Mn và Al trao đổi có xu hướng giảm ở các công thức có than sinh học, do tác động trung hòa axit và giảm hòa tan các ion kim loại trong điều kiện pH cao hơn. Tuy nhiên, hiệu quả của than sinh học giảm mạnh trong vụ lúa thứ 2 trên đất xám.

3.3.3. Ảnh hưởng của than sinh học đến sinh trưởng, năng suất lúa

Dữ liệu trong các bảng ở mục này được trình bày dưới dạng trung bình ± SE (sai số chuẩn của giá trị trung bình với n = 3). CT1: không sử dụng than sinh học, CT2: than trấu - 10 tấn/ha, CT3: than trấu - 20 tấn/ha, CT4: than nhãn - 10 tấn/ha, CT5: than nhãn - 20 tấn/ha.

3.3.3.1 Thí nghiệm trên đất phèn[5]

Bảng 3.16 Sinh trưởng và năng suất lúa (kg/m^2) trên đất phèn sau thí nghiệm sử dụng than sinh học

Sinh trưởng và năng suất	CT1	CT2	CT3	CT4	CT5
Vụ 1					
Rễ	$0,17^{a}$±0,01	$0,19^{a}$±0,01	$0,17^{a}$±0,04	$0,14^{a}$±0,01	$0,19^{a}$±0,02
Rơm	$0,80^{b}$±0,05	$0,94^{ab}$±0,06	$1,08^{a}$±0,03	$0,95^{ab}$±0,08	$1,05^{ab}$±0,04
Hạt	$0,74^{c}$±0,01	$0,84^{bc}$±0,03	$1,06^{a}$±0,01	$0,85^{bc}$±0,07	$0,91^{b}$±0,05
Tổng sinh khối	$1,71^{c}$±0,05	$1,97^{b}$±0,01	$2,31^{a}$±0,05	$1,94^{b}$±0,12	$2,15^{ab}$±0,03
Vụ 2					
Rễ	$0,23^{a}$±0,01	$0,27^{a}$±0,05	$0,22^{a}$±0,01	$0,24^{a}$±0,01	$0,21^{a}$±0,01
Rơm	$0,36^{b}$±0,03	$0,39^{ab}$±0,03	$0,48^{a}$±0,02	$0,44^{ab}$±0,04	$0,45^{ab}$±0,03
Hạt	$0,26^{b}$±0,01	$0,34^{ab}$±0,04	$0,40^{a}$±0,02	$0,38^{a}$±0,03	$0,37^{a}$±0,01
Tổng sinh khối	$0,85^{b}$±0,03	$1,00^{a}$±0,05	$1,10^{a}$±0,03	$1,06^{a}$±0,06	$1,03^{a}$±0,04

[5] Tác giả đã công bố 01 bài báo khoa học ở nội dung này: **Hao Phu Dong**, Binh Thanh Nguyen*, Anh Hoang Le, Gai Dai Dinh. "Seasonal variation-dependent biochar impacts on coastal acid-sulfate soil in paddy fields and the consequences on rice growth and yield," Geoderma Regional 39 (2024) e00878. https://doi.org/10.1016/j.geodrs.2024.e00878. Xếp hạng Q1 thuộc danh mục Web of Science, Impact factor = 3.3, công bố các kết quả liên quan đến thí nghiệm quy mô thực địa trên đất phèn trồng lúa.

Trong vụ 1 và vụ 2 kết quả cho thấy trọng lượng rễ không có sự khác biệt rõ rệt giữa các công thức (Bảng 3.16), với giá trị dao động lần lượt 0,14-0,19 kg/m^2 (vụ 1), 0,21-0,27 kg/m^2 (vụ 2). Tuy nhiên, trọng lượng rơm và tổng sinh khối có sự biến động đáng kể, với CT3 có trọng lượng rơm cao nhất (1,08 kg/m^2) và tổng sinh khối đạt 2,31 kg/m^2, cao hơn so với các công thức còn lại. Năng suất hạt trong vụ 1 cũng dao động 0,74-1,06 kg/m^2, trong đó CT3 đạt giá trị cao nhất. Đến vụ 2, CT3 vẫn duy trì ưu thế về trọng lượng rơm (0,48 kg/m^2) và năng suất hạt (0,40 kg/m^2), cao hơn so với đối chứng. Tổng sinh khối trong vụ 2 dao động 0,85-1,10 kg/m^2, với CT3 đạt giá trị cao nhất, tiếp theo là CT4 và CT5.

3.3.3.2 Thí nghiệm trên đất xám

Bảng 3.17 Sinh trưởng và năng suất lúa (kg/m^2) trên đất xám sau thí nghiệm sử dụng than sinh học

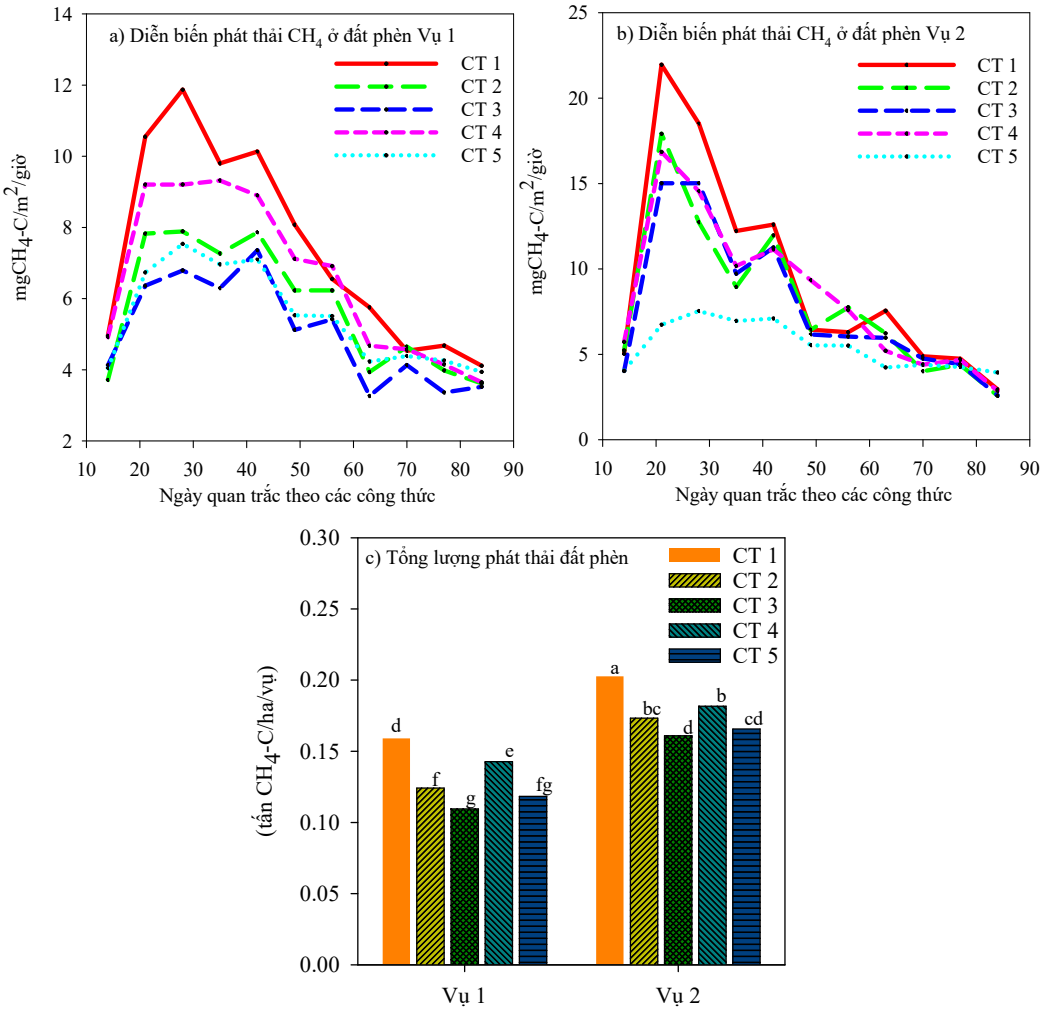
Sinh trưởng và năng suất	CT1	CT2	CT3	CT4	CT5
Vụ 1					
Rễ	$0,09^{a}\pm0,01$	$0,08^{a}\pm0,01$	$0,08^{ab}\pm0,04$	$0,12^{ab}\pm0,01$	$0,11^{b}\pm0,02$
Rơm	$0,80^{b}\pm0,03$	$1,06^{a}\pm0,05$	$1,11^{a}\pm0,02$	$0,99^{a}\pm0,06$	$0,93^{ab}\pm0,01$
Hạt	$0,59^{b}\pm0,02$	$0,69^{ab}\pm0,02$	$0,77^{a}\pm0,01$	$0,65^{ab}\pm0,05$	$0,61^{a}\pm0,03$
Tổng sinh khối	$1,48^{c}\pm0,02$	$1,83^{ab}\pm0,03$	$1,96^{a}\pm0,02$	$1,76^{ab}\pm0,09$	$1,65^{bc}\pm0,05$
Vụ 2					
Rễ	$0,59^{ab}\pm0,04$	$0,64^{b}\pm0,05$	$0,55^{b}\pm0,04$	$0,50^{a}\pm0,08$	$0,40^{ab}\pm0,06$
Rơm	$0,63^{a}\pm0,04$	$0,68^{a}\pm0,03$	$0,65^{a}\pm0,04$	$0,64^{a}\pm0,04$	$0,71^{b}\pm0,05$
Hạt	$0,44^{b}\pm0,02$	$0,50^{ab}\pm0,02$	$0,59^{a}\pm0,01$	$0,53^{ab}\pm0,05$	$0,57^{a}\pm0,03$
Tổng sinh khối	$1,65^{a}\pm0,08$	$1,82^{a}\pm0,07$	$1,80^{a}\pm0,08$	$1,67^{a}\pm0,09$	$1,68^{a}\pm0,12$

Trong cả hai vụ, việc bón than sinh học đã cải thiện rõ rệt năng suất và tổng sinh khối cây lúa trên đất xám, với CT3 cho kết quả nổi bật nhất (Bảng 3.17). Cụ thể, CT3 đạt giá trị cao nhất về tổng sinh khối và năng suất hạt so với các công thức khác, đặc biệt trong vụ 1. Điều này cho thấy việc sử dụng than sinh học ở liều lượng cao có tác động tích cực trong điều kiện đất xám. Mặc dù ở vụ 2, CT3 vẫn cho năng suất hạt cao nhất có ý nghĩa thống kê, tổng sinh khối của các công thức không khác biệt có ý nghĩa thống kê so với các công thức còn lại. Điều nay cho thấy hiệu quả của than sinh học đối với năng suất và sinh trưởng lúa giảm xuống trong vụ thứ hai. CT1 luôn cho kết quả thấp nhất về khối lượng hạt và sinh khối, nhấn mạnh tầm quan trọng của than sinh học trong cải thiện điều kiện sinh trưởng đối với cây lúa.

3.3.4 Ảnh hưởng của than sinh học đến phát thải khí CH_4

Ghi chú: CT1: không sử dụng than sinh học, CT2: than trấu - 10 tấn/ha, CT3: than trấu - 20 tấn/ha, CT4: than nhãn - 10 tấn/ha, CT5: than nhãn - 20 tấn/ha.

3.3.4.1 Thí nghiệm trên đất phèn

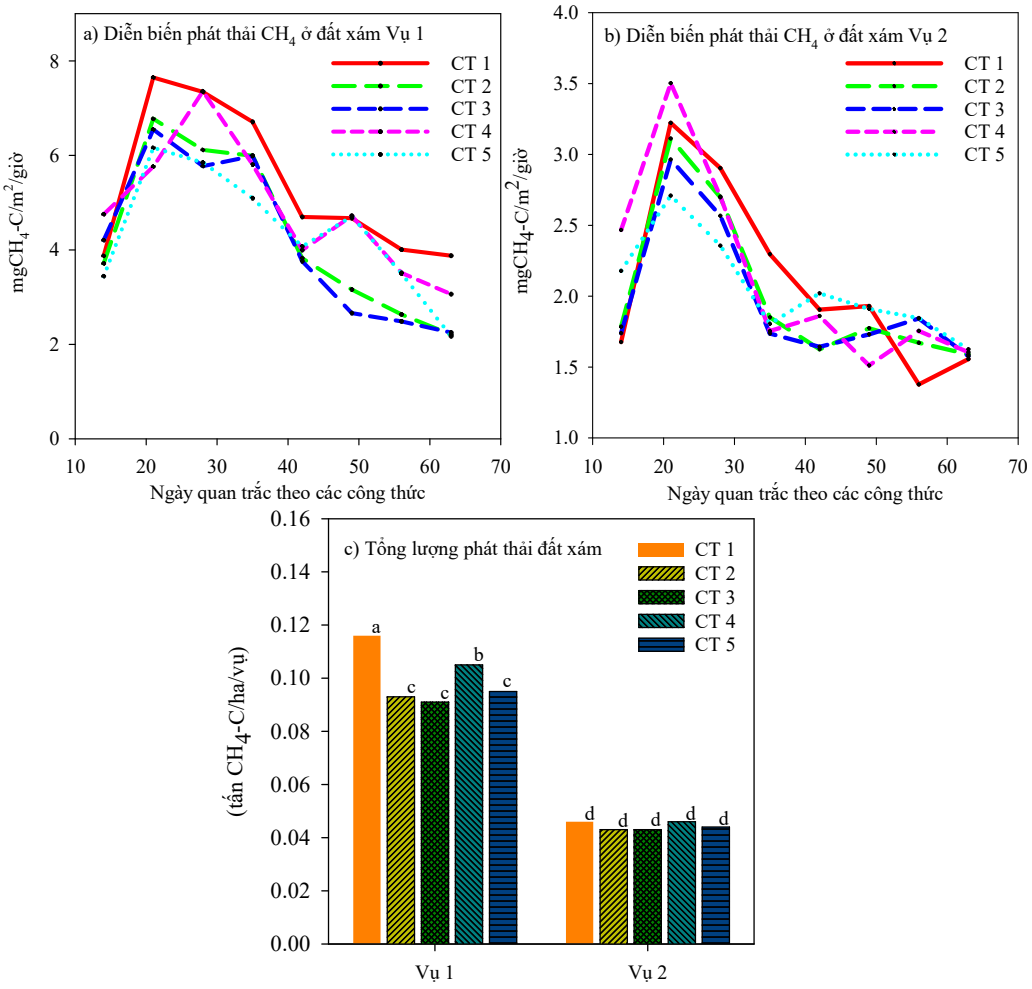


Hình 3.9 Diễn biến phát thải CH_4 ở vụ 1 (a), vụ 2 (b) và tổng lượng phát thải CH_4 cả hai vụ (c) trên đất phèn sau thí nghiệm sử dung than sinh học

Trong cả hai vụ, phát thải CH_4 đều tăng từ ngày 10, đạt đỉnh giữa ngày 25-35 ở vụ 1 (Hình 3.9a) và ngày 20-30 ở vụ 2 (Hình 3.9b), rồi giảm dần về mức < 4 mg CH_4-C/m^2/giờ sau ngày 60-80. CT1 luôn cho đỉnh phát thải cao nhất, trong khi CT3 duy trì mức thấp nhất trong vụ 1 và CT5 có mức phát thải thấp nhất trong vụ 2. CT2 và CT3 có đường cong xấp xỉ nhau, đỉnh trung bình (vụ 1: 6-8 mg; vụ 2: 15-17 mg)

và giảm nhanh hơn CT1 nhưng không bằng CT5. So với vụ 1, vụ 2 ghi nhận đỉnh phát thải cao hơn ở tất cả các công thức. Hình 3.9c cho thấy tổng phát thải CH_4/vụ tăng rõ ở vụ 2 so với vụ 1. CT1 luôn cao nhất, CT3 luôn thấp nhất, còn CT2, CT4 và CT5 nằm giữa có xu hướng phát thải tương đương nhau.

3.3.4.2 Thí nghiệm trên đất xám



Hình 3.10 Diễn biến phát thải CH_4 ở vụ 1 (a), vụ 2 (b) và tổng lượng phát thải CH_4 cả hai vụ (c) trên đất xám sau thí nghiệm sử dụng than sinh học

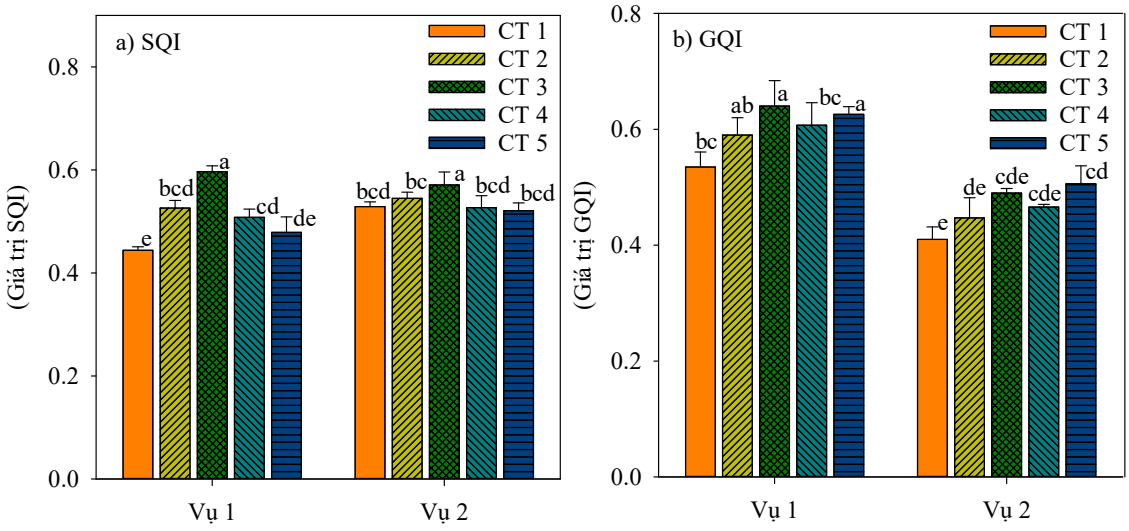
Phát thải CH_4 ở cả hai vụ đều có xu hướng tăng nhanh từ ngày 10, đạt đỉnh giữa ngày 20-30 và giảm dần về mức thấp (< 3 mg CH_4-C/m^2/giờ) sau ngày 40, sau đó tiệm cận giá trị thấp hơn vào ngày 60. Ở vụ 1 (Hình 3.10a), đỉnh phát thải của CT1, CT2–CT3 ở 6-8 mg CH_4-C/m^2/giờ, CT4 giảm nhanh hơn sau đỉnh, còn CT5 chỉ đạt khoảng 5 mg và nhanh chóng hạ xuống dưới 3 mg CH_4-C/m^2/giờ. Ở vụ 2 (Hình

3.10b), đỉnh chung giảm còn 3-3,5 mg CH_4-C/m^2/giờ, với CT4 cao nhất (~ 3,5 mg), CT1-CT3 khoảng 3 mg và CT5 duy trì thấp nhất (2-2,5 mg) suốt chu kỳ. So sánh hai vụ cho thấy vụ 2 phát thải thấp và ổn định hơn. Trong vụ 1, tổng lượng phát thải CH4 ở CT1 cao nhất có ý nghĩa thống kê so với các công thức còn lại. Trong vụ 2, tổng phát thải CH_4 thấp hơn vụ 1 và các công thức khác biệt không có ý nghĩa thống kê (Hình 3.10c).

3.3.5 Các chỉ số chất lượng

3.3.5.1 Thí nghiệm trên đất phèn

** Chỉ số chất lượng đất và chỉ số chất lượng hạt sau thí nghiệm:*[6]



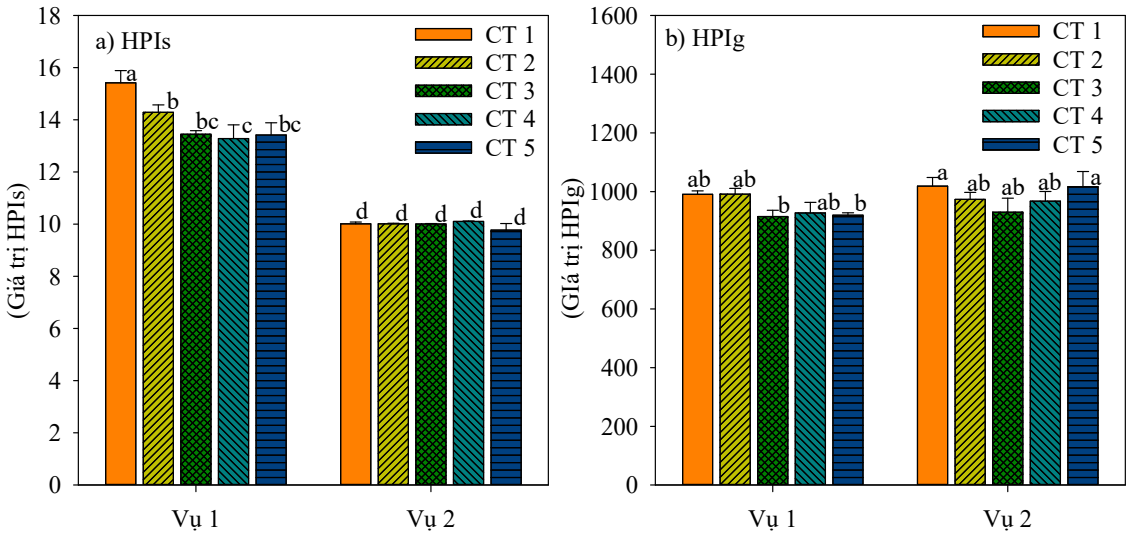
Hình 3.11 Chỉ số chất lượng đất phèn (SQI, a) và chỉ số chất lượng hạt lúa (GQI, b) sau thí nghiệm sử dụng than sinh học

Dựa trên kết quả từ PCA/FA (Bảng 4.6, Phụ lục 4), chỉ số chất lượng đất (SQI) đã được tính toán và hiển thị trong Hình 3.11a. Giá trị SQI cao nhất được quan sát thấy tại CT3 ở cả 2 vụ mùa lần lượt là 0,59 và 0,57. SQI thấp nhất được ghi nhận tại CT1. Việc bổ sung than trấu ở mức 20 tấn/ha đã làm tăng đáng kể SQI trong cả 2

[6] Tác giả đã công bố 01 bài báo khoa học ở nội dung này: **Hao Phu Dong**, Binh Thanh Nguyen*, Anh Hoang Le, Gai Dai Dinh. "Seasonal variation-dependent biochar impacts on coastal acid-sulfate soil in paddy fields and the consequences on rice growth and yield," Geoderma Regional 39 (2024) e00878. https://doi.org/10.1016/j.geodrs.2024.e00878. Xếp hạng Q1 thuộc danh mục Web of Science, Impact factor = 3.3, công bố các kết quả liên quan đến thí nghiệm quy mô thực địa trên đất phèn trồng lúa.

vụ. Than trấu và than nhãn ở mức 10 tấn/ha và 20 tấn/ha cho SQI tương đồng nhau. Tương tự, các kết quả từ PCA/FA (Bảng 4.8, Phụ lục 4), chỉ số chất lượng hạt (GQI) hiển thị trong Hình 3.11b. Nghiên cứu này đã tính toán chỉ số GQI từ 9 thông số hóa học (Bảng 4.7, Phụ lục 4) của hạt đo được sau thời gian thí nghiệm và chỉ số GQI được dùng để đánh giá xu hướng tổng thể chất lượng hạt dưới ảnh hưởng của than trấu và than nhãn. Kết quả nghiên cứu cho thấy đất sử dụng CT3 có chỉ số GQI cao nhất ở vụ 1, tiếp theo là CT5, vụ 2. Chỉ số GQI thấp nhất ở CT1 ở cả 2 vụ.

** Chỉ số ô nhiễm kim loại nặng trong đất và nhiễm kim loại nặng trong hạt sau thí nghiệm:*

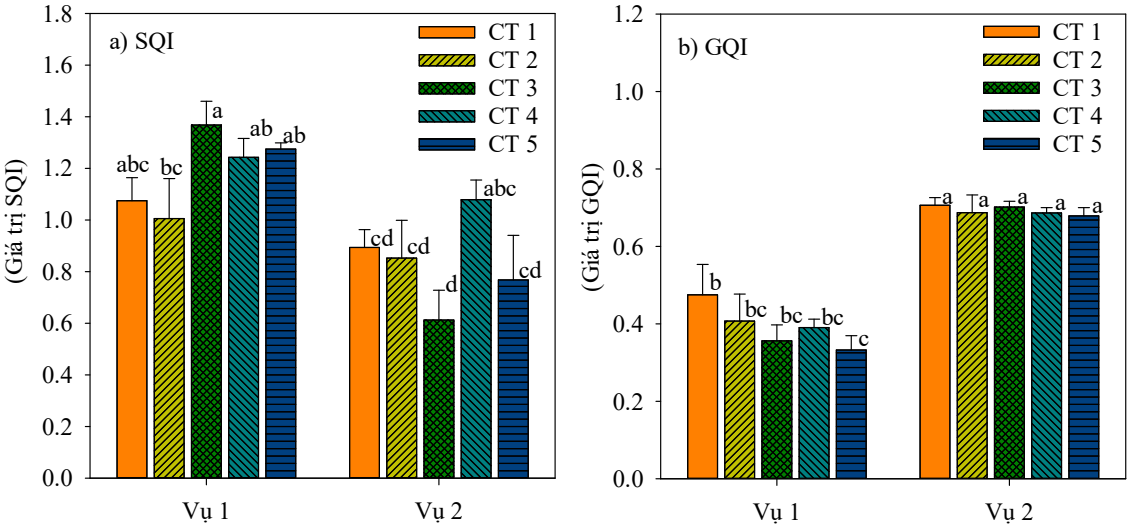


Hình 3.12 Chỉ số ô nhiễm kim loại nặng trong đất (HPIs, a) và nhiễm kim loại nặng trong hạt (HPIg, b) của đất phèn sau thí nghiệm

HPIs (Hình 3.12a) có sự khác biệt đáng kể giữa các công thức trong vụ 1 và không khác biệt có ý nghĩa thống kê trong vụ 2. Vụ 1 có HPI cao hơn so với vụ 2. CT1 có chỉ số HPIs cao nhất ở vụ 1, trong khi CT4 có chỉ số thấp hơn đáng kể. Tương tự, HPIg (Hình 3.12b) có sự khác biệt có ý nghĩa thống kê giữa các công thức trong vụ 1 với CT1 và CT2 có giá trị cao nhất. Trong vụ 2, chỉ số HPIg giữa các công thức tương đồng nhau về mặt thống kê.

3.3.5.2 Thí nghiệm trên đất xám

** Chỉ số chất lượng đất và chỉ số chất lượng hạt sau thí nghiệm:*[7]

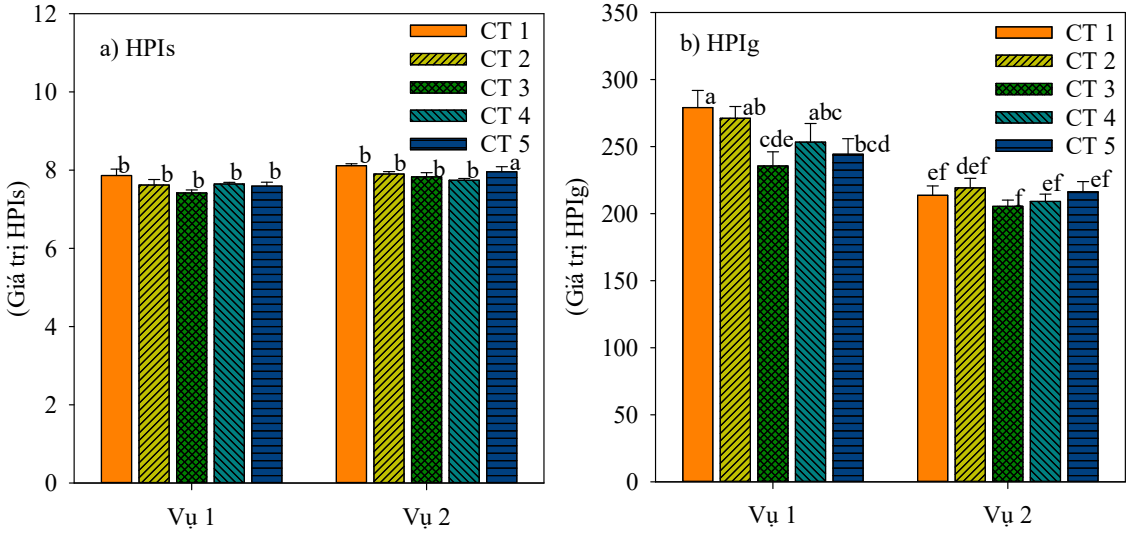


Hình 3.13 Chỉ số chất lượng đất xám (SQI, a) và chỉ số chất lượng hạt lúa (GQI, b) sau thí nghiệm sử dụng than sinh học

Dựa trên kết quả từ PCA/FA (Bảng 4.10, Phụ lục 4), chỉ số chất lượng đất (SQI) đã được tính toán và hiển thị trong Hình 3.13a. Kết quả nghiên cứu cho thấy đất sử dụng CT3 có SQI cao nhất ở vụ 1. Trong vụ 2, CT4 chỉ số SQI cao nhất. SQI thấp nhất ở CT2 ở vụ 1; CT3 - vụ 2. Tương tự, các kết quả từ PCA/FA (Bảng 4.12, Phụ lục 4), chỉ số chất lượng hạt (GQI) hiển thị trong Hình 3.13b. Nghiên cứu này đã tính toán chỉ số GQI từ 9 thông số hóa học của hạt đo được sau thời gian thí nghiệm (Bảng 4.11, Phụ lục 4) và chỉ số GQI được dùng để đánh giá xu hướng tổng thể chất lượng hạt dưới ảnh hưởng của than trấu và than nhãn. Kết quả nghiên cứu cho thấy GQI khác biệt có ý nghĩa thống kê ở các công thức khác nhau trong vụ 1 và không khác biệt có ý nghĩa thống kê trong vụ 2.

[7] Tác giả đã công bố 01 bài báo khoa học ở nội dung này: **Đồng Phú Hảo**, Nguyễn Thanh Bình, Lê Hoàng Anh. "Nghiên cứu ảnh hưởng của than sinh học đến chất lượng đất cát trồng lúa tại xã Thái Mỹ, huyện Củ Chi, thành phố Hồ Chí Minh," Tạp chí Khoa học Đất, số 79-2025 (trang 22-27), công bố các kết quả liên quan đến thí nghiệm quy mô thực địa trên đất xám trồng lúa tập trung vào chỉ số chất lượng đất (SQI).

** Chỉ số ô nhiễm kim loại nặng trong đất và nhiễm kim loại nặng trong hạt sau thí nghiệm:*[8]



Hình 3.14 Chỉ số ô nhiễm kim loại nặng trong đất (HPIs, a) và nhiễm kim loại nặng trong hạt (HPIg, b) của đất xám sau thí nghiệm sử dụng than sinh học

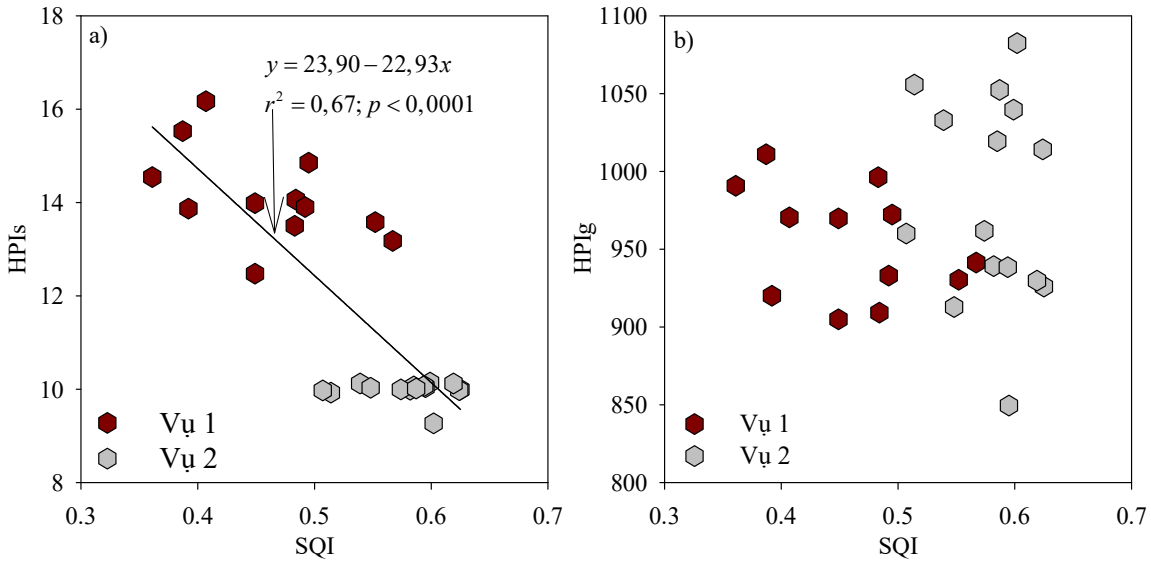
HPIs (Hình 3.14a) có mức dao động tương đối ổn định và không có ý nghĩa thống kê giữa các công thức trong cả hai vụ. HPIg (Hình 3.14b) cho thấy sự dao động đáng kể giữa các công thức, với CT1 có mức HPIg cao nhất và CT3 thấp nhất trong vụ 1. Trong vụ 2, HPIg giữa các công thức khác biệt không có ý nghĩa thống kê.

[8] Tác giả đã công bố 01 bài báo khoa học ở nội dung này: **Hao Phu Dong**, Binh Thanh Nguyen*, Thia Hong Le, My Hoang Nguyen, and Anh Hoang Le. "Agricultural byproduct-derived biochar for mitigating trace metal risks from soil to rice to public health: implications for sustainable management," Integrated Environmental Assessment and Management, 2025. https://doi.org/10.1093/inteam/vjaf024. Xếp hạng Q1 thuộc danh mục Web of Science, Impact factor = 8.4, công bố các kết quả liên quan đến thí nghiệm quy mô thực địa trên đất xám trồng lúa tập trung vào các thành phần kim loại nặng và chỉ số ô nhiễm kim loại nặng trong đất (HPIs).

3.3.6 Các mối tương quan

3.3.6.1 Thí nghiệm trên đất phèn

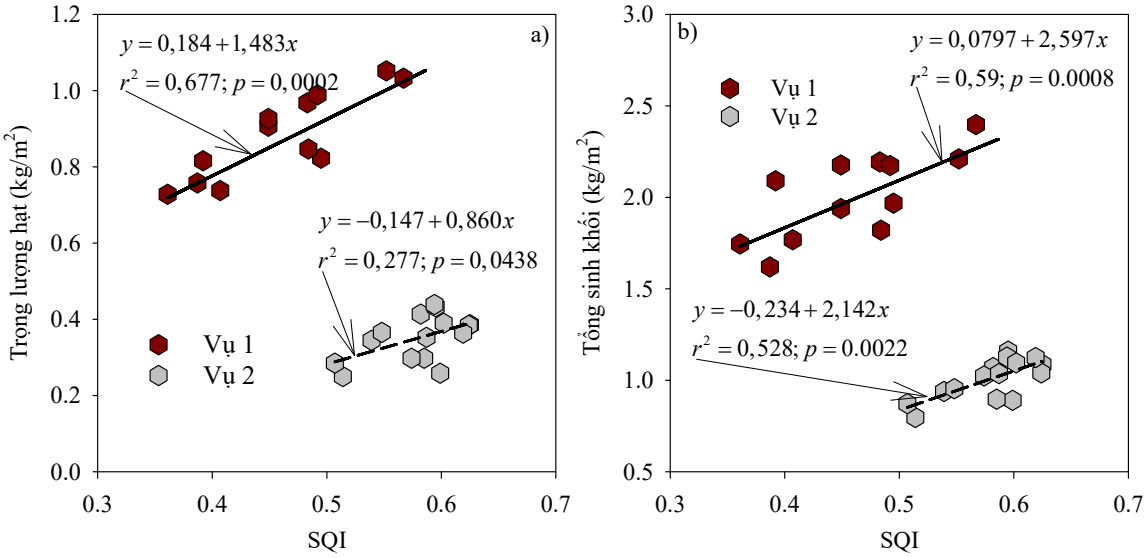
** Mối tương quan giữa chỉ số chất lượng đất và chỉ số ô nhiễm kim loại nặng trong đất và nhiễm kim loại nặng trong hạt:*



Hình 3.15 Mối tương quan SQI với HPIs (a) và HPIg (b) sau thí nghiệm trên đất phèn sử dụng than sinh học

Hình 3.15a cho thấy giữa HPIs và SQI có mối tương quan nghịch biến có ý nghĩa thống kê với hệ số xác định $r^2 = 0,67$. Các điểm dữ liệu của vụ 1 tập trung ở mức HPIs cao hơn (12-16) và SQI thấp, trong khi các điểm của vụ 2 tập trung ở mức HPIs thấp hơn (10-12) và SQI cao. Không có mối quan hệ rõ ràng giữa HPIg và SQI (Hình 3.15b). Vụ 1 và vụ 2 có mức HPIg tương đối gần nhau và không bị ảnh hưởng nhiều bởi chất lượng đất (SQI).

** Mối tương quan giữa chỉ số chất lượng đất và tổng sinh khối, năng suất hạt lúa nước sau thí nghiệm của đất phèn bị ảnh hưởng bởi than sinh học:*[9]



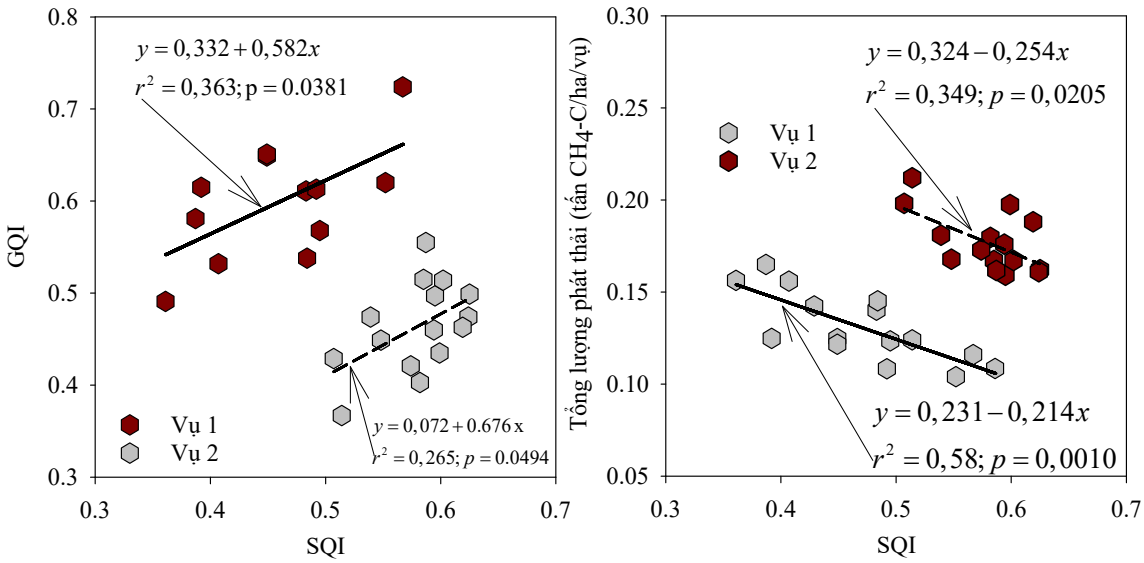
Hình 3.16 Mối tương quan SQI với năng suất hạt (a) và tổng sinh khối (b) trên đất phèn sau thí nghiệm sử dụng than sinh học

Hình 3.16 phản ánh mối tương quan giữa chỉ số chất lượng đất (SQI) với năng suất hạt (Hình a) và tổng sinh khối (Hình b) của cây lúa trên đất phèn sau hai vụ thí nghiệm sử dụng than sinh học. Kết quả cho thấy cả hai chỉ số năng suất đều có mối quan hệ tuyến tính dương với SQI, nhưng cường độ tương quan có sự khác biệt đáng kể giữa hai vụ. Đối với năng suất hạt (Hình 3.16a), vụ 1 thể hiện mối tương quan rất chặt giữa SQI và trọng lượng hạt, với hệ số xác định $r^2 = 0,68$ và giá trị p rất nhỏ ($p = 0,0002$), cho thấy ý nghĩa thống kê cao. Điều này chứng minh rằng ngay sau khi cải tạo đất bằng than sinh học, chất lượng đất đóng vai trò quan trọng trong việc tăng cường năng suất của cây lúa. Ngược lại, ở vụ 2, mặc dù mối liên hệ vẫn duy trì ở mức có ý nghĩa thống kê ($r^2 = 0,28; p = 0,04$), nhưng rõ ràng đã yếu đi, cho thấy hiệu quả cải tạo đất của than sinh học có xu hướng giảm dần theo thời gian hoặc do tác động của điều kiện canh tác và thời tiết thay đổi. Tương tự, tổng

[9] Tác giả đã công bố 01 bài báo khoa học ở nội dung này: **Hao Phu Dong**, Binh Thanh Nguyen*, Anh Hoang Le, Gai Dai Dinh. "Seasonal variation-dependent biochar impacts on coastal acid-sulfate soil in paddy fields and the consequences on rice growth and yield," Geoderma Regional 39 (2024) e00878. https://doi.org/10.1016/j.geodrs.2024.e00878. Xếp hạng Q1 thuộc danh mục Web of Science, Impact factor = 3.3, công bố các kết quả liên quan đến thí nghiệm quy mô thực địa trên đất phèn trồng lúa.

sinh khối (Hình 3.16b) cũng có mối tương quan dương với chỉ số chất lượng đất. Ở vụ 1, $r^2 = 0,59$ ($p = 0,0008$), cho thấy khi đất được cải thiện, sinh trưởng tổng thể của cây lúa được thúc đẩy đáng kể. Điều đáng chú ý là ở vụ 2, mối tương quan này vẫn duy trì ở mức cao ($r^2 = 0,528$; $p = 0,0022$), cao hơn so với tương quan với năng suất hạt. Điều này hàm ý rằng chỉ số SQI có ảnh hưởng bền vững hơn đến sinh trưởng toàn cây (bao gồm thân, rễ, lá và hạt) so với riêng phần năng suất hạt, vốn chịu ảnh hưởng bởi nhiều yếu tố môi trường trong giai đoạn trổ và làm hạt.

** Mối tương quan giữa chỉ số chất lượng đất và chỉ số chất lượng hạt lúa, tổng phát thải CH_4 sau thí nghiệm của đất phèn bị ảnh hưởng bởi than sinh học:*

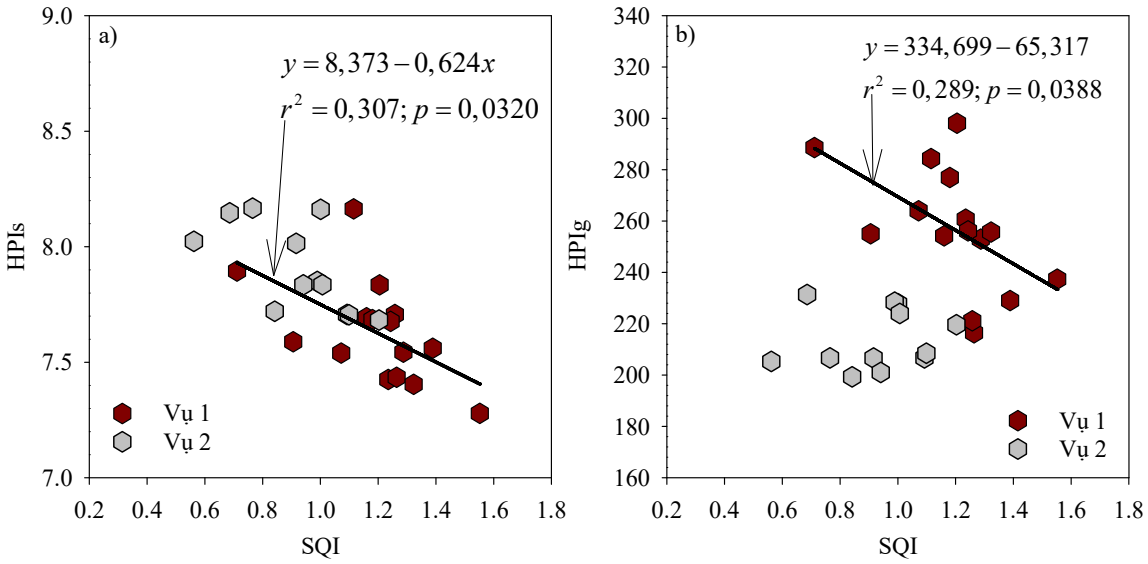


Hình 3.17 Mối tương quan SQI với GQI (a) và SQI với tổng lượng phát thải CH_4 (b) trên đất phèn sau thí nghiệm sử dụng than sinh học

Ở hình (3.17a), GQI tăng theo SQI với mối tương quan thuận, có ý nghĩa thống kê ở cả hai vụ ($r^2 = 0,36$; $p = 0,038$ cho vụ 1 và $r^2 = 0,26$; $p = 0,049$ cho vụ 2). Điều này cho thấy chất lượng đất được cải thiện sẽ góp phần nâng cao chất lượng hạt lúa, mặc dù mức độ ảnh hưởng ở vụ 2 thấp hơn vụ 1. Ở hình (3.17b), tổng lượng phát thải CH_4 lại có mối tương quan nghịch với SQI, đặc biệt rõ ràng ở vụ 2 ($r^2 = 0,58$; $p = 0,001$) so với vụ 1 ($r^2 = 0,349$; $p = 0,02$). Kết quả này phản ánh rằng cải thiện chất lượng đất nhờ than sinh học không chỉ nâng cao chất lượng hạt mà còn giúp giảm thiểu phát thải khí nhà kính, góp phần phát triển nông nghiệp bền vững.

3.3.6.2 Thí nghiệm trên đất xám

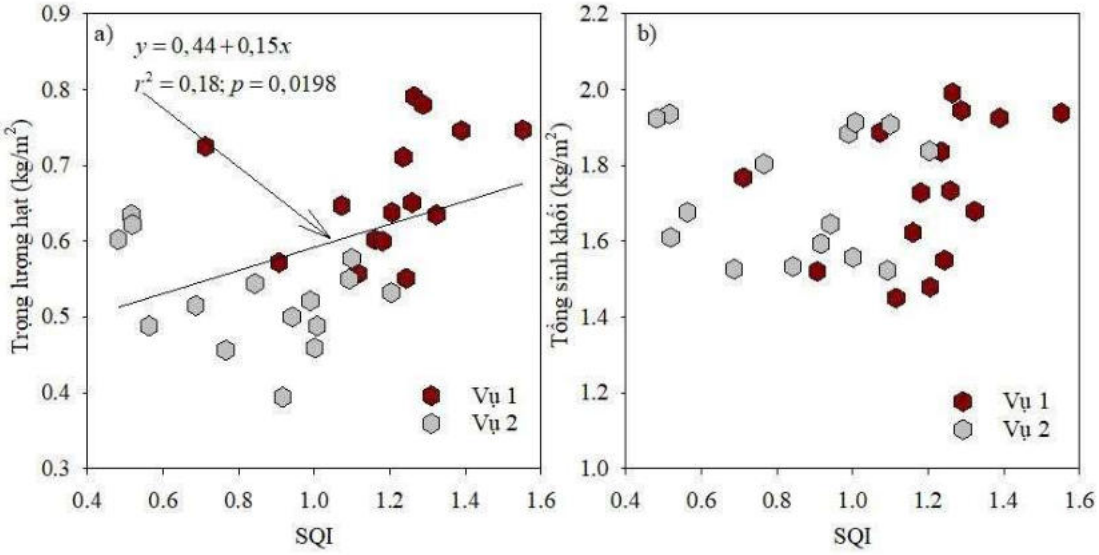
** Mối tương quan giữa chỉ số chất lượng đất và chỉ số ô nhiễm kim loại nặng trong đất và nhiễm kim loại nặng trong hạt:*



Hình 3.18 Mối tương quan SQI với HPIs (a) và HPIg (b) trên đất xám sau thí nghiệm sử dụng than sinh học

Ở hình (3.18a), chỉ số HPIs có xu hướng giảm theo SQI trên đất xám với mối tương quan nghịch có ý nghĩa thống kê (*r^2 = 0,31; p = 0,03*). Điều này cho thấy rằng khi chất lượng đất được cải thiện nhờ sử dụng than sinh học, mức độ ô nhiễm kim loại nặng trong đất cũng giảm theo. Tương tự, ở hình (3.18b), chỉ số HPIg phản ánh hàm lượng kim loại nặng tích lũy trong hạt cũng có tương quan nghịch với SQI (*r^2 = 0,29; p = 0,039*) trong vụ đầu, cho thấy cải thiện đất nhờ than sinh học còn giúp giảm nguy cơ ô nhiễm thực phẩm. Tuy nhiên trong vụ 2, mối tương quan này không có ý nghĩa thống kê, cho thấy hiệu quả của than sinh học trên đất xám đã giảm xuống trong vụ thứ hai.

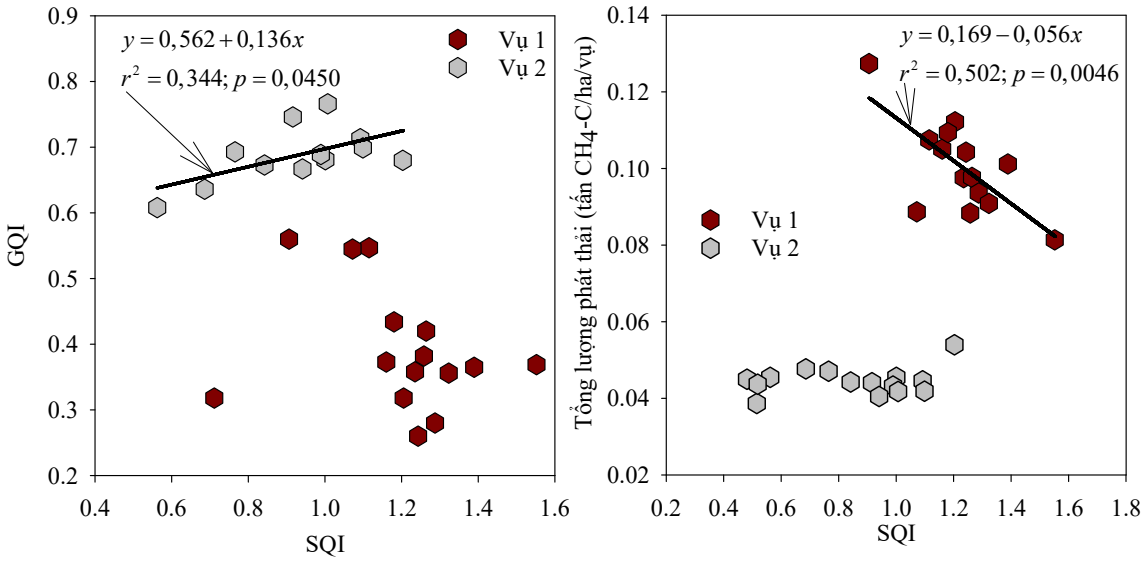
** Mối tương quan giữa chỉ số chất lượng đất và tổng sinh khối, năng suất hạt lúa nước sau thí nghiệm của đất xám bị ảnh hưởng bởi than sinh học:*



Hình 3.19 Mối tương quan SQI với năng suất hạt (a) và tổng sinh khối (b) trên đất xám sau thí nghiệm sử dụng than sinh học

Hình 3.19 thể hiện mối quan hệ giữa SQI với năng suất hạt (a) và tổng sinh khối (b) sau thí nghiệm sử dụng than sinh học trên đất xám. Kết quả cho thấy SQI có mối tương quan dương và có ý nghĩa thống kê với năng suất hạt, với hệ số xác định r^2 = 0,18 và giá trị p = 0,0198. Mặc dù r^2 không cao, nhưng giá trị p nhỏ hơn 0,05 chứng minh mối quan hệ này là có ý nghĩa thống kê. Điều này cho thấy khi chất lượng đất được cải thiện nhờ than sinh học, năng suất hạt lúa cũng tăng theo. Ngược lại, tổng sinh khối (Hình b) không thể hiện mối liên hệ rõ ràng với SQI. Các điểm dữ liệu phân bố rải rác và không hình thành xu hướng cụ thể, cho thấy tổng sinh khối ít bị chi phối bởi chất lượng đất trong điều kiện thí nghiệm này. Điều này có thể do quá trình tích lũy sinh khối bị ảnh hưởng bởi nhiều yếu tố khác như giống lúa, điều kiện thời tiết, hoặc khả năng hấp thu dinh dưỡng ở từng giai đoạn sinh trưởng.

** Mối tương quan giữa chỉ số chất lượng đất và chỉ số chất lượng hạt lúa, tổng phát thải CH_4 sau thí nghiệm của đất xám bị ảnh hưởng bởi than sinh học:*



Hình 3.20 Mối tương quan SQI với GQI (a) và SQI với tổng lượng phát thải CH_4 (b) trên đất xám sau thí nghiệm sử dụng than sinh học

Hình 3.20 mô tả mối tương quan giữa SQI với GQI (Hình a) và tổng lượng phát thải CH_4 (Hình b) sau thí nghiệm sử dụng than sinh học trên đất xám. Hình 3.20a cho thấy có mối tương quan dương và có ý nghĩa thống kê giữa SQI và GQI trong vụ lúa thứ 2. Điều này chứng minh rằng cải thiện chất lượng đất bằng than sinh học có tác động tích cực đến chất lượng hạt lúa, phản ánh ở việc các mẫu có SQI cao đi kèm với GQI cao hơn. Tuy nhiên, trong vụ lúa thứ nhất không tìm thấy mối tương quan này. Hình 3.20b cho thấy mối mối quan hệ nghịch giữa SQI và tổng lượng phát thải CH_4 trong vụ thứ nhất với hệ số xác định $r^2 = 0,502$ và $p = 0,0046$. Đây là một kết quả quan trọng, cho thấy rằng khi chất lượng đất được cải thiện (SQI tăng), lượng phát thải CH_4 có xu hướng giảm đáng kể. Kết quả này không chỉ củng cố vai trò tích cực của than sinh học trong canh tác bền vững, mà còn nhấn mạnh tiềm năng của nó trong giảm phát thải khí nhà kính từ sản xuất lúa trên đất xám.

3.3.7 Một số thảo luận

***** *Ảnh hưởng của than sinh học đến tính chất và chỉ số chất lượng đất*

Việc bổ sung than sinh học, đặc biệt là than trấu và than nhãn, đã cho thấy hiệu quả rõ rệt trong việc cải thiện các chỉ tiêu hóa học của đất, điển hình là làm tăng pH, CEC, OC đồng thời làm giảm độ $chua_{TrĐ}$ trong cả đất xám và đất phèn. Hiệu quả này rõ rệt nhất ở CT3 sử dụng than trấu với liều lượng 20 tấn/ha. Sự gia tăng pH có thể được lý giải bởi bản chất của than sinh học thường giữ lại một lượng lớn hàm lượng giàu cation kiềm như Ca^{2+}, Mg^{2+}, K^{+} và Na^{+} [146]. Những cation này có khả năng trung hòa $H^{+}_{TrĐ}$ trong đất, làm giảm độ chua và cải thiện pH đáng kể, điều này đặc biệt hữu ích cho đất phèn. Ngoài ra, CEC tăng cũng là kết quả hiển nhiên của việc áp dụng than sinh học. Với cấu trúc xốp, diện tích bề mặt riêng lớn và sự phong phú các nhóm chức bề mặt (carboxyl và hydroxyl), than sinh học cung cấp thêm nhiều vị trí hấp phụ cation, làm tăng khả năng giữ dinh dưỡng của đất [147]. Khi CEC tăng, khả năng giữ lại và trao đổi các chất dinh dưỡng trong đất cũng được cải thiện, từ đó hỗ trợ sự phát triển ổn định của lúa trên cả đất phèn và đất xám. Về OC, than sinh học không chỉ là nguồn bổ sung hữu cơ trực tiếp cho đất mà còn cải thiện điều kiện môi trường trong đất, từ đó gián tiếp thúc đẩy quá trình phân giải sinh học và khoáng hóa chất hữu cơ nội tại trong đất, điều này phù hợp với nhận định của Beusch [148]. Các kết quả này khẳng định tính ổn định và hiệu quả cải tạo của than sinh học trên nhiều loại đất khác nhau.

Trên đất phèn, việc sử dụng than sinh học làm giảm hàm lượng NH_4^{+} trong vụ 1 nhưng lại làm tăng trở lại trong vụ 2. Hiện tượng này có thể được giải thích là do ở vụ 1, than sinh học làm tăng pH đất phèn từ mức rất thấp lên trung tính hơn dẫn đến sự hấp thu NH_4^{+} mạnh mẽ cũng như có khả năng xảy ra thất thoát NH_4^{+} qua bay hơi dưới dạng NH_3 trong điều kiện pH cao hơn. Tuy nhiên, sang vụ 2, khi hệ vi sinh vật ổn định và các nhóm chức trên bề mặt than sinh học đã dần bão hòa, hiệu quả giữ CEC của than bắt đầu phát huy tác dụng rõ rệt hơn, giúp giữ lại NH_4^{+} hiệu quả hơn, từ đó làm tăng hàm lượng NH_4^{+} trong đất tương tự như nghiên cứu của Bedassa [149]. Ngược lại, trên đất xám, việc bổ sung than sinh học cũng làm giảm hàm

lượng NH_4^+ trong vụ 1, nhưng lại không thể hiện ảnh hưởng rõ rệt trong vụ 2. Điều này là do đất xám thường có pH trung tính đến hơi chua, nên hiệu ứng nâng pH của than sinh học không quá mạnh. Trong vụ đầu, than sinh học có thể đóng vai trò như một bẫy ion hấp phụ NH_4^+ vào cấu trúc xốp giàu nhóm chức âm, làm giảm hàm lượng NH_4^+ trong dung dịch đất. Đồng thời, hoạt động của vi sinh vật tăng lên trong thời gian ngắn sau khi bón than cũng có thể làm gia tăng hấp thu NH_4^+. Tuy nhiên, đến vụ 2, khi các cơ chế hấp phụ tạm thời và sự phát triển vi sinh vật đã ổn định, than sinh học không còn ảnh hưởng đáng kể đến hàm lượng NH_4^+ [150].

CEC (Cation Exchange Capacity) là khả năng đất giữ lại các ion dinh dưỡng như K^+, Ca^{2+}, Mg^{2+}. Than trấu có diện tích bề mặt lớn và khả năng trao đổi ion mạnh mẽ, làm tăng đáng kể CEC của hai loại đất trong cả 2 vụ mùa [151]. Nhờ khả năng này, đất có thể lưu giữ được nhiều chất dinh dưỡng hơn và giảm tình trạng rửa trôi các chất cần thiết cho lúa nước [152]. Than trấu, với khả năng hấp phụ cation nhờ bề mặt giàu carbon, giúp tăng CEC đáng kể. Ở mức bón cao hơn (CT3-CT5), khả năng này tăng mạnh, làm cho đất xám và đất phèn có thể giữ lại nhiều hơn các cation dinh dưỡng như Ca^{2+}, Mg^{2+}, K^+. Than trấu giúp giữ lại các yếu tố (K^+, Ca^{2+}, Mg^{2+}), từ đó làm tăng hàm lượng các chất này trong đất xám. Ở mức bón cao (CT3-CT5), các ion như K^+, Ca^{2+} và Mg^{2+} được giữ lại tốt hơn, góp phần vào sự phát triển cây lúa.

Trên cả đất phèn và đất xám, hiệu ứng giảm nhanh nồng độ Al và Fe trong vụ 1 ngay sau khi bón than sinh học có thể giải thích bằng cơ chế nâng pH khiến Al^{3+} và Fe^{3+} kết tủa dưới dạng hydroxyd không tan ($Al(OH)_3$, $Fe(OH)_3$) và đồng thời kích thích vi sinh vật khử Fe^{3+} thành Fe^{2+} ít hòa tan. Một nghiên cứu ủ đất chua với các loại than sinh học (gỗ, tre, trấu) ở 20 tấn/ha cho thấy pH đất tăng lên chỉ sau 30 ngày và giảm Al trao đổi và hòa tan so với đối chứng [153]. Tương tự, phân tích tổng hợp của Zhang, et al. [154] khẳng định trung bình độ chua trao đổi và Fe hòa tan trên nhiều loại đất sau bón than với hiệu ứng mạnh nhất trong các mẫu vụ 1. Sang vụ 2, khi nhóm chức bazơ và khoáng kiềm của than đã bão hòa và quần thể vi

sinh ổn định, quá trình kết tủa - khử không còn diễn ra mạnh, dẫn đến nồng độ Al, Fe trở về gần mức ban đầu.

Than trấu với hiệu quả nâng pH cao hơn sẽ giúp tăng SQI tốt hơn so với than nhãn trong cả 2 vụ, đặc biệt khi sử dụng ở liều lượng cao. Than trấu vượt trội hơn trong khả năng cải thiện yếu tố này, giúp SQI tăng nhanh chóng hơn so với than nhãn. Than trấu với khả năng cải thiện CEC mạnh mẽ hơn sẽ giúp tăng SQI nhanh chóng và ổn định hơn so với than nhãn. Sự ổn định của dưỡng chất và giảm ion độc là yếu tố then chốt trong việc duy trì và cải thiện SQI. Nhìn chung, cả than trấu và than nhãn đều có những ảnh hưởng tích cực đến SQI đất phèn, nhưng với mức độ khác nhau. Điều này có nghĩa là đối với các điều kiện đất phèn, việc sử dụng than trấu sẽ là một lựa chọn tối ưu hơn để tăng SQI và hỗ trợ lúa phát triển mạnh mẽ hơn. Tương tự, khi bổ sung than sinh học, SQI của đất xám được cải thiện nhờ các yếu tố như pH, CEC, hàm lượng OC và các chất dinh dưỡng tăng. Than trấu với khả năng cải thiện mạnh mẽ nhiều yếu tố hóa học đất, đặc biệt là ở mức bón cao, giúp tăng đáng kể SQI của đất xám do có tác động mạnh hơn tại vụ 1 so với than nhãn, khi bón ở mức cao (20 tấn/ha). Ngoài ra, ở mức 20 tấn/ha, GQI cao hơn đáng kể so với khi bón 10 tấn/ha (đất phèn), do sự cải thiện tổng thể về môi trường sinh trưởng của lúa. Than nhãn cũng cải thiện chất lượng hạt, nhưng ít hơn so với than trấu. Cải thiện chất lượng hạt phụ thuộc vào khả năng cung cấp dưỡng chất của đất và than trấu thể hiện ưu thế hơn trong việc nâng cao chỉ số chất lượng hạt so với than nhãn[155].

** Ảnh hưởng của than sinh học đến sinh trưởng, năng suất lúa*

Trên cả hai loại đất, các công thức bón than sinh học (CT2-CT5) đều cải thiện đáng kể cả năng suất hạt và tổng sinh khối trong vụ 1 so với đối chứng-CT1, chủ yếu nhờ than sinh học có cấu trúc xốp và diện tích bề mặt lớn giúp giữ nước, dinh dưỡng (N, P, K, …) và giải phóng chậm, kéo dài thời gian hấp thụ. Than sinh học còn thúc đẩy hoạt động vi sinh đất, gia tăng độ thông khí và sự trao đổi khí, góp phần cải thiện sinh trưởng rễ và chồi. Một nghiên cứu tương tự cho thấy bón than sinh học 20

tấn/ha làm tăng 11-13 % năng suất lúa trong vụ đầu tiên so với đối chứng không bón than sinh học [156, 157]. Hàm lượng OC dễ phân giải thúc đẩy quá trình khoáng hóa chậm, cung cấp dinh dưỡng dài hạn. Khi liều thấp hoặc cao, hiệu ứng tạo cấu trúc hoặc thừa dưỡng chất có thể kém tối ưu hơn. Điều này phù hợp với kết quả nghiên cứu của Yang, et al. [157]. Vụ 1 cho tổng sinh khối và năng suất hạt cao hơn vụ 2 ở mọi công thức là do hiệu ứng ban đầu của than sinh học do nhiều nhóm chức bazơ, khoáng kiềm chưa bão hòa dẫn đến cải thiện pH, CEC, giữ dinh dưỡng tối ưu. Sang vụ 2, nhóm chức và khoáng kiềm đã phần nào bão hòa, hiệu ứng bổ trợ chậm lại. Các kết quả này tương đồng với nghiên cứu của Premalatha, et al. [158] chỉ ra rằng lợi ích về năng suất do than sinh học mang lại có xu hướng suy giảm đáng kể sau 1-2 vụ, nhất là trên các thí nghiệm ngắn hạn. Trên đất phèn có pH rất thấp ban đầu nên than sinh học đã phát huy hiệu quả ổn định pH và CEC cao hơn, duy trì cải thiện sinh trưởng lúa. Trên đất xám hiệu ứng nâng pH và bổ sung khoáng kiềm của than sinh học kém nổi bật hơn, khiến vụ 2 không còn khác biệt rõ so với đối chứng. Nhiều đánh giá cho thấy tác dụng của than sinh học phụ thuộc mạnh vào tính axit của đất ban đầu với đất trung tính hoặc hơi chua, hiệu ứng suy giảm nhanh hơn sau vài vụ [158]. Điều này cho thấy hiệu quả của than sinh học còn tốt trên đất phèn nhưng suy giảm rõ trên đất xám trong vụ 2. Kết quả nghiên cứu cũng đã có thấy mối liên hệ tuyến tính chặt giữa SQI và năng suất cũng như tổng sinh khối lúa trên đất phèn cả 2 vụ và có liên hệ chặt trên với năng suất hạt trên đất xám.

***** *Ảnh hưởng của than sinh học đến phát thải CH_4 trong canh tác lúa nước*

Lượng CH_4 phát thải được giảm rõ rệt trong vụ đầu trên cả hai loại đất có thể hiểu là kết quả của cơ chế tăng thế oxy hóa khử và giảm OC dễ phân giải cho quá trình metan sinh nhờ than sinh học có diện tích bề mặt lớn và cấu trúc xốp, đồng thời ức chế hoạt động của vi khuẩn methanogens. Bón than sinh học kết hợp với phân N làm giảm 17 % tổng phát thải CH_4 trong vụ đầu tiên so với đối chứng, tương tự như cơ chế ức chế metan đã được Qian, et al. [44] tổng hợp trong đánh giá về chu trình CH_4 ở đất lúa. Ở vụ thứ hai trên đất phèn, than sinh học vẫn tiếp tục giảm phát thải CH_4, lý giải bởi tính ổn định lâu dài của hiệu ứng đệm pH và tăng CEC, tạo môi

trường kém thuận lợi cho methanogens ngay cả sau khi lượng OC dễ phân giải ban đầu đã cạn. Một nghiên cứu về ảnh hưởng phân vụ của than sinh học trên đất phèn đã ghi nhận xu hướng giảm phát thải và cải thiện điều kiện đất sang vụ hai, do than sinh học duy trì hiệu quả trung hòa axit và ức chế sinh học lên CH_4 [159]. Ngược lại, trên đất xám, tác dụng giảm CH_4 của than sinh học chưa phát huy tác dụng ở vụ hai, có thể do pH ban đầu đã đủ cao, khiến hiệu ứng đệm của than sinh học kém hơn, đồng thời nguồn OC dễ phân giải từ than sinh học đã được vi sinh vật chuyển hóa phần lớn, phục hồi điều kiện phát triển cho methanogens. Tương tự, nghiên cứu của Joseph, et al. [160] cho thấy lợi ích giảm CH_4 do than sinh học ở các đất trung tính thường suy giảm nhanh sau 1-2 vụ, trái ngược với đất chua, nơi hiệu ứng kéo dài lâu hơn. Bên cạnh đó, kết quả này cũng cho thấy mối tương quan nghịch giữa SQI và tổng lượng phát thải CH_4 trên đất phèn ở cả 2 vụ lúa (tương tự như ở thí nghiệm trong nhà lưới - nội dung 2). Mặt khác, ở đất xám mối tương quan này chỉ xuất hiện ở vụ 1.

Sự khác biệt về mức độ phát thải CH_4 giữa thí nghiệm nhà lưới và thực địa trên đất xám có thể được lý giải bởi đặc điểm của điều kiện thí nghiệm: trong nhà lưới, đất xám được ngập nước liên tục và kiểm soát chặt chẽ, tạo môi trường kỵ khí hoàn toàn thuận lợi cho vi khuẩn sinh CH_4 hoạt động mạnh, trong khi ngoài thực địa đất xám thường có khả năng thoát nước tốt hơn, làm gián đoạn quá trình kỵ khí và hạn chế phát thải CH_4. Ngược lại, trên thực địa, đất phèn có phát thải CH_4 cao hơn đất xám do đất phèn thường xuyên ngập nước sâu hơn, giàu chất hữu cơ phân giải chậm và có hàm lượng SO_4^{2-} cao; tuy SO_4^{2-} ban đầu cạnh tranh với vi khuẩn sinh CH_4 nhưng khi bị khử hoàn toàn sẽ tạo điều kiện cho *methanogen* chiếm ưu thế và phát thải CH_4 tăng mạnh trong dài hạn. Do đó, sự đảo ngược thứ tự phát thải giữa hai quy mô thí nghiệm phản ánh sự khác biệt căn bản về chế độ ngập nước, thành phần hóa học đất và thời gian tác động, những yếu tố mà thí nghiệm nhà lưới ngắn hạn chưa thể tái hiện đầy đủ so với điều kiện canh tác thực tế.

***** *Một số đặc điểm nổi bật khác*

Trên đất xám, SQI biến động mạnh giữa các công thức nghiên cứu bởi mỗi liều lượng than sinh học cải thiện ưu thế của riêng nó trên từng thành phần chất lượng. Ở vụ thứ nhất, CT3 và CT5 cùng kích thích gia tăng đồng thời nhiều chỉ tiêu đơn lẻ nên đã cho giá trị SQI tổng hợp cao nhất nhờ cân bằng giữa nguồn OC dễ phân giải và nhóm chức bề mặt còn dồi dào [161]. Tuy nhiên, sang vụ thứ hai, CT3 lại ghi nhận SQI thấp nhất trong các công thức, có thể do than sinh học bị vi sinh phân giải hết OC và bão hòa nhóm chức hấp phụ nhanh hơn so với liều thấp hoặc rất cao, dẫn đến suy giảm lợi ích tích hợp trên SQI [161]. Kết quả này tương ứng với đánh giá tổng quan của Verheijen, et al. [162], trong đó lợi ích về cải thiện các chỉ tiêu chức năng đất phụ thuộc chặt chẽ vào liều lượng, mức trung bình đôi khi cho hiệu quả không bền qua các vụ so với liều cao hơn hoặc thấp hơn.

Trên đất phèn, tính chua cao ban đầu làm tăng độ hòa tan của các kim loại nặng, nhưng khi bón than sinh học, pH đất được nâng lên, tạo điều kiện thuận lợi cho kết tủa hydroxyd của Cd, Pb, Zn, Cu và Ni và đồng thời ngăn chặn sự di chuyển của chúng nhờ các nhóm chức $–COO^–$, –OH trên bề mặt than sinh học. Hơn nữa, trong môi trường sulfate cao của đất phèn, vi sinh vật khử sulfate kết hợp với than sinh học còn thúc đẩy hình thành các hợp chất không tan, gia tăng hiệu quả cố định kim loại nặng ngay sau vụ đầu tại CT3 và CT5. Cơ chế này đã được chứng minh rõ trong nghiên cứu của Wu, et al. [163], than sinh học không chỉ nâng pH mà còn hỗ trợ vi khuẩn HY-1 tạo S^{2-}, thúc đẩy cố định Cd^{2+} và Pb^{2+} dưới dạng sulfide kém tan. Ngược lại, trên đất xám, dù hiệu ứng nâng pH của than sinh học không mạnh bằng đất phèn, than sinh học vẫn giảm đáng kể hàm lượng Cd^{2+} và Pb^{2+} thông qua cơ chế hấp phụ và trao đổi cation. Bề mặt xốp rộng lớn và nhóm chức âm của than sinh học gia tăng khả năng giữ kim loại, trong khi phản ứng kết tủa hydroxyd diễn ra ở mức độ vừa phải. Các đánh giá tổng quan về cải tạo đất nhiễm kim loại nặng đều khẳng định than sinh học là chất hấp phụ hiệu quả nhờ diện tích bề mặt và nhóm chức đa dạng, làm giảm tính di động và sinh khả dụng của Cd, Pb [164]. Ngoài ra, Liu, et al.

[165] cũng đề cập than sinh học có thể hoạt động như passivator cố định kim loại nặng trong đất trung tính, làm giảm nồng độ kim loại hòa tan trong dung dịch đất.

Từ đó cho thấy, việc bổ sung than sinh học dẫn đế làm giảm đáng kể HPIs, chủ yếu nhờ sự tăng pH dẫn đến kết tủa hydroxyd kim loại (Cd, Pb, Zn, Cu, Ni) và khả năng hấp phụ mạnh của cấu trúc xốp chứa nhiều nhóm chức âm trên bề mặt than sinh học trong vụ đầu tiên trên đất phèn. Kết quả này tương đồng với một nghiên cứu trên đất trồng thuốc lá cho thấy sau khi bón than sinh học, HPIs của các nguyên tố Cd, Pb, Co, Ni giảm từ 2,8 % đến 4,4 % so với đối chứng ngay trong vụ đầu tiên [166]. Ngược lại, sang vụ thứ hai, hiệu quả giảm HPIs hầu như không còn do các nhóm chức trên bề mặt than sinh học đã bão hòa kim loại trong đất làm giảm dần khả năng cố định, tương tự như kết quả ghi nhận rằng hiệu quả cố định lâu dài của than sinh học suy giảm khoảng 30 % sau một mùa canh tác [167]. Tương tự, HPIg giảm rõ rệt trong vụ lúa đầu tiên khi bổ sung than sinh học do pH đất tăng cao kích thích kết tủa hydroxyd kim loại nặng, đồng thời các nhóm chức âm trên bề mặt than sinh học hấp phụ mạnh Cd^{2+} và Pb^{2+}, hạn chế cây lúa hấp thu chúng vào hạt [168]. Tuy nhiên, sang vụ thứ hai, hiệu quả này không còn được duy trì do quá trình proton hóa dần các nhóm chức trên bề mặt than sinh học dưới tác động của $H^{+}_{TrĐ}$ trong đất chua, dẫn đến hiện tượng tháo hấp và tái hòa tan các kim loại đã cố định trước đó; hệ quả là kim loại nặng có thể tái hấp thụ và đưa vào mô hạt [168].

Đáng chú ý, trên cả hai loại đất xám và đất phèn, đều có mối tương quan nghịch biến rõ ràng giữa SQI và HPIs: khi SQI gia tăng, HPIs lại giảm (kết quả này cũng đã được phát hiện trong nội dung 1 và 2). Trong một nghiên cứu của Carnier, et al. [169] sử dụng than sinh học trên đất nhiễm kim loại nặng, giá trị SQI tăng lên đồng thời với việc giảm hơn 30 % HPIs ngay sau vụ đầu tiên, minh chứng cho khả năng cải thiện các thành phần hóa học làm giảm độ hòa tan và sinh khả dụng của kim loại nặng. Hiện tượng này lý giải được bằng cơ chế tăng pH và kết tủa hydroxyd kim loại, gia tăng khả năng hấp phụ của than sinh học tất cả đều góp phần làm giảm HPIs. Đặc biệt trên đất phèn, với SQI-CT1 thấp hơn nhiều, mỗi đơn vị cải thiện SQI

đem lại mức giảm HPIs rõ rệt hơn so với đất xám, phù hợp với quan điểm rằng hiệu quả than sinh học kéo dài và sâu sắc hơn trên các hệ đất kém chất lượng.

Nhìn tổng thể, hiệu quả của than sinh học giảm nhanh trong vụ lúa thứ hai trên đất xám, trong lúc hiệu quả này còn có tác dụng khá trên đất phèn. Điều này đã ủng hộ giả thuyết khoa học số 5 là "hiệu quả của than sinh học trên đất phèn kéo dài hơn trên đất xám". Nguyên nhân có thể xuất phát từ đặc điểm cơ bản về thành phần cơ giới của hai loại đất. Cụ thể, đất xám có thành phần cơ giới nhẹ với tỷ lệ cát cao nên có khả năng giữ nước, giữ chất dinh dưỡng và hấp phụ các ion dinh dưỡng yếu hơn đáng kể so với đất phèn. Tính chất này làm cho các dưỡng chất, cation dinh dưỡng cũng như các hợp chất hấp phụ trên bề mặt than sinh học dễ bị rửa trôi theo dòng nước thấm, đặc biệt là sau thời gian dài canh tác hoặc trong mùa mưa. Trong khi đó, đất phèn thường giàu thành phần sét và keo đất có khả năng giữ nước và chất dinh dưỡng tốt hơn, giúp các dưỡng chất và nhóm chức hấp phụ của than sinh học được duy trì lâu dài hơn trong môi trường đất. Sự hiện diện của sét cũng góp phần ổn định cấu trúc đất và làm chậm quá trình suy giảm hiệu lực của than sinh học, đặc biệt là các chức năng nâng pH, giữ CEC và giảm kim loại nặng. Do đó, trong vụ thứ hai, đất phèn vẫn ghi nhận được những tác động tích cực đáng kể từ than sinh học, trong khi trên đất xám, các hiệu ứng này đã suy giảm nhanh chóng. Điều này cho thấy vai trò then chốt của thành phần cơ giới trong việc điều phối hiệu quả và tính bền vững của than sinh học trên từng loại đất khác nhau.

3.3.8 Tiểu kết nội dung 3

***** *Ảnh hưởng của than sinh học đến tính chất hóa học của đất*

Việc sử dụng than sinh học, đặc biệt là công thức CT3 (than trấu 20 tấn/ha), đã cải thiện rõ rệt các chỉ tiêu hóa học đất trên cả hai loại đất phèn và đất xám. Cụ thể, than sinh học làm tăng pH, khả năng trao đổi cation (CEC), hàm lượng carbon hữu cơ (OC), đồng thời làm giảm độ chua trao đổi. Ngoài ra, các công thức bón than sinh học, đặc biệt là CT3 và CT5 làm tăng có ý nghĩa các cation trao đổi thiết yếu như K^+, Ca^{2+} và Mg^{2+}, phản ánh vai trò của than sinh học trong việc cải tạo và duy

trì độ phì đất. Ngược lại, than sinh học không làm thay đổi đáng kể hàm lượng các ion gây mặn như Cl^- và SO_4^{2-}.

Than sinh học cũng góp phần làm giảm hàm lượng các kim loại độc hại như Al và Fe, nhất là trong vụ 1, phù hợp với cơ chế trung hòa axit của than sinh học. Trên đất phèn, sử dụng than sinh học làm giảm hàm lượng NH_4^+ trong vụ 1 nhưng lại tăng trở lại trong vụ 2. Trong khi đó, trên đất xám, than sinh học làm giảm NH_4^+ trong vụ 1 nhưng không có tác dụng rõ rệt trong vụ sau.

***** *Ảnh hưởng đến chỉ số chất lượng đất (SQI), chất lượng hạt (GQI) và ô nhiễm kim loại nặng*

Việc cải thiện các thông số đơn lẻ đã dẫn đến gia tăng chỉ số chất lượng đất tổng hợp (SQI), đặc biệt trong CT3 ở vụ đầu tiên trên cả hai loại đất. Trên đất phèn, SQI tăng mạnh ở vụ 1 nhưng giảm nhẹ ở vụ 2. Trên đất xám, SQI có xu hướng biến động lớn, cao nhất ở CT3 và CT5 trong vụ 1, nhưng giảm mạnh ở CT3 trong vụ 2, một hiện tượng chưa được lý giải đầy đủ. Bên cạnh đó, chỉ số chất lượng hạt (GQI) cũng được cải thiện đáng kể khi sử dụng than sinh học, phản ánh chất lượng nông sản được nâng cao.

Than sinh học cũng giúp giảm chỉ số ô nhiễm kim loại nặng (HPIs) trên đất phèn ở vụ 1, nhưng hiệu quả này không duy trì được sang vụ 2. Tương tự, chỉ số kim loại nặng trong hạt (HPIg) giảm rõ rệt trong CT3 ở vụ 1. Trên đất xám, than sinh học có tác động yếu đến HPIs trong cả hai vụ, ngoại trừ sự giảm nhẹ HPIg ở CT3 trong vụ đầu.

***** *Ảnh hưởng đến sinh trưởng, năng suất và phát thải CH_4*

Trong vụ lúa 1, các công thức có sử dụng than sinh học (CT2-CT5) giúp cải thiện rõ rệt sinh trưởng, tổng sinh khối và năng suất hạt lúa so với đối chứng (CT1 - không sử dụng than sinh học). Trong đó, CT3 (than trấu 20 tấn/ha) thường đạt giá trị cao nhất, cho thấy hiệu quả rõ rệt của liều lượng cao. Tuy nhiên, hiệu quả này giảm

xuống ở vụ 2, đặc biệt trên đất xám. Ngược lại, trên đất phèn, than sinh học vẫn tiếp tục cho hiệu quả tốt hơn trong vụ sau.

Về phát thải khí nhà kính, sử dụng than sinh học giúp giảm đáng kể tổng lượng CH_4 phát thải trong vụ lúa thứ nhất trên cả đất phèn và đất xám, đặc biệt ở CT3. Tuy nhiên, trong vụ thứ hai, tác dụng này chỉ còn rõ rệt trên đất phèn. Mối quan hệ nghịch giữa SQI và lượng phát thải CH_4 được ghi nhận trên đất phèn trong cả hai vụ, và có ý nghĩa thống kê rõ ở vụ 1 trên đất xám.

***** *So sánh loại và liều lượng than sinh học*

Kết quả nghiên cứu khẳng định rằng than sinh học từ vỏ trấu (CT3) cho hiệu quả cải tạo đất cao hơn so với than từ thân cành nhãn (CT5), đặc biệt ở liều lượng cao (20 tấn/ha). Tác dụng của than sinh học nổi bật ở vụ đầu và giảm rõ ở vụ thứ hai, nhất là trên đất xám. Sự suy giảm hiệu lực của than sinh học trong vụ 2, đặc biệt trên đất xám, có thể được giải thích bởi đặc điểm thành phần cơ giới nhẹ và khả năng giữ vật liệu cải tạo thấp của loại đất này. Hàm lượng cát cao làm cho than sinh học (một vật liệu có khối lượng riêng thấp) dễ bị dịch chuyển cơ học hoặc rửa trôi khỏi tầng đất canh tác trong quá trình canh tác và điều tiết nước. Bên cạnh đó, sau một vụ canh tác, các hạt sét mịn, oxide sắt và chất hữu cơ có thể xâm nhập và bít tắc hệ lỗ rỗng của than, làm suy giảm diện tích bề mặt hoạt động và khả năng hấp phụ, từ đó làm giảm hiệu quả cải thiện tính chất đất trong vụ tiếp theo. Hiện tượng này biểu hiện rõ hơn trên đất xám so với đất phèn, nơi than sinh học còn tham gia mạnh vào quá trình trung hòa axit và cải thiện môi trường hóa học đất. Điều này cho thấy hiệu quả của than sinh học phụ thuộc vào loại đất, loại nguyên liệu và thời gian sử dụng, đồng thời gợi ý rằng cần có biện pháp bổ sung hoặc tái sử dụng sau mỗi vụ để duy trì hiệu quả lâu dài.

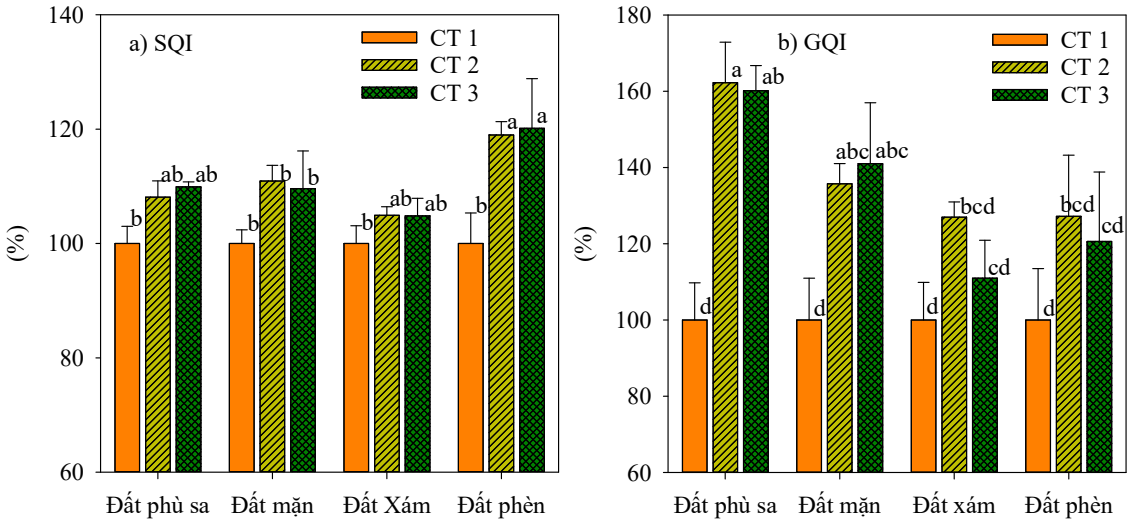
3.4 Hiệu quả môi trường và kinh tế của các mô hình thí nghiệm

3.4.1 Hiệu quả môi trường ở các mô hình thí nghiệm

Ghi chú: Các hình được trình bày trong phần này với các ký hiệu có ý nghĩa: Công thức 1 làm đối chứng đạt 100% so với các công thức khác. CT1: không sử dụng

than sinh học, CT2: sử dụng than từ vỏ trấu và CT3 sử dụng than sinh học từ thân cành nhãn. Trong cùng 1 đồ thị, các cột số liệu có gắn cùng ký tự khác biệt không có ý nghĩa thống kê ở xác suất p ≤ 0,05.

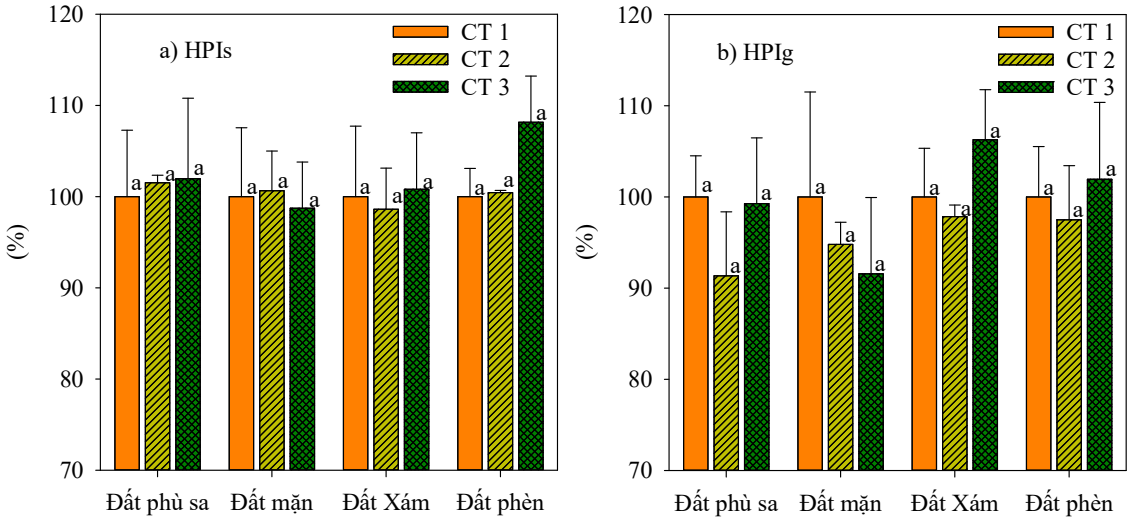
3.4.1.1 Mô hình thí nghiệm quy mô nhà lưới



Hình 3.21 Hiệu quả chất lượng đất (SQI, a) và chất lượng hạt (GQI, b) của các công thức nghiên cứu trên bốn loại đất thí nghiệm trong nhà lưới

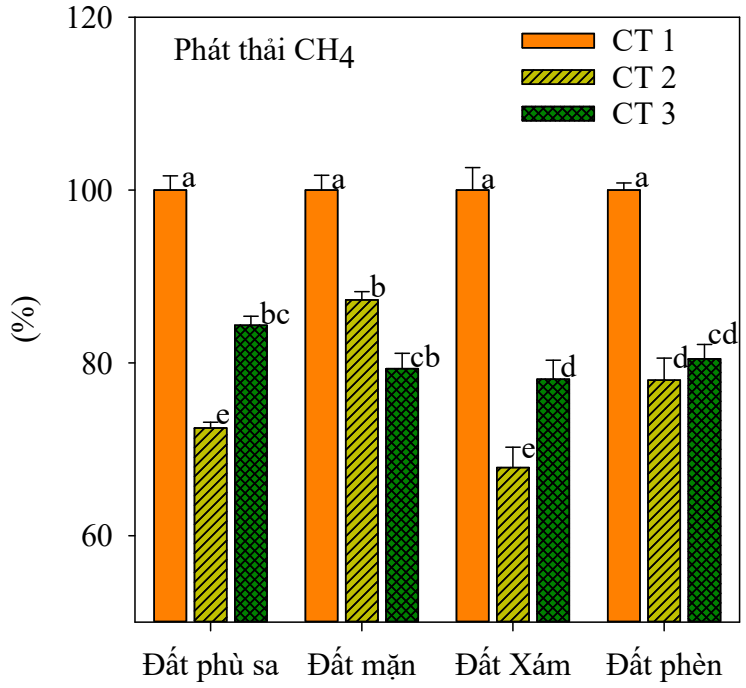
Hình 3.21 cho thấy cả CT2 và CT3 đều cải thiện SQI và GQI so với đối chứng (100%), với mức độ khác nhau tùy theo loại đất và loại than sinh học (sự khác biệt có ý nghĩa thống kê). Trên đất phù sa, SQI tăng nhẹ (~109%) ở cả hai công thức xử lý, trong khi GQI tăng mạnh, đặc biệt ở CT2 (~162%). Điều này cho thấy than trấu cải thiện rõ rệt chất lượng hạt nhờ tăng khả năng cung cấp dinh dưỡng. Đối với đất mặn, SQI đạt ~110% ở cả CT2 và CT3. GQI của CT3 (141%) cao hơn CT2 (~136%), cho thấy hiệu quả của than nhãn trong cải thiện chất lượng đất và chất lượng hạt lúa. Trên đất xám, SQI và GQI chỉ tăng nhẹ trên đất có sử dụng than sinh học. GQI của CT2 cao hơn CT3, nhưng nhìn chung phản ứng cải thiện ở đất này khá hạn chế do đặc tính nghèo dinh dưỡng. Với đất phèn, SQI tăng mạnh (~120%) ở cả hai công thức. GQI đạt cao nhất ở CT2, cho thấy than trấu hiệu quả hơn trong giảm độ chua và cải thiện hấp thu dinh dưỡng và hạt lúa. Tóm lại, cả hai loại than

sinh học đều có hiệu quả rõ rệt, trong đó than trấu (CT2) thường cho kết quả cao hơn về GQI, đặc biệt ở đất phù sa, đất xám và đất phèn.



Hình 3.22 Hiệu quả về chỉ số nhiễm kim loại trong đất (HPIs, a) và trong hạt (HPIg, b) của các công thức nghiên cứu trên bốn loại đất thí nghiệm trong nhà lưới

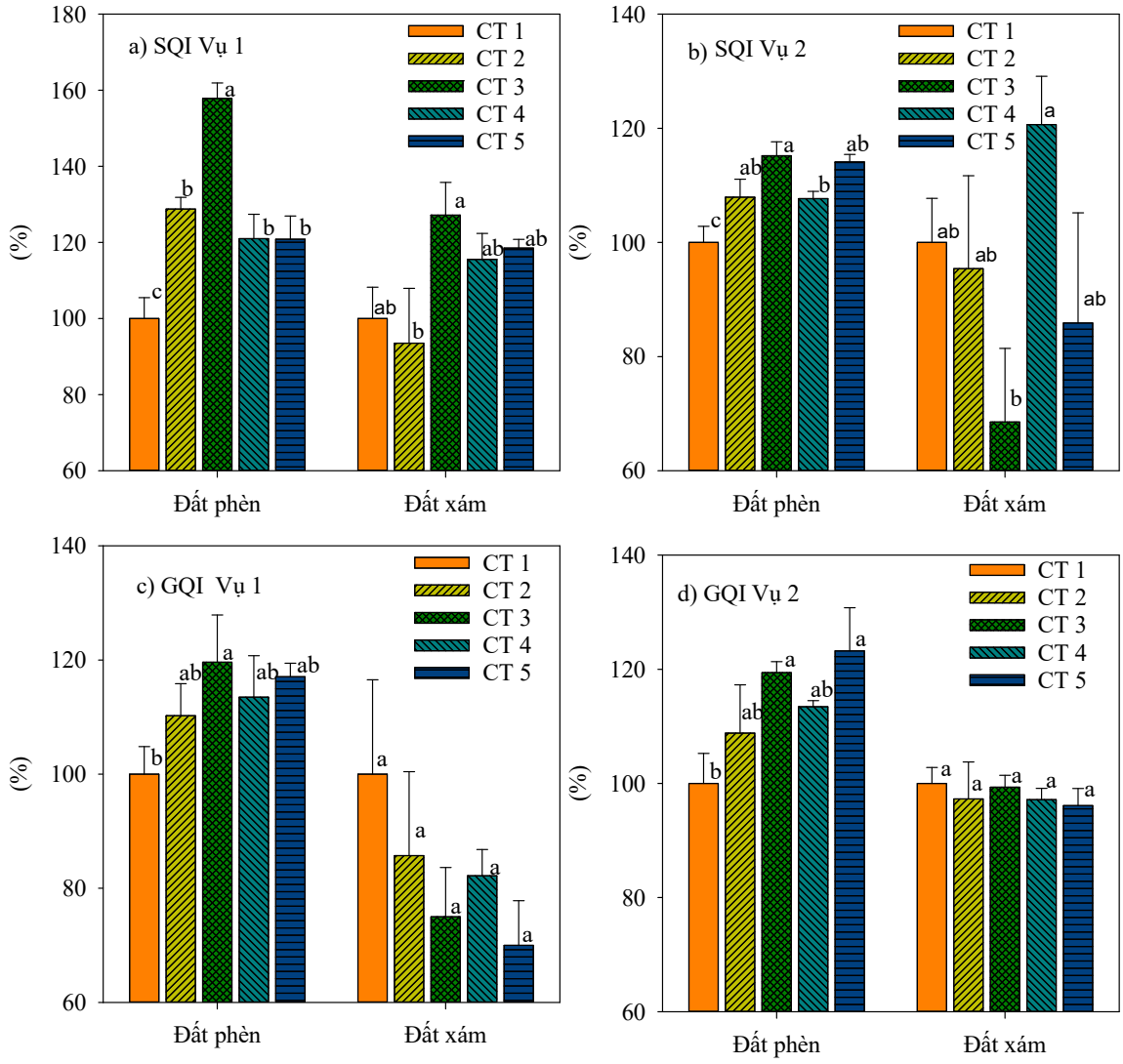
Các kết quả nghiên cứu cho thấy sự khác biệt về phần trăm HPIs và HPIg giữa các công thức thí nghiệm là không có ý nghĩa thống kê ở mức xác suất $p \leq 0,05$ (Hình 3.22). Điều này cho thấy, trong điều kiện thí nghiệm, việc bổ sung than sinh học (từ trấu hoặc thân cành nhãn) không làm thay đổi mức độ ô nhiễm kim loại trong cả bốn loại đất và nhiễm kim loại trong hạt lúa so với công thức đối chứng.



Hình 3.23 Phần trăm giảm phát thải CH_4 của các công thức nghiên cứu trên bốn loại đất thí nghiệm trong nhà lưới

Kết quả nghiên cứu cho thấy việc bổ sung than sinh học, đặc biệt là than từ vỏ trấu (CT2), có hiệu quả rõ rệt trong việc làm giảm phát thải CH_4 so với công thức đối chứng không sử dụng than sinh học (CT1, chuẩn hóa ở mức 100%) trên cả bốn loại đất thí nghiệm (Hình 3.23). Kết quả này ủng hộ giả thuyết khoa học số 3. Trên đất phù sa và đất xám, CT2 làm giảm phát thải CH_4 mạnh nhất, với giá trị lần lượt đạt khoảng 72% và 67%, và có sự khác biệt có ý nghĩa thống kê rõ rệt so với CT1 ($p \leq 0,05$). Trên đất mặn và đất phèn, cả hai công thức sử dụng than sinh học đều làm giảm phát thải CH_4, tuy nhiên mức giảm của CT2 vẫn mạnh hơn và có sự khác biệt có ý nghĩa thống kê so với đối chứng. So sánh giữa hai loại than sinh học cho thấy than từ vỏ trấu (CT2) có hiệu quả ổn định và vượt trội hơn trong việc ức chế phát thải CH_4 so với than nhãn (CT3), mặc dù cả hai đều cho thấy xu hướng tích cực. Kết quả này gợi mở tiềm năng sử dụng than sinh học, đặc biệt là từ phụ phẩm nông nghiệp như vỏ trấu, như một giải pháp khả thi nhằm giảm phát thải khí nhà kính trong hệ thống canh tác lúa nước.

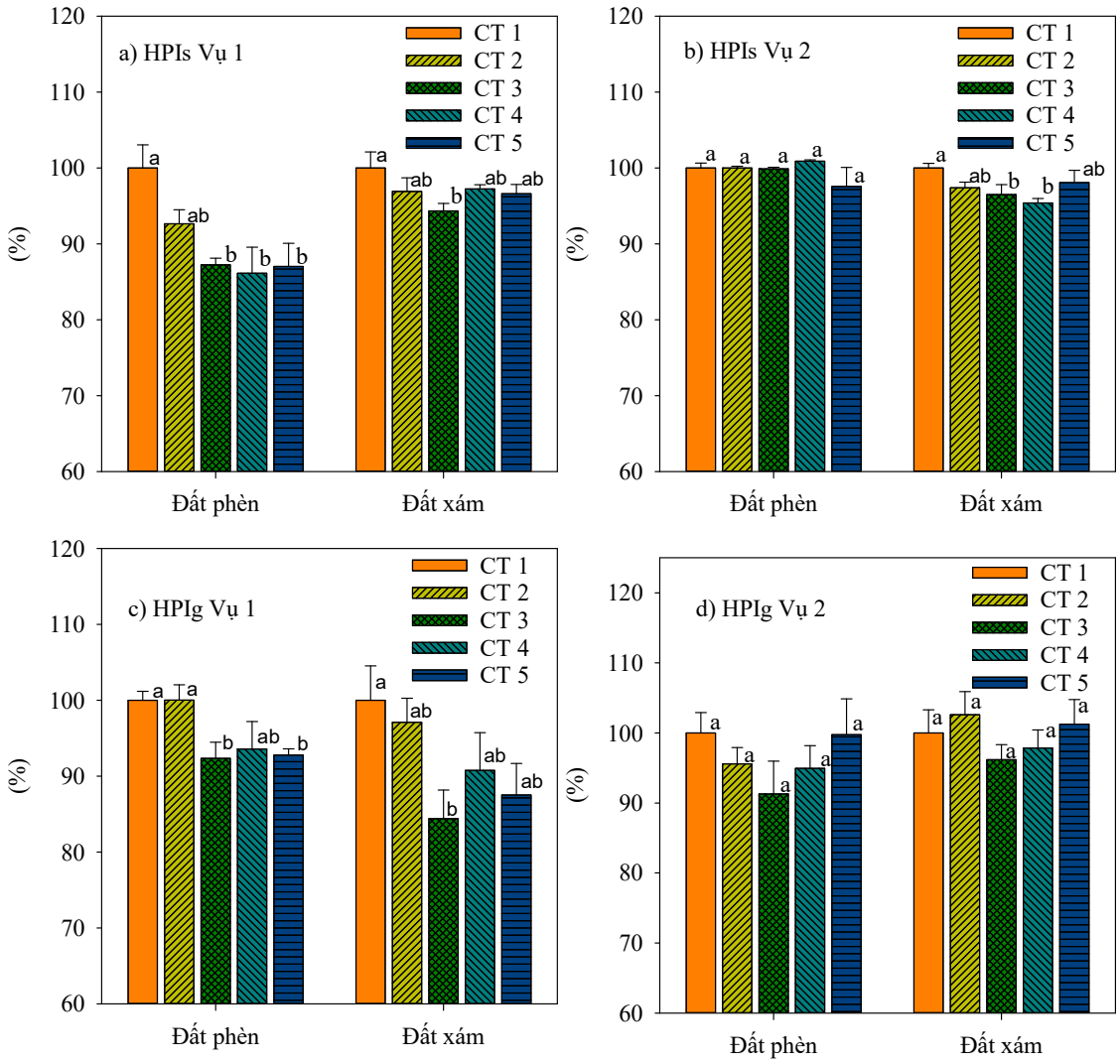
3.4.1.2 Mô hình thí nghiệm quy mô thực địa



Hình 3.24 Hiệu quả chất lượng môi trường đất (SQI) và chất lượng hạt (GQI) của các công thức nghiên cứu trên hai loại đất thí nghiệm trong thực địa

CT1 là công thức đối chứng không bón than sinh học (chuẩn hóa 100%), còn các công thức CT2 đến CT5 ứng với các mức bón và nguồn than sinh học khác nhau. Trong vụ 1 (Hình 3.24a và 3.24c), chất lượng môi trường đất (SQI) có sự cải thiện rõ rệt ở cả hai loại đất khi áp dụng than sinh học. Trên đất phèn, CT3 (than trấu, 20 tấn/ha) cho kết quả cao nhất với giá trị SQI vượt 158% và khác biệt thống kê rõ rệt so với đối chứng ($p \leq 0,05$). Trên đất xám, CT3 (than trấu, 20 tấn/ha) đạt giá trị SQI cao nhất, kế đến là CT5 và CT4, trong khi CT2 không khác biệt có ý nghĩa thống kê

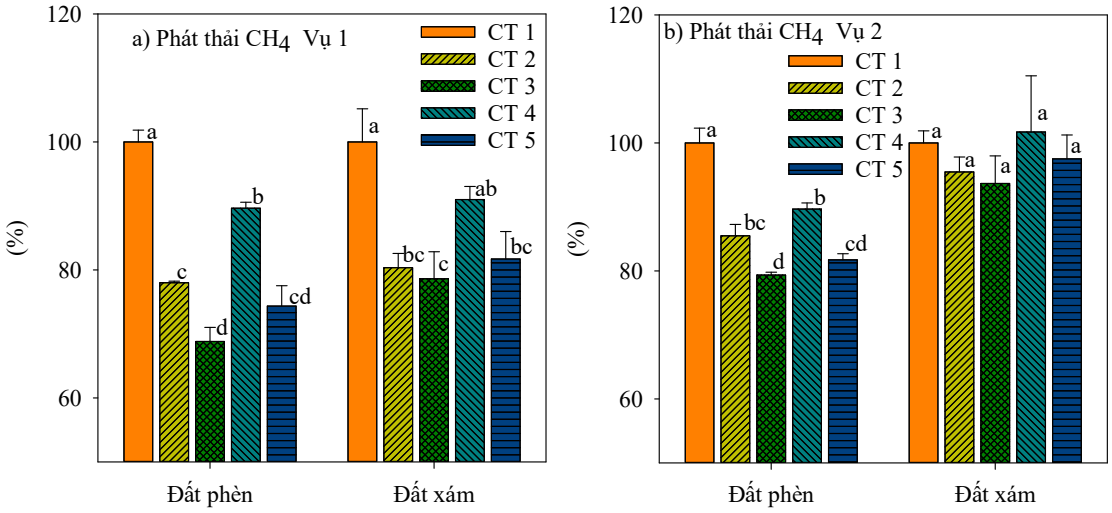
so với CT1. Về chất lượng hạt (GQI) trong vụ 1 (Hình 3.25c), trên đất phèn, các công thức có bón than đều cho kết quả GQI cao hơn CT1, trong đó CT3 và CT5 có xu hướng cải thiện tốt nhất. Tuy nhiên, trên đất xám, các công thức có sử dụng than sinh cho chỉ số chất lượng hạt không khác biệt có ý nghĩa thống kê so với công thức đối chứng. Trong vụ 2 (Hình 3.24b và 3.24d), giá trị SQI và GQI vẫn duy trì xu hướng tăng so với đối chứng ở trên loại đất phèn. Trên loại đất này, CT3 và CT5 cho kết quả về phần trăm chỉ số SQI và GQI cao hơn CT1 và có ý nghĩa thống kê. Trên đất xám, CT3 có SQI thấp nhất, khác biệt rõ rệt so với CT4. Về GQI trong vụ 2 (Hình 3.25d), các công thức sử dụng than sinh học được ghi nhận không có sự khác biệt có ý nghĩa thống kê so với CT1 đối chứng. Nhìn chung, than sinh học từ vỏ trấu (đặc biệt ở liều 20 tấn/ha) cho thấy hiệu quả cải thiện rõ rệt đối với chất lượng môi trường đất và hạt, nhất là trên đất phèn. Than từ thân cành nhãn cũng có tác dụng tích cực, tuy nhiên tác động còn phụ thuộc vào liều lượng và loại đất.



Hình 3.25 Hiệu quả cải thiện ô nhiễm kim loại nặng trong môi trường đất (HPIs) và nhiễm kim loại nặng trong hạt (HPIg) của các công thức nghiên cứu trên hai loại đất thí nghiệm trong thực địa

Ở vụ 1 (Hình 3.25a và 3.25c), giá trị phần trăm HPIs và HPIg của các công thức có sử dụng than sinh học trên đất phèn đều có xu hướng giảm đặc biệt rõ ở CT3, CT4 và CT5, so với công thức đối chứng. Giá trị HPIs giảm từ 100% (CT1) xuống còn khoảng 87% ở các công thức có sử dụng than, trong đó CT3, CT4 và CT5 cho giá trị thấp nhất và khác biệt có ý nghĩa thống kê so với CT1 ($p \leq 0,05$). Trên đất xám, mặc dù mức giảm thấp hơn, nhưng CT3 và CT5 vẫn cho thấy xu hướng giảm HPIs rõ rệt. Về HPIg - vụ 1 (Hình 3.26c), kết quả cho thấy trên đất phèn, các công thức CT3, CT4 và CT5 có mức HPIg thấp hơn đối chứng, với CT3 và CT4 thể hiện khác

biệt rõ rệt về mặt thống kê. Trên đất xám, CT3 và CT5 tiếp tục cho thấy hiệu quả làm giảm HPIg so với CT1, đặc biệt là CT3 với mức giảm mạnh nhất và khác biệt có ý nghĩa thống kê ($p \leq 0,05$). Tuy nhiên, trong vụ 2 (Hình 3.25b và 3.25d), xu hướng giảm HPIs và HPIg không còn rõ rệt. Trên cả hai loại đất, sự khác biệt giữa các công thức là không đáng kể và phần lớn không đạt mức ý nghĩa thống kê (các cột mang ký tự giống nhau), ngoại trừ HPIs ở vụ 2 trên đất xám. Điều này cho thấy hiệu lực của than sinh học trong việc làm giảm khả năng nhiễm kim loại nặng có thể bị suy giảm theo thời gian hoặc phụ thuộc vào điều kiện môi trường mùa vụ.



Hình 3.26 Hiệu quả giảm phát thải CH_4 của các công thức nghiên cứu trên hai loại đất thí nghiệm trong thực địa

Hình 3.26 trình bày hiệu quả giảm phát thải CH_4 của năm công thức thí nghiệm trên đất phèn và đất xám qua hai vụ thí nghiệm ngoài đồng ruộng. Kết quả cho thấy, ở vụ 1 (Hình 3.26a), cả trên đất phèn và đất xám, hầu hết các công thức sử dụng than sinh học đều làm giảm đáng kể phát thải CH_4 so với đối chứng. Trên đất phèn, CT3 và CT5 cho mức phát thải thấp nhất (69% và 74%), và sự khác biệt với CT1 có ý nghĩa thống kê ở mức $p \leq 0,05$. Trên đất xám, các công thức có sử dụng than sinh học đều cho thấy mức phát thải CH_4 thấp hơn đối chứng, trong đó CT3 và CT5 tiếp tục là hai công thức hiệu quả nhất. Ở vụ 2 (Hình 3.26b), xu hướng giảm phát thải CH_4 vẫn được duy trì trên đất phèn, với CT3 và CT5 tiếp tục cho kết quả thấp nhất và khác biệt có ý nghĩa so với đối chứng. Trên đất xám, tuy các công thức CT2-CT5

đều cho thấy xu hướng giảm nhẹ phát thải so với CT1, song sự khác biệt không đạt mức ý nghĩa thống kê, cho thấy hiệu quả than sinh học trong việc làm giảm phát thải khí CH_4 giảm sau 1 vụ thí nghiệm trên đất xám.

3.4.2. Hiệu quả kinh tế

3.4.2.1 Đất phèn

Kết quả của mô hình thí nghiệm này (Bảng 3.18) gồm năm công thức được sử dụng trên đất phèn, trong đó CT1 là đối chứng không sử dụng than sinh học, CT2 và CT3 bổ sung than trấu với liều lượng 10 và 20 tấn/ha, CT4 và CT5 bổ sung than nhãn với các liều tương ứng. Hai kịch bản kinh tế được xét: kịch bản 1 chỉ tính thu nhập từ bán hạt và rơm; kịch bản 2 bổ sung giá trị tín chỉ carbon trong đất dựa trên lượng carbon tích lũy ở trong đất và lượng giảm CH_4 phát thải do than sinh học so với đối chứng.

Bảng 3.18 Hiệu quả kinh tế của mô hình thí nghiệm sản xuất lúa trên đất phèn bổ sung than sinh học quy mô thực địa thông qua hai kịch bản khác nhau. TC = tín chỉ.

Thời vụ	**Vụ 1**					**Vụ 2**				
Các công thức thí nghiệm										
Công thức	CT1	CT2	CT3	CT4	CT5	CT1	CT2	CT3	CT4	CT5
Sản phẩm thu (triệu đồng/ha)										
Hạt	50,413	57,341	71,845	57,953	61,904	18,011	22,899	27,259	26,011	25,142
Rơm	5,871	6,883	7,920	6,961	7,688	2,652	2,854	3,496	3,207	3,315
TC Carbon trong đất	-	-	-	-	-	-	2,295	6,215	5,890	7,836
TC Carbon quy đổi theo CH_4	-	109,295	154,968	51,471	127,494	-	91,880	130,644	65,407	115,650
Tổng thu	56.283	173.519	234.732	116.385	197.086	20.663	119.927	167.614	100.514	151.944
Các mức chi (triệu đồng/ha)										
Than sinh học	-	62,500	125,000	11,250	22,500	-	-	-	-	-
Vật chất và lao động	29,041	29,041	29,041	29,041	29,041	31,722	31,722	31,722	31,722	31,722
Tổng chi	29,041	91,541	154,041	40,291	51,541	31,722	31,722	31,722	31,722	31,722
Hiệu quả kinh tế (triệu đồng/ha)										
Kịch bản 1	27,242	- 27,317	- 74,277	24,623	18,051	- 11,058	- 5,969	- 0,967	- 2,504	- 3,264
Kịch bản 2	27,242	81,977	80,691	76,094	145,545	- 11,058	88,205	135,892	68,793	120,222

Ở vụ 1, CT2 và CT3 ghi nhận lợi nhuận âm trong kịch bản 1 (lần lượt là -27,3 và -74,3 triệu/ha) chủ yếu do chi phí đầu tư than sinh học vượt quá giá trị thu hạt và rơm. Tương tự, nhiều nghiên cứu chỉ ra rằng chi phí ban đầu của than sinh học có thể cao hơn lợi ích trực tiếp về năng suất [170]. Tuy nhiên, khi tính thêm giá trị tín chỉ carbon (kịch bản 2), cả CT2 và CT3 đều chuyển thành lợi nhuận dương, lần lượt 81,98 và 80,69 triệu/ha, cho thấy vai trò quan trọng của cơ chế tín chỉ carbon và thị trường carbon. Ngược lại, ở CT4 và CT5 đều tạo ra lợi nhuận dương ngay cả khi chỉ xét bán nông sản (kịch bản 1): CT4 đạt 24,62 triệu đồng/ha, CT5 đạt 18,05 triệu đồng/ha, nhờ than nhãn có giá thành thấp hơn than trấu nhiều. Khi tính thêm giá trị tín chỉ carbon (kịch bản 2), CT4 tăng từ 24,62 lên 76,09 triệu/ha và CT5 tăng từ 18,05 lên 145,55 triệu/ha. Vụ 2 tiếp tục cho kết quả tương tự, chỉ với bán nông sản CT2 và CT3 đều thua lỗ, nhưng khi cộng tín chỉ carbon, lợi nhuận tăng 88 từ lên 136 triệu/ha. CT4 ở kịch bản 1 đạt 68,79 triệu, kịch bản 2 cũng không thay đổi về giá trị tín chỉ (do cùng lượng CH_4 giảm) là 68,79 triệu. CT5 ở kịch bản 1 đạt 120,22 triệu, kịch bản 2 giữ nguyên 120,22 triệu do đã tính tín chỉ trong tổng thu. Điều này khẳng định vai trò của cơ chế của than sinh học trong việc bù đắp chi phí ban đầu và thúc đẩy đầu tư vào biện pháp giảm phát thải. Như vậy, CT4 và CT5 không chỉ bền vững về mặt kinh tế trong từng vụ mà còn dễ dàng thăng hạng khi cộng thêm giá trị tín chỉ carbon, đặc biệt CT5 thể hiện lợi thế vượt trội với lợi nhuận vụ 1 và vụ 2 lần lượt là 145,55 và 120,22 triệu/ha.

3.4.2.2 Đất xám

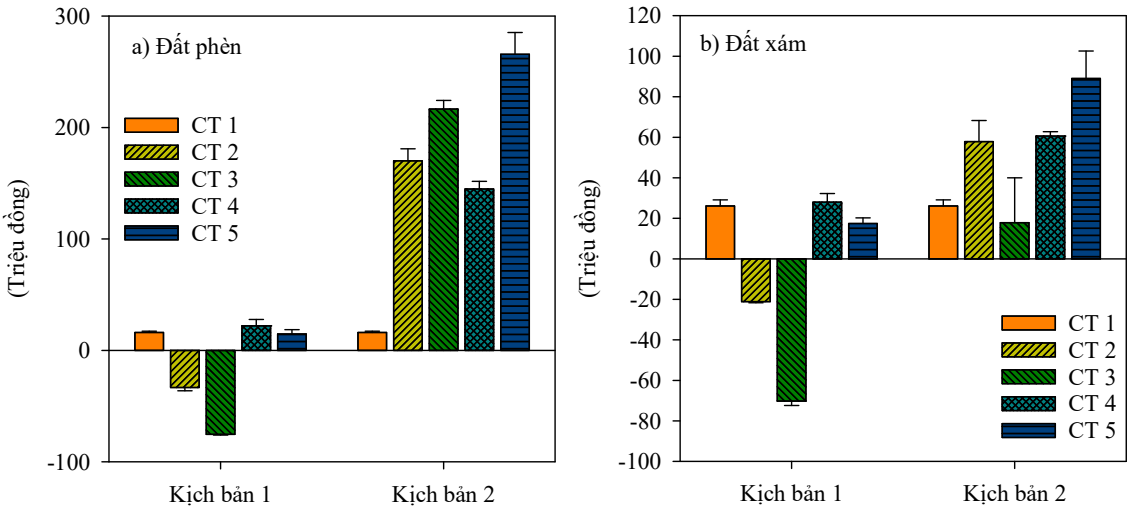
Tương tự như mô hình thí nghiệm trên đất phèn, hai kịch bản kinh tế tiếp tục được xét là kịch bản 1 chỉ tính thu nhập từ bán hạt và rơm; kịch bản 2 bổ sung giá trị tín chỉ carbon trong đất dựa trên lượng carbon tích lũy ở trong đất và lượng giảm CH_4 phát thải do than sinh học so với đối chứng (Bảng 3.19).

Bảng 3.19 Hiệu quả kinh tế của mô hình thí nghiệm sản xuất lúa trên đất xám bổ sung than sinh học quy mô thực địa thông qua hai kịch bản khác nhau. TC = tín chỉ.

Thời vụ	**Vụ 1**					**Vụ 2**				
Các công thức thí nghiệm										
Công thức	CT1	CT2	CT3	CT4	CT5	CT1	CT2	CT3	CT4	CT5
Sản phẩm thu (triệu đồng/ha)										
Hạt	45,359	53,450	59,469	49,980	47,166	33,578	38,401	45,713	40,611	43,998
Rơm	5,860	7,762	8,106	7,235	6,840	4,584	5,023	4,763	4,675	5,220
TC Carbon trong đất	-	-	-	-	-	-	1,660	1,808	2,533	1,963
TC Carbon quy đổi theo CH_4	-	70,927	77,253	32,511	66,071	-	6,444	9,008	- 2,455	3,514
Tổng thu	51,219	132,139	144,827	89,727	120,077	38,162	51,528	61,291	45,363	54,696
Các mức chi (triệu đồng/ha)										
Than sinh học	-	62,500	125,000	11,250	22,500	-	-	-	-	-
Vật chất và lao động	25,973	25,973	25,973	25,973	25,973	37,282	37,282	37,282	37,282	37,282
Tổng chi	25,973	88,473	150,973	37,223	48,473	37,282	37,282	37,282	37,282	37,282
Hiệu quả kinh tế (triệu đồng/ha)										
Kịch bản 1	25,246	- 27,262	- 83,399	19,992	5,532	0,880	6,141	13,193	8,003	11,937
Kịch bản 2	25,246	43,666	- 6,146	52,504	71,603	0,880	14,245	24,009	8,081	17,414

Vụ 1 cho thấy CT1 đạt lợi nhuận dương trong cả hai kịch bản (25,25 triệu/ha), vì không có chi phí đầu tư than sinh học. CT4 cũng có hiệu quả tốt với lợi nhuận 19,99 triệu/ha (kịch bản 1) và tăng mạnh lên 52,5 triệu/ha (kịch bản 2). CT5 vượt trội hơn khi đạt lợi nhuận 71,6 triệu/ha trong kịch bản 2, cho thấy hiệu quả của việc sử dụng than nhãn ở liều cao trong cải thiện hiệu quả sản xuất kết hợp với giảm phát thải. Ngược lại, CT2 và CT3 trong vụ 1 mang lại hiệu quả âm ở kịch bản 1 (-27,26 và - 83,40 triệu/ha), phản ánh rõ rệt chi phí đầu tư ban đầu cao mà chưa thu lại lợi ích ngay trong vụ đầu. Tuy nhiên, khi tính tín chỉ carbon (kịch bản 2), CT2 chuyển sang dương (43,67 triệu/ha), còn CT3 vẫn âm (-6,15 triệu/ha), cho thấy cần có thời gian dài hơn hoặc tích lũy thêm lợi ích môi trường để bù chi phí đầu tư ban đầu. Vụ 2 tiếp tục củng cố xu hướng trên, CT3 và CT5 đạt lợi nhuận cao nhất trong kịch bản 2 (24,01 và 17,41 triệu/ha). CT4 và CT2 đều cho lợi nhuận dương ổn định trong cả hai kịch bản, với lợi nhuận tăng thêm từ tín chỉ carbon. Điểm đáng chú ý là mức

giảm phát thải quy đổi thành tín chỉ carbon trong vụ 2 thấp hơn vụ 1, dẫn đến hiệu quả kinh tế từ tín chỉ carbon thấp hơn, điều này có thể liên quan đến điều kiện thủy văn, thời tiết, hoặc thời gian tương tác giữa than sinh học và đất chưa đủ dài để phát huy tối đa tiềm năng tích lũy carbon trong đất [171].



Hình 3.27 Hiệu quả kinh tế của tổng hai vụ sản xuất theo hai kịch bản

Hình 3.27a cho thấy tổng hiệu quả hai vụ cho kịch bản 1 chỉ duy trì lợi nhuận dương ở CT1, CT4 và CT5, trong khi CT2 và CT3 vẫn thua lỗ, khẳng định tác động chưa đủ bù đắp chi phí trong ngắn hạn. Ngược lại, kịch bản 2 cho thấy CT5 vượt trội nhất với 265,77 triệu/ha, kế tiếp CT3 - 216,58 triệu/ha. Điều này phù hợp với khuyến nghị của Lehmann and Joseph [171] về việc hiệu quả than sinh học được nhân lên khi tính thêm giá trị từ giảm phát thải khí nhà kính và duy trì bền vững trên nhiều vụ canh tác. Đối với đất xám (Hình 3.27b) cho thấy tổng hiệu quả của hai vụ cho kịch bản 1 chỉ CT1, CT4 và CT5 là có lãi, với CT4 là hiệu quả nhất (~28 triệu/ha). CT2 và CT3 lỗ nặng, cho thấy than trấu không hiệu quả nếu không bán được tín chỉ carbon. Ở kịch bản 2, tất cả công thức có than sinh học đều cho lợi nhuận vượt trội so với đối chứng, đặc biệt CT5 (89 triệu/ha) và CT4 (60,6 triệu/ha). So sánh CT2 và CT3 cũng cho thấy mức bù đắp từ tín chỉ carbon ở mức 10 tấn/ha tốt hơn so với mức 20 tấn/ha, do CT3 có chi phí đầu tư quá cao nhưng mức giảm phát thải không tương ứng. Như vậy, giả thuyết khoa học số 6 “Hiệu quả kinh tế do than sinh học

mang lại trong sản xuất lúa nước cao hơn trên đất phèn so với trên đất xám" được chứng minh thông qua kết quả nghiên cứu này.

3.4.3 Một số thảo luận

Các kết quả nghiên cứu cho thấy, than sinh học từ vỏ trấu và thân cành nhãn không chỉ nâng cao rõ rệt chỉ số chất lượng đất (SQI) và chỉ số chất lượng hạt (GQI) nhờ cấu trúc xốp, diện tích bề mặt lớn và hàm lượng silic cao, mà còn làm thay đổi đáng kể các tính chất hóa học của đất trên những nền đất có pH thấp như xám và phèn. Cơ chế trung hòa axit và điều chỉnh pH thông qua các khoáng bazơ (Ca^{2+}, Mg^{2+}, K^{+}) trên than sinh học đã được ghi nhận tương tự trong các nghiên cứu của Singh, et al. [172], cho thấy pH đất tăng 0,5-1,2 đơn vị so với đối chứng, giúp giảm độc tính Al và Fe, đồng thời cải thiện cấu trúc đất, tăng độ đa dạng và mật độ vi sinh vật cố định đạm cũng như phân giải hữu cơ. Bên cạnh đó, các chỉ số ô nhiễm kim loại nặng trong đất (HPIs) và chỉ số nhiễm kim loại nặng trong hạt (HPIg) giảm đáng kể khi ứng dụng than vỏ trấu và than nhãn, theo cơ chế kết tủa và hấp phụ mạnh mẽ các ion Cd^{2+}, Zn^{2+}, Cu^{2+} trên các nhóm chức carboxyl và hydroxyl của than sinh học. Kết quả này tương đồng với báo cáo của Wang, et al. [173], nơi than sinh học giảm 40-60 % hàm lượng Cd sinh học trong đất muối. Tuy nhiên, hiệu quả giữ kim loại có xu hướng giảm dần ở vụ tiếp theo, gợi ý rằng sau khoảng 3-4 tháng, khả năng trao đổi cation của than bắt đầu bão hòa, đòi hỏi chiến lược bón định kỳ hoặc kết hợp với các biện pháp ổn định kim loại khác để duy trì hiệu quả lâu dài. Song song đó, than sinh học cho thấy hiệu suất ức chế phát thải CH_4 ổn định cả trong điều kiện nhà lưới và thực địa. Cơ chế giảm phát thải bao gồm: (i) gia tăng độ thoáng khí, thu hẹp vùng yếm khí cho methanogens; (ii) nâng pH đất, ức chế vi khuẩn sinh methane ưa môi trường axit; và (iii) hấp phụ các phân tử hữu cơ dễ phân hủy, nguồn cơ chất cho quá trình methanogenesis. Thêm vào đó, bề mặt xốp và tính trung tính của than sinh học thúc đẩy mật độ và hoạt tính của vi khuẩn methanotrophs, như đã được chứng minh bởi Gao, et al. [174], với mức tăng 30-50 % hoạt động oxy hóa CH_4 so với đối chứng. Những phát hiện này phù hợp với tổng quan của Chen, et al. [175] về vai trò của phụ phẩm giàu silica và lignin trong giảm phát thải khí nhà

kính, từ đó khẳng định tiềm năng ứng dụng than sinh học trong canh tác lúa phát thải thấp.

Hai kịch bản kinh tế được lựa chọn và xem xét tính toán trong nghiên cứu này gồm: kịch bản 1 chỉ tính thu nhập từ bán hạt và rơm; kịch bản 2 bổ sung giá trị tín chỉ carbon trong đất và carbon quy đổi dựa trên lượng CH_4 giảm phát thải. Đối với đất phèn, khi so sánh giữa than trấu (CT3) và than nhãn (CT5) cho thấy cả hai đều hiệu quả, nhưng CT5 có lợi nhuận cao hơn (~49 triệu/ha gộp hai vụ) nhờ hiệu suất giảm CH_4 tốt hơn. Tuy nhiên, tình hình sẵn có nguyên liệu và chi phí vận chuyển cần được khảo sát cụ thể từng vùng. Kết quả nghiên cứu cũng đã chứng minh khi áp dụng than sinh học ở liều 20 tấn/ha kết hợp cơ chế tín chỉ carbon đã tối ưu hóa lợi ích kinh tế - môi trường. Ngoài ra, cần đánh giá chu kỳ bền vững của than trên nhiều vụ (≥3 vụ) để xác định liều lượng duy trì và phương thức bổ sung phù hợp [171]. Mặt khác, việc khảo sát chi phí thu mua, vận chuyển và xử lý nguyên liệu than sinh học tại địa phương đang canh tác lúa trên đất phèn cũng cần lưu ý để xây dựng mô hình chuỗi giá trị khả thi đồng thời xây dựng khung chính sách tín chỉ carbon minh bạch, đơn giản để nông dân dễ tiếp cận và giảm bớt thủ tục hành chính. Bên cạnh đó, kết quả của nghiên cứu này đã khẳng định vai trò của than sinh học trong việc nâng cao hiệu quả kinh tế nông nghiệp theo hướng canh tác bền vững trên đất xám. Than nhãn, đặc biệt ở mức 20 tấn/ha, không chỉ cải thiện năng suất mà còn tạo ra hiệu quả môi trường thông qua việc giảm phát thải CH_4, góp phần tạo ra nguồn tín chỉ carbon có thể thương mại hóa [176]. Tuy nhiên, giá thành đầu tư ban đầu cao là rào cản lớn, đặc biệt đối với hộ nông dân quy mô nhỏ. Đối với than trấu, nếu không có thị trường tín chỉ carbon ổn định hoặc cơ chế hỗ trợ, rất khó để đảm bảo lợi nhuận, nhất là ở liều lượng cao.

3.4.4 Tiểu kết Nội dung 4

***** *Hiệu quả môi trường*

Cải thiện chất lượng đất (SQI) và chất lượng hạt lúa (GQI): Cả hai loại than sinh học - than trấu (CT2, CT3) và than nhãn (CT4, CT5) đều cho thấy hiệu quả cải thiện đáng kể SQI và GQI so với đối chứng không sử dụng than (CT1). Trong điều kiện thí nghiệm nhà lưới, than trấu (CT2) thường cho kết quả vượt trội hơn về chất lượng hạt, đặc biệt trên các loại đất phù sa, đất xám và đất phèn. Trong điều kiện thực địa, CT3 (than trấu 20 tấn/ha) cải thiện chất lượng đất rõ rệt nhất trên đất phèn, phản ánh hiệu quả cao khi tăng liều lượng than sinh học.

Giảm phát thải khí metan (CH_4): Tác động tích cực và nổi bật nhất là khả năng giảm phát thải CH_4 trong quá trình canh tác lúa nước. Than sinh học, đặc biệt là trấu (CT2, CT3), có hiệu quả rõ rệt trong việc làm giảm phát thải khí nhà kính trên cả ba loại đất khảo nghiệm. Hiệu quả giảm phát thải được duy trì qua cả hai vụ lúa, nổi bật nhất trên đất phèn, cho thấy tính ổn định về mặt môi trường của giải pháp này.

Ảnh hưởng đến hàm lượng kim loại nặng: Trong điều kiện nhà lưới, việc bổ sung than sinh học không làm thay đổi đáng kể mức độ ô nhiễm kim loại nặng trong đất và hạt. Tuy nhiên, ở quy mô thực địa, các công thức có sử dụng than sinh học, đặc biệt là CT3, CT4 và CT5 cho thấy xu hướng làm giảm đáng kể hàm lượng các kim loại nặng trong đất ở vụ đầu tiên. Hiệu quả này có xu hướng giảm ở vụ thứ hai, phản ánh khả năng tác động của than sinh học có thể suy giảm theo thời gian, đặc biệt trên đất xám.

***** *Hiệu quả kinh tế*

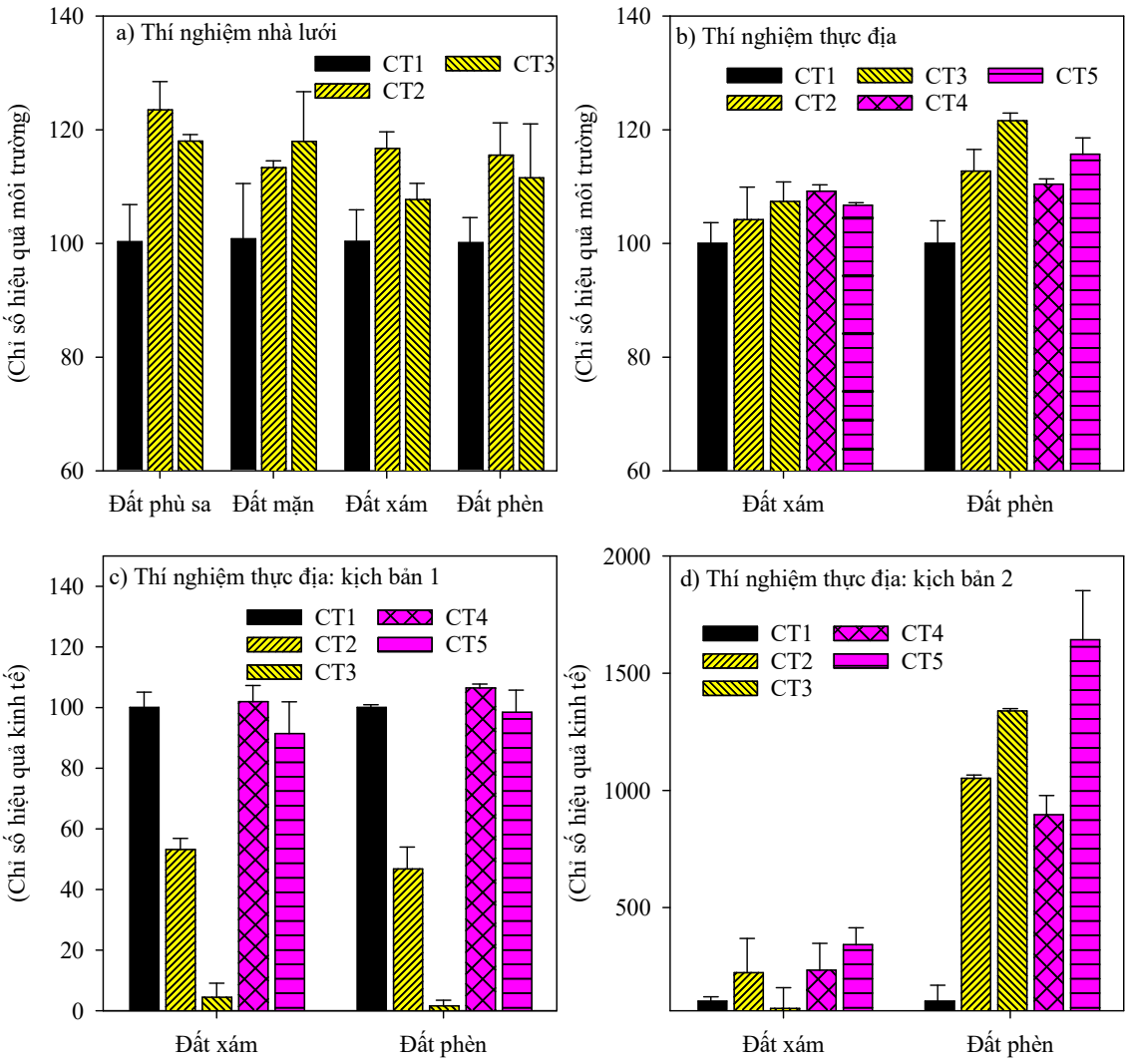
Kịch bản không có tín chỉ carbon (chỉ bán nông sản): Do chi phí đầu tư ban đầu cao, các công thức sử dụng than trấu (CT2 và CT3) bị lỗ trong ngắn hạn. Trong khi đó, các công thức sử dụng than nhãn (CT4 và CT5) với chi phí sản xuất thấp hơn đã cho lợi nhuận dương ngay từ vụ đầu tiên. Điều này cho thấy, nếu không có cơ chế hỗ trợ từ tín chỉ carbon, việc sử dụng than sinh học từ thân cành nhãn là khả thi hơn về mặt kinh tế.

Kịch bản có tín chỉ carbon (bán nông sản kết hợp tín chỉ carbon): Khi tính đến giá trị từ việc giảm phát thải CH_4 và tích lũy carbon trong đất, tất cả các công thức sử dụng than sinh học đều có lợi nhuận cao và vượt xa công thức đối chứng. Trong kịch bản này, CT5 (than nhãn, 20 tấn/ha) thể hiện lợi nhuận vượt trội nhất trên cả hai loại đất. Kết quả này khẳng định mô hình sử dụng than sinh học, đặc biệt ở liều lượng cao, vừa đạt hiệu quả về môi trường, vừa tối ưu về mặt kinh tế.

So sánh hiệu quả kinh tế giữa hai loại đất: Tổng lợi nhuận trên đất phèn (cao nhất đạt khoảng 266 triệu đồng/ha ở CT5) cao hơn nhiều so với đất xám (khoảng 89 triệu đồng/ha ở CT5). Sự khác biệt này củng cố giả thuyết khoa học số 6 của nghiên cứu về việc hiệu quả của than sinh học được duy trì tốt hơn trên đất phèn không chỉ về cải thiện đất, giảm phát thải mà còn cả về lợi ích kinh tế tổng hợp.

3.5 Thảo luận chung và đề xuất giải pháp nâng cao tính bền vững trong canh tác lúa nước

3.5.1 Các chỉ số môi trường (ENI) và chỉ số kinh tế (ECI)



Hình 3.28 Chỉ số hiệu quả môi trường (ENI) và hiệu quả kinh tế (ECI) tương đối của các công thức sử dụng than sinh học (CT2-CT5) so với đối chứng (CT1) trong điều kiện nhà lưới và ngoài thực địa, trên bốn loại đất khác nhau

Ghi chú: Tất cả các chỉ số được chuẩn hóa, với CT1 (không bón than sinh học) được quy đổi làm mốc so sánh 100%, nhằm phản ánh hiệu quả tương đối của các công thức xử lý khác.

Trong điều kiện nhà lưới (Hình 3.28a), các công thức sử dụng than trấu (CT2 và CT3) đều cho thấy chỉ số ENI cao hơn đối chứng CT1 ở tất cả các loại đất, trong đó than trấu cho khả năng cải thiện ENI tốt hơn than nhãn. Than trấu nâng cao ENI từ 13 đến 23%, trong lúc đó than nhãn nâng cao 7 đến 18%. Điều này cho thấy than trấu có khả năng cải thiện các yếu tố môi trường tốt như pH, tích lũy carbon hữu cơ, giảm phát thải CH_4 và tăng cation trao đổi, đặc biệt hiệu quả trên đất nghèo dinh dưỡng và có tính axit cao như đất phèn. Ở thí nghiệm thực địa (Hình 3.28b), trên đất xám hai loại than sinh học này đều làm tăng ENI khá đồng đều nhau (tăng từ 4 đến 9%. Tuy nhiên trên đất phèn, than trấu làm tăng ENI tốt hơn than nhãn (than trấu làm tăng ENI 12-21%, than nhãn làm tăng từ 10 đến 15%). Kết quả này cũng phù hợp với kết quả từ thí nghiệm trong nhà lưới trên cùng loại đất.

Về chỉ số kinh tế tương đối (ECI), trong kịch bản 1 (không tính đến giá trị tín chỉ carbon - Hình 3.28c), chỉ các công thức sử dụng than nhãn ở liều thấp (CT4) đạt chỉ số cao hơn 100%, tức hiệu quả kinh tế cao hơn đối chứng trên cả hai loại đất nghiên cứu. Ngược lại, các công thức sử dụng than trấu (CT2, CT3) có ECI hơn 100%, phản ánh chi phí đầu tư ban đầu cao và lợi nhuận thấp hơn trong điều kiện không có hỗ trợ tài chính từ tín chỉ carbon. Trong kịch bản 2 (có tính đến giá trị từ thị trường tín chỉ carbon - Hình 3.28d), giá trị ECI của tất cả các công thức đều tăng mạnh so với đối chứng, cho thấy cơ chế tín chỉ carbon có thể làm thay đổi đáng kể tính khả thi kinh tế của mô hình. Đặc biệt, CT5 (than nhãn, 20 tấn/ha) đạt chỉ số ECI cao nhất trên đất phèn, vượt xa CT1 và các công thức khác, khẳng định tiềm năng kinh tế vượt trội của than nhãn trong điều kiện có chính sách hỗ trợ khí hậu. Tóm lại kết quả nghiên cứu cho thấy rằng than trấu có ưu thế về hiệu quả môi trường, trong khi than nhãn lại thể hiện hiệu quả kinh tế tương đối cao hơn, đặc biệt trong điều kiện không có hoặc có tín chỉ carbon. Đất phèn là loại đất phản ứng tích cực nhất với than sinh học cả về môi trường lẫn kinh tế, trong khi đất xám thể hiện hiệu quả thấp hơn do dễ rửa trôi ở vụ thứ 2.

3.5.2 Hiệu quả môi trường

Hiệu quả môi trường trong nghiên cứu này dựa vào 3 nhóm vấn đề về chất lượng đất và hạt, ô nhiễm kim loại trong đất và hạt, và phát thải khí nhà kính trong sản xuất lúa. Về vấn đề chất lượng đất, nghiên cứu này đã cung cấp bằng chứng mạnh mẽ về hiệu quả của than sinh học, đặc biệt là than vỏ trấu và than nhãn, như một chất cải tạo đất bền vững trong hệ thống canh tác lúa nước. Than sinh học, đặc biệt là than vỏ trấu đã cải thiện đáng kể chỉ số chất lượng đất (SQI) và chất lượng hạt (GQI) trên các loại đất nghiên cứu. Kết quả này phù hợp với các nghiên cứu khác như của Nguyen, et al. [177], Nguyen, et al. [178], và Munda, et al. [179], cho thấy than sinh học có khả năng cải tạo tốt độ phì nhiêu đất. Đặc biệt, than sinh học từ vỏ trấu có cấu trúc xốp, diện tích bề mặt lớn và chứa nhiều silic, giúp cải thiện cấu trúc đất và làm giảm độc tính của các kim loại như Al, Fe, và Mn [178, 180]. Mặt khác nghiên cứu cho thấy than sinh học cho hiệu quả cao trên đất xám và đất phèn và một trong các nguyên nhân có thể có liên quan đến độ chua của hai loại đất này. Cả đất xám và đất phèn trong nghiên cứu đều có pH thấp. Trong điều kiện này, việc bổ sung than sinh học vốn có tính kiềm tự nhiên do chứa các khoáng bazơ như Ca^{2+}, Mg^{2+}, K^{+}, than sinh học còn đóng vai trò như một chất cải tạo pH mạnh [181]. Khi được đưa vào đất, than sinh học làm tăng pH đất thông qua quá trình trao đổi ion và trung hòa axit hữu cơ, từ đó giảm độ chua và tạo môi trường thuận lợi hơn cho sinh vật đất hoạt động [182]. Đồng thời, pH cao hơn thúc đẩy sự gia tăng đa dạng và mật độ vi sinh vật đất, đặc biệt là các nhóm vi sinh vật cố định đạm và phân giải hữu cơ [183]. Những thay đổi này góp phần cải thiện chu trình dinh dưỡng trong đất, tăng hiệu quả sử dụng phân bón và nâng cao chất lượng đất tổng thể.

Về vấn đề ô nhiễm kim loại năng trong đất, thử nghiệm thực địa đã ghi nhận sự giảm đáng kể chỉ số ô nhiễm kim loại nặng trong đất (HPIs) và chỉ số nhiễm kim loại nặng trong hạt (HPIg) trong vụ đầu tiên, đặc biệt với than vỏ trấu và than thân cành nhãn. Việc nâng pH đất của than sinh học giúp giảm hoạt tính sinh học của các ion kim loại (như Cd^{2+}, Zn^{2+}, Cu^{2+}), bởi ở pH cao hơn, các kim loại này có xu hướng kết tủa hoặc bị hấp phụ mạnh hơn bởi các bề mặt chức năng trên than sinh

học (carboxyl, hydroxyl) [184, 185]. Điều này không chỉ hạn chế sự hòa tan và di động của kim loại nặng, mà còn giảm khả năng chúng xâm nhập vào rễ cây và tích lũy trong hạt. Than trấu và nhãn đều có diện tích bề mặt lớn, khả năng trao đổi cation cao và chứa các nhóm chức hấp phụ mạnh như carboxyl và hydroxyl, cho phép hấp phụ hiệu quả các ion kim loại như Cd^{2+}, Zn^{2+}, Cu^{2+} [186]. Kết quả là khi sử dụng than sinh học đã làm giảm tính di động của các kim loại trong đất, giảm nguy cơ chúng bị cây hấp thu vào hạt. Đặc biệt, hiệu quả rõ rệt hơn trong vụ đầu tiên có thể phản ánh sự tái phân bố nhanh của các kim loại tự do trong môi trường đất mới cải tạo, khi than sinh học vẫn còn hoạt tính cao và chưa bị bão hòa. Hiệu quả này có xu hướng giảm trong vụ thứ hai, cho thấy tính bền vững của việc cố định kim loại cần được nghiên cứu thêm và có thể đòi hỏi các chiến lược ứng dụng dài hạn.

Mặt khác, kết quả nghiên cứu còn cho thấy, trong các thí nghiệm nhà lưới, việc bổ sung than sinh học chưa tạo ra sự khác biệt có ý nghĩa thống kê về chỉ số ô nhiễm kim loại nặng trong đất (HPIs) và chỉ số nhiễm kim loại nặng trong hạt (HPIg). Môi trường nhà lưới được kiểm soát chặt chẽ về điều kiện tưới tiêu, ánh sáng và vi khí hậu, nên các quá trình tự nhiên như rửa trôi, biến động pH và hoạt động của hệ vi sinh vật đất vốn đóng vai trò quan trọng trong cơ chế xử lý kim loại. Điều này làm giảm hiệu quả thực tế của than sinh học trong việc hấp phụ và giữ lại các ion kim loại [187]. Ngoài ra, sinh trưởng của cây lúa trong nhà lưới có thể khác nhiều so với ngoài thực địa do giới hạn không gian, ánh sáng tự nhiên và hệ sinh thái đất kém phát triển. Trong điều kiện này, cây hút dinh dưỡng và kim loại từ đất cũng giảm, dẫn đến lượng kim loại tích lũy trong hạt không đủ lớn để phản ánh sự khác biệt rõ rệt giữa các công thức. Điều này đặc biệt đúng trong giai đoạn đầu, khi hệ rễ chưa phát triển mạnh để tiếp cận lượng lớn ion kim loại trong đất. Kết quả này nhấn mạnh sự cần thiết của các thí nghiệm thực địa dài hạn để đánh giá đúng tiềm năng giảm ô nhiễm kim loại của than sinh học trong điều kiện canh tác thực tế.

Về vấn đề phát thải khí nhà kính CH_4, kết quả nghiên cứu cũng cho thấy cả hai loại than sinh học đều làm giảm phát thải khí metan (CH_4) một cách rõ rệt, với hiệu quả

ổn định ở cả điều kiện nhà lưới và thực địa, trên nhiều loại đất. Than trấu và than nhãn thể hiện hiệu suất vượt trội, cho thấy tiềm năng ứng dụng bền vững trong sản xuất lúa nước. Theo cơ chế sinh hóa trong đất ngập nước, CH_4 chủ yếu sinh ra qua quá trình methanogenesis, bởi vi khuẩn kỵ khí trong điều kiện yếm khí [188]. Việc bổ sung than sinh học tác động lên hệ vi sinh vật và điều kiện đất thông qua nhiều con đường: (i) cải thiện cấu trúc đất và tăng độ thoáng khí, từ đó giảm vùng yếm khí cần thiết cho methanogens; (ii) tăng pH đất, gây ức chế nhóm vi sinh vật sinh methane vốn ưa môi trường axit; và (iii) cung cấp bề mặt hấp phụ, giữ lại các chất hữu cơ dễ phân hủy (nguồn nền của CH_4) [189-191]. Đặc biệt, nhiều nghiên cứu gần đây đã nhấn mạnh vai trò của vi khuẩn methanotrophs (loài vi sinh vật oxy hóa CH_4 trong đất) [192, 193]. Than sinh học không chỉ hạn chế sinh methane mà còn tăng mật độ và hoạt động của vi khuẩn methanotrophs nhờ môi trường xốp, giàu oxy và trung tính pH, tạo điều kiện lý tưởng cho quá trình methane oxidation [194]. Điều này giúp tiêu hủy CH_4 trước khi thoát ra khỏi đất, làm tăng hiệu quả tổng thể của quá trình giảm phát thải. Kết quả này phù hợp với các nghiên cứu trước đây [192, 195], cho thấy than sinh học, đặc biệt từ phụ phẩm giàu silica hoặc lignin, không chỉ điều hòa điều kiện đất mà còn tác động mạnh lên hệ vi sinh, hướng tới nền nông nghiệp phát thải thấp.

3.5.3 Hiệu quả kinh tế

Nghiên cứu cũng cho thấy rằng than sinh học ở liều cao ban đầu đòi hỏi chi phí lớn, nhưng khả năng cải thiện cấu trúc đất, giữ ẩm và tăng hoạt tính vi sinh giúp duy trì năng suất trong nhiều vụ [171]. Nếu chỉ xét trong một vụ, mô hình có thể thua lỗ, nhưng khi tính dịch vụ môi trường (carbon credits - tín chỉ carbon), lợi ích kinh tế rõ ràng. Giá trị tín chỉ carbon đã chuyển đổi hầu hết các mô hình than sinh học từ lỗ thành lời, minh chứng cho tính khả thi của chính sách khuyến khích nông nghiệp giảm phát thải [176]. Điều này khuyến khích nông dân đầu tư vào biện pháp bền vững ngay cả khi lợi ích về năng suất chưa rõ ràng ngay tức thì. Than nhãn (CT4, CT5) sẽ bù đắp được chi phí nếu chỉ xét lợi nhuận thuần từ nông sản, ngược lại than trấu đòi hỏi thời gian hoặc cơ chế bổ sung (như tín chỉ carbon) để tăng tính khả thi

kinh tế. Cơ chế tín chỉ carbon là chìa khóa giúp tất cả các mức sử dụng than sinh học (đặc biệt 20 tấn/ha) trở nên rất hấp dẫn về mặt tài chính, đồng thời khuyến khích nông dân đầu tư vào biện pháp giảm phát thải. Trong bối cảnh cần cân bằng giữa hiệu quả kinh tế và giảm phát thải, kết quả nghiên cứu đã chứng minh than nhãn 10-20 tấn/ha là phương án tối ưu nhất cả về hiệu quả kinh tế và môi trường trên đất xám, đặc biệt khi có thị trường tín chỉ carbon. CT1 tuy an toàn về chi phí nhưng bị giới hạn bởi năng suất và không có giá trị môi trường đi kèm. Việc đầu tư than trấu chỉ phù hợp khi có khung chính sách tín chỉ carbon hiệu quả hoặc giảm chi phí sản xuất than sinh học. Khuyến nghị xây dựng mô hình khép kín sản xuất - sử dụng - bán tín chỉ carbon tại địa phương nhằm thúc đẩy canh tác lúa bền vững trên các vùng đất xám, đất nghèo dinh dưỡng tại Việt Nam.

3.5.4 Tính bền vững của mô hình

Tính bền vững của mô hình sản xuất lúa nước dựa vào than sinh học phụ thuộc vào việc ứng dụng nguyên tắc kinh tế tuần hoàn, sự tồn tại lâu dài của than sinh học trong môi trường, cũng như khả năng nâng cao hiệu quả môi trường của than sinh học. Việc ứng dụng than sinh học trong canh tác lúa nước khép kín một chu trình kinh tế tuần hoàn, vừa tận dụng phụ phẩm nông nghiệp, vừa cải thiện bền vững tính chất đất và giảm phát thải khí nhà kính. Với cấu trúc xốp và diện tích bề mặt lớn, gắn kết chặt cation và hữu cơ trong đất, từ đó làm tăng khả năng trao đổi cation, cải thiện khả năng giữ nước và dinh dưỡng, đồng thời giảm thất thoát nitơ dưới dạng NO_3^- và NH_4^+ [171]. Độ bền của than sinh học trong đất có thể lên đến hàng trăm năm do hàm lượng carbon thơm chịu phân hủy chậm, khẳng định hiệu ứng "bền" của một lần bón, tiết giảm nhu cầu bón bổ sung và đóng góp vào cô lập carbon dài hạn [196]. Về khía cạnh kinh tế tuần hoàn, việc chuyển đổi vỏ trấu, thân nhãn hay bất kỳ phụ phẩm nông nghiệp nào thành than sinh học không chỉ giảm thiểu chi phí xử lý phế thải và phát thải CO_2 từ đốt thông thường, mà còn đem lại sản phẩm giá trị gia tăng được tái sử dụng ngay tại ruộng, từ đó làm giảm nhập khẩu phân bón vô cơ và tối ưu hóa chuỗi giá trị từ nông trại đến đất đai [197]. Giới hạn khối lượng phụ phẩm sinh ra mỗi vụ đồng nghĩa với việc quy hoạch liều lượng bón than sinh

học có thể điều chỉnh linh hoạt theo khả năng sản xuất, tránh tích tụ thừa hoặc thiếu hụt, từ đó duy trì trạng thái cân bằng sinh thái và kinh tế.

Tuy nhiên, hiệu lực của than sinh học có thể giảm xuống sau một vài vụ lúa (như trong trường hợp trên đất xám): các yếu tố như mức độ sản xuất than, tính chất vật liệu nguồn, điều kiện ẩm ướt, khô xen kẽ và hoạt động vi sinh đất đều ảnh hưởng đến khả năng hiệu quả của than sinh học theo thời gian. Do đó, để đảm bảo bền vững lâu dài, cần thiết kế thử nghiệm dài hạn, theo dõi chu kỳ hóa học và cả sinh sinh học qua nhiều vụ và kết hợp các biện pháp luân canh hoặc bổ sung nguồn hữu cơ khác. Việc sử dụng lặp lại than sinh học trên các cánh đồng lúa hàng năm cũng là một giải pháp cho vấn đề này. Về khía cạnh xã hội, mô hình than sinh học còn mở ra cơ hội nâng cao giá trị sản phẩm địa phương, tạo việc làm cho người dân trong khâu sản xuất và phân phối than sinh học, đồng thời góp phần xây dựng hình ảnh nền nông nghiệp xanh và thích ứng với biến đổi khí hậu. Như vậy, than sinh học không chỉ là một "chất phụ gia" cho đất mà còn là chất xúc tác cho liên kết bền vững giữa môi trường - kinh tế - xã hội trong sản xuất lúa nước.

3.5.5 Đề xuất một số giải pháp nâng cao tính bền vững trong canh tác lúa nước

Để nâng cao tính bền vững khi áp dụng than sinh học trong sản xuất lúa nước, sáu giải pháp sau được đề xuất dựa trực tiếp trên bằng chứng thực nghiệm của nghiên cứu này.

** Tối ưu hóa loại than và liều lượng theo từng loại đất*

Kết quả nghiên cứu cho thấy hiệu quả của than sinh học phụ thuộc chặt chẽ vào sự tương thích giữa đặc tính vật liệu và tính chất đất. Trên đất phèn, than trấu liều 20 tấn/ha (CT3) được khuyến nghị ưu tiên vì đạt SQI cao nhất (158% so với đối chứng - Hình 3.24) và ENI tăng 12–21% (Hình 3.28b), nhờ pH cao (8,47) kết hợp silica đặc trưng tạo phức bền với Al^{3+}/Fe^{3+}, hai ion độc chủ đạo trên đất phèn. Trên đất xám, thực nghiệm cảnh báo liều cao 20 tấn/ha không phải lúc nào cũng tối ưu: CT3 đạt SQI cao nhất vụ 1 nhưng thấp nhất vụ 2 (Hình 3.13a) do OC bị khoáng hóa nhanh và cation kiềm bị rửa trôi mạnh trên nền đất cơ giới nhẹ. Do đó, trên đất xám

nên bón định kỳ liều thấp (10 tấn/ha/vụ) thay vì một lần liều cao. Đối với nông hộ chưa tiếp cận thị trường tín chỉ carbon, than nhãn liều 10 tấn/ha (CT4) là lựa chọn kinh tế hơn khi ECI đạt > 100% ngay trong Kịch bản 1 trên cả hai loại đất (Bảng 3.18–3.19). Về lâu dài, cần nghiên cứu thử nghiệm pha trộn hai loại than để kết hợp lợi thế cải thiện pH nhanh của than trấu với khả năng tích lũy carbon bền vững của than nhãn.

** Xây dựng chiến lược bón than theo chu kỳ dài hạn*

Hiệu lực của than sinh học suy giảm theo thời gian, đặc biệt rõ trên đất xám khi các nhóm chức bazơ và khoáng kiềm của than bão hòa sang vụ 2. Ngược lại, trên đất phèn, hiệu quả duy trì tốt hơn nhờ thành phần sét cao giữ lại cation và nhóm chức hấp phụ lâu dài hơn. Từ đó, chiến lược bón cần thiết kế theo đặc thù từng loại đất: trên đất phèn có thể bón một lần liều cao và theo dõi qua 3–4 vụ trước khi bổ sung; trên đất xám nên bón lặp lại liều thấp sau mỗi 1–2 vụ để bù đắp OC và nhóm chức hấp phụ đã mất. Đồng thời, cần kết hợp theo dõi định kỳ SQI, pH, CEC và OC qua ít nhất 3–5 vụ liên tục để xác định thời điểm bón bổ sung phù hợp, tránh lãng phí đầu tư hoặc để hiệu lực suy giảm quá mức. Việc kết hợp than sinh học với phân hữu cơ theo tỷ lệ cân đối cũng cần được khảo sát nhằm tận dụng khả năng giữ NH_4^+ của than và nguồn OC bổ sung, kéo dài hiệu lực cải tạo đất qua nhiều vụ.

** Giảm chi phí sản xuất than sinh học*

Chi phí than trấu cao là rào cản chính khiến CT2 và CT3 thua lỗ trong Kịch bản 1 (Bảng 3.18–3.19) do than được mua theo giá thị trường lẻ, chưa phản ánh chi phí sản xuất tối ưu. Để khắc phục, cần triển khai mô hình sản xuất than theo hướng cộng sinh công nghiệp, tận dụng nhiệt thải từ lò sấy lúa, nhà máy xay xát hoặc lò gạch tại địa phương để giảm chi phí năng lượng nhiệt phân. Đồng thời, tổ chức sản xuất tập trung qua hợp tác xã, tự nhiệt phân vỏ trấu từ nguồn phụ phẩm chi phí gần bằng không, sẽ giảm đáng kể giá thành đầu vào. Ngoài ra, cần điều chỉnh nhiệt độ và thời gian nhiệt phân để tối ưu độ xốp và hàm lượng carbon của than, đồng thời sàng phân loại theo kích thước hạt phù hợp từng loại đất. Khi chi phí được tối ưu

theo các hướng trên, than trấu hoàn toàn có thể đạt ECI > 100% ngay trong Kịch bản 1 không cần tín chỉ carbon hỗ trợ.

** Phát triển và khai thác cơ chế tín chỉ carbon*

Kết quả nghiên cứu chứng minh tín chỉ carbon là đòn bẩy tài chính then chốt: trong Kịch bản 2, tất cả các công thức than sinh học đều chuyển từ lỗ sang lãi, với CT5 đạt lợi nhuận cao nhất (145,55 và 120,22 triệu đồng/ha) qua hai vụ trên đất phèn (Bảng 3.18). Đường cơ sở tính tín chỉ có thể xây dựng trực tiếp từ số liệu thực đo: CT3 và CT5 giảm phát thải CH_4 tới 69–74% so với đối chứng trên đất phèn vụ 1 (Hình 3.26), kết hợp lượng carbon tích lũy trong đất theo Phương trình 2.8–2.10. Để hiện thực hóa, cần xây dựng khung chính sách tín chỉ carbon minh bạch, áp dụng mô hình dự án tập hợp theo vùng để giảm chi phí giao dịch cho nông hộ nhỏ, với cơ chế phân chia lợi ích rõ ràng giữa nông dân - hợp tác xã - tổ chức trung gian, đồng thời kèm hỗ trợ kỹ thuật và tín dụng đầu tư ban đầu để giảm rào cản tiếp cận.

** Xây dựng mô hình kinh tế tuần hoàn và liên kết chuỗi giá trị*

Kết quả so sánh kinh tế giữa hai loại đất cho thấy tổng lợi nhuận trên đất phèn (~266 triệu đồng/ha ở CT5 qua hai vụ) cao hơn đáng kể so với đất xám (~89 triệu đồng/ha), khẳng định tiềm năng lớn của mô hình khi triển khai đúng điều kiện. Để nhân rộng, cần hình thành các cơ sở sản xuất than sinh học quy mô nhỏ gắn liền với vùng canh tác, khép kín chu trình từ phụ phẩm đồng ruộng đến than sinh học - bón ruộng - thu tín chỉ carbon, vừa tối ưu chuỗi giá trị vừa tạo việc làm địa phương và đóng góp vào nông nghiệp xanh. Mô hình hợp tác xã than sinh học cần được đào tạo đội ngũ kỹ thuật viên địa phương, xây dựng tiêu chuẩn chất lượng than đầu ra và kết nối với thị trường tiêu thụ ổn định. Cơ chế hỗ trợ tài chính như vay ưu đãi, trợ giá và ưu đãi thuế thiết bị nhiệt phân cần được triển khai song song để hạ thấp rào cản đầu tư ban đầu, đặc biệt đối với nông hộ quy mô nhỏ tại các vùng đất phèn và đất xám.

** Thiết lập hệ thống theo dõi dài hạn và mở rộng nghiên cứu*

Kết quả hiện tại chỉ ghi nhận qua 2 vụ, chưa đánh giá được tác động tích lũy và điểm bão hòa của than sinh học trong từng loại đất, đặc biệt khi hiện tượng suy giảm hiệu lực trên đất xám đã xuất hiện rõ từ vụ 2. Do đó, cần thiết lập hệ thống theo dõi dài hạn (3–5 vụ) các chỉ số SQI, GQI, HPIs và CH_4 trên cả bốn loại đất, từ đó xác định chu kỳ bón bổ sung và liều lượng duy trì tối ưu cho từng điều kiện thổ nhưỡng. Cần bổ sung phân tích pha khoáng (XRD) và pha carbon (FTIR) của than đầu vào để làm rõ cơ chế khác biệt giữa than trấu giàu silica và than nhãn giàu carbon thơm, tạo cơ sở khoa học vững chắc hơn cho việc lựa chọn vật liệu. Ngoài ra, cần mở rộng nghiên cứu tổ hợp than sinh học với vôi, phân hữu cơ hoặc chế phẩm vi sinh, đồng thời phân tích cộng đồng vi sinh vật methanogen, methanotroph qua các vụ để hiểu sâu hơn cơ chế giảm CH_4.

Những giải pháp này khi triển khai đồng bộ và gắn chặt với kết quả thực nghiệm sẽ tạo nền tảng vững chắc cho việc nhân rộng mô hình canh tác lúa nước bền vững, đóng góp trực tiếp vào mục tiêu giảm phát thải khí nhà kính và thích ứng biến đổi khí hậu cấp quốc gia.

KẾT LUẬN VÀ KIẾN NGHỊ

1. Kết luận

Nghiên cứu cho thấy than sinh học từ vỏ trấu và thân cành nhãn mang lại hiệu quả cải thiện môi trường rõ rệt trong canh tác lúa, với chỉ số môi trường (ENI) tăng từ 13-23% đối với than trấu và 7-18% với than nhãn, đặc biệt hiệu quả trên đất phèn. Than sinh học góp phần nâng cao chất lượng đất (SQI), chất lượng hạt (GQI), giảm phát thải khí CH_4 và giảm tích lũy kim loại nặng trong đất và hạt, trong đó than trấu thể hiện ưu thế hơn nhờ khả năng cải thiện pH, hấp phụ ion kim loại và cấu trúc đất. Về hiệu quả kinh tế, than nhãn ở liều thấp (10 tấn/ha) đạt chỉ số hiệu quả kinh tế (ECI) >100% ngay cả khi chưa tính tín chỉ carbon, trong khi than trấu chỉ trở nên khả thi về mặt kinh tế khi có cơ chế tín chỉ carbon hỗ trợ. Trong kịch bản có tín chỉ carbon, tất cả các công thức sử dụng than sinh học đều có ECI vượt đối chứng, với CT5 (than nhãn 20 tấn/ha) đạt hiệu quả cao nhất trên đất phèn, phản ánh tiềm năng tài chính rõ rệt khi có chính sách khí hậu phù hợp. Đất phèn là loại đất phản ứng tích cực nhất với than sinh học cả về hiệu quả môi trường lẫn kinh tế, trong khi đất xám cho hiệu quả thấp hơn do hiện tượng rửa trôi mạnh ở vụ thứ hai.

Tuy nhiên, hiệu lực cải tạo đất và cố định kim loại của than sinh học có xu hướng giảm sau một vài vụ, đặc biệt trên đất xám, đòi hỏi đánh giá thêm trong các thí nghiệm dài hạn. Mặt khác, nghiên cứu chưa đề cập đầy đủ đến các yếu tố chi phí sản xuất, logistics và mô hình chuỗi giá trị trong triển khai thực tế. Việc ứng dụng than sinh học là một giải pháp tiềm năng trong nông nghiệp bền vững, đồng thời góp phần vào mục tiêu giảm phát thải khí nhà kính (CH_4), kiểm soát ô nhiễm kim loại nặng, và bảo vệ an ninh lương thực trước biến đổi khí hậu. Bên cạnh đó, cơ chế tín chỉ carbon và thị trường than sinh học có thể trở thành đòn bẩy tài chính quan trọng, khuyến khích nông dân tham gia vào quá trình chuyển đổi xanh trong sản xuất nông nghiệp.

Tóm lại, nghiên cứu này khẳng định than sinh học đặc biệt từ phụ phẩm địa phương, là một hướng đi khả thi và tích hợp giữa hiệu quả môi trường, kinh tế và phát triển nông nghiệp bền vững.

Kết quả kiểm tra các giả thuyết khoa học:

Giả thuyết 1: Sản xuất lúa nước trên vùng đất phèn có chất lượng đất thấp nhất và mức độ nhiễm kim loại cao nhất trong lúc có hiệu quả kinh tế thấp nhất trong các loại đất nghiên cứu.

Kết quả: Đất phèn trước khi xử lý cho pH thấp nhất, hàm lượng Al^{3+} và Fe^{3+} trao đổi, kim loại nặng (Cu, Co, Zn) cao nhất, SQI thấp nhất và HPIs cao nhất. Sau khi bón than sinh học, mặc dù chất lượng cải thiện, chi phí cải tạo cao dẫn tới lợi nhuận kinh tế thấp hơn so với các loại đất khác. Giả thuyết 1 được xác nhận.

Giả thuyết 2: Chất lượng đất (chỉ số chất lượng đất và chỉ số ô nhiễm kim loại nặng trong đất) của đất phèn và đất xám được cải thiện nhiều hơn khi sử dụng than sinh học so với các loại đất khác.

Kết quả: than trấu và than nhãn làm tăng SQI trên đất phèn và đất xám tốt hơn so với đất mặn và phù sa nhưng không cải thiện HPIs. Giả thuyết 2 được xác nhận một phần về chỉ số chất lượng đất được cải thiện tốt hơn khi sử dụng than sinh học trên đất phèn và đất xám so với hai loại đất còn lại.

Giả thuyết 3: Sử dụng than sinh học từ vỏ trấu và thân cành nhãn có thể làm hạn chế phát thải khí CH_4 trên đất xám nhiều hơn trên các loại đất khác.

Kết quả: Trên đất xám, than trấu và than nhãn giảm tổng phát thải CH_4 mức giảm cao nhất (đặc biệt là than trấu) so với đất phèn, đất mặn và phù sa. Giả thuyết 3 được xác nhận.

Giả thuyết 4: Than sinh học cải thiện sinh trưởng và phát triển của cây lúa trên đất phèn và đất xám tốt hơn hai loại đất còn lại.

Kết quả: Trên đất phèn với than trấu và đất xám với than nhãn đã tăng trọng lượng rễ, rơm và năng suất hạt so với khi không sử dụng và cao hơn mức cải thiện trên đất mặn và phù sa. Giả thuyết 4 được xác nhận.

Giải thuyết 5: Hiệu quả của than sinh học trên đất phèn kéo dài hơn trên đất xám

Kết quả: Trên đất xám hiệu quả của than sinh đã giảm đáng kể trong vụ thứ hai và nguyên nhân chủ yếu có liên quan đến thành phần cơ giới của đất xám dẫn đến khả năng rửa trôi cao trên loại đất này. Giả thuyết 5 được xác nhận.

Giả thuyết 6: Hiệu quả kinh tế do than sinh học mang lại trong sản xuất lúa nước cao hơn trên đất phèn so với trên đất xám.

Kết quả: Biên lợi nhuận trên đất phèn tăng sau khi bón than nhãn so với trên đất xám, do chi phí cải tạo thấp hơn và tăng năng suất tương đối lớn hơn do cải thiện chất lượng đất tốt hơn. Đặc biệt khi áp dụng kịch bản số 2 đã có hiệu quả kinh tế đạt cao nhất. Giả thuyết 6 được xác nhận.

Như vậy, cả sáu giả thuyết đều được thực nghiệm và phân tích số liệu kiểm chứng, tuy mức độ cải thiện kim loại trong đất và hạt ở mô hình canh tác nhà lưới chỉ ủng hộ giả thuyết 2 một phần. Các giả thuyết còn lại đều khẳng định than sinh học là công cụ hiệu quả để đồng thời cải thiện chất lượng đất, giảm phát thải CH_4 và nâng cao lợi ích kinh tế trong sản xuất lúa nước trên các vùng đất kém phì đặc biệt là đất phèn và đất xám.

2. Kiến nghị

Trong đề tài nghiên cứu này, mặc dù các kết quả nghiên cứu đã khẳng định hiệu quả của than sinh học đối với cải thiện chất lượng đất, giảm kim loại nặng trong đất, giảm phát thải CH_4 và tăng năng suất nhưng vẫn còn tồn tại một số hạn chế cần được khắc phục. Thí nghiệm chỉ triển khai trên diện tích nhỏ, ít điểm khảo nghiệm, chưa bao quát đủ biến thiên vi khí hậu và thành phần đất trong toàn vùng. Do đó, kết quả khó khái quát cho các vùng trồng lúa có điều kiện khác nhau về độ phèn, độ dinh dưỡng hoặc thành phần cơ giới. Ngoài ra, nghiên cứu thực địa tập trung chủ

yếu vào hai vụ liên tiếp, chưa đánh giá được tác động tích lũy và bền vững của than sinh học sau nhiều chu kỳ canh tác (3-5 năm). Bên cạnh đó, nghiên cứu thực địa diễn ra trong điều kiện khí hậu tương đối ổn định. Chưa xem xét tình huống mưa bất thường, hạn hán hoặc xâm nhập mặn tăng cao, những yếu tố này có thể làm thay đổi hiệu quả xử lý than sinh học và phát thải CH_4. Hiệu quả lâu dài về tích lũy hữu cơ, cân bằng vi sinh và chu trình dinh dưỡng đất và cây lúa vẫn chưa được làm rõ. Mặc dù đã đo đạc chỉ số hóa học và phát thải CH_4, nghiên cứu chưa đi sâu vào cơ chế tương tác than sinh học với vi sinh trong tầng đất ngập nước (chẳng hạn như sự thay đổi cộng đồng vi sinh methanogen/methanotroph hay phản ứng C-N vi khuẩn). Phân tích kinh tế mới dừng ở mức lợi nhuận canh tác trực tiếp, chưa tính đến chi phí chế biến, vận chuyển than sinh học hay các khoản hỗ trợ đầu tư cần thiết. Các rào cản về tiếp cận thị trường than sinh học, chính sách khuyến khích và nhận thức nông dân cũng chưa được khảo sát. Cuối cùng, nghiên cứu chỉ thử nghiệm hai nguồn than (trấu, nhãn) với hai liều lượng. Chưa so sánh hoặc kết hợp than sinh học với một số vật liệu khác khác như phân hữu cơ/vôi đồng thời kết hợp thời điểm bón tối ưu cho từng loại đất. Những hạn chế này mở ra hướng nghiên cứu tiếp theo: mở rộng quy mô và thời gian theo dõi, phân tích sâu cơ chế vi sinh, hoàn thiện đánh giá kinh tế - xã hội và thử nghiệm đa dạng nguồn nguyên liệu, nhằm hoàn chỉnh giải pháp than sinh học cho sản xuất lúa bền vững.

DANH MỤC CÔNG TRÌNH ĐÃ CÔNG BỐ CỦA NGHIÊN CỨU SINH

*** Bài báo trong nước:**

1. **Đồng Phú Hảo**, Nguyễn Thanh Bình*, Lê Hoàng Anh, "Phát thải khí metan (CH_4) trong sản xuất lúa nước tại Việt Nam: hiện trạng và giải pháp,". *VNU Journal of Science: Earth and Environmental Sciences*, tập 39, số 1 trang 28-41, 2023. https://doi.org/10.25073/2588-1094/vnuees.4909.
2. **Đồng Phú Hảo**, Nguyễn Thanh Bình, Lê Hoàng Anh, "Nghiên cứu ảnh hưởng của than sinh học đến chất lượng đất cát trồng lúa tại xã Thái Mỹ, huyện Củ Chi, thành phố Hồ Chí Minh," *Tạp chí Khoa học Đất*, số 79, trang 22-27, 2025.

***Bài báo quốc tế:**

1. **Hao Phu Dong**, Binh Thanh Nguyen*, Anh Hoang Le, Gai Dai Dinh, "Seasonal variation-dependent biochar impacts on coastal acid-sulfate soil in paddy fields and the consequences on rice growth and yield," *Geoderma Regional,* vol. 39, p. e00878, 2024. https://doi.org/10.1016/j.geodrs.2024.e00878. Xếp hạng Q1 thuộc danh mục Web of Science, Impact factor = 3.3.
2. **Hao Phu Dong**, Binh Thanh Nguyen*, Thia Hong Le, My Hoang Nguyen, and Anh Hoang Le, "Agricultural byproduct-derived biochar for mitigating trace metal risks from soil to rice to public health: implications for sustainable management," *Integrated Environmental Assessment and Management*, vol. 21, no. 4, p. 895-909, 2025. https://doi.org/10.1093/inteam/vjaf024. Xếp hạng Q1 thuộc danh mục Web of Science, Impact factor = 8.4.

***Báo cáo tại hội thảo:**

1. **Đồng Phú Hảo**, "Ảnh hưởng của than sinh học đến hiệu quả sử dụng đất," trình bày tại chuỗi seminar chuyên đề của nhóm nghiên cứu ứng dụng giải pháp xanh (ARGES) và nhóm nghiên cứu tài nguyên thiên nhiên và môi trường bền vững (RSENR) năm 2023.
2. **Đồng Phú Hảo**, "Nghiên cứu ảnh hưởng của than sinh học đến chất lượng đất cát trồng lúa tại xã Thái Mỹ, huyện Củ Chi, Thành phố Hồ Chí Minh," trình bày tại hội thảo khoa học quản lý đất đai toàn quốc 2025 - Quản lý đất đai bền vững. Đại học Cần Thơ, ngày 11-12/7/2025.

***Đề tài Nghiên cứu khoa học:**

Hoàn thành nghiệm thu đề tài NCKH cấp trường: "Nghiên cứu ảnh hưởng của than sinh học để cải thiện môi trường đất và năng suất lúa," tại trường Đại học Công Nghiệp Thành phố Hồ Chí Minh theo Hợp đồng số 121/HĐ-ĐHCN ngày 30/08/2022.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1] L. T. H. Xuân và A. Chu, "Báo cáo thị trường gạo năm 2020: Báo cáo cập nhật bức tranh toàn cảnh về tình hình sản xuất, biến động giá cả, tình hình tiêu thụ và các dự báo về thị trường lúa gạo trong nước và thế giới," Bộ Nông nghiệ và Phát triển nông thôn, 2020.

[2] M. V. Trịnh, T. V. Thể, và B. T. P. Loan, "Tiềm năng giảm thiểu phát thải khí nhà kính của ngành sản xuất lúa nọớc Việt Nam," *Tạp chí Nông nghiệp và Phát triển nông thôn,* trang. 1-10, 2013.

[3] N. H. Thành, N. Đ. Hùng, T. T. L. Hà, và N. T. Hoàng, "Tình hình phát thải khí metan (CH4) do hoạt động canh tác lúa nước ở khu vực Đồng bằng Sông Hồng," (in V), *Tạp chí Khoa học và Phát triển, Trường Đại học Nông nghiệp Hà Nội,* tập. 10, số. 1, trang. 165 - 172, 2012.

[4] L. V. Khoa, N. X. Cự, L. Đức, T. K. Hiệp, và T. C. Vân, *Đất và Môi trường*. Nhà xuất bản Giáo Dục, 2003.

[5] N. H. Tín, "Tổng quan về Ô nhiễm Nông nghiệp ở Việt Nam: Ngành trồng trọt," Ngân hàng Thế giới, Washington, D.C, 2017.

[6] B. Glaser, "Prehistorically modified soils of central Amazonia: a model for sustainable agriculture in the twenty-first century," (in eng), *Philos Trans R Soc Lond B Biol Sci,* vol. 362, no. 1478, pp. 187-196, 2007.

[7] N. Đ. Hùng, N. T. Hoàng và N. H. Thành, "Phát thải khí mê tan từ đất lúa nước được bón vật liệu hữu cơ khác nhau trên đất phù sa Sông Hồng " (in V), *Tạp chí Khoa học Nông nghiệp Việt Nam 2018,* tập. 7, số. 16, trang. 662-670, 2018.

[8] N. V. C. Ngân, T. S. Nam, và N. T. Thùy, "Đánh giá hiện trạng phế thải nông nghiệp ở Đồng bằng sông Cửu Long và tiềm năng ứng dụng để phát triển điện sinh khối," *Hội nghị Khoa học lần IX - Trường Đại học Khoa học Tự nhiên,* tập. 1, trang. 57-60, 2014.

[9] N. V. Mấn và T. V. Thịnh, *Nông nghiệp bền vững, cơ sở và ứng dụng*. Nhà xuất bản Thanh Hóa, 2002.

[10] FAO, *Guidelines for Soil Description*. Rome (in E), 2006.

[11] S. K. D. Datta, *Principles and practices of rice production* John Wiley & Sons, New York, 1981.

[12] Đ. T. Lộc, *Giáo trình Kỹ thuật trồng lúa*. Nhà xuất bản Hà Nội, 2006.

[13] N. N. Đệ, *Giáo Trình Cây lúa*. Viện Nghiên Cứu Phát Triển Đồng Bằng Sông Cửu Long, Đại Học Cần Thơ, 2008.

[14] M. J. Farrell, "The Measurement of Productive Efficiency," *Journal of the Royal Statistical Society. Series A (General),* vol. 120, no. 3, pp. 253-290, 1957.

[15] S. Haag, P. Jaska, and J. Semple, "Assessing the relative efficiency of agricultural production units in the Blackland Prairie, Texas," *Applied Economics,* vol. 24, no. 5, pp. 559-565, 1992/05/01 1992.

[16] R. Trewin, L. Weiguo, S. Erwidodo, and S. Bahri, "Analysis of the technical efficiency over time of West Javanese rice farms," *Australian Journal of Agricultural Economics,* vol. 39, no. 2, pp. 143-163, 1995.

[17] V. Huynh, H. Khai, and M. Yabe, "Technical efficiency analysis of rice production in Vietnam," *Journal of International Society for Southeast Asian Agricultural Sciences,* vol. 17, pp. 135-146, 01/01 2011.

[18] P. L. Thông, H. T. Đ. Xuân, và T. T. T. Duyên, "So sánh hiệu quả kinh tế của vụ lúa hè thu và thu đông ở Đồng bằng Sông Cửu Long " (in V), *Tạp chí Khoa học Trường Đại học Cần Thơ,* tập. 18a, trang. 267-276, 2011.

[19] N. T. Dũng and L. K. Ninh, "Các yếu tố ảnh hưởng đến hiệu quả kinh tế trong sản xuất lúa của nông hộ ở Thành phố Cần Thơ," *Tạp chí Khoa học Trường Đại học Cần Thơ,* số. 36, trang.116-125, 2015.

20] L. C. Dũng, N. V. Sánh, V. V. Tuấn, và N. T. K. Thoa, "Phân tích hiệu quả kinh tế của nông hộ trồng lúa ở Đồng bằng sông Cửu Long," *Tạp chí Khoa học Trường Đại học Cần Thơ,* tập 55, số 5, trang 73-81, 2019.

[21] Report of the World Commission on Environment and Development, "Our Common Future," United Nations, 1987.

[22] CGIAR, "Sustainable Agricultural Production, Implication of International Agricultural Research," Rome, 1989.

[23] L. V. Khoa, N. Đ. Lương, và N. T. Truyền, *Nông nghiệp và môi trường*. Nhà xuất bản Giáo dục, 2001.

[24] J. Timsina, R. J. Buresh, A. Dobermann, and J. Dixon, *Rice-maize systems in Asia: current situation on and potential*. Los Baños (Philippines): International Rice Research Institute and International Maize and Wheat Improvement Center, 2011.

[25] Bộ Nông nghiệp và Phát triển Nông thông. *Tái cơ cấu ngành lúa gạo Việt Nam đến năm 2020 và tầm nhìn đến năm 2030, (http://www.cuctrongtrot.gov.vn/ctt/vanban/20151026161029.doc)*, 2015

[26] H. D. Nguyen, K. T. Nguyen, and T. N. D. Bui, "Evaluation of paddy land use in the Mekong river Delta," *Journal of Science and Development,* vol. 13, no. 8, pp. 1435-1441, 2015.

[27] Tổng cục Thống kê, "Động thái và thực trạng kinh tế - xã hội Việt Nam 5 năm 2016-2020," Nhà xuất bản Thống kê, 2021.

[28] H. C. J. Godfray *et al.*, "Food Security: The Challenge of Feeding 9 Billion People," vol. 327, no. 5967, pp. 812-818, 2010.

[29] U. Nations, "World Population Prospects: The 2017 Revision. Department of Economic and Social Affairs, Population Division," 2017.

[30] FAO, "World Agriculture: Towards 2030/2050—Interim Report," Rome, 2006.

[31] M. D. Edgerton, "Increasing Crop Productivity to Meet Global Needs for Feed, Food, and Fuel," *Plant Physiology,* vol. 149, no. 1, pp. 7-13, 2009.

[32] D. Tilman, K. G. Cassman, P. A. Matson, R. Naylor, and S. Polasky, "Agricultural sustainability and intensive production practices," *Nature,* vol. 418, p. 671, 08/08/online 2002.

[33] N. Jain, D. S. Pathak, S. Mitra, and A. Bhatia, "Emission of methane from rice fields - A review," *Journal of Scientific and Industrial Research,* vol. 63, pp. 101-115, 2004.

[34] K. Ma, R. Conrad, and Y. Lu, "Responses of Methanogen: Genes and Their Transcripts to an Alternate Dry/Wet Cycle of Paddy Field Soil," *Applied and Environmental Microbiology,* vol. 78, no. 2, pp. 445-454, 2012.

[35] J. Yuan, X. Yi, and L. Cao, "Three-Source Partitioning of Methane Emissions from Paddy Soil: Linkage to Methanogenic Community Structure," *International Journal of Molecular Sciences,* vol. 20, no. 7, p. 1586, 2019.

[36] V. Đ. Đoan X. T. Nguyen, D. T. Tran, T. T. Phan, B. L. Nguyen, T. T.Nguyen, T. H. Duong, T. H. L. Phan, và T. L. Nguyen, "Đánh giá sự phát thải khí nhà kính từ nông nghiệp và lâm nghiệp ở Việt Nam đề xuất biện pháp giảm thiểu và kiểm soát. Dự án tăng cường năng lực quốc gia ứng phó với biến đổi khí hậu ở Việt Nam nhằm giảm nhẹ tác động và kiểm soát phát thải khí nhà kính - Hợp phần Bộ Nông nghiệp và Phát triển nông thôn," 2011.

[37] P. Q. Hà, V. Thắng, N. T. Khánh, K. Ito, K. Endoh, và K. Inubushi, "Đánh giá mức độ phát thải CH4 từ đất phù sa sông hồng và đất xám bạc màu trồng lúa ở Miền Bắc Việt Nam " *Tạp chí Nông nghiệp và Phát triển nông thôn,* 2013.

[38] C. S. Huân, M. V. Trịnh, C. V. Hà, B. T. P. Loan, V. T. Hằng, Đ. Q. Hiếu, Đ. T. M. Trang, và B. T. T. Trang,, "Nghiên cứu phát thải khí nhà kính trên đất trồng lúa tỉnh Thái Bình," *Tạp chí Khoa học Nông nghiệp Việt Nam,* tập. 18, số. 2, trang. 113-122, 2020.

[39] H. Q. Tín, T. T. H. Trang, V. V. Bình, T. K. Tính, và N. V. Sánh, "Ảnh hưởng của kỹ thuật tưới đến năng suất và phát thải methane (CH_4) trong sản xuất lúa tại Gò Công Tây - Tiền Giang," *Tạp chí Khoa học Trường Đại học Cần Thơ,* tập. 2, số. 38, trang. 55-63, 2015.

[40] N. V. Bộ, M. V. Trịnh, B. T. P. Loan, L. Q. Thanh, P. A. Cường, và N. L. Trang, "Urea-agrotain và phát thải khí nhà kính," *Hội thảo Quốc gia về Khoa học Cây trồng,* 2016.

[41] N. K. Thu, C. V. Phụng, T. V. Dũng, V. N. M. Tâm, và H. N. H. Phúc, "Ảnh hưởng của các phương pháp xử lý rơm lên phát thải khí CH_4 và năng suất lúa trên đất phù sa tại Thới Lai, Cần Thơ," *Tạp chí Khoa học Công nghệ Nông nghiệp Việt Nam,* tập. 79, số. 6, trang. 50-55, 2017.

[42] T. S. Nam, H. M. Nhựt, N. N. B. Trân, H. V. Thảo, Đ. T. Xuân, và N. H. Chiếm, "Ảnh hưởng của hai loại biochar trấu đến sự phát thải khí CH4 và N2O từ đất phù sa trong điều kiện phòng thí nghiệm," *Tạp chí Khoa học Trường Đại học Cần Thơ,* số. 56, trang. 109-118, 2020.

[43] T. T. K. Loan, P. T. N. Lan, và H. T. Nghĩa, "Giải pháp giảm phát thải khí nhà kính trong sản xuất lúa tại Thị xã Hương Trà, tỉnh Thừa Thiên Huế," *Tạp chí Khoa học và Công nghệ, Trường Đại học Khoa học, Đại học Huế,* tập. 1, số. 11, trang. 107-118, 2018.

[44] H. Qian *et al.*, "Greenhouse gas emissions and mitigation in rice agriculture," *Nature Reviews Earth & Environment,* vol. 4, no. 10, pp. 716-732, 2023.

[45] M. S. Aulakh, J. Bodenbender, R. Wassmann, and H. Rennenberg, "Methane Transport Capacity of Rice Plants. Influence of Methane Concentration and Growth Stage Analyzed with an Automated Measuring System," *Nutrient Cycling in Agroecosystems,* vol. 58, no. 1, pp. 357-366, 2000.

[46] H. Q. Tín *et al.*, "Canh tác lúa ít khí thải nhà kính tỉnh An Giang vụ Đông Xuân 2010-2011," *Tạp chí Khoa học Trường Đại học Cần Thơ,* số. 23a, trang. 31-41, 2012.

[47] Z.-Q. Xiong, G.-X. Xing, and Z.-L. Zhu, "Nitrous Oxide and Methane Emissions as Affected by Water, Soil and Nitrogen," *Pedosphere,* vol. 17, no. 2, pp. 146-155, 2007/04/01/ 2007.

[48] K. R. Brye, C. W. Rogers, A. D. Smartt, and R. J. Norman, "Soil texture effects on methane emissions from direct-seeded, delayed-flood rice production in Arkansas," *Soil Science,* vol. 178, no. 10, pp. 519-529, 2013.

[49] Y. Huang, Y. Jiao, L. Zong, X. Zheng, R. Sass, and F. M. Fisher, "Quantitative dependence of methane emission on soil properties," *Nutrient Cycling in Agroecosystems,* vol. 64, pp. 157-167, 2002.

[50] H. Yao, R. Conrad, R. Wassmann, and H. U. Neue, "Effect of soil characteristics on sequential reduction and methane production in sixteen rice paddy soils from China, the Philippines, and Italy," *Biogeochemistry,* journal article vol. 47, no. 3, pp. 269-295, 1999.

[51] N. K. Thu, "Đánh giá phát thải khí nhà kính (N2O và CH4) trên hai mô hình canh tác lúa," Luận án Tiến sĩ Khoa học Đất, Trường Đại học Cần Thơ, 2019.

[52] IPCC, "Climate Change 2021: The Physical Science Basis," 2021.

[53] E. A. Gilmore and H. Buhaug, "Climate mitigation policies and the potential pathways to conflict: Outlining a research agenda," (in eng), *Wiley Interdiscip Rev Clim Change,* vol. 12, no. 5, p. e722, Sep-Oct 2021, doi: 10.1002/wcc.722.

[54] L. H. Bá và L. M. Triết, *Sinh thái môi trường ứng dụng*. Nhà xuất bản Khoa họ Kỹ thuật, 2005.

[55] L. Đ. Huy, *Bài giảng Suy thoái và Phục hồi đất*. Trường Đại Học Nông Lâm, Thừa Thiên Huế, 2019.

[56] D. D. M. Hamdan, M. K. Sabullah, J. Seludin, A. S. M. Azman, and M. H. Adnan, "Rice cultivation in former rubber land without soil remediation contribute toxicity risk of heritable heavy metals contamination," *Paddy and Water Environment,* vol. 19, no. 3, pp. 469-479, 2021/07/01 2021.

[57] J. Ouyang, Z. Liu, L. Zhang, Y. Wang, and L. Zhou, "Analysis of influencing factors of heavy metals pollution in farmland-rice system around a uranium tailings dam," *Process Safety and Environmental Protection,* vol. 139, pp. 124-132, 2020/07/01/ 2020.

[58] N. Thạnh, V. Q. Minh, và L. Dũng, "Đánh giá hàm lượng kim loại nặng trong đất phèn trồng lúa có bón phân xỉ thép tại tỉnh Kiên Giang và Hậu Giang," *Tạp chí Khoa học Trường Đại học Cần Thơ,* tập. 54, trang. 157, 2018.

[59] T. A. Thư, N. H. Oanh, và T. T. Nga, "Khảo sát hàm lượng Cu, Zn, Cd và As ở các vùng đê bao kiểm soát lũ tỉnh An Giang," *Tạp chí Khoa học Trường Đại học Cần Thơ,* tập. 28, số. 2013, trang. 73-79, 2013.

[60] P. Q. Hưng và T. T. H. Thơm, "Đánh giá tính chất và mức độ ô nhiễm đất nông nghiệp thuộc lưu vực Sông Nhuệ tại Huyện Duy Tiên, Tỉnh Hà Nam," *Tạp chí Khoa học Nông nghiệp Việt Nam,* tập. 14, số. 11, 2016.

[61] A. J. Conacher, *Rural land degradation in Australia/Arthur and Jeanette Conacher* (Meridian, Australian geographical perspectives., no. Accessed from https://nla.gov.au/nla.cat-vn670371). Melbourne: Oxford University Press, 1995.

[62] D. L. Johnson, S. H. Ambrose, T. J. Bassett, M. L. Bowen, D. E. Crummey,

J. S. Isaacson, D. N. Johnson, P. Lamb, M. Saul, and A. E. Winter-Nelson "Meanings of Environmental Terms," vol. 26, no. 3, pp. 581-589, 1997.

[63] A. M. S. Ali, "Rice to shrimp: Land use/land cover changes and soil degradation in Southwestern Bangladesh," *Land Use Policy,* vol. 23, no. 4, pp. 421-435, 2006/10/01/ 2006.

[64] A. M. S. Ali, "Technological change in agriculture and land degradation in Bangladesh: A case study," vol. 15, no. 3, pp. 283-298, 2004.

[65] T. B. Linh và L. V. Khoa, "Hiện trạng độ phì vật lý của đất thâm canh lúa ở xã Long Khánh - Cai Lậy - Tiền Giang," *Tạp chí Khoa học Trường Đại học Cần Thơ,* tập. 6, số. 2016, trang. 111-117, 2016.

[66] N. H. Tề, N. Đ. Giao, N. T. Huyên, và H. C. Vượng, *Giáo trình Cây lương thực*. Nhà xuất bản Nông nghiệp Hà Nội, 1997.

[67] H. Surek and N. Beser, "Selection for grain yield & yield components in early generations for temperate rice," *Crop Science Society of the Philippines,* vol. 3, no. 28, pp. 3-15, 2005.

[68] Y. Uga *et al.*, "Accumulation of additive effects generates a strong photoperiod sensitivity in the extremely late-heading rice cultivar," *Theoretical and Applied Genetics,* 2007.

[69] H. Chen, Q.-P. Li, Y.-L. Zeng, F. Deng, and W.-J. Ren, "Effect of different shading materials on grain yield and quality of rice," *Scientific Reports,* vol. 9, no. 1, p. 9992, 2019/07/10 2019.

[70] G. Yang *et al.*, "Optimizing Planting Density and Impact of Panicle Types on Grain Yield and Microclimatic Response Index of Hybrid Rice (Oryza sativa L.)," *International Journal of Plant Production,* 2021/07/24 2021.

[71] Đ. T. T. Lê và N. K. Phùng, "Ảnh hưởng của sự thay đổi các yếu tố khí tượng nhạy cảm đến năng suất lúa ở tỉnh Vĩnh Long," *Tạp chí khí tượng thủy văn,* tập. 2, số. 2019, trang. 31-37, 2019.

[72] H. N. Thuận và T. T. Tâm, "Sử dụng phụ phẩm nông nghiệp trong trồng trọt," Viện Nông hóa Thổ nhưỡng, 2018.

[73] L. Wang *et al.*, "Biochar aging: mechanisms, physicochemical changes, assessment, and implications for field applications," *Environmental Science & Technology,* vol. 54, no. 23, pp. 14797-14814, 2020.

[74] T. T. Tú, "Đặc điểm hóa lý của than sinh học điều chế từ vỏ trấu," *Tạp chí Khoa học – Đại học Huế,* tập. 6, số. 20, trang. 233-247, 2016.

[75] V. T. D. Chi, L. N. Cẩn, L. T. Phong, N. T. Thành, và V. Đ. Thanh, "Nghiên cứu sản xuất than sinh học từ rác thải sinh hoạt dễ phân hủy và phế phẩm nông nghiệp," *An Giang University Journal of Science,* tập. 22, số. 1, trang. 81-85, 2019.

[76] V. Thắng và N. H. Sơn, "Nghiên cứu ứng dụng than sinh học nâng cao sức sản xuất của đất: Ảnh hưởng loại và lượng bón than sinh học đến sinh trưởng và năng suất lúa," *Tạp chí Khoa học và Công nghệ Nông nghiệp Việt Nam,* tập. 3, số. 24, 2011.

[77] B. T. Nguyen, G. D. Dinh, H. P. Dong, and L. B. Le, "Sodium adsorption isotherm and characterization of biochars produced from various agricultural biomass wastes," *Journal of Cleaner Production,* vol. 346, p. 131250, 2022/04/20/ 2022.

[78] T. V. Cường, "Nghiên cứu ứng dụng than sinh học từ phụ phẩm cây lúa để cải tạo môi trường đất xám bạc màu," Luận án tiến sĩ khoa học môi trường, 2015.

[79] K. A. Spokas, "Review of the stability of biochar in soils: predictability of O:C molar ratios," (in E), *Carbon Management,* vol. 1, no. 2, pp. 289-303, 2010/12/01 2010.

[80] J. O. Skjemstad, L. J. Janik, and J. A. Taylor, "Non-living soil organic matter: what do we know about it?," *Australian Journal of Experimental Agriculture,* Article vol. 38, no. 7, pp. 667-680, 1998.

[81] R. S. Swift, "Sequestration of carbon by soil," *Soil Science,* Article vol. 166, no. 11, pp. 858-871, Nov 2001.

[82] X. Yanan, S.-H. Yang, J. Xu, J. Ding, X. Sun, and Z. Jiang, "Effect of biochar amendment on methane emissions from paddy field under water-saving irrigation," *Sustainability,* vol. 10, p. 1371, 2018.

[83] E. P. A. Pratiwi and Y. Shinogi, "Rice husk biochar application to paddy soil and its effects on soil physical properties, plant growth, and methane emission," *Paddy Water Environ.,* journal article pp. 1-12, 2016.

[84] J. Liu *et al.*, "Effects of biochar amendment on the net greenhouse gas emission and greenhouse gas intensity in a Chinese double rice cropping system," *European Journal of Soil Biology,* vol. 65, pp. 30-39, 2014/11/01 2014.

[85] Y. Huang, R. Sass, and F. Fisher, "Methane emission from Texas rice paddy soils. 1. Quantitative multi-year dependence of CH4 emission on soil, cultivar and grain yield," vol. 3, no. 6, pp. 479-489, 1997.

[86] B. T. Nguyen, N. N. Trinh, and Q.-V. Bach, "Methane emissions and associated microbial activities from paddy salt-affected soil as influenced by biochar and cow manure addition," *Applied Soil Ecology,* vol. 152, p. 103531, 2020.

[87] S. Nardi, P. Carletti, D. Pizzeghello, and A. Muscolo, "Biological Activities of Humic Substances," *Biophysico-Chemical Processes Involving Natural Nonliving Organic Matter in Environmental Systems,* pp. 305-339, 08/05 2009.

[88] J. Lehmann, J. Gaunt, and M. Rondon, "Bio-char Sequestration in Terrestrial Ecosystems – A Review," *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change,* vol. 11, 06/27 2006.

[89] B. T. Nguyen, N. N. Trinh, C. M. T. Le, T. T. Nguyen, T. V. Tran, B. V.Thai, and T. V. Le., "The interactive effects of biochar and cow manure on rice growth and selected properties of salt-affected soil," *Archives of Agronomy and Soil Science,* vol. 64, no. 12, pp. 1744-1758, 2018/10/15 2018.

[90] N. C. Vinh, N. V. Hien, M. T. L. Anh, J. Lehmann, and S. Josep, "Biochar treatment and its effects on rice and vegetable yields in mountainous areas of northern Vietnam," *International Journal of Agricultural and Soil Science* vol. 2, no. 1, pp. 5-13, 2014.

[91] V. Thắng và N. H. Sơn, "Nghiên cứu ứng dụng than sinh học nâng cao sức sản xuất của đất - ảnh hưởng loại và lượng bón than sinh học đến sinh trưởng và năng suất lúa," *Tạp chí Khoa học và Công nghệ Nông nghiệp Việt Nam,* trang. 56-60, 2015.

[92] T. V. Công, "Nghiên cứu ứng dụng than sinh học từ phụ phẩm cây lúa để cải tạo môi trường đất xám bạc màu," Luận án tiến sĩ Khoa Môi trường và Tài nguyên Thiên nhiên, Trường Đại học Cần Thơ, 2015.

[93] V. T. Mai, "Nghiên cứu sử dụng rơm rạ sản xuất than sinh học nhằm cải tạo đất, giảm thiểu ô nhiễm môi trường tại Sóc Sơn - Hà Nội," 2012.

[94] L. X. Nguyen, P. T. M. Do, C. H. Nguyen, R. Kose, T. Okayama, T. N. Pham, P. D. Nguyen, and T. Miyanishi, "Properties of biochars prepared from local biomass in the Mekong Delta, Vietnam," *BioResources, Biochar; Physicochemical properties; Bamboo; Melaleuca; Rice husk; Water hyacinth* vol. 13, no. 4, 2018.

[95] H. Phuong, M. Azhar Uddin, and Y. Kato, "Characterization of biochar from pyrolysis of rice husk and rice straw," *Journal of Biobased Materials and Bioenergy,* vol. 9, pp. 439-446, 2015.

[96] T. Q. H. Nguyen, K. T. Le, M. K. Nguyen, and T. N. H. Le, "Potential of biochar production from agriculture residues at household scale: a case study in Go Cong Tay District, Tien Giang Province, Vietnam," *Environment and Natural Resources Journal,* vol. 16, 2018.

[97] D. Dong, Q. Feng, K. McGrouther, M. Yang, H. Wang, and W. Wu, "Effects of biochar amendment on rice growth and nitrogen retention in a waterlogged paddy field," *Journal of Soils and Sediments,* vol. 15, no. 1, pp. 153-162, 2015/01/01 2015.

[98] E. P. A. Pratiwi and Y. Shinogi, "Rice husk biochar application to paddy soil and its effects on soil physical properties, plant growth, and methane emission," *Paddy and Water Environment,* vol. 14, no. 4, pp. 521-532, 2016/10/01 2016.

[99] J. Wang, X. Pan, Y. Liu, X. Zhang, and Z. Xiong, "Effects of biochar amendment in two soils on greenhouse gas emissions and crop production," *Plant and Soil,* vol. 360, no. 1, pp. 287-298, 2012/11/01 2012.

[100] T. A. Thư, T. H. Khanh, N. N. Khánh, N. T. Hợp, và N. N. Hải, "Cải thiện dinh dưỡng trong đất và năng suất bắp lai thông qua sử dụng phân hữu cơ kết hợp than sinh học và phân đạm," *Tập chí Nông nghiệp và phát triển nông thôn,* tập. 2, trang. 65-72, 2019.

[101] L. H. Bá, *Những vấn đề đất phèn Nam Bộ*. Nhà xuất bản Thành phố Hồ Chí Minh, 1982.

[102] Viện Khoa học Nông nghiệp Việt Nam, *Tài nguyên đất Việt Nam: Hiện trạng và định hướng sử dụng bền vững*. Nhà xuất bản Khoa học tự nhiên và Công nghệ, 2018.

[103] Tổng cục thống kê, "Niên giám thống kê," Nhà xuất bản Thống kê, 2024.

[104] Đ. D. Lợi, N. T. K. Chương, Đ. V. Hương, và N. T. Nhu, *Giáo trình Địa lý tự nhiên Việt Nam (phần khu vực)*. Nhà xuất bản Đại Học Sư Phạm, 2013.

[105] Tổng cục thống kê, "Niên giám thống kê Thành phố Hồ Chí Minh - Nông nghiệp," Nhà xuất bản Thống kê, 2019.

[106] L. Thông, *Địa lý các tỉnh thành phố*. Nhà Xuất Bản Giáo Dục, 2006.

[107] M. Asadnabizadeh and E. Moe, "A review of Global Carbon Markets from Kyoto to Paris and beyond: The persistent failure of implementation," (in English), *Frontiers in Environmental Science,* Review vol. 12, 2024-July-02 2024.

[108] C. T. Barbato and A. L. Strong, "Farmer perspectives on carbon markets incentivizing agricultural soil carbon sequestration," *NPJ Climate Action,* vol. 2, no. 1, p. 26, 2023/09/25 2023.

[109] S. Biswas *et al.*, "Establishment of critical limits of indicators and indices of soil quality in rice-rice cropping systems under different soil orders," *Geoderma,* vol. 292, pp. 34-48, 2017/04/15/ 2017.

[110] M. S. Islam, M. K. Ahmed, M. Habibullah-Al-Mamun, and S. Masunaga, "Assessment of trace metals in foodstuffs grown around the vicinity of industries in Bangladesh," *Journal of Food Composition and Analysis,* vol. 42, pp. 8-15, 2015/09/01/ 2015.

[111] WRB, "World reference base for soil resources: International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps," Rome, 2015.

[112] M. R. Carter and E. G. Gregorich, *Soil sampling and methods of analysis, 2nd edition, Boca Raton: CRC Press, Taylor & Francis Group*. 2008.

[113] H. Wu and A. Cao, "Preparation and adding methods of Nessler's reagent having effects on determination of water quality ammonia nitrogen," *Advanced Materials Research,* vol. 726-731, pp. 1362-1366, 08/01 2013.

[114] J. Meija, A. Michałowska-Kaczmarczyk, and T. Michałowski, "Mohr's method challenge," *Analytical and Bioanalytical Chemistry,* vol. 408, pp. 1721-1722, 03/01 2016.

[115] E. W. Rice, R. B. Baird, and A. D. Eaton, *Standard methods for the examination of water and wastewater, 23rd Edition*. Washington, D.C.,

USA: American Public Health Association, American Water Works Association, Water Environment Federation, 2017.

[116] T. B. Nguyen, L. B. Le, L. P. Pham, H. T. Nguyen, T. D. Tran, and N. Van Thai, "The effects of biochar on the biomass yield of elephant grass (*Pennisetum Purpureum Schumach*) and properties of acidic soils," *Industrial Crops and Products,* vol. 161, p. 113224, 2021/03/01 2021.

[117] T. V. Le and B. T. Nguyen, "Heavy metal pollution in surface water bodies in provincial Khanh Hoa, Vietnam: Pollution and human health risk assessment, source quantification, and implications for sustainable management and development," *Environmental Pollution,* vol. 343, p. 123216, 2024.

[118] T. Chiroma, R. Ebewele, and F. Hymore, "Comparative assessment of heavy metal levels in soil, vegetables and urban grey waste water used for irrigation in Yola and Kano," *International refereed journal of engineering and science,* vol. 3, no. 2, pp. 01-09, 2014.

[119] S. V. Mohan, P. Nithila, and S. J. Reddy, "Estimation of heavy metals in drinking water and development of heavy metal pollution index," *Journal of Environmental Science & Health Part A,* vol. 31, no. 2, pp. 283-289, 1996.

[120] V. T. Nguyen, "Economic performance of rice production towards VietGap in Phong Binh, Phong Dien, Thua Thien Hue," *Hue University Journal of Science: Agriculture and Rural Development,* vol. 128, no. 3B, 2019.

[121] A. Zhang *et al.*, "Effects of biochar amendment on soil quality, crop yield and greenhouse gas emission in a Chinese rice paddy: A field study of 2 consecutive rice growing cycles," *Field Crops Research,* vol. 127, pp. 153-160, 2012.

[122] K. Minamikawa, T. Tokida, S. Sudo, A. Padre, and K. Yagi, "Guidelines for measuring CH4 and N2O emissions from rice paddies by a manually operated closed chamber method. National Institute for Agro-Environmental Sciences, Tsukuba, Japan," 2015.

[123] A. N. Le, T. N. Vo, V. H. Nguyen, and D. M. Nguyen, "Climate trends and climate change scenarios in Ho Chi Minh City," *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science,* vol. 964, no. 1, p. 012009, 2022/01/01 2022.

[124] H. M. Luu and N. H. Nguyen, "Effect of decomposed rice straw at different times on rice yield," *Omonrice,* vol. 14, pp. 58-63, 2006.

[125] V. V. Long, T. N. Nhanh, T. T. Tiền, H. V. Tài, N. P. Sang, N. T. Toàn, và L. T. T. Mai, "Ảnh hưởng của bón giảm phân đạm kết hợp biochar đến tính chất đất và năng suất lúa trong mô hình canh tác lúa - tôm tại huyện An Biên, tỉnh Kiên Giang," *Tạp chí Khoa học Đất,* tập. 64, trang. 17-21, 2021.

[126] L. V. Tân, C. M. Khôi, Đ. V. Tặng, và V. T. Gương, "Ảnh hưởng của ngập mặn đến diễn biến của natri và khả năng phóng thích đạm, lân dễ tiêu trong điều kiện phòng thí nghiệm," *Tạp chí Khoa học Trường Đại học Cần Thơ,* số. 32, trang. 33-39, 10/12 2014.

[127] T. V. Dũng, T. H. Khanh, Đ. Tân, và V. Long, "Đánh giá tiềm năng đất đai cho phát triển nông nghiệp vùng đất phèn mặn huyện Trần Văn Thời, tỉnh Cà Mau," tập. 67, trang. 64-72, 06/30 2022.

[128] V. T. Gương, N. D. Linh, and T. A. Thư, "Cải thiện đặc tính bất lợi của đất phèn nhiễm mặn và năng suất lúa qua sử dụng phân hữu cơ và vôi trong điều kiện nhà lưới," *Tạp chí Khoa học Đại học Cần Thơ,* tập. 54, trang. 65-74, 2018.

[129] R. Sanchez-Bragado *et al.*, "Are awns truly relevant for wheat yields? A study of performance of awned/awnless isogenic lines and their response to source–sink manipulations," *Field Crops Research,* vol. 254, p. 107827, 2020.

[130] V. Minh, V. Thanh, T. Hung, P. Dang, P. Phat, L. Vu, and T. Tuan, "Soil constraints and recommendations for improving major farming in Vinh Long province, Vietnam," 2025.

[131] B. Mills, C. Ta, D. P. Ta, and H. Nguyen, "Salinity inundation, profitability, and rice farming exits in the Mekong Delta of Vietnam," *Journal of the Agricultural and Applied Economics Association,* vol. 4, no. 2, pp. 170-186, 2025.

[132] L. Le Quang, V. Phan, K. Nghi, and M. Doan, "Study on economic efficiency in rice production of Cuu Long Delta," *Omonrice,* 2013.

[133] S. Liu, B. Cen, Z. Yu, R. Qiu, T. Gao, and X. Long, "The key role of biochar in amending acidic soil: reducing soil acidity and improving soil acid buffering capacity," *Biochar,* vol. 7, no. 1, p. 52, 2025.

[134] B. Glaser and V.-I. Lehr, "Biochar effects on phosphorus availability in agricultural soils: A meta-analysis," *Scientific reports,* vol. 9, no. 1, p. 9338, 2019.

[135] L. Zhang, L. Chang, H. Liu, M. de Jesus Puy Alquiza, and Y. Li, "Biochar application to soils can regulate soil phosphorus availability: A review," *Biochar,* vol. 7, no. 1, p. 13, 2025.

[136] K. Jindo, Y. Audette, F. S. Higashikawa, C. A. Silva, K. Akashi, G. Mastrolonardo, M. A. Sánchez-Monedero, and C. Mondini "Role of biochar in promoting circular economy in the agriculture sector. Part 1: A review of the biochar roles in soil N, P and K cycles," *Chemical and Biological Technologies in Agriculture,* vol. 7, no. 1, p. 15, 2020/07/13 2020.

[137] E. Kabir, K.-H. Kim, and E. E. Kwon, "Biochar as a tool for the improvement of soil and environment," *Frontiers in Environmental Science,* vol. 11, p. 1324533, 2023.

[138] H. Li, Y. Liu, Y. Chen, S. Wang, M. Wang, T. Xie, and G. Wang, "Biochar amendment immobilizes lead in rice paddy soils and reduces its phytoavailability," *Scientific Reports,* vol. 6, no. 1, p. 31616, 2016.

[139] L. Chen, L. Guo, X. Deng, X. Pan, P. Liao, Q. Xiong, H. Gao, H. Wei, Q. Dai, and Y. Zeng "Effects of biochar on rice yield, grain quality and starch viscosity attributes," *Journal of the Science of Food and Agriculture,* vol. 103, no. 12, pp. 5747-5753, 2023.

[140] F. Yang, B. Wang, Z. Shi, L. Li, Y. Li, Z. Mao, L. Liao, H. Zhang, and Y.Wu, "Immobilization of heavy metals (Cd, Zn, and Pb) in different contaminated soils with swine manure biochar," *Environmental Pollutants and Bioavailability,* vol. 33, no. 1, pp. 55-65, 2021.

[141] J. H. Park, G. K. Choppala, N. S. Bolan, J. W. Chung, and T. Chuasavathi, "Biochar reduces the bioavailability and phytotoxicity of heavy metals," *Plant and Soil,* vol. 348, pp. 439-451, 2011.

[142] W. Lu, W. Ding, J. Zhang, Y. Li, J. Luo, N. Bolan, and Z. Xie, "Biochar suppressed the decomposition of organic carbon in a cultivated sandy loam soil: A negative priming effect," *Soil Biology and Biochemistry,* vol. 76, pp. 12-21, 2014.

[143] B. P. Singh, B. J. Hatton, B. Singh, A. L. Cowie, and A. Kathuria, "Influence of biochars on nitrous oxide emission and nitrogen leaching from two contrasting soils," *Journal of Environmental Quality,* vol. 39, no. 4, pp. 1224-1235, 2018.

[144] J. Lehmann, & Joseph, S, *Biochar for Environmental Management: Science and Technology*. Earthscan, 2009.

[145] S. Jeffery, F. G. A. Verheijen, M. Van der Velde, and A. C. Bastos, "A quantitative review of the effects of biochar application to soils on crop productivity using meta-analysis," *Agriculture, Ecosystems & Environment,* vol. 144, no. 1, pp. 175-187, 2011.

[146] J. Lehmann and S. Joseph, "Biochar for Environmental Management: Science, Technology and Implementation," 2015.

[147] B. Glaser, J. Lehmann, and W. Zech, "Ameliorating physical and chemical properties of highly weathered soils in the tropics with charcoal – A review," *Biology and Fertility of Soils,* vol. 35, no. 4, pp. 219-230, 2002.

[148] C. Beusch, "Biochar as a soil ameliorant: How biochar properties benefit soil fertility—A review," *Journal of Geoscience and Environment Protection,* vol. 9, no. 10, pp. 28-46, 2021.

[149] M. Bedassa, "Soil acid management using biochar: Review," *International Journal of Agricultural Science and Food Technology,* vol. 6, pp. 211-217, 2020.

[150] M. Bekchanova *et al.*, "Biochar improves the nutrient cycle in sandy-textured soils and increases crop yield: a systematic review," *Environmental evidence,* vol. 13, no. 1, p. 3, 2024.

[151] T. T. N. Nguyen, C. Y. Xu, I. Tahmasbian, R. Che, Z. Xu, X. Zhou, and H. M. Wallace, "Effects of biochar on soil available inorganic nitrogen: A review and meta-analysis," *Geoderma,* vol. 288, pp. 79-96, 2017.

[152] D. A. Laird, P. Fleming, B. Wang, R. Horton, and D. L. Karlen, "Biochar impact on nutrient leaching from a Midwestern agricultural soil," *Geoderma,* vol. 158, no. 3-4, pp. 436-442, 2010.

[153] R. Shetty and N. B. Prakash, "Effect of different biochars on acid soil and growth parameters of rice plants under aluminium toxicity," *Scientific Reports,* vol. 10, no. 1, p. 12249, 2020/07/23 2020, doi: 10.1038/s41598-020-69262-x.

[154] N. Zhang, J. Xing, L. Wei, C. Liu, W. Zhao, Z. Liu, Y. Wang, E. Liu, X. Ren, and Z. Jia "The potential of biochar to mitigate soil acidification: a global meta-analysis," *Biochar,* vol. 7, no. 1, p. 49, 2025.

[155] A. Mishra, K. Taing, M. Hall, and Y. Shinogi, "Effects of Rice Husk and Rice Husk Charcoal on Soil Physicochemical Properties, Rice Growth and Yield " *Agricultural Sciences* vol. 8, no. 9, pp. 1014-1032, 2017.

[156] N. Ali, Q. Jiang, K. Akhtar, R. Luo, M. Jiang, B. He, and R. Wen, "Biochar and manure co-application improves soil health and rice productivity through microbial modulation," *BMC Plant Biology,* vol. 25, no. 1, p. 914, 2025.

[157] C. Yang, S. Dou, D. Guo, and H. Zhao, "The application of biochar enhances soil organic carbon and rice yields," *Agronomy,* vol. 14, no. 3, p. 455, 2024.

[158] R. Premalatha *et al.*, "A review on biochar's effect on soil properties and crop growth," *Frontiers in Energy Research,* vol. 11, p. 1092637, 2023.

[159] H. P. Dong, B. T. Nguyen, A. H. Le, and G. Dai Dinh, "Seasonal variation-dependent biochar impacts on coastal acid-sulfate soil in paddy fields and the consequences on rice growth and yield," *Geoderma Regional,* vol. 39, p. e00878, 2024.

[160] S. Joseph, A. L. Cowie, L. Van Zwieten, N. Bolan, A. Budai, W. Buss, M. L. Cayuela, E. R. Graber, J. A. Ippolito, and Y. Kuzyakov, "How biochar works, and when it doesn't: A review of mechanisms controlling soil and plant responses to biochar," *GCB Bioenergy,* vol. 13, no. 11, pp. 1731-1764, 2021.

[161] S. Demirkaya, A. Ay, C. Gülser, and R. Kızılkaya, "Enhancing Clay Soil Productivity with Fresh and Aged Biochar: A Two-Year Field Study on Soil Quality and Wheat Yield," *Sustainability,* vol. 17, no. 2, p. 642, 2025.

[162] F. Verheijen, S. Jeffery, A. Bastos, M. Van der Velde, and I. Diafas, "Biochar application to soils," *A critical scientific review of effects on soil properties, processes, and functions. EUR,* vol. 24099, no. 162, pp. 2183-2207, 2010.

[163] Z. Wu, K. A. Firmin, M. Cheng, H. Wu, and Y. Si, "Biochar enhanced Cd and Pb immobilization by sulfate-reducing bacterium isolated from acid mine drainage environment," *Journal of Cleaner Production,* vol. 366, p. 132823, 2022.

[164] M. Majewska and A. Hanaka, "Biochar in the Bioremediation of Metal-Contaminated Soils," *Agronomy,* vol. 15, no. 2, p. 273, 2025.

[165] Z. Liu, Z. Xu, L. Xu, F. Buyong, T. C. Chay, Z. Li, Y. Cai, B. Hu, Y. Zhu, and X. Wang, "Modified biochar: synthesis and mechanism for removal of environmental heavy metals," *Carbon Research,* vol. 1, no. 1, p. 8, 2022.

[166] J. Zhang, C. Li, G. Li, Y. He, J. Yang, and J. Zhang, "Effects of biochar on heavy metal bioavailability and uptake by tobacco (Nicotiana tabacum) in two soils," *Agriculture, Ecosystems & Environment,* vol. 317, p. 107453, 2021.

[167] J. Wang, L. Shi, L. Zhai, H. Zhang, S. Wang, J. Zou, Z. Shen, C. Lian, and Y. Chen, "Analysis of the long-term effectiveness of biochar immobilization remediation on heavy metal contaminated soil and the potential environmental factors weakening the remediation effect: A review," *Ecotoxicology and Environmental Safety,* vol. 207, p. 111261, 2021.

[168] J. Qin, X. Wang, J. Ying, and C. Lin, "Biochar is not durable for remediation of heavy metal-contaminated soils affected by acid-mine drainage," *Toxics,* vol. 10, no. 8, p. 462, 2022.

[169] R. Carnier, C. A. De Abreu, C. A. De Andrade, A. O. Fernandes, A. P. D. Silveira, and A. R. Coscione, "Soil quality index as a tool to assess biochars soil quality improvement in a heavy metal-contaminated soil," *Environmental Geochemistry and Health,* vol. 45, no. 8, pp. 6027-6041, 2023.

[170] S. Jeffery, F. G. Verheijen, M. van der Velde, and A. C. Bastos, "A quantitative review of the effects of biochar application to soils on crop productivity using meta-analysis," *Agriculture, ecosystems & environment,* vol. 144, no. 1, pp. 175-187, 2011.

[171] J. Lehmann and S. Joseph, *Biochar for environmental management: science and technology*. Routledge, 2012.

[172] C. Singh, S. Tiwari, V. K. Gupta, and J. S. Singh, "The effect of rice husk biochar on soil nutrient status, microbial biomass and paddy productivity of nutrient poor agriculture soils," *Catena,* vol. 171, pp. 485-493, 2018.

[173] R. Wang, S. Wei, P. Jia, T. Liu, D. Hou, R. Xie, Z. Lin, J. Ge, Y. Qiao, and X. Chang, "Biochar significantly alters rhizobacterial communities and reduces Cd concentration in rice grains grown on Cd-contaminated soils," *Science of the Total Environment,* vol. 676, pp. 627-638, 2019.

[174] J. Gao, L. Liu, Z. Shi, and J. Lv, "Biochar amendments facilitate methane production by regulating the abundances of methanogens and methanotrophs in flooded paddy soil," *Frontiers in Soil Science,* vol. 2, p. 801227, 2022.

[175] Y. Chen, M. Xu, L. Yang, H. Jing, W. Mao, J. Liu, Y. Zou, Y. Wu, H. Zhou, and W. Yang, "A critical review of biochar application for the remediation of greenhouse gas emissions and nutrient loss in rice paddies: characteristics, mechanisms, and future recommendations," *Agronomy,* vol. 13, no. 3, p. 893, 2023.

[176] N. Lokuge and S. Anders, "Carbon-credit systems in agriculture: a review of literature," *The School of Public Policy Publications,* vol. 15, 2022.

[177] T. X. T. Nguyen, B. T. Nguyen, and B. V. Thai, "Amelioration of salt-affected soil using combined amendments for synergistic effects: Impacts and management implications," *Soil Use and Management,* vol. 40, no. 3, p. e13104, 2024.

[178] T. B. Nguyen, G. D. Dinh, T. X. Nguyen, D. T. P. Nguyen, T. N. Vu, H. T.T. Tran, N. Van Thai, H. Vu, and D. D. Do, "The potential of biochar to ameliorate the major constraints of acidic and salt-affected soils," *Journal of Soil Science and Plant Nutrition,* vol. 22, no. 2, pp. 1340-1350, 2022.

[179] S. Munda, A. K. Nayak, M. Shahid, D. Bhaduri, D. Chatterjee, S. Mohanty, R. Tripathi, U. Kumar, A. Kumar, R. Khanam, and N. Jambhulkar, "Soil quality assessment of lowland rice soil of eastern India: Implications of rice husk biochar application," *Heliyon,* vol. 9, no. 7, p. e17835, 2023.

[180] B. T. Nguyen, Dinh, G. D., Dong, H. P., & Le, L. B., "Sodium adsorption isotherm and characterization of biochars produced from various agricultural biomass wastes," *Journal of Cleaner Production,* 2022.

[181] Í. V. d. Nascimento, L. G. Fregolente, A. P. d. A. Pereira, C. D. V. d. Nascimento, J. C. A. Mota, O. P. Ferreira, H. H. d. F. Sousa, D. G. G. d. Silva, L. R. Simões, A. G. Souza Filho, and M. C. G. Costa, "Biochar as a carbonaceous material to enhance soil quality in drylands ecosystems: A review," *Environmental Research,* vol. 233, p. 116489, 2023.

[182] N. Geng, X. Kang, X. Yan, N. Yin, H. Wang, H. Pan, Q. Yang, Y. Lou, and Y. Zhuge, "Biochar mitigation of soil acidification and carbon sequestration

is influenced by materials and temperature," *Ecotoxicology Environment Safety,* vol. 232, p. 113241, 2022/03/01 2022.

[183] R. Xiong, X. He, N. Gao, Q. Li, Z. Qiu, Y. Hou, and W. Shen, "Soil pH amendment alters the abundance, diversity, and composition of microbial communities in two contrasting agricultural soils," (in eng), *Microbiology Spectrum,* vol. 12, no. 8, p. e0416523, Aug 6 2024.

[184] M. Stoykova, I. Atanassova, M. Benkova, T. Simeonova, L. Nenova, M. Harizanova, and M. Atsenova, "Positive effect of biochar application on soil properties: Solubility and speciation of heavy metals in non-acidic contaminated soils near a steel metallurgical plant in Southeastern Europe," *Sustainability,* vol. 16, no. 16, p. 6891, 2024.

[185] P. Subramanian, K. Pandian, S. Pakkiyam, K. v. Dhanuskodi, S. Annamalai, P. Padanillay Chidambaram, and M. R. A. F. Mustaffa "Biochar for heavy metal cleanup in soil and water: A review," *Biomass Conversion and Biorefinery,* 2024/08/06 2024.

[186] D. Mohan, K. Abhishek, M. Patel, and C. Pittman, "Harnessing Biochar in Contaminated Soil for Heavy Metal Immobilization, Soil Health Enhancement, and Carbon Sequestration," *Industrial & Engineering Chemistry Research,* vol. 63, no. 23, pp. 10380-10396, 2024/06/12 2024.

[187] B. K. Biswal and R. Balasubramanian, "Use of biochar as a low-cost adsorbent for removal of heavy metals from water and wastewater: A review," *Journal of Environmental Chemical Engineering,* vol. 11, no. 5, p. 110986, 2023/10/01/ 2023.

[188] R. Conrad, "Methane Production in Soil Environments-Anaerobic Biogeochemistry and Microbial Life between Flooding and Desiccation," (in eng), *Microorganisms,* vol. 8, no. 6, Jun 11 2020.

[189] S. Somboon, B. Rossopa, S. Yodda, T.-S. Sukitprapanon, A. Chidthaisong, and P. Lawongsa, "Mitigating methane emissions and global warming potential while increasing rice yield using biochar derived from leftover rice straw in a tropical paddy soil," *Scientific Reports,* vol. 14, no. 1, p. 8706, 2024/04/15 2024,.

[190] B. T. Nguyen and V. N. Nguyen, "Biochar addition balanced methane emissions and rice growth by enhancing the quality of paddy soil," *Journal of Soil Science and Plant Nutrition,* vol. 23, no. 3, pp. 2998-3009, 2023.

[191] Q. Nan, C. wang, Q. Yi, L. Zhang, F. Ping, J. E. Thies, and W. Wu, "Biochar amendment pyrolysed with rice straw increases rice production and mitigates methane emission over successive three years," *Waste Management,* vol. 118, pp. 1-8, 2020/12/01/ 2020.

[192] Q. Nan, L. Xin, Y. Qin, M. Waqas, and W. Wu, "Exploring long-term effects of biochar on mitigating methane emissions from paddy soil: A review," *Biochar,* vol. 3, no. 2, pp. 125-134, 2021/06/01 2021.

[193] T. B. Nguyen, N. N. Trinh, and Q.-V. Bach, "Methane emissions and associated microbial activities from paddy salt-affected soil as influenced by biochar and cow manure addition," *Applied Soil Ecology,* vol. 152, p. 103531, 2020/08/01 2020.

[194] M. Li, W. Sun, W. Ding, P. He, X. Wang, and Y. Wang, "Methane oxidation characteristics of biochar-methanotroph amended cover soil in landfill," *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering,* vol. 40, no. 10, pp. 239-246, 2024.

[195] S. Yang, Y. n. Xiao, X. Sun, J. Ding, Z. Jiang, and J. Xu, "Biochar improved rice yield and mitigated CH4 and N2O emissions from paddy field under controlled irrigation in the Taihu Lake Region of China," *Atmospheric Environment,* vol. 200, pp. 69-77, 2019/03/01/ 2019.

[196] D. Woolf, J. E. Amonette, F. A. Street-Perrott, J. Lehmann, and S. Joseph, "Sustainable biochar to mitigate global climate change," *Nature communications,* vol. 1, no. 1, p. 56, 2010.

[197] S. P. Sohi, E. Krull, E. Lopez-Capel, and R. Bol, "A review of biochar and its use and function in soil," *Advances in agronomy,* vol. 105, pp. 47-82, 2010.

PHỤ LỤC

Phụ lục 1: Các bảng trình bày chi tiết các công thức thí nghiệm của tất cả các thí nghiệm trong luận án

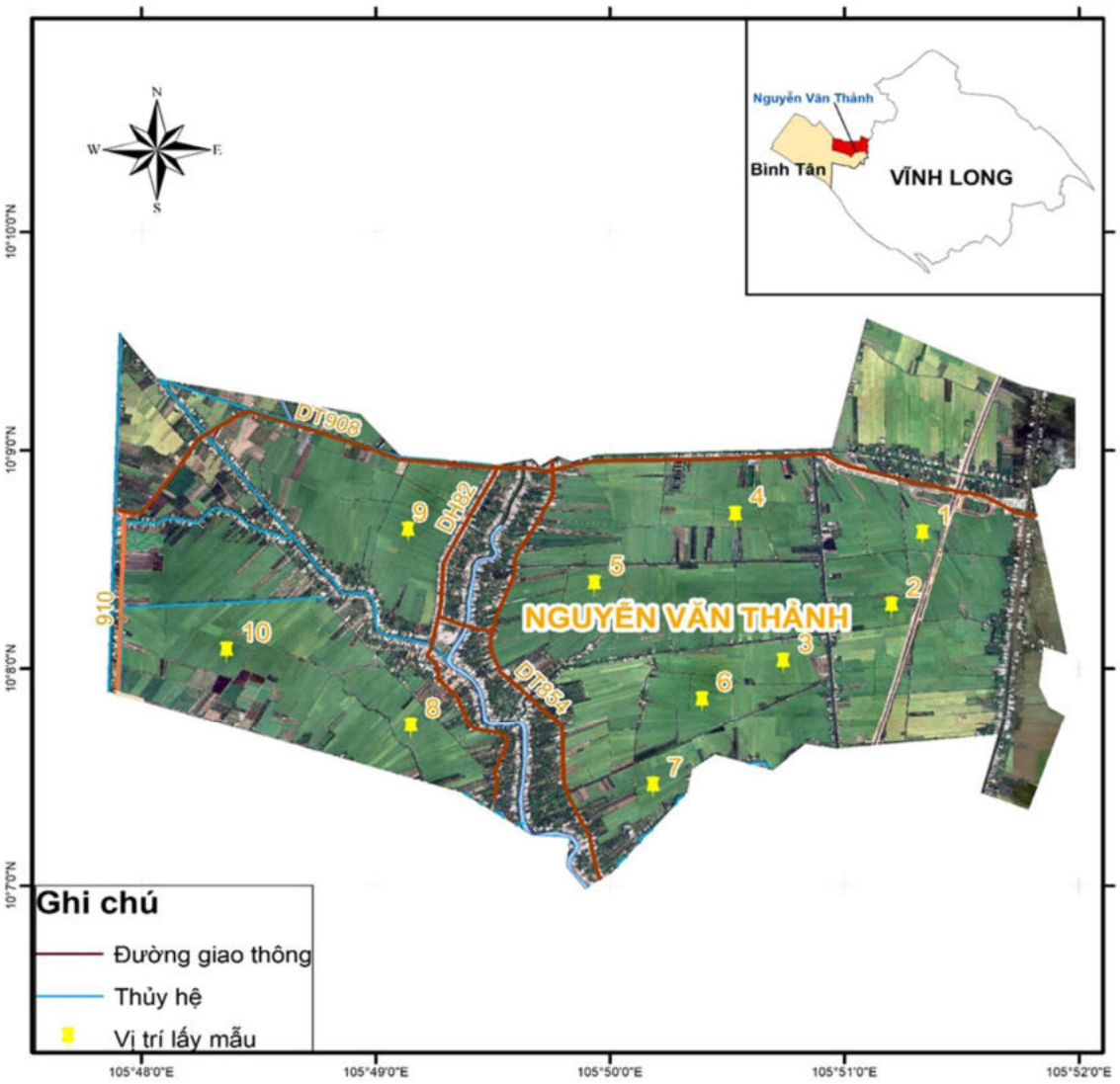
Bảng 1.1. Công thức cho thí nghiệm canh tác lúa quy mô nhà lưới

Lần nhắc	Công thức	Loại than	Tỷ lệ than (tấn/ha)
1	CT1	Không sử dụng than	0
	CT2	Than trấu	10
	CT3	Than nhãn	10
2	CT1	Không sử dụng than	0
	CT2	Than trấu	10
	CT3	Than nhãn	10
3	CT1	Không sử dụng than	0
	CT2	Than trấu	10
	CT3	Than nhãn	10

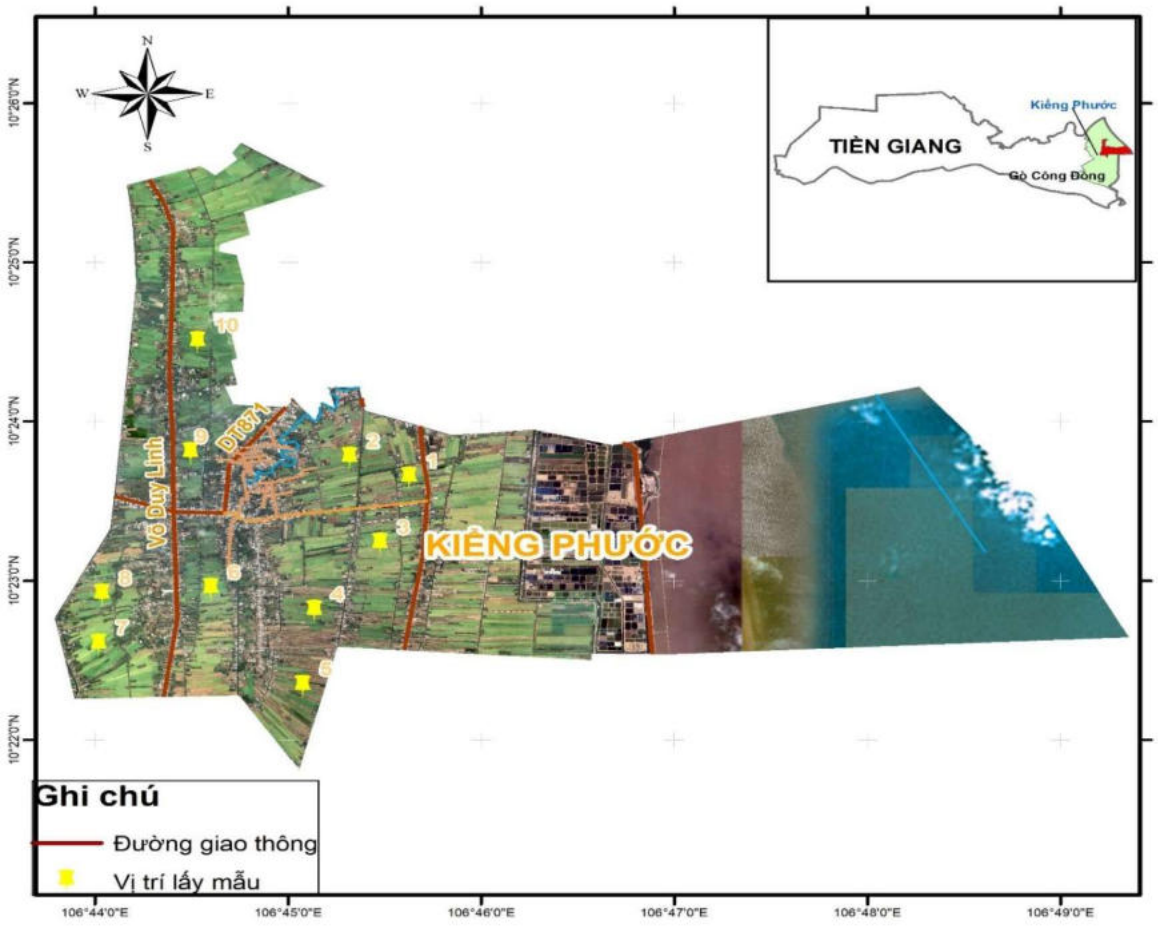
Bảng 1.2. Công thức cho thí nghiệm canh tác lúa quy mô thực địa

Lần nhắc	Công thức	Loại than	Tỷ lệ than (tấn/ha)	Diện tích ô (m^2)	Lượng than (kg)/1 ô thí nghiệm
1	CT1	Không sử dụng than	0	12	0
	CT2	Trấu	10		12
	CT3	Trấu	20		24
	CT4	Nhãn	10		12
	CT5	Nhãn	20		24
2	CT1	Không sử dụng than	0	12	0
	CT2	Trấu	10		12
	CT3	Trấu	20		24
	CT4	Nhãn	10		12
	CT5	Nhãn	20		24
3	CT1	Không sử dụng than	0	12	0
	CT2	Trấu	10		12
	CT3	Trấu	20		24
	CT4	Nhãn	10		12
	CT5	Nhãn	20		24

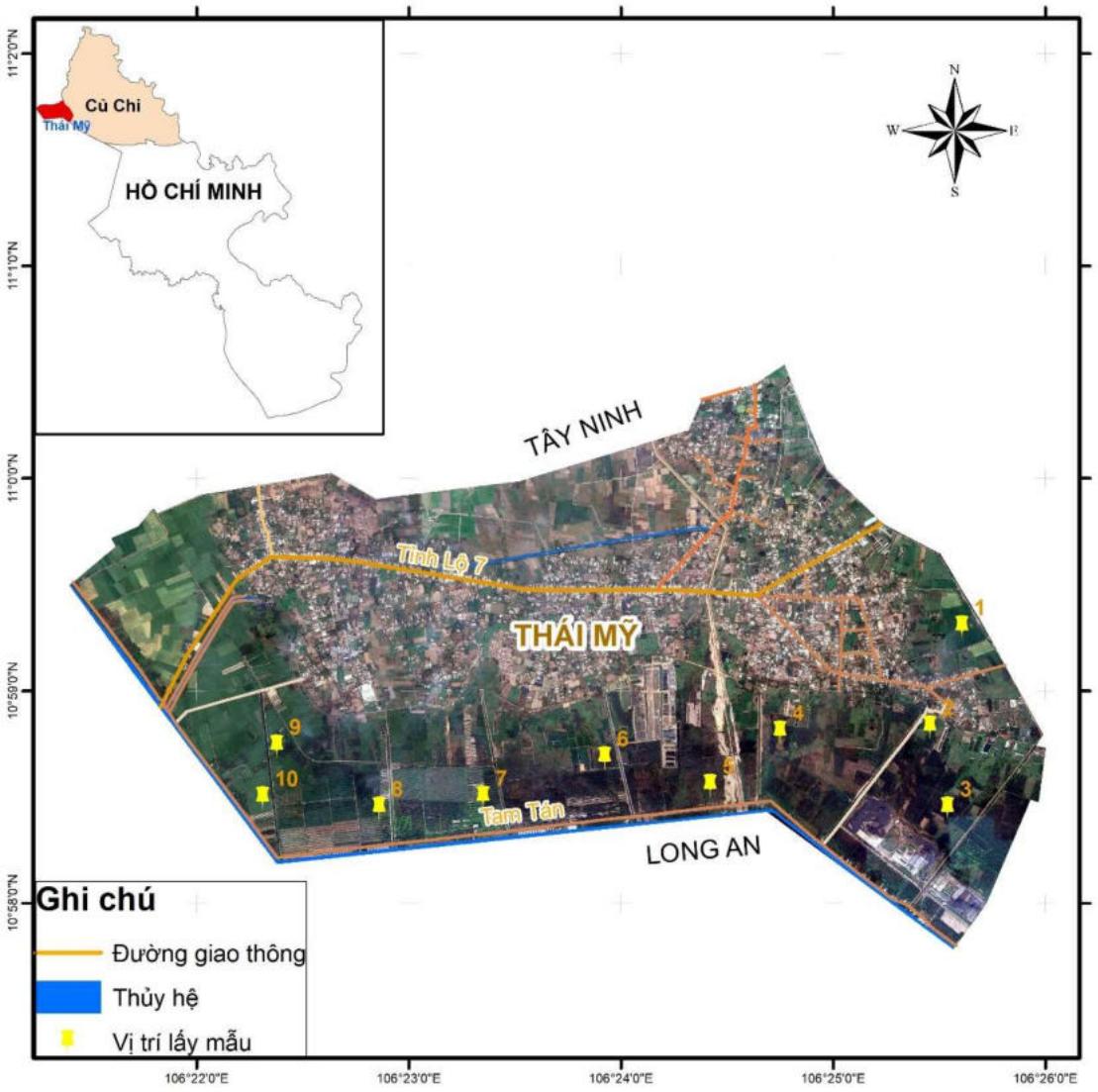
Phụ lục 2: Bản đồ vị trí lấy mẫu khảo sát và sơ đồ bố trí thí nghiệm của tất cả các thí nghiệm trong luận án



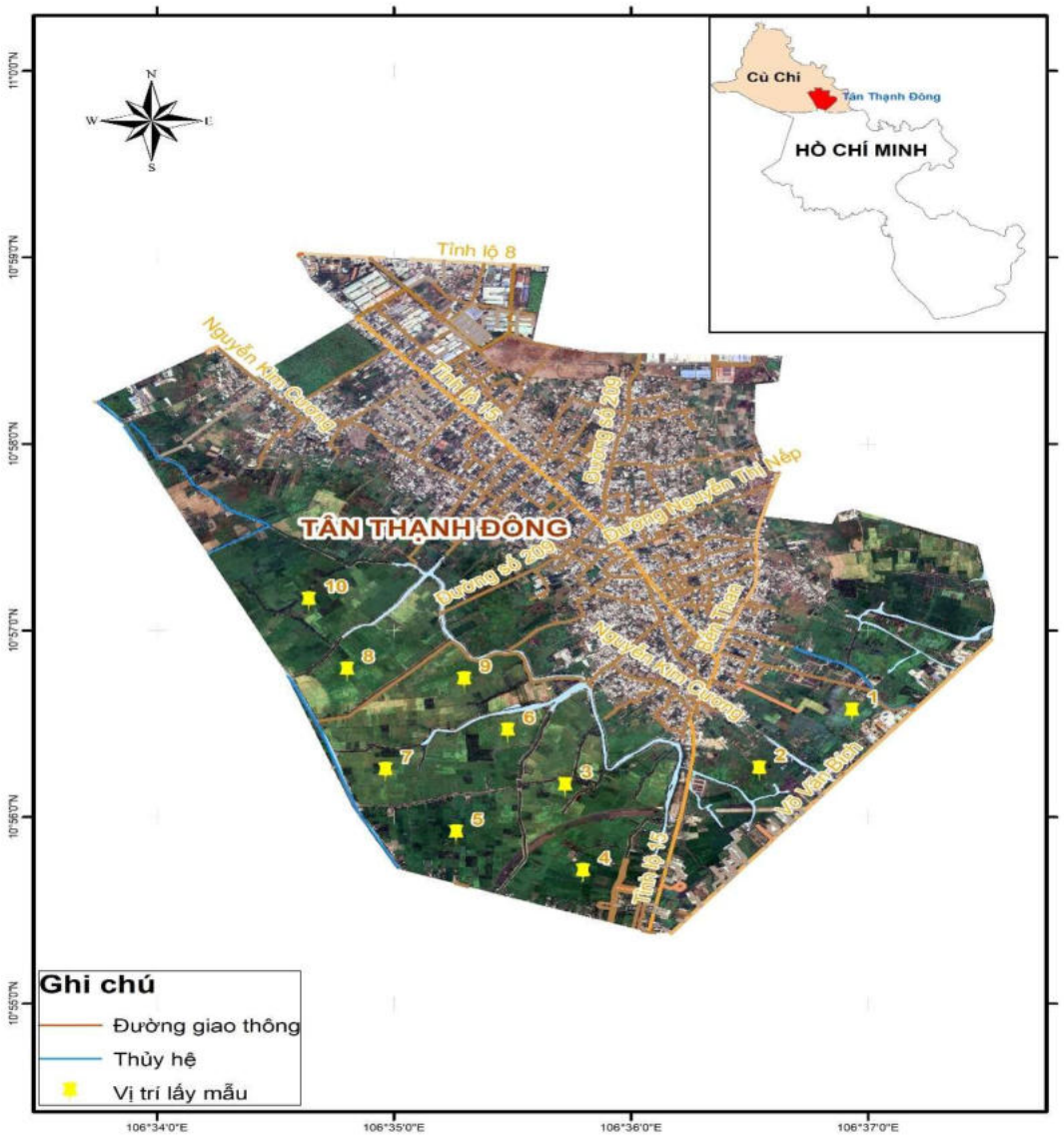
Hình 2.1. Vị trí lấy mẫu đất phù sa canh tác lúa nước



Hình 2.2. Vị trí lấy mẫu đất mặn canh tác lúa nước



Hình 2.3. Vị trí lấy mẫu đất xám canh tác lúa nước



Hình 2.4. Vị trí lấy mẫu đất phèn canh tác lúa nước

<table>
<tr><td rowspan="11">Mương nước 1m</td><td>(Ô:15)
Công thức: CT5
Than: nhãn, 24kg</td><td>1m</td><td>(Ô:10)
Công thức: CT4
Than: nhãn, 12 kg</td><td>1m</td><td>(Ô:5)
Công thức: CT2
Than: trấu, 12kg</td><td>3m</td></tr>
<tr><td colspan="5">Mương nước</td><td>1m</td></tr>
<tr><td>(Ô:14)
Công thức: CT3
Than: trấu, 24kg</td><td>1m</td><td>(Ô:9)
Công thức: CT1
Than: không than</td><td>1m</td><td>(Ô:4)
Công thức: CT5
Than: nhãn, 24kg</td><td>3m</td></tr>
<tr><td colspan="5">Mương nước</td><td>1m</td></tr>
<tr><td>(Ô:13)
Công thức: CT2
Than: trấu, 12kg</td><td>1m</td><td>(Ô:8)
Công thức: CT5
Than: nhãn, 24kg</td><td>1m</td><td>(Ô:3)
Công thức: CT3
Than: trấu, 24kg</td><td>3m</td></tr>
<tr><td colspan="5">Mương nước</td><td>1m</td></tr>
<tr><td>(Ô:12)
Công thức: CT1
Than: không than</td><td>1m</td><td>(Ô:7)
Công thức: CT2
Than: trấu, 12kg</td><td>1m</td><td>(Ô:2)
Công thức: CT4
Than: nhãn, 12 kg</td><td>3m</td></tr>
<tr><td colspan="5">Mương nước</td><td>1m</td></tr>
<tr><td>(Ô:11)
Công thức: CT4
Than: nhãn, 12 kg</td><td rowspan="2">1m</td><td>(Ô:6)
Công thức: CT3
Than: trấu, 24kg</td><td rowspan="2">1m</td><td>(Ô:1)
Công thức: CT1
Than: không than</td><td>3m</td></tr>
<tr><td>4m, lần nhắc 1</td><td>4m, lần nhắc 2</td><td>4m, lần nhắc 3</td><td></td></tr>
</table>

Hình 2.5. Sơ đồ bố trí thí nghiệm canh tác lúa nước

Phụ lục 3: Các bảng trình bày các yếu tố cấu thành kết quả tính toán hiệu quả kinh tế mô hình sản xuất lúa trên các loại đất khác nhau

Bảng 3.1. Hiệu quả kinh tế mô hình sản xuất lúa trên đất phèn

Thông tin chung	**Địa điểm**	**Củ Chi**					
	Loại đất	**Phèn**					
	Diện tích theo vụ (ha)	**Vụ Hè Thu**			**Vụ Đông Xuân**		
		0,57			0,76		
Vật chất	Vụ	Hè Thu	Đông Xuân	Hè Thu	Đông Xuân	Hè Thu	Đông Xuân
	Đơn vị tính	*Lượng sử dụng (tấn/ha)*		*Đơn giá (đồng/tấn)*		*Thành tiền (đồng/tấn)*	
	Giống OM18	0,07	0,10	11.500.000	11.500.000	852.150	1.136.200
	Đạm	0,07	0,09	11.900.000	11.900.000	813.960	1.085.280
	Lân	0,09	0,11	5.900.000	5.900.000	504.450	672.600
	Kali	0,03	0,05	10.500.000	10.500.000	359.100	478.800
	DAP	0,06	0,08	15.900.000	15.900.000	951.615	1.268.820
	Vôi	0,57	0,76	8.000.000	8.000.000	4.560.000	6.080.000
	Đơn vị tính	*Lượng sử dụng (chai/ha)*		*Đơn giá (đồng/chai)*		*Thành tiền (đồng/ha)*	
	Thuốc BVTV	4,0	4,0	250.000	250.000	1.000.000	1.000.000
Lao động	*Đơn vị tính*	*Công (công/ha)*		*Đơn giá (đồng/ha)*		*Thành tiền (đồng/ha)*	
	Làm đất	10	10	240.000	240.000	2.400.000	2.400.000
	Gieo xạ	10	10	300.000	300.000	3.000.000	3.000.000
	Chăm sóc	40	40	300.000	300.000	12.000.000	12.000.000
	Thu hoạch	10	10	260.000	260.000	2.600.000	2.600.000
Tổng chi (vật chất + lao động)						29.041.275	31.721.700
Sản phẩm thu	*Đơn vị tính*	*Năng suất (tấn/ha)*		*Đơn giá (đồng/tấn)*		*Thành tiền (đồng/tấn)*	
	Lúa	5,05	6,2	6.800.000	6.800.000	34.340.000	42.160.000
	Đơn vị tính	*Cuộn (cuộn/ha)*		*Đơn giá (cuộn)*		*Thành tiền (đồng/ha)*	
	Rơm	111	136	20.000	20.000	2.220.000	2.720.000
Tổng thu (lúa + rơm)						36.560.000	44.880.000
Hiệu quả kinh tế (Tổng thu – Tổng chi)						7.518.725	13.158.300

Bảng 3.2. Hiệu quả kinh tế mô hình sản xuất lúa trên đất phù sa

Thông tin chung	**Địa điểm**	**Vĩnh Long**					
	Loại đất	**Phù sa**					
	Diện tích theo vụ (ha)	**Vụ Hè Thu**			**Vụ Đông Xuân**		
		1,03			1,5		
Vật chất	Vụ	Hè Thu	Đông Xuân	Hè Thu	Đông Xuân	Hè Thu	Đông Xuân
	Đơn vị tính	*Lượng sử dụng (tấn/ha)*		*Đơn giá (đồng/tấn)*		*Thành tiền (đồng/tấn)*	
	Giống OM380	0,15	0,23	13.000.000	13.000.000	2.008.500	2.925.000
	Đạm	0,12	0,18	14.900.000	14.900.000	1.841.640	2.682.000
	Lân	0,12	0,18	7.200.000	7.200.000	889.920	1.296.000
	Kali	0,15	0,23	11.500.000	11.500.000	1.776.750	2.587.500
	DAP	0,15	0,23	17.900.000	17.900.000	2.765.550	4.027.500
	Đơn vị tính	*Lượng sử dụng (chai/ha)*		*Đơn giá (đồng/chai)*		*Thành tiền (đồng/ha)*	
	Thuốc BVTV	6,0	6,0	235.000	235.000	1.410.000	1.410.000
Lao động	*Đơn vị tính*	*Công (công/ha)*		*Đơn giá (đồng/ha)*		*Thành tiền (đồng/ha)*	
	Làm đất	12	14	250.000	250.000	3.000.000	3.500.000
	Gieo xạ	12	14	315.000	315.000	3.780.000	4.410.000
	Chăm sóc	30	35	315.000	315.000	9.450.000	11.025.000
	Thu hoạch	15	18	250.000	250.000	3.750.000	4.500.000
Tổng chi (vật chất + lao động)						30.672.360	38.363.000
Sản phẩm thu	*Đơn vị tính*	*Năng suất (tấn/ha)*		*Đơn giá (đồng/tấn)*		*Thành tiền (đồng/tấn)*	
	Lúa	6,2	7,6	7.200.000	7.200.000	44.640.000	54.720.000
	Đơn vị tính	*Cuộn (cuộn/ha)*		*Đơn giá (cuộn)*		*Thành tiền (đồng/ha)*	
	Rơm	183	226	22.000	22.000	4.026.000	4.972.000
Tổng thu (lúa + rơm)						48.666.000	59.692.000
Hiệu quả kinh tế (Tổng thu – Tổng chi)						17.993.640	21.329.000

Bảng 3.3. Hiệu quả kinh tế mô hình sản xuất lúa trên đất mặn

Thông tin chung	**Địa điểm**	**Tiền Giang**					
	Loại đất	**Mặn**					
	Diện tích theo vụ (ha)	**Vụ Hè Thu**			**Vụ Đông Xuân**		
		0,8			1,3		
Vật chất	Vụ	Hè Thu	Đông Xuân	Hè Thu	Đông Xuân	Hè Thu	Đông Xuân
	Đơn vị tính	*Lượng sử dụng (tấn/ha)*		*Đơn giá (đồng/tấn)*		*Thành tiền (đồng/tấn)*	
	Giống ST25	0,11	0,18	13.500.000	13.500.000	61.600.000	73.700.000
	Đạm	0,12	0,20	14.900.000	14.900.000	3.280.000	3.960.000
	Lân	0,08	0,13	7.200.000	7.200.000	1.512.000	2.457.000
	Kali	0,12	0,20	11.500.000	11.500.000	1.788.000	2.905.500
	DAP	0,12	0,20	17.900.000	17.900.000	2.148.000	3.490.500
	Đơn vị tính	*Lượng sử dụng (chai/ha)*		*Đơn giá (đồng/chai)*		*Thành tiền (đồng/ha)*	
	Thuốc BVTV	3,0	3,0	175.000	175.000	525.000	525.000
Lao động	*Đơn vị tính*	*Công (công/ha)*		*Đơn giá (đồng/ha)*		*Thành tiền (đồng/ha)*	
	Làm đất	10	12	250.000	250.000	2.500.000	3,000,000
	Gieo xạ	10	12	300.000	300.000	3.000.000	3,600,000
	Chăm sóc	25	30	300.000	300.000	7.500.000	9,000,000
	Thu hoạch	20	24	270.000	270.000	5.400.000	6.480.000
Tổng chi (vật chất + lao động)						26.329.000	34.636.500
Sản phẩm thu	*Đơn vị tính*	*Năng suất (tấn/ha)*		*Đơn giá (đồng/tấn)*		*Thành tiền (đồng/tấn)*	
	Lúa	5,6	6,7	11.000.000	11.000.000	61.600.000	73.700.000
	Đơn vị tính	*Cuộn (cuộn/ha)*		*Đơn giá (cuộn)*		*Thành tiền (đồng/ha)*	
	Rơm	164	198	20.000	20.000	3.280.000	3.960.000
Tổng thu (lúa + rơm)						64.880.000	77.660.000
Hiệu quả kinh tế (Tổng thu – Tổng chi)						38.551.000	43.023.500

Bảng 3.4. Hiệu quả kinh tế mô hình sản xuất lúa trên đất xám

Thông tin chung	**Địa điểm**	**Củ Chi**					
	Loại đất	**Xám**					
	Diện tích theo vụ (ha)	**Vụ Hè Thu**			**Vụ Đông Xuân**		
		0,53			1,14		
Vật chất	Vụ	Hè Thu	Đông Xuân	Hè Thu	Đông Xuân	Hè Thu	Đông Xuân
	Đơn vị tính	*Lượng sử dụng (tấn/ha)*		*Đơn giá (đồng/tấn)*		*Thành tiền (đồng/tấn)*	
	Giống OM18	0,08	0,17	11.000.000	11.000.000	874.500	1.881.000
	Đạm	0,10	0,21	14.000.000	14.000.000	1.335.600	2.872.800
	Lân	0,05	0,11	7.500.000	7.500.000	397.500	855.000
	Kali	0,08	0,17	11.500.000	11.500.000	914.250	1.966.500
	DAP	0,08	0,17	17.000.000	17.000.000	1.351.500	2.907.000
	Đơn vị tính	*Lượng sử dụng (chai/ha)*		*Đơn giá (đồng/chai)*		*Thành tiền (đồng/ha)*	
	Thuốc BVTV	3,0	3,0	200.000	200.000	600.000	600.000
Lao động	*Đơn vị tính*	*Công (công/ha)*		*Đơn giá (đồng/ha)*		*Thành tiền (đồng/ha)*	
	Làm đất	10	15	230.000	230.000	2.300.000	3.450.000
	Gieo xạ	10	15	320.000	320.000	3.200.000	4.800.000
	Chăm sóc	30	35	320.000	320.000	9.600.000	11.200.000
	Thu hoạch	20	25	270.000	270.000	5.400.000	6.750.000
Tổng chi (vật chất + lao động)						25.973.350	37.282.300
Sản phẩm thu	*Đơn vị tính*	*Năng suất (tấn/ha)*		*Đơn giá (đồng/ha)*		*Thành tiền (đồng/ha)*	
	Lúa	5,3	7,6	7.700.000	7.700.000	40.810.000	58.520.000
	Đơn vị tính	*Cuộn (cuộn/ha)*		*Đơn giá (cuộn)*		*Thành tiền (đồng/ha)*	
	Rơm	107	177	20.000	20.000	2.140.000	3.540.000
Tổng thu (lúa + rơm)						42.950.000	62.060.000
Hiệu quả kinh tế (Tổng thu – Tổng chi)						16.976.650	24.777.700

Phụ lục 4: Các bảng trình bày kết quả phân tích tính chất, thành phần kim loại nặng trong hạt; PCA/FA và trọng số của các thông số đất và hạt sau thí nghiệm của tất cả các thí nghiệm trong luận án

Ghi chú: Các số in đậm trong tất cả các bảng dưới đây thể hiện thông số có mối liên hệ chặt với nhân tố đó.

Bảng 4.1. Kết quả phân tích PCA/FA và trọng số của các thông số của đất ứng với các loại đất trong hai mùa (Nội dung 1 - khảo sát)

Thông số phân tích	Nhân tố 1	Nhân tố 2	Nhân tố 3	Nhân tố 4	Trọng số
Fe trao đổi	**0,97**	0,07	0,02	-0,07	0,10
SO_4^{2-}	**0,94**	0,19	0,06	-0,04	0,10
Độ chua trao đổi	**0,91**	0,05	-0,06	0,24	0,10
Al trao đổi	**0,87**	0,44	0,03	-0,09	0,10
H^+	**0,86**	0,26	0,23	0,11	0,10
Mn trao đổi	**0,84**	0,34	0,18	-0,26	0,10
C	**0,77**	0,20	-0,44	0,18	0,10
CEC	**0,52**	0,44	0,05	0,23	0,10
Mg trao đổi	0,14	**0,92**	-0,09	-0,12	0,03
Cl^-	0,19	**0,84**	-0,04	0,21	0,03
Na trao đổi	0,21	**0,80**	-0,01	0,44	0,03
EC	0,44	**0,69**	-0,02	0,19	0,03
pH	-0,47	0,03	**-0,55**	-0,50	0,02
Mehlich-1 P	-0,06	-0,14	**0,87**	0,04	0,02
Ca	0,13	0,10	**0,77**	-0,01	0,02
NH_4^+	-0,13	0,19	0,14	**0,75**	0,02
K trao đổi	0,13	0,27	-0,51	**0,68**	0,02
Eigenvalue	7,77	2,68	2,00	1,33	
Phần trăm (%)	45,70	15,75	11,75	7,85	
Phần trăm tích lũy (%)	45,70	61,45	73,20	81,05	
Hệ số nhân tố	0,56	0,19	0,14	0,10	

Bảng 4.2. Kết quả phân tích PCA/FA và trọng số của các thông số đất sau thí nghiệm bị ảnh hưởng bởi các loại than sinh học

Thông số phân tích	Nhân tố 1	Nhân tố 2	Nhân tố 3	Trọng số
Na trao đổi (mg/kg)	**0,983**	0,052	0,128	0,087
Mg trao đổi (mg/kg)	**0,981**	0,086	0,094	0,087
K trao đổi (mg/kg)	**0,981**	0,012	0,051	0,087
Cl (g/kg)	**0,929**	0,186	0,081	0,087
NH_4^+ (mg/kg)	**0,835**	0,072	-0,406	0,087
Mn trao đổi	**0,705**	0,654	0,019	0,087
EC (dS/m)	**0,693**	0,539	0,141	0,087
pH	0,465	**-0,725**	-0,422	0,053
Al trao đổi (mg/kg)	0,137	**0,899**	0,380	0,053
Fe trao đổi (mg/kg)	0,206	**0,898**	0,304	0,053
SO_4^{2-} (g/kg)	0,288	**0,886**	0,075	0,053
Độ chua trao đổi (cmol+/kg)	-0,166	**0,818**	0,472	0,053
C (%)	0,025	0,212	**0,899**	0,017
Ca trao đổi (mg/kg)	-0,003	0,447	**0,849**	0,017
CEC (cmolc/kg)	0,005	0,170	**0,822**	0,017
H^+ (cmol+/kg)	0,478	0,323	**0,654**	0,017
Mehlich-1 P (mg/kg)	-0,390	**-0,591**	-0,153	0,053
Eigenvalue	8,2022	5,0094	1,5901	
Percent	48,248	29,467	9,353	
Cum Percent	48,248	77,715	87,069	
Trọng số	0,554	0,338	0,107	

Bảng 4.3. Tính chất của hạt bị ảnh hưởng bởi các loại than sinh học sau thí nghiệm

Loại đất	Công thức	$N_{TrĐ}$	$P_{TrĐ}$	$K_{TrĐ}$	$Na_{TrĐ}$	$Ca_{TrĐ}$	$Mg_{TrĐ}$
		(g/kg)		(mg/kg)			
Phù sa	CT1	12.10^{c} ±0.39	3.09^{bcd}±0.07	9169.33^{c}±506.41	1806.00^{abc}±69.20	396.33^{bc}±40.13	930.00^{ab}±70.78
	CT2	12.70^{abc}±0.53	3.33^{abcd}±0.11	10607.67^{abc}±798.68	1774.83^{abc}±54.42	422.67^{abc}±11.67	1020.00^{a}±98.79
	CT3	13.21^{abc}±0.57	3.31^{abcd}±0.14	10180.00^{abc}±653.99	1810.67^{abc}±85.36	405.67^{bc}±23.90	974.33^{ab}±54.69
Mặn	CT1	12.42^{c}±0.16	3.00^{d}±0.08	9625.00^{bc}±704.59	1906.33^{ab}±27.97	361.00±17.35	764.00^{ab}±62.07
	CT2	13.16^{abc}±0.34	3.38^{abc}±0.13	10034.00^{abc}±372.50	1875.00^{ab}±66.16	422.00^{c}±26.23	789.00^{ab}±50.76
	CT3	13.76^{a}±0.41	3.51^{a}±0.11	9489.00^{bc}±654.59	1973.67^{a}±82.33	369.33^{abc}±9.17	744.00^{b}±45.92
Xám	CT1	12.71^{abc}±0.15	3.06^{cd}±0.04	10667.67^{abc}±448.51	1616.00^{bcd}±22.03	424.00^{c}±26.23	818.33^{ab}±45.17
	CT2	13.69^{ab}±0.48	3.52^{a}±0.10	11645.33^{a}±466.97	1378.67^{d}±103.36	500.67^{abc}±7.86	780.00^{ab}±39.04
	CT3	12.74^{abc}±0.10	3.15^{bcd}±0.12	11365.00^{ab}±540.79	1488.33^{cd}±46.33	481.75^{a}±22.97	788.33^{ab}±38.05
Phèn	CT1	12.53^{bc}±0.50	3.38^{abc}±0.21	10026.33^{abc}±765.15	1632.67^{abcd}±57.89	455.00^{ab}±64.47	829.33^{ab}±17.46
	CT2	13.15^{abc}±0.27	3.42^{ab}±0.18	11408.67^{ab}±847.71	1529.33^{cd}±104.50	457.83^{ab}±13.58	820.67^{ab}±25.96
	CT3	13.03^{abc}±0.64	3.23^{abcd}±0.09	10691.33^{abc}±1135.73	1486.67^{cd}±21.99	465.67^{ab}±36.10	811.67^{ab}±45.86

Loại đất	Công thức	$Al_{TrĐ}$	$Fe_{TrĐ}$	$Mn_{TrĐ}$
		(mg/kg)		
Phù sa	CT1	576.00^{a}±13.86	746.50^{a}±12.44	104.30^{a}±3.17
	CT2	411.43^{bcd}±33.51	711.66^{ab}±10.00	105.14^{a}±2.34
	CT3	401.67^{cd}±27.86	705.04^{ab}±12.13	103.88^{a}±4.00
Mặn	CT1	574.00^{a}±35.17	703.94^{ab}±20.80	105.12^{a}±9.21
	CT2	519.50^{ab}±9.76	738.45^{a}±7.91	99.84^{a}±4.70
	CT3	541.33^{a}±5.36	630.96^{abc}±61.03	97.36^{a}±6.62
Xám	CT1	393.33^{cd}±12.81	540.13^{bc}±26.38	96.79^{a}±7.83
	CT2	348.67^{d}±14.33	481.60^{c}±37.37	94.74^{a}±5.32
	CT3	362.67^{d}±25.77	546.93^{bc}±36.00	95.39^{a}±5.03
Phèn	CT1	572.17^{a}±31.22	726.75^{ab}±54.91	105.12^{a}±4.91
	CT2	499.50^{abc}±13.57	709.23^{ab}±33.70	97.35^{a}±4.28
	CT3	490.50^{abc}±4.33	675.15^{ab}±67.22	94.96^{a}±5.51

Bảng 4.4. Kết quả phân tích PCA/FA và trọng số của các thông số hạt lúa sau thí nghiệm bị ảnh hưởng bởi các loại than sinh học

Thông số phân tích	Nhân tố 1	Nhân tố 2	Nhân tố 3	Trọng số
Na (mg/kg)	**0,798**	0,031	-0,050	0,151
Al (mg/kg)	**0,771**	-0,312	-0,003	0,151
Fe (mg/kg)	**0,639**	-0,203	0,331	0,151
P (g/kg)	-0,042	**0,830**	0,126	0,065
N (g/kg)	-0,065	**0,686**	-0,262	0,065
K (mg/kg)	**-0,653**	0,159	-0,307	0,151
Mg (mg/kg)	-0,043	0,055	**0,885**	0,056
Mn (mg/kg)	0,379	-0,205	**0,568**	0,056
Ca (mg/kg)	**-0,683**	-0,260	-0,038	0,151
Eigenvalue	3,0595	1,324	1,1363	
Percent	33,994	14,711	12,626	
Cum Percent	33,994	48,705	61,33	
Trọng số	0,554	0,240	0,206	

Bảng 4.5. Thành phần của một số kim loại nặng trao đổi trong hạt của các loại đất sau thí nghiệm bị ảnh hưởng bởi các loại than sinh học

Loại đất	Công thức	$Cd_{TrĐ}$	$Cu_{TrĐ}$	$Pb_{TrĐ}$	$Co_{TrĐ}$	$Ni_{TrĐ}$	$Zn_{TrĐ}$
		(mg/kg)					
Phù sa	CT1	0.29±0.02	16.21±0.11	1.70±0.10	12.20±0.64	6.90±0.65	26.20±0.72
	CT2	0.29±0.04	14.66±0.74	1.30±0.10	12.44±1.01	6.30±0.62	24.77±0.67
	CT3	0.30±0.02	14.91±0.50	1.60±0.10	11.93±1.00	6.10±0.68	24.10±0.78
Mặn	CT1	0.27±0.05	14.05±0.35	1.93±0.09	13.98±0.04	5.60±0.95	21.80±0.62
	CT2	0.26±0.02	14.83±0.75	1.83±0.03	12.48±1.00	6.22±0.35	20.73±0.28
	CT3	0.26±0.03	14.08±0.79	1.73±0.12	12.63±1.05	5.98±0.61	18.70±0.70
Xám	CT1	0.25±0.02	13.70±0.38	1.90±0.06	9.33±0.50	8.70±0.65	35.00±2.65
	CT2	0.26±0.01	14.04±0.71	1.70±0.10	10.43±0.25	6.30±0.75	29.70±0.17
	CT3	0.29±0.03	14.71±0.34	1.83±0.18	9.67±0.63	7.00±0.72	32.10±0.90
Phèn	CT1	0.30±0.02	14.59±0.40	1.93±0.09	12.73±0.80	5.10±0.62	30.47±1.35
	CT2	0.29±0.03	15.38±0.78	1.87±0.12	11.98±1.05	5.00±0.56	29.63±2.06
	CT3	0.34±0.04	14.19±0.90	1.60±0.10	10.86±0.57	4.40±0.44	27.53±1.39

Bảng 4.6. Kết quả phân tích PCA/FA và trọng số của các thông số đất phèn

Thông số phân tích	Nhân tố 1	Nhân tố 2	Nhân tố 3	Trọng số
Fe trao đổi	**0,977**	0,056	-0,068	0,069
Al trao đổi	**0,974**	0,127	-0,146	0,069
Mg trao đổi	**0,957**	0,217	-0,067	0,069
Ca trao đổi	**0,950**	0,190	-0,138	0,069
Na trao đổi	**0,939**	-0,022	0,026	0,069
Mn trao đổi	**0,931**	-0,015	-0,038	0,069
K trao đổi	**0,924**	0,249	-0,200	0,069
H^+	**0,868**	-0,053	0,151	0,069
Độ chua trao đổi	**0,841**	-0,345	0,113	0,069
EC	**0,771**	-0,484	-0,054	0,069
SO_4^{2-}	**0,735**	-0,011	0,158	0,069
Mehlich-1 P	**-0,639**	0,442	0,126	0,069
NH_4^+	**-0,584**	-0,427	0,217	0,069
pH	**-0,944**	-0,061	0,045	0,069
C	-0,128	**0,813**	-0,088	0,013
CEC	0,360	**0,657**	-0,012	0,013
Cl^-	-0,015	-0,079	**0,966**	0,007
Eigenvalue	10,7434	2,099	1,0252	
Phần trăm (%)	63,196	12,347	6,03	
Phần trăm tích lũy (%)	63,196	75,544	81,574	
Hệ số nhân tố	0,775	0,151	0,074	

Bảng 4.7. Tính chất hạt trên đất phèn bị ảnh hưởng bởi than sinh học sau thí nghiệm

Các chỉ tiêu		CT1	CT2	CT3	CT4	CT5
Vụ 1						
$N_{TrĐ}$	mg/kg	12.47±0.05	11.81±0.32	12.47±0.19	12.33±0.27	12.89±0.41
$P_{TrĐ}$		2.32±0.06	2.54±0.00	2.58±0.09	2.53±0.01	2.54±0.02
$K_{TrĐ}$		3017.22±88.38	3207.50±21.48	3352.39±55.20	3069.74±119.42	3341.07±40.42
$Na_{TrĐ}$		2213.41±154.29	2129.24±249.14	1875.43±84.02	2037.03±169.11	2011.55±104.83
$Ca_{TrĐ}$		1676.074±54.347	1808.595±43.135	1892.465±30.638	1848.009±33.415	1833.342±102.555
$Mg_{TrĐ}$		1751.898±25.610	1795.403±58.885	1904.125±43.810	1814.069±25.105	1862.698±76.279
$Al_{TrĐ}$		686.651±37.028	646.056±13.393	614.406±62.387	639.774±76.813	651.549±38.638
$Fe_{TrĐ}$		912.967±23.071	859.244±54.992	725.701±31.989	762.297±23.155	767.360±32.241
$Mn_{TrĐ}$		41.133±0.530	42.343±2.050	42.172±0.490	40.878±0.625	42.737±1.390
Vụ 2						
$N_{TrĐ}$	mg/kg	12.00±0.35	12.53±0.18	12.56±0.14	13.14±0.22	12.56±0.19
$P_{TrĐ}$		2.33±0.04	2.51±0.04	2.65±0.03	2.50±0.05	2.71±0.05
$K_{TrĐ}$		1569.40±28.13	1652.21±21.26	1738.16±31.14	1663.85±11.93	1665.33±19.17
$Na_{TrĐ}$		2428.60±84.31	2308.03±104.01	2298.50±119.44	2221.91±47.31	2415.47±136.56
$Ca_{TrĐ}$		1455.582±10.61	1501.695±109.39	1673.303±56.72	1620.060±20.55	1652.160±65.88
$Mg_{TrĐ}$		1010.972±38.364	1058.284±13.909	1102.290±32.683	1055.371±35.739	1109.565±24.559
$Al_{TrĐ}$		315.158±14.068	314.213±21.768	303.080±17.710	305.237±5.020	310.573±17.065
$Fe_{TrĐ}$		337.949±2.878	309.161±6.288	299.857±35.913	315.043±6.455	287.711±21.395
$Mn_{TrĐ}$		88.580±7.730	85.072±4.184	92.128±4.179	86.713±3.215	90.316±1.381

Bảng 4.8. Kết quả phân tích PCA/FA và trọng số của các thông số hạt của đất phèn

Thông số phân tích	Nhân tố 1	Nhân tố 2	Trọng số
K trao đổi	**0,983**	-0,154	0,133
Mg trao đổi	**0,979**	-0,123	0,133
Fe trao đổi	**0,899**	-0,373	0,133
Al trao đổi	**0,894**	-0,336	0,133
Ca trao đổi	**0,800**	0,296	0,133
Mn trao đổi	**-0,926**	0,311	0,133
Na trao đổi	**-0,539**	-0,049	0,133
P	0,087	**0,924**	0,034
N	-0,091	**0,533**	0,034
Eigenvalue	5,6214	1,4327	
Phần trăm (%)	62,46	15,919	
Phần trăm tích lũy (%)	62,46	78,379	
Hệ số nhân tố	0,797	0,203	

Bảng 4.9. Thành phần một số kim loại nặng của hạt trên đất phèn sau thí nghiệm

Các chỉ tiêu	CT1	CT2	CT3	CT4	CT5
Vụ 1					
$Cd_{TrĐ}$	0.273±0.006	0.265±0.017	0.258±0.011	0.239±0.023	0.248±0.006
$Cu_{TrĐ}$	18.571±0.292	16.856±0.045	15.159±0.529	17.046±0.372	16.517±0.321
$Pb_{TrĐ}$	9.484±0.153	9.554±0.140	8.704±0.190	9.024±0.243	8.846±0.088
$Co_{TrĐ}$	17.702±0.121	17.551±0.003	17.479±0.030	17.652±0.091	17.762±0.122
$Ni_{TrĐ}$	5.322±0.349	4.284±0.276	4.600±0.441	5.040±0.163	5.330±0.495
$Zn_{TrĐ}$	137.512±10.940	139.414±2.445	121.584±3.237	124.596±6.849	122.265±1.572
Vụ 2					
$Cd_{TrĐ}$	1.077±0.033	1.049±0.041	0.995±0.033	1.035±0.022	1.096±0.059
$Cu_{TrĐ}$	1.811±0.146	2.030±0.029	1.759±0.135	2.293±0.103	2.126±0.135
$Pb_{TrĐ}$	2.578±0.166	2.293±0.115	2.251±0.309	2.337±0.213	2.381±0.183
$Co_{TrĐ}$	12.398±0.546	11.349±0.686	11.709±0.299	11.304±0.571	12.374±0.693
$Ni_{TrĐ}$	9.260±0.732	9.056±0.843	9.028±0.409	9.146±0.123	9.112±0.459
$Zn_{TrĐ}$	45.059±4.569	43.001±1.792	38.714±3.052	46.473±2.686	44.642±0.770

Bảng 4.10. Kết quả phân tích PCA/FA và trọng số của các thông số đất xám

Thông số phân tích	Nhân tố 1	Nhân tố 2	Nhân tố 3	Nhân tố 4	Trọng số
Cl^-	**0,78**	0,18	0,24	0,38	0,073
CEC	**0,75**	-0,46	0,21	-0,16	0,073
Mehlich-1 P	**0,73**	-0,19	0,35	0,13	0,073
NH_4^+	**0,64**	0,54	-0,10	-0,10	0,073
Mn trao đổi	**0,51**	0,21	-0,16	0,08	0,073
Na trao đổi	**-0,73**	0,05	-0,09	-0,26	0,073
Ca trao đổi	**-0,58**	-0,57	0,35	-0,08	0,073
Mg trao đổi	**-0,64**	-0,26	0,07	0,04	0,073
Độ chua trao đổi	0,20	**0,81**	-0,06	0,03	0,068
Al trao đổi	0,16	**0,69**	-0,42	-0,12	0,068
Fe trao đổi	0,12	**0,49**	-0,40	-0,04	0,068
pH	0,36	**-0,61**	0,41	0,37	0,068
K trao đổi	0,07	**-0,74**	0,09	-0,01	0,068
H^+ trao đổi	-0,33	0,11	**-0,55**	-0,37	0,022
C	0,06	-0,30	**0,87**	-0,13	0,022
EC	-0,00	0,16	-0,14	**-0,50**	0,016
SO_4^{2-}	0,20	0,17	-0,21	**0,72**	0,016
Eigenvalue	5,04	4,63	1,48	1,10	
Phần trăm (%)	29,63	27,25	8,69	6,49	
Phần trăm tích lũy (%)	29,63	56,88	65,56	72,05	
Hệ số nhân tố	0,41	0,38	0,12	0,09	

Bảng 4.11. Tính chất hạt trên đất xám ảnh hưởng bởi than sinh học sau thí nghiệm

Các chỉ tiêu		CT1	CT2	CT3	CT4	CT5
Vụ 1						
$N_{TrĐ}$	mg/kg	11.68±0.33	11.04±0.57	12.04±0.23	12.25±0.58	11.93±0.16
$P_{TrĐ}$		2.51±0.02	2.71±0.07	2.82±0.03	2.79±0.06	2.75±0.09
$K_{TrĐ}$		802.00±7.42	850.22±24.57	907.56±23.32	852.89±25.14	896.67±6.05
$Na_{TrĐ}$		282.22±34.09	288.00±52.41	267.11±39.17	295.56±5.57	284.22±23.36
$Ca_{TrĐ}$		490.67±17.64	490.22±22.33	573.78±31.97	523.33±46.91	513.78±33.35
$Mg_{TrĐ}$		371.11±20.66	373.78±19.08	397.78±7.75	381.78±27.77	394.44±14.99
$Al_{TrĐ}$		342.89±24.47	380.44±9.31	350.22±30.64	334.00±14.79	368.22±13.29
$Fe_{TrĐ}$		311.20±25.98	278.00±27.09	270.00±8.35	282.00±17.05	294.67±18.53
$Mn_{TrĐ}$		48.44±1.18	50.22±1.60	50.11±0.40	48.89±1.18	49.78±0.44
Vụ 2						
$N_{TrĐ}$	mg/kg	13.31±0.14	12.64±0.61	12.54±0.12	12.09±0.32	12.56±0.20
$P_{TrĐ}$		2.45±0.03	2.62±0.04	2.80±0.03	2.67±0.06	2.72±0.03
$K_{TrĐ}$		795.56±33.53	899.11±46.27	957.78±17.15	908.83±14.33	950.67±18.20
$Na_{TrĐ}$		263.85±8.07	270.04±29.24	264.19±7.36	257.11±11.60	249.56±14.26
$Ca_{TrĐ}$		30.22±0.89	29.78±0.44	32.22±0.71	29.56±0.22	29.33±0.77
$Mg_{TrĐ}$		125.45±4.29	126.70±1.37	127.18±0.72	128.10±1.35	126.33±1.81
$Al_{TrĐ}$		323.71±13.70	332.47±32.49	313.36±7.76	341.51±17.80	324.44±8.32
$Fe_{TrĐ}$		254.84±6.25	255.96±4.44	239.59±2.91	258.42±5.79	249.56±9.00
$Mn_{TrĐ}$		51.11±3.64	45.81±1.92	44.44±0.26	46.67±2.67	47.89±1.44

Bảng 4.12. Kết quả phân tích PCA/FA và trọng số của các thông số hạt lúa đất xám

Thông số phân tích	Nhân tố 1	Nhân tố 2	Nhân tố 3	Trọng số
Ca trao đổi	**0,892437**	-0,004643	0,451149	0,151
Mg trao đổi	**0,837017**	0,027611	0,501788	0,151
Fe trao đổi	**0,569798**	-0,20666	0,156309	0,151
Al trao đổi	**0,458713**	-0,054391	-0,024989	0,151
N	**-0,62223**	-0,146892	0,081953	0,151
K trao đổi	-0,325322	**0,945157**	-0,029019	0,071
P	0,269173	**0,621031**	0,111304	0,071
Na trao đổi	-0,010965	0,146959	**0,564736**	0,052
Mn trao đổi	0,203469	-0,285509	**0,420043**	0,052
Eigenvalue	3,4789	1,6434	1,1987	
Phần trăm (%)	38,654	18,26	13,319	
Phần trăm tích lũy (%)	38,654	56,914	70,234	
Hệ số nhân tố	0,550	0,260	0,190	

Bảng 4.13. Thành phần một số kim loại nặng của hạt trên đất xám sau thí nghiệm

Các chỉ tiêu	CT1	CT2	CT3	CT4	CT5
Vụ 1					
$Cd_{TrĐ}$	0.22±0.02	0.20±0.01	0.18±0.01	0.20±0.01	0.21±0.01
$Cu_{TrĐ}$	1.81±0.06	1.53±0.10	1.44±0.03	1.75±0.04	1.41±0.03
$Pb_{TrĐ}$	1.42±0.06	1.44±0.01	1.19±0.09	1.24±0.06	1.09±0.06
$Co_{TrĐ}$	12.03±0.15	11.70±0.21	10.79±0.20	11.85±0.21	11.37±0.02
$Ni_{TrĐ}$	4.81±0.60	4.10±0.08	4.17±0.39	4.78±0.51	4.77±0.41
$Zn_{TrĐ}$	10.09±0.73	11.71±1.16	9.91±0.24	11.44±0.61	12.67±0.67
Vụ 2					
$Cd_{TrĐ}$	0.18±0.00	0.19±0.00	0.18±0.00	0.18±0.00	0.19±0.01
$Cu_{TrĐ}$	2.05±0.04	1.74±0.21	1.81±0.05	2.00±0.02	1.94±0.07
$Pb_{TrĐ}$	0.92±0.07	0.97±0.09	0.89±0.02	0.88±0.11	0.91±0.06
$Co_{TrĐ}$	11.64±0.21	11.72±0.13	11.05±0.28	11.76±0.12	11.68±0.08
$Ni_{TrĐ}$	3.64±0.09	3.62±0.15	3.76±0.08	3.64±0.05	3.83±0.12
$Zn_{TrĐ}$	12.34±0.31	11.28±0.54	10.89±0.17	11.69±0.32	10.69±0.25

Phụ lục 5: Mẫu phiếu khảo sát hiện trạng canh tác lúa nước

TRƯỜNG ĐH CÔNG NGHIỆP TP.HCM
VIỆN KHOA HỌC CÔNG NGHỆ VÀ QUẢN LÝ MÔI TRƯỜNG

CỘNG HÒA XÃ HỘI CHỦ NGHĨA VIỆT NAM
Độc lập - Tự do - Hạnh phúc

PHIẾU KHẢO SÁT HIỆN TRẠNG CANH TÁC LÚA NƯỚC

Để đánh giá hiệu quả môi trường và kinh tế trong sản xuất lúa nước tại địa phương, kính đề nghị Ông/Bà vui lòng cho biết ý kiến của mình bằng cách đánh dấu (X) vào 1 ô trống tương ứng hoặc cung cấp thêm thông tin theo các câu hỏi dưới đây. Các câu trả lời của Ông /Bà sẽ cung cấp thông tin rất quan trọng cho nhóm thực hiện nghiên cứu hiệu quả của mô hình sản xuất lúa nước. Chúng tôi cam kết những thông tin cá nhân mà Ông/Bà cung cấp được hoàn toàn giữ bí mật và các câu trả lời chỉ được sử dụng cho mục đích nghiên cứu.

Ngày khảo sát: Người khảo sát: Phiếu khảo sát số:

I. TÌNH HÌNH CHUNG

1. Tên chủ hộ	
2. Trình độ văn hóa	
2. Địa chỉ	
3. Số nhân khẩu	
4. Loại hình canh tác	
5. Diện tích	
6. Loại đất	Diện tích: m^2
Phù sa	
Mặn	
Xám	
Phèn	
Khác	

II. HIỆU QUẢ KINH TẾ CỦA MÔ HÌNH SẢN XUẤT

Tên chủ ruộng lúa:……Địa điểm ruộng:……

THÔNG TIN CHUNG			
Hạng mục	Vụ 1	Vụ 2	Vụ 3
Thời vụ gieo			
Diện tích (m^2)			
Năng suất hạt (tạ/ha)			
Sản lượng hạt (tạ/ruộng)			

CHI PHÍ						
I. Vật chất (cho 1 ruộng)	Số lượng (kg)	Tiền (1.000đ)	Số lượng (kg)	Tiền (1.000đ)	Số lượng (kg)	Tiền (1.000đ)
1. Giống						
2. Phân hữu cơ						
3. Phân vô cơ						
- Đạm						
- Lân						
- Kali						
- NPK						

1

CHI PHÍ						
I. Vật chất (cho 1 ruộng)	Số lượng (kg)	Tiền (1.000đ)	Số lượng (kg)	Tiền (1.000đ)	Số lượng (kg)	Tiền (1.000đ)
- DAP						
- Vôi						
- Phân bón lá						
- Loại khác						
4. Thuốc BVTV						
5. Thuốc trừ cỏ						
6. Nhiên liệu						
7. Khác						
II. Lao động/công						
1. Lao động nhà						
2. Lao động thuê /vụ/ruộng						
3. Giá 1 ngày thuê (đ/công)						
III. Dịch vụ phí khác						
1. Làm đất						
2. Thủy lợi phí/ruộng						
3. Quản lý phí/ruộng						
IV. Trả lãi vay						
V. Chi khác						

III. THU HỒI SINH KHỐI VÀ CÁC VẤN ĐỀ KHÁC

a. Rơm rạ sẽ được xử lý như thế nào sau khi thu hoạch lúa?

□ Để lại trên ruộng, không đốt □ Để trên ruộng và đốt
□ Dọn khỏi ruộng □ Bán cho thương lái
□ Khác:_____

b. Rơm rạ nếu dọn khỏi ruộng ông/bà được sử dụng cho các mục đích gì?

□ Làm thức ăn gia súc □ Phục vụ trồng trọt (giá thể trồng nấm, ủ gốc cây…)
□ Ủ phân sinh học □ Nhiên liệu, đốt □ Khác:_____

c. Nếu bán rơm rạ thì giá bao nhiêu : _____nghìn đồng

d. Vỏ trấu ông/bà xử lý như thế nào?

□ Nhiên liệu, đốt □ Phục vụ trồng trọt (giá thể trồng nấm, ủ gốc cây…)
□ Ủ phân sinh học □ Khác:_____

e. Theo ông bà lợi nhuận từ trồng lúa so với các loại hình canh tác khác như thế nào?

□ Cao hơn □ Thấp hơn □ Bằng nhau

		Có	Không
f	Hộ gia đình ông/bà có muốn chuyển đổi cơ cấu cây trồng khác không?		
g	Gia đình ông/bà có muốn con cháu tiếp tục nghề này không?		
h	Ông/bà đã biết đến khái niệm nông nghiệp bền vững?		
i	Ông/bà có được chính quyền địa phương tuyên truyền về nông nghiệp bền vững chưa ?		

k. Ông bà có nguyện vọng hay đề xuất gì không?

_____

_____

XIN CHÂN THÀNH CẢM ƠN!

2

Phụ lục 6: Danh sách thông tin 400 hộ nông dân được khảo sát

STT	Tên chủ hộ	Địa điểm	Loại hình	Diện tích (m^2)	Loại đất
1	Nguyễn Văn Thép	Vĩnh Long	Lúa nước	25.000	Phù sa
2	Nguyễn Văn Khuyên	Vĩnh Long	Lúa nước	10.000	Phù sa
3	Nguyễn Văn Tèo	Vĩnh Long	Lúa nước	3.000	Phù sa
4	Nguyễn Văn Chiến	Vĩnh Long	Lúa nước	7.000	Phù sa
5	Phạm Minh Quý	Vĩnh Long	Lúa nước	20.000	Phù sa
6	Nguyễn Văn Buồm	Vĩnh Long	Lúa nước	7.000	Phù sa
7	Nguyễn Văn Tứn	Vĩnh Long	Lúa nước	15.000	Phù sa
8	Nguyễn Văn Ấu	Vĩnh Long	Lúa nước	20.000	Phù sa
9	Nguyễn Văn Tuấn	Vĩnh Long	Lúa nước	8.000	Phù sa
10	Lê Văn Chính	Vĩnh Long	Lúa nước	8.000	Phù sa
11	Huỳnh Văn Tám	Vĩnh Long	Lúa nước	13.000	Phù sa
12	Nguyễn Văn Huỳnh	Vĩnh Long	Lúa nước	15.000	Phù sa
13	Nguyễn Văn Sào	Vĩnh Long	Lúa nước	12.000	Phù sa
14	Nguyễn Thanh Tùng	Vĩnh Long	Lúa nước	16.000	Phù sa
15	Nguyễn Văn Đậu	Vĩnh Long	Lúa nước	15.000	Phù sa
16	Lê Hồng Ánh	Vĩnh Long	Lúa nước	10.000	Phù sa
17	Nguyễn Văn Bưởi	Vĩnh Long	Lúa nước	3.000	Phù sa
18	Nguyễn Văn Lâm	Vĩnh Long	Lúa nước	7.000	Phù sa
19	Phạm Minh Long	Vĩnh Long	Lúa nước	20.000	Phù sa
20	Nguyễn Văn Thuận	Vĩnh Long	Lúa nước	7.000	Phù sa
21	Nguyễn Ánh Hồng	Vĩnh Long	Lúa nước	15.000	Phù sa
22	Nguyễn Văn Lợi	Vĩnh Long	Lúa nước	20.000	Phù sa
23	Nguyễn Văn Thông	Vĩnh Long	Lúa nước	8.000	Phù sa
24	Lê Văn Trinh	Vĩnh Long	Lúa nước	8.000	Phù sa
25	Huỳnh Văn Trai	Vĩnh Long	Lúa nước	13.000	Phù sa
26	Nguyễn Văn Mười	Vĩnh Long	Lúa nước	15.000	Phù sa
27	Nguyễn Văn Thới	Vĩnh Long	Lúa nước	12.000	Phù sa
28	Nguyễn Thanh Hạnh	Vĩnh Long	Lúa nước	16.000	Phù sa
29	Nguyễn Văn Út	Vĩnh Long	Lúa nước	4.000	Phù sa
30	Phan Thành Phúc	Vĩnh Long	Lúa nước	6.000	Phù sa
31	Nguyễn Thanh Hà	Vĩnh Long	Lúa nước	25.000	Phù sa
32	Nguyễn Ánh Chinh	Vĩnh Long	Lúa nước	10.000	Phù sa
33	Nguyễn Văn Mão	Vĩnh Long	Lúa nước	3.000	Phù sa
34	Nguyễn Minh Chiến	Vĩnh Long	Lúa nước	7.000	Phù sa

35	Phạm Thị Minh Ánh	Vĩnh Long	Lúa nước	20.000	Phù sa
36	Nguyễn Văn Khôi	Vĩnh Long	Lúa nước	7.000	Phù sa
37	Nguyễn Văn Hải	Vĩnh Long	Lúa nước	15.000	Phù sa
38	Nguyễn Văn Nhân	Vĩnh Long	Lúa nước	20.000	Phù sa
39	Nguyễn Văn Hà	Vĩnh Long	Lúa nước	8.000	Phù sa
40	Lê Văn Hào	Vĩnh Long	Lúa nước	8.000	Phù sa
41	Huỳnh Văn Yên	Vĩnh Long	Lúa nước	13.000	Phù sa
42	Nguyễn Văn Chổi	Vĩnh Long	Lúa nước	15.000	Phù sa
43	Nguyễn Văn Sáu	Vĩnh Long	Lúa nước	12.000	Phù sa
44	Nguyễn Thanh Tùng	Vĩnh Long	Lúa nước	16.000	Phù sa
45	Tô Minh Ánh	Vĩnh Long	Lúa nước	2.500	Phù sa
46	Trần Thị Bé	Vĩnh Long	Lúa nước	6.000	Phù sa
47	Huỳnh Văn Phú	Vĩnh Long	Lúa nước	7.300	Phù sa
48	Lê Thị Bạch	Vĩnh Long	Lúa nước	8.000	Phù sa
49	Nguyễn Thị Hồng Minh	Vĩnh Long	Lúa nước	5.000	Phù sa
50	Trần Văn Anh	Vĩnh Long	Lúa nước	6.500	Phù sa
51	Phan Văn Hai	Vĩnh Long	Lúa nước	3.000	Phù sa
52	Ngô Văn Hải	Vĩnh Long	Lúa nước	4.000	Phù sa
53	Võ Văn Nghĩa	Vĩnh Long	Lúa nước	7.500	Phù sa
54	Trần Minh Hạnh	Vĩnh Long	Lúa nước	13.000	Phù sa
55	Nguyễn Văn Khiêm	Vĩnh Long	Lúa nước	15.000	Phù sa
56	Nguyễn Văn Phan	Vĩnh Long	Lúa nước	3.000	Phù sa
57	Võ Văn Hưng	Vĩnh Long	Lúa nước	6.000	Phù sa
58	Nguyễn Văn Hiền	Vĩnh Long	Lúa nước	8.000	Phù sa
59	Huỳnh Văn Huy	Vĩnh Long	Lúa nước	9.000	Phù sa
60	Nguyễn Văn Hiếu	Vĩnh Long	Lúa nước	7.000	Phù sa
61	Phạm Thị Hạnh	Vĩnh Long	Lúa nước	6.000	Phù sa
62	Lê Văn Hưng	Vĩnh Long	Lúa nước	5.000	Phù sa
63	Đào Thị Thủy Trang	Vĩnh Long	Lúa nước	7.300	Phù sa
64	Huỳnh Thị Ngọc	Vĩnh Long	Lúa nước	15.000	Phù sa
65	Hàng Văn Hùng	Vĩnh Long	Lúa nước	12.000	Phù sa
66	Trần Văn Hải	Vĩnh Long	Lúa nước	9.000	Phù sa
67	Trần Văn Giàu	Vĩnh Long	Lúa nước	10.000	Phù sa
68	Trương Văn Phước	Vĩnh Long	Lúa nước	8.500	Phù sa
69	Nguyễn Văn Bô	Vĩnh Long	Lúa nước	7.500	Phù sa
70	Nguyễn Văn Út	Vĩnh Long	Lúa nước	8.000	Phù sa
71	Nguyễn Thị Dàng	Vĩnh Long	Lúa nước	5.000	Phù sa

72	Cao Văn Viễn	Vĩnh Long	Lúa nước	2.500	Phù sa
73	Nguyễn Văn Mười	Vĩnh Long	Lúa nước	9.500	Phù sa
74	Trần Văn Chính	Vĩnh Long	Lúa nước	8.000	Phù sa
75	Nguyễn Thị Điểu	Vĩnh Long	Lúa nước	7.000	Phù sa
76	Phạm Văn Ý	Vĩnh Long	Lúa nước	6.000	Phù sa
77	Phạm Thị Năng	Vĩnh Long	Lúa nước	10.000	Phù sa
78	Đào Thị Thủy Trang	Vĩnh Long	Lúa nước	7.300	Phù sa
79	Huỳnh Thị Ngọc	Vĩnh Long	Lúa nước	15.000	Phù sa
80	Hàng Văn Hùng	Vĩnh Long	Lúa nước	12.000	Phù sa
81	Trần Văn Hải	Vĩnh Long	Lúa nước	9.000	Phù sa
82	Trần Văn Giàu	Vĩnh Long	Lúa nước	10.000	Phù sa
83	Trương Văn Phước	Vĩnh Long	Lúa nước	8.500	Phù sa
84	Nguyễn Thị Nga	Vĩnh Long	Lúa nước	7.500	Phù sa
85	Đinh Hữu Hà	Vĩnh Long	Lúa nước	3.000	Phù sa
86	Nguyễn Thị Thúy	Vĩnh Long	Lúa nước	5.000	Phù sa
87	Nguyễn Văn Hợi	Vĩnh Long	Lúa nước	25.000	Phù sa
88	Nguyễn Văn Hồng	Vĩnh Long	Lúa nước	10.000	Phù sa
89	Nguyễn Văn Hưng	Vĩnh Long	Lúa nước	3.000	Phù sa
90	Nguyễn Văn Hào	Vĩnh Long	Lúa nước	7.000	Phù sa
91	Phạm Minh Trực	Vĩnh Long	Lúa nước	20.000	Phù sa
92	Nguyễn Văn Hà	Vĩnh Long	Lúa nước	7.000	Phù sa
93	Nguyễn Văn Mỹ	Vĩnh Long	Lúa nước	15.000	Phù sa
94	Nguyễn Văn Hai	Vĩnh Long	Lúa nước	20.000	Phù sa
95	Nguyễn Văn Minh	Vĩnh Long	Lúa nước	8.000	Phù sa
96	Lê Văn Tám	Vĩnh Long	Lúa nước	8.000	Phù sa
97	Huỳnh Văn Hai	Vĩnh Long	Lúa nước	13.000	Phù sa
98	Nguyễn Văn Tấn	Vĩnh Long	Lúa nước	15.000	Phù sa
99	Nguyễn Văn Ba	Vĩnh Long	Lúa nước	12.000	Phù sa
100	Nguyễn Thanh Tân	Vĩnh Long	Lúa nước	16.000	Phù sa
STT	**Tên chủ hộ**	**Địa điểm**	**Loại hình**	**Diện tích (m^2)**	**Loại đất**
1	Nguyễn Văn Y	Củ Chi	Lúa nước	5.000	Phèn
2	Nguyễn Văn Khải	Củ Chi	Lúa nước	12.000	Phèn
3	Nguyễn Vẳn Lời	Củ Chi	Lúa nước	14.000	Phèn
4	Phạm Văn Đông	Củ Chi	Lúa nước	7.000	Phèn
5	Trần Hữu Kiếm	Củ Chi	Lúa nước	11.000	Phèn
6	Nguyễn Văn Mẫn	Củ Chi	Lúa nước	15.000	Phèn
7	Nguyễn Văn Đông	Củ Chi	Lúa nước	10.000	Phèn

8	Nguyễn Văn Sum	Củ Chi	Lúa nước	8.000	Phèn
9	Nguyễn Văn Mỹ	Củ Chi	Lúa nước	10.000	Phèn
10	Võ Trường Tùng	Củ Chi	Lúa nước	15.000	Phèn
11	Nguyễn Văn Đức	Củ Chi	Lúa nước	18.000	Phèn
12	Lê Văn Hậu	Củ Chi	Lúa nước	7.500	Phèn
13	Nguyễn Văn Đực	Củ Chi	Lúa nước	13.000	Phèn
14	Nguyễn Thị Tuyết	Củ Chi	Lúa nước	6.000	Phèn
15	Nguyễn Văn Út	Củ Chi	Lúa nước	9.000	Phèn
16	Thái Thị Lành	Củ Chi	Lúa nước	10.000	Phèn
17	Phạm Thị Sáu	Củ Chi	Lúa nước	15.000	Phèn
18	Nguyễn Thị Xinh	Củ Chi	Lúa nước	8.000	Phèn
19	Phan Văn Bích	Củ Chi	Lúa nước	5.000	Phèn
20	Dương Hoàng Ân	Củ Chi	Lúa nước	8.500	Phèn
21	Trần Văn Út	Củ Chi	Lúa nước	5.000	Phèn
22	Nguyễn Văn Nguyên	Củ Chi	Lúa nước	4.000	Phèn
23	Nguyễn Văn Hóa	Củ Chi	Lúa nước	12.000	Phèn
24	Trần Thị Sương	Củ Chi	Lúa nước	5.000	Phèn
25	Nguyễn Văn Kim	Củ Chi	Lúa nước	7.000	Phèn
26	Nguyễn Thị Luyến	Củ Chi	Lúa nước	8.000	Phèn
27	Nguyễn Văn Hòn	Củ Chi	Lúa nước	3.000	Phèn
28	Lê Văn Cang	Củ Chi	Lúa nước	5.000	Phèn
29	Nguyễn Văn Bé	Củ Chi	Lúa nước	4.000	Phèn
30	Phan Thành Phúc	Củ Chi	Lúa nước	6.000	Phèn
31	Phan Văn Gấm	Củ Chi	Lúa nước	4.000	Phèn
32	Châu Văn Dễ	Củ Chi	Lúa nước	10.000	Phèn
33	Trần Thị Sáu	Củ Chi	Lúa nước	9.000	Phèn
34	Trần Thị Hai	Củ Chi	Lúa nước	15.000	Phèn
35	Phạm Thị Tuyền	Củ Chi	Lúa nước	5.000	Phèn
36	Dương Văn Hơn	Củ Chi	Lúa nước	8.000	Phèn
37	Phạm Văn Khuôn	Củ Chi	Lúa nước	7.000	Phèn
38	Trần Thị Đẹt	Củ Chi	Lúa nước	10.000	Phèn
39	Nguyễn Văn Lài	Củ Chi	Lúa nước	5.000	Phèn
40	Bùi Thị Xuân	Củ Chi	Lúa nước	4.500	Phèn
41	Trần Thị Mỹ	Củ Chi	Lúa nước	3.000	Phèn
42	Lê Ngọc Dễ	Củ Chi	Lúa nước	7.200	Phèn
43	Lê Văn Tho	Củ Chi	Lúa nước	11.000	Phèn
44	Nguyễn Thị Định	Củ Chi	Lúa nước	10.000	Phèn

45	Tô Minh Đức	Củ Chi	Lúa nước	2.500	Phèn
46	Trần Thị Bé Nam	Củ Chi	Lúa nước	6.000	Phèn
47	Huỳnh Văn Phúc	Củ Chi	Lúa nước	7.000	Phèn
48	Lê Thị Bạch Tuyết	Củ Chi	Lúa nước	8.000	Phèn
49	Nguyễn Thị Nữ	Củ Chi	Lúa nước	5.000	Phèn
50	Trần Văn Định	Củ Chi	Lúa nước	6.500	Phèn
51	Phan Văn Mầu	Củ Chi	Lúa nước	3.000	Phèn
52	Ngô Văn Triều	Củ Chi	Lúa nước	4.000	Phèn
53	Võ Văn Ngoánh	Củ Chi	Lúa nước	7.500	Phèn
54	Trần Minh Phước	Củ Chi	Lúa nước	13.000	Phèn
55	Nguyễn Văn Khen	Củ Chi	Lúa nước	15.000	Phèn
56	Nguyễn Văn Phan	Củ Chi	Lúa nước	3.000	Phèn
57	Võ Văn Hùng	Củ Chi	Lúa nước	6.000	Phèn
58	Nguyễn Văn Lâm	Củ Chi	Lúa nước	8.000	Phèn
59	Huỳnh Văn Khai	Củ Chi	Lúa nước	9.000	Phèn
60	Nguyễn Văn Quốc	Củ Chi	Lúa nước	7.000	Phèn
61	Phạm Thị Huê	Củ Chi	Lúa nước	6.000	Phèn
62	Lê Văn Hùng	Củ Chi	Lúa nước	5.000	Phèn
63	Đào Thị Thủy	Củ Chi	Lúa nước	7.300	Phèn
64	Huỳnh Thị Ngọc Diệp	Củ Chi	Lúa nước	15.000	Phèn
65	Hàng Văn Phúc	Củ Chi	Lúa nước	12.000	Phèn
66	Trần Văn Đoàn	Củ Chi	Lúa nước	9.000	Phèn
67	Trần Văn Giàu	Củ Chi	Lúa nước	10.000	Phèn
68	Trương Văn Phước	Củ Chi	Lúa nước	8.500	Phèn
69	Nguyễn Văn Bô	Củ Chi	Lúa nước	7.500	Phèn
70	Nguyễn Văn Út	Củ Chi	Lúa nước	8.000	Phèn
71	Nguyễn Thị Dàng	Củ Chi	Lúa nước	5.000	Phèn
72	Cao Văn Viễn	Củ Chi	Lúa nước	2.500	Phèn
73	Nguyễn Văn Mười	Củ Chi	Lúa nước	9.500	Phèn
74	Trần Văn Chính	Củ Chi	Lúa nước	8.000	Phèn
75	Nguyễn Thị Điểu	Củ Chi	Lúa nước	7.000	Phèn
76	Phạm Văn Ý	Củ Chi	Lúa nước	6.000	Phèn
77	Phạm Thị Năng	Củ Chi	Lúa nước	10.000	Phèn
78	Nguyễn Thị Mót	Củ Chi	Lúa nước	8.000	Phèn
79	Nguyễn Đức Lộc	Củ Chi	Lúa nước	4.000	Phèn
80	Hồ Thị Son	Củ Chi	Lúa nước	5.000	Phèn
81	Vũ Thị Kim Phượng	Củ Chi	Lúa nước	8.500	Phèn

82	Trần Thế Thành	Củ Chi	Lúa nước	10.000	Phèn
83	Đoàn Phú Thợ	Củ Chi	Lúa nước	15.000	Phèn
84	Nguyễn Thị Nga	Củ Chi	Lúa nước	7.500	Phèn
85	Đinh Hữu Hà	Củ Chi	Lúa nước	3.000	Phèn
86	Nguyễn Thị Thúy	Củ Chi	Lúa nước	5.000	Phèn
87	Đăng Quốc Khánh	Củ Chi	Lúa nước	11.000	Phèn
88	Nguyễn Văn Thành	Củ Chi	Lúa nước	1.500	Phèn
89	Nguyễn Văn Tâm	Củ Chi	Lúa nước	2.000	Phèn
90	Lâm Văn Hải	Củ Chi	Lúa nước	3.000	Phèn
91	Trần Văn Út	Củ Chi	Lúa nước	5.000	Phèn
92	Nguyễn Văn Nguyên	Củ Chi	Lúa nước	4.000	Phèn
93	Nguyễn Văn Hóa	Củ Chi	Lúa nước	12.000	Phèn
94	Trần Thị Sương	Củ Chi	Lúa nước	5.000	Phèn
95	Nguyễn Văn Kim	Củ Chi	Lúa nước	7.000	Phèn
96	Nguyễn Thị Luyến	Củ Chi	Lúa nước	8.000	Phèn
97	Nguyễn Văn Hòn	Củ Chi	Lúa nước	3.000	Phèn
98	Lê Văn Cang	Củ Chi	Lúa nước	5.000	Phèn
99	Nguyễn Văn Bé	Củ Chi	Lúa nước	4.000	Phèn
100	Phan Thành Phúc	Củ Chi	Lúa nước	6.000	Phèn
STT	**Tên chủ hộ**	**Địa điểm**	**Loại hình**	**Diện tích (m^2)**	**Loại đất**
1	Nguyễn Ngọc Trâm Anh	Tiền Giang	Lúa nước	10.000	Mặn
2	Phạm Việt Anh	Tiền Giang	Lúa nước	10.000	Mặn
3	Bùi Thị Quỳnh Anh	Tiền Giang	Lúa nước	15.000	Mặn
4	Vũ Đức Anh	Tiền Giang	Lúa nước	20.000	Mặn
5	Nguyễn Phùng Linh Chi	Tiền Giang	Lúa nước	15.000	Mặn
6	Dương Mỹ Dung	Tiền Giang	Lúa nước	10.000	Mặn
7	Nguyễn Mạnh Duy	Tiền Giang	Lúa nước	8.000	Mặn
8	Phạm Phương Duy	Tiền Giang	Lúa nước	5.000	Mặn
9	Nguyễn Thùy Dương	Tiền Giang	Lúa nước	12.000	Mặn
10	Lưu Minh Hằng	Tiền Giang	Lúa nước	3.000	Mặn
11	Nguyễn Hữu Minh Hoàng	Tiền Giang	Lúa nước	5.000	Mặn
12	Nguyễn Huy Hoàng	Tiền Giang	Lúa nước	7.500	Mặn
13	Nguyễn Đức Huy	Tiền Giang	Lúa nước	5.500	Mặn
14	Nguyễn Trung Kiên	Tiền Giang	Lúa nước	10.000	Mặn
15	Lê Duy Khiêm	Tiền Giang	Lúa nước	5.600	Mặn
16	Nguyễn Minh Khuê	Tiền Giang	Lúa nước	5.800	Mặn
17	Bùi Hải Lâm	Tiền Giang	Lúa nước	20.000	Mặn

18	Nguyễn Hà Gia Linh	Tiền Giang	Lúa nước	11.000	Mặn
19	Nguyễn Phúc Lộc	Tiền Giang	Lúa nước	9.500	Mặn
20	Hoàng Hương Ly	Tiền Giang	Lúa nước	10.000	Mặn
21	Trịnh Xuân Minh	Tiền Giang	Lúa nước	8.000	Mặn
22	Nguyễn Vũ Tiến Nam	Tiền Giang	Lúa nước	10.000	Mặn
23	Phạm Thị Hằng Nga	Tiền Giang	Lúa nước	12.000	Mặn
24	Hoàng Kim Ngân	Tiền Giang	Lúa nước	15.000	Mặn
25	Hoàng Yến Nhi	Tiền Giang	Lúa nước	10.000	Mặn
26	Mai Ngô Thiên Phú	Tiền Giang	Lúa nước	9.000	Mặn
27	Lê Tiến Tâm	Tiền Giang	Lúa nước	11.000	Mặn
28	Trần Xuân Toản	Tiền Giang	Lúa nước	8.000	Mặn
29	Lê Minh Tuấn	Tiền Giang	Lúa nước	12.000	Mặn
30	Dương Tất Thành	Tiền Giang	Lúa nước	10.000	Mặn
31	Lê Cao Thắng	Tiền Giang	Lúa nước	10.000	Mặn
32	Đặng Phương Thúy	Tiền Giang	Lúa nước	10.000	Mặn
33	Nguyễn Thu Trang	Tiền Giang	Lúa nước	9.000	Mặn
34	Nguyễn Thùy Trang	Tiền Giang	Lúa nước	5.600	Mặn
35	Nguyễn Hùng Anh	Tiền Giang	Lúa nước	5.800	Mặn
36	Nguyễn Ngọc Anh	Tiền Giang	Lúa nước	20.000	Mặn
37	Mai Tùng Bách	Tiền Giang	Lúa nước	11.000	Mặn
38	Nguyễn Trần Bình	Tiền Giang	Lúa nước	9.500	Mặn
39	Vũ Điệp Chi	Tiền Giang	Lúa nước	10.000	Mặn
40	Ng Kim Hoằng	Tiền Giang	Lúa nước	10.000	Mặn
41	Đào Ng Gia Huy	Tiền Giang	Lúa nước	8.000	Mặn
42	Đoàn Hữu Phong	Tiền Giang	Lúa nước	10.000	Mặn
43	Vũ Quang Hợp	Tiền Giang	Lúa nước	12.000	Mặn
44	Vũ Văn Thắng	Tiền Giang	Lúa nước	15.000	Mặn
45	Hoàng Lê Hưng	Tiền Giang	Lúa nước	10.000	Mặn
46	Hoàng Duy Thành	Tiền Giang	Lúa nước	9.000	Mặn
47	Hà Huy Tùng	Tiền Giang	Lúa nước	11.000	Mặn
48	Trần Mạnh	Tiền Giang	Lúa nước	8.000	Mặn
49	Đỗ Hoài Sơn	Tiền Giang	Lúa nước	12.000	Mặn
50	Lương Ngọc Anh	Tiền Giang	Lúa nước	10.000	Mặn
51	Đồng Mai Phương Anh	Tiền Giang	Lúa nước	10.000	Mặn
52	Nguyễn Hoàng Duy	Tiền Giang	Lúa nước	10.000	Mặn
53	Phạm Vân Hà	Tiền Giang	Lúa nước	9.000	Mặn
54	Vũ Quốc Huy	Tiền Giang	Lúa nước	11.000	Mặn

55	Trần Khánh Linh	Tiền Giang	Lúa nước	8.500	Mặn
56	Lê My	Tiền Giang	Lúa nước	10.000	Mặn
57	Nguyễn Hà Ngân	Tiền Giang	Lúa nước	8.000	Mặn
58	Nguyễn Thiên Ngọc	Tiền Giang	Lúa nước	10.000	Mặn
59	Nguyễn Hải Sơn	Tiền Giang	Lúa nước	8.500	Mặn
60	Hà Duy Anh	Tiền Giang	Lúa nước	10.000	Mặn
61	Trần Mai Quỳnh Anh	Tiền Giang	Lúa nước	8.000	Mặn
62	Nguyễn Tùng Dương	Tiền Giang	Lúa nước	10.000	Mặn
63	Nguyễn Duy Đức	Tiền Giang	Lúa nước	12.000	Mặn
64	Lưu Hương Giang	Tiền Giang	Lúa nước	20.000	Mặn
65	Nguyễn Quang Hùng	Tiền Giang	Lúa nước	10.000	Mặn
66	Phạm Ngọc Huyền	Tiền Giang	Lúa nước	9.000	Mặn
67	Bùi Hải Lâm	Tiền Giang	Lúa nước	11.000	Mặn
68	Trần Nhật Long	Tiền Giang	Lúa nước	8.000	Mặn
69	Đoàn Hải Minh	Tiền Giang	Lúa nước	12.000	Mặn
70	Bùi Khánh Ngọc	Tiền Giang	Lúa nước	10.000	Mặn
71	Đinh Ngọc Quỳnh Như	Tiền Giang	Lúa nước	10.000	Mặn
72	Nguyễn Thúy Quỳnh	Tiền Giang	Lúa nước	10.000	Mặn
73	Nguyễn Đức Thiện	Tiền Giang	Lúa nước	9.000	Mặn
74	Đào Xuân Mạnh	Tiền Giang	Lúa nước	11.000	Mặn
75	Đoàn Thế Hưng	Tiền Giang	Lúa nước	8.500	Mặn
76	Bùi Văn Đạt	Tiền Giang	Lúa nước	10.000	Mặn
77	Đinh Văn Điễn	Tiền Giang	Lúa nước	8.000	Mặn
78	Nguyễn Anh Tuấn	Tiền Giang	Lúa nước	10.000	Mặn
79	Đỗ Quốc Thắng	Tiền Giang	Lúa nước	8.500	Mặn
80	Hà Quang Phong	Tiền Giang	Lúa nước	10.000	Mặn
81	Trần Đức Hoàn	Tiền Giang	Lúa nước	8.000	Mặn
82	Nguyễn Mạnh Dũng	Tiền Giang	Lúa nước	10.000	Mặn
83	Nguyễn Duy Hùng	Tiền Giang	Lúa nước	12.000	Mặn
84	Lưu Văn Tuấn	Tiền Giang	Lúa nước	15.000	Mặn
85	Nguyễn Quang Thắng	Tiền Giang	Lúa nước	10.000	Mặn
86	Phạm Đức Thắng	Tiền Giang	Lúa nước	9.000	Mặn
87	Bùi Trường Sơn	Tiền Giang	Lúa nước	11.000	Mặn
88	Phạm Thế An	Tiền Giang	Lúa nước	8.000	Mặn
89	Phạm Trúc Anh	Tiền Giang	Lúa nước	12.000	Mặn
90	Đoàn Duy Bảo	Tiền Giang	Lúa nước	10.000	Mặn
91	Dương Minh Dũng	Tiền Giang	Lúa nước	10.000	Mặn

92	Nguyễn Ngọc Hà	Tiền Giang	Lúa nước	10.000	Mặn
93	Đào Nguyên Gia Huy	Tiền Giang	Lúa nước	9.000	Mặn
94	Đoàn Vĩnh Hưng	Tiền Giang	Lúa nước	11.000	Mặn
95	Vũ Thiện Khiêm	Tiền Giang	Lúa nước	8.500	Mặn
96	Phạm Thế Anh	Tiền Giang	Lúa nước	10.000	Mặn
97	Phạm Hữu Nguyên	Tiền Giang	Lúa nước	8.000	Mặn
98	Đoàn bảo Thanh	Tiền Giang	Lúa nước	10.000	Mặn
99	Dương Việt Cường	Tiền Giang	Lúa nước	8.500	Mặn
100	Phan Thành Phúc	Tiền Giang	Lúa nước	9.000	Mặn
STT	**Tên chủ hộ**	**Địa điểm**	**Loại hình**	**Diện tích (m^2)**	**Loại đất**
1	Nguyễn Như Ý	Củ Chi	Lúa nước	5.000	Xám
2	Nguyễn Văn Kha	Củ Chi	Lúa nước	6.000	Xám
3	Nguyễn Ngọc Linh	Củ Chi	Lúa nước	15.000	Xám
4	Phạm Y Vũ	Củ Chi	Lúa nước	10.000	Xám
5	Trần Nhật Long	Củ Chi	Lúa nước	8.000	Xám
6	Nguyễn Văn Giàu	Củ Chi	Lúa nước	5.000	Xám
7	Nguyễn Văn Sơn	Củ Chi	Lúa nước	12.000	Xám
8	Nguyễn Văn Sành	Củ Chi	Lúa nước	3.000	Xám
9	Nguyễn Thị Mỹ	Củ Chi	Lúa nước	5.000	Xám
10	Võ Trường Tồn	Củ Chi	Lúa nước	7.500	Xám
11	Hồ Văn Đức	Củ Chi	Lúa nước	5.500	Xám
12	Lê Văn Minh	Củ Chi	Lúa nước	10.000	Xám
13	Nguyễn Thị Thanh	Củ Chi	Lúa nước	5.600	Xám
14	Nguyễn Thị Linh	Củ Chi	Lúa nước	5.800	Xám
15	Nguyễn Văn Đầu	Củ Chi	Lúa nước	10.000	Xám
16	Thái Thị Minh	Củ Chi	Lúa nước	11.000	Xám
17	Phạm Văn Sáu	Củ Chi	Lúa nước	9.500	Xám
18	Nguyễn Thị Đào	Củ Chi	Lúa nước	10.000	Xám
19	Phan Bích Hà	Củ Chi	Lúa nước	8.000	Xám
20	Dương Thanh An	Củ Chi	Lúa nước	10.000	Xám
21	Trần Văn Toàn	Củ Chi	Lúa nước	12.000	Xám
22	Nguyễn Văn Toàn	Củ Chi	Lúa nước	15.000	Xám
23	Nguyễn Văn Sinh	Củ Chi	Lúa nước	10.000	Xám
24	Trần Thị Lan Hương	Củ Chi	Lúa nước	9.000	Xám
25	Nguyễn Văn Kinh	Củ Chi	Lúa nước	12.000	Xám
26	Nguyễn Thị Loan	Củ Chi	Lúa nước	9.000	Xám
27	Nguyễn Văn Hàng	Củ Chi	Lúa nước	10.000	Xám

28	Lê An	Củ Chi	Lúa nước	8.500	Xám
29	Nguyễn Minh Nhựt	Củ Chi	Lúa nước	7.500	Xám
30	Phan Thành Toàn	Củ Chi	Lúa nước	8.000	Xám
31	Phan Văn Đoàn	Củ Chi	Lúa nước	5.000	Xám
32	Châu Văn An	Củ Chi	Lúa nước	2.500	Xám
33	Trần Thị Thanh Hồng	Củ Chi	Lúa nước	9.500	Xám
34	Trần Thị Yến Nhi	Củ Chi	Lúa nước	8.000	Xám
35	Lê Thị Ngọc	Củ Chi	Lúa nước	7.000	Xám
36	Dương Văn Nhật	Củ Chi	Lúa nước	6.000	Xám
37	Phạm Ý Như	Củ Chi	Lúa nước	10.000	Xám
38	Trần Thị Đoàn	Củ Chi	Lúa nước	8.000	Xám
39	Nguyễn Văn Nhân	Củ Chi	Lúa nước	4.000	Xám
40	Bùi Thị Hạ Nhi	Củ Chi	Lúa nước	5.000	Xám
41	Trần Thị Ngọc	Củ Chi	Lúa nước	8.500	Xám
42	Lê Ngọc Nhi	Củ Chi	Lúa nước	10.000	Xám
43	Lê Văn Kinh	Củ Chi	Lúa nước	15.000	Xám
44	Nguyễn Thị Huyền	Củ Chi	Lúa nước	7.500	Xám
45	Tô Minh Đăng	Củ Chi	Lúa nước	3.000	Xám
46	Trần Thị Bé	Củ Chi	Lúa nước	5.000	Xám
47	Huỳnh Văn Phát	Củ Chi	Lúa nước	11.000	Xám
48	Lê Thị Thảo	Củ Chi	Lúa nước	1.500	Xám
49	Nguyễn Thị Thanh Loan	Củ Chi	Lúa nước	2.000	Xám
50	Trần Văn Nhạn	Củ Chi	Lúa nước	3.000	Xám
51	Phan Văn Miếu	Củ Chi	Lúa nước	5.000	Xám
52	Ngô Văn Huy	Củ Chi	Lúa nước	4.000	Xám
53	Võ Văn Nhân	Củ Chi	Lúa nước	12.000	Xám
54	Trần Minh Hiếu	Củ Chi	Lúa nước	13.000	Xám
55	Nguyễn Anh Khen	Củ Chi	Lúa nước	15.000	Xám
56	Đinh Văn Hoàng	Củ Chi	Lúa nước	3.000	Xám
57	Võ Văn Toàn	Củ Chi	Lúa nước	6.000	Xám
58	Nguyễn Văn Lịch	Củ Chi	Lúa nước	8.000	Xám
59	Huỳnh Văn Khang	Củ Chi	Lúa nước	9.000	Xám
60	Phan Văn Quốc	Củ Chi	Lúa nước	7.000	Xám
61	Nguyễn Thị Huê	Củ Chi	Lúa nước	6.000	Xám
62	Trần Văn Khê	Củ Chi	Lúa nước	5.000	Xám
63	Đinh Minh Thông	Củ Chi	Lúa nước	7.300	Xám
64	Huỳnh Minh Thông	Củ Chi	Lúa nước	15.000	Xám

65	Đào Thị Như Lệ	Củ Chi	Lúa nước	12.000	Xám
66	Trần Minh Đoàn	Củ Chi	Lúa nước	5.000	Xám
67	Lê Văn Giàu	Củ Chi	Lúa nước	8.500	Xám
68	Trương Hữu Kha	Củ Chi	Lúa nước	10.000	Xám
69	Lê Thanh Bô	Củ Chi	Lúa nước	15.000	Xám
70	Đỗ Văn Út	Củ Chi	Lúa nước	7.500	Xám
71	Nguyễn Thị Thanh Nhi	Củ Chi	Lúa nước	3.000	Xám
72	Cao Vũ Viễn	Củ Chi	Lúa nước	5.000	Xám
73	Lê Văn Mười	Củ Chi	Lúa nước	11.000	Xám
74	Cao Văn Phụ	Củ Chi	Lúa nước	1.500	Xám
75	Trần Thanh Nhàn	Củ Chi	Lúa nước	2.000	Xám
76	Phạm Văn Vũ	Củ Chi	Lúa nước	3.000	Xám
77	Phạm Thị Nan	Củ Chi	Lúa nước	5.000	Xám
78	Lê Thị Lan	Củ Chi	Lúa nước	4.000	Xám
79	Nguyễn Văn Lộc	Củ Chi	Lúa nước	12.000	Xám
80	Hồ Thị Thanh Nhàn	Củ Chi	Lúa nước	5.000	Xám
81	Lê Kim Phượng	Củ Chi	Lúa nước	7.000	Xám
82	Trần Thành Nhật	Củ Chi	Lúa nước	8.000	Xám
83	Đoàn Phú Huy	Củ Chi	Lúa nước	3.000	Xám
84	Nguyễn Thị Thúy Nga	Củ Chi	Lúa nước	5.000	Xám
85	Đinh Quang Hàn	Củ Chi	Lúa nước	4.000	Xám
86	Nguyễn Thị Thúy Lan	Củ Chi	Lúa nước	6.000	Xám
87	Đăng Quốc Thái	Củ Chi	Lúa nước	12.000	Xám
88	Nguyễn Nhân Trọng	Củ Chi	Lúa nước	10.000	Xám
89	Trần Văn Tâm	Củ Chi	Lúa nước	3.000	Xám
90	Lâm Văn Dương	Củ Chi	Lúa nước	7.000	Xám
91	Hồ Thị Ý	Củ Chi	Lúa nước	15.000	Xám
92	Nguyễn Nguyên Minh	Củ Chi	Lúa nước	7.000	Xám
93	Lê Văn Hóa	Củ Chi	Lúa nước	15.000	Xám
94	Trần Ngọc Bích Châu	Củ Chi	Lúa nước	10.000	Xám
95	Nguyễn Thanh Kim	Củ Chi	Lúa nước	8.000	Xám
96	Nguyễn Thị Hoa	Củ Chi	Lúa nước	8.000	Xám
97	Nguyễn Văn Dào	Củ Chi	Lúa nước	13.000	Xám
98	Lê Thanh Nhân	Củ Chi	Lúa nước	15.000	Xám
99	Nguyễn Văn Phúc	Củ Chi	Lúa nước	12.000	Xám
100	Lê Đặng Đức Minh	Củ Chi	Lúa nước	16.000	Xám

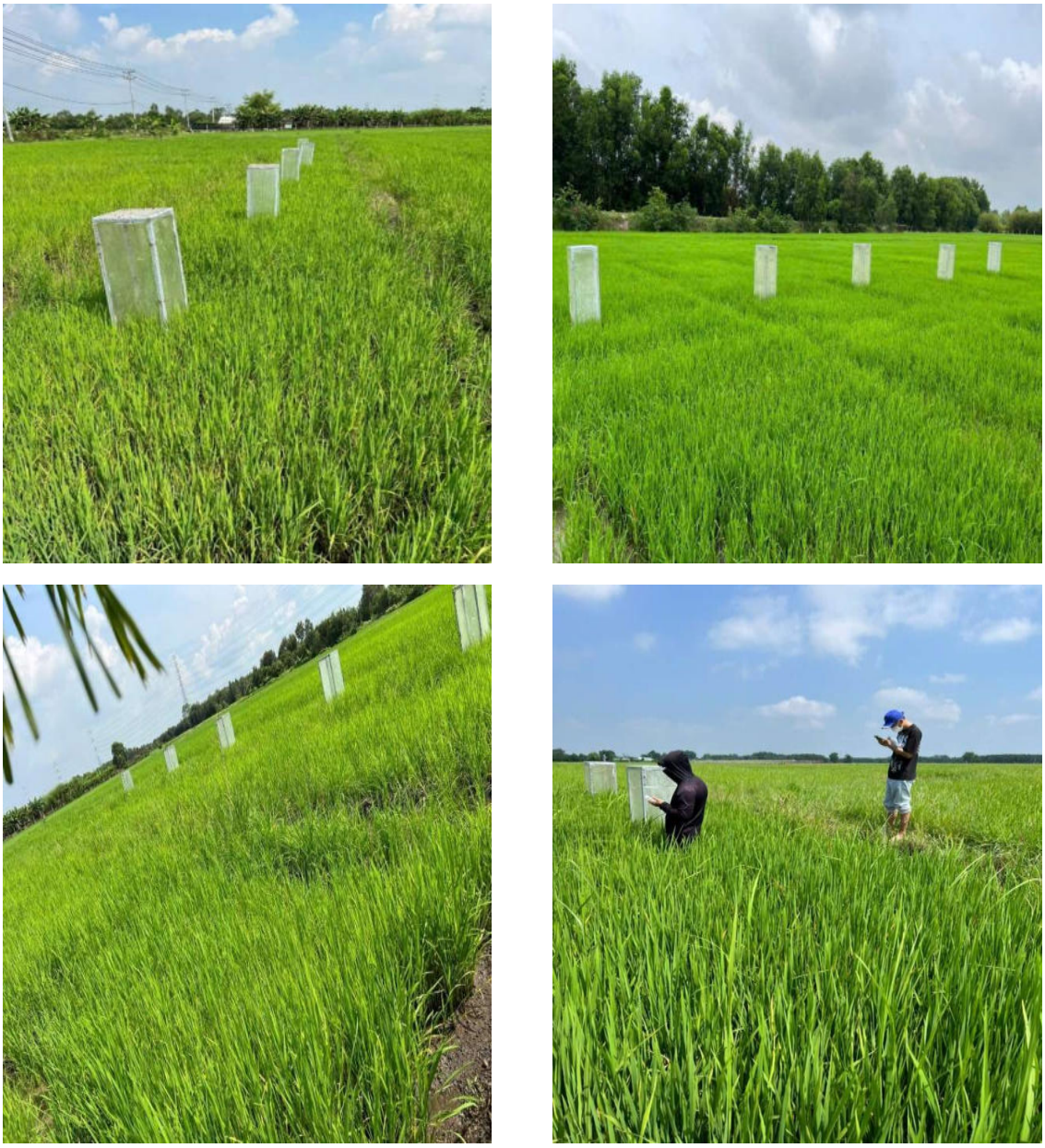
Phụ lục 7: Hình ảnh thực hiện các thí nghiệm trong luận án



Hình thu mẫu đất (phù sa, xám, mặn, phèn) của thí nghiệm nội dung 1



Hình chuẩn thí nghiệm và 36 chậu thí nghiệm mô hình nhà lưới



Hình thu mẫu khí CH_4 tại ruộng trong thí nghiệm thực địa



Hình chuẩn bị đất và trộn than tại các ô thí nghiệm mô hình thực địa

LÝ LỊCH TRÍCH NGANG CỦA NGHIÊN CỨU SINH

I. LÝ LỊCH SƠ LƯỢC:

Họ và tên: Đồng Phú Hảo ..... Giới tính: Nam

Ngày, tháng, năm sinh: 01/10/1980 ..... Nơi sinh: Vĩnh Long

Email: dongphuhao@iuh.edu.vn..... Điện thoại: 0989047046

II. QUÁ TRÌNH ĐÀO TẠO:

Bậc đào tạo	Thời gian	Nơi đào tạo	Chuyên ngành	Tên luận văn/luận án tốt nghiệp
Đại học	1998-2003	ĐH KHXH&NV - ĐHQG TPHCM	Địa lý môi trường	Thi tốt nghiệp
Thạc sĩ	2005-2008	ĐH KHXH&NV - ĐHQG TPHCM	Sử dụng và bảo vệ Tài nguyên môi trường	Đánh giá hiện trạng và đề xuất giải pháp phát triển bền vững du lịch sinh thái miệt vườn tại cù lao An Bình, huyện Long Hồ, tỉnh Vĩnh Long.
Tiến sĩ	2022-2025	Đại học Công nghiệp TP. HCM	Quản lý tài nguyên môi trường	Nâng cao hiệu quả môi trường và kinh tế của sản xuất lúa nước bằng than sinh học theo hướng phát triển bền vững

III. QUÁ TRÌNH CÔNG TÁC CHUYÊN MÔN:

Thời gian	Nơi công tác	Công việc đảm nhiệm
2003-2005	Công ty TNHH Bất động sản Linh Phương	Nhân viên
2005-2008	ĐH KHXH&NV - ĐHQG TP. HCM	Học cao học
2008-nay	Trường Đại học Công nghiệp TP. HCM	Giảng viên

Tp. HCM, ngày 28 tháng 02 năm 2026

Người khai

Đồng Phú Hảo