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



NGUYỄN TÂN XUÂN TÙNG

CẢI TẠO CÁC THÀNH PHẦN HÓA HỌC CỦA ĐẤT PHÈN NHIỄM MẶN BẰNG VẬT LIỆU THÂN THIỆN MÔI TRƯỜNG TRONG BỐI CẢNH BIẾN ĐỔI KHÍ HẬU

NGÀNH: QUẢN LÝ TÀI NGUYÊN VÀ MÔI TRƯỜNG
MÃ NGÀNH: 9850101

LUẬN ÁN TIẾN SĨ

THÀNH PHỐ HỒ CHÍ MINH, NĂM 2025

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

NGUYỄN TÂN XUÂN TÙNG

CẢI TẠO CÁC THÀNH PHẦN HÓA HỌC CỦA ĐẤT PHÈN NHIỄM MẶN BẰNG VẬT LIỆU THÂN THIỆN MÔI TRƯỜNG TRONG BỐI CẢNH BIẾN ĐỔI KHÍ HẬU

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

Phản biện độc lập 1:
Phản biện độc lập 2:

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

NGƯỜI HƯỚNG DẪN:
1. Phó Giáo sư, Tiến sĩ Nguyễn Thanh Bình
2. Tiến sĩ Thái Vũ Bình

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

Nguyễn Tân Xuân Tùng

TÓM TẮT LUẬN ÁN TIẾN SĨ

Đất phèn nhiễm mặn có bốn nhóm đặc tính hóa học gồm độ axit cao, nhiễm mặn, độc cao, mất cân bằng dinh dưỡng và có thể được khắc phục bằng các vật liệu thân thiện môi trường như than sinh học, vôi và phân bò. Các vật liệu này khi kết hợp đã tạo hiệu ứng mạnh mẽ cải thiện đất và tăng năng suất cây trồng. Luận án được thực hiện với mục tiêu khảo sát các đặc tính hóa học của đất phèn nhiễm mặn và đánh giá hiệu quả cải tạo loại đất này của than trấu, vôi, phân bò kết hợp với chế độ quản lý nước lên chất lượng đất, sinh trưởng và năng suất cây trồng, đồng thời đề xuất các giải pháp cải tạo và sử dụng đất khả thi, thích ứng với biến đổi khí hậu. Nghiên cứu đã triển khai bốn nội dung chính. Ở nội dung 1 - Khảo sát hiện trạng sử dụng và các đặc tính hóa học của đất phèn nhiễm, kết quả nghiên cứu cho thấy đất phèn nhiễm mặn có bốn đặc tính: (i) tính axit (pH, SO_4^{2-}, độ chua trao đổi, H^+ trao đổi), (ii) mặn (EC, Cl^-, Na trao đổi), (iii) độc (Al, Fe, Mn trao đổi) và (iv) dinh dưỡng (CEC, P, OC, NH_4^+, K, Ca, Mg trao đổi). Trong nội dung 2 - Đánh giá tác động của các vật liệu đến các đặc tính hóa học của đất phèn nhiễm mặn, kết quả nghiên cứu đã chọn được than trấu; các liều áp dụng, thí nghiệm 1,2,3: than trấu 1,1% (≈10 t/ha); vôi 1 t/ha; phân bò 10 t/ha, thí nghiệm 4: than trấu 1,5% (≈15 t/ha); vôi 1,5 t/ha; phân bò 15 t/ha; sự kết hợp giữa than trấu, vôi và phân bò đã cải thiện đáng kể các chỉ tiêu đất như tăng pH, giảm độc tố Al và Fe, hấp phụ Na^+ và Cl^-, tăng OC và chất dinh dưỡng; than trấu + vôi giúp giảm tính độc của Al, chuyển Al từ dạng độc sang dạng kết tinh. Nội dung 3 cho thấy ở quy mô thực địa, tổ hợp than trấu và phân bò, than trấu và vôi đều nâng cao sinh trưởng, năng suất lúa và cải thìa. Nội dung 4 đã xây dựng và đề xuất được các giải pháp cải tạo và sử dụng đất phèn nhiễm mặn. Cụ thể là than trấu kết hợp vôi cải thiện hiệu quả độ chua và giảm độc tính, than trấu kết hợp phân bò cải thiện đáng kể về dinh dưỡng. Các kết quả nghiên cứu trên đã chứng minh rằng kết hợp than trấu, vôi và phân bò là giải pháp toàn diện cải tạo đất phèn nhiễm mặn, vừa khắc phục hạn chế đất vừa nâng cao năng suất cây trồng, góp phần thích ứng biến đổi khí hậu.

***Từ khóa**: Biện pháp cải tạo, biochar, đất phèn nhiễm mặn, hóa học đất, phân bò, vôi.*

ĐIỂM NỔI BẬT CỦA LUẬN ÁN

(1) Đất phèn nhiễm mặn có bốn nhóm đặc tính quan trọng là có tính axit (pH thấp, SO_4^{2-}, độ chua trao đổi và H^+ trao đổi) cao, tính mặn (EC, Cl^-, Na trao đổi) cao, tính độc (Al, Fe, Mn trao đổi) cao, dinh dưỡng (CEC, NH_4^+, OC, P, K, Ca, Mg trao đổi) mất cân bằng.

(2) Chỉ số chất lượng đất tính axit và mặn tăng rõ rệt ở các điểm cách bờ biển > 20 km, đồng thời tầng đất 30-60 cm bị ảnh hưởng nặng hơn so với tầng đất 0-30 cm là minh chứng cho xu hướng xâm nhập mặn sâu và mở rộng phạm vi ảnh hưởng.

(3) Kết hợp than trấu và vôi làm tăng chất lượng đất, cải thiện tính axit, mặn, độc đồng thời làm giảm hàm lượng Al trao đổi và Al liên kết yếu. Cách thức tác động của vấn đề này có liên quan đến khả năng thúc đẩy quá trình kết tủa của Al thành dạng không tan, chuyển hóa Al từ dạng dễ hấp thu sang các dạng ít độc hơn.

(4) Kết hợp than trấu và phân bò làm tăng chất lượng đất và sinh trưởng, năng suất của lúa và cải thìa đồng thời làm tăng hàm lượng carbon hữu cơ trong đất phèn nhiễm mặn. Trong đó: (i) Thí nghiệm trên lúa được thực hiện trong 1 vụ, từ tháng 7 đến tháng 12 năm 2022, tại xã Bình Khánh, huyện Cần Giờ (cũ), thành phố Hồ Chí Minh. Than trấu và phân bò được bón cùng liều lượng 10 tấn/ha, vôi ở mức 1 tấn/ha; (ii) Thí nghiệm trên cải thìa được thực hiện trong 2 vụ, từ tháng 6 đến tháng 9 năm 2023, tại xã Kiểng Phước, huyện Gò Công Đông, tỉnh Tiền Giang (cũ). Than trấu và phân bò được bón cùng liều lượng 1,5 tấn/ha và vôi ở mức 1,5 tấn/ha.

Các kết quả nghiên cứu trên cho thấy việc cải tạo đất phèn nhiễm mặn bằng than trấu kết hợp với vôi hoặc phân bò không chỉ giúp trung hòa độ chua, giảm độc tố mà còn nâng cao chất lượng đất (pH, SO_4^{2-}, độ chua trao đổi, H^+ trao đổi, Cl^-, EC, OC, CEC, NH_4^+, Mehlich-1 P, Ca, K, Mg, Al, Fe, Mn, Na trao đổi), hiệu quả canh tác và phụ thuộc vào loại hình sử dụng đất (đất trồng lúa, cây lâu năm, cây hằng năm khác, nuôi thủy sản và tự nhiên) trong bối cảnh xâm nhập mặn gia tăng do biến đổi khí hậu.

ABSTRACT

Saline acid sulfate soils (SASS) exhibit four principal chemical constraints — high acidity, salinity, toxicity, and nutrient imbalance — and can be ameliorated by environmentally friendly amendments such as lime, cow manure (CM), and rice husk biochar (RHB). This dissertation aims to (i) characterize the chemical properties of SASS and (ii) evaluate the effectiveness of RHB, lime, and CM combined with water-management regimes on soil quality, crop growth, and yield, and to propose feasible land-improvement and land-use measures adapted to climate change. The study comprises four main tasks. In Task 1 — survey of land use and chemical properties of SASS — results show four diagnostic groups of soil properties: (i) acidity (pH, SO_4^{2-}, acidity, exchangeable H^+), (ii) salinity (EC, Cl^-, exchangeable Na), (iii) toxicity (exchangeable Al, Fe, Mn) and (iv) nutrient status (CEC, available P, OC, NH_4^+, exchangeable K, Ca, Mg). In Task 2 — evaluation of amendment effects on soil chemical properties — RHB was selected and applied in the following treatments: experiments 1–3: RHB 1.1% (≈10 t ha^{-1}), lime 1 t ha^{-1}, CM 10 t ha^{-1}; experiment 4: RHB 1.5% (≈15 t ha^{-1}), lime 1.5 t ha^{-1}, CM 15 t ha^{-1}. The combination of RHB, lime, and CM significantly improved soil indicators by increasing pH, reducing soluble/toxic Al and Fe, adsorbing/reducing Na^+ and Cl^-, and increasing OC and plant-available nutrients. The RHB+lime treatment in particular reduced Al toxicity by transforming Al from soluble/toxic forms into more crystalline, less bioavailable phases. Task 3 demonstrated at the field scale that the RHB+CM and RHB+lime combinations enhanced plant growth and increased yields of rice and pak choy. Task 4 developed and proposed practical remediation and land-use measures for SASS. RHB, combined with lime, effectively ameliorates acidity and reduces toxicity, while RHB, combined with CM, substantially improves nutrient status. Overall, the results validate that the integrated application of RHB, lime, and CM provides a comprehensive strategy for remediation of SASS, alleviation of soil constraints, and increased crop productivity, thereby contributing to climate change adaptation.

Keywords: *Soil amelioration measures, biochar, saline acid sulfate soils, soil chemistry, cow manure, lime.*

HIGHLIGHTS

(1) Saline acid sulfate soils (SASS) exhibit four principal chemical constraints: high acidity (low pH, SO_4^{2-}, exchangeable acidity and exchangeable H^+), high salinity (EC, Cl^-, exchangeable Na^+), toxicity (exchangeable Al, Fe, Mn) and nutrient imbalance (CEC, NH_4^+, OC, P, exchangeable K, Ca, Mg).

(2) The acidity and salinity-related Soil Quality Index (SQI) increase markedly at sampling points located >20 km from the coast, and the 30–60 cm soil layer is more strongly affected than the 0–30 cm layer. These patterns indicate deepening salt intrusion and an expansion of the affected zone inland.

(3) The combined application of rice-husk biochar (RHB) and lime improves soil quality by ameliorating acidity, salinity, and toxicity, and by reducing exchangeable Al and weakly complexed Al. Mechanistically, these treatments promote Al precipitation and transformation from plant-available forms to less soluble, less bioavailable species.

(4) The combination of RHB and cow manure (CM) enhances soil quality, crop growth, and yield (rice and pak choy) and increases soil OC in SASS. Study details: (i) Rice experiment: conducted during one season (July–December 2022) at Binh Khanh Commune, Can Gio District, Ho Chi Minh City. Application rates: RHB and CM each 10 t ha^{-1}; lime 1 t ha^{-1}. (ii) Pak choy experiments: conducted over two seasons (June–September 2023) at Kieng Phuoc Commune, Go Cong Dong District, Tien Giang Province. Application rates: RHB and CM each 1.5 t ha^{-1}; lime 1.5 t ha^{-1}.

Collectively, the results demonstrate that amelioration of SASS by RHB in combination with lime and/or CM not only neutralizes acidity and reduces toxicity but also improves a wide range of soil chemical properties (pH, SO_4^{2-}, exchangeable acidity, exchangeable H^+, Cl^-, EC, OC, CEC, NH_4^+, Mehlich-1 P, exchangeable Ca, K, Mg, Al, Fe, Mn, Na). The effectiveness of these amendment strategies and recommended land-use practices depends on the local land-use type (paddy rice, perennial land, other annual crops, aquaculture, and natural land) and should be considered in the context of increasing salt intrusion driven by climate change.

LỜI CÁM ƠN

Với lòng kính trọng sâu sắc nhất, tôi xin gửi lời cảm ơn chân thành đến PGS.TS. Nguyễn Thanh Bình - Trường Đại học Công nghiệp Thành phố Hồ Chí Minh và TS. Thái Vũ Bình - Viện Môi trường và Tài nguyên, Đại học Quốc gia Thành phố Hồ Chí Minh, người đã không quản ngại thời gian và công sức để tận tình hướng dẫn, chỉ bảo tôi trong suốt hành trình nghiên cứu đầy thách thức này. Kiến thức uyên bác, sự kiên nhẫn và những chỉ dẫn quý báu của hai Thầy đã giúp tôi vượt qua nhiều khó khăn, đồng thời là nguồn động lực lớn lao để tôi hoàn thành luận án Tiến sĩ.

Tôi cũng xin tri ân Ban Giám hiệu, Viện Đào tạo quốc tế và Sau đại học, 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 và cung cấp môi trường học thuật tuyệt vời cho tôi thực hiện nghiên cứu.

Tôi đặc biệt biết ơn Hội đồng khoa học, những chuyên gia đã dành thời gian quý báu để xem xét và đánh giá công trình của tôi. Những nhận xét, góp ý sắc bén và thấu đáo từ các quý Thầy/Cô đã giúp tôi nhìn nhận lại vấn đề một cách sâu sắc để hoàn thiện luận án tốt hơn.

Không thể không nhắc đến gia đình và những người thân yêu - những người luôn là chỗ dựa tinh thần vững chắc, không ngừng động viên, ủng hộ tôi trên con đường nghiên cứu đầy gian khó.

Cuối cùng, tôi xin chân thành cám ơn đến các bạn sinh viên của Viện Khoa học công nghệ và Quản lý môi trường - Trường Đại học Công nghiệp Thành phố Hồ Chí Minh dù trực tiếp hay gián tiếp cũng đã hỗ trợ và đồng hành cùng tôi trong quá trình thực hiện nghiên cứu này.

Xin trân trọng cảm ơn!

MỤC LỤC

LỜI CAM ĐOAN i
TÓM TẮT LUẬN ÁN TIẾN SĨ ii
ABSTRACT iv
LỜI CÁM ƠN vi
DANH MỤC HÌNH ẢNH x
DANH MỤC BẢNG BIỂU xii
DANH MỤC CÁC TỪ VIẾT TẮT xv
MỞ ĐẦU 1
1. Đặt vấn đề 1
2. Mục tiêu nghiên cứu 5
2.1 Mục tiêu tổng quát 5
2.2 Mục tiêu cụ thể 5
3. Đối tượng và phạm vi nghiên cứu 5
3.1 Đối tượng nghiên cứu 5
3.2 Phạm vi nghiên cứu 6
4. Ý nghĩa khoa học và thực tiễn 6
4.1 Ý nghĩa khoa học 6
4.2 Ý nghĩa thực tiễn 6
5. Tính mới của đề tài 6
6. Các giả thuyết khoa học cần kiểm tra 7
CHƯƠNG 1 TỔNG QUAN VỀ CÁC VẤN ĐỀ NGHIÊN CỨU 9
1.1 Tác động của biến đổi khí hậu đến tính chất đất phèn nhiễm mặn 9
1.2 Tính chất đất phèn nhiễm mặn 12
1.2.1 Tính axit 12
1.2.2 Tính mặn 13
1.2.3 Tính độc 14
1.2.4 Tính mất cân bằng dinh dưỡng 14
1.3 Một số nghiên cứu đặc trưng về tính chất đất phèn nhiễm mặn 15

1.4 Ảnh hưởng của đất phèn nhiễm mặn đến cây trồng 20
1.5 Các giải pháp cải tạo và sử dụng đất phèn nhiễm mặn 22
1.6 Giải pháp cải tạo đất bằng than sinh học 24
1.7 Một số phương pháp nội nghiệp điển hình trong nghiên cứu về đất 29
1.8 Nhận xét và vấn đề cần được tiếp tục nghiên cứu 31
CHƯƠNG 2 NỘI DUNG VÀ PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU 33
2.1 Nội dung nghiên cứu 33
2.2 Phương pháp nghiên cứu 34
CHƯƠNG 3 KẾT QUẢ NGHIÊN CỨU VÀ THẢO LUẬN 55
3.1 Nội dung 1: Khảo sát hiện trạng và hiệu quả sử dụng các loại hình sử dụng đất phèn nhiễm mặn phục vụ cho mục đích sản xuất nông nghiệp tại Cần Giờ (cũ) và Gò Công Đông (cũ) và đánh giá các đặc tính hóa học của chúng 55
3.1.1 Hiện trạng và hiệu quả sử dụng các loại hình sử dụng đất phèn nhiễm mặn phục vụ cho mục đích sản xuất nông nghiệp tại Cần Giờ (cũ) và Gò Công Đông (cũ) 55
3.1.2 Đánh giá các đặc tính hóa học của đất phèn nhiễm mặn tại Cần Giờ (cũ) 58
3.1.3 Chỉ số chất lượng đất thành phần theo không gian xâm nhập mặn 65
3.1.4 Thảo luận chung 68
3.2 Nội dung 2: Khảo sát và đánh giá tác động của than sinh học (than trấu, than nhãn, than dừa), vôi và phân bò đến các đặc tính hóa học của đất phèn nhiễm mặn trong điều kiện nhà lưới 73
3.2.1 Khảo sát đặc tính, xác định loại than sinh học và tỷ lệ sử dụng phù hợp cho cải tạo đất phèn nhiễm mặn 73
3.2.2 Ảnh hưởng của than trấu, vôi và phân bò lên các đặc tính hóa học đất phèn nhiễm mặn ở hai chế độ quản lý nước khác nhau ở điều kiện nhà lưới 82
3.2.3 Thảo luận chung 98
3.3 Nội dung 3: Đánh giá hiệu quả của than trấu, vôi và phân bò đến đặc tính đất, sinh trưởng và năng suất lúa và cải thìa ở điều kiện thực tế đồng ruộng 104
3.3.1 Đặc tính hóa học của đất và vật liệu trước thí nghiệm 104
3.3.2 Ảnh hưởng của các vật liệu thân thiện môi trường đến chất lượng đất 106
3.3.3 Ảnh hưởng của các vật liệu thân thiện môi trường đến năng suất và sinh trưởng của lúa và cải thìa 111

3.3.4 Ảnh hưởng của các vật liệu thân thiện môi trường đến hàm lượng các nguyên tố trong sinh khối lúa và cải thìa 113
3.3.5 Mối tương quan giữa chỉ số chất lượng đất thành phần và năng suất, sinh trưởng của lúa và cải thìa 114
3.3.6 Thảo luận chung 123
3.4 Nội dung 4: Đề xuất các giải pháp cải tạo và sử dụng đất phèn nhiễm mặn.... 127
3.4.1 Đánh giá tiềm năng cải tạo đất phèn nhiễm mặn bằng vật liệu thân thiện môi trường thông qua phân tích SWOT 127
3.4.2 Các giải pháp cải tạo và sử dụng đất phèn nhiễm mặn 134
KẾT LUẬN VÀ KIẾN NGHỊ 137
1. Kết luận 137
2. Kiến nghị 138
DANH MỤC CÔNG TRÌNH ĐÃ CÔNG BỐ CỦA NGHIÊN CỨU SINH 139
DANH MỤC TÀI LIỆU THAM KHẢO 140
PHỤ LỤC P1
Phụ lục 1: Các phương pháp phân tích chỉ tiêu hóa học đất chi tiết P1
Phụ lục 2: Các bảng trình bày kết quả phân tích PCA/FA và trọng số của các thông số đất sau thí nghiệm của tất cả các thí nghiệm trong luận án P11
Phụ lục 3: Các bảng trình bày kết quả hàm lượng của các nguyên tố có trong rễ, rơm và hạt của lúa; rễ, thân lá của cải thìa sau thời gian thực hiện thí nghiệm, thu hoạch và phân tích P16
Phụ lục 4: Mẫu phiếu khảo sát hiện trạng và hiệu quả sử dụng đất P21
Phụ lục 5: Hình ảnh thực hiện các thí nghiệm trong luận án P24
LÝ LỊCH TRÍCH NGANG CỦA NGHIÊN CỨU SINH P36

DANH MỤC HÌNH ẢNH

Hình 1.1 Mô hình tối giản mô phỏng cách thức hấp phụ Na^+ và hiệu quả làm giảm nồng độ Na^+ trong dung dịch đất bởi than sinh học 27

Hình 1.2 Mô hình mô phỏng vai trò của than sinh học trong việc cải thiện sinh trưởng, năng suất cây trồng trên đất phèn nhiễm mặn 28

Hình 2.1 Bản đồ vị trí lấy mẫu đất tại huyện Cần Giờ (cũ), thành phố Hồ Chí Minh 36

Hình 2.2 Sơ đồ bố trí thí nghiệm ba loại than sinh học (Thí nghiệm 1) 42

Hình 2.3 Sơ đồ bố trí thí nghiệm ủ đất và vật liệu thân thiện môi trường (Thí nghiệm 2) 46

Hình 2.4 Sơ đồ bố trí thí nghiệm canh tác lúa nước (Thí nghiệm 3) 49

Hình 2.5 Sơ đồ bố trí thí nghiệm canh tác cải thìa (Thí nghiệm 4) 52

Hình 3.1 SQI tổng thể tầng 0-30 cm (a) và 30-60 cm (b) của 5 loại hình sử dụng đất - Cần Giờ cũ (tháng 7,8 năm 2022) 62

Hình 3.2 SQI tính axit tầng 0-30 cm (a) và 30-60 cm (b), tính mặn tầng 0-30 cm (c) và 30-60 cm (d) của 5 loại hình sử dụng đất - Cần Giờ cũ (tháng 7,8 năm 2022) 63

Hình 3.3 SQI tính độc tầng 0-30 cm (a) và 30-60 cm (b), dinh dưỡng tầng 0-30 cm (c) và 30-60 cm (d) của 5 loại hình sử dụng đất - Cần Giờ cũ (tháng 7,8 năm 2022) 64

Hình 3.4 Mối tương quan giữa SQI tính axit tầng 0-30 cm (a) và 30-60 cm (b), tính mặn tầng 0-30 cm (c) và 30-60 cm (d) với khoảng cách tính từ bờ biển vào đất liền 65

Hình 3.5 Mối tương quan giữa SQI tính độc tầng 0-30 cm (a), 30-60 cm (b) và dinh dưỡng tầng 0-30 cm (c), 30-60 cm (d) với khoảng cách tính từ bờ biển vào đất liền 67

Hình 3.6 Biến động chỉ số chất lượng đất bị ảnh hưởng bởi các loại và tỷ lệ than sinh học ở thí nghiệm trong nhà lưới (tháng 1 đến tháng 4, năm 2022) 80

Hình 3.7 Ảnh hưởng của các vật liệu lên Al liên kết yếu (Al_{lky}) - tưới ngập (a), độ ẩm 60% (b) và Al liên kết bền (Al_{lkb}) - tưới ngập (c), độ ẩm 60% (d) sau thí nghiệm 90

Hình 3.8 Ảnh hưởng của các vật liệu lên Al vô định hình ($Al_{vđh}$) - tưới ngập (a), độ ẩm 60% (b) và Al kết tinh (Al_{kt}) - tưới ngập (c), độ ẩm 60% (d) sau thí nghiệm.....91

Hình 3.9 Ảnh hưởng của các vật liệu lên Al trao đổi ($Al_{trđ}$) - tưới ngập (a), độ ẩm 60% (b) và Al kết tinh chặt (Al_{ktc}) - tưới ngập (c), độ ẩm 60% (d) sau thí nghiệm 92

Hình 3.10 SQI tổng thể sau thí nghiệm với chế độ nước tưới ngập (a), độ ẩm 60% (b) ở điều kiện nhà lưới (tháng 4 đến tháng 7, năm 2022).....94

Hình 3.11 SQI axit (a), (b) và mặn (c), (d) sau thí nghiệm với chế độ nước lần lượt là tưới ngập và độ ẩm 60% ở điều kiện nhà lưới (tháng 4 đến tháng 7, năm 2022) 96

Hình 3.12 SQI độc (a), (b) và dinh dưỡng (c), (d) sau thí nghiệm với chế độ nước tưới ngập và độ ẩm 60% ở điều kiện nhà lưới (tháng 4 đến tháng 7, năm 2022) 98

Hình 3.13 SQI tổng thể của đất phèn nhiễm mặn trồng lúa sau thí nghiệm ở điều kiện thực tế đồng ruộng (tháng 7 đến tháng 12, năm 2022)..... 115

Hình 3.14 SQI tính axit (a), mặn (b), độc (c) và dinh dưỡng (d) sau thí nghiệm ở điều kiện thực tế đồng ruộng (tháng 7 đến tháng 12, năm 2022)..... 116

Hình 3.15 Mối tương quan giữa chỉ số chất lượng đất tính axit (a), mặn (b), độc (c) và dinh dưỡng (d) với tổng sinh khối và năng suất hạt lúa sau thí nghiệm ở điều kiện thực tế đồng ruộng (tháng 7 đến tháng 12, năm 2022) 117

Hình 3.16 SQI tổng thể của đất phèn nhiễm mặn trồng cải thìa sau thí nghiệm vụ 1 (a), vụ 2 (b) ở điều kiện thực tế đồng ruộng (tháng 6 đến tháng 9, năm 2023) 119

Hình 3.17 SQI tính axit vụ 1 (a), vụ 2 (b) và SQI tính mặn vụ 1 (c), vụ 2 (d) sau thí nghiệm ở điều kiện thực tế đồng ruộng (tháng 6 đến tháng 9, năm 2023) 120

Hình 3.18 SQI tính độc vụ 1 (a), vụ 2 (b) và SQI tính dinh dưỡng vụ 1 (c), vụ 2 (d) sau thí nghiệm ở điều kiện thực tế đồng ruộng (tháng 6 đến tháng 9, năm 2023) 121

Hình 3.19 Mối tương quan giữa chỉ số chất lượng đất tính axit (a), mặn (b), độc (c) và dinh dưỡng (d) với tổng sinh khối cải thìa sau thí nghiệm ở điều kiện thực tế đồng ruộng (tháng 6 đến tháng 9, năm 2023)..... 122

DANH MỤC BẢNG BIỂU

Bảng 1.1 Đặc tính vật lý đất phèn nhiễm mặn tại Cần Giờ (cũ) (Phương, 2020 [58]) 18

Bảng 1.2 Đặc tính hóa học đất phèn nhiễm mặn tại Cần Giờ (cũ) (Phương, 2020 [58]) 19

Bảng 2.1 Tổng hợp các chỉ tiêu hóa học cần phân tích cho mẫu đất 37

Bảng 2.2 Các nghiệm thức cho thí nghiệm 1 41

Bảng 2.3 Các nghiệm thức cho thí nghiệm 2 45

Bảng 2.4 Các nghiệm thức cho thí nghiệm 3 48

Bảng 2.5 Các nghiệm thức cho thí nghiệm 4 51

Bảng 3.1 Hiện trạng và hiệu quả của các loại hình sử dụng đất canh tác phổ biến trên đất phèn nhiễm mặn tại Cần Giờ (cũ) và Gò Công Đông (cũ) 56

Bảng 3.2 Đặc tính đất phèn nhiễm mặn thể hiện tính axit trên các loại hình sử dụng đất khác nhau - Cần Giờ cũ (tháng 7,8 năm 2022) 58

Bảng 3.3 Đặc tính đất phèn nhiễm mặn thể hiện tính mặn và tính độc trên các loại hình sử dụng đất khác nhau - Cần Giờ cũ (tháng 7,8 năm 2022) 59

Bảng 3.4 Đặc tính đất phèn nhiễm mặn thể hiện tính dinh dưỡng trên các loại hình sử dụng đất khác nhau - Cần Giờ cũ (tháng 7,8 năm 2022) 60

Bảng 3.5 Kết quả phân tích tương quan đa biến và phần trăm giải thích tổng biến thiên của khoảng cách tính từ bờ biển vào đất liền với các chỉ số chất lượng đất thành phần ở 2 tầng đất - Cần Giờ cũ (tháng 7,8 năm 2022) 68

Bảng 3.6 Tính chất của than trấu, nhãn, dừa và đất trước thí nghiệm (Thí nghiệm 1) 73

Bảng 3.7 Ảnh hưởng của ba loại than sinh học lên tính axit của đất phèn nhiễm mặn ở thí nghiệm trong nhà lưới (tháng 1 đến tháng 4, năm 2022) 74

Bảng 3.8 Ảnh hưởng của ba loại than sinh học lên tính mặn và tính độc của đất phèn nhiễm mặn ở thí nghiệm trong nhà lưới (tháng 1 đến tháng 4, năm 2022) 76

Bảng 3.9 Ảnh hưởng của ba loại than sinh học lên tính dinh dưỡng của đất phèn nhiễm mặn ở thí nghiệm trong nhà lưới (tháng 1 đến tháng 4, năm 2022) 78

Bảng 3.10 Tính chất của than trấu, phân bò và đất trước thí nghiệm (Thí nghiệm 2) 82

Bảng 3.11 Ảnh hưởng của các vật liệu lên đặc tính hóa học đất phèn nhiễm mặn với chế độ nước tưới ngập ở điều kiện nhà lưới (tháng 4 đến tháng 7, năm 2022) 83

Bảng 3.12 Ảnh hưởng của các vật liệu lên đặc tính hóa học đất phèn nhiễm mặn với chế độ nước độ ẩm 60% ở điều kiện nhà lưới (tháng 4 đến tháng 7, năm 2022) 86

Bảng 3.13 Tính chất của than trấu, phân bò và đất trước thí nghiệm (Thí nghiệm 3) 104

Bảng 3.14 Tính chất của than trấu, phân bò và đất trước thí nghiệm (Thí nghiệm 4) 105

Bảng 3.15 Ảnh hưởng của các vật liệu lên đặc tính hóa học đất phèn nhiễm mặn ở điều kiện thực tế đồng ruộng (tháng 7 đến tháng 12, năm 2022) 106

Bảng 3.16 Ảnh hưởng của các vật liệu lên đặc tính hóa học đất phèn nhiễm mặn ở điều kiện thực tế đồng ruộng (tháng 6 đến tháng 9, năm 2023) 108

Bảng 3.17 Ảnh hưởng của các vật liệu lên đặc tính hóa học đất phèn nhiễm mặn ở điều kiện thực tế đồng ruộng (tháng 6 đến tháng 9, năm 2023) (tt)..... 110

Bảng 3.18 Ảnh hưởng của các vật liệu lên trọng lượng (TL) rễ, rơm, hạt và tổng sinh khối lúa trồng ở điều kiện thực tế đồng ruộng (tháng 6 đến tháng 9, năm 2023) 112

Bảng 3.19 Ảnh hưởng của các vật liệu lên trọng lượng (TL) rễ, thân lá và tổng sinh khối cải thìa trồng ở điều kiện thực tế đồng ruộng (tháng 6 đến tháng 9, năm 2023) 112

Bảng 3.20 Kết quả phân tích tương quan đa biến và phần trăm giải thích tổng biến thiên của tổng sinh khối và năng suất hạt lúa với các chỉ số chất lượng đất thành phần ở điều kiện thực tế đồng ruộng (tháng 7 đến tháng 12, năm 2022) 118

Bảng 3.21 Kết quả phân tích tương quan đa biến và phần trăm giải thích tổng biến thiên của tổng sinh khối cải thìa với các chỉ số chất lượng đất thành phần ở điều kiện thực tế đồng ruộng (tháng 6 đến tháng 9, năm 2023) 123

Bảng 3.22 Mô hình SWOT tính axit và mặn của đất phèn nhiễm mặn 127

Bảng 3.23 Mô hình SWOT tính độc và dinh dưỡng của đất phèn nhiễm mặn 128

Bảng 3.24 Mô hình phân tích SWOT các vật liệu thân thiện môi trường và không sử dụng than trấu 129

Bảng 3.25 Mô hình phân tích SWOT các vật liệu thân thiện môi trường và có sử dụng than trấu 130

Phụ bảng Phụ lục 1:

Phụ bảng 1.1 Tổng hợp mô tả các phương pháp phân tích chỉ tiêu hóa học đất.....P1

Phụ bảng Phụ lục 2:

Phụ bảng 2.1 Kết quả phân tích PCA/FA và trọng số của các thông số của đất ứng với 5 loại hình sử dụng đất.....P11

Phụ bảng 2.2 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.....P12

Phụ bảng 2.3 Kết quả phân tích PCA/FA và trọng số của các thông số đất ở 2 chế độ nước tưới ngập và độ ẩm 60% P13

Phụ bảng 2.4 Kết quả phân tích PCA/FA và trọng số của các thông số đất sau thí nghiệm trên lúa.....P14

Phụ bảng 2.5 Kết quả phân tích PCA/FA và trọng số của các thông số đất sau thí nghiệm trên cải thìa P15

Phụ bảng Phụ lục 3:

Phụ bảng 3.1 Hàm lượng các nguyên tố trong rễ lúa sau thí nghiệm P16

Phụ bảng 3.2 Hàm lượng các nguyên tố trong rơm sau thí nghiệm P17

Phụ bảng 3.3 Hàm lượng các nguyên tố trong hạt lúa sau thí nghiệm P18

Phụ bảng 3.4 Hàm lượng các nguyên tố trong rễ cải thìa sau thí nghiệm.....P19

Phụ bảng 3.5 Hàm lượng các nguyên tố trong thân lá cải thìa sau thí nghiệm P20

DANH MỤC CÁC TỪ VIẾT TẮT

Tên viết tắt	Tiếng Anh	Tiếng Việt
CLN		Đất trồng cây lâu năm
CEC	Cation Exchange Capacity	Khả năng trao đổi Cation
EC	Electrical Conductivity	Độ dẫn điện
FAO	Food and Agriculture Organization	Tổ chức Lương thực và Nông nghiệp Liên Hợp Quốc
HNK		Đất trồng cây hằng năm khác
LUA		Đất trồng lúa
NT		Nghiệm thức
NTS		Đất nuôi trồng thủy sản
OC	Organic Carbon	Cacbon hữu cơ
QCVN		Quy chuẩn Việt Nam
SOC	Soil Organic Carbon	Cacbon hữu cơ trong đất
SQI	Soil Quality Index	Chỉ số chất lượng đất
TCVN		Tiêu chuẩn Việt Nam
TN		Đất tự nhiên
TP. HCM		Thành phố Hồ Chí Minh
VNĐ		Việt Nam đồng

MỞ ĐẦU

1. Đặt vấn đề

Hiện nay, hai vấn đề mang tính toàn cầu đang được quan tâm hàng đầu là biến đổi khí hậu và an ninh lương thực. Biến đổi khí hậu xảy ra do sự tích lũy ngày càng tăng nồng độ các khí như CO_2, CH_4, N_2O, CFCs/HFCs, O_3 tại tầng đối lưu. Ngoài ra, biến đổi khí hậu góp phần làm tăng cường độ xâm nhập mặn từ đó gây mặn hóa các vùng đất canh tác nông nghiệp làm ảnh hưởng đến năng suất cây trồng và an ninh lương thực toàn cầu. Đất phèn nhiễm mặn là loại đất phèn bị nhiễm mặn do sự xâm nhập của nước biển nên đất vừa có tính phèn (pH thấp) vừa có tính mặn (EC cao) và chứa hàm lượng cao sulfide, khi bị oxy hóa sẽ hình thành axit sulfuric, làm tăng độ chua và gia tăng nồng độ các nguyên tố có khả năng gây độc cho thực vật như nhôm (Al) và sắt (Fe) [1, 2]. Các khu vực gần biển thường dẫn đến việc đất bị nhiễm mặn do sự xâm nhập của nước biển, đưa vào các loại muối và tạo thành đất phèn nhiễm mặn. Do đó, loại đất này có bốn nhóm đặc tính hóa học làm hạn chế sự sinh trưởng và phát triển cây trồng: độ chua cao, độ mặn cao, độc tính từ Al, Fe và Mn và sự mất cân bằng dinh dưỡng [3-5]. Việc giảm thiểu các hạn chế này là cần thiết để cải thiện chất lượng và năng suất của đất phèn nhiễm mặn.

Quá trình oxy hóa các khoáng chất sulfide, một quá trình chính trong đất phèn và chua sulfate, dẫn đến việc hình thành axit sulfuric, Fe^{3+} và Al^{3+}. Kết quả là, hai hạn chế đầu tiên của loại đất này là độ chua mạnh (pH thấp, hàm lượng SO_4^{2-}, độ chua trao đổi cao) và độc tính của các nguyên tố có khả năng gây độc như Al, Fe và Mn. Hai hạn chế này liên quan mật thiết với nhau và được điều khiển bởi giá trị pH của đất. Vôi đã được nghiên cứu rộng rãi và được khuyến nghị sử dụng để giảm thiểu các hạn chế này [6, 7]. Do tính kiềm cao, việc bón vôi vào đất phèn nói chung và đất phèn nhiễm mặn nói riêng sẽ làm tăng pH và lượng bazơ trao đổi, đồng thời giảm Al^{3+} trao đổi [8]. Canxi (Ca) và magie (Mg) trong vôi có thể thay thế H^+, Fe^{3+}, Al^{3+}, Mn^{4+} khỏi các vị trí hấp phụ trong đất, từ đó nâng cao pH đất và giảm nồng độ các nguyên tố có

khả năng gây độc [9]. Tuy nhiên, dù vôi mang lại nhiều lợi ích, nó cũng có những nhược điểm như làm cho đất cứng, gây mất chất dinh dưỡng do rửa trôi và dẫn đến thiếu vi lượng [10]. Ngoài ra, vôi được phát hiện là giảm hiệu quả sử dụng phân đạm (N) và có thể làm giảm lượng photpho (P) có sẵn trong đất [11]. Do đó, dù vôi có thể giúp giảm thiểu hiệu quả độ chua và độc tính nhưng nó không phải lúc nào cũng giải quyết được các hạn chế khác của đất phèn nhiễm mặn, đặc biệt là chất lượng dinh dưỡng và độ mặn. Do pH thấp và mức độ cao của Al và Fe, đất phèn nhiễm mặn có thể thiếu hụt các chất dinh dưỡng quan trọng như P, Ca, K và N [1, 12]. Điều này cho thấy rằng thiếu hụt hoặc mất cân bằng dinh dưỡng là một hạn chế chính trong đất phèn nhiễm mặn. Hạn chế này có thể được khắc phục hiệu quả bằng cách sử dụng phân chuồng hoặc phân hữu cơ, loại phân chứa lượng cao các chất dinh dưỡng. Phân chuồng thường được bón để cải thiện các tính chất vật lý, hóa học và sinh học của đất có độ phì nhiêu thấp [13, 14]. Phân chuồng cũng được báo cáo chứa hàm lượng cao các chất N, P và K tổng số, cũng như các vi lượng [13, 15]. Mặc dù phân chuồng tăng hàm lượng dinh dưỡng nhưng hạn chế trong việc khắc phục độ chua và độc tính của đất phèn nhiễm mặn, đồng thời bón phân chuồng liên tiếp qua nhiều vụ có thể làm giảm pH và tăng độ mặn do quá trình phân hủy hữu cơ tạo axit và giải phóng ion hòa tan, từ đó làm trầm trọng thêm vấn đề mặn và độc tính [16]. Độ mặn, một hạn chế quan trọng của đất phèn nhiễm mặn, thường được đặc trưng bởi mức độ muối cao, dẫn đến tăng độ dẫn điện (EC), natri (Na) và clo (Cl), cần phải được giảm bớt để cải thiện chất lượng đất.

Vật liệu thân thiện môi trường là các loại vật liệu được thiết kế, sản xuất và sử dụng sao cho giảm thiểu tác động tiêu cực đến môi trường trong toàn bộ vòng đời của chúng [17]. Những vật liệu này thường được làm từ các nguồn tái tạo, tái chế hoặc tự nhiên, không phát thải độc hại và có khả năng phân hủy sinh học hoặc tái sử dụng [17]. Chúng góp phần giảm thiểu ô nhiễm, tiết kiệm năng lượng và bảo vệ tài nguyên thiên nhiên. Than sinh học, vôi và phân chuồng được chứng minh là vật liệu thân thiện với môi trường nhờ vào các đặc tính đặc biệt và lợi ích của chúng [18-20]. Than sinh học, một vật liệu giàu carbon được tạo từ các sản phẩm phụ nông nghiệp, đã

được báo cáo là một biện pháp bổ sung tiềm năng để cải thiện đất bị ảnh hưởng bởi muối [21]. Việc áp dụng than sinh học đã được ghi nhận là cải thiện các tính chất vật lý, hóa học và sinh học của đất bị ảnh hưởng bởi muối [21]. Tuy nhiên, do tỷ lệ C:N cao, than sinh học hiệu quả hơn trong việc tăng chất lượng đất và năng suất cây trồng khi được áp dụng cùng với phân đạm hoặc phân hữu cơ [22, 23]. Gunarathne, Senadeera, Gunarathne, Biswas, Almaroai and Vithanage [24] đã sử dụng than sinh học như một vật liệu thân thiện môi trường để cải tạo đất bị nhiễm mặn và chua ở Sri Lanka. Mặc dù một số nghiên cứu đã chỉ ra rằng than sinh học được sản xuất ở 500^{o}C từ *Gliricidia Sepium* (một loài thực vật có hoa trong họ Đậu) là một vật liệu đầy hứa hẹn trong việc cải tạo đất và than sinh học là một vật liệu thân thiện môi trường [25, 26]. Ở đất phèn, than sinh học đã được báo cáo là làm tăng năng suất lúa và ngô, phần lớn là do cải thiện khả năng trao đổi cation (CEC) và giảm được độc tính của Al [27]. Việc bổ sung than sinh học đã được ghi nhận để tăng pH của đất và cải thiện các tác động bất lợi của độc tính Al [28]. Việc bổ sung than sinh học đã được báo cáo làm tăng lượng P sẵn có của đất [29] và sự gia tăng này có thể bắt nguồn từ P được giữ lại trong than sinh học được thêm vào [30]. Tuy nhiên, các hạn chế khác của đất như độ mặn và muối hòa tan cũng như các tác động khác gây ra sự gia tăng P cho đến nay vẫn chưa có nhiều nghiên cứu. Việc bổ sung than sinh học để khắc phục các tác động tiêu cực của đất bị nhiễm mặn đã có nhiều nghiên cứu [31]. Năng suất cây trồng bị ảnh hưởng bởi mặn trong đất có thể được cải thiện do cải thiện các đặc tính vật lý, hóa học và sinh học của đất bằng cách bổ sung than sinh học [32, 33]. Hơn nữa, việc bổ sung than sinh học còn có thể làm giảm EC của đất bị ảnh hưởng bởi mặn bằng cách tạo điều kiện thuận lợi cho quá trình rửa trôi và hấp phụ Na^{+} [34]. Vôi nông nghiệp thường được dùng để cải tạo đất axit, vôi làm tăng pH và giảm độ chua, từ đó giúp cây trồng hấp thụ dinh dưỡng tốt hơn. Khi kết hợp với các chất như than sinh học, vôi giúp duy trì môi trường đất ổn định và bền vững. Phân chuồng, nguồn phân hữu cơ phong phú, như phân dê, phân bò cải thiện hệ vi sinh vật có ích trong đất, tăng độ phì nhiêu và năng suất cây trồng. Việc sử dụng phân chuồng làm giảm dư lượng hóa chất trong đất và cây trồng, đồng thời cung cấp dinh dưỡng tự nhiên, góp phần bảo vệ môi trường.

Ở Việt Nam, diện tích đất phèn có khoảng 1,8 triệu ha (tương đương 5,5% tổng diện tích), trong đó đồng bằng sông Cửu Long chiếm 1,6 triệu ha; riêng đất phèn nhiễm mặn khoảng 0,74 triệu ha tương đương 19% diện tích toàn vùng đồng bằng sông Cửu Long [35]. Dưới tác động của biến đổi khí hậu và thiếu nhận thức về cải tạo, diện tích đất phèn nhiễm mặn ở đồng bằng sông Cửu Long đang gia tăng, gây nhiều trở ngại cho sản xuất nông nghiệp do độ chua cao và nồng độ muối lớn. Các tỉnh ven biển (Tiền Giang, Bến Tre, Trà Vinh, Sóc Trăng, Bạc Liêu, Cà Mau, Kiên Giang cũ) chịu ảnh hưởng mạnh từ xâm nhập mặn và triều. Theo báo cáo năm 2023, Cần Giờ (cũ) có khoảng 43.945 ha và Gò Công Đông (cũ) có 38.276 ha đất phèn nhiễm mặn, cả hai vùng đều xuất hiện hai loại: phèn-mặn theo mùa (mặn vào mùa khô) và phèn-mặn quanh năm. Cần Giờ điển hình cho vùng đất ngập mặn ven biển, trong khi Gò Công Đông (cũ) tiêu biểu cho xâm nhập mặn và phèn hóa theo mùa. Đây là thách thức lớn đối với việc cải tạo và sử dụng đất bền vững tại đồng bằng sông Cửu Long.

Những phát hiện trên cho thấy mỗi biện pháp cải tạo đều có ưu và nhược điểm riêng khi giải quyết bốn hạn chế chính của đất phèn nhiễm mặn. Những điều này cũng gợi ý rằng việc kết hợp các giải pháp cải tạo có thể hiệu quả hơn trong việc giải quyết các hạn chế của đất nhờ tác động bổ trợ của chúng. Than sinh học đặc biệt hiệu quả trong việc giảm thiểu độ mặn cùng với độ chua và độc tính, trong khi vôi hiệu quả trong việc cải thiện độ chua và độc tính. Điều này có thể được chứng minh rằng độ chua, độ mặn và độc tính của đất phèn nhiễm mặn có thể được giảm thiểu hiệu quả thông qua sự kết hợp giữa than sinh học và vôi. Để tận dụng ưu điểm của phân chuồng và than sinh học, sự kết hợp này với bốn hạn chế chính, đặc biệt là các vấn đề dinh dưỡng của đất phèn nhiễm mặn có thể được khắc phục hiệu quả. Sự kết hợp này được kỳ vọng sẽ tạo ra tác động cộng hưởng từ các đặc điểm của chúng, dẫn đến sự cải thiện lớn hơn về chất lượng đất so với việc áp dụng đơn lẻ. Với những tình hình thực tiễn đã được nêu trên, đề tài **"Cải tạo các thành phần hóa học của đất phèn nhiễm mặn bằng vật liệu thân thiện môi trường trong bối cảnh biến đổi khí hậu"** được lựa chọn thực hiện nhằm đánh giá, cải tạo các đặc tính hóa học và đề xuất các hướng sử dụng đất phèn nhiễm mặn hợp lý hơn trong bối cảnh biến đổi khí hậu.

2. Mục tiêu nghiên cứu

2.1 Mục tiêu tổng quát

Đánh giá các đặc tính hóa học của đất phèn nhiễm mặn và tác động tổng hợp của các vật liệu thân thiện môi trường (than trấu, vôi, phân bò) ở quy mô nhà lưới và thực địa nhằm cải thiện chất lượng đất, sinh trưởng và năng suất cây trồng, từ đó đề xuất các giải pháp cải tạo và sử dụng đất trong bối cảnh biến đổi khí hậu.

2.2 Mục tiêu cụ thể

- Đánh giá được các đặc tính hóa học của đất phèn nhiễm mặn và phân tích mối tương quan giữa khoảng cách từ bờ biển với sự biến đổi các đặc tính này tại khu vực nghiên cứu điển hình (huyện Cần Giờ cũ thuộc TP. HCM).

- Khảo sát, đánh giá tác động của các vật liệu thân thiện môi trường như than sinh học (than trấu, than nhãn, than xơ dừa), vôi và phân bò đến khả năng cải thiện các đặc tính hóa học với hai chế độ nước (tưới ngập và độ ẩm 60%) trên đất phèn nhiễm mặn ở quy mô nhà lưới.

- Đánh giá được hiệu quả của các vật liệu thân thiện môi trường (than trấu, vôi, phân bò) đến các đặc tính hóa học, sinh trưởng và năng suất của cây trồng (lúa - 1 vụ tại huyện Cần Giờ cũ và cải thìa - 2 vụ tại huyện Gò Công Đông cũ) trên đất phèn nhiễm mặn ở quy mô thực địa.

- Đề xuất được các giải pháp cải tạo và sử dụng đất phèn nhiễm mặn.

3. Đối tượng và phạm vi nghiên cứu

3.1 Đối tượng nghiên cứu

- Các đặc tính hóa học của đất phèn nhiễm mặn.

- Vật liệu thân thiện môi trường (than sinh học, vôi và phân bò).

- Cây trồng: Lúa (Ba Bụi) và cải thìa (F1 Green Sun No 1).

3.2 Phạm vi nghiên cứu

- Phạm vi không gian: Huyện Cần Giờ (cũ), TP. HCM và xã Kiểng Phước, huyện Gò Công Đông, tỉnh Tiền Giang (cũ) trong thời gian từ năm 2022 đến năm 2025.

- Quy mô nghiên cứu: Nhà lưới và thực địa.

4. Ý nghĩa khoa học và thực tiễn

4.1 Ý nghĩa khoa học

Nghiên cứu bổ sung dữ liệu định lượng về các đặc tính hóa học và dữ liệu nền để xây dựng chỉ số chất lượng đất (SQI) đặc thù cho đất phèn nhiễm mặn, hoàn thiện lý thuyết canh tác phù hợp điều kiện nông hộ, thúc đẩy nông nghiệp bền vững vùng phèn. Đồng thời, nghiên cứu đề xuất biện pháp cải tạo xanh bằng vật liệu thân thiện môi trường, làm cơ sở khoa học và định hướng cho các nghiên cứu tiếp theo.

4.2 Ý nghĩa thực tiễn

Nghiên cứu cung cấp các bằng chứng định lượng và đề xuất những khuyến nghị kỹ thuật khả thi với định hướng cải tạo tầng canh tác nhằm giảm độ chua, độ mặn, độc tố và nâng cao dinh dưỡng cho đất phèn nhiễm mặn. Đồng thời, các kết quả này góp phần cải thiện môi trường đất và sức khỏe cây trồng, qua đó nâng cao năng suất, tăng thu nhập cho nông hộ và thúc đẩy phát triển kinh tế - xã hội tại địa phương.

5. Tính mới của đề tài

Đề tài nghiên cứu các đặc tính hóa học của đất phèn nhiễm mặn, loại đất chịu đồng thời các hạn chế phèn và mặn với đặc trưng độ chua cao (pH 2-5), độ mặn cao (EC, Na^+, Cl^-), độc tính Al, Fe và Mn lớn, đồng thời thiếu hụt dinh dưỡng, đặc biệt là lân. Vấn đề này đã có nhiều giải pháp nghiên cứu, xử lý trước đây nhưng chưa được toàn diện. Nghiên cứu này đã tiến hành triển khai nghiên cứu chuyên sâu với thí nghiệm mô phỏng trong nhà lưới ở hai chế độ nước (tưới ngập và duy trì độ ẩm 60%) nhằm tái hiện điều kiện canh tác trên đất lúa và đất màu, làm tiền đề cho thí nghiệm quy mô thực địa trên đất phèn nhiễm mặn trồng lúa và cải thìa.

Điểm mới nổi bật tiếp theo là sử dụng kết hợp các vật liệu thân thiện môi trường (than trấu, phân bò, vôi) để đồng thời cải thiện độ chua, giảm mặn, độc tố, bổ sung dinh dưỡng và đặc biệt là khảo sát, đánh giá tác động đến các dạng nhôm khác nhau ($Al_{trđ}$ - Al trao đổi, Al_{lky} - Al liên kết yếu với chất hữu cơ, Al_{lkb} - Al liên kết bền với chất hữu cơ, $Al_{vđh}$ - Al vô định hình, Al_{kt} - Al kết tinh), đây là khía cạnh chưa được các nghiên cứu trước đây công bố đầy đủ.

Bên cạnh đó, nghiên cứu còn ứng dụng các phương pháp phân tích hiện đại và kỹ thuật nội nghiệp tiên tiến nhằm định lượng chính xác sự biến đổi các chỉ tiêu hóa học đất, tác động của các tổ hợp vật liệu thân thiện môi trường trong cải tạo đất, từ đó cung cấp bằng chứng khoa học mới và đề xuất giải pháp cải tạo, sử dụng đất phèn nhiễm mặn theo hướng bền vững và khả thi hơn so với các tiếp cận trước đây.

6. Các giả thuyết khoa học cần kiểm tra

* Giả thuyết 1: Bổ sung than trấu sẽ cải thiện đồng thời một số hạn chế chính của đất phèn nhiễm mặn thông qua (i) tăng pH đất (giảm tính chua), (ii) giảm độ mặn (giảm Na trao đổi), (iii) giảm độc tính Al và Fe trao đổi do pH tăng và bề mặt hấp phụ có tính kiềm và (iv) tăng P dễ tiêu nhờ giảm cố định P bởi Al/Fe và/hoặc bổ sung khoáng kiềm từ tro. Tuy nhiên, mức cải thiện độ chua của than trấu nhỏ hơn vôi và hiệu quả nâng dinh dưỡng tổng thể (N, P, K khoáng hoá) nhỏ hơn chất hữu cơ.

* Giả thuyết 2: Bón vôi ($CaCO_3$/CaO) sẽ tăng pH nhanh và mạnh, do đó giảm Al/Fe trao đổi và các biểu hiện độc, chua liên quan. Tuy nhiên, vôi không làm giàu dinh dưỡng (N, P, K) như chất hữu cơ và có thể không cải thiện (hoặc cải thiện hạn chế) các chỉ báo mặn.

* Giả thuyết 3: Bổ sung chất hữu cơ sẽ cải thiện dinh dưỡng thông qua khoáng hoá và cung cấp C, N, P, K dễ tiêu. Đồng thời có thể tạo phức với Al/Fe, nhưng khả năng tăng pH và khử độc chua kém hơn vôi hoặc than trấu. Sử dụng chất hữu cơ có tác động yếu lên tính mặn của đất phèn nhiễm mặn.

* Giả thuyết 4: Sự kết hợp giữa than trấu với vôi hoặc phân hữu cơ có thể tạo ra hiệu ứng cộng hưởng trong cải tạo các hạn chế của đất phèn nhiễm mặn. Than trấu + vôi: tạo hiệu ứng cộng hưởng đối với pH, độc chua (Al/Fe) và cải thiện độ mặn; than trấu cung cấp bề mặt kiềm/trao đổi trong khi vôi nâng pH nhanh/chắc, giúp giảm độc tính Al/Fe tốt hơn từng vật liệu dùng riêng lẻ. Than trấu + chất hữu cơ: đồng thời cải thiện pH ở mức vừa phải, tăng dinh dưỡng và CEC; phù hợp mục tiêu phục hồi độ phì song song kiểm soát mặn, chua tốt hơn so với chỉ bón chất hữu cơ.

CHƯƠNG 1 TỔNG QUAN VỀ CÁC VẤN ĐỀ NGHIÊN CỨU

1.1 Tác động của biến đổi khí hậu đến tính chất đất phèn nhiễm mặn

Đất phèn (Acid sulfate soils) là loại đất có tính chua, được hình thành từ quá trình sản sinh axit sulfuric, gây ảnh hưởng lâu dài đến các đặc tính chính của đất. Đất phèn có màu đen hoặc nâu ở tầng đất mặt. Đất thường bị gley mạnh ở tầng C, có mùi đặc trưng của lưu huỳnh (S) và H_2S. Đặc điểm của loại đất này là hàm lượng lưu huỳnh tổng số lớn, lượng sắt (Fe^{3+}) cao, hàm lượng $CaCO_3$ thấp, nghèo lân và chua hoặc rất chua. Vì vậy vi sinh vật hoạt động khó khăn, quá trình phân huỷ chất hữu cơ gặp trở ngại, hạn chế giải phóng chất dinh dưỡng trong đất, cây trồng sinh trưởng kém và thường đạt năng suất thấp. Đất phèn được hình thành trên trầm tích đầm lầy biển [36]. Đặc trưng cơ bản của đơn vị trầm tích này là sự có mặt của sulfidic, vật liệu chủ yếu hình thành đất phèn, bởi các điều kiện đặc biệt trong suốt quá trình trầm tích trong điều kiện yếm khí, sự ngập lụt đều đặn theo chu kỳ của nước mặn, sự có mặt của thực vật ngập mặn (*Mangrove*) chủ yếu là Đước (*Rhizophora*) và Mắm (*Avicenia*) và tốc độ bồi tích chậm [37]. Xác thực vật này chứa nhiều lưu huỳnh (S), trong điều kiện yếm khí thường được tích lũy ở dạng H_2S, khi có Fe sẽ được phản ứng và hình thành FeS_2 (Pyrite), gặp điều kiện thoáng khí FeS_2 sẽ bị oxy hóa để chuyển thành $FeSO_4$ và H_2SO_4 [36]. Trong điều kiện yếm khí đất phèn còn ở dạng phèn tiềm tàng, trong phẫu diện chỉ có Pyrite (tầng sinh phèn - sulfidic horizon) (FeS_2), một khi có quá trình thoát thủy, tạo ra môi trường oxy hóa, tầng Pyrite chuyển thành tầng Jarosite ($KFe_3(SO_4)_2(OH)_6$) có màu vàng rơm (2.5Y8/6 - theo bảng so màu đất Munsell) làm cho đất chua, đồng thời giải phóng nhôm (Al^{3+}) gây độc hại cho cây trồng [38]. Như vậy khi đất phèn bị khô hạn hoặc xâm nhập mặn làm hạ thấp mực nước ngầm, Pyrite trong đất tiếp xúc với oxy từ không khí, gây ra quá trình oxy hóa mạnh mẽ [39]. Pyrite bị oxy hóa tạo thành axit sulfuric (H_2SO_4), làm giảm mạnh pH đất xuống dưới 4 [40].

Vì nó phân bố ở các khu vực gần biển nên đất phèn rất có thể bị nhiễm mặn, đặc biệt trong bối cảnh biến đổi khí hậu toàn cầu đang diễn ra [41]. Biến đổi khí hậu đã làm gia tăng đáng kể diện tích đất phèn nhiễm mặn trên toàn cầu, đặc biệt tại các khu vực

ven biển và đồng bằng, nơi chịu tác động trực tiếp của các yếu tố như nhiệt độ tăng, lượng mưa thay đổi, số giờ nắng gia tăng, khí hậu cực đoan và nước biển dâng [41]. Sự gia tăng nhiệt độ toàn cầu làm tăng tốc độ bốc hơi nước ở các tầng đất bề mặt. Điều này dẫn đến sự tích tụ muối trong đất do nước bốc hơi để lại các khoáng chất hòa tan, đặc biệt là Na^+ và Cl^-. Ở các vùng đất phèn, nhiệt độ cao làm tăng tốc độ oxy hóa Pyrite (FeS_2) trong đất, thúc đẩy quá trình hình thành axit sulfuric (H_2SO_4), gây axit hóa tầng đất canh tác [40]. Lượng mưa không đều hoặc suy giảm trong mùa khô khiến khả năng rửa trôi muối và phèn từ đất bị giảm, làm gia tăng độ mặn và tính phèn ở tầng đất trên. Ngoài ra, số giờ nắng kéo dài làm tăng tốc độ bốc hơi nước từ bề mặt đất, dẫn đến sự tích tụ muối nhiều hơn trong các tầng đất canh tác. Điều này đặc biệt nghiêm trọng ở các vùng đất thấp và khô hạn ven biển. Bên cạnh đó, biến đổi khí hậu còn làm gia tăng tần suất và cường độ của các hiện tượng khí hậu cực đoan như lũ lụt, hạn hán và bão [41]. Lũ lụt gây xáo trộn tầng đất và đưa phèn từ dưới sâu lên bề mặt. Hạn hán kéo dài làm giảm nước ngầm, khiến đất trở nên khô cằn, nứt nẻ và tích tụ muối trên bề mặt. Tiếp theo, mực nước biển dâng cao là nguyên nhân chính làm tăng tình trạng xâm nhập mặn vào đất liền [41]. Nước mặn di chuyển qua hệ thống sông ngòi và tầng ngậm nước, làm tăng nồng độ muối trong đất và nước ngầm. Khi nước rút đi, muối bị lắng đọng và tích tụ trên bề mặt, làm cho đất vốn đã nhiễm phèn trở nên nhiễm mặn nghiêm trọng hơn. Tình trạng xâm nhập mặn ở vùng phèn khu vực ven biển làm thu hẹp diện tích đất nông nghiệp. Xâm nhập mặn làm cho diện tích đất canh tác giảm, từ đó hệ số sử dụng đất có thể giảm từ 3 - 4 lần/năm xuống còn 1 - 1,5 lần/năm. Nếu nước biển dâng cao thêm 1 m thì khoảng 1,77 triệu ha đất sẽ bị nhiễm mặn, chiếm 45% diện tích đất ở đồng bằng sông Cửu Long và ước tính rằng, có khoảng 85% người dân ở vùng đồng bằng sông Cửu Long cần được hỗ trợ về nông nghiệp [42]. Do đó, loại đất phèn nhiễm mặn là loại đất với bản chất là đã có tính phèn và bị nhiễm mặn do sự xâm nhập của nước biển, lúc này đất vừa có tính chất phèn (tính axit cao, pH thấp) vừa có tính mặn (EC cao). Đất phèn được hình thành khi các lớp đất sulfidic tiếp xúc với điều kiện hiếu khí, các sulfur bị oxy hóa, dẫn đến sự hình thành axit sulfuric và do đó đất bị axit hóa nghiêm trọng (pH 2,5 - 4,5) [43, 44]. Độ chua làm tăng tính di động và rửa trôi kim loại từ các khoáng chất

trong đất [45]. Hậu quả là axit hóa nước tiếp nhận thoát nước gây nguy cơ nghiêm trọng cho hệ sinh vật thủy sinh. Đất phèn ở đồng bằng sông Cửu Long chiếm diện tích lớn nhất và có sự phân hóa phức tạp nhất, chủ yếu thuộc các nhóm đất Fluvisols và Gleysols [35]. Phân loại đất phèn dựa trên tầng sinh phèn và tầng phèn, với độ sâu của các tầng này được xác định qua phẫu diện; tầng phèn càng gần bề mặt, sự phát triển của cây trồng càng bị hạn chế. Đất phèn có thể bị mặn hóa, hình thành đất phèn nhiễm mặn, do các nguyên nhân như sự gia tăng nước ngầm nhiễm mặn, xâm nhập nước biển, tưới tiêu bằng nước mặn, bón phân, hoặc phong hóa đá chứa muối [39, 46]. Đất bị ảnh hưởng bởi muối thường có pH cao [47], do sự hiện diện của các nguyên tố kiềm như Na và K.

Biến đổi khí hậu ngày càng diễn biến phức tạp, cùng với các giải pháp cải tạo đất thiếu hiệu quả, đã làm gia tăng diện tích đất nhiễm phèn và nhiễm mặn ở đồng bằng sông Cửu Long và trên toàn cầu. Trong đó, đất phèn nhiễm mặn được xem là thách thức lớn nhất đối với sản xuất nông nghiệp, đặc biệt là trồng lúa. Những năm gần đây, phong trào nuôi tôm phát triển mạnh mẽ, khiến nhiều hộ dân phá đê ngăn mặn để lấy nước biển vào ao nuôi, dẫn đến đất bị nhiễm mặn suốt mùa nuôi tôm. Ở các tỉnh ven biển của đồng bằng sông Cửu Long, tình trạng mặn hóa còn trở nên nghiêm trọng hơn do triều cường xâm nhập sâu vào đất liền. Thêm vào đó, chế độ mưa bất thường cũng góp phần đẩy nhanh quá trình mặn hóa trên đất phèn, làm gia tăng áp lực trong việc quản lý và cải tạo đất. Vào mùa khô việc xâm nhập mặn xảy ra mạnh hơn do thiếu lượng nước ngọt từ thượng nguồn đổ xuống để đẩy nước mặn từ biển xâm nhập vào. Hoặc lượng bốc hơi nước mạnh trong mùa khô có thể kéo theo nước ngầm nhiễm mặn leo lên bề mặt. Trong khi đó vào mùa mưa với lượng mưa cao đã đẩy mặn ra xa đất liền, đất lại trở nên không bị ảnh hưởng mặn. Như vậy trong điều kiện biến đổi khí hậu, đất phèn có thể bị mặn hóa nhanh chóng làm cho loại đất này vừa có tính phèn và vừa có tính mặn. Xâm nhập mặn mang theo các ion Na^+, Cl^- và SO_4^{2-} từ nước biển hoặc nước mặn xâm nhập vào đất. Khi nước mặn bốc hơi, muối bị tích tụ lại trong tầng đất bề mặt, dẫn đến độ dẫn điện (EC) của đất tăng cao, gây độc cho cây trồng. Môi trường axit kích thích sự giải phóng các kim loại nặng như Al^{3+}, Fe^{2+} từ

các khoáng chất trong đất [40]. Những kim loại này làm giảm khả năng phát triển rễ cây, đồng thời ức chế sự hấp thụ dinh dưỡng của cây trồng [39]. Đất phèn nhiễm mặn không chỉ bị suy giảm chất lượng dinh dưỡng mà còn gặp khó khăn trong việc lưu giữ các chất dinh dưỡng cơ bản như N, P, K [48]. Điều này làm giảm đáng kể năng suất và chất lượng cây trồng. Như vậy, biến đổi khí hậu và đất phèn nhiễm mặn đã có mối liên hệ chặt chẽ với nhau do không những làm gia tăng diện tích đất phèn nhiễm mặn mà còn làm phức tạp hóa quá trình cải tạo do tính không ổn định của khí hậu [41]. Sự mất cân bằng nhiệt độ và độ ẩm do biến đổi khí hậu làm suy giảm các vi sinh vật hữu ích trong đất, làm giảm khả năng tự phục hồi của hệ sinh thái đất [41]. Tác động của nước biển dâng và xâm nhập mặn sẽ tiếp tục kéo dài trong nhiều thập kỷ, làm giảm khả năng cải tạo đất phèn nhiễm mặn và đe dọa an ninh lương thực.

1.2 Tính chất đất phèn nhiễm mặn

1.2.1 Tính axit

Tính axit có trong đất phèn nhiễm mặn thể hiện ở độ chua của đất, chủ yếu là do tiến trình hình thành đã sản sinh ra lượng axit sulfuric. Đất phèn có hàm lượng lưu huỳnh lớn, lượng sắt và nhôm cao, hàm lượng $CaCO_3$ thấp, nghèo photpho dễ tiêu. Một số tính chất khác của đất phèn bao gồm vi sinh vật hoạt động khó khăn, quá trình phân huỷ chất hữu cơ gặp trở ngại, hạn chế giải phóng chất dinh dưỡng trong đất, cây trồng sinh trưởng kém và thường đạt năng suất thấp [36]. Lượng S trong xác thực vật trong điều kiện yếm khí và sự hiện diện của Fe sẽ phản ứng và hình thành FeS_2 (Pyrite). Đất có chứa hàm lượng FeS_2 cao được gọi là đất phèn tiềm tàng. Gặp điều kiện thoáng khí, lượng FeS_2 sẽ bị oxy hóa để chuyển thành $FeSO_4$ và H_2SO_4 [36] và hình thành đất phèn hoạt động. Quá trình oxy hóa FeS_2 tạo ra một lượng axit lớn, từ đó làm cho đất chua, có giá trị pH thấp. Ngoài ra, quá trình này đồng thời giải phóng ra một lượng nhôm (Al^{3+}) gây độc hại cho cây trồng [38]. Quá trình hình thành phèn hoạt động trong đất phèn nhiễm mặn:

$$Fe_2O_3 + 4SO_4^{2-} + 8CH_2O + 1/2O_2 \rightarrow 2FeS_2 + 8HCO_3^- + 4H_2O$$

$$FeS_2 + H_2O + 7/2O_2 \rightarrow Fe^{2+} + 2SO_4^{2-} + 2H^+$$

$Fe^{2+} + 15H_2O + 2O_2 \rightarrow 6Fe(OH)_3 + 12H_2O$

$3Fe(OH)_3 + K^+ + 2SO_4^{2-} + 3H^+ \rightarrow KFe_3(SO_4)_2(OH)_6 + 3H_2O$

Các quá trình trên xảy ra khi có sự tham gia của các vi khuẩn khử sulfate và vi khuẩn *Thiobacillus Ferrooxydans*. Theo thời gian, do quá trình trầm tích phù sa, cốt đất ngập mặn phèn tiềm tàng mỗi ngày một cao dần, ảnh hưởng ngập nước triều ngày một giảm đi, đất phèn tiềm tàng mặn dần dần thoát khỏi ảnh hưởng của nước triều. Quá trình khử oxy trong đất ngày càng yếu đi và quá trình oxy hóa trong đất ngày càng mạnh, đất phèn tiềm tàng chuyển thành đất phèn hoạt động.

1.2.2 Tính mặn

Tính mặn có trong đất phèn nhiễm mặn là trong đất có tồn tại các loại muối hòa tan ở một nồng độ cao hơn mức bình thường, gây ảnh hưởng xấu đến sự sinh trưởng và phát triển của cây trồng [49]. Đại lượng EC là độ dẫn điện của đất để đánh giá độ mặn cho đất, có đơn vị là dS/m (1dS/m = 0,64‰) [47]. Đất có độ dẫn điện lớn hơn 4 dS/m ở 25^{o}C được xem là đất mặn và tương đương với nồng độ muối hòa tan khoảng 2,56‰ (cách tính thông thường tại Việt Nam) [49]. Clorua, natri và magie là các loại ion muối hòa tan phổ biến nhất xuất hiện trong đất phèn nhiễm mặn. Natri và clorua là các ion chiếm tỉ lệ nhiều nhất trong trong đất phèn nhiễm mặn. Ngoài ra, có một số loại muối tan thường gặp là NaCl, Na_2SO_4, $CaCl_2$, $CaSO_4$, $MgCl_2$, $NaHCO_3$, … Các loại muối này có nguồn gốc khác nhau (lục địa, biển, sinh vật, …) nhưng nguồn gốc nguyên thủy của chúng là từ các thành phần khoáng của đá núi lửa. Các muối này chủ yếu là muối của các ion Cl^-, SO_4^{2-}, Ca^{2+}, Mg^{2+}, K^+, Na^+, … Do vậy mà các vùng đất phèn nhiễm mặn thường là các vùng đất ít bị tác động rửa trôi của mưa như các vùng ít mưa, các vùng khô hạn và bán khô hạn, càng ngày đất càng tích tụ nhiều muối và bị mặn hóa. Ở nước ta, sự có mặt của tính mặn có trong đất phèn nhiễm mặn chủ yếu là do tình trạng xâm nhập mặn từ biển, nước biển theo các đường sông, nước ngầm và hệ thống cống rãnh vào sâu trong nội địa [50]. Tính mặn thường thấy ở đất phèn nhiễm mặn phải kể đến như có độ trương lớn, dẻo quánh khi gặp nước, mùa khô thì co lại tạo nên sự nứt nẻ [51]. Hiện tượng trương và co lại của đất là do sự xuất

hiện của ion Na^+ dẫn tới khả năng tán keo trong đất của ion Na^+ và pH có khuynh hướng hơi kiềm (do chứa nhiều ion kiềm Na^+) đồng thời áp suất thẩm thấu của dung dịch cao, gây cản trở cho sự hấp thụ nước và dinh dưỡng của cây trồng [51]. Bên cạnh đó, do tổng số muối tan tỷ lệ thuận với áp suất thẩm thấu trong dung dịch đất nên độ mặn càng lớn áp suất thẩm thấu càng mạnh dẫn đến sự hấp thụ nước của cây trồng bị ảnh hưởng nặng [39].

1.2.3 Tính độc

Tính độc trong đất phèn nhiễm mặn chủ yếu do sự hiện diện của các ion kim loại độc hại như nhôm (Al^{3+}), sắt (Fe^{2+}), mangan (Mn^{2+}) và các hợp chất sulfur độc hại (như H_2S) [40]. Những chất này được giải phóng và tích tụ trong đất dưới tác động của quá trình oxy hóa Pyrite (FeS_2) khi đất phèn bị khô hoặc bị xâm nhập mặn [48]. Quá trình này làm tăng độ axit trong đất (giảm pH) và kích thích sự hòa tan của các kim loại trong đất. Ở pH < 5, Al^{3+} trở thành ion tự do có độc tính cao. Nhôm ức chế sự phát triển của rễ cây, gây tổn thương mô rễ và làm giảm khả năng hấp thụ nước và dinh dưỡng. Trong điều kiện yếm khí (ngập nước), Fe^{2+} hòa tan trong đất và gây ngộ độc cho cây trồng. Ion này cũng cản trở quá trình hấp thụ các nguyên tố vi lượng khác. Dư thừa Mn^{2+} có thể dẫn đến độc tính cho cây trồng, gây hiện tượng cháy lá và tổn thương tế bào. Tính độc này ảnh hưởng nghiêm trọng đến hệ sinh thái đất, gây cản trở sinh trưởng của cây trồng, suy thoái đất và làm giảm khả năng sử dụng đất trong nông nghiệp [52]. Các ion độc hại cạnh tranh với các ion dinh dưỡng quan trọng như Ca^{2+}, Mg^{2+} và K^+, dẫn đến sự mất cân bằng dinh dưỡng [52]. Tích tụ kim loại và muối trong đất làm suy giảm chất lượng đất và gây thoái hóa đất nghiêm trọng. Tính độc cao làm giảm hoạt động của các vi sinh vật có lợi, gây ảnh hưởng tiêu cực đến chu trình dinh dưỡng và khả năng phục hồi tự nhiên của đất.

1.2.4 Tính mất cân bằng dinh dưỡng

Mất cân bằng dinh dưỡng trong đất phèn nhiễm mặn là hệ quả của sự tương tác giữa tính axit, tính mặn và tính độc. Mất cân bằng dinh dưỡng trong đất này xuất phát từ sự giảm khả năng hấp thụ các nguyên tố cần thiết như nitơ (N), photpho (P), kali (K), canxi (Ca) và magie (Mg), trong khi một số nguyên tố như natri (Na) hoặc nhôm (Al)

lại tăng cao vượt mức cần thiết [48]. pH thấp trong đất phèn làm tăng hàm lượng Al^{3+} và Fe^{2+} tự do, gây ức chế hấp thụ P; sulfate trong đất phèn kết hợp với Ca^{2+}, tạo kết tủa $CaSO_4$, làm giảm sự sẵn có của Ca trong đất; Sự gia tăng Na^+ và Cl^- trong đất phèn nhiễm mặn gây ra hiện tượng cạnh tranh với các cation cần thiết như K^+, Ca^{2+}, Mg^{2+} trên bề mặt hạt đất [52]. Điều này không chỉ làm giảm khả năng trao đổi cation (CEC) mà còn dẫn đến sự thiếu hụt các nguyên tố quan trọng. Áp suất thẩm thấu cao làm cây khó hấp thụ nước và dinh dưỡng, dẫn đến hiện tượng cháy rễ hoặc mất nước [52]. Đất phèn nhiễm mặn thường có hàm lượng carbon hữu cơ (OC) trung bình, ảnh hưởng đến khả năng giữ dinh dưỡng và hoạt động của vi sinh vật đất [48]. Do đó, việc thiếu N, P, K sẽ gây cản trở sinh trưởng và năng suất; thiếu hụt P dẫn đến sự còi cọc và giảm khả năng phát triển rễ; thiếu Ca, Mg làm yếu cấu trúc tế bào cây, dẫn đến hiện tượng rụng hoa và quả non; dư thừa Na, Cl gây độc cho cây, dẫn đến cháy lá, thối rễ và cuối cùng làm chết cây [52]. Từ đó, dẫn đến mất cân bằng dinh dưỡng làm suy giảm hệ vi sinh vật đất, ảnh hưởng đến các chu trình chuyển hóa chất hữu cơ và duy trì độ phì nhiêu. Ngoài ra, việc tích tụ Na^+ gây phá vỡ cấu trúc đất, làm giảm độ thấm nước và khả năng giữ dinh dưỡng [48]. Điều này ảnh hưởng đến sinh trưởng của cây trồng, làm giảm năng suất và chất lượng nông sản. Hiện tượng này phổ biến tại các khu vực đồng bằng ven biển, nơi thường xuyên bị ảnh hưởng bởi xâm nhập mặn và sự tích tụ muối trong đất [53].

1.3 Một số nghiên cứu đặc trưng về tính chất đất phèn nhiễm mặn

Tính phèn mặn có trong đất phèn nhiễm mặn được định nghĩa là đất vừa có tính chất phèn (tính axit cao, pH thấp) vừa có tính mặn (EC cao) [54]. Đất bị ảnh hưởng bởi muối là loại đất có lượng muối hòa tan đủ để làm giảm năng suất cây trồng [54]. Đất có tính phèn mặn chiếm một diện tích lớn, khoảng 400 triệu ha, bằng 6% tổng diện tích đất trên thế giới [49]. Chúng có thể được hình thành thông qua các quá trình nhân tạo và tự nhiên khác nhau, bao gồm sự gia tăng của nước ngầm bị nhiễm mặn, xâm nhập nước biển, tưới tiêu nước mặn, bón phân và phong hóa đá chứa muối [39, 46]. Nói chung, đất bị ảnh hưởng bởi muối có thể được đặc trưng bởi pH cao [47] do sự hiện diện của các nguyên tố kiềm như Na và K. Tuy nhiên, đất có thể bị axit hóa để

có pH thấp nếu nó nằm trên lớp sulfur. Quá trình oxy hóa các sulfur tồn tại trong lớp sulfidic có thể tạo thành axit sulfuric [55, 56], axit hóa đất bị ảnh hưởng bởi muối. Ngoài ra, sự hình thành axit sulfuric có thể hòa tan sắt (Fe), nhôm (Al) và một số kim loại khác [57], tiếp tục làm nhiễm mặn đất bị nhiễm mặn. Sau đó, đất chua là đất bị ảnh hưởng bởi muối được định nghĩa là đất bị ảnh hưởng bởi muối có pH thấp do quá trình oxy hóa các sulfur từ lớp sulfur. Đất phèn nhiễm mặn được coi là rất nghiêm trọng vì ngoài hạn chế về độc tố không những do bị chua hóa mà còn có độ mặn cao vì bị ảnh hưởng thường xuyên của thủy triều [37]. Tình trạng xen kẽ đồng thời hai yếu tố phèn và mặn, không chỉ là một diễn thế phức tạp về mặt hóa học mà còn gây những trở ngại lớn đối với vấn đề sử dụng đất.

Dựa trên độ sâu xuất hiện của tầng phèn (Jarosite) và tầng sinh phèn (Pyrite), đất phèn nhiễm mặn được chia thành hai nhóm chính với mức độ hạn chế khác nhau [58]: Nhóm thứ nhất là đất phèn nhiễm mặn có hạn chế nặng, trong đó tầng phèn hoặc tầng sinh phèn nằm trong phạm vi 50 cm từ lớp đất mặt. Loại đất này đặc biệt nhạy cảm với các tác động như thoát thủy hoặc đào xới lớp đất mặt, dễ dẫn đến hiện tượng chua hóa nghiêm trọng, gây ảnh hưởng xấu đến cây trồng và môi trường xung quanh. Đây cũng là nhóm đất tiềm tàng nhiều rủi ro, đặc biệt khi tầng sinh phèn nông bị kích thích bởi các yếu tố hóa học hoặc thủy lý. Nhóm thứ hai là đất phèn nhiễm mặn có hạn chế nhẹ, với tầng phèn hoặc tầng sinh phèn nằm ở độ sâu lớn hơn 50 cm dưới lớp đất mặt. Loại đất này ít nhạy cảm hơn trước các tác động bên ngoài, do đó ảnh hưởng đến cây trồng và môi trường thường nhẹ hơn.

Trong đất phèn nhiễm mặn, oxy hóa Pyrite (FeS_2) khi thông khí tăng hoặc khi đất bị khô sinh ra H_2SO_4, hạ pH và hòa tan Al^{3+} cùng Fe^{2+}/Fe^{3+} vào dung dịch, quá trình này phụ thuộc mạnh vào cung cấp oxy, tính thấm và hoạt động vi sinh [59]. Fe^{3+} và SO_4^{2-} có thể kết tủa thành Jarosite hoặc chuyển thành các pha Fe-oxy(hydr)oxit; động học hòa tan/tạo thành của các pha này điều chỉnh tốc độ phóng thích hoặc làm kết tủa Al và Fe theo chu kỳ ướt khô và biến động pH-Eh [60]. Sự hiện diện của Cl^- và Na^+ tăng mặn và khi Na^+ chiếm ưu thế trên bề mặt trao đổi, gây sodicity dẫn tới phân tán keo, giảm Ksat và kém thoát khí, từ đó làm phức tạp kiểm soát oxy hóa Pyrite và tăng mặn

cho thực vật. Tiếp theo, cơ chế kiểm soát dinh dưỡng của loại đất này còn thể hiện rõ qua ba tương tác chính: (1) pH kiểm soát cố định hoặc giải phóng P, ở pH thấp phosphate bị giữ mạnh bởi các oxit Al/Fe (Al-P, Fe-P) còn ở pH trung tính hoặc kiềm P dịch chuyển về pha Ca-P, nên mọi thay đổi pH (oxy hóa Pyrite hoặc bón vôi) tức thì làm thay đổi P khả dụng [61, 62]; (2) điều kiện oxy hóa khử quyết định cân bằng NH_4^+, môi trường ngập, yếm khí ức chế N khiến NH_4^+ tích tụ; khi đất khô thoáng nitrification phục hồi (NH_4^+ chuyển hóa thành NO_3^-) và tăng nguy cơ mất N qua denitrification/khử nitrate [63, 64]; (3) mặn tác động trực tiếp lên tính sẵn có dinh dưỡng: độ mặn cao và ion Na^+, Cl^- gây cạnh tranh ion (Na^+ giảm lấy K^+, Ca^{2+}) và thúc đẩy kết tủa P, đồng thời ức chế vi sinh chuyển hóa N, làm giảm hấp thu dinh dưỡng [65]. Các nghiên cứu ở đồng bằng sông Cửu Long cho thấy biến động ngập, khô làm gia tăng nồng độ Al, Fe trao đổi, biến đổi chu trình của các kim loại vết trực tiếp và làm giảm P dễ tiêu, nhấn mạnh tầm quan trọng của quản lý nước để hạn chế oxy hóa Pyrite và giảm độc tính cũng như ổn định trạng thái dinh dưỡng [66, 67].

Ngoài ra, tùy thuộc vào sự hiện diện của tầng phèn và mức độ nhiễm mặn ở các độ sâu khác nhau, đất phèn nhiễm mặn còn được phân chia thành nhiều loại với các đặc tính riêng biệt [68]: Đất phèn hoạt động mặn là đất vùng ẩm ướt, thoát thủy kém đến tốt, có tầng đất thay đổi theo mùa, mất Fe, Al, bazơ nhưng giữ khoáng phong hóa. Tiêu chuẩn: không có vật liệu sulfidic trong 50 cm đất mặt, pH < 3-4, trị số n < 0,7 ở độ sâu 20-50 cm. Đặc tính bất lợi: pH thấp - gây hại trực tiếp, tăng hòa tan Al^{3+}, Fe^{2+}, Fe^{3+}, giảm lân hữu dụng. Ở pH < 3,5-4, Al^+ gây độc chủ yếu cho lúa trên đồng ruộng; Khả năng đệm cao - pH tăng chậm dù Fe^{2+} cao, cần nhiều oxide Fe khử để nâng pH đáng kể. Al cao gây độc, triệu chứng lá vàng cam, đốm nâu, hiếm thấy do độc nhôm sớm; gây thiếu lân trầm trọng; Fe^{2+} > 300-400 ppm gây độc cho lúa; H_2S cao - ngập nước kéo dài, pH > 5, Fe^{2+} thấp dẫn đến ngộ độc H_2S do khử SO_4^{2-}, độc ở 0,1 ppm, thúc đẩy ngộ độc Fe. Ngược lại, đất phèn tiềm tàng mặn lại được tạo thành chủ yếu do vật liệu Pyrite (FeS_2), chất khoáng này thường chiếm 2 - 10% trong đất. Phần lớn đất phèn tiềm tàng mặn được phân bố dọc bờ biển, các vấn đề trở ngại chủ yếu là: độ mặn cao; khi nước biển không ngập mặn cao, đất bị oxy hóa rất mãnh liệt và gây

chua; đất không có cấu trúc, chịu đựng cơ giới thấp; khả năng thấm rút cao; khó giữ nước từ thủy triều. Đặc tính vật lý, hóa học của đất phèn nhiễm mặn (hoạt động và tiềm tàng) điển hình tại huyện Cần Giờ cũ được trình bày ở Bảng 1.1 và 1.2.

Bảng 1.1 Đặc tính vật lý đất phèn nhiễm mặn tại Cần Giờ (cũ) (Phương, 2020 [58])

Tầng đất (cm)	Dung trọng (g/cm^3)	Tỷ trọng	Độ xốp (%)	Độ ẩm (%)	Thành phần cấp hạt (%)			
					2,0-0,2 mm	0,2-0,02 mm	0,02-0,002 mm	< 0,002 mm
Đất phèn hoạt động mặn								
0-18	0,64	2,33	72,53	53,0	2,1	14,1	35,2	48,6
18-35	1,14	2,55	55,29	30,5	1,1	14,2	28,8	55,9
35-70	1,06	2,59	59,07	34,1	4,8	19,6	17,8	57,8
70-95	0,73	2,46	70,33	48,3	0,6	16,9	24,4	58,1
95-125	0,78	2,45	68,16	49,2	4,5	18,6	32,0	44,9
Đất phèn tiềm tàng mặn								
0-20	0,64	2,40	73,33	52,2	0,4	35,6	12,4	51,6
25-35	0,59	2,44	75,82	53,6	2,4	13,5	30,7	53,4
35-65	0,71	2,49	71,49	50,0	2,3	11,2	34,3	52,2
65-90	0,20	1,81	88,95	82,3	10,8	23,7	20,1	45,4
90-125	1,00	2,57	61,09	38,6	0,2	8,8	28,3	62,7

Đất phèn hoạt động mặn điển hình tại Cần Giờ (cũ) có dung trọng, tỷ trọng tăng dần ở độ sâu từ tầng mặt 0 cm đến 70 cm sau đó giảm xuống (Bảng 1.1). Độ xốp của đất phèn hoạt động mặn cao thấp nhất ở 2 tầng từ 18-35 cm và từ 35-70 cm. Thành phần cấp hạt của đất phèn hoạt động mặn ở mức ổn định đặc biệt là từ 0,2 mm đến 0,02 mm. Mặt khác, dung trọng, tỷ trọng của đất phèn tiềm tàng mặn lại có xu hướng tăng theo chiều sâu của phẫu diện từ tầng mặt đến độ sâu 125 cm. Độ xốp và độ ẩm của đất phèn tiềm tàng mặn cao nhất là 88,95% và 82,3% tương ứng ở độ sâu 65 cm đến 95 cm. Thành phần cấp hạt của đất phèn tiềm tàng mặn ở mức ổn định đăc biệt là từ < 0,0002 mm.

Bảng 1.2 Đặc tính hóa học đất phèn nhiễm mặn tại Cần Giờ (cũ) (Phương, 2020 [58])

Tầng đất (cm) / Đặc tính đất		0-18	18-35	35-70	70-95	95-125	0-20	25-35	35-65	65-90	95-125
Loại đất		**Phèn hoạt động mặn**					**Phèn tiềm tàng mặn**				
Hàm lượng tổng số (%)	OC	6,07	1,90	0,76	4,01	7,61	4,89	4,89	5,25	16,87	1,24
	N	0,19	0,04	0,04	0,03	0,07	0,26	0,24	0,18	1,01	0,06
	P_2O_5	0,14	0,05	0,03	0,03	0,04	0,13	0,11	0,88	0,07	0,07
	K_2O	1,63	1,63	1,95	1,88	1,43	2,24	2,20	2,20	1,00	2,58
Chất dễ tiêu (mg/100g đất)	P_2O_5	8,57	0,88	0,21	0,44	1,34	5,22	6,21	7,60	1,80	8,08
	K_2O	8,44	9,64	13,26	2,41	2,41	79,14	88,09	5,60	89,50	115,89
Độ chua cmol(+)/kg	Trao đổi	7,72	13,31	15,05	17,05	153,6	0,32	8,42	22,65	14,34	6,18
	Tiềm tàng	19,20	31,80	25,25	25,05	196,8	2,01	35,12	67,96	93,24	18,38
pH	H_2O	4,2	3,7	3,4	3,4	2,4	6,1	5,4	3,1	3,4	4,2
	KCl	3,8	3,4	3,2	3,2	2,3	5,7	4,9	2,8	3,1	3,7
EC (dS/m)		0,55	0,25	0,23	0,35	4,20	4,4	4,3	4,4	6,9	3,4
Cation trao đổi (cmol (+)/kg đất)	Ca^{2+}	2,24	1,74	1,01	1,37	1,16	1,08	1,22	1,01	1,68	1,26
	Mg^{2+}	1,10	1,42	1,16	1,63	1,47	3,01	3,55	4,85	4,66	2,96
	K^+	0,17	0,20	0,28	0,05	0,05	1,86	1,87	0,12	1,90	2,46
	Na^+	0,20	0,22	0,26	0,37	0,09	8,24	7,12	7,25	6,68	7,22
	Tổng	3,71	3,58	2,71	3,42	2,77	14,49	13,76	13,23	14,92	13,90
CEC (cmol(+)/kg)		16,08	9,08	18,56	13,68	10,96	23,12	22,80	17,12	16,23	19,36
BS (%)		23,1	36,5	14,6	25,0	25,3	61,4	60,4	77,3	91,9	71,8
SO_3^{2-} (%)		0,04	1,11	3,21	3,55	4,95	1,23	1,11	0,98	2,87	0,91
SO_4^{2-} (%)		0,06	0,07	0,25	0,28	0,24	0,18	1,01	1,30	2,83	0,58

Đất phèn hoạt động mặn điển hình tại Cần Giờ (cũ) có hàm lượng tổng số (OC) cao ở độ sâu 0-18 cm và 95-125 cm lần lượt là 6,07% và 7,61% (Bảng 1.2). Chỉ số độ chua trao đổi và độ chua tiềm tàng trong đất phèn hoạt động mặn cao dần theo chiều sâu của phẫu diện. Đối với pH_{KCl} và pH_{H2O} thấp 2,3 và 2,4 ở độ sâu từ 95 cm đến 125 cm tương ứng. Độ mặn của đất phèn hoạt động mặn được đánh giá là mặn trung bình (4,20 dS/m) ở độ sâu từ 95 cm đến 125 cm, điều này cho thấy đất phèn ở tầng càng sâu thì nhiễm mặn càng cao, đặc biệt là đất phèn ở dọc ven các bờ biển. Hàm lượng Ca^{2+}, Mg^{2+}, K^+, Na^+ không chênh lệch lớn ở các tầng ở độ sâu từ 0 cm đến 125 cm (Bảng 1.2). CEC (tỷ lệ các cation trao đổi) trong đất cao nhất 18,56 cmol(+)/kg ở độ sâu 35-70 cm và thấp nhất 9,80 cmol(+)/kg ở độ sâu 18-35 cm. BS (độ no bazơ) cao nhất ở mức 36,5% ở độ sâu 18 cm đến 35 cm. Thông số SO_3^{2-} và SO_4^{2-} có xu hướng tăng dần theo chiều sâu ở các tầng đất của đất phèn hoạt động mặn.

Mặt khác, đất phèn tiềm tàng mặn điển hình tại Cần Giờ (cũ) có hàm lượng OC cao hơn, đạt 16,87% ở độ sâu 65-90 cm. Hàm lượng P_2O_5 dễ tiêu biến thiên từ 1,8-8,08, K_2O từ 5,60-115,89 (Bảng 1.2). Độ chua trao đổi cao nhất 22,64 cmol(+)/kg (35-65 cm), độ chua tiềm tàng 93,24 cmol(+)/kg (65-90 cm). pH_{H2O} dao động từ 6,1 (0-20 cm) đến 3,1 (35-65 cm), cho thấy độ chua không đáng kể. Độ mặn trung bình 6,9 dS/m (65-90 cm), tăng ở tầng sâu, đặc biệt ven biển. Na^+ cao nhất 8,24 cmol(+)/kg (0-20 cm), thấp nhất 6,68 cmol(+)/kg (65-90 cm). CEC giảm từ 23,12 (0 cm) xuống 16,23 (90 cm), tăng lại 19,36 (90-125 cm). BS cao, đạt 91,9% (65-90 cm). SO_4^{2-} cao nhất 2,83% (65-90 cm), thấp nhất 0,58% (90-125 cm).

1.4 Ảnh hưởng của đất phèn nhiễm mặn đến cây trồng

Dưới tác động ngày càng rõ của biến đổi khí hậu, cùng với mức độ nhận thức và cải tạo đất phèn, đất mặn còn hạn chế ở nhiều nơi. Việc gia tăng mực nước biển, xâm nhập mặn, biến động chế độ mưa khô đã làm trầm trọng thêm quá trình phèn hóa và mặn hóa. Đồng thời, các hoạt động nhân sinh như mở đê để nuôi tôm đã đưa nước mặn trực tiếp vào đất canh tác, làm kéo dài thời gian phơi nhiễm muối và mở rộng vùng bị ảnh hưởng. Về bản chất, đất phèn nhiễm mặn thể hiện hai hạn chế chính tác động đa diện lên sinh trưởng và năng suất cây trồng gồm độ chua mạnh do oxy hóa sulfide sinh ra axit sulphuric, làm pH giảm sâu và giải phóng các kim loại gây độc, độ mặn với EC, Na^+ và Cl^- cao. Khi tầng phèn nằm gần mặt đất, rễ cây chịu ảnh hưởng trực tiếp bởi pH thấp, phá vỡ sự hấp thu dinh dưỡng, muối hòa tan làm giảm khả năng lấy nước và gây rối loạn trao đổi ion nội bào, dẫn tới kém sinh trưởng, giảm tỷ lệ nảy mầm, hạn chế khối rễ và giảm năng suất điển hình ở lúa và rau màu. Ngoài ra, mặn và phèn làm giảm hoạt động vi sinh có ích, cố định đạm và khoáng hóa hữu cơ, thiếu hụt P, Ca, K. Sự mất mát diện tích canh tác do đô thị hóa, ô nhiễm và thâm canh càng làm giảm khả năng bù đắp sản xuất. Vì vậy, xử lý và phục hồi độ phì đất phèn nhiễm mặn sẽ trực tiếp cải thiện sinh trưởng cây trồng, ổn định năng suất và tăng thu nhập nông hộ trong điều kiện khí hậu thay đổi [69].

Đất phèn nhiễm mặn có thể làm thay đổi carbon trong đất, chu trình dinh dưỡng và gây bất lợi cho sự phát triển của hệ sinh vật, thực vật trong đất và đe dọa các chức

năng của hệ sinh thái trên cạn như sản lượng sơ cấp thuần và sự phong phú của loài [70]. Vật liệu giàu Ca^{2+} như vôi là phương pháp cải tạo loại đất này rất phổ biến, điều này hỗ trợ cho cây trồng sinh trưởng và phát triển được cải thiện hơn [71]. Đất phèn nhiễm mặn có hàm lượng lưu huỳnh tổng số rất cao (0,18 - 2,83%) dẫn đến độ chua rất thấp, SO_4^{2-} hòa tan, Al^{3+} và Fe^{3+} khá cao, đặc biệt trong tầng đất có chứa vật liệu sinh phèn hay tầng phèn [38, 72]. Trong thực tế, sự oxy hóa và khử luân phiên theo mùa càng thúc đẩy quá trình hóa chua, khi đất phèn nhiễm mặn tiềm tàng bị khai thác và xới xáo sẽ làm chuyển hóa và phát sinh lượng Fe^{3+} lớn, khi đó đất phèn nhiễm mặn tiềm tàng nhanh chóng chuyển hóa thành đất phèn nhiễm mặn hoạt động, điển hình dễ thấy ở những nơi đào kênh mương thoát nước, lên líp trồng trọt [38]. Độ mặn trong đất phèn nhiễm mặn tiềm tàng dưới rừng ngập mặn khá cao ở những phẫu diện đất phèn nhiễm mặn hoạt động, hàm lượng Cl^- có trị số cao (0,2 - 0,28%) ở tầng đất mặt [72]. Về các chỉ tiêu độ phì của đất phèn nhiễm mặn thường không cân đối, hàm lượng chất hữu cơ rất cao so với các loại đất khác, nhất là đất phèn nhiễm mặn tiềm tàng (9 - 10% OM) tầng mặt [58]. Hàm lượng đạm tổng số ở các tầng mặt vào loại giàu (0,15 - 0,25%) [58]. Hàm lượng lân tổng số ngược lại chỉ có giá trị từ nghèo đến rất nghèo (0,049%) [58]. Tình trạng trên dẫn đến sự thiếu hụt nghiêm trọng lân dễ tiêu trong đất. Vì vậy, cây trồng trên nền đất này thường còi cọc, tốc độ sinh trưởng và phát triển chậm, dễ chết nếu độ mặn quá cao. Tầng sinh phèn và tầng phèn rất nông chỉ cách mặt đất vài chục cm, nhiều nơi phát hiện ngay ở tầng mặt, hàm lượng lưu huỳnh (vật liệu sinh phèn) và độc tố Fe^{3+}, Fe^{2+}, Al^{3+} rất cao [51]. Đây là một hạn chế lớn đòi hỏi khi khai thác phải có một quy trình kỹ thuật chặt chẽ, mà điều trước hết là tránh xới xáo, tránh sự thoát thủy ở tầng chứa vật liệu sinh phèn. Đặc biệt cần lưu ý đối với khai thác nguồn tài nguyên hệ thực vật đa dạng như: hệ thực vật rừng tự nhiên (Chà là, Ráng, Giá, Mắm, Dà vôi, …) tất cả đều sống trên vùng đất ít ngập nước và hệ thực vật rừng trồng (Chà là và Ráng, Dừa lá) trồng ở vùng đất phèn nhiễm mặn và nước lợ [35, 37]. Ngoài ra, hàm lượng muối cao trong đất phèn nhiễm mặn càng làm cho đất trong vùng trở nên phức tạp và diễn biến rất nhanh chóng theo chiều hướng bất lợi cho sản xuất, cũng như môi trường khi điều kiện tự nhiên thay đổi [72]. Các vấn đề trên cho thấy các yếu tố hóa học trong đất phèn nhiễm mặn là mối nguy

tiềm tàng làm cho hệ thực vật sinh trưởng và phát triển kém dần dẫn đến sự mất đa dạng hệ thực vật. Vì vậy, cần có các nghiên cứu và cải tạo các thành phần hóa học của đất phèn nhiễm mặn làm hạn chế sự sinh trưởng của cây trồng đồng thời đề xuất được các hướng sử dụng đất phèn nhiễm mặn một cách hiệu quả nhất.

1.5 Các giải pháp cải tạo và sử dụng đất phèn nhiễm mặn

Giải pháp phổ biến nhất trong cải tạo đất phèn nhiễm mặn được áp dụng là rửa đất, khi nước vào ngập đất và sau đó cho mức nước hạ dần xuống, nước chảy ra khỏi đất sẽ mang theo các chất muối và các độc tố như Al và Fe cũng như lượng H^+ trao đổi, SO_4^{2-} [35]. Kết quả của việc rửa đất là lượng muối và các độc tố sẽ giảm xuống. Việc lên líp, đào mương có mục đích hạ thấp mực nước ngầm có chứa muối. Rửa đất có kết hợp đào mương, lên líp thì sẽ cho hiệu quả tốt hơn. Nhược điểm của giải pháp này là làm cho đất mất dinh dưỡng. Hiệu quả của tiến trình rửa đất phụ thuộc vào rất nhiều yếu tố và cần thời gian dài. Tuy nhiên, rửa đất là một biện pháp có hiệu quả để cải tạo đất phèn nhiễm mặn. Mặt khác, đối với các khu vực ở vùng ngập theo triều trong mùa khô thì giải pháp quản lý mực thủy cấp là việc duy trì chế độ nước tự nhiên của vùng [35] sẽ được áp dụng nhiều nhất. Chế độ nước ngọt trong mùa mưa và nước mặn trong mùa khô sẽ gây cản trở sự chua hóa do quá trình oxy hóa trong mùa khô trên đất hoặc ngăn cản sự oxy hóa Pyrite trên đất phèn tiềm tàng mặn. Tuy nhiên, Pyrite có thể vẫn còn hiện diện bên trong các khối đất to, có thể bị oxy hóa khi mực nước ngầm hạ thấp khi có đủ thời gian thích hợp. Vì vậy, luôn giữ mực nước trên bề mặt đất để hạn chế sự xuất hiện oxy và oxy hóa Pyrite để chuyển đất phèn tiềm tàng lên đất phèn hoạt động.

Ngoài ra, một trong những phương pháp cải tạo hiệu quả mà ít tốn kém chính là bón vôi. Vôi vừa cung cấp canxi cho cây vừa có khả năng cải tạo đất chống mặn, chống chua [73]. Đặc biệt, vôi nông nghiệp có tác dụng cải tạo đất thông qua khả năng hạ phèn, khử chua cho đất [74]. Ví dụ như ở những khu đất đã khai thác trồng trọt nhiều năm làm đất bị suy thoái cũng cần bón lót vôi và phân hữu cơ để cải tạo và tăng độ mùn cho đất, qua đó sẽ tăng hiệu quả sử dụng đất rõ rệt. Khi bón vôi vào đất mặn Ca^{2+} sẽ giải phóng Na^+ (tác nhân gây mặn ra khỏi đất) giúp đất bớt mặn [75]. Trong

keo đất của đất phèn nhiễm mặn làm bão hòa Na^+ gây mặn và H^+ trao đổi gây chua nên bón vôi có thể cải tạo tốt. Khi bón vôi cho đất phèn nhiễm mặn, thì ion gây mặn (Na^+) trong keo đất được đẩy ra dung dịch sẽ tác dụng với OH^- của vôi tạo nên kiềm mới NaOH để khử độ chua của đất [76]. Ion H^+ trao đổi gây chua của đất cũng được trung hòa bằng ion OH^- của vôi tạo thành nước và giảm độ chua đất [76]. Vôi cung cấp canxi cho đất và làm tăng khả năng phát triển cho bộ rễ cây trồng. Ngoài ra, sử dụng vôi sẽ cung cấp canxi giúp cây trồng giải độc, tăng khả năng chống chịu với điều kiện bất lợi nắng nóng, phèn, mặn làm tăng pH cho đất [77]. Giải pháp tiếp theo không kém bón vôi đó là bón phân hữu cơ, bón phân hữu cơ vào đất sẽ làm tăng độ màu mỡ, tơi xốp cho đất bằng cách cung cấp chất hữu cơ, mùn và dinh dưỡng [78]. Phân hữu cơ gồm hai loại: truyền thống (phân rác, phân xanh, phân chuồng) và chế biến công nghiệp (phân hữu cơ sinh học, vi sinh, hữu cơ-khoáng, phân bón lá) [15]. Cách chế biến gồm: thô sơ (phân chuồng, rác, xanh, than bùn) do nông dân tự làm; sinh học (sử dụng vi sinh vật cho rác thải, than bùn, vỏ trấu, bột gỗ) [79]; than bùn qua hoạt hóa, dưỡng hóa, cung cấp mùn humat, giảm rửa trôi dinh dưỡng, tạo môi trường cho vi sinh vật phát triển [73]. Mặc dù, phân hữu cơ như phân chuồng luôn dễ tìm, bổ sung dinh dưỡng và thân thiện với môi trường nhưng nếu bón phân chuồng tươi hoặc chưa qua xử lý có thể làm trầm trọng thêm tình trạng độ chua, độ mặn và độc tính kim loại trong một số loại đất có tính phèn, mặn. Chẳng hạn, khi đánh giá phân gà và phân lợn ở các vùng canh tác ven biển Trung Quốc nhận thấy nồng độ muối hòa tan (Na^+, Cl^-, SO_4^{2-}) trong phân rất cao, dẫn đến gia tăng EC đất và giảm pH sau các vụ bón liên tiếp, làm tăng nguy cơ tái mặn hóa [16]. Tại vùng đất thịt pha sét bán khô hạn ở Alberta - Canada, Hao and Chang [80] đã cho thấy bón phân bò tươi liều cao liên tục 16 năm đã làm tăng EC đất và tích lũy Na^+, Cl^-, đồng thời giảm pH. Những nghiên cứu này cho thấy phân hủy hữu cơ trong phân chuồng tạo ra axit hữu cơ và ion hòa tan, tăng Al^{3+} và Fe^{2+} trao đổi, từ đó làm tăng độc tính của đất.

Bên cạnh đó, biện pháp nhằm khai thác và sử dụng đất phèn nhiễm mặn một cách hiệu quả nhất là bố trí cây trồng thích hợp [49]. Trên cơ sở các đặc tính về đất và các chất lượng đất đai ảnh hưởng đến các kiểu sử dụng đất đã được thực hiện và việc

trồng rừng trên vùng đất ngập mặn thường xuyên vẫn là biện pháp tốt nhất cho việc bảo vệ môi trường và tài nguyên thiên nhiên vùng biển. Ngoài ra, cần tăng cường khả năng rửa đất, chọn giống thực vật có khả năng chịu phèn và mặn, áp dụng thêm các biện pháp ngăn ngừa sự mao dẫn phèn, mặn, tưới, các kỹ thuật canh tác đặc biệt, san bằng mặt ruộng, … nhằm tăng cường khả năng thoát nước ở tầng đất dưới và gieo hoặc cấy hạt giống dưới lớp đất sâu [38].

Cuối cùng, các giải pháp sử dụng hiệu quả cho đất phèn nhiễm mặn bao gồm lên luống trong mùa khô, rửa mặn đầu mùa mưa và trồng lúa ở vùng phù sa thấp ngập mặn theo triều. Với đất phèn nhiễm mặn theo thời kỳ, trồng lúa trong mùa mưa và nuôi tôm trong mùa khô. Đất vừa có phèn và mặn, các mô hình tôm-lúa, lúa-cá, hoặc rừng ngập mặn phát huy hiệu quả rõ rệt. Tại các vùng ngập mặn quanh năm, nuôi tôm vào mùa mưa và sản xuất artemia hoặc muối vào mùa nắng là lựa chọn khả thi. Bên cạnh đó, việc thiết kế đồng ruộng có kênh mương để xả phèn, chọn giống cây trồng chịu phèn-mặn như lúa, mía, khoai mỡ, chuối, bắp, mè, tràm, bạch đàn và áp dụng các kỹ thuật canh tác phù hợp cũng đóng vai trò quan trọng trong quản lý và sử dụng hiệu quả loại đất này.

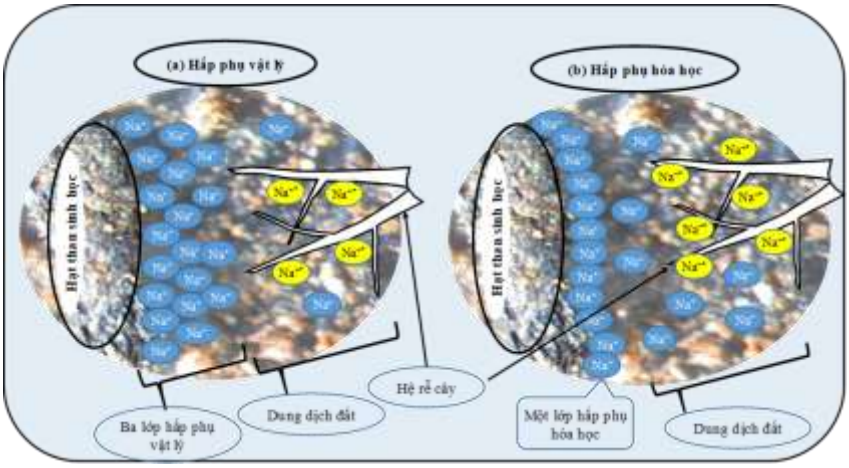
1.6 Giải pháp cải tạo đất bằng than sinh học

Than sinh học (Biochar) được tạo ra bằng phương pháp nhiệt phân sinh khối trong môi trường yếm khí, mang lại một vật liệu giàu carbon với cấu trúc ổn định có khả năng tồn tại trong đất hàng nghìn năm [81]. Được sử dụng như một chất cải tạo đất, than sinh học không chỉ cải thiện dinh dưỡng mà còn hỗ trợ đáng kể cho nông nghiệp. Với hàm lượng carbon cao và cấu trúc xốp đặc trưng, than sinh học giúp tăng khả năng giữ nước và dưỡng chất của đất, đồng thời tạo môi trường thuận lợi cho vi khuẩn có lợi phát triển. Đặc biệt, than sinh học còn hoạt động như một bể chứa carbon tự nhiên, góp phần cô lập và giữ khí CO_2 trong đất, hỗ trợ giảm thiểu tác động của biến đổi khí hậu [81]. Hơn thế nữa, thành phần của than sinh học là sự kết hợp chặt chẽ giữa các nguyên tố như H, N, O, P, và S trong các cấu trúc vòng thơm, tạo nên ái lực điện tử mạnh, làm gia tăng khả năng trao đổi cation (CEC) [82]. Điện tích bề mặt của than sinh học quyết định bản chất của các tương tác với hạt đất, chất hữu cơ hòa tan,

vi sinh vật, khí và nước, đóng vai trò quan trọng trong việc cải thiện các tính chất lý hóa học của đất [83].

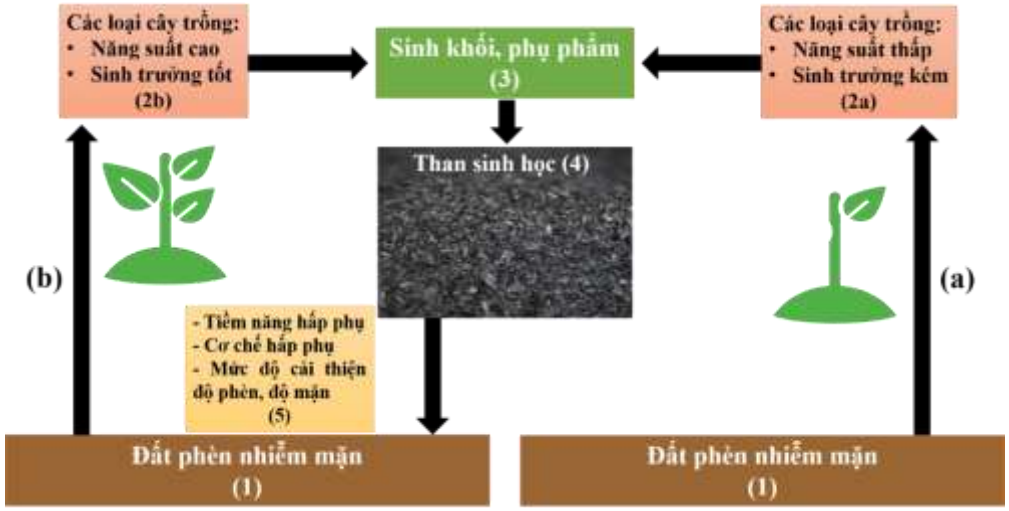
Nghiên cứu của Park, Kim, Park, Choi, Hong and Bahk [26] đã chỉ ra rằng than sinh học chế tạo từ giấy không chỉ thân thiện với môi trường và có chi phí thấp, mà còn đạt độ dẫn điện cao trong vùng quang phổ Terahertz. Than sinh học được tạo ra bằng phương pháp ủ yếm khí là một bước đột phá để tạo ra các đặc tính điện với nguồn gốc chủ yếu là do sự kết tinh của các nguyên tố carbon trong chất nền giấy bị phân hủy nhiệt. Khi nhiệt độ ủ tăng lên, quá trình nhiệt phân và kết tinh diễn ra nhanh hơn, dẫn đến độ dẫn điện của than sinh học cao hơn và tính ổn định hóa học trong các điều kiện môi trường xung quanh [26]. Do đó, việc đánh giá điện tích của than sinh học có ý nghĩa trên cả khía cạnh cơ bản và quan điểm ứng dụng. Các nghiên cứu trước đây cần bổ sung một bước tạo lớp hoa văn kim loại nhằm hoàn thiện cấu trúc chức năng cho thiết bị terahertz được triển khai trên nền vật liệu giấy [26]. Quá trình như vậy thường cần các thành phần đắt tiền và tạo ra chất ô nhiễm, điều này mâu thuẫn với việc sử dụng chất nền làm từ giấy như một nền tảng cảm biến thân thiện với môi trường và rẻ tiền. Về vấn đề đó, việc khảo sát than sinh học ở chế độ terahertz rất hấp dẫn để tìm kiếm các vật liệu thân thiện với môi trường và chi phí thấp. Srivatsav, Bhargav, Shanmugasundaram, Arun, Gopinath and Bhatnagar [25] đã chứng minh rằng than sinh học, được sản xuất từ các nguồn tự nhiên như sinh khối từ rừng, nông nghiệp, chất thải hữu cơ và chất thải động vật, ngày càng trở nên quan trọng như một giải pháp hấp phụ hiệu quả, thân thiện với môi trường và kinh tế. Tiềm năng của than sinh học bị ảnh hưởng bởi nhiều yếu tố bắt đầu từ nguồn sinh khối mà từ đó than sinh học được điều chế cùng với phương pháp chuẩn bị, điều kiện phản ứng, bản chất của chất ô nhiễm và cách thức hoạt động. Than sinh học như một chất hấp phụ có nhiều ưu điểm, chẳng hạn như thân thiện với môi trường, chi phí thấp và dễ sử dụng; các loại tiền chất khác nhau có sẵn rất nhiều để được chuyển đổi thành than sinh học, nó cũng có tiềm năng tái chế và khả năng hấp phụ cao hơn so với các loại thông thường khác chất hấp phụ. Từ đó cho thấy than sinh học là một vật liệu đầy tiềm năng để loại bỏ thuốc nhuộm và có khả năng hấp phụ trên 80% [25].

Khi được bón vào đất, than sinh học tạo ra những thay đổi đáng kể về lý tính và hóa tính, qua đó tác động trực tiếp đến các đặc tính và điều kiện sinh trưởng của vi sinh vật trong đất [84]. Đặc biệt, khi kết hợp than sinh học với phân hữu cơ, quá trình hóa mùn được thúc đẩy mạnh mẽ, mang lại hiệu quả cải tạo đất vượt trội. Sự phát triển hệ vi sinh vật hữu ích khu trú trên than sinh học, góp phần cải thiện cân bằng vi sinh vật đất theo hướng có lợi, quyết định đến năng suất cây trồng và hệ sinh thái đồng ruộng [85]. Việc kết hợp các vật liệu hữu cơ và vô cơ, chẳng hạn như vôi, phân chuồng và phân hỗn hợp, giúp tăng tốc quá trình rửa trôi các muối hòa tan khỏi bề mặt đất, qua đó giảm độ dẫn điện (EC) của đất. Than sinh học đóng vai trò quan trọng trong việc cải thiện độ xốp và khả năng dẫn thủy lực của đất [86]. Thực nghiệm đã chứng minh rằng EC của đất mặn giảm lần lượt 84%, 83% và 82% khi sử dụng than sinh học, phân trộn chất rắn sinh học và chất thải xanh phân trộn, so với đất đối chứng không bổ sung than sinh học [87]. Ngoài ra, than sinh học còn ảnh hưởng đến khả năng hấp phụ ion, giúp giữ lại muối trên bề mặt và trong các lỗ xốp mịn, làm giảm nồng độ muối trong dung dịch đất. Điều này cũng hạn chế sự di chuyển lên của dung dịch muối trong đất, đồng thời lớp vỏ của than sinh học làm giảm sự bốc hơi, từ đó ngăn chặn tích tụ muối ở tầng đất mặt [88]. Than sinh học được nghiên cứu khá nhiều về việc làm giảm nồng độ kim loại nặng trong các môi trường như nước, đất khác nhau, tùy thuộc vào từng nguyên tố kim loại nặng như asen (As), crom (Cr), cadimi (Cd), chì (Pb), thủy ngân (Hg) [89]. Mặc dù vậy, khả năng hấp phụ và tiềm năng hấp phụ muối của than sinh học lại có ít nghiên cứu quan tâm, ví dụ một nghiên cứu sơ khởi của nhóm tác giả Akhtar, Andersen and Liu [90]. Hấp phụ là quá trình tích luỹ chất lên bề mặt phân cách pha của các hệ dị thể. Muối có thể được hấp phụ trên bề mặt của than sinh học theo hai dạng hấp phụ vật lý và hấp phụ hóa học (Hình 1.1). Khi sử dụng than sinh học thì lượng Na^+ tự do trong dung dịch đất sẽ bằng tổng lượng Na^+ trừ đi tổng lượng Na^+ bị hấp phụ. Nếu đó là hấp phụ lý học thì Na^+ tự do trong dung dịch có thể còn 6 phân tử và rễ cây chỉ có cơ hội tiếp xúc với 4 phân tử Na^+. Mặt khác, nếu đó là hấp phụ hóa học thì rễ cây có cơ hội tiếp xúc với 6 phân tử Na^+.



Hình 1.1 Mô hình tối giản mô phỏng cách thức hấp phụ Na^+ và hiệu quả làm giảm nồng độ Na^+ trong dung dịch đất bởi than sinh học

Mức độ hấp phụ muối thay đổi tùy thuộc vào loại than sinh học và thời gian tồn lưu hoặc phân hủy của chúng, các muối này có thể bị giải phóng trở lại vào dung dịch đất theo thời gian, thông qua các lỗ rỗng của than sinh học [86]. Sự gia tăng pH của đất khi sử dụng than sinh học thường xảy ra trên đất có pH thấp (dưới 5,5), trong khi pH của than sinh học là khoảng 7,0 [91]. Sự thay đổi pH này có thể được giải thích nhờ vào khả năng trao đổi cation (CEC) cao của than sinh học, giúp thúc đẩy sự hấp thụ các cation cần thiết cho sự phát triển của cây như K^+, Ca^{2+} và Mg^{2+}. Kết quả là để cân bằng điện tích, rễ cây sẽ giải phóng ion H^+ trao đổi, làm tăng pH của đất [91]. Vai trò của than sinh học đối với cải thiện sinh trưởng của đất có thể được khái lược như Hình 1.2, cụ thể: (1) đất phèn nhiễm mặn thường cho năng suất thấp và sinh trưởng của cây trồng kém (2a)-(a). Các loại phụ phẩm (3) trong nông nghiệp sau khi thu hoạch được tái sử dụng để sản xuất than sinh học (4). Than sinh học này được bón trả lại cho đất phèn nhiễm mặn để cải thiện năng suất và sinh trưởng cây trồng (2b)-(b). Nghiên cứu này nhằm xác định tiềm năng, cách thức hấp phụ muối và mức độ cải thiện độ mặn của đất phèn nhiễm mặn bởi than sinh học (5).



Hình 1.2 Mô hình mô phỏng vai trò của than sinh học trong việc cải thiện sinh trưởng, năng suất cây trồng trên đất phèn nhiễm mặn

Với những đặc tính vượt trội, than sinh học có thể được sử dụng để cải tạo đất phèn nhiễm mặn, giảm độ mặn và thúc đẩy sự phát triển của cây trồng thông qua khả năng hấp phụ Na^+ lên bề mặt của các lỗ xốp mịn [92, 93]. Đồng thời, việc ứng dụng than sinh học trong điều kiện đất mặn còn giúp cải thiện khả năng cung cấp nước và dưỡng chất, từ đó tăng cường khả năng nảy mầm của hạt giống [94]. Tác động của than sinh học đến sự phát triển của cây trồng trong đất mặn phụ thuộc vào từng loài thực vật cụ thể [82]. Đặc biệt, sự cải thiện rõ rệt về sự phát triển và năng suất của một số loài cây chịu mặn, chẳng hạn như đậu điền thanh (*Sesbania Canabina*) và cây bụt mọc ven biển (*Kosteletzkya Virginica*), khi trồng trong đất được bổ sung than sinh học và phân trộn, đã dẫn đến sự thay đổi tích cực trong các đặc tính của đất phèn nhiễm mặn [91]. Một số than sinh học phổ biến bao gồm than trấu, than nhãn, than dừa và than mía, … mỗi loại có những đặc tính riêng biệt tùy thuộc vào nguồn nguyên liệu và điều kiện sản xuất. Trong đó, than trấu là sản phẩm từ vỏ trấu - một phế phụ phẩm nông nghiệp phổ biến tại Việt Nam, đặc biệt ở các vùng chuyên canh lúa. Với sản lượng vỏ trấu hàng năm lên đến hàng triệu tấn, than trấu trở thành lựa chọn phù hợp, khả thi về mặt kinh tế và thực tiễn. Nhờ nguồn nguyên liệu dồi dào và giá thành thấp, việc sử dụng than trấu không chỉ góp phần tái chế phế phẩm mà còn giải quyết vấn đề xử lý môi trường hiệu quả [95]. Với thành phần hóa học giàu carbon (~60-80%),

silic dioxide và các nguyên tố vi lượng như kali, magie, than trấu có pH kiềm (8-10), cấu trúc xốp và diện tích bề mặt lớn, giúp cải thiện tính chất lý hóa của đất. Than trấu đóng vai trò quan trọng trong việc cải tạo đất phèn nhiễm mặn, nhờ khả năng giảm độc tính của kim loại nặng, cải thiện cấu trúc và khả năng giữ nước của đất, đồng thời điều chỉnh pH và giảm nồng độ muối trong đất. Ngoài ra, than trấu còn hỗ trợ tối ưu hóa hiệu quả phân bón bằng cách hấp thụ và giải phóng chất dinh dưỡng dần dần. Việc bổ sung than trấu không chỉ nâng cao năng suất cây trồng trên đất phèn mà còn giảm thiểu phát thải khí nhà kính như CH_4 và N_2O, góp phần thúc đẩy nông nghiệp bền vững [96]. Ngoài ra, với nguồn nguyên liệu dồi dào, than trấu mang tính kinh tế cao, dễ sản xuất và không gây hại đến hệ sinh thái. Than trấu không chứa các chất độc hại, có khả năng tái sử dụng trong nhiều chu kỳ canh tác và hoàn toàn phân hủy trong tự nhiên sau một thời gian dài. Nhờ vậy, than trấu đã trở thành một lựa chọn lý tưởng để cải tạo đất phèn nhiễm mặn, giảm thiểu tác động tiêu cực từ nông nghiệp đến môi trường và phù hợp với xu hướng phát triển bền vững [96]. Nói tóm lại, than sinh học nói chung và than trấu nói riêng là một chất tiềm năng trong việc cải thiện đất phèn nhiễm mặn. Tuy nhiên, các nghiên cứu cho đến thời điểm hiện tại vẫn còn chưa đầy đủ và cần có nhiều nghiên cứu hơn trong việc ứng dụng than sinh học cải tạo đất phèn nhiễm mặn phục vụ phát triển nông nghiệp bền vững.

1.7 Một số phương pháp nội nghiệp điển hình trong nghiên cứu về đất

Trong nghiên cứu đất nói chung và đánh giá hiệu quả cải tạo đất nói riêng, việc áp dụng các phương pháp nội nghiệp bao gồm phân tích thống kê, xử lý dữ liệu và xây dựng chỉ số là rất cần thiết để đảm bảo tính khoa học, độ tin cậy và khả năng diễn giải sâu về bản chất biến động của đất. Các phương pháp này không chỉ hỗ trợ trong việc kiểm định sự khác biệt giữa các nghiệm thức mà còn cho phép xây dựng các mô hình tổng hợp nhằm đánh giá toàn diện chất lượng đất.

Phân tích phương sai (ANOVA) là một phương pháp nền tảng trong thống kê ứng dụng, được sử dụng phổ biến để kiểm định sự khác biệt có ý nghĩa giữa các nhóm xử lý đối với từng chỉ tiêu đất [97]. Việc kết hợp ANOVA với các phép kiểm định hậu nghiệm như Duncan hoặc Tukey giúp xác định rõ các nhóm khác biệt có ý nghĩa

thống kê. Các phân tích này thường được thực hiện bằng phần mềm thống kê chuyên dụng như JMP Pro, vốn tích hợp khả năng xử lý linh hoạt các mô hình tuyến tính, kiểm tra giả định phân phối, xây dựng biểu đồ và mô hình hóa tương tác [98]. Phân tích thành phần chính (Principal Component Analysis - PCA) và phân tích nhân tố (Factor analysis - FA) là các phương pháp đa biến quan trọng, được sử dụng để xác định mối liên hệ giữa các chỉ tiêu đất, giảm chiều dữ liệu và chọn lọc các chỉ tiêu đại diện. PCA giúp rút gọn số lượng biến mà vẫn giữ lại phần lớn thông tin trong dữ liệu, trong khi FA hỗ trợ nhận diện các nhóm chỉ tiêu có bản chất chức năng tương đồng [99]. Những phân tích này là bước nền quan trọng trong việc xây dựng chỉ số chất lượng đất (Soil Quality Index - SQI). Chỉ số chất lượng đất là công cụ tích hợp giúp đánh giá chức năng sinh thái của đất dựa trên các chỉ tiêu hóa - lý - sinh học. Phương pháp xây dựng SQI thường bao gồm: lựa chọn chỉ tiêu đầu vào (qua PCA/FA), chuẩn hóa giá trị và tổng hợp theo mô hình cộng hoặc nhân có trọng số [100]. Ngoài ra, một số nghiên cứu cũng phát triển chỉ số thành phần (component SQI) để đánh giá từng nhóm chức năng như dinh dưỡng, điều hòa pH, chống mặn hoặc duy trì sinh khối vi sinh vật [101]. Mối quan hệ giữa SQI tổng thể và SQI thành phần (các chỉ số thành phần như SQI tính axit, SQI tính mặn, SQI tính độc và SQI tính dinh dưỡng) là mối quan hệ cấu thành và phản ánh chức năng cụ thể của chất lượng đất: (i) SQI tổng thể là chỉ số tổng hợp phản ánh toàn diện chất lượng đất, được tính từ các thông số hóa học, vật lý, sinh học, … thông qua phân tích trọng số và chuẩn hóa giá trị từng thông số; (ii) SQI thành phần là các chỉ số con được tính riêng cho từng nhóm đặc tính hoặc yếu tố giới hạn cụ thể (ví dụ như axit, mặn, độc, dinh dưỡng. …). Mỗi chỉ số này phản ánh một khía cạnh riêng biệt trong chất lượng đất. SQI thành phần giúp xác định yếu tố nào đang là nguyên nhân chính làm suy giảm chất lượng đất (ví dụ: đất mặn nhưng dinh dưỡng cao thì cần ưu tiên cải tạo mặn trước). Mặt khác, SQI tổng thể cung cấp cái nhìn khái quát và hỗ trợ đánh giá so sánh chất lượng đất giữa các loại hình sử dụng đất, độ sâu đất hoặc khu vực khác nhau. Ngoài ra, SQI tổng thể được xây dựng từ các SQI thành phần hoặc từ tập hợp các thông số có liên quan đến từng yếu tố thành phần, nghĩa là SQI tổng thể chịu ảnh hưởng trực tiếp từ sự biến động của các SQI thành phần. Bên cạnh đó, phân tích tương quan đơn biến (ví dụ hệ số

Pearson, Spearman) và hồi quy bội được ứng dụng để làm rõ mối liên hệ giữa các chỉ tiêu đất hoặc giữa các yếu tố xử lý và năng suất cây trồng. Các phân tích này đóng vai trò quan trọng trong việc xác định các yếu tố ảnh hưởng chính cũng như xây dựng mô hình dự báo [99]. Ngoài các phân tích định lượng, phân tích SWOT (Strengths - Weaknesses - Opportunities - Threats) cũng là công cụ hữu ích để đánh giá tổng thể các yếu tố kỹ thuật, kinh tế - xã hội và môi trường liên quan đến việc áp dụng các giải pháp cải tạo đất. Đây là phương pháp có ý nghĩa đặc biệt trong các nghiên cứu có định hướng ứng dụng và chuyển giao công nghệ, giúp xác định tiềm năng nhân rộng và những rào cản cần khắc phục [102].

Nhìn chung, việc lựa chọn và kết hợp các phương pháp nội nghiệp phù hợp là cần thiết nhằm đảm bảo đánh giá toàn diện, sâu sắc và có hệ thống trong nghiên cứu đất, đặc biệt trong cải tạo đất phèn nhiễm mặn bằng các vật liệu thân thiện môi trường.

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

Tổng quan cho thấy các giải pháp hiện hành cho đất phèn nhiễm mặn như rửa mặn, quản lý mực nước, bón vôi, bổ sung phân chuồng, chọn giống chịu mặn hoặc phèn, tách cơ học Pyrite chỉ mang lại hiệu quả cục bộ và thường được triển khai riêng lẻ. Những biện pháp này hoặc tập trung vào trung hòa chua (vôi), hoặc cải thiện dinh dưỡng (hữu cơ), hoặc hạ muối nhờ thủy lợi nhưng do đó chưa giải quyết đồng thời bốn nhóm hạn chế trọng yếu: (i) pH thấp, (ii) mặn, (iii) độc tính Al^{3+}/Fe^{2+}–$^{3+}$ và (iv) mất cân bằng dinh dưỡng (thiếu N-P-K, CEC thấp). Bên cạnh đó, ít nghiên cứu cơ chế về biến đổi P (chuyển hóa Al-P/Fe-P thành Ca-P), sự thay đổi CEC/pH của đất khi áp dụng các vật liệu cải tạo. Đặc biệt, khoảng trống quan trọng là thiếu thử nghiệm tổ hợp để khai thác hiệu ứng cộng hưởng giữa các vật liệu thân thiện môi trường trong cải tạo đất. Vì vậy, nghiên cứu này được thực hiện theo hướng tiếp cận mới tập trung vào hai tổ hợp chính: (1) than sinh học (than trấu) kết hợp vôi và (2) than sinh học (than trấu) kết hợp phân chuồng (phân bò). Mục tiêu là cải tạo đồng thời chua - mặn - độc - dinh dưỡng trên nền cơ chế bổ sung và tương hỗ: vôi tạo "đòn bẩy" pH và kết tủa hoặc giảm Al-Fe trao đổi; than sinh học cung cấp bề mặt kiềm, tăng CEC, hỗ trợ mặn; phân chuồng bổ sung N-P-K. Cách tiếp cận này lấp đầy khoảng trống tri thức

về tác dụng cộng hưởng giữa vật liệu kiềm vô cơ và vật liệu carbon xốp, qua đó chuyển từ xử lý "đơn điểm" sang đa mục tiêu cải thiện đặc tính hóa học cho đất phèn nhiễm mặn. Kết quả dự kiến làm cơ sở cho hướng dẫn kỹ thuật và ra quyết định ở quy mô đồng ruộng, đồng thời tận dụng phế phụ phẩm địa phương (vỏ trấu, phân chuồng) để giảm chi phí và phát thải khí nhà kính. Ý nghĩa rộng hơn là đóng góp vào nông nghiệp thích ứng với biến đổi khí hậu, nâng cao an ninh lương thực và chất lượng môi trường đất ở các vùng ven biển có đất phèn, mặn tương đồng.

CHƯƠNG 2 NỘI DUNG VÀ PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

2.1 Nội dung nghiên cứu

* Nội dung 1: Khảo sát hiện trạng và hiệu quả sử dụng các loại hình sử dụng đất phèn nhiễm mặn phục vụ cho mục đích sản xuất nông nghiệp tại Cần Giờ (cũ) và Gò Công Đông (cũ) và đánh giá các đặc tính hóa học của chúng

Để xây dựng giải pháp cải tạo đất phèn nhiễm mặn, nghiên cứu đã khảo sát hiện trạng và hiệu quả sử dụng đất phèn nhiễm mặn tại khu vực nghiên cứu điển hình (Cần Giờ cũ thuộc TP. HCM và Kiểng Phước, Gò Công Đông, Tiền Giang cũ) và các đặc tính hóa học của đất phèn nhiễm mặn nhằm đánh giá chất lượng và tác động tiêu cực của chúng.

* Nội dung 2: Khảo sát và đánh giá tác động của than sinh học (than trấu, than nhãn, than dừa), vôi và phân bò đến các đặc tính hóa học của đất phèn nhiễm mặn trong điều kiện nhà lưới

Hai thí nghiệm trong điều kiện nhà lưới được thực hiện để khảo sát, đánh giá tác động của than sinh học (trấu, nhãn, xơ dừa), vôi và phân bò lên đất phèn nhiễm mặn. Thí nghiệm đầu tiên có mục đích lựa chọn than sinh học từ vỏ trấu với tỷ lệ sử dụng phù hợp cho các thí nghiệm tiếp theo. Thí nghiệm thứ hai có mục tiêu đánh giá hiệu cải tạo đất phèn nhiễm mặn và các tác động có liên quan của than trấu, vôi và phân bò khi sử dụng đơn lẻ và tổ hợp giữa than trấu với vôi hoặc phân bò.

* Nội dung 3: Đánh giá hiệu quả cải tạo của than trấu, vôi và phân bò đến các đặc tính hóa học và sinh trưởng, năng suất lúa và cải thìa trên đất phèn nhiễm mặn

Hai thí nghiệm với quy mô thực địa được thực hiện (trên lúa tại Bình Khánh, Cần Giờ cũ thuộc TP. HCM và trên cải thìa tại Kiểng Phước, Gò Công Đông, Tiền Giang cũ) để đánh giá hiệu quả thực tế của các vật liệu thân thiện môi trường. Các vật liệu sử dụng gồm than trấu, vôi, phân bò sử dụng đơn lẻ và tổ hợp than trấu với vôi hoặc phân bò, nhằm kiểm chứng hiệu quả cải tạo đất phèn nhiễm mặn trồng lúa và cải thìa theo các nghiệm thức đã xây dựng.

* Nội dung 4: Đề xuất các giải pháp cải tạo và sử dụng đất phèn nhiễm mặn

Ứng dụng ma trận SWOT vào phân tích và đánh giá tiềm năng cải tạo đất phèn nhiễm mặn bằng vật liệu thân thiện môi trường (than trấu, vôi và phân bò) với từng điểm mạnh, điểm yếu, cơ hội và thách thức khi ứng dụng thực tế than trấu, vôi và phân bò vào cải tạo đất phèn nhiễm mặn trong bối cảnh biến đổi khí hậu hiện nay.

2.2 Phương pháp nghiên cứu

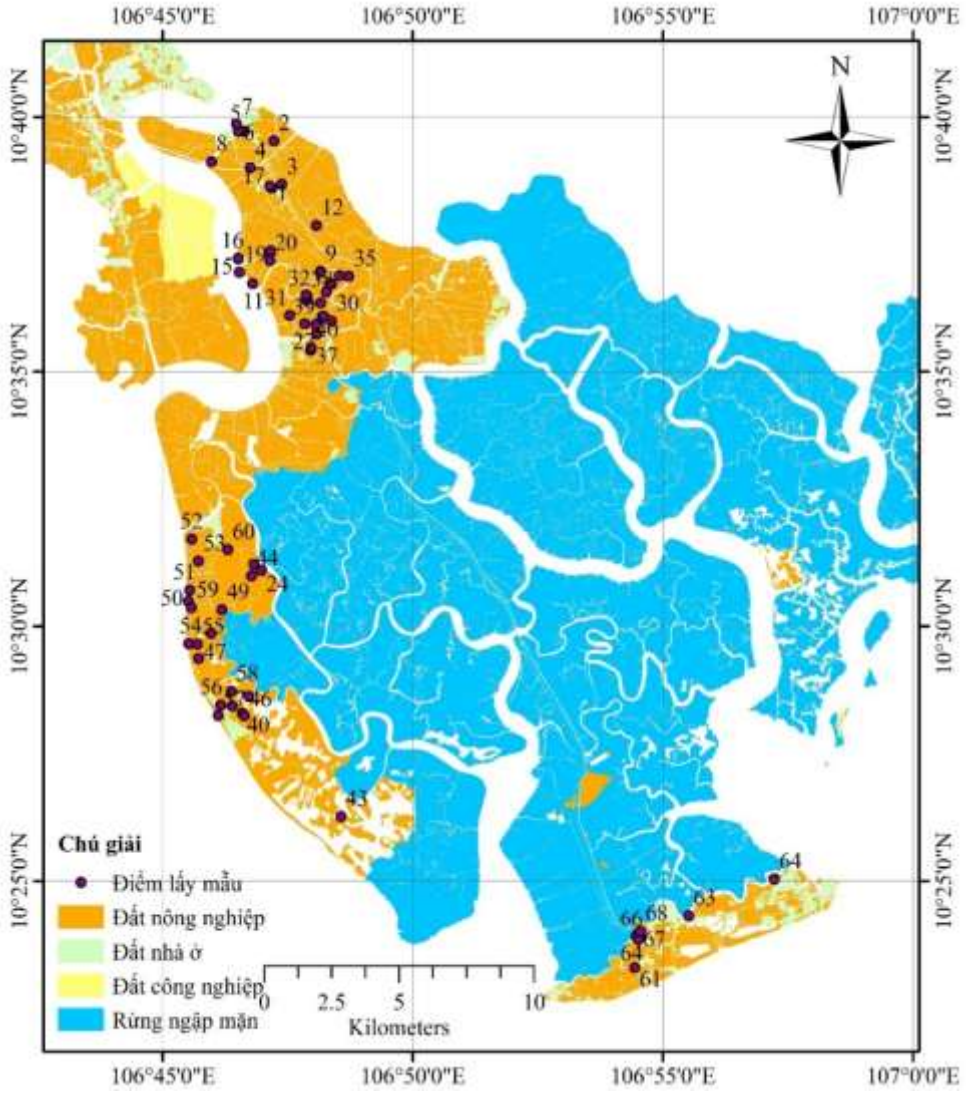
* Nội dung 1: Khảo sát hiện trạng và hiệu quả sử dụng các loại hình sử dụng đất phèn nhiễm mặn phục vụ cho mục đích sản xuất nông nghiệp tại Cần Giờ (cũ) và Gò Công Đông (cũ) và đánh giá các đặc tính hóa học của chúng

Huyện Cần Giờ (cũ) thuộc TP. HCM nằm trong vùng ven biển có khí hậu nhiệt đới gió mùa cận xích đạo, có hai mùa rõ rệt: mùa mưa kéo dài từ tháng 5 đến tháng 10 và mùa khô kéo dài từ tháng 11 đến tháng 4 năm sau. Huyện Gò Công Đông, tỉnh Tiền Giang (cũ) là vùng với kinh tế phát triển chủ lực là nông nghiệp. Vào mùa khô, vùng này được khuyến khích chuyển từ trồng lúa sang trồng màu, cây ăn trái hoặc các cây trồng thích hợp khác do phải đối mặt với nguy cơ hạn hán hoặc thiếu nước bơm tát, khu vực ven biển, cửa sông thường bị xâm nhập mặn. Cần Giờ (cũ) và Gò Công Đông (cũ) được chọn làm vùng nghiên cứu vì tính điển hình và bổ trợ lẫn nhau đối với vấn đề đất phèn nhiễm mặn. Cần Giờ (cũ) đại diện cho vùng ven biển, chịu ảnh hưởng xâm nhập mặn liên tục và hệ thủy triều (đất phèn nhiễm mặn quanh năm), thích hợp để nghiên cứu tác động của mặn liên tục lên tầng đất mặt và tầng sâu. Mặt khác, Gò Công Đông (cũ) thể hiện kiểu xâm nhập mặn theo mùa, vị trí gần cửa sông dẫn tới biến động mặn, phèn theo mùa khô.

Để tiến hành khảo sát hiện trạng của các loại hình sử dụng đất phèn nhiễm mặn phục vụ cho mục đích sản xuất nông nghiệp. 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 Cần Giờ (cũ) có 5 loại hình thường được sử dụng chính gồm đất trồng cây hằng năm khác, đất trồng cây lâu năm, đất trồng lúa đất nuôi trồng thủy sản lần lượt tương ứng với các mô hình canh tác như lúa, lúa-tôm, tôm và xoài. Tương tự, ở Gò Công Đông (cũ) có 3 loại hình sử dụng đất

chính gồm đất trồng lúa, đất trồng cây hằng năm khác, đất trồng cây lâu năm tương ứng với các mô hình canh tác như lúa, rau màu và cây trồng khác phục vụ cho mục đích sản xuất nông nghiệp nhằm đánh giá các mô hình canh tác chiếm ưu thế về diện tích và có mang lại hiệu quả về mặt kinh tế với điều kiện nông hộ và phản ánh điều kiện canh tác trên đất phèn nhiễm mặn của hai khu vực như đã được chọn. Việc điều tra chỉ được thực hiện trên các loại hình sử dụng đất phèn nhiễm mặn phục vụ cho mục đích sản xuất nông nghiệp. 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 hoặc quản lý đất phèn nhiễm mặn, với ưu tiên các loại hình sử dụng đất chính phục vụ sản xuất nông nghiệp có ảnh hưởng lớn đến tính chất đất và tiềm năng cải tạo. Do đó, việc khảo sát tại huyện Cần Giờ (cũ) và xã Kiểng Phước (cũ) đã được thực hiện điều tra bằng phiếu phỏng vấn các hộ dân sử dụng đất phèn nhiễm mặn. Tại Cần Giờ (cũ), 135 phiếu được thu thập từ 4 mô hình canh tác: lúa mùa, lúa-tôm, trồng xoài và nuôi tôm. Tại Kiểng Phước (cũ), 150 phiếu được thu thập từ 3 mô hình canh tác: trồng lúa, cây cạn và đất tự nhiên. Dữ liệu được xử lý bằng Excel, khảo sát, đánh giá hiệu quả kinh tế đối với việc sử dụng đất cho sản xuất nông nghiệp tại cả hai địa phương.

Lấy mẫu đất: Mẫu đất được thu thập theo TCVN 7538-1:2006 và TCVN 7538-2:2005. Tại mỗi ruộng, đất được lấy từ 5 điểm chéo góc, tổng 3 kg đất tươi, sau đó phơi khô, nghiền và sàng qua rây có kích thước 2 mm để phân tích. Tại huyện Cần Giờ cũ (TP. HCM), 136 mẫu đất được lấy từ 2 tầng (0-30 cm và 30-60 cm) trên 5 loại hình sử dụng đất: trồng cây hằng năm khác, trồng cây lâu năm, trồng lúa, nuôi trồng thủy sản và đất tự nhiên trong 2 tháng (tháng 7, 8 năm 2022). Bản đồ vị trí lấy mẫu được thể hiện tại Hình 2.1. Kết quả đánh giá đặc tính đất phèn nhiễm mặn ở các loại hình sử dụng giúp xác định sự biến đổi tính axit, mặn, độc và dinh dưỡng theo tầng đất, làm cơ sở đề xuất giải pháp cải tạo, ứng dụng cho lúa và rau màu.



Hình 2.1 Bản đồ vị trí lấy mẫu đất tại huyện Cần Giờ (cũ), thành phố Hồ Chí Minh

Phân tích hóa học: Các chỉ tiêu hóa học cần phân tích gồm pH, SO_4^{2-}, độ chua, H^+ trao đổi, EC, Cl^-, Na trao đổi, Al, Fe, Mn trao đổi, CEC, P, OC, NH_4^+, K, Ca, Mg trao đổi (Bảng 2.1; ngoài ra, các phương pháp chi tiết được mô tả tại Phụ bảng 1.1 - Phụ lục 1). Bộ 17 chỉ tiêu này được chọn dựa trên đặc điểm đặc trưng của đất phèn nhiễm mặn và nhu cầu đánh giá ảnh hưởng đến cây trồng. Chúng giúp xác định mức độ axit, mặn, khả năng giữ dinh dưỡng và độc tố, từ đó đưa ra giải pháp cải tạo đất phù hợp. Mặt khác, một số chỉ tiêu như NO_3^-, Zn, Cu, Pb, Cd, P tổng số không được phân tích vì đặc tính pH thấp của đất phèn khiến nitrat dễ rửa trôi hoặc chuyển hóa, các kim loại này ít ảnh hưởng trực tiếp đến đất phèn trong nông nghiệp và P tổng số không phản ánh mức độ sẵn có cho cây trồng, trong khi P dễ tiêu quan trọng hơn.

Bảng 2.1 Tổng hợp các chỉ tiêu hóa học cần phân tích cho mẫu đất

TT	Chỉ tiêu	Đơn vị	Mục đích	Phương pháp	Ghi chú
I	Các chỉ tiêu chất lượng đất: Đánh giá mức độ chua, khả năng giữ dinh dưỡng và độc tố trong đất				
1	pH	-	Xác định độ axit, ảnh hưởng trực tiếp đến cây trồng 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 $BaCl_2$	[103]
4	Độ chua trao đổi	cmol(+)/kg	Đánh giá tổng lượng axit có thể trao đổi trong đất.	Phương pháp chuẩn độ	[103]
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 cây.	Phương pháp Mehlich-1 P	TCVN 8661: 2011 [103]
6	NH_4^+	g/kg	Xác định nguồn cung cấp nitơ cho cây trồng.	Phương pháp so màu bằng máy UV-VIS	[104]
7	H^+ trao đổi	cmol(+)/kg	Đo lượng ion H^+ góp phần tạo độ chua của đất.	Phương pháp chuẩn độ	[103]
8	OC	%	Xác định lượng chất hữu cơ trong đất, ảnh hưởng đến độ phì nhiêu.	Phương pháp Walkley Black	TCVN 8941:2011
II	Anion: Đánh giá các ion chính gây nhiễm mặn và ảnh hưởng đến tính chất hóa học của đất.				
9	Cl^-	g/kg	Một trong những ion chính gây nhiễm mặn, ảnh hưởng đến khả năng hút nước của cây.	Phương pháp chuẩn độ	[105]
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	[106]
III	Kim loại: Đánh giá sự hiện diện của các kim loại ảnh hưởng đến sinh trưởng cây trồng và độ phì đất.				
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)	[103]
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 cây chịu hạn và nhiễm mặn tốt hơn.		
17	Na trao đổi		Xác định mức độ nhiễm mặn của đất, ảnh hưởng đến cấu trúc đất và sinh trưởng của cây.		

Các phương pháp tính toán và phân tích số liệu, cụ thể:

Phân tích thống kê: 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. Thống kê suy luận, ví dụ tương quan tuyến tính hoặc phi tuyến tính, được dùng để khảo sát mối liên hệ giữa các chỉ số đo (EC và pH với lượng hấp phụ cũng như nồng độ trong đất, trong dung dịch). Phân tích phương sai (ANOVA) một hoặc hai chiều được dùng để đánh giá các ảnh hưởng đơn lẻ hoặc tương tác giữa các loại vật liệu và nồng độ hay tỷ lệ áp dụng đối với lượng hấp phụ cũng như nồng độ trong dung dịch hoặc trong đất.

Phân tích thành phần chính/nhân tố (PCA/FA): Phân tích này được sử dụng để xác định trọng số (w_i) của các thông số đất riêng lẻ theo quy trình được mô tả bởi Nguyen, Le, Pham, Nguyen, Tran and Van Thai [107]. 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.

Tính chỉ số chất lượng đất (SQI)

Chỉ số Chất lượng đất (SQI) được tính toán theo phương pháp phân tích thành phần/nhân tố chính (PCA/FA) [107] sử dụng 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 2.2 và 2.3. 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.

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

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_i là trọng số của nhân tố của tham số thứ *i*, n là tổng số các thông số.

Tính chỉ số chất lượng đất thành phần: Chỉ số chất lượng đất tổng thể (SQI) được chia thành các chỉ số chất lượng đất thành phần (SQI thành phần), bao gồm SQI tính axit, SQI tính mặn, SQI tính độc và SQI tính dinh dưỡng. Mười bảy tính chất đất quan sát trong thí nghiệm này có thể được chia thành bốn nhóm khác nhau, bao gồm nhóm tính chất phản ánh tính axit của đất (pH, độ chua trao đổi, hàm lượng SO_4^{2-} và H^+ trao đổi), tính mặn (EC, Na trao đổi và Cl^-), tính độc (Al, Fe, Mn trao đổi) và tính dinh dưỡng (CEC, OC, NH_4^+, P, K, Ca và Mg trao đổi). Chỉ số SQI thành phần được tính dựa vào các nhóm tính chất đất này, theo phương trình 2.4.

$$SQI_{thành\ phần} = \sum_{j=1}^{z} w_j\ s_j \qquad (2.4)$$

Trong đó, z là số lượng tính chất đất trong nhóm, j là nhóm tính chất đất thứ j. Kết quả có 4 SQI thành phần được hình thành bao gồm, SQI phản ánh tính axit, SQI phản ánh tính mặn, SQI phản ánh tính dinh dưỡng và SQI phản ánh tính độc của đất. Vì các chỉ số này được tính dựa trên các số liệu đã được chuẩn hóa nên các chỉ số này càng cao thì đất càng tốt.

Phân tích phương sai và tương quan: Tất cả số liệu sau thí nghiệm đều được phân tích phương sai theo kiểu bố trí thí nghiệm hoàn toàn ngẫu nhiên một/hai yếu tố. 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 nghiệm thức. Phân tích tương quan đa biến giữa khoảng cách (km) tính từ bờ biển trở vào với

các chỉ số chất lượng đất thành phần (chỉ số chất lượng đất tính axit, tính mặn, tính độc và tính dinh dưỡng) được áp dụng để xác định khoảng cách nào có ảnh hưởng đến các chỉ số chất lượng đất thành phần ở 2 tầng đất ứng với 5 loại hình sử dụng đất tại khu vực nghiên cứu. Bên cạnh đó, phương pháp phân tích tương quan đa biến loại dần từng bước (Stepwise backward elimination) được áp dụng để xác định mô hình đa biến có ý nghĩa thống kê. Dựa vào phương trình này, phần trăm đóng góp của biến số độc lập (khoảng cách từ tính từ bờ biển vào đất liền) đối với tổng biến thiên của biến số phụ thuộc (các chỉ số chất lượng đất thành phần) được xác định.

* Nội dung 2: Khảo sát và đánh giá tác động của than sinh học (than trấu, than nhãn, than dừa), vôi và phân bò đến các đặc tính hóa học của đất phèn nhiễm mặn trong điều kiện nhà lưới

Thí nghiệm 1: Khảo sát đặc tính, xác định loại than sinh học và tỷ lệ sử dụng phù hợp cho cải tạo đất phèn nhiễm mặn.

Nghiên cứu lựa chọn ba loại than sinh học từ vỏ trấu, xơ dừa và cành nhãn để phân tích các đặc tính hóa học và ảnh hưởng đến chất lượng đất. Các loại than được kiểm chứng trên đất phèn nhiễm mặn trong điều kiện nhà lưới nhằm đánh giá tiềm năng cải tạo, xác định loại và tỷ lệ sử dụng phù hợp. Thí nghiệm này hướng đến cải tạo đất phèn nhiễm mặn, việc chọn mẫu đất từ vùng canh tác thực tế giúp phản ánh điều kiện ngoài đồng ruộng, đảm bảo tính ứng dụng của kết quả nghiên cứu.

Thời gian thực hiện: Từ tháng 01 đến tháng 4 năm 2022.

Địa điểm nghiên cứu: Trường Đại học Công nghiệp Thành phố Hồ Chí Minh.

Vật liệu thí nghiệm: Đất thí nghiệm được lấy từ xã Bình Khánh, huyện Cần Giờ (cũ) thuộc TP. HCM của nông hộ có mô hình canh tác luân phiên giữa lúa và nuôi tôm với EC = 3-4 dS/m, đất này được phân loại là đất phèn nhiễm mặn (*Salic Thionic Fluvisol*) theo hệ thống phân loại của WRB [108]. Khối lượng đất được lấy 250 kg đảm bảo đủ cho thí nghiệm, giúp giảm sai số do tính không đồng nhất của đất; Than sinh học: Than trấu (mua tại Công ty TNHH Sản xuất Thương mại Dịch vụ Đặng Gia

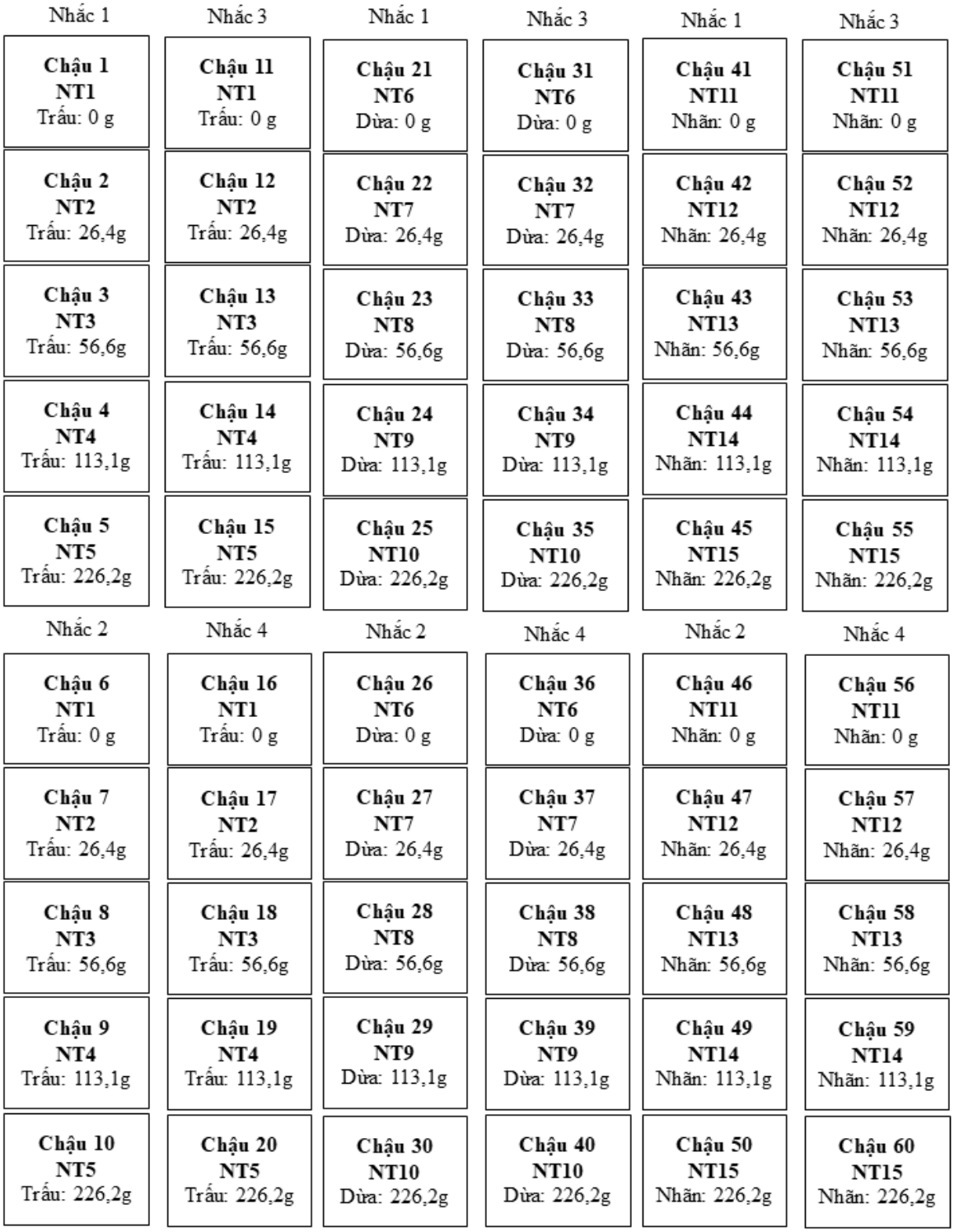
Trang), than nhãn và than dừa (mua ở cửa hàng bán vật tư nông nghiệp gần khu vực nghiên cứu).

Kiểu bố trí thí nghiệm hoàn toàn ngẫu nhiên với 3 loại than, 5 tỷ lệ than với 4 lần lặp lại và không trồng cây trên các nghiệm thức. 15 nghiệm thức thí nghiệm với 4 lần lặp tương ứng với 60 chậu. Các nghiệm thức từ 1 đến 6 sử dụng than trấu tương ứng với các tỷ lệ 0; 0,7; 1,5; 3 và 6% [109]. Tương tự, các nghiệm thức từ 6 đến 10 đối với than dừa và từ 11 đến 15 với than nhãn cũng lần lượt tương tứng với các tỷ lệ sử dụng như than trấu (Bảng 2.2).

Bảng 2.2 Các nghiệm thức cho thí nghiệm 1

Nghiệm thức	**Loại than**	**Tỷ lệ (%)**
1	Than trấu	0
2		0,7
3		1,5
4		3
5		6
6	Than dừa	0
7		0,7
8		1,5
9		3
10		6
11	Than nhãn	0
12		0,7
13		1,5
14		3
15		6

Tổng số chậu thí nghiệm là 15 × 4 = 60 chậu và kích thước của mỗi ô chậu là: đường kính × chiều cao: 20 cm × 35 cm, cột đất trong chậu có độ cao 15 cm, bán kính 10 cm. Trong cả hai thí nghiệm được thực hiện trong nhà lưới (thí nghiệm 1 và 2) không thực tế đo dung trọng đất, trọng lượng đất khô kiệt sử dụng cho 1 chậu và độ cao của cột đất trong từ chậu được ước lượng số liệu từ nghiên cứu trước đây [110], sau đó lấy trọng lượng đất chia cho thể tích mà đất chiếm trong chậu, do đó khối lượng đất khô kiệt sử dụng cho mỗi chậu là 3.770 g. Ba loại than sinh học được cân và trộn với đất đã sàng ở năm mức tỷ lệ khác nhau gồm 0%; 0,7%; 1,5%; 3% và 6% tương ứng với các khối lượng lần lượt là 0 g; 26,4 g; 56,6 g; 113,1 g; 226,2 g (Hình 2.2).



Hình 2.2 Sơ đồ bố trí thí nghiệm ba loại than sinh học (Thí nghiệm 1)

Than nhãn và than xơ dừa được làm vỡ nhỏ hơn từ các hạt than lớn bằng cách dùng cối và chày đá, than trấu được sử dụng nguyên bản sau đó được trộn với đất đã giã mịn sẽ được áp dụng 1 lần. Để đảm bảo tính nhất quán giữa các nghiệm thức và các

lần lặp lại, mỗi chậu với bất kể loại vật liệu bổ sung và tỷ lệ than đều được cho vào đất (đã trộn với than trước đó) và gõ dằn nhẹ bằng tay nhằm đạt chiều cao cột đất đồng đều [111]. Cuối cùng, tưới ngập tất cả các chậu bằng nước cất, giữ mức nước ngập 5 cm, tưới bổ sung ít nhất 1 lần/ngày và ủ liên tục trong vòng 100 ngày. Lấy mẫu đất để phân tích các thành phần hóa học sau 100 ngày ủ. Trước khi thu mẫu đất, đất được xáo trộn bằng tay sau đó dùng khoan tay nhỏ có đường kính ống 2,5 cm để thu mẫu trên từng chậu và thu 500 g đất/chậu. Mẫu đất sau khi thu được phơi khô trong không khí và giã mịn, sàng qua rây có kích thước 2 mm để phân tích hóa học. Đất trước và sau thí nghiệm được phân tích các thông số như ở nội dung 1 (Bảng 2.1) trừ OC và NH_4^+. Các phương pháp tính toán và phân tích số liệu như phân tích thống kê, phân tích thành phần chính/nhân tố (PCA/FA), tính chỉ số chất lượng đất (SQI), phân tích phương sai: Thực hiện như ở nội dung 1.

Thí nghiệm 2: Ảnh hưởng của than trấu, vôi và phân bò lên các đặc tính hóa học đất phèn nhiễm mặn ở hai chế độ quản lý nước khác nhau ở điều kiện nhà lưới.

Trên cơ sở khảo sát từ nội dung 1, nghiên cứu được thực hiện với đất phèn nhiễm mặn có loại hình sử dụng đất chính là đất trồng lúa và đất trồng cây cạn, áp dụng hai chế độ nước: tưới ngập (đại diện đất trồng lúa) và độ ẩm 60% (đại diện đất trồng cây cạn). Kết hợp than trấu với vôi hoặc phân bò giúp tăng pH, giảm mặn, giữ nước và cung cấp dinh dưỡng bền vững. Thí nghiệm này được thực hiện với mục tiêu tập trung vào đánh giá tác động của than trấu, vôi và phân bò lên đất phèn nhiễm mặn ở hai chế độ nước tưới nhằm đưa ra giải pháp cải tạo phù hợp cho từng điều kiện cụ thể.

Thời gian thực hiện: Từ tháng 4 đến tháng 7 năm 2022.

Địa điểm nghiên cứu: Trường Đại học Công nghiệp Thành phố Hồ Chí Minh.

Vật liệu thí nghiệm: Đất thí nghiệm được lấy từ xã Bình Khánh, huyện Cần Giờ (cũ) thuộc TP. HCM là khu vực điển hình có đất phèn nhiễm mặn được canh tác lúa, với EC = 5-6 dS/m (nằm trong ngưỡng đặc trưng của đất phèn nhiễm mặn), đất này được phân loại là đất phèn nhiễm mặn (*Salic Thionic Fluvisol*) theo hệ thống phân loại của WRB [108]. Khối lượng đất lấy 300 kg đảm bảo đủ cho thí nghiệm, giúp giảm sai số

do tính không đồng nhất của đất; Vật liệu thân thiện môi trường: Than trấu (mua tại Công ty TNHH Sản xuất Thương mại Dịch vụ Đặng Gia Trang), vôi nông nghiệp (pH = 13) và phân bò (phơi khô tự nhiên) được mua ở cửa hàng bán vật tư nông nghiệp gần khu vực nghiên cứu.

Liều lượng bón vật liệu và kiểu bố thí nghiệm được lựa chọn, cụ thể như sau:

Than trấu (tỷ lệ 1,1%): 10 tấn/ha (kết quả từ thí nghiệm 1); Liều lượng bón vôi khuyến cáo dùng là 1-5 tấn/ha. Đặc tính của đất phèn nhiễm mặn có pH từ thấp đến rất thấp (2-5). Trong thí nghiệm này, liều lượng vôi đã sử dụng là 1 tấn/ha với pH = 13. Một số nghiên cứu khác nhau đã thực hiện áp dụng các liều lượng phân bò khác nhau để bón lót cho đất trồng rau màu và thường nằm trong khoảng 5-20 tấn phân bò/ha như Dật [112] áp dụng 10-12 tấn phân bò/ha; Toàn [113] áp dụng 15-20 tấn phân bò/ha. Các tỷ lệ phân bò nêu trên đều cho cây trồng có năng suất cao khi thu hoạch. Trong thí nghiệm này, liều lượng phân bò đã chọn là 10 tấn phân bò/ha.

Thí nghiệm được bố trí theo kiểu hoàn toàn ngẫu nhiên 2 yếu, gồm 12 nghiệm thức (NT) thí nghiệm với 4 lần lặp lại, tương ứng 48 chậu. Ở chế độ nước tưới ngập, các NT từ 1 đến 3 thuộc nhóm không sử dụng than trấu (yếu tố 1), trong đó NT1 - đối chứng (không sử dụng bất kỳ vật liệu nào), NT2 - chỉ bón bôi, NT3 - chỉ bón phân bò; các NT từ 4 đến 6 thuộc nhóm có sử dụng than trấu (yếu tố 2), trong đó NT4 - chỉ bón than trấu, NT5 - bón than trấu kết hợp vôi, NT6 - bón than trấu kết hợp phân bò. Ở chế độ nước độ ẩm 60%, các nghiệm thức được mô tả tương tự với các nghiệm thức được đánh số thứ tự từ 7 đến 12 (Bảng 2.3).

Bảng 2.3 Các nghiệm thức cho thí nghiệm 2

Nghiệm thức	Chế độ nước	Than trấu	Vật liệu thân thiện môi trường (phân bò hoặc vôi)
1	Tưới ngập	Không than trấu	Không sử dụng
2			Vôi (1 tấn/ha)
3			Phân bò (10 tấn/ha)
4		Có than trấu (10 tấn/ha)	Không sử dụng
5			Vôi (1 tấn/ha)
6			Phân bò (10 tấn/ha)
7	Độ ẩm 60%	Không than trấu	Không sử dụng
8			Vôi (1 tấn/ha)
9			Phân bò (10 tấn/ha)
10		Có than trấu (10 tấn/ha)	Không sử dụng
11			Vôi (1 tấn/ha)
12			Phân bò (10 tấn/ha)

Mỗi chậu có kích thước đường kính 9 cm, chiều cao 23 cm, với tổng thể tích 1.500 cm^3. Cột đất trong chậu có độ cao 15 cm, bán kính 4,5 cm với phương pháp tính được thực hiện tương tự như thí nhiệm 1 [110], nên khối lượng đất khô kiệt sử dụng cho mỗi chậu là 1.145 g. Đất được phối trộn đều với các vật liệu thân thiện môi trường gồm: 0,64 g vôi, 6,36 g than sinh học và 6,36 g phân bò đã bóp nhuyễn vào các chậu thí nghiệm có nghiệm thức tương ứng và chỉ áp dụng một lần trước khi ủ. 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 số lượng các vật liệu than, vôi và phân bò cho mỗi chậu thí nghiệm. Sau khi phối trộn đất và vật liệu theo các nghiệm thức tương ứng, tiến hàng đậy nắp kín và gõ dằn nhẹ bằng tay để đạt được độ cao cột đất đồng đều là 15 cm [111]. Hai chế độ nước tưới được áp dụng cho các chậu: Tưới ngập nước: 24 chậu thuộc các nghiệm thức từ 1 đến 6, giữ mức nước ngập 5 cm và tưới bổ sung ít nhất 1 lần/ngày; Độ ẩm 60%: 24 chậu thuộc các nghiệm thức từ 7 đến 12, duy trì độ ẩm đất ở mức 60% (Hình 2.3) được xác định bằng thiết bị Spectrum Technologies FieldScout TDR 150/TDR 350, thiết bị này được sử dụng chuyên dụng cho việc đo độ ẩm đất.

Tưới ngập

Nhắc 1

Chậu 1 NT1 Than: 0 g Vôi: 0 g Phân bò: 0 g	Chậu 2 NT2 Than: 0 g Vôi: 0,64 g Phân bò: 0 g	Chậu 3 NT3 Than: 0 g Vôi: 0 g Phân bò: 0,64 g	Chậu 4 NT4 Than: 6,36 g Vôi: 0 g Phân bò: 0 g	Chậu 5 NT4 Than: 6,36 g Vôi: 0,64 g Phân bò: 0 g	Chậu 6 NT6 Than: 6,36 g Vôi: 0 g Phân bò: 0,64 g

Nhắc 2

Chậu 7 NT1 Than: 0 g Vôi: 0 g Phân bò: 0 g	Chậu 8 NT2 Than: 0 g Vôi: 0,64 g Phân bò: 0 g	Chậu 9 NT3 Than: 0 g Vôi: 0 g Phân bò: 0,64 g	Chậu 10 NT4 Than: 6,36 g Vôi: 0 g Phân bò: 0 g	Chậu 11 NT4 Than: 6,36 g Vôi: 0,64 g Phân bò: 0 g	Chậu 12 NT6 Than: 6,36 g Vôi: 0 g Phân bò: 0,64 g

Nhắc 3

Chậu 13 NT1 Than: 0 g Vôi: 0 g Phân bò: 0 g	Chậu 14 NT2 Than: 0 g Vôi: 0,64 g Phân bò: 0 g	Chậu 15 NT3 Than: 0 g Vôi: 0 g Phân bò: 0,64 g	Chậu 16 NT4 Than: 6,36 g Vôi: 0 g Phân bò: 0 g	Chậu 17 NT4 Than: 6,36 g Vôi: 0,64 g Phân bò: 0 g	Chậu 18 NT6 Than: 6,36 g Vôi: 0 g Phân bò: 0,64 g

Nhắc 4

Chậu 19 NT1 Than: 0 g Vôi: 0 g Phân bò: 0 g	Chậu 20 NT2 Than: 0 g Vôi: 0,64 g Phân bò: 0 g	Chậu 21 NT3 Than: 0 g Vôi: 0 g Phân bò: 0,64 g	Chậu 22 NT4 Than: 6,36 g Vôi: 0 g Phân bò: 0 g	Chậu 23 NT4 Than: 6,36 g Vôi: 0,64 g Phân bò: 0 g	Chậu 24 NT6 Than: 6,36 g Vôi: 0 g Phân bò: 0,64 g

Độ ẩm 60%

Nhắc 1

Chậu 25 NT7 Than: 0 g Vôi: 0 g Phân bò: 0 g	Chậu 26 NT8 Than: 0 g Vôi: 0,64 g Phân bò: 0 g	Chậu 27 NT9 Than: 0 g Vôi: 0 g Phân bò: 0,64 g	Chậu 28 NT10 Than: 6,36 g Vôi: 0 g Phân bò: 0 g	Chậu 29 NT11 Than: 6,36 g Vôi: 0,64 g Phân bò: 0 g	Chậu 30 NT12 Than: 6,36 g Vôi: 0 g Phân bò: 0,64 g

Nhắc 2

Chậu 31 NT7 Than: 0 g Vôi: 0 g Phân bò: 0 g	Chậu 32 NT8 Than: 0 g Vôi: 0,64 g Phân bò: 0 g	Chậu 33 NT9 Than: 0 g Vôi: 0 g Phân bò: 0,64 g	Chậu 34 NT10 Than: 6,36 g Vôi: 0 g Phân bò: 0 g	Chậu 35 NT11 Than: 6,36 g Vôi: 0,64 g Phân bò: 0 g	Chậu 36 NT12 Than: 6,36 g Vôi: 0 g Phân bò: 0,64 g

Nhắc 3

Chậu 37 NT7 Than: 0 g Vôi: 0 g Phân bò: 0 g	Chậu 38 NT8 Than: 0 g Vôi: 0,64 g Phân bò: 0 g	Chậu 39 NT9 Than: 0 g Vôi: 0 g Phân bò: 0,64 g	Chậu 40 NT10 Than: 6,36 g Vôi: 0 g Phân bò: 0 g	Chậu 41 NT11 Than: 6,36 g Vôi: 0,64 g Phân bò: 0 g	Chậu 42 NT12 Than: 6,36 g Vôi: 0 g Phân bò: 0,64 g

Nhắc 4

Chậu 43 NT7 Than: 0 g Vôi: 0 g Phân bò: 0 g	Chậu 44 NT8 Than: 0 g Vôi: 0,64 g Phân bò: 0 g	Chậu 45 NT9 Than: 0 g Vôi: 0 g Phân bò: 0,64 g	Chậu 46 NT10 Than: 6,36 g Vôi: 0 g Phân bò: 0 g	Chậu 47 NT11 Than: 6,36 g Vôi: 0,64 g Phân bò: 0 g	Chậu 48 NT12 Than: 6,36 g Vôi: 0 g Phân bò: 0,64 g

Hình 2.3 Sơ đồ bố trí thí nghiệm ủ đất và vật liệu thân thiện môi trường (Thí nghiệm 2)

Thí nghiệm kéo dài 100 ngày, tương đương một vụ lúa ngắn ngày (3-3,5 tháng) hoặc hai vụ rau màu (45-50 ngày mỗi vụ). Trong thời gian này, các vật liệu thân thiện môi trường (vôi, than sinh học, phân bò) tương tác với đất, giúp ổn định pH, giảm độc tố

(như Al, Fe), và cải thiện các đặc tính hóa học của đất. Mục tiêu là đánh giá hiệu quả của các nghiệm thức cải tạo trong một chu kỳ canh tác thực tế. Sau 100 ngày tiến hành lấy mẫu đất để phân tích các thành phần hóa học. Cách thu và phơi mẫu đất được thực hiện tương tự như thí nghiệm 1. Đất trước và sau thí nghiệm được phân tích các thông số như ở nội dung 1 (Bảng 2.1).

Phân tích các thành phần Al trong đất phèn nhiễm mặn (đánh giá tình trạng đất, xác định các biện pháp cải tạo và quản lý đất hiệu quả, đảm bảo cây trồng phát triển tốt và nâng cao hiệu quả sản xuất nông nghiệp). Năm thành phần của kim loại nhôm (Al) trong 48 mẫu đất được phân tích bằng phương pháp chiết các thành phần Al trong đất đơn lẻ [114]. Các nhóm Al gồm: $Al_{trđ}$ - Al trao đổi (KCl 1M), Al_{lky} - Al liên kết yếu với chất hữu cơ ($CuCl_2$ 0,5M - pH = 2,8), Al_{lkb} - Al liên kết bền với chất hữu cơ (Na-pyrophotphate 0,1M - pH = 10), $Al_{vđh}$ - Al vô định hình (Amoni oxalate 0,2M - pH = 3), Al_{kt} - Al kết tinh (NaOH 0,5M). Các thành phần Al sau khi được tách chiết sẽ được đo bằng thiết bị ICP-OES (Inductively Coupled Plasma Spectroscopy Optical Emission Spectrometer).

Các phương pháp tính toán và phân tích số liệu như phân tích thống kê, phân tích thành phần chính/nhân tố (PCA/FA), tính chỉ số chất lượng đất (SQI) và chỉ số chất lượng đất thành phần (SQI tính axit, mặn, độc và dinh dưỡng), phân tích phương sai và tương quan: Thực hiện như ở nội dung 1.

* Nội dung 3: Đánh giá hiệu quả của than trấu, vôi và phân bò đến các đặc tính hóa học và sinh trưởng, năng suất lúa và cải thìa ở điều kiện thực tế đồng ruộng

Thí nghiệm 3: Đánh giá hiệu quả của than trấu, vôi và phân bò lên đặc tính đất, sinh trưởng và năng suất lúa tại huyện Cần Giờ (cũ).

Thời gian thực hiện: Từ tháng 7 đến tháng 12 năm 2022.

Địa điểm nghiên cứu: Ruộng trồng lúa dùng cho thí nghiệm này có diện tích 500 m^2 (10.638770°N, 106.781880°E) của hộ nông dân Dương Văn To tại xã Bình Khánh, huyện Cần Giờ (cũ), Thành phố Hồ Chí Minh.

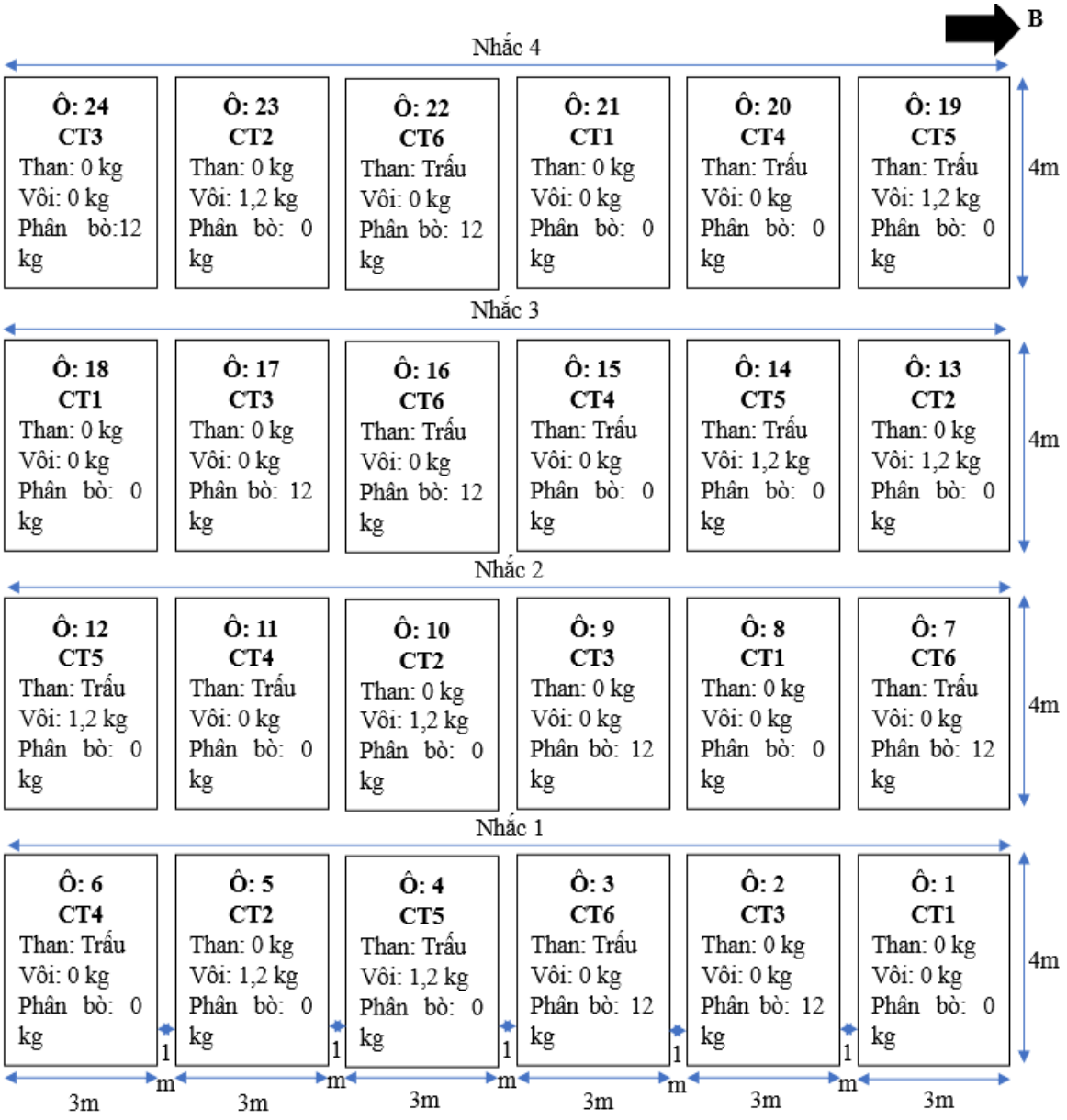
Vật liệu dùng cho thí nghiệm: Đất trồng lúa của hộ nông dân hiện đang trồng luân canh một vụ lúa và một vụ tôm có EC từ 1-2 (dS/m), đất này được phân loại là đất phèn nhiễm mặn (*Salic Thionic Fluvisol*) theo hệ thống phân loại của WRB [108]; Vật liệu thân thiện môi trường: Than trấu (mua tại Công ty TNHH Sản xuất Thương mại Dịch vụ Đặng Gia Trang), vôi nông nghiệp (pH = 13) và phân bò (phơi khô tự nhiên) được mua ở cửa hàng bán vật tư nông nghiệp gần khu vực nghiên cứu; Giống lúa: Ba Bụi (giống địa phương đang canh tác).

Các liều lượng phối trộn của than trấu, vôi và phân bò sử dụng trong thí nghiệm này được lựa chọn và thực hiện tương tự như ở nội dung 2 (thí nghiệm 2). Tiếp theo, nhằm đảm bảo độ tin cậy và khả năng suy rộng khi đánh giá hiệu quả cải tạo của vật liệu lên đất phèn nhiễm mặn trồng lúa, thí nghiệm đồng ruộng đã được bố trí theo kiểu khối đầy đủ ngẫu nhiên (RCBD) với 2 yếu tố, 6 nghiệm thức (NT) và 4 lần lặp lại, tổng cộng 24 ô thí nghiệm. Các NT từ 1 đến 3 thuộc nhóm không sử dụng than trấu (yếu tố 1), trong đó: NT1 - đối chứng (không sử dụng bất kỳ vật liệu nào), NT2 - chỉ bón bôi, NT3 - chỉ bón phân bò; các NT từ 4 đến 6 thuộc nhóm có sử dụng than trấu (yếu tố 2), trong đó: NT4 - chỉ bón than trấu, NT5 - bón than trấu kết hợp vôi, NT6 - bón than trấu kết hợp phân bò (Bảng 2.4).

Bảng 2.4 Các nghiệm thức cho thí nghiệm 3

Nghiệm thức	**Than trấu**	**Vật liệu thân thiện môi trường (phân bò hoặc vôi)**
1	Không than trấu	Không sử dụng
2		Vôi (1 tấn/ha)
3		Phân bò (10 tấn/ha)
4	Có than trấu (10 tấn/ha)	Không sử dụng
5		Vôi (1 tấn/ha)
6		Phân bò (10 tấn/ha)

Mỗi ô có diện tích 12 m^2 (3 m × 4 m) [115] phù hợp để đánh giá hiệu quả của vật liệu thân thiện môi trường đất trên lúa, đồng thời thuận tiện cho quản lý nước và thu thập số liệu về sinh trưởng và năng suất. Giữa các ô thí nghiệm, mương nước rộng 1 m được thiết kế nhằm cách ly vật lý, hạn chế sự di chuyển ngang của nước, muối và chất dinh dưỡng (Hình 2.4).



Hình 2.4 Sơ đồ bố trí thí nghiệm canh tác lúa nước (Thí nghiệm 3)

Thí nghiệm này thực hiện với một vụ lúa, các vật liệu thân thiện môi trường gồm than trấu, vôi và phân bò được áp dụng một lần vào đầu vụ. Các vật liệu này được rải đều trên diện tích bề mặt đất của từng ô cơ sở, sau đó sẽ được vùi vào đất tầng 0-10 cm bằng cuốc tay. Giống lúa sử dụng cho thí nghiệm này là Ba Bụi được cấy vào đầu vụ. Các cây lúa nảy mầm (mạ) được cấy vào các ô cơ sở với mật độ giống nhau (25 cây/m^2). 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 sử dụng thuốc bảo vệ thực vật khi vượt ngưỡng gây hại theo khuyến cáo kỹ thuật địa phương (thí nghiệm này không sử dụng thuốc bảo vệ thực vật).

Khi kết thúc thí nghiệm, năng suất hạt, sinh khối rơm và sinh khối rễ được thu trên từng ô thí nghiệm, sấy khô và cân trọng lượng. Năng suất lúa được đo trên toàn bộ diện tích của mỗi ô (12 m^2). Rơm rạ được thu từ bốn khung, mỗi khung có diện tích 1 m^2 (1 m × 1 m) và được đặt ngẫu nhiên trên từng ô ruộng sau khi thu hoạch hạt. Sinh khối rơm trong mỗi khung được thu thập, rửa sạch, sấy khô trong không khí và cân để đánh giá. Sinh khối rễ từ mỗi ô ruộng được thu thập bằng cách sử dụng tám khung có diện tích 0,04 m^2 (0,2 m × 0,2 m), hai khung nhỏ hơn này được đặt trong mỗi khung 1 m^2. Sinh khối rễ thu được từ khối đất lớn này được rửa cẩn thận bằng nước sạch và rửa lại bằng nước cất, để khô trong không khí và sau đó cân trọng lượng. Mẫu đất được lấy từ mỗi ô thí nghiệm vào cuối vụ được lấy ở lớp 0-10 cm trên cùng. Một mẫu đất tổng hợp được thu thập từ 10 địa điểm phụ trong các khung nhỏ lấy mẫu rễ ở trên. Lượng đất được lấy mỗi ô thí nghiệm là 3 kg/ô, sau đó được làm khô trong không khí, nghiền và sàng qua rây có kích thước 2 mm, lưu trữ và bảo quản để phân tích các chỉ tiêu hóa học.

Phân tích các chỉ tiêu hóa học đối với mẫu đất (trước và sau thí nghiệm) tương tự như nội dung 1 (Bảng 2.1). Thành phần nguyên tố trong rễ, rơm và hạt của lúa: Mẫu rễ, rơm và hạt của lúa được lấy và phân tích các nguyên tố chính. Thành phần nguyên tố phân tích bao gồm Na, Ca, Mg K, Al, Fe và Mn và các dinh dưỡng chính là N và P. Mẫu rễ, rơm và hạt của lúa được phơi khô, nghiền và sàng qua rây có kích thước 20 micromet để phân tích hóa học [116, 117]. N tổng trong thân lá được đo bằng phương pháp Kjeldahl [118]. Hàm lượng các nguyên tố Na, P, K, Ca, Mg, Al, Fe và Mn được xác định bằng phương pháp của Isaac and Johnson [119].

Thí nghiệm 4: Đánh giá hiệu quả của than trấu, vôi và phân bò lên đặc tính đất, sinh trưởng và năng suất cải thìa tại Gò Công Đông (cũ).

Thời gian thực hiện: Từ tháng 6 đến tháng 9 năm 2023.

Địa điểm nghiên cứu: Ruộng trồng cải thìa có diện tích 268,55 m^2 (10.380791°N, 106.773088°E) của hộ nông dân Trần Bình Tân tại xã Kiểng Phước, huyện Gò Công Đông, tỉnh Tiền Giang (cũ).

Vật liệu dùng cho thí nghiệm: Đất trồng rau màu của hộ nông dân trồng cải thìa có EC từ 1-2 (dS/m), đất này được phân loại là đất phèn nhiễm mặn (*Salic Thionic Fluvisol*) theo hệ thống phân loại của WRB, 2015 [108]; Vật liệu thân thiện môi trường: Than trấu (mua tại Công ty TNHH Sản xuất Thương mại Dịch vụ Đặng Gia Trang), vôi nông nghiệp (pH = 13) và phân bò (phơi khô tự nhiên) được mua ở cửa hàng bán vật tư nông nghiệp gần khu vực nghiên cứu; Giống cải thìa: F1 Green Sun No 1 (giống địa phương đang canh tác).

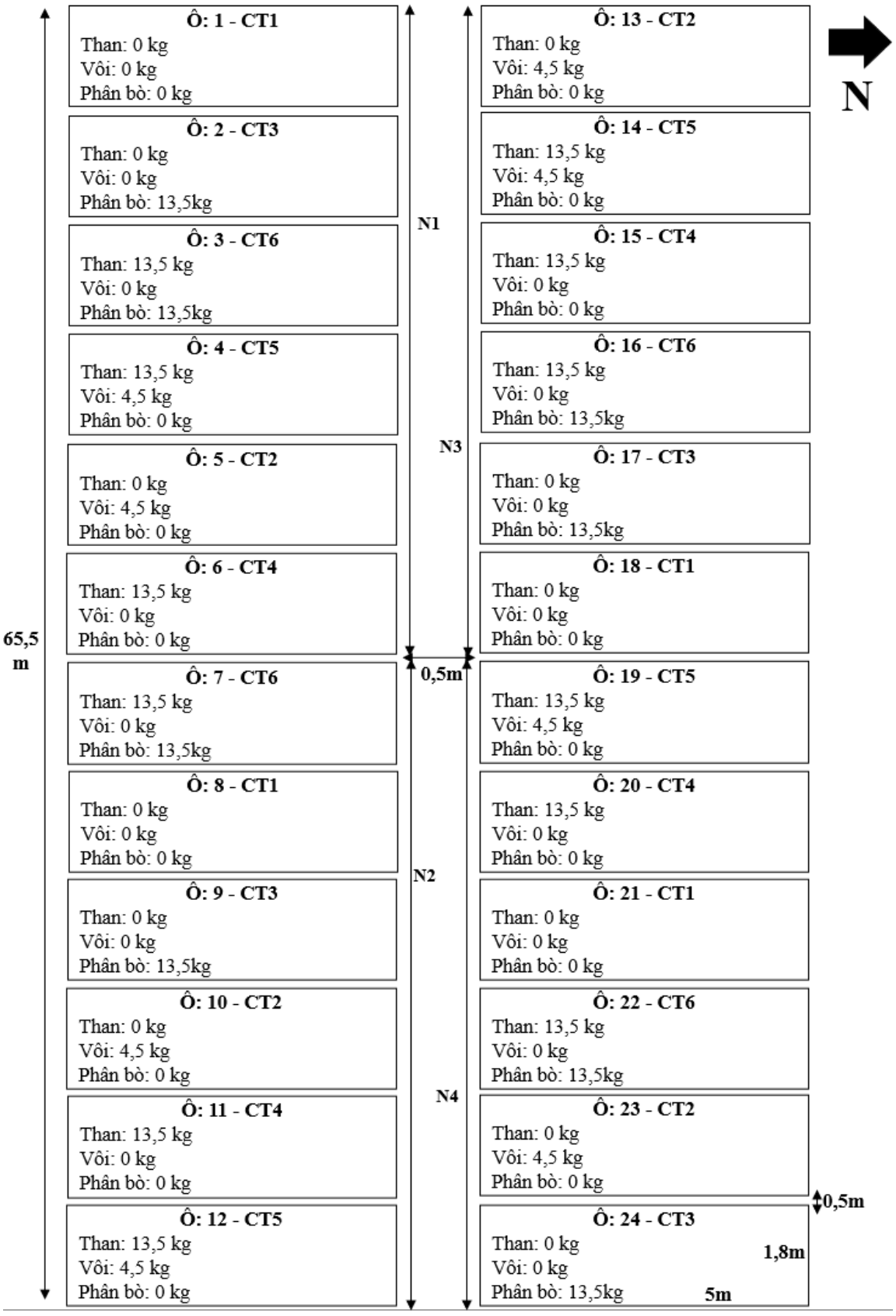
Liều lượng bón vật liệu và kiểu bố thí nghiệm được lựa chọn, cụ thể như sau: Than trấu (tỷ lệ 1,5%): 15 tấn/ha (kết quả từ thí nghiệm 1); Liều lượng bón vôi khuyến khích là 1-5 tấn/ha. Tuy nhiên, cải thìa phát triển tốt nhất trên đất màu mỡ, thoát nước tốt với nhiều chất hữu cơ và pH của đất là 5,8-7,5. Mặt khác, đất phèn nhiễm mặn có pH từ thấp đến rất thấp (2-5) và dinh dưỡng thấp nên trong thí nghiệm này: 1,5 tấn/ha là liều lượng vôi ($pH_{vôi}$ = 13) và 15 tấn/ha là liều lượng phân bò được lựa chọn để bón.

Tương tự như thí nghiệm 3, thí nghiệm trên cải thìa cũng được bố trí theo kiểu khối đủ ngẫu nhiên (RCBD) 2 yếu tố, 6 nghiệm thức và 4 lần lặp lại, tổng cộng 24 ô (Bảng 2.5).

Bảng 2.5 Các nghiệm thức cho thí nghiệm 4

Nghiệm thức	**Than trấu**	**Vật liệu thân thiện môi trường (phân bò hoặc vôi)**
1	Không than trấu	Không sử dụng
2		Vôi (1,5 tấn/ha)
3		Phân bò (15 tấn/ha)
4	Có than trấu (15 tấn/ha)	Không sử dụng
5		Vôi (1,5 tấn/ha)
6		Phân bò (15 tấn/ha)

Các nghiệm thức được mô tả tương tự như thí nghiệm 3. Diện tích ô trong thí nghiệm này đã được điều chỉnh phù hợp với cải thìa và điều kiện đồng ruộng. Diện tích mỗi ô là 9 m^2 (1,8 m × 5 m), khoảng cách giữa các ô là 0,5 m, chiều cao ô là 0,3 m. Sơ đồ thí nghiệm được trình bày tại Hình 2.5.



Hình 2.5 Sơ đồ bố trí thí nghiệm canh tác cải thìa (Thí nghiệm 4)

Cải thìa được trồng trong hai vụ liên tục. Than trấu, vôi và phân bò được áp dụng một lần, rải đều trên bề mặt đất và vùi vào tầng đất 0-10 cm bằng cuốc tay. Hạt cải thìa được ngâm trong nước ấm 30-35°C trong 6-8 giờ trước khi gieo và gieo với mật độ đồng nhất (20 cây/m^2). Chăm sóc được thực hiện đồng nhất theo quy trình đại trà của địa phương như vun gốc, làm cỏ khi cây 5-6 lá; tưới giữ ẩm (2 lần/ngày khi nắng, 1 lần khi mát); phòng trừ sâu bệnh ưu tiên biện pháp sinh học, khi vượt ngưỡng dùng Validacin/Ridomil (thối nhũn), Olong/Biocin (bọ nhảy), BT/Delfin (sâu tơ), Selecron (sâu khoang/rầy). Ngưng phun thuốc 7-10 ngày trước thu hoạch và tuân thủ theo khuyến cáo (thí nghiệm này không phun thuốc).

Khi kết thúc mỗi vụ, thân lá và sinh khối rễ được thu trên từng ô thí nghiệm, sấy khô và cân khối lượng. Sinh khối trên bề mặt đất (thân lá) và rễ được đo trong khung có diện tích 1 m^2 (1 m × 1 m). Mỗi ô cơ sở bố trí năm khung lớn mỗi khung có diện tích là 1 m^2 với mật mộ đồng đều và toàn bộ sinh khối trên bề mặt đất sẽ được lấy. Các mẫu sinh khối này sẽ được phơi khô và cân trọng lượng. Đối với sinh khối rễ: bố trí một khung gỗ, mỗi khung gỗ có kích thước 0,2 m × 0,2 m sẽ được sử dụng để định vị vị trí lấy mẫu. Hai khung nhỏ trên mỗi khung lớn sẽ được định vị, toàn bộ rễ (độ sâu khoảng 0-10 cm) trên hai khung này sẽ được lấy, rửa sạch, phơi khô và cân trọng lượng. Mẫu đất được lấy từ mỗi ô thí nghiệm vào cuối vụ được lấy ở lớp 0-10 cm trên cùng từ 10 khung nhỏ của mỗi ô trộn lại (sau khi đã tách rễ). Một mẫu đất tổng hợp được thu thập từ 10 điểm phụ trong 10 khung nhỏ lấy mẫu rễ.

Khối lượng đất được lấy tại mỗi ô thí nghiệm, các thao tác như phơi khô, nghiền, lưu trữ, bảo quản; Phân tích các chỉ tiêu hóa học đối với mẫu đất (trước và sau thí nghiệm), các chỉ tiêu cần phân tích tương tự như nội dung 1 (Bảng 2.1); Mẫu thân lá và rễ cải thìa được lấy và phân tích các nguyên tố và các thành phần dinh dưỡng chính bằng các phương pháp tương tự như đã mô tả trong thí nghiệm 3.

Ở nội dung này, các phương pháp tính toán và phân tích số liệu, bao gồm phân tích thống kê, PCA/FA, tính chỉ số chất lượng đất (SQI và các SQI thành phần), phân tích phương sai và tương quan, được thực hiện tương tự nội dung 1 trên cả thí nghiệm lúa

và cải thìa. Ngoài ra, tương quan đa biến được áp dụng để xác định các tính chất đất ảnh hưởng đến sinh trưởng lúa hoặc cải thìa. Phương pháp Stepwise Backward Elimination xác định mô hình đa biến ý nghĩa thống kê, qua đó tính phần trăm đóng góp của các biến độc lập (tính chất đất) vào biến thiên của biến phụ thuộc (sinh trưởng lúa hoặc cải thìa).

* Nội dung 4: Đề xuất các giải pháp cải tạo và sử dụng đất phèn nhiễm mặn

Ứng dụng ma trận SWOT vào phân tích và đánh giá tiềm năng cải tạo đất phèn nhiễm mặn bằng vật liệu thân thiện môi trường (than trấu, vôi và phân bò) với Strengths (S) - Điểm mạnh, Weaknesses (W) - Điểm yếu, Opportunities (O) - Cơ hội và Threats (T) - Thách thức khi ứng dụng các loại vật liệu này nhằm cải tạo đất phèn nhiễm mặn trong bối cảnh biến đổi khí hậu. Với mục tiêu thân tích toàn diện các yếu tố nội tại và bên ngoài ảnh hưởng đến khả năng cải tạo đất phèn nhiễm mặn; Xác định các chiến lược tối ưu hóa điểm mạnh, giảm thiểu điểm yếu, tận dụng cơ hội và hạn chế rủi ro; Hỗ trợ đưa ra các giải pháp cải tạo đất phù hợp với điều kiện biến đổi khí hậu. Kết quả đạt được là đánh giá được tiềm năng cải tạo đất phèn nhiễm mặn bằng vật liệu thân thiện môi trường và đề xuất giải pháp cải tạo và sử dụng loại đất này.

CHƯƠNG 3 KẾT QUẢ NGHIÊN CỨU VÀ THẢO LUẬN

3.1 Nội dung 1: Khảo sát hiện trạng và hiệu quả sử dụng các loại hình sử dụng đất phèn nhiễm mặn phục vụ cho mục đích sản xuất nông nghiệp tại Cần Giờ (cũ) và Gò Công Đông (cũ) và đánh giá các đặc tính hóa học của chúng

3.1.1 Hiện trạng và hiệu quả sử dụng các loại hình sử dụng đất phèn nhiễm mặn phục vụ cho mục đích sản xuất nông nghiệp tại Cần Giờ (cũ) và Gò Công Đông (cũ)

Bảng 3.1 trình bày hiện trạng và hiệu quả sử dụng đất của các loại hình sử dụng đất canh tác phổ biến trong khu vực khảo sát, cụ thể: Cần Giờ (cũ) có 4 mô hình canh tác gồm lúa mùa, lúa-tôm, tôm và xoài; Gò Công Đông (cũ) có 3 mô hình canh tác gồm lúa, rau màu và cây trồng khác.

Huyện Cần Giờ (cũ) có 66% diện tích đất tự nhiên là đất nông nghiệp (46.586 ha), phần lớn bị nhiễm mặn và phèn, đặc biệt ở ven biển. Kết quả cho thấy hệ canh tác lúa chiếm diện tích lớn nhất (61,39 ha) với năng suất = 4,64 tấn/ha và lợi nhuận trung bình 21.653.333 VNĐ/ha/năm. Mô hình lúa-tôm (20,59 ha) duy trì năng suất lúa tương đương (lúa thành phần = 4,91 tấn/ha) nhưng cho hiệu quả kinh tế cao nhất do đóng góp từ phần tôm (doanh thu tổng và lợi nhuận của mô hình đều cao hơn so với các mô hình còn lại), với hiệu quả kinh tế 99.691.297 VNĐ/ha/năm. Mô hình tôm đơn thuần (20 ha) có chi phí vật chất và chi phí lao động cao hơn nhưng vẫn đem lại lợi nhuận đáng kể (65.967.500 VNĐ/ha/năm), trong khi xoài (20 ha) cho năng suất/ha thấp hơn so với các mô hình trên (năng suất = 0,75 tấn/ha) và lợi nhuận thấp nhất trong các mô hình (6.820.000 VNĐ/ha/năm) với lý do cây mới được trồng vài năm gần đây trên đất phèn nhiễm mặn, còn ở giai đoạn kiến thiết cơ bản nên năng suất thấp; số liệu phản ánh đúng hiện trạng sản xuất tại thời điểm khảo sát, không phải năng suất tiềm năng tại Cần Giờ (cũ). Như vậy, về mặt kinh tế tại Cần Giờ (cũ): lúa-tôm > tôm > lúa mùa > xoài, trong khi về diện tích trồng lúa vẫn là chiếm ưu thế, điều này có thể phản ánh sự cân bằng giữa rủi ro đầu tư cao của nuôi tôm và tính ổn định, quy mô lớn của sản xuất lúa.

Bảng 3.1 Hiện trạng và hiệu quả của các loại hình sử dụng đất canh tác phổ biến trên đất phèn nhiễm mặn tại Cần Giờ (cũ) và Gò Công Đông (cũ)

Huyện Cần Giờ (cũ), Thành phố Hồ Chí Minh					
		Lúa mùa	Lúa-tôm	Tôm	Xoài
Thông tin chung	Tổng diện tích *(ha)*	61,39	20,59	20	20
	Tổng sản lượng *(tấn/tổng diện tích)*	285	Lúa: 101 Tôm: 16	16	15
	Năng suất *(tấn/ha/năm)*	4,64	Lúa: 4,91 Tôm: 0,78	0,78	0,75
Chi phí vật chất	Giống *(VNĐ/ha/năm)*	4.330.667	Lúa: 7.901.894 Tôm: 9.883.439	69.500.000	9.245.000
	Phân hữu cơ/Vôi *(VNĐ/ha/năm)*	3.608.889	7.684.080		
Chi phí thuê công lao động *(VNĐ/ha/năm)*		1.909.753	41.408.451	1.728.000	11.160.000
Giá tổng sản phẩm thu được *(VNĐ/ha/năm)*		31.502.642	Lúa: 26.827.052 Tôm: 139.742.108	152.747.500	27.225.000
Hiệu quả kinh tế *(VNĐ/ha/năm)*		21.653.333	99.691.297	65.967.500	6.820.000
Huyện Gò Công Đông, Tỉnh Tiền Giang (cũ)					
			Lúa	Rau màu	Cây trồng khác
Thông tin chung	Tổng diện tích *(ha)*		58,91	21,36	5,66
	Tổng sản lượng *(tấn/tổng diện tích)*		372	256	176
	Năng suất *(tấn/ha)*		6,31	11,99	31,09
Chi phí vật chất	Giống *(VNĐ/ha/năm)*		7.577.661	10.173.689	27.756.184
	Phân hữu cơ/Vôi *(VNĐ/ha/năm)*		6.314.717	5.359.176	18.139.576
Chi phí thuê công lao động *(VNĐ/ha/năm)*			5.051.774	17.869.850	15.547.703
Giá tổng sản phẩm thu được *(VNĐ/ha/năm)*			56.832.456	88.503.277	546.355.300
Hiệu quả kinh tế *(VNĐ/ha/năm)*			37.888.304	55.100.562	484.911.837

** Ghi chú:*

Năng suất = Tổng sản lượng ÷ Tổng diện tích

Giá tổng sản phẩm = Tổng lượng sản phẩm × Giá sản phẩm

Hiệu quả kinh tế = Giá tổng sản phẩm – Chi phí vật chất – Chi phí thuê công lao động

Tại huyện Gò Công Đông (cũ), phần lớn đất nông nghiệp được sử dụng trồng lúa (58,91 ha) nhưng năng suất và hiệu quả trên từng ha cao hơn so với Cần Giờ (cũ) năng suất lúa = 6,31 tấn/ha và lợi nhuận 37.888.304 VNĐ/ha/năm. Rau màu (21,36 ha) đạt năng suất cao hơn (11,99 tấn/ha) và lợi nhuận trung bình 55.100.562 VNĐ/ha/năm, phản ánh cường độ canh tác và giá trị thu hoạch trên diện tích nhỏ hơn. Nhóm cây trồng khác (5,66 ha) có năng suất lớn (31,09 tấn/ha) và đem lại doanh thu và lợi nhuận vượt trội hơn 2 mô hình còn lại (hiệu quả = 484.911.837 VNĐ/ha/năm), cho thấy ưu thế rõ rệt của các cây trồng giá trị cao trong hệ canh tác địa phương. Hiệu quả kinh tế vượt trội của cây trồng khác bắt nguồn từ giá bán trên đơn vị sản phẩm cao, cường độ canh tác và chu kỳ thu hoạch dày hơn và tiềm năng tham gia chuỗi giá trị nên doanh thu lớn hơn mặc dù diện tích nhỏ; ở Gò Công Đông (cũ), những loại cây điển hình mang lại giá trị này gồm thanh long, sơ ri và rau màu chất lượng cao, những loại này cho doanh thu trên diện tích rõ rệt so với lúa hoặc rau màu. Như vậy, tại Gò Công Đông (cũ) thứ tự hiệu quả kinh tế là cây trồng khác > rau màu > lúa, phản ánh xu hướng chuyển dịch sang các cây trồng khác như cây ăn trái hoặc rau màu.

Tóm lại, sự khác biệt rõ rệt về mô hình canh tác và hiệu quả kinh tế giữa các hệ lúa, lúa-tôm, tôm và cây ăn quả hoặc rau màu tại đã phản ánh mỗi vùng có thể chịu tác động bởi điều kiện mặn-phèn, áp lực quản lý nước và bón phân rất khác nhau. Để Cần Giờ (cũ) tiếp tục duy trì trồng lúa và cải thiện năng suất thì việc cải thiện chất lượng đất phèn nhiễm mặn là biện pháp cần thiết. Mặt khác, cây ăn trái hoặc rau màu tại Gò Công Đông (cũ) có thể là mô hình tốt hơn so với lúa. Bên cạnh đó, một trong những biện pháp cải tạo đất phèn nhiễm mặn như sử dụng than trấu, vôi và phân bò kết hợp với các chế độ nước hợp lý làm tăng chất lượng đất và năng suất cây trồng được tốt hơn.

3.1.2 Đánh giá các đặc tính hóa học của đất phèn nhiễm mặn tại Cần Giờ (cũ)

3.1.2.1 Các đặc tính hóa học của đất phèn nhiễm mặn tại Cần Giờ (cũ)

Tính axit (pH, SO_4^{2-}, độ chua trao đổi và H^+ trao đổi) của đất phèn nhiễm mặn tại hai tầng đất ứng với 5 loại hình sử dụng đất được trình bày tại Bảng 3.2.

Bảng 3.2 Đặc tính đất phèn nhiễm mặn thể hiện tính axit trên các loại hình sử dụng đất khác nhau - Cần Giờ cũ (tháng 7,8 năm 2022)

Loại hình sử dụng	Tính axit			
	pH	SO_4^{2-} (g/kg)	Độ chua trao đổi (cmol(+)/kg)	H^+ trao đổi (cmol(+)/kg)
Tầng đất 0-30 cm				
HNK	$4,50^{a} \pm 0,27$	$0,98^{b} \pm 0,13$	$3,73^{ab} \pm 0,43$	$2,29^{b} \pm 0,29$
CLN	$4,69^{a} \pm 0,23$	$0,96^{b} \pm 0,20$	$3,75^{ab} \pm 0,40$	$1,91^{b} \pm 0,23$
LUA	$4,05^{b} \pm 0,33$	$0,94^{b} \pm 0,14$	$3,60^{ab} \pm 0,45$	$2,25^{b} \pm 0,33$
NTS	$4,95^{a} \pm 0,35$	$1,25^{a} \pm 0,20$	$3,37^{b} \pm 0,35$	$2,26^{b} \pm 0,21$
TN	$4,68^{a} \pm 0,34$	$1,27^{a} \pm 0,20$	$4,33^{a} \pm 0,71$	$2,99^{a} \pm 0,44$
Tầng đất 30-60 cm				
HNK	$4,79^{ab} \pm 0,29$	$1,25^{a} \pm 0,18$	$3,14^{b} \pm 0,29$	$2,11^{ab} \pm 0,30$
CLN	$4,96^{a} \pm 0,26$	$1,27^{a} \pm 0,25$	$3,23^{b} \pm 0,41$	$1,64^{b} \pm 0,23$
LUA	$4,63^{ab} \pm 0,25$	$1,11^{a} \pm 0,13$	$3,26^{b} \pm 0,46$	$1,84^{ab} \pm 0,22$
NTS	$4,81^{ab} \pm 0,34$	$1,26^{a} \pm 0,20$	$3,45^{b} \pm 0,31$	$2,65^{a} \pm 0,80$
TN	$4,77^{b} \pm 0,46$	$1,30^{a} \pm 0,21$	$4,21^{a} \pm 0,71$	$2,72^{a} \pm 0,49$

Ghi chú: HNK - Đất trồng cây hằng năm khác, CLN - Đất trồng cây lâu năm, LUA - Đất trồng lúa, NTS - Đất nuôi trồng thủy sản, TN - Đất tự nhiên.

Ở tầng 0-30 cm, pH dao động từ 4,05 đến 4,95, trong đó LUA có pH thấp nhất (4,05), biểu thị tính axit cao nhất. Ở tầng 30-60 cm, pH dao động từ 4,63 đến 4,96, với CLN có pH cao nhất (4,96) và TN thấp nhất (4,77), có ý nghĩa thống kê. Nồng độ SO_4^{2-} ở tầng 0-30 cm cao nhất ở TN (1,27 g/kg), thấp nhất ở LUA (0,94 g/kg). Tầng 30-60 cm có SO_4^{2-} ít chênh lệch hơn và không có ý nghĩa thống kê. Độ chua trao đổi ở tầng 0-30 cm cao nhất ở TN (4,33 cmol(+)/kg), cho thấy khả năng trao đổi cation axit cao, do tích tụ nhôm và H^+ trao đổi. Ở tầng 30-60 cm, TN có độ chua trao đổi cao nhất (4,21 cmol(+)/kg), trong khi HNK thấp nhất (3,14 cmol(+)/kg). H^+ trao đổi ở tầng 0-30 cm cao nhất ở TN (2,99 cmol(+)/kg) có ý nghĩa thống kê và phản ánh độ axit mạnh, trong khi các loại hình khác thấp hơn. Như vậy, TN có độ chua trao đổi và H^+

trao đổi cao nhất ở cả hai tầng, thể hiện tính axit mạnh và khả năng trao đổi ion cao. LUA có tính axit mạnh nhất ở tầng 0-30 cm, với pH thấp nhất (4,05), cần chú trọng cải tạo để trung hòa độ chua. Kết quả này thể hiện sự khác biệt về tính axit giữa các loại hình sử dụng, phản ánh tác động của việc sử dụng đất tại Cần Giờ (cũ).

Tính mặn (EC, Cl^-, Na trao đổi) và độc (Al, Fe, Mn trao đổi) của đất phèn nhiễm mặn tại 5 loại hình sử dụng đất cho thấy sự khác biệt theo tầng đất và loại hình (Bảng 3.3).

Bảng 3.3 Đặc tính đất phèn nhiễm mặn thể hiện tính mặn và tính độc trên các loại hình sử dụng đất khác nhau - Cần Giờ cũ (tháng 7,8 năm 2022)

Loại hình sử dụng	Tính mặn			Tính độc		
	EC (dS/m)	Cl^- (g/kg)	Na trao đổi (mg/kg)	Al trao đổi (mg/kg)	Fe trao đổi (mg/kg)	Mn trao đổi (mg/kg)
Tầng đất 0-30 cm						
HNK	$5,10^{b}$ ± 1,26	$1,83^{ab}$ ± 0,19	$2.649,27^{c}$ ± 814,57	$228,24^{b}$ ± 87,88	$304,69^{b}$ ± 189,87	$32,19^{ab}$ ± 7,96
CLN	$5,27^{b}$ ± 1,15	$1,84^{ab}$ ± 0,14	3.670^{bc} ± 984,51	$143,81^{b}$ ± 53,34	$366,60^{b}$ ± 200,36	$41,60^{a}$ ± 9,65
LUA	$6,35^{a}$ ± 1,75	$1,96^{a}$ ± 0,23	3.808^{bc} ± 552,99	$341,82^{a}$ ± 121,39	$578,48^{a}$ ± 232,44	$32,02^{ab}$ ± 3,23
NTS	$7,12^{a}$ ± 1,29	$1,87^{ab}$ ± 0,33	4.060^{b} ± 886,38	$164,32^{b}$ ± 39,24	$265,56^{b}$ ± 138,12	$27,38^{b}$ ± 3,67
TN	$7,02^{a}$ ± 1,18	$1,68^{b}$ ± 0,18	5.368^{a} ± 1.174	$181,93^{b}$ ± 42,33	$377,78^{ab}$ ± 185,91	$29,77^{b}$ ± 5,74
Tầng đất 30-60 cm						
HNK	$5,82^{b}$ ± 1,46	$2,20^{a}$ ± 0,23	3.116^{b} ± 1.296	$157,57^{a}$ ± 64,00	$304,19^{ab}$ ± 120,06	$27,77^{b}$ ± 3,49
CLN	$6,12^{b}$ ± 1,44	$2,17^{a}$ ± 0,18	2.794^{b} ± 652,61	$86,16^{a}$ ± 28,19	$189,31^{b}$ ± 78,85	$38,51^{a}$ ± 9,19
LUA	$5,56^{b}$ ± 1,43	$1,64^{b}$ ± 0,20	4.519^{ab} ± 1.466	$142,54^{a}$ ± 52,05	$349,81^{a}$ ± 137,73	$30,67^{b}$ ± 3,64
NTS	$7,12^{a}$ ± 1,27	$1,78^{b}$ ± 0,19	5.226^{a} ± 1.367	$153,81^{a}$ ± 52,85	$326,13^{a}$ ± 92,08	$28,72^{ab}$ ± 4,16
TN	$7,26^{a}$ ± 1,40	$1,82^{b}$ ± 0,22	6.403^{a} ± 1.410	$175,98^{a}$ ± 57,50	$319,23^{a}$ ± 94,98	$28,42^{b}$ ± 4,53

Ghi chú: HNK - Đất trồng cây hằng năm khác, CLN - Đất trồng cây lâu năm, LUA - Đất trồng lúa, NTS - Đất nuôi trồng thủy sản, TN - Đất tự nhiên.

EC cao nhất ở tầng 0-30 cm thuộc NTS (7,12 dS/m) và TN (7,02 dS/m), tiếp tục tăng ở tầng 30-60 cm (TN: 7,26 dS/m), khác biệt có ý nghĩa thống kê so với LUA, CLN,

HNK. Na trao đổi cũng cao nhất ở TN và NTS, phản ánh sự tích tụ muối lớn. Cl^- cao nhất ở LUA tầng 0-30 cm (1,9 g/kg), nhưng ở tầng sâu (30-60 cm) lại tập trung tại HNK và CLN. Về tính độc, LUA có Al (341,82 mg/kg) và Fe (578,48 mg/kg) cao nhất ở tầng nông, khác biệt có ý nghĩa thống kê so với các loại hình còn lại, điều này ảnh hưởng xấu đến cây trồng trong khi Mn trao đổi cao nhất ở CLN. NTS và TN có tính mặn nổi bật, còn LUA chịu ảnh hưởng mạnh từ kim loại nặng. Điều này nhấn mạnh nhu cầu cải tạo đất phù hợp để nâng cao hiệu quả sản xuất.

Tính dinh dưỡng (CEC, NH_4^+, Mehlich-1 P, OC, K, Ca, Mg trao đổi) ở hai tầng đất của 5 loại hình sử dụng đất được thể hiện tại Bảng 3.4.

Bảng 3.4 Đặc tính đất phèn nhiễm mặn thể hiện tính dinh dưỡng trên các loại hình sử dụng đất khác nhau - Cần Giờ cũ (tháng 7,8 năm 2022)

Loại hình sử dụng	**Tính dinh dưỡng**						
	CEC (cmol(+)/kg)	**NH_4^+ (mg/kg)**	**Mehlich-1 P (mg/kg)**	**OC (%)**	**K trao đổi (mg/kg)**	**Ca trao đổi (mg/kg)**	**Mg trao đổi (mg/kg)**
Tầng đất 0-30 cm							
HNK	$12,42^{b}$ ± 0,44	$103,34^{c}$ ± 7,63	$8,28^{b}$ ± 0,98	$5,07^{bc}$ ± 0,13	$613,62^{a}$ ± 131,52	$522,27^{a}$ ± 102,20	$891,32^{a}$ ± 183,80
CLN	$13,43^{b}$ ± 0,76	$114,18^{bc}$ ± 8,80	$9,16^{ab}$ ± 1,11	$4,87^{cd}$ ± 0,22	$588,85^{a}$ ± 136,71	$570,37^{a}$ ± 147,34	$930,72^{a}$ ± 200,59
LUA	$13,00^{b}$ ± 0,57	$123,63^{b}$ ± 11,11	$8,35^{b}$ ± 1,44	$4,62^{d}$ ± 0,29	$625,37^{a}$ ± 152,24	$458,02^{a}$ ± 51,25	$859,49^{a}$ ± 148,62
NTS	$12,97^{a}$ ± 1,58	$140,71^{a}$ ±10,06	$10,17^{a}$ ± 1,55	$5,85^{a}$ ± 0,15	$616,24^{a}$ ± 122,13	$484,81^{a}$ ± 68,64	$790,59^{a}$ ± 148,64
TN	$12,80^{a}$ ± 1,83	$124,87^{b}$ ± 4,78	$10,20^{a}$ ± 1,54	$5,27^{b}$ ± 0,10	$579,49^{a}$ ± 144,91	$489,56^{a}$ ± 123,11	$858,13^{a}$ ± 148,78
Tầng đất 30-60 cm							
HNK	$13,82^{b}$ ± 0,66	$139,14^{a}$ ± 13,88	$7,22^{c}$ ± 1,00	$5,43^{a}$ ± 0,21	$597,93^{a}$ ± 170,72	$545,93^{a}$ ± 118,99	$932,15^{a}$ ± 143,64
CLN	$15,50^{a}$ ± 0,68	$137,78^{a}$ ± 7,75	$7,53^{c}$ ± 1,11	$5,33^{a}$ ± 0,26	$563,90^{a}$ ± 149,60	$486,50^{a}$ ± 41,20	$796,61^{a}$ ± 116,38
LUA	$14,54^{ab}$ ± 0,66	$105,75^{b}$ ± 7,82	$6,96^{c}$ ± 1,30	$5,21^{a}$ ± 0,23	$676,65^{a}$ ± 166,71	$489,04^{a}$ ± 48,70	$915,65^{a}$ ± 150,00
NTS	$12,68^{b}$ ± 1,52	$134,19^{a}$ ± 13,69	$9,53^{b}$ ± 1,10	$5,34^{a}$ ± 0,22	$581,95^{a}$ ± 134,74	$457,36^{a}$ ± 48,30	$783,73^{a}$ ± 106,14
TN	$13,56^{ab}$ ± 1,09	$124,52^{a}$ ± 8,60	$10,95^{a}$ ± 1,99	$5,35^{a}$ ± 0,14	$516,96^{a}$ ± 186,95	$469,27^{a}$ ± 57,66	$889,30^{a}$ ± 92,66

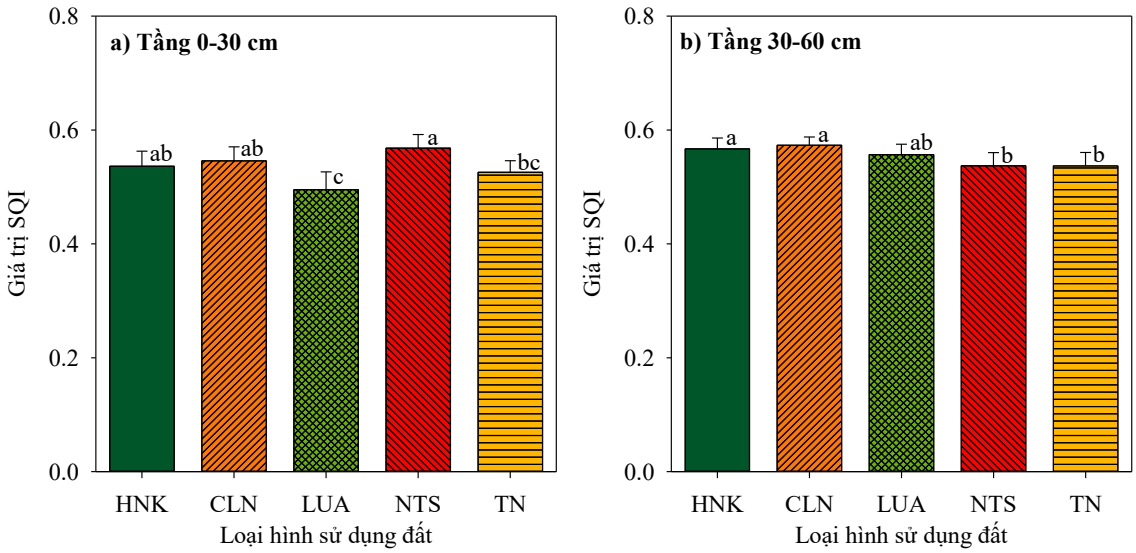
Ghi chú: HNK - Đất trồng cây hằng năm khác, CLN - Đất trồng cây lâu năm, LUA - Đất trồng lúa, NTS - Đất nuôi trồng thủy sản, TN - Đất tự nhiên.

Ở tầng 0-30 cm, CLN có CEC cao nhất (13,43 cmol(+)/kg), tiếp tục dẫn đầu ở tầng 30-60 cm (15,50 cmol(+)/kg) và đều khác biệt có ý nghĩa thống kê. NH_4^+ tại tầng 0-30 cm cao nhất ở NTS (140,71 mg/kg), thấp nhất ở HNK (103,34 mg/kg); tầng sâu LUA thấp nhất (105,75 mg/kg), khác biệt có ý nghĩa thống kê so với các loại hình còn lại. Mehlich-1 P cao nhất ở TN tại cả hai tầng, trong khi thấp nhất vẫn là LUA và đều khác biệt có ý nghĩa thống kê. OC tại tầng 0-30 cm cao nhất ở NTS (5,85%), thấp nhất ở LUA (4,62%). Tóm lại, CLN có khả năng trao đổi dinh dưỡng tốt nhất (CEC cao), NTS giàu NH_4^+, P, OC nhưng CEC thấp hơn. LUA nổi bật về kém NH_4^+, Mehlich-1 P và OC, còn TN giàu P và OC. Các loại đất tại Cần Giờ (cũ) có tiềm năng dinh dưỡng khác nhau phù hợp với các mục đích sử dụng khác nhau, riêng LUA cần được cải tạo và bổ sung dinh dưỡng cả tầng nông và tầng sâu.

3.1.2.2 Các chỉ số chất lượng đất theo tầng ứng với loại hình sử dụng đất

* Chỉ số chất lượng đất (SQI) tổng thể

PCA/FA được phân tích từ các đặc tính đất của 5 loại hình sử dụng khác nhau, phản ánh ảnh hưởng dài hạn của các yếu tố môi trường, canh tác và quản lý đất. Từ đó phân tích 17 thông số đất phèn nhiễm mặn, chia thành 4 nhân tố, giải thích 59,28% tổng phương sai (Phụ bảng 2.1 - Phụ lục 2) gồm nhân tố 1 (Mg, Fe, Ca trao đổi, CEC, pH; 26,51%), nhân tố 2 (Mn trao đổi, OC, EC, NH_4^+, SO_4^{2-}, Cl^-; 11,85%), nhân tố 3 (độ chua trao đổi, P, H^+ trao đổi; 11,54%), nhân tố 4 (Al, K, Na trao đổi; 9,38%).



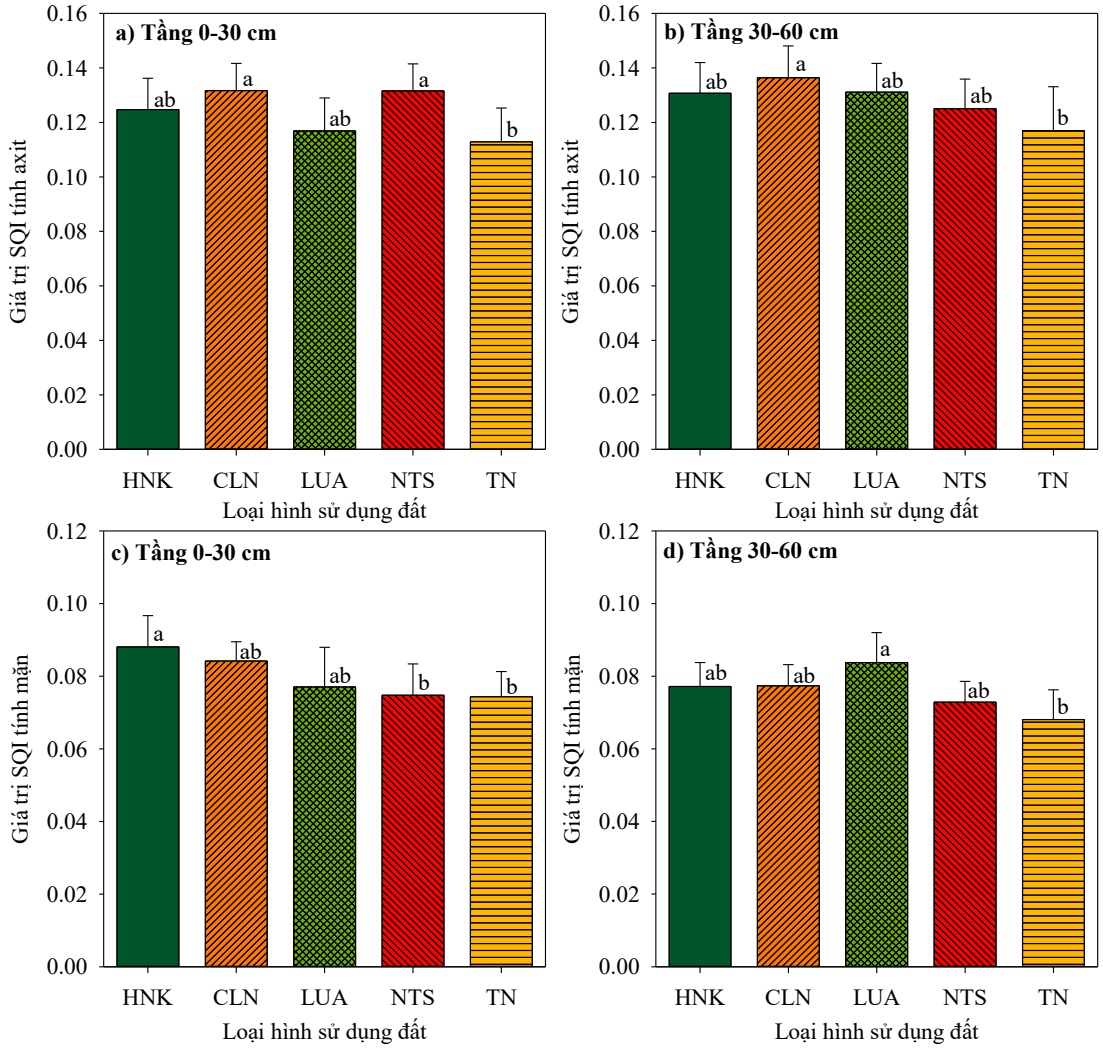
Hình 3.1 SQI tổng thể tầng 0-30 cm (a) và 30-60 cm (b) của 5 loại hình sử dụng đất - Cần Giờ cũ (tháng 7,8 năm 2022)

Ghi chú: HNK - Đất trồng cây hằng năm khác, CLN - Đất trồng cây lâu năm, LUA - Đất trồng lúa, NTS - Đất nuôi trồng thủy sản, TN - Đất tự nhiên.

SQI đã được tính toán cho cả hai tầng đất theo kết quả PCA/FA (Hình 3.1). Ở tầng 0-30 cm, NTS có SQI cao nhất (0,57), vượt trội hơn các loại đất khác, SQI của các loại hình sử dụng đất đều khác biệt có ý nghĩa thống kê. Ở tầng 30-60 cm, SQI của HNK và CLN cao nhất (0,57), cao hơn các loại đất còn lại và khác biệt có ý nghĩa thống kê nhưng chênh lệch không lớn, cho thấy tầng sâu ít chịu tác động từ yếu tố bên ngoài.

* Các chỉ số chất lượng đất thành phần

Chất lượng đất phèn nhiễm mặn đã được chia thành 4 nhóm khác nhau, bao gồm nhóm tính chất liên quan đến tính axit, tính mặn, tính độc và tính dinh dưỡng của đất. Chất lượng thành phần của bốn nhóm tính chất này được trình bày ở Hình 3.2 và 3.3.

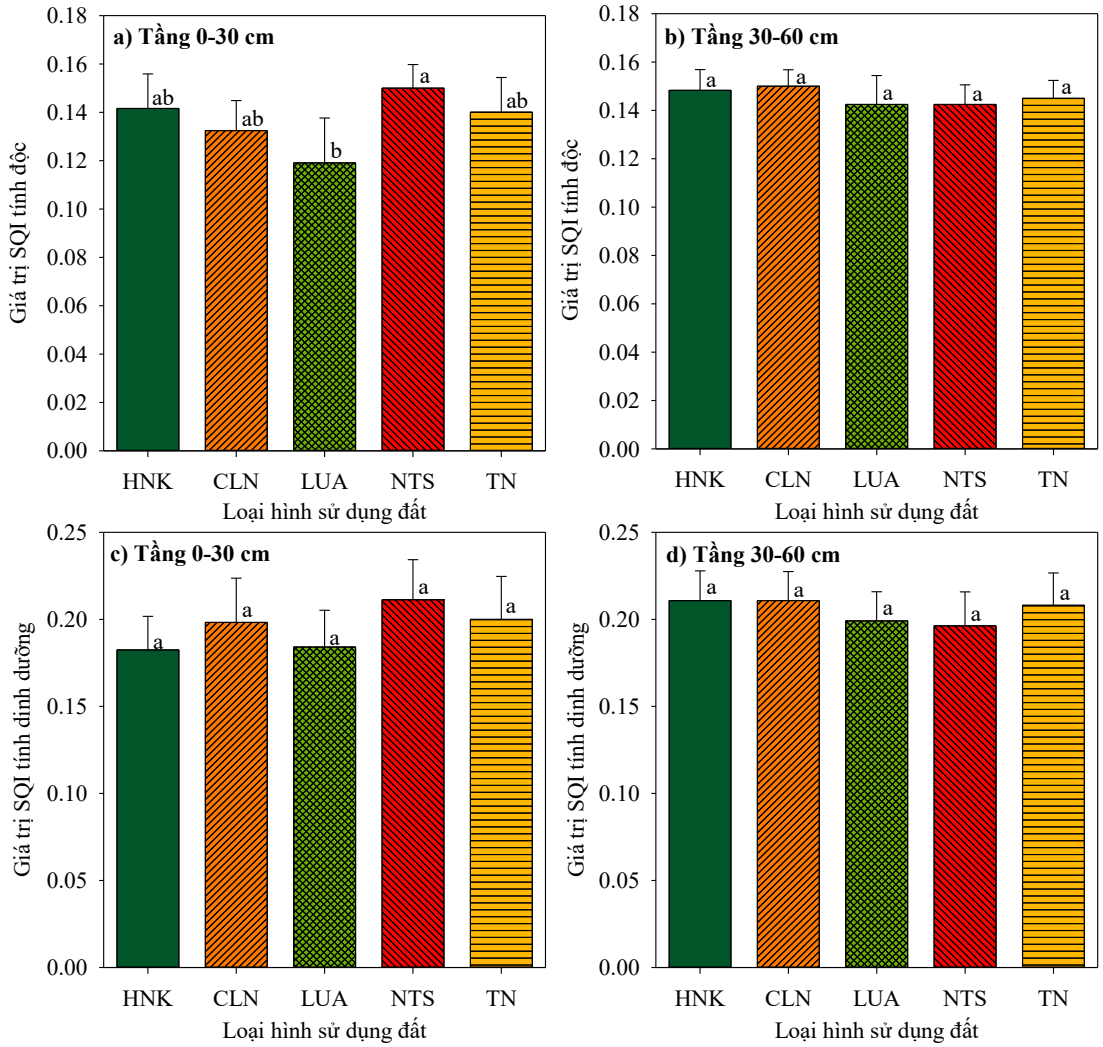


Hình 3.2 SQI tính axit tầng 0-30 cm (a) và 30-60 cm (b), tính mặn tầng 0-30 cm (c) và 30-60 cm (d) của 5 loại hình sử dụng đất - Cần Giờ cũ (tháng 7,8 năm 2022)

Ghi chú: HNK - Đất trồng cây hằng năm khác, CLN - Đất trồng cây lâu năm, LUA - Đất trồng lúa, NTS - Đất nuôi trồng thủy sản, TN - Đất tự nhiên.

Hình 3.2 cho thấy SQI tính axit và tính mặn theo 5 loại hình sử dụng đất ở hai độ sâu 0-30 và 30-60 cm khác biệt có ý nghĩa thống kê (ANOVA-Tukey, $p < 0,05$). Ở tầng mặt, SQI tính axit cao nhất ở NTS và CLN, trung gian ở HNK và LUA, thấp hơn ở TN (Hình 3.2a). Trong khi SQI tính mặn lại cao nhất ở HNK, trung gian CLN, LUA và thấp ở NTS, TN (Hình 3.2c). Ở tầng sâu, HNK, CLN, LUA, NTS đều có SQI tính axit cao hơn TN (Hình 3.2b), gợi ý rủi ro axit hóa dưới bề mặt do biểu hiện sulfur ở

TN. Đồng thời SQI tính mặn tăng mạnh trong LUA và thấp nhất ở TN (Hình 3.2d), cho thấy xu hướng tích lũy muối ở tầng dưới chế độ ruộng trồng lúa ngập nước.



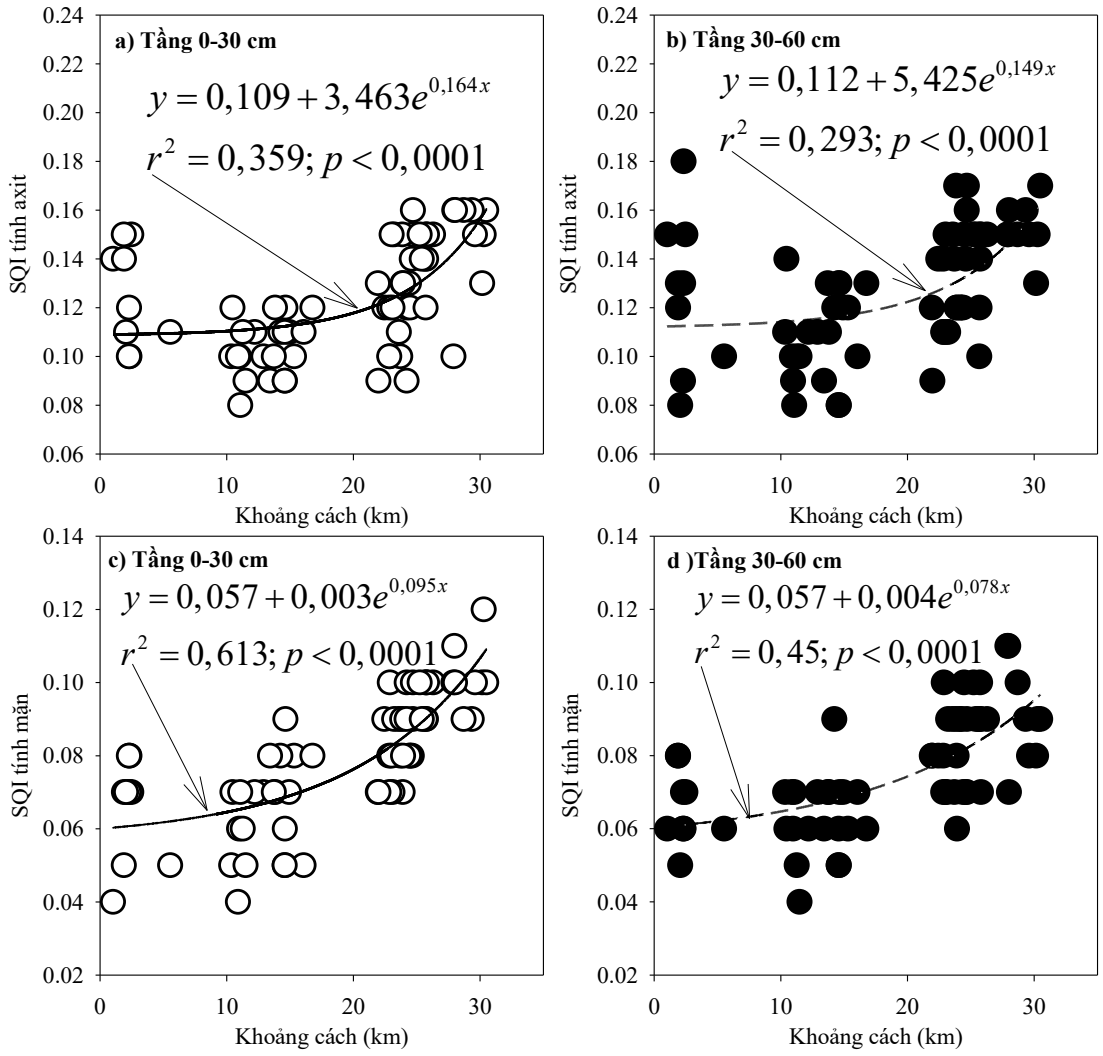
Hình 3.3 SQI tính độc tầng 0-30 cm (a) và 30-60 cm (b), dinh dưỡng tầng 0-30 cm (c) và 30-60 cm (d) của 5 loại hình sử dụng đất - Cần Giờ cũ (tháng 7,8 năm 2022)

Ghi chú: HNK - Đất trồng cây hằng năm khác, CLN - Đất trồng cây lâu năm, LUA - Đất trồng lúa, NTS - Đất nuôi trồng thủy sản, TN - Đất tự nhiên.

Hình 3.3 cho thấy SQI tính độc thể hiện rõ rệt, thấp nhất ở LUA, tầng 0-30 cm (Hình 3.3a). SQI tính độc ở tầng 30-60 cm không có sự khác biệt có ý nghĩa thống kê giữa các loại hình sử dụng đất (Hình 3.3b). SQI dinh dưỡng tại tầng 0-30 cm (Hình 3.3c) và 30-60 cm (Hình 3.3d) khác biệt không có ý nghĩa thống kê giữa các loại hình.

3.1.3 Chỉ số chất lượng đất thành phần theo không gian xâm nhập mặn

Khảo sát mối liên hệ giữa các SQI thành phần với khoảng cách (km) tính từ bờ biển vào đất liền nhằm đánh giá mức độ ảnh hưởng của xâm nhập mặn do biến đổi khí hậu đến chất lượng đất tại khu vực nghiên cứu. Mối tương quan giữa bốn chỉ số SQI thành phần với khoảng cách được thể hiện ở Hình 3.4 và Hình 3.5. Vì số liệu đã được chuẩn hóa trước khi dùng để tính SQI thành phần nên SQI càng cao thì đất càng tốt.



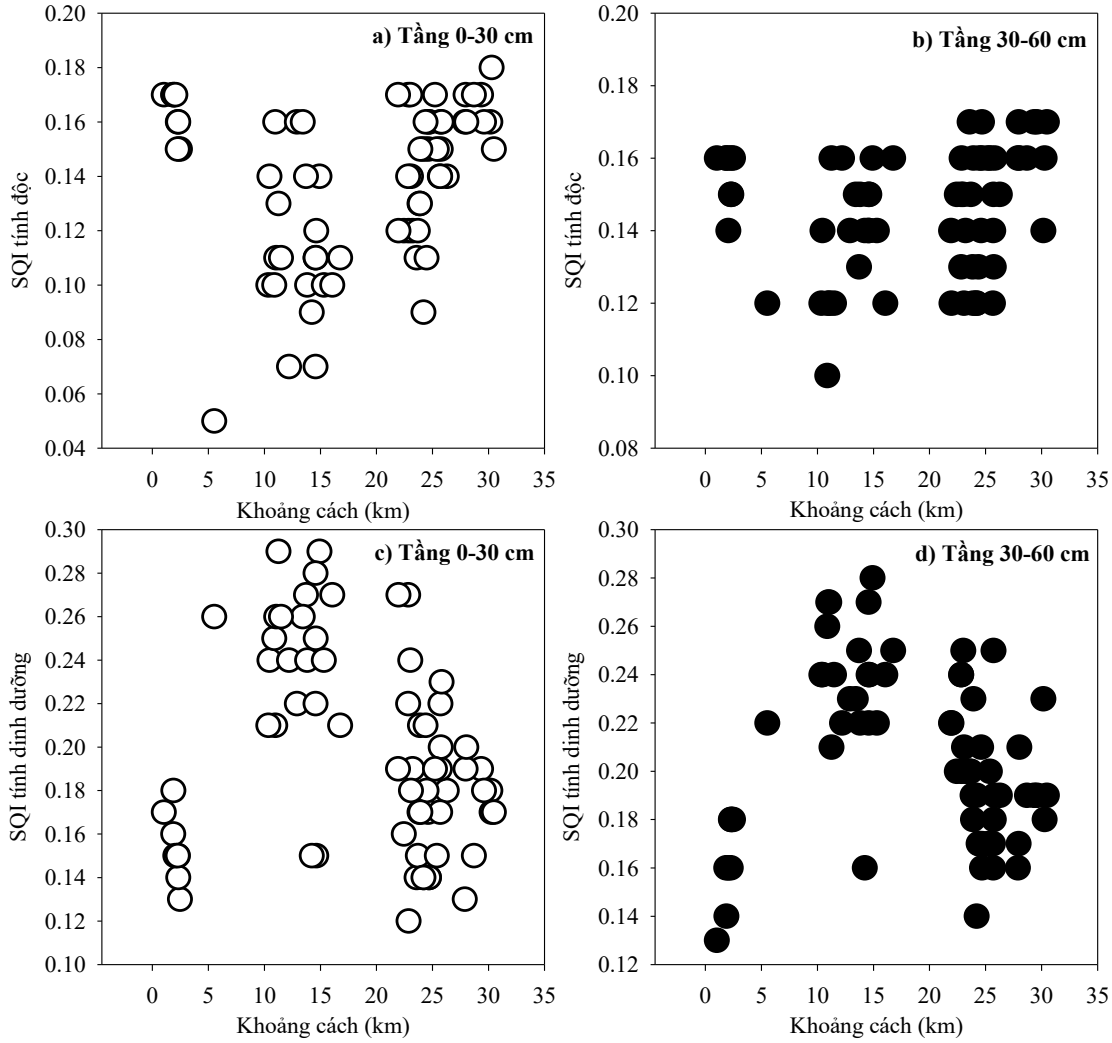
Hình 3.4 Mối tương quan giữa SQI tính axit tầng 0-30 cm (a) và 30-60 cm (b), tính mặn tầng 0-30 cm (c) và 30-60 cm (d) với khoảng cách tính từ bờ biển vào đất liền

Ở khu vực ven biển, nước biển mang theo nồng độ muối cao, đặc biệt là ion Cl^- và Na^+. Các ion này có khả năng thay thế các ion kiềm yếu (Ca^{2+}, Mg^{2+}) trên keo đất,

làm mất cân bằng hóa học, dẫn đến sự phóng thích H^+ trao đổi, gây axit hóa đất. Điều này giải thích tại sao vùng gần bờ biển (<20 km) có giá trị SQI tính axit thấp và gần như ổn định, nhưng khi càng đi sâu vào đất liền (>20 km), mức độ axit hóa tăng nhanh (tầng 0-30 cm, Hình 3.4a). Ở tầng 30-60 cm, nước mặn thấm sâu hơn qua quá trình mao dẫn và thẩm thấu. Sự kết hợp giữa nồng độ muối cao và tính axit tự nhiên của đất phèn đã khuếch đại tác động xấu, thể hiện qua giá trị SQI tính mặn tầng sâu tăng nhanh. Trong khoảng cách dưới 20 km từ bờ biển, SQI tính axit duy trì ở mức thấp và thay đổi chậm, phản ánh đặc điểm của vùng đất bị ảnh hưởng mạnh bởi xâm nhập mặn và sự tích lũy axit do đặc tính tự nhiên của đất. Khi vượt qua ngưỡng 20 km, SQI tính axit tăng nhanh chóng ở cả tầng 0-30 cm (Hình 3.4a) và tầng 30-60 cm (Hình 3.4b). Sự gia tăng này cho thấy tính axit không chỉ gắn liền với vùng ven biển mà còn lan truyền dần vào sâu trong đất liền, do nước biển thấm sâu qua các tầng đất. Điều này là dấu hiệu rõ ràng về tác động dài hạn của quá trình xâm nhập mặn trong điều kiện biến đổi khí hậu. Tương tự, SQI tính mặn trong khoảng cách dưới 20 km từ bờ biển cũng thấp và thay đổi chậm (Hình 3.4 c,d). Đây là khu vực chịu ảnh hưởng trực tiếp của nước biển và sự bốc hơi, dẫn đến tích tụ muối. Khi khoảng cách từ bờ biển vượt qua 20 km, SQI tính mặn tăng đáng kể, đặc biệt ở tầng 30-60 cm (Hình 3.4d). Điều này cho thấy sự thẩm thấu mặn không chỉ giới hạn ở tầng đất mặt mà còn có xu hướng lan rộng và tích lũy ở tầng đất sâu hơn, phản ánh mức độ nghiêm trọng của quá trình xâm nhập mặn do ảnh hưởng của biến đổi khí hậu.

Hình 3.5 mô tả sự biến động của SQI về tính độc và tính dinh dưỡng theo tầng đất (0-30 cm và 30-60 cm) dựa trên khoảng cách từ bờ biển vào đất liền. Ở tầng 0-30 cm (Hình 3.5a), SQI tính độc dao động trong khoảng từ 0,04-0,18. Các giá trị phân bố rải rác, không có xu hướng rõ ràng liên quan đến khoảng cách từ bờ biển; Tầng 30-60 cm (Hình 3.5b), SQI nằm trong khoảng 0,10-0,18, tương tự với tầng đất trên. Dữ liệu cũng không cho thấy mối tương quan với khoảng cách từ bờ biển. Tương tự, SQI tính dinh dưỡng ở tầng 0-30 cm (Hình 3.5c), SQI dinh dưỡng dao động trong khoảng 0,12-0,30, với sự phân bố không đồng đều, đặc biệt các giá trị cao tập trung tại khoảng cách 15-25 km; Ở tầng 30-60 cm (Hình 3.5d), SQI dinh dưỡng trong khoảng 0,12-

0,28, nhưng xu hướng cũng bất thường và không có sự phụ thuộc đáng kể vào khoảng cách. Từ kết quả Hình 3.5, chưa ghi nhận được mối liên hệ rõ ràng và không có ý nghĩa thống kê giữa chỉ số chất lượng đất (tính độc và dinh dưỡng) với khoảng cách từ bờ biển. Điều này có thể phản ánh bản chất phức tạp của xâm nhập mặn và các yếu tố môi trường trong khu vực.



Hình 3.5 Mối tương quan giữa SQI tính độc tầng 0-30 cm (a), 30-60 cm (b) và dinh dưỡng tầng 0-30 cm (c), 30-60 cm (d) với khoảng cách tính từ bờ biển vào đất liền

Mô hình thống kê đa biến đã được xây dựng để mô tả mối liên hệ giữa khoảng cách tính từ bờ biển vào đất liền với bốn chỉ số chất lượng đất thành phần ở 2 tầng đất ứng với 5 loại hình sử dụng đất được thể hiện ở Bảng 3.5.

Bảng 3.5 Kết quả phân tích tương quan đa biến và phần trăm giải thích tổng biến thiên của khoảng cách tính từ bờ biển vào đất liền với các chỉ số chất lượng đất thành phần ở 2 tầng đất - Cần Giờ cũ (tháng 7,8 năm 2022)

Khoảng cách	**< 20 km (Nhóm I)**			**> 20 km (Nhóm II)**		
Tầng đất	**Tầng 0-30 cm**			**Tầng 0-30 cm**		
Biến số	Tổng bình phương sai số dư	Giá trị xác suất	Phần trăm đóng góp (%)	Tổng bình phương sai số dư	Giá trị xác suất	Phần trăm đóng góp (%)
SQI tính axit	0,02	688,55	26,54*	0,02	399,45	15,24*
SQI tính mặn	0,00	46,13	1,78*	0,00	42,24	1,61*
SQI tính độc	0,01	197,23	7,60	0,01	127,46	4,86
SQI tính dinh dưỡng	0,05	1534,72	59,17	0,03	791,55	30,20
Sai số	0,00	-	0,96	0,00	-	1,26
Tổng biến thiên	0.08	-	-	0,11	-	-
	Tầng 30-60 cm			**Tầng 30-60 cm**		
SQI tính axit	0,02	641,72	27,31*	0,022	625,64	28,67*
SQI tính mặn	0,00	29,90	1,27*	0,001	34,28	1,57*
SQI tính độc	0,00	60,61	2,58	0,003	76,58	3,51
SQI tính dinh dưỡng	0,05	1247,73	53,10	0,019	538,53	24,68
Sai số	0,00	-	1,06	0,001	-	1,51
Tổng biến thiên	0,09	-	-	0,077	-	-

*Ghi chú: * là biến số quyết định từ phương pháp phân tích thống kê đa biến loại dần.*

Như vậy, các khoảng cách có liên hệ với chỉ số SQI tính axit và mặn theo mô hình hàm số mũ. Điều này cho thấy, khoảng cách càng gần biển (<20 km), đất càng mặn và càng chua ở cả 2 tầng đất; càng đi sâu vào đất liền (>20 km), đất có xu hướng giảm 2 tính này nhưng không đáng kể, đặc biệt trong bối cảnh khí hậu đang diễn ra cực kỳ phức tạp, đáng chú ý hơn tình trạng xâm nhập mặn tại những vùng canh tác nông nghiệp ven biển. Vì vậy, cần có nghiên cứu tích hợp, sử dụng các loại vật liệu thân thiện môi trường như than trấu, vôi và phân bò là để bổ sung nhằm cải thiện chất lượng đất phèn nhiễm mặn và phát triển nông nghiệp bền vững.

3.1.4 Thảo luận chung

Các khu vực có đất phèn nhiễm mặn tại Cần Giờ (cũ) và Gò Công Đông (cũ) đã và đang được khai thác hiệu quả với nhiều mô hình canh tác khác nhau. Tuy các mô hình như lúa mùa và lúa-tôm đều cho thấy hiệu quả kinh tế nhưng sự phụ thuộc quá mức

vào lúa vẫn tạo ra rủi ro cho nông dân trong trường hợp đất bị nhiễm phèn nặng hơn hoặc có biến đổi khí hậu bất lợi. Do đó, cần thúc đẩy thêm sự đa dạng hóa trong canh tác để tối ưu hóa sử dụng đất. Tại Gò Công Đông (cũ), sự xuất hiện của các mô hình rau màu và cây trồng khác cho thấy nông dân đã chủ động tìm kiếm các giải pháp khác thay thế hoặc bổ trợ cho việc trồng lúa. Đây là hướng đi bền vững giúp giảm bớt sự phụ thuộc vào chất lượng đất. Mặt khác, mô hình lúa-tôm tại Cần Giờ (cũ) là ví dụ điển hình cho việc khai thác đồng thời cả hệ sinh thái nước mặn và nước ngọt. Sự kết hợp này giúp tăng cường khả năng sử dụng đất và tạo ra lợi nhuận cao hơn, đặc biệt trong điều kiện đất phèn bị nhiễm mặn do biến đổi khí hậu.

Đất phèn nhiễm mặn là loại đất có sự kết hợp giữa đất phèn và đất nhiễm mặn, với các yếu tố bất lợi ảnh hưởng đến sự phát triển của cây trồng và hệ sinh thái. Tại Cần Giờ (cũ) nói riêng và các khu vực khác ở Việt Nam như đồng bằng sông Cửu Long nói chung thì loại đất này hình thành chủ yếu trong vùng ven biển hoặc vùng đất ngập nước, chịu ảnh hưởng mạnh từ quá trình thủy triều và xâm nhập mặn do biến đổi khí hậu. Đất phèn nhiễm mặn gây ra nhiều khó khăn trong canh tác nông nghiệp và phát triển bền vững. Những đặc tính hóa học của loại đất này chủ yếu xoay quanh bốn yếu tố chính: tính axit, tính mặn, tính độc và tính dinh dưỡng. Các yếu tố này không chỉ ảnh hưởng trực tiếp đến sự phát triển của cây trồng mà còn đóng vai trò quan trọng trong việc xác định chỉ số chất lượng đất tổng thể, cũng như các chỉ số thành phần của đất phèn nhiễm mặn. Trong bối cảnh sử dụng đất đa dạng như trồng lúa nước và trồng cây trong điều kiện đất ẩm, việc đánh giá các yếu tố này là cần thiết để có thể cải tạo và quản lý đất hiệu quả.

Tính axit: Các yếu tố liên quan đến tính axit của đất phèn nhiễm mặn bao gồm pH, ion SO_4^{2-}, độ chua trao đổi và ion H^+ trao đổi. pH thấp (dao động từ 4,05 đến 4,96 ở các loại hình sử dụng đất ở cả 2 tầng đất, trong đó đất trồng lúa có pH thấp nhất ở cả 2 tầng đất - Bảng 3.2) làm cho đất có tính axit mạnh, dẫn đến sự phát triển kém của cây trồng. SO_4^{2-} ở các loại hình sử dụng đất tăng dần theo độ sâu từ 0-30 cm đến 30-60 cm, cao nhất ở đất tự nhiên (Bảng 3.2). Điều này cho thấy SO_4^{2-} đã góp phần làm tăng tính axit theo độ sâu khi nó tham gia vào quá trình oxy hóa Pyrite trong đất, tạo

ra axit sulfuric tương tự như nghiên cứu của Ritsema and Groenenberg [120]. Độ chua trao đổi và H^+ trao đổi gây ra sự ức chế trong việc hấp thụ các dưỡng chất cần thiết, đặc biệt là các nguyên tố trung và vi lượng như Ca, Mg và K; Havlin, Tisdale, Nelson and Beaton [121] cũng đã có kết quả nghiên cứu tương tự. SQI tính axit trong các loại hình sử dụng đất như đất trồng lúa nước có thể phản ánh rõ ràng tác động tiêu cực này, đặc biệt là khi đất luôn ngập nước, dẫn đến sự tích lũy axit và các ion kim loại nặng. Theo nghiên cứu của Hùng, Hưng và Dũng [122], tình trạng này có thể làm giảm năng suất cây trồng đến 30% trong điều kiện ngập nước kéo dài.

Tính mặn: Đất phèn nhiễm mặn chủ yếu được đo bằng độ dẫn điện (EC) và sự hiện diện của các ion Cl^- và Na trao đổi. EC ở các loại hình sử dụng đất có xu hướng tăng dần từ độ sâu 0-30 cm đến 30-60 cm, trừ đất trồng lúa giảm từ 6,35 xuống 5,56 dS/m từ tầng 0-30 cm đến 30-60 cm. EC cao chứng tỏ đất có nồng độ muối cao, làm giảm khả năng hút nước của cây trồng do sự chênh lệch áp suất thẩm thấu [123]. Bên cạnh đó, sự tích lũy Na trao đổi cao nhất ở đất trồng cây hằng năm khác và đất trồng lúa đều có xu hướng tăng theo độ sâu (Bảng 3.3). Tương tự, Cl^- tăng đều ở các loại hình sử dụng đất theo độ sâu, trừ đất trồng lúa (Bảng 3.3). Điều này cho thấy, Cl^- và Na trao đổi khi tích tụ nhiều trong đất theo độ sâu có thể gây ra hiện tượng tắc nghẽn trong quá trình hấp thụ dinh dưỡng và làm cho cây trồng khô héo, tương đồng với nghiên cứu của Balasubramaniam, Shen and Esmaeili [124]. Nghiên cứu của Hai and Non [125] đã chỉ ra rằng, độ mặn cao có thể gây ra hiện tượng chết rễ và làm giảm khả năng sinh trưởng của cây lúa, đặc biệt là trong mùa khô. SQI tính mặn phản ánh mức độ ảnh hưởng của muối đối với nông nghiệp, đặc biệt là trong điều kiện ngập nước so với đất ẩm. Trong điều kiện đất ngập nước, muối thường di chuyển chậm hơn, nhưng sự bốc hơi mạnh có thể gia tăng nồng độ muối trong đất mặt, làm cho tình trạng mặn trở nên nghiêm trọng hơn trong các vùng ven biển như đồng bằng sông Cửu Long.

Tính độc: Trong đất phèn nhiễm mặn, các ion độc như nhôm (Al^{3+}), sắt (Fe^{2+}) và mangan (Mn^{2+}) có thể tích tụ và gây độc cho cây trồng. Al^{3+} tích lũy cao nhất ở đất trồng lúa lần lượt 341,82 mg/kg ở độ sâu 0-30 cm (Bảng 3.3) có pH = 4,05 (Bảng

3.2) và giảm xuống 142,54 mg/kg ở độ sâu 30-60 cm (Bảng 3.3) có pH = 4,63 (Bảng 3.2). Khi đất có pH thấp, Al^{3+} trở nên dễ hòa tan và ảnh hưởng trực tiếp đến sự phát triển của rễ cây, gây ra hiện tượng ức chế sự sinh trưởng và giảm hấp thu dưỡng chất, kết quả này cũng đã được Munns and Tester [126] chứng minh. Fe^{2+} và Mn^{2+} cũng có thể gây ngộ độc cho cây khi tích tụ trong đất ngập nước, làm giảm quá trình trao đổi khí và ức chế sinh trưởng. Nghiên cứu của Hùng, Hưng và Dũng [122] cũng đã chỉ ra rằng nồng độ cao của Al^{3+} trong đất phèn có thể làm giảm năng suất lúa tới 40% trong điều kiện ngập nước. SQI tính độc đánh giá mức độ ảnh hưởng của các ion độc hại này đến sự phát triển của cây trồng trong điều kiện đất ẩm và ngập nước. Trong điều kiện ngập nước, các kim loại nặng như Fe^{2+} và Mn^{2+} có xu hướng bị khử và tồn tại ở dạng hòa tan, dễ dàng gây hại cho cây trồng. Ngược lại, trong điều kiện đất ẩm, các ion này ít di động hơn nhưng vẫn có nguy cơ gây hại lâu dài cho cây.

Tính dinh dưỡng: Khả năng trao đổi cation (CEC), NH_4^+, OC, P, K Ca và Mg trao đổi là những yếu tố dinh dưỡng quan trọng ảnh hưởng đến độ màu mỡ của đất phèn nhiễm mặn [127]. Mặc dù đất có thể chứa nhiều chất dinh dưỡng, nhưng pH thấp và tính mặn cao khiến các nguyên tố dinh dưỡng này khó sẵn sàng cho cây trồng sử dụng. NH_4^+ có xu hướng tăng từ tầng 0-30 cm đến 30-60 cm ở đất trồng cây hằng năm khác, đất trồng cây lâu năm và đất trồng lúa và ngược lại ở OC, đặc biệt đất trồng lúa thể hiện rõ rệt nhất ở cả 2 chỉ tiêu này. Tương tự, đối với P và K trao đổi, đất trồng cây hằng năm khác, đất trồng cây lâu năm và đất trồng lúa đều giảm từ tầng nông (0-30 cm) xuống tầng sâu (30-60 cm), trừ chỉ tiêu K trao đổi ở đất trồng lúa; P có xu hướng giảm nhẹ ở đất nuôi thủy sản và đất tự nhiên từ tầng nông (0-30 cm) xuống tầng sâu (30-60 cm) còn K trao đổi ngược lại. NH_4^+ và OC giúp cải thiện khả năng giữ dinh dưỡng, trong khi P và K là yếu tố quyết định đến năng suất lúa, tương đồng với kết quả nghiên cứu của Dhanya and Gladis [128]. Trong đất ngập nước (như đất trồng lúa), quá trình phân hủy chất hữu cơ tạo ra môi trường giàu dinh dưỡng cho cây trồng [129]. SQI tính dinh dưỡng có xu hướng cao hơn ở tầng sâu (30-60 cm) so với tầng nông (0-30 cm) ở các loại hình sử dụng đất (trừ đất nuôi trồng thủy sản) do khả năng giữ chất dinh dưỡng tốt hơn. Theo Gương, Linh và Thư [130], quản lý dinh

dưỡng trong đất phèn nhiễm mặn đòi hỏi sự cân bằng giữa năng suất cây trồng và chất lượng đất.

Bối cảnh biến đổi khí hậu tại khu vực nghiên cứu đã làm tính axit và tính mặn không chỉ phản ánh hiện trạng mà còn cho thấy một xu hướng đáng lo ngại với sự gia tăng của SQI tính axit và mặn ở các khoảng cách lớn hơn 20 km cho thấy rằng nước biển đang thấm sâu vào đất, vượt xa khu vực ven biển. Tầng đất sâu (30-60 cm) bị ảnh hưởng mạnh mẽ hơn so với tầng đất mặt (0-30 cm), chứng minh rằng nước mặn không chỉ tác động bề mặt mà còn xâm nhập vào tầng sâu, có khả năng làm suy giảm chất lượng đất lâu dài. Hiện tượng này đặt ra mối đe dọa nghiêm trọng đối với sản xuất nông nghiệp, đặc biệt là ở vùng có đất phèn ven biển. Trong bối cảnh khu vực nghiên cứu, tác động này không chỉ làm tăng độ mặn mà còn mở rộng phạm vi bị ảnh hưởng, khiến các vùng cách bờ biển hơn 20 km trở thành vùng nguy cơ cao. Bên cạnh đó, vấn đề giảm lượng mưa mùa khô và gia tăng cường độ mưa trong thời gian ngắn đã làm mất cân bằng thủy văn. Lượng nước ngọt không đủ để rửa mặn ở bề mặt, trong khi nước mưa với pH thấp (5,5-6,5) lại tăng cường axit hóa các tầng đất. Khi muối thẩm thấu vào tầng sâu và không được rửa trôi, đất trở thành "bẫy muối". Quá trình này diễn ra từ từ nhưng dẫn đến hậu quả nghiêm trọng, làm giảm chất lượng đất trong hàng thập kỷ. Từ đó đã làm đất bị axit hóa và mặn hóa làm giảm khả năng hấp thu dinh dưỡng của cây trồng. Điều này làm suy giảm chu trình dinh dưỡng, khiến đất ngày càng thoái hóa. Trong khi đó, mưa lớn trong thời gian ngắn có thể rửa trôi một phần muối từ tầng đất trên xuống tầng sâu (30-60 cm), gây sự biến động trong dữ liệu SQI tính dinh dưỡng và tính độc.

Tóm lại, các đặc tính hóa học của đất phèn nhiễm mặn, gồm tính axit, mặn, độc và dinh dưỡng đều tác động mạnh đến chất lượng đất theo tầng, loại hình sử dụng và bị ảnh hưởng bởi không gian, đặc biệt ở vùng ven biển. Nghiên cứu tại khu vực tiêu biểu cho thấy tính axit, mặn, độc và dinh dưỡng của đất bị ảnh hưởng nặng nề. Tính axit tăng mạnh ở tầng mặt do oxy hóa Pyrite và tác động thủy triều; tính mặn cao do tích tụ muối từ biển và tưới tiêu, lan tới tầng sâu; kim loại độc như Al^{3+}, Fe^{2+}, Mn^{2+} gia tăng. Dinh dưỡng đất cao hơn khi ở xa biển nhưng bị giảm do axit hóa và rửa trôi

so với gần biển. Tác động khác biệt rõ rệt giữa các loại hình sử dụng đất: đất lúa giảm pH, tăng độc tính kim loại, ảnh hưởng năng suất; đất trồng cây hằng năm khác và đất trồng cây lâu năm chịu tác động mạnh ở tầng 30-60 cm do mặn và axit; mô hình lúa-tôm bất ổn năng suất do biến động mặn, phèn; đất tự nhiên ven biển suy thoái, giảm khả năng phục hồi. Để cải thiện đất phèn nhiễm mặn, cần nghiên cứu đề xuất sử dụng các vật liệu thân thiện môi trường như than trấu, vôi, phân bò, nhằm nâng cao hiệu quả sử dụng đất và phát triển bền vững trong bối cảnh biến đổi khí hậu.

3.2 Nội dung 2: Khảo sát và đánh giá tác động của than sinh học (than trấu, than nhãn, than dừa), vôi và phân bò đến các đặc tính hóa học của đất phèn nhiễm mặn trong điều kiện nhà lưới

3.2.1 Khảo sát đặc tính, xác định loại than sinh học và tỷ lệ sử dụng phù hợp cho cải tạo đất phèn nhiễm mặn

3.2.1.1 Đặc tính hóa học của các loại than sinh học và đất trước thí nghiệm

Các đặc tính ban đầu của các loại than sinh học và đất được trình bày trong Bảng 3.6.

Bảng 3.6 Tính chất của than trấu, nhãn, dừa và đất trước thí nghiệm (Thí nghiệm 1)

Đặc tính vật liệu	Đơn vị	Than trấu	Than nhãn	Than dừa	Đất
pH	-	8,46 ± 0,05	7,23 ± 0,05	9,39 ± 0,05	3,80 ± 0,11
EC	dS/m	0,31 ± 0,00	0,19 ± 0,01	3,64 ± 0,02	3,87 ± 0,33
Cl^-	g/kg	1,87 ± 0,07	1,81 ± 0,07	27,54 ± 0,12	2,09 ± 0,04
SO_4^{2-}	g/kg	7,57 ± 0,31	0,66 ± 0,05	0,65 ± 0,10	13,15 ± 0,33
Độ chua trao đổi	cmol(+)/kg	4,08 ± 0,29	2,80 ± 0,46	3,84 ± 0,02	7,01 ± 0,08
H^+ trao đổi	cmol(+)/kg	2,72 ± 0,06	2,10 ± 0,26	1,90 ± 0,11	3,48 ± 0,33
Mehlich-1 P	mg/kg	2.286 ± 52,72	580,90 ± 28,17	2.656 ± 164,97	25,04 ± 0,58
CEC	cmol(+)/kg	23,88 ± 0,71	20,27 ± 0,77	41,28 ± 1,59	21,77 ± 0,70
Al trao đổi	mg/kg	27,52 ± 2,01	32,45 ± 2,60	16,59 ± 0,54	3,83 ± 0,05
Ca trao đổi	mg/kg	2.980 ± 158,86	3.117 ± 229,32	3.412 ± 342,53	1.574 ± 115,36
Fe trao đổi	mg/kg	54,40 ± 5,03	67,87 ± 10,35	79,96 ± 6,90	21,67 ± 0,25
K trao đổi	mg/kg	10.882 ± 114,11	965,97 ± 29,22	64.336 ± 1.955,56	889,18 ± 30,35
Mg trao đổi	mg/kg	495,25 ± 24,18	283,24 ± 13,28	1.346 ± 127,91	703,24 ± 37,92
Mn trao đổi	mg/kg	69,39 ± 0,97	48,43 ± 1,31	98,05 ± 0,34	20,49 ± 0,12
Na trao đổi	mg/kg	2.481 ± 142,96	1.382 ± 98,61	23.849 ± 528,73	1.893 ± 16,98

Các đặc tính hóa học của ba loại than sinh học (than trấu, than nhãn, than dừa) và đất cho thấy sự khác biệt nổi bật. Than sinh học có tính kiềm rõ rệt (pH 7,23-9,39) so với

đất chua mạnh (pH - 3,80). EC của than dừa (3,64 dS/m) và đất (3,87 dS/m) cao hơn so với than trấu và than nhãn, phản ánh hàm lượng muối hòa tan cao. Hàm lượng Cl^- và SO_4^{2-} trong than dừa vượt trội, đặc biệt Cl^- (27,54 g/kg) cao gấp hơn 13 lần đất. Hàm lượng lân dễ tiêu trong than trấu (2.286 mg/kg) và than dừa (2.656 mg/kg) rất cao, vượt xa đất (25,04 mg/kg). Khả năng trao đổi cation (CEC) của than dừa đạt 41,28 cmol(+)/kg, gấp gần 2 lần đất. Các cation trao đổi như Ca^{2+}, K^+, Mg^{2+}, Mn^{2+} và Na^+ trong than dừa đạt giá trị cao nhất với K^+ = 64.335 mg/kg, thể hiện tiềm năng cung cấp dinh dưỡng vượt trội. Tuy nhiên, hàm lượng Al^{3+} trao đổi trong than nhãn (32,45 mg/kg) cao hơn đất. Nhìn chung, than trấu có tiềm năng lớn trong cải tạo đất nhờ khả năng trung hòa pH, tăng CEC và bổ sung dinh dưỡng thiết yếu.

3.2.1.2 Đặc tính hóa học của đất phèn nhiễm mặn sau thí nghiệm

Tính axit: Bốn tính chất liên quan đến tính axit của đất phèn nhiễm mặn gồm pH, SO_4^{2-}, độ chua trao đổi và H^+ trao đổi đều có sự thay đổi rõ rệt dưới tác động của than trấu, than nhãn và than dừa ở các tỷ lệ 0%, 0,7%, 1,5%, 3% và 6% (Bảng 3.7).

Bảng 3.7 Ảnh hưởng của ba loại than sinh học lên tính axit của đất phèn nhiễm mặn ở thí nghiệm trong nhà lưới (tháng 1 đến tháng 4, năm 2022)

Đặc tính đất		Đơn vị	Tỷ lệ than (%)				
			0	0,7	1,5	3	6
Than trấu							
pH	Tính axit	-	$4,51^{f}$±0,04	$4,64^{def}$±0,02	$4,68^{def}$±0,02	$4,84^{bcd}$±0,03	$5,01^{ab}$±0,03
SO_4^{2-}		g/kg	$9,51^{a}$±0,19	$9,11^{ab}$±0,17	$8,51^{abcd}$±0,19	$7,86^{abcd}$±0,31	$7,69^{d}$±0,37
Độ chua trđ		cmol(+)/kg	$6,17^{a}$±0,09	$5,25^{ab}$±0,07	$4,63^{bcde}$±0,45	$3,37^{ef}$±0,27	$3,36^{ef}$±0,33
H^+ trao đổi		cmol(+)/kg	$3,28^{a}$±0,09	$2,73^{bc}$±0,07	$2,37^{cd}$±0,10	$1,93^{de}$±0,07	$1,74^{ef}$±0,04
Than nhãn							
pH	Tính axit	-	$4,52^{f}$±0,04	$4,67^{def}$±0,02	$4,75^{cde}$±0,03	$4,68^{def}$±0,05	$4,83^{bcd}$±0,02
SO_4^{2-}		g/kg	$9,47^{a}$±0,13	$8,81^{abcd}$±0,20	$8,74^{abcd}$±0,18	$8,61^{abcd}$±0,15	$7,97^{bcd}$±0,28
Độ chua trđ		cmol(+)/kg	$6,15^{a}$±0,10	$5,39^{ab}$±0,14	$4,72^{bcd}$±0,24	$3,44^{def}$±0,29	$3,23^{fg}$±0,21
H^+ trao đổi		cmol(+)/kg	$3,28^{a}$±0,10	$2,72^{bc}$±0,05	$2,64^{bc}$±0,02	$2,02^{de}$±0,15	$2,05^{de}$±0,20
Than dừa							
pH	Tính axit	-	$4,55^{ef}$±0,08	$4,74^{cde}$±0,07	$4,72^{def}$±0,04	$4,93^{abc}$±0,01	$5,10^{a}$±0,04
SO_4^{2-}		g/kg	$9,48^{a}$±0,23	$8,96^{abc}$±0,34	$8,62^{abcd}$±0,21	$8,39^{abcd}$±0,28	$8,08^{bcd}$±0,20
Độ chua trđ		cmol(+)/kg	$6,09^{a}$±0,23	$4,75^{bc}$±0,19	$3,59^{cdef}$±0,25	$2,71^{fg}$±0,39	$2,06^{g}$±0,15
H^+ trao đổi		cmol(+)/kg	$3,28^{a}$±0,04	$2,95^{ab}$±0,09	$2,38^{cd}$±0,13	$1,75^{ef}$±0,13	$1,40^{f}$±0,12

Ghi chú: Các tỷ lệ than 0; 0,7; 1,5; 3; 6% tương đương với 0; 7,4; 15,8; 31,5; 63 tấn/ha với giả thuyết dung trọng là 1,1 g/cm^3 và độ dày tầng đất mặt là 10 cm. trđ: trao đổi.

Nhìn chung, việc bổ sung than sinh học giúp cải thiện đáng kể các tính chất bất lợi của đất như pH thấp, độ chua trao đổi và H^+ trao đổi cao. Đặc biệt, than dừa cho kết quả cải thiện pH cao nhất, đạt 5,10 tại mức bón 6%, tiếp theo là than trấu (5,01) và than nhãn (4,83) và đều khác biệt có ý nghĩa thống kê ở cùng tỷ lệ này (Bảng 3.6). Sự gia tăng pH đi kèm với sự giảm mạnh của độ chua trao đổi và H^+ trao đổi, hai chỉ tiêu trực tiếp phản ánh mức độ axit trong đất. Ở tất cả các loại than, độ chua trao đổi giảm từ trên 6 cmol(+)/kg xuống còn khoảng 2-3 cmol(+)/kg khi tăng tỷ lệ than từ 0% lên 6%. H^+ trao đổi cũng giảm mạnh, đặc biệt khi bón than dừa (từ 3,28 xuống còn 1,40 cmol(+)/kg), cho thấy khả năng trung hòa axit mạnh mẽ của vật liệu này. Ngoài ra, hàm lượng SO_4^{2-} trong đất cũng giảm đáng kể ở cả ba loại than khi tăng tỷ lệ bón. Trong đó, than trấu cho mức giảm SO_4^{2-} rõ nhất, từ 9,51 g/kg xuống còn 7,69 g/kg tại tỷ lệ 6%. Than nhãn và than dừa cũng thể hiện xu hướng giảm tương tự, tuy mức độ thay đổi ít hơn. Điều này cho thấy vai trò của than sinh học không chỉ trong việc cải thiện pH mà còn góp phần giảm lượng sulfate. Tuy nhiên, một điểm đáng chú ý là than trấu, mặc dù không đạt hiệu quả cải tạo tối ưu như than dừa ở liều cao, lại thể hiện tác động cải thiện đất ổn định và rõ rệt ngay từ các tỷ lệ bón thấp, đặc biệt ở mức 0,7-1,5%. Tại mức 0,7%, pH đất đã tăng từ 4,51 (0%) lên 4,64, kèm theo giảm độ chua trao đổi và H^+ trao đổi và có ý nghĩa thống kê. Ngoài ra, than trấu cũng thể hiện hiệu quả cao nhất trong việc giảm hàm lượng SO_4^{2-} ở liều cao, nhưng hiệu lực đã được ghi nhận từ mức 1,5% trở lên. Kết quả đã cho thấy than trấu cải thiện có ý nghĩa so với đối chứng về pH và các chỉ tiêu axit, hiệu lực ở các mức này tương đương với hai loại than còn lại và về mặt thực tiễn, than trấu có nguồn gốc địa phương, chi phí sản xuất thấp và dễ tiếp cận cho nông hộ nên than trấu là một lựa chọn phù hợp và khả thi, đặc biệt cho cải tạo bước đầu hoặc ứng dụng dài hạn với liều thấp.

Tính mặn (EC, Cl^-, Na trao đổi) và tính độc (Al, Fe, Mn trao đổi) của đất phèn nhiễm mặn đều bị ảnh hưởng rõ rệt bởi ba loại than sinh học (than trấu, than nhãn và than dừa) ở các tỷ lệ bón khác nhau (0%, 0,7%, 1,5%, 3% và 6%) (Bảng 3.8).

Bảng 3.8 Ảnh hưởng của ba loại than sinh học lên tính mặn và tính độc của đất phèn nhiễm mặn ở thí nghiệm trong nhà lưới (tháng 1 đến tháng 4, năm 2022)

Đặc tính đất		Đơn vị	Tỷ lệ than (%)				
			0	0,7	1,5	3	6
Than trấu							
EC	Tính mặn	dS/m	3,16^{c} ± 0,05	3,18^{c} ± 0,07	3,32^{bc} ± 0,13	3,24^{c} ± 0,07	3,34^{bc} ± 0,05
Cl^-		g/kg	2,14^{bcd} ± 0,10	2,01^{cde} ± 0,05	1,96^{de} ± 0,05	1,82^{de} ± 0,04	1,64^{e} ± 0,07
Na trao đổi		mg/kg	2.981^{bcde} ± 37,91	2.783^{cdefg} ± 96,95	2.784^{cdefg} ± 84,25	2.718^{defg} ± 77,17	2.471^{g} ± 41,43
Al trao đổi	Tính độc	mg/kg	34,68^{a} ± 1,56	28,14^{abc} ± 2,50	26,42^{abcd} ± 2,18	27,01^{abcd} ± 2,70	23,70^{abcd} ± 1,34
Fe trao đổi		mg/kg	96,13^{ab} ± 4,48	87,37^{ab} ± 5,29	82,49^{abc} ± 5,02	81,22^{abc} ± 3,80	76,77^{abc} ± 6,58
Mn trao đổi		mg/kg	52,80^{a} ± 0,71	50,76^{a} ± 1,51	50,86^{a} ± 1,53	51,06^{a} ± 0,62	52,91^{a} ± 0,98
Than nhãn							
EC	Tính mặn	dS/m	3,24^{c} ± 0,13	3,46^{abc} ± 0,10	3,31^{bc} ± 0,23	3,29^{bc} ± 0,05	3,26^{bc} ± 0,09
Cl^-		g/kg	2,15^{bcd} ± 0,07	2,13^{bcd} ± 0,10	2,28^{bcd} ± 0,11	2,19^{bcd} ± 0,08	2,02^{cde} ± 0,08
Na trao đổi		mg/kg	2.921^{bcdef} ± 33,49	2.861^{cdef} ± 102,52	2.764^{defg} ± 67,60	2.657^{efg} ± 99,70	2.576^{fg} ± 99,93
Al trao đổi	Tính độc	mg/kg	34,61^{a} ± 2,39	27,40^{abcd} ± 0,88	24,44^{abcd} ± 3,41	22,26^{bcde} ± 2,45	21,52^{cde} ± 2,23
Fe trao đổi		mg/kg	98,56^{a} ± 2,85	84,82^{ab} ± 5,37	78,62^{abc} ± 7,88	73,85^{abc} ± 6,36	74,90^{abc} ± 5,18
Mn trao đổi		mg/kg	52,85^{a} ± 0,24	49,57^{a} ± 0,48	49,24^{a} ± 0,81	48,81^{a} ± 1,55	47,01^{a} ± 1,69
Than dừa							
EC	Tính mặn	dS/m	3,15^{c} ± 0,06	3,41^{bc} ± 0,10	3,39^{bc} ± 0,06	3,78^{ab} ± 0,14	3,97^{a} ± 0,09
Cl^-		g/kg	2,11^{cd} ± 0,06	2,25^{bcd} ± 0,08	2,46^{bc} ± 0,08	2,58^{ab} ± 0,09	2,93^{a} ± 0,19
Na trao đổi		mg/kg	2.905^{cdef} ± 29,98	3.069^{abcd} ± 75,90	3.125^{abc} ±33,96	3.276^{ab} ± 51,68	3.421^{a} ± 55,42
Al trao đổi	Tính độc	mg/kg	33,24^{ab} ± 2,23	22,53^{bcde} ± 3,03	19,07^{cde} ± 2,56	16,02^{de} ± 1,80	11,91^{e} ± 1,75
Fe trao đổi		mg/kg	95,04^{ab} ± 1,73	80,15^{abc} ± 8,74	75,05^{abc} ± 5,82	68,53^{bc} ± 4,69	55,64^{c} ± 5,32
Mn trao đổi		mg/kg	51,69^{a} ± 0,62	49,32^{a} ± 1,28	49,46^{a} ± 0,71	48,33^{a} ± 2,07	47,88^{a} ± 2,24

Ghi chú: Các tỷ lệ than 0; 0,7; 1,5; 3; 6% tương đương với 0; 7,4; 15,8; 31,5; 63 tấn/ha với giả thuyết dung trọng là 1,1 g/cm^3 và độ dày tầng đất mặt là 10 cm.

Than dừa có hiệu quả cải thiện mạnh mẽ nhất đối với tính độc của đất, thể hiện qua sự giảm đáng kể hàm lượng Al, Fe trao đổi khi tăng tỷ lệ bón, đặc biệt ở mức 6% (Al giảm từ 33,24 xuống còn 11,91 mg/kg; Fe từ 95,04 xuống 55,64 mg/kg). Tuy nhiên, việc sử dụng than dừa lại làm gia tăng đáng kể độ mặn của đất (EC tăng từ 3,15 lên 3,97 dS/m; Cl^- từ 2,11 lên 2,93 g/kg; Na trao đổi từ 2.905 lên 3.421 mg/kg) có ý nghĩa thống kê, thể hiện nguy cơ làm trầm trọng thêm điều kiện mặn nếu sử dụng ở liều cao. Than nhãn có xu hướng cải thiện tốt tính độc mà không làm gia tăng đáng kể tính mặn. Cụ thể, Al trao đổi giảm đáng kể từ 34,61 còn 21,52 mg/kg ở mức bón 6%, trong khi EC và Cl^- hầu như không thay đổi có ý nghĩa giữa các mức bón. Tuy nhiên, hiệu quả cải tạo của than nhãn vẫn kém hơn so với than dừa ở liều cao. Đáng chú ý, than trấu dù không đạt mức cải tạo mạnh mẽ như than dừa, nhưng lại thể hiện sự cân bằng giữa hiệu quả giảm độc tố (đặc biệt Al trao đổi) và kiểm soát tốt độ mặn của đất. Tại tỷ lệ bón 0,7-1,5%, than trấu giúp giảm Al trao đổi từ 34,68 xuống còn khoảng 26,42-28,14 mg/kg, đồng thời duy trì độ mặn ở mức ổn định, không gây tích lũy muối (EC dao động nhẹ quanh mức 3,16-3,32 dS/m; Cl^- giảm từ 2,14 xuống 1,96 g/kg). Ngoài ra, nồng độ Na trao đổi và Fe trao đổi cũng có xu hướng giảm dần theo tỷ lệ bón. Điều này cho thấy than trấu là lựa chọn tiềm năng, phù hợp trong điều kiện thực tiễn cải tạo đất phèn nhiễm mặn nhờ tính sẵn có, hiệu quả ổn định và rủi ro tích muối thấp, đặc biệt ở tỷ lệ 0,7-1,5%.

Tính dinh dưỡng (CEC, NH_4^+, Mehlich-1 P, OC, K, Ca, Mg trao đổi) đều có xu hướng tăng rõ rệt khi bón các loại than sinh học (than trấu, than nhãn và than dừa) với các mức tỷ lệ từ 0% đến 6% (Bảng 3.9).

Bảng 3.9 Ảnh hưởng của ba loại than sinh học lên tính dinh dưỡng của đất phèn nhiễm mặn ở thí nghiệm trong nhà lưới (tháng 1 đến tháng 4, năm 2022)

Đặc tính đất		Đơn vị	Tỷ lệ than (%)				
			0	0,7	1,5	3	6
Than trấu							
Mehlich-1 P	Tính dinh dưỡng	mg/kg	$23,83^{ij}$ ± 0,33	$26,84^{gh}$ ± 0,66	$31,73^{f}$ ± 0,46	$38,25^{d}$ ± 0,20	$44,62^{b}$ ± 0,48
CEC		cmol(+)/kg	$25,23^{fg}$ ± 0,38	$26,94^{defg}$ ± 0,48	$27,71^{bcdefg}$ ± 0,62	$28,71^{bcd}$ ± 0,26	$29,80^{abc}$ ± 0,31
Ca trao đổi		mg/kg	1.825^{efg} ± 19,71	1.886^{cdefg} ± 27,62	1.955^{abcde} ± 42,03	2.028^{ab} ± 25,90	2.079^{a} ± 21,69
K trao đổi		mg/kg	1.625^{e} ± 31,58	1.727^{de} ± 40,87	1.828^{de} ± 40,81	1.973^{de} ± 30,42	2.301^{de} ± 75,48
Mg trao đổi		mg/kg	1.213^{ab} ± 21,79	1.223^{ab} ± 33,75	1.270^{ab} ± 54,78	1.234^{ab} ± 35,74	1.232^{ab} ± 24,66
Than nhãn							
Mehlich-1 P	Tính dinh dưỡng	mg/kg	$23,01^{j}$ ± 0,35	$24,39^{hij}$ ± 0,65	$25,81^{ghi}$ ± 0,46	$28,33^{g}$ ± 0,54	$33,36^{ef}$ ± 0,54
CEC		cmol(+)/kg	$25,13^{g}$ ± 0,14	$25,70^{efg}$ ± 0,49	$26,46^{defg}$ ± 0,55	$27,31^{bcdefg}$ ± 0,75	$28,07^{bcdef}$ ± 0,71
Ca trao đổi		mg/kg	1.806^{fg} ± 22,86	1.866^{cdefg} ± 24,11	1.933^{bcdef} ± 20,45	1.994^{abc} ± 28,48	2.045^{ab} ± 5,86
K trao đổi		mg/kg	1.653^{e} ± 28,44	1.681^{e} ± 47,58	1.671^{e} ± 45,30	1.709^{de} ± 111,81	1.714^{de} ± 48,49
Mg trao đổi		mg/kg	1.185^{b} ± 21,66	1.270^{ab} ± 45,71	1.285^{ab} ± 33,66	1.263^{ab} ± 41,79	1.232^{ab} ± 41,01
Than dừa							
Mehlich-1 P	Tính dinh dưỡng	mg/kg	$22,92^{j}$ ± 0,46	$28,32^{g}$ ± 0,26	$34,48^{e}$ ± 0,49	$41,01^{c}$ ± 1,12	$49,58^{a}$ ± 0,32
CEC		cmol(+)/kg	$25,30^{fg}$ ± 0,81	$27,03^{cdefg}$ ± 0,47	$28,45^{bcde}$ ± 0,67	$29,94^{ab}$ ± 0,45	$32,01^{a}$ ± 0,79
Ca trao đổi		mg/kg	1.772^{g} ± 24,34	1.840^{defg} ± 30,52	1.893^{cdefg} ± 12,64	1.959^{abcd} ± 27,75	2.028^{ab} ± 34,18
K trao đổi		mg/kg	1.565^{e} ± 40,80	2.465^{d} ± 130,83	3.257^{c} ± 218,59	4.455^{b} ± 287,05	6.179^{a} ± 398,61
Mg trao đổi		mg/kg	1.202^{ab} ± 24,75	1.260^{ab} ± 25,89	1.308^{ab} ± 24,96	1.319^{ab} ± 46,88	1.380^{a} ± 33,79

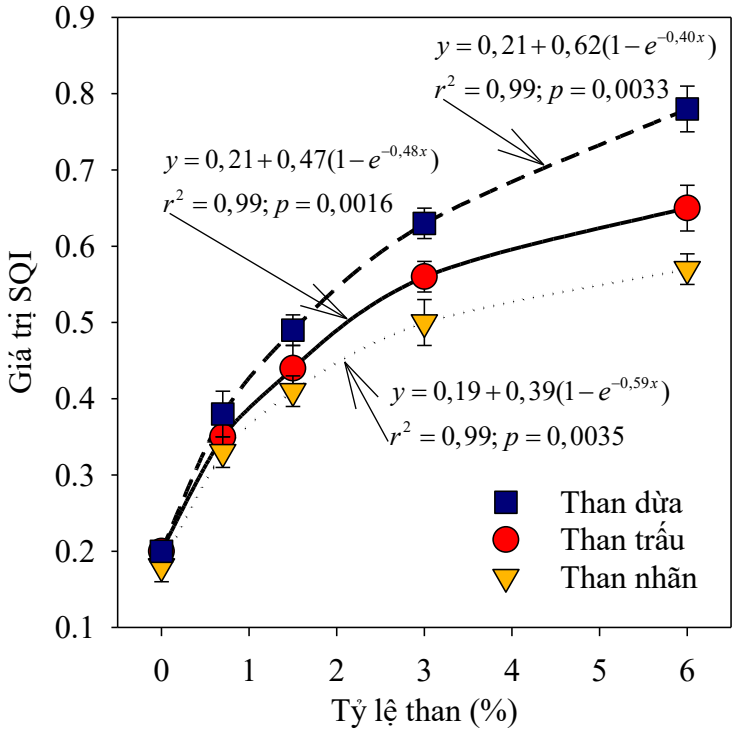
Ghi chú: Các tỷ lệ than 0; 0,7; 1,5; 3; 6% tương đương với 0; 7,4; 15,8; 31,5; 63 tấn/ha với giả thuyết dung trọng là 1,1 g/cm^3 và độ dày tầng đất mặt là 10 cm.

Than dừa cho hiệu quả cải thiện dinh dưỡng đất vượt trội nhất ở tất cả các chỉ tiêu, đặc biệt là kali trao đổi tăng từ 1.565 mg/kg (ở mức 0%) lên đến 6.179 mg/kg (ở mức 6%), tức gấp gần 4 lần. CEC và Mehlich-1 P cũng gia tăng đáng kể theo liều lượng than dừa, đạt giá trị cao nhất lần lượt là 32,01 cmol(+)/kg và 49,58 mg/kg ở mức 6%.

Tuy nhiên, trong bối cảnh thực tế ứng dụng tại các vùng đất phèn nhiễm mặn có điều kiện sản xuất còn hạn chế, than trấu thể hiện là một lựa chọn hợp lý và khả thi. Dù không đạt giá trị cao nhất so với than dừa, than trấu vẫn cho thấy sự cải thiện dinh dưỡng đất tương đối rõ rệt, đặc biệt ở tỷ lệ bón từ 0,7-1,5%, cụ thể, tại mức 1,5%, than trấu giúp tăng hàm lượng Mehlich-1 P lên 31,73 mg/kg, CEC đạt 27,71 cmol(+)/kg, Ca trao đổi đạt 1.955 mg/kg và K trao đổi đạt 1.828 mg/kg, có ý nghĩa thống kê so với hai loại than và các mức bón còn lại. Mặc dù giá trị các chỉ tiêu này thấp hơn so với mức bón cao hơn (3-6%), nhưng sự cải thiện vẫn có ý nghĩa thống kê so với đối chứng và phù hợp với canh tác bền vững trong điều kiện thực địa (Bảng 3.9). Trong khi đó, than nhãn mặc dù có xu hướng cải thiện các chỉ tiêu dinh dưỡng, song mức tăng nhìn chung thấp hơn so với hai loại than còn lại và chỉ tiêu K và Mg trao đổi không có sự khác biệt rõ rệt giữa các mức bón.

3.2.1.3 Chỉ số chất lượng đất sau thí nghiệm

Tổng cộng có ba nhân tố được tính toán từ bộ số liệu để giải thích tổng biến thiên của 15 thông số đất (Phụ bảng 2.2 - Phụ lục 2). Ba nhân tố này giải thích đến 81,22% tổng biến thiên của 15 thông số đất phân tích. Nhân tố 1 có mối liên hệ chặt với các thông số CEC, P, pH, SO_4^{2-}, Ca, độ chua và H^+ trao đổi, giải thích 53,79% tổng biến thiên của tất cả các thông số nghiên cứu. Nhân tố 2 có mối liên hệ chặt với các thông số Cl^-, EC, Na, K và Mg trao đổi của đất, giải thích 19,07% tổng biến thiên của tất cả các thông số. Nhân tố 3 có mối liên hệ với các thông số Al, Fe và Mn trao đổi, giải thích 8,36% tổng biến thiên. Giá trị trọng số của các thông số được dùng để tính chỉ số chất lượng đất (SQI). Nghiên cứu này đã tính toán SQI từ 15 thông số hóa học của đất đo được sau thời gian thí nghiệm và SQI được dùng để đánh giá biến động chỉ số chất lượng đất sau thí nghiệm bị ảnh hưởng bởi các loại và tỷ lệ than sinh học (Hình 3.6).



Hình 3.6 Biến động chỉ số chất lượng đất bị ảnh hưởng bởi các loại và tỷ lệ than sinh học ở thí nghiệm trong nhà lưới (tháng 1 đến tháng 4, năm 2022)

Hình 3.6 mô tả sự biến động của chỉ số chất lượng đất (SQI) trên đất phèn nhiễm mặn khi bổ sung ba loại than sinh học (than dừa, than trấu, than nhãn) với năm mức tỷ lệ (0%, 0,7%, 1,5%, 3%, 6%). SQI tăng theo hàm mũ khi gia tăng tỷ lệ bón, cho thấy hiệu quả cải tạo đất tích cực của các loại than. Than dừa đạt hiệu quả cao nhất với SQI tối đa 0,75 tại mức 6%, biên độ mô hình lớn nhất *(a = 0,62)*, nhờ diện tích bề mặt lớn, khả năng giữ nước/dinh dưỡng cao, và hàm lượng carbon ổn định. Than trấu nổi bật ở mức bón thấp (0,7-1,5%), với SQI đạt 0,34-0,4 *(a = 0,47)*, phù hợp cho canh tác ngắn hạn hoặc điều kiện đầu tư hạn chế. Than nhãn có hiệu quả thấp nhất, với SQI và biên độ mô hình thấp *(a = 0,39)*, có thể do diện tích bề mặt nhỏ, cấu trúc xốp kém và hàm lượng tro cao, làm giảm khả năng cải tạo đất.

3.2.1.4 Kết quả lựa chọn loại than sinh học và tỷ lệ sử dụng phù hợp

Kết quả nghiên cứu cho thấy ba loại than sinh học (than trấu, than dừa, than nhãn) đều có tiềm năng cải tạo đất phèn nhiễm mặn, nhưng hiệu quả và khả năng ứng dụng thực tế khác nhau. Than dừa nổi bật trong việc cải thiện tính axit và cung cấp dinh

dưỡng ở liều cao, nhưng cần kiểm soát liều lượng để tránh tăng độ mặn. Than nhãn có hiệu quả cải tạo kém ổn định, đặc biệt ở tỷ lệ bón thấp, với biên độ cải thiện nhỏ, hạn chế ứng dụng trong điều kiện cải tạo nhanh. Than trấu hiệu quả ổn định ngay cả ở mức bón thấp (0,7-1,5%), cải thiện các chỉ tiêu quan trọng như pH, CEC, Mehlich-1 P, Ca và K trao đổi. Thêm vào đó, trấu là phế phẩm phổ biến trong sản xuất lúa gạo, giúp giảm chi phí và dễ triển khai quy mô lớn, phù hợp với nông nghiệp bền vững. Những kết quả này hoàn toàn tương đồng với kết luận từ đề tài nghiên cứu của Nguyễn Thanh Bình, 2023 [131], trong đó than trấu được xác định là loại vật liệu thân thiện môi trường sử dụng trong cải tạo đất phèn mặn hiệu quả và bền vững, với mức khuyến nghị sử dụng từ 8-10 tấn/ha.

Tổng hợp các minh chứng từ nghiên cứu và các kết quả trước đó, tỷ lệ từ 0,7-1,5% được xác định là khoảng tối ưu để sử dụng than trấu trong cải tạo đất phèn nhiễm mặn. Trong đó, tỷ lệ trung bình 1,1% ≈ 10 tấn/ha (với độ sâu lớp đất là 10 cm suy ra thể tích lớp đất là 1.000.000.00 cm^3; dung trọng đất là 1,1 g/cm^3 suy ra trọng lượng đất là 1.050.000.000 g/cm^3 = 1.050 tấn/ha; trọng lượng đất × tỷ lệ than = 1.050.000.000 × 1,1 = 11,6 như vậy, kết quả được lấy theo mức khuyến nghị tối đa là 10 tấn/ha) được lựa chọn cho các thí nghiệm tiếp theo trên đất phèn nhiễm mặn trồng lúa, nhằm đạt được sự cân bằng giữa hiệu quả cải tạo, chi phí và tính ổn định lâu dài. Đối với định hướng ứng dụng than trấu trong cải tạo đất phèn nhiễm mặn canh tác rau màu, loại hình có yêu cầu cao hơn về dinh dưỡng nên tỷ lệ 1,5% ≈ 15 tấn/ha (với độ sâu lớp đất là 10 cm suy ra thể tích lớp đất là 800.000.00 cm^3; dung trọng đất là 1,2 g/cm^3 suy ra trọng lượng đất là 1.000.000.00 g/cm^3 = 1.050 tấn/ha; trọng lượng đất × tỷ lệ than = 1.050.000.000 × 1,5 = 15,8 ≈ 15 tấn/ha) được lựa chọn. Mức bón này có thể cho thấy hiệu quả cải thiện ổn định, an toàn, không gây dư lượng muối, đồng thời giúp đảm bảo cung cấp đầy đủ dinh dưỡng, phù hợp với đặc điểm chu kỳ sinh trưởng ngắn của cây rau màu. Như vậy, than trấu với tỷ lệ áp dụng phù hợp (10 tấn/ha cho lúa và 15 tấn/ha cho rau màu) là phương án cải tạo đất hiệu quả, khả thi và có tiềm năng ứng dụng cao.

3.2.2 Ảnh hưởng của than trấu, vôi và phân bò lên các đặc tính hóa học đất phèn nhiễm mặn ở hai chế độ quản lý nước khác nhau ở điều kiện nhà lưới

3.2.2.1 Đặc tính hóa học của đất và vật liệu trước thí nghiệm

Các đặc tính ban đầu của đất và vật liệu được trình bày tại Bảng 3.10, $pH_{vôi}$ = 13.

Bảng 3.10 Tính chất của than trấu, phân bò và đất trước thí nghiệm (Thí nghiệm 2)

Đặc tính vật liệu	Đơn vị	Than trấu	Phân bò	Đất
pH	-	8,03 ± 0,08	6,81 ± 0,02	5,83 ± 0,08
SO_4^{2-}	g/kg	5,01 ± 0,14	583,10 ± 61,44	1,27 ± 0,38
Độ chua trao đổi	cmol(+)/kg	1,38 ± 0,30	4,66 ± 0,20	3,49 ± 0,20
H^+ trao đổi	cmol(+)/kg	1,17 ± 0,29	3,08 ± 0,18	1,48 ± 0,10
EC	dS/m	0,38 ± 0,01	1,21 ± 0,10	5,52 ± 0,21
Cl^-	g/kg	1,35 ± 0,13	2.747,88 ± 294,17	11,87 ± 0,83
Mehlich-1 P	mg/kg	226,46 ± 11,20	657,10 ± 41,03	6,18 ± 0,60
OC	%	32,45 ± 2,30	32,58 ± 1,32	2,68 ± 0,08
NH_4^+	g/kg	3,29 ± 0,23	130,59 ± 10,74	90,09 ± 27,34
CEC	cmol(+)/kg	19,56 ± 1,57	33,45 ± 0,88	9,58 ± 0,24
Al trao đổi	mg/kg	19,37 ± 1,66	301,69 ± 8,54	204,09 ± 7,92
Fe trao đổi	mg/kg	38,80 ± 0,43	56,76 ± 1,99	52,72 ± 2,76
Mn trao đổi	mg/kg	53,97 ± 4,08	8.513,59 ± 614,65	194,69 ± 2,80
Ca trao đổi	mg/kg	2.493 ± 109,16	573,97 ± 17,51	7.443 ± 194,20
K trao đổi	mg/kg	10.073 ± 333,40	9.195 ± 327,44	1.846 ± 37,87
Mg trao đổi	mg/kg	380,19 ± 30,86	20,84 ± 3,45	2.922,55 ± 109,98
Na trao đổi	mg/kg	1.924 ± 41,80	814,97 ± 64,10	4.439 ± 519,27

Than trấu có pH = 8,03, EC = 0,38 dS/m, OC = 32,45%, và K trao đổi cao nhất (10.073 mg/kg). Phân bò có pH = 6,81, EC = 1,21 dS/m, OC = 32,58% và hàm lượng cao nhất về Mehlich-1 P (657,10 mg/kg), NH_4^+ (139,59 g/kg), SO_4^{2-} (583,10 g/kg), CEC (33,45 cmol(+)/kg), và các nguyên tố Al, Fe, Mn. Đất có pH = 5,83, EC = 5,52 dS/m, OC = 2,68% với Ca (7.443 mg/kg), Mg (2.923 mg/kg) và Na (4.439 mg/kg) cao nhất. Vôi (pH = 13) hỗ trợ điều chỉnh pH. Sự kết hợp các vật liệu này giúp cải thiện tính chất đất: than trấu và vôi điều chỉnh pH, bổ sung K, trong khi phân bò cải thiện CEC, chất hữu cơ và dinh dưỡng vi lượng. Những đặc điểm này cho thấy tiềm năng kết hợp các vật liệu để cải thiện tính chất đất, với than trấu và vôi giúp điều chỉnh pH và bổ sung K, còn phân bò cải thiện CEC và bổ sung chất hữu cơ cùng các nguyên tố dinh dưỡng.

3.2.2.2 Đặc tính hóa học của đất phèn nhiễm mặn sau thí nghiệm ở 2 chế độ nước

* Chế độ nước tưới ngập

Đặc tính hóa học đất phèn nhiễm mặn sau thí nghiệm ở chế độ tưới ngập (Bảng 3.11).

Bảng 3.11 Ảnh hưởng của các vật liệu lên đặc tính hóa học đất phèn nhiễm mặn với chế độ nước tưới ngập ở điều kiện nhà lưới (tháng 4 đến tháng 7, năm 2022)

Đặc tính đất	Không than trấu			Có than trấu		
	Đối chứng	Vôi	Phân bò	Than trấu	Than trấu + vôi	Than trấu + phân bò
Tính axit						
pH	5,99^{c} ± 0,04	6,20^{ab} ± 0,05	6,02^{c} ± 0,09	6,10^{bc} ± 0,07	6,24^{a} ± 0,05	6,16^{ab} ± 0,05
SO_4^{2-} (g/kg)	0,66^{c} ± 0,04	0,57^{c} ± 0,03	1,06^{b} ± 0,03	1,02^{b} ± 0,04	0,56^{c} ± 0,03	1,59^{a} ± 0,14
Độ chua trao đổi (cmol(+)/kg)	4,22^{a} ± 0,13	3,79^{b} ± 0,13	4,24^{a} ± 0,10	3,25^{c} ± 0,07	2,66^{d} ± 0,12	4,60^{a} ± 0,12
H^+ trao đổi (cmol(+)/kg)	1,05^{b} ± 0,01	0,84^{c} ± 0,05	1,35^{a} ± 0,06	1,07^{b} ± 0,05	1,15^{b} ± 0,02	1,35^{a} ± 0,14
Tính mặn						
EC (dS/m)	1,21^{a} ± 0,03	1,23^{a} ± 0,03	1,22^{a} ± 0,03	1,26^{a} ± 0,03	1,29^{a} ± 0,03	1,23^{a} ± 0,03
Cl^- (g/kg)	10,73^{bc} ± 0,43	10,79^{bc} ± 0,26	16,41^{a} ± 0,26	9,76^{c} ± 0,35	11,23^{b} ± 0,32	15,35^{a} ± 1,26
Na trao đổi (mg/kg)	5.615^{a} ± 342,34	4.933^{b} ± 360,35	5.059^{ab} ± 314,81	4.972^{b} ± 354,62	4.267^{c} ± 185,21	5.626^{a} ± 185,67
Tính độc						
Al trao đổi (mg/kg)	421,12^{b} ± 16,14	396,44^{b} ± 20,64	532,80^{a} ± 30,29	394,15^{b} ± 34,68	366,91^{b} ± 30,13	507,52^{a} ± 51,42
Fe trao đổi (mg/kg)	170,98^{c} ± 6,70	125,51^{d} ± 11,01	239,40^{a} ± 12,89	161,42^{c} ± 10,00	102,35^{d} ± 2,28	209,74^{b} ± 27,86
Mn trao đổi (mg/kg)	177,68^{ab} ± 9,68	127,50^{d} ± 14,99	183,23^{a} ± 9,71	164,46^{bc} ± 8,89	155,48^{c} ± 2,36	167,98^{abc} ± 13,38
Tính dinh dưỡng						
CEC (cmol(+)/kg)	11,64^{c} ± 0,49	12,62^{bc} ± 0,53	13,03^{ab} ± 0,46	13,32^{ab} ± 0,51	13,37^{ab} ± 0,28	14,01^{a} ± 0,38
NH_4^+ (mg/kg)	196,01^{ab} ± 6,15	194,6^{bc} ± 8,04	218,09^{a} ± 6,38	126,88^{d} ± 7,04	194,47^{bc} ± 7,20	173,03^{c} ± 7,41
Mehlich-1 P (mg/kg)	12,71^{cd} ± 0,84	11,86^{d} ± 1,06	13,17^{cd} ± 1,04	13,83^{bc} ± 0,74	18,14^{a} ± 0,73	15,51^{b} ± 0,45
OC (%)	2,80^{cd} ± 0,19	2,59^{d} ± 0,16	3,29^{bc} ± 0,12	3,40^{b} ± 0,12	3,71^{ab} ± 0,16	4,08^{b} ± 0,29
K trao đổi (mg/kg)	1.932^{b} ± 34,29	2.328^{a} ± 92,04	2.197^{a} ± 145,73	2.217^{a} ± 126,13	2.274^{a} ± 139,51	2.344^{a} ± 160,47
Ca trao đổi (mg/kg)	6.507^{b} ± 162,87	7.065^{ab} ± 362,33	6.823^{ab} ± 267,88	6.714^{ab} ± 310,96	7.380^{a} ± 295,77	6.534^{b} ± 185,18
Mg trao đổi (mg/kg)	2.637^{a} ± 159,99	2.532^{a} ± 146,99	2.594^{a} ± 139,81	2.520^{a} ± 116,04	2.491^{a} ± 76,11	2.577^{a} ± 97,15

pH là đặc tính nổi bật của tính axit. Nghiệm thức (NT) bổ sung than trấu và vôi cho pH cao nhất (6,24), tiếp theo là NT chỉ dùng vôi (6,20), trong khi NT đối chứng hoặc NT chỉ dùng phân bò cho pH thấp hơn. Điều này cho thấy vôi có tác dụng tăng pH, đặc biệt khi kết hợp với than trấu. Chế độ tưới ngập tạo điều kiện khử, giảm oxy hóa axit sulfuric và H^+ trong đất, góp phần tăng pH, tương tự như Moore Jr, Attanandana and Patrick Jr [132] đã báo cáo. Glaser, Lehmann and Zech [133] cũng đã chứng minh vôi cho hiệu quả trung hòa độ chua tốt hơn, trong khi phân bò với hàm lượng SO_4^{2-} cao lại kém hiệu quả hơn do hạn chế khử lưu huỳnh. Ngoài ra, tưới ngập giúp giảm khả năng chuyển hóa lưu huỳnh thành axit sulfuric, từ đó làm giảm độ chua của đất, tương đồng với kết quả nghiên cứu của Dent and Pons [134]. Về độ chua trao đổi, NT than trấu kết hợp vôi cho giá trị thấp nhất (2,66 cmol(+)/kg), trong khi NT than trấu kết hợp phân bò cao nhất (4,60 cmol(+)/kg), cho thấy vôi giảm độ chua hiệu quả hơn. NT chỉ sử dụng phân bò có H^+ trao đổi cao nhất (1,35 cmol(+)/kg), còn NT chỉ sử dụng vôi thấp nhất (0,84 cmol(+)/kg), nhấn mạnh vai trò trung hòa axit của vôi, đặc biệt khi kết hợp với than trấu.

Đối với tính mặn, kết quả cho thấy không có sự khác biệt quá lớn về EC giữa 2 yếu tố, tất cả đều dao động từ 1,21 đến 1,29 dS/m. Tại NT phân bò kết hợp than trấu và NT chỉ bón phân bò cho hàm lượng Cl^- cao nhất lần lượt là 16,41 và 15,35 g/kg, trong khi NT chỉ bón than trấu cho hàm lượng Cl^- thấp nhất (9,76 g/kg). Điều này cho thấy việc sử dụng phân bò có thể làm tăng nồng độ Cl^- trong đất. Chế độ nước tưới ngập giúp giảm tác động của muối hòa tan trong đất vì làm loãng nồng độ các ion mặn như Cl^- và Na^+ trong dung dịch đất, tương đồng với nghiên cứu của Balasubramaniam, Shen, Esmaeili and Zhang [135]. Tuy nhiên, trong thí nghiệm này, sự khác biệt về EC giữa 2 yếu tố lại không có ý nghĩa thống kê, điều này có thể do độ mặn tổng thể của đất không quá cao hoặc do thời gian ngập nước không đủ dài để làm giảm đáng kể độ dẫn điện. Ở NT than trấu kết hợp với phân bò cho hàm lượng Na trao đổi cao nhất (5.626 mg/kg) so với các NT khác.

Tính độc của đất phèn nhiễm mặn được phản ánh qua hàm lượng Al, Fe, và Mn trao đổi. NT chỉ bón phân bò làm tăng Al trao đổi cao nhất (532,80 mg/kg), trong khi NT

chỉ bón vôi giảm xuống thấp nhất (396,44 mg/kg). Tương tự, NT chỉ bón phân bò cũng làm tăng Fe (239,40 mg/kg) và Mn (183,23 mg/kg), trong khi NT chỉ bón vôi giữ Fe ở mức thấp nhất (125,51 mg/kg). Phân bò vừa trực tiếp đưa vào chất gây độc, vừa chế độ ngập nước sinh ra H_2S, Fe^{2+}, Mn^{2+} và làm giải phóng Al^{3+} từ khoáng đất. Chế độ tưới ngập tạo môi trường yếm khí, thúc đẩy quá trình khử Fe và Mn, làm chúng dễ di chuyển hơn trong đất [136]. NT kết hợp vôi với than trấu và NT kết hợp phân bò với than trấu giúp giảm độc tính của Al, Fe và Mn thông qua việc cải thiện CEC và tạo phức chelate, hạn chế sự di chuyển của các kim loại nặng này trong đất.

Tính dinh dưỡng của đất phèn nhiễm mặn ở chế độ tưới ngập được thể hiện qua các thông số CEC, NH_4^+, P, OC, K, Ca và Mg trao đổi. NT kết hợp than trấu và phân bò cho CEC cao nhất (14,01 cmol(+)/kg), trong khi NT đối chứng có CEC thấp nhất (11,64 cmol(+)/kg), cho thấy sự kết hợp này cải thiện khả năng trao đổi cation và dinh dưỡng của đất, tương đồng với nghiên cứu của Sriraj and Butnan [137]. NT chỉ bón phân bò cho NH_4^+ cao nhất (218,09 mg/kg), trong khi NT chỉ bón than trấu làm tăng hàm lượng P nhờ khả năng giữ photphat và tác động của điều kiện yếm khí, tương tự như Gamage, Basnayake, De Costa and Merah [138] đã báo cáo. NT kết hợp than trấu và phân bò đạt hàm lượng OC cao nhất (4,08%), vượt trội so với khi không cải tạo, Gamage, Basnayake, Costa and Vidanagamage [139] cũng đã báo cáo với kết quả tương tự. NT kết hợp than trấu với vôi và NT kết hợp than trấu với phân bò đã cho hàm lượng K, Ca, và Mg trao đổi đều tăng, nhấn mạnh tác động tích cực của sự kết hợp này đối với các chất dinh dưỡng trong đất. Tưới ngập giúp duy trì OC nhờ làm chậm quá trình phân hủy hữu cơ và cải thiện trao đổi cation, đặc biệt ở NT kết hợp than trấu và phân bò, phù hợp với nghiên cứu của Xu, Zhan, Cao, Ge, Ye, Tian and Cai [140]. Đồng thời, tưới ngập cũng làm giảm độc tính của Fe và Mn, tăng khả năng giữ dinh dưỡng và cải thiện CEC, tương tự như Pierce, Moore, Larsen and Pezeshki [141] đã báo cáo. Sự kết hợp giữa than trấu với vôi hoặc phân bò là hiệu quả nhất trong việc cải thiện pH đất, giảm độ chua và tăng tính dinh dưỡng. Tuy nhiên, chế độ tưới ngập đôi khi không đủ hiệu quả trong việc giảm độ mặn hoặc Na trao đổi, đòi hỏi kết hợp với các biện pháp tưới khác để đạt hiệu quả tối ưu.

* Chế độ nước độ ẩm 60%

Đặc tính hóa học đất phèn nhiễm mặn sau thí nghiệm, chế độ độ ẩm 60% (Bảng 3.12).

Bảng 3.12 Ảnh hưởng của các vật liệu lên đặc tính hóa học đất phèn nhiễm mặn với chế độ nước độ ẩm 60% ở điều kiện nhà lưới (tháng 4 đến tháng 7, năm 2022)

Đặc tính đất	Không than trấu			Có than trấu		
	Đối chứng	Vôi	Phân bò	Than trấu	Than trấu + vôi	Than trấu + phân bò
Tính axit						
pH	6,12^{bc} ± 0,02	6,22^{ab} ± 0,07	6,10^{c} ± 0,02	6,20^{bc} ± 0,02	6,32^{a} ± 0,01	6,18^{bc} ± 0,02
SO_4^{2-} (g/kg)	0,70^{a} ± 0,06	0,43^{d} ± 0,01	0,53^{bc} ± 0,02	0,72^{a} ± 0,03	0,44^{cd} ± 0,02	0,57^{b} ± 0,02
Độ chua trao đổi (cmol(+)/kg)	2,87^{a} ± 0,08	2,72^{a} ± 0,20	2,86^{a} ± 0,20	2,65^{a} ± 0,17	2,76^{a} ± 0,19	2,83^{a} ± 0,07
H^+ trao đổi (cmol(+)/kg)	1,31^{ab} ± 0,06	1,22^{bc} ± 0,01	1,37^{a} ± 0,02	1,11^{c} ± 0,03	1,00^{d} ± 0,03	1,26^{b} ± 0,05
Tính mặn						
EC (dS/m)	1,43^{a} ± 0,06	1,17^{b} ± 0,06	1,30^{ab} ± 0,04	1,21^{b} ± 0,03	1,30^{ab} ± 0,04	1,26^{b} ± 0,06
Cl^- (g/kg)	12,04^{b} ± 0,52	12,40^{b} ± 0,28	14,30^{a} ± 0,48	12,40^{b} ± 0,62	11,70^{b} ± 0,50	15,42^{a} ± 0,29
Na trao đổi (mg/kg)	5.180^{b} ± 90,53	5.287^{ab} ± 190,82	5.352^{ab} ± 173,77	5.455^{ab} ± 90,12	5.108^{b} ± 378,56	5.844^{a} ± 83,04
Tính độc						
Al trao đổi (mg/kg)	459,14^{a} ± 23,30	427,75^{a} ± 23,89	423,87^{a} ± 16,06	421,45^{a} ± 10,84	405,51^{a} ± 24,80	417,23^{a} ± 4,77
Fe trao đổi (mg/kg)	229,12^{a} ± 5,95	162,75^{c} ± 7,16	226,31^{a} ± 8,18	171,63^{bc} ± 10,90	167,32^{bc} ± 10,18	188,46^{b} ± 3,53
Mn trao đổi (mg/kg)	149,41^{bc} ± 10,95	136,59^{c} ± 9,01	158,44^{ab} ± 10,41	173,81^{a} ± 7,46	134,33^{c} ± 3,80	166,69^{ab} ± 6,54
Tính dinh dưỡng						
CEC (cmol(+)/kg)	10,06^{c} ± 0,34	12,25^{b} ± 0,39	12,06^{b} ± 0,43	13,41^{ab} ± 0,45	13,34^{ab} ± 0,50	14,54^{a} ± 0,08
NH_4^+ (mg/kg)	160,06^{c} ± 7,60	181,66^{b} ± 4,35	203,28^{a} ± 8,61	177,80^{b} ± 8,13	170,44^{bc} ± 5,61	184,15^{b} ± 7,40
Mehlich-1 P (mg/kg)	10,16^{c} ± 0,33	13,22^{b} ± 1,05	14,01^{ab} ± 0,30	15,14^{ab} ± 0,83	15,78^{a} ± 0,60	14,38^{ab} ± 0,61
OC (%)	2,78^{b} ± 0,22	2,95^{b} ± 0,36	2,92^{b} ± 0,22	3,78^{a} ± 0,08	3,73^{a} ± 0,23	3,96^{a} ± 0,13
K trao đổi (mg/kg)	1.998^{b} ± 75,01	2.155^{ab} ± 112,17	2.257^{ab} ± 128,35^{a}	2.377^{a} ± 75,08	2.331^{a} ± 65,22	2.408^{a} ± 64,09
Ca trao đổi (mg/kg)	6.306^{b} ± 146,62	7.283^{a} ± 149,32	6.983^{ab} ± 355,85	7.043^{ab} ± 378,84	7.154^{a} ± 252,75	7.305^{a} ± 263,20
Mg trao đổi (mg/kg)	2.699^{ab} ± 66,20	2.973^{a} ± 144,67	2.618^{b} ± 100,38	2.741^{ab} ± 102,61	2.777^{ab} ± 109,95	2.737^{ab} ± 34,76

Đối với tính axit, hầu hết các nghiệm thức (NT) đều giúp tăng pH đất so với đối chứng, trong đó NT kết hợp vôi và than trấu đạt pH cao nhất (6,32), hiệu quả hơn so với NT chỉ bón vôi, chỉ bón phân bò và chỉ bón than trấn. NT chỉ bón vôi và NT vôi kết hợp than trấu cũng làm giảm SO_4^{2-} đáng kể với mức thấp lần lượt là 0,43 và 0,44 g/kg), cho thấy tác dụng giảm oxy hóa lưu huỳnh tốt nhất. Chế độ nước độ ẩm 60% giúp hạn chế quá trình tạo axit sulfuric từ Pyrite (FeS_2), giảm SO_4^{2-} trong đất, tương đồng với nghiên cứu của Yasin [142]. NT kết hợp than trấu và vôi và NT than trấu kết hợp với phân bò cũng làm giảm SO_4^{2-}, có thể do tác động của chế độ nước bán ngập ngăn oxy hóa sulfur như Chen, Tang, Li, Zhang, Xie and Zheng [143] đã báo cáo. Về độ chua trao đổi, không có khác biệt có ý nghĩa giữa các nghiệm thức.

Tính mặn của đất ở chế độ độ ẩm 60% giảm khi áp dụng NT chỉ bón vôi cho EC thấp nhất (1,17 dS/m) có ý nghĩa thống kê. Điều này cho thấy vôi cải thiện đáng kể tính mặn, NT chỉ bón than trấu cũng cải thiện EC tốt nhưng thấp hơn NT chỉ bón vôi (1,21 dS/m) và hiệu quả hơn NT kết hợp với vôi hoặc phân bò (EC lần lượt 1,30 và 1,26 dS/m). Độ ẩm 60% giúp hạn chế tích tụ muối, giảm bay hơi nước và nồng độ Na^+, Cl^- gây hại, tương đồng với báo cáo của Yadav, Irfan, Ahmad and Hayat [144]. Hàm lượng Cl^- giảm rõ rệt khi áp dụng NT than trấu kết hợp với vôi (11,70 g/kg) nhưng lại tăng cao nhất khi NT than trấu kết hợp với phân bò (15,42 g/kg) cho kết quả cao hơn so với đối chứng (12,04 g/kg). Tương tự, hàm lượng Na^+ trao đổi giảm đáng kể khi áp dụng NT than trấu kết hợp vôi (5.108 mg/kg) nhưng lại tăng cao nhất ở NT than trấu kết hợp phân bò (5.844 mg/kg), chế độ nước độ ẩm 60% giúp hạn chế tích tụ muối, cải thiện chất lượng đất và giảm tác động xấu đến cây trồng, kết quả này phù hợp với kết quả nghiên cứu của Hamoud, Saleem, Zia-ur-Rehman, Shaghaleh, Usman, Rizwan, Alharby, Alamri, Al-Sarraj and Alabdallah [145].

Đối với tính độc, NT đối chứng có hàm lượng Al, Fe, và Mn cao nhất, cho thấy các các NT còn lại đều có khả năng giảm tính độc kim loại. Trong đó, ở NT than trấu kết hợp với vôi cho hàm lượng Al, Fe, Mn trao đổi thấp nhất lần lượt là 405,15; 167,32; 134,33 mg/kg và có ý nghĩa thống kê đối với Fe và Mn trao đổi. NT này chứng minh

hiệu quả vượt trội nhất trong cải thiện độc tính kim loại của đất phèn nhiễm mặn. Chế độ nước độ ẩm 60% hạn chế sự di chuyển của ion Al, Fe, Mn, giúp giảm độc tính đất.

Chế độ nước độ ẩm 60% giúp cải thiện tính dinh dưỡng của đất, với CEC của các NT cao hơn so với đối chứng. NT kết hợp than trấu với phân bò cho CEC, NH_4^+, OC, K và Ca cao nhất lần lượt là 14,54 cmol(+)/kg, 184,15 mg/kg, 3,96%, 2.408 và 7.305 mg/kg đều có ý nghĩa thống kê. NT này giúp cải thiện khả năng giữ cation và cung cấp dinh dưỡng nitơ, canxi, OC cho đất. Các NT cũng nâng cao Mehlich-1 P và Mg trao đổi, đặc biệt là NT than trấu kết hợp với vôi. Chế độ nước độ ẩm 60% thúc đẩy phân hủy chất hữu cơ, cung cấp dinh dưỡng cho cây mà không gây ngập úng, từ đó cải thiện khả năng trao đổi cation và giữ dinh dưỡng của đất. NT kết hợp giữa vôi và than trấu mang lại hiệu quả tốt nhất trong việc cải thiện tính axit, giảm mặn, độc tính kim loại; NT kết hợp giữa than trấu và phân bò lại tăng cường dinh dưỡng cho đất phèn nhiễm mặn. Hamoud, Saleem, Zia-ur-Rehman, Shaghaleh, Usman, Rizwan, Alharby, Alamri, Al-Sarraj and Alabdallah [145] cũng đã báo cáo chế độ nước này giúp hỗ trợ cân bằng quá trình oxy hóa khử, tối ưu hóa các vật liệu thân thiện môi trường trong cải tạo đất phèn nhiễm mặn.

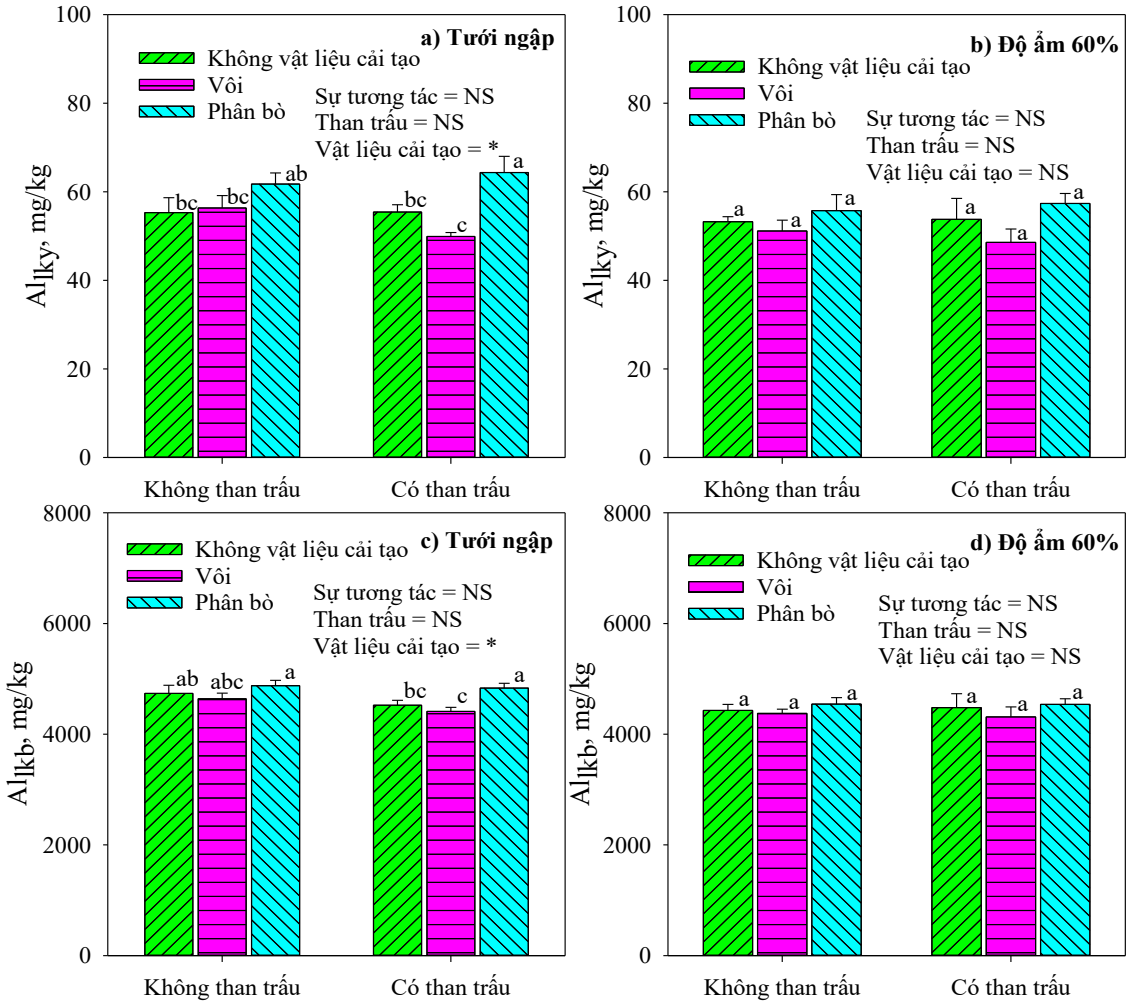
3.2.2.3 Các thành phần Al trong đất sau thí nghiệm

Nghiên cứu thành phần nhôm trong đất phèn nhiễm mặn là quan trọng vì nhôm là thành phần cấu trúc chính của đất phèn, tồn tại trong khoáng sét và hợp chất vô cơ. Khi oxy hóa ở pH thấp, nhôm giải phóng ion Al^{3+}, làm tăng tính axit và gây độc cho môi trường đất. Ion nhôm hòa tan có thể ức chế sự phát triển rễ cây và ảnh hưởng đến sự hấp thu nước, dinh dưỡng của cây [146]. Vì vậy, kiểm soát nhôm trong đất là yếu tố quan trọng trong cải tạo đất phèn nhiễm mặn và phát triển nông nghiệp bền vững.

Al trao đổi ($Al_{trđ}$) là dạng nhôm hòa tan dễ hấp thu và có tính độc cao, gây ức chế phát triển rễ và giảm khả năng hấp thu nước, dinh dưỡng. $Al_{trđ}$ cần được chuyển hóa để giảm độc tính đất phèn. Al liên kết yếu với chất hữu cơ (Al_{lky}) có hòa tan thấp hơn $Al_{trđ}$, nhưng có thể chuyển hóa lại thành $Al_{trđ}$ dưới pH thấp hoặc mặn. Tăng cường liên kết giữa Al và chất hữu cơ giúp giữ Al ở dạng ít độc. Al liên kết bền (Al_{lkb}) có

hòa tan thấp và có thể chuyển hóa lại thành $Al_{trđ}$ hoặc Al_{lky} trong điều kiện đất mặn hoặc pH thấp. Al vô định hình ($Al_{vđh}$) ít hòa tan và ít độc, nhưng có thể tham gia phản ứng hóa học trong đất. Al kết tinh (Al_{kt}) là dạng bền nhất, không gây độc do không dễ hấp thu, và giúp giảm độc tính lâu dài cho đất. Al kết tinh chặt (Al_{ktc}) xác định chính xác hàm lượng Al kết tinh chặt, không lẫn với các dạng Al khác. Hình 3.7, Hình 3.8, Hình 3.9 lần lượt trình bày hàm lượng Al liên kết yếu (Al_{lky}) và bền (Al_{lkb}) với chất hữu cơ, Al vô định hình ($Al_{vđh}$) và Al kết tinh (Al_{kt}), Al trao đổi ($Al_{trđ}$) và Al kết tinh chặt (Al_{ktc}) ở chế độ nước tưới ngập và độ ẩm 60%.

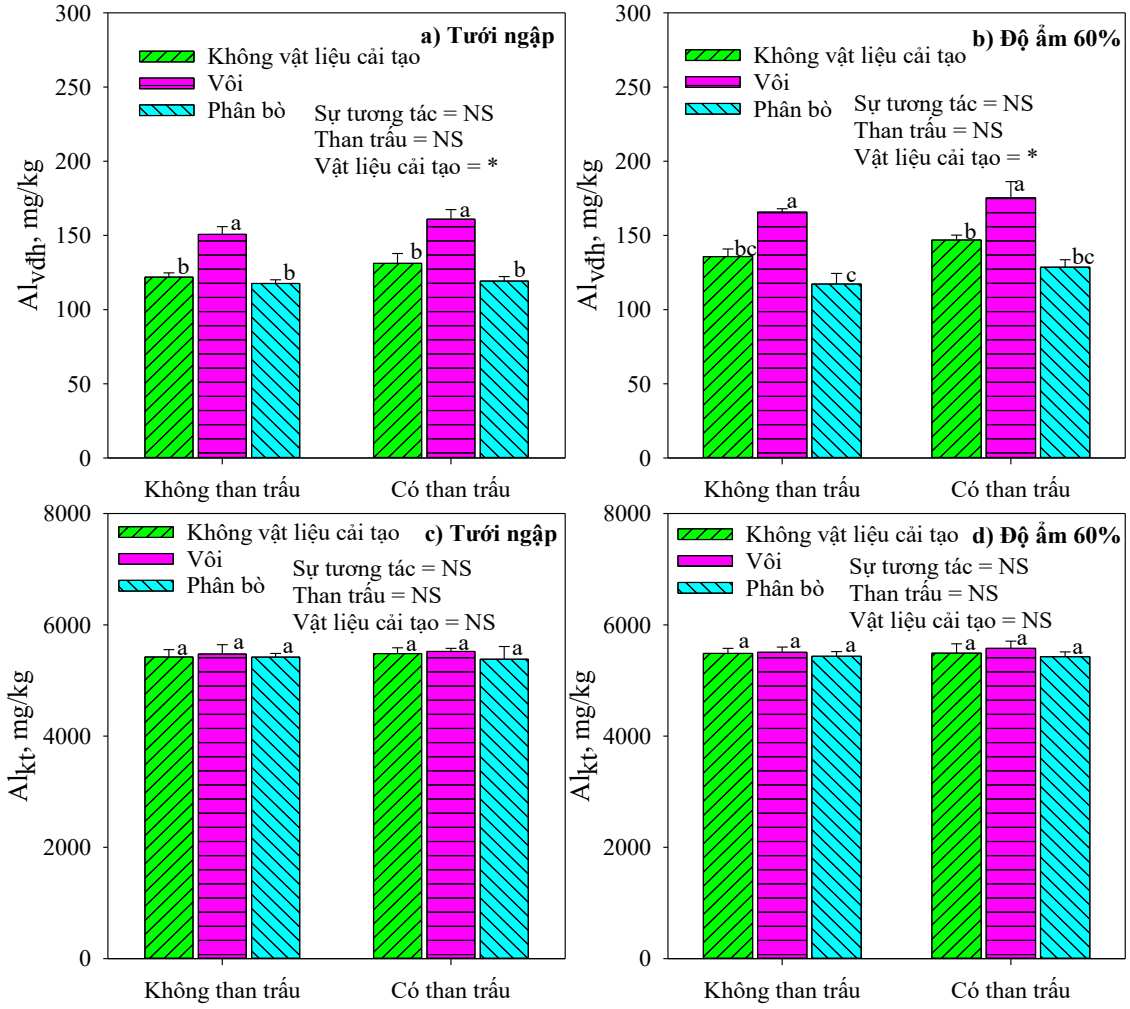
Hàm lượng Al_{lky} thay đổi giữa các nghiệm thức (NT) ở chế độ nước tưới ngập (Hình 3.7a). NT kết hợp than trấu và phân bò cho hàm lượng Al_{lky} cao nhất (64,36 mg/kg), cho thấy sự tăng cường liên kết yếu với nhôm. NT than trấu kết hợp với vôi cho hàm lượng Al_{lky} thấp nhất (49,93 mg/kg), chứng tỏ NT này đã làm giảm nhôm liên kết yếu. Ở nhóm yếu tố không sử dụng than trấu (NT đối chứng, NT chỉ bón vôi, NT chỉ bón phân bò) cho các giá trị tương đương, trong khi NT chỉ bón than trấu thấp hơn NT than trấu kết hợp với phân bò nhưng cao hơn NT than trấu kết hợp với vôi. Điều này chỉ ra rằng sự phân giải của than trấu và phân bò trong môi trường ngập làm tăng hàm lượng Al_{lky}. Ở chế độ ẩm 60%, hàm lượng Al_{lky} không có sự khác biệt có ý nghĩa thống kê (Hình 3.7b), cho thấy độ ẩm 60% làm đồng đều các yếu tố tác động lên Al_{lky}, giảm sự khác biệt trong liên kết yếu giữa nhôm và chất hữu cơ. Về Al_{lkb}, ở chế độ tưới ngập (Hình 3.7c), NT chỉ bón phân bò làm hàm lượng Al_{lkb} cao nhất (4.877 mg/kg) và NT kết hợp than trấu với vôi cho giá trị thấp nhất (4.414 mg/kg). Sự khác biệt này có thể do khả năng cố định nhôm mạnh mẽ của phân bò trong môi trường ngập. Ở độ ẩm 60% (Hình 3.7d), hàm lượng Al_{lkb} không có sự khác biệt có ý nghĩa thống kê giữa các yếu tố, cho thấy độ ẩm 60% giúp ổn định liên kết mạnh giữa nhôm và chất hữu cơ. Tóm lại, chế độ tưới ngập làm tăng sự khác biệt về hàm lượng Al_{lky} và Al_{lkb} giữa các yếu tố, trong khi độ ẩm 60% giảm sự khác biệt này, cho thấy sự thay đổi hàm lượng nhôm liên kết với chất hữu cơ phụ thuộc vào điều kiện thủy lợi và vật liệu bổ sung như than trấu và phân bò.



Hình 3.7 Ảnh hưởng của các vật liệu lên Al liên kết yếu (Al_{lky}) - tưới ngập (a), độ ẩm 60% (b) và Al liên kết bền (Al_{lkb}) - tưới ngập (c), độ ẩm 60% (d) sau thí nghiệm

Chế độ tưới ngập (Hình 3.8a), hàm lượng $Al_{vđh}$ cao nhất (161,01 mg/kg) được ghi nhận ở NT kết hợp than trấu và vôi, cho thấy NT này làm tăng nhôm vô định hình. NT chỉ bón vôi và NT chỉ bón than trấu cũng cho hàm lượng cao, nhưng thấp hơn NT kết hợp than trấu và vôi. Điều này chứng tỏ vôi và than trấu cùng nhau làm tăng và cố định nhôm vô định hình. Tương tự, điều kiện độ ẩm 60% (Hình 3.8b), NT kết hợp vôi và than trấu tiếp tục cho hàm lượng $Al_{vđh}$ cao nhất (175,38 mg/kg), khẳng định vai trò quan trọng của sự kết hợp này trong môi trường ẩm. NT chỉ bón vôi cũng làm tăng hàm lượng $Al_{vđh}$, nhưng không hiệu quả bằng NT kết hợp vôi và than trấu. Về Al_{kt}, ở cả chế độ tưới ngập và độ ẩm 60% (Hình 3.8 c,d), hàm lượng Al_{kt} không khác biệt có ý nghĩa thống kê giữa các yếu tố thí nghiệm, cho thấy điều kiện thí nghiệm và

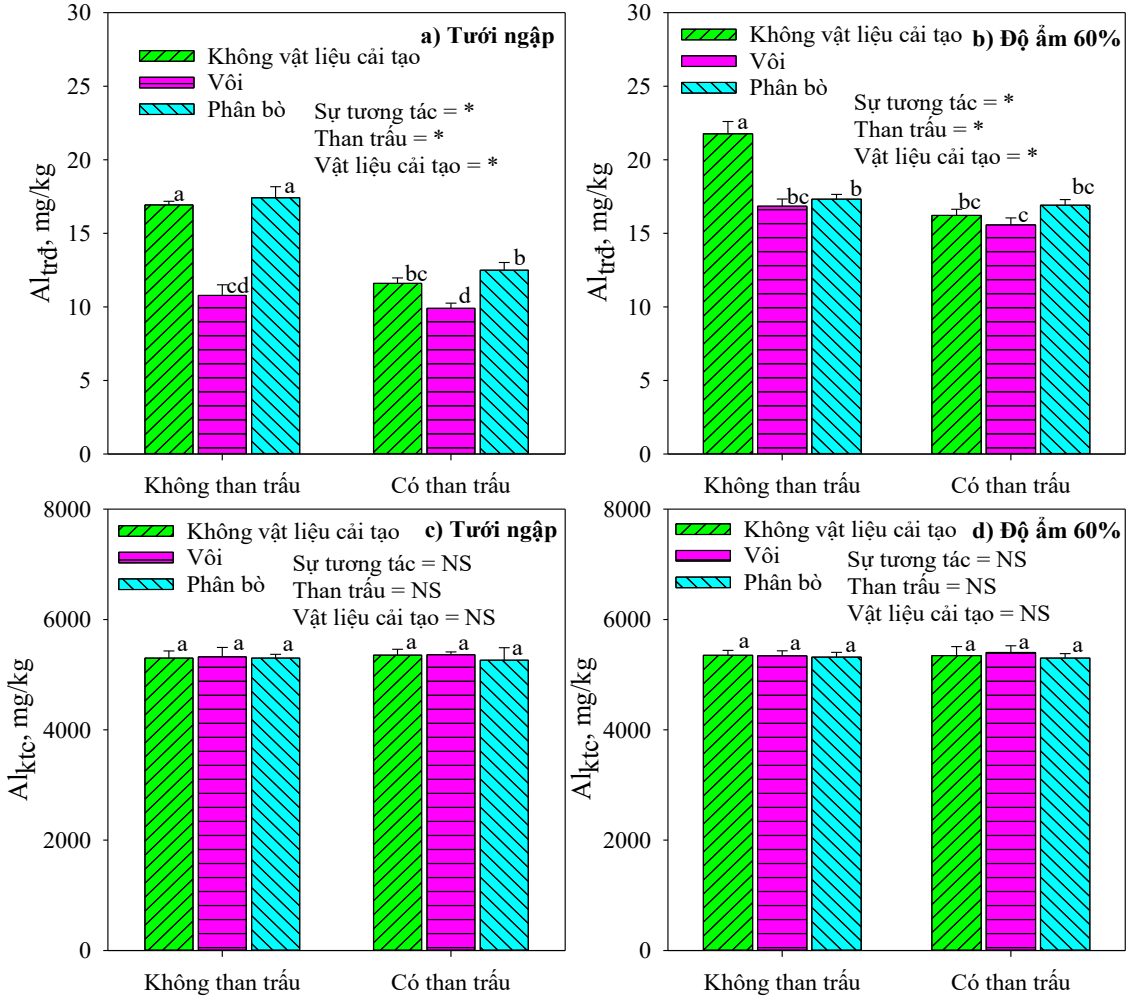
các vật liệu thân thiện môi trường này không ảnh hưởng đến sự thay đổi nhôm kết tinh trong đất phèn nhiễm mặn. Tóm lại, Al_{kt} chịu ảnh hưởng rõ rệt từ các yếu tố thí nghiệm, đặc biệt là ở NT kết hợp vôi và than trấu, trong khi Al_{kt} không bị ảnh hưởng bởi bất kỳ NT nào.



Hình 3.8 Ảnh hưởng của các vật liệu lên Al vô định hình ($Al_{vđh}$) - tưới ngập (a), độ ẩm 60% (b) và Al kết tinh (Al_{kt}) - tưới ngập (c), độ ẩm 60% (d) sau thí nghiệm

Chế độ tưới ngập (Hình 3.9a), hàm lượng $Al_{trđ}$ thấp nhất (9,91 mg/kg) được ghi nhận ở NT kết hợp than trấu và vôi, trong khi NT chỉ bón phân bò cho hàm lượng $Al_{trđ}$ cao nhất (17,42 mg/kg). Điều này cho thấy vôi giảm đáng kể $Al_{trđ}$, và giảm nhiều hơn khi vôi kết hợp với than trấu. Tương tự, dưới điều kiện độ ẩm 60% (Hình 3.9b), NT kết hợp than trấu và vôi tiếp tục làm giảm $Al_{trđ}$ (15,58 mg/kg), trong khi NT đối chứng có hàm lượng $Al_{trđ}$ cao nhất. Điều này cho thấy NT này làm giảm $Al_{trđ}$ trong điều kiện

độ ẩm 60%, mặc dù sự khác biệt giữa các NT không lớn như trong chế độ tưới ngập nhưng vẫn có ý nghĩa thống kê. Về Al_{ktc}, dưới cả chế độ tưới ngập và độ ẩm 60% (Hình 3.9 c,d), hàm lượng Al_{ktc} không có sự khác biệt có ý nghĩa thống kê giữa các yếu tố thí nghiệm, cho thấy các điều kiện này không ảnh hưởng đến nhôm kết tinh chặt. Tóm lại, hàm lượng $Al_{trđ}$ bị ảnh hưởng rõ rệt bởi các yếu tố thí nghiệm và điều kiện tưới ngập, đặc biệt ở NT kết hợp than trấu và vôi. Trong khi đó, Al_{ktc} ổn định hơn và không chịu tác động lớn từ các yếu tố thí nghiệm hay điều kiện nước.



Hình 3.9 Ảnh hưởng của các vật liệu lên Al trao đổi ($Al_{trđ}$) - tưới ngập (a), độ ẩm 60% (b) và Al kết tinh chặt (Al_{ktc}) - tưới ngập (c), độ ẩm 60% (d) sau thí nghiệm

Sự tác động của các vật liệu thân thiện môi trường trong việc thay đổi các thành phần nhôm trong đất là khác nhau, đặc biệt là Al trao đổi, tùy thuộc vào tính chất hóa học của từng vật liệu. Than trấu có khả năng làm giảm hàm lượng Al^{3+} trao đổi thông qua

quá trình hấp phụ hoặc tạo phức, nhưng lượng nhôm này có thể chuyển sang dạng ít độc hại hơn như nhôm liên kết yếu hoặc bền với hợp chất hữu cơ. Với phân bò, các hợp chất hữu cơ phong phú trong phân bò có thể tạo phức chelate với Al^{3+}, giúp giảm tính độc của nhôm trao đổi và chuyển một phần sang dạng nhôm hữu cơ. Vôi, nhờ tính kiềm, trung hòa H^+ trao đổi trong đất, tăng pH và làm nhôm trao đổi chuyển hóa thành Al kết tinh. Tổng lượng nhôm trong đất trước và sau thí nghiệm thường không thay đổi, nhưng sự phân bố giữa các dạng nhôm (trao đổi, liên kết yếu hoặc bền với chất hữu cơ và kết tinh) thay đổi rõ rệt. Nghiên cứu của Lauricella, Butterly, Clark, Sale, Li and Tang [147] đã chỉ ra rằng bổ sung vôi hoặc than sinh học có thể giảm đáng kể Al trao đổi, trong khi phân bò giúp tăng tính bền vững của các dạng nhôm liên kết hữu cơ. Một nghiên cứu thực nghiệm khác của Thakuria, Hazarika and Krishnappa [148] cũng cho thấy các tác động này đóng vai trò quan trọng trong việc cải thiện độ phì nhiêu của đất phèn nhiễm mặn.

3.2.2.4 Các chỉ số chất lượng đất sau thí nghiệm

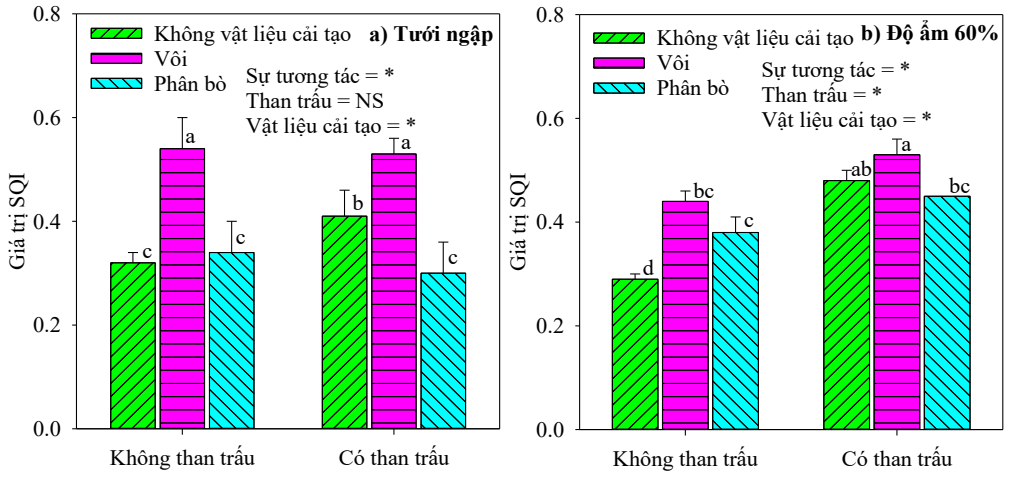
Năm nhân tố giải thích 68,6% biến thiên của 17 thông số đất thông qua phân tích PCA/FA (Phụ bảng 2.3 - Phụ lục 2), cụ thể: nhân tố 1 (CEC, P, OC, K trao đổi; 23,9%), nhân tố 2 (Cl^-, H^+, Al, Fe trao đổi; 17,9%), nhân tố 3 (pH, EC, SO_4^{2-}, độ chua, Ca, Mn trao đổi; 11,9%), nhân tố 4 (Na, Mg trao đổi; 8,1%), nhân tố 5 (NH_4^+; 6,8%). Trọng số các thông số được dùng tính chỉ số chất lượng đất (SQI) để đánh giá tác động của than trấu, vôi, phân bò (Hình 3.10a, 3.10b).

* Chỉ số chất lượng đất tổng thể sau thí nghiệm

Trong điều kiện tưới ngập (Hình 3.10a), các yếu tố thí nghiệm có sự khác biệt rõ rệt về SQI. SQI cao nhất ở NT chỉ bón vôi và NT kết hợp vôi và than trấu (0,54 và 0,53), thấp nhất NT kết hợp than trấu với phân bò (0,3). Điều này cho thấy NT chỉ bón vôi và NT vôi kết hợp với than trấu đã cải thiện chất lượng đất đáng kể, trong khi NT chỉ bón phân bò và NT chỉ bón than trấu kém hiệu quả hơn. Tưới ngập tạo môi trường thuận lợi hơn cho cải thiện chất lượng đất, đặc biệt khi áp dụng NT vôi kết hợp than trấu. Ở điều kiện độ ẩm 60% (Hình 3.10b), sự khác biệt giữa các yếu tố thí nghiệm

vẫn tương tự như trong điều kiện tưới ngập. SQI cao nhất đạt được vẫn là ở NT than trấu kết hợp vôi (0,53), thấp nhất ở NT đối chứng (0,29). Ngoài ra, NT chỉ bón than trấu và NT phân bò kết hợp với than trấu cũng làm tăng SQI cao hơn so với tưới ngập. Điều này cho thấy tưới ngập tạo sự khác biệt đáng kể về chất lượng đất ở NT vôi kết hợp than trấu nhưng độ ẩm 60% mang lại hiệu quả cải thiện đồng đều hơn.

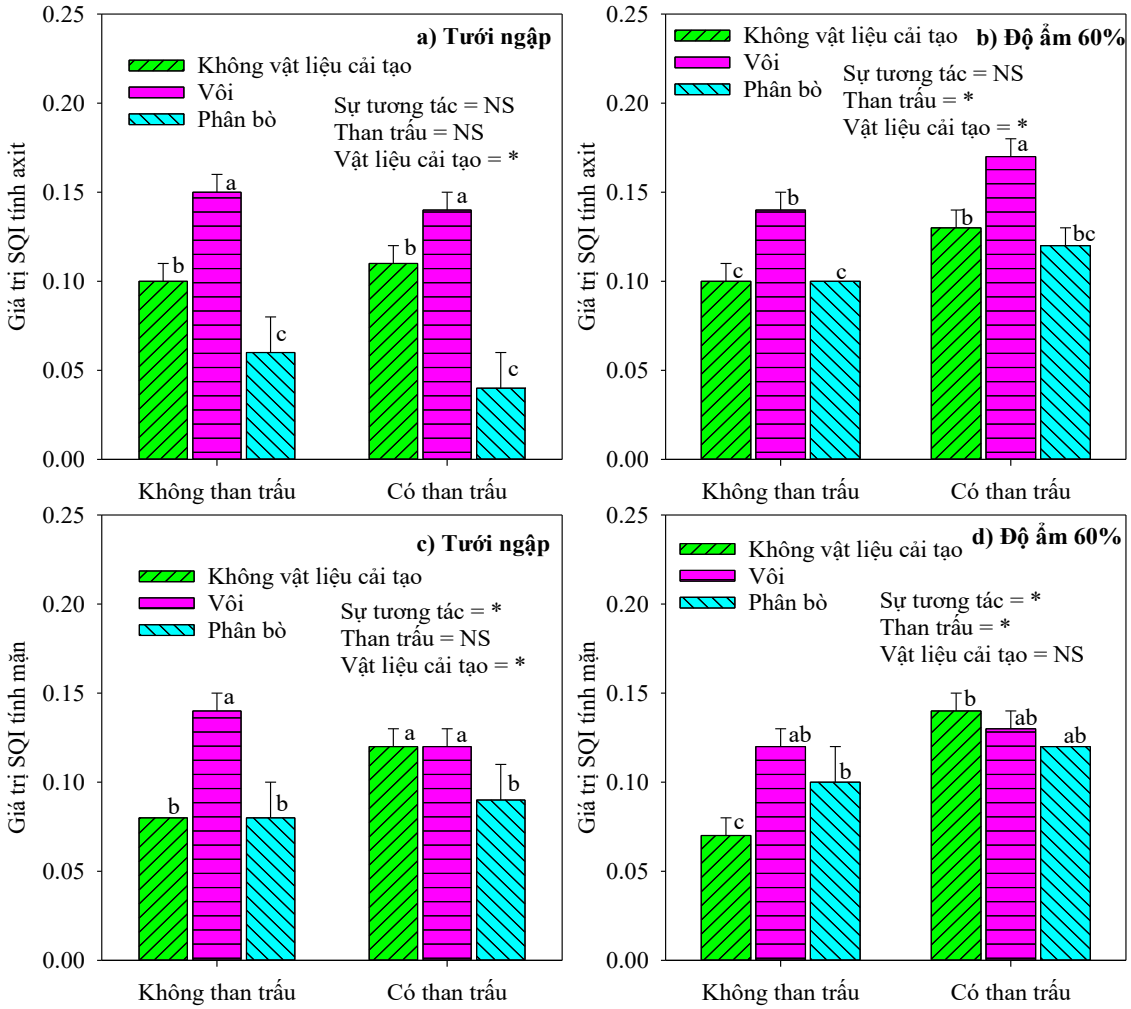
Trong cả hai điều kiện nước, NT chỉ bón than trấu vẫn cho giá trị SQI khá cao, cho thấy khả năng cải thiện chất lượng đất phèn nhiễm mặn, đặc biệt ở NT than trấu kết hợp với vôi. Các nghiên cứu khác cũng chỉ ra rằng SQI của đất bón than trấu cao hơn so với đất không bón than trấu [149-151]. Đối với NT chỉ bón vôi và NT vôi kết hợp với than trấu, đều có SQI cao. Ngược lại, NT chỉ bón phân bò và NT phân bò kết hợp với than trấu có SQI thấp hơn, đặc biệt trong điều kiện tưới ngập. Tuy nhiên, trong điều kiện độ ẩm 60%, NT kết hợp phân bò và than trấu cải thiện rõ rệt so với NT chỉ bón phân bò. Tưới ngập tạo điều kiện thuận lợi hơn cho việc cải tạo đất, đặc biệt NT kết hợp vôi và than trấu, mang lại kết quả chất lượng đất cao nhất. Trong điều kiện này, NT chỉ bón than trấu, than trấu kết hợp với phân bò cho kết quả tốt hơn so với tưới ngập, cho thấy sự tương tác giữa các vật liệu có thể thay đổi theo điều kiện tưới. Nhìn chung, vôi là vật liệu quan trọng nhất trong cải tạo chất lượng đất, trong khi phân bò cần kết hợp với các vật liệu khác để đạt hiệu quả tốt hơn.



Hình 3.10 SQI tổng thể sau thí nghiệm với chế độ nước tưới ngập (a), độ ẩm 60% (b) ở điều kiện nhà lưới (tháng 4 đến tháng 7, năm 2022)

* Các chỉ số chất lượng đất thành phần sau thí nghiệm

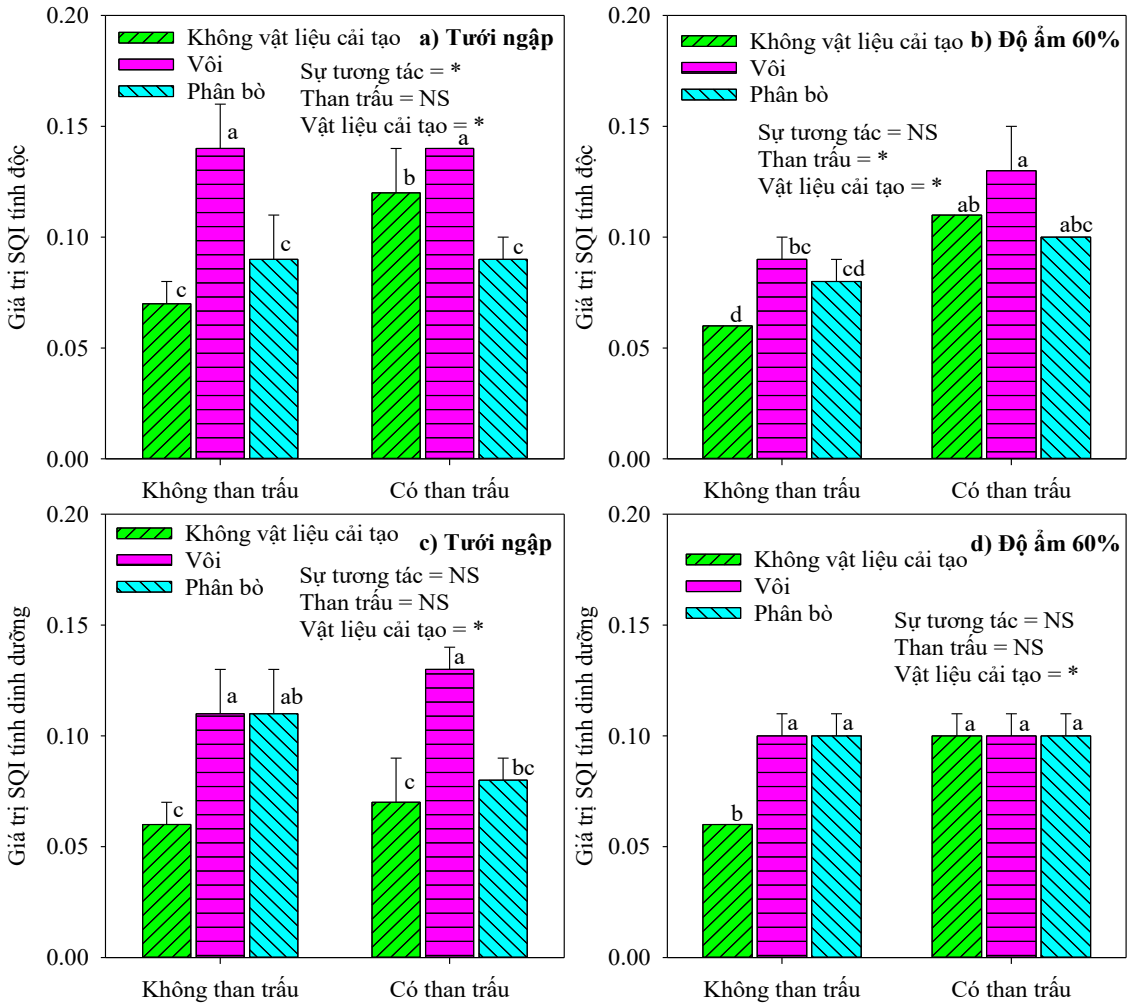
Chất lượng đất phèn nhiễm mặn được chia thành 4 nhóm: tính axit, tính mặn, tính độc và tính dinh dưỡng. Các nhóm tính chất này được trình bày ở Hình 3.11 và 3.12. Về tính axit (pH, hàm lượng SO_4^{2-}, độ chua và H^+ trao đổi), trong điều kiện tưới ngập (Hình 3.11a), nghiệm thức (NT) kết hợp vôi và than trấu cho giá trị SQI cao nhất (0,14), chứng tỏ cải thiện đáng kể khả năng giảm độ axit. NT chỉ bón vôi có giá trị SQI cao hơn (0,15), cho thấy vai trò quan trọng của vôi trong việc giảm axit đất. NT kết hợp phân bò và than trấu, cũng như NT chỉ bón phân bò có SQI thấp nhất (0,04 và 0,06), thể hiện hiệu quả kém trong giảm axit. Trong điều kiện độ ẩm 60% (Hình 3.11b), NT kết hợp vôi và than trấu vẫn có SQI cao nhất (0,17), nhưng mức độ chênh lệch giữa các vật liệu khác cao hơn so với tưới ngập. NT chỉ bón phân bò và NT phân bò kết hợp với than trấu có SQI khá cao lần lượt là 0,13 và 0,12. Nhìn chung, NT vôi kết hợp với than trấu, cải thiện đáng kể khả năng giảm độ axit đất. Tưới ngập làm tăng tác động của các vật liệu thân thiện môi trường, trong khi ở độ ẩm 60%, tác động này rõ rệt hơn. Về tính mặn (EC, Cl^- và Na trao đổi), trong điều kiện tưới ngập (Hình 3.11c), NT chỉ bón vôi có giá trị SQI cao nhất (0,14), cho thấy hiệu quả tốt trong việc giảm độ mặn đất. NT chỉ bón than trấu và NT kết hợp than trấu với vôi có giá trị SQI bằng nhau (0,12), cải thiện đáng kể tính mặn. NT đối chứng và NT chỉ bón phân bò có SQI thấp nhất (0,08), thể hiện hiệu quả kém. Trong điều kiện độ ẩm 60% (Hình 3.11d), NT chỉ bón than trấu có SQI cao nhất (0,14), tiếp theo là NT chỉ vôi kết hợp với than trấu (0,13). Vôi đóng vai trò quan trọng trong việc giảm độ axit và độ mặn của đất. Khi sử dụng than trấu đơn lẻ làm giảm độ axit tốt hơn phân bò, nhưng không bằng vôi. Kết hợp vôi và than trấu giúp tối ưu hóa cải thiện cả tính axit và tính mặn. Phân bò, dù không hiệu quả trong việc giảm axit và mặn khi sử dụng đơn lẻ, vẫn có tác dụng khi kết hợp với than trấu, nhưng kém hơn so với vôi. Điều kiện tưới ngập giúp cải thiện chất lượng đất, đặc biệt là tính mặn, do sự hòa tan các muối và kim loại gây mặn. Điều kiện độ ẩm 60% cải thiện chất lượng đất nhưng ít hiệu quả hơn so với tưới ngập. Tóm lại, vôi là vật liệu thân thiện môi trường cải tạo hiệu quả nhất, đặc biệt khi kết hợp với than trấu và điều kiện tưới ngập có hiệu quả hơn.



Hình 3.11 SQI axit (a), (b) và mặn (c), (d) sau thí nghiệm với chế độ nước lần lượt là tưới ngập và độ ẩm 60% ở điều kiện nhà lưới (tháng 4 đến tháng 7, năm 2022)

Đối với tính độc (hàm lượng Al, Fe và Mn trao đổi) ở điều kiện tưới ngập (Hình 3.12a), NT chỉ bón vôi và NT kết hợp vôi và than trấu cho giá trị SQI tính độc cao nhất (0,15), cho thấy khả năng làm giảm độc tính tốt nhất. Mặt khác, ở điều kiện độ ẩm 60% (Hình 3.12b), NT kết hợp vôi và than trấu vẫn có giá trị SQI cao nhất (0,13), nhưng mức độ chênh lệch giữa các yếu tố khác giảm đi so với tưới ngập. Khi áp dụng NT chỉ bón vôi hay NT chỉ bón than trấu cũng đạt giá trị SQI khá tốt (lần lượt là 0,09 và 0,11), thể hiện khả năng giảm độc tính đáng kể dưới điều kiện độ ẩm 60%. Trong cả hai điều kiện tưới, NT vôi kết hợp với than trấu có tác dụng rõ rệt trong việc giảm độc tính của đất. Tưới ngập giúp tăng cường khả năng giảm độc tính, đặc biệt là đối với các NT có bón vôi. Đối với tính dinh dưỡng (bao gồm 7 thông số đất) ở điều kiện

tưới ngập (Hình 3.12c), NT vôi kết hợp than trấu vẫn có giá trị SQI tính dinh dưỡng cao nhất (0,13), cho thấy khả năng cải thiện dinh dưỡng đất tốt nhất. Khi áp dụng NT chỉ bón vôi hoặc NT chỉ bón phân bò cũng có giá trị cao, đều đạt 0,11, thể hiện rằng vôi hoặc phân bò cũng giúp cải thiện dinh dưỡng đất. Tương tự, điều kiện độ ẩm 60% (Hình 3.12d), tất cả NT kể cả đều cho giá trị SQI tính dinh dưỡng như nhau, đều bằng 0,1 và cao hơn đối chứng, cho thấy khả năng cải thiện dinh dưỡng ở các vật liệu là tương tự nhau. Trong cả hai điều kiện tưới, NT phân bò kết hợp với than trấu hoặc vôi và than trấu giúp cải thiện dinh dưỡng đất đáng kể. Điều kiện tưới ngập có xu hướng làm tăng giá trị dinh dưỡng, nhưng sự khác biệt giữa các NT không lớn bằng khi sử dụng độ ẩm 60%. Vôi, đặc biệt khi kết hợp với than trấu, hiệu quả rõ rệt trong việc giảm độc tính và cải thiện dinh dưỡng đất, nhất là trong điều kiện tưới ngập. Than trấu cũng cải thiện độc tính và dinh dưỡng, đặc biệt khi kết hợp với vôi hoặc phân bò, nhưng hiệu quả đơn lẻ của nó không cao bằng khi kết hợp với vật liệu khác. Phân bò khi sử dụng một mình không hiệu quả trong việc giảm độc tính và cải thiện dinh dưỡng, nhưng khi kết hợp với than trấu, lại rất hiệu quả, đặc biệt dưới điều kiện tưới ngập. Tưới ngập giúp cải thiện khả năng giảm độc tính và tăng dinh dưỡng đất, nhờ vào việc hòa tan các chất độc trong đất phèn. Trong khi đó, độ ẩm 60% cũng có tác dụng cải thiện chất lượng đất nhưng ít rõ rệt hơn, nhất là về mặt độc tính. Vôi, đặc biệt khi kết hợp với than trấu, là vật liệu hiệu quả nhất trong việc cải thiện cả độc tính và dinh dưỡng đất, với điều kiện tưới ngập tối ưu hóa hiệu quả này.



Hình 3.12 SQI độc (a), (b) và dinh dưỡng (c), (d) sau thí nghiệm với chế độ nước tưới ngập và độ ẩm 60% ở điều kiện nhà lưới (tháng 4 đến tháng 7, năm 2022)

3.2.3 Thảo luận chung

3.2.3.1 Tính axit

Vôi, với tính kiềm, nâng cao pH đất bằng cách trung hòa axit, giảm độ chua trao đổi từ 4,22 (đối chứng) xuống 3,79 cmol(+)/kg ở chế độ tưới ngập và từ 2,87 xuống 2,72 cmol(+)/kg ở chế độ độ ẩm 60% (Bảng 3.11 và 3.12). Tưới ngập, pH cải thiện nhanh hơn nhờ Ca^{2+} hòa tan tốt hơn trong nước, trong khi ở độ ẩm 60%, hiệu quả này chậm hơn do ít nước hòa tan vôi hơn. Vôi cũng tăng SQI tổng thể (0,6 ở tưới ngập và 0,44 ở độ ẩm 60% so với đối chứng) bằng cách trung hòa axit và giảm ion độc hại, kết quả này tương đồng với kết quả nghiên cứu của Li, Cui, Chang and Zhang [152]. Than

trấu, giàu carbon hữu cơ, cải thiện pH chậm hơn và kém hiệu quả hơn vôi trong việc giảm độ axit, điều này thể hiện rõ rệt qua SQI tính axit. Việc kết hợp than trấu và vôi mang lại hiệu quả cải tạo đất toàn diện. Carbon hữu cơ trong than trấu làm tăng khả năng giữ dưỡng chất, giúp trung hòa axit hiệu quả và bền vững hơn [95]. Trong môi trường ngập nước, pH giảm nhẹ do hợp chất axit (H_2S, SO_4^{2-}) từ quá trình khử sulfate nhưng vôi phản ứng nhanh làm tăng pH do than trấu khử sulfate chuyển SO_4^{2-} thành S^{2-}, rồi kết tủa với Fe^{2+} thành FeS/FeS_2, giảm sulfate tự do phù hợp với báo cáo của Yuan, Fitzpatrick, Mosley and Marschner [153]. Do đó, than trấu ổn định quá trình này bằng cách giữ carbon hữu cơ, hạn chế hợp chất axit. Trong điều kiện độ ẩm 60%, quá trình khử sulfate yếu hơn, –OH, –COOH trên bề mặt than trấu hấp phụ SO_4^{2-} vào lỗ xốp và cải thiện thoát nước, ngăn oxy hóa Pyrite sinh SO_4^{2-} mới nên vôi cải thiện pH vừa phải và than trấu duy trì ổn định. Sự phối hợp này giúp trung hòa axit mạnh mẽ và ổn định pH, thể hiện rõ qua SQI tính axit ở cả hai chế độ nước (Hình 3.11 a,b). Bên cạnh đó, kết hợp phân bò và than trấu giúp giảm H^+ trao đổi, tăng khả năng trao đổi cation và cải thiện pH đất bền vững. Phân bò cung cấp chất hữu cơ dễ phân hủy, giảm nhẹ độ axit, từ đó giảm độ chua tổng thể [154]. Trong môi trường ngập nước, phân hủy chất hữu cơ có thể sinh ra khí axit như CH_4 và H_2S, tạm thời làm giảm pH nếu không cân bằng tốt [155]. Than trấu bổ sung carbon hữu cơ bền vững, ổn định quá trình trung hòa axit trong đất [156]. Ở điều kiện độ ẩm 60%, tổ hợp này nâng pH đất nhờ quá trình phân giải chất hữu cơ chậm và ổn định hơn, kết quả này tương ứng với quan sát trước đó của Novak, Busscher, Laird, Ahmedna, Watts and Niandou [157]. Hiệu quả trung hòa axit chậm nhưng bền vững, được thể hiện rõ qua SQI tính axit (Hình 3.11b).

3.2.3.2 Tính mặn

Vôi giúp giảm Na trao đổi (Bảng 3.11 và 3.12) bằng cách thay thế Na^+ trên bề mặt hạt đất bằng Ca^{2+}, làm giảm từ 5.615 mg/kg (đối chứng) xuống 4.933 mg/kg, khả năng thông khí và thoát nước, đặc biệt trong chế độ nước tưới ngập. Điều này cải thiện tính mặn của đất, thể hiện qua SQI tính mặn. Phân bò không giảm trực tiếp tính mặn nhưng tăng khả năng giữ nước, gián tiếp điều chỉnh nồng độ muối. Than trấu hỗ

trợ giữ nước và hấp thụ muối (Na^+, Cl^-), giảm tích tụ muối trong đất, giúp cải thiện tính mặn lâu dài, được chứng minh qua SQI tính mặn. Kết hợp vôi và than trấu giúp giảm tính mặn đất hiệu quả. Vôi thay thế Na^+ bằng Ca^{2+}, giảm nồng độ Na^+ trao đổi và cải thiện tính thấm nước. Than trấu giữ nước và dưỡng chất, ngăn chặn di chuyển nhanh của muối và giảm EC, tạo môi trường ổn định, tương đồng với Prasertsuk and Wijitkosum [158] đã báo cáo. Trong điều kiện ngập nước, vôi chủ yếu là giải phóng Ca^{2+} để trao đổi Na^+ khỏi keo đất, giúp giảm độ mặn, Cl^- vẫn tồn tại dưới dạng muối tan (NaCl, $CaCl_2$, …) và được rửa trôi khi ngập nước, tạo hợp chất ít tan như $CaCO_3$, trong khi than trấu giữ ion trong lớp đất mặt, giảm rửa trôi, Blanco-Canqui [159] cũng có kết quả nghiên cứu tương tự. Mặt khác, ở độ ẩm 60%, muối di chuyển chậm hơn, vôi giảm Na^+ qua trao đổi cation và than trấu giữ vai trò chính trong duy trì ion dinh dưỡng và giảm ảnh hưởng muối, tương đồng với nghiên cứu của Qadir and Oster [160]. Tổ hợp này cải thiện tính mặn bền vững, thể hiện qua SQI tính mặn (Hình 3.11 c,d) ở cả hai chế độ nước. Khi kết hợp than trấu và phân bò cải thiện tính mặn đất thông qua giảm Na^+ và Cl^- trao đổi, phù hợp với nghiên cứu của Meng, Ma, Zhang and Yu [161]. Than trấu duy trì độ ẩm, ngăn rửa trôi muối và tăng CEC, giúp giảm tác động của muối. Phân bò làm tăng khả năng giữ dưỡng chất, nhưng trong môi trường ngập nước, có thể làm tăng Cl^- và Na^+. Ở độ ẩm 60%, tổ hợp này tạo lớp bảo vệ tự nhiên, hạn chế tích tụ muối và cải thiện chỉ số SQI tính mặn (Hình 3.11d). Than trấu giữ vai trò chính, cần kiểm soát để tránh tích lũy muối trong điều kiện ngập nước.

3.2.3.3 Tính độc

Vôi làm giảm nồng độ Al và Fe trao đổi bằng cách tăng pH (Bảng 3.11 và 3.12), giảm độc tính đất phèn nhiễm mặn ở cả hai chế độ nước, cải thiện chất lượng đất thông qua SQI tính độc. Phân bò hỗ trợ tạo phức chất hữu cơ, cố định Al, Fe và Mn dưới dạng không hòa tan giúp giảm độc tính kim loại, phù hợp với kết quả nghiên cứu của Vasylovych [162]. Than trấu hấp phụ kim loại độc hại, giảm độc tính Al, Fe, Mn đặc biệt hiệu quả ở độ ẩm 60%, nghiên cứu của Shetty, Vidya, Prakash, Lux and Vaculík [163] cũng có kết quả tương tự. Kết hợp than trấu và vôi giúp giảm độc tính kim loại trong đất. Vôi tăng pH, giảm hòa tan Al^{3+}, Fe^{2+}, Mn^{2+} bằng cách tạo hợp chất ít tan,

tương đồng với kết quả nghiên cứu của Enesi, Dyck, Chang, Thilakarathna, Fan and Gorim [164]. Trong môi trường ngập nước, vôi giảm độc tính kim loại dù chúng dễ hòa tan hơn, còn than trấu cố định chúng trên bề mặt, hạn chế gây hại; quá trình oxy hóa hỗ trợ giảm hòa tan kim loại và tổ hợp này tiếp tục duy trì chúng ở dạng ít độc ở điều kiện độ ẩm 60%, phù hợp với kết quả nghiên cứu của Herath [165]. SQI tính độc (Hình 3.12 a,b) cho thấy than trấu và vôi hiệu quả trong việc cố định kim loại độc ở cả hai chế độ nước. Bên cạnh đó, sự kết hợp giữa than trấu và phân bò cũng cho thấy hiệu quả trong việc giảm độc tính kim loại nhưng kém hơn so với kết hợp than trấu và vôi. Cụ thể, than trấu đóng vai trò cung cấp carbon hữu cơ và cố định các ion Al^{3+}, Fe^{2+}, từ đó hạn chế tính di động và giảm độc tính của chúng [166]. Trong khi đó, phân bò bổ sung nguồn dinh dưỡng hữu cơ cần thiết cho cây trồng, nhưng trong điều kiện ngập nước có thể làm tăng sự hòa tan kim loại [167]. Khi kết hợp, than trấu có khả năng hấp phụ và giữ lại kim loại, ngăn chặn sự di chuyển, đồng thời giảm độc tính tiềm tàng của chúng trong đất [167]. Đặc biệt, ở điều kiện độ ẩm 60%, tổ hợp này góp phần tạo môi trường ổn định, hạn chế quá trình hòa tan kim loại, qua đó cải thiện hiệu quả hấp thụ dinh dưỡng cho cây. Kết quả SQI tính độc (Hình 3.12a,b) đã chứng minh hiệu quả bền vững của tổ hợp than trấu và vôi trong cả hai chế độ nước.

Mặt khác, việc đánh giá nồng độ của từng thành phần của kim loại Al giúp hiểu rõ mức độ axit của đất, từ đó xác định các biện pháp canh tác phù hợp, như việc điều chỉnh pH của đất bằng vôi hoặc các chất kiềm khác. Việc phân tích nhôm giúp hiểu rõ hơn về tương tác giữa muối mặn và các ion kim loại trong đất, từ đó có thể tìm ra cách giảm thiểu sự nhiễm độc và tác động của nó đến chất lượng đất. Với mục tiêu sử dụng các vật liệu thân thiện môi trường như vôi, phân bò, than trấu và các tổ hợp của chúng để làm giảm hàm lượng $Al_{trđ}$, Al_{lky} và Al_{lkb}, từ đó chuyển hóa thành các dạng Al bền hơn như $Al_{vđh}$, Al_{kt} và Al_{ktc}. Điều này không chỉ giúp giảm độc tính của đất phèn nhiễm mặn mà còn tạo ra môi trường đất an toàn và phù hợp hơn cho sự phát triển của cây trồng. Kết quả nghiên cứu của Das and Das [168] cũng chỉ ra rằng việc chuyển hóa Al từ dạng dễ hấp thu sang dạng khó hòa tan có thể giúp cải thiện sức khỏe đất và năng suất cây trồng trên đất phèn nhiễm mặn. Vôi giúp tăng pH đất,

làm giảm độ hòa tan của $Al_{trđ}$ và thúc đẩy quá trình kết tủa thành các dạng nhôm không tan như Al hydroxide. Khi pH đất tăng, Al sẽ kết hợp với OH^- để tạo thành $Al(OH)_3$, giúp giảm tính độc của đất, phù hợp với báo cáo của Brown, Koenig, Huggins, Harsh and Rossi [169]. Vôi cũng góp phần chuyển $Al_{trđ}$, Al_{lky} và Al_{lkb} thành $Al_{vđh}$ và Al_{kt}, làm giảm lượng Al có khả năng gây độc. Phân bò cung cấp chất hữu cơ, giúp tăng khả năng liên kết với nhôm và chuyển hóa Al từ dạng dễ hòa tan sang các dạng ít độc hơn như $Al_{vđh}$. Sự hiện diện của các chất hữu cơ trong phân bò có thể liên kết với Al, từ đó làm giảm hàm lượng $Al_{trđ}$, Al_{lky} và Al_{lkb}, kết quả này tương đồng với kết quả nghiên cứu của Yu, Wu, Wei, Luo, Ran, Wang, Zhang and Shen [170]. Than trấu có khả năng hấp phụ Al và giữ nhôm ở dạng không hòa tan, giúp ngăn chặn sự hấp thu nhôm độc hại bởi cây trồng. Sự kết hợp giữa than trấu và vôi có thể tạo ra hiệu ứng tổng hợp trong việc chuyển hóa Al thành $Al_{vđh}$ và Al_{kt}. Bên cạnh đó, sự kết hợp này hiệu quả nhất trong việc giảm hàm lượng $Al_{trđ}$ vì vôi làm tăng pH và thúc đẩy quá trình kết tủa nhôm, trong khi than trấu giữ nhôm ở dạng không tan. Tổ hợp này đã giúp chuyển hóa $Al_{trđ}$ thành $Al_{vđh}$ và Al_{kt} một cách hiệu quả, giảm độc tính của đất. Kết hợp than trấu và phân bò cung cấp bề mặt hấp phụ và nguồn chất hữu cơ, giúp chuyển hóa $Al_{trđ}$ sang Al_{lkb}. Mức độ hiệu quả của tổ hợp này có thể phụ thuộc vào điều kiện đất, nhưng nhìn chung giúp cải thiện tính chất đất và giảm độc tính.

3.2.3.4 Tính dinh dưỡng

Vôi cải thiện pH đất, tăng khả năng hấp thu dưỡng chất và nâng cao SQI dinh dưỡng. Phân bò, giàu chất hữu cơ (N, P, K, Ca, Mg), cải thiện NH_4^+, P, K, tăng CEC nâng cao khả năng giữ dinh dưỡng, tương đồng với nghiên cứu của Singh, Badiyala and Ranjha [171]. Ở chế độ tưới ngập, phân bò phân hủy nhanh, cung cấp dưỡng chất nhưng có thể gây độc do sinh H_2S. Ở độ ẩm 60%, phân bò cung cấp dinh dưỡng từ từ, tránh tích lũy độc tố, tăng độ phì nhiêu, từ đó giúp nâng SQI tổng thể (0,38). Sự gia tăng P sau bón than trấu là do P có sẵn trong đất, vi khuẩn khử sắt hòa tan oxit Fe/Al-P, giải phóng PO_4^{3-} (tưới ngập); hiệu ứng liming của than trấu và –COOH/–OH giảm bền vững các phức hợp Fe/Al-P, đồng thời cạnh tranh giải phóng P đã bám trên hạt đất (độ ẩm 60%). Than trấu cung cấp carbon hữu cơ ổn định, cải thiện giữ

nước và dinh dưỡng, kết quả này phù hợp với báo cáo của Agegnehu, Bass, Nelson, Muirhead, Wright and Bird [172]. Kết hợp than trấu và vôi tăng CEC giúp đất giữ NH_4^+, P và các dưỡng chất thiết yếu lâu dài. Than trấu cung cấp carbon hữu cơ bền vững, cải thiện phân giải dưỡng chất và tính dinh dưỡng tổng thể. Vôi bổ sung Ca^{2+}, kết hợp với than trấu ngăn rửa trôi dưỡng chất dưới ngập nước [173]. Tổ hợp này duy trì độ ẩm, dinh dưỡng ổn định, giảm độ chua, tăng SQI tổng thể (Hình 3.10) và SQI dinh dưỡng (Hình 3.12 c,d) ở cả hai chế độ nước, đặc biệt rõ rệt ở độ ẩm 60% nhờ cung cấp Ca, Mg nhanh và tận dụng NH_4^+, K sẵn có ở đất phèn nhiễm mặn. Cần kiểm soát để tránh tích tụ muối và rửa trôi dưới ngập nước. Tổ hợp than trấu và phân bò cung cấp dinh dưỡng đầy đủ, với phân bò bổ sung N, P, K ngắn hạn và than trấu tăng CEC, lưu trữ dưỡng chất lâu dài, nghiên cứu của Agegnehu, Bass, Nelson and Bird [174] cũng chứng minh ở điều kiện tưới ngập, phân bò dễ mất dưỡng chất do rửa trôi nhưng than trấu giữ lại, đảm bảo cung cấp lâu dài. Ở độ ẩm 60%, tổ hợp than trấu và phân bò tạo môi trường dinh dưỡng ổn định, tăng khả năng giữ dưỡng chất qua CEC của than trấu, tương tự như nghiên cứu của Liang, Lehmann, Solomon, Kinyangi, Grossman, O'Neill, Skjemstad, Thies, Luizão, Petersen and Neves [175]. Tổ hợp này cũng cải thiện SQI tổng thể (Hình 3.10) và SQI dinh dưỡng (Hình 3.12 c,d).

Như vậy, cải tạo đất phèn nhiễm mặn bằng tổ hợp than trấu, vôi và phân bò đã hiệu quả trong việc cải thiện tính axit, mặn, độc và dinh dưỡng của đất. Vôi trung hòa độ chua, than trấu và phân bò giảm axit hóa. Than trấu hấp phụ muối, vôi thay thế Na^+ bằng Ca^{2+} và phân bò cung cấp dinh dưỡng. Vôi và than trấu giúp cố định kim loại độc hại như Al^{3+}, Fe^{2+}, Mn^{2+}. Tưới ngập rửa trôi muối và kim loại độc, trong khi đất ẩm cải thiện dinh dưỡng đất. Bên cạnh đó, nhôm (Al) trong đất phèn nhiễm mặn có tính độc cao khi ở dạng dễ hòa tan như $Al_{trđ}$, Al_{lky} và Al_{lkb}, trong khi các dạng bền như $Al_{vđh}$ và Al_{kt} ít ảnh hưởng đến cây trồng. Các vật liệu thân thiện môi trường giúp giảm hàm lượng Al trao đổi và Al liên kết yếu, đồng thời tăng pH, thúc đẩy kết tủa Al thành dạng không tan và liên kết với chất hữu cơ. Nhờ đó, tính độc của đất phèn được giảm với mục tiêu là chuyển hóa Al thành dạng kết tinh bền vững để giảm độc tính lâu dài và duy trì năng suất cây trồng.

3.3 Nội dung 3: Đánh giá hiệu quả của than trấu, vôi và phân bò đến đặc tính đất, sinh trưởng và năng suất lúa và cải thìa ở điều kiện thực tế đồng ruộng

Hai thí nghiệm thực địa được thực hiện trên đất trồng lúa tại Bình Khánh, Cần Giờ (cũ), TP. HCM và trên đất trồng cải thìa tại Kiểng Phước, Gò Công Đông, Tiền Giang (cũ). Mục tiêu là đánh giá tác động của các vật liệu thân thiện môi trường đến chất lượng đất và năng suất, sinh trưởng của lúa và cải thìa trong điều kiện thực tế.

3.3.1 Đặc tính hóa học của đất và vật liệu trước thí nghiệm

3.3.1.1 Trên đất trồng lúa

Các đặc tính ban đầu của vật liệu và đất được trình bày ở Bảng 3.13, vôi có pH = 13.

Bảng 3.13 Tính chất của than trấu, phân bò và đất trước thí nghiệm (Thí nghiệm 3)

Đặc tính vật liệu	Đơn vị	Than trấu	Phân bò	Đất
pH	-	8,15 ± 0,03	7,11 ± 0,02	4,98 ± 0,03
SO_4^{2-}	g/kg	5,53 ± 0,21	594,58 ± 42,34	3,18 ± 0,14
Độ chua trao đổi	cmol(+)/kg	1,38 ± 0,30	5,21 ± 0,11	2,43 ± 0,10
H^+ trao đổi	cmol(+)/kg	1,17 ± 0,29	3,46 ± 0,09	1,76 ± 0,16
EC	dS/m	0,40 ± 0,01	1,41 ± 0,03	1,43 ± 0,05
Cl^-	g/kg	1,52 ± 0,04	5.214,79 ± 53,95	0,26 ± 0,02
Mehlich-1 P	mg/kg	231,59 ± 8,91	692,63 ± 23,29	5,69 ± 0,31
OC	%	37,83 ± 0,48	34,91 ± 0,66	4,39 ± 0,09
NH_4^+	g/kg	3,57 ± 0,08	145,94 ± 8,33	110,65 ± 17,96
CEC	cmol(+)/kg	21,38 ± 0,32	36,09 ± 0,70	15,49 ± 0,22
Al trao đổi	mg/kg	20,44 ± 2,03	331,10 ± 12,08	27,16 ± 1,31
Fe trao đổi	mg/kg	49,65 ± 3,13	62,05 ± 2,43	70,9 ± 2,84
Mn trao đổi	mg/kg	64,14 ± 1,05	8.890,08 ± 399,6	35,14 ± 1,25
Ca trao đổi	mg/kg	2.780 ± 86,55	622,66 ± 34,43	572,63 ± 26,02
K trao đổi	mg/kg	11.094 ± 94,78	9.095 ± 152,42	921,54 ± 20,30
Mg trao đổi	mg/kg	447,75 ± 3,23	21,38 ± 3,51	1.045 ± 32,22
Na trao đổi	mg/kg	1.968 ± 70,70	934,49 ± 18,27	1.599 ± 51,84

pH của than trấu, phân bò và đất lần lượt là 8,15, 7,11 và 4,98; EC của than trấu (0,40 dS/m) thấp hơn phân bò (1,41 dS/m) và đất (1,43 dS/m). Phân bò có hàm lượng Mehlich-1 P cao nhất (629,36 mg/kg), tiếp theo là than trấu (231,59 mg/kg) và đất (5,69 mg/kg). Hàm lượng OC của than trấu và phân bò (34,91-37,83%) vượt xa đất (4,39%). Nồng độ NH_4^+ lần lượt là 3,57 g/kg (than trấu), 145,94 g/kg (phân bò) và

110,65 g/kg (đất). SO_4^{2-} trong phân bò (594,58 g/kg) cao hơn nhiều so với than trấu (5,53 g/kg) và đất (3,18 g/kg). CEC cao nhất thuộc về phân bò (36,09 cmol(+)/kg), sau đó là than trấu (21,38 cmol(+)/kg) và đất (15,49 cmol(+)/kg). Than trấu chứa Ca, K và Na trao đổi cao nhất, trong khi phân bò có hàm lượng Al và Mn trao đổi cao nhất. Đất có hàm lượng Fe trao đổi cao nhất (70,19 mg/kg), hơn phân bò (62,05 mg/kg) và than trấu (49,65 mg/kg).

3.3.1.2 Trên đất trồng cải thìa

Tính chất cơ bản của đất và vật liệu được thể hiện ở Bảng 3.14, vôi có pH = 13.

Bảng 3.14 Tính chất của than trấu, phân bò và đất trước thí nghiệm (Thí nghiệm 4)

Đặc tính vật liệu	Đơn vị	Than trấu	Phân bò	Đất
pH	-	7,80 ± 0,17	6,98 ± 0,05	5,59 ± 0,13
SO_4^{2-}	g/kg	5,51 ± 0,25	645,62 ± 59,30	0,69 ± 0,02
Độ chua trao đổi	cmol(+)/kg	1,37 ± 0,24	5,41 ± 0,24	1,14 ± 0,05
H^+ trao đổi	cmol(+)/kg	1,16 ± 0,09	3,39 ± 0,17	0,90 ± 0,04
EC	dS/m	0,44 ± 0,01	1,43 ± 0,10	1,80 ± 0,32
Cl^-	g/kg	1,51 ± 0,08	5.308 ± 206,98	3,80 ± 0,13
Mehlich-1 P	mg/kg	244,48 ± 4,49	723,49 ± 36,02	6,79 ± 0,17
OC	%	37,40 ± 1,75	35,50 ± 0,71	1,11 ± 0,05
NH_4^+	g/kg	3,64 ± 0,12	150,00 ± 12,15	47,28 ± 1,74
CEC	cmol(+)/kg	21,54 ± 1,19	36,09 ± 0,70	11,78 ± 0,44
Al trao đổi	mg/kg	21,14 ± 1,57	353,14 ± 9,15	51,61 ± 4,32
Fe trao đổi	mg/kg	48,66 ± 4,75	65,42 ± 3,23	12,57 ± 0,59
Mn trao đổi	mg/kg	63,02 ± 3,64	9.143 ± 639,69	19,35 ± 0,50
Ca trao đổi	mg/kg	2.822 ± 170,89	645,19 ± 34,35	265,08 ± 7,22
K trao đổi	mg/kg	11.167 ± 432,37	9.668 ± 376,39	511,08 ± 20,77
Mg trao đổi	mg/kg	434,00 ± 14,64	21,99 ± 3,52	172,84 ± 2,97
Na trao đổi	mg/kg	2.026 ± 88,21	914,93 ± 55,58	1.107 ± 67,09

Than trấu có tính kiềm cao với pH là 7,08 và hàm lượng carbon hữu cơ chiếm 37,40% trong khi đó đất mang tính axit mạnh (pH = 5,59) và carbon hữu cơ thấp (1,11%). Đất trước thí nghiệm có độ dẫn điện (EC) ở mức trung bình (1,8 dS/m), hàm lượng Na và H^+ trao đổi cao lần lượt là 1.107 mg/kg và 0,9 cmol(+)/kg. Phân bò có hàm lượng các chất dinh dưỡng như P, NH_4^+ cao hơn so với đất và than trấu. Ngoài ra, các đặc tính khác của than trấu, phân bò và đất như SO_4^{2-}, độ chua trao đổi, P, CEC và hàm lượng các kim loại trao đổi cũng được xác định cụ thể trong Bảng 3.14.

3.3.2 Ảnh hưởng của các vật liệu thân thiện môi trường đến chất lượng đất

3.3.2.1 Trên đất trồng lúa

Đặc tính hóa học đất phèn nhiễm mặn sau thí nghiệm được trình bày trong Bảng 3.15.

Bảng 3.15 Ảnh hưởng của các vật liệu lên đặc tính hóa học đất phèn nhiễm mặn ở điều kiện thực tế đồng ruộng (tháng 7 đến tháng 12, năm 2022)

Đặc tính đất	Không than trấu			Có than trấu		
	Đối chứng	Vôi	Phân bò	Than trấu	Than trấu + vôi	Than trấu + phân bò
Tính axit						
pH	5,24^{d} ± 0,19	6,04^{ab} ± 0,10	5,72^{c} ± 0,06	5,87^{bc} ± 0,05	6,16^{a} ± 0,09	5,78^{bc} ± 0,07
SO_4^{2-} (g/kg)	2,12^{a} ± 0,25	2,13^{a} ± 0,39	2,05^{a} ± 0,09	1,92^{a} ± 0,18	1,67^{a} ± 0,23	1,92^{a} ± 0,32
Độ chua trao đổi (cmol(+)/kg)	2,30^{a} ± 0,06	1,47^{b} ± 0,10	2,26^{a} ± 0,28	1,87^{ab} ± 0,05	1,69^{b} ± 0,11	1,68^{b} ± 0,10
H^+ trao đổi (cmol(+)/kg)	1,73^{a} ± 0,04	1,62^{ab} ± 0,17	1,67^{ab} ± 0,12	1,35^{b} ± 0,03	1,44^{ab} ± 0,06	1,68^{ab} ± 0,17
Tính mặn						
EC (dS/m)	1,02^{a} ± 0,04	1,02^{a} ± 0,04	1,03^{a} ± 0,06	1,07^{a} ± 0,06	1,03^{a} ± 0,06	1,11^{a} ± 0,02
Cl^- (g/kg)	1,27^{a} ± 0,00	1,39^{a} ± 0,13	1,63^{a} ± 0,19	1,24^{a} ± 0,03	1,29^{a} ± 0,15	1,29^{a} ± 0,10
Na trao đổi (mg/kg)	1.839^{a} ± 49,45	1.851^{a} ± 33,81	1.918^{a} ± 40,63	1.828^{a} ± 31,12	1.818^{a} ± 9,55	1.880^{a} ± 55,44
Tính độc						
Al trao đổi (mg/kg)	19,44^{a} ± 0,69	15,54^{b} ± 0,49	16,15^{b} ± 0,25	13,93^{c} ± 0,43	11,83^{d} ± 0,54	11,67^{d} ± 0,53
Fe trao đổi (mg/kg)	70,19^{a} ± 1,44	48,02^{b} ± 7,03	64,51^{a} ± 1,87	66,61^{a} ± 1,49	37,55^{c} ± 2,47	50,79^{b} ± 2,77
Mn trao đổi (mg/kg)	28,72^{a} ± 1,12	28,38^{a} ± 0,52	30,24^{a} ± 1,34	28,55^{a} ± 0,93	28,71^{a} ± 0,88	30,02^{a} ± 1,25
Tính dinh dưỡng						
CEC (cmol(+)/kg)	15,57^{bc} ± 0,18	15,18^{c} ± 0,30	16,30^{ab} ± 0,18	16,57^{a} ± 0,36	16,56^{a} ± 0,22	17,21^{a} ± 0,46
NH_4^+ (mg/kg)	20,34^{bc} ± 0,71	20,52^{c} ± 0,39	26,62^{ab} ± 1,24	21,93^{a} ± 0,60	21,00^{a} ± 0,42	27,05^{a} ± 1,50
Mehlich-1 P (mg/kg)	2,10^{b} ± 0,04	3,07^{a} ± 0,18	3,15^{a} ± 0,34	2,74^{ab} ± 0,21	3,22^{a} ± 0,26	3,36^{a} ± 0,36
OC (%)	4,35^{c} ± 0,06	4,40^{bc} ± 0,10	4,69^{ab} ± 0,14	4,74^{a} ± 0,09	4,77^{a} ± 0,12	4,99^{a} ± 0,11
K trao đổi (mg/kg)	726,65^{c} ± 6,74	761,51^{c} ± 32,05	791,20^{bc} ± 52,20	885,76^{ab} ± 21,19	898,89^{a} ± 42,45	936,41^{a} ± 23,49
Ca trao đổi (mg/kg)	543,18^{b} ± 15,76	639,88^{a} ± 14,49	550,60^{b} ± 2,75	559,46^{b} ± 17,71	648,60^{a} ± 13,48	646,03^{a} ± 15,73
Mg trao đổi (mg/kg)	882,46^{a} ± 44,69	898,71^{a} ± 8,95	834,84^{a} ± 37,64	838,20^{a} ± 39,80	894,70^{a} ± 26,86	908,97^{a} ± 61,26

Nghiệm thức (NT) than trấu kết hợp vôi nâng pH đất lên 6,16 cao nhất so với NT đối chứng (5,24) và các NT khác, có nghĩa thống kê. NT đối chứng có độ chua cao nhất (2,30 cmol(+)/kg), trong khi NT chỉ bón vôi giảm độ chua thấp nhất (1,44 cmol(+)/kg). NT than trấu kết hợp phân bò giảm độ chua còn 1,68 cmol(+)/kg so với NT chỉ bón phân bò (2,26 cmol(+)/kg). Không có tác động đáng kể của các NT chỉ bón than trấu, vôi, hoặc phân bò đến SO_4^{2-} (1,67-2,13 g/kg), EC (1,02-1,11 dS/m), Cl^- (1,27-1,39 g/kg) và Na trao đổi (1.818-1.918 mg/kg). Trong khi đó, NT chỉ bón than trấu, vôi và phân bò ảnh hưởng đáng kể đến nồng độ Al và Fe trao đổi (Bảng 3.15). NT đối chứng có nồng độ Al trao đổi cao nhất (19,44 mg/kg), trong khi NT kết hợp than trấu với vôi hoặc phân bò giảm nồng độ Al xuống thấp nhất (11,8 và 11,7 mg/kg). NT chỉ bón vôi hoặc kết hợp than trấu giảm nồng độ Fe trao đổi thấp nhất (48,01 và 37,54 mg/kg), trong khi NT đối chứng hoặc NT chỉ bón than trấu giữ nồng độ Fe cao nhất (70,19 và 66,61 mg/kg).

Có 7 thông số dinh dưỡng đất được đánh giá (Bảng 3.15). Mehlich-1 P thấp nhất (2,42 mg/kg) ở NT chỉ bón than trấu, cao nhất (3,36 mg/kg) ở NT kết hợp than trấu và phân bò, có ý nghĩa thống kê. NT kết hợp than trấu và phân bò làm tăng đáng kể OC, cao nhất (4,99%) và thấp nhất (4,35%) ở NT đối chứng. NH_4^+ tăng mạnh ở NT kết hợp phân bò và than trấu, đạt 27,05 mg/kg, cao hơn các NT còn lại. Tương tự, CEC đạt cao nhất (17,21 cmol(+)/kg) ở NT kết hợp than trấu và phân bò, thấp nhất (15,18 cmol(+)/kg) ở NT chỉ bón vôi và có ý nghĩa thống kê. NT bón than trấu làm tăng đáng kể Ca trao đổi, từ 543,18 mg/kg (đối chứng) lên 559,46 mg/kg và tăng lên 646,03 mg/kg ở NT than trấu kết hợp với phân bò. NT bón vôi làm Ca trao đổi tăng cao nhất (trung bình 639,88 mg/kg) và thấp nhất ở NT đối chứng. K trao đổi tăng mạnh, từ 726,65 mg/kg (đối chứng) lên 936,41 mg/kg ở NT kết hợp than trấu và phân bò.

3.3.2.2 Trên đất trồng cải thìa

Các đặc tính hóa học của đất phèn nhiễm mặn sau thí nghiệm được trình bày tại Bảng 3.16 và 3.17.

Bảng 3.16 Ảnh hưởng của các vật liệu lên đặc tính hóa học đất phèn nhiễm mặn ở điều kiện thực tế đồng ruộng (tháng 6 đến tháng 9, năm 2023)

Đặc tính đất	Không than trấu			Có than trấu		
	Đối chứng	Vôi	Phân bò	Than trấu	Than trấu + vôi	Than trấu + phân bò
Tính axit	**Vụ 1**					
pH	6,50^{e} ± 0,10	7,36^{b} ± 0,06	6,80^{d} ± 0,11	7,12^{c} ± 0,02	7,69^{a} ± 0,10	6,99^{cd} ± 0,09
SO_4^{2-} (g/kg)	0,68^{b} ± 0,05	0,47^{c} ± 0,05	0,91^{a} ± 0,05	0,67^{b} ± 0,04	0,78^{b} ± 0,06	0,95^{a} ± 0,05
Độ chua trao đổi (cmol(+)/kg)	7,69^{a} ± 0,18	5,88^{c} ± 0,32	5,68^{c} ± 0,17	6,81^{b} ± 0,10	5,50^{c} ± 0,44	5,60^{c} ± 0,23
H^+ trao đổi (cmol(+)/kg)	2,85^{a} ± 0,12	2,47^{b} ± 0,17	2,26^{bc} ± 0,16	2,15^{c} ± 0,01	2,22^{bc} ± 0,05	2,45^{b} ± 0,10
Tính axit	**Vụ 2**					
pH	6,39^{c} ± 0,12	7,16^{b} ± 0,06	6,43^{c} ± 0,20	6,90^{b} ± 0,06	7,62^{a} ± 0,11	6,97^{b} ± 0,04
SO_4^{2-} (g/kg)	1,05^{cd} ± 0,05	0,83^{d} ± 0,06	1,30^{b} ± 0,07	1,02^{cd} ± 0,06	1,06^{c} ± 0,06	2,01^{a} ± 0,16
Độ chua trao đổi (cmol(+)/kg)	5,36^{a} ± 0,14	4,33^{c} ± 0,10	4,97^{ab} ± 0,15	4,55^{bc} ± 0,22	4,13^{c} ± 0,24	4,65^{bc} ± 0,07
H^+ trao đổi (cmol(+)/kg)	3,26^{a} ± 0,05	3,17^{a} ± 0,08	3,30^{a} ± 0,11	2,97^{a} ± 0,34	2,85^{a} ± 0,21	3,17^{a} ± 0,13
Tính mặn	**Vụ 1**					
EC (dS/m)	0,75^{a} ± 0,09	0,83^{a} ± 0,08	0,70^{a} ± 0,03	0,72^{a} ± 0,05	0,88^{a} ± 0,05	0,74^{a} ± 0,05
Cl^- (g/kg)	0,67^{b} ± 0,02	0,61^{b} ± 0,03	0,86^{a} ± 0,05	0,61^{b} ± 0,04	0,61^{b} ± 0,03	0,65^{b} ± 0,03
Na trao đổi (mg/kg)	1.283^{a} ± 46,79	993,15^{cd} ± 32,90	1.114^{b} ± 31,78	1.052^{bc} ± 17,06	942,97^{d} ± 33,62	1.012^{bcd} ± 37,96
Tính mặn	**Vụ 2**					
EC (dS/m)	0,82^{b} ± 0,05	0,81^{b} ± 0,05	0,89^{ab} ± 0,04	0,86^{ab} ± 0,07	1,03^{a} ± 0,09	0,87^{ab} ± 0,06
Cl^- (g/kg)	1,95^{ab} ± 0,15	1,96^{ab} ± 0,10	1,94^{ab} ± 0,11	1,84^{ab} ± 0,06	1,75^{b} ± 0,09	2,13^{a} ± 0,06
Na trao đổi (mg/kg)	1.209^{a} ± 16,46	934,33^{c} ± 65,50	1.111^{ab} ± 26,96	1.061^{bc} ± 35,63	801,46^{d} ± 21,07	1.036^{bc} ± 57,01

Bốn tính chất có liên quan đến tính axit của đất phèn nhiễm mặn bao gồm pH, SO_4^{2-}, độ chua trao đổi và H^+ trao đổi hầu như đều khác biệt có ý nghĩa thống kê giữa các nghiệm thức (NT) trong cả 2 vụ, tuy nhiên H^+ trao đổi ở vụ 2 khác biệt không có ý nghĩa thống kê giữa các NT (Bảng 3.16). Giá trị pH tăng lên khi áp dụng NT than trấu kết hợp với vôi tăng cao nhất đạt 7,69 (vụ 1) và 7,62 (vụ 2). Than trấu có giá trị pH cao, có tính kiềm nên có tác dụng làm tăng pH của đất. Tương tự như pH, độ chua trao đổi của NT đối chứng là cao nhất (7,69 và 5,36 cmol(+)/kg lần lượt ở vụ 1 và vụ 2) và thấp nhất ở NT than trấu kết hợp với vôi ở cả 2 vụ lần lượt là 5,50 và 4,13 cmol(+)/kg. Hàm lượng SO_4^{2-} đạt cao nhất ở NT than trấu kết hợp phân bò ở vụ 1 là 0,95 g/kg và 2,01g/kg, vụ 2. Việc sử dụng than trấu làm giảm độ chua đất cũng như làm tăng giá trị pH của đất như trong thí nghiệm này tương đồng với một số nghiên cứu khác như Zhao, Coles, Kong and Wu [176] và Wang, Butterly, Wang, Herath, Xi and Xiao [177]. Do đó, việc sử dụng than trấu là giải pháp hợp lý để cải tạo đất có tính axit mạnh và hiệu quả trong việc tăng pH đất [177]. Hai thông số Cl^- và Na trao đổi trong đất của các NT ở cả 2 vụ hầu như đều khác biệt có ý nghĩa thống kê, trong khi đó EC trong vụ 1 không khác biệt có ý nghĩa thống kê giữa các NT. NT than trấu kết hợp với vôi cho giá trị EC cao nhất (1,03 dS/m) ở vụ 2. NT than trấu kết hợp với vôi làm giảm hàm lượng Na trao đổi có ý nghĩa thống kê so với NT chỉ bón than trấu, vôi và phân bò trong cả 2 vụ và giảm hàm lượng Na trao đổi 942,98 mg/kg ở vụ 1 và 801,46 mg/kg ở vụ 2 so với NT đối chứng.

Bảng 3.17 Ảnh hưởng của các vật liệu lên đặc tính hóa học đất phèn nhiễm mặn ở điều kiện thực tế đồng ruộng (tháng 6 đến tháng 9, năm 2023) (tt)

Đặc tính đất	Không than trấu			Có than trấu		
	Đối chứng	Vôi	Phân bò	Than trấu	Than trấu + vôi	Than trấu + phân bò
Tính độc	**Vụ 1**					
Al trao đổi (mg/kg)	51,21^{a} ± 2,81	47,91^{a} ± 2,55	50,13^{a} ± 0,53	41,63^{bc} ± 0,41	38,49^{c} ± 0,54	46,39^{ab} ± 0,92
Fe trao đổi (mg/kg)	9,49^{a} ± 0,39	7,98^{bc} ± 0,40	8,40^{ab} ± 0,26	8,14^{bc} ± 0,45	7,24^{c} ± 0,41	8,66^{ab} ± 0,49
Mn trao đổi (mg/kg)	34,15^{a} ± 1,56	23,79^{c} ± 0,82	34,31^{a} ± 1,37	27,97^{bc} ± 1,34	24,84^{c} ± 1,53	31,64^{ab} ± 0,98
Tính độc	**Vụ 2**					
Al trao đổi (mg/kg)	51,98^{a} ± 1,55	43,94^{cd} ± 0,73	48,00^{b} ± 0,57	41,75^{d} ± 0,68	41,17^{d} ± 1,03	46,01^{bc} ± 1,02
Fe trao đổi (mg/kg)	9,86^{a} ± 0,37	8,45^{b} ± 0,23	8,61^{b} ± 0,36	7,18^{c} ± 0,18	6,59^{c} ± 0,22	8,33^{b} ± 0,24
Mn trao đổi (mg/kg)	30,79^{a} ± 1,53	24,41^{bc} ± 0,89	26,55^{b} ± 1,73	25,23^{bc} ± 1,52	21,74^{c} ± 1,22	23,60^{bc} ± 1,08
Tính dinh dưỡng	**Vụ 1**					
CEC (cmol(+)/kg)	12,05^{b} ± 0,64	12,06^{b} ± 0,41	13,45^{ab} ± 0,59	14,59^{a} ± 0,41	14,03^{a} ± 0,63	15,00^{a} ± 0,44
NH_4^+ (mg/kg)	24,69^{c} ± 0,80	23,25^{c} ± 0,90	28,69^{b} ± 35,71	20,28^{d} ± 0,46	24,81^{c} ± 0,47	33,62^{a} ± 1,11
Mehlich-1 P (mg/kg)	462,28^{ab} ± 24,92	416,10^{b} ± 15,82	480,35^{ab} ± 0,07	480,16^{ab} ± 39,23	426,89^{b} ± 33,33	503,11^{a} ± 47,78
OC (%)	3,24^{b} ± 0,07	3,20^{b} ± 0,05	3,31^{b} ± 0,07	3,69^{a} ± 0,09	3,64^{a} ± 0,07	3,81^{a} ± 0,11
K trao đổi (mg/kg)	448,79^{d} ± 11,83	573,66^{c} ± 4,63	604,27^{bc} ± 16,48	627,00^{bc} ± 38,76	654,45^{ab} ± 16,07	709,25^{a} ± 24,89
Ca trao đổi (mg/kg)	416,31^{c} ± 21,75	647,04^{a} ± 30,66	411,82^{c} ± 12,59	437,70^{bc} ± 21,32	622,69^{a} ± 26,18	505,48^{b} ± 27,87
Mg trao đổi (mg/kg)	293,67^{c} ± 10,21	334,50^{a} ± 7,08	283,08^{c} ± 8,80	302,93^{bc} ± 1,94	320,94^{ab} ± 7,00	319,02^{ab} ± 9,12
Tính dinh dưỡng	**Vụ 2**					
CEC (cmol(+)/kg)	10,96^{c} ± 0,42	12,93^{b} ± 0,37	12,62^{b} ± 0,55	13,58^{ab} ± 0,35	13,09^{b} ± 0,16	14,84^{a} ± 0,70
NH_4^+ (mg/kg)	34,41^{b} ± 0,58	31,86^{c} ± 0,87	35,83^{b} ± 0,71	32,10^{c} ± 0,20	32,20^{c} ± 0,74	38,45^{a} ± 0,46
Mehlich-1 P (mg/kg)	489,14^{b} ± 25,24	432,93^{b} ± 25,09	480,09^{b} ± 22,77	510,90^{ab} ± 36,43	476,59^{b} ± 15,35	590,84^{a} ± 33,14
OC (%)	3,38^{c} ± 0,13	3,54^{bc} ± 0,03	3,63^{b} ± 0,10	3,60^{b} ± 0,06	3,91^{a} ± 0,05	4,00^{a} ± 0,08
K trao đổi (mg/kg)	518,67^{c} ± 17,51	607,50^{b} ± 3,86	631,55^{ab} ± 27,41	680,04^{a} ± 12,93	650,66^{ab} ± 26,85	634,66^{ab} ± 23,53
Ca trao đổi (mg/kg)	481,73^{b} ± 29,41	591,09^{a} ± 12,92	513,81^{ab} ± 39,42	586,29^{ab} ± 25,65	612,41^{a} ± 50,79	602,46^{a} ± 41,04
Mg trao đổi (mg/kg)	294,21^{c} ± 9,82	319,73^{bc} ± 11,20	386,71^{a} ± 42,90	386,22^{a} ± 8,97	411,21^{a} ± 13,04	365,00^{ab} ± 8,18

Ba tính chất liên quan đến tính độc bao gồm Al, Fe, Mn trao đổi) và tính dinh dưỡng bao gồm CEC, NH_4^+, Mehlich-1 P, OC, K, Ca và Mg trao đổi (Bảng 3.17). Các NT có than trấu đã giảm đáng kể Al, Fe, Mn trao đổi, đặc biệt ở NT than trấu kết hợp với vôi trong cả 2 vụ, có ý nghĩa thống kê nhờ tăng pH đất và khả năng hấp phụ của trong than trấu. Kết quả này cho thấy than trấu cải thiện độ chua đất và giảm độc tố Al nhờ tính kiềm. NT than trấu kết hợp với vôi cũng làm tăng OC đáng kể, đạt 4% (vụ 2), do hàm lượng carbon hữu cơ cao trong than trấu. CEC tăng rõ rệt, đạt 15 cmol(+)/kg (vụ 1) ở NT than trấu kết hợp với phân bò, nhờ gia tăng vị trí hấp phụ từ điện tích âm của than trấu. Ngoài ra, NT than trấu kết hợp phân bò tiếp tục tăng hàm lượng P dễ tiêu (590,84 mg/kg, vụ 2) và K trao đổi, cao nhất (709,25 mg/kg, vụ 1). Các hiệu ứng này liên quan đến lượng P và K có sẵn trong than trấu cùng hiệu ứng mồi lên chất hữu cơ đất (priming effect), phù hợp với nhiều nghiên cứu khác [178, 179].

3.3.3 Ảnh hưởng của các vật liệu thân thiện môi trường đến năng suất và sinh trưởng của lúa và cải thìa

3.3.3.1 Trên đất trồng lúa

Thí nghiệm đã được thực hiện trên đất phèn nhiễm mặn trồng lúa tại xã Bình Khánh, huyện Cần Giờ cũ thuộc TP. HCM từ tháng 7 đến tháng 12 năm 2022. Bảng 3.18 cho thấy trọng lượng rễ, rơm, năng suất hạt và tổng sinh khối lúa sau thu hoạch. Các nghiệm thức (NT) có than trấu làm tăng đáng kể năng suất hạt, trong khi NT bón vôi và phân bò không có tác dụng đáng kể có ý nghĩa thống kê giữa 2 yếu tố. Trọng lượng rễ tăng từ 0,09-0,10 kg/m^2 (nhóm yếu tố không có than trấu) lên 0,12-0,15 kg/m^2 (nhóm yếu tố có than trấu), khác biệt có ý nghĩa thống kê. NT chỉ bón than trấu tăng trọng lượng rơm (0,28 kg/m^2), hạt (0,47 kg/m^2) và tổng sinh khối (0,87 kg/m^2), cao hơn so với NT đối chứng lần lượt là 0,21, 0,36, 0,65 kg/m^2. NT kết hợp than trấu với vôi hay NT kết hợp than trấu với phân bò không cải thiện thêm năng suất hoặc sinh khối so với NT chỉ bón than trấu do khác biệt không có ý nghĩa thống kê (Bảng 3.18).

Bảng 3.18 Ảnh hưởng của các vật liệu lên trọng lượng (TL) rễ, rơm, hạt và tổng sinh khối lúa trồng ở điều kiện thực tế đồng ruộng (tháng 6 đến tháng 9, năm 2023)

Sinh trưởng và năng suất lúa (kg/m^2)	Không than trấu			Có than trấu		
	Đối chứng	Vôi	Phân bò	Than trấu	Than trấu + vôi	Than trấu + phân bò
TL rễ	$0,09^{b}$±0,00	$0,10^{b}$±0,02	$0,10^{b}$±0,02	$0,12^{ab}$±0,02	$0,13^{ab}$±0,00	$0,15^{a}$±0,00
TL rơm	$0,21^{c}$±0,00	$0,26^{b}$±0,01	$0,30^{a}$±0,01	$0,28^{ab}$±0,01	$0,26^{b}$±0,01	$0,27^{ab}$±0,01
Năng suất hạt	$0,36^{b}$±0,01	$0,47^{a}$±0,03	$0,39^{b}$±0,01	$0,47^{a}$±0,02	$0,45^{a}$±0,02	$0,46^{a}$±0,02
Tổng sinh khối	$0,65^{c}$±0,01	$0,83^{ab}$±0,03	$0,80^{b}$±0,02	$0,87^{ab}$±0,03	$0,84^{ab}$±0,02	$0,88^{a}$±0,04

3.3.3.2 Trên đất trồng cải thìa

Thí nghiệm đã được thực hiện trên đất phèn nhiễm mặn trồng lúa tại xã Kiểng Phước, huyện Gò Công Đông, tỉnh Tiền Giang (cũ) từ tháng 6 đến tháng 9 năm 2023. Nghiệm thức (NT) than trấu kết hợp với phân bò ở cả 2 vụ đều làm tăng khối lượng rễ, thân lá và tổng sinh khối và tăng cao nhất ở vụ 1 lần lượt là rễ 5,23, thân lá 59,99, tổng sinh khối 65,27 g/m^2 (Bảng 3.19). NT chỉ bón than trấu, than trấu kết hợp với vôi, than trấu kết hợp với phân bò của cả 2 vụ đã làm tăng khối lượng rễ và thân lá có ý nghĩa thống kê so với NT đối chứng, NT chỉ bón vôi hoặc phân bò. NT đối chứng và NT chỉ bón than trấu đều cho khối lượng rễ, thân lá và tổng sinh khối thấp nhất ở cả 2 vụ so với các NT còn lại trong cùng một nhóm yếu tố (Bảng 3.19).

Bảng 3.19 Ảnh hưởng của các vật liệu lên trọng lượng (TL) rễ, thân lá và tổng sinh khối cải thìa trồng ở điều kiện thực tế đồng ruộng (tháng 6 đến tháng 9, năm 2023)

Sinh trưởng và năng suất cải thìa (g/m^2)	Không than trấu			Có than trấu		
	Đối chứng	Vôi	Phân bò	Than trấu	Than trấu + vôi	Than trấu + phân bò
Vụ 1						
TL rễ	$2,19^{b}$±0,13	$2,40^{b}$±0,32	$4,66^{a}$±0,42	$2,18^{b}$±0,16	$2,35^{b}$±0,17	$5,29^{a}$±0,30
TL thân lá	$11,39^{c}$±2,73	$15,58^{bc}$±0,99	$25,25^{b}$±0,40	$14,76^{bc}$±0,54	$16,48^{bc}$±1,46	$59,99^{a}$±9,53
Tổng sinh khối	$13,57^{c}$±2,76	$17,98^{bc}$±0,91	$29,91^{b}$±2,74	$16,94^{bc}$±0,66	$18,82^{bc}$±1,47	$65,27^{a}$±9,29
Vụ 2						
TL rễ	$1,24^{c}$±0,22	$1,60^{c}$±0,20	$3,61^{b}$±0,40	$1,50^{c}$±0,24	$1,46^{c}$±0,16	$4,45^{a}$±0,26
TL thân lá	$6,51^{bc}$±2,45	$10,30^{bc}$±0,90	$19,86^{b}$±1,08	$10,56^{bc}$±0,55	$11,39^{bc}$±1,45	$49,35^{a}$±7,25
Tổng sinh khối	$7,74^{c}$±2,64	$11,89^{c}$±1,01	$23,46^{b}$±1,39	$12,07^{c}$±0,79	$12,86^{c}$±1,50	$53,81^{a}$±7,05

3.3.4 Ảnh hưởng của các vật liệu thân thiện môi trường đến hàm lượng các nguyên tố trong sinh khối lúa và cải thìa

3.3.4.1 Trên đất trồng lúa

Hàm lượng các nguyên tố Ca và Mn trong rễ không bị ảnh hưởng bởi các nghiệm thức (NT) thí nghiệm (Phụ bảng 3.1 - Phụ lục 3). Hàm lượng P cao nhất đạt được ở NT kết hợp than trấu với phân bò (0,60 g/kg) so với các NT còn lại. NT than trấu kết hợp với vôi cho hàm lượng Na trong rễ lúa cao nhất (4.388 mg/kg) so với các NT còn lại. Các NT trong nhóm yếu tố có than trấu đều cho hàm lượng K (1.438 mg/kg - NT chỉ bón than trấu, 1.408 mg/kg - NT than trấu kết hợp với vôi, 1.584 mg/kg - NT than trấu kết hợp với phân bò) trong rễ cao hơn có ý nghĩa thống kê so với NT đối chứng. NT than trấu kết hợp với vôi cho hàm lượng Al (6.822 mg/kg) và Fe (8.474 mg/kg) trong rễ thấp nhất so với NT đối chứng.

Hàm lượng các nguyên tố N và Mg trong rơm khác biệt không có ý nghĩa thống kê khi áp dụng các yếu tố thí nghiệm khác nhau (Phụ bảng 3.2 - Phụ lục 2). NT than trấu kết hợp với vôi cho hàm lượng P (0,71 g/kg) và K (5.789 mg/kg) trong rơm cao nhất. Hàm lượng Na trong rơm giảm đáng kể (6.742 mg/kg) ở NT than trấu kết hợp với phân bò. NT chỉ bón than trấu và than trấu kết hợp với vôi đã làm giảm hàm lượng Al và Fe tốt nhất có ý nghĩa thống kê hơn so với các NT còn lại.

Hàm lượng các nguyên tố Na, Ca, Mg và Mn trong hạt không bị ảnh hưởng bởi các vật liệu thân thiện môi trường (Phụ bảng 3.3 - Phụ lục 3). Hàm lượng N (14,06 g/kg) và P (2,70 g/kg) cao nhất đạt được ở NT kết hợp than trấu với phân bò. Yếu tố có sử dụng than trấu đều cho hàm lượng K (2.438 mg/kg - NT chỉ bón than trấu, 2.443 mg/kg - NT than trấu kết hợp với vôi, 2.400 mg/kg - NT than trấu kết hợp với phân bò) trong hạt cao hơn có ý nghĩa thống kê so với NT đối chứng. NT than trấu kết hợp với vôi cho hàm lượng Fe trong hạt thấp nhất (533 mg/kg) so với đối chứng.

3.3.4.2 Trên đất trồng cải thìa

Hàm lượng Na và Mg trong rễ không bị ảnh hưởng bởi các nghiệm thức (NT) thí nghiệm ở cả hai vụ (Phụ bảng 3.4 - Phụ lục 3). Hàm lượng P cao nhất (0,19 g/kg ở

vụ 1, 0,23 g/kg ở vụ 2) đạt được ở NT chỉ bón than trấu, trong khi các NT khác cho hàm lượng P tương đương. NT than trấu và vôi cho Ca trong rễ cao nhất (1.117 mg/kg ở vụ 1, 2.771 mg/kg ở vụ 2). Các NT trong nhóm yếu tố có sử dụng than trấu đều tăng hàm lượng K trong rễ đáng kể so nhóm yếu tố không sử dụng than trấu. NT than trấu và vôi làm giảm hàm lượng Al (3.206 mg/kg ở vụ 1, 4.453 mg/kg ở vụ 2) và Fe (608,00 mg/kg ở vụ 1, 1.797 mg/kg ở vụ 2) trong rễ thấp nhất so với NT đối chứng.

Hàm lượng các nguyên tố Fe và Mn trong thân lá không bị ảnh hưởng bởi vật liệu ở cả 2 vụ (Phụ bảng 3.5 - Phụ lục 3). Hàm lượng N (5,08 g/kg - vụ 1, 5,45 g/kg - vụ 2) và P (0,54 g/kg - vụ 1, 0,51 g/kg - vụ 2) 2 vụ đều cao nhất đạt được ở NT than trấu kết hợp với phân bò. Các NT trong nhóm yếu tố có sử dụng than trấu đều cho hàm lượng K trong thân lá cao hơn có ý nghĩa thống kê so với nhóm yếu tố còn lại. NT than trấu kết hợp với vôi cho hàm lượng Al trong thân lá thấp nhất (1.576 mg/kg - vụ 1, 2.657 mg/kg - vụ 2) so với đối chứng ở cả 2 vụ.

3.3.5 Mối tương quan giữa chỉ số chất lượng đất thành phần và năng suất, sinh trưởng của lúa và cải thìa

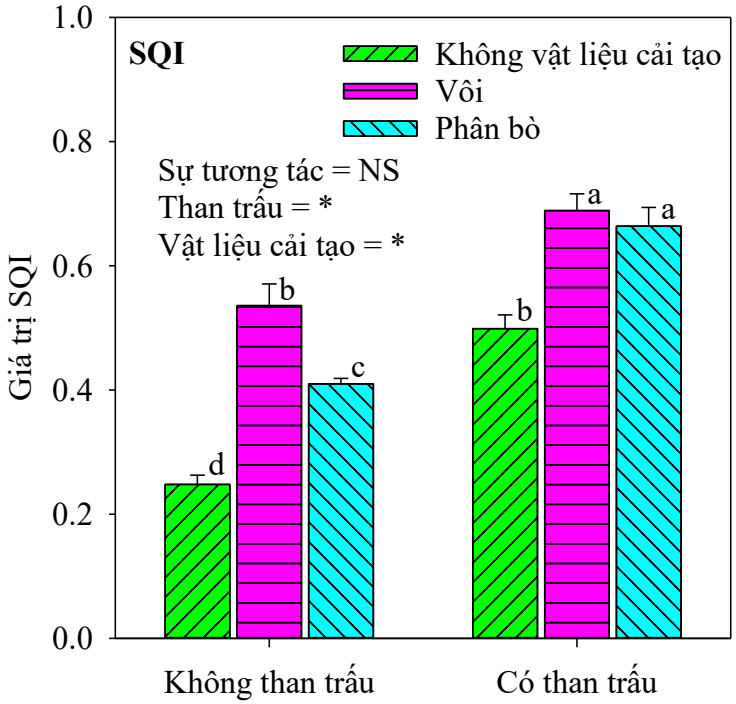
3.3.5.1 Trên đất trồng lúa

Các chỉ số chất lượng đất sau thí nghiệm

* Chỉ số chất lượng đất tổng thể sau thí nghiệm

PCA/FA đã phân nhóm dữ liệu thành sáu nhân tố, giải thích 80,64% tổng phương sai của 17 thông số đất (Phụ bảng 2.4 - Phụ lục 2). Nhân tố 1, chiếm 28,51% phương sai, liên quan chặt chẽ đến Fe, độ chua, Al, Ca trao đổi và pH. Nhân tố 2 (17,16%) bao gồm OC, CEC, K trao đổi, NH_4^+ và Mehlich-1 P. Nhân tố 3 (11,60%) liên quan đến Cl^- và H^+ trao đổi, trong khi nhân tố 4 (9,97%) gắn với Mg, Mn và Na trao đổi. Nhân tố 5 (7,03%) liên quan đến SO_4^{2-} và nhân tố 6 (6,37%) chủ yếu gắn với EC. Dựa trên kết quả này, SQI được tính toán và hiển thị trong Hình 3.13. Kết quả cho thấy, SQI cao nhất đạt 0,69 ở nghiệm thức (NT) than trấu kết hợp với vôi và 0,66 ở NT than trấu kết hợp với phân bò, trong khi SQI thấp nhất là 0,25 ở đất NT đối chứng. NT chỉ bón than trấu đã làm tăng đáng kể SQI từ 0,24 lên 0,50 so với NT đối chứng và tiếp

tục tăng từ 0,54 lên 0,69 ở NT than trấu kết hợp với vôi và từ 0,41 lên 0,66 ở NT than trấu kết hợp với phân bò. Ngoài ra, NT chỉ bón vôi hoặc phân bò cũng cải thiện đáng kể SQI so với NT đối chứng.

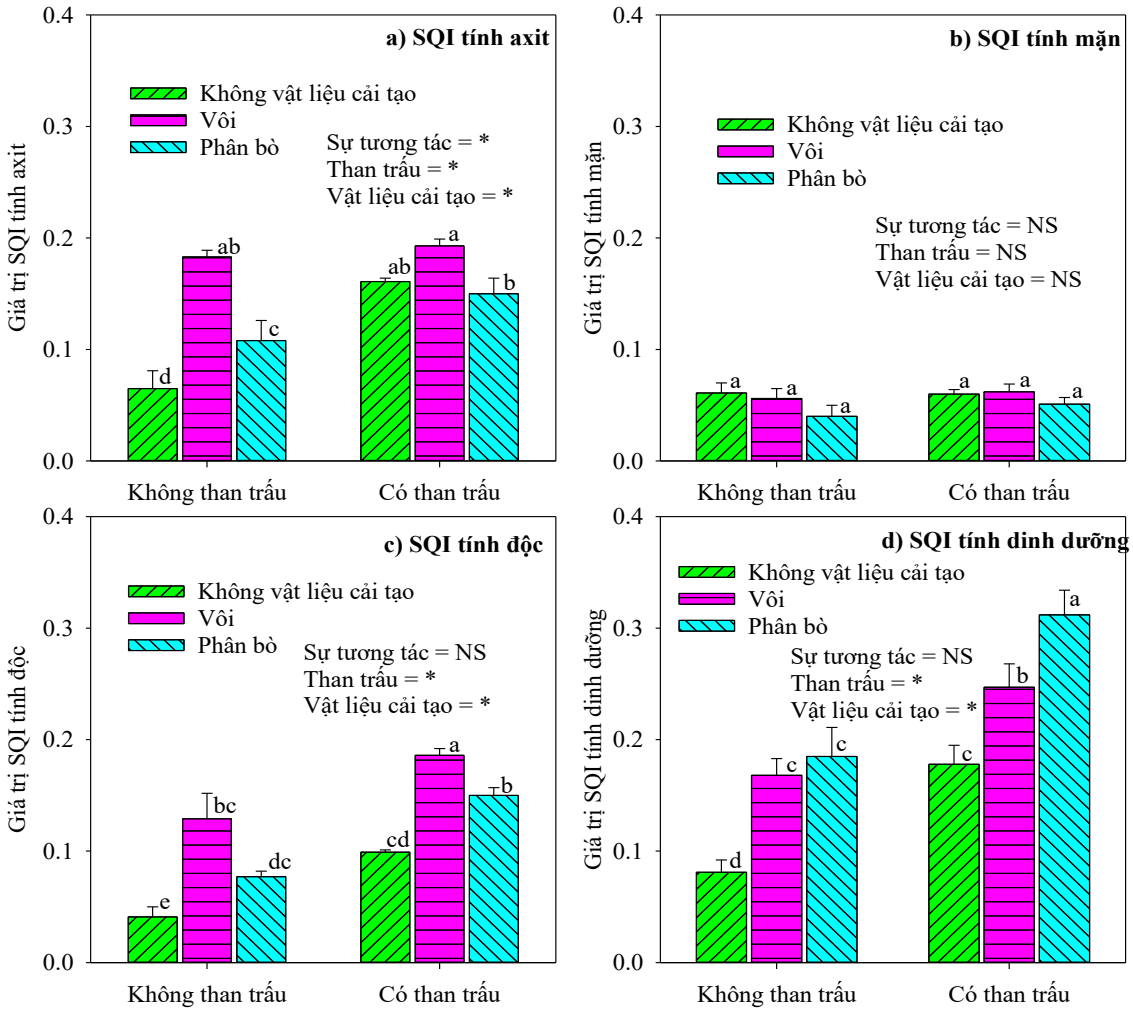


Hình 3.13 SQI tổng thể của đất phèn nhiễm mặn trồng lúa sau thí nghiệm ở điều kiện thực tế đồng ruộng (tháng 7 đến tháng 12, năm 2022)

* Các chỉ số chất lượng đất thành phần sau thí nghiệm

Tương tự như các thí nghiệm ở trên, chỉ số chất lượng đất tổng thể được phân thành các chỉ số chất lượng đất thành phần phản ánh các yếu tố giới hạn của đất bao gồm tính axit, tính mặn, tính độc và tính dinh dưỡng của đất. Chất lượng thành phần của bốn nhóm tính chất này được trình bày ở Hình 3.14. Đối với tính axit, NT than trấu kết hợp với vôi cho giá trị SQI tính axit cao nhất và có ý nghĩa thống kê so với các NT còn lại (Hình 3.14a). Đối với tính mặn, NT than trấu kết hợp với vôi hoặc phân bò hay NT chỉ bón than trấu, vôi hoặc phân bò không ảnh hưởng đến SQI tính mặn của đất và khác biệt không có ý nghĩa thống kê (Hình 3.14b). Đối với tính độc, NT than trấu kết hợp với vôi cho SQI tính độc tốt nhất, kế đến là NT than trấu kết hợp với phân bò và cuối cùng là NT chỉ bón vôi (Hình 3.14c). Đối với tính dinh dưỡng

(Hình 3.14d), NT than trấu kết hợp phân bò cho SQI tính dinh dưỡng cao nhất và thấp nhất là NT đối chứng.

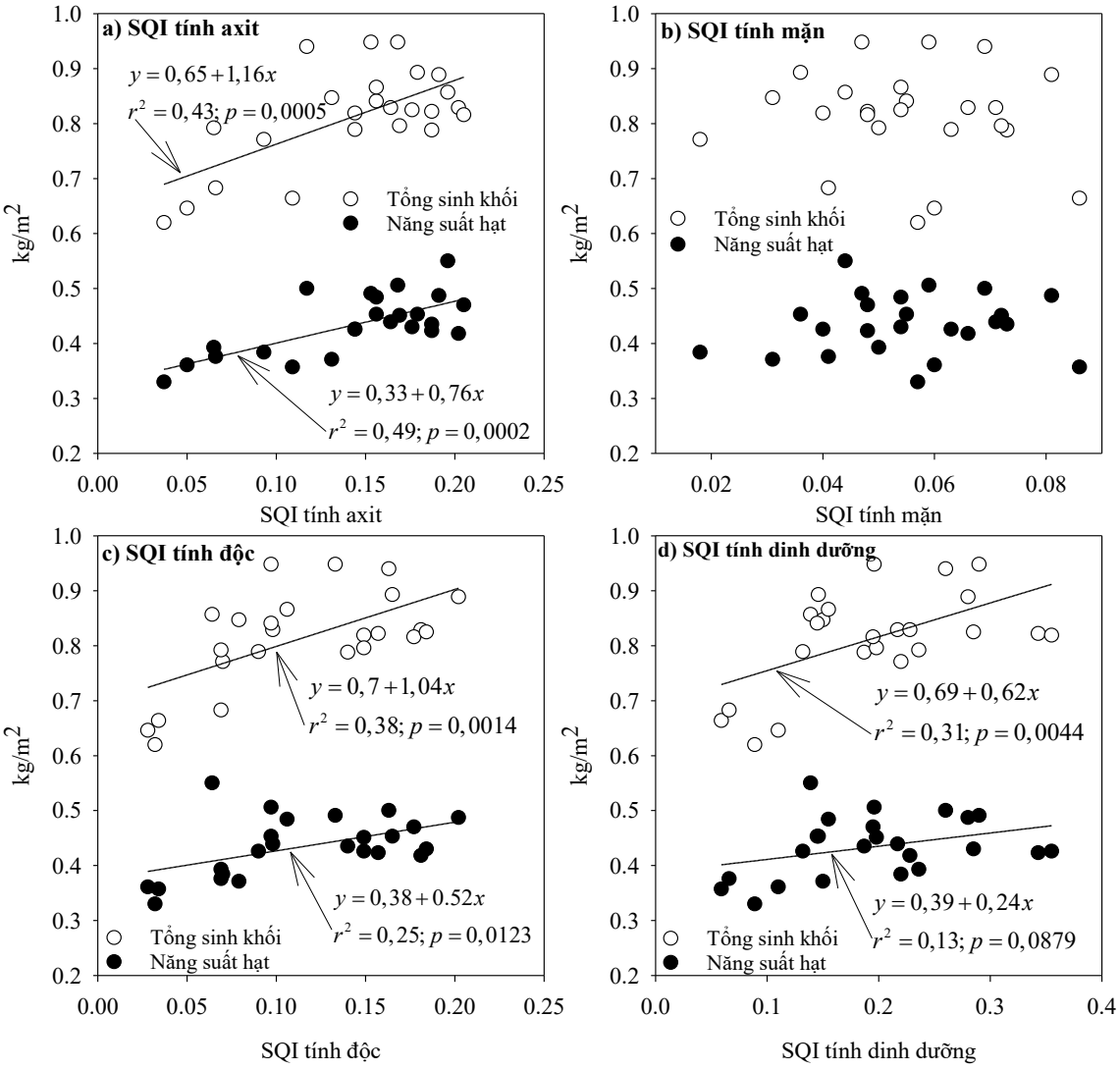


Hình 3.14 SQI tính axit (a), mặn (b), độc (c) và dinh dưỡng (d) sau thí nghiệm ở điều kiện thực tế đồng ruộng (tháng 7 đến tháng 12, năm 2022)

Mối tương quan của các chỉ số chất lượng đất thành phần với tổng sinh khối và năng suất hạt của lúa nước

Khi các chỉ số này tăng, tổng sinh khối và năng suất hạt cũng tăng đáng kể. SQI tính axit đóng góp 18,52% vào tổng sinh khối và 31,94% vào năng suất hạt, cao hơn SQI tính mặn, độc và dinh dưỡng. Không có mối liên hệ thống kê giữa tổng sinh khối, năng suất hạt và SQI tính mặn, vì sự thay đổi không đồng đều. Tuy nhiên, SQI tính axit, độc và dinh dưỡng có mối liên hệ tuyến tính với tổng sinh khối và năng suất hạt.

Điều này cho thấy, việc canh tác lúa nước trên đất phèn nhiễm mặn cần cân bằng giữa tính axit, tính độc và dinh dưỡng để đạt năng suất cao. Vì vậy, than trấu, vôi và phân bò là những vật liệu cần thiết để cải thiện chất lượng đất và tăng năng suất lúa.



Hình 3.15 Mối tương quan giữa chỉ số chất lượng đất tính axit (a), mặn (b), độc (c) và dinh dưỡng (d) với tổng sinh khối và năng suất hạt lúa sau thí nghiệm ở điều kiện thực tế đồng ruộng (tháng 7 đến tháng 12, năm 2022)

Mô hình thống kê đa biến đã mô tả mối liên hệ giữa tổng sinh khối, năng suất hạt và bốn chỉ số chất lượng đất thành phần. Bảng 3.20 cho thấy tổng sinh khối và năng suất hạt có mối tương quan chặt chẽ, có ý nghĩa thống kê với SQI tính axit của đất, chứng tỏ tính axit ảnh hưởng quyết định đến năng suất và sinh trưởng của lúa nước. Đối với tính dinh dưỡng, tất cả các yếu tố cải tạo đều có tác dụng tương đồng. Tuy nhiên, đối

với tính mặn, các yếu tố cải tạo chỉ cải thiện chất lượng đất ở tổng sinh khối tốt hơn năng suất hạt. Ngược lại, đối với tính độc, các yếu tố cải tạo cải thiện chất lượng đất ở năng suất hạt tốt hơn tổng sinh khối.

Bảng 3.20 Kết quả phân tích tương quan đa biến và phần trăm giải thích tổng biến thiên của tổng sinh khối và năng suất hạt lúa với các chỉ số chất lượng đất thành phần ở điều kiện thực tế đồng ruộng (tháng 7 đến tháng 12, năm 2022)

Biến số	Tổng sinh khối				Năng suất hạt			
	Tổng bình phương sai số dư	Giá trị xác suất	Phần trăm đóng góp (%)	Nghiệm thức tốt nhất	Tổng bình phương sai số dư	Giá trị xác suất	Phần trăm đóng góp (%)	Nghiệm thức tốt nhất
SQI tính axit*	0,02	4,92	18,52	NT5	0,02	9,20	31,94	NT5
SQI tính mặn	0,00	0,81	3,07	NT5	0,00	0,00	0,02	NT5
SQI tính độc*	0,00	0,03	0,10	NT5	0,00	0,23	0,79	NT5
SQI tính dinh dưỡng*	0,01	1,79	6,73	NT6	0,00	0,38	1,33	NT6
Sai số	0,08		71,58		0,03		65,93	
Tổng biến thiên	0,11				0,05			

*Ghi chú: * là biến số quyết định từ phương pháp phân tích thống kê đa biến loại dần. NT5: Nghiệm thức than trấu kết hợp với vôi. NT6: Nghiệm thức than trấu kết hợp với phân bò.*

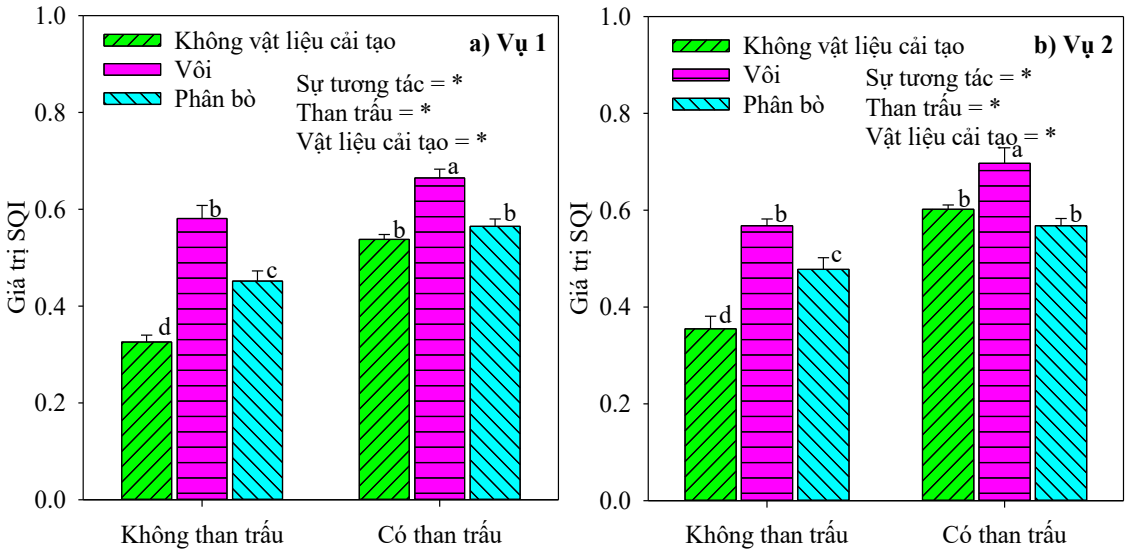
3.3.5.2 Trên đất trồng cải thìa

Các chỉ số chất lượng đất sau thí nghiệm

* Chỉ số chất lượng đất tổng thể sau thí nghiệm

Ba nhân tố được tính toán từ bộ số liệu giải thích 68,6% tổng biến thiên của 17 thông số đất (Phụ bảng 2.5 - Phụ lục 2). Nhân tố 1 liên quan đến Na, Mn, Fe, Al, độ chua trao đổi, Mg, EC, Ca và pH, giải thích 34,4% biến thiên. Nhân tố 2 liên quan đến NH_4^+, Cl^-, SO_4^{2-} và H^+, giải thích 23%. Nhân tố 3 liên quan đến CEC, K, OC và P, giải thích 11,3%. SQI được tính toán từ các thông số này để đánh giá chất lượng đất dưới ảnh hưởng của các vật liệu thân thiện môi trường. Kết quả thí nghiệm cho thấy nghiệm thức (NT) chỉ bón than trấu, NT than trấu kết hợp với vôi và NT than trấu kết

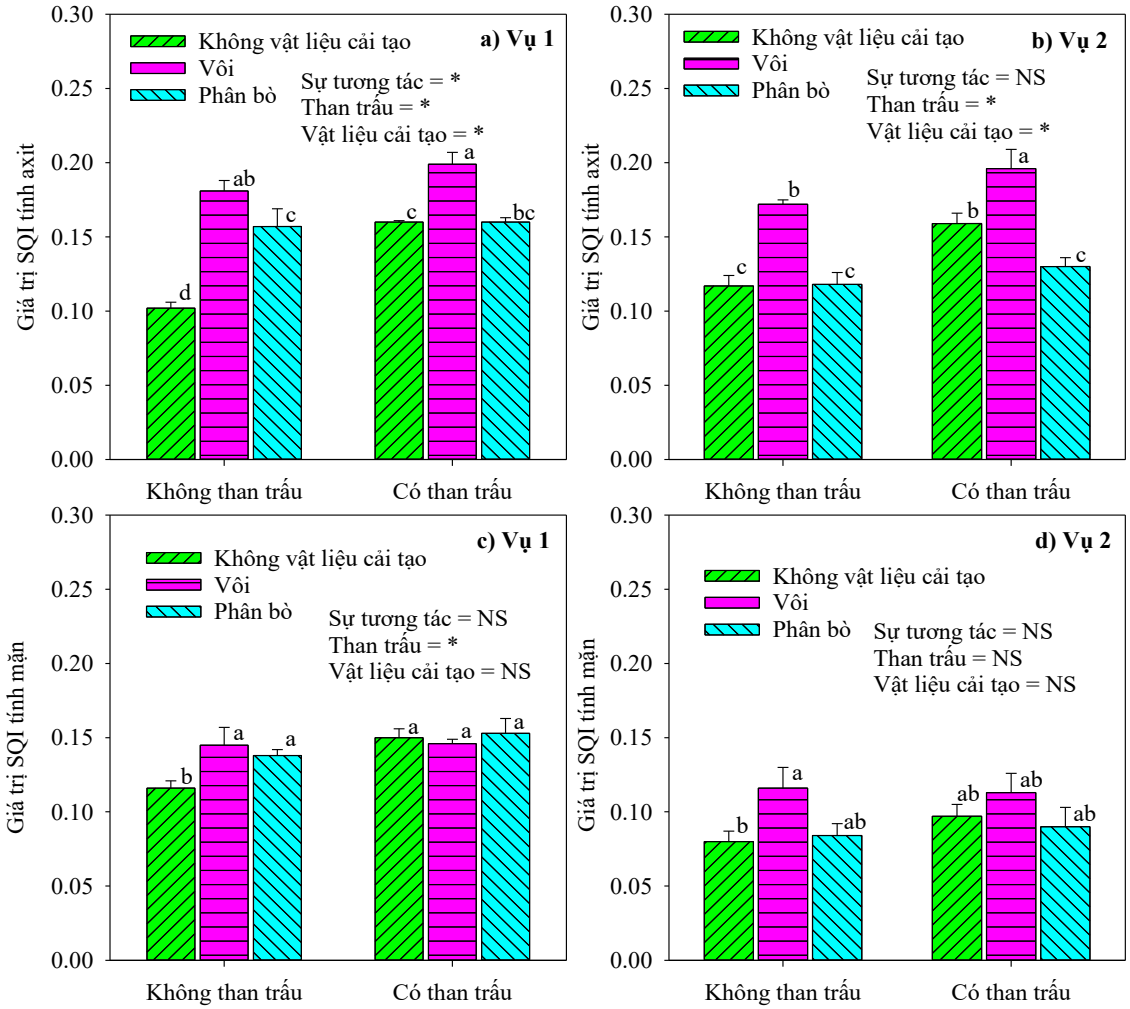
hợp với phân bò có SQI tổng thể cao hơn NT đối chứng, NT chỉ bón vôi hoặc phân bò ở cả 2 vụ. SQI tổng thể cao nhất ở NT than trấu kết hợp với vôi và thấp nhất ở NT đối chứng trong cả 2 vụ. Điều này cho thấy than trấu có khả năng cải thiện chất lượng đất phèn nhiễm mặn, đặc biệt khi kết hợp với vôi. Một số nghiên cứu khác cũng cho thấy giá trị SQI đối với mẫu đất có bón than trấu cao hơn so với không bón than trấu [149-151].



Hình 3.16 SQI tổng thể của đất phèn nhiễm mặn trồng cải thìa sau thí nghiệm vụ 1 (a), vụ 2 (b) ở điều kiện thực tế đồng ruộng (tháng 6 đến tháng 9, năm 2023)

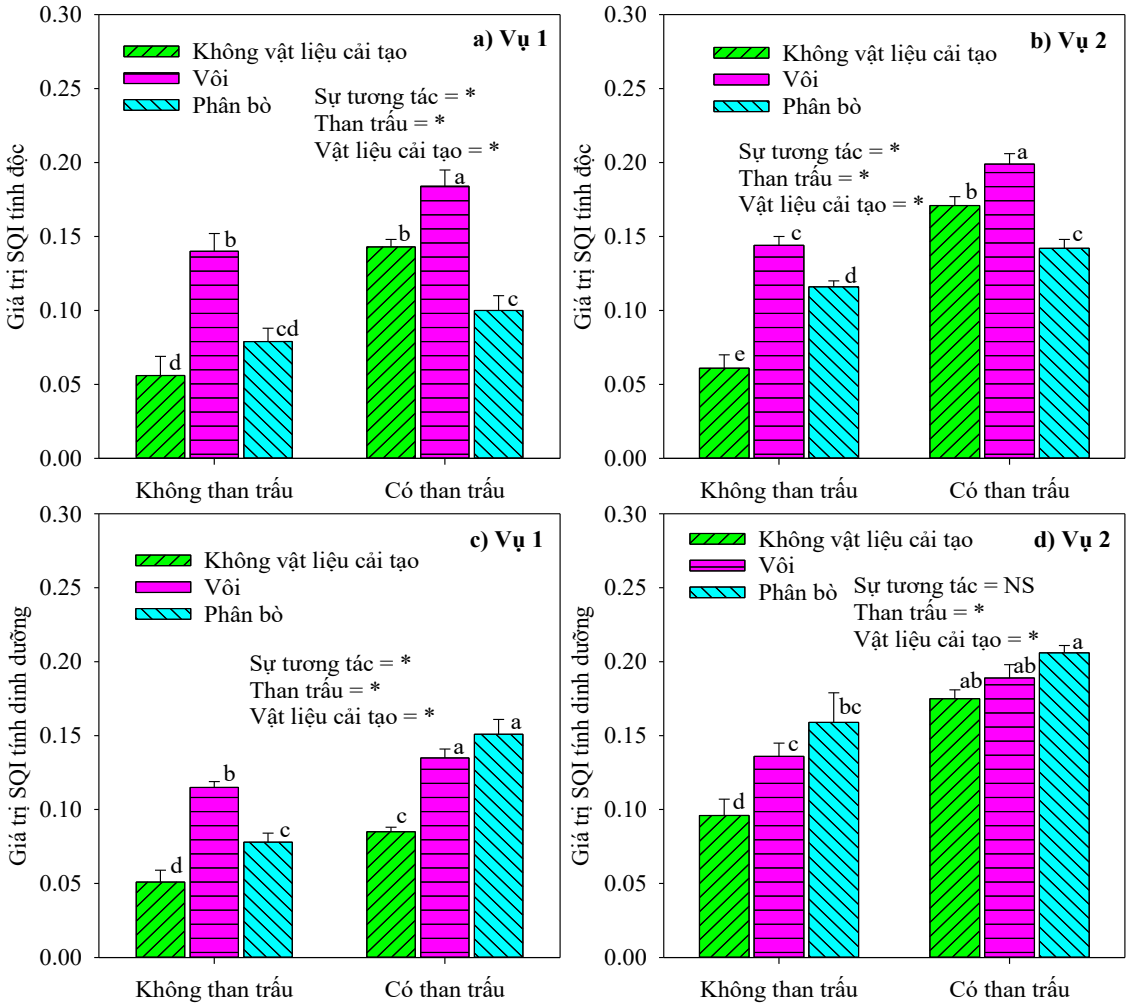
* Các chỉ số chất lượng đất thành phần sau thí nghiệm

Chất lượng đất phèn nhiễm mặn có 4 nhóm khác nhau, bao gồm nhóm tính chất liên quan đến tính axit, tính mặn, tính độc và tính dinh dưỡng của đất. Chất lượng thành phần của bốn nhóm tính chất này được trình bày ở Hình 3.17 và 3.18. Đối với tính axit, NT than trấu kết hợp với vôi cho giá trị SQI tính axit cao nhất ở cả 2 vụ và có ý nghĩa thống kê so với các NT còn lại (Hình 3.17 a,b). Đối với tính mặn, NT than trấu kết hợp với phân bò, vụ 1 và NT chỉ bón vôi, vụ 2 đã làm cho SQI tính mặn tăng lên so với các NT còn lại ở 2 vụ (Hình 3.17 c,d).



Hình 3.17 SQI tính axit vụ 1 (a), vụ 2 (b) và SQI tính mặn vụ 1 (c), vụ 2 (d) sau thí nghiệm ở điều kiện thực tế đồng ruộng (tháng 6 đến tháng 9, năm 2023)

Đối với tính độc, NT than trấu kết hợp với vôi cho SQI tính độc tốt nhất, kế đến là NT chỉ bón than trấu và cuối cùng là NT chỉ bón vôi ở cả 2 vụ (Hình 3.18 a,b). Đối với tính dinh dưỡng (Hình 3.18 c,d), NT than trấu kết hợp với phân bò cho SQI tính dinh dưỡng cao nhất và thấp nhất là NT đối chứng.

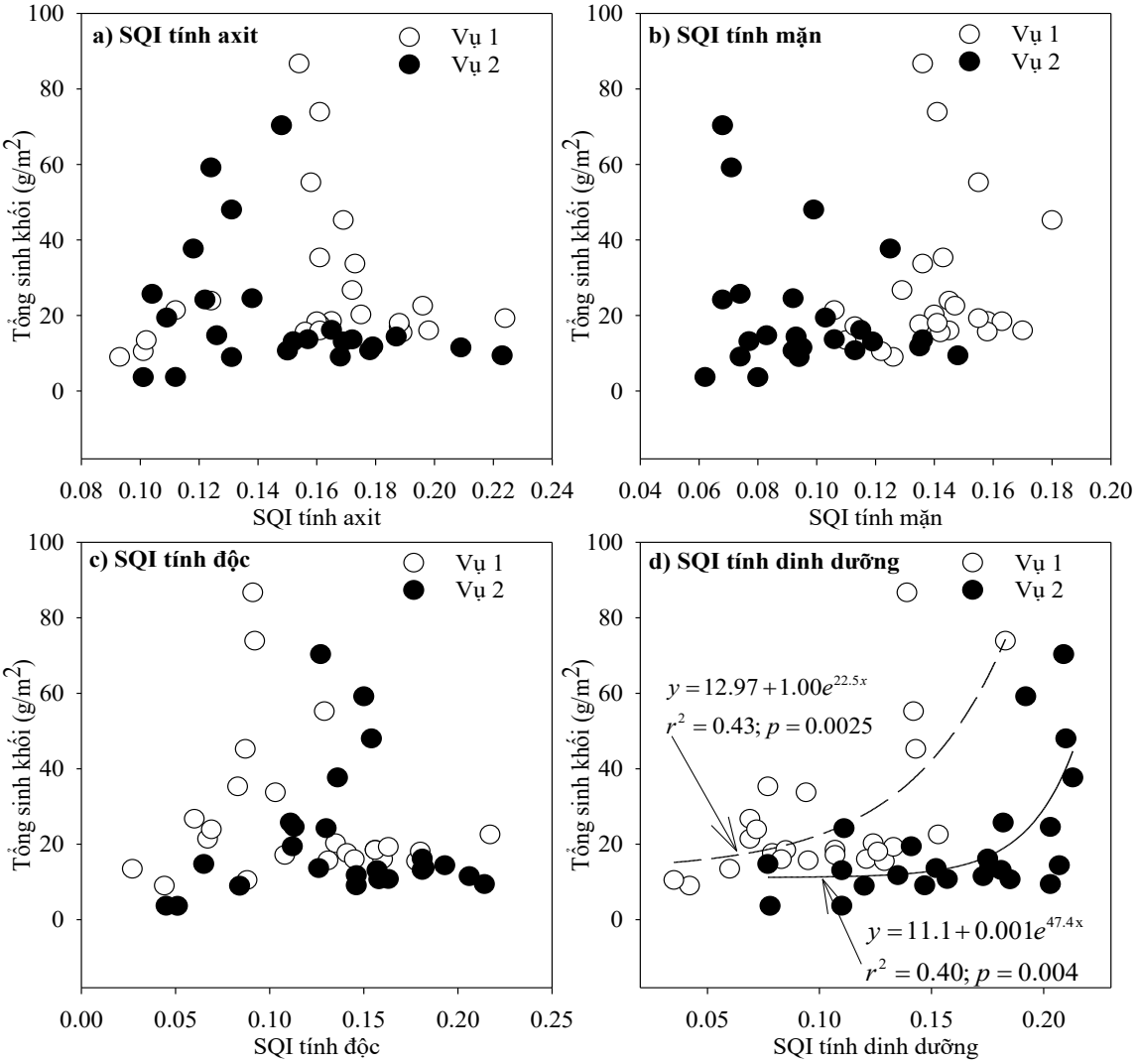


Hình 3.18 SQI tính độc vụ 1 (a), vụ 2 (b) và SQI tính dinh dưỡng vụ 1 (c), vụ 2 (d) sau thí nghiệm ở điều kiện thực tế đồng ruộng (tháng 6 đến tháng 9, năm 2023)

Mối tương quan của các chỉ số chất lượng đất thành phần với tổng sinh khối cải thìa

Mối liên hệ giữa bốn SQI thành phần với tổng sinh khối cải thìa được trình bày ở Hình 3.19. Tổng sinh khối cải thìa có mối liên hệ với SQI tính dinh dưỡng chặt hơn so với tính axit, tính mặn và tính độc, thể hiện qua hệ số quyết định (r^2). Khi SQI tính dinh dưỡng tăng lên thì tổng sinh khối cải thìa tăng lên có ý nghĩa thống kê. Phần trăm đóng góp của SQI tính dinh dưỡng ở vụ 1 là 53,38% và ở vụ 2 là 27,77%, đều cao hơn so với SQI tính axit, mặn và độc. Tổng sinh khối cải thìa không có mối liên hệ có ý nghĩa thống kê với SQI tính axit, tính mặn và tính dộc do chúng có xu hướng tăng giảm bất thường trong khi SQI tính dinh dưỡng có xu hướng tăng đều từ 0 đến

0,15 sau đó tiếp tục tăng thì tổng sinh khối cải thìa cũng tăng theo. Tổng sinh khối có liên hệ với SQI tính dinh dưỡng theo mô hình hàm số mũ. Điều này cho thấy, cải thìa trên đất phèn nhiễm mặn cần một lượng dinh dưỡng lớn để làm tăng khối lượng thân lá hoặc sinh trưởng cải thìa. Vì vậy, ngoài các vật liệu cần thiết (than trấu và vôi) để bổ sung nhằm cải thiện chất lượng đất phèn nhiễm mặn thì việc cung cấp dinh dưỡng như bổ sung phân bò là yếu tố quan trọng quyết định đến việc làm tăng khối lượng thân lá cũng như tổng sinh khối cải thìa tương ứng.



Hình 3.19 Mối tương quan giữa chỉ số chất lượng đất tính axit (a), mặn (b), độc (c) và dinh dưỡng (d) với tổng sinh khối cải thìa sau thí nghiệm ở điều kiện thực tế đồng ruộng (tháng 6 đến tháng 9, năm 2023)

Mô hình thống kê đa biến đã được xây dựng để mô tả mối liên hệ giữa tổng sinh khối (tổng khối lượng thân lá và rễ) với bốn chỉ số chất lượng đất thành phần. Bảng 3.21 cho thấy tổng sinh khối có mối tương quan chặt có ý nghĩa thống kê với SQI tính dinh dưỡng của đất ở cả 2 vụ mùa. Điều này cho thấy tính dinh dưỡng của đất có ảnh hưởng quyết định đến năng suất và sinh trưởng của cải thìa. Đối với tính axit, tất cả các yếu tố áp dụng trong thí nghiệm này đều có có tác dụng cải tạo tương đồng nhau. Tuy nhiên đối với tính mặn ở vụ 1, các yếu tố áp dụng có khả năng cải thiện chỉ số lượng đất kém hơn so với vụ 2. Ngược lại ở tính độc, các yếu tố áp dụng có khả năng cải thiện chỉ số chất lượng đất ở vụ 1 tốt hơn so với vụ 2.

Bảng 3.21 Kết quả phân tích tương quan đa biến và phần trăm giải thích tổng biến thiên của tổng sinh khối cải thìa với các chỉ số chất lượng đất thành phần ở điều kiện thực tế đồng ruộng (tháng 6 đến tháng 9, năm 2023)

Biến số	Vụ 1				Vụ 2			
	Tổng bình phương sai số dư	**Giá trị xác suất**	**Phần trăm đóng góp (%)**	**Nghiệm thức tốt nhất**	**Tổng bình phương sai số dư**	**Giá trị xác suất**	**Phần trăm đóng góp (%)**	**Nghiệm thức tốt nhất**
SQI tính axit	146,78	1,12	1,86	NT5	175,40	1,06	3,68	NT5
SQI tính mặn	13,83	0,11	0,18	NT6	108,74	0,66	2,28	NT2
SQI tính độc	1.021	7,77	12,94	NT5	2,68	0,02	0,06	NT5
SQI tính dinh dưỡng*	4.215	32,05	53,38	NT6	1.323	7,97	27,77	NT6
Sai số	2.498		31,64		3.154		66,21	
Tổng biến thiên	7.895				4.765			

*Ghi chú: * là biến số quyết định từ phương pháp phân tích thống kê đa biến loại dần. NT2: Nghiệm thức chỉ bón vôi. NT5: Nghiệm thức than trấu kết hợp với vôi. NT6: Nghiệm thức than trấu kết hợp với phân bò.*

3.3.6 Thảo luận chung

3.3.6.1 Tác động đơn lẻ của từng loại vật liệu trong việc cải tạo đất phèn nhiễm mặn

Than trấu, với hàm lượng carbon hữu cơ (37,83%) và K trao đổi (11.094 mg/kg) cao nhất (Bảng 3.13), làm tăng OC, CEC và K trao đổi lớn nhất so với vôi hoặc phân bò

(Bảng 3.15). Nồng độ Al trao đổi thấp nhất khi chỉ dùng than trấu, do than trấu có độ kiềm cao, diện tích bề mặt và độ xốp lớn, thúc đẩy hấp phụ Al, giảm hòa tan. Than trấu cung cấp K, P, tăng CEC [180], cải thiện tính axit, mặn, độc của đất phèn nhiễm mặn, nâng cation bazơ trao đổi và độ bão hòa bazơ, từ đó tăng độ phì đất [181]. Vôi, với pH = 13 và hàm lượng Ca cao (93-95%), khắc phục độ chua đất nhờ độ kiềm và giàu cation Ca [182]. pH tăng mạnh do đất ban đầu có pH thấp, với vôi và than trấu thay H^+ bằng Ca, K từ đó giúp nâng pH [183]. Vôi giảm thấp nhất độ chua, H^+ và Fe trao đổi ở thí nghiệm lúa và ở thí nghiệm cải thìa, giảm SO_4^{2-}, H^+, độ chua trao đổi, tương đồng với kết quả nghiên cứu của Nair, Kumar, Lalitha, Shivanand, Kumar, Srinivas, Koyal, Parvathy, Sujatha, Thamban, Mathew, Chandran, Haris, Krishnakumar, Srinivasan, Jessy, Jacob, Nagaraj, D'Souza, Raghuramulu, Hegde and Singh [184]. Vôi tác động H^+ và Al^{3+}, duy trì tỷ lệ ổn định, xử lý một cation bất kỳ cũng ảnh hưởng cation kia [185]. Phân bò có Mehlich-1 P, NH_4^+, Cl^-, SO_4^{2-}, độ chua trao đổi, H^+, CEC, Al và Mn trao đổi cao nhất, giàu dinh dưỡng nhưng độ axit và độc hơn than trấu và vôi (Bảng 3.13 và 3.14). Khi chỉ dùng phân bò, độ chua trao đổi, H^+, Mehlich-1 P, NH_4^+ cao nhất (Bảng 3.15, 3.16, 3.17). Mặc dù hàm lượng Cl^-, SO_4^{2-} cao, nhưng phân bò không làm tăng đáng kể hai anion này trong đất do tính linh động, dễ rửa trôi [186, 187]. Trong thí nghiệm cải thìa, sử dụng than trấu đơn lẻ trong vụ 1 cho SQI tính axit cao hơn các SQI khác. Vôi đơn lẻ cho SQI tính axit cao nhất cả hai vụ. Sử dụng phân bò đơn lẻ trong vụ 2 có SQI tính dinh dưỡng cao nhất, nhưng vụ 1 SQI tính axit cao do độ chua và H^+ lớn, sau đó trung hòa bởi nước tưới, thời tiết. Than trấu hoặc phân bò cải thiện pH, carbon hữu cơ tương tự so với đối chứng, chịu ảnh hưởng từ pH và chất hữu cơ đất.

Than trấu tăng đáng kể năng suất hạt lúa, trọng lượng rơm, hạt và tổng sinh khối, trong khi vôi và phân bò không có tác động rõ rệt (Bảng 3.18). Than trấu, vôi hoặc phân bò đơn lẻ cho kết quả tương tự về rơm, hạt, sinh khối lúa. Với cải thìa, than trấu đơn lẻ cho tổng sinh khối và thân lá thấp nhất, chỉ cao hơn đối chứng ở cả hai vụ (Bảng 3.19). Hàm lượng K cao và giảm độ chua khi kết hợp than trấu với vôi hoặc phân bò là nguyên nhân chính tăng năng suất trên đất axit [188-190]. Vôi hoặc phân

bò đơn lẻ chỉ tăng nhẹ năng suất hạt lúa và sinh khối cải thìa, nhưng phân bò hiệu quả hơn vôi, đặc biệt với cải thìa ở cả hai vụ, trong khi vôi đơn lẻ hầu như không tăng sinh trưởng và năng suất lúa, cải thìa trên đất phèn nhiễm mặn, phù hợp với kết quả nghiên cứu của Masulili, Utomo and MS [191]. Vì vậy, những phát hiện trên cho thấy rằng than trấu, vôi và phân bò tác động rõ rệt đến tính chất và chất lượng đất phèn nhiễm mặn nhờ đặc tính riêng. Các thông số như pH, carbon hữu cơ, Ca và K trao đổi phản ứng trực tiếp với vật liệu. Tuy nhiên, Nhôm, Mangan, P, Cl^- và SO_4^{2-} chịu ảnh hưởng bởi quá trình thứ cấp, không chỉ phụ thuộc vào đặc tính ban đầu của vật liệu.

3.3.6.2 Tác động của tổ hợp các loại vật liệu trong việc cải tạo đất phèn nhiễm mặn

Kết hợp than trấu với vôi hoặc phân bò tăng đáng kể Mehlich-1 P, OC, CEC, Al, Fe, K, Ca trao đổi trong thí nghiệm lúa và cải thìa, vượt trội hơn so với sử dụng đơn lẻ nhờ tác động tổng hợp cải thiện tính chất đất và SQI dinh dưỡng. Dù vôi có thể làm giảm P sẵn có do hấp phụ hoặc tạo hợp chất ít tan [11, 192] nhưng thí nghiệm không ghi nhận rõ nhưng có thể là do pH tăng, Al trao đổi giảm và P ban đầu cao. Phân bò có Al cao nhưng đã làm giảm Al trong đất khi kết hợp than trấu và không làm tăng pH. Fe trao đổi phụ thuộc vào vật liệu, pH cao và hấp phụ trên than trấu, chất hữu cơ [107, 193]. Kết hợp than trấu và vôi không giảm độ chua và H^+ trao đổi như vôi đơn lẻ nguyên nhân là do than trấu có khả năng đệm, chống kiềm hóa mạnh, dẫn đến độ chua và H^+ tăng nhẹ so với chỉ dùng vôi.

Kết hợp than trấu với vôi hoặc phân bò tăng SQI đáng kể trong thí nghiệm lúa và cải thìa, vượt trội so với vật liệu đơn lẻ (Hình 3.13, 3.16) nhờ cải thiện các thông số đất. Với lúa, than trấu tăng SQI 0,25 đơn vị so với đối chứng, nhưng khi kết hợp vôi đã làm tăng lên 0,44 và khi kết hợp phân bò tăng 0,42 đơn vị, điều này cho thấy vôi kết hợp than trấu hiệu quả hơn do hàm lượng Ca sẵn có trong vôi. Với cải thìa, than trấu kết hợp vôi cho SQI cao nhất cả hai vụ, hỗ trợ sinh trưởng nhờ tăng P dễ tiêu, giảm Al và Fe trao đổi. Đất phèn nhiễm mặn có P thấp là do pH thấp và khả năng cố định với Al, Fe, nhưng than trấu kết hợp phân bò đã bổ sung P, giảm độc tính Al, Fe, thúc đẩy sinh trưởng cải thìa.

Các nhân tố chính trong phân tích đa biến đã được sử dụng trong hai thí nghiệm này (thí nghiệm 3 và 4) cho thấy những nhóm chỉ tiêu đất có liên quan chặt chẽ với nhau về mặt hóa học. Chúng phản ánh các quá trình như thay đổi độ chua, mặn, cân bằng ion hay hoạt động oxy hóa khử, vốn ảnh hưởng trực tiếp đến khả năng dinh dưỡng và môi trường sinh trưởng của cây khi áp dụng các vật liệu thân thiện môi trường như than trấu, vôi và phân bò. Từ đó cho thấy, các chỉ số chất lượng đất (tính axit, mặn, độc, dinh dưỡng) tương quan đáng kể với năng suất hạt và tổng sinh khối lúa (mô hình tuyến tính, Hình 3.15) và cải thìa (mô hình mũ, Hình 3.19). Với lúa, vôi kết hợp than trấu cải thiện SQI tính axit (0,19) và độc (0,19) cao nhất, phân bò kết hợp than trấu cải thiện SQI tính dinh dưỡng (0,31) tốt nhất. SQI tính axit tăng từ 0,02-0,22, cùng với tính độc và dinh dưỡng, thúc đẩy năng suất và sinh khối lúa, cho thấy cần cân bằng tính axit, độc và bổ sung dinh dưỡng để cải tạo đất phèn nhiễm mặn, đảm bảo năng suất lúa. Với cải thìa, than trấu kết hợp phân bò cải thiện SQI tính dinh dưỡng tốt nhất, tăng sinh khối khi SQI dinh dưỡng tăng từ 0-0,15 (Hình 3.19d), nhấn mạnh vai trò dinh dưỡng đối với năng suất cải thìa. Than trấu và phân bò cung cấp P, OC, CEC, K cao, cùng N, P, K, Ca, Mg, hỗ trợ sinh trưởng. Kết quả chứng minh tác động tổng hợp của kết hợp vật liệu thân thiện môi trường, nâng cao năng suất cây trồng trên đất phèn nhiễm mặn, đòi hỏi cân đối dinh dưỡng và vi chất.

Tóm lại, kết quả thí nghiệm trên đất phèn nhiễm mặn cho thấy hiệu quả của than trấu, vôi và phân bò phụ thuộc cả vào tính chất vật liệu và trạng thái ban đầu của đất. Ở lúa, tổ hợp than trấu + vôi chủ yếu nâng pH, tăng Ca trao đổi và giảm Al, Fe trao đổi, từ đó giảm độ chua và độc tính, trong khi tổ hợp than trấu + phân bò gia tăng OC, CEC, NH_4^+ và P, dẫn đến cải thiện sinh trưởng, tổng sinh khối và năng suất hạt. Các chỉ tiêu sinh học (tổng sinh khối, năng suất) biểu hiện mối quan hệ tuyến tính với các SQI thành phần (axit, mặn, dinh dưỡng), cho thấy cân bằng giữa tính axit, độc và tính dinh dưỡng là nhân tố quyết định năng suất lúa trên đất phèn mặn. Trên cải thìa, than trấu cải thiện sinh trưởng nhất khi kết hợp với phân bò; than trấu + vôi giảm rõ rệt tính axit (tăng pH, giảm SO_4^{2-}, độ chua trao đổi và H^+ trao đổi), tăng chỉ số chất lượng đất. Cả hai tổ hợp này góp phần giảm mặn, độc và tăng các chỉ tiêu dinh dưỡng (CEC,

P, K), giúp tăng tổng sinh khối và việc cải thiện sinh trưởng chủ yếu liên quan đến nhóm chất lượng đất liên quan đến tính dinh dưỡng.

3.4 Nội dung 4: Đề xuất các giải pháp cải tạo và sử dụng đất phèn nhiễm mặn

3.4.1 Đánh giá tiềm năng cải tạo đất phèn nhiễm mặn bằng vật liệu thân thiện môi trường thông qua phân tích SWOT

3.4.1.1 Phân tích SWOT đối với đất phèn nhiễm mặn

Đất phèn nhiễm mặn bao gồm bốn các đặc tính hóa học: tính axit, tính mặn, tính độc và tính dinh dưỡng. Hai mô hình SWOT dưới đây (Bảng 3.22) được phân tích ứng với hai nhóm gồm tính axit và tính mặn.

Bảng 3.22 Mô hình SWOT tính axit và mặn của đất phèn nhiễm mặn

	Tính axit	**Tính mặn**
Điểm mạnh	Đặc điểm axit hóa của đất đã được xác định rõ ràng qua các kết quả nghiên cứu chi tiết (tính axit ảnh hưởng mạnh mẽ đặc biệt tại tầng đất mặt (0-30 cm) gần bờ biển, do tác động của quá trình thủy triều và quá trình oxy hóa Pyrite) từ đó tạo cơ sở để đề xuất giải pháp trung hòa như vôi hoặc vật liệu kiềm, ...).	Xác định được nguồn gốc mặn (chủ yếu do nước biển xâm nhập hoặc tích tụ muối trong đất, bên cạnh đó tính mặn bị ảnh hưởng cao nhất ở tầng đất mặt) từ đó giúp đưa ra giải pháp như tưới rửa mặn hoặc cải tạo bằng vật liệu hấp phụ muối (than trấu).
Điểm yếu	Đất axit hóa cao có khả năng giải phóng Al^{3+} và Fe^{2+} (chủ yếu tập trung ở tầng đất mặt và gần bờ biển) làm tăng độc tính, gây khó khăn cho việc cải tạo. Ngoài ra, hiệu quả cải tạo phụ thuộc vào liều lượng và cách thức áp dụng các vật liệu.	Độ mặn cao làm giảm khả năng hút nước và dinh dưỡng của cây trồng. Quá trình khắc phục mặn thường tốn nhiều nước và thời gian.
Cơ hội	Sử dụng các vật liệu trung hòa axit như vôi hoặc than trấu là giải pháp chi phí thấp, dễ thực hiện.	Các giải pháp cải tạo như tưới rửa mặn kết hợp với vật liệu hút mặn đã được chứng minh hiệu quả trong điều kiện thực nghiệm.
Thách thức	Biến đổi khí hậu với khí hậu thất thường có thể làm tăng độ chua do hạn hán làm khô đất và oxy hóa khoáng vật sinh phèn Pyrite làm tăng tính axit của đất [194].	Biến đổi khí hậu với mực nước biển dâng cao và thiếu lượng mưa vào mùa khô làm tăng cường mức độ xâm nhập mặn từ nước biển.

Hai mô hình SWOT dưới đây (Bảng 3.23) được phân tích ứng với hai nhóm gồm tính độc và tính dinh dưỡng.

Bảng 3.23 Mô hình SWOT tính độc và dinh dưỡng của đất phèn nhiễm mặn

	Tính độc	**Tính dinh dưỡng**
Điểm mạnh	Các dạng độc tính kim loại đã được định lượng chi tiết từ đó có thể sử dụng vật liệu hấp thụ hoặc cố định độc tính (vôi, than trấu) bằng cách chuyển sang các dạng hóa học ít độc hơn.	Đất phèn có dư một số nguyên tố làm tăng chất lượng đất như hàm lượng OC trong đất, giá trị CEC cao.
Điểm yếu	Độc tính của Al^{3+}, Fe^{2+}, Mn^{2+} không chỉ tăng độc tính trong đất mà còn ảnh hưởng trực tiếp đến cây trồng.	Đất thường mất cân bằng dinh dưỡng như thiếu dinh dưỡng đa lượng (P, K) và nguyên tố độc như Na.
Cơ hội	Kết hợp các vật liệu thân thiện môi trường như vôi (giảm Al^{3+}) và than trấu (cố định kim loại) giúp giảm độc tính đáng kể.	Các vật liệu như phân bò, than trấu cung cấp nguồn dinh dưỡng sẵn có, đồng thời cải thiện cấu trúc và tăng hoạt động vi sinh.
Thách thức	Nhiệt độ và điều kiện ngập nước do biến đổi khí hậu có thể làm tăng độc tính kim loại, gây cản trở cho các phương pháp cải tạo.	Biến đổi khí hậu gây rửa trôi dưỡng chất trong đất, giảm hiệu quả cải tạo nếu không có kế hoạch quản lý hợp lý.

3.4.1.2 Phân tích SWOT đối với các vật liệu thân thiện môi trường trong cải tạo đất

Các vật liệu thân thiện môi trường được nghiên cứu cho việc cải tạo đất phèn nhiễm mặn bao gồm than trấu, vôi và phân bò với hai yếu tố không than trấu (không sử dụng vật liệu, vôi và phân bò) và có than trấu (than trấu, than trấu kết hợp với vôi và than trấu kết hợp với phân bò). Hai mô hình SWOT dưới đây (Bảng 3.24 và Bảng 3.25) được phân tích ứng với hai yếu tố nghiên cứu đã đề cập ở trên.

Bảng 3.24 trình bày mô hình SWOT được phân tích với các vật liệu thân thiện môi trường và không sử dụng than trấu cho cải tạo đất phèn nhiễm mặn.

Bảng 3.24 Mô hình phân tích SWOT các vật liệu thân thiện môi trường và không sử dụng than trấu

	Không sử dụng vật liệu thân thiện môi trường	**Sử dụng vôi**	**Sử dụng phân bò**
Điểm mạnh	Giảm chi phí đầu tư ban đầu, tránh rủi ro sử dụng sai vật liệu.	Hiệu quả trong việc trung hòa độ chua, giảm độc tính Al^{3+}; giá thành rẻ, dễ mua.	Cải thiện tính dinh dưỡng của đất bằng cách bổ sung các nguyên tố mang tính dinh dưỡng hữu cơ (OC, NH_4^+, P, K) cho đất.
Điểm yếu	Không thể cải thiện các đặc tính hóa học của đất, đặc biệt là tính axit và mặn.	Khó cải thiện được các yếu tố giới hạn khác của đất như tính dinh dưỡng, và tính mặn.	Giá trị EC cao, nếu không được xử lý đúng cách có thể làm tăng độ mặn của đất.
Cơ hội	Thích hợp ở các khu vực đất ít bị ảnh hưởng bởi phèn hoặc đất đã ổn định.	Có thể sử dụng để kết hợp với các vật liệu khác như than trấu giúp tăng hiệu quả cải tạo.	Sản xuất và sử dụng tại chỗ giúp giảm chi phí.
Thách thức	Sự thay đổi khí hậu và các hoạt động của con người có thể làm trầm trọng hơn bốn yếu tố giới hạn của đất.	Liều lượng không đúng có thể gây tác dụng ngược, làm giảm chất hữu cơ trong đất.	Phân bò có thể không đồng nhất về hàm lượng dinh dưỡng tùy thuộc vào nguồn thức ăn của bò và cách xử lý.

Bảng 3.25 trình bày mô hình SWOT được phân tích với các vật liệu thân thiện môi trường và có sử dụng than trấu cho cải tạo đất phèn nhiễm mặn.

Bảng 3.25 Mô hình phân tích SWOT các vật liệu thân thiện môi trường và có sử dụng than trấu

	Than trấu	**Than trấu + vôi**	**Than trấu + phân bò**
Điểm mạnh	Cải thiện được tính axit, tính dinh dưỡng và tính độc của đất. Tăng cố định carbon trong đất.	Hiệu quả cải tạo đa dạng: Vôi có khả năng trung hòa độ chua, giảm độc tính của Al^{3+} và Fe^{2+} bằng cách thay thế Na^{+} bằng Ca^{2+}, tăng khả năng trao đổi cation (CEC). Than trấu hấp thụ muối (Na^{+}, Cl^{-}), giúp giảm tính mặn và tăng khả năng giữ nước. Chi phí thấp: Cả than trấu và vôi đều có giá thành rẻ, sẵn có tại địa phương. Thân thiện với môi trường: Than trấu là sản phẩm tái chế từ phế phẩm nông nghiệp, hạn chế phát thải khí nhà kính nếu được sử dụng đúng cách. Dễ áp dụng: Phương pháp cải tạo đơn giản, phù hợp với nhiều loại đất phèn nhiễm mặn. Tăng cố định carbon trong đất.	Cải tạo đa dạng: Phân bò cải thiện tính dinh dưỡng, cung cấp OC, NH_4^{+}, P, K cho đất. Than trấu hấp thụ muối, tăng khả năng giữ nước và chất dinh dưỡng. Tổ hợp này giúp cải thiện cả 4 nhóm đặc tính hóa học: tính axit, mặn, độc, và dinh dưỡng. Thân thiện môi trường: Sử dụng phế phẩm nông nghiệp, giảm lãng phí và phát thải khí nhà kính. Cải tạo lâu dài: Than trấu giúp giữ dinh dưỡng lâu hơn, tăng độ phì nhiêu bền vững của đất. Tăng cố định carbon trong đất.

	Than trấu	Than trấu + vôi	Than trấu + phân bò
Điểm yếu	Hiệu quả phụ thuộc vào đặc tính đất, cần kết hợp với vật liệu khác để tăng tính toàn diện.	Cải thiện tính dinh dưỡng kém. Hiệu quả cải tạo phụ thuộc vào điều kiện đất: Tổ hợp này có thể kém hiệu quả ở vùng đất có độ chua và mặn cao, cần bổ sung thêm nước để rửa trôi. Tác dụng ngắn hạn: Vôi có tác dụng nhanh nhưng không bền vững lâu dài nếu không kết hợp các giải pháp bổ trợ.	Rủi ro mặn hóa: Phân bò chưa qua xử lý có EC cao, có thể làm tăng độ mặn nếu sử dụng với liều lượng lớn. Khó kiểm soát chất lượng: Phân bò có chất lượng không đồng đều, phụ thuộc vào quy trình xử lý và nguồn cung. Tác dụng chậm: Than trấu và phân bò thường mất nhiều thời gian để cải thiện đáng kể tính chất đất so với vôi.
Cơ hội	Nguồn than trấu dồi dào từ phế phẩm nông nghiệp, giá rẻ, dễ sản xuất.	Phù hợp với điều kiện Việt Nam: Các vùng có canh tác nông nghiệp nói chung và vùng đồng bằng sông Cửu Long nói riêng có nguồn than trấu dồi dào từ sản xuất nông nghiệp và dễ dàng mua vôi tại các cửa hàng vật tư nông nghiệp. Hỗ trợ từ chính sách: Chính phủ có thể khuyến khích sử dụng các vật liệu thân thiện môi trường thông qua trợ giá hoặc đào tạo kỹ thuật.	Nguồn nguyên liệu sẵn có: Phân bò và than trấu là những nguyên liệu phổ biến tại các vùng nông thôn Việt Nam, đặc biệt là các khu vực chăn nuôi và trồng trọt. Hỗ trợ nông dân: Chi phí thấp và khả năng tự sản xuất vật liệu này giúp nông dân dễ dàng tiếp cận và sử dụng. Hướng tới nông nghiệp bền vững: Giảm phụ thuộc vào phân bón hóa học, đồng thời cải thiện chất lượng đất trong dài hạn.
Thách thức	Cần chi phí nhất định để sản xuất than.	Biến đổi khí hậu: Tần suất, cường độ xâm nhập mặn và lũ lụt ngày càng tăng có thể làm giảm hiệu quả cải tạo, cần phải áp dụng giải pháp bổ sung thường xuyên. Nguồn cung không đồng đều: Than trấu có thể không đủ cung cấp ở một số vùng xa trung tâm sản xuất nông nghiệp.	Cần chi phí nhất định để sản xuất than. Ô nhiễm môi trường: Nếu phân bò không được xử lý kỹ, có thể gây ô nhiễm môi trường, bao gồm cả nước ngầm.

3.4.1.3 Tổng hợp chiến lược từ ma trận SWOT

Chiến lược S-O (Strenghts: điểm mạnh - Opportunities: cơ hội) tập trung vào việc tận dụng các điểm mạnh nội tại kết hợp với những cơ hội từ môi trường bên ngoài để phát triển các giải pháp cải tạo đất phèn nhiễm mặn hiệu quả. Dựa trên kết quả nghiên cứu thực nghiệm đầy triển vọng, việc đẩy mạnh ứng dụng các tổ hợp vật liệu thân thiện môi trường như vôi kết hợp với than trấu hoặc than trấu kết hợp với phân bò đã cho thấy hiệu quả tích cực trong việc cải thiện các hạn chế hóa học của đất. Những tổ hợp vật liệu này có ưu điểm là dễ tìm kiếm, chi phí hợp lý và thân thiện với môi trường. Để mở rộng quy mô ứng dụng, cần thiết xây dựng các mô hình thí điểm trên các vùng đất phèn nhiễm mặn có điều kiện tự nhiên và tính chất đất khác nhau. Những mô hình này sẽ giúp đánh giá hiệu quả thực tế của các tổ hợp vật liệu trong điều kiện canh tác thực tế, đồng thời tạo cơ sở để điều chỉnh và tối ưu hóa tỷ lệ phối trộn vật liệu cho phù hợp với từng loại đất cụ thể. Thông qua việc triển khai các mô hình thí điểm, nông dân sẽ có cơ hội tiếp cận, học hỏi và áp dụng các giải pháp cải tạo đất hiệu quả, từ đó góp phần nâng cao năng suất canh tác và phát triển nông nghiệp bền vững trên vùng đất phèn nhiễm mặn.

Chiến lược W-O (Weekness: điểm yếu - Opportunities: cơ hội) tập trung vào việc khắc phục những điểm yếu hiện tại để tận dụng tối đa các cơ hội phát triển trong tương lai về cải tạo đất phèn nhiễm mặn. Một trong những ưu tiên hàng đầu là đẩy mạnh nghiên cứu chuyên sâu về hiệu quả dài hạn của từng loại vật liệu cũng như các tổ hợp vật liệu thân thiện môi trường trong cải tạo đất. Các nghiên cứu này cần tập trung vào việc đánh giá tính bền vững của giải pháp, khả năng duy trì hiệu quả cải tạo theo thời gian và tác động lâu dài đến môi trường đất và năng suất cây trồng. Song song đó, việc tăng cường huy động nguồn lực tài chính và kỹ thuật từ chính phủ và các tổ chức quốc tế đóng vai trò then chốt trong việc thúc đẩy nghiên cứu và triển khai ứng dụng. Sự hỗ trợ này không chỉ giúp nâng cao chất lượng nghiên cứu mà còn tạo điều kiện để chuyển giao công nghệ và kỹ thuật cải tạo đất đến người nông dân, đồng thời giúp họ tiếp cận được với các vật liệu thân thiện môi trường có chất lượng với chi phí hợp lý.

Chiến lược S-T (Strengths: điểm mạnh - Threats: thách thức) tập trung vào việc tận dụng những điểm mạnh của đất phèn nhiễm mặn và các loại vật liệu thân thiện môi trường để ứng phó với các thách thức của đất phèn nhiễm mặn trong bối cảnh biến đổi khí hậu hiện nay. Đầu tiên là cần phát triển các kỹ thuật cải tạo đất linh hoạt (ví dụ: tưới rửa mặn, luân canh cây trồng). Việc đào tạo nông dân sử dụng vật liệu thân thiện môi trường đúng cách để tối ưu hóa hiệu quả cũng là giải pháp cần quan tâm và thực hiện cấp bách.

Chiến lược W-T (Weekness: điểm yếu - Threats: thách thức) tập trung vào tận dụng điểm yếu của đất phèn nhiễm mặn để ứng phó với các thách thức về giải pháp cải tạo loại đất này. Việc kết hợp cải tạo đất với các biện pháp quản lý nông nghiệp bền vững như luân canh cây trồng và bảo tồn đất cần được ưu tiên hàng đầu. Song song đó, cần phát triển các chính sách hỗ trợ trực tiếp cho nông dân, bao gồm trợ giá vật liệu thân thiện môi trường và đào tạo kỹ thuật.

Từ phân tích SWOT chi tiết và các chiến lược kết hợp ở trên, có thể thấy rằng việc ứng dụng các loại vật liệu thân thiện môi trường vào cải tạo đất phèn nhiễm mặn trong bối cảnh biến đổi khí hậu là khả thi nhưng phụ thuộc vào nhiều yếu tố. Điểm mạnh từ nền tảng nghiên cứu vững chắc và kết quả khả quan ban đầu cho thấy tiềm năng của việc cải tạo đất phèn nhiễm mặn, đặc biệt khi các vật liệu này có khả năng cải thiện năng suất cây trồng. Điểm yếu như tính phức tạp của đất và chi phí sản xuất cần được khắc phục bằng việc tinh chỉnh giải pháp cho từng vùng đất cụ thể và tối ưu hóa chi phí sản xuất vật liệu. Cơ hội mở ra từ chính sách hỗ trợ của chính phủ và nhu cầu cấp bách về cải tạo đất, giúp tăng khả năng ứng dụng thực tiễn và mở rộng các khu vực khác. Tuy nhiên, thách thức về biến đổi khí hậu và thiếu nguồn lực tại địa phương đòi hỏi sự phối hợp chặt chẽ giữa các bên liên quan và phát triển các giải pháp lâu dài, linh hoạt để đảm bảo thành công trong quá trình cải tạo đất. Vì vậy, để ứng dụng thành công các giải pháp cải tạo đất phèn nhiễm mặn, cần kết hợp nghiên cứu khoa học với chính sách hỗ trợ tài chính và kỹ thuật, cũng như nâng cao nhận thức của người dân về vấn đề này.

3.4.2 Các giải pháp cải tạo và sử dụng đất phèn nhiễm mặn

Vôi là một yếu tố quan trọng trong việc cải tạo đất phèn nhiễm mặn, vì có khả năng trung hòa axit, giảm độc tính của các ion kim loại nặng như Al^{3+} và Fe^{2+}, đồng thời tăng pH và cải thiện độ no bazơ (Ca^{2+}, Mg^{2+}). Vôi có thể bón trước hoặc sau khi ngập nước để đạt hiệu quả cao nhất trong việc cải thiện đất. Bên cạnh đó, than trấu có tác dụng nâng cao khả năng trao đổi cation và giữ nước, giúp giảm nồng độ muối hòa tan trong đất. Điều này rất quan trọng trong việc tạo môi trường thuận lợi cho sự phát triển của cây trồng, đặc biệt là trong đất phèn nhiễm mặn. Kết quả nghiên cứu cũng cho thấy than trấu giúp giữ lại các dưỡng chất như P và K, làm tăng dinh dưỡng đất hơn. Phân bò cung cấp carbon hữu cơ, giúp giảm sự di động của các ion độc như Al^{3+} và Fe^{2+}, đồng thời cung cấp dưỡng chất cho cây trồng. Các kết quả nghiên cứu cũng đã chứng minh rằng bón phân bò trước mùa vụ giúp thúc đẩy phân hủy hữu cơ trong điều kiện yếm khí, làm tăng độ màu mỡ của đất (thí nghiệm 2). Khi kết hợp vôi và than trấu, hiệu quả cải tạo đất sẽ được nâng cao, với vôi trung hòa axit nhanh chóng trong khi than trấu giữ lại dinh dưỡng. Việc kết hợp phân bò và than trấu cũng giúp tăng cường lượng carbon hữu cơ, cải thiện khả năng trao đổi cation và giữ nước, tạo điều kiện thuận lợi cho cây trồng trong mùa khô. Các kết quả nghiên cứu đều cho thấy rằng việc lựa chọn tỷ lệ phối trộn vôi, than trấu và phân bò phù hợp với từng điều kiện đất và cây trồng sẽ mang lại hiệu quả cao trong việc cải tạo đất phèn mặn (thí nghiệm 1, 2, 3), giúp cây trồng phát triển bền vững và năng suất cao (thí nghiệm 2, 3). Như vậy, dựa trên các kết quả nghiên cứu (kết quả của 4 thí nghiệm) đều đã chứng minh điều này, việc đề xuất các giải pháp cải tạo và sử dụng đất phèn nhiễm mặn hiệu quả, cụ thể như sau:

3.4.2.1 Giải pháp cho đất ngập nước trồng lúa

Với khả năng trung hòa axit, giảm độc tính của Al^{3+} và Fe^{2+}, tăng pH đất, cải thiện độ no bazơ (Ca^{2+}, Mg^{2+}) như vôi có thể bón trước hoặc sau khi ngập nước để tăng hiệu quả cải tạo. Sử dụng than trấu giúp cải thiện CEC, giảm nồng độ muối hòa tan và trộn đều vào đất trước khi ngập nước, thúc đẩy vai trò giữ P và K. Phân bò, cung

cấp carbon hữu cơ, giảm sự di động của các ion độc như Al^{3+} và Fe^{2+}. Do đó, bón phân bò trước mùa vụ để thúc đẩy phân hủy hữu cơ trong điều kiện yếm khí.

Khi kết hợp than trấu và vôi làm tăng độ no bazơ, giảm axit hóa và độc tính nhôm. Than trấu giữ dinh dưỡng trong đất, còn vôi trung hòa axit nhanh. Do đó, phối trộn tỷ lệ phù hợp trước khi cày bừa sau đó mới bón vào đất. Mặt khác, khi kết hợp than trấu và phân bò có hiệu quả tăng OC và dinh dưỡng, giảm sự hình thành axit sulfuric trong đất ngập. Do đó, nên bón phân bò và phủ lớp than trấu mỏng lên bề mặt.

3.4.2.2 Giải pháp cho đất trồng cây hoa màu

Vôi có khả năng cải thiện pH, giảm độc tính của các ion độc, tăng khả năng hấp thụ Ca^{2+} và Mg^{2+}. Vì vậy, nên ứng dụng bón vôi trong mùa khô để cải thiện tầng đất mặt.

Than trấu giúp giữ P và K, tăng khả năng giữ nước, hạn chế rửa trôi dinh dưỡng. Trộn vào đất là việc làm cần thiết trước khi gieo hạt giúp cải thiện độ tơi xốp và giảm độ mặn. Phân bò giúp bổ sung OC và các nguyên tố vi lượng cải thiện màu mỡ của đất. Vì vậy, cần bón lót trước khi trồng hoa màu để thúc đẩy hoạt động phân hủy.

Kết hợp than trấu và vôi sẽ phù hợp với cây rau màu chịu mặn, giúp giữ chất dinh dưỡng và giảm độc tố hiệu quả. Do đó, nên phối trộn trước mùa mưa để chống rửa trôi. Ngoài ra, khi kết hợp than trấu và phân bò giúp tăng khả năng trao đổi cation, cải thiện OC và giữ nước cho cây trồng trong mùa khô. Do đó, nên phủ lớp hỗn hợp trên bề mặt đất canh tác.

Mặt khác, tùy thuộc loại cây trồng có thể lựa chọn giải pháp phù hợp với nhu cầu dinh dưỡng và khả năng chịu mặn của từng cây trồng. Ngoài ra, cần nghiên cứu thêm về tỷ lệ phối trộn vôi, than trấu, và phân bò tối ưu cho từng điều kiện đất và cây trồng cụ thể. Bên cạnh đó, việc theo dõi thực địa như kết hợp công nghệ cảm biến để giám sát pH, độ mặn và dinh dưỡng đất trong suốt mùa vụ.

Tóm lại, phân tích SWOT khẳng định đất phèn nhiễm mặn là một hệ đất phức tạp với thách thức chủ đạo là độ chua cao, độ mặn và tồn lưu kim loại độc (Al, Fe, Mn) làm suy giảm năng suất và chức năng đất. Tuy nhiên, đất này có khả năng được cải tạo

đáng kể bằng các biện pháp thích hợp: vôi ưu tiên cho trung hòa axit và giảm độc tính Al; phân bò và than sinh học cải thiện OC, CEC và khả năng giữ dinh dưỡng; sự phối hợp (vôi + than trấu, phân bò + than trấu) cho hiệu quả toàn diện hơn về pH, dinh dưỡng và hạn chế di động kim loại. Các biện pháp cần được điều chỉnh theo kiểu canh tác: với đất ngập (lúa) ưu tiên giảm độc tính, giữ nước và tăng dinh dưỡng; với đất cạn (rau màu) ưu tiên tăng tơi xốp, thoát nước và giảm mặn. Tiếp cận tích hợp, điều chỉnh theo mục tiêu cây trồng và điều kiện địa phương sẽ giúp nâng cao bền vững sản xuất trên đất phèn nhiễm mặn.

KẾT LUẬN VÀ KIẾN NGHỊ

1. Kết luận

Các nhóm yếu tố chính trong đất phèn nhiễm mặn thể hiện rõ nét qua từng loại hình sử dụng đất và độ sâu lớp đất. Tính axit mạnh nhất tại đất trồng lúa và đất trồng cây hằng năm khác, đặc biệt ở tầng đất mặt gần biển, do tác động của thủy triều và quá trình oxy hóa Pyrite. Đất trồng lúa cũng chịu ảnh hưởng nặng nề của mặn ở lớp bề mặt, do sự xâm nhập của nước biển. Các kim loại độc như Fe^{2+}, Mn^{2+} và Al^{3+} tập trung cao ở tầng đất mặt và khu vực ven biển, nổi bật ở đất trồng lúa và đất tự nhiên. Về mặt dinh dưỡng, đất trồng cây lâu năm và lúa có hàm lượng dinh dưỡng cao hơn, nhưng giảm dần khi tiến gần biển do ảnh hưởng kết hợp của tính mặn và axit. Những yếu tố này là trở ngại lớn, cản trở sự sinh trưởng và phát triển của cây trồng trên đất phèn nhiễm mặn.

Tổ hợp vật liệu thân thiện môi trường gồm than trấu, vôi và phân bò đã chứng minh khả năng cải thiện các đặc tính hóa học của đất phèn nhiễm mặn như cải thiện độ chua, mặn, giảm độc tính và tăng dinh dưỡng. Vôi trung hòa axit và bổ sung Ca^{2+} thay thế Na^{+}, than trấu gia tăng OC và CEC đồng thời hấp phụ Na^{+}, Cl^{+} và các ion kim loại, hạn chế tính di động của chúng, phân bò bổ sung nguồn dinh dưỡng và cung cấp hữu cơ. Dưới hai chế độ nước, tưới ngập hỗ trợ rửa trôi muối hòa tan và một phần kim loại còn độ ẩm 60% tạo môi trường ổn định cho quá trình tạo phức hữu cơ và giảm hòa tan kim loại. Về độc tính nhôm, tổ hợp than trấu kết hợp vôi đã làm giảm Al trao đổi và Al liên kết yếu, đồng thời tăng pH làm thúc đẩy kết tủa Al ở dạng ít hoà tan hoặc liên kết bền với hữu cơ, chuyển hóa Al sang dạng ít gây độc lâu dài.

Than trấu kết hợp với vôi cải tạo tốt nhất tính axit và tính độc, than trấu kết hợp với phân bò cải tạo tốt nhất tính dinh dưỡng của đất phèn nhiễm mặn. Sự kết hợp các vật liệu giúp cân bằng các đặc tính hóa học của đất phèn nhiễm mặn (mặn, axit và độc tính đối với thí nghiệm trên lúa) và cải thiện dinh dưỡng (tính dinh dưỡng đối với thí nghiệm trên cải thìa). Điều này đã tạo điều kiện tối ưu cho sinh trưởng cây trồng.

Các giải pháp cải tạo cần được điều chỉnh để phù hợp với loại cây trồng cụ thể. Đối với đất ngập nước trồng lúa, ưu tiên cải thiện khả năng giữ nước, giảm độc tính và tăng hàm lượng dinh dưỡng. Với đất cạn trồng màu, cần tập trung vào tăng độ tơi xốp, cải thiện khả năng thoát nước và giảm độ mặn. Sự phối hợp linh hoạt giữa các giải pháp này sẽ đảm bảo tính bền vững và hiệu quả trong sử dụng đất phèn nhiễm mặn, đồng thời mở ra tiềm năng lớn hơn cho phát triển nông nghiệp trên các vùng đất khó khăn này.

Cả 4 giả thuyết khoa học đều được xác nhận và chứng minh có cơ sở khoa học từ các nghiên cứu ở trên. Sự kết hợp giữa than trấu với vôi và/hoặc than trấu với phân bò là giải pháp cải tạo đất phèn nhiễm mặn toàn diện, vừa giảm các đặc tính hóa học của đất, vừa nâng cao chất lượng và độ phì nhiêu, đồng thời hỗ trợ sự phát triển bền vững cho cây trồng, góp phần ứng phó với thách thức từ biến đổi khí hậu.

2. Kiến nghị

Trong nghiên cứu này, các vật liệu thân thiện môi trường như vôi, phân bò và than trấu và các tổ hợp của chúng (than trấu + vôi, than trấu + phân bò) đã cho thấy hiệu quả trong việc giảm tính axit, độc chất và cải thiện dinh dưỡng đất phèn nhiễm mặn. Tuy nhiên, một số vấn đề vẫn cần được tiếp tục nghiên cứu. Thứ nhất, tính mặn chưa được kiểm soát hiệu quả ở những vùng có độ mặn cao, cần có các giải pháp tập trung hơn vào xử lý mặn dài hạn. Thứ hai, các giải pháp cải tạo hiện tại chỉ tập trung vào lúa và rau trong khi ảnh hưởng của chúng lên những nhóm cây trồng khác như cây ăn quả và cây công nghiệp chưa được làm rõ. Thứ ba, cần nghiên cứu tối ưu hóa liều lượng và điều kiện áp dụng của các vật liệu thân thiện môi trường (vôi, phân bò và than trấu) để phù hợp hơn với từng loại đất và mức độ phèn - mặn. Cuối cùng, hiệu quả kinh tế của các giải pháp cũng cần được đánh giá sâu hơn nhằm hỗ trợ nhân rộng và ứng dụng thực tiễn. Đây là những định hướng quan trọng cho các nghiên cứu tiếp theo để hoàn thiện và nâng cao hiệu quả của giải pháp đã đề xuất.

DANH MỤC CÔNG TRÌNH ĐÃ CÔNG BỐ CỦA NGHIÊN CỨU SINH

Tạp chí quốc tế:

1. **Tung Xuan Tan Nguyen**, Binh Thanh Nguyen, Binh Vu Thai, and Minh Quang Vo*, "Soil quality assessment on different land use types in the coastal saline acid sulfate soils of Can Gio District, Vietnam," *Ecological Engineering & Environmental Technology*, vol. 26, no. 8, pp. 115-129, 2025, https://doi.org/10.12912/27197050/207331.

2. **Tung Xuan Tan Nguyen**, Binh Thanh Nguyen*, and Binh Vu Thai, "Amelioration of salt-affected soil using combined amendments for synergistic effects: Impacts and management implications," *Soil Use and Management*, vol. 40, no. 3, pp. e13104, 2024, https://doi.org/10.1111/sum.13104.

3. **Tung Xuan Tan Nguyen** and Binh Thanh Nguyen*, "The effects of two different biochars on the characteristics of saline acid sulfate soil," *Land Degradation and Development*, vol. 34, no. 12, pp. 3744-3754, 2023, http://doi.org/10.1002/ldr.4717.

Tạp chí trong nước:

Nguyễn Tân Xuân Tùng, Nguyễn Thanh Bình*, và Thái Vũ Bình, "Đặc tính đất phèn nhiễm mặn và các giải pháp cải tạo trong bối cảnh biến đổi khí hậu," *Tạp chí Nông nghiệp và Phát triển Nông thôn,* số 16, trang: 43-52. 30/8/2023.

Hội nghị quốc tế:

Tung Xuan Tan Nguyen, Binh Thanh Nguyen*, and Binh Vu Thai. Fractionation and remediation of quality components of saline acid-sulfate soil for improved Pak Choy with combined eco-friendly amendments," presented at the *International Conference of Agricultural Science "Climate-Smart and Resilient Agriculture for Sustainable Development" in Session: Soil health for climate resilient and sustainable development*, Can Tho University, Vietnam, 28-29/08/2024.

DANH MỤC TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1] M. Q. Vo, H. V. Tran, and V. T. Pham, "Constraints of acid sulfate soils and practical use for the improvement of farming in the Mekong Delta, Vietnam: A Review," *Indian Journal of Agricultural Research,* vol. 58, no. 3, pp. 369-379, 2024.

[2] J. Shamshuddin, A. E. Azura, M. Shazana, C. Fauziah, Q. Panhwar, and U. Naher, "Properties and management of acid sulfate soils in Southeast Asia for sustainable cultivation of rice, oil palm, and cocoa," *Advances in Agronomy,* vol. 124, pp. 91-142, 2014.

[3] A. Lindgren, I. K. Jonasson, C. Öhrling, and M. Giese, "Acid sulfate soils and their impact on surface water quality on the Swedish west coast," *Journal of Hydrology: Regional Studies,* vol. 40, p. 101019, 2022.

[4] L. W. Morton, N. K. Nguyen, and M. S. Demyan, "Salinity and acid sulfate soils of the Vietnam Mekong Delta: Agricultural management and adaptation," *Journal of Soil and Water Conservation,* vol. 78, no. 4, pp. 85A-92A, 2023.

[5] T. X. T. Nguyen and B. T. Nguyen, "The effects of two different biochars on the characteristics of saline acid sulfate soil," *Land Degradation & Development,* vol. 34, no. 12, pp. 3744-3754, 2023.

[6] J. Palko and K. Weppling, "Lime requirement experiments in acid sulphate soils," *Acta Agriculturae Scandinavica, Section B — Soil & Plant Science,* vol. 44, no. 3, pp. 149-156, 1994.

[7] S. Shoghi Kalkhoran, D. Pannell, T. Thamo, B. White, and M. Polyakov, "Soil acidity, lime application, nitrogen fertility, and greenhouse gas emissions: Optimizing their joint economic management," *Agricultural Systems,* vol. 176, p. 102684, 2019.

[8] W. Ejigu, Y. G. Selassie, E. Elias, and E. Molla, "Effect of lime rates and method of application on soil properties of acidic Luvisols and wheat (Triticum aestivum, L.) yields in northwest Ethiopia," (in eng), *Heliyon,* vol. 9, no. 3, p. e13988, 2023.

[9] T. Ameyu, "A review on the potential effect of lime on soil properties and crop productivity improvements," *Journal of Environment and Earth Science,* vol. 9, no. 2, pp. 17-23, 2019.

[10] M. Mosharrof, M. K. Uddin, M. F. Sulaiman, S. Mia, S. M. Shamsuzzaman, and A. N. A. Haque, "Combined application of biochar and lime increases

maize yield and accelerates carbon loss from an acidic soil," *Agronomy,* vol. 11, no. 7, p. 1313, 2021.

[11] L. Ping, B. Mart, V. Natasja, S. Yan-ni, Z. Yong-jun, W. Zi-ming, and V. Kees Jan, "Liming reduces soil phosphorus availability but promotes yield and P uptake in a double rice cropping system," *Journal of Integrative Agriculture,* vol. 19, no. 11, pp. 2807-2814, 2020.

[12] S. K. Sarangi, M. Mainuddin, and B. Maji, "Problems, management, and prospects of acid sulphate soils in the Ganges Delta," *Soil Systems,* vol. 6, no. 4, p. 95, 2022.

[13] N. Rayne and L. Aula, "Livestock manure and the impacts on soil health: A review," *Soil Systems,* vol. 4, no. 4, p. 64, 2020.

[14] D. Liang, Y. Ning, C. Ji, Y. Zhang, H. Wu, H. Ma, J. Zhang, and J. Wang, "Biochar and manure co-application increases rice yield in low productive acid soil by increasing soil pH, organic carbon, and nutrient retention and availability," *Plants,* vol. 13, no. 7, p. 973, 2024.

[15] W. Lin, M. Lin, H. Zhou, H. Wu, Z. Li, and W. Lin, "The effects of chemical and organic fertilizer usage on rhizosphere soil in tea orchards," *PloS One,* vol. 14, no. 5, p. e0217018, 2019.

[16] Y. Li-Xian, L. Guo-Liang, T. Shi-Hua, G. Sulewski, and H. Zhao-Huan, "Salinity of animal manure and potential risk of secondary soil salinization through successive manure application," *The Science of The Total Environment,* vol. 383, pp. 106-14, 2007.

[17] N. Sharma and A. K. Jha, "Overview of Eco-Friendly Construction Materials," in *Intelligent Energy Management Technologies: ICAEM 2019*: Springer, 2020, pp. 111-118.

[18] G. Sorrenti, C. A. Masiello, B. Dugan, and M. Toselli, "Biochar physico-chemical properties as affected by environmental exposure," *Science of the total Environment,* vol. 563, pp. 237-246, 2016.

[19] 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.

[20] N. C. Brady, R. R. Weil, and R. R. Weil, *The nature and properties of soils*. Prentice Hall Upper Saddle River, NJ, 2008.

[21] Y. Yuan, Q. Liu, H. Zheng, M. Li, Y. Liu, X. Wang, Y. Peng, X. Luo, F. Li, X. Li, and B. Xing, "Biochar as a sustainable tool for improving the health of

salt-affected soils," *Soil & Environmental Health,* vol. 1, no. 3, p. 100033, 2023.

[22] Z. Zhang, X. Dong, S. Wang, and X. Pu, "Benefits of organic manure combined with biochar amendments to cotton root growth and yield under continuous cropping systems in Xinjiang, China," *Scientific Reports,* vol. 10, no. 1, p. 4718, 2020.

[23] H. M. Alkharabsheh, M. F. Seleiman, M. L. Battaglia, A. Shami, R. S. Jalal, B. A. Alhammad, K. F. Almutairi, and A. M. Al-Saif, "Biochar and its broad impacts in soil quality and fertility, nutrient leaching and crop productivity: A review," *Agronomy,* vol. 11, no. 5, p. 993, 2021.

[24] V. Gunarathne, A. Senadeera, U. Gunarathne, J. K. Biswas, Y. A. Almaroai, and M. Vithanage, "Potential of biochar and organic amendments for reclamation of coastal acidic-salt affected soil," *Biochar,* vol. 2, no. 1, pp. 107-120, 2020.

[25] P. Srivatsav, B. S. Bhargav, V. Shanmugasundaram, J. Arun, K. P. Gopinath, and A. Bhatnagar, "Biochar as an eco-friendly and economical adsorbent for the removal of colorants (dyes) from aqueous environment: A review," *Water,* vol. 12, no. 12, p. 3561, 2020.

[26] W. Park, H. Kim, H. Park, S. Choi, S. J. Hong, and Y.-M. Bahk, "Biochar as a low-cost, eco-friendly, and electrically conductive material for terahertz applications," *Scientific Reports,* vol. 11, no. 1, pp. 1-8, 2021.

[27] P. Do, T. Ueda, R. Kose, L. X. Nguyen, T. Okayama, and T. Miyanishi, "Properties and potential use of biochars from residues of two rice varieties, Japanese Koshihikari and Vietnamese IR50404," *Journal of Material Cycles and Waste Management,* vol. 21, no. 1, pp. 98-106, 2019.

[28] S. Ren-yong, L. Jiu-yu, N. Ni, and X. Ren-kou, "Understanding the biochar's role in ameliorating soil acidity," *Journal of Integrative Agriculture,* vol. 18, no. 7, pp. 1508-1517, 2019.

[29] J. M. Novak, M. G. Johnson, and K. A. Spokas, "Concentration and release of phosphorus and potassium from lignocellulosic-and manure-based biochars for fertilizer reuse," *Frontiers in Sustainable Food Systems,* vol. 2, p. 54, 2018.

[30] F. Li, X. Liang, C. Niyungeko, T. Sun, F. Liu, and Y. Arai, "Effects of biochar amendments on soil phosphorus transformation in agricultural soils," *Advances in Agronomy,* vol. 158, pp. 131-172, 2019.

[31] S. Amini, H. Ghadiri, C. Chen, and P. Marschner, "Salt-affected soils, reclamation, carbon dynamics, and biochar: a review," *Journal of Soils and Sediments,* journal article vol. 16, no. 3, pp. 939-953, 2016.

[32] S. Gul, J. K. Whalen, B. W. Thomas, V. Sachdeva, and H. Deng, "Physico-chemical properties and microbial responses in biochar-amended soils: mechanisms and future directions," *Agriculture, Ecosystems & Environment,* vol. 206, pp. 46-59, 2015.

[33] E. C. Hammer, M. Forstreuter, M. C. Rillig, and J. Kohler, "Biochar increases arbuscular mycorrhizal plant growth enhancement and ameliorates salinity stress," *Applied soil ecology,* vol. 96, pp. 114-121, 2015.

[34] J. Li, X. Wu, M. T. Gebremikael, H. Wu, D. Cai, B. Wang, B. Li, J. Zhang, Y. Li, and J. Xi, "Response of soil organic carbon fractions, microbial community composition and carbon mineralization to high-input fertilizer practices under an intensive agricultural system," *PLoS One,* vol. 13, no. 4, p. e0195144, 2018.

[35] P. T. Vũ và V. Q. Minh, "Sử dụng có hiệu quả đất phèn, mặn ở đồng bằng sông Cửu Long," *Đất Việt Nam, Hiện trạng sử dụng và thách thức,* trang. 167-174, 2015.

[36] R. Fitzpatrick, R. Merry, J. Williams, I. White, G. Bowman, and G. Taylor, "Acid sulfate soil assessment: coastal, inland and minesite conditions," *National Land and Water Resources Audit Methods Paper, Australia,* 1998.

[37] V. N. Nam, L. Sinh, T. Miyagi, S. Baba, and H. Chan, "An overview of Can Gio district and mangrove biosphere reserve," *Studies in Can Gio Mangrove Biosphere Reserve, Ho Chi Minh City, Vietnam Mangrove Ecosystems Technical Reports,* vol. 6, pp. 1-7, 2014.

[38] J. T. Jennings, *Natural history of the Riverland and Murraylands*. Royal Society of South Australia, Adelaide, 2009.

[39] P. Rengasamy, "Soil processes affecting crop production in salt-affected soils," *Functional Plant Biology,* vol. 37, no. 7, pp. 613-620, 2010.

[40] K. T. Osman, "Acid soils and acid sulfate soils," in *Management of soil problems*: Springer, 2018, pp. 299-332.

[41] IPCC, "Climate Change 2021: The Physical Science Basis," *Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change,* 2021.

[42] B. TNMT, "Kịch bản biến đổi khí hậu, nước biển dâng cho Việt Nam," 2016.

[43] R. M. Fältmarsch, M. E. Åström, and K.-M. Vuori, "Environmental risks of metals mobilised from acid sulphate soils in Finland: a literature review," 2008.

[44] L. Nordmyr, M. Åström, and P. Peltola, "Metal pollution of estuarine sediments caused by leaching of acid sulphate soils," *Estuarine, Coastal and Shelf Science,* vol. 76, no. 1, pp. 141-152, 2008.

[45] T. Saarinen, S. Mohämmädighävam, H. Marttila, and B. Kløve, "Impact of peatland forestry on runoff water quality in areas with sulphide-bearing sediments; how to prevent acid surges," *Forest Ecology and Management,* vol. 293, pp. 17-28, 2013.

[46] P. Shrivastava and R. Kumar, "Soil salinity: A serious environmental issue and plant growth promoting bacteria as one of the tools for its alleviation," *Saudi Journal of Biological Sciences,* vol. 22, no. 2, pp. 123-131, 2015.

[47] N. Jordanova, *Soil magnetism: Applications in pedology, environmental science and agriculture*. Academic Press, 2016.

[48] P. Rengasamy, "World salinization with emphasis on Australia," *Journal of Experimental Botany,* vol. 57, no. 5, pp. 1017-1023, 2006.

[49] S. Arora, "Diagnostic properties and constraints of salt-affected soils," in *Bioremediation of Salt Affected Soils: An Indian Perspective*, S. Arora, A. K. Singh, and Y. P. Singh, Eds. Cham: Springer International Publishing, 2017, pp. 41-52.

[50] M. F. Ahmed and M. Z. Haider, "Impact of salinity on rice production in the south-west region of Bangladesh," *Environmental Science,* vol. 9, pp. 135-141, 2014.

[51] R. Singh, M. S. Mavi, and O. P. Choudhary, "Saline Soils Can Be Ameliorated by Adding Biochar Generated From Rice-Residue Waste," *CLEAN–Soil, Air, Water,* vol. 47, no. 2, p. 1700656, 2019.

[52] N. K. Fageria and V. C. Baligar, "Ameliorating soil acidity of tropical Oxisols by liming for sustainable crop production," *Advances in Agronomy,* vol. 99, pp. 345-399, 2008.

[53] C. Arulmathi and G. Porkodi, "Characteristics of coastal saline soil and their management: A review," *International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences,* vol. 9, no. 10, pp. 1726-1734, 2020.

[54] FAO., *The State of Food and Agriculture 2001* (no. 33). Food & Agriculture Org., 2001.

[55] J. Shamshuddin, S. Muhrizal, I. Fauziah, and E. Van Ranst, "A laboratory study of pyrite oxidation in acid sulfate soils," *Communications in Soil Science and Plant Analysis,* vol. 35, no. 1-2, pp. 117-129, 2004.

[56] P. S. Michael, "Ecological impacts and management of acid sulphate soil: A review," *Asian Journal of Water, Environment and Pollution,* vol. 10, no. 4, pp. 13-24, 2013.

[57] K. Ljung, F. Maley, and A. Cook, "Canal estate development in an acid sulfate soil—Implications for human metal exposure," *Landscape and Urban Planning,* vol. 97, no. 2, pp. 123-131, 2010.

[58] N. N. L. Phương, "Đánh giá đặc điểm tài nguyên đất huyện Cần Giờ, thành phố Hồ Chí Minh," Luận văn Thạc sĩ, Trường Đại học Công nghiệp Thành phố Hồ Chí Minh, Thành phố Hồ Chí Minh, 2020.

[59] F. Cook, S. Dobos, G. Carlin, and G. Millar, "Oxidation rate of pyrite in acid sulfate soils: in situ measurements and modelling," *Soil Research,* vol. 42, no. 6, pp. 499-507, 2004.

[60] S. A. Welch, D. Kirste, A. G. Christy, F. R. Beavis, and S. G. Beavis, "Jarosite dissolution II—Reaction kinetics, stoichiometry and acid flux," *Chemical Geology,* vol. 254, no. 1-2, pp. 73-86, 2008.

[61] J. Shen, L. Yuan, J. Zhang, H. Li, Z. Bai, X. Chen, W. Zhang, and F. Zhang, "Phosphorus dynamics: from soil to plant," *Plant Physiology,* vol. 156, no. 3, pp. 997-1005, 2011.

[62] C. J. Penn and J. J. Camberato, "A critical review on soil chemical processes that control how soil pH affects phosphorus availability to plants," *Agriculture,* vol. 9, no. 6, p. 120, 2019.

[63] J. Norton and Y. Ouyang, "Controls and adaptive management of nitrification in agricultural soils," *Frontiers in microbiology,* vol. 10, p. 1931, 2019.

[64] Z. Zhang and A. Furman, "Soil redox dynamics under dynamic hydrologic regimes-A review," *Science of the Total Environment,* vol. 763, p. 143026, 2021.

[65] S. Grattan and C. Grieve, "Salinity–mineral nutrient relations in horticultural crops," *Scientia horticulturae,* vol. 78, no. 1-4, pp. 127-157, 1998.

[66] M. Kawahigashi, N. M. Do, V. B. Nguyen, and H. Sumida, "Effects of drying on the release of solutes from acid sulfate soils distributed in the Mekong Delta, Vietnam," *Soil Science and Plant Nutrition,* vol. 54, no. 4, pp. 495-506, 2008.

[67] J. Gröger, U. Proske, T. J. Hanebuth, and K. Hamer, "Cycling of trace metals and rare earth elements (REE) in acid sulfate soils in the Plain of Reeds, Vietnam," *Chemical Geology,* vol. 288, no. 3-4, pp. 162-177, 2011.

[68] N. T. X. Tùng, N. T. Bình, và T. V. Bình, "Đặc tính đất phèn nhiễm mặn và các giải pháp cải tạo trong bối cảnh biến đổi khí hậu," *Tạp chí Nông nghiệp & Phát triển Nông thôn,* tập. 16, trang. 43-52, 2023.

[69] R. Shetty, C. S.-N. Vidya, N. B. Prakash, A. Lux, and M. Vaculik, "Aluminum toxicity in plants and its possible mitigation in acid soils by biochar: A review," *Science of the Total Environment,* vol. 765, p. 142744, 2021.

[70] C. Meng, D. Tian, H. Zeng, Z. Li, C. Yi, and S. Niu, "Global soil acidification impacts on belowground processes," *Environmental Research Letters,* vol. 14, no. 7, p. 074003, 2019.

[71] Y. Wang, Z. Yao, Y. Zhan, X. Zheng, M. Zhou, G. Yan, L. Wang, C. Werner, and K. Butterbach-Bahl, "Potential benefits of liming to acid soils on climate change mitigation and food security," *Global Change Biology,* vol. 27, no. 12, pp. 2807-2821, 2021.

[72] E. Stavridou, A. Hastings, R. J. Webster, and P. R. Robson, "The impact of soil salinity on the yield, composition and physiology of the bioenergy grass Miscanthus× giganteus," *Gcb Bioenergy,* vol. 9, no. 1, pp. 92-104, 2017.

[73] Y. Li, T. Wang, M. Camps-Arbestain, M. Suárez-Abelenda, and C. P. Whitby, "Lime and/or phosphate application affects the stability of soil organic carbon: Evidence from changes in quantity and chemistry of the soil water-extractable organic matter," *Environmental Science & Technology,* vol. 54, no. 21, pp. 13908-13916, 2020.

[74] S. Li, X. Ji, C. Chao, Z. Liu, J. Zhu, and H. Peng, "Effects of increasing lime application rates on microbial diversity and community structure in paddy soils," *Applied Soil Ecology,* vol. 161, p. 103837, 2021.

[75] S. Higgins, S. Morrison, and C. Watson, "Effect of annual applications of pelletized dolomitic lime on soil chemical properties and grass productivity," *Soil Use and Management,* vol. 28, no. 1, pp. 62-69, 2012.

[76] S. Grover, C. Butterly, X. Wang, and C. Tang, "The short-term effects of liming on organic carbon mineralisation in two acidic soils as affected by different rates and application depths of lime," *Biology and Fertility of Soils,* vol. 53, no. 4, pp. 431-443, 2017.

[77] C. Ai, G. Liang, J. Sun, P. He, S. Tang, S. Yang, W. Zhou, and X. Wang, "The alleviation of acid soil stress in rice by inorganic or organic ameliorants is

associated with changes in soil enzyme activity and microbial community composition," *Biology and Fertility of Soils,* vol. 51, no. 4, pp. 465-477, 2015.

[78] J. Tian, Y. Lou, Y. Gao, H. Fang, S. Liu, M. Xu, E. Blagodatskaya, and Y. Kuzyakov, "Response of soil organic matter fractions and composition of microbial community to long-term organic and mineral fertilization," *Biology and Fertility of Soils,* vol. 53, no. 5, pp. 523-532, 2017.

[79] J. Wang, Y. Song, T. Ma, W. Raza, J. Li, J. G. Howland, Q. Huang, and Q. Shen, "Impacts of inorganic and organic fertilization treatments on bacterial and fungal communities in a paddy soil," *Applied Soil Ecology,* vol. 112, pp. 42-50, 2017.

[80] X. Hao and C. Chang, "Does long-term heavy cattle manure application increase salinity of a clay loam soil in semi-arid southern Alberta?," *Agriculture, Ecosystems & Environment,* vol. 94, no. 1, pp. 89-103, 2003.

[81] L. Wang, D. O'Connor, J. R. Rinklebe, Y. S. Ok, D. C. Tsang, Z. Shen, and D. Hou, "Biochar aging: mechanisms, physicochemical changes, assessment, and implications for field applications," *Environmental Science & Technology,* vol. 54, no. 23, pp. 14797-14814, 2020.

[82] M. Ahmad, A. U. Rajapaksha, J. E. Lim, M. Zhang, N. Bolan, D. Mohan, M. Vithanage, S. S. Lee, and Y. S. Ok, "Biochar as a sorbent for contaminant management in soil and water: a review," *Chemosphere,* vol. 99, pp. 19-33, 2014.

[83] A. Tomczyk, Z. Sokołowska, and P. Boguta, "Biochar physicochemical properties: pyrolysis temperature and feedstock kind effects," *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology,* vol. 19, no. 1, pp. 191-215, 2020.

[84] Y. Wang, X. Xiao, and B. Chen, "Biochar impacts on soil silicon dissolution kinetics and their interaction mechanisms," *Scientific Reports,* vol. 8, no. 1, pp. 1-11, 2018.

[85] Y. Zhang, Z. Zhang, and Y. Chen, "Biochar mitigates N2O emission of microbial denitrification through modulating carbon metabolism and allocation of reducing power," *Environmental Science & Technology,* vol. 55, no. 12, pp. 8068-8078, 2021.

[86] P. T. Do, T. Ueda, R. Kose, L. X. Nguyen, T. Okayama, and T. Miyanishi, "Properties and potential use of biochars from residues of two rice varieties, Japanese Koshihikari and Vietnamese IR50404," *Journal of Material Cycles and Waste Management,* vol. 21, no. 1, pp. 98-106, 2019.

[87] N. T. K. Phuong, C. M. Khoi, K. Ritz, T. B. Linh, D. D. Minh, T. A. Duc, N. V. Sinh, T. T. Linh, and K. Toyota, "Influence of rice husk biochar and compost amendments on salt contents and hydraulic properties of soil and rice yield in salt-affected fields," *Agronomy,* vol. 10, no. 8, p. 1101, 2020.

[88] W. Cheng, C. Liu, T. Tong, R. Epsztein, M. Sun, R. Verduzco, J. Ma, and M. Elimelech, "Selective removal of divalent cations by polyelectrolyte multilayer nanofiltration membrane: Role of polyelectrolyte charge, ion size, and ionic strength," *Journal of membrane science,* vol. 559, pp. 98-106, 2018.

[89] H. Li, X. Dong, E. B. da Silva, L. M. de Oliveira, Y. Chen, and L. Q. Ma, "Mechanisms of metal sorption by biochars: Biochar characteristics and modifications," *Chemosphere,* vol. 178, pp. 466-478, 2017.

[90] S. S. Akhtar, M. N. Andersen, and F. Liu, "Biochar mitigates salinity stress in potato," *Journal of Agronomy and Crop Science,* vol. 201, no. 5, pp. 368-378, 2015.

[91] N. T. Q. Hung, L. K. Thong, M. K. Nguyen, and L. T. N. Han, "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, no. 2, pp. 68-78, 2018.

[92] H. J. Kronzucker, D. Coskun, L. M. Schulze, J. R. Wong, and D. T. Britto, "Sodium as nutrient and toxicant," *Plant and Soil,* vol. 369, no. 1, pp. 1-23, 2013.

[93] S. Awan, J. A. Ippolito, J. Ullman, K. Ansari, L. Cui, and A. Siyal, "Biochars reduce irrigation water sodium adsorption ratio," *Biochar,* vol. 3, no. 1, pp. 77-87, 2021.

[94] L. X. Nguyen, P. T. 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,* vol. 13, no. 4, pp. 7325-7344, 2018.

[95] J. Lehmann and S. Joseph, *Biochar for environmental management: science and technology*. Earthscan, 2012.

[96] L. Van Zwieten, S. Kimber, S. Morris, K. Chan, A. Downie, J. Rust, S. Joseph, and A. Cowie, "Effects of biochar from slow pyrolysis of papermill waste on agronomic performance and soil fertility," *Plant and Soil,* vol. 327, no. 1, pp. 235-246, 2010.

[97] K. A. Gomez and A. A. Gomez, *Statistical procedures for agricultural research*. John wiley & sons, 1984.

[98] S. Institute, "JMP® Pro 17 Documentation," 17 ed: SAS Institute Inc, 2023.

[99] J. F. Hair, *Multivariate Data Analysis*, 7th ed. Pearson Education, 2010.

[100] S. S. Andrews, D. L. Karlen, and C. A. Cambardella, "The soil management assessment framework: A quantitative soil quality evaluation method," *Soil Science Society of America Journal,* vol. 68, no. 6, pp. 1945-1962, 2004.

[101] Else K. Bünemann, Giulia Bongiorno, Zhanguo Bai, Rachel E. Creame, Gerlinde De Deyn, Ron de Goede, Luuk Fleskens, T. W. K. Violette Geissen, Paul Mäder, Mirjam Pulleman, Wijnand Sukkel, Jan Willem van Groenigen, and L. Brussaard, "Soil quality – A critical review," *Soil Biology and Biochemistry,* vol. 120, pp. 105-125, 2018.

[102] M. Helms and J. Nixon, "Exploring SWOT analysis–Where are we now?," *Journal of Strategy and Management,* vol. 3, no. 3, pp. 215-251, 2006.

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

[104] 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, 2013.

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

[106] 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.

[107] 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 Product,* vol. 161, p. 113224, 2021.

[108] WRB, "World reference base for soil resources 2014, update 2015 International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps. World Soil Resources Reports No. 106. FAO, Rome.," 2015.

[109] T. T. T. Hương, N. X. Tòng, N. P. T. Dương, N. V. Nghĩa, V. Hải, và N. T. Bình, "Đánh giá khả năng xử lý đất phèn nhiễm mặn của than sinh học từ vỏ trấu trong điều kiện nhà kính," *VNU Journal of Science: Earth and Environmental Sciences,* tập. 38, số. 3, trang. 101-114, 2022.

[110] R. Jahn, H.-P. Blume, V. Asio, O. Spaargaren, and P. Schad, *Guidelines for soil description*. FAO, 2006.

[111] I. Ikoyi and A. Schmalenberger, "Design and Construction of Repacked Soil Columns for Measuring Solute Transport, Plant Growth and Soil Biota," *Bio-protocol,* vol. 11, no. 2, 2021.

[112] Đ. H. Dật, *Kỹ thuật bón phân cân đối và hợp lý cho cây trồng*. NXB Khoa học tự nhiên và công nghệ, 2010.

[113] D. B. Toàn, *Kỹ thuật trồng một số cây họ Bầu Bí*. NXB Phương Đông, 2015.

[114] Q.-x. Dai, N. Ae, T. Suzuki, M. Rajkumar, S. Fukunaga, and N. Fujitake, "Assessment of potentially reactive pools of aluminum in Andisols using a five-step sequential extraction procedure," *Soil Science and Plant Nutrition,* vol. 57, no. 4, pp. 500-507, 2011.

[115] S. Yoseftabar, A. Fallah, and J. Daneshian, "Comparing of yield and yield components of hybrid rice (GRH1) indifferent application of nitrogen fertilizer," *International Journal of Biology,* vol. 4, no. 3, pp. 60-65, 2012.

[116] M. Kumar, A. Das, J. Layek, J. Buragohain, R. Gandhiji Idapuganti, S. Babu, G. S. Yadav, R. Krishnappa, and M. T. Devi, "Impact of varieties and organic nutrient sources on productivity, soil carbon stocks and energetics of rice-ratoon system in Eastern Himalayas of India," *Carbon Management,* vol. 12, no. 2, pp. 183-199, 2021.

[117] T. A. Urmi, M. M. Rahman, M. M. Islam, M. A. Islam, N. A. Jahan, M. A. B. Mia, S. Akhter, M. H. Siddiqui, and H. M. Kalaji, "Integrated nutrient management for rice yield, soil fertility, and carbon sequestration," (in eng), *Plants (Basel),* vol. 11, no. 1, 2022.

[118] D. Horneck and R. Miller, "Determination of total nitrogen in plant tissue," in *Handbook of reference methods for plant analysis*, Y. P. Kalra, Ed.: Taylor & Francis Group, 1998, pp. 75-84.

[119] R. A. Isaac and W. C. J. Johnson, "Elemental determination by inductively coupled plasma atomic emission spectrometry," in *Handbook of methods for plant analysis*, Y. P. Kalra, Ed.: Taylor & Francis Group, 1998, pp. 165-170.

[120] C. J. Ritsema and J. E. Groenenberg, "Pyrite oxidation, carbonate weathering, and gypsum formation in a drained acid sulfate soil," *Soil Science Society of America Journal,* vol. 57, no. 4, pp. 968-976, 1993.

[121] J. L. Havlin, S. L. Tisdale, W. L. Nelson, and J. D. Beaton, *Soil fertility and fertilizers*. Pearson Education India, 2016.

[122] T. V. Hùng, N. N. Hưng, và T. V. Dũng, "Ảnh hưởng thời gian khô và ngập đến khả năng phóng thích độ chua và hàm lượng Fe2+, Al3+, SO42-trong đất phèn hoạt động," *Tạp chí Khoa học Đại học Cần Thơ,* tập. 55, trang. 117-123, 2019.

[123] E. V. Maas and G. J. Hoffman, "Crop salt tolerance - Current assessment," *Journal of the Irrigation and Drainage Division,* vol. 103, no. 2, pp. 115-134, 1977.

[124] T. Balasubramaniam, G. Shen, and N. Esmaeili, "Plants' Response Mechanisms to Salinity Stress," *Plants,* vol. 12, no. 12, 2023.

[125] N. T. Hai and D. Q. Non, "Impacts of salt intrusion on paddy land in Quang Thai commune, Quang Dien district, Thua Thien Hue province," *Hue University Journal of Science: Agriculture and Rural Development,* vol. 130, no. 3B, pp. 157-166, 2021.

[126] R. Munns and M. Tester, "Mechanisms of salinity tolerance," *Annual Review of Plant Biology,* vol. 59, pp. 651-681, 2008.

[127] J. L. Havlin, "Soil fertility and nutrient management," *Upper Saddle River, NJ, USA,* pp. 460-469, 2014.

[128] K. Dhanya and R. Gladis, "Acid sulfate soils-its characteristics and nutrient dynamics," *Asian Journal of Soil Science,* vol. 12, no. 1, pp. 221-227, 2017.

[129] J. Havlin and R. Heiniger, "Soil fertility management for better crop production," vol. 10, ed: MDPI, 2020, p. 1349.

[130] V. T. Gương, N. D. Linh, và 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.

[131] T. B. Nguyễn, Nguyễn, P.T.D., Đinh, Đ.G., Đỗ, D.D., Trần, T.T.H., Vũ, N.T. và Nguyễn, X.T, "Nghiên cứu cơ chế và tiềm năng cải tạo mặn của đất nông nghiệp bằng than sinh học sản xuất từ các phụ phẩm nông nghiệp," Đề tài cấp Thành Phố Hồ Chí Minh, Quỹ phát triển Khoa học Công nghệ Thành phố Hồ Chí Minh, 2023.

[132] P. Moore Jr, T. Attanandana, and W. Patrick Jr, "Factors affecting rice growth on acid sulfate soils," *Soil Science Society of America Journal,* vol. 54, no. 6, pp. 1651-1656, 1990.

[133] 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.

[134] D. Dent and L. J. Pons, "A World Perspective on Acid Sulfate Soils," *Geoderma,* vol. 67, pp. 263-276, 1995.

[135] T. Balasubramaniam, G. Shen, N. Esmaeili, and H. Zhang, "Plants' response mechanisms to salinity stress," *Plants,* vol. 12, no. 12, p. 2253, 2023.

[136] J. Xiong, Y. Xu, Y. Li, and X.-C. Zeng, "A novel Mn-and Fe-oxides-reducing bacterium with high activity to drive mobilization and release of arsenic from soils," *Water,* vol. 15, no. 13, p. 2337, 2023.

[137] P. Sriraj and S. Butnan, "Lasting effects of the co-application of rice husk biochar with cattle manure and compost on soil and corn," *Soil Science Annual,* vol. 75, no. 4, pp. 1-14, 2024.

[138] A. Gamage, B. Basnayake, J. De Costa, and O. Merah, "Effects of rice husk biochar coated urea and anaerobically digested rice straw compost on the soil fertility, and cyclic effect of phosphorus," *Plants,* vol. 11, no. 1, p. 75, 2021.

[139] D. Gamage, B. Basnayake, J. Costa, and K. Vidanagamage, "Evaluation of total N, P, K and organic matter contents of soil amended with paddy husk charcoal coated urea and comparison of the yield of paddy," in *Proceedings of the International Conference on Sustainable Built Environment, Kandy, Sri Lanka*, 2012, pp. 16-18.

[140] Y. Xu, M. Zhan, C. Cao, J. Ge, R. Ye, S. Tian, and M. Cai, "Effects of irrigation management during the rice growing season on soil organic carbon pools," *Plant and Soil,* vol. 421, no. 1, pp. 337-351, 2017.

[141] S. C. Pierce, M. T. Moore, D. Larsen, and S. Pezeshki, "Macronutrient (N, P, K) and redoximorphic metal (Fe, Mn) allocation in Leersia oryzoides (Rice Cutgrass) grown under different flood regimes," *Water, Air, and Soil Pollution,* vol. 207, no. 1, pp. 73-84, 2010.

[142] S. Yasin, "Soil Sulfur Dynamics and Their Role in Plant Growth and Development," *Journal Agronomy Tanaman Tropika,* vol. 6, no. 3, pp. 850-868, 2024.

[143] X. Chen, Z. Tang, G. Li, J. Zhang, F. Xie, and L. Zheng, "Revealing the Role of Coal Gangue-Biochar Composite for Removing SO_4^{2-} from Water: Adsorption Mechanisms and Application Effects," *Minerals,* vol. 13, no. 10, 2023.

[144] S. Yadav, M. Irfan, A. Ahmad, and S. Hayat, "Causes of salinity and plant manifestations to salt stress: a review," *Journal of Environmental Biology,* vol. 32, no. 5, p. 667, 2011.

[145] Y. A. Hamoud, T. Saleem, M. Zia-ur-Rehman, H. Shaghaleh, M. Usman, M. Rizwan, H. F. Alharby, A. M. Alamri, F. Al-Sarraj, and N. M. Alabdallah, "Synergistic effect of biochar with gypsum, lime, and farm manure on the growth and tolerance in rice plants under different salt-affected soils," *Chemosphere,* vol. 360, p. 142357, 2024.

[146] N. Muhammad, G. Zvobgo, and Z. Guo-ping, "A review: the beneficial effect of aluminum on plant growth in acid soil and the possible mechanisms," *Journal of Integrative Agriculture,* vol. 17, pp. 60345-60347, 2018.

[147] D. Lauricella, C. R. Butterly, G. J. Clark, P. W. Sale, G. Li, and C. Tang, "Effectiveness of innovative organic amendments in acid soils depends on their ability to supply P and alleviate Al and Mn toxicity in plants," *Journal of Soils and Sediments,* vol. 20, no. 11, pp. 3951-3962, 2020.

[148] D. Thakuria, S. Hazarika, and R. Krishnappa, "Soil acidity and management options," *Indian Journal of Fertilisers,* vol. 12, no. 12, pp. 40-56, 2016.

[149] T. Bera, H. P. Collins, A. K. Alva, T. J. Purakayastha, and A. K. Patra, "Biochar and manure effluent effects on soil biochemical properties under corn production," *Applied Soil Ecology,* vol. 107, pp. 360-367, 2016.

[150] N. Li, S. Wen, S. Wei, H. Li, Y. Feng, and G. Ren, "Straw incorporation plus biochar addition improved the soil quality index focused on enhancing crop yield and alleviating global warming potential," *Environmental Technology & Innovation,* vol. 21, p. 101316, 2021.

[151] D. J. Kim, B. K. Ahn, and J. H. Lee, "Soil Quality Assessment Based on Different Properties of Remediated Soil Affected by Various Organic Amendments," *Korean Journal of Soil Science and Fertilizer,* vol. 52, no. 2, pp. 114-132, 2019.

[152] Y. Li, S. Cui, S. X. Chang, and Q. Zhang, "Liming effects on soil pH and crop yield depend on lime material type, application method and rate, and crop species: a global meta-analysis," *Journal of Soils and Sediments,* vol. 19, no. 3, pp. 1393-1406, 2019.

[153] C. Yuan, R. Fitzpatrick, L. M. Mosley, and P. Marschner, "Sulfate reduction in sulfuric material after re-flooding: Effectiveness of organic carbon addition and pH increase depends on soil properties," *Journal of Hazardous Materials,* vol. 298, pp. 138-145, 2015.

[154] S. Li, Z. Liu, J. Li, Z. Liu, X. Gu, and L. Shi, "Cow Manure Compost Promotes Maize Growth and Ameliorates Soil Quality in Saline-Alkali Soil: Role of

Fertilizer Addition Rate and Application Depth," *Sustainability,* vol. 14, no. 16, p. 10088, 2022.

[155] J. Le Mer, Roger, P., "Production, oxidation, emission and consumption of methane by soils: A review," *European Journal of Soil Biology,* vol. 37, no. 1, pp. 25-50, 2001.

[156] R. D. Harter, "Acidity," in *Encyclopedia of Soil Science,* Springer, 2007, pp. 6-9.

[157] J. M. Novak, W. J. Busscher, D. L. Laird, M. Ahmedna, D. W. Watts, and M. A. S. Niandou, "Impact of biochar amendment on fertility of a Southeastern coastal plain soil," *Soil Science,* vol. 174, no. 2, pp. 105-112, 2009.

[158] S. Prasertsuk and S. Wijitkosum, "Innovative use of Rice Husk Biochar for Rice Cultivation in Salt-affected Soils with Alternated Wetting and Drying Irrigation," vol. 25, no. 9, pp. 19-32, 2021.

[159] H. Blanco-Canqui, "Biochar and soil physical properties," *Soil Science Society of America Journal,* vol. 81, no. 3, pp. 687-711, 2017.

[160] M. Qadir and J. D. Oster, "Crop and irrigation management strategies for saline-sodic soils and waters aimed at environmentally sustainable agriculture," *Science of the Total Environment,* vol. 323, no. 1-3, pp. 1-19, 2004.

[161] Q. Meng, X. Ma, J. Zhang, and Z. Yu, "The long-term effects of cattle manure application to agricultural soils as a natural-based solution to combat salinization," *CATENA,* vol. 175, pp. 193-202, 2019.

[162] P. S. Vasylovych, "Reducing the risks of contamination of agricultural land with toxic heavy metals during the application of organic fertilizers," *Ukrainian Journal of Ecology,* vol. 14, no. 4, pp. 1-11, 2024.

[163] R. Shetty, C. S.-N. Vidya, N. B. Prakash, A. Lux, and M. Vaculík, "Aluminum toxicity in plants and its possible mitigation in acid soils by biochar: A review," *Science of The Total Environment,* vol. 765, p. 142744, 2021.

[164] R. O. Enesi, M. Dyck, S. Chang, M. S. Thilakarathna, X. Fan, Strelkov, S, and L. Y. Gorim, "Liming remediates soil acidity and improves crop yield and profitability-a meta-analysis," *Frontiers in Agronomy,* vol. 5, p. 1194896, 2023.

[165] H. M. S. K. Herath, Camps-Arbestain, M., Hedley, M., "Effect of biochar on soil physical properties in two contrasting soils: An Alfisol and an Andisol," *Geoderma,* vol. 209-210, pp. 188-197, 2013.

[166] L. Han, H. Sun, K. Sun, Y. Yang, L. Fang, and B. Xing, "Effect of Fe and Al ions on the production of biochar from agricultural biomass: properties, stability and adsorption efficiency of biochar," *Renewable and Sustainable Energy Reviews,* vol. 145, p. 111133, 2021.

[167] L. Beesley, E. Moreno-Jiménez, and J. L. Gomez-Eyles, "Effects of biochar and greenwaste compost amendments on mobility, bioavailability and toxicity of inorganic and organic contaminants in a multi-element polluted soil," *Environmental Pollution,* vol. 158, no. 6, pp. 2282-2287, 2011.

[168] S. K. Das and S. K. Das, "Acid Sulphate Soil: Management Strategy for Soil Health and Productivity," *Popular Kheti,* vol. 3, no. 2, pp. 2-7, 2012.

[169] T. T. Brown, R. T. Koenig, D. R. Huggins, J. B. Harsh, and R. E. Rossi, "Lime Effects on Soil Acidity, Crop Yield, and Aluminum Chemistry in Direct-Seeded Cropping Systems," *Soil Science Society of America Journal,* vol. 72, no. 3, pp. 634-640, 2008.

[170] G.-H. Yu, M.-J. Wu, G.-R., Wei, Y.-H. Luo, W. Ran, B.-R. Wang, J. c. Zhang, and Q.-R. Shen, "Binding of Organic Ligands with Al(III) in Dissolved Organic Matter from Soil: Implications for Soil Organic Carbon Storage," *Environmental Science & Technology,* vol. 46, no. 11, pp. 6102-6109, 2012.

[171] D. Singh, A. Badiyala, and R. Ranjha, *Organic Methods of Enhancing Soil Fertility*, 1st Edition. Apple Academic Press, 2025.

[172] G. Agegnehu, A. M. Bass, P. N. Nelson, B. Muirhead, G. Wright, and M. I. Bird, "Biochar and biochar-compost as soil amendments: Effects on peanut yield, soil properties and greenhouse gas emissions in tropical North Queensland, Australia," *Agriculture, Ecosystems & Environment,* vol. 239, pp. 69-78, 2017.

[173] K. C. Uzoma, M. Inoue, H. Andry, H. Fujimaki, A. Zahoor, and E. Nishihara, "Effect of cow manure biochar on maize productivity under sandy soil condition," *Soil Use and Management,* vol. 27, no. 2, pp. 205-212, 2011.

[174] G. Agegnehu, A. M. Bass, P. N. Nelson, and M. I. Bird, "Benefits of biochar, compost and biochar–compost for soil quality, maize yield and greenhouse gas emissions in a tropical agricultural soil," *Science of the Total Environment,* vol. 543, pp. 295-306, 2016.

[175] B. Liang, J. Lehmann, D. Solomon, J. Kinyangi, J. Grossman, B. O'Neill, J. O. Skjemstad, J. Thies, F. J. Luizão, J. Petersen, and E. G. Neves, "Black carbon increases cation exchange capacity in soils," *Soil Science Society of America Journal,* vol. 70, no. 5, pp. 1719-1730, 2006.

[176] R. Zhao, N. Coles, Z. Kong, and J. Wu, "Effects of aged and fresh biochars on soil acidity under different incubation conditions," *Soil and Tillage Research,* vol. 146, pp. 133-138, 2015.

[177] L. Wang, C. R. Butterly, Y. Wang, H. M. S. K. Herath, Y. G. Xi, and X. J. Xiao, "Effect of crop residue biochar on soil acidity amelioration in strongly acidic tea garden soils," *Soil Use and Management,* vol. 30, no. 1, pp. 119-128, 2013.

[178] F. Rasuli, H. Owliaie, M. Najafi-Ghiri, and E. Adhami, "Effect of biochar on potassium fractions and plant-available P, Fe, Zn, Mn and Cu concentrations of calcareous soils," *Arid Land Research and Management,* pp. 1-26, 2021.

[179] U. Sadowska, I. Domagała-Świątkiewicz, and A. Żabiński, "Biochar and its effects on plant–soil macronutrient cycling during a three-year field trial on sandy soil with peppermint (Mentha piperita L.). Part I: yield and macro element content in soil and plant biomass," *Agronomy,* vol. 10, no. 12, p. 1950, 2020.

[180] K. Chan and Z. Xu, *Biochar: Nutrient Properties and Their Enhancement* (Biochar for Environmental Management: Science and Technology). Earthscan, London, UK, 2009.

[181] J. H. Yuan and R. K. Xu, "The amelioration effects of low temperature biochar generated from nine crop residues on an acidic Ultisol," *Soil Use and Management,* vol. 27, pp. 110-115, 2011.

[182] R. Hume, P. Marschner, S. Mason, R. K. Schilling, B. Hughes, and L. M. Mosley, "Measurement of lime movement and dissolution in acidic soils using mid-infrared spectroscopy," *Soil and Tillage Research,* vol. 233, p. 105807, 2023.

[183] V. L. Dang, P. N. Ngoc, and N. N. Hung, "Effects of biochar, lime, and compost applications on soil physicochemical properties and yield of pomelo (Citrus grandis Osbeck) in alluvial soil of the Mekong Delta," *Applied and Environmental Soil Science,* vol. 2022, pp. 1-10, 2022.

[184] K. M. Nair, K. S. A. Kumar, M. Lalitha, Shivanand, S. C. R. Kumar, S. Srinivas, A. Koyal, S. Parvathy, K. Sujatha, C. Thamban, J. Mathew, K. P. Chandran, A. Haris, V. Krishnakumar, V. Srinivasan, Jessy, J. Jacob, J. S. Nagaraj, M. V. D'Souza, Y. Raghuramulu, R. Hegde, and S. K. Singh, "Surface soil and subsoil acidity in natural and managed land-use systems in the humid tropics of Peninsular India," *Current Science,* vol. 116, no. 7, pp. 1201-1211, 2019.

[185] W. Li and C. E. Johnson, "Relationships among pH, aluminum solubility and aluminum complexation with organic matter in acid forest soils of the Northeastern United States," *Geoderma,* vol. 271, pp. 234-242, 2016.

[186] S. Nenadović, M. Nenadovic, L. Kljajevic, M. Ljesevic, M. Omerašević, and B. Matovic, "Investigation of Cl - and SO4 2- anion absorption in natural soils," *Processing and Application of Ceramics,* vol. 5, pp. 85-89, 2011.

[187] E. M. Miramontes-Gutierrez, J. M. Ochoa-Rivero, H. O. Rubio-Arias, L. Ballinas-Casarrubias, and B. A. Rocha-Gutiérrez, "Impact of cations (Na(+), K(+), Mg(+2)) and Anions (F(-), Cl(-), SO(4)(2-)) leaching from filters packed with natural zeolite and ferric nanoparticles for wastewater treatment," (in eng), *International Journal Environmental Research and Public Health,* vol. 18, no. 16, 2021.

[188] J. H. Yuan, R. K. Xu, and H. Zhang, "The forms of alkalis in the biochar produced from crop residues at different temperatures," *Bioresource Technology,* vol. 102, no. 3, pp. 3488-3497, 2011.

[189] C. Steiner, W. G. Teixeira, J. Lehmann, T. Nehls, J. L. V. de Macêdo, W. E. H. Blum, and W. Zech, "Long term effects of manure, charcoal and mineral fertilization on crop production and fertility on a highly weathered Central Amazonian upland soil," *Plant and Soil,* vol. 291, no. 1-2, pp. 275-290, 2007.

[190] 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, no. 1, pp. 47-82, 2010.

[191] A. Masulili, W. H. Utomo, and S. MS, "Rice husk biochar for rice based cropping system in acid soil 1. The characteristics of rice husk biochar and its influence on the properties of acid sulfate soils and rice growth in west Kalimantan, Indonesia," *Journal of Agricultural Science,* vol. 2, no. 1, 2010.

[192] D. Curtin and J. Syers, "Lime-induced changes in indices of soil phosphate availability," *Soil Science Society of America Journal,* vol. 65, no. 1, pp. 147-152, 2001.

[193] G. Pouangam Ngalani, F. Dzemze Kagho, N. N. C. Peguy, P. Prudent, J. A. Ondo, and E. Ngameni, "Effects of coffee husk and cocoa pods biochar on the chemical properties of an acid soil from West Cameroon," *Archives of Agronomy and Soil Science,* vol. 69, pp. 744-758, 2022.

[194] C. L. Vithana, P. A. K. Ulapane, R. Chandrajith, L. A. Sullivan, J. Bundschuh, N. Toppler, N. J. Ward, and A. Senaratne, "Acid sulfate soils on the west coast of Sri Lanka: A review," *Geoderma Regional,* vol. 25, p. e00382, 2021.

PHỤ LỤC

Phụ lục 1: Các phương pháp phân tích chỉ tiêu hóa học đất chi tiết

Phụ bảng 1.1 Tổng hợp mô tả các phương pháp phân tích chỉ tiêu hóa học đất

TT	Chỉ tiêu	Phương pháp	Tài liệu tham khảo
1	pH	Cân 8g đất Thêm vào 40ml nước cất Thỉnh thoảng lắc trong vòng 1h Lọc qua giấy lọc Đo bằng máy đo pH (4 lần)	TCVN 5979:2007
2	EC (dS/m)	Cân 8g đất Thêm vào 40ml nước cất Thỉnh thoảng lắc trong vòng 1h Lọc qua giấy lọc Đo bằng máy đo EC (4 lần). Tỷ lệ trích đất:nước 1:5 (w/v)	TCVN 8567:2010
3	Độ chua trao đổi (cmol(+)/kg)	Phương pháp chuẩn độ: 1. Dụng cụ và hóa chất: - Các ống ly tâm 50mL, máy ly tâm (15 vòng/phút). - Dung dịch trao đổi $BaCl_2.2H_2O$ 0,1M: 24,43g $BaCl_2.2H_2O$ pha thành 1L trong bình 1000mL cùng nước khử ion. - Dung dịch tạo phức nhôm, NaF 1M: hòa tan 41,99g NaF trong khoảng 900mL nước khử ion trong cốc có dung tích 1L và sau đó chuẩn độ đến điểm cuối Phenolphtalein bằng Natri Hydroxit. Chuyển vào bình định mức 1L và pha đủ 1L. - Natri Hydroxit (NaOH) nồng độ 0,05 M, tiêu chuẩn (cân 1g NaOH trong 0,5L nước). - Dung dịch Phenolphtalein: hòa tan 1g Phenolphtalein trong 100mL Ethanol. 2. Các bước tiến hành: - Cân một mẫu đất khoáng 2,5g hoặc 2g đất hữu cơ vào ống ly tâm 50mL, thêm 30 mL $BaCl_2$ 1M và lắc trong 1 giờ. - Ly tâm ở 5000 vòng trong 10 phút. - Chuyển chất lỏng nổi phía trên sang bình định mức 100mL. - Lặp lại bằng cách thêm 30mL dung dịch $BaCl_2$, lắc, ly tâm và gặn nước thêm hai lần nữa, thu tất cả phần nước phía trên vào một bình định mức 100mL. - Bù đủ thể tích bình định mức bằng dung dịch $BaCl_2$ và trộn. - Lọc dịch chiết (Whatman no.42 hoặc tương đương) vào chai	[103]
4	H^+ trao đổi (cmol(+)/kg)		

TT	Chỉ tiêu	Phương pháp	Tài liệu tham khảo
		nhựa và bảo quản trong tủ lạnh trước khi phân tích. - Phân tích độ chua trao đổi: + Phân tích độ chua trao đổi: pipet 25mL dịch chiết vào cốc Polyetylen 100mL. + Thêm 4 hoặc 5 giọt Phenolphtalein. + Chuẩn độ bằng NaOH 0,05M đến lúc xuất hiện màu hồng bền (lắc không tan); ghi lại thể tích NaOH dùng làm VA. (Lưu ý: Không để màu hồng quá đậm). Chuẩn độ mẫu trắng (25mL dung dịch $BaCl_2$) đến điểm cuối và ghi lại lượng VB. + Centimole (cmole(+) của axit được chiết xuất $BaCl_2$ trên mỗi kg đất (cmol (+)/kg) được tính như công thức (1). - Xác định H^+ trao đổi: + Xác định H^+ trao đổi: pipet 25mL dịch chiết vào cốc có dung tích 100 mL sau đó thêm 2,5mL NaF 1M + Thêm 4 hoặc 5 giọt Phenolphtalein. + Chuẩn độ bằng NaOH 0,05M đến điểm cuối màu hồng vĩnh cửu đầu tiên (Va). Lặp lại với một mẫu trống $BaCl_2$ (Vb). H^+ trao đổi được tính như Công thức (1). 3. Tính toán kết quả: $$\boldsymbol{Chua\ Trao}\ \text{Đổi}\left(\frac{\boldsymbol{cmol(+)}}{\boldsymbol{kg}}\right) = \frac{(\boldsymbol{VA-VB})\times\boldsymbol{M(NaOH)}\times\boldsymbol{100}\times\boldsymbol{V}}{\boldsymbol{g\ mẫu}\times\boldsymbol{Vs}} \quad (1)$$ H^+ trao đổi cmol (+)/kg được tính bằng cách sử dụng cùng một phương trình thay thế VA bằng Va và VB bằng Vb, *Trong đó:* • VA, Va là thể tích dung dịch chuẩn độ các ion chua trao đổi; Va là thể tích dung dịch chuẩn độ H^+ • VB hoặc Vb là thể tích chuẩn độ bằng mẫu trắng • M (NaOH) là nồng độ NaOH dùng để chuẩn độ • V tổng thể tích dịch chiết thu được • g mẫu là khối lượng đất dùng để chiết • Vs là Thể tích dịch chiết được chuẩn độ	
5	P dễ tiêu (mg/kg)	Phương pháp Mehlich-1 P: 1. Nguyên tắc xác định: P dễ tiêu trong đất được hòa tan bằng dung dịch $NaHCO_3$. Hàm lượng P trong dịch chiết sau đó được xác định bằng phương pháp so màu. 2. Hóa chất và chuẩn bị hóa chất: - Hóa chất gốc: H_2SO_4 98%, d = 1,84 g/mL; HCl 37%, d = 1,19 g/mL; $(NH_4)6Mo_7O_{24}.4H_2O$; $SnCl_2$; Glycerol; KH_2PO_4. - Hóa chất sử dụng: + Dung dịch H_2SO_4 4 mol/L: Cẩn thận lấy 55mL H_2SO_4 đặc	TCVN 8661: 2011 [103]

<table>
<tr><th>TT</th><th>Chỉ tiêu</th><th>Phương pháp</th><th>Tài liệu tham khảo</th></tr>
<tr><td></td><td></td><td>
bằng ống đong. Rót từ từ vào cốc thủy tinh có chứa sẵn 150mL nước cất. Để nguội và thêm nước cất đến vạch 250mL.
+ Dung dịch ammonium molybdate: hòa tan 12,5g $(NH_4)6Mo_7O_{24}.4H_2O$ trong 90mL nước cất được dung dịch 1. Thêm từ từ 140mL H_2SO_4 đặc vào 200mL nước cất, để nguội được dung dịch 2. Rót dung dịch 1 vào dung dịch 2 và thêm nước cất để được 500mL dung dịch.
+ Dung dịch $SnCl_2$: Cân 2,5g $SnCl_2.2H_2O$ trong 100mL dung dịch glycerol. Đun cách thủy đến khi tan hoàn toàn.
+ Dung dịch 1000 mgP/L (dung dịch lưu trữ): Cân 2,1971g KH_2PO_4 hòa tan với khoảng 300mL nước cất trong bình định mức 500mL. Thêm 10mL dung dịch H_2SO_4 4 mol/L, lắc đều. Thêm nước cất đến vạch định mức.
+ Dung dịch phosphat chuẩn loại 10 mgP/L: Lấy 1 mL dung dịch lưu trữ (1000 mgP/L) vào định định mức 100mL, thêm nước cất đến vạch.
+ Dung dịch chiết 0,0125M H_2SO_4 + 0,05M HCl: Dùng bình định mức 2L, thêm vào đó 1,5L nước cất, rồi thêm vào 8,4L HCl đậm đặc (12M) và 1,4mL H_2SO_4 đậm đặc (18M). Lắc và thêm nước cất vào đến 2L. Lắc/khuấy đều 10 phút.
3. Các bước tiến hành:
Bước 1: Chiết mẫu: Cân 5g (ghi lại số liệu) đất khô đã sàng qua rây 2 mm vào ống ly tâm 50mL; Thêm 30mL dung dịch chiết, và để trên máy lắc trong vòng 30 phút; Lọc dung dịch và đưa đi phân tích P theo quy trình bên dưới.
Bước 2: Xây dựng đường chuẩn: Chuẩn bị 6 bình định mức dung tích 50mL, đánh số thứ tự từ 1 đến 6; Dùng pipet loại 10mL lấy lần lượt vào mỗi bình dung dịch phosphat chuẩn 10 mgP/L và các dung dịch thuốc thử theo thứ tự như trong bảng:
<table>
<tr><td>Bước</td><td>Mô tả</td><td>1</td><td>2</td><td>3</td><td>4</td><td>5</td><td>6</td></tr>
<tr><td>1</td><td>10 mgP/L (mL)</td><td>0</td><td>1</td><td>2</td><td>3</td><td>4</td><td>5</td></tr>
<tr><td>2</td><td>Molybdate (mL)</td><td colspan="6">2</td></tr>
<tr><td>3</td><td>$SnCl_2$ (giọt)</td><td colspan="6">5</td></tr>
<tr><td>4</td><td>Nước cất</td><td colspan="6">Thêm nước cất vào bình định mức</td></tr>
<tr><td></td><td>Nồng độ C_P (mg/L)</td><td>0</td><td>0,2</td><td>0,4</td><td>0,6</td><td>0,8</td><td>1,0</td></tr>
</table>
Bước 3: Phân tích mẫu dịch lọc.
- Lấy 10mL dịch lọc của các mẫu ở bước 1 vào bình định mức 50mL (lưu ý: thể tích mẫu có thể tăng hoặc giảm tùy theo hàm lượng P có trong mẫu).
- Thêm vào mỗi bình lần lượt 2mL dung dịch molybdate và 5 giọt $SnCl_2$, lắc đều.
</td><td></td></tr>
</table>

TT	Chỉ tiêu	Phương pháp	Tài liệu tham khảo
		- Thêm nước cất đến vạch định mức. Bước 4. Đo màu: Các dung dịch trong dãy chuẩn và dung dịch mẫu được đo độ hấp thụ A ở bước sóng 690 nm. 4. Tính toán kết quả: - Từ kết quả độ hấp thụ A và nồng độ của P trong dãy chuẩn vẽ đồ thị đường chuẩn có dạng y = ax + b, trong đó y tương ứng với độ hấp thụ A đo được của các dung dịch trong dãy chuẩn, x là nồng độ P của dãy chuẩn. - Từ kết quả A của mẫu, thay vào phương trình đường chuẩn để tính ra nồng độ của P trong dung dịch chiết. Từ đó quy đổi ra hàm lượng P hữu hiệu trong mẫu đất (mgP/kg đất).	
6	NH_4^+ (g/kg)	Phương pháp so màu bằng máy UV-VIS: 1. Hóa chất: KCl 2M: cân 148g KCl trong 1 L nước cất 2. Chiết dung dịch: - Cân 7 gram đất vào ống ly tâm - Thêm 35 mL KCl 2M - Lắc trong vòng 1 tiếng - Lọc dung dịch và đo NH_4^+ 3. Dung dịch cần chuẩn bị: - Dung dịch MS: hòa tan 250g Sodium Citrate và 300g Potassium Sodium Tartrate ($NaKC_4H_4O_6$) trong 1 L nước cất (250g Sodium Citrate và 300g $NaKC_4H_4O_6$ vào 1 L nước cất). - Dung dịch PVA (polyvinyl alcohol): hòa tan 1,35g PVA trong 1 L nước cất - Dung dịch Nessler: + Cân 15g Potassium Hydroxide (KOH) vào hòa tan vào 50mL nước cất, và để nguội. + Cân 5g Potassium Iodide (KI) và hòa tan trong 10mL nước cất trong bình định mức 100mL. + Thêm 2,5g bột Mercuric Chloride ($HgCl_2$) vào dung dịch KI (thêm từ từ và khuấy đều đến khi dung dịch có màu vàng hoặc đỏ đậm). Khi có dấu hiệu kết tủa, dừng ngay lập tức. + Khuấy và đổ dung dịch KOH từ từ vào dung dịch $HgCl_2$ và KI và thêm nước cất đến 100mL. + Khi thêm dung dịch KOH vào thì có thể có các kết tủa. Cần để hỗn hợp này trong tối trong 24h. + Chuyển tất cả các phần nước vào bình nhựa và đống kính nắp, lưu trữ trong tối. Dung dịch này có thể tồn tại đến 1 tháng. - Dung dịch NH_4-N chuẩn nồng độ 1000 ppm NH_4-N: cân 4,716g Ammonium Sulfate hoặc 3,819g. Ammonium	TCVN 6643:2000 [104]

<table>
<tr><th>TT</th><th>Chỉ tiêu</th><th>Phương pháp</th><th>Tài liệu tham khảo</th></tr>
<tr><td></td><td></td><td>Chloride vào 1 L nước cất trong bình định mức.
- Dung dịch NH_4-N chuẩn nồng độ 50 µg/mL: lấy 5mL dung dịch 1000 ppm pha loãng với nước cất thành 100mL.
- Dung dịch Potassium Sodium Tartrate ($NaKC_4H_4O_6.4H_2O$): 10g hòa đến trong 50mL nước cất bằng bình định mức 50 mL (có thể làm 5g trong 50mL bình định mức).
4. Đo Máy UV-VIS, thực hiện theo các bước sau: Sử dụng bình định mức loại 50mL thêm các dung dịch vào theo thứ tự:
<table>
<tr><td>Bước</td><td>Định mức 50 mL</td><td colspan="7">Dung dịch chuẩn (đường chuẩn) nồng độ 50 µg/mL</td><td>Mẫu</td></tr>
<tr><td></td><td></td><td>1</td><td>2</td><td>3</td><td>4</td><td>5</td><td>6</td><td>7</td><td></td></tr>
<tr><td>1</td><td>Dung dịch cần đo (mL)</td><td>0</td><td>0.2</td><td>0.4</td><td>0.8</td><td>1.5</td><td>3</td><td>5</td><td>5</td></tr>
<tr><td>2</td><td>Nước cất (%)</td><td>70-80</td><td>70-80</td><td>70-80</td><td>70-80</td><td>70-80</td><td>70-80</td><td>70-80</td><td>70-80</td></tr>
<tr><td>3</td><td>$NaKC_4H_4O_6.4H_2O$, lắc đều (mL)</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td></tr>
<tr><td>4</td><td>Nessler, lắc đều (mL)</td><td>1,5</td><td>1,5</td><td>1,5</td><td>1,5</td><td>1,5</td><td>1,5</td><td>1,5</td><td>1,5</td></tr>
<tr><td>5</td><td>Nước cất</td><td colspan="8">Làm đầy đến mức</td></tr>
<tr><td colspan="10">Để trong vòng 10-20 phút và đo trên máy UV-VIS bước sóng 420 nm</td></tr>
<tr><td colspan="2">Nồng độ ammonia nitrogen trong các bình định mức (µg/mL)</td><td>0</td><td>0,2</td><td>0,4</td><td>0,8</td><td>1,5</td><td>3</td><td>5</td><td></td></tr>
</table></td><td></td></tr>
<tr><td>7</td><td>OC (%)</td><td>Xác định OC tổng số - Phương pháp Walkley Black:
1. Nguyên tắc xác định: Oxy hóa hoàn toàn carbon hữu cơ trong đất bằng dung dịch $K_2Cr_2O_7$ trong môi trường axit. Chuẩn độ lượng $K_2Cr_2O_7$ dư bằng dung dịch muối Fe^{2+}. Từ lượng $K_2Cr_2O_7$ phản ứng tính ra hàm lượng carbon hữu cơ trong đất.
2. Hóa chất và chuẩn bị hóa chất:
- Hóa chất gốc: H_2SO_4 98%, d = 1,84 g/mL; $K_2Cr_2O_7$; $(NH_4)_2Fe(SO_4)_2.6H_2O$; 1,10-phenaltrolin.
- Hóa chất sử dụng:
+ Dung dịch $K_2Cr_2O_7$ 0,1667 mol/L: Cân 24,52 g $K_2Cr_2O_7$ (M = 294,18 g/mol), hòa tan bằng khoảng 400 mL nước cất vào bình định mức 500mL, thêm nước đến vạch định mức, lắc đều.
+ Dung dịch muối FAS 0,5 mol/L: Cân 19,71g muối $(NH_4)_2Fe(SO_4)_2.6H_2O$ (M = 394,2 g/mol), hòa tan bằng khoảng 60mL nước cất trong bình định mức 100mL. Thêm từ từ 2mL H_2SO_4 đặc, lắc đều. Thêm nước cất đến vạch định mức. Dung dịch này được bảo quản trong bình tối màu. Nên kiểm tra nồng độ trước khi sử dụng.
+ Chỉ thị màu Ferroin: cân 1,48g 1,10-phenalthroline monohydrate và 0,7g $FeSO_4.7H_2O$ và trong 100mL nước cất.</td><td>TCVN 8941:2011</td></tr>
</table>

TT	Chỉ tiêu	Phương pháp	Tài liệu tham khảo
		3. Các bước tiến hành: - Chuẩn bị tất cả các hóa chất theo mục 4. - Cân 0,5g mỗi mẫu đất (đã cho qua rây 2 mm) cho vào bình erlen dung tích 250mL. Ghi nhãn mẫu. Sử dụng thêm 2 mẫu trắng (mẫu không có đất). - Thêm chính xác 10mL (sử dụng pipet để lấy) dung dịch $K_2Cr_2O_7$ 0,1667 mol/L, lắc đều. - Thêm 20mL H_2SO_4 đặc (sử dụng ống đong). Lắc đều hỗn hợp. Để trong 30 phút. Lưu ý: thực hiện bước này trong tủ hút. - Thêm 50mL nước cất và 5mL H_3PO_4 đặc, lắc đều. Để nguội dung dịch. - Thêm 3 giọt chỉ thị Ferroin và chuẩn độ $K_2Cr_2O_7$ bằng dung dịch muối FAS đến khi dung dịch chuyển từ màu xanh sang màu đỏ. 4. Tính toán kết quả: Hàm lượng carbon hữu cơ (% OC) được tính theo công thức: $$OC(\%) = \frac{(a-b)\times 0{,}4\times C\times K}{m}$$ *Trong đó*: • a: trung bình thể tích dung dịch muối FAS sử dụng để chuẩn độ 2 mẫu trắng (mL) • b: thể tích dung dịch muối FAS sử dụng để chuẩn độ mẫu thật (mL) • m: khối lượng mẫu (g) • C: nồng độ mol/L của dung dịch muối FAS • 0,4 = 3 × 10^{-3} × 100 × 100/75 (*Ghi chú*: 3 là khối lượng mol đương lượng của carbon, 100 là hệ số quy đổi phần trăm và 100/75 là hệ số điều chỉnh do quá trình oxy hóa carbon hữu cơ không triệt để. • K: hệ số khô kiệt	
8	Cl^- (g/kg)	Phương pháp chuẩn độ: 1. Nguyên tắc xác định: Nồng độ Cl^- hòa tan trong đất nhiễm mặn được chiết bằng nước cất. Dung dịch chiết được dùng để xác định nồng Cl^- thông qua phản ứng với dung dịch $AgNO_3$ tạo thành chất kết tủa AgCl. $$Ag+_{(aq)} + Cl-_{(aq)} \rightarrow AgCl_{(s)}$$ Khi Cl phản ứng hết, thì Ag thêm vào sẽ kết hợp với chất chỉ thị Potassium Chromate tạo thành chất kết tủa có màu nâu đỏ. 2. Hóa chất và chuẩn bị hóa chất:	[105]

<table>
<tr><th>TT</th><th>Chỉ tiêu</th><th>Phương pháp</th><th>Tài liệu tham khảo</th></tr>
<tr><td></td><td></td><td>
- Hóa chất gốc: Nitrate bạc ($AgNO_3$), chất chỉ thị Potassium Chromate (K_2CrO_4)
- Hóa chất sử dụng:
+ Dung dịch nitrate bạc 0,05 mol/L: Cân 2,13g $AgNO_3$ vào bình định mức 250mL. Thêm nước cất đẩy 250mL. Lắc cho tan hoàn toàn.
+ Hòa tan 1g K_2CrO_4 trong 20mL nước cất.
3. Dụng cụ cần sử dụng: Bình tam giác, bộ chuẩn độ burrete, ống ly tâm.
4. Các bước tiến hành:
<table>
<tr><th>Bước</th><th>Hoạt động</th><th>Hóa chất, vật liệu</th><th>Dụng cụ</th></tr>
<tr><td>1</td><td>Cân 7g đất vào ống ly tâm (ghi nhãn)</td><td>Đất</td><td>-</td></tr>
<tr><td>2</td><td>Thêm 35 mL nước cất</td><td>Nước</td><td>-</td></tr>
<tr><td>3</td><td>Lắc trong vòng 30 phút</td><td>-</td><td>Máy lắc</td></tr>
<tr><td>4</td><td>Lấy ống lý tâm xuống và lọc dụng dịch bằng giấy lọc</td><td>Giấy lọc</td><td>-</td></tr>
<tr><td rowspan="8">5</td><td>Xác định nồng đô Cl^- bằng phương pháp chuẩn độ bạc như sau:</td><td>Dung dịch bạc</td><td>Bộ buret chuẩn độ</td></tr>
<tr><td>Lấy 20 mL dung dịch sau lọc vào bình tam giác 100 mL</td><td></td><td>Bình tam giá</td></tr>
<tr><td>Thêm vào 20 mL nước cất</td><td>Nước cất</td><td>-</td></tr>
<tr><td>Thêm vào 4 giọt chất chỉ thị K_2CrO_4</td><td>K_2CrO_4</td><td>-</td></tr>
<tr><td>Lấy dung dịch nitrate bạc 0,05 mol/L vào cây burete chuẩn độ</td><td>-</td><td>Dung dịch bạc 0,05 mol/L</td></tr>
<tr><td>Nhỏ từ từ từng giọt một vào dung dịch lọc trong bình tam giác</td><td>-</td><td>-</td></tr>
<tr><td>Quan sát và kết thúc chuẩn độ khi dung dịch bắt đầu có màu nâu đỏ</td><td>-</td><td>-</td></tr>
<tr><td>Ghi lại lượng $AgNO_3$ đã sử dụng</td><td>-</td><td>-</td></tr>
<tr><td>6</td><td>Kết thúc và vệ sinh sạch sẽ</td><td>-</td><td>-</td></tr>
</table>
5. Tính toán kết quả:
$$\text{Nồng độ } Cl^- = \frac{0.05x\frac{a}{1000}x35x2}{8} \times 1000 \left(\frac{gram}{kg} \text{ đất khô}\right)$$
a là số mL $AgNO_3$ sử dụng trong quá trình chuẩn độ.
</td><td></td></tr>
<tr><td>9</td><td>SO_4^{2-} (g/kg)</td><td>
Phương pháp đo độ đục:
1. Nguyên tắc xác định SO_4^{2-} sẽ kết tủa với $BaCl_2$ trong môi trường Acid Acetic để hình thành nên tinh thể $BaSO_4$. Hấp phụ ánh sáng của huyền phù $BaSO_4$ được xác định thông qua máy UV-VIS và nồng độ SO_4^{2-} sẽ được xác định dựa trên kết quả đo đường chuẩn. Các yếu tố cản trở: Màu sắc hoặc các chất tan huyền phù với lượng lớn sẽ ảnh hưởng đến kết quả. Một số chất huyền phù có thể sẽ được loại bỏ bằng cách lọc.
</td><td>[106]</td></tr>
</table>

TT	Chỉ tiêu	Phương pháp	Tài liệu tham khảo
		Silica vượt quá 500 mg/L sẽ ảnh hưởng đến kết quả. Chất hữu cơ tan trong nước nhiều cũng có thể làm cho $BaSO_4$ không thể kết tủa hiệu quả Nồng độ thấp nhất có thể đo là khoảng 1 mg SO_4^{2-}/L 2. Dụng cụ: Máy khuấn từ, máy quang phổ UV-VIS, muỗng nhỏ (0.2-0.3 mL) 3. Hóa chất: - Dung dịch đệm A: hòa tan + 30g Magnesium Chloride ($MgCl_2.6H_2O$) + 5g Sodium Acetate ($CH_3COONa.3H_2O$) + 1g Potassium Nitrate (KNO_3) + 20mL Acetic acid (CH_3COOH, 99%) trong 500mL nước cất, sau đó làm đầy đến 1 L. - Dung dịch đệm B (không sử dụng). - Barium Chloride ($BaCl_2$), tinh thể. - Dung dịch sulfate chuẩn (100 miligram SO_4/lit=100 µg/mL): Chuẩn bị dung dịch sulfate chuẩn (theo 1 trong 2 cách): Cách 1: Hoà tan 1,042mL acid H_2SO_4 nồng độ 0,5M vào 0,5L nước cất (đong 0,69mL acid H_2SO_4 đậm đặc vào 20mL nước cất và làm đầy 25mL có dung dịch 0,5M với thể tích 25mL). Cách 2: Hòa tan 0,1479g Anhydrous (Na_2SO_4) vào 1 L nước cất (nên sử dụng cách này). 4. Phân tích (Chọn 1 trong 2 phương pháp sau tùy theo hóa chất đang có): 4.1. Chiết SO_4 từ đất a. Phương pháp Monocalcium Phosphate Chất chiết: dung dịch Calcium Phosphate (500 mg/L): Cân 2,03g Calcium Phosphate [$Ca(H_2PO_4)_2 \cdot 2H_2O$] vào bình định mức 1 L và thêm nước cất vào cho đủ 1 L. Cách chiết: cân 10g đất khô đã sàng qua rây 2mm vào ống ly tâm 50 mL. Thêm 25mL dung dịch chiết và lắc trên máy lắc trong vòng 30 phút. Lọc qua giấy lọc và lấy dung dịch phân tích SO_4. b. Phương pháp 0,5M-0,25M Acetic Acid Chất chiết: 0,5M NH4C2H3O2-0,5M CH_3COOH: Cân 39g Ammonium Acetate ($NH_4C_2H_3O_2$) vào bình định mức 1 L và thêm Acetic acid (0,25M) cho đầy 1 L: (Acetic acid 0,25M: hoàn tan 14,31g tinh thể CH_3COOH trong 1 L nước cất). Cách chiết: cân 10g đất khô đã sàng qua rây 2mm vào ống ly tâm 50mL. Thêm 25mL dung dịch chiết và lắc trên máy lắc	

TT	Chỉ tiêu	Phương pháp	Tài liệu tham khảo
		trong vòng 30 phút. Lọc qua giấy lọc và lấy dung dịch phân tích SO_4. Xác định nồng độ SO_4 trong dung dịch chiết bằng phương pháp kết tủa $BaCl_2$. 4.2. Đo SO_4 từ dung dịch chiết * Hình thành dung dịch đục Barium Sulfate: - Lấy 5 mL dung dịch mẫu cần đo vào bình tam giác 250mL - Thêm vào 95mL nước cất - Thêm 20mL dung dịch đệm A và để trên máy khuấy từ - Thêm 1 muỗng nhỏ $BaCl_2$ và khuấy trong vòng 1 phút - Mẫu trắng: lấy 100mL nước cất + 20mL dung dịch đệm A (lưu ý không cho 1 muỗng $BaCl_2$ nào vào) và tiến hành đo như bình thường * Đo độ đục dung dịch: Đo dung dịch này trên máy quang phổ ở bước sóng 420 nm. * Đo đường chuẩn - Thêm 0, 10, 20, 40, 60, 80 và 100mL dung dịch chuẩn vào các bình tam giác 250mL - Thêm nước cất vào theo thứ tự 100, 90, 80, 60, 40, 20, 10 mL nước cất - Thêm vào 20mL dung dịch đệm A và để trên máy khuấy từ - Thêm vào 1 muỗng nhỏ $BaCl_2$ và khuấy trong vòng 1 phút - Đo dung dịch chuẩn trên máy quang phổ, bước sóng 420 nm	
10	CEC (cmol(+)/kg)	Phương pháp tách chiết bằng $BaCl_2$: 1. Dụng cụ và hóa chất - Ống ly tâm (50mL) có nắp vặn và máy ly tâm tốc độ thấp. - Máy lắc. - Bari Clorua, 0,1M: hòa tan 24,43g $BaCl_2.2H_2O$ bằng nước khử ion kép (d.d.) và định mức cho vào bình định mức 1 L. - Các chất chuẩn Ca, Mg, K, Na, Al, Fe, Mn được chuẩn bị bằng chất chuẩn lỏng cấp thuốc thử hấp thụ nguyên tử 1000 mg/L. Nền mẫu trong các chất chuẩn phải tương ứng với nồng độ $BaCl_2$ của mẫu phân tích. - Dung dịch Lanthanum, 100 mg/L: hòa tan 53,5g $LaCl_3.7H_2O$ trong bình định mức 200mL và định mức đến vạch (để phân tích bằng phương pháp quang phổ hấp thụ nguyên tử [AAS]). - Dung dịch Caesium, 100 g/L: hòa tan 25,2g CsCl trong bình 200mL và định mức đến vạch (phân tích bằng AAS). 2. Các bước thực hiện:	[103]
11	Fe trao đổi (mg/kg)		
12	Al trao đổi (mg/kg)		
13	Mn trao đổi (mg/kg)		
14	Ca trao đổi (mg/kg)		
15	Mg trao đổi (mg/kg)		
16	K trao đổi (mg/kg)		

TT	Chỉ tiêu	Phương pháp	Tài liệu tham khảo
17	Na trao đổi (mg/kg)	- Cân khoảng 0,5g đất hữu cơ hoặc đất có kết cấu mịn để khô trong không khí (<2 mm) với 1,5g đất có kết cấu thô cho vào ống ly tâm 50mL. Ghi lại khối lượng đất đã sử dụng chính xác đến 0,001g. Bao gồm các mẫu trống, mẫu trùng lặp và mẫu kiểm soát chất lượng. - Thêm 30mL $BaCl_2$ 0,1M vào mỗi ống và lắc từ từ trên máy lắc hai đầu (15 vòng/phút) trong 2 giờ. - Ly tâm (15 phút, 700g) và lọc phần nổi phía trên (SN) bằng giấy lọc Whatman no. 41. - Phân tích các cation sau trong dung dịch SN bằng AAS hoặc bất kỳ thiết bị thích hợp nào khác: Ca, Mg, K, Na, Al, Fe và Mn. Pha loãng (10 hoặc 100 lần) thường được yêu cầu đối với Ca, K và Mg. Việc bổ sung 0,1mL dung dịch La và 0,1mL dung dịch Cs vào 10mL dịch chiết pha loãng là cần thiết để xác định Ca, Mg và K bằng AAS. Bảo quản mẫu bằng cách axit hóa đến 0,2% HNO_3 sẽ ngăn ngừa sự thất thoát các kim loại, chẳng hạn như Fe và Al. - Có thể đo độ pH của dung dịch cân bằng trên một phần dung dịch $BaCl_2$ riêng biệt trước khi lọc. Sự rò rỉ K từ cầu muối KCl của điện cực pH là đáng kể và do đó không thể sử dụng cùng một lượng K để phân tích K và đo pH 3. Tính toán kết quả: - Cation trao đổi: **M+ cmol(+)/kg =** **C cmol(+)/L x (0:03 L= wt:đất g) x 1000 g/kg x DF** *Trong đó:* • M+ là nồng độ của cation bị hấp phụ, cmol(+)/kg • C là nồng độ của cation tương tự đo được trong dịch chiết $BaCl_2$ (cmol(+)/L) • DF là hệ số pha loãng (nếu có) - Effective CEC: **Effective CEC cmol(+)/kg = Tổng M+cmol(+)/kg** - Các cation kim loại trao đổi sau khi tách chiết bằng $BaCl_2$ như các bước ở trên tiếp tục đem đi đo bằng thiết bị ICP-OES (Inductively Coupled Plasma Spectroscopy Optical Emission Spectrometer) để xác định nồng độ các kim loại Al, Fe, Mn, Na, K, Ca, Mg ở dạng trao đổi.	

Phụ lục 2: Các bảng trình bày kết quả phân tích PCA/FA và trọng số của các thông số đất 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.

Phụ bảng 2.1 Kết quả phân tích PCA/FA và trọng số của các thông số của đất ứng với 5 loại hình sử dụng đất

Thông số phân tích	Nhân tố 1	Nhân tố 2	Nhân tố 3	Nhân tố 4	Trọng số
Mg trao đổi	**0,8**	0,3	0,2	0,1	0,100
Fe trao đổi	**0,7**	0,1	0,2	-0,4	0,100
Ca trao đổi	**0,7**	0,1	0,3	0,4	0,100
CEC	**0,5**	0,1	-0,5	0,1	0,100
pH	**-0,7**	0,3	0,0	0,5	0,100
Mn trao đổi	0,2	**-0,5**	-0,3	0,0	0,044
OC	0,0	**0,7**	0,1	0,1	0,044
EC	0,4	**0,6**	0,5	-0,2	0,044
NH_4^+	0,1	**0,6**	-0,2	0,1	0,044
SO_4^{2-}	0,3	**0,5**	0,3	-0,3	0,044
Cl^-	0,2	**0,5**	0,1	-0,1	0,044
Độ chua trao đổi	0,1	0,1	**0,8**	-0,1	0,043
Mehlich-1 P	0,3	0,3	**0,7**	-0,1	0,043
H^+	0,1	0,0	**0,7**	0,0	0,043
Al trao đổi	0,0	-0,3	0,2	**-0,7**	0,035
K trao đổi	0,0	-0,4	-0,2	**0,6**	0,035
Na trao đổi	0,0	-0,4	0,3	**0,5**	0,035
Eigenvalue	4,51	2,01	1,96	1,59	
Phần trăm (%)	26,51	11,85	11,54	9,38	
Phần trăm tích lũy (%)	26,51	38,36	49,90	59,28	
Hệ số nhân tố	0,45	0,20	0,19	0,16	

Phụ bảng 2.2 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
Mehlich-1 P	**0,89**	0,36	-0,02	0,11
Ca trao đổi	**0,86**	-0,14	-0,23	0,11
pH	**0,86**	0,28	-0,16	0,11
CEC	**0,81**	0,34	-0,19	0,11
SO_4^{2-}	**-0,84**	0,17	0,09	0,11
Độ chua trao đổi	**-0,84**	-0,23	0,32	0,11
H^+ trao đổi	**-0,90**	-0,17	0,21	0,11
Cl^-	-0,05	**0,91**	-0,19	0,04
Na trao đổi	-0,13	**0,89**	-0,05	0,04
K trao đổi	0,46	**0,80**	-0,15	0,04
EC	0,33	**0,72**	-0,20	0,04
Mg trao đổi	0,30	**0,70**	0,31	0,04
Mn trao đổi	-0,18	0,01	**0,86**	0,02
Fe trao đổi	-0,55	-0,29	**0,64**	0,02
Al trao đổi	-0,57	-0,41	**0,61**	0,02
Eigenvalue	8,07	2,91	1,25	
Phần trăm (%)	53,79	19,07	8,36	
Phần trăm tích lũy (%)	53,79	72,87	81,22	
Hệ số nhân tố	0,66	0,23	0,10	

Phụ bảng 2.3 Kết quả phân tích PCA/FA và trọng số của các thông số đất ở 2 chế độ nước tưới ngập và độ ẩm 60%

Thông số phân tích	Nhân tố 1	Nhân tố 2	Nhân tố 3	Nhân tố 4	Nhân tố 5	Trọng số
CEC	**0,9**	-0,1	0,2	-0,1	0,1	0,09
Mehlich-1 P	**0,8**	-0,1	-0,1	-0,3	0,0	0,09
OC	**0,7**	0,2	0,0	0,1	-0,3	0,09
K trao đổi	**0,7**	0,0	-0,1	0,2	0,1	0,09
H^+ trao đổi	0,0	**0,9**	0,0	0,0	0,0	0,07
Fe trao đổi	-0,3	**0,8**	0,2	0,4	0,0	0,07
Cl^-	0,3	**0,8**	0,1	0,2	0,3	0,07
Al trao đổi	-0,1	**0,7**	0,4	0,0	0,2	0,07
pH	0,4	-0,2	**-0,6**	0,0	-0,2	0,05
Ca trao đổi	0,4	0,0	**-0,5**	0,1	0,4	0,05
EC	-0,3	0,4	**-0,5**	-0,2	-0,3	0,05
Độ chua trao đổi	-0,1	0,1	**0,8**	0,0	0,1	0,05
SO_4^{2-}	0,2	0,4	**0,7**	0,0	-0,3	0,05
Mn trao đổi	0,2	0,4	**0,5**	0,1	0,0	0,05
Na trao đổi	0,0	0,2	0,2	**0,8**	0,0	0,03
Mg trao đổi	0,0	0,1	-0,4	**0,6**	0,1	0,03
NH_4^+	0,0	0,2	0,1	0,0	**0,9**	0,03
Eigenvalue	4,1	3,0	2,0	1,4	1,2	
Phần trăm (%)	23,9	17,9	11,9	8,1	6,8	
Phần trăm tích lũy (%)	23,9	41,8	53,7	61,8	68,6	
Hệ số nhân tố	0,3	0,3	0,2	0,1	0,1	

Phụ bảng 2.4 Kết quả phân tích PCA/FA và trọng số của các thông số đất sau thí nghiệm trên lúa

Thông số phân tích	Nhân tố 1	Nhân tố 2	Nhân tố 3	Nhân tố 4	Nhân tố 5	Nhân tố 6	Trọng số
Fe trao đổi	**0,87**	-0,17	0,08	-0,11	-0,02	0,07	0,097
Độ chua trao đổi	**0,78**	0,08	0,31	0,04	-0,01	-0,26	0,097
Al trao đổi	**0,64**	-0,64	0,05	-0,02	0,22	-0,10	0,097
Ca trao đổi	**-0,86**	0,17	-0,08	0,39	0,02	-0,03	0,097
pH	**-0,75**	0,20	0,21	-0,37	-0,23	-0,17	0,097
OC	-0,16	**0,80**	0,16	-0,14	0,26	0,21	0,058
CEC	-0,03	**0,79**	-0,38	0,10	-0,14	0,17	0,058
K trao đổi	-0,26	**0,75**	-0,14	0,04	-0,23	-0,13	0,058
NH_4^+	0,15	**0,63**	0,55	0,15	0,11	-0,05	0,058
Mehlich-1 P	-0,38	**0,54**	0,21	0,37	-0,20	0,05	0,058
Cl^-	0,08	-0,08	**0,92**	-0,01	-0,10	0,07	0,039
H^+ trao đổi	0,08	-0,19	**0,59**	0,00	0,59	0,19	0,039
Mg trao đổi	-0,25	-0,01	-0,13	**0,88**	-0,12	-0,13	0,034
Mn trao đổi	0,14	0,34	0,48	**0,64**	0,02	0,02	0,034
Na trao đổi	0,11	-0,08	0,42	**0,51**	-0,49	0,26	0,034
SO_4^{2-}	0,08	-0,06	-0,04	-0,09	**0,84**	-0,01	0,024
EC	-0,03	0,15	0,10	-0,05	0,01	**0,93**	0,022
Eigenvalue	4,85	2,92	1,97	1,69	1,20	1,08	
Phần trăm (%)	28,51	17,16	11,60	9,97	7,03	6,37	
Phần trăm tích lũy (%)	28,51	45,67	57,27	67,23	74,26	80,64	
Hệ số nhân tố	0,354	0,213	0,144	0,124	0,087	0,079	

Phụ bảng 2.5 Kết quả phân tích PCA/FA và trọng số của các thông số đất sau thí nghiệm trên cải thìa

Thông số phân tích	Nhân tố 1	Nhân tố 2	Nhân tố 3	Trọng số
Na trao đổi	**0,8**	0,0	-0,3	0,08
Mn trao đổi	**0,8**	-0,2	0,0	0,08
Fe trao đổi	**0,7**	0,1	-0,3	0,08
Al trao đổi	**0,7**	0,2	-0,4	0,08
Độ chua trao đổi	**0,6**	-0,6	-0,1	0,08
Mg trao đổi	**-0,6**	0,5	0,1	0,08
EC	**-0,5**	0,3	-0,2	0,08
Ca trao đổi	**-0,8**	0,2	-0,1	0,08
pH	**-0,8**	-0,4	0,3	0,08
NH_4^+	0,0	**0,9**	0,1	0,05
Cl^-	-0,2	**0,9**	-0,1	0,05
SO_4^{2-}	0,0	**0,8**	0,4	0,05
H^+ trao đổi	0,0	**0,8**	-0,3	0,05
CEC	-0,1	-0,1	**0,9**	0,03
K trao đổi	-0,4	0,1	**0,7**	0,03
OC	-0,3	0,4	**0,6**	0,03
Mehlich-1 P	0,2	0,4	**0,5**	0,03
Eigenvalue	5,8	3,9	1,9	
Phần trăm	34,4	23,0	11,3	
Phân trăm tích lũy (%)	34,4	57,4	68,6	
Hệ số nhân tố	0,5	0,3	0,2	

Phụ lục 3: Các bảng trình bày kết quả hàm lượng của các nguyên tố có trong rễ, rơm và hạt của lúa; rễ, thân lá của cải thìa sau thời gian thực hiện thí nghiệm, thu hoạch và phân tích

Phụ bảng 3.1 Hàm lượng các nguyên tố trong rễ lúa sau thí nghiệm

Đặc tính rễ	Không than trấu			Có than trấu		
	Đối chứng	Vôi	Phân bò	Than trấu	Than trấu + vôi	Than trấu + phân bò
N (g/kg)	3,57^{c} ± 0,09	3,60^{bc} ± 0,11	4,35^{a} ± 0,06	3,70^{b} ± 0,04	3,70^{bc} ± 0,07	4,24^{a} ± 0,02
P (g/kg)	0,50^{d} ± 0,01	0,55^{c} ± 0,01	0,59^{ab} ± 0,00	0,60^{ab} ± 0,01	0,58^{b} ± 0,00	0,60^{a} ± 0,01
K (mg/kg)	1.268^{c} ± 27,70	1.396^{b} ± 8,10	1.450^{b} ± 44,98	1.438^{b} ± 36,35	1.408^{b} ± 46,22	1.584^{a} ± 32,51
Na (mg/kg)	4.496^{a} ± 70,83	4.309^{a} ± 227,15	4.317^{a} ± 110,71	4.205^{a} ± 99,82	4.388^{a} ± 95,71	4.352^{a} ± 146,75
Ca (mg/kg)	693,66^{c} ± 32,79	760,35^{b} ± 19,76	753,87^{bc} ± 15,11	810,69^{b} ± 8,06	934,60^{a} ± 17,89	817,46^{b} ± 24,07
Mg (mg/kg)	953,79^{a} ± 19,05	995,59^{a} ± 24,61	961,02^{a} ± 23,10	932,98^{a} ± 21,22	940,49^{a} ± 16,66	962,65^{a} ± 27,21
Al (mg/kg)	11.094^{a} ± 472,30	9.136^{bc} ± 398,65	9.272^{b} ± 378,63	8.080^{c} ± 333,35	6.822^{d} ± 307,95	8.931^{bc} ± 294,57
Fe (mg/kg)	13.074^{a} ± 684,22	11.547^{b} ± 363,78	12.166^{ab} ± 301,93	9.471^{c} ± 190,86	8.474^{c} ± 137,36	9.356^{c} ± 178,32
Mn (mg/kg)	116,24^{a} ± 3,90	105,66^{a} ± 3,60	112,57^{a} ± 2,59	105,34^{a} ± 2,96	105,91^{a} ± 3,86	109,59^{a} ± 4,97

Phụ bảng 3.2 Hàm lượng các nguyên tố trong rơm sau thí nghiệm

Đặc tính rơm	Không than trấu			Có than trấu		
	Đối chứng	Vôi	Phân bò	Than trấu	Than trấu + vôi	Than trấu + phân bò
N (g/kg)	5,88[a] ± 0,20	5,91[a] ± 0,16	6,23[a] ± 0,16	5,96[a] ± 0,12	5,96[a] ± 0,07	6,25[a] ± 0,23
P (g/kg)	0,62[b] ± 0,01	0,68[ab] ± 0,02	0,71[a] ± 0,03	0,69[a] ± 0,01	0,71[a] ± 0,02	0,70[a] ± 0,02
K (mg/kg)	4.052[d] ± 145,72	4.864[c] ± 94,20	5.305[bc] ± 103,22	5.707[ab] ± 203,40	5.789[a] ± 128,62	5.556[ab] ± 157,64
Na (mg/kg)	7.760[a] ± 198,05	7.323[ab] ± 358,08	7.208[ab] ± 158,35	6.872[ab] ± 295,39	7.130[ab] ± 367,84	6.742[b] ± 284,32
Ca (mg/kg)	781,25[cd] ± 10,84	882,83[b] ± 23,45	748,05[d] ± 9,87	808,49[c] ± 17,39	988,32[a] ± 28,41	797,22[cd] ± 16,18
Mg (mg/kg)	903,89[a] ± 29,49	969,04[a] ± 49,41	902,45[a] ± 43,44	954,46[a] ± 39,78	960,96[a] ± 31,52	999,60[a] ± 38,12
Al (mg/kg)	600,51[a] ± 14,44	507,97[b] ± 10,85	594,21[a] ± 9,05	425,58[c] ± 7,73	433,10[c] ± 8,54	584,48[a] ± 18,90
Fe (mg/kg)	361,78[ab] ± 12,67	226,87[cd] ± 10,22	394,66[a] ± 27,70	256,66[c] ± 6,73	200,95[d] ± 5,44	344,75[b] ± 12,11
Mn (mg/kg)	130,42[ab] ± 6,20	124,35[ab] ± 3,26	114,06[b] ± 4,77	117,73[ab] ± 12,62	136,71[a] ± 8,00	131,59[ab] ± 3,25

Phụ bảng 3.3 Hàm lượng các nguyên tố trong hạt lúa sau thí nghiệm

Đặc tính hạt	Không than trấu			Có than trấu		
	Đối chứng	Vôi	Phân bò	Than trấu	Than trấu + vôi	Than trấu + phân bò
N (g/kg)	11,19^{c} ± 0,29	11,50^{bc} ± 0,18	13,95^{a} ± 0,39	12,02^{bc} ± 0,27	12,10^{b} ± 0,30	14,06^{a} ± 0,38
P (g/kg)	2,16^{c} ± 0,05	2,57^{ab} ± 0,08	2,65^{ab} ± 0,05	2,46^{b} ± 0,07	2,68^{ab} ± 0,09	2,70^{a} ± 0,10
K (mg/kg)	2.228^{c} ± 38,35	2.367^{ab} ± 39,22	2.299^{bc} ± 67,32	2.438^{a} ± 40,46	2.443^{a} ± 0,09	2.400^{ab} ± 26,13
Na (mg/kg)	2.364^{a} ± 31,83	2.318^{a} ± 53,17	2.459^{a} ± 112,74	2.247^{a} ± 106,31	2.367^{a} ± 123,10	2.421^{a} ± 106,52
Ca (mg/kg)	1.540^{a} ± 28,72	1.632^{a} ± 54,20	1.550^{a} ± 57,55	1.601^{a} ± 66,28	1.627^{a} ± 75,89	1.600^{a} ± 78,20
Mg (mg/kg)	1.310^{a} ± 43,13	1.337^{a} ± 43,45	1.333^{a} ± 41,41	1.305^{a} ± 67,65	1.346^{a} ± 42,48	1.336^{a} ± 38,79
Al (mg/kg)	488,76^{ab} ± 5,21	484,91^{ab} ± 2,89	491,84^{a} ± 4,19	479,45^{b} ± 2,08	484,54^{ab} ± 3,59	484,44^{ab} ± 2,52
Fe (mg/kg)	622,98^{a} ± 13,43	589,48^{b} ± 10,42	605,21^{ab} ± 13,06	548,05^{c} ± 4,32	533,00^{c} ± 2,58	550,51^{c} ± 5,14
Mn (mg/kg)	66,74^{a} ± 1,25	66,41^{a} ± 1,70	63,99^{a} ± 0,92	64,57^{a} ± 1,22	64,54^{a} ± 1,39	65,47^{a} ± 1,06

Phụ bảng 3.4 Hàm lượng các nguyên tố trong rễ cải thìa sau thí nghiệm

Đặc tính rễ	Không than trấu			Có than trấu		
	Đối chứng	Vôi	Phân bò	Than trấu	Than trấu + vôi	Than trấu + phân bò
Vụ 1						
N (g/kg)	1,95^{b} ± 0,05	1,87^{b} ± 0,08	2,07^{ab} ± 0,05	1,98^{b} ± 0,05	1,55^{c} ± 0,05	2,36^{a} ± 0,22
P (g/kg)	0,13^{a} ± 0,01	0,16^{a} ± 0,02	0,16^{a} ± 0,01	0,19^{a} ± 0,05	0,17^{a} ± 0,01	0,16^{a} ± 0,00
K (mg/kg)	6.736^{bc} ± 411,70	7.588^{b} ± 250,90	6.338^{bc} ± 482,13	7.545^{b} ± 550,65	8.991^{a} ± 294,97	7.892^{ab} ± 340,96
Na (mg/kg)	5.599^{a} ± 353,04	5.244^{a} ± 346,01	5.586^{a} ± 370,98	4.841^{a} ± 647,68	5.327^{a} ± 589,26	5.195^{a} ± 292,62
Ca (mg/kg)	851,83^{c} ± 40,56	1.131^{a} ± 84,11	947,83^{bc} ± 21,12	1.006^{ab} ± 61,91	1.117^{a} ± 44,57	917,50^{bc} ± 48,61
Mg (mg/kg)	624,33^{a} ± 27,09	627,00^{a} ± 24,30	619,00^{a} ± 30,29	606,33^{a} ± 47,54	615,17^{a} ± 58,60	612,17^{a} ± 39,99
Al (mg/kg)	4.684^{a} ± 424,42	3.999^{abc} ± 364,91	4.162^{ab} ± 358,76	4.241^{ab} ± 105,90	3.206^{c} ± 200,77	3.784^{bc} ± 141,90
Fe (mg/kg)	919,33^{a} ± 25,75	781,67^{b} ± 40,89	755,67^{bc} ± 52,45	768,67^{bc} ± 31,64	608,00^{d} ± 37,45	654,67^{cd} ± 44,24
Mn (mg/kg)	73,42^{a} ± 2,68	72,33^{a} ± 3,09	60,33^{b} ± 1,96	66,33^{ab} ± 1,86	72,83^{a} ± 3,07	69,25^{a} ± 1,52
Vụ 2						
N (g/kg)	1,34^{b} ± 0,11	1,26^{b} ± 0,03	1,91^{a} ± 0,07	1,44^{b} ± 0,07	1,43^{b} ± 0,10	1,91^{a} ± 0,06
P (g/kg)	0,13^{b} ± 0,01	0,16^{ab} ± 0,01	0,15^{ab} ± 0,01	0,23^{a} ± 0,06	0,15^{ab} ± 0,01	0,17^{ab} ± 0,01
K (mg/kg)	17.740^{b} ± 657,86	20.517^{a} ± 959,31	20.783^{a} ± 367,55	20.967^{a} ± 967,82	22.333^{a} ± 780,31	20.456^{a} ± 1.174
Na (mg/kg)	13.579^{a} ± 415,83	13.004^{ab} ± 563,01	12.574^{ab} ± 683,50	12.091^{ab} ± 479,04	11.1923^{b} ± 342,85	12.397^{ab} ± 1.184
Ca (mg/kg)	2.282^{b} ± 109,69	2.779^{a} ± 49,02	2.020^{c} ± 44,32	2.269^{b} ± 96,40	2.771^{a} ± 48,32	1.999^{c} ± 66,49
Mg (mg/kg)	1.705^{a} ± 103,10	1.871^{a} ± 62,69	1.795^{a} ± 68,13	1.789^{a} ± 79,06	1.811^{a} ± 57,11	1.713^{a} ± 77,63
Al (mg/kg)	5.554^{a} ± 197,70	4.610^{b} ± 133,45	5.587^{a} ± 478,99	4.495^{b} ± 231,91	4.452,^{b} ± 209,56	5.049^{ab} ± 232,04
Fe (mg/kg)	2.832^{a} ± 144,04	2.004^{b} ± 63,76	1.739^{c} ± 42,49	1.879^{bc} ± 39,27	1.797^{bc} ± 14,18	1.748^{c} ± 32,52
Mn (mg/kg)	80,67^{a} ± 1,25	81,00^{a} ± 3,05	87,42^{a} ± 4,32	83,58^{a} ± 4,47	89,50^{a} ± 2,33	82,17^{a} ± 3,91

Phụ bảng 3.5 Hàm lượng các nguyên tố trong thân lá cải thìa sau thí nghiệm

Đặc tính thân lá	Không than trấu			Có than trấu		
	Đối chứng	Vôi	Phân bò	Than trấu	Than trấu + vôi	Than trấu + phân bò
Vụ 1						
N (g/kg)	4,54^{b} ± 0,10	4,77^{ab} ± 0,11	5,30^{a} ± 0,27	4,94^{ab} ± 0,24	4,67^{b} ± 0,28	5,08^{ab} ± 0,12
P (g/kg)	0,40^{c} ± 0,04	0,45^{bc} ± 0,01	0,53^{a} ± 0,02	0,51^{ab} ± 0,03	0,51^{ab} ± 0,01	0,54^{a} ± 0,01
K (mg/kg)	13.513^{ab} ± 577,31	12.383^{bc} ± 587,31	13.873^{ab} ± 1.180	14.265^{a} ± 217,91	11.820^{c} ± 484,13	12.406^{bc} ± 367,86
Na (mg/kg)	6.831^{a} ± 293,45	6.533^{ab} ± 282,27	6.267^{bc} ± 180,88	5.916^{c} ± 245,69	5.059^{d} ± 249,17	5.332^{d} ± 150,17
Ca (mg/kg)	1.732^{c} ± 35,58	1.9501^{a} ± 50,40	1.705^{c} ± 35,99	1.907^{ab} ± 46,86	2.038^{a} ± 52,21	1.772^{bc} ± 63,25
Mg (mg/kg)	1.170^{a} ± 45,69	977,00^{b} ± 22,36	1.095^{ab} ± 48,35	1.072^{ab} ± 78,64	1.085^{ab} ± 70,89	1.096^{ab} ± 32,80
Al (mg/kg)	2.096^{a} ± 63,45	1.532^{d} ± 46,63	1.903^{b} ± 88,76	1.800^{bc} ± 65,93	1.576^{d} ± 28,27	1.633^{cd} ± 33,96
Fe (mg/kg)	409,33^{a} ± 3,50	364,67^{a} ± 16,63	370,50^{a} ± 9,16	385,50^{a} ± 25,47	386,00^{a} ± 15,64	396,00^{a} ± 27,03
Mn (mg/kg)	64,17^{a} ± 1,09	60,06^{a} ± 1,78	65,25^{a} ± 2,00	59,00^{a} ± 2,85	59,86^{a} ± 1,57	61,60^{a} ± 2,07
Vụ 2						
N (g/kg)	4,57^{b} ± 0,14	4,90^{ab} ± 0,23	5,34^{a} ± 0,21	4,98^{ab} ± 0,29	4,43^{b} ± 0,17	5,45^{a} ± 0,22
P (g/kg)	0,43^{b} ± 0,03	0,46^{ab} ± 0,01	0,47^{ab} ± 0,01	0,49^{a} ± 0,02	0,46^{ab} ± 0,03	0,51^{a} ± 0,03
K (mg/kg)	25.633^{ab} ± 1.441	23.817^{b} ± 656,24	26.000^{ab} ± 1.037	25.283^{ab} ± 1.336	19.253^{c} ± 925,62	27.274^{a} ± 643,34
Na (mg/kg)	15.089^{a} ± 291,18	13.818^{b} ± 276,95	14.291^{ab} ± 160,10	10.693^{d} ± 404,93	11.444^{cd} ± 271,76	12.161^{c} ± 507,19
Ca (mg/kg)	4.235^{b} ± 109,85	5.343^{a} ± 324,37	4.256^{b} ± 50,86	4.557^{b} ± 101,55	4.600^{b} ± 240,61	4.491^{b} ± 166,57
Mg (mg/kg)	2.851^{a} ± 59,74	2.789^{a} ± 91,02	2.898^{a} ± 126,62	2.811^{a} ± 116,46	2.387^{a} ± 53,12	2.806^{a} ± 102,54
Al (mg/kg)	3.592^{a} ± 158,96	3.547^{a} ± 87,69	3.288^{ab} ± 103,26	3.089^{ab} ± 400,78	2.657^{b} ± 248,14	3.290^{ab} ± 433,89
Fe (mg/kg)	438,83^{ab} ± 12,53	443,33^{ab} ± 8,78	430,33^{a} ± 9,76	469,67^{b} ± 23,03	403,50^{ab} ± 29,73	434,00^{ab} ± 22,31
Mn (mg/kg)	72,67^{a} ± 2,77	70,36^{a} ± 0,45	75,38^{a} ± 1,15	74,60^{a} ± 1,09	73,00^{a} ± 2,58	71,40^{a} ± 2,70

Phụ lục 4: Mẫu phiếu khảo sát hiện trạng và hiệu quả sử dụng đất

TRƯỜNG ĐH CÔNG NGHIỆP TP.HCM
VIỆN KHOA HỌC CÔNG NGHỆ & QUẢN LÝ MÔI TRƯỜNG

CỘNG HÒA XÃ HỘI CHỦ NGHĨA VIỆT NAM
Độc lập - Tự do - Hạnh phúc

PHIẾU KHẢO SÁT HIỆN TRẠNG VÀ HIỆU QUẢ SỬ DỤNG ĐẤT

Ngày khảo sát: .....Người khảo sát:.....

TÌNH HÌNH CHUNG

1. Tên chủ hộ ..... Nam/Nữ... ……Trình độ văn hóa……
2. Địa chỉ: Thôn .....Xã .....Huyện ..... Tỉnh/TP…….
3. Số nhân khẩu ..... Số lao động .....Chính ..... Phụ……
4. Loại hình: .... ……..
5. Diện tích: .....m^2, số thửa…….

a. Theo địa hình

- Cao .....☐ .....Diện tích ..... m^2;
- Thấp.....☐ .....Diện tích ..... m^2;
- Trũng .....☐ .....Diện tích ..... m^2;
- Ngập nước

b. Loại đất

- Mặn.....☐ .....Diện tích..... m^2;
- Phèn.....☐ .....Diện tích..... m^2;
- Phèn nhiễm mặn.....☐ .....Diện tích..... m^2;

c. Theo thời vụ

Số lượng vụ .....m^2, trong đó:

+ Vụ 1:
+ Vụ 2:
+ Vụ 3:
+ Khác:

Khác: …….

d. Loại hình khác: .....m^2, cây trồng: ……

6. Diện tích cần hoặc có thể chuyển đổi (theo ý kiến của chủ hộ)

a. Trồng công nghiệp .....m^2
b. Cây ăn quả .....m^2
c. Cây hoa màu .....m^2
d. Nuôi trồng thủy/ hải sản .....m^2
e. Loại hình khác .....m^2

MÔ HÌNH SẢN XUẤT

Hạng mục	Vụ 1		Vụ 2		Vụ 3	
	Số lượng (kg)	Tiền (1.000đ)	Số lượng (kg)	Tiền (1.000đ)	Số lượng (kg)	Tiền (1.000đ)
THÔNG TIN CHUNG						
Thời vụ gieo						
Diện tích (m^2)						
Năng suất (tấn/ha)						
Sản lượng						
Sản phẩm phụ						
Giá sản phẩm (đ/kg)						
CHI PHÍ						
I. Vật chất						
1. Giống						
2. Phân hữu cơ						
3. Phân vô cơ						
- Đạm						
- Lân						
- Kali						
- NPK						
- DAP						
- Vôi						
- Phân bón lá						
- Loại khác						
4. Thuốc BVTV						
5. Thuốc trừ cỏ						
6. Nhiên liệu						
7. Khác						
II. Lao động						
1. Lao động nhà (công)						
2. Lao động thuê (công)						
3. Giá 1 ngày thuê (đ/công)						
III. Dịch vụ phí khác						
1. Làm đất						
2. Thủy lợi phí						
3. Quản lý phí						
IV. Trả lãi vay						
V. Chi khác						

TỔNG THU						
I. Tổng thu						
1. Sản phẩm chính						
2. Sản phẩm phụ						
II. Hướng tiêu thụ SP						
1. Bán tiêu dùng (%)						
2. Bán cho nhà máy (%)						
3. Bán nơi khác (%)						
HIỆU QUẢ KINH TẾ						
1. Lãi						
2. Tỷ lệ lãi/chi phí						

Phụ lục 5: Hình ảnh thực hiện các thí nghiệm trong luận án

Thí nghiệm 1: Khảo sát đặc tính, xác định loại than sinh học và tỷ lệ sử dụng phù hợp cho cải tạo đất phèn nhiễm mặn

Thời gian thực hiện: từ tháng 01 đến tháng 4 năm 2022.

Địa điểm nghiên cứu: Trường Đại học Công nghiệp Thành phố Hồ Chí Minh.



Đất phèn nhiễm mặn phơi trong không khí



Than xơ dừa



Than nhãn



Than trấu



Phối trộn than sinh học và đất



Bố trí thí nghiệm trong nhà lưới



Thu mẫu đất sau thí nghiệm



Phơi mẫu đất sau thí nghiệm

Thí nghiệm 2: Ảnh hưởng của than trấu, vôi và phân bò lên các đặc tính hóa học đất phèn nhiễm mặn ở hai chế độ quản lý nước khác nhau ở điều kiện nhà lưới

Thời gian thực hiện: từ tháng 4 đến tháng 7 năm 2022.

Địa điểm nghiên cứu: Trường Đại học Công nghiệp Thành phố Hồ Chí Minh.



Phơi đất phèn nhiễm mặn trong nhà lưới



Than trấu



Phân bò phơi khô tự nhiên



Vôi nông nghiệp (pH = 13)



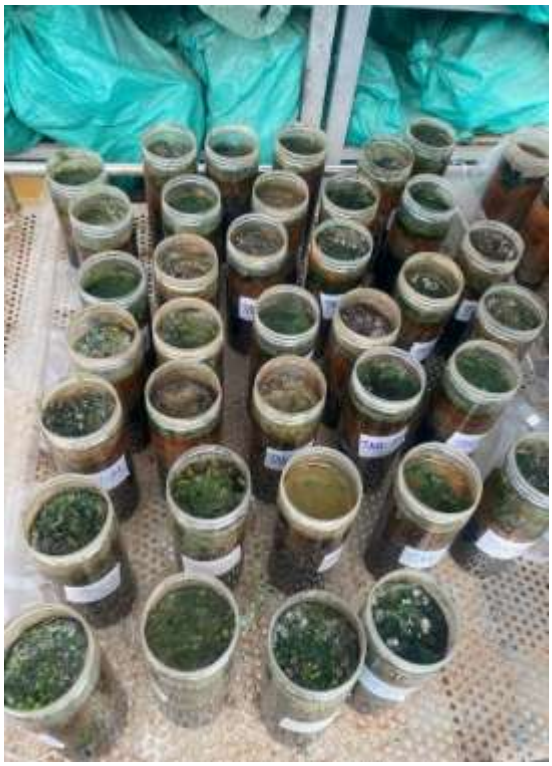
Cân đất và các vật liệu



48 chậu sau khi thiết lập thí nghiệm



Các chậu thí nghiệm ở chế độ nước độ ẩm 60%



Các chậu thí nghiệm ở chế độ nước tưới ngập



Xới mẫu để chuẩn bị thu mẫu đất



Thu mẫu đất bằng khoan tay nhỏ



Phơi mẫu đất sau thí nghiệm trong nhà lưới



Phơi mẫu đất sau thí nghiệm trong nhà lưới

Thí nghiệm 3: Đánh giá hiệu quả của than trấu, vôi và phân bò lên đặc tính đất, sinh trưởng và năng suất lúa tại Cần Giờ (cũ).

Thời gian thực hiện: từ tháng 7 đến tháng 12 năm 2022.

Địa điểm nghiên cứu: Hộ nông dân Dương Văn To (10.638770°N, 106.781880°E), tại xã Bình Khánh, huyện Cần Giờ cũ thuộc thành phố Hồ Chí Minh.



Phối trộn vật liệu vào các ô nghiệm thức



Phối trộn vật liệu vào các ô nghiệm thức



Lúa nước phát triển



Lúa nước phát triển



Lúa nước phát triển



Thu mẫu đất và sinh khối sau khi kết thúc thời gian thí nghiệm



Mẫu sinh khối sau khi kết thúc thời gian thí nghiệm



Mẫu sinh khối rễ và đất được phơi trong nhà lưới sau khi kết thúc thời gian thí nghiệm

Thí nghiệm 4: Đánh giá hiệu quả của than trấu, vôi và phân bò lên đặc tính đất, sinh trưởng và năng suất cải thìa tại Gò Công Đông (cũ).

Thời gian thực hiện: từ tháng 6 đến tháng 9 năm 2023.

Địa điểm nghiên cứu: Hộ nông dân Trần Bình Tân (10.380791°N, 106.773088°E), tại xã Kiểng Phước, huyện Gò Công Đông, tỉnh Tiền Giang (cũ).



Làm đất chuẩn bị bố trí thí nghiệm



Hoàn tất bố trí thí nghiệm



Giống cải thìa



Vật liệu: than trấu, vôi và phân bò



Cải thìa nảy mầm



Cải thìa phát triển



Cải thìa phát triển



Cải thìa phát triển



Mẫu thân lá được phơi trong nhà lưới sau thí nghiệm



Mẫu thân lá được phơi trong nhà lưới sau thí nghiệm



Mẫu rễ được phơi trong nhà lưới sau thí nghiệm



Mẫu đất được phơi trong nhà lưới sau thí nghiệm

LÝ LỊCH TRÍCH NGANG CỦA NGHIÊN CỨU SINH

I. LÝ LỊCH SƠ LƯỢC:

Họ và tên: Nguyễn Tân Xuân Tùng ..... Giới tính: Nam

Ngày, tháng, năm sinh: 09/05/1995 ..... Nơi sinh: Quảng Ngãi

Email: ntxuantung.envi@gmail.com..... Điện thoại: 0356678777

II. QUÁ TRÌNH ĐÀO TẠO:

Bậc đào tạo	Thời gian	Nơi đào tạo	Chuyên ngành	Tên luận văn/luận án tốt nghiệp
Đại học	2013 - 2017	Trường ĐH Nguyễn Tất Thành	Quản lý Tài nguyên và Môi trường	-
Thạc sĩ	2018 - 2020	Trường ĐH Công nghiệp TP. HCM	Quản lý Tài nguyên và Môi trường	Đánh giá chất lượng đất và đề xuất phát triển các loại hình nông nghiệp đô thị tại xã Bạch Đằng, thị xã Tân Uyên, tỉnh Bình Dương
Tiến sĩ	2022 - 2025	Trường ĐH Công nghiệp TP. HCM	Quản lý Tài nguyên và Môi trường	Cải tạo các thành phần hóa học của đất phèn nhiễm mặn bằng vật liệu thân thiện môi trường trong bối cảnh biến đổi khí hậu

III. QUÁ TRÌNH CÔNG TÁC CHUYÊN MÔN:

Thời gian	Nơi công tác	Công việc đảm nhiệm
2017 - 2020	Cơ sở An Phú Đông, Trường Đại học Nguyễn Tất Thành	Chuyên viên phụ trách quản lý cơ sở
2020 - 2022	Khoa Kỹ thuật Thực phẩm và Môi trường, Trường Đại học Nguyễn Tất Thành	Giảng viên
2022 - Nay	Viện Môi trường và Tài nguyên, Đại học Quốc gia Thành phố Hồ Chí Minh	Nghiên cứu viên

TP. Hồ Chí Minh, ngày ... tháng ... năm 2025

Người khai

Nguyễn Tân Xuân Tùng