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

ĐỒNG PHÚ HẢO

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

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

TÓM TẮT LUẬN ÁN TIẾN SĨ

THÀNH PHỐ HỒ CHÍ MINH, NĂM 2025

DANH MỤC CÔNG TRÌNH CÔNG BỐ CỦA TÁC GIẢ

*** Bài báo trong nước:**

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

*** Bài báo quốc tế:**

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

https://doi.org/10.1093/inteam/vjaf024. Xếp hạng Q1 thuộc danh mục Web of Science, Impact factor = 8.4.

*** Báo cáo tại hội thảo:**

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

*** Đề tài Nghiên cứu khoa học:**

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

MỞ ĐẦU

1. Đặt vấn đề

Hai trụ cột quan trọng của sản xuất lúa nước hiện đại là hiệu quả môi trường và kinh tế. Tuy nhiên, hệ thống canh tác hiện nay đối mặt với những thách thức lớn, bao gồm suy thoái chất lượng đất và ô nhiễm kim loại nặng. Các vấn đề này phần nào do việc sử dụng quá mức phân bón hóa học và thuốc bảo vệ thực vật. Những hoá chất này không chỉ gây tổn hại cho đất mà còn làm gia tăng phát thải khí nhà kính như CO_2 và CH_4. Hiện tại, lúa là cây trồng chủ lực, nuôi sống khoảng 50% dân số thế giới. Đặc biệt, canh tác lúa là một trong những nguồn phát thải lớn khí nhà kính. Than sinh học, sản phẩm được tạo ra từ sinh khối hữu cơ, có tiềm năng cải thiện chất lượng đất và nâng cao năng suất cây trồng. Với cấu trúc tơi xốp và khả năng hấp phụ cao, than sinh học giúp giảm tính chua và tăng độ phì nhiêu của đất. Ngoài ra, có nhiều phế phẩm nông nghiệp như rơm và vỏ trấu có thể tái sử dụng để sản xuất than sinh học. Tính bền vững trong nông nghiệp nhấn mạnh đến việc sử dụng hợp lý tài nguyên và bảo vệ môi trường. Việc hạn chế phát thải khí CH_4 và cải thiện tình trạng ô nhiễm đất là rất cần thiết cho sự phát triển bền vững. Đề tài nghiên cứu "Nâng cao hiệu quả môi trường và kinh tế của sản xuất lúa nước bằng than sinh học" được thực hiện với những mục tiêu này.

2. Mục tiêu nghiên cứu

2.1 Mục tiêu tổng quát

Đánh giá hiệu quả tổng hợp của than sinh học từ vỏ trấu và thân cành nhãn trong canh tác lúa nước thông qua các chỉ tiêu về chất lượng đất, giảm phát thải khí nhà kính, hạn chế ô nhiễm kim loại nặng và hiệu quả kinh tế.

2.2 Mục tiêu cụ thể

- Đánh giá hiện trạng chất lượng môi trường đất và hiệu quả kinh tế trong sản xuất lúa nước của một số loại đất chính.
- Khảo sát ảnh hưởng của than sinh học từ phụ phẩm nông nghiệp đến phát thải khí CH_4, chất lượng môi trường đất và năng suất lúa nước trên một số loại đất chính.
- Đánh giá mức độ cải thiện hiệu quả môi trường và kinh tế trong sản xuất lúa nước của than sinh học.
- Đề xuất các giải pháp nâng cao chất lượng môi trường và kinh tế cho sản xuất lúa nước thông qua than sinh học.

3. Đối tượng và phạm vi nghiên cứu

- Không gian nghiên cứu: Đề tài lựa chọn bốn loại đất chính (đất xám, đất phèn, đất mặn, và đất phù sa) theo tiêu chuẩn phân hạng đất của FAO (2006) trên một số cánh đồng trồng lúa tại (huyện Củ Chi cũ), tỉnh Tiền Giang (cũ) và Vĩnh Long. Thời gian thực hiện từ năm 2022 đến năm 2025. Đề tài lựa chọn than trấu và than nhãn trong các thí nghiệm nghiên cứu.

4. Ý nghĩa khoa học và thực tiễn

4.1 Ý nghĩa khoa học

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

4.2 Ý nghĩa thực tiễn

Đề tài cung cấp cơ sở khoa học và thực tiễn cho việc ứng dụng than sinh học từ trấu và thân cành nhãn như một giải pháp cải tạo đất hiệu quả và phù hợp với điều kiện canh tác

lúa nước tại Việt Nam, đặc biệt trên các vùng đất phèn và đất xám kém bền vững.

Thông qua các mô hình thí nghiệm thực địa và nhà lưới, đề tài góp phần xây dựng kịch bản canh tác thích ứng với biến đổi khí hậu, đồng thời chỉ ra hiệu quả kinh tế cao của một số công thức bón than sinh học, đặc biệt trong bối cảnh tích hợp tín chỉ carbon.

5. Tính mới của đề tài

* Đánh giá tích hợp đa chiều về chất lượng đất và kim loại nặng trên nhiều loại đất đặc trưng vùng ĐBSCL

* Ứng dụng so sánh 2 loại than sinh học từ phụ phẩm nông nghiệp bản địa (than trấu và than nhãn) trên nhiều loại đất:

* Phân tích song song giữa mô hình nhà lưới và mô hình thực địa, với kết nối giữa thử nghiệm ngắn hạn và tiềm năng ứng dụng dài hạn:

* Lần đầu tiên chỉ ra tương quan thống kê có ý nghĩa giữa SQI và HPIs trong điều kiện đất lúa ở Việt Nam: Phát hiện rằng nâng cao SQI giúp giảm thiểu tích lũy kim loại nặng trong đất là một cơ sở khoa học quan trọng, làm rõ thêm vai trò cải tạo đất của than sinh học không chỉ về mặt dinh dưỡng mà còn về mặt giảm độc tố.

* Lồng ghép phân tích hiệu quả kinh tế với mô phỏng kịch bản tín chỉ carbon và đề xuất mô hình nông nghiệp giảm phát thải:

* Một điểm mới quan trọng của nghiên cứu này là việc xây dựng và tính toán chỉ số hiệu quả môi trường (Environmental efficiency Index - ENI) và chỉ số hiệu quả kinh tế (Economic efficiency Index - ECI) để đánh giá tổng hợp tác động của từng công thức sử dụng than sinh học theo hai kịch bản tín chỉ carbon.

6. Các giả thuyết khoa học cần kiểm tra

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

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

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

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

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

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

CHƯƠNG 1. TỔNG QUAN VỀ CÁC VẤN ĐỀ NGHIÊN CỨU

1.1 Tổng quan tính bền vững trong sản xuất lúa nước

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

Lúa nước là loại cây lương thực có tên khoa học là *Oryza sativa* với bộ nhiễm sắc thể 2n = 24, đây là loại cây thảo mộc có thể sinh sống và chịu đựng nhiều điều kiện môi trường khác nhau. Đất trồng lúa cần giàu dinh dưỡng, nhiều hữu cơ, tơi xốp, thoáng khí, tầng canh tác dầy để rễ ăn sâu, bám chặt vào đất và huy động nhiều dinh dưỡng nuôi cây. Loại đất thịt hay đất thịt pha sét (pH = 5,5-7,5) là thích hợp đối với cây lúa. Cây lúa cần nhiều loại dưỡng chất để phát triển nhưng có loại dưỡng chất chính cần dùng nhiều là N, P, K. Nhìn chung, cây lúa nước được gieo trồng ở nhiều nơi trên thế giới nhưng thích hợp với điều kiện khí hậu nhiệt đới ẩm gió mùa và cận nhiệt như ở nước ta.

1.1.2 Hiệu quả kinh tế trong sản xuất lúa nước

Hiệu quả kinh tế (*Economic Efficiency* - EE) là thước đo kết quả tổng hợp của nhà sản xuất và bằng với tích số của hiệu quả kỹ thuật (*Technical Efficiency* - TE) và hiệu quả phân bổ (*Alocative Efficiency* - AE) hay EE = TE x AE. Hiệu quả của sản xuất nông nghiệp nói chung và hiệu quả trong sản xuất lúa nói riêng cũng được xem xét trên ba phương diện trên: *hiệu quả kỹ thuật, hiệu quả phân bổ, hiệu quả kinh tế*.

1.1.3 Tính bền vững trong sản xuất lúa nước

Bền vững môi trường trong nông nghiệp là phải khai thác hợp lý, sử dụng tiết kiệm và hiệu quả tài nguyên thiên nhiên, phòng ngừa, ngăn chặn, xử lý và kiểm soát có hiệu quả ô nhiễm môi trường. Bền vững kinh tế trong nông nghiệp là sự phát triển đảm bảo ổn định lâu dài về mặt kinh

tế của nông nghiệp, góp phần tích cực vào phát triển kinh tế của quốc gia, cộng đồng.

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

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

Lúa được trồng ở hơn 100 quốc gia, với Trung Quốc, Ấn Độ, Indonesia, Bangladesh, Việt Nam, và Thái Lan là những nơi sản xuất chính. Lúa là nguồn lương thực quan trọng, cung cấp từ 20% đến 70% năng lượng hàng ngày cho khoảng 50% dân số thế giới. Tại Việt Nam, sản xuất lúa đã góp phần lớn vào việc xóa đói giảm nghèo và đảm bảo an ninh lương thực. Tuy nhiên, diện tích trồng lúa ở nước ta đã giảm từ 7,737 triệu ha năm 2016 xuống còn 7,278 triệu ha năm 2020. Sản lượng lúa cũng sụt giảm, từ 43,16 triệu tấn năm 2016 xuống 42,69 triệu tấn năm 2020. Biến đổi khí hậu đe dọa năng suất lúa, với dự báo rằng nếu nhiệt độ tăng 1°C, năng suất có thể giảm đến 10%. Để đáp ứng nhu cầu thực phẩm đang tăng nhanh, việc nâng cao năng suất trên diện tích hiện có là giải pháp cần thiết, nhưng cũng kèm theo thách thức về môi trường.

1.2.2 Sản xuất lúa nước và phát thải khí hiệu ứng nhà kính

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

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

Để tăng năng suất cây trồng, nông dân thường sử dụng các loại phân hóa học như đạm, lân và kali. Tuy nhiên, việc bón phân vượt mức khuyến nghị có thể dẫn đến ô nhiễm môi trường đất, trong đó phân lân có khả năng làm cho đất chua và chứa kim loại nặng. Các ion dinh dưỡng từ phân lân như H2PO4- và H2PO42- có thể tạo hợp chất khó tiêu trong môi trường chua. Phân đạm là rất quan trọng cho năng suất, nhưng nếu sử dụng liều cao, chỉ khoảng 40-50% lượng phân được cây hấp thu, phần còn lại có thể bị rửa trôi hoặc tồn dư trong đất, gây ô nhiễm nguồn nước và ảnh hưởng sức khỏe người tiêu dùng. Mặc dù phân bón hóa học đóng vai trò quan trọng trong việc tăng năng suất lúa, việc sử dụng không hợp lý đã dẫn đến nhiều vấn đề môi trường.

1.2.4 Sản xuất lúa nước và vấn đề thoái hóa đất

Đất thoái hóa có thể do yếu tố tự nhiên và tác động của con người, trong đó các biện pháp quản lý bảo vệ đất và sản xuất luân canh có thể dẫn đến suy giảm độ phì nhiêu và khả năng sản xuất. Sự thoái hóa này ảnh hưởng đến các đặc tính vật lý, sinh học và hóa học của đất, làm giảm khả năng sản xuất, ví dụ như suy giảm chất hữu cơ và hoạt tính sinh học.

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

1.3.1 Giới thiệu chung về than sinh học

Than sinh học là vật liệu carbon hữu cơ được sản xuất từ phụ phẩm nông nghiệp, sinh khối thực vật hoặc chất thải hữu cơ thông qua quá trình nhiệt phân trong điều kiện thiếu oxy, có tác dụng như chất cải tạo đất giúp tăng lượng mùn, hoạt động vi sinh vật và khả năng giữ nước, dinh dưỡng. Đặc tính của than sinh học phụ thuộc vào loại chất hữu cơ

dùng để nhiệt phân, môi trường nhiệt phân và chất bổ sung trong quá trình sản xuất, trong đó diện tích bề mặt riêng và vi lỗ tăng theo nhiệt độ. Một đặc tính quan trọng của than sinh học là độ bền rất cao trong môi trường đất với thời gian lưu trú lên tới hàng ngàn năm, giúp cố định carbon vào đất và giảm phát thải khí nhà kính.

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

Nhiều nghiên cứu trên thế giới ghi nhận than sinh học có khả năng làm giảm phát thải khí CH4 từ 15,6% đến 54,9% so với không sử dụng, với mức độ giảm tỷ lệ thuận với liều lượng sử dụng. Các lý do làm giảm phát thải CH4 bao gồm làm tăng pH của đất từ đó tăng quá trình ôxi hóa sinh học CH4, tỷ lệ C/N cao và tỷ lệ phần C hữu cơ dễ tiêu thấp của than sinh học. Ảnh hưởng của than sinh học đến phát thải CH4 còn phụ thuộc vào tính chất đất như hàm lượng chất hữu cơ và thành phần cơ giới, trong đó đất có thành phần cơ giới nhẹ (tỷ lệ cát cao) thường có hàm lượng C hữu cơ thấp và có thể phát thải CH4 cao hơn đất có thành phần cơ giới nặng. Các nghiên cứu thêm về than sinh học và phát thải CH4 trên đất trồng lúa là điều cần thiết trong giai đoạn hiện nay.

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

Than sinh học cung cấp các nguyên tố có lợi cho cây trồng, cải thiện hàm lượng dinh dưỡng dễ tiêu, tăng khả năng giữ dinh dưỡng và giữ nước trong đất, đồng thời chứa axit humic với hóc-môn tăng trưởng cây trồng, đặc biệt hiệu quả cao hơn khi bón kết hợp với phân khoáng. Than sinh học có khả năng hấp thu amoni từ dung dịch đất, giúp giảm lượng đạm bị mất do thấm xuống đất và bay hơi amoniac, đồng

thời cải thiện môi trường đất thông qua tăng tổng lượng cation trao đổi, nồng độ K trao đổi và liều lượng P dễ tiêu. Than sinh học có tác dụng làm tăng các chỉ số chất lượng đất như CEC, pH, carbon hữu cơ, N, P và độ xốp đất.

1.4 Các vấn đề sản xuất lúa nước ở Việt nam

1.4.1 Một số loại đất trồng lúa nước ở Việt Nam

Việt Nam, với nền văn minh lúa nước lâu đời, sở hữu hệ thống đất đai đa dạng phản ánh sự khác biệt về điều kiện hình thành và quá trình sử dụng, trong đó các nhóm đất chính đóng vai trò quyết định đến năng suất và phương thức canh tác lúa nước. Đất phù sa được xem là nhóm đất có giá trị nông nghiệp cao nhất với tầng canh tác dày, thành phần cơ giới cân đối, độ phì tự nhiên cao (OM >2,5%, đạm >0,15%), pH trung tính đến hơi chua (5,5-7,0), tập trung chủ yếu tại Đồng bằng sông Hồng và Đồng bằng sông Cửu Long. Đất mặn hình thành ở các vùng duyên hải với nồng độ muối hòa tan cao (ECe >4 dS/m), làm tăng áp suất thẩm thấu và phá vỡ cấu trúc đất, tập trung ở các tỉnh Đồng bằng sông Cửu Long, đòi hỏi hệ thống đê bao ngăn mặn và giống lúa chịu mặn chuyên biệt. Đất xám đã trải qua quá trình rửa trôi mạnh với thành phần cơ giới nhẹ, khả năng giữ nước kém, nghèo chất hữu cơ (<1,5%), pH chua (<5,5) với hàm lượng nhôm di động cao gây độc cho rễ lúa, phân bố chủ yếu ở Đông Nam Bộ và vùng trung du miền núi. Đất phèn là nhóm đất có nhiều yếu tố hạn chế nhất do chứa khoáng pyrite khi oxy hóa tạo axit sunfuric làm pH giảm đột ngột và tạo độc tố Al^{3+}, Fe^{2+} nồng độ cao, tập trung với quy mô lớn tại Đồng bằng sông Cửu Long, đặc biệt ở Đồng Tháp Mười và Tứ giác Long Xuyên.

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

Theo báo cáo của Tổng cục thống kê Việt Nam năm 2020, sản lượng lúa cả nước đạt 42,8 triệu tấn với năng suất 58,7 tạ/ha, trong khi diện tích gieo trồng lúa đạt 7.279 nghìn ha, giảm 190,5 nghìn ha so với năm 2019 do chuyển đổi cơ cấu cây trồng theo hướng nâng cao chất lượng. ĐBSCL là đồng bằng lớn của Việt Nam với diện tích tự nhiên 4.092,2 nghìn ha, trong đó 2.575,2 nghìn ha đất dùng cho sản xuất nông nghiệp chiếm 62,9%, với diện tích gieo trồng lúa luôn đứng đầu cả nước, chiếm 52-54,5% diện tích gieo trồng lúa của cả nước. Nhóm đất phèn phân bố ở vùng Đồng Tháp Mười, Hà Tiên và vùng trũng trung tâm bán đảo Cà Mau với tổng diện tích 1,2 triệu ha chiếm 40% diện tích toàn vùng. Nhóm đất xám phân bố chủ yếu dọc biên giới Campuchia trên các bậc thềm phù sa cổ với diện tích trên 134 nghìn ha chiếm 3,4% diện tích toàn vùng, có tính chất đất nhẹ, tơi xốp và độ phì thấp.

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

Thành phố Hồ Chí Minh có diện tích 2.095 km² với dân số 9,04 triệu người đứng đầu cả nước, trong đó lao động nông nghiệp chiếm 2,2%. Địa hình đồng bằng thấp, bằng phẳng bị chia cắt bởi mạng lưới sông ngòi dày đặc, có xu hướng thấp dần từ tây bắc xuống đông nam. Đất đai gồm 4 nhóm chính: đất phèn (27,5%), đất phù sa (12,6%), đất sám (19,3%) và đất mặn (12,2%). Đất phù sa ít phèn thích hợp trồng lúa năng suất cao, đất phèn trung bình trồng lúa, đất sám trồng cây công nghiệp. Đất nông nghiệp chiếm 31,8% tổng diện tích, chủ yếu là đất trồng lúa và cây hoa màu. Thành phố Hồ Chí Minh có nét tương đồng về đất đai, khí

hậu với ĐBSCL nên nghiên cứu sản xuất lúa tại đây có thể áp dụng cho các tỉnh xung quanh.

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

Sản xuất lúa nước đóng vai trò quan trọng đảm bảo an ninh lương thực quốc gia và tạo nguồn hàng xuất khẩu. Tuy nhiên, việc sản xuất lúa ở Việt Nam nói riêng và cả thế giới nói chung đang gặp các vấn đề về phát thải khí hiệu ứng nhà kính, đặc biệt là khí CH_4 từ đó đẩy nhanh quá trình biến đổi khí hậu, gây ô nhiễm môi trường đất, đất thoái hóa bạc màu và hiệu quả kinh tế của việc canh tác lúa sẽ xuống thấp. Việc hạn chế các ảnh hưởng này và cải thiện năng suất lúa nước là điều cần thiết, từ đó nâng cao tính bền vững môi trường và kinh tế của loại hình sản xuất nông nghiệp này.

CHƯƠNG 2. NỘI DUNG VÀ PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

2.1 Nội dung nghiên cứu

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

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

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

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

2.2 Phương pháp nghiên cứu

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

Khu vực khảo sát: Các vùng trồng lúa tại TP. HCM (Củ Chi, Phú Hòa Đông) và các tỉnh phía Nam (Vĩnh Long, Tiền Giang, Đồng Tháp). Phương pháp điều tra: Thu thập dữ liệu sơ cấp qua phỏng vấn ngẫu nhiên 400 phiếu (mỗi loại đất 100 phiếu) tại 4 khu vực có đất xám, phù sa, phèn và mặn để đánh giá hiện trạng sản xuất, tiềm năng sinh khối và hiệu quả kinh tế. Thu mẫu đất: Trên mỗi loại đất thu 20 mẫu từ 10 ruộng khác nhau (10 mẫu mùa mưa, 10 mẫu mùa khô) theo TCVN 7538, lấy từ 5 điểm chéo góc độ sâu 20 cm, phơi khô và rây qua 2 mm để phân tích hóa học. Địa điểm cụ thể: Đất phù sa tại xã Mỹ Thuận, Vĩnh Long

(Fluvisols); đất mặn tại xã Gia Thuận, Đồng Tháp (*Salic Fluvisols)*; đất xám tại xã Củ Chi, TP. HCM (*Gleyic Acrisols*); đất phèn tại xã Phú Hòa Đông, TP. HCM *(Thionic Fluvisols*) theo phân loại WRB.

Tính toán các chỉ số và phân tích thống kê

* 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 [110] sử dụng cách tính như (Phương trình 1).

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

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.

$$s_i = \frac{x_i - x_{min}}{x_{max} - x_{min}} \qquad \text{(Phương trình 2)}$$

Với các thông số trong nhóm "ít tốt hơn", s_i được xác định theo phương trình 3

$$s_i = \frac{x_{max} - x_i}{x_{max} - x_{min}} \qquad \text{(Phương trình 3)}$$

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

Chỉ số ô nhiễm kim loại nặng trong đất (HPIs) và nhiễm kim loại nặng trong hạt (HPIg) được tính toán bằng phương pháp của [111] được thể hiện trong phương trình sau (phương trình 4):

$$\text{HPI} = \frac{\sum_{i=1}^{n} Q_i W_i}{\sum_{i=1}^{n} W_i} \qquad \text{(Phương trình 4)}$$

* 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. Các nhân tố có giá trị riêng lớn hơn 1 được giữ lại để ước tính trọng số của các thông số đất có tải lượng cao (> 0,5) với hệ số tương ứng.

* Phân tích phương sai và tương quan

Các số liệu được xử lý thống kê suy luận và mô tả (tùy theo từng trường hợp cụ thể). Phân tích tương quan được dùng để khảo sát mối liên hệ giữa các chỉ số và thông số đất nghiên cứu. Phân tích phương sai (ANOVA) hai chiều được dùng để đánh giá các ảnh hưởng đơn lẻ hoặc tương tác giữa các loại đất và mùa đến các thông số đất. Phân tích tương quan đa biến giữa chỉ số chất lượng đất (SQI) với các chỉ số kim loại nặng trong đất (HPIs) được áp dụng để xác định mối tương quan giữa 2 chỉ số này của các loại đất khác nhau.

* Hiệu quả kinh tế

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

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

Không gian và vật liệu: Thí nghiệm nhà lưới tại Trường ĐH Công nghiệp TP.HCM sử dụng 4 loại đất (phù sa, mặn, xám, phèn) thu vụ Đông Xuân theo TCVN 7538, mỗi loại 100 kg từ 5 ruộng (5 điểm chéo góc/ruộng, sâu 20 cm), phơi khô và rây 2 mm. Than sinh học từ trấu và thân cành nhãn được giã nhỏ qua rây 5 mm. Giống lúa OM545. Thiết kế thí nghiệm: Bố trí 2 yếu tố ngẫu nhiên hoàn toàn, 3 lần lặp: yếu tố 1 là 4 loại đất, yếu tố 2 là than sinh học (đối chứng, than trấu, than nhãn) với 12 công thức và 36 chậu (27×16 cm, chứa 4 kg đất). Than áp dụng 10 tấn/ha (25g/chậu), trộn đều một lần, trồng 4 tháng (10/2023-01/2024). Quan trắc: Đất sau thí nghiệm thu 0,5 kg/chậu phơi khô rây 2 mm phân tích hóa học. Rễ tầng 0-10 cm rửa sạch, cắt 2 cm, cân ướt và khô. Rơm tách khỏi hạt, cắt đoạn 10 cm, cân tươi và khô. Năng suất hạt đo khi độ ẩm 14%. Phát thải CH4: Đo bằng buồng kín 7-10 ngày/lần, hút khí bằng xilanh tại 0, 10, 20, 40 phút, lưu trong ống thủy tinh 20 ml đã hút chân không, đo vào lúc sáng 8-11h và phân tích bằng máy sắc ký khí GC-SRI 8610C.

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

Không gian nghiên cứu: Thí nghiệm đất phèn tại xã Tân Thành Đông, Củ Chi (Thionic Fluvisols) và đất xám tại xã Thái Mỹ, Củ Chi (Gleyic Acrisols), cả hai có lịch sử trồng lúa >20 năm, khí hậu nhiệt đới gió mùa (mưa 1800-2000 mm/năm, nhiệt độ 27-28°C). Đặc điểm đất: Đất phèn có cơ giới nặng, chua, giàu OM và N, trung bình K, nghèo P, chứa

độc tố sulfate-Fe-Al, độ phì trung bình thấp, luân canh 2 vụ lúa/năm. Đất xám có cơ giới nhẹ, chua, dinh dưỡng trung bình thấp không cân đối, giàu OM-N nhưng nghèo P-K, luân canh 2 vụ lúa và 1 vụ bắp. Vật liệu: Than trấu và than nhãn như ND2. Giống lúa: Đài Thơm 8 cho đất phèn (lá cứng xanh, kháng bệnh trung bình); OM5451 cho đất xám (chịu khắc nghiệt, kháng sâu bệnh). Thiết kế: Khối ngẫu nhiên đủ, 5 công thức (CT1: đối chứng; CT2-CT3: than trấu 12-24 kg; CT4-CT5: than nhãn 12-24 kg tương đương 10-20 tấn/ha), 3 lần lặp, 15 ô 12m² (4×3m), mương ngăn 1m giữa các ô. Than áp dụng một lần đầu vụ, rải đều và vùi 0-10 cm. Phân bón: N=80, P_2O_5=40, K_2O=40 kg/ha/vụ. Quan trắc: Năng suất đo qua 5 khung 1m²/ô, hạt phơi khô 14% tính tạ/ha; rơm cân tươi và khô; rễ thu 2 điểm 20×20 cm sâu 15 cm/ô. Đất: 15 mẫu sau TN và 3 mẫu trước TN (5 điểm chéo góc) phân tích như ND1. CH_4 đo buồng kín 1 lần/tuần (~20 lần/2 vụ), hút khí 0-10-20-40 phút, lưu ống 20 ml, đo sáng 8-11h bằng GC-SRI 8610C.

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

Dựa trên kết quả của nội dung 2 và 3 để đánh giá hiệu quả kinh tế và môi trường, từ đó đánh giá hiệu quả của các mô hình thực nghiệm. Hiệu quả kinh tế sản xuất lúa nước thực địa = Tổng sản phẩm - Tổng chi phí, trong đó tổng sản phẩm từ bán hạt và rơm; tổng chi phí gồm vật chất và lao động (giống, phân bón, thuốc BVTV, công làm đất, gieo sạ, chăm sóc, thu hoạch) như nội dung 1. Do có thêm giá trị giảm phát thải CH_4 và tích lũy carbon theo nguyên tắc tín chỉ carbon, hiệu quả kinh tế được đánh giá qua 2 kịch bản:

Kịch bản 1 (KB1): Tính thu nhập từ bán hạt và rơm theo phương pháp truyền thống như ND1.

Kịch bản 2 (KB2): Bổ sung giá trị tín chỉ carbon tích lũy trong đất và carbon quy đổi từ lượng CH_4 giảm phát thải. Lượng C tích lũy/ha trong tầng đất 15 cm được tính theo Phương trình 5.

$$CT = BD * OC * D * 100$$

(Phương trình 5)

Tính tín chỉ carbon được tính bằng CO_2 tương đương theo phương trình 6

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

(Phương trình 6)

Tín chỉ carbon thu được từ giảm phát thải CH_4 được tính theo phương trình 7.

$$Tín\ chỉ\ carbon\ từ\ CH_4 = (CH_{4_{ĐC}} - CH_{4_{TSH}}) * 25$$

(Phương trình 7)

Chỉ số hiệu quả môi trường (Environmental Efficiency Index - ENI) được tính bằng công thức:

$$ENI = \frac{ENI_{SQI} + ENI_{GQI} + ENI_{HPIs} + ENI_{HPIg} + EMI_{CH4}}{5}$$

(Phương trình 8)

Trong đo các ENI được tính từ công thức:

$$ENI_{thành\ phần} = \frac{x_i - x_{đc}}{x_{đc}}\ x\ 100$$

(Phương trình 9)

Chỉ chỉ số hiệu quả kinh tế (Economic Efficiency Index – ENI) được tính bằng công thức:

$$ECI = \frac{x_{i\ chuẩn} - x_{đc\ chuẩn}}{x_{đc\ chuẩn}}\ x\ 100$$

(Phương trình 10)

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

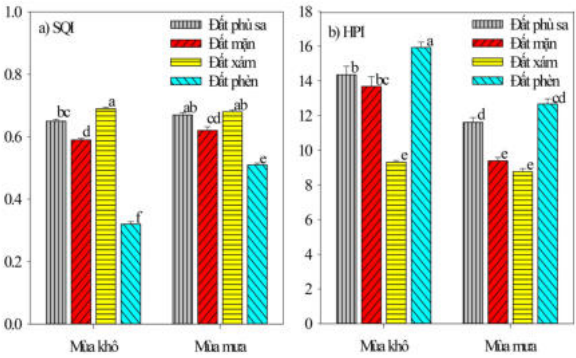
$$x_{chuẩn} = \frac{x_i - x_{min}}{x_{max} - x_{min}} \ x\ 100 \qquad \text{(Phương trình 11)}$$

CHƯƠNG 3. KẾT QUẢ NGHIÊN CỨU VÀ THẢO LUẬN

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

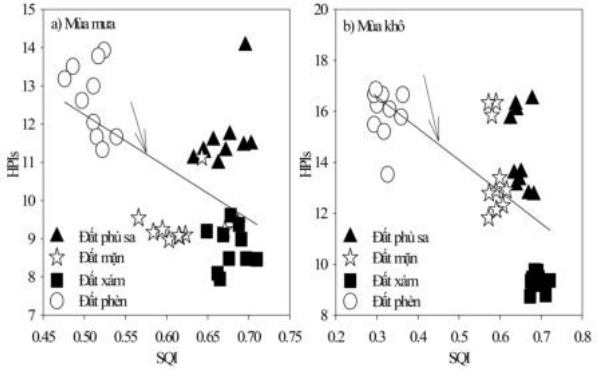
3.1.1 Chất lượng môi trường đất của các loại đất đặc trưng canh tác lúa nước trong mùa khô và mùa mưa

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



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

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



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

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

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

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

3.1.3 Một số thảo luận

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

Đất phù sa (Vĩnh Long): Giàu dinh dưỡng (NH_4^+, K^+), CEC cao hỗ trợ trao đổi dinh dưỡng tốt, kim loại thấp do bồi tụ và rửa trôi tự nhiên, có tiềm năng sản xuất lúa tốt nhất với đặc tính ổn định và cân bằng. Đất mặn (Tiền Giang): Độ mặn trung bình, Na^+ và Cl^- cao cản trở hấp thụ nước-dinh dưỡng, chất hữu cơ thấp, thiếu vi lượng, pH 5,42 (acid nhẹ-trung tính), kim loại (Ni, Zn) tích tụ cao hơn đất phù sa, cần cải tạo bằng rửa mặn, bón hữu cơ và kiểm soát nước. Đất xám (Củ Chi): Nghèo dinh dưỡng, CEC thấp (8,55 cmol(+)/kg), kim loại không đáng kể nhưng dễ rửa trôi, tuy nhiên SQI khá cao do hàm lượng độc tố (Al, Fe, Mn) thấp. Đất phèn (Củ Chi): pH thấp nhất (4,63), kim loại độc (Fe, Mn, Al) cao, chất hữu cơ và dinh dưỡng thấp, CEC bị hạn chế, SQI thấp nhất, cần cải tạo liên tục bằng bón vôi, kiểm soát nước và phân hữu cơ. Mối quan hệ SQI-HPIs: Khi SQI cao thì HPIs thấp do đất chất lượng cao có pH ổn định, giàu hữu cơ, CEC lớn và độc tố thấp, làm giảm tính di động kim loại nặng qua hấp phụ, tạo phức, trao đổi ion. Tương quan này mạnh hơn ở mùa khô do ít bị rửa trôi/pha loãng, phản ánh chính xác hơn đặc tính nội tại của đất.

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

Đất phèn (Củ Chi): Vụ Đông Xuân lãi 13,16 triệu/ha (41,5%), cao hơn 75% vụ Hè Thu nhờ năng suất và giá tốt. Chi phí vôi >25%, nên phối hợp than sinh học để giảm chi phí và độc tính Al^{3+}. Có thể áp dụng tưới luân phiên, cơ giới hóa và thuốc sinh học để tăng hiệu quả. Đất phù sa (Vĩnh Long): Lãi vụ Đông Xuân 21,24 triệu/ha, cao hơn vụ Hè Thu. Đất màu mỡ, ít chua mặn, chi phí thấp. Nên tận

dụng rơm rạ làm than sinh học, ủ vi sinh, compost để tăng giá trị và cải thiện đất. Đất mặn (Tiền Giang): Vụ Hè Thu hiệu quả cao hơn do chi phí thấp; đầu tư thêm phân bón, lao động cho vụ Đông Xuân không tăng lợi nhuận tương ứng. Đất xám (Củ Chi): Lãi vụ Đông Xuân 24,78 triệu/ha, cao hơn vụ Hè Thu. Đất pH thấp, nghèo dinh dưỡng, cần kết hợp phân hữu cơ hoặc than sinh học để giảm chi phí vô cơ và cải thiện đất.

3.1.4 Tiểu kết nội dung 1

Đặc điểm đất: Đất phù sa cân bằng thích hợp đa dạng cây trồng; đất mặn giàu dinh dưỡng vô cơ nhưng mặn cao; đất xám nghèo K^+, C, Zn nhưng thấp độc tố Al-Fe; đất phèn pH thấp, chứa Al^{3+}-Fe độc cao. SQI đất phù sa và xám tương đương nhau cao, đất phèn thấp nhất. HPIs đất phèn cao nhất (ô nhiễm nghiêm trọng), đất phù sa-mặn trung bình, đất xám thấp nhất. Hai chỉ số SQI-HPIs tương quan nghịch ở cả hai mùa, nâng SQI vừa cải thiện dinh dưỡng vừa giảm ô nhiễm kim loại. Hiệu quả kinh tế: Đất mặn cao nhất cả hai mùa, đặc biệt vụ Đông Xuân (43,02 triệu/ha); đất phù sa ổn định cao; đất xám cải thiện rõ vụ Đông Xuân; đất phèn thấp nhất (nhất là vụ Hè Thu). Vụ Đông Xuân cho hiệu quả cao hơn vụ Hè Thu. Kết quả khẳng định vai trò cải tạo đất và kỹ thuật canh tác trong nâng cao hiệu quả-tính bền vững sản xuất lúa.

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

3.2.2 Tính chất của các loại đất bị ảnh hưởng bởi than sinh học sau thí nghiệm

Bảng 3.6 Tính chất của các loại đất sau thí nghiệm bị ảnh hưởng bởi các loại than sinh học sau thí nghiệm

Loại đất	Công thức	pH	EC (dS/m)	CEC (cmol(+)/kg)	NH_4^+ (mg/kg)	P dễ tiêu (mg/kg)	OC (%)
Phù sa	CT1	5,39^{f}± 0,04	0,79^{b}± 0,10	12,55^{abc}± 0,32	199,18^{de}± 9,77	45,58^{efg} ± 1,22	4,73^{ab} ± 0,27
	CT2	5,46^{ef}± 0,07	0,71^{b}± 0,38	12,95^{abc}± 9,10	187,25^{de}± 2,86	55,06^{bc}± 0,08	5,24^{ab} ± 0,07
	CT3	5,79^{cd}± 0,03	0,73^{b}± 0,10	11,79^{cd}± 0,78	190,11^{e}± 2,43	55,56^{b}± 0,84	5,33^{a}± 0,10
Mặn	CT1	6,10^{ab}± 0,09	1,38^{a}± 0,16	10,36^{def}± 0,76	280,52^{a}± 11,31	43,29^{fg}± 1,55	3,71^{e}± 0,09
	CT2	6,20^{a}± 0,11	1,36^{a}± 0,17	10,46^{de}± 0,59	285,54^{a}± 7,75	48,26^{def} ± 0,85	4,27^{cd} ± 0,26
	CT3	5,98^{bc}± 0,06	1,29^{a}± 0,15	13,46^{ab}± 0,19	286,11^{a}± 3,27	48,83^{cdef} ± 4,34	4,04^{de} ± 0,14
Xám	CT1	5,66^{de}± 0,04	0,78^{b}± 0,05	8,84^{f}± 0,21	240,95^{b}± 21,75	51,31^{bcde}± 1,72	2,29^{f}± 0,09
	CT2	6,10^{ab}±0,06	0,67^{b}±0,01	10,42^{de}±0,23	212,83^{cde}±3,86	62,97^{bcd} ± 2,41	2,61^{f}± 0,17
	CT3	6,06^{ab}± 0,06	0,67^{b}± 0,08	10,17^{ef}± 0,71	231,77^{bc}± 8,86	54,22^{a}± 1,16	2,32^{f}± 0,10
Phèn	CT1	4,86^{g}± 0,04	1,24^{a}± 0,08	12,47^{abc}± 0,70	233,63^{bd}± 5,04	39,41^{g}± 2,37	4,83^{ab} ± 0,09
	CT2	5,03^{g}± 0,08	1,22^{a}± 0,05	13,68^{a}± 0,25	193,09^{de}± 4,23	51,01^{bcde}± 2,31	4,79^{abc} ± 0,32
	CT3	4,92^{g}± 0,05	1,24^{a}± 0,14	11,98^{bc}± 0,54	217,25^{bcd}± 9,45	49,04^{cdef} ± 1,27	4,87^{ab} ± 0,29

Bảng 3.7 Tính chất của các loại đất sau thí nghiệm bị ảnh hưởng bởi các loại than sinh học (tt)

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

Bảng 3.8 Hàm lượng một số kim loại trao đổi trong các loại đất sau thí nghiệm bị ảnh hưởng bởi các loại than sinh học

Loại đất	Công thức	$Ca_{TrĐ}$	$Mg_{TrĐ}$	$Al_{TrĐ}$	$Fe_{TrĐ}$	$Mn_{TrĐ}$
Phù sa	CT1	645,47^{c}± 19,85	142,29^{cd}± 2,63	79,77^{e}± 0,77	30,43^{d}± 2,22	16,18^{cd}± 0,46
	CT2	663,99^{c}± 15,03	170,29^{c}± 7,02	69,85^{f}± 2,51	31,07^{de}± 1,37	14,66^{cd}± 0,73
	CT3	675,78^{c}± 24,56	162,66^{c}± 3,90	75,68^{ef}± 1,55	31,83^{de}± 0,42	13,62^{d}± 1,08
Mặn	CT1	491,69^{d}± 14,17	93,49^{a}± 2,69	107,20^{c}± 4,12	51,96^{c}± 1,20	37,43^{a}± 1,14
	CT2	504,47^{d}± 27,54	106,31^{a}± 6,09	98,85^{d}± 2,36	50,43^{c}± 0,93	37,09^{a}± 0,84
	CT3	522,52^{d}± 12,02	105,32^{a}± 6,01	99,68^{cd}± 4,54	51,65^{c}± 0,85	36,13^{a}± 1,62
Xám	CT1	223,64^{e}± 9,50	712,66^{e}± 18,15	52,94^{g}± 1,90	26,73^{def}± 0,72	20,05^{b}± 0,52
	CT2	225,15^{e}± 5,27	716,02^{de}± 10,51	50,61^{h}± 1,07	24,86^{ef}± 0,23	19,84^{b}± 1,07
	CT3	228,28^{e}± 16,14	690,92^{de}± 46,60	43,92^{gh}± 2,01	23,08^{f}± 1,10	18,00^{bc}± 0,43
Phèn	CT1	690,08^{c}± 1,86	270,55^{b}± 14,54	193,75^{a}± 2,92	89,83^{a}± 3,29	35,86^{a}± 0,70
	CT2	750,19^{b}± 27,53	275,56^{b}± 7,16	171,74^{b}± 2,95	80,23^{b}± 2,91	34,99^{a}± 1,90
	CT3	819,98^{a}± 38,36	268,88^{b}± 5,49	173,52^{b}± 1,73	85,59^{ab}± 4,96	34,68^{a}± 2,06

Bảng 3.9 Thành phần của một số kim loại nặng trao đổi của các loại đất sau thí nghiệm bị ảnh hưởng bởi các loại than sinh học sau thí nghiệm

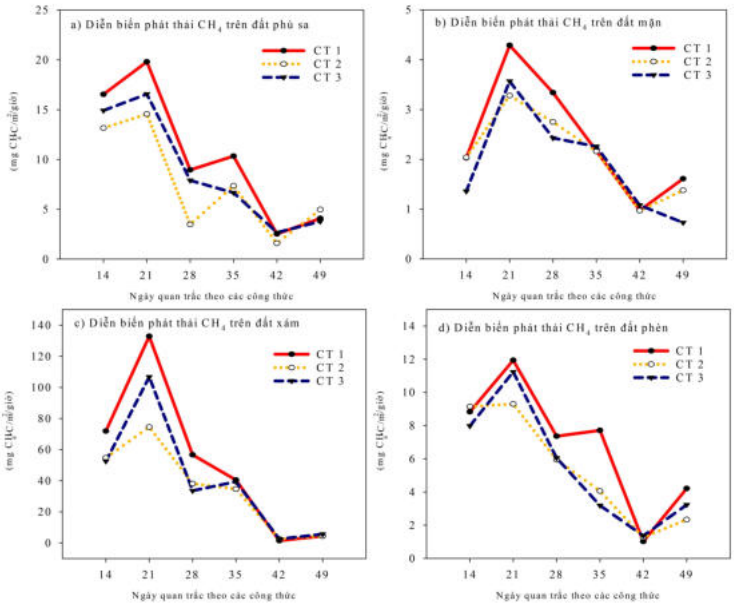
Loại đất	Công thức	$Cd_{TrĐ}$	$Cu_{TrĐ}$	$Pb_{TrĐ}$	$Co_{TrĐ}$	$Ni_{TrĐ}$	$Zn_{TrĐ}$
Phù sa	CT1	$0,30^{bcd}\pm 0,03$	$12,86^{c}\pm 0,85$	$0,38^{b}\pm 0,04$	$19,60^{d}\pm 0,40$	$1,93^{a}\pm 0,08$	$4,42^{c}\pm 0,18$
	CT2	$0,31^{bcd}\pm 0,01$	$10,80^{de}\pm 0,63$	$0,28^{c}\pm 0,02$	$18,32^{d}\pm 0,52$	$1,82^{ab}\pm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

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

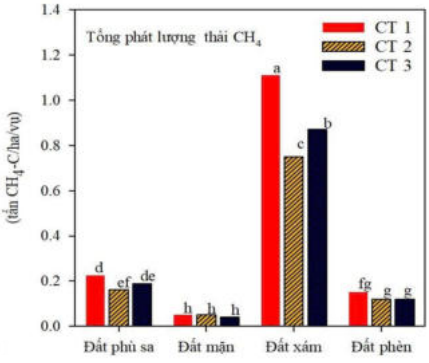
Bảng 3.10 Sinh trưởng, năng suất lúa (kg/m^2) trên các loại đất bị ảnh hưởng bởi than sinh học

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

3.2.4 Ảnh hưởng của than sinh học đến phát thải CH_4



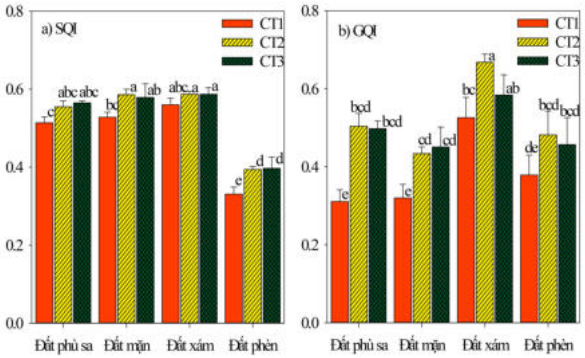
Hình 3.3 Diễn biến phát thải CH_4 của thí nghiệm trồng lúa nước trên đất phù sa (a), đất mặn (b), đất xám (c) và đất phèn (d) bị ảnh hưởng bởi than sinh học



Hình 3.4 Tổ iệm trồng lúa nước trên đất phù sa, đất mặn, đất xám và đất phèn bị ảnh hưởng bởi than sinh học

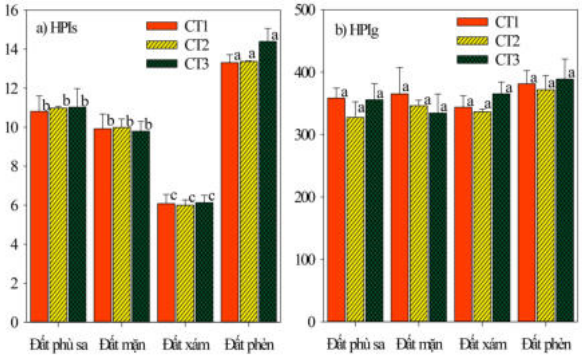
3.2.5 Các chỉ số sau thí nghiệm

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



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

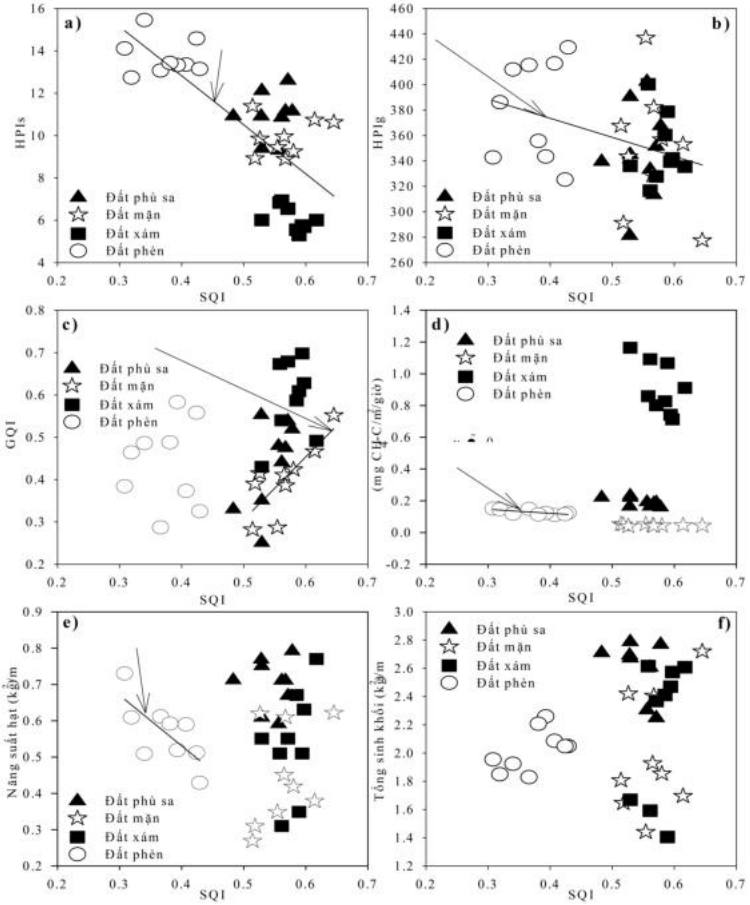
3.2.5.2 Chỉ số ô nhiễm kim loại nặng trong đất và nhiễm kim loại nặng trong hạt



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

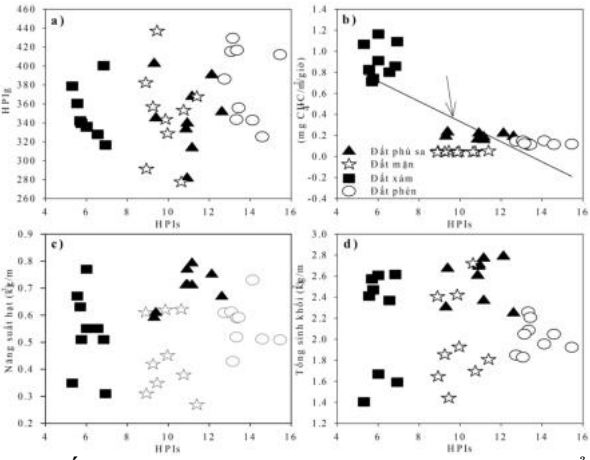
3.2.6 Các mối tương quan

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



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

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



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

3.2.7 Một số thảo luận

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

Than sinh học (than trấu và than nhãn) có độ kiềm cao do giàu Ca^{2+}, K^{+}, Mg^{2+} nên trung hòa axit khi bón vào đất, nâng pH (hiệu ứng vôi hóa), tăng khả năng đệm axit và giảm độ chua trao đổi, đặc biệt rõ trên đất phèn và đất xám.Than vừa giải phóng P nội tại vừa tăng pH làm tăng P dễ tiêu, thúc đẩy hòa tan apatit, hiệu quả cao ở đất phèn-xám có P bị cố định do pH thấp.Than trấu giàu K giải phóng K vào dung dịch đất, cải thiện K trao đổi đáng kể trên đất xám (CEC thấp, giữ K kém), đồng thời tăng CEC giúp đất giữ dinh dưỡng và ổn định pH tốt hơn. Than khống

chế Al^{3+} và Fe^{3+} độc qua hai cơ chế: (i) tăng pH làm kết tủa hydroxide Al-Fe, (ii) hấp phụ trực tiếp lên bề mặt carbon xốp, giảm mạnh Al-Fe trao đổi trong đất phèn-xám. Kết quả: SQI các loại đất tăng khi áp dụng than sinh học, cao nhất ở đất phèn, tiếp theo đất xám, sau đó đất mặn và phù sa.

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

Than sinh học từ nhãn và trấu giúp giữ ẩm, cân bằng dinh dưỡng (N, P, K), tăng tích lũy protein và tinh bột, qua đó nâng cao chất lượng hạt. Đồng thời, nhờ bề mặt xốp và nhóm chức axit hữu cơ, than sinh học hấp phụ mạnh Zn^{2+}, Co^{2+}, Cu^{2+}, làm giảm hàm lượng trao đổi của chúng trong đất phèn và xám. Dù chỉ số ô nhiễm kim loại (HPIs, HPIg) không khác biệt đáng kể, chúng có xu hướng giảm khi SQI tăng, cho thấy khả năng hấp phụ và hạn chế tích tụ kim loại nặng của than sinh học.

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

Bổ sung than sinh học (trấu, nhãn) làm thay đổi điều kiện đất, giảm phát thải CH_4 bằng cách cải thiện pH và tăng độ thoáng khí. Hiệu quả giảm phát thải cao nhất ở đất xám, tiếp đến là đất phèn và mặn; thấp hơn ở hai loại đất sau do tồn tại ion độc cản trở vi sinh vật hiếu khí. Trong đất phèn, than trấu giúp giảm CH_4 nhờ tăng thoáng khí và ức chế vi khuẩn methanogen, còn than nhãn dù hấp phụ hữu cơ kém hơn nhưng vẫn hạn chế chất nền phân giải yếm khí và cải thiện thoát nước, góp phần giảm phát thải CH_4.

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

Than sinh học (trấu, nhãn) cải thiện tính chất hóa học đất, đặc biệt trên đất phèn, giúp cây lúa sinh trưởng và cho năng suất cao hơn. Việc bổ sung than làm tăng tổng sinh khối và hiệu quả rõ nhất ở đất phèn và đất xám. Sự cải thiện pH giúp giảm độc tính Al, Fe và nâng cao dinh dưỡng, góp phần tăng năng suất lúa.

3.2.8 Tiểu kết nội dung 2

Nghiên cứu chỉ ra rằng các công thức thí nghiệm khác nhau ảnh hưởng đáng kể đến tính chất hóa học, sinh trưởng và năng suất lúa, cũng như các chỉ số môi trường liên quan. Các công thức sử dụng than sinh học làm tăng pH và giảm độ chua của đất, đồng thời cải thiện hàm lượng P dễ tiêu và K trao đổi. Giá trị CEC tăng mạnh, đặc biệt trên đất xám, trong khi hàm lượng Al và Fe trao đổi giảm xuống trên tất cả các loại đất. Sử dụng than sinh học cũng làm tăng chỉ số chất lượng đất (SQI) và chỉ số chất lượng hạt mà không phân biệt giữa các loại đất. Than sinh học không ảnh hưởng đến chỉ số ô nhiễm kim loại nặng trong đất và hạt, nhưng làm giảm hàm lượng Zn, Co và Cu trao đổi trong đất. Cuối cùng, than sinh học giảm phát thải CH4 từ sản xuất lúa và tăng tổng sinh khối cấy lúa, hiệu quả nhất trên đất xám và đất phèn.

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

3.3.2 Ảnh hưởng của than sinh học đến chất lượng đất

3.3.2.1 Thí nghiệm trên đất phèn

Bảng 3.12 Tính chất của đất phèn bị ảnh hưởng bởi than sinh học sau thí nghiệm

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

Vụ 2					
pH	5,57^{a}±0,19	5,75^{a}±0,18	5,98^{a}±0,08	5,89^{a}±0,13	5,84^{a}±0,13
EC (dS/m)	0,42^{a}±0,05	0,33^{ab}±0,02	0,28^{b}±0,02	0,28^{b}±0,01	0,27^{b}±0,01
CEC (cmol(+)/kg)	8,70^{a}±0,26	9,37^{a}±0,06	9,32^{a}±0,57	9,22^{a}±0,18	8,86^{a}±0,13
NH_4^+ (mg/kg)	125,64^{c}±2,64	140,15^{ab}±6,28	150,39^{a}±4,17	127,45^{bc}±2,31	128,36^{bc}±3,55
P dễ tiêu (mg/kg)	7,56^{a}±0,49	8,53^{a}±0,47	8,55^{a}±0,15	8,24^{a}±0,26	8,34^{a}±0,23
OC (%)	5,34^{c}±0,19	5,65^{bc}±0,21	6,17^{ab}±0,11	6,12^{ab}±0,20	6,38^{a}±0,07
Cl^- (g/kg)	1,31^{a}±0,02	1,35^{a}±0,08	1,25^{a}±0,01	1,25^{a}±0,01	1,27^{a}±0,01
SO_4^{2-} (g/kg)	3,85^{a}±0,20	3,82^{a}±0,25	3,75^{a}±0,29	3,89^{a}±0,40	3,36^{a}±0,19
Độ $chua_{TrĐ}$ (cmol(+)/kg)	5,03^{a}±0,16	4,87^{a}±0,05	4,53^{a}±0,48	4,58^{a}±0,06	4,08^{a}±0,16
$H^+_{TrĐ}$ cmol(+)/kg	1,73^{b}±0,18	2,11^{a}±0,13	1,70^{b}±0,06	1,82^{ab}±0,03	1,78^{ab}±0,12

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

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

$Fe_{TrĐ}$	$50,65^{a}\pm3,56$	$38,32^{ab}\pm2,19$	$33,64^{ab}\pm10,08$	$32,69^{b}\pm1,98$	$24,68^{b}\pm1,66$
$Mn_{TrĐ}$	$26,54^{a}\pm0,58$	$26,52^{a}\pm0,44$	$26,43^{ab}\pm0,15$	$25,50^{b}\pm0,23$	$24,79^{c}\pm0,69$
$Cd_{TrĐ}$	$0,24^{a}\pm0,00$	$0,24^{a}\pm0,00$	$0,24^{a}\pm0,00$	$0,24^{a}\pm0,00$	$0,23^{a}\pm0,01$
$Cu_{TrĐ}$	$19,78^{a}\pm0,27$	$17,93^{ab}\pm0,17$	$17,51^{ab}\pm0,54$	$18,92^{b}\pm0,22$	$18,49^{b}\pm0,41$
$Pb_{TrĐ}$	$1,60^{a}\pm0,08$	$1,52^{ab}\pm0,08$	$1,37^{ab}\pm0,03$	$1,33^{ab}\pm0,07$	$1,29^{b}\pm0,04$
$Co_{TrĐ}$	$26,53^{a}\pm0,17$	$26,72^{a}\pm0,04$	$26,82^{a}\pm0,05$	$27,10^{a}\pm0,20$	$26,11^{a}\pm0,74$
$Ni_{TrĐ}$	$1,87^{a}\pm0,04$	$1,73^{ab}\pm0,05$	$1,40^{cd}\pm0,05$	$1,59^{bc}\pm0,05$	$1,36^{d}\pm0,01$
$Zn_{TrĐ}$	$2,62^{a}\pm0,12$	$2,43^{a}\pm0,13$	$1,94^{bc}\pm0,05$	$2,19^{ab}\pm0,12$	$1,71^{c}\pm0,07$

3.3.2.2 Thí nghiệm trên đất xám

Bảng 3.14 Tính chất của đất xám bị ảnh hưởng bởi than sinh học sau thí nghiệm

Các chỉ tiêu	**CT1**	**CT2**	**CT3**	**CT4**	**CT5**
Vụ 1					
pH	$5,78^{b}\pm0,06$	$6,11^{ab}\pm0,06$	$6,33^{a}\pm0,04$	$6,06^{ab}\pm0,08$	$6,17^{a}\pm0,13$
EC (dS/m)	$0,16^{a}\pm0,02$	$0,16^{ab}\pm0,00$	$0,13^{b}\pm0,01$	$0,13^{b}\pm0,01$	$0,16^{a}\pm0,01$
CEC (cmol(+)/kg)	$6,56^{b}\pm0,30$	$7,68^{ab}\pm0,47$	$8,23^{a}\pm0,18$	$6,73^{ab}\pm0,48$	$7,07^{ab}\pm0,09$
NH_4^+ (mg/kg)	$44,33^{a}\pm2,28$	$31,20^{b}\pm1,65$	$18,47^{c}\pm0,46$	$29,68^{b}\pm0,64$	$33,61\pm1,80$
P dễ tiêu (mg/kg)	$21,28^{b}\pm0,64$	$22,31^{b}\pm0,19$	$25,85^{a}\pm0,85$	$23,39^{ab}\pm1,18$	$23,10^{ab}\pm0,52$
OC (%)	$1,52^{b}\pm0,05$	$1,79^{a}\pm0,03$	$1,83^{a}\pm0,06$	$1,80^{a}\pm0,03$	$1,84^{a}\pm0,09$
Cl^- (g/kg)	$0,66^{a}\pm0,05$	$0,69^{a}\pm0,04$	$0,71^{a}\pm0,07$	$0,74^{a}\pm0,05$	$0,66^{a}\pm0,03$
SO_4^{2-} (g/kg)	$0,37^{a}\pm0,01$	$0,32^{a}\pm0,03$	$0,32^{a}\pm0,05$	$0,35^{a}\pm0,05$	$0,38^{a}\pm0,02$

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

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

Các chỉ tiêu	**CT1**	**CT2**	**CT3**	**CT4**	**CT5**
Vụ 1					
$K_{TrĐ}$	510,59^{b}± 5,74	627,86^{ab}± 27,82	705,12^{a}± 45,27	536,26^{b}± 23,60	538,31^{b}± 9,95
$Na_{TrĐ}$	324,91^{a}± 35,72	301,79^{a}± 20,38	298,44^{a}± 7,48	328,61^{a}± 17,07	276,61^{a}± 6,45
$Ca_{TrĐ}$	168,09^{b}± 3,44	187,22^{a}± 5,88	191,71^{a}± 2,43	187,72^{a}± 3,67	187,22^{a}± 2,22
$Mg_{TrĐ}$	79,77^{a}± 2,36	83,41^{a}± 1,84	83,78^{a}± 3,03	80,65^{a}± 1,27	79,36^{a}± 2,68

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

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

3.3.3.1 Thí nghiệm trên đất phèn

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

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

3.3.3.2 Thí nghiệm trên đất xám

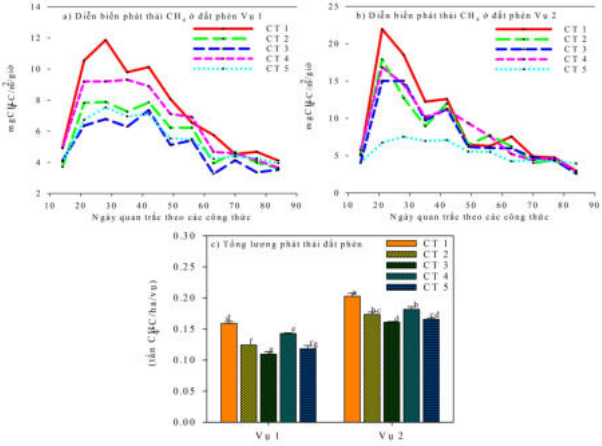
Bảng 3.17 Sinh trưởng và năng suất lúa (kg/m^2) trên đất xám bị ảnh hưởng bởi than sinh học sau thí nghiệm

Các chỉ tiêu	CT1	CT2	CT3	CT4	CT5
Vụ 1					
Rễ	0,09^{a}±0,01	0,08^{a}±0,01	0,08^{ab}±0,04	0,12^{ab}±0,01	0,11^{b}±0,02
Rơm	0,80^{b}±0,03	1,06^{a}±0,05	1,11^{a}±0,02	0,99^{a}±0,06	0,93^{ab}±0,01
Hạt	0,59^{b}±0,02	0,69^{ab}±0,02	0,77^{a}±0,01	0,65^{ab}±0,05	0,61^{a}±0,03
Tổng sinh khối	1,48^{c}±0,02	1,83^{ab}±0,03	1,96^{a}±0,02	1,76^{ab}±0,09	1,65^{bc}±0,05
Vụ 2					
Rễ	0,59^{ab}±0,04	0,64^{b}±0,05	0,55^{b}±0,04	0,50^{a}±0,08	0,40^{ab}±0,06
Rơm	0,63^{a}±0,04	0,68^{a}±0,03	0,65^{a}±0,04	0,64^{a}±0,04	0,71^{b}±0,05

Hạt	$0,44^{b}\pm0,02$	$0,50^{ab}\pm0,02$	$0,59^{a}\pm0,01$	$0,53^{ab}\pm0,05$	$0,57^{a}\pm0,03$
Tổng sinh khối	$1,65^{a}\pm0,08$	$1,82^{a}\pm0,07$	$1,80^{a}\pm0,08$	$1,67^{a}\pm0,09$	$1,68^{a}\pm0,12$

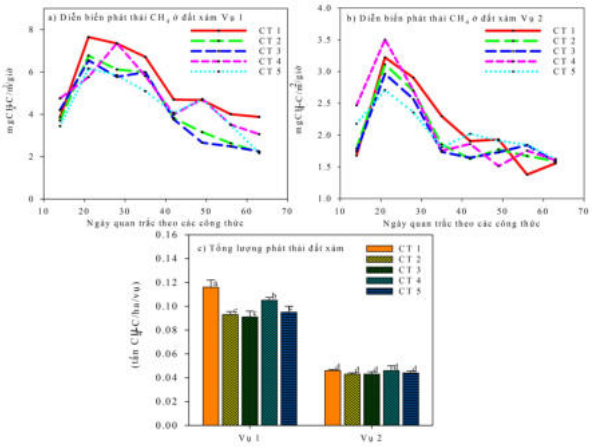
3.3.4 Ảnh hưởng của than sinh học đến phát thải khí CH_4

3.3.4.1 Thí nghiệm trên đất phèn



Hình 3.9 Diễn biến phát thải CH_4 ở vụ 1 (a), vụ 2 (b) và tổng lượng phát thải CH_4 cả hai vụ (c) trong thí nghiệm trên đất phèn bị ảnh hưởng bởi than sinh học

3.3.4.2 Thí nghiệm trên đất xám

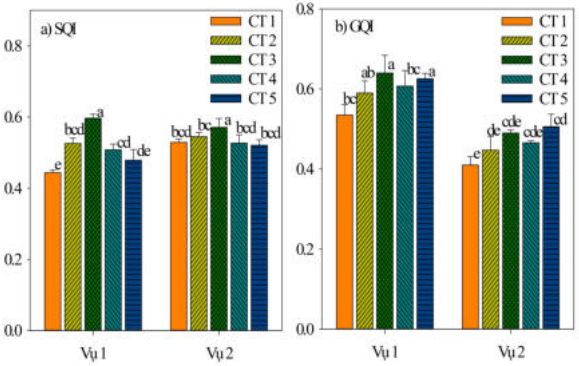


Hình 3.10 Diễn biến phát thải CH_4 ở vụ 1 (a), vụ 2 (b) và tổng lượng phát thải CH_4 cả hai vụ (c) trong thí nghiệm trên đất xám bị ảnh hưởng bởi than sinh học

3.3.5 Các chỉ số chất lượng

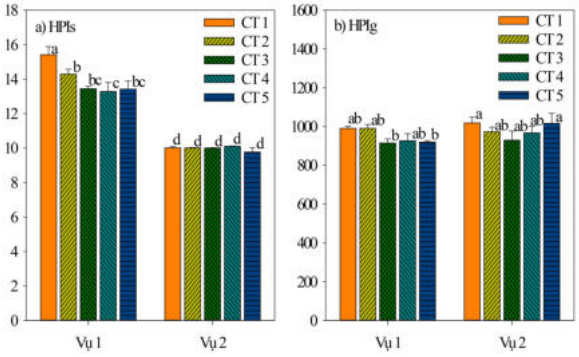
3.3.5.1 Thí nghiệm trên đất phèn

** Chỉ số chất lượng đất và chỉ số chất lượng hạt sau thí nghiệm*



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

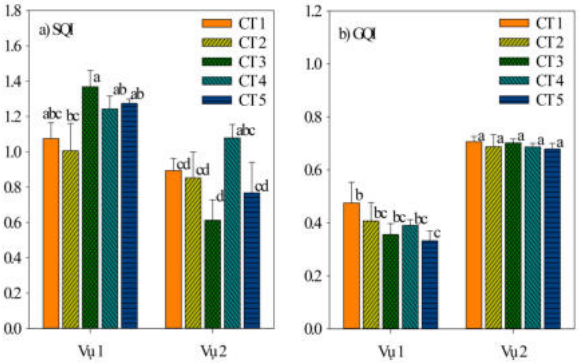
** Chỉ số ô nhiễm kim loại nặng trong đất và nhiễm kim loại nặng trong hạt sau thí nghiệm:*



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

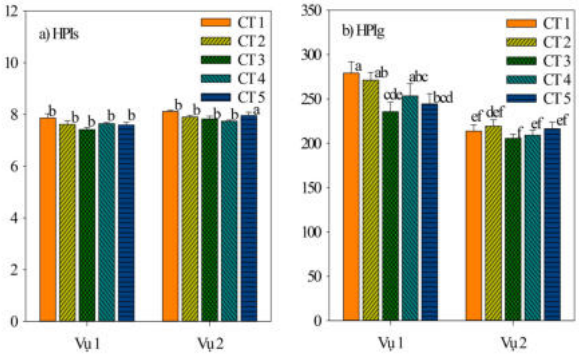
3.3.5.2 Thí nghiệm trên đất xám

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



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

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

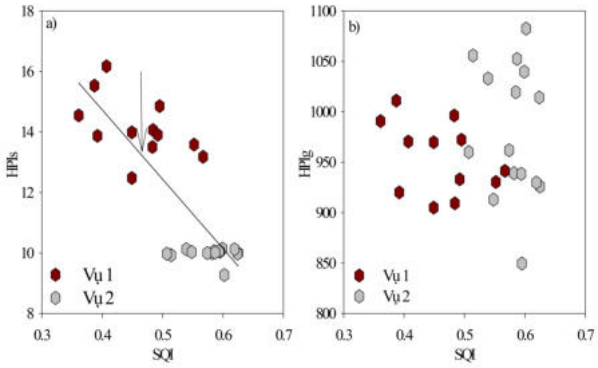


Hình 3.14 Chỉ số ô nhiễm kim loại nặng trong đất (HPIs, a) và nhiễm kim loại nặng trong hạt (HPIg, b) của đất xám sau thí nghiệm bị ảnh hưởng bởi than sinh học

3.3.6 Các mối tương quan

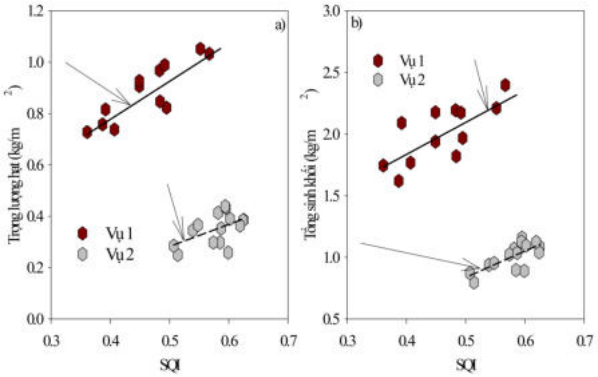
3.3.6.1 Thí nghiệm trên đất phèn

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



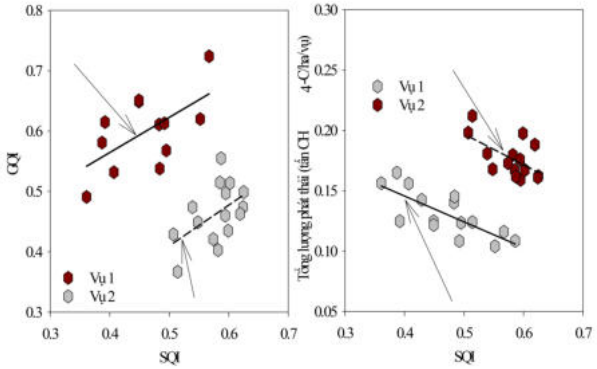
Hình 3.15 Mối tương quan SQI với HPIs (a) và HPIg (b) sau thí nghiệm trên đất phèn bị ảnh hưởng bởi than sinh học

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



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

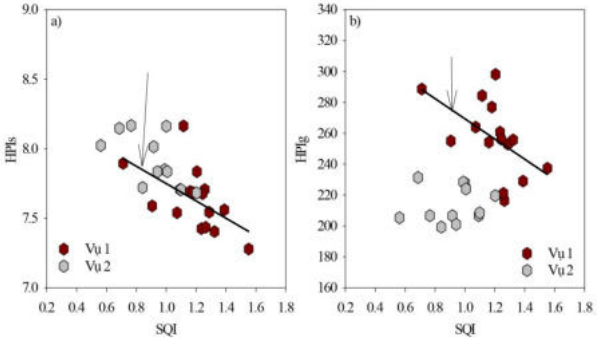
** Mối tương quan giữa chỉ số chất lượng đất và chỉ số chất lượng hạt lúa, tổng phát thải CH_4 sau thí nghiệm của đất phèn bị ảnh hưởng bởi than sinh học:*



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

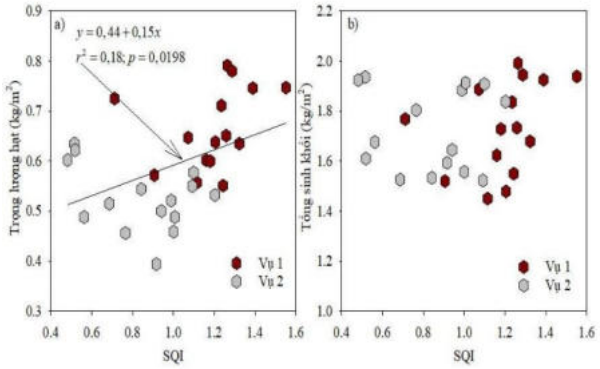
3.3.6.2 Thí nghiệm trên đất xám

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



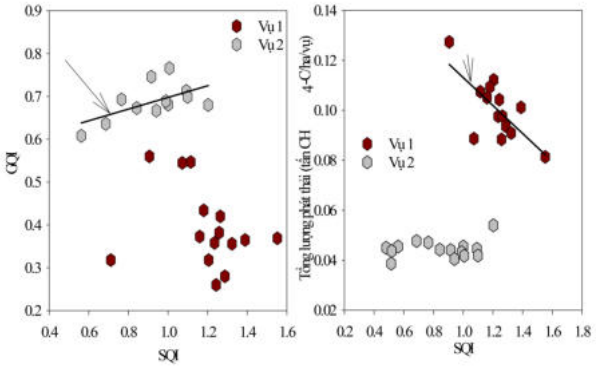
Hình 3.18 Mối tương quan SQI với HPIs (a) và HPIg (b) sau thí nghiệm trên đất xám bị ảnh hưởng bởi than sinh học

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



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

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



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

3.3.7 Một số thảo luận

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

Việc bổ sung than sinh học, đặc biệt là than trấu, đã cải thiện rõ rệt các chỉ tiêu hóa học của đất, như tăng pH và CEC, đồng thời giảm độ chua trong cả đất xám và đất phèn. Hiệu quả tốt nhất được ghi nhận ở CT3 với 20 tấn/ha than trấu. Sự gia tăng pH do than sinh học chứa cation kiềm như Ca2+, Mg2+, K+, và Na+, giúp trung hòa H+ và làm giảm độ chua. CEC cũng tăng khi than sinh học cung cấp nhiều vị trí hấp phụ cation, từ đó cải thiện khả năng giữ dinh dưỡng của đất. Trên đất phèn, than sinh học làm giảm hàm lượng

NH4+ trong vụ 1 nhưng làm tăng trong vụ 2 khi hệ vi sinh ổn định hơn. Ngược lại, trên đất xám, than sinh học không ảnh hưởng rõ rệt đến hàm lượng NH4+ trong vụ 2 do pH đất đã đủ trung tính. Than trấu không chỉ cải thiện CEC mà còn giúp giữ lại nhiều cation dinh dưỡng, góp phần vào sự phát triển của lúa. Nhìn chung, than trấu có hiệu quả cao hơn so với than nhãn trong việc cải thiện SQI cho cả hai loại đất.

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

Bón than sinh học (CT2-CT5) cải thiện đáng kể năng suất hạt và tổng sinh khối trong vụ 1 nhờ cấu trúc xốp giúp giữ nước và dinh dưỡng, đồng thời thúc đẩy hoạt động vi sinh đất và cải thiện sinh trưởng rễ. Nghiên cứu cho thấy bón 20 tấn/ha tăng 11-13% năng suất so với đối chứng. Tuy nhiên, hiệu quả giảm dần ở vụ 2 do nhóm chức khoáng kiềm bão hòa, và hiệu ứng trên đất xám kém hơn so với đất phèn. Trên đất phèn, than sinh học giúp ổn định pH và CEC, duy trì sinh trưởng lúa tốt hơn. Mối liên hệ giữa SQI và năng suất cũng rõ ràng hơn trên đất phèn và xám.

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

Bón than sinh học giảm phát thải CH4 rõ rệt trong vụ đầu nhờ cơ chế tăng oxy hóa khử, giảm OC dễ phân giải và ức chế vi khuẩn methanogens. Kết hợp với phân N, giảm 17% tổng phát thải CH4 so với đối chứng. Trên đất phèn, hiệu quả giảm CH4 duy trì trong vụ 2 nhờ tác dụng ổn định pH và tăng CEC. Tuy nhiên, trên đất xám, hiệu quả giảm CH4 không rõ rệt ở vụ 2 do pH đã đủ cao và OC từ than sinh học bị chuyển hóa, phục hồi môi trường cho methanogens. Kết

quả cũng cho thấy mối tương quan nghịch giữa SQI và phát thải CH4 trên đất phèn, nhưng chỉ ở vụ 1 trên đất xám.

3.3.8 Tiểu kết nội dung 3

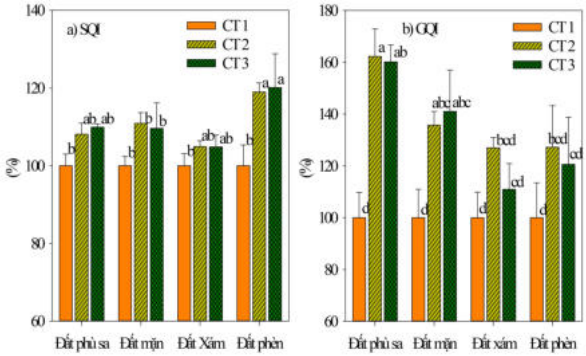
*Ảnh hưởng của than sinh học đến tính chất hóa học của đất: Than sinh học, đặc biệt là CT3 (20 tấn/ha), cải thiện pH, CEC, hàm lượng OC và giảm độ chua trao đổi trên đất phèn và xám. Nó cũng làm tăng các cation thiết yếu như K+, Ca2+, Mg2+ và giảm kim loại độc Al, Fe. Tuy nhiên, không ảnh hưởng rõ đến các ion gây mặn (Cl-, SO42-) và NH_4^+, hiệu quả giảm NH_4^+ chỉ duy trì trong vụ 1 trên đất phèn.

*Ảnh hưởng đến SQI, GQI và ô nhiễm kim loại: Việc sử dụng than sinh học tăng chỉ số SQI và GQI, đặc biệt ở CT3 trong vụ 1. Tuy nhiên, SQI giảm ở vụ 2, đặc biệt trên đất xám. Than sinh học cũng giảm ô nhiễm kim loại nặng (HPIs) và kim loại trong hạt (HPIg) trong vụ 1, nhưng hiệu quả này không duy trì qua vụ 2.

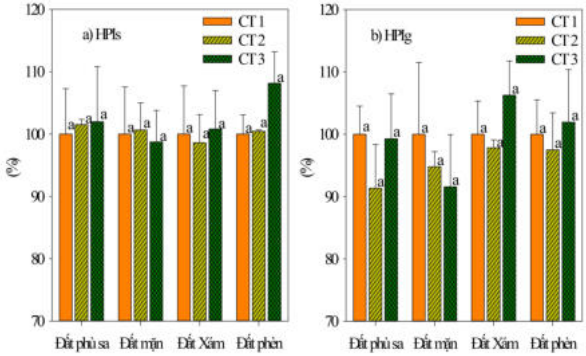
*Ảnh hưởng đến sinh trưởng, năng suất và phát thải CH4: Than sinh học (CT2-CT5) cải thiện sinh trưởng, tổng sinh khối và năng suất hạt trong vụ 1, đặc biệt với CT3. Tuy nhiên, hiệu quả giảm dần trong vụ 2, nhất là trên đất xám. Về phát thải CH4, than sinh học giảm rõ rệt trong vụ 1, nhưng tác dụng này chỉ duy trì trên đất phèn trong vụ 2.

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

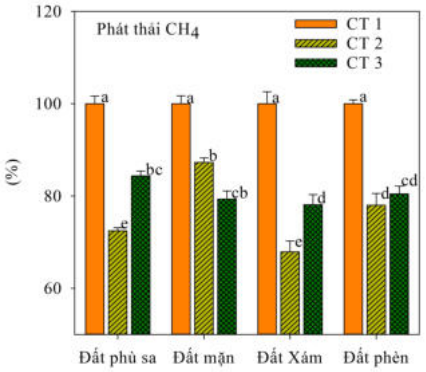
3.4.1 Hiệu quả môi trường ở các mô hình thí nghiệm



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

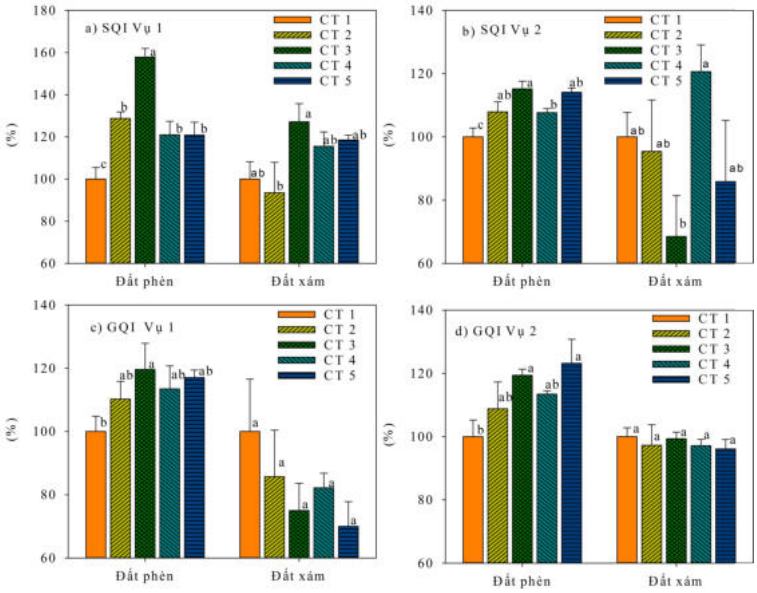


Hình 3.22 Hiệu quả về chỉ số nhiễm kim loại trong đất (HPIs, a) và trong hạt (HPIg, b) của các công thức nghiên cứu trên bốn loại đất thí nghiệm trong nhà lưới

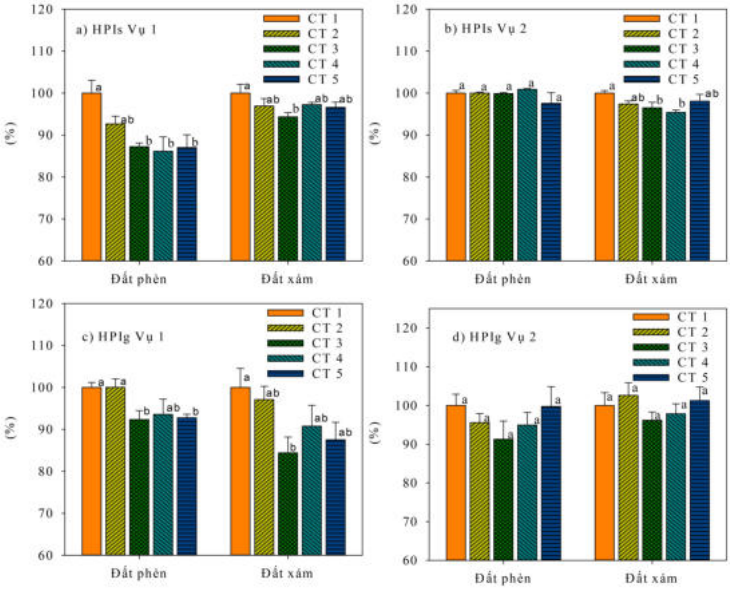


Hình 3.23 Phần trăm giảm phát thải CH_4 của các công thức nghiên cứu trên bốn loại đất thí nghiệm trong nhà lưới

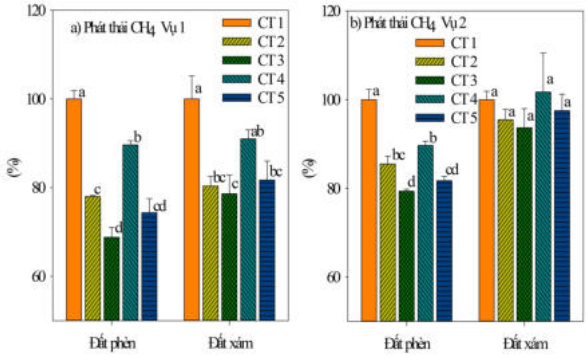
3.4.1.2 Mô hình thí nghiệm quy mô thực địa



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

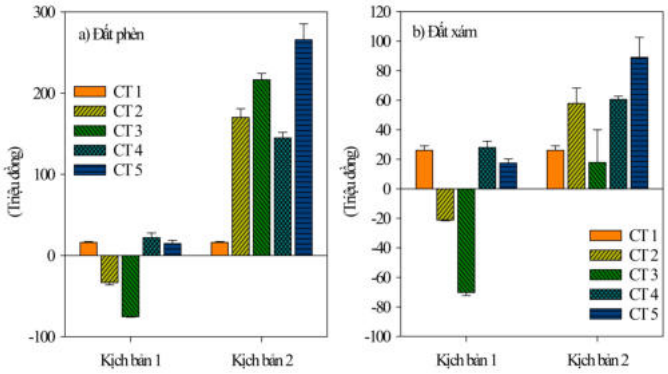


Hình 3.25 Hiệu quả cải thiện ô nhiễm kim loại nặng trong môi trường đất (HPIs) và nhiễm kim loại nặng trong hạt (HPIg) của các công thức nghiên cứu trên hai loại đất thí nghiệm trong thực địa



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

3.4.2. Hiệu quả kinh tế



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

3.4.3 Một số thảo luận

Các nghiên cứu cho thấy than sinh học từ vỏ trấu và thân cành nhãn cải thiện đáng kể chỉ số chất lượng đất (SQI) và hạt (GQI) nhờ cấu trúc xốp và hàm lượng silic cao. Than giúp tăng pH đất, giảm độc tính Al và Fe, cải thiện cấu trúc đất và đa dạng vi sinh vật. Đồng thời, các chỉ số ô nhiễm kim loại nặng giảm 40-60%, nhờ khả năng hấp phụ mạnh mẽ. Tuy nhiên, hiệu quả giảm kim loại giảm dần sau 3-4 tháng, cần bón định kỳ để duy trì. Than sinh học cũng ức chế phát thải CH4 nhờ cải thiện độ thoáng khí và hỗ trợ vi khuẩn methanotrophs. Về mặt kinh tế, than nhãn ở liều 20 tấn/ha mang lại lợi nhuận cao (~49 triệu/ha), giúp tối ưu hóa lợi ích kinh tế và môi trường. Tuy nhiên, giá đầu tư cao là rào cản lớn, đặc biệt nếu thiếu thị trường tín chỉ carbon ổn định. Cần đánh giá chu kỳ bền vững và xây dựng chính sách tín chỉ carbon rõ ràng để hỗ trợ nông dân phát triển mô hình này.

3.4.4 Tiểu kết Nội dung 4

** Hiệu quả môi trường*

Than sinh học từ vỏ trấu (CT2, CT3) và thân cành nhãn (CT4, CT5) cải thiện rõ rệt chất lượng đất (SQI) và hạt lúa (GQI) so với đối chứng. Than trấu (CT2) hiệu quả hơn về chất lượng hạt, đặc biệt trên đất phù sa, xám và phèn, trong khi CT3 (than trấu 20 tấn/ha) cải thiện tốt nhất trên đất phèn. Than sinh học, đặc biệt từ vỏ trấu, giảm phát thải CH4 rõ rệt qua cả hai vụ lúa, đặc biệt hiệu quả trên đất phèn, cho thấy tính ổn định môi trường. Tác động đến kim loại nặng cho thấy than sinh học không thay đổi nhiều ô nhiễm kim loại trong nhà lưới, nhưng có xu hướng giảm

kim loại trong đất ở quy mô thực địa, đặc biệt với CT3, CT4, CT5, mặc dù hiệu quả giảm dần ở vụ sau, đặc biệt trên đất xám.

***** *Hiệu quả kinh tế*

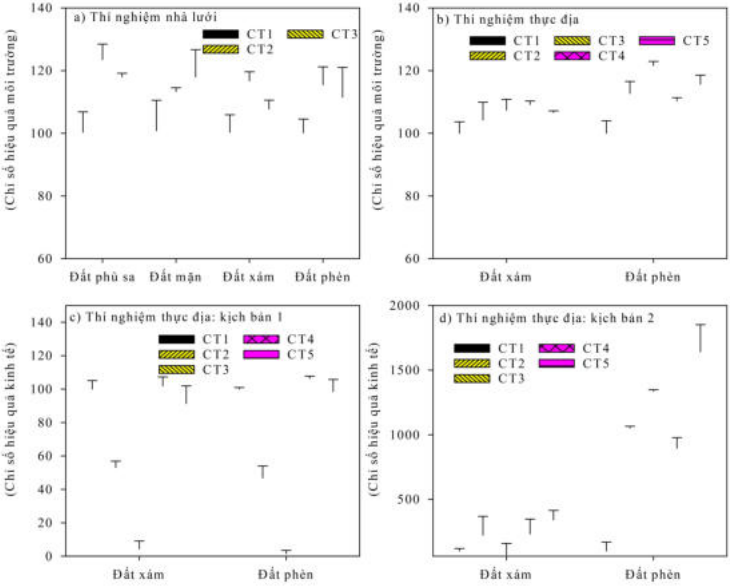
Kịch bản không có tín chỉ carbon: Các công thức sử dụng than trấu (CT2, CT3) bị lỗ ngắn hạn do chi phí đầu tư cao, trong khi than thân cành nhãn (CT4, CT5) có chi phí sản xuất thấp, đem lại lợi nhuận dương từ vụ đầu. Do đó, nếu không có tín chỉ carbon, than sinh học từ thân cành nhãn là lựa chọn kinh tế khả thi hơn.

Kịch bản có tín chỉ carbon: Khi tính đến giá trị tín chỉ carbon từ giảm phát thải CH4 và tích lũy carbon, tất cả công thức sử dụng than sinh học đều có lợi nhuận cao hơn đối chứng. CT5 (than nhãn, 20 tấn/ha) cho lợi nhuận vượt trội nhất, khẳng định tính khả thi của mô hình này về cả môi trường và kinh tế.

So sánh hiệu quả kinh tế giữa hai loại đất: Lợi nhuận trên đất phèn (266 triệu đồng/ha ở CT5) cao hơn nhiều so với đất xám (89 triệu đồng/ha ở CT5), chứng tỏ hiệu quả của than sinh học duy trì tốt hơn trên đất phèn về cải thiện đất, giảm phát thải và lợi ích kinh tế.

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

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



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

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

3.5.2 Hiệu quả môi trường

Than sinh học, đặc biệt là từ vỏ trấu, cải thiện chất lượng đất (SQI) và chất lượng hạt (GQI), giảm ô nhiễm kim loại

và phát thải CH4, đặc biệt trên đất xám và phèn. Nó cải thiện cấu trúc đất, tăng độ thoáng khí và hỗ trợ vi khuẩn methanotrophs, giúp tiêu hủy CH4. Tuy nhiên, hiệu quả giảm ô nhiễm kim loại và phát thải CH4 cần được kiểm chứng dài hạn trong điều kiện thực tế.

3.5.3 Hiệu quả kinh tế

Than sinh học yêu cầu chi phí cao ban đầu, nhưng khi tính đến tín chỉ carbon, lợi ích kinh tế rõ ràng. Than nhãn (CT4, CT5) có thể bù đắp chi phí từ nông sản, trong khi than trấu cần cơ chế hỗ trợ (tín chỉ carbon). Mô hình tín chỉ carbon giúp tăng tính khả thi kinh tế và khuyến khích canh tác lúa bền vững trên các vùng đất xám, đất nghèo dinh dưỡng tại Việt Nam.

3.5.4 Tính bền vững của mô hình

Tính bền vững của mô hình sản xuất lúa nước dựa vào than sinh học phụ thuộc việc ứng dụng nguyên tắc kinh tế tuần hoàn, sự tồn tại lâu dài của than sinh học trong môi trường và khả năng nâng cao hiệu quả môi trường. Việc ứng dụng than sinh học trong canh tác lúa nước khép kín chu trình kinh tế tuần hoàn, vừa tận dụng phụ phẩm nông nghiệp, vừa cải thiện bền vững tính chất đất và giảm phát thải khí nhà kính. Tuy nhiên, hiệu lực của than sinh học có thể giảm sau một vài vụ lúa. Do đó, cần thiết kế thử nghiệm dài hạn, theo dõi chu kỳ hóa học và sinh học qua nhiều vụ, kết hợp luân canh hoặc bổ sung nguồn hữu cơ khác. Việc sử dụng lặp lại than sinh học trên các cánh đồng lúa hàng năm là một giải pháp cho vấn đề này.

3.5.5 Đề xuất một số giải pháp cho việc ứng dụng mô hình

Để nâng cao tính bền vững, cần tối ưu hóa quy trình sản xuất than sinh học, kết hợp quản lý dinh dưỡng cân đối và luân canh. Thiết lập hệ thống giám sát dài hạn và khuyến

khích hợp tác giữa nông dân và doanh nghiệp để giảm chi phí. Cần đào tạo và phát triển chính sách khuyến khích thông qua tín chỉ carbon, hỗ trợ giá và thị trường ổn định, nhằm hạ thấp chi phí đầu tư và nâng cao hiệu quả kinh tế.

KẾT LUẬN VÀ KIẾN NGHỊ

1. Kết luận

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

và mô hình chuỗi giá trị trong triển khai thực tế. Việc ứng dụng than sinh học là một giải pháp tiềm năng trong nông nghiệp bền vững, đồng thời góp phần vào mục tiêu giảm phát thải khí nhà kính (CH_4), kiểm soát ô nhiễm kim loại nặng, và bảo vệ an ninh lương thực trước biến đổi khí hậu. Bên cạnh đó, cơ chế tín chỉ carbon và thị trường than sinh học có thể trở thành đòn bẩy tài chính quan trọng, khuyến khích nông dân tham gia vào quá trình chuyển đổi xanh trong sản xuất nông nghiệp. Tóm lại, nghiên cứu này khẳng định than sinh học đặc biệt từ phụ phẩm địa phương, là một hướng đi khả thi và tích hợp giữa hiệu quả môi trường, kinh tế và phát triển nông nghiệp bền vững.

2. Kiến nghị

Đề tài nghiên cứu có một số hạn chế như diện tích thí nghiệm nhỏ, ít điểm khảo nghiệm, chưa đại diện cho biến thiên khí hậu và thành phần đất trong toàn vùng. Nghiên cứu chưa đánh giá tác động lâu dài của than sinh học sau nhiều chu kỳ canh tác và chưa xem xét tình huống thời tiết cực đoan. Hiệu quả lâu dài về tích lũy hữu cơ và chu trình dinh dưỡng chưa rõ, và cơ chế tương tác với vi sinh trong đất ngập nước chưa được nghiên cứu đầy đủ. Phân tích kinh tế chỉ dừng ở lợi nhuận canh tác, chưa tính đến chi phí chế biến và vận chuyển. Nghiên cứu cũng chưa so sánh hoặc kết hợp than sinh học với các vật liệu khác. Những hạn chế này mở ra hướng nghiên cứu tiếp theo: mở rộng quy mô, phân tích sâu cơ chế vi sinh, và thử nghiệm đa dạng nguồn nguyên liệu để hoàn thiện giải pháp than sinh học.