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 2026

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 CH_4. Trong nông nghiệp, canh tác lúa ngập nước là một trong những nguồn thải thải CH_4 lớn nhất. Phát thải CH_4 từ ruộng lúa chiếm khoảng 10% khí thải CH_4 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% CH_4 phát thải. Khí CH_4 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 $H_2PO_4^-$ và $H_2PO_4^-$ 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 CH_4 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 CH_4 bao gồm làm tăng pH của đất từ đó tăng quá trình ôxi hóa

sinh học CH_4, 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 CH_4 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 CH_4 cao hơn đất có thành phần cơ giới nặng. Các nghiên cứu thêm về than sinh học và phát thải CH_4 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 Tổng cục Thống kê năm 2023, sản lượng lúa cả nước đạt 43,50 triệu tấn, năng suất 61,1 tạ/ha trên diện tích 7.119 nghìn ha. ĐBSCL là vùng sản xuất lúa trọng điểm với diện tích 3.839 nghìn ha (53,9% cả nước), sản lượng 24,16 triệu tấn (55,5% cả nước), năng suất bình quân 62,9 tạ/ha — cao hơn 1,8 tạ/ha so với trung bình quốc gia. Lúa đông xuân đạt sản lượng cao nhất với 20,19 triệu tấn, chiếm 46,4% tổng sản lượng cả năm.

ĐBSCL có địa hình thấp bằng phẳng (0,5–5m so với mực nước biển), khí hậu gió mùa cận xích đạo, nhiệt độ trung bình 27–28°C, mùa mưa tập trung tháng 5–10. Đất đai gồm ba nhóm chính: đất phù sa (1,2 triệu ha, 29,7%), đất phèn (1,2 triệu ha, 40%) và đất xám (134 nghìn ha, 3,4%). Tuy nhiên, biến đổi khí hậu và tập quán canh tác đang làm gia tăng diện tích đất nhiễm phèn và mặn, gây trở ngại cho sản xuất bền vững trong vùng.

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

Tín chỉ carbon là đơn vị chứng nhận có thể giao dịch trên thị trường, đại diện cho việc giảm thiểu hoặc loại bỏ một tấn CO_2 tương đương khỏi khí quyển, được phát triển nhằm khuyến khích giảm phát thải khí nhà kính theo Nghị định thư Kyoto và Thỏa thuận Paris. Canh tác lúa nước đóng góp khoảng 10-12% tổng lượng khí metan toàn cầu, do đó có tiềm năng lớn trong việc tham gia thị trường tín chỉ carbon, mang lại thêm 50-200 USD/ha/năm cho nông dân. Tuy nhiên, rào cản chính gồm chi phí giám sát cao (MRV), thiếu năng lực kỹ thuật và quy mô sản xuất nhỏ lẻ, đòi hỏi sự hỗ trợ từ chính phủ và tổ chức quốc tế. Chỉ số chất lượng đất (SQI) là công cụ định lượng tổng hợp đánh giá khả năng duy trì năng suất và bền vững môi trường của đất, được xây dựng từ các chỉ tiêu vật lý, hóa học và sinh học. Kết hợp với chỉ số ô nhiễm kim loại nặng (HPI), bộ chỉ số này cung cấp cái nhìn toàn diện về chất lượng đất trồng lúa, là nền tảng quan trọng để đánh giá hiệu quả cải tạo đất của than sinh học trong nghiên cứu này.

1.6 Nhận xét và vấn đề cần tiếp tục nghiên cứu

Sản xuất lúa nước hiện đối mặt với ba thách thức lớn: phát thải khí CH_4 (tiềm năng gây hiệu ứng nhà kính gấp 22-25 lần CO_2), ô nhiễm kim loại nặng trong đất do sử dụng phân bón không hợp lý, và thoái hóa đất dẫn đến giảm năng suất và hiệu quả kinh tế. Than sinh học từ phụ phẩm nông nghiệp được xác định là giải pháp tiềm năng, song còn thiếu nghiên cứu thực chứng tại Việt Nam. Tổng quan tài liệu xác định năm khoảng trống nghiên cứu: (1) thiếu so sánh trực tiếp than trấu và than nhãn trên cùng điều kiện canh tác; (2) thiếu dữ liệu trên đất phèn và đất xám đặc thù của Việt Nam; (3) thiếu bằng chứng thực địa về giảm kim loại nặng trong đất và hạt lúa; (4) chưa có bộ chỉ số tích hợp đồng thời ENI và ECI trong bối cảnh tín chỉ carbon; (5) thiếu dữ liệu dài hạn về

suy giảm hiệu lực than sinh học qua nhiều vụ canh tác. Năm khoảng trống này là cơ sở khoa học hình thành các câu hỏi nghiên cứu và khẳng định tính cấp thiết của luận án.

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).

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

* 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).

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.

$$CT = BD * OC * D * 100 \qquad \text{(Phương trình 5)}$$

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

$$Tín\ chỉ\ carbon\ từ\ đất = CT_{TSH} - CT_{ĐC} * \frac{44}{12} \qquad \text{(Phương trình 6)}$$

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:

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

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.

3.2 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

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.

3.3 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

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 Ca^{2+}, Mg^{2+}, 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 NH_4^+ 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 NH_4^+ 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 CH_4 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 CH_4 so với đối chứng. Trên đất phèn, hiệu quả giảm CH_4 duy trì trong vụ 2 nhờ tác dụng ổn định pH và tăng CEC. Tuy nhiên, trên đất xám, hiệu quả giảm CH_4 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 CH_4 trên đất phèn, nhưng chỉ ở vụ 1 trên đất xám.

*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^+, Ca^{2+}, Mg^{2+} và giảm kim loại độc Al, Fe. Tuy

nhiên, không ảnh hưởng rõ đến các ion gây mặn (Cl^-, SO_4^{2-}) 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 CH_4: 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 CH_4, 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

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 CH_4 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 CH_4 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.

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.