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

NGUYỄN TÂN XUÂN TÙNG

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

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

TÓM TẮT LUẬN ÁN TIẾN SĨ

THÀNH PHỐ HỒ CHÍ MINH, NĂM 2025

DANH MỤC CÔNG TRÌNH CÔNG BỐ CỦA NGHIÊN CỨU SINH

Bài báo quốc tế:

1. **Tung Xuan Tan Nguyen**, Binh Thanh Nguyen, Binh Vu Thai, and Minh Quang Vo*, "Soil quality assessment on different land use types in the coastal saline acid sulfate soils of Can Gio District, Vietnam," *Ecological Engineering & Environmental Technology*, 26(8), 115–129, 2025, https://doi.org/10.12912/27197050/207331.

2. **Tung Xuan Tan Nguyen**, Binh Thanh Nguyen*, and Binh Vu Thai, "Amelioration of salt-affected soil using combined amendments for synergistic effects: Impacts and management implications," *Soil Use and Management*, 40:e13104, 2024, https://doi.org/10.1111/sum.13104.

3. **Tung Xuan Tan Nguyen** and Binh Thanh Nguyen*, "The effects of two different biochars on the characteristics of saline acid sulfate soil," *Land Degradation and Development*, pp. 1-11, 2023, http://doi.org/10.1002/ldr.4717.

Bài báo trong nước:

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

Hội nghị khoa học:

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

Ngoài ra, tác giả đã nộp hai bài báo khác và đang trong quá trình phản biện:

1. Binh Thanh Nguyen, Binh Vu Thai, and **Tung Xuan Tan Nguyen***, "Boosting Soil Health and Pak Choy Growth: Synergistic Effects of Biochar, Lime, and Manure on Saline Acid-Sulfate Soils" tại tạp chí *Applied and Environmental Soil Science*. Xếp hạng Q2 thuộc danh mục Web of Science, Impact factor (2025) = 2.7.

2. **Tung Xuan Tan Nguyen**, Hao Phu Dong, and Binh Thanh Nguyen*, "Improving the quality of saline acid sulfate soil by eco-friendly amendments under two regimes for sustainable management" tại tạp chí Soil Use and Management. Xếp hạng Q1 thuộc danh mục Web of Science, Impact factor (2025) = 3.7.

MỞ ĐẦU

1. Đặt vấn đề

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

Vật liệu thân thiện môi trường là các loại vật liệu được thiết kế, sản xuất và sử dụng sao cho giảm thiểu tác động tiêu cực đến môi trường trong toàn bộ vòng đời của chúng [17]. Những vật liệu này thường được làm từ các nguồn tái tạo, tái chế hoặc tự nhiên, không phát thải độc hại và có khả năng phân hủy sinh học hoặc tái sử dụng [17]. Chúng góp phần giảm thiểu ô nhiễm, tiết kiệm năng lượng và bảo vệ tài nguyên thiên nhiên. Than sinh học, vôi và phân chuồng được chứng minh là vật liệu thân thiện với môi trường nhờ vào các đặc tính đặc biệt và lợi ích của chúng [18-20]. Than sinh học, một vật liệu giàu carbon được tạo từ các sản phẩm phụ nông nghiệp, đã được báo cáo là một biện pháp bổ sung tiềm năng để cải thiện đất bị ảnh hưởng bởi muối [21]. Việc áp dụng than sinh học đã được ghi nhận là cải thiện các tính chất vật lý, hóa học và sinh học của đất bị ảnh hưởng bởi muối [21]. Tuy nhiên, do tỷ lệ C:N cao, than sinh học hiệu quả hơn trong việc tăng chất lượng đất và năng suất cây trồng khi được áp dụng cùng với phân đạm hoặc phân hữu cơ [22, 23]. Gunarathne, Senadeera, Gunarathne, Biswas, Almaroai and Vithanage [24] đã sử dụng than sinh học như một vật liệu cải tạo để cải tạo đất bị nhiễm mặn và chua ở Sri Lanka. Mặc dù các tác giả chỉ ra rằng than sinh học được sản xuất ở 500^oC từ Gliricidia Sepium (một loài thực vật có hoa trong họ Đậu) là một vật liệu đầy hứa hẹn trong việc cải tạo đất và than sinh học là một vật liệu thân thiện môi trường [25, 26]. Ở đất phèn, than sinh học đã được báo cáo là làm tăng năng suất lúa và ngô, phần lớn là do cải thiện khả năng trao đổi cation (CEC) và giảm được độc tính của Al [27]. Việc bổ sung than sinh học đã được ghi nhận để tăng pH của đất và cải thiện các tác động bất lợi của độc tính Al [28]. Việc bổ sung than sinh học đã được báo cáo làm tăng lượng P sẵn có của đất [29] và sự gia tăng này có thể bắt nguồn từ P được giữ lại trong than sinh học được thêm vào [30]. Tuy nhiên, các hạn chế khác của đất như độ mặn và muối hòa tan cũng như các tác động khác gây ra sự gia tăng P cho đến nay vẫn chưa có nhiều nghiên cứu. Việc bổ sung than sinh học để khắc phục các tác động tiêu cực của đất bị nhiễm mặn đã có nhiều nghiên cứu [31]. Năng suất cây trồng bị ảnh hưởng bởi mặn trong đất có thể được cải thiện do cải thiện các đặc tính vật lý, hóa học và sinh học của đất bằng cách bổ sung than sinh học [32, 33]. Hơn nữa, việc bổ sung than sinh học còn có thể làm giảm EC của đất bị ảnh hưởng bởi mặn bằng cách tạo điều kiện thuận lợi cho quá trình rửa trôi và hấp phụ Na^+ [34]. Vôi nông nghiệp, thường được dùng để cải tạo đất axit, vôi làm tăng pH và giảm độ chua, từ đó giúp cây trồng hấp thụ dinh dưỡng tốt hơn. Khi kết hợp với các chất như than sinh học, vôi giúp duy trì môi trường đất ổn định và bền vững. Phân chuồng, nguồn phân hữu cơ phong phú, như phân dê, phân bò cải thiện hệ vi sinh vật có ích trong đất, tăng độ phì nhiêu và năng suất cây trồng. Việc sử dụng phân chuồng làm giảm dư lượng hóa chất trong đất và cây trồng, đồng thời cung cấp dinh dưỡng tự nhiên, góp phần bảo vệ môi trường.

Những phát hiện trên cho thấy mỗi biện pháp cải tạo đều có ưu và nhược điểm riêng khi giải quyết bốn hạn chế chính của đất phèn nhiễm mặn. Những điều này cũng gợi ý rằng việc kết hợp các giải pháp cải tạo có thể hiệu quả hơn trong việc giải quyết các hạn chế của đất nhờ tác động bổ trợ của chúng.Với những tình hình thực tiễn đã được nêu trên, đề tài **"Cải tạo các thành phần hóa học của đất phèn nhiễm mặn bằng vật liệu thân thiện môi trường trong bối cảnh biến đổi khí hậu"** được lựa chọn thực hiện nhằm đánh giá, cải tạo các đặc tính hóa học và đề xuất các hướng sử dụng đất phèn nhiễm mặn hợp lý hơn trong bối cảnh biến đổi khí hậu.

2. Mục tiêu nghiên cứu

2.1. Mục tiêu tổng quát

Đánh giá toàn diện các đặc tính hóa học của đất phèn nhiễm mặn và khảo sát, đánh giá tác động của các vật liệu cải tạo (than trấu, vôi, phân bò) cùng chế độ quản lý nước lên cải thiện chất lượng đất, sinh trưởng và năng suất cây trồng, từ đó đề xuất các giải pháp cải tạo và sử dụng đất khả thi trong bối cảnh biến đổi khí hậu.

2.2. Mục tiêu cụ thể

- Đánh giá được các đặc tính hóa học của đất phèn nhiễm mặn tại khu vực nghiên cứu điển hình (Cần Giờ - TP. HCM).
- Khảo sát, đánh giá tác động của các vật liệu cải tạo (than trấu, vôi, phân bò) đến khả năng cải thiện các đặc tính hóa học ở hai chế độ nước (tưới ngập và độ ẩm 60%) trên đất phèn nhiễm mặn.
- Đánh giá được hiệu quả của các vật liệu cải tạo (than trấu, vôi, phân bò) đến các đặc tính hóa học, sinh trưởng và năng suất của cây trồng (lúa - 1 vụ tại Cần Giờ và cải thìa - 2 vụ tại Gò Công Đông) trên đất phèn nhiễm mặn.
- Đề xuất được các giải pháp cải tạo và sử dụng đất phèn nhiễm mặn.

3. Đối tượng và phạm vi nghiên cứu

3.1. Đối tượng nghiên cứu

- Các đặc tính hóa học của đất phèn nhiễm mặn.
- Cây trồng: lúa (Ba Bụi) và cải thìa (F1 Green Sun No 1).
- Các biện pháp cải tạo và sử dụng đất phèn nhiễm mặn.

3.2. Phạm vi nghiên cứu

- Phạm vi không gian tại Huyện Cần Giờ, thành phố Hồ Chí Minh và xã Kiểng Phước, huyện Gò Công Đông, tỉnh Tiền Giang trong thời gian từ năm 2022 đến năm 2025.
- Quy mô nghiên cứu: Nhà lưới và thực địa.

4. Ý nghĩa khoa học và thực tiễn

4.1. Ý nghĩa khoa học

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

4.2. Ý nghĩa thực tiễn

Nghiên cứu cung cấp bằng chứng định lượng và khuyến nghị kỹ thuật khả thi tại thực địa, làm cơ sở cho quy hoạch sử dụng đất, phân vùng và hướng dẫn cải tạo tầng canh tác nhằm giảm chua, mặn, độc và cải thiện dinh dưỡng đất phèn nhiễm mặn. Bên cạnh đó, nghiên cứu còn góp phần hỗ trợ quyết định cho chính quyền và cơ quan quản lý, đồng thời nâng cao năng suất, thu nhập nông hộ, cải thiện môi trường đất, sức khỏe cộng đồng và thúc đẩy phát triển kinh tế - xã hội địa phương.

5. Tính mới của đề tài

Đề tài nghiên cứu các đặc tính hóa học của đất phèn nhiễm mặn, loại đất chịu đồng thời các hạn chế phèn và mặn với đặc trưng độ chua cao (pH 2-5), độ mặn cao (EC, Na^+, Cl^-), độc tính Al, Fe và Mn lớn, đồng thời thiếu hụt dinh dưỡng, đặc biệt là lân. Vấn đề này đã có nhiều giải pháp nghiên cứu, xử lý trước đây nhưng chưa được toàn diện. Nghiên cứu này đã tiến hành triển khai nghiên cứu chuyên sâu với thí nghiệm mô phỏng trong nhà lưới ở hai chế độ nước (tưới ngập và duy trì độ ẩm 60%) nhằm tái hiện điều kiện canh tác trên đất lúa và đất màu, làm tiền đề cho thí nghiệm quy mô thực địa trên đất phèn nhiễm mặn trồng lúa và cải thìa. Điểm mới nổi bật tiếp theo là sử dụng kết hợp các vật liệu cải tạo thân thiện môi trường (than trấu, phân bò, vôi) để đồng thời cải thiện độ chua, giảm mặn, độc tố, bổ sung dinh dưỡng và đặc biệt là khảo sát, đánh giá tác động đến các dạng nhôm khác nhau ($Al_{trđ}$ - Al trao đổi, Al_{lky} - Al liên kết yếu với chất hữu cơ, Al_{lkb} - Al liên kết bền với chất hữu cơ, $Al_{vđh}$ - Al vô định đình, Al_{kt} - Al kết tinh), đây là khía cạnh chưa được các nghiên cứu trước đây công bố đầy đủ. Bên cạnh đó, nghiên cứu còn ứng dụng các phương pháp phân tích hiện đại và kỹ thuật nội nghiệp tiên tiến nhằm định lượng chính xác sự biến đổi các chỉ tiêu hóa học đất, tác động của các tổ hợp vật liệu cải tạo lên đất, từ đó cung cấp bằng chứng khoa học mới và đề xuất giải pháp cải tạo, sử dụng đất phèn nhiễm mặn theo hướng bền vững và khả thi hơn so với các tiếp cận trước đây.

6. Các giả thuyết khoa học cần kiểm tra

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

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

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

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

CHƯƠNG 1 TỔNG QUAN VỀ CÁC VẤN ĐỀ NGHIÊN CỨU

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

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

Biến đổi khí hậu đã làm gia tăng đáng kể diện tích đất phèn nhiễm mặn trên toàn cầu, đặc biệt tại các khu vực ven biển và đồng bằng, nơi chịu tác động trực tiếp của các yếu tố như nhiệt độ tăng, lượng mưa thay đổi, số giờ nắng gia tăng, khí hậu cực đoan và nước biển dâng [41]. Sự gia tăng nhiệt độ toàn cầu làm tăng tốc độ bốc hơi nước ở các tầng đất bề mặt. Điều này dẫn đến sự tích tụ muối trong đất do nước bốc hơi để lại các khoáng chất hòa tan, đặc biệt là Na^+ và Cl^-. Ở các vùng đất phèn, nhiệt độ cao làm tăng tốc độ oxy hóa pyrite (FeS_2) trong đất, thúc đẩy quá trình hình thành axit sulfuric (H_2SO_4), gây axit hóa tầng đất canh tác [40]. Lượng mưa không đều hoặc suy giảm trong mùa khô khiến khả năng rửa trôi muối và phèn từ đất bị giảm, làm gia tăng độ mặn và tính phèn ở tầng đất trên. Ngoài ra, số giờ nắng kéo dài làm tăng tốc độ bốc hơi nước từ bề mặt đất, dẫn đến sự tích tụ muối nhiều hơn trong các tầng đất canh tác. Điều này đặc biệt nghiêm trọng ở các vùng đất thấp và khô hạn ven biển. Bên cạnh đó, biến đổi khí hậu còn làm gia tăng tần suất và cường độ của các hiện tượng khí hậu cực đoan như lũ lụt, hạn hán và bão [41]. Lũ lụt gây xáo trộn tầng đất và đưa phèn từ dưới sâu lên bề mặt. Hạn hán kéo dài làm giảm nước ngầm, khiến đất trở nên khô cằn, nứt nẻ và tích tụ muối trên bề mặt. Tiếp theo, mực nước

biển dâng cao là nguyên nhân chính làm tăng tình trạng xâm nhập mặn vào đất liền [41]. Nước mặn di chuyển qua hệ thống sông ngòi và tầng ngậm nước, làm tăng nồng độ muối trong đất và nước ngầm. Khi nước rút đi, muối bị lắng đọng và tích tụ trên bề mặt, làm cho đất vốn đã nhiễm phèn trở nên nhiễm mặn nghiêm trọng hơn. Tình trạng xâm nhập mặn ở vùng phèn khu vực ven biển làm thu hẹp diện tích đất nông nghiệp. Xâm nhập mặn làm cho diện tích đất canh tác giảm, từ đó hệ số sử dụng đất có thể giảm từ 3 - 4 lần/năm xuống còn 1 - 1,5 lần/năm. Nếu nước biển dâng cao thêm 1m thì khoảng 1,77 triệu ha đất sẽ bị nhiễm mặn, chiếm 45% diện tích đất ở Đồng bằng Sông Cửu Long và ước tính rằng, có khoảng 85% người dân ở vùng Đồng bằng Sông Cửu Long cần được hỗ trợ về nông nghiệp [42]. Do đó, loại đất phèn nhiễm mặn là loại đất với bản chất là đã có tính phèn và bị nhiễm mặn do sự xâm nhập của nước biển, lúc này đất vừa có tính chất phèn (tính axit cao, pH thấp) vừa có tính mặn (EC cao). Đất phèn được hình thành khi các lớp đất sulfidic tiếp xúc với điều kiện hiếu khí, các sulfua bị oxy hóa, dẫn đến sự hình thành axit sulfuric và do đó đất bị axit hóa nghiêm trọng (pH 2,5 - 4,5) [43, 44]. Độ chua làm tăng tính di động và rửa trôi kim loại từ các khoáng chất trong đất [45]. Hậu quả là axit hóa nước tiếp nhận thoát nước gây nguy cơ nghiêm trọng cho hệ sinh vật thủy sinh. Đất phèn ở đồng bằng sông Cửu Long chiếm diện tích lớn nhất và có sự phân hóa phức tạp nhất, chủ yếu thuộc các nhóm đất Fluvisols và Gleysols [35]. Phân loại đất phèn dựa trên tầng sinh phèn và tầng phèn, với độ sâu của các tầng này được xác định qua phẫu diện; tầng phèn càng gần bề mặt, sự phát triển của cây trồng càng bị hạn chế. Đất phèn có thể bị mặn hóa, hình thành đất phèn nhiễm mặn, do các nguyên nhân như sự gia tăng nước ngầm nhiễm mặn, xâm nhập nước biển, tưới tiêu bằng nước mặn, bón phân, hoặc phong hóa đá chứa muối [39, 46]. Đất bị ảnh hưởng bởi muối thường có pH cao [47], do sự hiện diện của các nguyên tố kiềm như Na và K. Như vậy, biến đổi khí hậu và đất phèn nhiễm mặn đã có mối liên hệ chặt chẽ với nhau do không những làm gia tăng diện tích đất phèn nhiễm mặn mà còn làm phức tạp hóa quá trình cải tạo do tính không ổn định của khí hậu [41]. Sự mất cân bằng nhiệt độ và độ ẩm do biến đổi khí hậu làm suy giảm các vi sinh vật hữu ích trong đất, làm giảm khả năng tự phục hồi của hệ sinh thái đất [41]. Tác động của nước biển dâng và xâm nhập mặn sẽ tiếp tục kéo dài trong nhiều thập kỷ, làm giảm khả năng cải tạo đất phèn nhiễm mặn và đe dọa an ninh lương thực.

1.2. Tính chất đất phèn nhiễm mặn

1.2.1. Tính axit

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

1.2.2. Tính mặn

Tính mặn có trong đất phèn nhiễm mặn là trong đất có tồn tại các loại muối hòa tan ở một nồng độ cao hơn mức bình thường, gây ảnh hưởng xấu đến sự sinh trưởng và phát triển của cây trồng [49]. Đại lượng EC là độ dẫn điện của đất để đánh giá độ mặn cho đất, có đơn vị là dS/m (1dS/m = 0,64‰) [47]. Đất có độ dẫn điện lớn hơn 4 dS/m ở 25^{o}C được xem là đất mặn và tương đương với nồng độ muối hòa tan khoảng 2,56‰ [49]. Clorua, Natri và Magie là các loại ion muối hòa tan phổ biến nhất xuất hiện trong đất phèn nhiễm mặn. Các loại muối này có nguồn gốc khác nhau nhưng nguồn gốc nguyên thủy của chúng là từ các thành phần khoáng của đá núi lửa. Các muối này chủ yếu là muối của các ion Cl^-, SO_4^{2-}, Ca^{2+}, Mg^{2+}, K^+, Na^+, … Tính mặn thường thấy ở đất phèn nhiễm mặn phải kể đến như có độ trương lớn, dẻo quánh khi gặp nước, mùa khô thì co lại tạo nên sự nứt nẻ [51]. Hiện tượng trương và co lại của đất là do sự xuất hiện của ion Na^+ dẫn tới khả năng tán keo trong đất của ion Na^+ và pH có khuynh hướng hơi kiềm đồng thời áp suất thẩm thấu của dung dịch cao, gây cản trở cho sự hấp thụ nước và dinh dưỡng của cây trồng [51].

1.2.3. Tính độc

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

1.2.4. Tính mất cân bằng dinh dưỡng

Mất cân bằng dinh dưỡng trong đất phèn nhiễm mặn là hệ quả của sự tương tác giữa tính axit, tính mặn và tính độc. Mất cân bằng dinh dưỡng trong đất này xuất phát từ sự giảm khả năng hấp thụ các nguyên tố cần thiết như N, P, K, Ca và Mg, trong khi một số nguyên tố như Na hoặc Al lại tăng cao vượt mức cần thiết [48]. pH thấp trong đất phèn làm tăng hàm lượng Al^{3+} và Fe^{2+} tự do, gây ức chế hấp thụ P; Sulfate trong đất phèn kết hợp với Ca^{2+}, tạo kết tủa $CaSO_4$, làm giảm sự sẵn có của Ca trong đất; Sự gia tăng Na^+ và Cl^- trong đất phèn nhiễm mặn gây ra hiện tượng cạnh tranh với các cation cần thiết như K^+, Ca^{2+}, Mg^{2+} trên bề mặt hạt đất [52]. Đất phèn nhiễm mặn thường có hàm lượng carbon hữu cơ (OC) trung bình, ảnh hưởng đến khả năng giữ dinh dưỡng và hoạt động của vi sinh vật đất [48]. Do đó, việc thiếu N, P, K sẽ gây cản trở sinh trưởng và năng suất; thiếu hụt P dẫn đến sự còi cọc và giảm khả năng phát triển rễ; thiếu Ca, Mg làm yếu cấu trúc tế bào cây, dẫn đến hiện tượng rụng hoa và quả non; Dư thừa Na, Cl gây độc cho cây, dẫn đến cháy lá, thối rễ và cuối cùng làm chết cây [52]. Từ đó, dẫn đến mất cân bằng dinh dưỡng, ảnh hưởng đến các chu trình chuyển hóa chất hữu cơ và duy trì độ phì nhiêu. Ngoài ra, việc tích tụ Na^+ gây phá vỡ cấu trúc đất, làm giảm độ thấm nước và khả năng giữ dinh dưỡng [48]. Điều này ảnh hưởng đến sinh trưởng của cây trồng, làm giảm năng suất và chất lượng nông sản.

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

Trong đất phèn nhiễm mặn, oxy hóa pyrit (FeS_2) khi thông khí tăng hoặc khi đất bị khô sinh ra H_2SO_4, hạ pH và hòa tan Al^{3+} cùng Fe^{2+}/Fe^{3+} vào dung dịch, quá trình này phụ thuộc mạnh vào cung cấp oxy, tính thấm và hoạt động vi sinh [59]. Fe^{3+} và SO_4^{2-} có thể kết tủa thành jarosit hoặc chuyển thành các pha Fe-oxy(hydr)oxit; động học hòa tan/tạo thành của các pha này điều chỉnh tốc độ phóng thích hoặc làm kết tủa Al và Fe theo chu kỳ ướt khô và biến động pH-Eh [60]. Sự hiện diện của Cl^- và Na^+ tăng mặn và khi Na^+ chiếm ưu thế trên bề mặt trao đổi, gây sodicity dẫn tới phân tán keo, giảm Ksat và kém thoát khí, từ đó làm phức tạp kiểm soát oxy hóa pyrit và tăng mặn cho thực vật. Tiếp theo, cơ chế kiểm soát dinh dưỡng của loại đất này còn thể hiện rõ qua ba tương tác chính: (1) pH kiểm soát cố định hoặc giải phóng P, ở pH thấp phosphate bị giữ mạnh bởi các oxit Al/Fe (Al-P, Fe-P) còn ở pH trung tính hoặc kiềm P dịch chuyển về pha Ca-P, nên mọi thay đổi pH (oxy hóa pyrit hoặc bón vôi) tức thì làm thay đổi P khả dụng [61, 62]; (2) điều kiện oxy hóa khử quyết định cân bằng NH_4^+, môi trường ngập, yếm khí ức chế N khiến NH_4^+ tích tụ; khi đất khô thoáng nitrification phục hồi (NH_4^+ chuyển hóa thành NO_3^-) và tăng nguy cơ mất N qua denitrification/khử nitrate [63, 64]; (3) mặn tác động trực tiếp lên tính sẵn có dinh dưỡng: độ mặn cao và ion Na^+, Cl^- gây cạnh tranh ion (Na^+ giảm lấy K^+, Ca^{2+}) và thúc đẩy kết tủa P, đồng thời ức chế vi sinh chuyển hóa N, làm giảm hấp thu dinh dưỡng [65]. Các nghiên cứu ở ĐBSCL cho thấy biến động ngập, khô làm gia tăng nồng độ Al, Fe trao đổi, biến đổi chu trình của các kim loại vết trực tiếp và làm giảm P dễ tiêu, nhấn mạnh tầm quan trọng của quản lý nước để hạn chế oxy hóa pyrit và giảm độc tính cũng như ổn định trạng thái dinh dưỡng [66, 67].

Ngoài ra, tùy thuộc vào sự hiện diện của tầng phèn và mức độ nhiễm mặn ở các độ sâu khác nhau, đất phèn nhiễm mặn còn được phân chia thành nhiều loại với các đặc tính riêng biệt [68]: Đất phèn hoạt động mặn là đất vùng ẩm ướt, thoát thủy kém đến tốt, có tầng đất thay đổi theo mùa, mất Fe, Al, bazơ nhưng giữ khoáng phong hóa. Tiêu chuẩn: không có vật liệu sulfidic trong 50 cm đất mặt, pH < 3-4, trị số n < 0,7 ở độ sâu 20-50 cm. Đặc tính bất lợi: pH thấp - gây hại trực tiếp, tăng hòa tan Al^{3+}, Fe^{2+}, Fe^{3+},

giảm lân hữu dụng. Ở pH < 3,5-4, Al^{+} gây độc chủ yếu cho lúa trên đồng ruộng; Khả năng đệm cao - pH tăng chậm dù Fe^{2+} cao, cần nhiều oxide Fe khử để nâng pH đáng kể. Al cao gây độc, triệu chứng lá vàng cam, đốm nâu, hiếm thấy do độc nhôm sớm; gây thiếu lân trầm trọng; Fe^{2+} > 300-400 ppm gây độc cho lúa; H_2S cao - ngập nước kéo dài, pH > 5, Fe^{2+} thấp dẫn đến ngộ độc H_2S do khử SO_4^{2-}, độc ở 0,1 ppm, thúc đẩy ngộ độc Fe. Ngược lại, đất phèn tiềm tàng mặn lại được tạo thành chủ yếu do vật liệu Pyrite (FeS_2), chất khoáng này thường chiếm 2 - 10% trong đất. Phần lớn đất phèn tiềm tàng mặn được phân bố dọc bờ biển, các vấn đề trở ngại chủ yếu là: độ mặn cao; khi nước biển không ngập mặn cao, đất bị oxy hóa rất mãnh liệt và gây chua; đất không có cấu trúc, chịu đựng cơ giới thấp; khả năng thấm rút cao; khó giữ nước từ thủy triều. Đặc tính vật lý, hóa học của đất phèn nhiễm mặn (hoạt động và tiềm tàng) điển hình tại Cần Giờ được trình bày ở Bảng 1.1 và 1.2.

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

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

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

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

1.4. Ảnh hưởng của đất phèn nhiễm mặn đến cây trồng

Khi tầng phèn nằm gần mặt đất, rễ cây chịu ảnh hưởng trực tiếp bởi pH thấp, phá vỡ sự hấp thu dinh dưỡng, muối hòa tan làm giảm khả năng lấy nước và gây rối loạn trao đổi ion nội bào, dẫn tới kém sinh trưởng, giảm tỷ lệ nảy mầm, hạn chế khối rễ và giảm năng suất điển hình ở lúa và rau màu. Ngoài ra, mặn và phèn làm giảm hoạt động vi sinh có ích, cố định đạm và khoáng hóa hữu cơ, thiếu hụt P, Ca, K. Vì vậy, xử lý và phục hồi độ phì đất phèn nhiễm mặn sẽ trực tiếp cải thiện sinh trưởng cây trồng, ổn định năng suất và tăng thu nhập nông hộ trong điều kiện khí hậu thay đổi [69]. Đất phèn nhiễm mặn có thể làm thay đổi carbon trong đất, chu trình dinh dưỡng và gây bất lợi cho sự phát triển của hệ sinh vật, thực vật trong đất và đe dọa các chức năng của hệ sinh thái trên cạn như sản lượng sơ cấp thuần và sự phong phú của loài [70]. Vật liệu giàu Ca^{2+} như vôi là phương pháp cải tạo loại đất này rất phổ biến, điều này hỗ trợ cho cây trồng sinh trưởng và phát triển được cải thiện hơn [71]. Đất phèn nhiễm mặn có hàm lượng lưu huỳnh tổng số rất cao (0,18 - 2,83%) dẫn đến độ chua rất thấp, SO_4^{2-} hòa tan, Al^{3+} và Fe^{3+}

khá cao, đặc biệt trong tầng đất có chứa vật liệu sinh phèn hay tầng phèn [38, 72]. Trong thực tế sự oxy hóa và khử luân phiên theo mùa càng thúc đẩy quá trình hóa chua, khi đất phèn nhiễm mặn tiềm tàng bị khai thác và xới xáo sẽ làm chuyển hóa và phát sinh lượng Fe^{3+} lớn, khi đó đất phèn nhiễm mặn tiềm tàng nhanh chóng chuyển hóa thành đất phèn nhiễm mặn hoạt động, điển hình dễ thấy ở những nơi đào kênh mương thoát nước, lên líp trồng trọt [38]. Độ mặn trong đất phèn nhiễm mặn tiềm tàng dưới rừng ngập mặn khá cao ở những phẫu diện đất phèn nhiễm mặn hoạt động, hàm lượng Cl^- có trị số cao (0,2 - 0,28%) ở tầng đất mặt [72]. Về các chỉ tiêu độ phì của đất phèn nhiễm mặn thường không cân đối, hàm lượng chất hữu cơ rất cao so với các loại đất khác, nhất là đất phèn nhiễm mặn tiềm tàng (9 - 10% OM) tầng mặt [58]. Hàm lượng đạm tổng số ở các tầng mặt vào loại giàu (0,15 - 0,25%) [58]. Hàm lượng lân tổng số ngược lại chỉ có giá trị từ nghèo đến rất nghèo (0,049%) [58]. Tình trạng trên dẫn đến sự thiếu hụt nghiêm trọng lân dễ tiêu trong đất. Vì vậy, cây trồng trên nên nền đất này thường còi cọc, tốc độ sinh trưởng và phát triển chậm, dễ chết nếu độ mặn quá cao. Tầng sinh phèn và tầng phèn rất nông chỉ cách mặt đất vài chục cm, nhiều nơi phát hiện ngay ở tầng mặt, hàm lượng lưu huỳnh (vật liệu sinh phèn) và độc tố Fe^{3+}, Fe^{2+}, Al^{3+} rất cao [51]. Đây là một hạn chế lớn đòi hỏi khi khai thác phải có một quy trình kỹ thuật chặt chẽ, mà điều trước hết là tránh xới xáo, tránh sự thoát thủy ở tầng chứa vật liệu sinh phèn. Đặc biệt cần lưu ý đối với khai thác nguồn tài nguyên hệ thực vật đa dạng như: hệ thực vật rừng tự nhiên (Chà là, Ráng, Giá, Mắm, Dà vôi, …) tất cả đều sống trên vùng đất ít ngập nước và hệ thực vật rừng trồng (Chà là và Ráng, Dừa lá) trồng ở vùng đất phèn nhiễm mặn và nước lợ [35, 37]. Vì vậy, cần có các nghiên cứu và cải tạo các thành phần hóa học của đất phèn nhiễm mặn làm hạn chế sự sinh trưởng của cây trồng đồng thời đề xuất được các hướng sử dụng đất phèn nhiễm mặn một cách hiệu quả nhất.

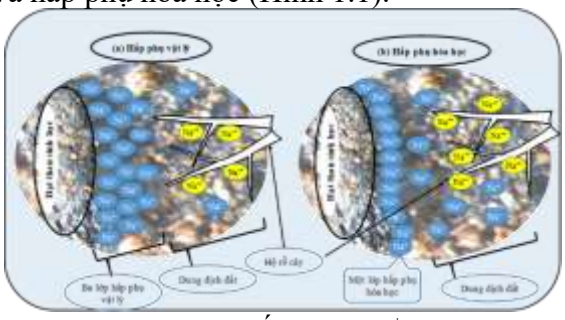
1.5. Các giải pháp cải tạo và sử dụng đất phèn nhiễm mặn

Giải pháp phổ biến nhất trong cải tạo đất phèn nhiễm mặn được áp dụng là rửa đất, khi nước vào ngập đất và sau đó cho mức nước hạ dần xuống, nước chảy ra khỏi đất sẽ mang theo các chất muối và các độc tố như Al và Fe cũng như lượng H^+ trao đổi, SO_4^{2-} [35]. Ngoài ra, một trong những phương pháp cải tạo hiệu quả mà ít tốn kém chính là bón vôi. Vôi vừa cung cấp canxi cho cây vừa có khả năng cải tạo đất chống mặn, chống chua [73]. Đặc biệt, vôi nông nghiệp có tác dụng cải tạo đất thông qua khả năng hạ phèn, khử chua cho đất [74]. Giải pháp tiếp theo không kém bón vôi đó là bón phân hữu cơ, bón phân hữu cơ vào đất sẽ làm tăng độ màu mỡ, tơi xốp cho đất bằng cách cung cấp chất hữu cơ, mùn và dinh dưỡng [78]. Phân hữu cơ gồm hai loại: truyền thống (phân rác, phân xanh, phân chuồng) và chế biến công nghiệp (phân hữu cơ sinh học, vi sinh, hữu cơ-khoáng, phân bón lá) [15]. Bên cạnh đó, biện pháp nhằm khai thác và sử dụng đất phèn nhiễm mặn một cách hiệu quả nhất là bố trí cây trồng thích hợp [49]. Cuối cùng, các giải pháp sử dụng hiệu quả cho đất phèn nhiễm mặn bao gồm lên luống trong mùa khô, rửa mặn đầu mùa mưa và trồng lúa ở vùng phù sa thấp ngập mặn theo triều. Với đất phèn nhiễm mặn theo thời kỳ, trồng lúa trong mùa mưa và nuôi tôm trong mùa khô. Đất vừa có phèn và mặn, các mô hình tôm-lúa, lúa-cá, hoặc rừng ngập mặn phát huy hiệu quả rõ rệt.

1.6. Giải pháp cải tạo bằng than sinh học

Than sinh học (Biochar) được tạo ra bằng phương pháp nhiệt phân sinh khối trong môi trường yếm khí, mang lại một vật liệu giàu carbon với cấu trúc ổn định có khả năng tồn tại trong đất hàng nghìn năm [81]. Với hàm lượng carbon cao và cấu trúc xốp đặc trưng, than sinh học giúp tăng khả năng giữ nước và dưỡng chất của đất, đồng thời tạo môi trường thuận lợi cho vi khuẩn có lợi phát triển. Khi được bón vào đất, than sinh học tạo ra những thay đổi đáng kể về lý tính và hóa tính, qua đó tác động trực tiếp đến các đặc tính và điều kiện sinh trưởng của vi sinh vật trong đất [84]. Đặc biệt, khi kết hợp than sinh học với phân hữu cơ, quá trình hóa mùn được thúc đẩy mạnh mẽ, mang lại hiệu quả cải tạo đất vượt trội. Sự phát triển hệ vi sinh vật hữu ích khu trú trên than sinh học, góp phần cải thiện cân bằng vi sinh học đất theo hướng có lợi, quyết định đến năng suất cây trồng và hệ sinh thái đồng ruộng [85]. Việc kết hợp các vật liệu hữu cơ và vô cơ, chẳng hạn như vôi, phân chuồng và phân hỗn hợp, giúp tăng tốc quá trình rửa trôi các muối hòa tan khỏi bề mặt đất, qua đó giảm độ dẫn điện (EC) của đất. Than sinh học đóng vai trò quan trọng trong việc cải thiện độ xốp và khả năng dẫn thủy lực của đất [86]. Thực nghiệm đã chứng minh rằng EC của đất mặn giảm lần lượt 84%, 83%, và 82% khi sử dụng than sinh học, phân trộn chất rắn sinh học, và chất thải xanh phân trộn, so với đất đối chứng không bổ sung than sinh học [87]. Ngoài ra, than sinh học còn ảnh hưởng đến khả năng hấp phụ ion, giúp giữ lại muối trên bề mặt và trong các lỗ xốp mịn, làm giảm nồng độ muối trong dung dịch đất. Điều này cũng hạn chế sự di chuyển lên của dung

dịch muối trong đất, đồng thời lớp vỏ của than sinh học làm giảm sự bốc hơi, từ đó ngăn chặn tích tụ muối ở tầng đất mặt [88]. Than sinh học được nghiên cứu khá nhiều về việc làm giảm nồng độ kim loại nặng trong các môi trường như nước, đất khác nhau, tùy thuộc vào từng nguyên tố kim loại nặng như asen (As), crom (Cr), cadimi (Cd), chì (Pb), thủy ngân (Hg) [89]. Mặc dù vậy, khả năng hấp phụ và tiềm năng hấp phụ muối của than sinh học lại có ít nghiên cứu quan tâm, ví dụ một nghiên cứu sơ khởi của nhóm tác giả Akhtar, Andersen and Liu [90]. Muối có thể được hấp phụ trên bề mặt của than sinh học theo hai dạng hấp phụ vật lý và hấp phụ hóa học (Hình 1.1).



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

Mức độ hấp phụ muối thay đổi tùy thuộc vào loại than sinh học và thời gian tồn lưu hoặc phân hủy của chúng, các muối này có thể bị giải phóng trở lại vào dung dịch đất theo thời gian, thông qua các lỗ rỗng của than sinh học [86]. Sự gia tăng pH của đất khi sử dụng than sinh học thường xảy ra trên đất có pH thấp (dưới 5,5), trong khi pH của than sinh học là khoảng 7.0 [91]. Sự thay đổi pH này có thể được giải thích nhờ vào khả năng trao đổi cation cao của than sinh học, giúp thúc đẩy sự hấp thụ các cation cần thiết cho sự phát triển của cây như K^+, Ca^{2+} và Mg^{2+}. Kết quả là, để cân bằng điện tích, rễ cây sẽ giải phóng ion H^+ trao đổi, làm tăng pH của đất [91]. Vai trò của than sinh học đối với cải thiện sinh trưởng của đất có thể được khái lược như Hình 1.2.



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

Với những đặc tính vượt trội, than sinh học có thể được sử dụng để cải tạo đất phèn nhiễm mặn, giảm độ mặn và thúc đẩy sự phát triển của cây trồng thông qua khả năng hấp phụ Na^+ lên bề mặt của các lỗ xốp mịn [92, 93]. Đồng thời, việc ứng dụng than sinh học trong điều kiện đất mặn còn giúp cải thiện khả năng cung cấp nước và dưỡng chất, từ đó tăng cường khả năng nảy mầm của hạt giống [94]. Tác động của than sinh học đến sự phát triển của cây trồng trong đất mặn phụ thuộc vào từng loài thực vật cụ thể [82]. Một số than sinh học phổ biến bao gồm than trấu, than nhãn, than dừa và than mía, … mỗi loại có những đặc tính riêng biệt tùy thuộc vào nguồn nguyên liệu và điều kiện sản xuất. Trong đó, than trấu là sản phẩm từ vỏ trấu - một phế phụ phẩm nông nghiệp phổ biến tại Việt Nam, đặc biệt ở các vùng chuyên canh lúa. Với sản lượng vỏ trấu hàng năm lên đến hàng triệu tấn, than trấu trở thành lựa chọn phù hợp, khả thi về mặt kinh tế và thực tiễn. Nhờ nguồn nguyên liệu dồi dào và giá thành thấp, việc sử dụng than trấu không chỉ góp phần tái chế phế phẩm mà còn giải quyết vấn đề xử lý môi trường hiệu quả [95]. Với thành phần hóa học giàu carbon (~60-80%), silic dioxide, và các nguyên tố vi lượng như kali, magiê, than trấu có pH kiềm (8-10), cấu trúc xốp và diện tích bề mặt lớn, giúp cải thiện tính chất lý hóa của đất. Than trấu đóng vai trò quan trọng trong việc cải tạo đất phèn nhiễm mặn, nhờ khả năng giảm độc tính của kim loại nặng, cải thiện cấu trúc và khả năng giữ nước của đất, đồng thời điều chỉnh pH và giảm nồng độ muối trong đất. Ngoài ra, than trấu còn hỗ trợ tối ưu hóa hiệu quả phân bón bằng cách hấp thụ

và giải phóng chất dinh dưỡng dần dần. Việc bổ sung than trấu không chỉ nâng cao năng suất cây trồng trên đất phèn mà còn giảm thiểu phát thải khí nhà kính như CH_4 và N_2O, góp phần thúc đẩy nông nghiệp bền vững [96]. Nói tóm lại, than sinh học nói chung và than trấu nói riêng là một chất tiềm năng trong việc cải thiện đất phèn nhiễm mặn. Tuy nhiên, các nghiên cứu cho đến thời điểm hiện tại vẫn còn chưa đầy đủ và cần có nhiều các nghiên cứu hơn trong việc ứng dụng than sinh học cải tạo đất phèn nhiễm mặn phục vụ phát nông nghiệp triển bền vững.

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

Phân tích phương sai (ANOVA) là một phương pháp nền tảng trong thống kê ứng dụng, được sử dụng phổ biến để kiểm định sự khác biệt có ý nghĩa giữa các nhóm xử lý đối với từng chỉ tiêu đất [97]. Các phân tích này thường được thực hiện bằng phần mềm thống kê chuyên dụng như JMP Pro, vốn tích hợp khả năng xử lý linh hoạt các mô hình tuyến tính, kiểm tra giả định phân phối, xây dựng biểu đồ và mô hình hóa tương tác [98]. Phân tích thành phần chính (Principal Component Analysis - PCA) và phân tích nhân tố (Factor analysis - FA) là các phương pháp đa biến quan trọng, được sử dụng để xác định mối liên hệ giữa các chỉ tiêu đất, giảm chiều dữ liệu và chọn lọc các chỉ tiêu đại diện. PCA giúp rút gọn số lượng biến mà vẫn giữ lại phần lớn thông tin trong dữ liệu, trong khi FA hỗ trợ nhận diện các nhóm chỉ tiêu có bản chất chức năng tương đồng [99]. Những phân tích này là bước nền quan trọng trong việc xây dựng chỉ số chất lượng đất (Soil Quality Index - SQI). Chỉ số chất lượng đất (SQI) là công cụ tích hợp giúp đánh giá chức năng sinh thái của đất dựa trên các chỉ tiêu hóa - lý - sinh học. Phương pháp xây dựng SQI thường bao gồm: lựa chọn chỉ tiêu đầu vào (qua PCA/FA), chuẩn hóa giá trị, và tổng hợp theo mô hình cộng hoặc nhân có trọng số [100]. Ngoài ra, một số nghiên cứu cũng phát triển chỉ số thành phần (component SQI) để đánh giá từng nhóm chức năng như dinh dưỡng, điều hòa pH, chống mặn hoặc duy trì sinh khối vi sinh vật [101]. Bên cạnh đó, phân tích tương quan đơn biến (ví dụ hệ số Pearson, Spearman) và hồi quy bội được ứng dụng để làm rõ mối liên hệ giữa các chỉ tiêu đất hoặc giữa các yếu tố xử lý và năng suất cây trồng. Các phân tích này đóng vai trò quan trọng trong việc xác định các yếu tố ảnh hưởng chính cũng như xây dựng mô hình dự báo [99]. Ngoài các phân tích định lượng, phân tích SWOT (Strengths - Weaknesses - Opportunities - Threats) cũng là công cụ hữu ích để đánh giá tổng thể các yếu tố kỹ thuật, kinh tế - xã hội và môi trường liên quan đến việc áp dụng các giải pháp cải tạo đất. Đây là phương pháp có ý nghĩa đặc biệt trong các nghiên cứu có định hướng ứng dụng và chuyển giao công nghệ, giúp xác định tiềm năng nhân rộng và những rào cản cần khắc phục [102].

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

Tổng quan cho thấy các giải pháp hiện hành cho đất phèn nhiễm mặn như rửa mặn, quản lý mực nước, bón vôi, bổ sung phân hữu cơ, chọn giống chịu mặn hoặc phèn, tách cơ học pyrit chỉ mang lại hiệu quả cục bộ và thường được triển khai riêng lẻ. Những biện pháp này hoặc tập trung vào trung hòa chua (vôi), hoặc cải thiện dinh dưỡng (hữu cơ), hoặc hạ muối nhờ thủy lợi nhưng do đó chưa giải quyết đồng thời bốn nhóm hạn chế trọng yếu: (i) pH thấp, (ii) mặn, (iii) độc tính Al^{3+}/Fe^{2+}–$^{3+}$ và (iv) mất cân bằng dinh dưỡng (thiếu N-P-K, CEC thấp). Bên cạnh đó, ít nghiên cứu cơ chế về biến đổi P (chuyển hóa Al-P/Fe-P thành Ca-P), sự thay đổi CEC/pH của đất khi áp dụng các vật liệu cải tạo. Đặc biệt, khoảng trống quan trọng là thiếu thử nghiệm tổ hợp để khai thác hiệu ứng cộng hưởng giữa các vật liệu cải tạo đất. Vì vậy, nghiên cứu này được thực hiện theo hướng nghiên cứu mới tập trung vào hai tổ hợp chính: (1) than sinh học (than trấu) kết hợp vôi và (2) than sinh học kết hợp phân hữu cơ. Mục tiêu là cải tạo đồng thời chua - mặn - độc - dinh dưỡng trên nền cơ chế bổ sung và tương hỗ: vôi tạo "đòn bẩy" pH và kết tủa hoặc giảm Al-Fe trao đổi; than sinh học cung cấp bề mặt kiềm, tăng CEC, hỗ trợ mặn; phân chuồng bổ sung N-P-K. Cách tiếp cận này lấp đầy khoảng trống tri thức về tác dụng cộng hưởng giữa vật liệu kiềm vô cơ và vật liệu carbon xốp, qua đó chuyển từ xử lý "đơn điểm" sang đa mục tiêu cải thiện đặc tính hóa học cho đất phèn nhiễm mặn. Kết quả dự kiến làm cơ sở cho hướng dẫn kỹ thuật và ra quyết định ở quy mô đồng ruộng, đồng thời tận dụng phế phụ phẩm địa phương (vỏ trấu, phân chuồng) để giảm chi phí và phát thải. Ý nghĩa rộng hơn là đóng góp vào nông nghiệp thích ứng khí hậu, nâng cao an ninh lương thực và chất lượng môi trường đất ở các vùng ven biển có đất phèn, mặn tương đồng.

CHƯƠNG 2 NỘI DUNG VÀ PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

2.1. Nội dung nghiên cứu

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

Để xây dựng giải pháp cải tạo đất phèn nhiễm mặn, nghiên cứu đã khảo sát hiện trạng và hiệu quả sử dụng đất phèn nhiễm mặn tại khu vực nghiên cứu điển hình và các đặc tính hóa học của đất phèn nhiễm mặn nhằm đánh giá chất lượng và tác động tiêu cực của chúng.

Nội dung 2: Khảo sát, đánh giá tác động của than trấu, vôi và phân bò đến các đặc tính hóa học của đất phèn nhiễm mặn

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

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

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

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

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

2.2. Phương pháp nghiên cứu

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

Tại Cần Giờ, 135 phiếu được thu thập từ 4 mô hình canh tác: lúa mùa, lúa-tôm, trồng xoài và nuôi tôm. Tại Kiểng Phước, 150 phiếu được thu thập từ 3 mô hình canh tác: trồng lúa, cây cạn và đất tự nhiên. Dữ liệu được xử lý bằng Excel, khảo sát, đánh giá hiệu quả kinh tế đối với việc sử dụng đất cho sản xuất nông nghiệp tại cả hai địa phương.

Lấy mẫu đất: Mẫu đất được thu thập theo TCVN 7538-1:2006 và TCVN 7538-2:2005. Tại mỗi ruộng, đất được lấy từ 5 điểm chéo góc, tổng 3 kg đất tươi, sau đó phơi khô, nghiền và rây qua rây có kích thước 2 mm để phân tích. Tại huyện Cần Giờ (TP. HCM), 136 mẫu đất được lấy từ 2 tầng (0-30 cm và 30-60 cm) trên 5 loại hình sử dụng đất: trồng cây hằng năm khác, trồng cây lâu năm, trồng lúa, nuôi trồng thủy sản và đất tự nhiên trong 2 tháng (tháng 7, 8 năm 2022). Bản đồ vị trí lấy mẫu được thể hiện tại Hình 3.1 - Phụ lục 3. Kết quả đánh giá đặc tính đất phèn nhiễm mặn ở các loại hình sử dụng giúp xác định sự biến đổi tính axit, mặn, độc và dinh dưỡng theo tầng đất, làm cơ sở đề xuất giải pháp cải tạo, ứng dụng cho lúa và rau màu.

Phân tích hóa học: Các chỉ tiêu hóa học cần phân tích gồm pH, SO_4^{2-}, độ chua, H^+ trao đổi, EC, Cl^-, Na trao đổi, Al, Fe, Mn trao đổi, CEC, P, OC, NH_4^+, K, Ca, Mg trao đổi (Bảng 2.1; ngoài ra, các phương pháp chi tiết hơn được mô tả tại Bảng 1.1 - Phụ lục 1.

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

TT	Chỉ tiêu	Đơn vị	Mục đích	Phương pháp	Ghi chú
I	Các chỉ tiêu chất lượng đất: Đánh giá mức độ chua, khả năng giữ dinh dưỡng và độc tố trong đất				
1	pH	-	Xác định độ axit, ảnh hưởng đến cây trồng và khả năng hấp thu dinh dưỡng.	Đo bằng máy đo pH	TCVN 5979:2007
2	EC	dS/m	Đánh giá mức độ mặn của đất, ảnh hưởng đến quá trình hút nước.	Đo bằng máy đo EC. Tỷ lệ trích đất:nước 1:5 (w/v)	TCVN 8567:2010
3	CEC	cmol(+)/kg	Xác định khả năng giữ và cung cấp dinh dưỡng.	Tách chiết $BaCl_2$	[103]
4	Độ chua trđ	cmol(+)/kg	Đánh giá tổng lượng axit có thể trao đổi trong đất.	Chuẩn độ	[103]
5	P dễ tiêu	mg/kg	P thường bị Fe, Al cố định trong đất phèn, cần xác định mức độ cho cây.	Mehlich-1 P	TCVN 8661: 2011 [103]

TT	Chỉ tiêu	Đơn vị	Mục đích	Phương pháp	Ghi chú
6	NH_4^+	g/kg	Xác định nguồn cung cấp nitơ cho cây trồng.	So màu bằng máy UV-VIS	[104]
7	H^+ trao đổi	cmol(+)/kg	Đo lượng ion H^+ góp phần tạo độ chua của đất.	Chuẩn độ	[103]
8	OC	%	Xác định lượng chất hữu cơ trong đất, ảnh hưởng đến độ phì nhiêu.	Walkley Black	TCVN 8941:2011
II	Anion: Đánh giá các ion chính gây nhiễm mặn và ảnh hưởng đến tính chất hóa học của đất.				
9	Cl^-	g/kg	Ion chính gây nhiễm mặn, ảnh hưởng đến khả năng hút nước của cây.	Chuẩn độ	[105]
10	SO_4^{2-}	g/kg	Thành phần đặc trưng trong đất phèn, liên quan đến quá trình oxy hóa pyrite.	Đo độ đục	[106]
III	Kim loại: Đánh giá sự hiện diện của các kim loại ảnh hưởng đến sinh trưởng cây trồng và độ phì đất.				
11	Fe trao đổi	mg/kg	Gây độc, làm kết tủa lân, ảnh hưởng đến hấp thu dinh dưỡng.	Phương pháp tách chiết bằng $BaCl_2$ và đo bằng thiết bị ICP-OES (Inductively Coupled Plasma Spectroscopy Optical Emission Spectrometer)	[103]
12	Al trao đổi		Ion độc gây ức chế rễ cây, thường xuất hiện nhiều trong đất phèn.		
13	Mn trao đổi		Gây ngộ độc cho cây khi tích tụ ở mức cao.		
14	Ca trao đổi		Trung hòa độ chua, cải thiện cấu trúc đất.		
15	Mg trao đổi		Cần thiết cho quang hợp, nhưng có thể bị cạnh tranh với Ca, K.		
16	K trao đổi		Dinh dưỡng quan trọng, giúp cây chịu hạn và nhiễm mặn tốt hơn.		
17	Na trao đổi		Xác định mức độ nhiễm mặn của đất, ảnh hưởng đến cấu trúc đất và sinh trưởng của cây.		

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

Phân tích thống kê: Các số liệu được xử lý thống kê suy luận và mô tả (tùy theo từng trường hợp cụ thể). Thống kê mô tả bao gồm việc tính giá trị trung bình, giá trị cao nhất, thấp nhất cũng như sai số chuẩn. Thống kê suy luận, ví dụ tương quan tuyến tính hoặc phi tuyến tính, được dùng để khảo sát mối liên hệ giữa các chỉ số đo (EC và pH với lượng hấp phụ cũng như nồng độ trong đất, trong dung dịch). Phân tích phương sai (ANOVA) một hoặc hai chiều được dùng để đánh giá các ảnh hưởng đơn lẻ hoặc tương tác giữa các loại vật liệu và nồng độ hay tỷ lệ áp dụng đối với lượng hấp phụ cũng như nồng độ trong dung dịch hoặc trong đất.

Phân tích thành phần chính/nhân tố (PCA/FA): Phân tích này được sử dụng để xác định trọng số (w_i) của các thông số đất riêng lẻ theo quy trình được mô tả bởi [107]. Các nhân tố có giá trị riêng lớn hơn 1 được giữ lại để ước tính trọng số của các thông số đất có tải lượng cao (> 0,5) với hệ số tương ứng.

Tính chỉ số chất lượng đất (SQI)

Chỉ số Chất lượng đất (SQI) được tính toán theo phương pháp phân tích thành phần/nhân tố chính [107] sử dụng phương trình như sau 2.1.

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

Trong đó n là số lượng các thông số đất; w_i là trọng số của tham số thứ i và s_i là giá trị của tham số thứ i. w_i được xác định bằng cách sử dụng phân tích thành phần/nhân tố chính và s_i được xác định thông qua phương trình 2.2 và 2.3. Mười bảy thông số đất đã phân tích được chia thành hai nhóm là "cao tốt hơn" và "thấp tốt hơn". Các thông số trong nhóm "cao tốt hơn" bao gồm pH, Ca, K, Mg, P dễ tiêu, CEC, NH_4-N, OC; các thông số trong nhóm "thấp tốt hơn" gồm phần còn lại. Đối với nhóm "cao tốt hơn", s_i được xác định theo phương trình 2.2.

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

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

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

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

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

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

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

Phân tích phương sai và tương quan: Tất cả cả số liệu sau thí nghiệm đều được phân tích phương sai theo kiểu bố trí thí nghiệm hoàn toàn ngẫu nhiên một yếu tố. Kết quả phân tích phương sai nếu có ý nghĩa thống kê thì trắc nghiệm Tukey's Honest Significant Difference test được sử dụng để phân hạng trung bình của các nghiệm thức. Phân tích tương quan đa biến giữa khoảng cách (km) tính từ bờ biển trở vào với các chỉ số chất lượng đất thành phần (chỉ số chất lượng đất tính axit, tính mặn, tính độc và tính dinh dưỡng) được áp dụng để xác định khoảng cách nào có ảnh hưởng đến các chỉ số chất lượng đất thành phần ở 2 tầng đất ứng với 5 loại hình sử dụng đất tại khu vực nghiên cứu. Bên cạnh đó, phương pháp phân tích tương quan đa biến loại dần từng bước (Stepwise backward elimination) được áp dụng để xác định mô hình đa biến có ý nghĩa thống kê. Dựa vào phương trình này, phần trăm đóng góp của biến số độc lập (khoảng cách từ tính từ bờ biển vào đất liền) đối với tổng biến thiên của biến số phụ thuộc (các chỉ số chất lượng đất thành phần) được xác định.

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

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

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

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

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

Kiểu bố trí thí nghiệm hoàn toàn ngẫu nhiên với 3 loại than, 5 tỷ lệ than với 4 lần lặp lại và không trồng cây trên các nghiệm thức. 15 nghiệm thức thí nghiệm với 4 lần lặp tương ứng với 60 chậu. Các nghiệm thức từ 1 đến 6 sử dụng than trấu tương ứng với các tỷ lệ 0; 0,7; 1,5; 3 và 6% [109]. Tương tự, các nghiệm thức từ 6 đến 10 đối với than dừa và từ 11 đến 15 với than nhãn cũng lần lượt tương tứng với các tỷ lệ sử dụng như than trấu (Bảng 2.1 - Phụ lục 2). Tổng số chậu thí nghiệm là 15 × 4 = 60 chậu. Cuối cùng, tưới ngập tất cả các chậu bằng nước cất, giữ mức nước ngập 5 cm, tưới bổ sung ít nhất 1 lần/ngày và ủ liên tục trong vòng 100 ngày. Lấy mẫu đất để phân tích các thành phần hóa học sau 100 ngày ủ. Mẫu đất sau khi thu được phơi khô trong không khí và giã mịn, rây qua rây có kích thước 2 mm để phân tích hóa học. Đất trước và sau thí nghiệm được phân tích các thông số như ở nội dung 1 (Bảng 2.1) trừ OC và NH_4^+. Các phương pháp tính toán và phân tích số liệu thực hiện như ở ND1.

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

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

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

Vật liệu: Đất thí nghiệm được lấy từ xã Bình Khánh, huyện Cần Giờ, thành phố Hồ Chí Minh là khu vực điển hình có đất phèn nhiễm mặn được canh tác lúa, với EC = 5-6 dS/m (nằm trong ngưỡng đặc trưng của đất phèn nhiễm mặn), đất này được phân loại là đất phèn nhiễm mặn (Salic Thionic Fluvisol) theo hệ thống phân loại của WRB [108]. Khối lượng đất lấy 300 kg đảm bảo đủ cho thí nghiệm, giúp giảm sai số do tính không đồng nhất của đất; Vật liệu cải tạo: Than trấu (mua tại Công ty TNHH Sản xuất Thương mại Dịch vụ Đặng Gia Trang), vôi nông nghiệp (pH = 13) và phân bò (phơi khô tự nhiên) được mua ở cửa hàng bán vật tư nông nghiệp gần khu vực nghiên cứu.

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

Than trấu (tỷ lệ 1,1%): 10 tấn/ha (kết quả từ thí nghiệm 1); Liều lượng bón vôi khuyến cáo dùng là 1-5 tấn/ha. Đặc tính của đất phèn nhiễm mặn có pH từ thấp đến rất thấp (2-5). Trong thí nghiệm này, liều lượng đã sử dụng là 1 tấn/ha với pH = 13. Trong thí nghiệm này, liều phân bò: 10 tấn/ha.

Thí nghiệm được bố trí theo kiểu hoàn toàn ngẫu nhiên 2 yếu, gồm 12 nghiệm thức (NT) thí nghiệm với 4 lần lặp lại, tương ứng 48 chậu. Ở chế độ nước tưới ngập, các NT từ 1 đến 3 thuộc nhóm không sử dụng than trấu (yếu tố 1), trong đó: NT1 - đối chứng (không sử dụng bất kỳ vật liệu nào), NT2 - chỉ bón bôi, NT3 - chỉ bón phân bò; các NT từ 4 đến 6 thuộc nhóm có sử dụng than trấu (yếu tố 2), trong đó: NT4 - chỉ bón than trấu, NT5 - bón than trấu kết hợp vôi, NT6 - bón than trấu kết hợp phân bò. Ở chế độ nước độ ẩm 60%, các nghiệm thức được mô tả tương tự với các nghiệm thức được đánh số thứ tự từ 7 đến 12 (Bảng 2.2 - Phụ lục 2). Hai chế độ nước tưới được áp dụng cho các chậu: Tưới ngập nước: 24 chậu thuộc các nghiệm thức từ 1 đến 6, giữ mức nước ngập 5 cm và tưới bổ sung ít nhất 1 lần/ngày; Độ ẩm 60%: 24 chậu thuộc các nghiệm thức từ 7 đến 12, duy trì độ ẩm đất ở mức 60% (Hình 3.3 - Phụ lục 3) được xác định thông qua việc cân toàn bộ chậu (bao gồm chậu, đất, than, nước 60%). Thí nghiệm kéo dài 100 ngày, tương đương một vụ lúa ngắn ngày (3-3,5 tháng) hoặc hai vụ rau màu (45-50 ngày mỗi vụ). Thời gian này đủ dài để các vật liệu cải tạo (vôi, than sinh học, phân bò) tương tác với đất, giúp ổn định pH, giảm độc tố (như Al, Fe), và cải thiện các tính chất vật lý, hóa học của đất. Mục tiêu là đánh giá hiệu quả của các NT cải tạo trong một chu kỳ canh tác thực tế. Sau 100 ngày tiến hành lấy mẫu đất để phân tích các thành phần hóa học. Cách thu và phơi mẫu đất được thực hiện tương tự như Thí nghiệm 1. Đất trước và sau thí nghiệm được phân tích các thông số như ở ND1 (Bảng 2.1).

Phân tích các thành phần Al trong đất phèn nhiễm mặn (đánh giá tình trạng đất, xác định các biện pháp cải tạo và quản lý đất hiệu quả, đảm bảo cây trồng phát triển tốt và nâng cao hiệu quả sản xuất nông nghiệp). Năm thành phần của kim loại nhôm (Al) trong 48 mẫu đất được phân tích bằng phương pháp chiết các thành phần Al trong đất đơn lẻ [118]. Các nhóm Al gồm: $Al_{trđ}$ - Al trao đổi (KCl 1M), Al_{lky} - Al liên kết yếu với chất hữu cơ ($CuCl_2$ 0,5M - pH = 2,8), Al_{lkb} - Al liên kết bền với chất hữu cơ (Na-pyrophotphate 0,1M - pH = 10), $Al_{vđh}$ - Al vô định đình (Amoni oxalate 0,2M - pH = 3), Al_{kt} - Al kết tinh (NaOH 0,5M). Các thành phần Al sau khi được tách chiết sẽ được đo bằng thiết bị ICP-OES (Inductively Coupled Plasma Spectroscopy Optical Emission Spectrometer).

Các phương pháp tính toán và phân tích số liệu thực hiện như ở ND1.

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

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

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

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

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

Các liều lượng phối trộn của than trấu, vôi và phân bò sử dụng trong thí nghiệm này được lựa chọn và thực hiện tương tự như ở nội dung 2 (Thí nghiệm 2). Tiếp theo, nhằm đảm bảo độ tin cậy và khả năng suy rộng khi đánh giá hiệu quả cải tạo của vật liệu lên đất phèn nhiễm mặn trồng lúa, thí nghiệm đồng ruộng đã được bố trí theo kiểu khối đầy đủ ngẫu nhiên (RCBD) với 2 yếu tố, 6 nghiệm thức (NT) và 4 lần lặp lại, tổng cộng 24 ô thí nghiệm. Các NT từ 1 đến 3 thuộc nhóm không sử dụng than trấu (yếu tố 1), trong đó: NT1 - đối chứng (không sử dụng bất kỳ vật liệu nào), NT2 - chỉ bón bôi, NT3 - chỉ bón phân bò; các NT từ 4 đến 6 thuộc nhóm có sử dụng than trấu (yếu tố 2), trong đó: NT4 - chỉ bón than trấu, NT5 - bón than trấu kết hợp vôi, NT6 - bón than trấu kết hợp phân bò (Bảng 2.3 - Phụ lục 2). Mỗi ô có diện tích 12 m^2 (3 m × 4 m) [119] phù hợp để đánh giá hiệu quả phân bón và vật liệu cải tạo đất trên lúa, đồng thời thuận tiện cho quản lý nước và thu thập số liệu về sinh trưởng và năng suất. Giữa các ô thí nghiệm, mương nước rộng 1 m được thiết kế nhằm cách ly vật lý, hạn chế sự di chuyển ngang của nước, muối và chất dinh dưỡng (Hình 3.4 - Phụ lục 3).

Thí nghiệm này thực hiện với một vụ lúa, các vật liệu cải tạo gồm than trấu, vôi và phân bò được áp dụng một lần vào đầu vụ. Các vật liệu này được rải đều trên diện tích bề mặt đất của từng ô cơ sở, sau đó sẽ được vùi vào đất tầng 0-10 cm bằng cuốc tay. Giống lúa sử dụng cho thí nghiệm này là Ba Bụi được cấy

vào đầu vụ. Các cây lúa nảy mầm (mạ) được cấy vào các ô cơ sở với mật độ giống nhau (25 cây/m^2). Tất cả ô thí nghiệm được quản lý đồng nhất theo khuyến nghị kỹ thuật địa phương như quản lý nước giữ mực 3-5 cm giai đoạn sinh trưởng, tháo bớt nước 7-10 ngày trước thu hoạch. Làm cỏ bằng cách nhổ tay, chỉ phun hóa học khi vượt ngưỡng gây hại theo khuyến cáo kỹ thuật địa phương (thí nghiệm này không phun hóa học).

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

Phân tích các chỉ tiêu hóa học đối với mẫu đất (trước và sau thí nghiệm) tương tự như nội dung 1 (Bảng 2.1). Thành phần nguyên tố trong rễ, rơm và hạt của lúa: Mẫu rễ, rơm và hạt của lúa được lấy và phân tích các nguyên tố chính. Thành phần muối phân tích bao gồm Na, Ca, Mg K, Al, Fe và Mn và các dinh dưỡng chính là N và P. Mẫu rễ, rơm và hạt của lúa được phơi khô, nghiền và rây qua rây có kích thước 20 micro để phân tích hóa học [120, 121]. N tổng trong thân lá được đo bằng phương pháp Kjeldahl [122]. Hàm lượng các nguyên tố Na, P, K, Ca, Mg, Al, Fe và Mn được xác định bằng phương pháp của Isaac and Johnson [123].

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

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

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

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

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

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

Tương tự như thí nghiệm 3, thí nghiệm trên cải thìa cũng được bố trí theo kiểu khối đủ ngẫu nhiên (RCBD) với 2 yếu tố, 6 nghiệm thức và 4 lần lặp lại, tổng cộng có 24 ô (Bảng 2.4 - Phụ lục 2). Các nghiệm thức được mô tả tương tự như thí nghiệm 3. Diện tích ô trong thí nghiệm này đã được điều chỉnh phù hợp với cải thìa và điều kiện đồng ruộng. Diện tích mỗi ô là 9 m^2 (1,8 m × 5 m), khoảng cách giữa các ô là 0,5 m, chiều cao ô là 0,3 m. Sơ đồ thí nghiệm được trình bày tại Hình 3.5 - Phụ lục 3.

Cải thìa được trồng trong hai vụ liên tục. Than trấu, vôi và phân bò được áp dụng một lần, rải đều trên bề mặt đất và vùi vào tầng đất 0-10 cm bằng cuốc tay. Khi kết thúc mỗi vụ, thân lá và sinh khối rễ được thu trên từng ô thí nghiệm, sấy khô và cân khối lượng. Sinh khối trên bề mặt đất (thân lá) và rễ được đo trong khung có diện tích 1 m^2 (1 m × 1 m). Mỗi ô cơ sở bố trí năm khung lớn mỗi khung có diện tích là 1 m^2 với mật mộ đồng đều và toàn bộ sinh khối trên bề mặt đất sẽ được lấy. Các mẫu sinh khối này sẽ được phơi khô và cân trọng lượng. Đối với sinh khối rễ: bố trí một khung gỗ, mỗi khung gỗ có kích thước 0,2 m × 0,2 m sẽ được sử dụng để định vị vị trí lấy mẫu. Hai khung nhỏ trên mỗi khung lớn sẽ được định vị, toàn bộ rễ (độ sâu khoảng 0-10 cm) trên hai khung này sẽ được lấy, rửa sạch, phơi khô và cân trọng lượng. Mẫu đất được

lấy từ mỗi ô thí nghiệm vào cuối vụ được lấy ở lớp 0-10 cm trên cùng từ 10 khung nhỏ của mỗi ô trộn lại (sau khi đã tách rễ). Một mẫu đất tổng hợp được thu thập từ 10 điểm phụ trong 10 khung nhỏ lấy mẫu rễ. Khối lượng đất được lấy tại mỗi ô thí nghiệm, các thao tác như phơi khô, nghiền, lưu trữ, bảo quản; Phân tích các chỉ tiêu hóa học đối với mẫu đất (trước và sau thí nghiệm), các chỉ tiêu cần phân tích tương tự như nội dung 1 (Bảng 2.1); Mẫu thân lá và rễ cải thìa được lấy và phân tích các nguyên tố và các thành phần dinh dưỡng chính bằng các phương pháp tương tự như đã mô tả trong thí nghiệm 3.

Ở nội dung này, các phương pháp tính toán và phân tích số liệu, bao gồm phân tích thống kê, PCA/FA, tính chỉ số chất lượng đất (SQI và các SQI thành phần), phân tích phương sai và tương quan, được thực hiện tương tự nội dung 1 trên cả thí nghiệm lúa và cải thìa. Ngoài ra, tương quan đa biến được áp dụng để xác định các tính chất đất ảnh hưởng đến sinh trưởng lúa hoặc cải thìa. Phương pháp Stepwise backward elimination xác định mô hình đa biến ý nghĩa thống kê, qua đó tính phần trăm đóng góp của các biến độc lập (tính chất đất) vào biến thiên của biến phụ thuộc (sinh trưởng lúa hoặc cải thìa).

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

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

CHƯƠNG 3 KẾT QUẢ NGHIÊN CỨU VÀ THẢO LUẬN

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

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

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

Bảng 3.1 Hiện trạng và hiệu quả của các loại hình sử dụng canh tác phổ biến trên đất phèn nhiễm mặn

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

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

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

3.1.2.1. Các đặc tính hóa học của đất phèn nhiễm mặn tại Cần Giờ

Tính axit: Bốn tính chất liên quan đến tính axit của đất phèn nhiễm mặn gồm pH, SO_4^{2-}, độ chua trao đổi và H^+ trao đổi tại hai tầng đất ứng với 5 loại hình sử dụng đất được trình bày tại Bảng 3.2.

Bảng 3.2 Đặc tính đất phèn nhiễm mặn thể hiện tính axit trên các loại hình sử dụng đất khác nhau

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

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

Bảng 3.3 Đặc tính đất phèn nhiễm mặn thể hiện tính mặn, độc trên các loại hình sử dụng đất khác nhau

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

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

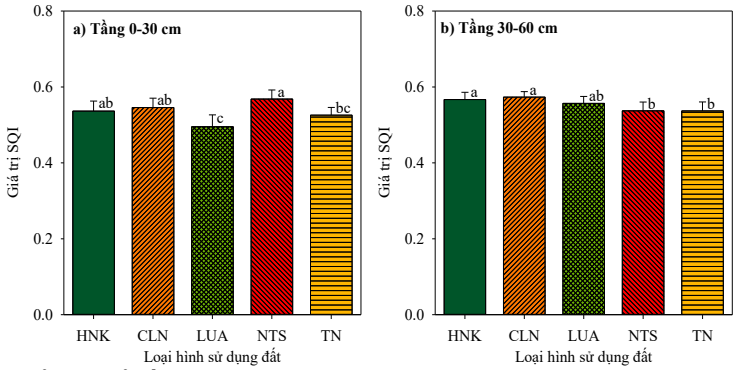
Bảng 3.4 Đặc tính đất phèn nhiễm mặn thể hiện tính dinh dưỡng trên các loại hình sử dụng đất

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

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

* Chỉ số chất lượng đất (SQI) tổng thể

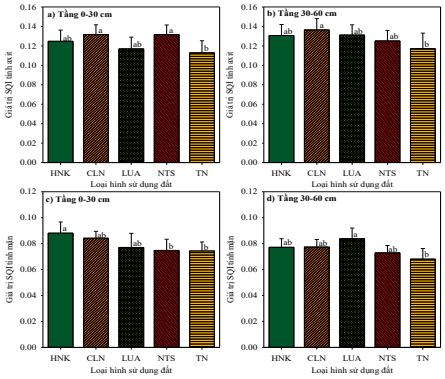
PCA/FA được phân tích từ các đặc tính đất của 5 loại hình sử dụng khác nhau (Bảng 4.1 - Phụ lục 4). SQI đã được tính toán cho cả hai tầng đất theo kết quả PCA/FA (Hình 3.1).



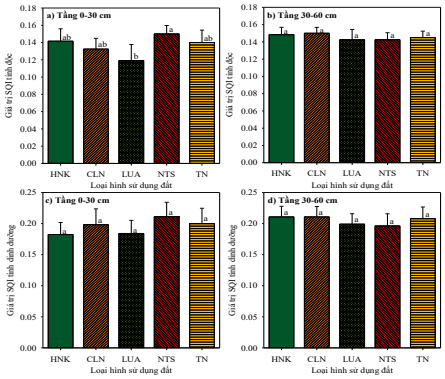
Hình 3.1. SQI tổng thể tầng 0-30 cm (a) và 30-60 cm (b) của 5 loại hình sử dụng đất

* Các chỉ số chất lượng đất thành phần

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



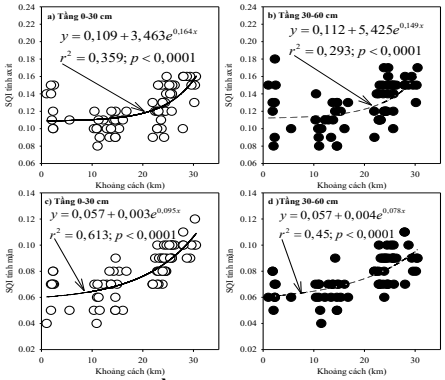
Hình 3.2 SQI tính axit tầng 0-30 cm (a) và 30-60 cm (b), tính mặn tầng 0-30 cm (c) và 30-60 cm (d)



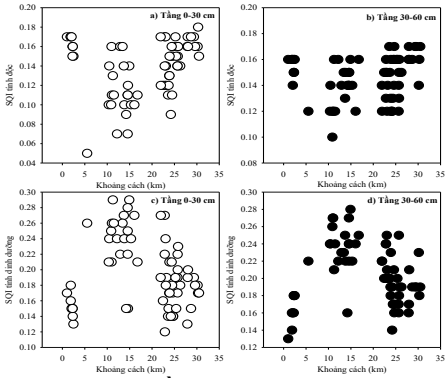
Hình 3.3 SQI tính độc tầng 0-30 cm (a) và 30-60 cm (b), dinh dưỡng tầng 0-30 cm (c) và 30-60 cm (d)

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

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



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



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

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

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

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

3.1.4. Thảo luận chung

Các đặc tính hóa học của đất phèn nhiễm mặn, gồm tính axit, mặn, độc và dinh dưỡng đều tác động mạnh đến chất lượng đất theo tầng, loại hình sử dụng và bị ảnh hưởng bởi không gian, đặc biệt ở vùng ven biển. Kết quả cho thấy tính axit, mặn, độc và dinh dưỡng của đất bị ảnh hưởng nặng nề. Tính axit tăng mạnh ở tầng mặt do oxy hóa pyrite và tác động thủy triều; tính mặn cao do tích tụ muối từ biển và tưới tiêu, lan tới tầng sâu; kim loại độc như Al^{3+}, Fe^{2+}, Mn^{2+} gia tăng. Dinh dưỡng đất cao hơn khi ở xa biển nhưng bị giảm do axit hóa và rửa trôi so với gần biển. Tác động khác biệt rõ rệt giữa các loại hình sử dụng đất: đất lúa giảm pH, tăng độc tính kim loại, ảnh hưởng năng suất; đất trồng cây hằng năm khác và đất trồng cây lâu năm chịu tác động mạnh ở tầng 30-60 cm do mặn và axit; mô hình lúa-tôm bất ổn năng suất do biến động mặn, phèn; đất tự nhiên ven biển suy thoái, giảm khả năng phục hồi. Để cải thiện đất phèn nhiễm mặn, cần nghiên cứu đề xuất sử dụng các vật liệu cải tạo như than trấu, vôi, phân bò, nhằm nâng cao hiệu quả sử dụng đất và phát triển bền vững trong bối cảnh biến đổi khí hậu.

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

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

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

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

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

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

Tính axit: Bốn tính chất liên quan đến tính axit của đất phèn nhiễm mặn đều có sự thay đổi rõ rệt dưới tác động của ba loại than sinh học ở các tỷ lệ bón khác nhau (Bảng 3.7).

Bảng 3.7 Ảnh hưởng của ba loại than sinh học lên tính axit của đất phèn nhiễm mặn

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

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

Bảng 3.8 Ảnh hưởng của ba loại than sinh học lên tính mặn và tính độc của đất phèn nhiễm mặn

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

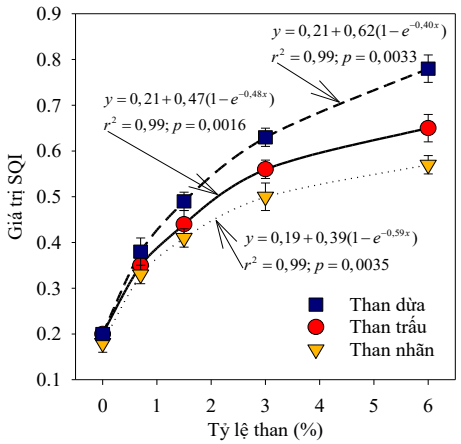
Tính dinh dưỡng (CEC, NH_4^+, Mehlich-1 P, OC, K, Ca, Mg trao đổi) đều có xu hướng tăng rõ rệt khi bón các loại than sinh học (than trấu, than nhãn và than dừa) với các mức tỷ lệ từ 0% đến 6% (Bảng 3.9).

Bảng 3.9 Ảnh hưởng của ba loại than sinh học lên tính dinh dưỡng của đất phèn nhiễm mặn

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

3.2.1.3. Chỉ số chất lượng đất sau thí nghiệm

Tổng cộng có ba nhân tố được tính toán từ bộ số liệu để giải thích tổng biến thiên của 15 thông số đất (Bảng 4.2 - Phụ lục 4). Giá trị trọng số của các thông số được dùng để tính chỉ số chất lượng đất (SQI). Nghiên cứu này đã tính toán SQI từ 15 thông số hóa học của đất đo được sau thời gian thí nghiệm và SQI được dùng để đánh giá biến động chất lượng đất sau thí nghiệm bị ảnh hưởng bởi các loại và tỷ lệ than sinh học (Hình 3.6).



Hình 3.6 Biến động chỉ số chất lượng đất bị ảnh hưởng bởi các loại và tỷ lệ than sinh học

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

Kết quả nghiên cứu cho thấy ba loại than sinh học (than trấu, than dừa, than nhãn) đều có tiềm năng cải tạo đất phèn nhiễm mặn, nhưng hiệu quả và khả năng ứng dụng thực tế khác nhau. Thêm vào đó, trấu là phế phẩm phổ biến trong sản xuất lúa gạo, giúp giảm chi phí và dễ triển khai quy mô lớn, phù hợp với nông nghiệp bền vững. Những kết quả này hoàn toàn tương đồng với kết luận từ đề tài nghiên cứu của Nguyễn Thanh Bình, 2023 [135], trong đó than trấu được xác định là loại vật liệu cải tạo đất phèn mặn hiệu quả và bền vững, với mức khuyến nghị sử dụng từ 8-10 tấn/ha. Tổng hợp các minh chứng từ nghiên cứu và các kết quả trước đó, tỷ lệ từ 0,7-1,5% được xác định là khoảng tối ưu để sử dụng than trấu trong cải tạo đất phèn nhiễm mặn. Mức bón này có thể cho thấy hiệu quả cải thiện ổn định, an toàn, không gây dư lượng muối, đồng thời giúp đảm bảo cung cấp đầy đủ dinh dưỡng, phù hợp với đặc điểm chu kỳ sinh trưởng ngắn của cây rau màu. Như vậy, than trấu với tỷ lệ áp dụng phù hợp (10 tấn/ha cho lúa và 15 tấn/ha cho rau màu) là phương án cải tạo đất hiệu quả, khả thi và có tiềm năng ứng dụng cao.

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

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

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

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

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

* Chế độ nước tưới ngập

Bảng 3.11 Ảnh hưởng của các vật liệu lên đặc tính đất phèn nhiễm mặn với chế độ nước tưới ngập

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

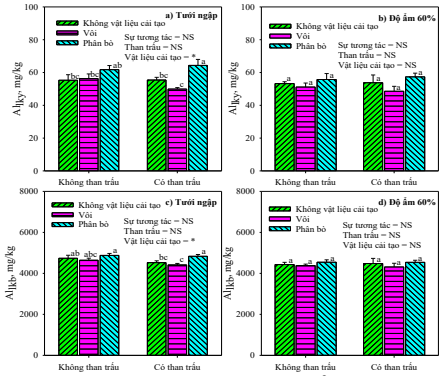
* Chế độ nước độ ẩm 60%

Bảng 3.12 Ảnh hưởng của các vật liệu lên đặc tính đất phèn nhiễm mặn với chế độ nước độ ẩm 60%

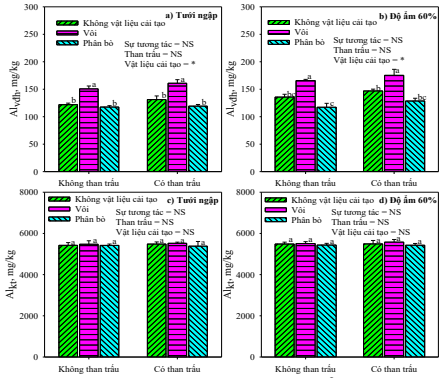
Đặc tính đất	Không than trấu			Có than trấu		
	Đối chứng	Vôi	Phân bò	Than trấu	Than trấu+vôi	Than trấu+phân bò
Tính axit						
pH	6,12^{bc}±0,02	6,22^{ab}±0,07	6,10^{c}±0,02	6,20^{bc}±0,02	6,32^{a}±0,01	6,18^{bc}±0,02
SO_4^{2-} (g/kg)	0,70^{a}±0,06	0,43^{d}±0,01	0,53^{bc}±0,02	0,72^{a}±0,03	0,44^{cd}±0,02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

3.2.2.3. Các thành phần Al trong đất sau thí nghiệm

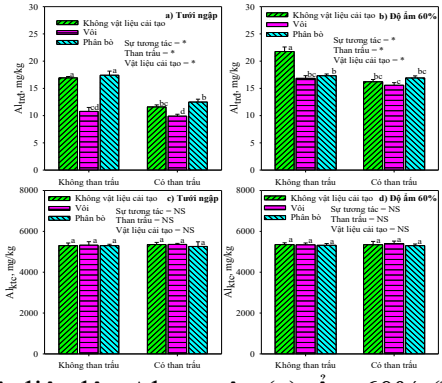
Hình 3.7, 3.8, 3.9 trình bày hàm lượng Al liên kết yếu (Al_{lky}) và bền (Al_{lkb}) với hữu cơ, Al vô định hình ($Al_{vđh}$) và Al kết tinh (Al_{kt}), Al trao đổi ($Al_{trđ}$) và Al kết tinh chặt (Al_{ktc}) ở chế độ nước ngập và ẩm 60%.



Hình 3.7 Ảnh hưởng của các vật liệu lên Al_{lky}-ngập (a), ẩm 60% (b) và Al_{lkb}-ngập (c), ẩm 60% (d)



Hình 3.8 Ảnh hưởng của các vật liệu lên $Al_{vđh}$-ngập (a), ẩm 60% (b) và Al_{kt}-ngập (c), ẩm 60% (d)

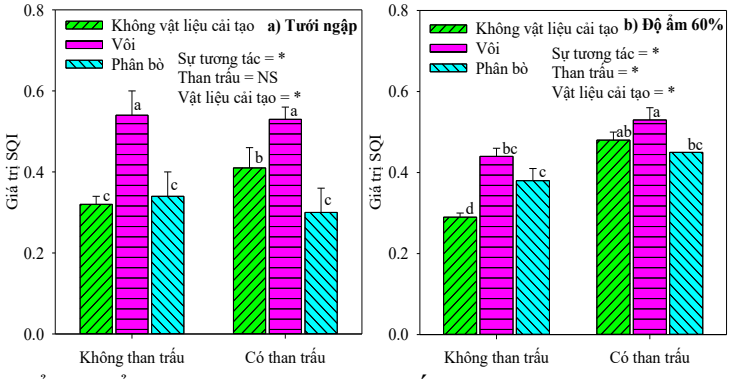


Hình 3.9 Ảnh hưởng của các vật liệu lên $Al_{trđ}$-ngập (a), ẩm 60% (b) và Al_{ktc}-ngập (c), ẩm 60% (d)

3.2.2.4. Các chỉ số chất lượng đất sau thí nghiệm

Năm nhân tố - PCA/FA (Bảng 4.3-Phụ lục 4). SQI đánh giá tác động các vật liệu (Hình 3.10).

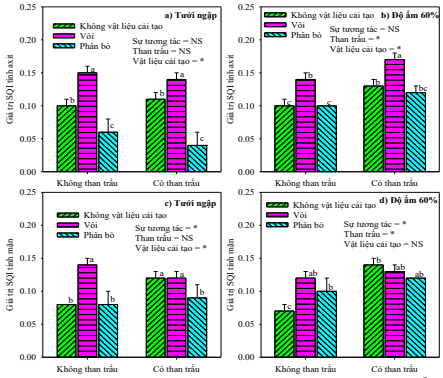
* Chỉ số chất lượng đất tổng thể sau thí nghiệm.



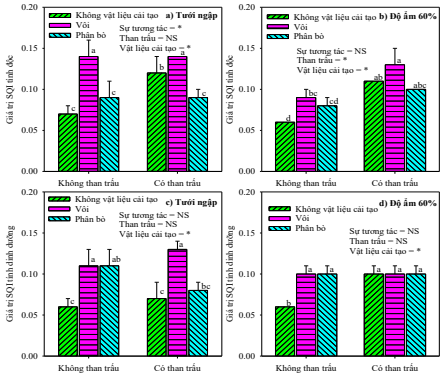
Hình 3.10 SQI tổng thể sau thí nghiệm với chế độ nước tưới ngập (a), độ ẩm 60% (b)

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

Chất lượng đất phèn nhiễm mặn được chia thành 4 nhóm: tính axit, tính mặn, tính độc và tính dinh dưỡng. Các nhóm tính chất này được trình bày ở Hình 3.11 và 3.12.



Hình 3.11 SQI axit (a), (b) và mặn (c), (d) sau thí nghiệm với chế độ nước tưới ngập và độ ẩm 60%



Hình 3.12 SQI độc (a), (b) và dinh dưỡng (c), (d) sau thí nghiệm, chế độ nước tưới ngập và độ ẩm 60%

3.2.3. Thảo luận chung

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

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

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

3.3.1.1. Trên đất trồng lúa

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

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

3.3.1.2. Trên đất trồng cải thìa

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

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

3.3.2. Ảnh hưởng của các vật liệu cải tạo đến chất lượng đất

3.3.2.1. Trên đất trồng lúa

Bảng 3.15 Ảnh hưởng của các vật liệu lên đặc tính hóa học đất phèn nhiễm mặn

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

3.3.2.2. Trên đất trồng cải thìa

Bảng 3.16 Ảnh hưởng của các vật liệu lên đặc tính hóa học đất phèn nhiễm mặn

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

Bảng 3.17 Ảnh hưởng của các vật liệu lên đặc tính hóa học đất phèn nhiễm mặn (tt)

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

3.3.3. Ảnh hưởng của các vật liệu cải tạo đến năng suất và sinh trưởng của lúa và cải thìa

3.3.3.1. Trên đất trồng lúa

Bảng 3.18 Ảnh hưởng của các vật liệu lên trọng lượng (TL) rễ, rơm, hạt và tổng sinh khối lúa

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

3.3.3.2. Trên đất trồng cải thìa

Bảng 3.19 Ảnh hưởng của các vật liệu lên trọng lượng (TL) rễ, thân lá và tổng sinh khối cải thìa

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

3.3.4. Ảnh hưởng của các vật liệu cải tạo đến hàm lượng nguyên tố trong sinh khối lúa và cải thìa

3.3.4.1. Trên đất trồng lúa

Hàm lượng các nguyên tố Ca và Mn trong rễ không bị ảnh hưởng bởi các nghiệm thức (NT) thí nghiệm (Bảng 5.1 - Phụ lục 5). Hàm lượng P cao nhất đạt được ở NT kết hợp than trấu với phân bò so với các NT còn lại. NT than trấu kết hợp với vôi cho hàm lượng Na trong rễ lúa cao nhất so với các NT còn lại. Các NT trong nhóm tếu tố có than trấu đều cho hàm lượng K trong rễ cao hơn có ý nghĩa thống kê so với NT đối chứng. NT than trấu kết hợp với vôi cho hàm lượng Al và Fe trong rễ thấp nhất so với NT đối chứng. Hàm lượng N và Mg trong rơm khác biệt không có ý nghĩa thống kê khi áp dụng các yếu tố thí nghiệm khác nhau (Bảng 5.2 - Phụ lục 5). NT than trấu kết hợp với vôi cho hàm lượng P và K trong rơm cao nhất. Hàm lượng Na trong rơm giảm đáng kể ở NT than trấu kết hợp với phân bò. NT chỉ bón than trấu và than trấu kết hợp với vôi đã làm giảm hàm lượng Al và Fe tốt nhất có ý nghĩa thống kê hơn so với các NT còn lại. Hàm lượng các nguyên tố Na, Ca, Mg và Mn trong hạt không bị ảnh hưởng bởi vật liệu cải tạo (Bảng 5.3 - Phụ lục 5). Hàm lượng N và P cao nhất đạt được ở NT kết hợp than trấu với phân bò. Yếu tố có sử dụng than trấu đều cho hàm lượng trong hạt cao hơn có ý nghĩa thống kê so với NT đối chứng. NT than trấu kết hợp với vôi cho hàm lượng Fe trong hạt thấp nhất so với đối chứng.

3.3.4.2. Trên đất trồng cải thìa

Hàm lượng Na và Mg trong rễ không bị ảnh hưởng bởi các nghiệm thức (NT) thí nghiệm ở cả hai vụ (Bảng 5.4 - Phụ lục 5). Hàm lượng P cao nhất đạt được ở NT chỉ bón than trấu. NT than trấu và vôi cho Ca trong rễ cao nhất. Các NT trong nhóm yếu tố có sử dụng than trấu đều tăng hàm lượng K trong rễ đáng kể so nhóm yếu tố không sử dụng than trấu. NT than trấu và vôi làm giảm hàm lượng Al và Fe trong rễ thấp nhất. Hàm lượng các nguyên tố Fe và Mn trong thân lá không bị ảnh hưởng bởi vật liệu ở cả 2 vụ (Bảng 5.5 - Phụ lục 5). Hàm lượng N và P 2 vụ đều cao nhất đạt được ở NT than trấu kết hợp với phân bò. Các NT trong nhóm yếu tố có sử dụng than trấu đều cho hàm lượng K trong thân lá cao hơn có ý nghĩa thống kê so với nhóm yếu tố còn lại.

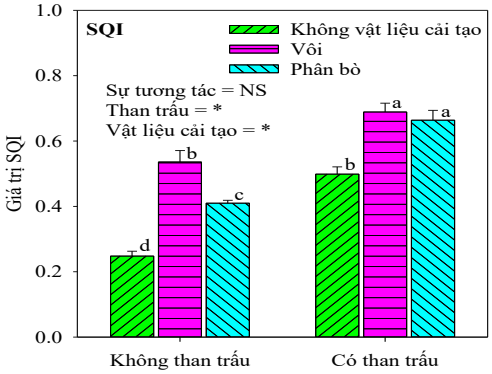
3.3.5. Mối tương quan giữa SQI thành phần và năng suất, sinh trưởng của lúa và cải thìa

3.3.5.1. Trên đất trồng lúa

Các chỉ số chất lượng đất sau thí nghiệm

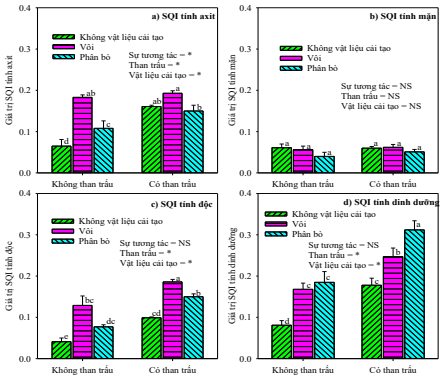
* Chỉ số chất lượng đất tổng thể sau thí nghiệm

PCA/FA đã phân nhóm dữ liệu thành sáu nhân tố (Bảng 4.4 - Phụ lục 4). SQI hiển thị trong Hình 3.13.



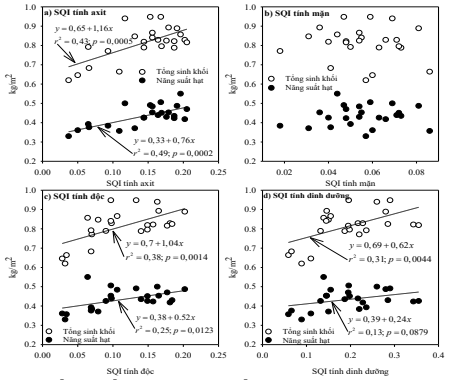
Hình 3.13 SQI tổng thể của đất phèn nhiễm mặn trồng lúa sau thí nghiệm

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



Hình 3.14 SQI tính axit (a), mặn (b), độc (c) và dinh dưỡng (d) sau thí nghiệm

Mối tương quan của các SQI thành phần với tổng sinh khối và năng suất hạt của lúa nước



Hình 3.15 Mối tương quan giữa chỉ số chất lượng đất tính axit (a), mặn (b), độc (c) và dinh dưỡng (d) với tổng sinh khối và năng suất hạt lúa sau thí nghiệm

Mô hình thống kê đa biến được trình bày tại Bảng 3.20.

Bảng 3.20 Kết quả phân tích tương quan đa biến và phần trăm giải thích tổng biến thiên của tổng sinh khối và năng suất hạt lúa với các chỉ số chất lượng đất thành phần

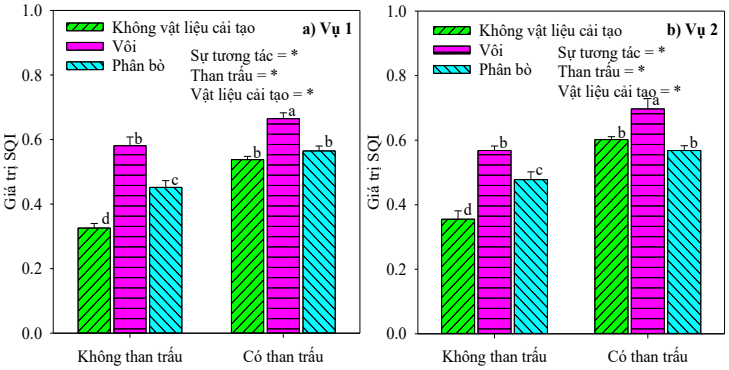
Biến số	Tổng sinh khối				Năng suất hạt			
	Tổng bình phương sai số dư	Giá trị xác suất	Phần trăm đóng góp (%)	Nghiệm thức tốt nhất	Tổng bình phương sai số dư	Giá trị xác suất	Phần trăm đóng góp (%)	Nghiệm thức tốt nhất
SQI axit*	0,02	4,92	18,52	NT5	0,02	9,20	31,94	NT5
SQI mặn	0,00	0,81	3,07	NT5	0,00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

3.3.5.2. Trên đất trồng cải thìa

Các chỉ số chất lượng đất sau thí nghiệm

* Chỉ số chất lượng đất tổng thể sau thí nghiệm

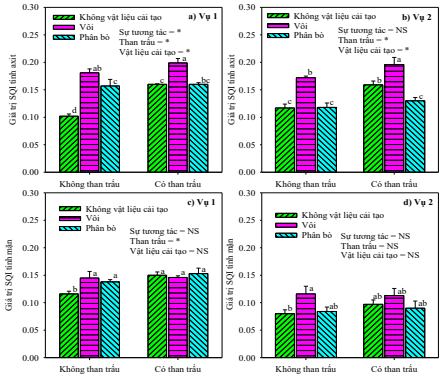
PCA/FA đã phân nhóm dữ liệu thành ba nhân tố (Bảng 4.5 - Phụ lục 4). SQI hiển thị trong Hình 3.16.



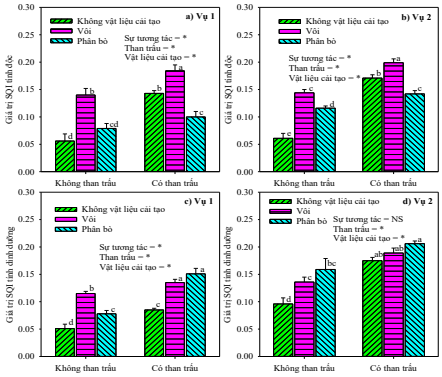
Hình 3.16 SQI tổng thể của đất phèn nhiễm mặn trồng cải thìa sau thí nghiệm vụ 1 (a), vụ 2 (b)

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

Chất lượng thành phần của bốn nhóm tính chất này được trình bày ở Hình 3.17 và 3.18.

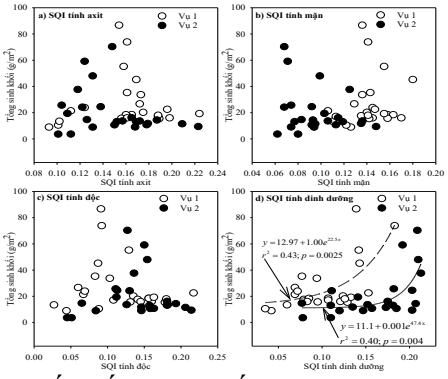


Hình 3.17 SQI tính axit vụ 1 (a), vụ 2 (b) và SQI tính mặn vụ 1 (c), vụ 2 (d) sau thí nghiệm



Hình 3.18 SQI tính độc vụ 1 (a), vụ 2 (b) và SQI tính dinh dưỡng vụ 1 (c), vụ 2 (d) sau thí nghiệm

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



Hình 3.19 Mối tương quan giữa chỉ số chất lượng đất tính axit (a), mặn (b), độc (c) và dinh dưỡng (d) với tổng sinh khối cải thìa sau thí nghiệm

Mô hình thống kê đa biến đã được trình bày tại Bảng 3.21.

Bảng 3.21 Kết quả phân tích tương quan đa biến và phần trăm giải thích tổng biến thiên của tổng sinh khối cải thìa với các chỉ số chất lượng đất thành phần

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

3.3.6. Thảo luận chung

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

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

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

Chiến lược S-O (Strenghts: điểm mạnh - Opportunities: cơ hội) tập trung vào việc tận dụng các điểm mạnh nội tại kết hợp với những cơ hội từ môi trường bên ngoài để phát triển các giải pháp cải tạo đất phèn nhiễm mặn hiệu quả.

Chiến lược W-O (Weekness: điểm yếu - Threats: thách thức) tập trung vào việc khắc phục những điểm yếu hiện tại để tận dụng tối đa các cơ hội phát triển trong tương lai về cải tạo đất phèn nhiễm mặn. Một trong những ưu tiên hàng đầu là đẩy mạnh nghiên cứu chuyên sâu về hiệu quả dài hạn của từng loại vật liệu cũng như các tổ hợp vật liệu cải tạo đất.

Chiến lược S-T (Strengths: điểm mạnh - Threats: thách thức) tập trung vào việc tận dụng những điểm mạnh của đất phèn nhiễm mặn và các loại vật liệu cải tạo để ứng phó với các thách thức của đất phèn nhiễm mặn trong bối cảnh biến đổi khí hậu hiện nay.

Chiến lược W-T (Weekness: điểm yếu - Threats: thách thức) tập trung vào tận dụng điểm yếu của đất phèn nhiễm mặn để ứng phó với các thách thức về giải pháp cải tạo loại đất này.

Từ phân tích SWOT chi tiết và các chiến lược kết hợp ở trên, có thể thấy rằng việc ứng dụng các loại vật liệu cải tạo đất phèn nhiễm mặn trong bối cảnh biến đổi khí hậu là khả thi nhưng phụ thuộc vào nhiều yếu tố. Điểm mạnh từ nền tảng nghiên cứu vững chắc và kết quả khả quan ban đầu cho thấy tiềm năng của việc cải tạo đất phèn nhiễm mặn, đặc biệt khi các vật liệu cải tạo có khả năng cải thiện năng suất cây trồng. Điểm yếu như tính phức tạp của đất và chi phí sản xuất cần được khắc phục bằng việc tinh chỉnh

giải pháp cho từng vùng đất cụ thể và tối ưu hóa chi phí sản xuất vật liệu. Cơ hội mở ra từ chính sách hỗ trợ của chính phủ và nhu cầu cấp bách về cải tạo đất, giúp tăng khả năng ứng dụng thực tiễn và mở rộng các khu vực khác. Tuy nhiên, thách thức về biến đổi khí hậu và thiếu nguồn lực tại địa phương đòi hỏi sự phối hợp chặt chẽ giữa các bên liên quan và phát triển các giải pháp lâu dài, linh hoạt để đảm bảo thành công trong quá trình cải tạo đất. Vì vậy, để ứng dụng thành công các giải pháp cải tạo đất phèn nhiễm mặn, cần kết hợp nghiên cứu khoa học với chính sách hỗ trợ tài chính và kỹ thuật, cũng như nâng cao nhận thức của người dân về vấn đề này.

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

3.4.2.1. Giải pháp cho đất ngập nước trồng lúa

Bón vôi trước hoặc sau khi ngập nước để tăng hiệu quả cải tạo. Bón phân bò trước mùa vụ để thúc đẩy phân hủy hữu cơ. Phối trộn than trấu và vôi với tỷ lệ phù hợp trước khi cày bừa sau đó mới bón vào đất. Khi kết hợp than trấu và phân bò, nên bón phân bò và phủ lớp than trấu mỏng lên bề mặt.

3.4.2.2. Giải pháp cho đất trồng cây hoa màu

Bón vôi trong mùa khô để cải thiện tầng đất mặt. Trộn than trấu vào đất là việc làm cần thiết trước khi gieo hạt giúp cải thiện độ tơi xốp và giảm độ mặn. Bón lót phân bò trước khi trồng hoa màu để thúc đẩy hoạt động phân hủy. Kết hợp than trấu và vôi sẽ phù hợp với cây rau màu chịu mặn, giúp giữ chất dinh dưỡng và giảm độc tố hiệu quả. Do đó, nên phối trộn trước mùa mưa để chống rửa trôi. Ngoài ra, khi kết hợp than trấu và phân bò giúp tăng khả năng trao đổi cation, cải thiện OC và giữ nước cho cây trồng trong mùa khô. Do đó, nên phủ lớp hỗn hợp trên bề mặt đất canh tác. Mặt khác, tùy thuộc loại cây trồng có thể lựa chọn giải pháp phù hợp với nhu cầu dinh dưỡng và khả năng chịu mặn của từng cây trồng.

KẾT LUẬN VÀ KIẾN NGHỊ

1. Kết luận

Tính axit mạnh nhất tại đất trồng lúa và đất trồng cây hằng năm khác, đặc biệt ở tầng đất mặt gần biển, do tác động của thủy triều và quá trình oxy hóa pyrite. Đất trồng lúa cũng chịu ảnh hưởng nặng nề của mặn ở lớp bề mặt, do sự xâm nhập của nước biển. Các kim loại độc như Fe^{2+}, Mn^{2+} và Al^{3+} tập trung cao ở tầng đất mặt và khu vực ven biển, nổi bật ở đất trồng lúa và đất tự nhiên. Về mặt dinh dưỡng, đất trồng cây lâu năm và lúa có hàm lượng dinh dưỡng cao hơn, nhưng giảm dần khi tiến gần biển do ảnh hưởng kết hợp của tính mặn và axit. Vôi trung hòa axit và bổ sung Ca^{2+} thay thế Na^{+}, than trấu gia tăng OC và CEC đồng thời hấp phụ Na^{+}, Cl^{+} và các ion kim loại, hạn chế tính di động của chúng, phân bò bổ sung nguồn dinh dưỡng và cung cấp hữu cơ. Dưới hai chế độ nước, tưới ngập hỗ trợ rửa trôi muối hòa tan và một phần kim loại còn độ ẩm 60% tạo môi trường ổn định cho quá trình tạo phức hữu cơ và giảm hòa tan kim loại. Về độc tính nhôm, tổ hợp than trấu kết hợp vôi đã làm giảm Al trao đổi và Al liên kết yếu, đồng thời tăng pH làm thúc đẩy kết tủa Al ở dạng ít hoà tan hoặc liên kết bền với hữu cơ, chuyển hóa Al sang dạng ít gây độc lâu dài. Than trấu kết hợp với vôi cải tạo tốt nhất tính axit và tính độc, than trấu kết hợp với phân bò cải tạo tốt nhất tính dinh dưỡng của đất phèn nhiễm mặn. Sự kết hợp các vật liệu giúp cân bằng các đặc tính hóa học của đất phèn nhiễm mặn (mặn, axit và độc tính đối với thí nghiệm trên lúa) và cải thiện dinh dưỡng (dinh dưỡng đối với thí nghiệm trên cải thìa). Điều này đã tạo điều kiện tối ưu cho sinh trưởng cây trồng. Đối với đất ngập nước trồng lúa, ưu tiên cải thiện khả năng giữ nước, giảm độc tính và tăng hàm lượng dinh dưỡng. Với đất cạn trồng màu, cần tập trung vào tăng độ tơi xốp, cải thiện khả năng thoát nước và giảm độ mặn.

2. Kiến nghị

Trong nghiên cứu này, mặc dù đã có những kết quả tích cực trong việc giảm tính axit, tính độc và cải thiện tính dinh dưỡng của đất phèn nhiễm mặn nhưng vẫn còn tồn tại một số hạn chế cần được khắc phục. Tính mặn chưa được giải quyết hiệu quả, đặc biệt với các vùng đất có độ mặn cao và khả năng tích tụ muối kéo dài. Các giải pháp cải tạo chỉ tập trung vào lúa và rau, trong khi ảnh hưởng của chúng đến các loại cây khác như cây ăn quả hoặc cây công nghiệp chưa được làm rõ. Việc cải thiện tính chất đất còn phụ thuộc lớn vào đặc điểm đất, liều lượng và sự kết hợp của các vật liệu cải tạo như vôi, phân bò và than trấu. Tuy nhiên, nghiên cứu chưa đưa ra hướng dẫn cụ thể về liều lượng và điều kiện áp dụng tối ưu. Bên cạnh đó, hiệu quả kinh tế của các phương pháp cải tạo chưa được đánh giá một cách toàn diện, gây khó khăn trong việc nhân rộng ứng dụng. Do đó, cần có các nghiên cứu sâu hơn, tập trung vào việc tối ưu hóa liều lượng sử dụng các vật liệu phù hợp với thực tiễn, đánh giá trên các loại cây trồng khác và hiệu quả dài hạn cũng như tính kinh tế của các giải pháp.