

**ĐẠI HỌC HUẾ
TRƯỜNG ĐẠI HỌC NÔNG LÂM**

TRƯƠNG THỊ DIỆU HÒA

**NGHIÊN CỨU ẢNH HƯỞNG CỦA THAN SINH HỌC GIÀU SILIC
TỪ PHỤ PHẨM CÂY TRỒNG ĐẾN SẢN XUẤT LÚA
VÀ HÀM LƯỢNG KIM LOẠI NẶNG TRONG ĐẤT
TẠI TỈNH THỪA THIÊN HUẾ**

LUẬN ÁN TIẾN SĨ NÔNG NGHIỆP

HUẾ - 2025

ĐẠI HỌC HUẾ
TRƯỜNG ĐẠI HỌC NÔNG LÂM

TRƯỜNG THỊ DIỆU HÒA

NGHIÊN CỨU ẢNH HƯỞNG CỦA THAN SINH HỌC GIÀU SILIC
TỪ PHỤ PHẨM CÂY TRỒNG ĐẾN SẢN XUẤT LÚA
VÀ HÀM LƯỢNG KIM LOẠI NẶNG TRONG ĐẤT
TẠI TỈNH THỪA THIÊN HUẾ

LUẬN ÁN TIẾN SĨ NÔNG NGHIỆP

Ngành: Khoa học cây trồng

Mã số: 96.20.110

NGƯỜI HƯỚNG DẪN KHOA HỌC

GS.TS. HOÀNG THỊ THÁI HÒA

PGS.TS. TRẦN THANH ĐỨC

HUẾ - 2025

LỜI CAM ĐOAN

Tôi xin cam đoan rằng luận án này là công trình nghiên cứu khoa học do chính tôi thực hiện. Toàn bộ số liệu, kết quả và nội dung trình bày trong luận án đều trung thực, khách quan và được thu thập, phân tích một cách nghiêm túc. Những kết quả này chưa từng được công bố trong bất kỳ công trình nghiên cứu nào khác.

Tôi xin hoàn toàn chịu trách nhiệm về tính xác thực và nguyên bản của nội dung trong luận án.

Huế, ngày 12 tháng 11 năm 2025

Tác giả luận án

A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'Thao', is written over a horizontal line.

Trương Thị Diệu Hòa

LỜI CẢM ƠN

Để hoàn thành luận án này, ngoài sự nỗ lực cá nhân, tôi đã nhận được rất nhiều sự quan tâm, giúp đỡ quý báu từ các tổ chức, cá nhân và tập thể. Tôi xin được bày tỏ lòng biết ơn sâu sắc đến tất cả những ai đã đồng hành, hỗ trợ và truyền cảm hứng cho tôi trong suốt hành trình nghiên cứu và học tập.

Trước hết, tôi xin trân trọng và chân thành gửi lời cảm ơn sâu sắc tới GS.TS. Hoàng Thị Thái Hòa và PGS.TS. Trần Thanh Đức, những người thầy/cô hướng dẫn khoa học đáng kính, đã tận tình dìu dắt, định hướng chuyên môn và luôn đồng hành cùng tôi bằng tất cả tâm huyết và trí tuệ trong suốt quá trình thực hiện và hoàn thiện luận án.

Tôi xin được bày tỏ lòng biết ơn chân thành đến Ban Giám đốc Đại học Huế, Ban Đào tạo và Công tác sinh viên Đại học Huế, Lãnh đạo Trường Đại học Nông Lâm Huế, Phòng Đào tạo và Công tác sinh viên, cùng các thầy, cô giáo Khoa Nông học đã nhiệt tình giảng dạy, tạo điều kiện thuận lợi và hỗ trợ tôi trong quá trình học tập và nghiên cứu. Tôi cũng xin cảm ơn sự hỗ trợ kinh phí từ đề tài cấp Bộ mã số B2023-DHH-22 cho thực hiện luận án này.

Tôi cũng xin cảm ơn các bạn sinh viên và các hộ nông dân tại xã Quảng Thọ, Quảng Phú, huyện Quảng Điền, và phường Thủy Phương, thị xã Hương Thủy, tỉnh Thừa Thiên Huế, những người đã nhiệt tình hợp tác, hỗ trợ và tạo điều kiện thuận lợi để tôi có thể triển khai nghiên cứu thực tiễn một cách hiệu quả.

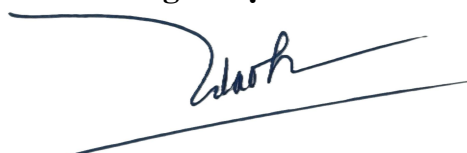
Tôi chân thành cảm ơn Lãnh đạo và các viên chức Trường Cao đẳng Huế, cùng các nhà khoa học, bạn bè và đồng nghiệp đã dành cho tôi sự hỗ trợ, động viên và những góp ý quý báu trong suốt quá trình thực hiện đề tài.

Cuối cùng, từ tận đáy lòng, tôi xin được bày tỏ lòng biết ơn sâu sắc đến gia đình thân yêu, đặc biệt là bố mẹ, anh chị, chồng và con gái. Chính sự động viên không ngừng về cả tinh thần lẫn vật chất, cùng sự đồng hành đầy yêu thương và sẻ chia của gia đình đã tiếp thêm cho tôi sức mạnh và niềm tin để hoàn thành hành trình học thuật đầy thử thách này.

Xin trân trọng cảm ơn!

Huế, ngày 12 tháng 11 năm 2025

Tác giả luận án



Trương Thị Diệu Hòa

MỤC LỤC

LỜI CAM ĐOAN	i
LỜI CẢM ƠN.....	ii
MỤC LỤC	iii
DANH MỤC CÁC KÝ HIỆU, CÁC CHỮ VIẾT TẮT	vi
DANH MỤC CÁC BẢNG.....	viii
DANH MỤC CÁC HÌNH VẼ, ĐỒ THỊ.....	x
MỞ ĐẦU	1
1. ĐẶT VẤN ĐỀ	1
2. MỤC TIÊU ĐỀ TÀI	3
2.1. Mục tiêu tổng quát.....	3
2.2. Mục tiêu cụ thể	3
3. Ý NGHĨA KHOA HỌC VÀ THỰC TIỄN CỦA ĐỀ TÀI.....	3
3.1. Ý nghĩa khoa học.....	3
3.2. Ý nghĩa thực tiễn	3
4. PHẠM VI NGHIÊN CỨU CỦA LUẬN ÁN	4
5. ĐÓNG GÓP MỚI CỦA LUẬN ÁN.....	4
CHƯƠNG 1	5
TỔNG QUAN NGHIÊN CỨU	5
1.1. CƠ SỞ LÝ LUẬN CỦA ĐỀ TÀI.....	5
1.1.1. Khái quát về than sinh học	5
1.1.2. Phụ phẩm cây trồng chứa Si cao	8
1.1.3. Vai trò của Si và than sinh học giàu Si đối với cây trồng.....	10
1.1.4. Khái quát về kim loại nặng trong đất	10
1.1.5. Vai trò và cơ chế của Si và than sinh học giàu Si trong giảm kim loại nặng trong đất.....	14
1.2. CƠ SỞ THỰC TIỄN CỦA ĐỀ TÀI	20
1.2.1. Thực trạng kim loại nặng trong đất nông nghiệp tại Việt Nam và thành phố Huế.....	20

1.2.2. Nguồn phụ phẩm nông nghiệp giàu Si	23
1.2.3. Tình hình sử dụng than sinh học từ phụ phẩm cây trồng tại Việt Nam và tỉnh Thừa Thiên Huế	24
1.3. CÁC CÔNG TRÌNH NGHIÊN CỨU LIÊN QUAN ĐẾN ĐỀ TÀI	25
1.3.1. Trên thế giới.....	25
1.3.2. Tại Việt Nam.....	33
CHƯƠNG 2. ĐỐI TƯỢNG, NỘI DUNG VÀ PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU	38
2.1. ĐỐI TƯỢNG NGHIÊN CỨU	38
2.1.1. Đất thí nghiệm	38
2.1.2. Giống lúa thí nghiệm	38
2.1.3. Phân bón	38
2.1.4. Than sinh học giàu Si từ vỏ trấu và vỏ lạc	38
2.1.5. Các kim loại nặng	39
2.2. NỘI DUNG NGHIÊN CỨU	39
2.3. PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU	39
2.3.1. Khảo sát hiện trạng sử dụng phụ phẩm cây trồng và than sinh học tại vùng trồng lúa ở tỉnh Thừa Thiên Huế.....	39
2.3.2. Nghiên cứu hàm lượng một số nguyên tố kim loại nặng trong đất trồng lúa tại tỉnh Thừa Thiên Huế.....	40
2.3.3. Nghiên cứu ảnh hưởng của dạng và liều lượng than sinh học giàu Si từ vỏ trấu và vỏ lạc đến sinh trưởng, phát triển, năng suất lúa, hiệu quả kinh tế và hàm lượng kim loại nặng trên đất phù sa tại tỉnh Thừa Thiên Huế trong phòng, nhà lưới và trên đồng ruộng.....	43
2.3.4. Xây dựng mô hình sử dụng than sinh học giàu Si từ vỏ trấu và vỏ lạc trong sản xuất lúa và giảm hàm lượng kim loại nặng trên đất phù sa tại tỉnh Thừa Thiên Huế ...	54
CHƯƠNG 3. KẾT QUẢ NGHIÊN CỨU VÀ THẢO LUẬN	56
3.1. KHẢO SÁT HIỆN TRẠNG SỬ DỤNG PHỤ PHẨM CÂY TRỒNG VÀ THAN SINH HỌC TẠI VÙNG TRỒNG LÚA Ở TỈNH THỪA THIÊN HUẾ	56
3.1.1. Tình hình sản xuất lúa tại địa điểm nghiên cứu.....	56
3.1.2. Tình hình sử dụng phụ phẩm cây trồng trong sản xuất lúa	57
3.2. NGHIÊN CỨU HÀM LƯỢNG MỘT SỐ NGUYÊN TỐ KIM LOẠI NẶNG TRONG ĐẤT TRỒNG LÚA TẠI TỈNH THỪA THIÊN HUẾ	60

3.2.1. Hiện trạng một số tính chất hóa học cơ bản của đất trồng lúa	60
3.2.2. Hiện trạng một số nguyên tố kim loại nặng trong đất trồng lúa.....	63
3.3. NGHIÊN CỨU ẢNH HƯỞNG CỦA DẠNG VÀ LIỀU LƯỢNG THAN SINH HỌC GIÀU SI TỪ VỎ TRÁU VÀ VỎ LẠC ĐẾN SINH TRƯỞNG, PHÁT TRIỂN, NĂNG SUẤT LÚA VÀ HIỆU QUẢ KINH TẾ VÀ HÀM LƯỢNG KIM LOẠI NẶNG TRÊN ĐẤT PHÙ SA TẠI TỈNH THỪA THIÊN HUẾ TRONG PHÒNG, NHÀ LƯỚI VÀ TRÊN ĐỒNG RUỘNG	67
3.3.1. Kết quả thí nghiệm trong phòng.....	67
3.3.2. Kết quả thí nghiệm trong nhà lưới.....	69
3.3.3. Kết quả thí nghiệm trên đồng ruộng.....	83
3.4. XÂY DỰNG MÔ HÌNH SỬ DỤNG THAN SINH HỌC GIÀU SI TỪ VỎ TRÁU VÀ VỎ LẠC TRONG SẢN XUẤT LÚA VÀ HÀM LƯỢNG KIM LOẠI NẶNG TRÊN ĐẤT PHÙ SA TẠI TỈNH THỪA THIÊN HUẾ	103
3.4.1. Thời gian sinh trưởng và phát triển của cây lúa	103
3.4.2. Chiều cao cây, khả năng đẻ nhánh và số lá xanh còn lại sau khi thu hoạch lúa.....	103
3.4.3. Sinh khối tươi và khô của lúa qua các giai đoạn sinh trưởng, phát triển	104
3.4.4. Năng suất và các yếu tố cấu thành năng suất	105
3.4.5. Hiệu quả kinh tế.....	106
3.4.6. Hàm lượng Cd, Pb và Si trong đất và cây	106
CHƯƠNG 4. KẾT LUẬN VÀ ĐỀ NGHỊ.....	108
4.1. KẾT LUẬN	108
4.2. KIẾN NGHỊ.....	109
DANH MỤC CÁC CÔNG TRÌNH KHOA HỌC ĐÃ CÔNG BỐ CỦA LUẬN ÁN.....	110
TÀI LIỆU THAM KHẢO	111
PHỤ LỤC	

DANH MỤC CÁC KÝ HIỆU, CÁC CHỮ VIẾT TẮT

TT	Từ viết tắt	Nội dung đầy đủ
1	ANOVA	Analysis of Variance (Phân tích phương sai)
2	BTNMT	Bộ Tài nguyên và Môi trường
3	BNNPTNT	Bộ Nông nghiệp và Phát triển Nông thôn
4	CEC	Cation Exchange Capacity (Khả năng trao đổi cation)
5	CF	Contamination Factor (Hệ số ô nhiễm)
6	cs	Cộng sự
7	CT	Công thức
8	CTRL	Control Group (Nhóm đối chứng)
9	ĐC	Đối chứng
10	FAO	Food and Agriculture Organization of the United Nations (Tổ chức Lương thực và Nông nghiệp của liên hợp quốc)
11	H	Hiệu quả hấp thu
12	HC	Hữu cơ
13	KLN	Kim loại nặng
14	K/K ₂ O	Potassium (Kali)
15	LAI	Leaf Area Index (Chỉ số diện tích lá)
16	LSA	Lignousulfonic Acid (Hợp chất hữu cơ có nguồn gốc từ lignin)
17	HSD	Tukey's Honestly Significant Difference (Sai khác nhỏ nhất có ý nghĩa theo Tukey)
18	MH	Mô hình
19	N	Nitrogen (Đạm)
20	NSLT	Năng suất lý thuyết

TT	Từ viết tắt	Nội dung đầy đủ
21	NSTT	Năng suất thực thu
22	OC	Organic Carbon (Carbon hữu cơ)
23	OM	Organic Matter (Hàm lượng hợp chất hữu cơ)
24	PLI	Pollution Load Index (Chỉ số tải lượng ô nhiễm)
25	P/P ₂ O ₅	Phosphorous (Lân)
26	p	Probability value (Giá trị xác suất)
27	QCVN	Quy chuẩn Việt Nam
28	SD	Standard Deviation (Độ lệch chuẩn)
29	TCVN	Tiêu chuẩn Việt Nam
30	TMA	Thermo Mechanical Analysis (Phân tích cơ nhiệt)
31	TGSTPT	Thời gian sinh trưởng phát triển
32	TN và MT	Tài nguyên và Môi trường
33	TSH	Than sinh học
34	Si	Silicon (Silic)
35	VCR	Value Cost Ratio (Tỷ suất lợi nhuận)
36	VL	Vật liệu
37	WMA	Weighted Moving Average (Trung bình động có trọng số)

DANH MỤC CÁC BẢNG

Bảng 2.1. Đặc điểm của than sinh học giàu Si từ vỏ trấu và vỏ lạc	39
Bảng 2.2. Chỉ tiêu và phương pháp phân tích một số tính chất hóa học đất	41
Bảng 2.3. Công thức thí nghiệm.....	44
Bảng 2.4. Công thức thí nghiệm 2.1 trong nhà lưới.....	46
Bảng 2.5. Công thức thí nghiệm 2.2 trong nhà lưới.....	49
Bảng 2.6. Phương pháp phân tích một số chỉ tiêu trong cây.....	50
Bảng 2.7. Công thức thí nghiệm trên đồng ruộng	51
Bảng 3.1. Hiện trạng diện tích và năng suất lúa tại địa điểm điều tra năm 2022.....	56
Bảng 3.2. Quy mô diện tích trồng lúa của nông hộ tại các địa điểm điều tra	56
Bảng 3.3. Lượng phụ phẩm cây trồng tại điểm điều tra vào tháng 01 năm 2023	57
Bảng 3.4. Tình hình sử dụng phế phụ phẩm cây trồng sau thu hoạch tại các địa điểm điều tra vào tháng 01 năm 2023	57
Bảng 3.5. Tình hình sử dụng phân hữu cơ cho sản xuất lúa tại địa điểm điều tra vào tháng 1 năm 2023	59
Bảng 3.6. Hiện trạng một số tính chất hóa học đất trồng lúa tại địa điểm nghiên cứu năm 2023	60
Bảng 3.7. Hàm lượng Cd, Pb, Cu và Zn tổng số trên đất trồng lúa	63
Bảng 3.8. Hàm lượng Cd, Pb, Cu và Zn dễ tiêu trên đất trồng lúa	66
Bảng 3.9. Ảnh hưởng của than sinh học giàu Si đến khả năng hấp thu kim loại nặng trên đất trồng lúa ở thí nghiệm trong phòng.....	68
Bảng 3.10. Ảnh hưởng của liều lượng phân Si và than sinh học giàu Si đến diện tích lá và chỉ số diện tích lá lúa ở thí nghiệm nhà lưới.....	70
Bảng 3.11. Ảnh hưởng của liều lượng phân Si và than sinh học đến khả năng hấp thu Si của cây lúa ở thí nghiệm nhà lưới	73
Bảng 3.12. Ảnh hưởng của liều lượng phân Si và than sinh học đến một số tính chất hóa học của đất trước và sau thí nghiệm nhà lưới ở vụ xuân hè 2023	74
Bảng 3.13. Ảnh hưởng của than sinh học giàu Si từ vỏ trấu và vỏ lạc đến diện tích lá và chỉ số diện tích lá của cây lúa ở thí nghiệm trong nhà lưới.....	76
Bảng 3.14. Ảnh hưởng của than sinh học giàu Si từ vỏ trấu và vỏ lạc đến khả năng tích lũy sinh khối tươi và khô của cây lúa ở thí nghiệm nhà lưới	77
Bảng 3.15. Ảnh hưởng của than sinh học giàu Si từ vỏ trấu và vỏ lạc đến một số tính chất hóa học của đất trước và sau thí nghiệm nhà lưới ở vụ xuân hè 2023	79

Bảng 3.16. Ảnh hưởng của than sinh học giàu Si từ vỏ trấu và vỏ lạc đến hàm lượng Cd và Pb trên đất trồng lúa ở vụ xuân hè 2023 trong thí nghiệm nhà lưới	80
Bảng 3.17. Ảnh hưởng của than sinh học giàu Si từ vỏ trấu và vỏ lạc đến hàm lượng Si (SiO_2) và Cd, Pb tổng số trong cây lúa ở vụ xuân hè 2023 ở thí nghiệm nhà lưới	82
Bảng 3.18. Hệ số tương quan giữa hàm lượng Si trong cây và hàm lượng Cd, Pb	83
Bảng 3.19. Ảnh hưởng của than sinh học giàu Si từ vỏ trấu và vỏ lạc đến thời gian sinh trưởng và phát triển của cây lúa ở thí nghiệm đồng ruộng.....	84
Bảng 3.20. Ảnh hưởng của than sinh học giàu Si từ vỏ trấu và vỏ lạc đến chiều cao cây và số lá xanh khi thu hoạch của cây lúa ở thí nghiệm đồng ruộng	86
Bảng 3.21. Ảnh hưởng của than sinh học giàu Si từ vỏ trấu và vỏ lạc đến số nhánh và tỉ lệ nhánh hữu hiệu của cây lúa ở thí nghiệm đồng ruộng	88
Bảng 3.22. Ảnh hưởng của than sinh học giàu Si từ vỏ trấu và vỏ lạc đến lá đồng tại giai đoạn thu hoạch ở thí nghiệm đồng ruộng	90
Bảng 3.23. Ảnh hưởng của than sinh học giàu Si từ vỏ trấu và vỏ lạc đến sinh khối tươi và khô của cây lúa vụ hè thu 2023 ở thí nghiệm đồng ruộng	91
Bảng 3.24. Ảnh hưởng của than sinh học giàu Si từ vỏ trấu và vỏ lạc đến sinh khối tươi và khô của cây lúa vụ xuân 2024 ở thí nghiệm đồng ruộng	93
Bảng 3.25. Ảnh hưởng của than sinh học giàu Si từ vỏ trấu và vỏ lạc đến tình hình sâu bệnh hại ở thí nghiệm đồng ruộng.....	94
Bảng 3.26. Ảnh hưởng của than sinh học và phân bón hữu cơ giàu Si từ vỏ trấu và vỏ lạc đến năng suất lúa ở thí nghiệm đồng ruộng.....	95
Bảng 3.27. Ảnh hưởng của than sinh học giàu Si từ vỏ trấu và vỏ lạc đến hiệu quả kinh tế giữa các công thức ở thí nghiệm đồng ruộng	98
Bảng 3.28. Ảnh hưởng của than sinh học giàu Si từ vỏ trấu và vỏ lạc đến một số tính chất hóa học của đất trước và sau thí nghiệm tại vụ xuân 2024 ở thí nghiệm đồng ruộng.....	100
Bảng 3.29. Hàm lượng Cd và Pb, Si của đất và cây sau thí nghiệm ở vụ xuân 2024 tại thí nghiệm đồng ruộng.....	101
Bảng 3.30. Thời gian sinh trưởng và phát triển của lúa ở mô hình.....	103
Bảng 3.31. Chiều cao cây, khả năng đẻ nhánh và số lá xanh khi thu hoạch lúa ở mô hình	104
Bảng 3.32. Khối lượng tươi và khô của lúa qua các giai đoạn ở mô hình	104
Bảng 3.33. Năng suất và các yếu tố cấu thành năng suất lúa ở mô hình	105
Bảng 3.34. Hiệu quả kinh tế của mô hình	106
Bảng 3.35. Hàm lượng Cd và Pb, Si của đất và cây sau thực hiện mô hình	106

DANH MỤC CÁC HÌNH VẼ, ĐỒ THỊ

Hình 1.1. Lợi ích của than sinh học.....	18
Hình 1.2. Cơ chế hấp thu kim loại nặng trong đất từ vật liệu giàu Si	19
Hình 2.1. Hình ảnh vật liệu và bổ sung TSH vào thí nghiệm trong phòng	45
Hình 3.1. Giá trị CF của hàm lượng KLN trên đất trồng lúa	66
Hình 3.2. Ảnh hưởng của liều lượng phân Si và TSH đến sinh khối tươi và khô của thân và rễ lúa.....	71
Hình 3.3. Năng suất lý thuyết và thực thu của lúa trong vụ hè thu 2023 và đông xuân 2024	97
Hình 3.4. Tương quan giữa hàm lượng Cd, Pb dễ tiêu trong đất và hàm lượng Cd, Pb tổng số trong cây.....	102

MỞ ĐẦU

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Thừa Thiên Huế (nay là thành phố Huế) là tỉnh nằm ở duyên hải miền Trung Việt Nam với tổng diện tích đất tự nhiên năm 2024 của tỉnh Thừa Thiên Huế là 494.710,9 ha trong đó diện tích đất nông nghiệp là 400.306,4 ha (chiếm 80,92%); đất phi nông nghiệp là 88.052,2 ha (chiếm 17,80%); đất chưa sử dụng có 6.352,3 ha (chiếm 1,28%). Trong tổng số 400,306 nghìn ha diện tích đất nông nghiệp thì diện tích lúa chiếm khoảng 53,446 nghìn ha (trong đó diện tích lúa đông xuân là 27,918 nghìn ha, năng suất 67,4 tạ/ha, sản lượng 188,151 nghìn tấn; lúa hè thu là 25,333 nghìn ha, năng suất 62,1 tạ/ha, sản lượng 157,381 nghìn tấn; lúa mùa khoảng 195 ha, năng suất khoảng 18,2 tạ/ha, sản lượng khoảng 355 tấn), năng suất bình quân đạt 64,7 tạ/ha, sản lượng 345,887 nghìn tấn (Niên giám thống kê tỉnh Thừa Thiên Huế, 2024) [32]. Đây là một trong những địa phương chịu ảnh hưởng đáng kể từ biến đổi khí hậu, thường xuyên phải đối mặt với nhiều thiên tai như bão, lũ, hạn hán và triều cường, có diễn biến hết sức phức tạp và nguy cơ khó lường, ảnh hưởng trực tiếp đến sản xuất nông nghiệp.

Theo thống kê thì tỉnh Thừa Thiên Huế chỉ bắt đầu chuyển đổi mô hình trồng trọt theo hướng hữu cơ, đặc biệt là lúa bắt đầu từ năm 2011 và tập trung mạnh từ năm 2016 trở lại đây, tuy nhiên việc thực hiện triển khai các mô hình trồng lúa hữu cơ trên địa bàn tỉnh khá chậm, nhỏ lẻ và không nhiều, tổng diện tích lúa hữu cơ vụ đông xuân 2022 - 2023 trên địa bàn tỉnh Thừa Thiên Huế khoảng 1.105,2 ha/28.024 ha (chiếm khoảng 3,94% so với tổng diện tích lúa gieo trồng vụ đông xuân). Nguyên nhân do tập quán sử dụng phân bón của người nông dân hiện vẫn theo kinh nghiệm truyền thống, việc lạm dụng các loại phân bón hoá học và thuốc bảo vệ thực vật ở mức độ cao, không đúng thời điểm dẫn đến tích lũy các tác nhân ô nhiễm trong đất và cây trồng, thay đổi cấu trúc đất, phá vỡ mối quan hệ đất - cây trồng, ô nhiễm kim loại nặng gây ảnh hưởng xấu đến người tiêu dùng khi sử dụng sản phẩm không an toàn.

Bên cạnh đó, áp lực của tăng trưởng kinh tế, gia tăng dân số, đẩy mạnh đô thị hóa và công nghiệp hóa thiếu biện pháp quản lý môi trường đã trực tiếp hay gián tiếp ảnh hưởng đến môi trường đất, nước, không khí nói chung và ở các vùng sản xuất cây trồng nói riêng. Sự chuyển đổi cơ cấu cây trồng với mức độ đầu tư thâm canh cao ở các vùng ven đô, cũng như việc sử dụng phân bón và hóa chất bảo vệ ở mức cao và không đúng thời điểm dẫn đến thay đổi cấu trúc đất, phá vỡ mối quan hệ đất, cây, tích lũy các tác nhân ô nhiễm trong đất và cây trồng, gây ảnh hưởng xấu đến người tiêu dùng khi sử dụng sản phẩm không an toàn. Hiện nay, ô nhiễm kim loại nặng trong đất là một trong những vấn đề môi trường đáng quan tâm. Kim loại nặng tác động trực

tiếp đến sức khỏe cây trồng, vật nuôi và đặc biệt là xâm nhập vào chuỗi thức ăn, gây ra những hậu quả khó lường đối với con người.

Than sinh học có vai trò quan trọng trong nông nghiệp, môi trường và công nghiệp như cải tạo đất, giảm thiểu biến đổi khí hậu, lọc nước, phụ gia thức ăn và nguồn năng lượng sạch. Nó giúp đất tăng khả năng giữ nước và dinh dưỡng, hỗ trợ hệ vi sinh vật có lợi, cô lập độc tố, lưu trữ carbon, và giảm phát thải khí nhà kính, ô nhiễm kim loại nặng trong đất, từ đó góp phần xây dựng một nền nông nghiệp và môi trường bền vững (Ahmad et al., 2020 [81]; Chen et al., 2023 [99])

Silicon (Si) là nguyên tố chiếm khối lượng lớn thứ hai trên bề mặt trái đất và được coi là nguyên tố có lợi cho nhiều loại cây trồng (Deshmukh et al., 2017) [105]. Việc sử dụng Si nhằm giảm thiểu các tác động tiêu cực đến môi trường, trong đó có hấp thu kim loại nặng đang ngày càng phổ biến trên thế giới, do đó việc bổ sung Si cho cây trồng đang nhận được nhiều sự quan tâm. Than sinh học giàu Si (Sichar) là một chất rắn thu được từ quá trình ủ hoặc carbon hóa sinh khối giàu Si như rơm rạ, vỏ trấu, thân lá cây ngô,... Sichar có thể là một chất cải tạo đất tốt, không chỉ để duy trì sản xuất lúa mà còn để giảm tình trạng tích lũy kim loại nặng trong quá trình canh tác lúa. Các loại Sichar từ vỏ trấu hoặc vỏ lạc được xem là nguồn cung cấp Si sinh học tiềm năng cho các cây trồng tích lũy Si cao ở Việt Nam (Hughes et al., 2020) [135], vì lượng sinh khối này hàng năm rất cao, nhưng chúng vẫn chưa được sử dụng một cách hiệu quả. Sự phân giải Si từ TSH là một quá trình quan trọng để cung cấp phân Si cho cây trồng. Vì vậy, cần đánh giá tiềm năng cung cấp Si từ than sinh học nhằm cung cấp Si cho cây. Hiện nay, việc nghiên cứu và tìm ra các giải pháp nhằm giảm hàm lượng kim loại nặng trong đất có ý nghĩa quan trọng trong việc cải tạo ô nhiễm môi trường đất, nhất là trong bối cảnh diện tích đất sản xuất nông nghiệp trên toàn cầu đang suy giảm nhanh chóng cả về diện tích lẫn chất lượng, gây ảnh hưởng đến an ninh lương thực và mục tiêu phát triển bền vững. Tại Việt Nam đã có một số công trình nghiên cứu về phương pháp xử lý kim loại nặng trong đất như của Đặng Đình Kim (2013) [24] đã xác định một số loại cây trồng như cỏ màn trầu, cải xanh, nghệ nước, dương xỉ... thích hợp với việc xử lý đất ô nhiễm kim loại nặng; Đinh Thị Lan Phương và cs. (2022) [34] nghiên cứu khả năng giảm độc tố Cd trong đất ô nhiễm bởi phụ phẩm nông nghiệp cho thấy đem lại hiệu quả cao. Hàm lượng Si dễ tiêu trong đất rất thấp, do vậy bổ sung Si dễ tiêu tự nhiên từ Sichar là một hướng đi cần nghiên cứu. Hướng đi mới này không chỉ giúp tiết kiệm chi phí mà còn thân thiện với môi trường, đồng thời có tính ứng dụng thực tiễn cao trong sản xuất nông nghiệp hữu cơ. Do đó, bón Sichar có thể là một biện pháp đơn giản để tăng năng suất cây trồng trên đất trồng lúa có tích lũy kim loại nặng. Do đó, đề tài: ***“Nghiên cứu ảnh hưởng của than sinh học giàu Si từ phụ phẩm cây trồng đến sản xuất lúa và hàm lượng kim loại nặng trong đất tại tỉnh Thừa Thiên Huế”*** được thực hiện.

2. MỤC TIÊU ĐỀ TÀI

2.1. Mục tiêu tổng quát

Tìm ra được dạng và liều lượng than sinh học giàu Si từ phụ phẩm cây trồng thích hợp cho cây lúa nhằm đạt năng suất cao và giảm hàm lượng kim loại nặng trên đất trồng lúa tại tỉnh Thừa Thiên Huế.

2.2. Mục tiêu cụ thể

- Xác định được hiện trạng sử dụng phụ phẩm cây trồng và than sinh học tại vùng trồng lúa của tỉnh Thừa Thiên Huế.

- Xác định được hàm lượng một số nguyên tố kim loại nặng trong đất trồng lúa như Cd, Pb, Cu, Zn tại tỉnh Thừa Thiên Huế.

- Xác định được dạng và liều lượng than sinh học giàu Si từ phụ phẩm cây trồng phù hợp cho cây lúa đạt được năng suất, hiệu quả kinh tế và giảm hàm lượng kim loại nặng trên đất trồng lúa tại tỉnh Thừa Thiên Huế.

- Xây dựng được mô hình bón than sinh học giàu Si trong sản xuất lúa đạt năng suất cao và giảm hàm lượng kim loại nặng trên đất phù sa tại tỉnh Thừa Thiên Huế.

3. Ý NGHĨA KHOA HỌC VÀ THỰC TIỄN CỦA ĐỀ TÀI

3.1. Ý nghĩa khoa học

Kết quả nghiên cứu cung cấp cơ sở lý luận cho việc sử dụng than sinh học giàu Si từ phụ phẩm cây trồng trong quy trình canh tác lúa hữu cơ đạt năng suất và hiệu quả kinh tế, cải thiện chất lượng đất, đặc biệt là giảm thiểu hàm lượng kim loại nặng tích lũy trong đất canh tác lúa.

Nghiên cứu được sử dụng làm tài liệu tham khảo cho các công trình khoa học có liên quan tại tỉnh Thừa Thiên Huế cũng như tại các khu vực khác có điều kiện sinh thái tương đồng, từ đó góp phần định hướng các giải pháp canh tác bền vững trong sản xuất lúa.

3.2. Ý nghĩa thực tiễn

Kết quả nghiên cứu có ý nghĩa thực tiễn quan trọng trong giải quyết vấn đề xử lý phụ phế phẩm nông nghiệp tại địa phương, tạo ra được than sinh học giàu Si bổ sung vật liệu hữu cơ trong hấp thu kim loại nặng trong đất, giảm thiểu ô nhiễm và bảo vệ môi trường.

Kết quả nghiên cứu góp phần hoàn thiện quy trình sản xuất lúa trên địa bàn tỉnh Thừa Thiên Huế; khuyến cáo nông dân sử dụng than sinh học giàu Si cho cây lúa hướng tới nền nông nghiệp bền vững.

4. PHẠM VI NGHIÊN CỨU CỦA LUẬN ÁN

- Khảo sát tình hình sử dụng phụ phẩm cây trồng, than sinh học trong sản xuất lúa thực hiện tại xã Quảng Thọ và xã Quảng Phú, huyện Quảng Điền, tỉnh Thừa Thiên Huế trong thời gian từ tháng 12/2022 đến tháng 01/2023.

- Mẫu đất trồng lúa được thu thập tại xã Quảng Thọ và Quảng Phú, huyện Quảng Điền và phường Thủy Phương, thị xã Hương Thủy, thành phố Huế trong thời gian tháng 01/2023.

- Các thí nghiệm trong phòng và trong nhà lưới được tiến hành tại Khoa Nông học, Trường Đại học Nông Lâm, Đại học Huế trong thời gian từ tháng 02 đến tháng 4/2023 (vụ xuân) và tháng 4 đến tháng 6/2023 (vụ xuân hè).

- Các thí nghiệm đồng ruộng được tiến hành tại xã Quảng Thọ, huyện Quảng Điền, tỉnh Thừa Thiên Huế trong thời gian từ tháng 6 đến tháng 9/2023 (vụ hè thu) và tháng 01 đến tháng 5/2024 (vụ đông xuân).

- Mô hình sản xuất lúa thực hiện từ tháng 5 đến tháng 8/2024 (vụ hè thu).

- Phân tích các mẫu đất, cây, phân bón và than sinh học tại Bộ môn Khoa học Cây trồng, Khoa Nông học, Trường Đại học Nông Lâm, Đại học Huế trong thời gian từ tháng 02/2023 đến tháng 9/2024.

- Các thí nghiệm trong phòng, trong nhà lưới và trên đồng ruộng chỉ tập trung vào hai nguyên tố kim loại nặng Cd, Pb trên đất trồng lúa tại xã Quảng Thọ, huyện Quảng Điền, tỉnh Thừa Thiên Huế để phục vụ mở rộng diện tích canh tác lúa hữu cơ tại địa phương.

5. ĐÓNG GÓP MỚI CỦA LUẬN ÁN

- Xác định được than sinh học giàu Si từ vỏ trấu và vỏ lạc có khả năng giảm hàm lượng kim loại nặng (Cd và Pb tổng số và dễ tiêu) trong đất phù sa trồng lúa, đặc biệt là than sinh học giàu Si từ vỏ trấu ở lượng bón 15 g/kg đất (thí nghiệm trong nhà lưới) và 15 tấn/ha (thí nghiệm đồng ruộng).

- Xác định được bón 15 tấn/ha than sinh học giàu Si từ vỏ trấu phù hợp cho cây lúa đạt năng suất và hiệu quả kinh tế cao trên đất phù sa tại tỉnh Thừa Thiên Huế.

CHƯƠNG 1

TỔNG QUAN NGHIÊN CỨU

1.1. CƠ SỞ LÝ LUẬN CỦA ĐỀ TÀI

1.1.1. Khái quát về than sinh học

1.1.1.1. Khái niệm và đặc điểm than sinh học

Than sinh học (TSH) là sản phẩm được hình thành từ quá trình nhiệt phân các vật liệu hữu cơ trong điều kiện yếm khí hoặc thiếu oxy. TSH có khả năng tồn tại lâu dài, gia tăng lượng carbon lưu giữ trong đất, giảm phát thải carbon ra khí quyển và từ đó cải thiện sức sản xuất của đất. (Li et al., 2023) [162].

TSH được gọi là “vàng đen” nhờ những lợi ích quan trọng đối với môi trường và nông nghiệp, là yếu tố chủ chốt trong cuộc cách mạng xanh lần thứ 3. Với hàm lượng carbon cao và cấu trúc xốp, TSH giúp đất giữ nước, dưỡng chất và bảo vệ hệ vi sinh vật có lợi. Nó cũng hoạt động như bể chứa carbon tự nhiên, cô lập và giữ khí CO₂ trong đất, đồng thời có khả năng trao đổi cation, hấp thu kim loại nặng và các hóa chất nông nghiệp như thuốc trừ sâu, thuốc diệt cỏ. Điểm nổi bật khi sử dụng TSH là nâng cao hiệu quả sử dụng nitơ của cây trồng. Nhiều bằng chứng cho thấy năng suất không đổi khi giảm đáng kể lượng phân N và bón bổ sung TSH (Nguyễn Đăng Nghĩa, 2014) [31].

TSH thường được sản xuất ở nhiệt độ từ 300° đến 700°C (lên đến 1000°C) trong môi trường thiếu oxy, đôi khi sử dụng các chất xúc tác như Ni₂O₃, MgO, Al₂O₃, ZSM-5 và Al-MCM-41 (Miandad et al., 2016) [174]. Cách sản xuất TSH ảnh hưởng đến tỷ lệ các nhóm chức C, cũng như các đặc tính khác bao gồm pH, kích thước lỗ, cấu trúc lỗ, diện tích bề mặt riêng và khả năng trao đổi cation (CEC) (Wang et al., 2017 [242]; Hafeez et al., 2022 [125]). Kích thước lỗ rỗng của bề mặt TSH, là một thành phần quan trọng của Hình thái bề mặt TSH, phụ thuộc vào quá trình nhiệt phân và thời gian (Gujre et al., 2021) [121]. TSH được sản xuất bằng quá trình nhiệt phân chậm có độ xốp, pH (thường trên 7) và diện tích bề mặt (100 - 800 m²/g) cao hơn (Weber và Quicker, 2018) [243]. Trong quá trình sản xuất TSH, sinh khối phân hủy trải qua ba giai đoạn. Nhiệt độ đầu tiên dưới 150°C cho phép nước bốc hơi và phân hủy hemicellulose và các hợp chất dễ bay hơi; giai đoạn thứ hai diễn ra ở nhiệt độ 150 - 400°C và gây ra sự phân hủy cellulose; và ở giai đoạn thứ ba, quá trình phân hủy lignin và quá trình đốt than diễn ra ở nhiệt độ trên 400°C. Hàm lượng O, H và N trong TSH giảm khi nhiệt độ tăng, điều này là do mất chất dễ bay hơi và nước trong các hợp chất hữu cơ (Weber và Quicker, 2018) [243].

TSH có diện tích bề mặt lớn hơn và hàm lượng kiềm cao hơn có khả năng hấp thu KLN, thuốc trừ sâu và chất ô nhiễm hữu cơ tốt hơn (Shen et al., 2019) [223]. Nhiệt độ nhiệt phân, quy trình nhiệt phân và loại nguyên liệu là những yếu tố chính quyết định đến tính chất vật lý và hóa học của TSH. Độ xốp của TSH cung cấp nguồn dinh dưỡng và nước tốt cho sự phát triển của thực vật và sinh sản của vi sinh vật (Yu et al., 2019) [263]. Kích thước của các lỗ rỗng này cũng giúp cung cấp diện tích bề mặt giúp tăng cường sự đa dạng tiềm năng của vi sinh vật và các vị trí liên kết cho các ion dinh dưỡng. Kích thước hạt nhỏ hơn và diện tích bề mặt riêng lớn hơn của TSH dẫn đến sự gia tăng chỉ số trao đổi cation (CEC) (Kavitha et al., 2018) [151]. Mặt khác, kích thước hạt TSH lớn hơn có nghĩa là độ dẫn thủy lực bão hòa thấp hơn trong đất cát, làm tăng khả năng giữ nước trong đất (Lim et al., 2016) [166]. Các tính chất này chủ yếu bị ảnh hưởng bởi loại nguyên liệu thô, nhiệt độ và các điều kiện vận hành khác. Hamzah và Shuhaimi (2018) [126] cho thấy có các nhóm chức năng như O–H, Si–OH, H–C–H, C–H, N=O, C–F và N–H trong rơm rạ; O–H, H–C–H, C–H, C=O, C–F trong trấu và C–O trong TSH. Khi nhiệt độ nhiệt phân tăng, hàm lượng oxygen (O) và hydrogen (H) cũng như tỷ lệ mol H/C đều giảm.

1.1.1.2. Khái niệm và đặc điểm của than sinh học giàu Si

Si là nguyên tố phổ biến thứ hai trong lớp vỏ trái đất và hàm lượng của nó trong một số TSH có nguồn gốc từ thực vật ưa Si như rơm rạ có thể đạt tới khoảng 20% (vật chất khô). Qian et al., (2016) [200] cho rằng hiện tượng Cu kết tủa Al với các hạt Si từ TSH phân chuồng, có thể làm giảm hiệu quả độc tính thực vật của nhôm ở lúa mì. Hơn nữa, Si được giải phóng từ TSH chứa Al tham gia vào quá trình tái cấu trúc alumino-Si, dẫn đến việc làm giảm độc tính thực vật của Al trong đất chua (Qian et al., 2016) [200].

TSH giàu Si chính là TSH được sản xuất từ các nguyên liệu có hàm lượng Si cao như vỏ trấu, rơm rạ,...trong điều kiện nhiệt độ thích hợp từ 500 - 700°C. Lúa được coi là loại cây giàu Si có thể hấp thu Si từ đất dưới dạng axit Si hòa tan (Ma, et al., 2006) [171], và thân lúa chứa tới 10% Si trong sinh khối khô và 270 kg/ha/năm đối với toàn bộ cây lúa (Desplanques et al., 2006) [104]. Rơm rạ và trấu là nguồn Si phong phú, vì vậy rơm hoặc trấu đã carbon hóa là một loại phân bón Si tốt (Ma et al., 2015) [172]. Hàm lượng carbon, Si, tro và diện tích bề mặt BET-N₂ tăng khi nhiệt độ nhiệt phân tăng (Xiao et al., 2014) [250] và sản lượng TSH giảm. Rõ ràng, TSH có nguồn gốc từ vỏ trấu và rơm rạ có hàm lượng Si cao hơn (TSH giàu Si), chứa 16,11 - 25,70% Si đối với TSH giàu Si từ vỏ trấu và 11,02 - 18,46% Si đối với TSH từ rơm rạ, trong khi TSH có nguồn gốc từ vụn gỗ và vỏ cam có hàm lượng Si thấp hơn (TSH thiếu Si), chỉ chứa 0,30 - 0,37% Si đối với TSH từ vỏ gỗ và 0,30 - 0,43% Si đối với TSH từ vỏ cam. Nhìn chung, Si là thành phần chính của tro (Xiao et al., 2014) [250].

TSH có diện tích bề mặt lớn, thể hiện khả năng hấp thu mạnh với các hợp chất HC. Trong số các loại TSH, sản phẩm từ rơm rạ có diện tích bề mặt 234,9 m²/g, độ xốp 0,4392 ml/g và số lượng các nhóm chức năng là 2,99 mmol/g, cao nhất so với các nguyên liệu khác. Phần tro của TSH chứa nhiều loại muối, chủ yếu phụ thuộc vào hàm lượng khoáng chất có trong nguyên liệu ban đầu. Nhiều nghiên cứu cho thấy, hàm lượng tro của TSH thay đổi từ 0,5 - 55% tùy nguồn nguyên liệu và điều kiện nhiệt phân (Wang et al., 2021 [240]; Puri et al., 2024 [199]; Sotoudehnia et al., 2020[230]). TSH sản xuất từ cỏ và phụ phẩm cây ngô có hàm lượng tro 26 - 54%, trong đó thành phần Si chiếm tỷ lệ lớn; trong khi tro từ gỗ cứng chủ yếu chứa các kim loại kiềm. Các yếu tố phổ biến nhất có trong TSH là K, Ca, Si và một lượng nhỏ Al, Fe, Mg, P, Na và Mn. Các nguyên tố này tồn tại chủ yếu dưới dạng bị ôxi hóa, chẳng hạn như Na₂ O, CaO, K₂ O có khả năng hòa tan trong nước ở các mức độ khác nhau. Đây cũng là phần tro cung cấp Ca của TSH (Puri et al., 2024) [199]. Lúa là cây tích lũy Si, trong đó Si đóng vai trò quan trọng cả về mặt vật lý và hóa học cho sự phát triển của cây. Trấu và rơm rạ chứa hàm lượng Si rất cao (220 và 170 g/kg) so với nhiều cây trồng khác. Si tồn tại trong thực vật dưới dạng phytolith, vì vậy bón TSH trở lại đất là một nguồn bổ sung Si quan trọng cho lúa (Trần Viết Cường, 2022 [6]).

1.1.1.3. Vai trò của than sinh học

Theo Nguyễn Đăng Nghĩa (2014) [31], TSH có vai trò quan trọng như sau:

- Đóng vai trò quan trọng trong việc cung cấp các nguyên tố dinh dưỡng có lợi cho quá trình sinh trưởng và phát triển của cây trồng. Việc bổ sung TSH vào đất giúp cải thiện đồng thời các đặc tính vật lý và hóa học của đất, tạo môi trường thuận lợi cho hoạt động của các nhóm vi sinh vật có ích, từ đó góp phần nâng cao hiệu quả sử dụng dinh dưỡng của cây.

- Ngoài khả năng cung cấp các nguyên tố thiết yếu, TSH còn giúp gia tăng hàm lượng dinh dưỡng dễ tiêu và khả năng giữ nước trong đất nhờ cấu trúc rỗng, xốp, có diện tích bề mặt lớn và khả năng hấp phụ cao. Bên cạnh đó, TSH chứa các hợp chất hữu cơ hoạt tính như axit humic và các hormone thực vật tự nhiên, có tác dụng kích thích sinh trưởng và phát triển cây trồng. Nhiều nghiên cứu cho thấy việc kết hợp TSH với phân khoáng giúp cải thiện rõ rệt năng suất và sinh khối cây trồng so với việc sử dụng đơn lẻ (Lehmann et al., 2002) [155].

- Bổ sung TSH vào đất còn giúp nâng cao chất lượng đất từ 80% đến 220%, cải thiện khả năng hấp thu dinh dưỡng của cây, đồng thời làm giảm hiện tượng xói mòn, đặc biệt tại các khu vực có địa hình dốc hoặc kết cấu đất yếu.

- Về phương diện sinh địa hóa, TSH góp phần đáng kể vào chu trình carbon thông qua khả năng ổn định các hợp chất hữu cơ, hạn chế sự phân hủy sinh học giải phóng CO₂ ra khí quyển. Cơ chế này cho phép cây trồng lưu trữ an toàn lượng

CO₂ hấp thu trong quá trình quang hợp, qua đó giúp cân bằng phát thải khí nhà kính. Đặc biệt, TSH có khả năng hấp phụ và lưu giữ khoảng 50% lượng CO₂ phát sinh từ hô hấp của cây trồng, chuyển hóa thành các dạng carbon ổn định, góp phần giảm thiểu hiệu ứng nhà kính và thúc đẩy phát triển nông nghiệp bền vững.

Nhiều công trình nghiên cứu đã khẳng định rằng việc bón kết hợp TSH và phân khoáng trên các loại đất chua, nghèo dinh dưỡng mang lại hiệu quả canh tác cao hơn so với bón đơn lẻ. Điểm nổi bật là TSH làm tăng hiệu suất sử dụng phân đạm (N), cho phép giảm lượng phân bón hóa học mà vẫn duy trì năng suất cây trồng ổn định (Oladele et al., 2019 [191]; Ning et al., 2022 [183]; Chen et al., 2022 [98]).

- Ngoài ra, TSH còn có khả năng hấp phụ và cố định các chất độc trong đất, đặc biệt là cyanua và kim loại nặng tại những khu vực chịu ảnh hưởng của hoạt động khai thác khoáng sản. Nhờ đó, việc ứng dụng TSH góp phần phục hồi và tái tạo môi trường đất bị thoái hóa, hướng tới mục tiêu phát triển nông nghiệp thân thiện với môi trường và giảm phát thải carbon.

- TSH được xem là chất cải tạo đất, cải thiện hiệu quả sử dụng tài nguyên, bảo vệ chống lại ô nhiễm môi trường, giảm thiểu khí nhà kính (IBI, 2014) [136].

1.1.1.4. Các yếu tố ảnh hưởng đến chất lượng than sinh học

Tính chất hóa học và vật lý của than sinh học sản xuất từ trấu thay đổi tùy theo nhiệt độ nung. Cụ thể, hiệu suất tạo than giảm đáng kể từ 51,75% xuống còn 35,93% khi nhiệt độ tăng từ 350°C lên 650°C; khối lượng riêng của sản phẩm có xu hướng tăng theo nhiệt độ và đạt giá trị cao nhất 0,93 g/cm³ ở 500°C. Giá trị pH cùng độ dẫn điện (EC) cũng tăng dần theo nhiệt độ nung, dao động lần lượt từ 7,8 đến 10,1 và từ 0,15 đến 0,52 mS/cm. Khả năng giữ nước đạt cao nhất tại 550°C với tỷ lệ 393,06% (w/w); trong khi độ tro tăng từ mức trung bình 29,88% (ở 350°C) lên 42,49% (ở 600°C). Đối với TSH nung ở 550°C, diện tích bề mặt riêng đạt 42,22 m²/g, cấu trúc rỗng xốp với kích thước lỗ 0,12–0,23 nm; các nhóm chức hóa học đặc trưng gồm C=C và O–H; điểm điện tích không ở pH 6,8 và kết quả phổ XRD cho thấy cấu trúc carbon ở dạng vô định hình. (Võ Thị Minh Thảo và cs., 2021) [67].

1.1.2. Phụ phẩm cây trồng chứa Si cao

Si đã thu hút được sự chú ý cao trong sản xuất nông nghiệp do tác động có lợi của nó trong việc cải thiện năng suất và chất lượng của nhiều loại cây trồng. Những tác động có lợi đó liên quan đến tích lũy Si khác nhau tùy theo loài thực vật (Jiang et al, 2024) [142].

Các loại cây một lá mầm như lúa (*Oryza sativa*), lúa mì (*Triticum aestivum*), cỏ lúa mạch đen (*Lolium perenne*), ngô (*Zea mays*), lúa mạch (*Hordeum vulgare*), chuối (*Musa sp.*) được cho là hấp thu và lắng đọng nhiều Si hơn bằng cách vận chuyển tích

cực. Vận chuyển tích cực cho phép nhiều Si di chuyển qua màng hơn do sự hiện diện của các protein vận chuyển Si như poly-2-vinylpyridine-1-oxide có ở màng tế bào chất. Si đóng vai trò là aluminoSi tinh thể không hòa tan trong đất mà cây có rễ không thể hấp thu (Yan et al., 2017) [260]. Khoáng vật Si chính này bị phong hóa và khử Si để giải phóng Si hòa tan dưới dạng axit Si. Axit Si được lấy từ dung dịch bên ngoài và giải phóng vào apoplast của mô khí, sau đó được vận chuyển vào trụ (Ma et al., 2015) [172]. Sau đó, nó được chuyển vào chồi thông qua quá trình thoát hơi nước bằng mạch gỗ. Do mất nước lớn, axit Si được cô đặc và tiếp tục trùng hợp thành pha Si vô định hình mà không có bất kỳ năng lượng nào cao hơn 2 mol/l (Ma et al., 2015) [172]. Tỷ lệ và vị trí của Si vô định hình khác nhau tùy theo loài và độ tuổi của thực vật. Si vô định hình có thể được tìm thấy trong lớp biểu bì của lá, hạt và quả của cây và thảo mộc và các mô của phiến lá và lá bắc cụm hoa ở cây cỏ (Shakoor, 2014) [221]. Người ta quan sát thấy cây trưởng thành sở hữu phần lớn Si vô định hình lắng đọng do quá trình tích lũy Si không thể đảo ngược trong thành tế bào già hơn. Hàm lượng Si trong phụ phẩm cây trồng thay đổi trong khoảng 9 - 93%. Một số cây hai lá mầm được phân loại là cây tích tụ Si trung gian như lạc, mù tạt và hạt cải dầu cho thấy hàm lượng Si thấp hơn. Các phụ phẩm cây trồng từ cây một lá mầm như lúa mạch, ngô, yến mạch, lúa, lúa miến và lúa mì có xu hướng chứa nồng độ Si cao do chúng hấp thu Si tích cực. Si tập trung nhiều hơn ở các tế bào vỏ quả so với tế bào gốc, vì tác dụng có lợi của Si trong việc cung cấp khả năng phòng vệ vật lý bằng cách tạo ra cấu trúc cứng trong hạt hoặc ngũ cốc.

Rơm và trấu chứa lần lượt là 76g Si/kg và 40g Si/kg. Chúng có năng suất Si cao nhất. Lượng Si có thể chiết xuất từ rơm và trấu trên toàn thế giới là 28.000 - 55.000 triệu kg mỗi năm (Lu et al., 2024) [169]. Lá mía có năng suất Si thấp hơn rơm và trấu, nhưng năng suất mía cao có thể tăng cường Si do vậy đạt mức khoảng 37.000 triệu kg/năm. Lá mía sẽ là phế phẩm nông nghiệp tốt nhất để tạo ra Si nếu diện tích thu hoạch được xem xét. Nó có thể tạo ra 1415kg Si/ha, tiếp theo là bã mía, rơm, trấu và vỏ cọ dầu (Divyangkumar and Panwar, 2025) [111]. Các phụ phẩm cây trồng khác có nguồn gốc từ lúa mạch, dừa, ngô, yến mạch, hạt cải dầu, lúa miến và lúa mì có năng suất Si thấp hơn (Sow et al, 2020) [231].

Trấu là sản phẩm phụ thu được từ xay xát gạo và chiếm 20% trọng lượng gạo. Thành phần vô cơ chính trong trấu là Si (~20%) (Peng et al, 2024) [196]. Xu hướng chiết xuất Si từ trấu đang gia tăng trong lĩnh vực nghiên cứu hiện tại. Hầu hết trấu chỉ được xử lý như chất thải và thải ra bãi chôn lấp, nhưng chất thải này có thể gây ra hỏa hoạn và ô nhiễm môi trường. Hơn nữa, các hạt có nguồn gốc từ việc đốt trấu có thể gây ra các bệnh về đường hô hấp nếu hít phải (Rahman et al., 2023) [202]. Do đó, việc tái chế chất thải và tái tạo thành vật liệu có giá trị cao là rất quan trọng để duy trì tính

bền vững của môi trường. Trấu có thể được sử dụng làm nguyên liệu thô để sản xuất các sản phẩm sử dụng Si vì hàm lượng Si cao (Gu et al., 2013) [120].

Rơm rạ là thân cây lúa được phân loại trong quá trình thu hoạch lúa và được coi là chất thải nông nghiệp. Rơm rạ là một trong những chất thải nông nghiệp có hàm lượng Si cao (Huges et al., 2020) [135]. Hàm lượng Si trong rơm rạ nhiều hơn các loại cây khác. Các thành phần hữu cơ có trong rơm rạ là cellulose (32 - 47%), hemicellulose (19 - 27%), lignin (5 - 24%) và tro (13 - 20%) (Sharma et al., 2020) [222]. Thành phần tro phụ thuộc vào giống lúa, khí hậu và điều kiện khí hậu nông nghiệp nơi trồng lúa (Zaky et al., 2008) [264].

1.1.3. Vai trò của Si và than sinh học giàu Si đối với cây trồng

Si là một nguyên tố vi lượng giữ vai trò quan trọng đối với nhiều loài thực vật bậc cao. Những loài có hàm lượng Si cao thường thuộc nhóm hai lá mầm, đặc biệt là các cây họ Đậu. Sau khi được rễ hấp thu, Si được vận chuyển và tích lũy chủ yếu tại mạch gỗ và thành tế bào dẫn truyền. Nhờ tính linh động cao, Si có thể thay đổi cấu trúc để thích ứng với điều kiện thời tiết khắc nghiệt, qua đó góp phần điều hòa nhiệt độ và giảm tác động của các biến đổi bất lợi lên cây. Đối với cây lúa, Si là nguyên tố đặc biệt cần thiết, giúp thân cây khỏe, cứng cáp, tăng khả năng chống đổ ngã, chịu ngập và kháng gió hiệu quả. Ngoài ra, Si còn hỗ trợ tăng cường khả năng kháng bệnh, giúp cây chống lại sự xâm nhập của một số loại vi sinh vật gây hại và côn trùng. Đối với cây lúa, Si giúp lá mọc thẳng, tăng khả năng hấp thu ánh sáng, từ đó nâng cao hiệu quả quang hợp và hiệu lực sử dụng nitơ. Sự tương tác giữa Si và P còn thúc đẩy quá trình hấp thu dinh dưỡng, giúp cây sinh trưởng nhanh hơn, đồng thời làm giảm nồng độ Fe và Al trong mô thực vật, qua đó tăng khả năng chống chịu phèn cho cây lúa (Ma et al., 2015) [172].

Việc bổ sung Si và biochar giàu silic vào đất trồng lúa cho thấy nhiều hiệu quả tích cực: tăng khả năng sẵn có của Si trong đất, cải thiện pH đất, tăng sức giữ ẩm, cải thiện cấu trúc đất và sinh khối rễ/lá, đồng thời giảm ảnh hưởng của các chất độc như Cd nếu có. Trong một thử nghiệm sử dụng biochar giàu Si trên đất paddy đỏ, các dạng Si: *available Si*, *organic Si* và Si- liên kết với Fe/Mn- oxide đều tăng lớn và năng suất lúa tăng rõ ràng so với đối chứng (Hu et al., 2022) [134]. Biochar và Si cũng giúp tăng tích lũy các dưỡng chất như N, P, K trong đất và cây lúa, cải thiện năng suất hạt (Xie et al., 2023) [252].

1.1.4. Khái quát về kim loại nặng trong đất

1.1.4.1. Khái niệm

Kim loại nặng (KLN) là các chất gây ô nhiễm môi trường nghiêm trọng, có độc tính cao đối với hệ sinh thái, sinh vật và con người, do đó được xem là vấn đề cần đặc biệt quan tâm. Thuật ngữ “KLN” được dùng để chỉ các nguyên tố kim loại hoặc á kim

có mật độ nguyên tử lớn hơn 5 g/cm^3 , tức cao gấp khoảng 5 lần hoặc hơn so với nước, và có khả năng gây độc ngay cả ở nồng độ thấp (Raychaudhuri et al., 2021) [207]. Tuy nhiên, độc tính của KLN chịu ảnh hưởng nhiều hơn bởi đặc tính hóa học của chúng hơn là bởi mật độ (Nguyễn Thị Phương Dung, 2024) [7].

1.1.4.2. Phân loại

Kim loại được chia thành bốn nhóm chính: kim loại kiềm, kim loại kiềm thổ, kim loại chuyển tiếp và kim loại hậu chuyển tiếp. Bên cạnh đó, còn có các nhóm phân loại đặc biệt khác như kim loại nặng, kim loại đất hiếm và nhóm kim loại nội chuyển tiếp (gồm actinide và lantanide).

KLN bao gồm Pb, Cd, Ni, Co, Fe, Zn, Cr, As, Ag và các nguyên tố nhóm bạch kim. Dựa trên đặc tính hoá học và sinh học, KLN được chia làm 4 nhóm chính: (1) kim loại quý (Pd, Pt, Au, Ag, Ru...), (2) kim loại dinh dưỡng vi lượng hoặc siêu vi lượng (Cu, Fe, Mn/Ni, Mo, Se...), (3) kim loại độc (Hg, Cr, Pb, Ni, Cd, As, Sn...), (4) kim loại phóng xạ (U, Th, Ra, Am...) (Raychaudhuri et al., 2021) [207].

1.1.4.3. Nguồn gây ô nhiễm kim loại nặng trong đất

Ô nhiễm đất nông nghiệp bởi KLN hiện là một vấn đề môi trường nghiêm trọng và là mối quan tâm lớn do những tác động sinh thái bất lợi tiềm tàng của chúng. KLN được xem là chất gây ô nhiễm đất vì chúng tồn tại phổ biến và có khả năng gây độc cấp tính hoặc mãn tính đối với cây trồng trên đất canh tác (Rashid et al., 2023) [205]. Nguồn gốc của KLN trong môi trường rất đa dạng, bao gồm: (1) nguồn tự nhiên, (2) nguồn nông nghiệp, (3) nguồn công nghiệp, (4) nước thải sinh hoạt, (5) nguồn khí quyển và (6) các nguồn khác. Như vậy, ô nhiễm KLN có thể phát sinh từ cả yếu tố tự nhiên lẫn các hoạt động do con người gây ra. Các KLN từ nguồn tự nhiên và nông nghiệp thường liên quan đến quá trình Hình thành sản phẩm nông nghiệp và có ảnh hưởng đáng kể đến sức khỏe con người (Alloway, 2013) [87].

Đất có thể bị ô nhiễm do tích tụ KLN và một số phi kim loại từ các nguồn như khí thải công nghiệp, chất thải mỏ, xử lý chất thải kim loại, xăng, sơn, phân bón, bùn thải, thuốc trừ sâu, ... Đất là nơi tập trung các KLN phát sinh từ các hoạt động nhân tạo này và hầu hết kim loại không bị phân hủy sinh học hay hóa học, do đó tồn tại trong đất trong thời gian dài (Khan et al., 2017) [149].

Quá trình sản xuất nông nghiệp đã làm gia tăng đáng kể hàm lượng KLN trong nước và đất. Các hóa chất bảo vệ thực vật, đặc biệt là phân lân, thường chứa KLN như Cd, As, Pb, Hg. Hoạt động phun thuốc, bón phân hóa học hoặc rửa trôi đất mang theo các KLN này dẫn đến sự hiện diện của chúng trong nguồn nước (Khan et al., 2017) [149]. Tại Việt Nam, mỗi năm sử dụng khoảng 9 triệu tấn hóa chất thuộc hơn 500 loại, phần lớn là thuốc trừ sâu, còn lại là thuốc trừ cỏ và trừ bệnh. Ô nhiễm môi trường nước

còn nghiêm trọng ở các làng nghề tái chế kim loại, nơi xả thải trực tiếp mà không qua xử lý (Nguyễn Thanh Giao và cs., 2021) [11]. Do đó, hàm lượng KLN như Cu, Pb và Zn trong nước thải và đất nông nghiệp rất cao; đặc biệt, nồng độ Pb trong một số nguồn nước thải cao gấp 100 lần tiêu chuẩn cho phép, trở thành tác nhân chính gây ô nhiễm đất và nguồn nước mặt. Việc sử dụng phân bón không hợp lý cũng dẫn đến tích lũy KLN như Pb và Cd trong đất nông nghiệp (Pham et al., 2021) [197].

Theo Phạm Quang Hà (2024) [14] thì Cd là một KLN không mong muốn và là tác nhân gây ô nhiễm chính trong phân bón được quan tâm. Cd thường xuất hiện trong trầm tích chứa Zn và P, do đó có mặt trong nhiều loại phân P. Hàm lượng Cd trong phân bón phụ thuộc vào nguồn đá phosphat sử dụng để sản xuất, tuy nhiên tại Việt Nam, các loại đá này có nồng độ Cd tương đối thấp so với nhiều quốc gia khác. Dù vậy, việc bón phân P quá nhiều trong thời gian dài vẫn có thể gây ảnh hưởng xấu đến cây trồng.

1.1.4.4. Kim loại nặng trong đất và mối liên hệ với sinh lý cây trồng

Nguyễn Thị Phương Dung (2024) [7], chỉ ra rằng độc tính của KLN có tác động nghiêm trọng đến sinh lý của một số loại cây trồng, từ đó ảnh hưởng trực tiếp đến hệ sinh thái, nơi mà thực vật đóng vai trò là một mắt xích quan trọng. Thực vật sinh trưởng trong môi trường bị ô nhiễm KLN thường biểu hiện sự biến đổi trong quá trình trao đổi chất, giảm sinh trưởng, lượng sinh khối tạo ra thấp hơn bình thường và tích lũy kim loại nhiều. Các quá trình sinh lý và sinh hóa trong thực vật có thể bị ảnh hưởng bởi KLN. Các nghiên cứu gần đây cho thấy mức độ độc tính và khả năng chịu đựng của thực vật trước “stress” KLN ngày càng tăng, phản ánh tình trạng ô nhiễm kim loại gia tăng trong môi trường. Tuy nhiên, một số kim loại như Cu, Mn, Co, Zn và Cr lại là nguyên tố vi lượng cần thiết cho quá trình chuyển hóa của thực vật; chúng chỉ trở nên độc hại khi tồn tại ở dạng hoạt tính sinh học và ở mức độ rất cao. KLN trong đất có thể ảnh hưởng đáng kể đến chức năng sinh lý của cây trồng (Angulo-Bejarano et al., 2021) [88].

- Hấp thu KLN: Rễ cây có thể hấp thu KLN từ đất và tích tụ chúng trong mô thực vật. Quá trình này gây độc cho thực vật và có thể làm giảm khả năng hấp thu các chất dinh dưỡng thiết yếu, dẫn đến sinh trưởng chậm lại và giảm năng suất (Mohamed et al., 2025) [178].

- Ảnh hưởng đến quá trình quang hợp: KLN có thể làm thay đổi cấu trúc và chức năng của lục lạp trong tế bào thực vật, từ đó ức chế quá trình quang hợp. Hậu quả là khả năng sản xuất năng lượng của cây giảm, ảnh hưởng trực tiếp đến sinh trưởng và năng suất (Riyazuddin et al., 2021) [210].

- Ảnh hưởng đến hệ thống rễ: KLN có thể ảnh hưởng đến rễ làm hệ thống rễ hư hỏng, làm giảm khả năng hấp thu nước và chất dinh dưỡng. Hệ thống rễ bị hư hại dễ bị bệnh hơn và khó sinh trưởng, dẫn đến cây yếu và kém phát triển.

- Tích lũy trong chuỗi thức ăn: Khi KLN tích lũy trong thực vật, chúng có thể xâm nhập vào chuỗi thức ăn và gây nguy hại cho sức khỏe con người khi được tiêu thụ.

1.1.4.5. Các phương pháp xử lý kim loại nặng trong đất

Theo nghiên cứu của Đinh Đại Gái và cs. (2022) [9], có nhiều phương pháp để xử lý đất bị ô nhiễm kim loại nặng (KLN), mỗi phương pháp đều có ưu nhược điểm riêng. Các giải pháp phổ biến bao gồm rửa đất, cố định KLN bằng hóa chất hoặc vật lý, xử lý nhiệt, trao đổi ion, oxy hóa/khử và đào đất đưa đi nơi khác. Tuy nhiên, các phương pháp này thường tốn kém, hạn chế về kỹ thuật và diện tích (Jennifer, 2022) [139]. Gần đây, xử lý KLN bằng thực vật được quan tâm nhờ chi phí thấp, an toàn và thân thiện với môi trường, dựa trên cơ chế hấp thu, chuyển hóa, chống chịu và loại bỏ KLN của một số loài cây. Phương pháp này cũng có nhược điểm: sinh khối thực vật thấp (trừ cỏ vetiver) và khả năng phát triển kém trên đất mặn hoặc phèn. Để khắc phục, việc sử dụng than sinh học (TSH) và phân hữu cơ giàu Si là giải pháp thích hợp, giúp giảm hàm lượng KLN trao đổi trong đất (Saifullah et al., 2018 [219]; Xiao và Meng, 2020 [249]). Đối với Cd, có nhiều cách loại bỏ khỏi đất ô nhiễm như cố định dạng kết tủa, trao đổi ion, sử dụng phụ phẩm nông nghiệp, TSH, cây trồng, vật liệu nano, kỹ thuật oxy hóa và công nghệ sinh học (Rahim et al., 2022 [201]).

Theo Yadav et al, (2021) [256], các biện pháp xử lý KLN hiện nay được chia thành ba nhóm chính: (i) phương pháp vật lý, (ii) phương pháp hóa học, và (iii) phương pháp sinh học. Mỗi nhóm phương pháp có ưu điểm, hạn chế và điều kiện áp dụng riêng biệt, song xu hướng hiện nay là kết hợp đa phương pháp để đạt hiệu quả xử lý cao và thân thiện môi trường hơn. Phương pháp vật lý chủ yếu dựa trên các quá trình cơ học hoặc lý học nhằm tách kim loại khỏi môi trường nước hoặc đất mà không làm biến đổi bản chất hóa học của chúng. Các kỹ thuật phổ biến bao gồm lọc màng (membrane filtration), trao đổi ion, hấp phụ (adsorption), điện hóa, và lắng – lọc cơ học. Trong đó, lọc màng (thẩm thấu ngược, nano-lọc) được xem là một trong những kỹ thuật hiệu quả nhất để loại bỏ ion KLN trong nước, với khả năng loại đến 99% ion Pb^{2+} , Cd^{2+} , Cu^{2+} hoặc Cr(VI). Tuy nhiên, chi phí đầu tư và bảo trì màng cao, cùng với nguy cơ tắc nghẽn màng (fouling) vẫn là hạn chế lớn.

Phương pháp hóa học nhằm chuyển hóa kim loại nặng từ dạng hòa tan sang dạng không tan hoặc ít độc hơn thông qua các phản ứng hóa học như kết tủa, oxy hóa – khử, trung hòa, hoặc tạo phức.

Biện pháp sinh học (bioremediation) là hướng xử lý thân thiện môi trường, sử dụng cây trồng, vi sinh vật hoặc sự cộng sinh giữa chúng để hấp thu, chuyển hóa hoặc cố định kim loại nặng trong đất nông nghiệp. Các loài cây siêu tích lũy như *Brassica juncea*, *Vetiveria zizanioides* hay *Pteris vittata* có khả năng hấp thu và cô lập Cd, Pb, As trong mô thực vật (Ahmed et al., 2023) [82]. Vi sinh vật vùng rễ

như *Pseudomonas* và *Bacillus* có thể tiết siderophore và acid hữu cơ giúp giảm tính di động của kim loại, đồng thời tăng sức chống chịu cho cây (Jiang et al., 2024) [143].

Sự kết hợp giữa thực vật và vi sinh bản địa được xem là giải pháp bền vững giúp cải tạo đất ô nhiễm và duy trì năng suất cây trồng (Zhang et al., 2025) [268]. Tuy nhiên, phương pháp này cần thời gian dài và chịu ảnh hưởng bởi điều kiện môi trường, do đó nên kết hợp với vật liệu cải tạo như biochar hoặc vôi để nâng cao hiệu quả xử lý.

1.1.5. Vai trò và cơ chế của Si và than sinh học giàu Si trong giảm kim loại nặng trong đất

Si là nguyên tố phổ biến thứ hai trong vỏ Trái Đất, chiếm khoảng 28% khối lượng và chủ yếu tồn tại ở dạng SiO_2 cùng các khoáng silicat. Trong hệ sinh thái đất – cây trồng, Si tham gia một chu trình khép kín, bao gồm các quá trình phong hóa, hòa tan, hấp thu, tích lũy và tái khoáng hóa. Trong đất, Si tồn tại ở ba dạng chính: dạng rắn (khoáng silicat, thạch anh, khoáng sét), dạng hấp phụ (gắn trên bề mặt oxit Fe, Al hoặc hạt sét) và dạng hòa tan – chủ yếu là axit monosilicic (H_4SiO_4), là dạng cây trồng có thể hấp thu được (Liang et al., 2015) [160].

Si là một chất dinh dưỡng có lợi cho thực vật, cung cấp khả năng bảo vệ cây khỏi các tác nhân sinh học (sâu bệnh) và phi sinh học. Si tích lũy trong thực vật giúp cải thiện khả năng mài mòn của các mô thực vật, ngăn cản động vật ăn cỏ và động vật chân đốt tiêu hóa các cơ thể thực vật giàu Si (Snehal và Lohani, 2018) [228]. Khả năng chống chịu phi sinh học được định nghĩa là khả năng chống lại các điều kiện bất lợi chủ yếu do những thay đổi khắc nghiệt của khí hậu. Điều này được cung cấp bởi sự bảo vệ cơ học hoặc vật lý của Si lắng đọng đối với phản ứng sinh hóa thông qua con đường trao đổi chất khác. Lượng Si thích hợp cũng có thể cải thiện cân bằng nước, tăng trưởng và năng suất của cây, tốc độ quang hợp và giảm sự mài mòn của hạt (Shakoor, 2014) [221]. Phân bón Si thay cho các chất dinh dưỡng đa lượng bổ sung cũng có thể được sử dụng để tăng năng suất của nhiều loại cây trồng nông nghiệp. Khi năng suất nông nghiệp tăng lên, lượng phụ phẩm cũng tăng lên do đó sẽ tăng cường Si dễ tiêu. Mức tăng sản lượng cây trồng dao động từ 6 đến 14%, 10 đến 50% đối với xi-lô cao và kali Si. Những phản ứng tích cực này là do nhiều loại cây trồng như lúa, lúa mì và mía được xem là cây có phản ứng cao với Si và nhu cầu Si lớn (Yan et al., 2017) [260]. Sun et al. (2019) [234] đã báo cáo việc bón phân Si với liều lượng tối đa trong đất giàu Si đã làm tăng hàm lượng phytolith của lúa lần lượt là 32,83%, 27,01% và 32,06% ở thân, bẹ và lá.

Si làm tăng khả năng kháng KLN ở nhiều loài cây trồng. Si có khả năng cố định KLN ở dạng không độc hại bên trong thân cây. Một số nghiên cứu chỉ ra rằng, trong điều kiện đất bị ô nhiễm bởi các KLN như Cr, Cd, Cu việc bổ sung Si giúp tăng cường hấp thu các vi chất và khoáng chất đa lượng như Ca, Mg, P, K, Zn, Fe, Mn. Nhiều

công trình nghiên cứu cũng đã chứng minh rằng việc cung cấp Si cho cây trồng có thể làm giảm các tổn thương do Cd gây ra, như hiện tượng giảm hàm lượng diệp lục ở cây dưa chuột. Bên cạnh đó, Si còn đóng vai trò quan trọng trong việc thúc đẩy các quá trình trao đổi chất của thực vật như tăng tốc độ quang hợp, vận chuyển vi chất, tốc độ thoát hơi nước và hiệu quả sử dụng nước. Ngoài ra, Si cũng góp phần thúc đẩy các hoạt động của các enzyme để chống lại quá trình oxy hóa, đặc biệt là trong điều kiện bị nhiễm cadimi ở trong cây bông (Phạm Công Khải, 2018) [20].

Sự tích lũy của các kim loại nặng như Cd và Pb trong đất canh tác lúa đang trở thành vấn đề môi trường và an toàn thực phẩm đáng quan ngại tại nhiều quốc gia châu Á, trong đó có Việt Nam. Đặc tính của các nguyên tố này trong đất và cây trồng, cũng như mối quan hệ tương tác với các yếu tố đất học khác như silic (Si), là nền tảng để đề xuất các phương pháp giảm thiểu ô nhiễm hiệu quả. Cd và Pb có nguồn gốc chủ yếu từ hoạt động nhân sinh, đặc biệt là sử dụng phân bón, thuốc bảo vệ thực vật chứa tạp chất, nước tưới bị ô nhiễm và sự lắng đọng khí thải công nghiệp. Sau khi tích tụ trong đất, chúng tồn tại dưới nhiều dạng phân hóa học khác nhau, trong đó chỉ một phần tồn tại dưới dạng sẵn sàng sinh học (bioavailable), có khả năng hấp thụ vào rễ và tích lũy trong mô cây (He et al., 2023) [133]. Cd có xu hướng di động cao hơn Pb, do khả năng hòa tan lớn hơn trong điều kiện pH thấp và môi trường oxy hóa, trong khi Pb thường liên kết chặt với vật chất hữu cơ, oxit Fe/Mn hoặc bị cố định ở pha rắn không hoạt động (Xie et al., 2021) [251].

Nhiều nghiên cứu gần đây cho thấy vai trò điều tiết quan trọng của silic (Si) trong việc giảm thiểu sự hấp thụ và vận chuyển Cd và Pb trong cây lúa. Si, khi được bổ sung dưới dạng silicate hoặc từ nguồn hữu cơ như biochar giàu Si, không những cải thiện tính chất hóa học của đất (tăng pH, cải thiện CEC), mà còn thúc đẩy sự hình thành lớp Fe plaque giàu oxit sắt quanh rễ – nơi có khả năng hấp phụ và giữ lại phần lớn kim loại nặng ở vùng ngoài tế bào, hạn chế sự thâm nhập vào rễ (Rizwan et al., 2023) [215]. Si cũng tham gia vào cấu trúc thành tế bào, đặc biệt ở dạng Si liên kết với hemicellulose, tạo điều kiện cho sự hấp phụ tĩnh điện của ion kim loại dương như Cd^{2+} và Pb^{2+} , từ đó ngăn chặn sự di chuyển vào tế bào chất. Ngoài ra, Si còn được chứng minh là có khả năng điều hòa biểu hiện gen vận chuyển Cd như OsNramp5 và OsHMA2, giúp giảm lượng Cd được vận chuyển từ rễ lên hạt lúa (Wu et al., 2020) [245]. Một lợi ích bổ sung của việc bổ sung Si là tăng cường hoạt động của các enzyme chống oxy hóa (SOD, POD, CAT), giảm stress sinh lý do độc tính kim loại gây ra, qua đó giúp cây trồng duy trì năng suất trong điều kiện đất bị ô nhiễm (Nwajiaku et al., 2023) [188].

Trên cơ sở những cơ chế nêu trên, nhiều phương pháp cải tạo đất nhằm giảm thiểu sự tích lũy Cd và Pb trong cây lúa đã được nghiên cứu và đề xuất. Việc sử dụng các chất bổ sung giàu Si như silicate, biochar từ vỏ trấu, rơm rạ hoặc các vật liệu biến

tính (ví dụ: biochar gắn oxit Fe) được ghi nhận là làm giảm đáng kể lượng Cd và Pb trong hạt lúa so với đối chứng không xử lý (Kong et al., 2022) [153]. Các thí nghiệm đồng ruộng tại Trung Quốc, Ấn Độ và Việt Nam cũng cho thấy rằng kết hợp giữa bón silicate, quản lý nước theo chế độ ngập – khô luân phiên (AWD), và chọn giống lúa có khả năng tích lũy Cd thấp là hướng đi tiềm năng, hiệu quả và bền vững trong giảm thiểu ô nhiễm kim loại nặng tại vùng trồng lúa (Zhao et al., 2023) [270]. Bên cạnh đó, việc sử dụng đồng thời phân lân, canxi và các vật liệu hấp phụ như zeolite, bentonite có thể tạo kết tủa với Cd và Pb, góp phần giảm sự di động của chúng trong đất, tuy nhiên hiệu quả phụ thuộc lớn vào điều kiện pH, thành phần đất và thời gian tiếp xúc.

Gd, Hg, Pb và ciprofloxacin là những chất gây ô nhiễm trong dung dịch nước có thể được kiểm soát bằng cách sử dụng vật liệu Si tạo ra từ phụ phẩm cây trồng. Bột Si và Si gel thu được từ tro trấu được sử dụng thành công để chế tạo polyme và copolyme ghép để hấp thu Gd (Ghime và Ghosh, 2017) [119]. Kết quả này cho thấy copolyme ghép Si gel có khả năng hấp thu Gd tối đa là 229,36 mg/gw, cao hơn so với chất hấp thu khác được sử dụng trong hấp thu Gd trong các công trình khác. Một nghiên cứu khác của Hasan et al. (2019) [128] đã chế tạo Si dạng sợi KCC-1 giá rẻ thu được từ tro trấu để loại bỏ Pb. Phân tích hấp thu-giải hấp thu chỉ ra rằng KCC-1 là chất hấp thu tốt để loại bỏ Pb khỏi dung dịch nước. Điều này được thể hiện qua khả năng hấp thu-giải hấp thu tốt trong năm chu kỳ với tỷ lệ loại bỏ Pb giảm từ 75 xuống 43% và từ 65% xuống 27%. Ngoài ra, cấu trúc nano Si thu được từ vỏ trấu có khả năng hấp thu tốt để loại bỏ thuốc ciprofloxacin khỏi môi trường nước (Sahebi et al., 2015) [218]. Các hạt nano Si cho thấy khả năng hấp thu ciprofloxacin cao nhất ở mức 190 mg/g, cao hơn nhiều so với Si gel thương mại (11,0 mg/g) trong cùng điều kiện tối ưu.

TSH giàu Si có những đặc điểm và lợi ích đặc biệt (theo Hình 1.1), làm cho nó trở nên có giá trị trong các ứng dụng nông nghiệp và môi trường. Loại TSH này được tạo ra từ các vật liệu giàu Si như vỏ trấu và các sinh khối khác chứa nhiều Si, nổi bật với hàm lượng Si cao, tăng cường tính năng của nó. TSH giàu Si rất hiệu quả trong việc cải thiện tính chất đất và giảm thiểu tính khả dụng sinh học của các KLN như Cd, Pb, Zn và As. Cơ chế của quá trình này là chuyển hóa các KLN dễ hòa tan thành các dạng không di động, giảm tính di động và độc tính của chúng trong đất. Quá trình này cũng liên quan đến việc điều chỉnh “stress” oxy hóa trong cây, thúc đẩy sự phát triển tốt hơn và giảm sự tích tụ KLN trong cây trồng như lúa mì. Việc bón TSH giàu Si có thể cải thiện cấu trúc đất, nâng cao khả năng giữ nước và tăng tính sẵn có của các chất dinh dưỡng cho cây trồng. Nó đã được chứng minh là thúc đẩy sự phát triển của cây và hiệu suất quang hợp, làm cho nó trở thành một bổ sung có lợi cho các loại đất nông nghiệp, đặc biệt là những nơi bị ô nhiễm bởi nhiều KLN. TSH, rơm rạ và các phụ phẩm nông nghiệp có nồng độ phytolith Si cao (Rizwan et al., 2017) [212] đã được chứng minh là nguồn cung cấp Si hiệu quả cho đất (Etesami và Jeong, 2018) [117]. Cụ

thể, TSH sản xuất từ trấu, nung trong điều kiện kiểm soát oxy ở 400 - 500°C, có hàm lượng Si đạt khoảng 27 kg Si/tấn (Khac Thi Vu et al., 2022) [145].

Theo nghiên cứu của Đinh Đại Gái và cs. (2022) [9], việc sử dụng TSH từ phụ phẩm nông nghiệp nhằm giảm hàm lượng kim loại nặng (KLN) trên đất canh tác. Nghiên cứu tiến hành trên đất phèn nhiễm mặn, phối trộn với hai loại TSH ở các tỉ lệ 0,7; 1,5; 3,0 và 6,0%. Thí nghiệm thực hiện trong nhà kính kéo dài 60 ngày, với mẫu đất được thu thập sau 5 ngày và 60 ngày để phân tích hàm lượng KLN trao đổi. Kết quả cho thấy, TSH từ trấu giúp giảm hàm lượng trao đổi của Cd, Ni, Pb, Sr và Zn tùy theo tỉ lệ phối trộn vào đất. Ở tỉ lệ TSH là 6% thì khả năng cải tạo KLN tốt nhất. Than từ vỏ trấu cho thấy hiệu quả cải tạo đất tốt hơn so với loại than từ thân cành cây nhãn. Giá trị pH của đất tăng lên theo tỉ lệ than sử dụng. Việc giảm hàm lượng KLN trao đổi trong đất có thể liên quan đến khả năng hấp thu của than sinh học và sự thay đổi pH của đất.

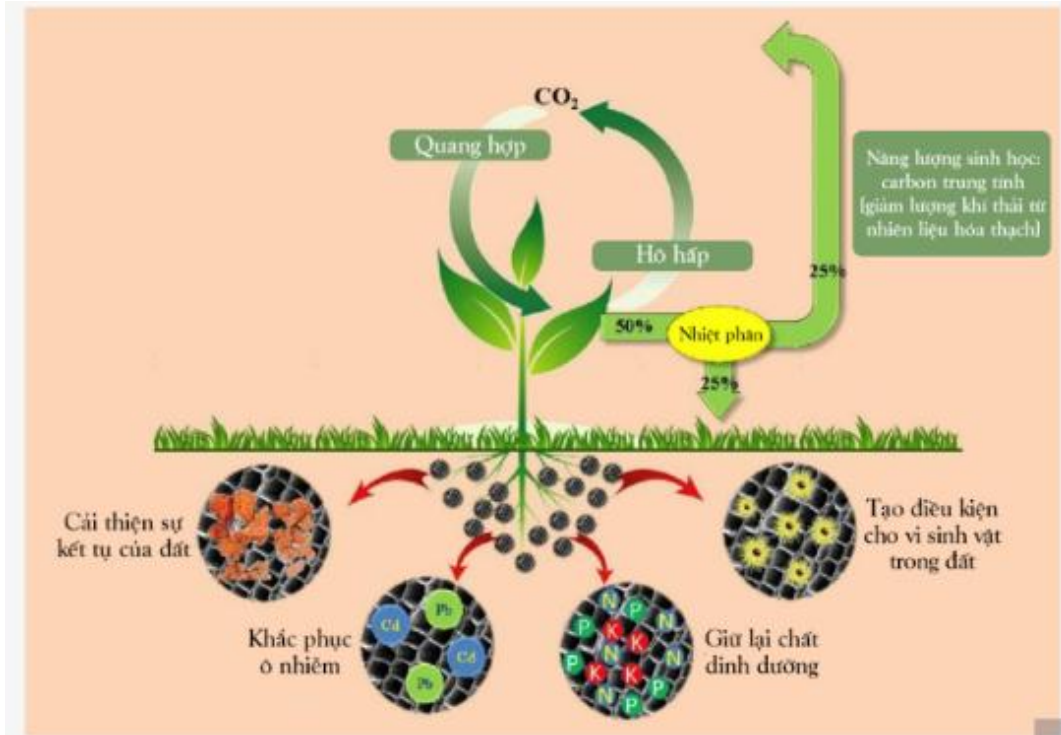
Việc sử dụng các phụ phẩm nông nghiệp để xử lý đất bị ô nhiễm đã được áp dụng khá phổ biến nhờ chi phí thấp và hiệu quả thực tiễn như việc bón rơm và tro trấu vào đất làm giảm sự tích lũy Cd trong hạt gạo khi canh tác trên đất bị ô nhiễm. (Khac Thi Vu et al., 2022) [145]

Những tiến bộ trong nghiên cứu về khả năng hấp thu KLN bằng TSH đã làm tăng dần cơ chế giúp TSH loại bỏ KLN trong đất. Sohi et al. (2010) [229] đề xuất ba cơ chế (tương tác tĩnh điện, trao đổi ion và hấp thu), Ahmad et al. (2020) [81] đề xuất năm cơ chế (tạo phức, tương tác tĩnh điện, trao đổi ion, hấp thu vật lý và kết tủa) và Li et al. (2022) [161] đề xuất sáu cơ chế (tạo phức, tương tác tĩnh điện, trao đổi ion, hấp thu vật lý, kết tủa và khử). Bón TSH vào đất làm tăng tương tác tĩnh điện giữa các cation kim loại và các nhóm chức năng hoạt hóa của đất bằng cách tăng độ pH của đất. Do đó, ngoài các tương tác trực tiếp, TSH có thể gián tiếp làm giảm sự hấp thu KLN của thực vật bằng cách thay đổi tính chất của đất (Abdelhafez et al., 2014) [74].

TSH là vật liệu nổi bật có khả năng loại bỏ nhiều chất ô nhiễm từ nước và đất, được xem là công nghệ tiềm năng trong xử lý môi trường. TSH là chất rắn với diện tích bề mặt riêng hiệu quả (SSA) dao động từ 35,4 đến 151,4 m²/g, thậm chí có thể vượt quá 520 m²/g, đồng thời chứa các nhóm chức năng quan trọng như -OH, -COOH, C-O và C=O. Ngoài ra, TSH giàu khoáng chất vẫn là giải pháp kinh tế để hấp thụ kim loại nặng (KLN). Gần đây, TSH được ứng dụng trong xử lý nước thải bằng công nghệ sinh học. Nhờ cấu trúc SSA lớn và các micropore khổng lồ, TSH thích hợp cho nhiều ứng dụng môi trường; ví dụ, khi nhiệt phân ở 400 - 600°C, SSA của TSH thay đổi từ 10 đến 400 m²/g (Elkhlifi et al., 2023) [115].

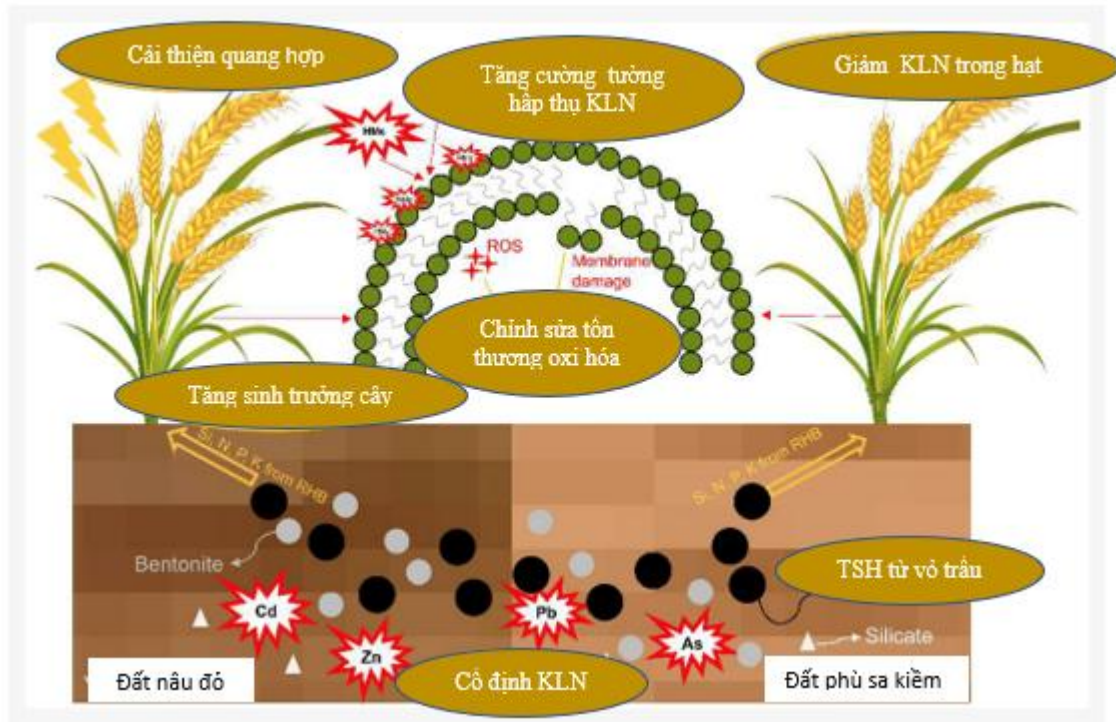
Hiệu quả loại bỏ KLN vượt trội được ghi nhận ở TSH từ thân lá cây cải (Pb - 100%), vỏ dừa (Cr - 99,9%) và lá tía tô (As - 100%). Nhìn chung, sử dụng TSH để xử

lý nước là giải pháp thay thế tiềm năng, chi phí thấp, thân thiện với môi trường và bền vững. Các đặc tính vật lý và hóa học của TSH đóng vai trò then chốt trong việc loại bỏ KLN khỏi nước thải, chứng tỏ đây là chất hấp thu sinh học có tính sẵn có cao và an toàn cho môi trường.



Hình 1.1. Lợi ích của than sinh học (Natasha et al., 2022) [180]

Các vật liệu giàu Si được sử dụng làm giảm độc tính của bốn KLN đối với lúa mì thông qua một số cơ chế (Hình 1.2). Đầu tiên, xử lý TSH giàu Si từ vỏ trấu làm giảm nồng độ Pb, Zn và Cd trong hạt lúa mì ở các mức độ khác nhau, nhưng có tác dụng thúc đẩy sự tích tụ As trong lúa mì. Điều này có thể là do TSH giàu Si từ vỏ trấu làm tăng liều lượng vi khuẩn khử Fe trong đất, làm tăng khả năng di động của As trong đất thông qua quá trình hòa tan khử (Chen et al., 2021) [96]. Sau khi bổ sung một lượng bentonite đủ, hàm lượng As trong hạt lúa mì giảm xuống. Điều này có thể là do sự hấp thu của As tích điện âm trên bề mặt tích điện dương của bentonite (Adrees et al., 2015) [79]. Thứ hai, Si trong các xử lý góp phần vào sự hình thành đồng kết tủa Si-KLN và giúp làm dày thành tế bào để cản trở quá trình vận chuyển KLN (Bhat et al., 2019) [93]. Thứ ba, với khả năng hấp thu mạnh đối với các cation kim loại, vật liệu giàu Si đã làm giảm dạng di động của Pb, Zn và Cd trong đất. Thứ tư, Si kích hoạt hệ thống enzyme chống oxy hóa trong lúa mì và làm giảm thiệt hại oxy hóa do KLN gây ra. Cuối cùng, TSH giàu Si từ vỏ trấu giàu Si, N, P, K và các chất dinh dưỡng khác, cải thiện quá trình quang hợp của cây trồng và thúc đẩy sự phát triển của lúa mì so với muối Si.



Hình 1.2. Cơ chế hấp thu kim loại nặng trong đất từ vật liệu giàu Si

(Li et al., 2022) [161]

Cd, Zn, Pb và As là những chất ô nhiễm phân bố rộng rãi và sự tích tụ của chúng trong thực vật ảnh hưởng đến hiệu suất hình thái và sinh lý và làm giảm sản lượng của chúng. Trong nghiên cứu này, việc bổ sung vật liệu giàu Si vào đất bị ô nhiễm bởi nhiều KLN đã ảnh hưởng tích cực đến sự phát triển của lúa mì. Gần đây, các chất cải tạo đất làm từ vật liệu thải có nguồn gốc từ sinh khối đã thu hút được sự quan tâm rộng rãi do một số khả năng của chúng, chẳng hạn như cải thiện độ phì nhiêu của đất (Rehman et al., 2020) [208], điều chỉnh tăng hệ thống phòng thủ chống oxy hóa và cố định các chất ô nhiễm đất (Raji et al., 2023) [204]. Do đó, các chất cải tạo sinh học này có thể được sử dụng để hạn chế khả năng di chuyển và độc tính của các chất gây ô nhiễm (Rizwan et al., 2019) [214] để thúc đẩy sự phát triển của thực vật.

Trong nghiên cứu hiện tại, cả bốn phương pháp xử lý chất cải tạo đất giàu Si đều làm giảm hàm lượng KLN có hiệu quả trong thân và hạt lúa mì. Sự hiện diện của nhiều KLN trong đất làm trầm trọng thêm quá trình chua hóa đất (Qian et al., 2016) [200] kích thích sự hấp thu KLN dẫn đến tổn thương oxy hóa nghiêm trọng. Độc tính giữa các nguyên tố kim loại thường có tác dụng cộng gộp và hiệp đồng, khiến việc quản lý ô nhiễm KLN kết hợp trong đất trở nên khó khăn (Wu et al., 2022) [247]. Tất cả các chất bổ sung giàu Si trong thí nghiệm này đều có thể làm giảm nồng độ của tất cả các KLN ngoại trừ As trong lúa mì ở cả hai loại đất, cho thấy rằng các vật liệu giàu Si trong thí nghiệm này có thể hạn chế cả quá trình chuyển giao và hấp thu các KLN phức hợp trong lúa mì. Việc xử lý TSH giàu Si từ vỏ trấu kết hợp với bentonite đồng thời làm giảm hàm

lượng Cd, Zn, Pb và As trong thân và hạt lúa mì trong đất, Saffari (2018) [217] đã báo cáo rằng TSH giàu Si từ vỏ trấu có thể làm giảm hiệu quả sinh học của KLN trong đất ô nhiễm KLN tổng hợp bằng cơ chế TSH giàu Si từ vỏ trấu có pH cao, diện tích bề mặt riêng lớn và khả năng trao đổi cation, giúp tăng cường thêm hiệu ứng hấp thu của quá trình phức hợp bề mặt và trao đổi ion. Thành tế bào được coi là lá chắn đầu tiên và hiệu quả nhất cho thực vật bị ảnh hưởng bởi KLN để ngăn kim loại nặng chảy vào các vị trí nội bào (Zhao et al., 2015) [269]. Các phân đoạn polysaccharide trong thành tế bào chứa nhiều nhóm chức năng (bao gồm -COOH và -SH), có thể liên kết hiệu quả các cation kim loại và hạn chế sự vận chuyển của chúng (Adrees et al., 2015) [79]. Kết quả thực nghiệm cho thấy cả bốn phương pháp xử lý đều làm giảm hàm lượng Pb, Zn, Cd và As trong phân đoạn hòa tan trong tế bào (bao gồm tế bào chất và cytosol) trong đất nâu đỏ phù hợp với việc giảm KLN trong toàn bộ thực vật. Li et al. (2023) [162] cho thấy phương pháp xử lý Si có thể làm thay đổi quá trình trao đổi chất của thành tế bào để tăng khả năng kéo dài của mô thực vật và thúc đẩy quá trình cô lập KLN của thành tế bào.

Việc bổ sung các chất cải tạo giàu Si đã thay đổi hình thái đất với sự giảm và khử chua, quá trình oxy hóa và các phản ứng tăng lên ở nhiều mức độ khác nhau. Si đã được báo cáo là làm giảm trạng thái trao đổi của KLN trong đất, làm giảm độc tính của KLN. Trong khi đó, TSH giàu Si từ vỏ trấu có các đặc tính carbon đặc biệt và các nhóm chức năng độc đáo (nhóm hydroxyl hữu cơ, phenolic và carboxyl), làm tăng khả năng hấp thu KLN trên bề mặt TSH giàu Si từ vỏ trấu và làm giảm hiệu quả sinh học của KLN (Li et al., 2022) [161]. Bên cạnh đó, việc sử dụng TSH giàu Si từ vỏ trấu làm giảm hàm lượng As liên kết hữu cơ và As oxy hóa ferromangan trong đất, cho thấy các dạng As này có liên quan chặt chẽ với nồng độ As dễ tiêu trong đất (Leksungnoen et al., 2019) [157].

1.2. CƠ SỞ THỰC TIỄN CỦA ĐỀ TÀI

1.2.1. Thực trạng kim loại nặng trong đất nông nghiệp tại Việt Nam và thành phố Huế

Kết quả phân tích dạng tồn tại và hàm lượng của Cu và Pb trong 50 mẫu đất nông nghiệp thu thập tại huyện Văn Lâm, tỉnh Hưng Yên cho thấy hàm lượng Cu tổng số dao động trong khoảng từ 21,91 đến 91,06 ppm, trong khi hàm lượng Pb từ 24,25 đến 948,77 ppm. Các khu vực đất nông nghiệp nằm gần làng nghề tái chế kim loại thuộc xã Chỉ Đạo, các khu công nghiệp Phố Nối A và Như Quỳnh đã ghi nhận tình trạng ô nhiễm bởi Cu và Pb (hàm lượng Cu tổng số vượt ngưỡng cho phép theo quy chuẩn QCVN 03:2008/BTNMT từ 1,28 đến 1,82 lần; hàm lượng Pb tổng số vượt quy chuẩn này từ 2,14 đến 13,55 lần). Đặc biệt, đất tại khu vực làng nghề xã Chỉ Đạo cho thấy mức độ ô nhiễm Pb nghiêm trọng, với hàm lượng Pb vượt từ 10,03 đến 13,55 lần so với giới hạn quy định trong QCVN 03:2008/BTNMT (Cao Việt Hà, 2012) [13].

Nghiên cứu hàm lượng một số KLN trong đất nông nghiệp tại huyện Phú Lương, tỉnh Thái nguyên ở các loại địa hình và chế độ canh tác khác nhau dựa trên kết quả giải đoán ảnh viễn thám, phân tích tương quan giữa chỉ số khác biệt thực vật (NDVI) và hàm lượng KLN trong đất cho thấy hàm lượng KLN trong đất trồng cây nông nghiệp, giảm theo thứ tự: Lúa < chè < keo và đều thấp hơn quy chuẩn QCVN 03:2008/BTNMT của Việt Nam (Đàm Xuân Vận và cs., 2018) [71].

Theo Trần Thanh Sơn và cs. (2021) [44] cho thấy do sự phát triển nhanh chóng trong nhiều ngành công nghiệp như ngành kỹ thuật luyện kim, khai thác mỏ và hóa chất tại Việt Nam, đã đặt ra nhiều vấn đề liên quan đến ô nhiễm môi trường. Nghiên cứu này được thực hiện để khảo sát hàm lượng KLN trong nước, đất nông nghiệp và lúa tại xã Thượng Quan, huyện Ngân Sơn, tỉnh Bắc Kạn, Việt Nam. Kết quả phân tích của 06 nguyên tố như As, Cd, Cu, Pb, Ni và Zn cho thấy tình trạng hiện tại của chất lượng đất nông nghiệp, nước và lúa trong khu vực nghiên cứu. Đối với mẫu nước bề mặt và mẫu nước sinh hoạt, mức trung bình của sáu nguyên tố không vượt quá tiêu chuẩn Việt Nam. Trong khi hàm lượng As trong đất nông nghiệp là 15,6 - 27,2 mg/kg, vượt quá tiêu chuẩn Việt Nam cho đất nông nghiệp. Hàm lượng tổng As trong lúa là 0,18 - 0,40 mg/kg, không vượt quá tiêu chuẩn Việt Nam. Trong nghiên cứu này, As là yếu tố duy nhất cần được nghiên cứu kỹ hơn từ nồng độ tương đối cao trong mẫu đất nông nghiệp. Có bảy trong tám mẫu gạo có mức As vượt quá tiêu chuẩn Codex cho gạo xay.

Theo Nguyen Thanh Giao et al. (2022) [184], ô nhiễm KLN trong đất đã nhận được sự chú ý nhiều hơn trong những năm gần đây do sự tăng cường hoạt động của con người và tác động tiềm năng của nó đối với hệ sinh thái và sức khỏe con người. Nghiên cứu đánh giá sự xuất hiện của các KLN (As, Pb, Cu, Zn và Cd) trong các loại đất canh tác khác nhau và rủi ro sinh thái của chúng ở tỉnh Đồng Tháp, Việt Nam cho thấy mười bảy mẫu được thu thập trong các loại đất lúa, rau màu, cây lâu năm và cây cảnh được đo nồng độ KLN và cấu trúc đất. Dữ liệu được phân tích bằng hệ số tương quan Pearson, phân tích thành phần chính (PCA), phân tích cụm (CA), chỉ số ô nhiễm Nemerow (PIN), chỉ số tích tụ địa hóa học (Igeo), chỉ số tải ô nhiễm (PLI) và chỉ số rủi ro sinh thái tiềm năng (RI). Kết quả cho thấy cấu trúc đất là đất sét cát và đất sét cát nền. Nồng độ các kim loại nặng đều nằm trong giới hạn cho phép theo quy chuẩn quốc gia, theo thứ tự: $Zn > Cu > Pb > As > Cd$. Hệ số tương quan Pearson và PCA cho thấy rằng các KLN đều có mối liên hệ mạnh mẽ cả nông nghiệp và đất đai. Các thành phần đã chịu trách nhiệm cho sự hiện diện của chúng trong đất. Các điểm lấy mẫu được chia thành bốn nhóm bằng cách sử dụng CA, trong đó đất lúa và đất cây trồng có hàm lượng KLN cao nhất. Dựa trên các giá trị PIN (0,82 - 2,92), ô nhiễm KLN dao động từ mức cảnh báo đến mức trung bình. Hàm lượng KLN cao nhất tích lũy trong đất, với các giá trị Igeo dao động từ 0,12 - 2,05. Nguy cơ ô nhiễm KLN trong đất nông nghiệp

đối với sinh thái từ thấp đến trung bình. Mặc dù vậy, đề xuất theo dõi hàng năm sự xuất hiện của KLN trong đất nông nghiệp để có các giải pháp phù hợp để bảo vệ sức khỏe cộng đồng.

Theo nghiên cứu của các tác giả Ngô Nam Thanh và cs. (2018) [48] về đánh giá hàm lượng KLN trong đất phèn trồng lúa có bón phân xi thép tại tỉnh Kiên Giang và Hậu Giang cho thấy hàm lượng KLN trong đất và nước giảm đáng kể.

Kết quả khảo sát và đánh giá mức độ ô nhiễm KLN trên 300 mẫu đất sản xuất nông nghiệp tại tỉnh Bắc Ninh cho thấy phần lớn các mẫu đất được phân tích có hàm lượng kim loại nặng tồn dư nằm dưới ngưỡng cho phép theo quy định (chiếm 93,3%). Đối chiếu với tiêu chuẩn Việt Nam QCVN 03:2015/BTNMT, trong tổng số 300 mẫu đất khảo sát, có 4 mẫu ô nhiễm và 55 mẫu cận ô nhiễm Pb; 2 mẫu ô nhiễm và 17 mẫu cận ô nhiễm Cd; 13 mẫu ô nhiễm và 78 mẫu cận ô nhiễm Hg; 2 mẫu cận ô nhiễm Cu; 10 mẫu cận ô nhiễm Zn; 17 mẫu cận ô nhiễm As so với giới hạn quy định. Các điểm cận ô nhiễm KLN tập trung chủ yếu tại các khu công nghiệp và làng nghề ở các huyện Gia Bình, Quế Võ, Thuận Thành và thành phố Bắc Ninh. Kết quả này cho thấy việc đánh giá định kỳ ô nhiễm KLN tại vùng nông nghiệp là cần thiết để đảm bảo sản xuất nông sản an toàn (Trần Thị Minh Thu và cs., 2018) [66].

Kết quả của Nguyễn Thanh Bình và cs. (2015) [2] cho thấy tất cả các mẫu đất phân tích tại thị xã Hương Trà, tỉnh Thừa Thiên Huế đều có hàm lượng KLN thấp hơn ngưỡng cho phép theo quy định của QCVN 03:2015/BTNMT. Một số mẫu như mẫu HA2, HA6 của Hương An và HC1, đặc biệt mẫu HC7 của Hương Chữ có hàm lượng một số KLN cao hơn các mẫu khác, do các mẫu này nằm ở gần khu dân cư, trường học nên lượng KLN phát sinh do rác thải sinh hoạt. Bên cạnh đó do các mẫu này nằm ở khu vực khá xa nguồn nước, nên khả năng rửa trôi thấp.

Nghiên cứu tập trung vào sự thay đổi theo mùa và xác định nguồn gốc của KLN từ nước thải đô thị tại các trang trại ngoại thành của tỉnh Thừa Thiên Huế. Hàm lượng Fe, Mn, Zn, Cu, Cr, Cd, Pb và As đã được xác định trong các mẫu nước tưới, đất và rau xà lách được thu thập trong mùa khô và mùa mưa từ một địa điểm thượng nguồn, nơi nước tưới không ảnh hưởng đến từ nước thải đô thị cũng như từ hai địa điểm hạ lưu tại các trang trại ở ngoại thành thành phố. Mặc dù nước tưới và đất trong cùng một trang trại không bị ô nhiễm mạnh, nhưng các mẫu rau xà lách lại bị ô nhiễm Cd, Zn và Pb. Hơn nữa, nồng độ Cu và As và KLN (trừ Cu) trong đất trồng rau xà lách vào mùa mưa cao hơn đáng kể ($p < 0,05$) so với mùa khô, cho thấy tác động của nước thải đô thị thay đổi theo mùa. Các phân tích tương quan và thành phần chính đã được thực hiện để xác định các nguồn KLN, chỉ ra rằng Cu, Zn, Cd, Pb, Cr và As trong nước tưới và đất có thể có nguồn gốc từ con người (ví dụ: nước thải đô thị chưa qua xử lý, sử dụng phân bón); trong khi đó, Fe, Mn, As và Cr trong nước tưới và đất có thể có

nguồn gốc từ các nguồn không phải do con người (ví dụ: phong hóa vật liệu gốc). Nghiên cứu này cho thấy rằng quá trình đô thị hóa nhanh chóng cùng với lượng mưa lớn dẫn đến lũ lụt đô thị ở tỉnh Thừa Thiên Huế là một yếu tố quan trọng làm phát tán KLN trong các trang trại nông nghiệp, cho thấy tầm quan trọng của hệ thống xử lý nước thải, có thể làm giảm tải lượng KLN trong thành phố để bảo vệ sản xuất lương thực tại địa phương (Viet Dung Pham et al., 2021) [254].

1.2.2. Nguồn phụ phẩm nông nghiệp giàu Si

Theo số liệu của Tổng cục Thống kê (2023) [69], tổng lượng phụ phẩm của cả nước năm 2023 đạt trên 156,8 triệu tấn, gồm 88,9 triệu tấn từ phụ phẩm sau thu hoạch cây trồng và chế biến nông sản (chiếm 56,7%); 61,4 triệu tấn phân gia súc, gia cầm từ ngành chăn nuôi (chiếm 39,1%); 5,5 triệu tấn từ ngành lâm nghiệp (chiếm 3,5%) và gần 1 triệu tấn từ ngành thủy sản (10,6%). Trong đó, rơm rạ – phụ phẩm sau thu hoạch lúa – chiếm khối lượng lớn nhất, khoảng 42,8 triệu tấn, đồng thời là nguồn silic (Si) quan trọng. Hàm lượng Si trong rơm lúa dao động khoảng 6 - 15% khối lượng khô tùy giống lúa, điều kiện đất và phân bón (Liang et al., 2015) [160]. Các phụ phẩm nông nghiệp khác cũng chứa lượng Si đáng kể, bao gồm thân cây bắp (10 triệu tấn), vỏ trấu từ quá trình xay xát lúa (8,6 triệu tấn) và vỏ trấu là một trong những phụ phẩm cây trồng giàu Si nhất. Theo nghiên cứu của Liang et al. (2015) [160] cho thấy hàm lượng Si dao động khoảng 15 - 20% khối lượng khô, lõi ngô (1,4 triệu tấn), thân cây sắn (3,1 triệu tấn) và vỏ củ sắn (1,3 triệu tấn). Những phụ phẩm này, nếu được thu gom và sử dụng hiệu quả, có thể trở thành nguồn nguyên liệu quan trọng cho sản xuất than sinh học giàu Si hoặc cải tạo đất. Tuy nhiên, hiện nay tỉ lệ thu gom và sử dụng phụ phẩm cây trồng tại Việt Nam chỉ đạt khoảng 52,2%. Trong đó, chỉ có khoảng 56,3% rơm rạ được sử dụng cho các mục đích như thức ăn thô cho gia súc ăn cỏ, chất độn chuồng, đệm lót sinh học, nuôi nấm rơm, phủ gốc cây trồng hoặc lót trái cây (Đỗ Hương, 2021) [19]. Trấu chiếm khoảng 20% khối lượng hạt thóc, dẫn đến mỗi năm khoảng 9 triệu tấn trấu bị thải ra môi trường, tạo lượng chất thải lớn nếu không được xử lý, gây ô nhiễm và lãng phí. Phân tích cho thấy trấu chứa 15–17% SiO_2 . Do đó, các nhà khoa học đã phát triển phương pháp nhiệt phân trấu trong lò đặc biệt ở nhiệt độ kiểm soát, thu được tro trấu giàu SiO_2 trên 90%, hiệu quả trong công nghệ điều chế SiO_2 cho nhiều ứng dụng (Nzereogu et al., 2023) [189]. Đặc biệt, tro trấu được dùng sản xuất phân hữu cơ (HC) giàu Si, giúp tăng năng suất lúa và các cây trồng khác từ 15–30%, đồng thời giảm nhu cầu phân N, P, K và thuốc trừ sâu (Trần Anh Khoa và cs., 2017) [23]. Ngoài ra, Việt Nam là quốc gia sản xuất lạc đứng thứ năm châu Á, chiếm 2% sản lượng thế giới. Mỗi năm, có khoảng 530.000 tấn lạc được đưa vào sản xuất. Khối lượng vỏ lạc chiếm khoảng 20% khối lượng hạt lạc. Riêng tại Việt Nam, mỗi năm có hơn 10.000 tấn vỏ lạc bị loại thải sau quá trình chế biến. Vỏ lạc rất giàu carbon và N. Phân vỏ lạc làm tăng tổng lượng N và P, K dễ tiêu trong giá thể. Các lợi ích trên làm

tăng các chỉ số phát triển của thực vật. Vỏ lạc khô chứa 60% chất xơ, 25% cellulose, 6% protein thô, 2% tro, 1% lipid, 8% nước, 41,42% SiO₂.

Theo Đỗ Minh Cường (2022) [5], sản lượng sinh khối rơm rạ, trấu, ngô có thể qui đổi như sau: 1 tấn lúa có 0,85 tấn rơm và 0,2 tấn trấu; 1 tấn ngô hạt có 3 tấn thân cây ngô. Như vậy, với diện tích gieo cấy lúa tại tỉnh Thừa Thiên Huế, khối lượng phụ phẩm (rơm, trấu...) sau thu hoạch rất lớn, ước tính 3.744.000 tấn rơm và 624.000 tấn trấu. Đây là khối lượng phế thải sau thu hoạch lúa rất lớn, nếu không được xử lý và tái sử dụng sẽ gây ô nhiễm môi trường đồng thời là sự lãng phí đáng kể. Một phần lượng rơm rạ này được tận dụng làm chất đốt, giá thể trồng rau, hoa, nấm, hoặc xử lý bằng công nghệ vi sinh để phân hủy nhanh trên đồng ruộng, từ đó tạo ra phân hữu cơ bổ sung cho cây trồng, giảm chi phí phân hóa học và cải thiện dinh dưỡng đất,... Phần còn lại (chiếm khối lượng khá lớn) chủ yếu bị đốt bỏ trên đồng ruộng, hoặc vớt, đổ rơm, rạ xuống các kênh mương gây ảnh hưởng lớn đến môi trường, tắc nghẽn dòng chảy, ảnh hưởng đến việc bảo đảm an toàn giao thông.... Thói quen đốt bỏ rơm rạ trên đồng ruộng, không chỉ vừa lãng phí mà còn có nhiều tác hại như: làm ô nhiễm môi trường, biến các chất hữu cơ trong rơm và đất thành chất vô cơ do nhiệt cao, khiến đất khô, chai cứng và làm bốc hơi lượng lớn nước do hun đốt. Bên cạnh đó, với lượng vỏ trấu lớn như trên, cần thiết phải có những công nghệ hỗ trợ để tái sử dụng vào sản xuất nông nghiệp, đặc biệt là định hướng sản xuất nông nghiệp hữu cơ (Ninkuu et al., 2025) [182].

1.2.3. Tình hình sử dụng than sinh học từ phụ phẩm cây trồng tại Việt Nam và tỉnh Thừa Thiên Huế

Nghiên cứu của Nguyen Tri Quang Hung và cs. (2018) [185] được tiến hành tại huyện Gò Công Tây (tỉnh Tiền Giang) để ước lượng tiềm năng sử dụng phế phẩm từ sản xuất lúa, đặc biệt là rơm rạ, để sản xuất TSH ở cấp hộ gia đình. Sản lượng lúa hàng năm của huyện Gò Công Tây là 185.072 tấn/năm, tạo ra khoảng 233.190 tấn rơm rạ mỗi năm. Hiện nay, hầu hết các phế thải này đều được nông dân đốt. Nghiên cứu này đã kiểm tra việc sản xuất TSH từ các thời gian đốt cháy khác nhau (6 giờ, 10 giờ và 15 giờ). Kết quả cho thấy rằng thời gian đốt 6 giờ để thu được TSH cao, lượng tro ít. Với 100 kg rơm rạ, đã sản xuất được $48,25 \pm 2,25$ kg TSH. Lượng tro và TSH chưa hoàn thành thấp, tương ứng là $0,75 \pm 0,1$ kg và $3,95 \pm 1,33$ kg. Năng lượng nhiệt TSH từ rơm rạ khoảng 4.030 kcal/kg, cao hơn các vật liệu tương tự khác như vỏ, bụi gỗ, v.v. Mô hình sản xuất TSH này phù hợp với quy mô hộ gia đình do thời gian đốt ngắn, hiệu suất cao và dễ thực hiện. Việc sản xuất TSH này giúp giảm thiểu chất thải nông nghiệp, bảo vệ đất và tạo ra năng lượng nhiệt hữu ích cho các hoạt động sinh hoạt gia đình. Tro thu được từ quá trình sản xuất TSH có thể được tận dụng làm phân bón.

Kết quả nghiên cứu của Nguyen Quoc Viet và cs. (2019) [186] cho thấy bón TSH đã tăng năng suất giống lúa NA2 ở Hà Tĩnh, Quảng Trị và giống Thiên ưu 8 ở Quảng Nam khi bón kết hợp 2,5 - 5,0 tấn/ha TSH với NPK so với đối chứng chỉ bón NPK cũng như một số nghiên cứu khác trên địa bàn một số tỉnh như Bắc Giang, Thái Nguyên, Thanh Hoá hay Sóc Sơn (Hà Nội). So sánh với các mô hình sản xuất lúa HC kết hợp xử lý rơm rạ sau thu hoạch bằng chế phẩm vi sinh Quế Lâm, lãi so với đối chứng canh tác theo truyền thống từ 3,7 - 9,1 triệu đồng/ha với tỷ suất lợi nhuận từ 1,70 - 2,07 thì hiệu quả tương đương nhau.

Trần Thị Xuân Phương và cs. (2023) [36] kết quả cho thấy, bón TSH với liều lượng 2,5 tấn/ha đã tác động tích cực đến sinh trưởng, phát triển và năng suất giống lúa HT1 trong cả hai vụ (Đông Xuân 2020 - 2021, Hè Thu 2021) so với mô hình đối chứng không bón. Việc áp dụng TSH không chỉ nâng năng suất giống lúa HT1 thêm 1,0 - 1,1 tấn/ha mà còn làm giảm đáng kể mức độ hại của các sâu bệnh chính, bao gồm bệnh đốm nâu và sâu cuốn lá nhỏ. Mật độ sâu cuốn lá nhỏ trong mô hình TSH thấp hơn so với mô hình đối chứng ở cả hai vụ. Đồng thời, bệnh đốm nâu gây hại cũng giảm hơn, với tỷ lệ bệnh và chỉ số bệnh lần lượt là 9,7 - 10% và 3,4 - 4,5% so với mô hình đối chứng. Sử dụng TSH trong canh tác giống lúa HT1 đem lại hiệu quả kinh tế cao hơn, đạt 6,0 - 7,3 triệu đồng/ha so với phương pháp bón phân truyền thống của nông dân, đồng thời góp phần cải thiện một số tính chất hóa học và sinh học của đất, đặc biệt là trong mô hình TSH.

Nghiên cứu đánh giá sự kết hợp của TSH và phân bón HC sinh học đối với sự phát triển và năng suất của lúa trong hai vụ từ năm 2023 - 2024 tại tỉnh Thừa Thiên Huế cho thấy có sự kết hợp tối ưu giữa 80% NPK + 5 tấn/ha phân bón HC sinh học + 2 tấn/ha TSH giàu Si từ vỏ trấu đối với chiều cao cây lúa (98,67 cm), sinh khối khô (12,43 g/cây) và năng suất thực thu (6,95 tấn/ha) (Tran et al., 2024) [237].

1.3. CÁC CÔNG TRÌNH NGHIÊN CỨU LIÊN QUAN ĐẾN ĐỀ TÀI

1.3.1. Trên thế giới

1.3.1.1. Si và hàm lượng kim loại nặng trong cây và đất

Vai trò của Si trong tăng khả năng chống chịu của thực vật đối với độc tính KLN đã được ghi nhận (Sahebi, 2015 [218]; Cocker et al., 1998 [100]). Cơ chế của việc nâng cao khả năng chịu KLN là do pH tăng khi bón Si dẫn đến kết tủa Si kim loại làm giảm KLN dễ tiêu ở thực vật (Cocker et al., 1998) [100]. Trong thực vật, Si ảnh hưởng đến sự chuyển vị và phân bố các kim loại trong các loại cây khác nhau và cho phép chúng tồn tại dưới khả năng sốc kim loại cao hơn (Shi et al., 2018) [224]. Trong cây lúa, bón các vật liệu giàu Si cho thấy giảm tích tụ KLN, cũng như tăng nồng độ đa kim loại (Cd, Zn, Cu và Pb) và giảm đất chua bị ô nhiễm (Wu et al., 2021) [246]. Si tăng sinh khối cây con và làm giảm nồng độ Zn ở cả rễ và chồi của cây lúa và nhựa

cây. Ngoài ra, sự tích lũy Zn bị hạn chế đáng kể do cung cấp Si trong các bộ phận khác nhau như rễ và lá của cây bông và cây ngô (Anwaar et al., 2015) [89]. Shi et al. (2005) [225] báo cáo rằng Si giảm thiểu độc tính kim loại Cd bằng cách giảm sự hấp thu và chuyển vị ion từ rễ sang chồi ở cây lúa. Bón Si cũng thấy giảm quá trình peroxy hóa lipid và khử bão hòa axit béo trong các mô thực vật và cải thiện sự tăng trưởng và sinh khối của thực vật trong điều kiện nhiễm KLN (Nagajyoti et al., 2010) [179]. Một số kết quả nghiên cứu đã chỉ ra bón Si có tác dụng cố định kim loại độc trong đất (Sahebi et al., 2015) [218]. Sự cố định này liên quan đến tăng pH đất hoặc thay đổi đặc tính kim loại trong dung dịch đất thông qua sự tạo phức Si. Trên lúa, bón các chất cải tạo giàu Si (tro bay và xỉ thép) cho thấy làm tăng pH của đất từ 4,0 lên 5,0 - 6,4 và làm giảm tính dễ tiêu của KLN trong thực vật ít nhất là 60%, điều này càng hạn chế sự hấp thu KLN (Wu et al., 2022) [247]. Ngoài ra, Si giúp thay đổi đặc điểm của kim loại từ dạng độc hại sang dạng không độc hại bằng cách hình thành phức chất Si trong dung dịch đất. Trong đất đã bón Si, phần lớn Cd được tìm thấy ở dạng oxit hoặc bị oxit Fe-Mn hấp thu (Li et al., 2019a) [163]. Ding et al. (2011) [109] đã chỉ ra rằng việc sử dụng Si trong đất bị ô nhiễm Cr có thể làm giảm đáng kể lượng Cr trao đổi bằng cách đẩy nhanh quá trình kết tủa của chất hữu cơ liên kết với Cr. Tương tự, Shim et al. (2014) [226] đã quan sát thấy sự giảm tính di động của kim loại trong đất bị ô nhiễm Pb khi bón Si do sự hình thành Pb-Si không hòa tan trong đất. Tương tự, các ảnh hưởng đã được quan sát thấy trong trường hợp đất bị ô nhiễm Cd và Zn, nơi bón Si đã tăng sự hình thành các phân đoạn Cd và Zn bền vững hơn. Tác dụng có lợi của Si trong việc giảm thiểu độc hại của KLN thường rõ ràng trong thực vật có tích lũy hàm lượng Si cao trong chồi của chúng (Ma và Takahashi, 2002) [170].

1.3.1.2. Ô nhiễm đất do kim loại nặng

Tính di động và dễ tiêu sinh học của Cu và Pb là một vấn đề toàn cầu được quan tâm, đặc biệt là trong môi trường ô nhiễm đất của các khu vực khai thác mỏ và công nghiệp hóa (Ahmad et al., 2012) [80]. Việc sử dụng thường xuyên nước thải, phân, chất thải khai thác mỏ và thuốc diệt nấm có chứa Cu là nguyên nhân chính gây nhiễm Cu trong đất (Mackie et al., 2015) [173]. Sự hiện diện của Zn trong đất bị ảnh hưởng theo pH, hàm lượng HC, cấu trúc và bản chất của nguyên liệu gốc. Zn là chất chuyển tiếp kim loại và là một vi chất dinh dưỡng cần thiết cho nhiều quá trình sinh học, nhưng nó gây độc ở nồng độ cao; Zn là KLN dạng vết phong phú nhất hiện có trong các hệ thống nông nghiệp (Baccio et al., 2015) [91]. Zn cũng xâm nhập vào môi trường từ các nguồn như từ nhà máy xử lý chất thải và đốt than. Các nhà máy xử lý rác thải đô thị, đốt than và chất thải cũng là những nguồn gây ô nhiễm Zn. Tính dễ tiêu của Zn trong đất kiểm tăng lên do khả năng hòa tan của nó. Zn cũng có tính linh động trong đất chua.

Theo nghiên cứu của Deyi Hou et al. (2025) [107] đã phân tích dữ liệu từ hơn 1000 nghiên cứu để xác định các khu vực có độc tính kim loại và tìm hiểu các yếu tố thúc đẩy những xu hướng này. Họ ước tính rằng từ 14 đến 17% diện tích đất trồng trọt vượt quá ngưỡng nông nghiệp đối với ít nhất một kim loại độc hại. Khí hậu và địa hình, cùng với hoạt động khai thác mỏ và tưới tiêu, đã dự đoán những loại đất nào sẽ vượt quá ngưỡng kim loại. Ô nhiễm kim loại trong đất là một vấn đề toàn cầu và có khả năng sẽ gia tăng do nhu cầu ngày càng tăng về kim loại độc hại trong các công nghệ mới. Tại Trung Quốc, Cd chiếm 43% tổng số trường hợp vượt tiêu chuẩn chất lượng đất dựa trên một cuộc khảo sát chất lượng đất quốc gia. Sự tích tụ Cd trong gạo là mối quan tâm đặc biệt đối với các quốc gia châu Á, nơi người dân có xu hướng tiêu thụ một lượng lớn sản phẩm từ gạo. Tại Hoa Kỳ, Cd trong đất được phát hiện vượt mức hướng dẫn sức khỏe tại 1011 trong số 1867 địa điểm ưu tiên quốc gia được xác định bởi USEPA.

Ô nhiễm KLN trong đất là một trong những vấn đề môi trường nghiêm trọng, ảnh hưởng trực tiếp đến chất lượng đất, năng suất cây trồng và sức khỏe con người. Các kim loại như Cd, Pb, Hg, As và Cr có khả năng tích lũy lâu dài trong môi trường đất, khó bị phân hủy và có thể xâm nhập vào chuỗi thực phẩm thông qua cây trồng. Trong bối cảnh đó, việc nghiên cứu và ứng dụng các giải pháp cải tạo đất bị ô nhiễm kim loại nặng đang trở thành một hướng đi cấp thiết trong quản lý tài nguyên đất bền vững.

Theo Nie et al. (2024) [181], việc sử dụng các chất cải tạo đất như biochar, zeolit, bentonite và compost đã cho thấy hiệu quả rõ rệt trong việc hấp phụ kim loại nặng, đồng thời cải thiện các đặc tính lý hóa của đất như độ pH, khả năng trao đổi cation và độ ổn định cấu trúc đất. Biochar, đặc biệt, được đánh giá cao nhờ diện tích bề mặt lớn, khả năng giữ nước và tính ổn định cao trong môi trường đất, giúp cố định kim loại nặng và giảm khả năng di động của chúng. Theo Mohammad et al. (2025) [178] cho rằng các chiến lược sinh học như phytoremediation (sử dụng thực vật để hấp thụ kim loại) và bioremediation (sử dụng vi sinh vật để chuyển hóa kim loại) đang được ứng dụng rộng rãi trong các vùng đất bị ảnh hưởng bởi xâm nhập mặn và hoạt động công nghiệp. Các loài cây như vetiver, cải xoong, hướng dương và một số loài cỏ bản địa có khả năng tích lũy kim loại nặng trong thân và rễ, từ đó giúp làm sạch đất một cách tự nhiên và ít tốn kém.

Theo Ahmed và Aidi (2025) [83] đã đánh giá khá toàn diện về tiềm năng của biochar trong xử lý đất ô nhiễm kim loại nặng, đặc biệt là thông qua các cơ chế hấp phụ, trao đổi ion, kết tủa và tạo phức. Tác giả nhấn mạnh rằng biochar, với cấu trúc xốp và diện tích bề mặt lớn, có khả năng giữ lại các ion kim loại như Pb^{2+} , Cd^{2+} và Zn^{2+} , đồng thời giảm tính di động và độc tính của chúng trong môi trường đất. Nghiên cứu cũng chỉ ra rằng hiệu quả xử lý phụ thuộc vào nguồn nguyên liệu sinh khối, nhiệt độ nhiệt phân và điều kiện môi trường đất. Đáng chú ý, tác giả đã đề xuất

các hướng cải tiến như biến tính biochar bằng nano-vật liệu hoặc polymer sinh học, cũng như kết hợp với vi sinh vật cải tạo đất để tăng hiệu quả xử lý. Những ứng dụng thực tiễn được tổng hợp trong nghiên cứu cho thấy biochar không chỉ giúp cải thiện chất lượng đất mà còn góp phần phục hồi hệ sinh thái nông nghiệp tại các vùng bị ô nhiễm kim loại nặng. Đây là một tài liệu nền tảng quan trọng, mở ra triển vọng ứng dụng biochar như một giải pháp bền vững trong quản lý đất và bảo vệ môi trường.

Theo Yang et al. (2024) [259] cho rằng các phương pháp kết hợp giữa xử lý hóa học và sinh học đang được đánh giá là hướng tiếp cận toàn diện, vừa đảm bảo hiệu quả xử lý vừa giảm thiểu rủi ro môi trường. Chẳng hạn, việc kết hợp biochar với vi sinh vật phân giải kim loại không chỉ tăng hiệu quả hấp phụ mà còn thúc đẩy quá trình phân hủy sinh học các hợp chất kim loại phức tạp. Ngoài ra, các công nghệ mới như nano-vật liệu, polymer sinh học và enzyme xúc tác cũng đang được nghiên cứu nhằm nâng cao hiệu quả xử lý kim loại nặng trong đất.

1.3.1.3. Than sinh học và phụ phẩm cây trồng giàu Si trong xử lý ô nhiễm đất

TSH là một vật liệu cải tạo đất nông nghiệp bị thoái hóa, ô nhiễm tốt nhất và mới nhất (Rizwan et al., 2016) [211]. Nhiều lợi ích của TSH đã được báo cáo như tăng khả năng hấp thu carbon, độ phì đất, sản xuất sinh khối, năng suất cây trồng và giảm thiểu phát thải khí nhà kính (Abiven et al., 2015) [73].

Một số nghiên cứu đã đề cập đến hàm lượng Si trong các loại TSH khác nhau từ lúa, lúa mì, cỏ hòa thảo (Wang et al., 2017 [241]; Li et al., 2019a [163]), nhưng những nghiên cứu này chủ yếu xem xét đến phương pháp chế biến và ảnh hưởng của nhiệt độ nhiệt phân cho hàm lượng Si cao trong TSH, kết quả cho thấy TSH có nguồn gốc từ rơm rạ là TSH giàu Si (Sichar) (Xiao et al., 2014 [250]; Wang et al., 2017 [242]). Hàm lượng Si trong TSH liên quan nhiều đến các dạng tiền chất và nhiệt độ nhiệt phân. Hàm lượng Si cao nhất trong TSH từ trấu ở 400°C là 33,41% (Si là 71,60%). Nói chung, hàm lượng Si trong vỏ trấu cao hơn trong rơm rạ, vì vậy hàm lượng Si trong TSH giàu Si từ vỏ trấu ở cùng nhiệt độ thường cao hơn trong rơm rạ, cho thấy rằng TSH có nguồn gốc từ rơm rạ cũng có thể là một phân bón cung cấp Si (Xiao et al., 2014) [250], hàm lượng trung bình của Si trong TSH từ phụ phẩm cây trồng là 7,07% (Li et al., 2019b) [164]. Rơm và trấu là nguồn vật liệu giàu Si, vì vậy rơm hoặc vỏ trấu đã carbon hóa sẽ là một loại phân bón Si tốt (Wang et al., 2017) [242].

Thực vật giàu Si như lúa, ngô và lúa mì thường hấp thu Si đáng kể, do đó có thể bị nhiệt phân để thu được nguyên liệu TSH giàu Si. Vì vậy, TSH được sản xuất từ cây trồng tích lũy Si, chẳng hạn như lúa mì, lúa và bã mía có thể là nguồn cung cấp Si tốt cho cây (Teasley et al., 2017) [236], trong đó TSH giàu Si từ vỏ trấu chế biến từ quá trình nhiệt phân được coi là một trong những loại TSH hiệu quả nhất về chi phí, do đó được sử dụng trong các hệ thống canh tác dựa trên cây lúa (Ogawa và Okimori, 2010) [190].

Không giống như nhiều chất cải tạo đất sinh học khác, TSH có khả năng tăng pH của đất, từ đó cải thiện sự hấp thu của kim loại, do đó làm giảm tính dễ tiêu sinh học của KLN đối với sự hấp thu của thực vật. TSH có độ pH cao và hàm lượng carbon hữu cơ; photpho, canxi và magiê cao hơn và diện tích bề mặt thấp hơn so với carbon (Cao et al., 2011) [94]. Đó là lý do tại sao bón TSH vào đất đã tăng đáng kể khả năng trao đổi cation của đất. TSH có vai trò hạn chế Pb trong đất (Cao et al., 2011) [94]. Pb giảm đạt được ở tỷ lệ bón 10% TSH với mức giảm ổn định là 68 và 30% ở chất thải từ bã mía và vỏ cam, tương ứng là 93% (Abdelhafez et al., 2014) [74]. pH là thông số chính làm ảnh hưởng quá trình hấp thu hoặc giải phóng các KLN trong đất chua. Tăng lượng TSH làm giảm Pb và Cu hòa tan trong axit xuống 18,8 - 77,0% và 19,7 - 100,0%, lần lượt. Khi tỷ lệ bón TSH từ phân bò tăng lên, hấp thu chất dinh dưỡng trên cây ngô và các đặc tính quang hóa của đất cát khô hạn được cải thiện đáng kể. TSH có nguồn gốc từ bùn thải loại bỏ Pb^{2+} khỏi đất chua ở pH ban đầu 5, 4, 3 và 2 với khả năng là 30,88; 24,80; 20,11 và 16,11 mg/g, tương ứng. TSH từ phân chuồng giàu P như một loại phân bón và cũng được sử dụng để loại bỏ KLN (Penido et al., 2019) [195]. TSH tổng hợp từ phân lợn ở 450°C có thể góp phần điều chỉnh khả năng kiểm soát KLN (Cd^{2+}) trong đất cát (Xu et al., 2013) [253]. TSH được sản xuất từ chất thải xanh hạn chế Pb, Cu và Cd 36,8%, 22,9%, và 30,3% tương ứng đối với đất tự nhiên và 72,9, 0,901 và 42,7% đối với đất ô nhiễm (Park et al., 2011) [192]. TSH có nguồn gốc từ tre có thể hấp thu Ni, Cr, Cu, Hg từ cả nước, đất và Cd từ đất bị ô nhiễm (Zhang et al., 2018) [267]. Xu et al. (2013) [253] đã chỉ ra TSH có nguồn gốc từ rơm rạ làm tăng tính khả dụng sinh học và tính di động của Pb, Cu và Cd trong đất Ultisol.

Theo nghiên cứu của Li et al. (2023) [162], TSH giàu Si từ vỏ trấu là nguồn tài nguyên có chi phí thấp và có thể tái tạo được đã được chứng minh là có hiệu quả cao trong việc xử lý môi trường nước và đất. Hiệu suất, cấu trúc, thành phần và tính chất hóa lý của nó có thể được điều chỉnh bằng cách thay đổi các thông số của quá trình điều chế, chẳng hạn như tốc độ gia nhiệt, nhiệt độ nhiệt phân và tốc độ dòng khí mang. Ngoài ra, diện tích bề mặt cụ thể và các nhóm chức năng của nó có thể được sửa đổi thông qua các phương tiện vật lý, hóa học và sinh học. So với TSH từ các nguyên liệu thô khác, TSH giàu Si từ vỏ trấu hoạt động kém hơn trong các dung dịch có kim loại cùng tồn tại, nhưng có thể được biến đổi để cải thiện khả năng hấp thu. Trong đất bị ô nhiễm, TSH giàu Si từ vỏ trấu đã được chứng minh là có hiệu quả trong việc hấp thu KLN và chất hữu cơ, cũng như làm giảm lượng chất ô nhiễm và tăng cường sự phát triển của cây trồng bằng cách điều chỉnh tính chất của đất và giải phóng các yếu tố có lợi. Tuy nhiên, hiệu quả của nó trong môi trường phức tạp vẫn chưa chắc chắn và cần nghiên cứu thêm để hiểu đầy đủ về cơ chế và hiệu quả của nó trong việc xử lý môi trường. Bón TSH giàu Si từ vỏ trấu vào đất thường cải thiện năng suất cây trồng. TSH giàu Si từ vỏ trấu cung cấp trực tiếp chất dinh dưỡng cho cây trồng nhờ có nhiều loại

khoáng chất khác nhau. Nó cũng có thể gián tiếp làm tăng năng suất cây trồng bằng cách cải thiện các tính chất lý hóa của đất, bao gồm pH, khả năng trao đổi cation, K hữu hiệu, carbon hữu cơ trong đất và tỷ trọng đất.

Si cạn kiệt trong đất trồng trọt đã trở thành một vấn đề quan trọng để tổng hợp Si từ tàn dư cây trồng thành nhiều sản phẩm Si khác nhau. Việc phát triển phân bón Si từ các nguồn bền vững khác đã trở thành một lựa chọn khả thi để khắc phục tình trạng này. Nhiều nghiên cứu đã đánh giá khả năng sử dụng các chất thải công nghiệp làm phân bón silic cho cây trồng. Haynes et al. (2013) [131] đã đánh giá bốn loại chất thải công nghiệp (xỉ lò cao, xỉ thép, bùn chế biến, tro bay) làm nguồn phân bón Si cho cây lúa. Kết quả báo cáo rằng tất cả các vật liệu ngoại trừ tro bay đều làm tăng lượng Si dễ tiêu trong đất. Hơn nữa, người ta đã xác nhận rằng xỉ lò cao là vật liệu thải hiệu quả nhất làm nguồn phân bón Si trong số các vật liệu thải được thử nghiệm. Các chất thải công nghiệp khác có hàm lượng Si cao như bùn thải (Ding et al., 2014) [108], chất thải Si (Han et al., 2020) [127], sản phẩm thải từ ngành phân bón photphat cũng có thể được coi là nguồn phân bón Si.

1.3.1.4. Sử dụng than sinh học giàu Si đối với sinh trưởng, phát triển và năng suất cây trồng

TSH từ rơm rạ, thân ngô, rơm lúa mì, trấu và tre đã làm tăng năng suất lúa trên mặt đất từ 6,3 - 13,3% và TSH giàu Si từ vỏ trấu có tác dụng lớn nhất đến năng suất cây trồng (Yang và Lu, 2021) [262].

TSH thúc đẩy sự phát triển của rễ bằng cách cải thiện cấu trúc đất để cây xới và giảm sức cản cơ học đối với sự phát triển của rễ cây. Rễ cung cấp nước và chất dinh dưỡng cho cây và tăng khí khổng, tốc độ quang hợp và hiệu suất của cây (Driesen et al., 2020) [113]. TSH được sản xuất ở nhiệt độ nhiệt phân thấp hơn có khả năng cung cấp chất dinh dưỡng cao hơn trong đất so với nhiệt độ cao hơn (Purakayastha et al, 2019) [198]. TSH được làm từ thân ngô ở 2,1% được sản xuất ở nhiệt độ nhiệt phân thấp hơn (400°C) có hiệu quả hơn 13% trong việc tăng năng suất lúa so với nhiệt độ cao hơn (700°C) (Chen et al., 2023) [99]. Li et al. (2019b) [164] cũng chứng minh rằng TSH ở nhiệt độ cao có xu hướng kiềm và đã chỉ ra rằng TSH ở nhiệt độ cao chứa ít hợp chất dễ bay hơi có hoạt tính sinh học hơn có thể hạn chế sự phát triển của cây. Theo Wu et al. (2021) [246], TSH từ rơm rạ làm tăng tỷ lệ hấp thu chất dinh dưỡng so với rửa trôi của cây trồng và cải thiện khả năng tiếp cận chất dinh dưỡng cation lên 108% khi sử dụng 8,0 tấn/ha TSH, giúp tăng 5,8% sản lượng lúa so với sử dụng 4,0 tấn/ha TSH từ rơm rạ. Độ xốp và diện tích bề mặt lớn của TSH thúc đẩy khả năng liên kết của cation và anion, giúp cải thiện khả năng lưu trữ các nguyên tố (Han et al., 2020) [127]. Ngoài ra, TSH chứa một lượng lớn chất dinh dưỡng dễ tiêu mà cây trồng có thể hấp thu, ảnh hưởng đến năng suất cây trồng (Wu et al., 2021) [146]. Mặt khác, việc sử dụng quá nhiều TSH có

thể gây hại cho sự phát triển của cây trồng. Nguyên nhân là do quá nhiều TSH dẫn đến tỷ lệ C/N cao, làm giảm quá trình khoáng hóa và chuyển đổi các nguyên tố thành các nguyên tố HC, làm giảm khả năng tiếp cận chất dinh dưỡng của cây trồng trong đất (Tsai và Chang, 2021) [238]. Lượng TSH dư thừa (từ 2 tấn/ha đến 40 tấn/ha) làm tăng tỷ lệ C/N của đất khoảng 13%, làm giảm khả năng hấp thu chất dinh dưỡng của đất và khiến cây lúa hấp thu và sử dụng chất dinh dưỡng không có lợi (Cui et al., 2017) [101]. Người ta thấy rằng cải tạo đất bằng TSH có thể có những tác động lâu dài khác nhau đến sản xuất lúa, mặc dù có rất ít nghiên cứu được tiến hành về vấn đề này. Các nghiên cứu về lúa thường chỉ được tiến hành trong một vụ; do đó, kết quả liên quan đến tác động của TSH đến năng suất lúa trong một vụ ngắn không thể khái quát hóa thành tác động lâu dài của nó. Trong hệ thống lúa-cai lương, năng suất hạt tăng trong hai năm và bốn vụ khi bón 11 tấn/ha phân gà, phân bón HC, than củi và TSH từ thảm mục rừng. Năng suất tích lũy của lúa và cao lương tăng khoảng 75% trong thời gian nghiên cứu. Rễ là phương tiện chính để hấp thu nước và chất dinh dưỡng và giải phóng axit hữu cơ, hormone và axit amin vào đất (Xiang et al., 2017) [248]. Do đó, đặc điểm hình thái của rễ ảnh hưởng trực tiếp đến sự sinh trưởng và phát triển của cây (Yu et al., 2019 [263], Li et al., 2020) [159]. Hình thái của rễ có thể dễ dàng bị ảnh hưởng bởi các kỹ thuật trồng trọt, tính chất lý hóa của đất và việc bổ sung phân bón (Jha et al., 2017) [140]. Nhiều nhà nghiên cứu đã báo cáo về sự cải thiện chiều dài rễ, diện tích bề mặt, đường kính, đặc tính sinh lý và đặc điểm thể tích do sự thay đổi của rễ ở mọi giai đoạn sinh trưởng của lúa khi sử dụng TSH khác nhau (Li et al., 2022 [161]; Ali et al., 2020 [84]; Ullah et al., 2021 [239]). Tác động tích cực của TSH đối với năng suất cây trồng có thể là do tốc độ quang hợp tăng lên. Hệ thống quang hợp trong lá lúa hấp thu và sử dụng năng lượng ánh sáng, dẫn đến những thay đổi trong các thông số quang hợp của lá; tuy nhiên, việc sử dụng một lượng TSH thích hợp có thể cải thiện hiệu suất chuyển đổi năng lượng ánh sáng, khả năng quang hợp thực tế, hoạt động quang hợp tiềm năng và tỷ lệ các trung tâm phản ứng quang hợp mở trong lá (Abulaiti et al., 2023) [78]. Một nghiên cứu của Ullah et al. (2021) [239] cho thấy việc sử dụng TSH từ rơm sắn với tỷ lệ 30 tấn/ha làm tăng nồng độ diệp lục a lên 12,91% và nồng độ diệp lục b lên 10,05% trong lúa do khả năng tiếp cận chất dinh dưỡng trong đất được cải thiện so với các phương pháp xử lý không có TSH. Sự hình thành sắc tố quang hợp chịu ảnh hưởng của các yếu tố phi sinh học, bao gồm khả năng tiếp cận các nguyên tố dinh dưỡng trong đất và sự thiếu hụt chất dinh dưỡng ảnh hưởng rất lớn đến cơ chế quang hợp (Rizwan et al., 2018 [213]; Ali et al., 2020 [84]). TSH đã được chứng minh là làm tăng khối lượng vật chất khô (rễ và lá) do tác động tích cực của nó đối với chất thảm thấu, sắc tố diệp lục và các đặc điểm sinh lý (Hasanuzzaman et al., 2019) [130]. Đất nhận được 25% NPK từ TSH vỏ trấu và 75% phân NPK.

Theo nghiên cứu của John et al. (2024) [144], TSH giàu Si từ vỏ trấu là nguồn Si dễ tiêu tiềm năng trong đất lúa và là chất bổ sung cho sản xuất lúa bền vững. Nghiên cứu đã thử nghiệm ảnh hưởng của các phương pháp bón TSH giàu Si từ vỏ trấu đối với sự phát triển cây lúa, sản lượng lúa và hàm lượng Si trong đất cát ở thí nghiệm trong chậu. TSH giàu Si từ vỏ trấu được bón ở mức 5 tấn/ha dưới dạng bón sâu (LSA) hoặc trộn trên mặt (TMA) cùng với đất ở phần trên 7 cm hoặc trộn toàn bộ (WMA) trong phạm vi 20 cm từ mặt đất và ở mức 10 tấn/ha trong các phương pháp TMA và WMA và được so sánh với đối chứng (CTRL) không có sinh khối. So với CTRL, các phương pháp LSA và TMA không ảnh hưởng đến nồng độ Si trung bình ở giai đoạn làm đồng và trổ bông. Tuy nhiên, phương pháp WMA bón với liều lượng là 5 tấn/ha đã tăng ($p < 0,05$) nồng độ Si trung bình lần lượt là 12,3 và 39,5% ở giai đoạn đẻ nhánh và trổ bông, trong khi ở 10 tấn/ha, sinh trưởng của cây lúa tăng tương ứng là 26,1 và 32,7%. Kết quả nghiên cứu đã chứng minh việc lựa chọn phương pháp bón và liều lượng TSH ảnh hưởng đáng kể đến sự hòa tan Si trong nước, dẫn đến sự hấp thu Si cao hơn và sau đó là hiệu suất lúa cao hơn.

Kết quả cho thấy bón TSH ở tỷ lệ lên tới 1,2 tấn/ha làm tăng năng suất lúa, nhưng hạn chế tốc độ kéo dài thân và chiều cao cây. Trong giai đoạn sinh trưởng sinh dưỡng, bón TSH làm tăng đáng kể số nhánh, lá, trọng lượng khô của thân và trọng lượng khô của rễ. TSH ảnh hưởng đáng kể đến các thành phần năng suất như số nhánh, tỷ lệ nhánh hữu hiệu, số hạt trên bông, mật độ bông, tỷ lệ hạt chắc và khối lượng 1.000 hạt (Lakitan et al., 2018) [154].

Theo Wei Miao et al. (2023) [244], việc bổ sung TSH cải thiện đáng kể các đặc tính của đất, làm tăng sự phát triển và năng suất cây trồng. Việc sử dụng TSH đã tăng sản xuất sinh khối và khả năng chống đổ ngã ở cả ba giống cây trồng lên tới 29% và 22% tương ứng, với mức cải thiện lớn nhất ở tỷ lệ bón TSH là 30 tấn/ha. Đáng chú ý, thành phần thành tế bào và phân tích hàm lượng Si cho thấy hàm lượng hemicellulose, hàm lượng lignin và Si trong các mẫu được xử lý bằng TSH lên đến 36%, 13% và 58% tương ứng khi so sánh với các cây không được xử lý bằng TSH. Nghiên cứu này cho thấy bón TSH có thể cải thiện cả quá trình sản xuất sinh khối và khả năng chống đổ ngã bằng cách thúc đẩy quá trình đồng lắng đọng Si với hemicellulose và lignin trong thành tế bào.

Gu et al. (2013) [120] đã chỉ ra rằng bón TSH giàu Si từ vỏ trấu làm tăng năng suất lúa từ $6,66 \pm 0,21$ lên $7,98 \pm 0,55$ tấn/ha. Tương tự như vậy, Sirisuntornlak et al. (2021) [227], cho thấy bổ sung TSH giàu Si từ vỏ trấu làm tăng năng suất lúa từ 2,57 lên 4,55 tấn/ha và năng suất rom rạ từ 6,28 lên 8,43 tấn/ha.

1.3.2. Tại Việt Nam

1.3.2.1. Sử dụng than sinh học đối với sinh trưởng, phát triển và năng suất lúa

Tại Việt Nam, người dân từ lâu đã sử dụng TSH có nguồn gốc từ rơm rạ, trấu thông qua phương pháp đốt yếm khí để tạo than hoa hoặc đốt trấu trực tiếp bón ruộng. Tuy nhiên, các nghiên cứu mang tính hệ thống về sản xuất và ứng dụng TSH trong nông nghiệp chỉ mới được thực hiện trong những năm gần đây, và lĩnh vực này vẫn còn khá mới mẻ.

Một số kết quả nghiên cứu chỉ ra rằng, trữ lượng carbon trong TSH sản xuất từ gỗ, tre nứa và rơm rạ mặc dù khác nhau nhưng đều đạt mức rất cao (Mai Văn Trinh, 2011) [68]. Ngoài ra, một số nghiên cứu cũng đánh giá hiệu quả việc bón bổ sung TSH kết hợp với phân HC và phân vô cơ đối với sinh trưởng, phát triển và năng suất lúa; kết quả cho thấy mặc dù năng suất lúa tăng, hiệu quả kinh tế lại thấp do chi phí sử dụng TSH tương đối cao (Nguyễn Hồng Sơn và Nguyễn Thị Nguyệt Thu, 2015) [45]. Trên cơ sở đó, nhóm tác giả tại Viện Khoa học Việt Nam đã tiến hành nghiên cứu khả năng thay thế phân chuồng và phân vô cơ bằng TSH, nhằm xác định lượng than và các loại phân bón khác thích hợp để đạt hiệu quả kinh tế tối ưu và cải thiện sức sản xuất của đất, phục vụ sản xuất lúa bền vững. Kết quả nghiên cứu cho thấy, vào các thời điểm sinh trưởng chính như đẻ nhánh, đứng cái, làm đòng và kết thúc làm đòng (tương ứng 2, 4, 6, 8 và 10 tuần sau cấy), chiều cao cây ở các công thức bón TSH đều tăng rõ rệt so với công thức chỉ bón N, P, K. Tuy nhiên, thống kê cũng chỉ ra rằng việc sử dụng TSH với các liều lượng khác nhau không tạo ra sự khác biệt rõ rệt về chiều cao cây. Về năng suất lý thuyết, ngoại trừ số hạt/bông, khóm/m² và khối lượng 1000 hạt, các chỉ tiêu quan trọng khác như tỷ lệ danh hữu hiệu, số danh/khóm và tỷ lệ hạt chắc đều cao hơn ở công thức bón TSH và công thức bón bổ sung phân chuồng so với công thức chỉ bón N, P, K, đặc biệt là tỷ lệ hạt chắc và tỷ lệ danh hữu hiệu. Nhờ đó, số hạt chắc/bông và số bông/khóm tăng, dẫn đến năng suất lý thuyết của các công thức bón TSH và bón bổ sung phân chuồng đều cao hơn công thức chỉ bón N, P, K (78,3 - 83,1 tạ/ha so với 69,9 tạ/ha). Năng suất thực thu cao nhất đạt được ở công thức bón 4,5 tấn TSH (70,6 tạ/ha), tiếp theo là công thức bón 3,0 tấn TSH (69,2 tạ/ha), N, P, K + phân hữu cơ (67,6 tạ/ha), 1,5 tấn TSH (66,5 tạ/ha) và thấp nhất là công thức chỉ bón phân vô cơ (59,4 tạ/ha).

Việc áp dụng than sinh học trong sản xuất lúa đem lại hiệu quả kinh tế rõ rệt: tổng chi phí sản xuất 1 ha lúa ở các công thức dao động từ 28.922 nghìn đồng (công thức chỉ sử dụng phân vô cơ) đến 42.351 nghìn đồng (công thức bón 4,5 tấn TSH). Chi phí của các công thức bón phân chuồng, TSH với liều lượng 1,5 và 3,0 tấn lần lượt là 34.922; 33.411,5 và 37.874 nghìn đồng/ha. Như vậy, khi sử dụng TSH thay thế phân chuồng và một phần phân hóa học, các chỉ tiêu về sinh trưởng, sinh thực, năng suất và

khả năng chống chịu sâu bệnh của cây lúa trong các công thức bón TSH đều tăng rõ rệt và đạt mức tương đương hoặc cao hơn so với công thức bón phân chuồng. Tuy nhiên, nếu chỉ áp dụng trong một vụ gieo trồng và không chú trọng cải tạo độ phì đất nhằm duy trì sản xuất bền vững, các biện pháp sử dụng TSH để thay thế phân chuồng và một phần phân N, P, K sẽ không phải là giải pháp kỹ thuật được khuyến cáo áp dụng.

Theo các tác giả Vũ Thắng và Nguyễn Hồng Sơn (2011) [49], nghiên cứu về ảnh hưởng của loại và lượng bón TSH đến sinh trưởng và năng suất lúa cho thấy việc bổ sung TSH sản xuất từ xơ dừa, gốc luồng hoặc vỏ trấu vào đất xám bạc màu trồng lúa, khi bón kèm phân khoáng (N, P, K) ở mức trung bình, đã tác động tích cực đến khả năng đẻ nhánh, số bông, sinh khối và năng suất lúa. Tuy nhiên, hiệu quả này còn phụ thuộc vào loại và lượng TSH được sử dụng. Cụ thể, trong nghiên cứu, than luồng có tác dụng tích cực đến sinh trưởng và năng suất lúa khi mức bón tăng dần từ 10 đến 30 g than/kg đất, trong khi than xơ dừa và than trấu chỉ thể hiện hiệu quả tích cực ở lượng bón 10 g/kg đất. Để đánh giá đầy đủ hiệu quả và cơ chế tác động của TSH đối với đất và cây trồng, cần tiến hành nghiên cứu dài hạn về các loại TSH, cả khi sử dụng riêng lẻ hoặc kết hợp với các vật liệu khác trên nhiều loại đất và cây trồng. Bên cạnh đó, việc tập trung nghiên cứu công nghệ sản xuất than cũng rất quan trọng, vì đây là một trong những yếu tố quyết định hiệu quả kinh tế và tác động môi trường khi áp dụng TSH.

Si từ TSH và phân bón HC hầu như chưa được nghiên cứu ở Việt Nam. Chỉ có một số nghiên cứu về phân Si hóa học đối với sinh trưởng và năng suất cây trồng được thực hiện trên cây lúa (Trần Thị Tường Linh và cs., 2005) [26].

Theo nghiên cứu của Trần Thị Xuân Phương và cs. (2023) [36], việc áp dụng mô hình sử dụng 2,5 tấn biochar được sản xuất từ rơm và trấu, kết hợp với nền phân bón gồm 100 kg N, 65 kg P_2O_5 , 70 kg K_2O và 500 kg vôi đã cho thấy hiệu quả tích cực đối với sự sinh trưởng, phát triển và năng suất của giống lúa HT1. So với mô hình đối chứng sử dụng 110 kg N, 70 kg P_2O_5 , 75 kg K_2O và 500 kg vôi, việc áp dụng biochar giúp rút ngắn thời gian sinh trưởng của cây lúa từ 1 đến 2 ngày, đồng thời làm tăng năng suất từ 1,0 đến 1,1 tấn/ha. Thêm vào đó, mật độ sâu cuốn lá nhỏ trong hai vụ lúa ở mô hình sử dụng biochar đều thấp hơn so với mô hình đối chứng. Ứng dụng biochar trong canh tác lúa không chỉ mang lại hiệu quả kinh tế cao hơn, từ 6,0 đến 7,3 triệu đồng/ha so với phương pháp bón phân truyền thống, mà còn góp phần cải thiện các đặc tính hóa học và sinh học của đất, đặc biệt là trong những mô hình có sử dụng biochar.

Nghiên cứu về các pha của Si trong đất vùng đồng bằng sông Hồng do Nguyễn Ngọc Minh (2018) [28] thực hiện cho thấy sự gia tăng của Si hòa tan trong dung dịch đất có thể đẩy nhanh sự mất đi các hạt keo sét trong đất do xói mòn và rửa trôi. Nghiên

cứu về chu trình Si trong hệ thống canh tác nông nghiệp và trong đất lúa, kết hợp với mô hình mô phỏng quá trình trao đổi chất (mất Si) cho phép cung cấp những thay đổi trạng thái Si trong đất và xác định thời điểm có khả năng thiếu Si trong cây trồng từ đó có thể đề xuất các biện pháp bổ sung Si qua phân bón.

Theo nghiên cứu của Hughes et al. (2020) [135], việc hoàn trả phụ phẩm cây trồng trên đồng ruộng miền Bắc Việt Nam góp phần khép kín chu trình Si giữa đất và cây trồng, đồng thời hạn chế thất thoát silic. Điều này cho thấy tái sử dụng phụ phẩm là biện pháp cần thiết để duy trì hàm lượng silic thích hợp trong đất nông nghiệp.

1.3.2.2. Sử dụng than sinh học đối với hàm lượng kim loại nặng trong đất

Đồng Thị Minh Hậu và cs. (2008) [15] nghiên cứu cho thấy, khả năng tích lũy Cr và Cu của cây cỏ voi cao hơn so với cây ngô, trong khi khả năng tích lũy Zn của cỏ voi lại thấp hơn. Cả cây ngô và cỏ voi đều không thuộc loại cây siêu tích lũy, mà tích lũy các kim loại nặng theo cơ chế ổn định thông qua thực vật. So với thân, hàm lượng kim loại nặng tích lũy trong rễ cao hơn nhiều lần: cây bắp tích lũy trong rễ cao gấp 5,1 - 100 lần so với thân, trong khi cây cỏ voi tương ứng là 13,9 - 130 lần. Tỷ lệ tích lũy Zn trong rễ/thân của cây bắp là 5,1 lần, là giá trị thấp nhất. Do cả hai loài cây đều có sinh khối lớn, chúng có thể được sử dụng để xử lý bùn nạo vét và đất ô nhiễm kim loại nặng. Phương pháp này mang ưu điểm là đơn giản, thân thiện với môi trường và chi phí thấp.

Phạm Hoàng Giang và Đỗ Quang Huy (2016) [10] đã nghiên cứu việc biến tính một số vật liệu phụ phẩm nông nghiệp bằng axit H_3PO_4 , và nhận thấy rằng sau quá trình biến tính, khả năng hấp thu xanh metylen của các vật liệu tăng từ 2 đến 5 lần so với vật liệu gốc. Trên cơ sở đó, hai vật liệu có hiệu suất hấp thu tốt nhất, gồm vỏ chuối và rơm, đã được lựa chọn để tiến hành thí nghiệm hấp thu kim loại nặng. Ảnh SEM (kính hiển vi điện tử quét) của vật liệu cho thấy quá trình biến tính đã làm thay đổi cấu trúc, làm tăng tổng diện tích bề mặt, từ đó nâng cao khả năng hấp thu. Khảo sát ảnh hưởng của nồng độ ion kim loại nặng cho thấy, quá trình hấp thu tuân theo mô hình đường hấp thu đẳng nhiệt Langmuir, với dung lượng hấp thu cực đại (Q_{max}) của các vật liệu như sau: vỏ chuối biến tính đạt 121,95 mg Pb^{2+} /g và 53,2 mg Cu^{2+} /g; rơm biến tính đạt 55,56 mg Pb^{2+} /g và 46,3 mg Cu^{2+} /g.

Đất tại khu vực khai thác và chế biến khoáng sản huyện Quỳnh Hợp, tỉnh Nghệ An hiện đang bị ô nhiễm nặng bởi As, với hàm lượng vượt nhiều lần so với quy chuẩn cho phép theo QCVN 03:2015/BTNMT. Đề tài đã lựa chọn và nghiên cứu ba loài thực vật có khả năng xử lý đất ô nhiễm As, gồm dương xỉ *Pteris vittata*, cải xanh và sậy, để xây dựng mô hình thử nghiệm. Kết quả cho thấy cả ba loài cây này đều có khả năng sinh trưởng và phát triển tốt trên vùng đất nghèo chất dinh dưỡng và ô nhiễm kim loại nặng (Mai Văn Định, 2020) [8].

Theo nghiên cứu của Vũ Thị Khắc và cs. (2022) [21], đất trồng lúa bị ô nhiễm Cd với nồng độ 5,125 ppm đã được lựa chọn để nghiên cứu, trong đó các vật liệu TSH từ trấu (BRH) và rơm rạ (RS) được phối trộn vào đất nhằm thay đổi đặc tính đất, như tăng pH và hàm lượng Si, nhằm giảm thiểu sự tích lũy Cd vào hạt. Thí nghiệm được tiến hành trong điều kiện nhà lưới với các tỷ lệ phối trộn TSH và rơm rạ từ 1,25 đến 5% theo khối lượng. Kết quả cho thấy cả rơm rạ và TSH đều có khả năng hạn chế tích lũy Cd trong gạo; cụ thể, hàm lượng Cd trong gạo được kiểm soát theo thứ tự: RS 2,5% < BRH 1,25% + RS 1,25% < BRH 2,5% < (BRH 5%, BS 5%, BRH - BS 2,5% - 2,5%). Trong đó, các công thức BRH và RS với tỷ lệ 5% về trọng lượng mang lại hiệu quả tốt nhất, với các công thức BRH 5%, BS 5% và BRH - BS 2,5% - 2,5% làm giảm tích lũy Cd trong gạo nhiều hơn so với các công thức còn lại. Hàm lượng Cd trong gạo của các công thức này giảm sâu so với đối chứng, từ 82,47 - 83,94%. Từ các kết quả trên, có thể kết luận rằng áp dụng tỷ lệ trộn BRH - BS 2,5% - 2,5%, BRH 5% hoặc RS 5% đều đạt hiệu quả tối ưu trong nghiên cứu.

Theo Nguyễn Thanh Bình và Hà Trần Quang Nghiêm (2023) [3], TSH ảnh hưởng đến hàm lượng kim loại ở dạng trao đổi trong đất trồng lúa nước, từ đó tác động đến môi trường nói chung và sản phẩm nông nghiệp nói riêng. TSH có khả năng thay đổi một số tính chất lý và hóa học của đất, từ đó làm giảm hàm lượng kim loại ở dạng trao đổi. Kết quả nghiên cứu cho thấy, TSH làm tăng giá trị pH sau vụ lúa đầu tiên, nhưng không cải thiện giá trị pH sau vụ thứ hai. Ngoài ra, TSH còn giúp giảm hàm lượng trao đổi của một số kim loại như Al, Fe, Ni, Cd, Pb và Zn. So với đất không bổ sung TSH, việc thêm TSH làm tăng chỉ số chất lượng các kim loại trong đất từ 4,1 - 12,8% sau vụ thứ nhất và từ 9,6 - 188,7% sau vụ lúa thứ hai, tùy thuộc vào loại đất và tỷ lệ TSH sử dụng. Hiệu quả giảm này được giải thích bởi việc pH tăng (5,98 - 6,63 với tỷ lệ than 0 - 12% ở đất có hàm lượng OC cao, và 6,17 - 6,90 ở đất có hàm lượng OC thấp) cùng khả năng hấp thu của TSH. Như vậy, TSH thể hiện triển vọng tốt trong việc hạn chế hàm lượng kim loại trao đổi trong đất trồng trọt, đồng thời có tiềm năng ứng dụng thực tế để cải tạo các loại đất bị ô nhiễm kim loại.

Các nghiên cứu trong phòng thí nghiệm của Đinh Thị Lan Phương và cộng sự (2021) [33] đã đánh giá khả năng xử lý Cd di động trong đất ô nhiễm (Cd tổng số 5,125 ppm, Cd di động 0,048 ppm) bằng đá perlite và TSH từ rơm, trấu. Thí nghiệm được tiến hành với ba tỷ lệ trộn 0,5%, 1% và 1,5% theo khối lượng vật liệu. Kết quả cho thấy, đá perlite với tỷ lệ 1% và 1,5% đạt hiệu quả cao nhất, với mức xử lý tối ưu trên 99% sau 40 ngày. Trong khi đó, tro trấu ở tỷ lệ 1,5% đạt mức tối ưu sau 50 ngày, còn tro rơm 1,5% đạt mức tối ưu sau 60 ngày. So với rơm ủ, TSH mang lại hiệu quả xử lý Cd di động cao gấp 1,3 - 2,55 lần ở cùng tỷ lệ, làm giảm Cd di động từ 2,12 - 10,19 lần so với đối chứng. Trong nghiên cứu này, tỷ lệ trộn TSH hun từ trấu ở 400 -

450°C trong 2 giờ với 5% khối lượng cho kết quả tối ưu, giảm 97,49% Cd di động so với đối chứng (Đinh Thị Lan Phương và cs., 2022) [34].

Tóm lại, TSH giàu Si có nhiều tác dụng trong cải tạo đất và giảm hàm lượng KLN trong đất, đã có một số kết quả nghiên cứu về TSH đối với sinh trưởng, phát triển, năng suất lúa và cải tạo đất trên thế giới và Việt Nam. Tuy nhiên các nghiên cứu về TSH giàu Si từ phụ phẩm cây trồng đối với cây lúa và hàm lượng KLN trong đất còn rất ít tại Việt Nam và hầu như chưa có tại tỉnh Thừa Thiên Huế.

CHƯƠNG 2

ĐỐI TƯỢNG, NỘI DUNG VÀ PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

2.1. ĐỐI TƯỢNG NGHIÊN CỨU

2.1.1. Đất thí nghiệm

- Các mẫu đất được thu thập tại xã Quảng Thọ, huyện Quảng Điền và so sánh với mẫu đất tại phường Thủy Phương, thị xã Hương Thủy, tỉnh Thừa Thiên Huế (đối chứng).

- Các thí nghiệm trong phòng, trong nhà lưới và trên đồng ruộng được bố trí trên đất phù sa (*Dystic Fluvisols*) chuyên trồng 2 vụ lúa trên năm tại xã Quảng Thọ, huyện Quảng Điền, tỉnh Thừa Thiên Huế. Một số tính chất đất trước thí nghiệm như sau: pH_{KCl} 4,32; OM 3,3%; N 0,15%; P_2O_5 0,087%; K_2O 0,18%; CEC 10,23 meq/100g; Cd 1,27 mg/kg; Pb 38,64 mg/kg; Cu 31,27 mg/kg; Zn 36,02 mg/kg.

2.1.2. Giống lúa thí nghiệm

Giống lúa được sử dụng trong các thí nghiệm là giống lúa HT1 đang được trồng phổ biến tại địa phương. HT1 là giống lúa thuần, cảm ôn, thích nghi với nhiều vùng sinh thái ở Việt Nam, cây cao 95 - 105 cm, bông dài 22 - 25 cm, số hạt/bông cao, năng suất trung bình 5,5 - 6,0 tấn/ha. Giống kháng vừa các bệnh đạo ôn, khô vằn, chịu rét tốt và chịu chua trung bình. Thời gian sinh trưởng dao động 95-135 ngày tùy vụ.

2.1.3. Phân bón

Thí nghiệm sử dụng các loại phân bón như sau:

- Phân đạm urê Phú Mỹ (46% N)
- Phân lân supe Lâm Thao (16% P_2O_5)
- Phân KCl Phú Mỹ (60% K_2O)
- Phân chuồng: từ rơm rạ và phân lợn do người dân tự ủ có tính chất như sau (pH 7,5; OM: 28,4%; N: 0,78%; P_2O_5 : 0,34%; K_2O : 0,54%).

- Vôi bột phổ biến trên thị trường tại xã Quảng Thọ, huyện Quảng Điền, tỉnh Thừa Thiên Huế: vôi nghiền từ vỏ ốc, vỏ sò hến. Đây là dạng vôi bón đang được sử dụng phổ biến tại địa phương (50% CaO).

2.1.4. Than sinh học giàu Si từ vỏ trấu và vỏ lạc

Than sinh học giàu Si từ vỏ trấu và vỏ lạc được tự sản xuất và phân tích tính chất hóa học thể hiện qua Bảng 2.1.

Bảng 2.1. Đặc điểm của than sinh học giàu Si từ vỏ trấu và vỏ lạc

Loại TSH	pH	C (%)	N (%)	P ₂ O ₅ (%)	K ₂ O (%)
Vỏ trấu	7,56	46,3	0,42	0,22	1,79
Vỏ lạc	7,89	43,1	0,51	0,31	2,24
Loại TSH	Cd (mg/kg)	Pb (mg/kg)	Cu (mg/kg)	Zn (mg/kg)	Si (%)
Vỏ trấu	0,02	2,56	9,28	5,23	27,22
Vỏ lạc	0,03	4,72	10,41	7,21	12,66

Nguồn: Phân tích tại Trường Đại học Nông Lâm, Đại học Huế, 2023.

2.1.5. Các kim loại nặng

Nghiên cứu các KLN độc Cd, Cu, Pb, Zn trên đất trồng lúa, do 4 KLN này là phổ biến, có tính độc và vai trò sinh lý đặc trưng, phản ứng mạnh trong điều kiện ngập nước, ảnh hưởng đến an toàn lương thực và môi trường, đồng thời phù hợp với tiêu chuẩn giám sát quốc tế (Ha Thu Trinh et al., 2021) [124].

2.2. NỘI DUNG NGHIÊN CỨU

- Khảo sát hiện trạng sử dụng phụ phẩm cây trồng và than sinh học tại vùng trồng lúa ở tỉnh Thừa Thiên Huế.

- Nghiên cứu hàm lượng một số nguyên tố kim loại nặng trong đất trồng lúa tại tỉnh Thừa Thiên Huế.

- Nghiên cứu ảnh hưởng của dạng và liều lượng than sinh học giàu Si từ vỏ trấu và vỏ lạc đến sinh trưởng, phát triển, năng suất lúa, hiệu quả kinh tế và hàm lượng kim loại nặng trên đất phù sa tại tỉnh Thừa Thiên Huế trong phòng, nhà lưới và trên đồng ruộng.

- Xây dựng mô hình sử dụng than sinh học giàu Si từ vỏ trấu và vỏ lạc trong sản xuất lúa và giảm hàm lượng kim loại nặng trên đất phù sa tại tỉnh Thừa Thiên Huế.

2.3. PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

2.3.1. Khảo sát hiện trạng sử dụng phụ phẩm cây trồng và than sinh học tại vùng trồng lúa ở tỉnh Thừa Thiên Huế

2.3.1.1. Địa điểm nghiên cứu

Chọn xã Quảng Thọ và Quảng Phú, huyện Quảng Điền nơi có diện tích đất phù sa chuyên canh lúa lớn tại tỉnh Thừa Thiên Huế làm điểm nghiên cứu.

2.3.1.2. Điều tra thu thập số liệu

- Thu thập số liệu thứ cấp: Điều tra, thu thập tài liệu, số liệu từ các cơ quan quản lý Nhà nước về điều kiện tự nhiên, kinh tế - xã hội, tình hình sản xuất nông nghiệp, tình hình sử dụng phụ phẩm cây trồng trong sản xuất nông nghiệp từ các báo cáo, niên giám thống kê.

- Thu thập số liệu sơ cấp: Tiến hành điều tra thu thập số liệu sơ cấp thông qua bộ câu hỏi điều tra theo phương pháp điều tra nhanh nông thôn có sự tham gia của người dân (PRA) về các thông tin liên quan đến tình hình sử dụng phụ phẩm cây trồng, than sinh học trong sản xuất nông nghiệp, tình hình sản xuất lúa (diện tích, năng suất, đầu tư phân bón, thuốc bảo vệ thực vật, ...). Lựa chọn ngẫu nhiên 30 hộ/xã có diện tích trồng lúa > 500 m² trong danh sách hộ trồng lúa tại xã Quảng Thọ và Quảng Phú để điều tra. Tổng số hộ điều tra là 60 hộ.

2.3.1.3. Phương pháp xử lý số liệu

Xử lý số liệu điều tra bao gồm giá trị trung bình và SD bằng phần mềm Excel 2016.

2.3.2. Nghiên cứu hàm lượng một số nguyên tố kim loại nặng trong đất trồng lúa tại tỉnh Thừa Thiên Huế

2.3.2.1. Điểm nghiên cứu

Trên cơ sở điều tra nông hộ, chọn ra 20 hộ chuyên sản xuất lúa tại xã Quảng Thọ và Quảng Phú, huyện Quảng Điền, tỉnh Thừa Thiên Huế để thu thập các mẫu đất đại diện cho đất trồng lúa tại địa phương. Tổng số 20 mẫu đất được thu thập, mỗi xã 10 mẫu để đánh giá một số tính chất hóa học cơ bản trong đất. Ngoài ra, tiến hành thu thập thêm 10 mẫu đất trồng lúa cạnh nguồn thải của Khu công nghiệp tại phường Thủy Phương, thị xã Hương Thủy, tỉnh Thừa Thiên Huế để làm mẫu đối chứng dương so sánh về hàm lượng KLN. Tất cả 30 mẫu đất được lấy trước khi gieo lúa vào tháng 01, năm 2023, trong đó có 10 mẫu đất tại xã Quảng Thọ, huyện Quảng Điền và 10 mẫu đất tại phường Thủy Phương, thị xã Hương Thủy, tỉnh Thừa Thiên Huế được đánh giá về chỉ tiêu KLN bao gồm Cd, Pb, Cu, Zn).

2.3.2.2. Thu thập mẫu đất

Mẫu đất hỗn hợp được lấy đại diện trên 5 điểm theo đường chéo góc tại các ruộng được lựa chọn cho nghiên cứu trước và sau khi thực hiện thí nghiệm ở tầng 0 - 20 cm đựng vào túi nilon và mang về phòng thí nghiệm để xử lý, tiến hành trộn đều và phơi khô trong không khí và tiến hành rây qua rây 2 mm theo TCVN 7538 - 2: 2007/BTNMT [51] về hướng dẫn kỹ thuật lấy mẫu đất trồng trọt.

2.3.2.3. Phân tích một số tính chất hoá học và hàm lượng kim loại nặng trong đất

Mẫu đất phơi khô trong không khí, nhặt sạch rễ cây, nghiền nhỏ và qua rây 2 mm. Các chỉ tiêu phân tích bao gồm pH_{KCl} , OM, N tổng số, P_2O_5 tổng số, P_2O_5 dễ tiêu, K_2O tổng số, CEC, KLN tổng số, dễ tiêu bao gồm Cu, Pb, Zn, Cd, SiO_2 tổng số, dễ tiêu.

Phương pháp phân tích đất dựa theo Sổ tay Phân tích đất, nước và phân bón của Viện Thổ nhưỡng Nông hóa (1989) [46] bao gồm các chỉ tiêu như sau:

Bảng 2.2. Chỉ tiêu và phương pháp phân tích một số tính chất hóa học đất

TT	Chỉ tiêu	Phương pháp	Tài liệu dẫn
1	pH_{KCl}	Tỷ lệ chiết (1 đất: 5 KCl 1N) và đo trên máy đo pH met	TCVN 5979:2007 [52]
2	OC	Sử dụng dung dịch $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7 + \text{H}_2\text{SO}_4$ (1:1) oxi hoá hợp chất hữu cơ, sau đó chuẩn độ lượng dư bicromat bằng dung dịch Fe^{2+} theo phương pháp Wakley Black	TCVN 4050:1985 [62]
3	N tổng số	Chuyển toàn bộ hợp chất hữu cơ chứa N thành muối NH_4^+ bằng cách công phá với H_2SO_4 đậm đặc với chất xúc tác hoặc chất oxi hoá mạnh tạo thành $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ theo phương pháp Kjeldahl	TCVN 6498:1999 [64]
4	P_2O_5 tổng số	Sử dụng axit pecloric cùng axit nitric hòa tan các hợp chất P trong đất. Xác định hàm lượng P trong dung dịch bằng phương pháp trắc quang “màu xanh molybden” và đo trên quản phổ hấp phụ.	TCVN 8940:2011 [61]
5	K_2O tổng số	Dùng hỗn hợp axit flohydric và axit pecloric để phá mẫu, chuyển các dạng kali trong đất về dạng hòa tan trong dung dịch. Xác định hàm lượng kali trong dung dịch bằng phương pháp quang kế ngọn lửa	TCVN 8660:2011 [59]
6	CEC	Phương pháp amoni axetat: Sử dụng NH_4OAc ($\text{pH}=7$), định lượng NH_4^+ theo phương pháp Kjeldahl	TCVN 8568: 2010 [56]

TT	Chỉ tiêu	Phương pháp	Tài liệu dẫn
7	SiO ₂ tổng số	Xác định bằng phương pháp khối lượng từ phương pháp công phá mẫu bằng HNO ₃ và HClO ₄ tách SiO ₂ bằng HClO ₄	TCVN 7131: 2016 [57]
8	SiO ₂ dễ tiêu	Chiết bằng hỗn hợp dung dịch natri cacbonat và amoni nitrat. Dung dịch chiết được tạo màu xanh dị hợp bằng amoni molipdat trong môi trường khử và phân tích bằng thiết bị đo phổ hấp thụ phân tử (UV - VIS) ở bước sóng 660 nm.	TCVN 11407- 2019 [58]
9	Cd, Pb Cu, Zn tổng số	Phương pháp này dựa trên phép đo phổ hấp thụ nguyên tử của nồng độ nguyên tố trong dịch chiết mẫu bằng cường độ thủy được chuẩn bị theo TCVN 6649 (ISO 11466) theo phương pháp quang phổ hấp thụ nguyên tử	TCVN 6496: 2009 [63]
10	Cd, Pb Cu, Zn dễ tiêu	Phân hủy và chuyển hóa KLN trong mẫu đất bằng hỗn hợp axit nitric và axit clohydric đậm đặc, xác định hàm lượng KLN trong dung dịch bằng phép đo phổ hấp thụ nguyên tử.	TCVN 6496: 2009 [63]

Chỉ số tải lượng ô nhiễm (PLI) và hệ số ô nhiễm (CF): được tính tại hai địa điểm nghiên cứu ở xã Quảng Thọ, huyện Quảng Điền và phường Thủy Phương, thị xã Hương Thủy, tỉnh Thừa Thiên Huế.

- Chỉ số tải lượng ô nhiễm (PLI): PLI tại một địa điểm là căn bậc n của n số giá trị hệ số ô nhiễm (CF) nhân với nhau, $PLI = (CF_1 \times CF_2 \times CF_3 \times \dots \times CF_n)^{1/n}$, trong đó n bằng số lượng hệ số ô nhiễm và địa điểm tương ứng. Khi $PLI > 1$, chỉ ra đất bị ô nhiễm, trong khi nhỏ hơn 1 cho thấy đất không ô nhiễm (Haynes và Zhou, 2022) [132].

- Hệ số ô nhiễm (CF) = Nồng độ kim loại/Nồng độ nền của cùng một kim loại. CF cho biết hệ số ô nhiễm và n là số lượng các nguyên tố được xác định trong nghiên cứu (Khan et al., 2022) [148].

- Hiệu quả hấp thụ KLN so với đối chứng theo công thức:

$$H (\%) = (C_0 - C_x) * 100\%/C_0$$

Trong đó:

H: Hiệu quả tăng hấp thụ so với đối chứng

C_0 : Hàm lượng kim loại hấp thu trong đất (công thức đối chứng)

C_x : Hàm lượng kim loại hấp thu trong đất khi bổ sung thêm các tỷ lệ vật liệu khác nhau.

2.3.2.4. Phương pháp xử lý số liệu

Xử lý số liệu bao gồm trung bình, phân tích ANOVA 1 nhân tố, Tukey HSD_{0,05}, SD bằng phần mềm Statistix 10.0. Vẽ đồ thị theo phần mềm Excel.

2.3.3. Nghiên cứu ảnh hưởng của dạng và liều lượng than sinh học giàu Si từ vỏ trấu và vỏ lạc đến sinh trưởng, phát triển, năng suất lúa, hiệu quả kinh tế và hàm lượng kim loại nặng trên đất phù sa tại tỉnh Thừa Thiên Huế trong phòng, nhà lưới và trên đồng ruộng

2.3.3.1. Sản xuất than sinh học giàu silic

* Nguyên liệu: Vỏ trấu và vỏ lạc là nguyên liệu phổ biến và được chọn làm vật liệu giàu Si để tạo ra TSH giàu Si.

Một lò nung bằng thép kín với thiết kế đặc biệt sẽ được chuẩn bị để sản xuất TSH, trong lò có một vài lỗ thông hơi một chiều, hạn chế không khí lọt vào buồng nhiệt phân. Một nhiệt kế được đưa vào ngay giữa lò nung để kiểm tra nhiệt độ trong quá trình sản xuất TSH. Trên đỉnh lò có các lỗ nhỏ để tạo điều kiện thoát khí tổng hợp được trong khi sản xuất (H_2 và CO). Quá trình nhiệt phân sẽ được thực hiện bằng nguồn điện đảm bảo độ nóng đồng đều và nhiệt độ sản xuất mong muốn. Kết quả nghiên cứu cho thấy, nhiệt phân ở nhiệt độ 450°C - 500°C cho TSH có hàm lượng Si cao nhất, nên vỏ trấu hoặc vỏ lạc được đưa vào lò đốt ở nhiệt độ này trong thời gian 60 phút (nhiệt phân chậm). Thực hiện quá trình nhiệt phân theo nguyên tắc đốt yếm khí trực tiếp, tự ngùn có hỗ trợ của quạt gió cung cấp một lượng không khí vừa đủ. Thu TSH sau 60 phút và để nguội.

* Lấy mẫu và phân tích đánh giá chất lượng TSH:

Sau khi hoàn thành quá trình nhiệt phân và làm nguội, TSH được cân, nghiền và đưa qua rây 2 mm để bảo quản và phân tích thêm. Khối lượng TSH được tính bằng tỷ lệ khối lượng của sản phẩm nhiệt phân so với nguyên liệu ban đầu.

Phân tích các chỉ tiêu bao gồm: pH (TCVN 5979: 2007) [51], carbon được đánh giá bằng nung ở 550°C và cân khối lượng theo Richard (1992) [209], Si tổng số (TCVN 11407: 2019) [58], hàm lượng KLN tổng số: Pb (TCVN 7766: 2007) [53], Cd (TCVN 7768: 2007) [54], Cu (TCVN 6541: 1999) [65], Zn (TCVN 5487: 1991) [55]. Các phân tích được thực hiện tại Khoa Nông học, trường Đại học Nông Lâm, Đại học Huế. Tổng số mẫu phân tích là 3.

2.3.3.2. Thí nghiệm 1: (Trong phòng) Nghiên cứu khả năng hấp thu kim loại nặng của than sinh học giàu Si từ phụ phẩm cây trồng

a. Mục tiêu

Xác định được dạng và liều lượng TSH giàu Si từ vỏ trấu và vỏ lạc có khả năng hấp thu KLN trong đất trồng lúa có hiệu quả nhất.

b. Thời gian và địa điểm thực hiện

Thí nghiệm tiến hành trong tháng 2/2023 tại Phòng thí nghiệm của Bộ môn Khoa học Cây trồng, Khoa Nông học, trường Đại học Nông Lâm, Đại học Huế.

c. Công thức và bố trí thí nghiệm

Dựa theo nghiên cứu của Đinh Thị Lan Phương và cs. (2022) [34]; Đinh Đại Gái và cs. (2022) [9] về bổ sung hàm lượng TSH để hấp thu KLN trong đất với liều lượng dao động từ 0 - 6%, do đó thí nghiệm này được thiết kế gồm 12 công thức với hai dạng TSH (TSH giàu Si từ vỏ trấu, TSH giàu Si từ vỏ lạc) và 6 lượng TSH giàu Si từ vỏ trấu và vỏ lạc (0, 1, 2, 3, 4, 5%). Dựa vào kết quả từ nội dung 2, lựa chọn Cd và Pb là đối tượng KLN nghiên cứu cho các thí nghiệm tiếp theo, do kết quả phân tích Cd và Pb trong đất có hàm lượng cao hơn so với Zn và Cu.

Bảng 2.3. Công thức thí nghiệm

STT	Ký hiệu công thức	Dạng TSH	Liều lượng (%) so với khối lượng đất trong chậu
1	CT1 (ĐC)	TSH giàu Si từ vỏ trấu	0
2	CT2		1
3	CT3		2
4	CT4		3
5	CT5		4
6	CT6		5
7	CT7	TSH giàu Si từ vỏ lạc	0
8	CT8		1
9	CT9		2
10	CT10		3
11	CT11		4
12	CT12		5

Thí nghiệm bố trí theo kiểu hoàn toàn ngẫu nhiên (CRD), 3 lần nhắc lại.

d. Quy trình thí nghiệm

Đất phù sa trồng lúa (tầng 0 - 20 cm) tại xã Quảng Thọ, huyện Quảng Điền và phường Thủy Phương, thị xã Hương Thủy, tỉnh Thừa Thiên Huế thu thập về được phơi khô trong không khí (độ ẩm <50%), giã nhỏ, loại bỏ rễ cây và các tồn dư khác, trộn đều đồng nhất trước khi bố trí thí nghiệm. Cân đều đất vào các bát thí nghiệm có đường kính 12 cm với khối lượng là 200g đất (Hình 2.1). Trộn đất (Đ) tự nhiên không bổ sung KLN Cd và Pb với vật liệu TSH giàu Si theo tỷ lệ như sau: 0% (0g) , 1% (2g), 2% (4g), 3% (6g), 4% (8g), 5% (10g). Thêm 150ml nước cất vào các bát thí nghiệm cho đến bão hòa để thấm đều TSH và đất, để dung dịch 2 - 3 ngày đảm bảo TSH có khả năng hấp thu KLN rồi đem đi phơi khô, sau đó tiến hành phân tích hàm lượng KLN (Đinh Thị Lan Phương và cs. (2022) [34]; Đinh Đại Gái và cs. (2022) [9]).



Hình 2.1. Hình ảnh vật liệu và bổ sung TSH vào thí nghiệm trong phòng

e. Chỉ tiêu và phương pháp theo dõi

- Phân tích hàm lượng 2 nguyên tố KLN (Cd và Pb tổng số và dễ tiêu) trước và sau khi bón TSH giàu Si. Số lượng mẫu đất lấy ở các công thức nhập chung cho 3 lần nhắc lại thành một mẫu hỗn hợp cho từng công thức, tổng số mẫu đất sau thí nghiệm là 12.

- Xác định hiệu quả tăng hấp thu KLN (Cd và Pb) so với đối chứng.

Phương pháp theo dõi và phân tích các chỉ tiêu theo trình bày bảng 2.2 và ở nội dung 2.

2.3.3.3. Thí nghiệm 2 (trong nhà lưới): Nghiên cứu ảnh hưởng của than sinh học giàu Si từ phụ phẩm cây trồng đến sinh trưởng, phát triển của cây lúa và hàm lượng kim loại nặng trên đất trồng lúa

a. Thí nghiệm 2.1. Nghiên cứu khả năng cung cấp Si từ TSH cho cây lúa

** Mục tiêu:*

Xác định được tiềm năng cung cấp Si từ TSH giàu Si từ vỏ trấu và vỏ lạc, làm cơ sở đề xuất dạng và lượng TSH giàu Si cho cây lúa.

** Thời gian và địa điểm thực hiện:*

Thí nghiệm thực hiện trong vụ xuân (tháng 02 - 4) và xuân hè (tháng 4 - 6), năm 2023 tại nhà lưới Khoa Nông học, Trường Đại học Nông Lâm, Đại học Huế.

** Công thức và bố trí thí nghiệm:*

Các công thức thí nghiệm được đề xuất dựa trên hướng dẫn về lượng phân bón cho cây lúa theo quy chuẩn kỹ thuật quốc gia về khảo nghiệm giá trị canh tác và sử dụng của giống lúa (QCVN 01-55: 2011/BNNT) [41], theo hướng dẫn của Sở Nông nghiệp và Phát triển nông thôn tỉnh Thừa Thiên Huế (lượng phân hữu cơ khuyến cáo cho cây lúa từ 5 - 10 tấn/ha), lượng TSH khuyến cáo từ 5 - 10 tấn/ha (Nguyễn Thị Kim Phụng và cs., 2022) [37] và điều tra thực tế về liều lượng Si và TSH sử dụng cho lúa của nông dân tại điểm nghiên cứu, do vậy lượng TSH bón tối đa trong thí nghiệm này chỉ bằng 0 - 30% lượng TSH sử dụng ở thí nghiệm trong phòng (0 - 5%). Thí nghiệm gồm có 11 công thức như ở Bảng 2.4.

Bảng 2.4. Công thức thí nghiệm 2.1 trong nhà lưới

STT	Ký hiệu công thức	Phân Si và TSH	Lượng bón/kg đất	Lượng bón/ha
1	CT1 (ĐC)	SiO ₂	0mg	0kg
2	CT2		30mg	30kg
3	CT3		60mg	60kg
4	CT4		90mg	90kg
5	CT5		120mg	120kg
6	CT6	TSH giàu Si từ vỏ trấu	5g	5 tấn
7	CT7		10g	10 tấn
8	CT8		15g	15 tấn
9	CT9	TSH giàu Si từ vỏ lạc	5g	5 tấn
10	CT10		10g	10 tấn
11	CT11		15g	15 tấn

Tất cả 11 công thức bón trên nền: 100 mg N + 60 mg P₂O₅ + 70 g K₂O + 500 g vôi/kg đất (tương đương 100 kg N + 60 kg P₂O₅ + 70 kg K₂O + 500 kg vôi/ha). Lượng bón được tính dựa trên lượng bón cho cây lúa trên 1 ha và quy về diện tích mỗi chậu là 0,04 m².

Thí nghiệm gồm có 4 lần nhắc lại, 1 công thức là 1 chậu, thiết kế theo kiểu khối hoàn toàn ngẫu nhiên (RCBD), tổng số chậu là 44 chậu cho mỗi thí nghiệm.

** Quy trình thí nghiệm trong nhà lưới:*

- Đất phù sa trồng lúa (tầng 0 - 20 cm) tại xã Quảng Thọ, huyện Quảng Điền, tỉnh Thừa Thiên Huế thu thập về theo TCVN 7538 - 2: 2007/BTNMT [51] được phơi khô trong không khí, giã nhỏ, loại bỏ rễ cây và các tồn dư khác, trộn đều đồng nhất trước khi bố trí thí nghiệm.

- Mỗi chậu gồm 4 kg đất được trộn đều và bổ sung 100% TSH và phân HC được bón vào đất một tuần trước khi cấy lúa với lượng tương ứng như trên. Sử dụng các chậu hình trụ có diện tích $0,04 \text{ m}^2$, dung trọng của đất khoảng $1,3 \text{ kg đất/dm}^3$. 400 ml nước được thêm vào mỗi chậu thành nhiều lần liên tiếp để đạt được hàm lượng nước ở độ ẩm bão hòa đồng ruộng. Các chậu được làm ẩm và bảo quản trong một tuần trước khi cấy để tránh ngộ độc có thể xảy ra do quá trình khoáng hóa hợp chất hữu cơ xảy ra sau khi làm ướt đất khô. Cấy 6 cây lúa (13 - 15 ngày tuổi, cao khoảng 10 cm) vào mỗi chậu; mực nước được điều chỉnh đến 3 cm trên bề mặt đất. Sau 7 ngày, 2 cây được cắt bỏ để giữ lại 4 cây khỏe mạnh, đồng nhất trong mỗi chậu. Thời gian thí nghiệm là 70 ngày/vụ, do thí nghiệm chỉ xác định một số chỉ tiêu liên quan đến sinh khối cây lúa và tính chất đất và để có thể thực hiện được liên tiếp 2 vụ trong vụ đông xuân 2023.

- Giống lúa HT1 được gieo trong vườn ươm để lấy cây con cấy trong chậu. Thời gian thí nghiệm 70 ngày. Ngoài ra lượng phân được bón như sau: Đạm urê (46% N), lân supe (16% P_2O_5), kali clorua (60% K_2O), vôi và phân bón Si silicamon (20% SiO_2) Hùng Ngọc được bón với lượng tương ứng như ở trên. Chia làm 2 lần bón:

+ Lần 1: Bón lót trước khi cấy: 100% lân, silic và vôi, 50% đạm, 50% kali.

+ Lần 2: Bón thúc sau cấy 5 - 7 ngày khi lúa bén rễ hồi xanh, bón lượng phân còn lại.

- Các biện pháp kỹ thuật khác áp dụng theo quy trình kỹ thuật cho cây lúa (QCVN 01-55:2011/BNNT) [41]. Thí nghiệm được tiến hành trong nhà lưới của Khoa Nông học, Trường Đại học Nông Lâm, Đại học Huế.

** Các chỉ tiêu và phương pháp theo dõi:*

- Sinh khối khô, tươi: Mỗi ô thí nghiệm thu 5 cây cả rễ (không lấy vào vị trí đo năng suất và cây theo dõi) vào 4 giai đoạn bắt đầu đẻ nhánh, kết thúc đẻ nhánh, làm đồng và thu hoạch để xác định sinh khối tươi (mẫu cây thu về rửa sạch, để ráo nước và

tiến hành cân tươi mẫu) và sinh khối khô (sấy ở 105°C trong vòng 6 giờ cho đến khi khối lượng không đổi và đem cân) tại phòng thí nghiệm.

- Hàm lượng Si tổng số trong cây (TCVN 11407: 2019) [58].

- Hàm lượng Si hấp thu trong cây (g/cây) = Hàm lượng Si trong cây (mg/g) x Khối lượng thân lá cây lúa (g/cây) x 10 (Klotzbücher và cs., 2016) [152].

- Diện tích lá (máy đo diện tích lá cầm tay CIC-202, Mỹ), chỉ số diện tích lá (LAI) = diện tích lá (m²)/diện tích mặt đất (m²).

- Hàm lượng Si tổng số, dễ tiêu, pH_{KCl}, OM, CEC trong đất theo phương pháp trình bày bảng 2.2 (nội dung 2). Số lượng mẫu đất lấy ở các công thức nhập chung cho 3 lần nhắc lại thành một mẫu hỗn hợp cho từng công thức, tổng số mẫu đất sau thí nghiệm là 11.

b. Thí nghiệm 2.2. Nghiên cứu ảnh hưởng của dạng và liều lượng TSH giàu Si từ vỏ trấu và vỏ lạc đến sinh trưởng và phát triển của lúa và hàm lượng kim loại nặng trên đất trồng lúa.

** Mục tiêu:*

Xác định được dạng và liều lượng TSH giàu Si từ vỏ trấu và vỏ lạc phù hợp với sinh trưởng và phát triển của lúa và giảm hàm lượng KLN trên đất trồng lúa trong nhà lưới, làm cơ sở lựa chọn công thức bón phù hợp cho thí nghiệm đồng ruộng.

** Thời gian và địa điểm thực hiện:*

Thí nghiệm thực hiện trong vụ xuân (tháng 02 - 4) và xuân hè (tháng 4 - 6), năm 2023 tại nhà lưới Khoa Nông học, Trường Đại học Nông Lâm, Đại học Huế.

** Công thức và bố trí thí nghiệm:*

Các công thức thí nghiệm được đề xuất dựa trên cơ sở tương tự như ở thí nghiệm 2.1. Thí nghiệm gồm có 12 công thức như ở Bảng 2.5.

Bảng 2.5. Công thức thí nghiệm 2.2 trong nhà lưới

STT	Ký hiệu công thức	Dạng TSH	Liều lượng (g/kg đất)
1	CT1 (ĐC)	TSH giàu Si từ vỏ trấu	0
2	CT2		2,5
3	CT3		5,0
4	CT4		7,5
5	CT5		10
6	CT6		15
7	CT7 (ĐC)	TSH giàu Si từ vỏ lạc	0
8	CT8		2,5
9	CT9		5,0
10	CT10		7,5
11	CT11		10
12	CT12		15

Tất cả 12 công thức bón trên nền: 100 mg N + 60 mg P_2O_5 + 70 mg K_2O + 500 mg vôi/kg đất (tương đương 100 kg N + 60 kg P_2O_5 + 70 kg K_2O + 500 kg vôi/ha). Lượng bón được tính dựa trên lượng bón cho cây lúa trên 1 ha và quy về diện tích mỗi chậu là 0,04 m².

Thí nghiệm bố trí theo kiểu khối hoàn toàn ngẫu nhiên (RCBD), 4 lần nhắc lại. Tổng số chậu thí nghiệm là 48 chậu.

* Quy trình thí nghiệm trong nhà lưới: Tương tự thí nghiệm 2.1. Các biện pháp kỹ thuật áp dụng theo quy trình kỹ thuật cho cây lúa (QCVN 01-55: 2011/BNNPTNT) [41].

* Các chỉ tiêu và phương pháp theo dõi tại giai đoạn thu hoạch: Tương tự phương pháp đã trình bày tại thí nghiệm 2.1 trong nhà lưới và bảng 2.2 (nội dung 2).

- Sinh khối tươi và khô của thân lá và rễ lúa.

- Diện tích lá, chỉ số diện tích lá.

- Phân tích hàm lượng Si tổng số, hàm lượng Cd và Pb tổng số trong cây và sự hấp thu Si, Cd và Pb trong cây. Số lượng mẫu cây lấy ở các công thức nhập chung cho 3 lần nhắc lại thành một mẫu hỗn hợp cho từng công thức, tổng số mẫu cây sau thí nghiệm là 12 mẫu.

Bảng 2.6. Phương pháp phân tích một số chỉ tiêu trong cây

TT	Chỉ tiêu	Phương pháp	Tài liệu dẫn
1	SiO ₂ tổng số	Đốt mẫu tro hóa, nung mẫu trong lò nung ở nhiệt độ từ 500 ⁰ C đến 550 ⁰ C trong khoảng 2- 4 giờ để phân hủy hoàn toàn chất hữu cơ, hòa tan tro trong dung dịch axit clohydric (HCl) hoặc axit nitric (HNO ₃) để hòa tan các thành phần vô cơ, bao gồm cả silic, phân tích trên quang phổ hấp thụ nguyên tử	Lê Văn Khoa và cs., 2001 [22]
2	Pb tổng số	Phân hủy các chất hữu cơ trong môi trường axit nitric ở điều kiện nhiệt độ và áp suất cao. Xác định Pb bằng quang phổ hấp thụ nguyên tử không ngọn lửa sau khi bổ sung axit orthophosphoric	TCVN 7766:2007 [53]
3	Cd tổng số	Phương pháp này dựa trên việc phá hủy các chất hữu cơ được bằng HNO ₃ , H ₂ SO ₄ và H ₂ O ₂ , chiết cadimi bằng dithizon-CHCl ₃ ở pH 9, và xác định cadimi bằng quang phổ hấp thụ nguyên tử ngọn lửa	TCVN 7768-2:2007 [54]

- Hiệu quả hấp thụ Cd và Pb (theo công thức tính nội dung 2).

- Phân tích hàm lượng Si tổng số, dễ tiêu, pH_{KCl}, OM, CEC và hàm lượng tổng số, dễ tiêu của Cd và Pb trong đất. Số lượng mẫu đất lấy ở các công thức nhập chung cho 3 lần nhắc lại thành một mẫu hỗn hợp cho từng công thức, tổng số mẫu đất sau thí nghiệm là 12. Phương pháp phân tích như ở bảng 2.2 (nội dung 2).

2.3.3.4. Thí nghiệm 3 (trên đồng ruộng): Nghiên cứu ảnh hưởng của dạng và lượng than sinh học giàu Si từ phụ phẩm cây trồng đến cây lúa và hàm lượng kim loại nặng trên đất trồng lúa

a. Mục tiêu

Xác định được dạng và liều lượng TSH giàu Si từ vỏ trấu và vỏ lạc phù hợp với cây lúa và giảm hàm lượng KLN trên đất trồng lúa trên đồng ruộng, làm cơ sở lựa chọn công thức bón phù hợp cho mô hình sản xuất lúa.

b. Thời gian và địa điểm thực hiện

Thí nghiệm thực hiện trong vụ hè thu 2023 (tháng 6 - 8) và đông xuân 2024 (tháng 01 - 5) tại xã Quảng Thọ, huyện Quảng Điền, tỉnh Thừa Thiên Huế.

c. Công thức và bố trí thí nghiệm

Từ kết quả thí nghiệm 2.1 và 2.2, tiến hành lựa chọn 2 lượng TSH giàu Si từ vỏ trấu và vỏ lạc là 10 - 15 tấn/ha và so sánh với các công thức không bón phân hữu cơ, TSH và công thức theo hướng dẫn của cơ quan nông nghiệp địa phương. Thí nghiệm gồm có 6 công thức như ở Bảng 2.7.

Bảng 2.7. Công thức thí nghiệm trên đồng ruộng

Ký hiệu công thức	Vật liệu hữu cơ	Lượng bón (tấn/ha)	N (kg/ha)	P ₂ O ₅ (kg/ha)	K ₂ O (kg/ha)	Vôi (kg/ha)
CT1 (ĐC 1)	0	0	100	60	70	500
CT2 (ĐC 2)	Phân chuồng	5	100	60	70	500
CT3	TSH giàu Si từ vỏ trấu	10	0	0	0	500
CT4		15	0	0	0	500
CT5	TSH giàu Si từ vỏ lạc	10	0	0	0	500
CT6		15	0	0	0	500

Bố trí thí nghiệm theo kiểu khối hoàn toàn ngẫu nhiên (RCBD), 3 lần nhắc lại. Mỗi ô có diện tích 10 m² được be bờ và lót nylon ở độ sâu 50 cm để hạn chế rửa trôi dinh dưỡng. Tổng diện tích thí nghiệm là 300 m², bao gồm cả bảo vệ.

d. Quy trình kỹ thuật thí nghiệm trên đồng ruộng

- Làm đất: đất được cày bừa kỹ, nhuyễn bùn, sạch cỏ dại, san bằng phẳng sau đó chia ô và be bờ.

- Lượng giống gieo sạ: Lượng giống gieo tại các thí nghiệm và mô hình là 100 kg/ha.

- Bón phân: 100% TSH giàu Si từ vỏ trấu và vỏ lạc được bón đều trên bề mặt đất và sau đó được trộn vào đất đến độ sâu khoảng 10 cm trước khi gieo hạt. Bón lót 100% lân, phân chuồng, 30% N và 50% K, bón thúc 45% N vào giai đoạn đẻ nhánh và 25% N vào giai đoạn làm đồng.

- Chăm sóc và phòng trừ sâu bệnh: Tuân thủ theo quy chuẩn kỹ thuật quốc gia về khảo nghiệm giá trị canh tác và sử dụng của giống lúa (QCVN 01-55: 2011/BNNPTNT) [41]. Đối với sâu bệnh hại được điều tra theo quy chuẩn Quốc gia (QCVN 01-38: 2010/BNNPTNT) [39] và Quy chuẩn quốc gia về phương pháp điều tra phát hiện dịch hại lúa (QCVN 01 - 166: 2014/BNNPTNT) [40].

+ Làm cỏ và tia dặm: Tiến hành tia dặm khi lúa có 4 đến 5 lá, đồng thời kết hợp làm cỏ đợt một. Trước bón thúc lần hai tiến hành làm cỏ sục bùn, cỏ bờ cho ruộng thông thoáng

+ Điều tiết nước: Khi lúa giai đoạn cây con giữ mực nước khoảng 3 - 6 cm, thời kì lúa đẻ nhánh cần mực nước thấp hơn, thời kì làm đòng và trổ bông giữ mực nước 5 - 7 cm. khi lúa bước vào thời kì chín thì rút dần nước đến khi thu hoạch phải tháo cạn nước. Riêng thí nghiệm 2 và 3 điều tiết nước theo các công thức thí nghiệm.

+ Phòng trừ sâu bệnh: Phòng trừ theo nguyên tắc phòng là chính, trừ khi cần thiết.

+ Biện pháp phòng: Xử lý hạt giống, làm sạch cỏ dại, dọn sạch mầm mống cỏ dại trên đồng ruộng.

+ Biện pháp trừ: Khi sâu bệnh xuất hiện với mật độ dày trên đồng ruộng có khả năng ảnh hưởng đến sinh trưởng và phát triển, năng suất thì bắt buộc phải dùng biện pháp trừ bằng thuốc.

e. Chỉ tiêu và phương pháp theo dõi

** Chỉ tiêu về cây:*

Các chỉ tiêu và phương pháp theo dõi tuân theo quy chuẩn kỹ thuật quốc gia về khảo nghiệm giá trị canh tác và sử dụng của giống lúa (QCVN 01-55: 2011/BNNPTNT) [41].

- Tổng thời gian sinh trưởng, phát triển: Thời gian sinh trưởng của mỗi giống lúa tính từ lúc gieo mạ đến khi có 90% số hạt trên bông chín và quan sát trên từng ô thí nghiệm.

- Chiều cao cây cuối cùng: Đo từ mặt đất đến đỉnh bông cao nhất (không kể râu) vào giai đoạn thu hoạch. Số mẫu 10 cây/ô thí nghiệm.

- Số lá xanh còn lại sau khi thu hoạch: Đếm số lá xanh còn lại tại thời điểm thu hoạch.

- Sinh khối khô, tươi: Mỗi ô thí nghiệm thu 5 cây cả rễ (không lấy vào vị trí đo năng suất và cây theo dõi) vào 4 giai đoạn bắt đầu đẻ nhánh, kết thúc đẻ nhánh, trổ bông và thu hoạch để xác định sinh khối tươi (mẫu cây thu về rửa sạch, để ráo nước và tiến hành cân tươi mẫu) và sinh khối khô (sấy ở 105°C trong vòng 6 giờ cho đến khi khối lượng không đổi và đem cân) tại phòng thí nghiệm.

- Chỉ tiêu về nhánh:

+ Số nhánh tối đa (nhánh): Đếm tổng số nhánh hiện có ở trên cây.

+ Số nhánh hữu hiệu (nhánh): Đếm những nhánh thành bông cho năng suất (bông có trên 10 hạt chắc).

+ Tỷ lệ nhánh hữu hiệu (%) = (Số nhánh hữu hiệu/số nhánh tối đa) x 100.

- Diện tích lá (máy đo diện tích lá cầm tay CIC-202, Mỹ), chỉ số diện tích lá (LAI) = diện tích lá (m²)/diện tích mặt đất (m²).

Mỗi chỉ tiêu đều đánh giá số mẫu là 5 cây/ô thí nghiệm.

- Các chỉ tiêu về sâu bệnh hại chính:

Đánh giá bằng cảm quan và cho điểm tại thời điểm phát sinh gây hại của các đối tượng sâu bệnh hại chính trên cây lúa bao gồm: Bệnh khô vằn (*Rhizoctonia solani* Kuhn), bệnh đạo ôn (*Pyricularia oryzae*), sâu cuốn lá nhỏ (*Cnaphalocrosis medinalis*), sâu đục thân (*Chilo suppressalis*). Điều tra theo quy chuẩn Quốc gia (QCVN 01-38: 2010/BNNPTNT) [39] và Quy chuẩn quốc gia về phương pháp điều tra phát hiện dịch hại lúa (QCVN 01 - 166: 2014/BNNPTNT) [40].

- Các chỉ tiêu về năng suất:

+ Số bông/m²: Đếm số bông có ít nhất 10 hạt chắc của một cây. Số cây mẫu là 10 cây/ô.

+ Số hạt trên bông: Mỗi ô đếm tổng số hạt có trên bông của 10 bông rồi tính trung bình số hạt/bông.

+ Số hạt chắc/bông: Trên cơ sở đếm số hạt/bông, loại bỏ hạt lép rồi tính trung bình số hạt chắc/bông.

+ Khối lượng 1000 hạt: Cân 8 mẫu 100 hạt ở độ ẩm 14%, đơn vị tính gam, lấy một chữ số sau dấu phẩy.

+ Năng suất lý thuyết (tấn/ha) = (Số bông/m² x Số hạt chắc/bông x P₁₀₀₀ hạt)/10⁵

+ Năng suất thực thu (tấn/ha): Tại giai đoạn thu hoạch, cân khối lượng hạt trên mỗi ô ở độ ẩm hạt 14%, đơn vị tính kg/ô, lấy hai chữ số sau dấu phẩy.

- Hàm lượng Si tổng số trong cây (TCVN 11407: 2019) [58].

- Hàm lượng Si hấp thu trong cây (g/cây) = Hàm lượng Si trong cây (mg/g) x Khối lượng thân lá cây lúa (g/cây) x 10 (Klotzbücher và cs., 2016) [152].

- KLN tổng số và dễ tiêu: Pb (TCVN 7766: 2007) [53], Cd (TCVN 7768: 2007) [54]. Theo phương pháp quang phổ hấp phụ.

* Các chỉ tiêu về đất: Hàm lượng Si tổng số, dễ tiêu, pH_{KCl}, OM, CEC, KLN tổng số và dễ tiêu: Pb, Cd theo phương pháp phân tích ở bảng 2.2 (nội dung 2) đã được trình bày trong nội dung thí nghiệm 2.2.

* Các chỉ tiêu về hiệu quả kinh tế:

+ Lợi nhuận (đ/ha) = tổng thu - tổng chi

+ Tổng thu (đ/ha) = năng suất thực thu x giá bán sản phẩm (đ/kg).

- + Tổng chi (đ/ha) = giống + phân bón + thuốc bảo vệ thực vật + công lao động
- + Hiệu suất than sinh học (kg thóc/tấn than): Số kg thóc tăng lên khi bón 1 tấn than.
- + VCR (Lãi suất đầu tư than sinh học): Giá trị sản phẩm tăng thêm do bón than sinh học/Chi phí tăng thêm do bón than sinh học.

Hiệu quả kinh tế được xác định sau khi kết thúc vụ sản xuất, khi đã có số liệu thực tế về năng suất, sản lượng, giá bán và toàn bộ chi phí đầu vào. Việc tính toán được tiến hành theo từng vụ lúa (vụ đông xuân, hè thu).

Thời điểm xác định giá và chi phí nên lấy tại thời điểm thu hoạch, căn cứ vào giá thị trường thực tế tại địa phương (giá lúa bán tại ruộng hoặc tại điểm thu mua). Đối với các yếu tố đầu vào (giống, phân bón, thuốc, nhân công, nhiên liệu...), giá được ghi nhận tại thời điểm phát sinh chi phí trong cùng vụ sản xuất.

2.3.3.5. Phương pháp xử lý số liệu

Xử lý số liệu bao gồm trung bình, phân tích ANOVA 1 nhân tố, 2 nhân tố, Tukey HSD_{0,05}, SD bằng phần mềm Statistix 10.0. Vẽ đồ thị theo phần mềm Excel.

2.3.4. Xây dựng mô hình sử dụng than sinh học giàu Si từ vỏ trấu và vỏ lạc trong sản xuất lúa và giảm hàm lượng kim loại nặng trên đất phù sa tại tỉnh Thừa Thiên Huế

2.3.4.1. Mục tiêu

Xác định được biện pháp sử dụng than sinh học giàu Si từ vỏ trấu và vỏ lạc phù hợp trong sản xuất lúa và giảm hàm lượng kim loại nặng trên đất phù sa tại tỉnh Thừa Thiên Huế.

2.3.4.2. Thời gian và địa điểm thực hiện

Mô hình thực hiện trong vụ hè thu 2024 (tháng 5 - 8) tại xã Quảng Thọ, huyện Quảng Điền, tỉnh Thừa Thiên Huế.

2.3.4.3. Công thức và bố trí thí nghiệm

- Công thức mô hình và bố trí thí nghiệm:

CT1 (ĐC - theo lượng bón của nông dân): 100 kg/ha N + 60 kg/ha P₂O₅ + 70 kg/ha K₂O + 500 kg/ha vôi.

CT2 (Dựa trên kết quả công thức có kết quả đạt cao nhất về năng suất, hiệu quả kinh tế và giảm hàm lượng KLN từ các công thức của thí nghiệm 2.2 và 3): 15 tấn/ha TSH giàu Si từ vỏ trấu + 500 kg/ha vôi.

Mô hình được bố trí theo kiểu khối hoàn toàn ngẫu nhiên (RCBD) với 3 lần nhắc lại, diện tích mỗi mô hình là 1.000 m².

2.3.4.4. Quy trình kỹ thuật mô hình

Các biện pháp kỹ thuật áp dụng theo thí nghiệm đồng ruộng và theo quy trình kỹ thuật cho cây lúa (QCVN 01-55: 2011/BNNPTNT) [41] và theo trình bày tại nội dung 2.3.

2.3.4.5. Chỉ tiêu và phương pháp theo dõi

- Năng suất và yếu tố cấu thành năng suất: Số bông/m², số hạt chắc/bông, khối lượng 1000 hạt, NSLT, NSTT.

- Hiệu quả kinh tế: Lợi nhuận, VCR.

- Tính chất đất: Hàm lượng Si tổng số, dễ tiêu, pH_{KCl}, OM, CEC, KLN tổng số và dễ tiêu: Pb, Cd theo phương pháp phân tích đất dựa theo Sổ tay Phân tích đất, nước và phân bón của Viện Thổ nhưỡng Nông hóa (1989) [46] đã được trình bày trong nội dung thí nghiệm 2.2.

2.3.4.6. Phương pháp xử lý số liệu

Xử lý số liệu bao gồm trung bình, phân tích T_{test} (mô hình) bằng phần mềm Statistix 10.0. Vẽ đồ thị theo phần mềm Excel.

CHƯƠNG 3

KẾT QUẢ NGHIÊN CỨU VÀ THẢO LUẬN

3.1. KHẢO SÁT HIỆN TRẠNG SỬ DỤNG PHỤ PHẨM CÂY TRỒNG VÀ THAN SINH HỌC TẠI VÙNG TRỒNG LÚA Ở TỈNH THỪA THIÊN HUẾ

3.1.1. Tình hình sản xuất lúa tại địa điểm nghiên cứu

Bảng 3.1. Hiện trạng diện tích và năng suất lúa tại địa điểm điều tra năm 2022

Địa điểm	Diện tích (ha)	Năng suất (tấn/ha)
Huyện Quảng Điền	9.993	4,70
Xã Quảng Phú	778,4	4,94
Xã Quảng Thọ	575,4	5,17

Nguồn: Số liệu điều tra năm 2023.

Kết quả trình bày trong Bảng 3.1 cho thấy diện tích lúa tại huyện Quảng Điền là 9.993 ha, xã Quảng Phú là 778,4 ha (chiếm 7,8% tổng diện tích lúa của huyện), xã Quảng Thọ là 575,4 ha (chiếm 5,8% tổng diện tích lúa của huyện), năng suất lúa năm 2022 dao động từ 4,94 - 5,17 tấn/ha, giảm so với năm 2021 do tình hình thời tiết bất lợi (Nguyễn Văn Hoà, 2022 [17] và Sở NN&PTNT Thừa Thiên Huế, 2023 [47]).

Bảng 3.2. Quy mô diện tích trồng lúa của nông hộ tại các địa điểm điều tra

Quy mô diện tích (m ²)	Tỷ lệ (% số hộ)	
	Quảng Phú (n = 30)	Quảng Thọ (n = 30)
< 2.500	23,3 ± 5	80,0 ± 11
2.500 - <5.000	76,7 ± 21	20,0 ± 4

Nguồn: Số liệu điều tra năm 2023; Giá trị trung bình ± SD.

Kết quả trình bày ở Bảng 3.2 cho thấy quy mô diện tích trồng lúa của nông hộ có sự chênh lệch lớn giữa 2 địa điểm Quảng Phú, Quảng Thọ. Trong tổng số 60 hộ điều tra có 31 hộ quy mô diện tích từ < 2.500 m² chiếm 51,7%; có 29 hộ có quy mô diện tích từ 2.500 - 5.000 m² chiếm 48,3%. Xã Quảng Phú có 76,7% hộ có diện tích lúa từ 2.500 - 5.000 m², trong khi xã Quảng Thọ có 80% hộ có diện tích lúa < 2.500 m². Diện tích sản xuất lúa của các hộ nông dân chủ yếu phân tán, không tập trung.

Điều này phản ánh tình trạng manh mún trong sản xuất lúa (Trần Thị Xuân Phương và cs., 2021) [35].

3.1.2. Tình hình sử dụng phụ phẩm cây trồng trong sản xuất lúa

Kết quả trình bày ở Bảng 3.3 cho thấy hàng năm phụ phẩm rơm rạ, vỏ lạc và vỏ trấu có tại 2 xã điều tra là khá lớn, khối lượng rơm rạ từ 3.450 - 4.670 tấn, chiếm 5,8 - 7,8% của tổng lượng phụ phẩm toàn huyện Quảng Điền, khối lượng vỏ lạc từ 45 đến 119 tấn, vỏ trấu là 743 đến 961 tấn. Kết quả của Đỗ Năng Vịnh và cs. (2020) [72] cho thấy tỷ lệ phụ phẩm/thóc bình quân hàng năm là khoảng 1,43 (61,975 triệu tấn phụ phẩm/43,294 triệu tấn thóc = 1,43), tương tự với kết quả của IRRI (2020) [137].

Bảng 3.3. Lượng phụ phẩm cây trồng tại điểm điều tra vào tháng 01 năm 2023

Loại phụ phẩm cây trồng	Huyện Quảng Điền (tấn/năm)	Xã Quảng Phú (tấn/năm)	Xã Quảng Thọ (tấn/năm)
Rơm rạ	59.958	4.670	3.450
Vỏ lạc	348	119	45
Vỏ trấu	12.491	961	743

Nguồn: Kết quả điều tra và tính toán, năm 2023 (1 ha lúa thu trung bình 6 tấn rơm rạ, khối lượng vỏ lạc và vỏ trấu bằng 25% năng suất quả lạc khô và năng suất lúa) (Đỗ Năng Vịnh và cs., 2020 [72]).

Bảng 3.4. Tình hình sử dụng phế phụ phẩm cây trồng sau thu hoạch tại các địa điểm điều tra vào tháng 01 năm 2023

Chỉ tiêu		Vụ đông xuân (% số hộ)		Vụ hè thu (% số hộ)	
		Quảng Phú (n = 30)	Quảng Thọ (n = 30)	Quảng Phú (n = 40)	Quảng Thọ (n = 30)
Rơm rạ	- Đốt trực tiếp	80,0	100	80,0	100
	- Ủ chuồng trại	0	0	6,7	0
	- Đốt thành TSH	40,0	0	40,0	0
	- Phân bón cho cây	0	3,3	0	3,3
Vỏ trấu	- Đốt trực tiếp	20,0	50,0	0	3,3
	- Vùi lấp trên ruộng	0	50,0	0	0

Chỉ tiêu		Vụ đông xuân (% số hộ)		Vụ hè thu (% số hộ)	
		Quảng Phú (n = 30)	Quảng Thọ (n = 30)	Quảng Phú (n = 40)	Quảng Thọ (n = 30)
	- Đốt thành than sinh học	26,7	0	20,0	20,0
	- Phân bón cho cây	6,7	3,3	6,7	0
	Vỏ lạc	- Đốt trực tiếp	6,7	0	6,7
- Đốt thành TSH		20,0	13,3	13,3	0
- Phân bón cho cây		13,3	0	6,67	0

Nguồn: Số liệu điều tra năm 2023.

Vấn đề xử lý phế phụ phẩm nông nghiệp đã và đang rất được quan tâm bởi khối lượng phụ phẩm sau thu hoạch rất lớn mà nếu không được xử lý, tái sử dụng sẽ gây ô nhiễm môi trường và là một sự lãng phí lớn. Phụ phẩm từ lúa gạo gồm có rơm rạ, vỏ trấu. Kết quả điều tra ở Bảng 3.4 cho thấy người dân ở Quảng Phú xử lý rơm bằng hình thức đốt trực tiếp chiếm 80% và đốt thành than sinh học là 40% trong vụ đông xuân và 3 hình thức (đốt trực tiếp, đốt thành than sinh học, ủ chuồng trại) trong vụ hè thu. Ở Quảng Thọ, hình thức xử lý phế phụ phẩm lúa sau thu hoạch là đốt 100% và có một số ít bón cho cây. Hiện nay nông dân tại địa điểm điều tra chủ yếu đốt vỏ trấu thành TSH theo phương pháp ống khói với lượng nhỏ chủ yếu phục vụ mô hình trồng hoa cúc, còn việc sử dụng bón cho lúa mới được thực hiện tại một số mô hình thử nghiệm của các dự án (Đỗ Minh Cường, 2022) [5]. Kết quả này cũng tương tự như ở một số tỉnh ở Đồng bằng sông Cửu Long có đến 6 hình thức xử lý rơm rạ được người dân lựa chọn phổ biến là đốt rơm, vùi rơm, trồng nấm, chăn nuôi, bán và cho người khác (Trần Sỹ Nam và cs., 2014) [29]. Kết quả này cũng tương tự như điều tra thực trạng sản xuất lúa và vấn đề xử lý rơm rạ sau thu hoạch tại Thừa Thiên Huế được thực hiện thông qua phỏng vấn nông hộ ở xã Thủy Phù (thị xã Hương Thủy) và xã Hương Toàn (thị xã Hương Trà) (Trần Thị Xuân Phương và cs., 2021) [35].

Bảng 3.5. Tình hình sử dụng phân hữu cơ cho sản xuất lúa tại địa điểm điều tra vào tháng 1 năm 2023

Chỉ tiêu		(% số hộ)	
		Quảng Phú (n=30)	Quảng Thọ (n=30)
Loại phân	Phân chuồng	0	0
	Phân hữu cơ vi sinh Sông Gianh	13,3	73,3
	Phân hữu cơ vi sinh Quế Lâm	50,0	26,7
	Phân hữu cơ vi sinh Sông Hương	36,7	0
Nguồn gốc	Công ty	100	100
	Tự sản xuất	0	0
Liều lượng bón (kg/ha)	240	26,7	0
	400	0	0
	500	73,3	0
	600	0	100

Nguồn: Số liệu điều tra năm 2023.

Kết quả trình bày ở Bảng 3.5 cho thấy: Qua khảo sát 60 hộ trồng lúa ở 2 địa điểm cho thấy chỉ có 8 hộ ở Quảng Phú (26,7%) và 15 hộ ở Quảng Thọ (50%) có sử dụng phân hữu cơ vi sinh Quế Lâm; có 22 hộ ở Quảng Phú (73,3%) và 4 hộ ở Quảng Thọ (13,3%) có sử dụng phân hữu cơ vi sinh Sông Gianh và 11 hộ ở Quảng Phú (36,7%) có sử dụng phân hữu cơ vi sinh Sông Hương trong quá trình sản xuất lúa với liều lượng khác nhau. Kết quả này tương đồng với nghiên cứu của Trần Thị Xuân Phương và cs. (2021) [35] cho thấy 22,5% hộ tại Thủy Phù và 12,5% tại Hương Toàn dùng phân hữu cơ vi sinh, thấp hơn cả Quảng Phú và Quảng Thọ. Chủ yếu sử dụng phân hữu cơ vi sinh Quế Lâm và Sông Gianh.

Về liều lượng bón, kết quả khảo sát cho thấy 100% hộ tại xã Quảng Thọ sử dụng các loại phân bón hữu cơ vi sinh với liều lượng 600kg/ha; trong khi đó tại xã Quảng Phú có khoảng 8 hộ (chiếm tỉ lệ 26,7%) sử dụng liều lượng 240kg/ha phân hữu cơ vi sinh các loại và 22 hộ (chiếm tỉ lệ 73,3%) sử dụng liều lượng 500kg/ha.

Tóm lại: Tỉnh Thừa Thiên Huế có diện tích lúa hơn 53,5 nghìn ha, trong đó huyện Quảng Điền có diện tích trồng lúa lớn (9.993 ha) so với các loại cây trồng khác. Tổng lượng phụ phẩm hàng năm khoảng 72.797 tấn. Các loại phụ phẩm cây trồng như rơm rạ, vỏ trấu, vỏ lạc được sử dụng chủ yếu với các hình thức đốt trên đồng ruộng (7 - 100%), sản xuất than sinh học (13 - 40%) và làm phân bón (7 - 13%). Lượng phân hữu cơ bón cho cây lúa dao động từ 240 - 600 kg/ha. Dạng phân hữu cơ sử dụng cho cây lúa chủ yếu là phân hữu cơ vi sinh có sẵn trên thị trường. TSH từ vỏ trấu và vỏ lạc chưa được sử dụng rộng rãi tại địa bàn nghiên cứu.

3.2. NGHIÊN CỨU HÀM LƯỢNG MỘT SỐ NGUYÊN TỐ KIM LOẠI NẶNG TRONG ĐẤT TRỒNG LÚA TẠI TỈNH THỪA THIÊN HUẾ

3.2.1. Hiện trạng một số tính chất hóa học cơ bản của đất trồng lúa

Kết quả phân tích các tính chất hóa học cơ bản của 30 mẫu đất trồng lúa ở tầng 0 - 20 cm tại xã Quảng Thọ, xã Quảng Phú và phường Thủy Phương được trình bày ở các Bảng 3.6.

Bảng 3.6. Hiện trạng một số tính chất hóa học đất trồng lúa tại địa điểm nghiên cứu năm 2023

Chỉ tiêu	Huyện Quảng Điền		Thị xã Hương Thủy
	Xã Quảng Thọ (n=10)	Xã Quảng Phú (n=10)	Phường Thủy Phương (n=10)
pH _{KCl}	4,32 ± 0,24	4,41 ± 0,14	4,54 ± 0,31
OM (%)	3,30 ± 0,54	3,43 ± 0,63	2,89 ± 0,22
N (%)	0,15 ± 0,02	0,16 ± 0,03	0,13 ± 0,01
P ₂ O ₅ (%)	0,087 ± 0,01	0,079 ± 0,01	0,081 ± 0,01
P ₂ O ₅ (mg/100 g)	12,80 ± 1,52	10,20 ± 1,43	9,54 ± 1,01
K ₂ O (%)	0,18 ± 0,04	0,20 ± 0,03	0,25 ± 0,03
CEC (meq/100g)	10,23 ± 1,41	10,12 ± 1,52	8,97 ± 1,13
SiO ₂ (%)	25,31 ± 3,42	26,5 ± 2,89	26,45 ± 3,54
SiO ₂ (mg/100 g)	9,09 ± 2,06	10,8 ± 1,76	9,85 ± 1,98

Nguồn: Số liệu phân tích, năm 2023. Số liệu trong từng cột là giá trị trung bình ± SD

Độ chua của đất (pH_{KCl}): Độ chua của đất có ảnh hưởng rất lớn đến sinh trưởng và phát triển của cây trồng. Trên đất có pH quá thấp hoặc quá cao, sinh trưởng và phát triển của cây trồng thường bị ngưng trệ, hệ rễ phát triển không bình thường, khả năng thu hút chất dinh dưỡng của cây bị hạn chế, dẫn đến năng suất cây trồng thường thấp (Trần Bá Linh và cs., 2021 [25]; Minh et al., 2024) [176]. Qua 30 mẫu đất được phân tích (Bảng 3.6) thu được kết quả như sau: pH_{KCl} dao động từ 4,32 - 4,54; điều đó cho thấy rằng đất trồng lúa là từ chua đến rất chua theo thang đánh giá QCVN 03: 2023/BTNMT [38], trong khi khoảng pH thích hợp cho cây lúa là 5,5 - 6,5, do vậy cần tăng cường bón vôi để cải thiện pH đất hỗ trợ cây lúa sinh trưởng và phát triển tốt hơn.

Hàm lượng hợp chất hữu cơ (OM%): Chất hữu cơ là nguồn cung cấp dinh dưỡng cho cây trồng có tương quan rất chặt chẽ đến độ phì nhiêu của đất, nhất là trong điều kiện nhiệt đới nóng ẩm nước ta. Dưới tác dụng của nhiệt độ và độ ẩm cao, mùn bị phân giải nhanh chóng. Do đó hàm lượng mùn thường rất ít biến động, phụ thuộc vào loại đất. Đất có hàm lượng chất hữu cơ cao sẽ là điều kiện thuận lợi cho sinh trưởng và phát triển của cây trồng và vi sinh vật đất. Trên đất có hàm lượng hợp chất hữu cơ cao, hệ số sử dụng chất dinh dưỡng trong đất và trong phân bón thường cao hơn (Minh et al., 2024) [176]. Kết quả phân tích hàm lượng hợp chất hữu cơ của 30 mẫu đất (Bảng 3.6) cho thấy nếu tính trung bình thì hầu hết các mẫu có hàm lượng hợp chất hữu cơ ở mức giàu ($>2\%$) theo thang đánh giá của QCVN 03: 2023/BTNMT [38]. Như vậy có thể thấy được rằng hàm lượng hợp chất hữu cơ của các mẫu đất trồng lúa tại ba xã, phường nhìn chung đạt ở mức giàu, do quá trình tích lũy và phân huỷ gốc rạ sau thu hoạch trong quá trình canh tác lúa qua các năm, tuy nhiên khi trồng lúa vẫn cần chú ý đầu tư phân bón HC. Kết quả này tương tự kết quả nghiên cứu của Đỗ Thành Nhân và cs. (2020) [30].

Hàm lượng đạm tổng số trong đất ($\text{N}\%$): N là nguyên tố dinh dưỡng cần thiết đầu tiên đối với cây trồng. Hàm lượng đạm tổng số và chất hữu cơ trong đất là nguồn dự trữ và cung cấp đạm cho cây trồng. Nói chung N trong từng loại đất phụ thuộc vào hàm lượng chất hữu cơ trong đất, những đất giàu chất hữu cơ thì cũng giàu đạm tổng số. Cây trồng không phải chỉ đồng hoá NO_3^- và NH_4^+ mà còn có khả năng đồng hoá chất hữu cơ phân tử lượng nhỏ có chứa N như các acid amine, amide dễ thủy phân (Zewdie and Reta, 2021) [266]. Vì vậy, khi đánh giá khả năng cung cấp đạm dễ tiêu cho cây có thể dựa vào hàm lượng đạm thủy phân trong đất. Số liệu thu được khi phân tích 30 mẫu đất cho thấy: hàm lượng đạm trong đất trồng lúa tại huyện Quảng Điền và thị xã Hương Thủy, tỉnh Thừa Thiên Huế ở mức nghèo đến trung bình (QCVN 03: 2023/BTNMT) [38], chủ yếu các mẫu ở mức trung bình. Kết quả nghiên cứu hàm lượng N tổng số tại đất trồng lúa ở Thừa Thiên Huế dao động từ 0,050 đến 0,10% (Nguyễn Quang Lịch và Nguyễn Hồ Lam, 2023) [27]. Nguyễn Hữu Chiếm và cs. (2017) [4] cũng cho thấy hàm lượng đạm tổng số ở đất trồng lúa tỉnh An Giang ở mức trung bình đến giàu.

Hàm lượng lân tổng số và lân dễ tiêu trong đất (P): Sau N, P là nguyên tố rất cần thiết đối với cây trồng, nó có ý nghĩa về mặt dinh dưỡng cũng như khắc phục một số yếu tố độc hại của đất. Đối với đất thì P là một chỉ tiêu về độ phì nhiêu của đất “Đất giàu P mới có độ màu mỡ cao và ngược lại đất có độ màu mỡ cao đều giàu P” (Zewdie and Reta, 2021) [266]. Kết quả phân tích hàm lượng P tổng số trong đất cho thấy hàm lượng P trong đất trồng lúa tại 30 mẫu nghiên cứu ở mức trung bình (0,079 - 0,087%). Hàm lượng P dễ tiêu trong đất ở 30 mẫu đều dao động ở mức nghèo đến trung bình (9,54 - 12,80 mg/100 g). Do đất có độ chua cao, hàm lượng Fe^{3+} , Al^{3+} di động lớn, nên P bị giữ chặt ở dưới dạng khó tiêu (Nguyễn Hữu Chiêm và cs., 2017) [4].

Hàm lượng kali tổng số trong đất (K): Hàm lượng K trong đất phụ thuộc vào đá mẹ, điều kiện phong hóa đá và Hình thành đất, thành phần cơ giới đất, chế độ canh tác và phân bón (Zewdie and Reta, 2021) [266]. Kết quả phân tích tại Bảng 3.6 cho thấy, hàm lượng K tổng số trong đất trồng lúa ở 30 mẫu đều ở mức rất nghèo ($< 0,5\%$). Kết quả này tương đồng với kết quả nghiên cứu của Hoàng Thị Thái Hoà và cs. (2023) [16]; Minh et al. (2024) [176].

Khả năng trao đổi cation của đất (CEC): Lượng và chất của CEC là một chỉ tiêu quan trọng về độ phì nhiêu của đất, phản ánh khả năng chứa đựng và điều hòa chất dinh dưỡng, nó có liên quan đến phương pháp bón phân hợp lý. Nói chung, những loại đất có CEC thấp được coi là loại đất có khả năng sản xuất thấp. Đất giàu chất hữu cơ thì có CEC cao cũng là đất có khả năng dự trữ chất hữu cơ cho cây trồng (Hoàng Thị Thái Hoà và cs., 2023) [16]. Theo phân loại của QCVN 03: 2023/BTNMT) [38], cho thấy đất có $\text{CEC} < 5 \text{ meq/100 g}$ đất là loại đất xấu. Kết quả phân tích CEC của 30 mẫu đất trồng lúa tại ba xã phường cho thấy CEC ở mức nghèo đến trung bình (8,97 - 10,23 meq/100g). Nghiên cứu của Nguyễn Quang Lịch và Nguyễn Hồ Lam (2023) [27] cho thấy CEC trên đất trồng lúa tại huyện Quảng Điền, tỉnh Thừa Thiên Huế dao động từ 2,0 - 6,4 meq/100g.

Si tổng số và dễ tiêu: Trong vỏ quả đất, Si là nguyên tố phổ biến thứ 2 sau oxy, chiếm 25% khối lượng quả đất. Lượng SiO_2 trong đất cát ít bị phong hóa có thể đến 90% nhưng trong những đất nhiệt đới bị phong hóa mạnh chỉ khoảng 20%. Nhìn chung lượng SiO_2 chiếm khoảng 60 - 90% trong đất rất nghèo Si thường gặp ở những vùng có cường độ phong hóa mạnh và nhiều mưa, thường có độ bão hòa bazơ kém, pH thấp và hàm lượng oxit sắt, oxit nhôm nhiều, vì vậy khả năng hấp thu lân cao (Abdullah et al., 2021) [75]. Kết quả phân tích hàm lượng Si tổng số dao động từ 25,31 - 26,45% (hơi nghèo), hàm lượng Si dễ tiêu từ 9,09 - 10,80 mg/100g đất (nghèo) (TCVN 7131:2016) [57]. So sánh giữa những đất bình thường, nồng độ Si trong dung dịch dao động nhiều từ 3 - 37 ppm. Ở Nhật Bản và Hàn Quốc, nồng độ Si (chiết bằng NaOAc) $> 130 \text{ ppm}$ được đánh giá là thích hợp đối với sự sinh trưởng của cây lúa; ở Đài Loan nồng độ Si thích hợp cho lúa là $> 90 \text{ ppm}$ (Dobermann và Fairhurst, 2000) [112].

3.2.2. Hiện trạng một số nguyên tố kim loại nặng trong đất trồng lúa

Bảng 3.7. Hàm lượng Cd, Pb, Cu và Zn tổng số trên đất trồng lúa

STT	Cd (mg/kg)	Pb (mg/kg)	Cu (mg/kg)	Zn (mg/kg)	PLI
I	<i>Xã Quảng Thọ, huyện Quảng Điền</i>				
1	0,83 ^{ab}	21,20 ^{ab}	23,26 ^b	35,25 ^a	0,30
2	1,14 ^b	30,14 ^a	28,58 ^{ab}	33,56 ^a	0,35
3	0,65 ^{ab}	34,54 ^a	34,15 ^{ab}	39,51 ^a	0,35
4	1,05 ^{ab}	35,25 ^a	38,14 ^a	41,12 ^a	0,41
5	0,94 ^{ab}	35,56 ^a	30,25 ^{ab}	39,25 ^a	0,39
6	1,27 ^b	38,64 ^a	27,45 ^{ab}	38,24 ^a	0,40
7	1,04 ^b	41,15 ^a	35,36 ^{ab}	31,47 ^a	0,39
8	1,12 ^b	30,47 ^{ab}	34,24 ^{ab}	35,23 ^a	0,38
9	0,75 ^{ab}	19,48 ^b	30,18 ^{ab}	34,26 ^a	0,36
10	0,56 ^a	33,25 ^a	31,05 ^{ab}	32,25 ^a	0,27
HSD _{0,05}	0,54	11,81	12,42	11,76	-
TB	0,94^a	31,94^a	30,48^a	36,01^a	0,37^a
II	<i>Phường Thủy Phương, thị xã Hương Thủy</i>				
1	21,12 ^a	81,3 ^a	34,54 ^d	28,47 ^f	0,95
2	22,14 ^a	75,18 ^{ab}	47,65 ^a	35,74 ^{ef}	1,08
3	19,31 ^{ab}	54,47 ^{cd}	24,18 ^f	46,49 ^c	0,87
4	15,27 ^{bc}	45,67 ^d	48,54 ^a	35,72 ^{ef}	0,87
5	18,25 ^{abc}	75,23 ^{ab}	37,57 ^d	55,12 ^b	1,08
6	10,25 ^d	78,65 ^{ab}	45,13 ^{ab}	38,21 ^{de}	0,90
7	14,27 ^{cd}	71,34 ^{ab}	38,45 ^{cd}	54,47 ^b	1,00
8	21,64 ^a	59,32 ^c	29,47 ^e	65,42 ^a	1,04
9	17,47 ^{abc}	69,45 ^b	42,41 ^{bc}	44,45 ^{cd}	1,02
10	18,56 ^{abc}	73,14 ^{ab}	45,79 ^{ab}	46,54 ^c	1,08
HSD _{0,05}	4,68	10,04	4,58	14,67	-
TB	17,84^b	68,38^b	39,37^b	45,04^b	0,99^b

Ghi chú: Các công thức có cùng ký tự trong cùng một cột không có sai khác ý nghĩa về mặt thống kê ở khoảng tin cậy 95% (với HSD_{0,05}); Giá trị TB (trung bình) của 10 mẫu/xã so sánh trong 2 xã theo T_{test} .

Kết quả phân tích ở Bảng 3.7 cho thấy trên đất trồng lúa, hàm lượng Cd tại xã Quảng Thọ dao động từ 0,56 đến 1,14 mg/kg, trong khi hàm lượng Cd tại phường Thủy Phương cao hơn quy chuẩn ($<1,5$ mg/kg) từ 9,5 đến 14,8 lần và dao động từ 10,25 đến 22,14 mg/kg (Bộ TN và MT, 2015) [1]. Đã tìm thấy sự khác biệt đáng kể về hàm lượng Cd giữa các địa điểm được khảo sát ở cả hai địa điểm ($p < 0,05$). Việc sử dụng chất thải công nghiệp, hóa chất nông nghiệp là những nguồn gây ô nhiễm kim loại độc hại chính cho môi trường đất (Kamani et al., 2018 [146]; Pham et al., 2021) [197]. Từ kết quả này cho thấy, hàm lượng Cd trong đất trồng lúa tại xã Quảng Thọ ở mức an toàn, trong khi một số mẫu tại phường Thủy Phương cao hơn mức cho phép rất nhiều. Pb ở đất trồng lúa trong tất cả các mẫu đất đều dao động từ 19,48 đến 41,15 mg/kg (xã Quảng Thọ) và từ 45,67 đến 81,3 mg/kg (phường Thủy Phương). Theo quy chuẩn Việt Nam (Bộ TN và MT, 2015) [1], hàm lượng Pb trong đất lúa phường Thủy Phương cao hơn tiêu chuẩn (<70 mg/kg) từ 3,14 đến 11,3 mg/kg. Do đất trồng lúa tại đây ở cạnh nguồn nước thải của cụm công nghiệp Thủy Phương. Tuy nhiên, hàm lượng Cu và Zn trong đất lúa ở cả hai điểm nghiên cứu đều thấp so với tiêu chuẩn.

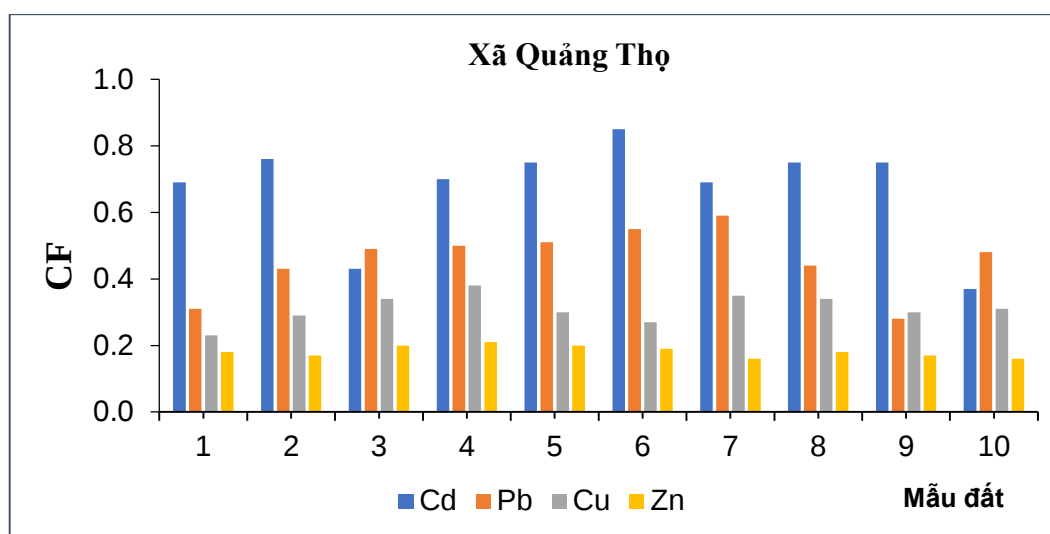
Hàm lượng Cu được phát hiện tại các khu vực lấy mẫu tương tự như hàm lượng Cu trong nghiên cứu trước đây ở Bangladesh (Hasan et al., 2022) [129] và Việt Nam (Nguyễn Thanh Bình và cs., 2015 [2]; Pham V.D. et al., 2021) [197]. Nghiên cứu hiện tại chỉ ra rằng hàm lượng Cu thấp hơn so với kết quả nghiên cứu tại các thành phố công nghiệp khác trên thế giới (Yang et al., 2016) [261]. Hàm lượng Zn trên đất trồng lúa dao động từ 31,47 - 41,12 mg/kg (xã Quảng Thọ) và từ 35,72 - 65,42 mg/kg (phường Thủy Phương), tương đồng với kết quả nghiên cứu của Nguyễn Thanh Bình và cs., 2015 [2]. Nghiên cứu của Hasan et al. (2022) [129] cho thấy hàm lượng Zn trong đất phù sa sông lần lượt là 78,50 mg/kg và 66,4 mg/kg. Kết quả tương tự cũng tìm thấy tại Trung Quốc, nơi ô nhiễm KLN trong đất chủ yếu bao gồm Cd, Pb, Zn vượt tiêu chuẩn quốc gia lần lượt là 7%, 1,5%, 0,9% đất dựa trên báo cáo về hiện trạng của ô nhiễm đất ở Trung Quốc (Wu et al., 2022) [247].

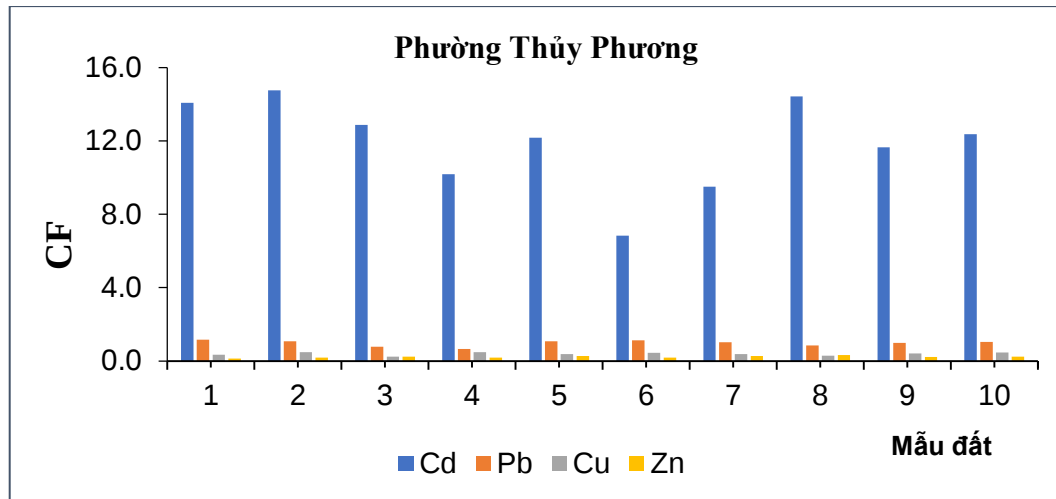
Chỉ số tải lượng ô nhiễm (PLI - Pollution Load Index) dùng để đánh giá mức độ ô nhiễm của kim loại trong một môi trường nhất định, dựa trên sự so sánh nồng độ của kim loại đó trong mẫu với nồng độ nền. Giá trị $PLI > 1$ cho thấy sự ô nhiễm có xu hướng gia tăng, trong khi $PLI = 0$ biểu thị tình trạng nguyên sơ và $PLI = 1$ chỉ mức ô nhiễm cơ bản (Dinh Xuan Thanh et al. (2024) [110]. Kết quả phân tích ở Bảng 3.7 cho thấy đất trồng lúa ở xã Quảng Thọ xếp vào mức ô nhiễm nhẹ KLN ($PLI < 1$). Ngược lại, hầu như các giá trị PLI tại phường Thủy Phương đều cao hơn 1, chứng tỏ cho thấy nguy cơ ô nhiễm KLN (Cd, Pb) ở khu vực này là cao. Các vị trí PLI của mẫu 2, 5, 7, 8, 9 và 10 đều cao hơn 1, cho thấy nguy cơ ô nhiễm kim loại nặng (Cd, Pb) tại địa điểm này cao. Kết quả tương tự từ Yadav và Yadav (2018) [255], Lê Hồng Thía và Nguyễn

Văn Phương, (2022) [50] chỉ ra rằng PLI là chỉ số rất hữu ích để đánh giá mức độ ô nhiễm trong đất. PLI cho thấy mức độ ô nhiễm cơ bản tại 28 địa điểm từ thành phố Al-Shamiyah, Iraq (Al-Khuzai và Maulud, 2022) [86] và các giá trị PLI đối với Co, Zn, Cu và Pb cũng cho thấy loại ô nhiễm cục bộ từ Ishaqi, Iraq (Al-Dabbas và Abdullah, 2020) [85]. Theo như trên, các loại đất được nghiên cứu bị ô nhiễm Cd rất cao và người ta quan sát thấy rằng các giá trị chỉ số tải lượng ô nhiễm (PLI) của tất cả các KLN khác đối với tất cả các đơn vị lấy mẫu đều không lớn hơn một (Islam et al., 2018) [138]. Kết quả số liệu Bảng 3.7 cho thấy giá trị Cd, Pb, Cu, Zn trung bình khi so sánh giữa 2 xã nghiên cứu có sai khác ý nghĩa về thống kê, dao động từ 0,84 - 17,84 mg/kg (Cd), 31,94 - 68,38 mg/kg (Pb), 30,48 - 39,37 mg/kg (Cu) và 36,01 - 45,04 mg/kg (Zn).

Hệ số ô nhiễm môi trường (CF) là một chỉ số định lượng mức độ ô nhiễm, giúp đánh giá tác động môi trường của các hoạt động kinh tế, sản xuất và xác định các nguồn gây ô nhiễm lớn nhất Lê Hồng Thía và Nguyễn Văn Phương, (2022) [50]. Kết quả Hình 3.1 cho thấy giá trị CF của Cd, Pb, Cu và Zn tại mỗi điểm lấy mẫu của xã Quảng Thọ đều nhỏ hơn 1, do đó, đất trồng lúa tại xã này có mức độ ô nhiễm kim loại thấp (Bảng 3.7). Ngược lại, giá trị CF của Cd và Pb tại hầu hết các mẫu ở phường Thủy Phương đều cao hơn 1, đặc biệt là giá trị CF của Cd, cho thấy đất trồng lúa tại địa điểm này bị ô nhiễm Cd và Pb, do hàm lượng Cd và Pb trong đất đều cao hơn tiêu chuẩn cho phép (Bộ TN và MT, 2015) [1]. Kết quả tương tự được tìm thấy ở Bangladesh, nơi nhân tố ô nhiễm (CF) cao hơn đối với Cu và Cd (Hasan et al., 2022) [129].

Kết quả phân tích hàm lượng KLN dễ tiêu trong đất trồng lúa tại xã Quảng Thọ, huyện Quảng Điền ở Bảng 3.8 cho thấy: hàm lượng Cd dao động từ 0,010 - 0,041 mg/kg, trung bình là 0,025 mg/kg; Pb từ 0,45 - 0,89 mg/kg, trung bình là 0,78 mg/kg; các nguyên tố Cu và Zn đều ở mức thấp. So sánh với ngưỡng giới hạn cho phép của QCVN 03:2015/BTNMT [42] cho đất nông nghiệp, tất cả các nguyên tố đều nằm trong phạm vi an toàn.





Hình 3.1. Giá trị CF của hàm lượng KLN trên đất trồng lúa

Bảng 3.8. Hàm lượng Cd, Pb, Cu và Zn dễ tiêu trên đất trồng lúa

STT	Đất trồng lúa tại xã Quảng Thọ, huyện Quảng Điền (n=10)			
	Cd (mg/kg)	Pb (mg/kg)	Cu (mg/kg)	Zn (mg/kg)
1	0,025	0,72	0,57	0,79
2	0,034	0,83	0,63	0,53
3	0,012	0,85	0,75	0,65
4	0,025	0,78	0,79	0,79
5	0,021	0,87	0,65	0,64
6	0,041	0,89	0,56	0,69
7	0,032	0,88	0,83	0,52
8	0,034	0,79	0,76	0,51
9	0,012	0,45	0,63	0,58
10	0,010	0,73	0,71	0,56
TB	0,025	0,78	0,69	0,63
SD	0,010	0,12	0,09	0,10

Tóm lại: Đất trồng lúa tại hai xã nghiên cứu có các đặc điểm như sau: đất chua, hàm lượng carbon hữu cơ ở mức trung bình, hàm lượng N, P, K tổng số ở mức nghèo đến trung bình, hàm lượng Si tổng số ở mức hơi cao. Đánh giá chung độ phì đất trồng lúa ở mức trung bình. Hàm lượng KLN ở xã Quảng Thọ nằm trong ngưỡng tiêu chuẩn cho phép, một số mẫu đất tại phường Thủy Phương vượt ngưỡng cho phép với nguyên tố Cd và Pb. Tuy nhiên, hàm lượng tương đối cao của Cd và Pb so với hai nguyên tố còn lại cho thấy tiềm ẩn nguy cơ tích lũy sinh học và ô nhiễm trong dài hạn (Nguyễn Thanh Giao và Trương Hoàng Đan, 2021) [12]. Do đó, nghiên cứu sẽ tập trung vào hai nguyên tố này để đánh giá mức độ ảnh hưởng đến cây trồng và môi trường đất tại địa phương, nên đề tài sẽ tập trung vào hai nguyên tố này cho các thí nghiệm tiếp theo tại xã Quảng Thọ, huyện Quảng Điền, tỉnh Thừa Thiên Huế. Bên cạnh đó, nghiên cứu nằm trong 1 nội dung đề tài cấp Bộ mã số B2023-DHH-22 và mục tiêu đề tài chỉ là giảm hàm lượng KLN trong đất, mặc dù kết quả tại phường Thủy Phương cho thấy có sự ô nhiễm KLN Cd và Pb, nhưng đây là mẫu đối chứng để so sánh như đã đề cập trong phạm vi nghiên cứu.

3.3. NGHIÊN CỨU ẢNH HƯỞNG CỦA DẠNG VÀ LIỀU LƯỢNG THAN SINH HỌC GIÀU SI TỪ VỎ TRÁU VÀ VỎ LẠC ĐẾN SINH TRƯỞNG, PHÁT TRIỂN, NĂNG SUẤT LÚA VÀ HIỆU QUẢ KINH TẾ VÀ HÀM LƯỢNG KIM LOẠI NẶNG TRÊN ĐẤT PHÙ SA TẠI TỈNH THỪA THIÊN HUẾ TRONG PHÒNG, NHÀ LƯỚI VÀ TRÊN ĐỒNG RUỘNG

3.3.1. Kết quả thí nghiệm trong phòng

Hiệu quả hấp thu Cd và Pb phụ thuộc vào loại dạng và lượng bón TSH giàu Si (Bảng 3.9). Bón TSH giàu Si từ vỏ trấu và vỏ lạc và Si đã làm giảm hàm lượng Cd và Pb với khả năng hấp thu cao nhất được tìm thấy ở dạng TSH giàu Si từ vỏ trấu ở mức bón 5% (CT6) từ 22,83 đến 38,54% đối với Cd (giảm 0,29 - 8,14 mg/kg Cd trong đất so với ĐC) và 30,69 đến 31,53% đối với Pb (giảm 11,86 - 25,63 mg/kg Pb trong đất so với ĐC) tại cả hai địa điểm nghiên cứu, đặc biệt là ở phường Thủy Phương (đất bị ô nhiễm). Khi bổ sung TSH giàu Si từ vỏ trấu, là vật liệu có hàm lượng Si cao hơn TSH từ vỏ lạc, khả năng trao đổi tương đối cao và hấp thu Cd và Pb vào cấu trúc của chúng, làm giảm tính di động của Cd và Pb trong đất, do đó ở mức bón cao hơn, khả năng hấp thu Cd và Pb cao hơn (Li et al., 2019) [158].

Bảng 3.9. Ảnh hưởng của than sinh học giàu Si đến khả năng hấp thu kim loại nặng trên đất trồng lúa ở thí nghiệm trong phòng

CT	Dạng TSH	Liều lượng (%)	Xã Quảng Thọ				Phường Thủy Phương			
			Cd (mg/kg)	H (%)	Pb (mg/kg)	H (%)	Cd (mg/kg)	H (%)	Pb (mg/kg)	H (%)
CT1	TSH giàu Si từ vỏ trấu	0 (ĐC)	1,27 ^a	0,00	38,64 ^a	0,00	21,12 ^a	0,00	81,30 ^a	0,00
CT2		1	1,22 ^{ab}	3,94	34,21 ^a	11,46	19,21 ^{abc}	9,04	76,44 ^{bc}	5,98
CT3		2	1,20 ^{abc}	5,51	30,45 ^a	21,20	16,56 ^{cde}	21,59	70,25 ^d	13,59
CT4		3	1,14 ^{a-d}	10,24	29,25 ^a	24,30	15,89 ^{def}	24,76	68,47 ^d	15,78
CT5		4	1,04 ^{bcd}	18,11	28,34 ^a	26,66	14,54 ^{ef}	31,16	62,32 ^{ef}	23,35
CT6		5	0,98 ^d	22,83	26,78 ^a	30,69	12,98 ^f	38,54	55,67 ^g	31,53
CT7	TSH giàu Si từ vỏ lạc	0 (ĐC)	1,27 ^a	0,00	38,64 ^a	0,00	21,12 ^a	0,00	81,30 ^a	0,00
CT8		1	1,24 ^a	2,36	35,41 ^a	8,36	20,22 ^{ab}	4,26	78,96 ^{ab}	2,88
CT9		2	1,21 ^{ab}	4,72	33,22 ^a	14,03	17,96 ^{bcd}	14,96	74,56 ^c	8,29
CT10		3	1,18 ^{abc}	7,09	31,56 ^a	18,32	16,89 ^{cde}	20,03	69,45 ^d	14,58
CT11		4	1,11 ^{a-d}	12,60	30,12 ^a	22,05	15,21 ^{def}	27,98	63,26 ^e	22,19
CT12		5	1,01 ^{cd}	20,47	27,87 ^a	27,87	14,88 ^{ef}	29,55	59,54 ^f	26,77
HSD _{0,05}			0,19	-	19,44	-	3,08	-	3,51	-

Ghi chú: Các công thức có cùng ký tự trong cùng một cột không có sai khác ý nghĩa về mặt thống kê ở khoảng tin cậy 95%. H là hiệu quả hấp thu KLN.

Xu hướng tương tự cũng được tìm thấy về giảm hàm lượng Cd và Pb khi bón TSH giàu Si từ vỏ lạc. Ở các mức bón khác nhau, hàm lượng Cd thay đổi đáng kể so với đất đối chứng ở phường Thủy Phương. Ở lượng bón 4% (CT11) và 5% (CT12), hàm lượng Cd giảm đáng kể, nhưng vẫn cao hơn ngưỡng tiêu chuẩn cho phép. So với khả năng hấp thu Pb, khả năng hấp thu Cd của vật liệu cao hơn nhiều.

Như vậy, TSH giàu Si từ vỏ trấu là chất cải tạo đất khả thi liên quan đến khả năng hấp thu Cd và Pb. Trong nghiên cứu hiện tại, việc bón TSH giàu Si từ vỏ trấu

và vỏ lạc đã làm giảm hàm lượng KLN trong đất trồng lúa. Những phát hiện này đã được báo cáo bởi Rizwan et al. (2018) [213] trên đất trồng lúa, TSH giàu Si từ vỏ trấu có pH cao và khả năng trao đổi cation, giúp tăng cường thêm hiệu ứng hấp thu của phức hợp bề mặt và trao đổi ion. Do đó, TSH giàu Si từ vỏ trấu làm giảm hiệu quả sinh học của KLN trong đất ô nhiễm kim loại nặng. Độc tính của KLN đã được quan sát thấy giảm đi nhờ Si thông qua giảm khả năng trao đổi của kim loại trong đất (Adrees et al., 2015) [79].

Tóm lại: Giảm lượng KLN trong đất lúa có thể được thực hiện hiệu quả bằng cách sử dụng TSH giàu Si. Phương pháp xử lý tốt nhất và là lựa chọn khả thi để giảm lượng KLN trên đất trồng lúa là sử dụng TSH từ vỏ trấu với tỷ lệ 5%. Nghiên cứu này cung cấp cơ sở cho việc sử dụng TSH giàu Si từ vỏ trấu và cung cấp nguồn vật liệu hứa hẹn để khắc phục đất bị ô nhiễm KLN.

3.3.2. Kết quả thí nghiệm trong nhà lưới

3.3.2.1. Nghiên cứu khả năng cung cấp Si từ than sinh học giàu Si từ vỏ trấu và vỏ lạc đến cây lúa

a. Diện tích lá và chỉ số diện tích lá lúa

Diện tích lá (LA) là tổng diện tích bề mặt của tất cả các lá cây, trong khi chỉ số diện tích lá (LAI) là tỷ lệ giữa tổng diện tích một mặt lá của tất cả các lá trên một đơn vị diện tích bề mặt của cây. LAI cho biết tiềm năng quang hợp của cây, là phương tiện để đánh giá hiệu quả hoạt động quang hợp, trong khi diện tích lá là một yếu tố cơ bản để tính toán chỉ số LAI (Phạm Thị Lệ Huyền và Võ Quang Minh, 2014) [18].

Diện tích lá và chỉ số diện tích lá tăng lên khi tăng tỷ lệ phân bón Si, TSH giàu Si từ vỏ trấu và vỏ lạc (Bảng 3.10). Diện tích lá và chỉ số diện tích lá cao nhất ở lượng bón 120 mg SiO_2/kg đất (CT5) ở 2 vụ (lần lượt là 29,57 - 33,83 cm^2 và 0,59 - 0,68 m^2 lá/ m^2 đất). Trong hai loại TSH, diện tích lá và chỉ số diện tích lá cao nhất thu được ở lượng bón 15 g/kg đất ở TSH giàu Si từ vỏ trấu (CT8) và cao hơn ĐC (CT1) từ 7 - 10%.

Kết quả này phù hợp với nghiên cứu của Pati và cs., (2016) [193], tăng các chỉ tiêu sinh trưởng khi bổ sung phân bón Si so với ĐC. Cuong et al., (2017) [102] đã đề cập đến việc tích lũy Si trong thành tế bào có thể làm tăng chiều cao của cây lúa bằng cách làm cho lá và thân cây thẳng đứng hơn, dẫn đến giảm sự che bóng lẫn nhau do mật độ cây cao, do đó làm tăng tốc độ quang hợp của cây do khả năng đón ánh sáng tốt hơn. Việc bón kết hợp Si + TSH đã làm tăng diện tích lá lên 13,78% và chiều dài bắp ngô lên 14,64% (Sattar et al., 2022) [220].

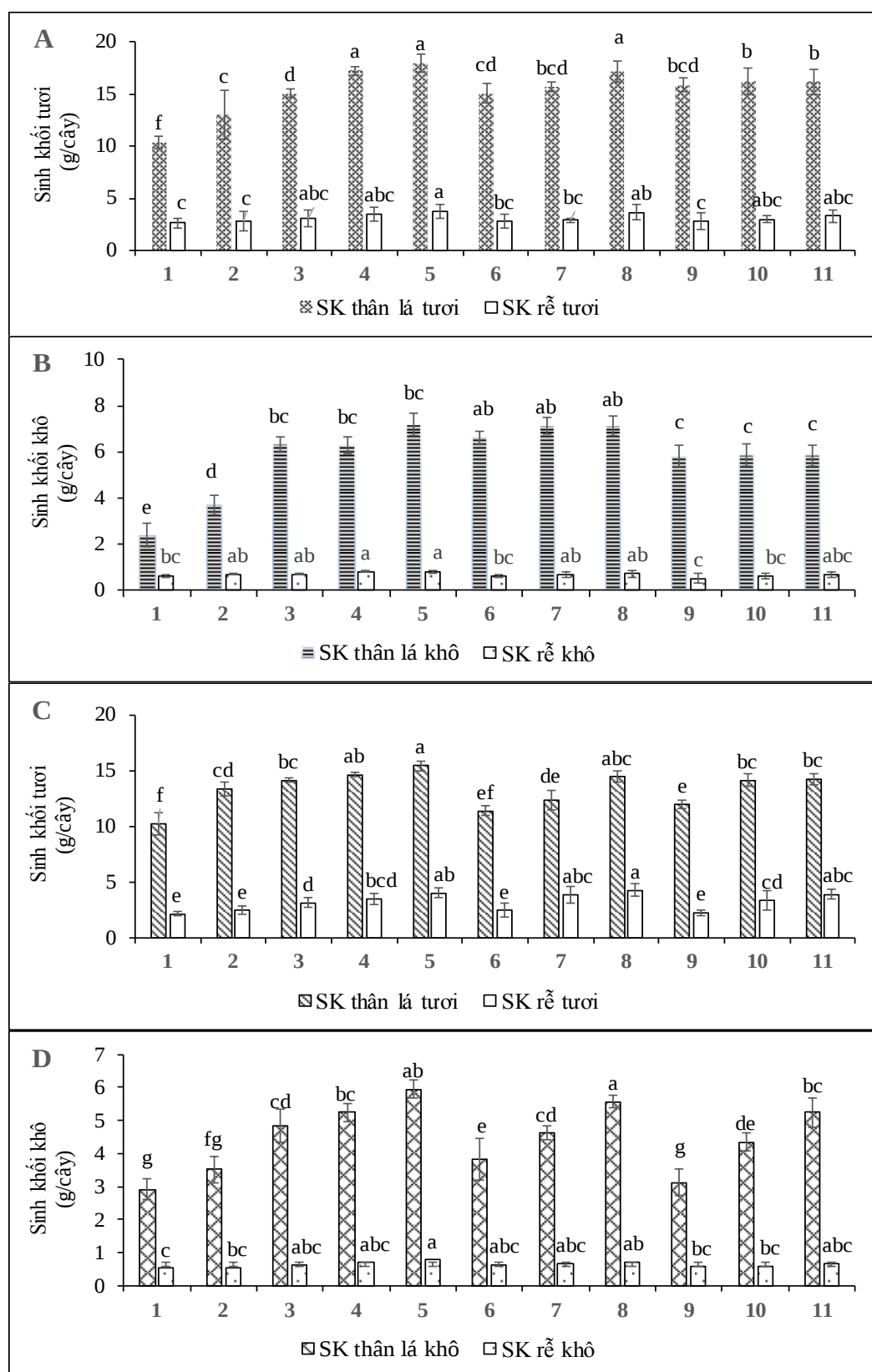
Bảng 3.10. Ảnh hưởng của liều lượng phân Si và than sinh học giàu Si đến diện tích lá và chỉ số diện tích lá lúa ở thí nghiệm nhà lưới

CT	Dạng vật liệu	Liều lượng	Vụ xuân 2023		Vụ xuân hè 2023	
			Diện tích lá (cm ²)	Chỉ số diện tích lá (m ² lá/m ² đất)	Diện tích lá (cm ²)	Chỉ số diện tích lá (m ² lá/m ² đất)
CT1	SiO ₂ (mg/kg)	0 (ĐC)	30,30 ^d	0,60 ^d	27,15 ^b	0,55 ^b
CT2		30	31,91 ^{bcd}	0,64 ^{bcd}	28,65 ^{ab}	0,57 ^{ab}
CT3		60	32,35 ^{bc}	0,65 ^{bc}	28,70 ^{ab}	0,57 ^{ab}
CT4		90	32,83 ^{ab}	0,65 ^{ab}	29,42 ^{ab}	0,59 ^{ab}
CT5		120	33,83 ^a	0,68 ^a	29,57 ^a	0,59 ^a
CT6	TSH giàu Si từ vỏ trấu (g/kg)	5	31,52 ^{bcd}	0,61 ^{bcd}	29,41 ^{ab}	0,57 ^{ab}
CT7		10	31,91 ^{bcd}	0,64 ^{bcd}	29,29 ^{ab}	0,58 ^{ab}
CT8		15	32,70 ^{abc}	0,65 ^{abc}	29,78 ^{ab}	0,59 ^{ab}
CT9	TSH giàu Si từ vỏ lạc (g/kg)	5	30,65 ^d	0,61 ^d	28,35 ^{ab}	0,57 ^{ab}
CT10		10	30,71 ^d	0,61 ^d	29,00 ^{ab}	0,58 ^{ab}
CT11		15	31,55 ^{bcd}	0,63 ^{bcd}	29,41 ^{ab}	0,58 ^{ab}
HSD _{0,05}			1,46	0,03	1,55	0,04

Ghi chú: Các công thức có cùng ký tự trong cùng một cột không có sai khác ý nghĩa về mặt thống kê ở khoảng tin cậy 95%.

b. Sinh khối tươi, khô và khả năng hấp thu Si của cây lúa

Sinh khối tươi và khô của cây trồng có liên quan mật thiết đến khả năng sinh trưởng, hiệu suất quang hợp và năng suất của cây trồng. Các nghiên cứu trên cây lúa mới đây chỉ ra rằng muốn tăng năng suất lúa vượt trội hiện nay phải tăng tổng sinh khối cây lúa (tức là cây phải to, cao, cứng cây hơn so với hiện nay) (Trịnh Thị Sen, 2023) [43]. Kết quả thể hiện



Hình 3.2. Ảnh hưởng của liều lượng phân Si và TSH đến sinh khối tươi và khô của thân và rễ lúa (A, B: vụ xuân 2023 và C, D: vụ xuân hè 2023) (CT 1, 2, 3, 4, 5 tương ứng 0, 30, 60, 90, 120 mg/kg SiO₂ và CT 6, 7, 8 tương ứng 5, 10, 15 g/kg TSH giàu Si từ vỏ trấu; CT 9, 10, 11 tương ứng 5, 10, 15 g/kg TSH giàu Si từ vỏ lạc)

ở Hình 3.2. Sinh khối tươi và khô của thân và rễ lúa bị ảnh hưởng đáng kể bởi bón Si trong phân bón hóa học và TSH (Hình 3.2). Sinh khối tươi trong thân và rễ lúa tăng gần 42,5 và 30,5% khi bón 120 mg SiO_2/kg (CT5) so với ĐC (CT1). Ở mức bón 15 g/kg TSH giàu Si từ vỏ trấu (CT8) và vỏ lạc (CT11), sinh khối tươi trong thân và rễ đạt giá trị cao nhất và tăng 39,8% và 28,4% (TSH giàu Si từ vỏ trấu) và 36,2 và 20,1% (TSH giàu Si từ vỏ lạc) so với ĐC (CT1). Tương tự, sinh khối khô trong thân lá tăng từ 35,6 đến 66,7% so với ĐC ở các lượng phân Si khác nhau. Sinh khối khô trong thân cũng đạt giá trị cao nhất ở mức 15 g/kg TSH giàu Si từ vỏ trấu (CT8) và vỏ lạc (CT11). Nhiều nghiên cứu đã chứng minh Si tăng khả năng sinh trưởng và năng suất của cây trồng (Farooq và Dietz, 2015 [118]; Cuong et al., 2017 [102]; Swe et al., 2021 [235]). Theo Li et al., (2020) [159], việc bón Si có thể tăng sinh khối khô của rom rạ và chỉ tiêu sinh trưởng sinh dưỡng.

Bón Si làm tăng sinh khối khô của hạt lúa và rom rạ lên 24 và 30% so với đất không được cải tạo ở giai đoạn sinh sản của lúa (Limmer et al., 2023) [167]. Si là một chất dinh dưỡng quan trọng giúp giảm bớt tác hại phi sinh học ở thực vật bằng cách cải thiện các quá trình lý hóa của cây. Trong nghiên cứu này, ảnh hưởng tương tác của Si và TSH đã cải thiện năng suất cây trồng so với việc chỉ sử dụng Si hoặc TSH. Ảnh hưởng tương tác này là do vai trò sinh học của Si (Li et al., 2019c) [165] và có lợi cho sinh khối cây lúa nên sẽ làm tăng năng suất.

c. Khả năng hấp thu Si ở cây lúa

Liều lượng Si và TSH có tác động đáng kể ($p < 0,05$) đến sự hấp thu Si của lúa (Bảng 3.11). Sự hấp thu và tích lũy Si trong thân lá lúa tăng lên theo liều lượng Si và TSH, từ đó làm tăng tổng sinh khối. Tất cả các lượng bón Si và TSH đều có tác động đáng kể đến sự hấp thu Si của lúa khi so sánh với ĐC; tuy nhiên, không có sự khác biệt có ý nghĩa thống kê giữa các dạng bón TSH khác nhau. Hấp thu Si lớn hơn (0,18 - 0,20 g/cây) khi bón lượng phân Si cao nhất (CT5) so với ĐC (CT1) và các lượng Si thấp hơn. Sự tích lũy Si trong lúa có khác biệt đáng kể ($p < 0,05$) so với ĐC ở tất cả các liều lượng TSH. Lúa có thể hấp thu Si theo cả cách chủ động và thụ động, mặc dù quá trình hấp thu có thể bị ức chế rất nhiều bởi nhiệt độ thấp hoặc chất ức chế chuyển hóa (Sun et al., 2016) [233].

Những kết quả trong nghiên cứu này phù hợp với các nghiên cứu trước đây vì có mối tương quan tuyến tính dương đáng kể ($p < 0,05$) giữa lượng Si được bón và lượng Si hấp thu của cây. Hơn nữa, sự tương tác của TSH với Si cũng rất quan trọng vì TSH làm tăng pH của đất, tạo điều kiện thuận lợi cho quá trình hấp thu Si (Sirisuntornlak et al., 2021) [227]. Bón phân Si có thể làm tăng lượng Si dễ tiêu trong đất và tăng cường hệ thống rễ, dẫn đến cây hấp thu nhiều Si hơn từ dung dịch đất (Pati et al., 2016) [193]. Sự hấp thu Si được tăng cường đáng kể nhờ việc bón phân Si (Swe

et al., 2021) [235]. TSH được chế biến từ các loại cây trồng giàu Si, chẳng hạn như rơm lúa và lúa mì, có thể chứa nồng độ Si phytolith cao hơn, đây là nguồn Si khả dụng tiềm năng cho cây trồng (Rizwan et al., 2019) [214].

Bảng 3.11. Ảnh hưởng của liều lượng phân Si và than sinh học đến khả năng hấp thu Si của cây lúa ở thí nghiệm nhà lưới

CT	Dạng vật liệu	Liều lượng	Vụ xuân 2023			Vụ xuân hè 2023		
			Sinh khối khô thân lá cây (g/cây)	Hàm lượng Si trong cây (mg/g)	Hàm lượng Si hấp thu trong cây (g/cây)	Sinh khối khô thân lá cây (g/cây)	Hàm lượng Si trong cây (mg/g)	Hàm lượng Si hấp thu trong cây (g/cây)
CT1	SiO ₂ (mg/kg)	0 (ĐC)	2,39 ^e	17,1 ^f	0,04 ^e	2,91 ^g	19,2 ^e	0,06 ^e
CT2		30	3,71 ^d	19,3 ^{ef}	0,07 ^e	3,51 ^{fg}	20,4 ^{de}	0,07 ^e
CT3		60	6,32 ^{bc}	22,4 ^{de}	0,14 ^{cd}	4,82 ^{cd}	24,4 ^c	0,12 ^c
CT4		90	6,29 ^{bc}	25,2 ^{a-d}	0,16 ^{bc}	5,24 ^{bc}	26,5 ^{bc}	0,14 ^b
CT5		120	6,18 ^{bc}	22,8 ^{de}	0,20 ^a	5,94 ^{ab}	30,3 ^a	0,18 ^a
CT6	TSH giàu Si từ vỏ trấu (g/kg)	5	6,64 ^{ab}	23,5 ^{cd}	0,12 ^d	3,83 ^{ef}	24,7 ^c	0,09 ^d
CT7		10	7,13 ^a	24,8 ^{bcd}	0,17 ^{ab}	4,62 ^{cd}	26,5 ^{bc}	0,13 ^{bc}
CT8		15	7,11 ^a	27,1 ^a	0,19 ^a	5,57 ^a	28,4 ^{ab}	0,14 ^b
CT9	TSH giàu Si từ vỏ lạc (g/kg)	5	5,79 ^c	22,4 ^{de}	0,13 ^d	3,12 ^g	23,7 ^{cd}	0,07 ^e
CT10		10	5,88 ^c	25,6 ^{a-d}	0,15 ^{bcd}	4,35 ^{de}	26,4 ^{bc}	0,11 ^c
CT11		15	5,84 ^c	26,3 ^{ab}	0,16 ^{bcd}	5,24 ^{bc}	26,6 ^{bc}	0,12 ^b
HSD _{0,05}			0,67	3,51	0,03	0,68	0,32	0,02

Ghi chú: Các công thức có cùng ký tự trong cùng một cột không có sai khác ý nghĩa về mặt thống kê ở khoảng tin cậy 95%.

Hàm lượng Si trong thân lúa mì được nâng cao nhờ TSH từ rơm lúa (Abbas et al., 2017) [73]. Nồng độ Si trong lúa được nâng cao bằng cách bón TSH làm từ rơm lúa mì và trấu (Patil et al., 2018) [194] và có sự khác biệt về sinh khối ($p < 0,05$) so với ĐC. TSH giàu Si có hiệu quả hơn TSH có hàm lượng Si trung bình và thấp trong việc tăng khả năng hấp thu Si trong đất, dẫn đến lúa hấp thu Si nhiều hơn và năng suất, sinh khối lúa được cải thiện (Ratnadass et al., 2023) [206].

d. Một số tính chất hóa học của đất trước và sau thí nghiệm

Bảng 3.12. Ảnh hưởng của liều lượng phân Si và than sinh học đến một số tính chất hóa học của đất trước và sau thí nghiệm nhà lưới ở vụ xuân hè 2023

CT	Dạng vật liệu	Lượng bón	pH _{KCl}	OM (%)	CEC (meq/100 g)	SiO _{2ts} (%)	SiO _{2dt} (g/kg)
TTN		-	4,32	3,30	10,23	25,31	9,09
CT1	SiO ₂ (mg/kg)	0 (ĐC)	4,87	3,53	9,58	26,1	8,2
CT2		30	4,83	3,57	9,67	29,5	10,1
CT3		60	4,87	3,58	9,69	30,4	11,5
CT4		90	4,95	3,69	9,76	34,4	15,6
CT5		120	5,02	3,71	9,78	35,6	16,4
CT6	TSH giàu Si từ vỏ trấu (g/kg)	5	4,94	3,68	9,70	28,1	9,4
CT7		10	4,97	3,73	9,79	29,9	12,4
CT8		15	4,94	3,79	9,89	30,6	16,5
CT9	TSH giàu Si từ vỏ lạc (g/kg)	5	5,02	3,60	9,65	25,3	9,1
CT10		10	5,05	3,69	9,70	26,6	11,5
CT11		15	5,15	3,71	9,78	27,7	14,7

Ghi chú: TTN là trước thí nghiệm.

Qua Bảng 3.12 cho thấy:

pH_{KCl}: pH_{KCl} ở các công thức thí nghiệm có sự dao động trong khoảng từ 4,83 - 5,15, thấp nhất ở công thức bón 30 mg SiO₂/kg đất (CT2) và cao nhất ở công thức bón 15 g TSH giàu Si từ vỏ lạc/kg đất (CT11). pH_{KCl} ở các công thức tăng tỉ lệ thuận với lượng TSH giàu Si từ vỏ trấu và vỏ lạc, so với đất trước thí nghiệm, ở các công thức

đều có pH_{KCl} tăng lên, có thể do phân Si và TSH có tính kiềm (pH từ 7,56 - 7,89) (Ramamoorthy and Porkodi, 2024) [203].

OM: Hàm lượng OM dao động trong khoảng từ 3,53 - 3,79%, cao nhất ở công thức bón 15g TSH giàu Si từ vỏ trấu/kg đất (CT8) và thấp nhất ở công thức ĐC (CT1). Hàm lượng OM của các công thức tăng tỉ lệ thuận với lượng phân bón Si và lượng TSH giàu Si từ vỏ trấu và vỏ lạc. Kết quả nghiên cứu của Ernest et al. (2024) [116] cũng chỉ ra rằng bổ sung TSH làm tăng đáng kể lượng carbon hữu cơ trong đất.

CEC: Các công thức thí nghiệm có CEC cao nhất ở công thức bón 15 g TSH giàu Si từ vỏ trấu/kg đất (CT8) và thấp nhất ở công thức ĐC (CT1). CEC của các công thức tăng tỉ lệ thuận với lượng phân bón Si và lượng TSH giàu Si từ vỏ trấu và vỏ lạc. Nhiều nghiên cứu đã báo cáo rằng TSH cải thiện chất lượng đất bằng cách tăng khả năng trao đổi cation (CEC) (Yao et al., 2022 [257]; Dey et al., 2023 [106]).

Si tổng số và dễ tiêu: kết quả phân tích cho thấy hàm lượng Si tổng số và dễ tiêu đạt cao nhất vẫn là ở công thức bón 120 mg SiO_2 /kg đất (CT5). Các công thức bón TSH giàu Si từ vỏ trấu có hàm lượng Si tổng số và dễ tiêu cao hơn các công thức bón TSH giàu Si từ vỏ lạc (Ramamoorthy and Porkodi, 2024) [203]. So với đất trước thí nghiệm, hàm lượng Si tổng số và dễ tiêu có tăng lên, điều này là do bón bổ sung phân Si hóa học và TSH giàu Si (12,66 - 27,22% Si).

Tóm lại: Bón phân Si và TSH giàu Si từ phụ phẩm cây trồng ảnh hưởng đến sự tích lũy chất khô và hấp thu Si trong thân lá lúa. Hợp chất khô và sự hấp thu Si cao nhất ở liều lượng 120 mg SiO_2 /kg đất và 15 g/kg đất với TSH từ vỏ trấu và vỏ lạc, nhưng đạt cao hơn ở TSH từ vỏ trấu. Do đó, TSH từ vỏ trấu và vỏ lạc được coi là nguồn cung cấp Si dễ tiêu tiềm năng cho cây lúa. Nghiên cứu sâu hơn sẽ được tiến hành trong điều kiện thực tế trên đồng ruộng.

3.3.2.2. Nghiên cứu ảnh hưởng của dạng và liều lượng than sinh học giàu Si từ vỏ trấu và vỏ lạc đến sinh trưởng, phát triển của lúa

a. Diện tích lá và chỉ số diện tích lá của cây lúa

Kết quả ở Bảng 3.13 cho thấy: Tăng lượng TSH từ vỏ trấu và vỏ lạc dẫn đến tăng diện tích lá và chỉ số diện tích lá. Với lượng bón 5% ở cả hai dạng TSH từ vỏ trấu và vỏ lạc, diện tích lá và chỉ số diện tích lá cao nhất lần lượt là 31,65 - 34,45 cm^2 và 0,64 - 0,69 m^2 lá/ m^2 đất vào vụ xuân và 32,12 - 35,23 cm^2 và 0,67 - 0,71 m^2 lá/ m^2 vào vụ xuân hè. Diện tích lá và chỉ số diện tích lá cao nhất ở lượng bón TSH từ vỏ trấu là 15 g/kg đất, cao hơn so với đối chứng từ 9,83 đến 10,2 cm^2 và 0,19 đến 0,20 m^2 lá/ m^2 .

Bảng 3.13. Ảnh hưởng của than sinh học giàu Si từ vỏ trấu và vỏ lạc đến diện tích lá và chỉ số diện tích lá của cây lúa ở thí nghiệm trong nhà lưới

CT	Dạng TSH	Liều lượng (g/kg đất)	Vụ xuân 2023		Vụ xuân hè 2023	
			Diện tích lá (cm ²)	Chỉ số diện tích lá (m ² lá/m ² đất)	Diện tích lá (cm ²)	Chỉ số diện tích lá (m ² lá/m ² đất)
CT1	TSH giàu Si từ vỏ trấu	0 (ĐC)	24,62 ^d	0,49 ^a	25,02 ^c	0,52 ^b
CT2		2,5	25,37 ^{cd}	0,51 ^a	26,23 ^c	0,56 ^{ab}
CT3		5,0	26,98 ^{cd}	0,54 ^a	27,87 ^{bc}	0,60 ^{ab}
CT4		7,5	27,23 ^{cd}	0,55 ^a	28,12 ^{bc}	0,62 ^{ab}
CT5		10,0	28,23 ^{bd}	0,56 ^a	29,13 ^{bc}	0,66 ^{ab}
CT6		15,0	34,45 ^a	0,69 ^a	35,23 ^a	0,71 ^a
CT7	TSH giàu Si từ vỏ lạc	0 (ĐC)	24,22 ^d	0,48 ^a	24,87 ^c	0,50 ^b
CT8		2,5	24,54 ^d	0,49 ^a	25,02 ^c	0,54 ^{ab}
CT9		5,0	25,72 ^{cd}	0,52 ^a	26,12 ^c	0,58 ^{ab}
CT10		7,5	25,54 ^{cd}	0,51 ^a	24,34 ^c	0,62 ^{ab}
CT11		10,0	26,77 ^{cd}	0,54 ^a	27,43 ^{bc}	0,65 ^{ab}
CT12		15,0	31,65 ^{ab}	0,64 ^a	32,12 ^{ab}	0,67 ^{ab}
HSD _{0,05}			1,78	0,04	5,26	0,18

Ghi chú: Các công thức có cùng ký tự trong cùng một cột không có sai khác ý nghĩa về mặt thống kê ở khoảng tin cậy 95%.

Cedeño et al. (2024) [95] cho thấy bón TSH từ vỏ trấu cho lúa với tỷ lệ cao (5%) có diện tích lá trung bình cao nhất. Tỷ lệ bón tối ưu khác nhau giữa các loại TSH đã chứng minh TSH có tác động đến thành phần khối lượng của cây. Kết quả này phù hợp với những phát hiện của Bebeley et al. (2021) [92] cho thấy diện tích lá tăng lên do bón TSH. Guo et al. (2023) [122] cho thấy đất được bổ sung TSH có chỉ số diện tích lá cao hơn đáng kể ($p < 0,05$) so với công thức đối chứng. Islam et al. (2018) [138] và Khan et al. (2022) [150] báo cáo chỉ số diện tích lá của ngô tăng đáng kể khi có bón TSH. Ahmad et al. (2020) [81] cũng chỉ ra bón TSH tăng diện tích lá/cây (171,99 cm²) và chỉ số diện tích lá (6,48).

b. Sinh khối tươi và khô của cây lúa

Kết quả xác định sinh khối tươi và khô của cây lúa được thể hiện ở Bảng 3.14.

Bảng 3.14. Ảnh hưởng của than sinh học giàu Si từ vỏ trấu và vỏ lạc đến khả năng tích lũy sinh khối tươi và khô của cây lúa ở thí nghiệm nhà lưới

CT	Dạng TSH	Liều lượng (g/kg đất)	Sinh khối thân (g/cây)		Sinh khối rễ (g/cây)	
			Tươi	Khô	Tươi	Khô
I	Vụ Xuân 2023					
CT1	TSH giàu Si từ vỏ trấu	0 (ĐC)	9,89 ^{ab}	2,25 ^{ab}	2,63 ^a	0,46 ^a
CT2		2,5	10,27 ^{ab}	2,29 ^{ab}	2,68 ^a	0,48 ^a
CT3		5,0	11,78 ^{ab}	2,49 ^{ab}	2,76 ^a	0,56 ^a
CT4		7,5	11,57 ^{ab}	2,44 ^{ab}	2,73 ^a	0,54 ^a
CT5		10,0	12,02 ^{ab}	2,51 ^{ab}	2,81 ^a	0,58 ^a
CT6		15,0	12,40 ^a	2,86 ^a	2,86 ^a	0,63 ^b
CT7	TSH giàu Si từ vỏ lạc	0 (ĐC)	9,83 ^b	2,19 ^b	2,61 ^a	0,45 ^a
CT8		2,5	10,19 ^{ab}	2,26 ^{ab}	2,65 ^a	0,46 ^a
CT9		5,0	10,31 ^{ab}	2,29 ^{bcd}	2,69 ^a	0,52 ^a
CT10		7,5	11,33 ^{ab}	2,38 ^{ab}	2,79 ^a	0,56 ^a
CT11		10,0	11,45 ^{ab}	2,40 ^{ab}	2,76 ^a	0,55 ^a
CT12		15,0	11,53 ^{ab}	2,41 ^{ab}	2,81 ^a	0,61 ^{ab}
HSD _{0,05}		-	0,41	0,26	0,13	0,05
II	Vụ xuân hè 2023					
CT1	TSH giàu Si từ vỏ trấu	0 (ĐC)	10,24 ^{de}	2,34 ^a	2,89 ^a	0,48 ^{de}
CT2		2,5	11,25 ^{b-e}	2,41 ^a	2,92 ^a	0,51 ^{b-e}
CT3		5,0	10,89 ^{cde}	2,51 ^a	3,01 ^a	0,59 ^{a-e}
CT4		7,5	12,45 ^{abc}	2,55 ^a	3,12 ^a	0,67 ^{abc}

CT	Dạng TSH	Liều lượng (g/kg đất)	Sinh khối thân (g/cây)		Sinh khối rễ (g/cây)	
			Tươi	Khô	Tươi	Khô
CT5		10,0	13,21 ^{ab}	2,67 ^a	3,23 ^a	0,69 ^{ab}
CT6		15,0	13,45 ^a	2,97 ^a	3,43 ^a	0,72 ^a
CT7	TSH giàu Si từ vỏ lạc	0 (ĐC)	10,11 ^e	2,24 ^a	2,78 ^a	0,46 ^e
CT8		2,5	10,89 ^{cde}	2,32 ^a	2,84 ^a	0,49 ^{cde}
CT9		5,0	11,34 ^{a-e}	2,45 ^a	2,97 ^a	0,54 ^{a-e}
CT10		7,5	11,98 ^{a-e}	2,54 ^a	3,12 ^a	0,59 ^{a-e}
CT11		10,0	12,32 ^{a-d}	2,57 ^a	3,21 ^a	0,64 ^{a-e}
CT12		15,0	12,56 ^{abc}	2,67 ^a	3,32 ^a	0,65 ^{a-d}
HSD _{0,05}		-	2,11	1,16	1,31	0,18

Ghi chú: Các công thức có cùng ký tự trong cùng một cột không có sai khác ý nghĩa về mặt thống kê ở khoảng tin cậy 95%.

Sinh khối tươi của thân rễ lúa có sự thay đổi đáng kể ở các dạng và lượng bón TSH khác nhau. Cùng lượng bón 15g TSH giàu Si/kg đất từ vỏ trấu (CT6) và vỏ lạc (CT12) đều có sinh khối tươi cao hơn 17 - 25% và 24 - 32% so với ĐC (CT1, CT7) ở vụ xuân và vụ xuân hè, tiếp theo là lượng bón 2,5 - 10,0 g/kg đất. Không có sự khác biệt thống kê nào về sinh khối tươi giữa hai dạng TSH ở cùng lượng bón. Tương tự như vậy, sinh khối khô của thân rễ lúa cũng có sự khác biệt đáng kể khi bón các dạng và lượng TSH và tăng theo lượng bón.

Sinh khối khô cũng đạt cao nhất ở lượng bón 15g TSH giàu Si từ vỏ trấu (CT6) và vỏ lạc (CT12), dao động từ 2,40 - 2,86 g/cây ở vụ xuân và 2,67 - 2,97 g/cây vào vụ xuân hè. Không tìm thấy sự khác biệt đáng kể nào đối với sinh khối tươi và khô ở rễ khi bón TSH giàu Si từ vỏ trấu và vỏ lạc. Trong nghiên cứu này, sinh khối tươi và khô của thân lá tăng theo lượng bón TSH. Lý do cho những kết quả này là TSH đã tăng diện tích lá và chỉ số diện tích lá, nên có thể tăng khả năng quang hợp, do đó làm tăng sinh khối khô (Jaswal et al., 2022) [141]. Tương tự như vậy, việc bón TSH làm tăng khối lượng sinh khối thân lá ở nhiều loại cây trồng (Ahmad et al., 2020 [81]; Guo et al., 2023) [122]; Novair et al., 2023 [187]).

c. Một số tính chất hoá học của đất trước và sau thí nghiệm

Bảng 3.15. Ảnh hưởng của than sinh học giàu Si từ vỏ trấu và vỏ lạc đến một số tính chất hóa học của đất trước và sau thí nghiệm nhà lưới ở vụ xuân hè 2023

CT	Dạng TSH	Liều lượng (g/kg đất)	pH _{KCl}	OM (%)	CEC (meq/100 g)	SiO ₂ (%)	SiO ₂ (g/kg)
TTN	-	-	4,32	3,30	10,23	25,31	9,09
CT1	TSH giàu Si từ vỏ trấu	0 (ĐC)	4,87	3,48	9,61	27,1	9,4
CT2		2,5	4,94	3,61	9,68	29,3	10,5
CT3		5,0	4,96	3,63	9,75	30,3	10,9
CT4		7,5	4,94	3,73	9,79	31,5	11,3
CT5		10,0	4,96	3,79	9,85	35,4	12,1
CT6		15,0	4,98	3,81	9,88	36,2	12,6
CT7	TSH giàu Si từ vỏ lạc	0 (ĐC)	4,78	3,54	9,60	26,3	9,4
CT8		2,5	4,98	3,62	9,65	26,2	9,8
CT9		5,0	4,99	3,60	9,71	28,3	10,6
CT10		7,5	5,09	3,61	9,82	29,4	11,1
CT11		10,0	5,07	3,64	9,84	29,6	12,2
CT12		15,0	5,17	3,70	9,86	32,3	12,5

Ghi chú: TTN là trước thí nghiệm.

Kết quả phân tích một số tính chất hoá học của đất trước và sau thí nghiệm được thể hiện ở Bảng 3.15 cho thấy:

pH_{KCl}: ở các công thức thí nghiệm có sự dao động trong khoảng từ 4,78 đến 5,17, có xu hướng thấp nhất ở CT7 (TSH giàu Si từ vỏ lạc) và xu hướng cao nhất ở CT12 (TSH giàu Si từ vỏ lạc). pH_{KCl} ở các công thức tăng tỉ lệ thuận với liều lượng bón các dạng TSH. Các công thức ở các dạng TSH với liều lượng 15 g/kg đất đều cao hơn so với liều lượng còn lại (Dan Tan et al., 2024) [103].

OM: Hàm lượng OM dao động trong khoảng từ 3,48 - 3,81% và có xu hướng cao nhất ở CT6 (TSH giàu Si từ vỏ trấu) và thấp nhất ở CT1 (TSH giàu Si từ vỏ trấu). Bón TSH giàu Si từ vỏ lạc với liều lượng 15 g/kg đất đều có hàm lượng OM cao hơn so

với liều lượng còn lại. Kết quả của Ebido et al. (2021) [114] đã kết luận bón 40g TSH từ vỏ trấu/chậu (tương đương với 60 tấn TSH/ha) cải thiện lớn nhất về chỉ số chất lượng đất đặc biệt carbon hữu cơ trong đất (SOC), nguyên nhân do TSH tác động đến môi trường carbon trong đất và sự phát triển của vi sinh vật đất.

SiO₂ tổng số và dễ tiêu: Hàm lượng SiO₂ tổng số và dễ tiêu lớn nhất ở CT6 (TSH giàu Si từ vỏ trấu) và thấp nhất ở CT7 (TSH giàu Si từ vỏ lạc). Nhìn chung, hàm lượng SiO₂ tổng số và dễ tiêu tăng dần theo lượng bón TSH. Kết quả này tương đồng với nghiên cứu của Abrishamkesh et al. (2015) [77], Karam et al. (2022) [147] về tác động của TSH giàu Si từ vỏ trấu hoặc vỏ lạc đến tăng hàm lượng Si trong đất.

d. Hàm lượng Cd và Pb tổng số và dễ tiêu trong đất

Kết quả Bảng 3.16 cho thấy có sự chênh lệch về hàm lượng Cd tổng số trong đất giữa các lượng bón từ 0 đến 15 g/kg đất ở dạng TSH từ vỏ trấu và vỏ lạc. Bón 2 loại TSH ở mức 15 g/kg đất đã làm giảm hàm lượng Cd xuống lần lượt là 0,98 mg/kg và 1,01 mg/kg. Thứ tự hiệu quả giảm hàm lượng Cd cao nhất đối với TSH giàu Si từ vỏ trấu (28,0%), tiếp theo là TSH giàu Si từ vỏ lạc (26,0%).

Cũng có sự khác biệt về hàm lượng Pb tổng số trong đất ở các lượng bón TSH khác nhau. Bón 15 g/kg đất ở cả hai dạng TSH, thứ tự giảm hàm lượng Pb được tìm thấy đối với TSH giàu Si từ vỏ trấu và vỏ lạc lần lượt là 24,32; 25,76 mg/kg (Bảng 3.16). Như vậy, bón TSH giàu Si từ vỏ trấu ở mức 15 g/kg đất làm giảm hàm lượng Pb trong đất xuống mức thấp nhất, hiệu quả giảm Pb trong đất cao nhất là 37,0%, tiếp theo là TSH giàu Si từ vỏ lạc (33,3%).

Bảng 3.16. Ảnh hưởng của than sinh học giàu Si từ vỏ trấu và vỏ lạc đến hàm lượng Cd và Pb trên đất trồng lúa ở vụ xuân hè 2023 trong thí nghiệm nhà lưới

CT	Dạng TSH	Liều lượng (g/kg đất)	Hàm lượng tổng số		Hàm lượng dễ tiêu	
			Cd (mg/kg)	Pb (mg/kg)	Cd (mg/kg)	Pb (mg/kg)
TTN	-	-	1,27	38,64	0,045	0,90
CT1	TSH giàu Si từ vỏ trấu	0 (ĐC)	1,26	38,62	0,041	0,89
CT2		2,5	1,20	31,12	0,035	0,72
CT3		5,0	1,14	26,78	0,032	0,65
CT4		7,5	1,09	26,23	0,024	0,58

CT	Dạng TSH	Liều lượng (g/kg đất)	Hàm lượng tổng số		Hàm lượng dễ tiêu	
			Cd (mg/kg)	Pb (mg/kg)	Cd (mg/kg)	Pb (mg/kg)
CT5		10,0	1,07	25,67	0,019	0,53
CT6		15,0	0,98	24,32	0,018	0,47
CT7	TSH giàu Si từ vỏ lạc	0 (ĐC)	1,27	38,63	0,042	0,89
CT8		2,5	1,22	33,45	0,037	0,75
CT9		5,0	1,16	27,89	0,035	0,68
CT10		7,5	1,11	26,45	0,028	0,61
CT11		10,0	1,08	26,02	0,022	0,60
CT12		15,0	1,01	25,76	0,020	0,55

Hàm lượng Cd và Pb dễ tiêu giảm xuống khi bón các dạng và lượng TSH khác nhau và hàm lượng Cd và Pb dễ tiêu cũng đạt mức thấp nhất ở lượng bón 15 g/kg đất tại cả hai dạng TSH (CT6 và CT12), đặc biệt ở dạng bón TSH giàu Si từ vỏ trấu có hàm lượng Cd và Pb thấp nhất là 0,018 và 0,47 mg/kg, theo thứ tự.

Tóm lại, bón TSH giàu Si từ vỏ trấu có hiệu quả hấp thu KLN cao nhất nên, giảm hàm lượng Cd trong đất là 28,0%, Pb trong đất là 37,0% so với ĐC. Các kết quả này cũng tương đồng với nghiên cứu của Zehui et al. (2022) [265] nghiên cứu về TSH từ vỏ trấu kết hợp với vôi cho thấy mức giảm của Cd trong đất khoảng 38,9% và trong hạt lúa là 38,5% so với ĐC. Asadi et al. (2021) [90] cũng quan sát thấy độc tính của Pb và Cd trong đất giảm sau khi bón TSH, trong đó sử dụng TSH từ rơm rạ (RSB) trên ba loại đất chua có sự gia tăng đáng kể khả năng hấp phụ Pb của đất khi được xử lý. Cơ chế hấp phụ chính là sự hình thành các phức chất bề mặt giữa các nhóm chức năng của TSH và Pb. Kết quả cũng cho thấy tiềm năng đáng kể của RSB trong việc cố định Pb và Cd trong đất chua.

e. Hàm lượng Si ($\text{SiO}_{2\text{ts}}$) và Cd, Pb tổng số trong cây lúa

Kết quả phân tích trong cây được thể hiện dưới Bảng 3.17.

Bảng 3.17. Ảnh hưởng của than sinh học giàu Si từ vỏ trấu và vỏ lạc đến hàm lượng Si (SiO_2) và Cd, Pb tổng số trong cây lúa ở vụ xuân hè 2023 ở thí nghiệm nhà lưới

CT	Dạng TSH	Liều lượng (g/kg đất)	Cd (mg/kg)	Pb (mg/kg)	SiO_2 . (%)
CT1	TSH giàu Si từ vỏ trấu	0,0	0,041	0,21	11,7
CT2		2,5	0,035	0,18	12,6
CT3		5,0	0,029	0,17	13,1
CT4		7,5	0,027	0,15	13,4
CT5		10,0	0,026	0,12	13,6
CT6		15,0	0,020	0,10	13,9
CT7	TSH giàu Si từ vỏ lạc	0,0	0,040	0,23	11,5
CT8		2,5	0,037	0,20	11,9
CT9		5,0	0,032	0,18	12,6
CT10		7,5	0,029	0,17	13,2
CT11		10,0	0,024	0,14	13,3
CT12		15,0	0,022	0,13	13,5

Hàm lượng Cd và Pb tổng số trong cây lúa giảm theo thứ tự sau: TSH giàu Si từ vỏ trấu < TSH giàu Si từ vỏ lạc khi bón cho cây lúa. Bón TSH giàu Si từ vỏ trấu và vỏ lạc ở lượng 15 g/kg đất (CT6 và CT12) đã làm giảm đáng kể hàm lượng Cd và Pb trong cây lúa trong đó bón TSH giàu Si từ vỏ trấu giảm hàm lượng Cd và Pb lần lượt là 14,6 - 51,2% và 14,3 - 52,4% so với ĐC (Yaofeng et al., 2020) [258]. Tương tự như vậy, việc bón TSH giàu Si từ vỏ lạc giảm hàm lượng Cd và Pb lần lượt là 7,5 - 45,0%, 14,3 - 43,0%. Chen et al. (2023) [99] chỉ ra rằng việc sử dụng TSH cho đất làm giảm đáng kể sự tích tụ Cd, Pb, trong cây lúa.

Hàm lượng Si tổng số ($\text{SiO}_{2\text{ts}}$) trong cây lúa: Lượng Si tổng số cây hấp thu khi bón bổ sung TSH vào đất dao động từ 11,5 - 13,9%. Trong đó cao nhất ở CT6 (TSH

giàu Si từ vỏ trấu) và thấp nhất CT7 (TSH giàu Si từ vỏ lạc). Do TSH giàu Si từ vỏ trấu có hàm lượng Si (27,2%) cao hơn so với TSH giàu Si từ vỏ lạc (12,6%), dẫn đến sự tích lũy Si tổng số trong cây lúa cao hơn, kết quả này cũng tương đồng với nghiên cứu của Wang et al. (2018) [241].

Bảng 3.18. Hệ số tương quan giữa hàm lượng Si trong cây và hàm lượng Cd, Pb
($n = 12$)

TT	Nguyên tố	SiO ₂ (%)	Cd (mg/kg)	Pb (mg/kg)
1	SiO ₂ (%)	1,00		
2	Cd (mg/kg)	- 0,96**	1,00	
3	Pb (mg/kg)	- 0,91**	0,93**	1,00

Ghi chú: ** tương quan rất có ý nghĩa ($p < 0,01$).

Kết quả Bảng 3.18 cho thấy có sự tương quan nghịch rất chặt rất có ý nghĩa giữa hàm lượng Si trong cây và Cd, Pb ($r = 0,91 - 0,96$), điều này có nghĩa là lượng Si trong cây tăng lên thì hàm lượng Cd và Pb trong cây giảm xuống. Như vậy cung cấp vật liệu TSH giàu Si có vai trò làm giảm hàm lượng Cd, Pb tích lũy trong đất và trong cây. Kết quả nghiên cứu của Su et al. (2023) [232] cho thấy tăng lượng Si đóng vai trò then chốt trong việc tăng cường hấp thụ và sử dụng các chất dinh dưỡng thiết yếu cho cây trồng, đồng thời làm giảm đáng kể sự tích tụ Cd trong cây lúa.

Tóm lại: Dạng và liều lượng TSH giàu Si từ vỏ trấu và vỏ lạc có tác động đến sinh trưởng, khối lượng vật chất khô của lúa và hàm lượng KLN trong đất. Sinh khối khô của lúa tích lũy cao nhất đạt được ở lượng bón 15 g/kg đất trên cả hai loại TSH trong hai vụ. Hàm lượng Si trong đất cũng được cải thiện khi lượng bón TSH tăng lên và các xu hướng cao nhất ở lượng bón 15g TSH/kg đất. Hàm lượng KLN (Cd và Pb) cũng có xu hướng thấp nhất tại lượng bón 15g TSH/kg đất. TSH từ vỏ trấu và vỏ lạc là vật liệu tốt để tăng sinh khối khô của lúa và giảm KLN trong đất. Nghiên cứu sâu được tiến hành trong điều kiện đồng ruộng.

3.3.3. Kết quả thí nghiệm trên đồng ruộng

3.3.3.1. Ảnh hưởng của than sinh học giàu Si từ vỏ trấu và vỏ lạc đến thời gian sinh trưởng và phát triển của lúa

Thời gian sinh trưởng và phát triển của cây trồng, đặc biệt là cây lúa, chủ yếu do yếu tố di truyền quyết định. Tuy nhiên, trong những điều kiện canh tác khác nhau, thời gian này cũng có sự thay đổi do ảnh hưởng của nhiều yếu tố, đặc biệt là chế độ phân bón và thời vụ. Việc nghiên cứu quá trình sinh trưởng và phát triển của cây lúa qua từng giai

đoạn là cơ sở quan trọng để xác định thời vụ phù hợp và áp dụng các biện pháp kỹ thuật thích hợp nhằm nâng cao hiệu quả canh tác (Trịnh Thị Sen, 2023) [43].

Bảng 3.19. Ảnh hưởng của than sinh học giàu Si từ vỏ trấu và vỏ lạc đến thời gian sinh trưởng và phát triển của cây lúa ở thí nghiệm đồng ruộng

CT	Vụ hè thu 2023 (ngày)				Vụ xuân 2024 (ngày)			
	Thời gian từ gieo đến...			Tổng TGSTPT	Thời gian từ gieo đến...			Tổng TGSTPT
	Bắt đầu để nhánh	Kết thúc để nhánh	Trổ bông		Bắt đầu để nhánh	Kết thúc để nhánh	Trổ bông	
CT1 (ĐC1)	28	58	66	95	28	48	80	110
CT2 (ĐC2)	26	55	64	93	27	51	81	111
CT3	26	54	65	90	26	51	83	113
CT4	25	54	66	92	25	52	84	115
CT5	25	53	67	91	28	49	81	111
CT6	25	53	65	91	27	53	83	112

Ghi chú: CT1: 100 kg N + 60 kg P₂O₅ + 70 kg K₂O + 500 kg vôi/ha; CT2: 5 tấn phân chuồng + 100 kg N + 60 kg P₂O₅ + 70 kg K₂O + 500 kg vôi/ha; CT3: 10 tấn TSH giàu Si từ vỏ trấu/ha + 500 kg vôi; CT4: 15 tấn TSH giàu Si từ vỏ trấu/ha + 500 kg vôi; CT5: 10 tấn TSH giàu Si từ vỏ lạc/ha + 500 kg vôi; CT6: 15 tấn TSH giàu Si từ vỏ lạc/ha + 500 kg vôi;

Kết quả ở Bảng 3.19 cho thấy:

Giai đoạn từ gieo sạ đến bắt đầu đẻ nhánh: Giai đoạn này đóng vai trò then chốt trong vòng đời cây lúa, ảnh hưởng trực tiếp đến năng suất và chất lượng mùa vụ. Trong suốt quá trình, cây lúa trải qua những biến đổi sinh lý và Hình thái phức tạp để sẵn sàng bước vào thời kỳ sinh sản (Trịnh Thị Sen, 2023) [43]. Theo dõi thực tế cho thấy, thời gian từ khi gieo đến khi bắt đầu đẻ nhánh ở các công thức có thời gian sinh trưởng dao động từ 25 đến 28 ngày. Đáng chú ý, CT4 (15 tấn TSH giàu Si từ vỏ trấu + 500 kg vôi/ha) có thời gian đẻ nhánh 25 ngày, trong khi CT1 (100 kg N + 60 kg P₂O₅ + 70 kg K₂O/ha + 500 kg vôi/ha) có thời gian đẻ nhánh 28 ngày ở cả hai vụ.

Giai đoạn từ gieo sạ đến kết thúc đẻ nhánh: Đây là một trong những giai đoạn quan trọng nhất trong vòng đời cây lúa, đánh dấu sự chuyển tiếp từ sinh trưởng dinh dưỡng sang sinh trưởng sinh thực. Trong thời gian này, cây lúa phát triển mạnh mẽ, Hình thành hệ thống lá, rễ và nhánh, tạo tiền đề quan trọng cho năng suất vụ mùa (Trịnh Thị Sen, 2023) [43]. Số liệu theo dõi cho thấy, thời gian từ khi gieo đến khi kết thúc đẻ nhánh dao động từ 53 đến 58 ngày ở vụ hè thu 2023 và từ 48 đến 53 ngày ở vụ xuân 2024. Cụ thể, trong vụ hè thu 2023, CT5 (10 tấn TSH giàu Si từ vỏ lạc + 500 kg vôi/ha) và CT6 (15 tấn TSH giàu Si từ vỏ lạc + 500 kg vôi/ha) (53 ngày), trong khi CT1 (100 kg N + 60 kg P_2O_5 + 70 kg K_2O /ha + 500 kg vôi/ha) (58 ngày). Ngược lại, ở vụ xuân 2024, CT1 (48 ngày), còn CT6 (53 ngày).

Giai đoạn từ gieo sạ đến trổ bông: là giai đoạn cây lúa hoàn tất sinh trưởng sinh dưỡng và chính thức bước vào thời kỳ sinh sản. Lúc này, quá trình thụ phấn diễn ra, các hạt phấn kết hợp với noãn để Hình thành hạt lúa, quyết định trực tiếp đến năng suất và chất lượng thu hoạch (Trịnh Thị Sen, 2023) [43]. Số liệu Bảng 3.19 cho thấy, thời gian kết thúc trổ của các công thức ở vụ hè thu 2023 dao động từ 64 đến 67 ngày, trong đó CT4 (10 tấn TSH giàu Si từ vỏ trấu + 500 kg vôi/ha) (67 ngày) và CT2 (5 tấn phân chuồng + 100 kg N + 60 kg P_2O_5 + 70 kg K_2O + 500 kg vôi/ha) (64 ngày). Đối với vụ xuân 2024, khoảng thời gian này kéo dài từ 80 đến 84 ngày, với CT4 (84 ngày) và CT1 (80 ngày).

Tổng thời gian sinh trưởng: Thời gian sinh trưởng, phát triển dao động từ 91 - 95 ngày trong vụ hè thu và 110 - 115 ngày trong vụ đông xuân. CT1 (100 kg N + 60 kg P_2O_5 + 70 kg K_2O + 500 kg vôi/ha) (ĐC1) có thời gian sinh trưởng là 110 ngày trong vụ xuân 2024, CT5 (10 tấn TSH giàu Si từ vỏ lạc + 500 kg vôi/ha) và CT6 (15 tấn TSH giàu Si từ vỏ lạc + 500 kg vôi/ha) có thời gian sinh trưởng là 91 ngày trong vụ hè thu 2023. Có sự chênh lệch 5 ngày giữa CT1 và CT3 (10 tấn TSH giàu Si từ vỏ trấu + 500 kg vôi/ha) trong vụ hè 2023 và giữa CT1 và CT4 (15 tấn TSH giàu Si từ vỏ trấu + 500 kg vôi/ha) trong vụ xuân 2024.

So với vụ hè thu 2023, vụ xuân 2024 chịu tác động của nhiều yếu tố, đặc biệt là điều kiện thời tiết và khí hậu, khiến thời gian sinh trưởng và phát triển của từng giai đoạn cũng như toàn bộ chu kỳ sinh trưởng của giống kéo dài hơn. Do đó, tổng thời gian sinh trưởng và phát triển trong vụ xuân dài hơn khoảng 20 ngày so với vụ hè thu.

Như vậy liều lượng và dạng TSH có ảnh hưởng đến thời gian sinh trưởng, phát triển của từng giai đoạn và tổng thời gian sinh trưởng, phát triển của lúa. Kết quả này tương đồng với nghiên cứu của Đỗ Minh Cường (2022) [5].

3.3.3.2. Ảnh hưởng của than sinh học giàu Si từ vỏ trấu và vỏ lạc đến chiều cao cây và số lá xanh còn lại sau khi thu hoạch lúa

Chiều cao cây là một chỉ tiêu quan trọng phản ánh quá trình sinh trưởng và phát triển của cây lúa. Đây cũng là yếu tố đánh giá tổng thể sự phát triển của cây lúa dưới các mức phân bón khác nhau của TSH, đồng thời thể hiện quá trình tăng trưởng của thân lá từ khi nảy mầm đến giai đoạn Hình thành đọt, vươn lóng và trổ bông hoàn toàn. Chiều cao cây có mối liên hệ chặt chẽ với khả năng chống đổ ngã và năng suất lúa. Nhiều nghiên cứu đã chỉ ra rằng chiều cao cây tương quan thuận với nguy cơ đổ ngã nhưng lại có mối tương quan nghịch với năng suất. Vì vậy, đây là một trong những tiêu chí quan trọng được các nhà chọn tạo giống quan tâm nhằm phát triển các giống lúa có năng suất cao và phẩm chất tốt. Ngoài ra, chiều cao cây còn phản ánh khả năng chịu thâm canh của cây lúa (Trịnh Thị Sen, 2023) [43].

Bảng 3.20. Ảnh hưởng của than sinh học giàu Si từ vỏ trấu và vỏ lạc đến chiều cao cây và số lá xanh khi thu hoạch của cây lúa ở thí nghiệm đồng ruộng

CT	Vụ hè thu 2023				Vụ xuân 2024			
	Chiều cao cây ở giai đoạn (cm)			Số lá xanh khi thu hoạch (lá)	Chiều cao cây ở giai đoạn (cm)			Số lá xanh khi thu hoạch (lá)
	Bắt đầu đẻ nhánh (25 ngày sau gieo)	Kết thúc đẻ nhánh (53 ngày sau gieo)	Thu hoạch (90 ngày sau gieo)		Bắt đầu đẻ nhánh (25 ngày sau gieo)	Kết thúc đẻ nhánh (48 ngày sau gieo)	Thu hoạch (110 ngày sau gieo)	
CT1 (ĐC1)	28,9 ^b	69,7 ^{ab}	94,8 ^{bc}	3,0 ^{ab}	28,3 ^{ab}	79,0 ^a	98,7 ^{ab}	3,1 ^{ab}
CT2 (ĐC2)	30,9 ^a	70,7 ^a	97,6 ^a	3,2 ^a	29,0 ^a	79,0 ^a	99,3 ^a	3,2 ^{ab}
CT3	28,3 ^b	67,1 ^c	92,9 ^d	2,7 ^b	27,3 ^{bc}	74,7 ^{bc}	98,3 ^{ab}	3,3 ^a
CT4	28,7 ^b	68,7 ^{bc}	93,3 ^{cd}	2,9 ^{ab}	26,3 ^c	77,3 ^{ab}	98,7 ^{ab}	3,3 ^a
CT5	27,8 ^b	67,9 ^{bc}	94,3 ^{bcd}	2,9 ^{ab}	27,0 ^{bc}	75,7 ^{bc}	98,7 ^{ab}	3,2 ^{ab}
CT6	28,6 ^b	67,7 ^c	95,1 ^b	2,9 ^{ab}	27,0 ^{bc}	74,3 ^c	96,7 ^b	3,0 ^b
HSD _{0,05}	1,6	1,9	1,6	0,3	1,4	2,9	2,4	0,3

Ghi chú: Các công thức có cùng ký tự trong cùng một cột không có sai khác ý nghĩa về mặt thống kê ở khoảng tin cậy 95%. CT1: 100 kg N + 60 kg P₂O₅ + 70 kg K₂O + 500 kg vôi/ha; CT2: 5 tấn phân chuồng + 100 kg N + 60 kg P₂O₅ + 70 kg K₂O + 500 kg vôi/ha; CT3: 10 tấn TSH giàu Si từ vỏ trấu/ha + 500 kg vôi; CT4: 15 tấn TSH giàu Si từ vỏ trấu/ha + 500 kg vôi; CT5: 10 tấn TSH giàu Si từ vỏ lạc/ha + 500 kg vôi; CT6: 15 tấn TSH giàu Si từ vỏ lạc/ha + 500 kg vôi;

Kết quả ở Bảng 3.20 cho thấy:

Giai đoạn bắt đầu đẻ nhánh: Trong vụ hè thu 2023, CT2 (5 tấn phân chuồng + 100 kg N + 60 kg P_2O_5 + 70 kg K_2O + 500 kg vôi/ha) (ĐC2) đạt chiều cao 30,9 cm. Ngược lại, CT5 (10 tấn TSH giàu Si từ vỏ lạc + 500 kg vôi/ha) có chiều cao cây lúa thấp nhất (27,8 cm). Các CT còn lại có chiều cao cây lúa dao động từ 28,3 đến 28,9 cm, với sự chênh lệch không đáng kể. Sang vụ xuân 2024, chiều cao cây lúa nhìn chung thấp hơn so với vụ hè thu, có thể do điều kiện thời tiết lạnh hơn vào thời điểm gieo cấy. CT2 có chiều cao cao nhất (29,0 cm), trong khi CT4 (15 tấn TSH giàu Si từ vỏ trấu + 500 kg vôi/ha) thấp nhất (26,3 cm), phản ánh sự khác biệt trong giai đoạn đầu sinh trưởng.

Giai đoạn kết thúc đẻ nhánh: Trong vụ hè thu 2023, cây lúa ở CT2 (5 tấn phân chuồng + 100 kg N + 60 kg P_2O_5 + 70 kg K_2O + 500 kg vôi/ha) đạt chiều cao 70,7 cm. Ngược lại, CT3 (10 tấn TSH giàu Si từ vỏ trấu + 500 kg vôi/ha) có chiều cao thấp hơn (67,1 cm). Bước sang vụ xuân 2024, CT2 và CT1 đạt chiều cao giống nhau (79,0 cm). Trong khi đó, CT6 (15 tấn TSH giàu Si từ vỏ lạc + 500 kg vôi/ha) có chiều cao 74,3 cm, có khả năng bị ảnh hưởng bởi điều kiện thời tiết vụ xuân.

Giai đoạn thu hoạch: Chiều cao cuối cùng ở các công thức có sự sai khác có ý nghĩa về mặt thống kê ở xác suất 95%. Chiều cao trung bình cuối cùng của cây lúa ở vụ hè thu 2023 và vụ xuân 2024 ở các công thức dao động từ 92,9 - 97,6 cm và 96,7 - 99,3 cm, trong đó CT có chiều cao cao nhất ở vụ hè thu 2023 và vụ xuân 2024 lần lượt là CT2 (5 tấn phân chuồng + 100 kg N + 60 kg P_2O_5 + 70 kg K_2O + 500 kg vôi/ha) (97,60 và 99,3 cm), thấp nhất là CT3 (10 tấn TSH giàu Si từ vỏ trấu + 500 kg vôi/ha) (92,9 cm) và CT6 (15 tấn TSH giàu Si từ vỏ lạc + 500 kg vôi/ha) (96,7 cm). Kết quả này tương đồng với nghiên cứu của Nguyễn Hồng Sơn và Nguyễn Thị Nguyệt Thu (2015) [45].

Số lá xanh còn lại: Số lá xanh còn lại sau thu hoạch là một chỉ tiêu quan trọng phản ánh khả năng tích lũy chất khô vào hạt của cây lúa, đồng thời đóng vai trò nền tảng trong việc nâng cao năng suất. Khi số lượng lá xanh còn lại càng nhiều, quá trình quang hợp diễn ra mạnh mẽ hơn, giúp tích lũy dinh dưỡng tốt hơn, từ đó làm cho hạt thóc đầy đặn và chắc mẩy hơn (Lee et al., 2021) [156]. Số lá xanh còn lại giữa các CT có sự khác biệt có ý nghĩa thống kê ở mức xác suất 95%. Trong cả hai vụ, số lá xanh dao động trong khoảng 2,7 - 3,2 lá. Vụ hè thu 2023 ở CT2 có số lá xanh (3,2 lá), CT3 có số lá xanh (2,7 lá). Các CT còn lại số lá xanh dao động từ 2,9 - 3,0 lá, với sự chênh lệch không đáng kể. Vụ xuân 2024 ở CT3 và CT4 có số lá xanh (3,3 lá), CT6 có số lá xanh (3,0 lá). Nhìn chung, CT2 duy trì số lá xanh tốt trong vụ hè thu, CT3 và CT4 có lợi thế về số lá xanh trong vụ xuân.

3.3.3.3. Ảnh hưởng của than sinh học giàu Si từ vỏ trấu và vỏ lạc đến khả năng đẻ nhánh của lúa

Quá trình đẻ nhánh là một đặc tính sinh học quan trọng của cây lúa, ảnh hưởng trực tiếp đến số bông hữu hiệu và năng suất cuối cùng. Tuy nhiên, khả năng đẻ nhánh của lúa chịu tác động của nhiều yếu tố, bao gồm giống lúa, chế độ dinh dưỡng, mật độ gieo cấy, nguồn nước và điều kiện canh tác Nguyễn Hồng Sơn và Nguyễn Thị Nguyệt Thu (2015) [45].

Bảng 3.21. Ảnh hưởng của than sinh học giàu Si từ vỏ trấu và vỏ lạc đến số nhánh và tỉ lệ nhánh hữu hiệu của cây lúa ở thí nghiệm đồng ruộng

CT	Vụ hè thu 2023			Vụ xuân 2024		
	Số nhánh tối đa (nhánh)	Số nhánh hữu hiệu (nhánh)	Tỷ lệ nhánh hữu hiệu (%)	Số nhánh tối đa (nhánh)	Số nhánh hữu hiệu (nhánh)	Tỷ lệ nhánh hữu hiệu (%)
CT1 (ĐC1)	6,40 ^a	4,60 ^b	74,60 ^{ab}	9,00 ^{ab}	5,00 ^b	57,00 ^a
CT2 (ĐC2)	6,67 ^a	5,33 ^a	80,33 ^a	9,33 ^a	6,00 ^a	61,33 ^a
CT3	6,13 ^a	4,33 ^b	71,53 ^{bc}	8,33 ^{bc}	4,67 ^b	61,67 ^a
CT4	6,53 ^a	4,33 ^b	66,67 ^c	8,67 ^{abc}	4,67 ^b	56,00 ^a
CT5	6,60 ^a	4,47 ^b	67,87 ^{bc}	8,00 ^c	4,33 ^b	57,33 ^a
CT6	6,33 ^a	4,47 ^b	71,27 ^{bc}	8,33 ^{bc}	4,33 ^b	63,00 ^a
HSD _{0,05}	0,68	0,50	7,62	0,92	0,74	8,79

Ghi chú: Các công thức có cùng ký tự trong cùng một cột không có sai khác ý nghĩa về mặt thống kê ở khoảng tin cậy 95%. CT1: 100 kg N + 60 kg P₂O₅ + 70 kg K₂O + 500 kg vôi/ha; CT2: 5 tấn phân chuồng + 100 kg N + 60 kg P₂O₅ + 70 kg K₂O + 500 kg vôi/ha; CT3: 10 tấn TSH giàu Si từ vỏ trấu/ha + 500 kg vôi; CT4: 15 tấn TSH giàu Si từ vỏ trấu/ha + 500 kg vôi; CT5: 10 tấn TSH giàu Si từ vỏ lạc/ha + 500 kg vôi; CT6: 15 tấn TSH giàu Si từ vỏ lạc/ha + 500 kg vôi;

Kết quả ở Bảng 3.21 cho thấy: Tổng số nhánh lúa trong các công thức thí nghiệm dao động từ 6,13 đến 6,67 ở vụ hè thu năm 2023 và từ 8,00 đến 9,33 ở vụ xuân 2024, với sự khác biệt có ý nghĩa thống kê. Trong đó, CT2 (5 tấn phân chuồng + 100 kg N + 60 kg P_2O_5 + 70 kg K_2O + 500 kg vôi/ha) có tổng số nhánh đạt 6,67 nhánh ở vụ xuân và 9,33 nhánh ở vụ hè thu, CT3 (6,13 nhánh) và CT5 (8,00 nhánh) lần lượt ở vụ hè thu 2023 và vụ xuân 2024.

Số nhánh hữu hiệu là nhánh tạo bông chịu ảnh hưởng bởi dạng và lượng bón của TSH cũng như phân hữu cơ. Kết quả thí nghiệm cho thấy, số nhánh hữu hiệu của cây lúa dao động từ 4,33 đến 5,33 nhánh ở vụ hè thu 2023 và từ 4,33 đến 6,00 nhánh ở vụ xuân 2024. Trong đó, CT2 đạt giá trị 5,33 nhánh ở vụ hè thu và 6,00 nhánh ở vụ đông xuân. Ngược lại, số nhánh hữu hiệu ở CT3 (10 tấn TSH giàu Si từ vỏ trấu + 500 kg vôi/ha) và CT4 (15 tấn TSH giàu Si từ vỏ trấu + 500 kg vôi/ha) đạt 4,33 nhánh trong vụ hè thu, và ở CT5 (10 tấn TSH giàu Si từ vỏ lạc + 500 kg vôi/ha), CT6 (15 tấn TSH giàu Si từ vỏ lạc + 500 kg vôi/ha) (4,33 nhánh) trong vụ xuân.

Tỷ lệ nhánh hữu hiệu biến động rõ rệt giữa các công thức thí nghiệm. Trong vụ hè thu 2023: cây lúa ở CT2 (5 tấn phân chuồng + 100 kg N + 60 kg P_2O_5 + 70 kg K_2O + 500 kg vôi/ha) có tỷ lệ nhánh hữu hiệu đạt 80,33%, CT5 (10 tấn TSH giàu Si từ vỏ lạc + 500 kg vôi/ha) có tỷ lệ nhánh hữu hiệu đạt 66,67%. Vụ xuân 2024: CT3 (10 tấn TSH giàu Si từ vỏ trấu + 500 kg vôi/ha) đạt tỷ lệ nhánh hữu hiệu 61,67%, CT4 (15 tấn TSH giàu Si từ vỏ trấu + 500 kg vôi/ha) có tỷ lệ nhánh hữu hiệu (56,00%).

Sự chênh lệch về tỷ lệ nhánh hữu hiệu giữa hai vụ lúa do ảnh hưởng của điều kiện thời tiết, đặc biệt là nhiệt độ. Trong vụ hè thu, nhiệt độ cao hơn có thể thúc đẩy sự phát triển và duy trì nhánh hữu hiệu tốt hơn, dẫn đến tỷ lệ nhánh hữu hiệu cao hơn so với vụ xuân. Trong vụ xuân, nhiệt độ thấp hơn có thể ảnh hưởng đến quá trình đẻ nhánh và phân hóa mầm hoa, khiến tỷ lệ nhánh hữu hiệu thấp hơn so với vụ hè thu. Ngoài ra, sự khác biệt giữa các công thức cũng có thể liên quan đến chế độ dinh dưỡng, hoặc khả năng chống chịu của từng công thức (Nguyễn Hồng Sơn và Nguyễn Thị Nguyệt Thu, 2015) [45].

3.3.3.4. Ảnh hưởng của than sinh học giàu Si từ vỏ trấu và vỏ lạc đến lá lúa

Kết quả ở Bảng 3.22 cho thấy:

* Đối với vụ hè thu 2023:

Chiều dài lá đồng: Khoảng biến động của chỉ tiêu này dao động từ 22,40 cm đến 26,40 cm. Trong đó, cây lúa ở CT1 (100 kg N + 60 kg P_2O_5 + 70 kg K_2O + 500 kg vôi/ha) và CT3 (10 tấn TSH giàu Si từ vỏ trấu + 500 kg vôi/ha) có chiều dài lá đồng đạt 26,40 cm; 22,40 cm, có sự sai khác có ý nghĩa thống kê giữa CT1 và các công thức còn lại, trừ CT6 (15 tấn TSH giàu Si từ vỏ lạc + 500 kg vôi/ha) .

Chiều rộng lá đồng: Giá trị này dao động trong khoảng từ 1,26 cm đến 1,41 cm. Trong đó, cây lúa ở CT6 (15 tấn TSH giàu Si từ vỏ lạc + 500 kg vôi/ha) có chiều rộng lá đồng 1,41 cm, CT3 (10 tấn TSH giàu Si từ vỏ trấu + 500 kg vôi/ha) là 1,26 cm. Không có sự sai khác thống kê giữa các công thức về chiều rộng lá đồng.

Diện tích lá đồng: Giá trị này dao động từ 28,20 cm² đến 35,60 cm². Trong đó, cây lúa ở CT1 (100 kg N + 60 kg P₂O₅ + 70 kg K₂O + 500 kg vôi/ha) có diện tích lá đồng 35,60 cm², tương tự CT3 (10 tấn TSH giàu Si từ vỏ trấu + 500 kg vôi/ha) có diện tích lá đồng chỉ đạt 28,20 cm², có sự sai khác có ý nghĩa thống kê giữa CT1 và các công thức còn lại, trừ CT6.

Bảng 3.22. Ảnh hưởng của than sinh học giàu Si từ vỏ trấu và vỏ lạc đến lá đồng tại giai đoạn thu hoạch ở thí nghiệm đồng ruộng

CT	Vụ hè 2023			Vụ xuân 2024		
	Kích thước lá đồng (cm)		Diện tích lá đồng (cm ²)	Kích thước lá đồng (cm)		Diện tích lá đồng (cm ²)
	Dài	Rộng		Dài	Rộng	
CT1 (ĐC1)	26,40 ^a	1,35 ^a	35,60 ^a	31,13 ^a	1,67 ^{ab}	51,80 ^{ab}
CT2 (ĐC2)	23,00 ^{bc}	1,38 ^a	31,73 ^{bc}	31,37 ^a	1,72 ^a	52,98 ^a
CT3	22,40 ^c	1,26 ^a	28,20 ^c	27,70 ^b	1,60 ^{bc}	44,83 ^c
CT4	23,73 ^{bc}	1,27 ^a	30,07 ^c	27,93 ^b	1,60 ^{bc}	45,23 ^c
CT5	23,00 ^{bc}	1,31 ^a	30,07 ^c	26,23 ^b	1,57 ^c	41,77 ^c
CT6	24,93 ^{ab}	1,41 ^a	35,27 ^{ab}	25,90 ^b	1,63 ^{bc}	42,50 ^c
HSD _{0,05}	2,12	0,62	3,69	3,24	0,09	5,82

Ghi chú: Các công thức có cùng ký tự trong cùng một cột không có sai khác ý nghĩa về mặt thống kê ở khoảng tin cậy 95%. CT1: 100 kg N + 60 kg P₂O₅ + 70 kg K₂O + 500 kg vôi/ha; CT2: 5 tấn phân chuồng + 100 kg N + 60 kg P₂O₅ + 70 kg K₂O + 500 kg vôi/ha; CT3: 10 tấn TSH giàu Si từ vỏ trấu/ha + 500 kg vôi; CT4: 15 tấn TSH giàu Si từ vỏ trấu/ha + 500 kg vôi; CT5: 10 tấn TSH giàu Si từ vỏ lạc/ha + 500 kg vôi; CT6: 15 tấn TSH giàu Si từ vỏ lạc/ha + 500 kg vôi;

* Đối với vụ xuân 2024:

Chiều dài lá đồng: ở các CT dao động từ 25,90 - 31,37 cm, có sự sai khác có ý nghĩa thống kê giữa CT1 (100 kg N + 60 kg P₂O₅ + 70 kg K₂O + 500 kg vôi/ha) và các công thức còn lại.

Chiều rộng lá đồng: CT2 (5 tấn phân chuồng + 100 kg N + 60 kg P₂O₅ + 70 kg K₂O + 500 kg vôi/ha) và CT5 (15 tấn TSH giàu Si từ vỏ trấu + 500 kg vôi/ha) có chiều rộng lá đồng là 1,72 cm và 1,57 cm, có sự sai khác có ý nghĩa thống kê giữa CT1, CT2 và các công thức còn lại.

Diện tích lá đồng: ở các CT dao động từ 41,77 - 52,98 cm².

Tóm lại, các chỉ tiêu về lá đồng bị ảnh hưởng bởi các công thức bón phân, CT2 bón đầy đủ phân chuồng và phân hóa học có các chỉ tiêu về lá đồng cao nhất, các công thức bón TSH từ vỏ trấu và vỏ lạc có các chỉ tiêu này thấp hơn CT2, nhưng không sai khác có ý nghĩa về thống kê, trừ diện tích lá đồng trong vụ xuân 2024.

3.3.3.5. Ảnh hưởng của than sinh học giàu Si từ vỏ trấu và vỏ lạc đến sinh khối tươi và khô của cây lúa

Khối lượng vật chất khô bao gồm tinh bột, khoáng chất, vitamin, chất xơ... còn lại trong cây sau khi sấy khô trong 6 giờ ở nhiệt độ 105°C. Chỉ số này đóng vai trò quan trọng trong việc đánh giá khả năng quang hợp, hấp thu dinh dưỡng từ môi trường cũng như xác định hàm lượng dinh dưỡng của cây. Kết quả được trình bày trong Bảng 3.23 (vụ hè thu 2023) và Bảng 3.24 (vụ xuân 2024).

Bảng 3.23. Ảnh hưởng của than sinh học giàu Si từ vỏ trấu và vỏ lạc đến sinh khối tươi và khô của cây lúa vụ hè thu 2023 ở thí nghiệm đồng ruộng

DVT: g/cây

CT	Bắt đầu đẻ nhánh (25 ngày sau gieo)		Kết thúc đẻ nhánh (53 ngày sau gieo)		Trổ bông (64 ngày sau gieo)		Thu hoạch (90 ngày sau gieo)	
	Sinh khối tươi	Sinh khối khô	Sinh khối tươi	Sinh khối khô	Sinh khối tươi	Sinh khối khô	Sinh khối tươi	Sinh khối khô
CT1 (ĐC1)	10,00 ^b	3,33 ^b	17,33 ^b	5,33 ^b	34,67 ^b	7,00 ^b	67,67 ^a	19,33 ^{bc}
CT2 (ĐC2)	12,67 ^a	4,67 ^a	20,33 ^a	6,33 ^a	38,67 ^a	8,33 ^a	71,00 ^a	21,33 ^a
CT3	9,33 ^b	3,33 ^b	16,00 ^c	4,67 ^c	29,00 ^{cd}	6,00 ^b	58,00 ^c	16,67 ^d
CT4	11,00 ^{ab}	4,00 ^{ab}	17,00 ^{bc}	5,00 ^{bc}	34,00 ^b	7,00 ^b	67,67 ^a	20,00 ^{ab}
CT5	9,67 ^b	3,33 ^b	16,67 ^{bc}	5,00 ^{bc}	27,67 ^d	6,33 ^b	60,33 ^{bc}	16,67 ^d
CT6	9,33 ^b	3,33 ^b	17,33 ^b	5,00 ^{bc}	31,33 ^{bc}	7,00 ^b	62,00 ^b	18,00 ^{cd}
HSD _{0,05}	1,97	0,81	1,03	0,64	3,57	1,03	3,66	1,85

Ghi chú: Các công thức có cùng ký tự trong cùng một cột không có sai khác ý nghĩa về mặt thống kê ở khoảng tin cậy 95%. CT1: 100 kg N + 60 kg P₂O₅ + 70 kg K₂O + 500 kg vôi/ha; CT2: 5 tấn phân chuồng + 100 kg N + 60 kg P₂O₅ + 70 kg K₂O + 500 kg vôi/ha; CT3: 10 tấn TSH giàu Si từ vỏ trấu/ha + 500 kg vôi; CT4: 15 tấn TSH giàu Si từ vỏ trấu/ha + 500 kg vôi; CT5: 10 tấn TSH giàu Si từ vỏ lạc/ha + 500 kg vôi; CT6: 15 tấn TSH giàu Si từ vỏ lạc/ha + 500 kg vôi;

* Vụ hè thu 2023:

Kết quả trình bày ở Bảng 3.23 cho thấy khối lượng tươi và chất khô ở các giai đoạn có sự khác biệt có ý nghĩa ở mức 0,05 ở các công thức thí nghiệm. Lượng TSH bón càng cao thì khả năng tích lũy chất tươi, chất khô càng cao và ngược lại.

Giai đoạn bắt đầu đẻ nhánh: Khối lượng tươi và khô ở các CT dao động từ 9,33 - 12,67 g/cây và 3,33 - 4,67 g/cây theo thứ tự, CT có sinh khối tươi cao nhất là CT2 (5 tấn phân chuồng + 100 kg N + 60 kg P_2O_5 + 70 kg K_2O + 500 kg vôi/ha) (12,67 g/cây) và thấp nhất là CT3 (10 tấn TSH giàu Si từ vỏ trấu + 500 kg vôi/ha), CT6 (15 tấn TSH giàu Si từ vỏ lạc + 500 kg vôi/ha) (9,33 g/cây). Tương tự, CT có sinh khối khô lớn nhất là CT2 (4,67 g/cây) và thấp nhất là CT1 (100 kg N + 60 kg P_2O_5 + 70 kg K_2O + 500 kg vôi/ha), CT3, CT5, CT6 (3,33 g/cây). Trong các CT bón TSH giàu Si từ vỏ trấu và vỏ lạc thì ở liều lượng 15 tấn/ha cho sinh khối tươi và khô cao nhất.

Giai đoạn trổ bông: Đây là giai đoạn, sinh khối tươi và khô của cây lúa tăng nhanh và có sự sai khác có ý nghĩa về mặt thống kê ở xác suất 95%. Sinh khối tươi và khô lớn nhất là CT2 (38,67 và 8,33 g/cây) và thấp nhất là CT6 (15 tấn TSH giàu Si từ vỏ lạc + 500 kg vôi/ha) (27,67 g/cây và 6,33 g/cây).

Giai đoạn thu hoạch: Sinh khối tươi và khô đạt cao nhất ở CT2 (5 tấn phân chuồng + 100 kg N + 60 kg P_2O_5 + 70 kg K_2O + 500 kg vôi/ha) (71,00 và 21,33 g/cây). Khi tăng lượng bón TSH giàu Si từ vỏ trấu và vỏ lạc có tác dụng tăng sinh trưởng của cây lúa (số nhánh, chiều cao cây) nên dẫn đến tăng tích lũy sinh khối tươi và khô. Trong các CT bón TSH thì liều lượng bón 15 tấn TSH giàu Si từ vỏ trấu/ha cho sinh khối tươi và khô cao nhất. Kết quả này tương đồng với nghiên cứu của các tác giả (Roussos et al., 2017 [216]; Chen et al., 2022 [98]).

* Vụ xuân 2024:

Kết quả trình bày ở Bảng 3.24 cho thấy:

Giai đoạn đẻ nhánh: Có sự sai khác thống kê giữa các công thức bón phân hóa học, TSH giàu Si từ vỏ trấu và vỏ lạc đến sinh khối tươi và chất khô của cây lúa tại giai đoạn này. Cụ thể, sinh khối tươi dao động từ 5,00 - 6,08 g/cây, trong đó CT2 (5 tấn phân chuồng + 100 kg N + 60 kg P_2O_5 + 70 kg K_2O + 500 kg vôi/ha) đạt giá trị cao nhất (6,08 g/cây). Tương tự, sinh khối khô dao động từ 1,64 - 1,74 g/cây, và CT2 đạt mức cao nhất (1,74 g/cây).

Giai đoạn kết thúc đẻ nhánh: CT1 (100 kg N + 60 kg P_2O_5 + 70 kg K_2O + 500 kg vôi/ha) đạt sinh khối tươi 42,00 g/cây và CT5 (10 tấn TSH giàu Si từ vỏ lạc + 500 kg vôi/ha) đạt 33,33 g/cây. Tương tự, sinh khối khô nằm trong khoảng 8,00 - 10,67 g/cây, với CT1 đạt giá trị lớn nhất (10,67 g/cây) và CT5 thấp nhất (8,00 g/cây).

Giai đoạn trổ bông: Sinh khối tươi ở CT1 là 76,33 g/cây và chất khô ở CT2 đạt 20,67 g/cây và thấp nhất là CT3 (10 tấn TSH giàu Si từ vỏ trấu + 500 kg vôi/ha) (62,67 g/cây với sinh khối tươi và 18,33 g/cây với sinh khối khô). Giai đoạn thu hoạch: Sinh khối tươi và khô đạt cao nhất ở CT2 (120,33 và 35,67 g/cây, theo thứ tự).

Bảng 3.24. Ảnh hưởng của than sinh học giàu Si từ vỏ trấu và vỏ lạc đến sinh khối tươi và khô của cây lúa vụ xuân 2024 ở thí nghiệm đồng ruộng

CT	Bắt đầu đẻ nhánh (25 ngày sau gieo)		Kết thúc đẻ nhánh (48 ngày sau gieo)		Trổ bông (80 ngày sau gieo)		Thu hoạch (90 ngày sau gieo)	
	Sinh khối tươi (g/cây)	Sinh khối khô (g/cây)	Sinh khối tươi (g/cây)	Sinh khối khô (g/cây)	Sinh khối tươi (g/cây)	Sinh khối khô (g/cây)	Sinh khối tươi (g/cây)	Sinh khối khô (g/cây)
CT1 (ĐC1)	6,00 ^a	1,70 ^{ab}	42,00 ^a	10,67 ^a	76,33 ^a	20,00 ^{ab}	96,00 ^a	27,33 ^b
CT2 (ĐC2)	6,08 ^a	1,74 ^a	39,67 ^{ab}	9,67 ^{ab}	75,67 ^a	20,67 ^a	120,33 ^a	35,67 ^a
CT3	5,00 ^b	1,64 ^b	35,00 ^{ab}	8,67 ^{ab}	62,67 ^b	18,33 ^b	104,00 ^a	32,67 ^{ab}
CT4	5,40 ^b	1,68 ^b	36,00 ^{ab}	9,00 ^{ab}	70,33 ^{ab}	19,33 ^{ab}	100,33 ^a	29,33 ^b
CT5	5,33 ^b	1,66 ^{ab}	33,33 ^b	8,00 ^b	62,67 ^b	19,33 ^{ab}	111,33 ^a	34,00 ^{ab}
CT6	5,33 ^b	1,64 ^b	35,33 ^{ab}	8,67 ^{ab}	71,33 ^{ab}	20,00 ^{ab}	108,67 ^a	32,33 ^{ab}
HSD _{0,05}	0,99	0,31	11,94	3,45	18,43	2,24	24,82	6,03

Ghi chú: Các công thức có cùng ký tự trong cùng một cột không có sai khác ý nghĩa về mặt thống kê ở khoảng tin cậy 95%. CT1: 100 kg N + 60 kg P₂O₅ + 70 kg K₂O + 500 kg vôi/ha; CT2: 5 tấn phân chuồng + 100 kg N + 60 kg P₂O₅ + 70 kg K₂O + 500 kg vôi/ha; CT3: 10 tấn TSH giàu Si từ vỏ trấu/ha + 500 kg vôi; CT4: 15 tấn TSH giàu Si từ vỏ trấu/ha + 500 kg vôi; CT5: 10 tấn TSH giàu Si từ vỏ lạc/ha + 500 kg vôi; CT6: 15 tấn TSH giàu Si từ vỏ lạc/ha + 500 kg vôi;

Như vậy, bón phân hoá học, phân chuồng, TSH giàu Si có ảnh hưởng đến sinh khối tươi và khô của cây lúa trong suốt các giai đoạn sinh trưởng, mặc dù ở các công thức có bón TSH thì số liệu về sinh khối tươi và khô không cao bằng công thức bón phân hoá học, tuy nhiên các công thức này chỉ bón mỗi TSH, nên chứng tỏ TSH và Si có trong than đã có cải thiện sinh khối lúa. Liều lượng bón 15 tấn/ha với TSH giàu Si từ vỏ trấu có khối lượng tươi và khô cao hơn so với lượng bón 10 tấn/ha, kết quả tương tự với TSH giàu Si từ vỏ lạc. TSH đã được chứng minh là cải thiện sự phát triển của cây

trồng theo nhiều cách, bao gồm tăng sinh khối, ra hoa, năng suất hạt, chất lượng và khả năng chống chịu với các thách thức của môi trường (Miao et al., 2023) [175].

3.3.3.6. Ảnh hưởng của than sinh học giàu Si từ vỏ trấu và vỏ lạc đến tình hình sâu bệnh hại

Bảng 3.25. Ảnh hưởng của than sinh học giàu Si từ vỏ trấu và vỏ lạc đến tình hình sâu bệnh hại ở thí nghiệm đồng ruộng

CT	Vụ hè thu 2023 (điểm)		Vụ xuân 2023 (điểm)	
	Bệnh khô vằn	Sâu cuốn lá	Bệnh đạo ôn hại lá	Sâu cuốn lá
CT1 (ĐC1)	1	1	1	1
CT2 (ĐC2)	1	1	1	1
CT3	1	1	1	1
CT4	1	1	1	1
CT5	1	1	1	1
CT6	1	1	0	1

Ghi chú: CT1: 100 kg N + 60 kg P_2O_5 + 70 kg K_2O + 500 kg vôi/ha; CT2: 5 tấn phân chuồng + 100 kg N + 60 kg P_2O_5 + 70 kg K_2O + 500 kg vôi/ha; CT3: 10 tấn TSH giàu Si từ vỏ trấu/ha + 500 kg vôi; CT4: 15 tấn TSH giàu Si từ vỏ trấu/ha + 500 kg vôi; CT5: 10 tấn TSH giàu Si từ vỏ lạc/ha + 500 kg vôi; CT6: 15 tấn TSH giàu Si từ vỏ lạc/ha + 500 kg vôi; 1. Gây hại mức rất thấp; 0: không gây hại.

Qua điều tra theo dõi nhận thấy có sâu cuốn lá, bệnh đạo ôn và bệnh khô vằn xuất hiện trong 2 vụ lúa, nhưng mức độ gây hại ở các CT rất thấp (điểm 1) (Bảng 3.25), điều này là do trong TSH giàu Si từ vỏ trấu và vỏ lạc chứa một lượng Si lớn nên có tác dụng làm cho thân lá lúa cứng hơn, dẫn đến tăng khả năng chống chịu sâu bệnh hại (Miao et al., 2023) [175].

3.3.3.7. Năng suất và các yếu tố cấu thành năng suất lúa

Kết quả trình bày ở Bảng 3.26 cho thấy:

* Trong vụ hè thu 2023:

Số bông/m²: ở các CT dao động từ 322,33 - 351,00 bông/m² phụ thuộc vào các dạng và liều lượng TSH. Có sự sai khác có ý nghĩa thống kê giữa các CT thí nghiệm.

Trong 2 dạng TSH sử dụng thì công thức bón 15 tấn/ha TSH giàu Si từ vỏ vỏ lạc (CT6) có số bông/m² cao nhất (332,00 bông/m²).

Bảng 3.26. Ảnh hưởng của than sinh học và phân bón hữu cơ giàu Si từ vỏ trấu và vỏ lạc đến năng suất lúa ở thí nghiệm đồng ruộng

CT	Số bông/m ²	Tổng số hạt/bông (hạt)	Tỷ lệ hạt chắc (%)	P ₁₀₀₀ hạt (g)	NSLT (tấn/ha)	NSTT (tấn/ha)
I	Vụ hè thu 2023					
CT1 (ĐC1)	337,33 ^b	115,07 ^{ab}	81,27 ^c	24,00 ^e	7,07 ^b	6,70 ^a
CT2 (ĐC2)	351,00 ^a	111,67 ^{ab}	87,27 ^b	25,00 ^b	8,07 ^{ab}	7,02 ^a
CT3	323,67 ^d	116,93 ^a	90,33 ^{ab}	24,67 ^c	8,20 ^a	6,42 ^{ab}
CT4	322,33 ^d	117,00 ^a	88,07 ^{ab}	25,33 ^a	8,57 ^a	6,81 ^a
CT5	330,33 ^c	101,20 ^b	91,40 ^a	24,33 ^d	7,40 ^{ab}	5,87 ^b
CT6	332,00 ^c	123,67 ^a	88,87 ^{ab}	24,33 ^d	8,47 ^a	6,60 ^a
HSD _{0,05}	3,58	14,98	3,82	0,20	1,11	1,31
II	Vụ xuân 2024					
CT1 (ĐC1)	360,67 ^{ab}	131,67 ^a	82,97 ^c	25,07 ^{bc}	9,90 ^{bc}	6,90 ^{bcd}
CT2 (ĐC2)	365,33 ^a	132,67 ^a	84,65 ^a	25,70 ^a	10,58 ^a	7,52 ^a
CT3	337,00 ^d	128,67 ^{abc}	82,65 ^c	25,53 ^{ab}	9,18 ^d	6,52 ^{de}
CT4	347,67 ^c	129,67 ^{ab}	83,82 ^{ab}	25,80 ^a	9,78 ^{bc}	7,05 ^{abc}
CT5	345,00 ^{cd}	125,33 ^c	83,43 ^{bc}	25,07 ^{bc}	9,07 ^d	6,17 ^e
CT6	348,67 ^c	126,33 ^{b^c}	83,82 ^{ab}	24,77 ^c	9,18 ^d	6,67 ^{cd}
HSD _{0,05}	16,26	6,61	1,91	1,37	1,16	1,23

Ghi chú: Các công thức có cùng ký tự trong cùng một cột không có sai khác ý nghĩa về mặt thống kê ở khoảng tin cậy 95%. CT1: 100 kg N + 60 kg P₂O₅ + 70 kg K₂O + 500 kg vôi/ha; CT2: 5 tấn phân chuồng + 100 kg N + 60 kg P₂O₅ + 70 kg K₂O + 500 kg vôi/ha; CT3: 10 tấn TSH giàu Si từ vỏ trấu/ha + 500 kg vôi; CT4: 15 tấn TSH giàu Si từ vỏ trấu/ha + 500 kg vôi; CT5: 10 tấn TSH giàu Si từ vỏ lạc/ha + 500 kg vôi; CT6: 15 tấn TSH giàu Si từ vỏ lạc/ha + 500 kg vôi;

Tỷ lệ hạt chắc: có sự sai khác có ý nghĩa về mặt thống kê ở xác suất 95% tại các công thức. Tỷ lệ hạt chắc dao động từ 81,27 - 91,40%. CT ĐC (CT1) có tỷ lệ hạt chắc thấp hơn so với CT bón 10 tấn/ha TSH giàu Si từ vỏ lạc (CT5).

P_{1000} hạt: P_{1000} hạt ở các CT có sự sai khác có ý nghĩa về mặt thống kê ở xác suất 95%. P_{1000} hạt ở các CT dao động từ 24,00 - 25,33g. Công thức có P_{1000} hạt lớn nhất là CT2 (25,33g) và thấp nhất là CT ĐC1 (24,00g).

Năng suất lý thuyết (NSLT) và năng suất thực thu (NSTT): NSLT và NSTT (Hình 3.4) có sự chênh lệch có ý nghĩa giữa CT bón đầy đủ phân bón HC và hoá học (ĐC2) với các CT chỉ bón TSH giàu Si từ vỏ trấu và vỏ lạc. Trong 2 dạng TSH sử dụng thì NSLT và NSTT đạt cao nhất ở công thức bón 15 tấn/ha TSH giàu Si từ vỏ trấu (CT4) (8,57 - 6,81 tấn/ha).

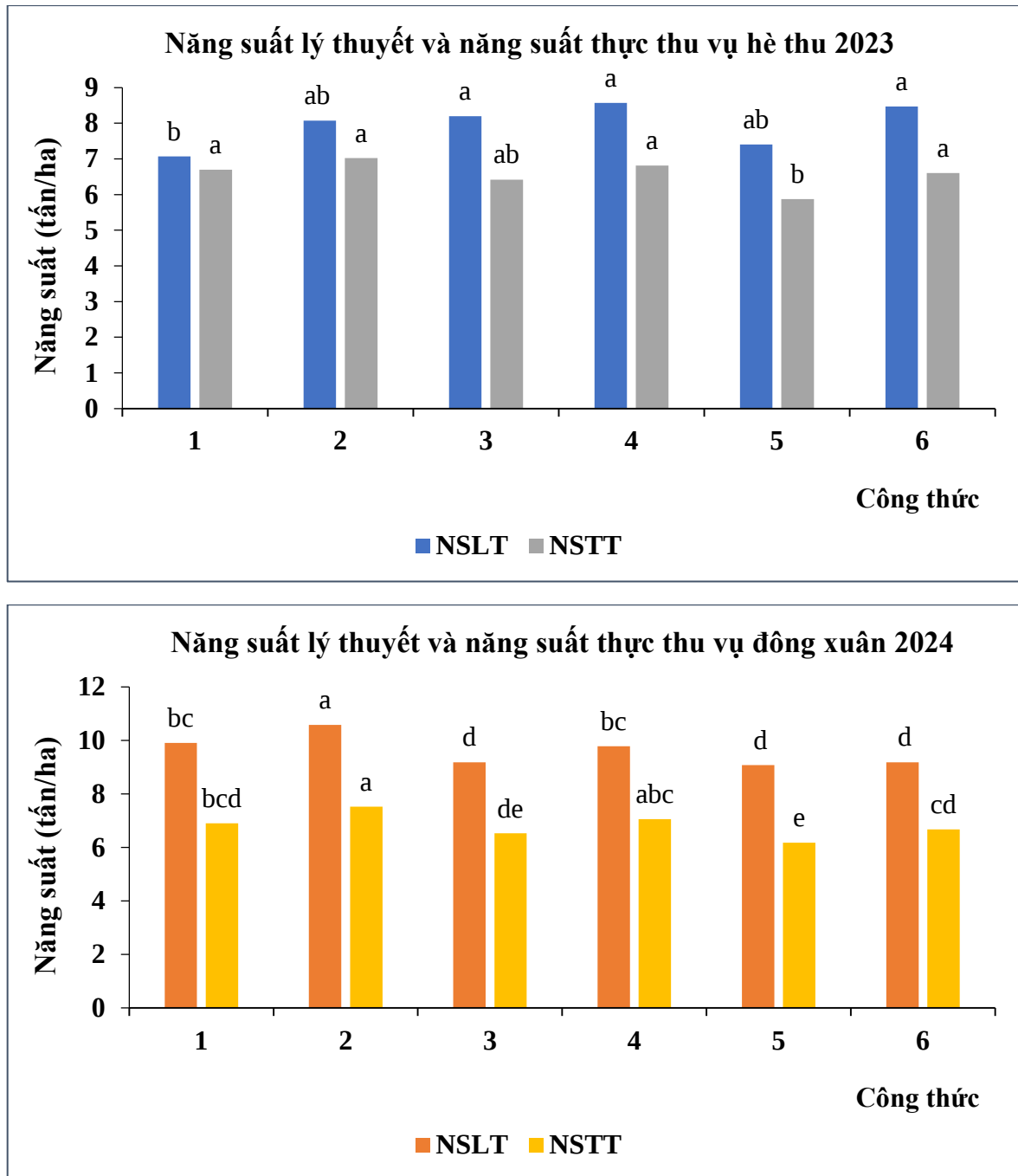
* Trong vụ xuân 2024 cho thấy:

Số bông/m²: trong các CT thí nghiệm dao động từ 337,00 - 365,33 bông/m². Kết quả cho thấy có sự khác biệt có ý nghĩa thống kê giữa các CT. Trong hai dạng TSH bón, CT bón 15 tấn/ha TSH giàu Si từ vỏ trấu (CT4) và vỏ lạc (CT6) đạt số bông/m² cao nhất, với 348,67 bông/m².

Tỷ lệ hạt chắc: giữa các CT có sự sai khác có ý nghĩa thống kê ở mức xác suất 95%. Giá trị này dao động trong khoảng 82,65 - 84,65%, trong đó ở cả hai dạng TSH từ vỏ trấu và vỏ lạc, CT bón 10 tấn/ha (CT3 và CT5) cho tỷ lệ hạt chắc thấp hơn so với CT bón 15 tấn/ha (CT4 và CT6). Điều này cho thấy liều lượng TSH cao hơn có thể góp phần nâng cao tỷ lệ hạt chắc trên bông.

NSLT và NSTT: có sự khác biệt đáng kể giữa CT bón đầy đủ phân bón HC và hoá học (CT2-ĐC2) so với các CT chỉ sử dụng TSH giàu Si từ vỏ trấu và vỏ lạc. Trong hai dạng TSH được áp dụng, CT bón TSH giàu Si từ vỏ trấu và vỏ lạc cho NSLT và NSTT cao nhất, lần lượt đạt 9,07 - 9,78 tấn/ha và 6,17 - 7,05 tấn/ha. Đáng chú ý, mức bón 15 tấn/ha (CT4 và CT6) có NSLT và NSTT cao nhất, đạt 9,78 và 7,05 tấn/ha (Hình 3.4).

Theo Liu et al. (2022) [168], TSH là một phương pháp hiệu quả để tăng năng suất lúa. Kết quả phân tích tổng hợp cho thấy phản ứng của năng suất lúa với than sinh học tăng 10,73% và 12,04% so với nghiệm thức ĐC. Các nghiên cứu trước đây đã chỉ ra rằng việc sử dụng than sinh học có thể thúc đẩy năng suất lúa bằng cách tăng số bông, số hạt, và tỷ lệ hạt chắc. Về năng suất lúa, có một số khác biệt về lượng TSH tối ưu được sử dụng. Với TSH được làm từ trấu, số bông và số hạt tăng lên khi lượng than sinh học đầu vào tăng lên và năng suất lúa tăng 15,26 - 44,89%. Đặc biệt, năng suất lúa có lượng than sinh học cao (300 kg/ha) khác biệt đáng kể so với các nghiệm thức khác (Chen et al., 2021) [97].



Hình 3.3. Năng suất lý thuyết và thực thu của lúa trong vụ hè thu 2023 và đông xuân 2024 (CT1: 100 kg N + 60 kg P_2O_5 + 70 kg K_2O + 500 kg vôi/ha; CT2: 5 tấn phân chuồng + 100 kg N + 60 kg P_2O_5 + 70 kg K_2O + 500 kg vôi/ha; CT3: 10 tấn TSH giàu Si từ vỏ trấu/ha + 500 kg vôi; CT4: 15 tấn TSH giàu Si từ vỏ trấu/ha + 500 kg vôi; CT5: 10 tấn TSH giàu Si từ vỏ lạc/ha + 500 kg vôi; CT6: 15 tấn TSH giàu Si từ vỏ lạc/ha + 500 kg vôi)

3.3.3.8. Hiệu quả kinh tế

Hiệu quả kinh tế khi sử dụng TSH từ vỏ trấu và vỏ lạc cho cây lúa thể hiện qua Bảng 3.27.

Bảng 3.27. Ảnh hưởng của than sinh học giàu Si từ vỏ trấu và vỏ lạc đến hiệu quả kinh tế giữa các công thức ở thí nghiệm đồng ruộng

CT	Tổng thu (đồng/ha)	Tổng chi (đồng/ha)	Lợi nhuận (đồng/ha)	VCR
I	Vụ hè thu 2023			
CT1 (ĐC1)	67.000.000	53.082.500	13.917.500	-
CT2 (ĐC2)	70.200.000	65.332.500	4.867.500	0,26
CT3	96.300.000	74.800.000	21.500.000	1,35
CT4	102.150.000	89.800.000	12.350.000	0,96
CT5	88.050.000	79.800.000	8.250.000	0,79
CT6	99.000.000	97.300.000	1.700.000	0,72
II	Vụ Xuân 2024			
CT1 (ĐC1)	69.000.000	53.082.500	15.917.500	-
CT2 (ĐC2)	75.167.000	65.332.500	9.834.500	0,50
CT3	97.750.500	74.800.000	22.950.500	1,32
CT4	105.750.000	89.800.000	15.950.000	1,00
CT5	92.500.500	79.800.000	12.700.500	0,88
CT6	100.000.500	97.300.000	2.700.500	0,70

Ghi chú: Giống = 18.000 đ/kg, Công = 250.000 đ/công, Cày đất = 4,4 triệu đ/ha, Phân Urê = 11.500 đ/kg, Lân Super = 10.000 đ/kg, Phân Kali = 11.000 đ/kg, TSH giàu Si từ vỏ trấu = 3.000.000 đ/tấn, TSH giàu Si từ vỏ lạc = 3.500.000 đ/tấn, Vôi = 4.500 đ/kg. Giá bán lúa = 10.000 đ/kg (CT 1, 2) và 15.000 đ/kg (CT 3 - CT 6).

Kết quả trình bày ở Bảng 3.27 cho thấy:

* Vụ hè thu 2023: CT bón 10 - 15 tấn/ha TSH giàu Si từ vỏ trấu (CT3, CT4) và vỏ lạc (CT5, CT6) có năng suất thu được không cao bằng năng suất ở CT1 (100 kg N + 60 kg P_2O_5 + 70 kg K_2O + 500 kg vôi/ha và CT2 (5 tấn phân chuồng + 100 kg N + 60 kg P_2O_5 + 70 kg K_2O + 500 kg vôi/ha, nhưng lợi nhuận gần gấp đôi so với các công thức còn lại (12.350.000 - 21.500.500 đ/ha), do công thức này không bón phân hóa học, nên chi phí đầu tư thấp hơn.

Tỷ suất lợi nhuận (VCR) ở các CT so với ĐC dao động từ 0,26 - 1,35. CT có VCR cao nhất là bón 10 tấn/ha TSH giàu Si từ vỏ trấu (CT3) (1,35), tiếp đến CT bón 15 tấn/ha TSH giàu Si từ vỏ trấu (CT4) (0,96) và thấp nhất là CT bón đầy đủ phân HC và phân hóa học (CT2- ĐC 2) (0,26).

* Vụ xuân 2024: CT1 (100 kg N + 60 kg P_2O_5 + 70 kg K_2O + 500 kg vôi/ha) và CT2 (5 tấn phân chuồng + 100 kg N + 60 kg P_2O_5 + 70 kg K_2O + 500 kg vôi/ha) có năng suất cao nhất, nhưng CT bón 10 -15 tấn/ha với TSH từ vỏ trấu (CT3, CT4) có lợi nhuận cao nhất. Cụ thể, mức lợi nhuận thu được dao động từ 15.950.000 - 22.950.500 đ/ha, gần gấp đôi so với các CT còn lại. Điều này cho thấy hiệu quả kinh tế vượt trội của việc sử dụng TSH giàu Si từ vỏ trấu và vỏ lạc, dù không có năng suất cao như các công thức khác.

Về tỷ suất lợi nhuận (VCR), các CT thử nghiệm có mức dao động từ 0,50 - 1,32 khi so sánh với ĐC. Trong đó, CT bón 10 tấn/ha TSH giàu Si từ vỏ trấu (CT3) đạt VCR cao nhất (1,32). Tiếp theo là công thức bón 15 tấn/ha TSH giàu Si từ vỏ trấu (CT4) với VCR đạt 1,00. Ngược lại, công thức bón đầy đủ phân HC và phân hóa học (CT2 - ĐC2) có VCR thấp nhất (0,50), phản ánh chi phí đầu tư cao nhưng hiệu quả kinh tế có xu hướng thấp.

Như vậy, mặc dù năng suất thu hoạch từ việc bón TSH giàu Si từ vỏ trấu và vỏ lạc không cao bằng công thức có bón phân hóa học, nhưng xét về lợi nhuận, đây lại là phương án có tính kinh tế cao hơn, đặc biệt là khi sử dụng 10 tấn/ha TSH giàu Si từ vỏ trấu. Điều này cho thấy tiềm năng của việc tận dụng nguồn nguyên liệu này trong canh tác để tối ưu hóa lợi nhuận.

3.3.3.9. Một số tính chất hóa học của đất sau thí nghiệm

Qua Bảng 3.28 ta thấy rằng:

pH_{KCl} ở các CT thí nghiệm có sự dao động trong khoảng từ 4,49 - 4,90, có xu hướng thấp nhất ở CT1 (100 kg N + 60 kg P_2O_5 + 70 kg K_2O + 500 kg vôi/ha) (4,49) và xu hướng cao nhất ở CT2 (4,90). pH_{KCl} ở các CT tăng tỉ lệ thuận với liều lượng bón TSH giàu Si từ vỏ trấu và vỏ lạc và cải thiện hơn so với đất trước thí nghiệm. Than sinh học thường làm tăng độ pH của đất trồng lúa chua, giúp đất ít chua hơn và thích

hợp hơn cho cây lúa sinh trưởng. Điều này xảy ra vì than sinh học có độ pH cao và có thể trung hòa độ chua của đất, một quá trình có thể diễn ra rõ rệt hơn khi sử dụng lâu dài (Novair et al., 2023) [187].

OM là chỉ tiêu quan trọng đại diện cho độ phì nhiêu của đất, có tính chất quyết định đối với các tính chất vật lý, hóa học và sinh học của đất. Hàm lượng OM dao động trong khoảng từ 3,35 - 3,97%, cao nhất ở CT6 (15 tấn/ha TSH từ vỏ lạc + 500 kg vôi/ha) và thấp nhất ở CT1 (100 kg N + 60 kg P_2O_5 + 70 kg K_2O + 500 kg vôi/ha). Các nghiên cứu trước đây đã kết luận rằng: Sau một thời gian bổ sung TSH và phân bón HC vào đất, lượng mùn trong đất sẽ tăng lên một cách đáng kể, lượng hợp chất hữu cơ từ đó cũng được tăng lên (Jaswal et al., 2022 [141]; Novair et al., 2023 [187]).

Bảng 3.28. Ảnh hưởng của than sinh học giàu Si từ vỏ trấu và vỏ lạc đến một số tính chất hóa học của đất trước và sau thí nghiệm tại vụ xuân 2024 ở thí nghiệm đồng ruộng

CT	pH _{KCl}	OM%	CEC (meq/100 g)	SiO ₂ (%)	SiO ₂ (g/kg)
TTN	4,35	3,18	10,12	24,79	9,12
CT1 (ĐC1)	4,49	3,35	9,49	26,51	9,44
CT2 (ĐC2)	4,90	3,56	9,63	28,43	10,83
CT3	4,70	3,74	9,55	27,35	9,85
CT4	4,64	3,84	9,65	28,92	11,92
CT5	4,87	3,82	9,57	27,14	9,53
CT6	4,59	3,97	9,68	28,65	11,23

CEC ở các công thức có sự dao động từ 9,49 - 9,68 meq/100g, đạt cao nhất ở CT6 bón 15 tấn/ha TSH giàu Si từ vỏ lạc, tiếp đến ở công thức bón 15 tấn/ha TSH giàu Si từ vỏ trấu (CT4). TSH làm tăng khả năng trao đổi cation (CEC) của đất lúa. Điều này là do cấu trúc xốp và diện tích bề mặt lớn của than sinh học tạo ra các vị trí liên kết cho các cation, giúp tăng cường khả năng giữ lại các chất dinh dưỡng thiết yếu của đất và cải thiện độ phì nhiêu tổng thể của đất. Các nghiên cứu đã chỉ ra rằng CEC tăng đáng kể khi sử dụng TSH từ trấu và rom rạ (Novair et al., 2023 [187]).

Si tổng số và dễ tiêu: hàm lượng Si tổng số và dễ tiêu ở các CT thí nghiệm khác nhau. Các CT thí nghiệm ở có hàm lượng Si tổng số dao động từ 26,51 - 28,92% và Si dễ tiêu từ 9,44 - 11,92 g/kg. Cả hai dạng TSH bón đều cho hàm lượng Si tổng số và dễ

tiêu cao nhất ở lượng bón 15 tấn/ha. Tuy nhiên, dạng TSH giàu Si từ vỏ trấu ở liều lượng 15 tấn/ha (CT4) có hàm lượng Si tổng số và dễ tiêu cao nhất.

3.3.3.10. Hàm lượng Cd và Pb, Si của đất và cây sau thí nghiệm

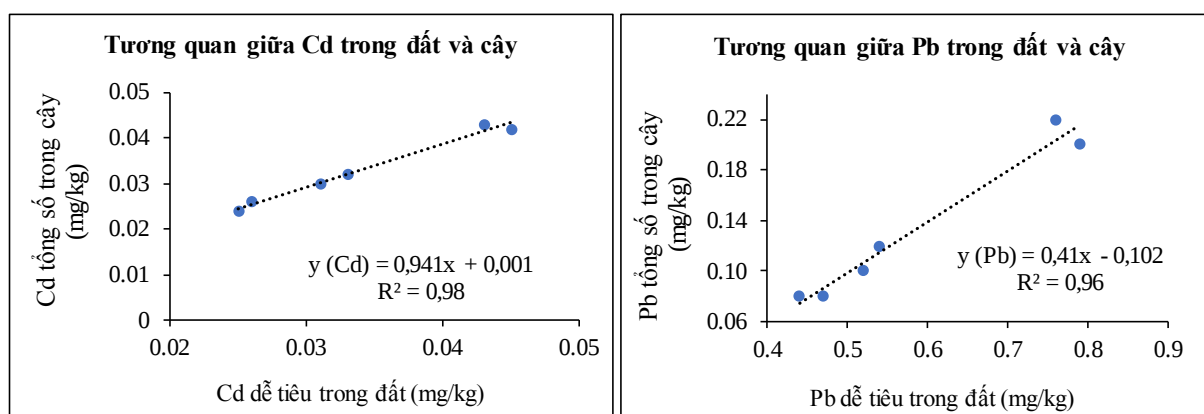
Kết quả trình bày ở Bảng 3.29 cho thấy sau thí nghiệm hàm lượng Cd, Pb tổng số và dễ tiêu trong đất giảm ở các công thức thí nghiệm có bón TSH giàu Si từ vỏ trấu và vỏ lạc tại các lượng bón từ 10 - 15 tấn/ha so với TTN, cụ thể cùng một lượng bón TSH là 15 tấn/ha ở cả hai dạng TSH (CT4, CT6), hàm lượng Cd và Pb tổng số, dễ tiêu thấp nhất ở công thức bón TSH giàu Si từ vỏ trấu, là 0,91 - 25,12 mg/kg và 0,025 - 0,44 mg/kg đất, tiếp theo là ở dạng bón TSH giàu Si từ vỏ lạc là 0,95 - 26,12 mg/kg và 0,026 - 0,47 mg/kg.

Bảng 3.29. Hàm lượng Cd và Pb, Si của đất và cây sau thí nghiệm ở vụ xuân 2024 tại thí nghiệm đồng ruộng

CT	Trong đất				Trong cây		
	Hàm lượng tổng số (mg/kg)		Hàm lượng dễ tiêu (mg/kg)		Hàm lượng tổng số (mg/kg)		
	Cd	Pb	Cd	Pb	Cd	Pb	SiO ₂ (%)
TTN	1,15	38,80	0,044	0,84	-	-	-
CT1 (ĐC1)	1,10	38,75	0,043	0,79	0,043	0,20	11,5
CT2 (ĐC2)	1,15	38,45	0,045	0,76	0,042	0,22	11,8
CT3	1,03	29,25	0,031	0,52	0,030	0,10	12,7
CT4	0,91	25,12	0,025	0,44	0,024	0,08	13,6
CT5	1,04	31,89	0,033	0,54	0,032	0,12	12,3
CT6	0,95	26,12	0,026	0,47	0,026	0,08	13,3

Tương tự như vậy, hàm lượng Cd, Pb tổng số trong cây có xu hướng giảm khi bón TSH giàu Si từ vỏ trấu và vỏ lạc, công thức bón 15 tấn/ha TSH giàu Si từ vỏ trấu (CT4) và vỏ lạc (CT6) cũng có hàm lượng Cd và Pb thấp nhất là 0,024 và 0,08 mg/kg, như vậy tương tự thí nghiệm trong nhà lưới, khi bón TSH giàu Si từ vỏ trấu và vỏ lạc có khả năng làm giảm được Cd và Pb ở trên đất trồng lúa. Hàm lượng Si tổng số trong cây tăng theo lượng bón TSH giàu Si từ vỏ trấu và vỏ lạc, dao động từ 12,3 - 13,6%.

Kết quả Hình 3.4 cho thấy có sự tương quan chặt giữa Cd, Pb dễ tiêu trong đất với hàm lượng Cd, Pb tổng số trong cây ($R^2 = 0,96 - 0,98$). Kết quả nghiên cứu của Guo et al. (2023) [123] cũng chỉ ra có mối tương quan thuận giữa nồng độ Cd và Pb trong đất và cây lúa, nghĩa là nồng độ Cd trong đất cao hơn thường dẫn đến nồng độ Cd trong cây cao hơn, nhưng mức độ tương quan này bị ảnh hưởng đáng kể bởi các yếu tố như độ pH đất và các biện pháp quản lý đất. Pb ít di động hơn do liên kết chặt chẽ với các thành phần đất, trong khi khả năng di động và hấp thụ Cd rất nhạy cảm với điều kiện đất, với khả năng sinh khả dụng tăng lên trong đất ngập nước hoặc đất có độ pH thấp.



Hình 3.4. Tương quan giữa hàm lượng Cd, Pb dễ tiêu trong đất và hàm lượng Cd, Pb tổng số trong cây

Tóm lại: Kết quả thí nghiệm đồng ruộng cho thấy việc bón TSH giàu Si từ vỏ trấu và vỏ lạc với lượng 10 - 15 tấn/ha giúp tăng năng suất (đạt cao nhất ở 15 tấn/ha), hiệu quả kinh tế trong sản xuất lúa (đạt cao nhất ở 10 tấn/ha) và giảm hàm lượng Cd và Pb tổng số cũng như dạng dễ tiêu trong đất trồng lúa. Đặc biệt, ở mức bón 15 tấn/ha, công thức sử dụng TSH giàu Si từ vỏ trấu cho hiệu quả giảm Cd và Pb cao nhất, tiếp theo là TSH giàu Si từ vỏ lạc. Bên cạnh đó, hàm lượng Cd và Pb trong cây lúa cũng có xu hướng giảm đáng kể khi áp dụng các công thức bón này, chứng minh khả năng hạn chế tích lũy kim loại nặng trong cây trồng. Đồng thời, việc bổ sung TSH giàu Si từ vỏ trấu và vỏ lạc còn giúp tăng hàm lượng Si tổng số trong cây, với mức dao động từ 12,3 - 13,6%. Như vậy, bón TSH giàu Si từ vỏ trấu và vỏ lạc không chỉ cải thiện chất lượng đất mà còn góp phần giảm nguy cơ ô nhiễm kim loại nặng trong canh tác lúa, mở ra hướng sử dụng hiệu quả các nguồn phụ phẩm nông nghiệp trong sản xuất nông nghiệp bền vững.

3.4. XÂY DỰNG MÔ HÌNH SỬ DỤNG THAN SINH HỌC GIÀU SI TỪ VỎ TRÁU VÀ VỎ LẠC TRONG SẢN XUẤT LÚA VÀ HÀM LƯỢNG KIM LOẠI NẶNG TRÊN ĐẤT PHÙ SA TẠI TỈNH THỪA THIÊN HUẾ

3.4.1. Thời gian sinh trưởng và phát triển của cây lúa

Kết quả xây dựng mô hình trong vụ hè thu 2024 được trình bày ở Bảng 3.30.

Bảng 3.30. Thời gian sinh trưởng và phát triển của lúa ở mô hình

CT	Thời gian từ gieo đến... (ngày)			Tổng TGSTPT (ngày)
	Bắt đầu đẻ nhánh	Kết thúc đẻ nhánh	Trở bông	
ĐC	26	66	70	95
MH	24	64	67	93

Ghi chú: ĐC là đối chứng; MH là mô hình.

Kết quả ở Bảng 3.30 cho thấy:

Giai đoạn từ gieo đến bắt đầu đẻ nhánh: Giai đoạn này của CT MH ngắn hơn so với ĐC 2 ngày.

Giai đoạn từ gieo đến kết thúc đẻ nhánh: dao động từ 64 đến 66 ngày. Cụ thể, ở CT MH kết thúc đẻ nhánh sớm hơn so với ĐC 2 ngày. Bón 15 tấn/ha TSH từ vỏ trấu (MH) cho cây lúa có thời gian kết thúc đẻ nhánh 64 ngày.

Giai đoạn từ gieo đến trở bông: thời gian kết thúc trở của CT MH sớm hơn ĐC 3 ngày (67 ngày).

Tổng thời gian sinh trưởng: do có sự chênh lệch thời gian đẻ nhánh, kết thúc đẻ nhánh và trở bông, nên tổng thời gian sinh trưởng của CT MH là 93 ngày, ngắn hơn ĐC là 2 ngày.

3.4.2. Chiều cao cây, khả năng đẻ nhánh và số lá xanh còn lại sau khi thu hoạch lúa

Về chiều cao cây: CT MH có chiều cao cây cao hơn ĐC tại các thời điểm bắt đầu đẻ nhánh, kết thúc đẻ nhánh và thu hoạch, với các giá trị lần lượt là 26,67 cm; 79,33 cm và 95,33 cm; so với 25,00 cm; 77,00 cm và 94,00 cm của ĐC. Tuy nhiên, sự khác biệt này không có ý nghĩa thống kê ($p > 0,05$).

Về số lá xanh khi thu hoạch, cả CT MH và đối chứng đều đạt giá trị trung bình 3,00 lá/cây, không có sự khác biệt về thống kê ($p > 0,05$).

Về khả năng đẻ nhánh: cả CT MH và ĐC đều đạt trung bình 5,7 nhánh/cây, không có sự khác biệt giữa các CT ($p > 0,05$). Mặc dù số nhánh hữu hiệu và tỷ lệ nhánh hữu hiệu ở MH (3,3 nhánh; 64,3%), cao hơn so với ĐC (3,0 nhánh; 61,0%), nhưng sự khác biệt này không có ý nghĩa thống kê ($p > 0,05$).

Bảng 3.31. Chiều cao cây, khả năng đẻ nhánh và số lá xanh khi thu hoạch lúa ở mô hình

CT	Chiều cao cây khi (cm)			Số nhánh tối đa (nhánh)	Số nhánh hữu hiệu (nhánh)	Tỷ lệ nhánh hữu hiệu (%)	Số lá xanh khi thu hoạch
	Bắt đầu đẻ nhánh	Kết thúc đẻ nhánh	Thu hoạch				
ĐC	25,00	77,00	94,00	5,7	3,0	61,0	3,00
MH	26,67	79,33	95,33	5,7	3,3	64,3	3,00
p	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns

Ghi chú: Các chữ cái khác nhau trong cùng một cột thể hiện sự sai khác có ý nghĩa ở mức 0,05 khi so sánh Ttest; ns sai khác không có ý nghĩa. Ghi chú: ĐC là đối chứng; MH là mô hình.

Như vậy, CT MH không làm thay đổi rõ rệt các chỉ tiêu sinh trưởng như chiều cao cây, khả năng đẻ nhánh và số lá xanh khi thu hoạch so với đối chứng trong điều kiện thí nghiệm.

3.4.3. Sinh khối tươi và khô của lúa qua các giai đoạn sinh trưởng, phát triển

Bảng 3.32. Khối lượng tươi và khô của lúa qua các giai đoạn ở mô hình

DVT: g/cây

CT	Bắt đầu đẻ nhánh		Kết thúc đẻ nhánh		Làm đồng		Thu hoạch	
	Sinh khối tươi	Sinh khối khô	Sinh khối tươi	Sinh khối khô	Sinh khối tươi	Sinh khối khô	Sinh khối tươi	Sinh khối khô
ĐC	2,70	0,50	49,00	14,00	63,33	19,67	76,67	26,33
MH	2,58	0,45	49,33	14,67	63,67	20,00	77,67	26,67
p	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns

Ghi chú: Các chữ cái khác nhau trong cùng một cột thể hiện sự sai khác có ý nghĩa ở mức 0,05 khi so sánh Ttest; ns sai khác không có ý nghĩa. ĐC là đối chứng; MH là mô hình

Qua Bảng 3.32 cho thấy sinh khối tươi, khô tại các giai đoạn sinh trưởng ở CT MH có xu hướng tích lũy sinh khối (cả tươi và khô) cao hơn so với ĐC. Cụ thể, tại thời điểm thu hoạch, sinh khối tươi và khô của MH đạt lần lượt 77,67 g và 26,67 g, cao hơn so với 76,67 g và 26,33 g ở ĐC. Tuy nhiên, sự chênh lệch giữa các công thức đều không sai khác thống kê ($p > 0,05$).

3.4.4. Năng suất và các yếu tố cấu thành năng suất

Số liệu ở Bảng 3.33 cho thấy: Năng suất và các yếu tố cấu thành năng suất của CT mô hình cao hơn so với ĐC.

Bảng 3.33. Năng suất và các yếu tố cấu thành năng suất lúa ở mô hình

CT	Các yếu tố cấu thành năng suất			Năng suất	
	Số bông/m ² (bông)	Tỉ lệ hạt chắc/bông (%)	P ₁₀₀₀ hạt (g)	Lý thuyết (tấn/ha)	Thực thu (tấn/ha)
Đ/C	318,00 ^b	83,93 ^b	26,81	8,97	6,05
MH	334,33 ^a	84,88 ^a	27,36	9,19	6,41
p	*	*	ns	ns	ns

*Ghi chú: Các chữ cái khác nhau trong cùng một cột thể hiện sự sai khác có ý nghĩa ở mức 0,05 khi so sánh Ttest; ns sai khác không có ý nghĩa; * sai khác có ý nghĩa ở mức 0,05; ĐC là đối chứng; MH là mô hình.*

Số bông/m² dao động từ 318,00 - 334,33 bông. Tỉ lệ hạt chắc/bông đạt cao nhất là 84,88% đối với MH.

Năng suất lý thuyết: Áp dụng CT MH có năng suất cao hơn ĐC 0,22 tấn/ha, mặc dù CT ĐC có sử dụng phân bón hoá học.

Năng suất thực thu: tương tự năng suất lý thuyết, năng suất thực thu của CT MH cao hơn ĐC 0,37 tấn/ha, mặc dù CT MH sản xuất hoàn toàn hữu cơ, không bón phân hoá học.

Kết quả nghiên cứu của Chen et al. (2021) [97] cho rằng năng suất lúa được cải thiện nhờ việc tăng cường bón TSH. Năng suất lúa đạt cao nhất khi bón TSH với liều lượng cao (40 tấn/ha). Năng suất trung bình hai năm đạt 7.938,50 kg/ha, tăng 24,44% so với ĐC. Do bón than sinh học đã cải thiện số hạt chắc, số bông hữu hiệu và tỷ lệ hạt chắc, là những yếu tố chính giúp tăng năng suất lúa.

3.4.5. Hiệu quả kinh tế

Kết quả Bảng 3.34 cho thấy CT MH cho tổng thu cao hơn so với ĐC, dẫn đến lợi nhuận cao hơn và tỷ suất lợi nhuận (VCR) là 1,06.

Bảng 3.34. Hiệu quả kinh tế của mô hình

CT	Tổng thu (đồng/ha)	Tổng chi (đồng/ha)	Lợi nhuận (đồng/ha)	VCR
Đ/C	60.500.000	53.082.500	7.417.500	-
MH	99.560.000	89.800.000	9.760.000	1,06

Ghi chú: Giống = 18.000 đ/kg, Công = 250.000 đ/công, Cày đất = 4,4 triệu đ/ha, Phân Urê = 11.500 đ/kg, Lân Super = 10.000 đ/kg, Phân Kali = 11.000 đ/kg, TSH giàu Si từ vỏ trấu = 3.000.000 đ/tấn, Vôi = 4.500 đ/kg. Giá bán lúa = 10.000 đ/kg (Đ/C) và 15.500 đ/kg (MH). ĐC là đối chứng; MH là mô hình.

3.4.6. Hàm lượng Cd, Pb và Si trong đất và cây

Bảng 3.35. Hàm lượng Cd và Pb, Si của đất và cây sau thực hiện mô hình

CT	Trong đất				Trong cây		
	Hàm lượng tổng số (mg/kg)		Hàm lượng dễ tiêu (mg/kg)		Hàm lượng tổng số (mg/kg)		
	Cd	Pb	Cd	Pb	Cd	Pb	SiO ₂ (%)
Đ/C	1,05	39,14	0,045	0,81	0,040	0,21	11,6
MH	0,90	37,14	0,038	0,75	0,036	0,20	11,9

Ghi chú: ĐC là đối chứng; MH là mô hình.

Hàm lượng KLN tổng số và dễ tiêu trong đất: ở CT MH có Cd tổng số giảm 14,3%, Pb tổng số giảm 5,1%, Cd dễ tiêu giảm 15,6%, Pb dễ tiêu giảm 7,4% so với ĐC. Điều này cho thấy bón TSH từ vỏ trấu giúp giảm hàm lượng Cd và Pb tổng số trong đất.

Hàm lượng KLN trong cây: ở CT MH, Cd trong cây giảm 10%, Pb trong cây giảm 4,8% so với ĐC. Như vậy bón TSH từ vỏ trấu làm cho cây lúa trong MH hấp thu ít Cd và Pb hơn.

Hàm lượng SiO_2 trong cây: ở CT MH tăng nhẹ từ 11,6% đến 11,9%, có thể cho thấy do TSH từ vỏ trấu có hàm lượng Si cao, nên giúp cây tích lũy nhiều Si hơn (Wei et al., 2023) [244].

Tóm lại: Kết quả xây dựng mô hình sản xuất lúa trong vụ hè thu 2024 cho thấy CT MH sản xuất cao hơn ĐC về các mặt năng suất, hiệu quả kinh tế và giảm hàm lượng KLN trong đất, trong cây và tăng hàm lượng Si trong cây, cụ thể: lợi nhuận cao hơn ĐC 24%, giảm lượng KLN trong đất (Cd và Pb) từ 5,1 - 15,6%, KLN trong cây từ 4,8 - 10%, hàm lượng Si tăng 2,6%.

CHƯƠNG 4

KẾT LUẬN VÀ ĐỀ NGHỊ

4.1. KẾT LUẬN

1. Tỉnh Thừa Thiên Huế có diện tích lúa hơn 53,5 nghìn ha. Tổng lượng phụ phẩm hàng năm khoảng 72.797 tấn. Các loại phụ phẩm cây trồng như rơm rạ, vỏ trấu, vỏ lạc được sử dụng theo nhiều hình thức như đốt trên đồng ruộng, cho gia súc ăn, làm phân bón, than sinh học. Tuy nhiên, TSH từ vỏ trấu và vỏ lạc chưa được sử dụng rộng rãi tại địa bàn nghiên cứu.

2. Kết quả nghiên cứu hàm lượng KLN (Cd, Pb, Cu và Zn) cho thấy, đất trồng lúa tại xã Quảng Thọ, huyện Quảng Điền đều có hàm lượng KLN ở ngưỡng tiêu chuẩn cho phép, tại phường Thủy Dương, thị xã Hương Thủy có hàm lượng KLN vượt tiêu chuẩn cho phép ở một số mẫu đất với KLN (Cd và Pb). Hàm lượng Cd và Pb lớn hơn so với Cu và Zn, do vậy lựa chọn nghiên cứu tập trung vào Cd và Pb là những KLN gây ô nhiễm chính trong đất tại khu vực nghiên cứu.

3. TSH giàu Si từ vỏ trấu ở tỷ lệ 5% (thí nghiệm trong phòng) có khả năng hấp thu KLN Cd và Pb cao hơn so với TSH giàu Si từ vỏ lạc từ 2,36 - 8,99% (Cd) và 2,82 - 4,76% (Pb). Bón TSH giàu Si từ vỏ trấu ở lượng bón 15 g/kg đất (thí nghiệm trong nhà lưới) và 15 tấn/ha (thí nghiệm đồng ruộng) là tốt nhất và là lựa chọn khả thi để giảm hàm lượng KLN (Cd và Pb) trên đất trồng lúa. Mức giảm hàm lượng Cd tổng số và dễ tiêu từ 17,2 - 56,1% và hàm lượng Pb tổng số và dễ tiêu từ 35,2 - 47,2%.

4. Dạng và lượng bón TSH giàu Si từ vỏ trấu và vỏ lạc có ảnh hưởng đến một số chỉ tiêu sinh trưởng, sinh khối khô và năng suất lúa tại các thí nghiệm trong nhà lưới và trên đồng ruộng. Sinh khối khô và năng suất thực thu đạt cao nhất ở lượng bón 15 g/kg đất (thí nghiệm trong nhà lưới) và 15 tấn/ha (thí nghiệm đồng ruộng) trên cả 2 dạng TSH giàu Si từ vỏ trấu và vỏ lạc trên cây lúa. Sinh khối khô dao động từ 2,86 - 2,97 g/cây (thí nghiệm trong nhà lưới) và năng suất thực thu dao động từ 6,81 - 7,05 tấn/ha (thí nghiệm đồng ruộng) ở dạng TSH giàu Si từ vỏ trấu. Tăng hàm lượng Si trong cây sẽ làm giảm hàm lượng Cd và Pb tổng số.

5. Kết quả mô hình xác định được công thức bón 15 tấn TSH giàu Si từ vỏ trấu + 500 kg vôi/ha là phù hợp nhất cho giống lúa HT1 trên đất phù sa về năng suất, hiệu quả kinh tế và giảm hàm lượng KLN (Cd và Pb) tại xã Quảng Thọ, huyện Quảng Điền, tỉnh Thừa Thiên Huế.

4.2. KIẾN NGHỊ

1. Tiếp tục nghiên cứu các nguyên liệu khác từ phụ phẩm nông nghiệp trên các địa điểm và các loại đất khác để có các giải pháp toàn diện trong giảm hàm lượng KLN trong đất phục vụ sản xuất lúa hữu cơ.
2. Đề xuất áp dụng bón 15 tấn TSH giàu Si từ vỏ trấu + 500 kg vôi/ha trong sản xuất lúa trên đất phù sa tại tỉnh Thừa Thiên Huế.
3. Chuyển giao kết quả nghiên cứu đến các đơn vị địa phương có điều kiện sản xuất tương đồng.

DANH MỤC CÁC CÔNG TRÌNH KHOA HỌC ĐÃ CÔNG BỐ CỦA LUẬN ÁN

1. Trương Thị Diệu Hòa, Trần Thanh Đức, Hoàng Thị Thái Hòa, 2023. Tình hình sử dụng phụ phẩm cây trồng và một số tính chất đất trồng lúa tại huyện Quảng Điền, tỉnh Thừa Thiên Huế. Tạp chí Khoa học Đại học Huế, 132 (3B): 143-155.
2. Trương Thị Diệu Hòa, Trần Thanh Đức, Trần Thị Hương Sen, Hoàng Thị Thái Hòa, 2023. Nghiên cứu một số tính chất hóa học đất và đề xuất biện pháp cải tạo đất trồng lúa và rau má tại tỉnh Thừa Thiên Huế. Kỷ yếu Hội thảo khoa học Quản lý đất đai lần thứ I vào tháng 9/2023, Hà Nội.
3. Truong Thi Dieu Hoa, Tran Thanh Duc, Tran Thi Huong Sen, Hoang Thi Thai Hoa, 2024. Management of heavy metals in rice (*Oryza sativa*) soils by silicon rich biochar materials. Indian Journal of Agricultural Sciences, 94(3): 241-245. ISI/SCIE (Q4).
4. Truong Thi Dieu Hoa, Tran Thanh Duc, Do Dinh Thuc, Trinh Thi Sen, Hoang Thi Thai Hoa, 2024. Effect of silicon based fertilizer and biochar from crop residues on dry matter accumulation and Si uptake by rice crop in Central Vietnam. Indian Journal of Agricultural Research, 58(4): 588-594. Scopus Q3.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

Tài liệu tiếng Việt

- [1]. Bộ Tài nguyên và Môi trường (2015). *Quy định về kỹ thuật điều tra đánh giá đất đai*. Thông tư 60/2015/TT-BTNMT.
- [2]. Nguyễn Thanh Bình, Đỗ Đình Thực, Dương Văn Hậu (2015). Khảo sát thực trạng sản xuất rau và hàm lượng kim loại nặng trong đất trồng rau và nước tưới tại thị xã Hương Trà, tỉnh Thừa Thiên Huế. *Tạp chí Khoa học Đại học Huế*, 108 (9).
- [3]. Nguyễn Thanh Bình, Hà Trần Quang Nghiêm (2023). Ảnh hưởng của TSH đến hàm lượng kim loại ở dạng trao đổi trong đất trồng lúa nước. *Tạp chí Khoa học: Khoa học Trái đất và Môi trường*, 39(2), 78-94.
- [4]. Nguyễn Hữu Chiêm, Huỳnh Công Khánh, Nguyễn Xuân Lộc và Đinh Thị Việt Huỳnh (2017). Đánh giá và so sánh tính chất lý, hóa học đất trồng lúa trong và ngoài đê bao khép kín tỉnh An Giang. *Tạp chí Khoa học Trường Đại học Cần Thơ*, 1, 86-92.
- [5]. Đỗ Minh Cường (2022). *Báo cáo tổng kết Dự án Khoa học và Công nghệ cấp tỉnh Thừa Thiên Huế*. Sở Khoa học và Công nghệ tỉnh Thừa Thiên Huế.
- [6]. Trần Viết Cường (2022). *Vai trò của than sinh học trong canh tác nông nghiệp và giảm nhẹ biến đổi khí hậu*. Trường Đại học Hà Tĩnh (<https://agr.htu.edu.vn/nghien-cuu/vai-tro-cua-than-sinh-hoc-trong-canh-tac-nong-nghiep-va-giam-nhe-bien-doi-khi-hau.html>).
- [7]. Nguyễn Thị Phương Dung (2024). *Kim loại nặng trong đất và mối liên quan với sinh lý cây trồng*. Học viện Nông nghiệp Việt Nam.
- [8]. Mai Văn Định (2020). *Nghiên cứu xây dựng mô hình sử dụng thực vật để xử lý đất nhiễm Asen do hoạt động khai thác, chế biến khoáng sản*. Cục Thông tin Khoa học công nghệ quốc gia.
- [9]. Đinh Đại Gái, Nguyễn Thanh Bình, Lý Thanh Bình (2022). Cải thiện hàm lượng kim loại nặng trong đất phèn nhiễm mặn bằng TSH. *Tạp chí Khoa học và Công nghệ*, 59 (05), 182-190.
- [10]. Phạm Hoàng Giang, Đỗ Quang Huy (2016). Nghiên cứu xử lý kim loại nặng trong nước bằng phương pháp hấp thu trên phụ phẩm nông nghiệp biến tính axit photphoric. *Tạp chí Khoa học Đại học quốc gia Hà Nội: Khoa học Trái đất và Môi trường*, 32(1S), 96-101.

- [11]. Nguyễn Thanh Giao, La Nguyễn Khiết Linh, Lâm Thị Kiều Trinh, Huỳnh Thị Hồng Nhiên. (2021). Hiện trạng sử dụng thuốc bảo vệ thực vật và hiệu quả kinh tế của mô hình canh tác sầu riêng tại Cù Lao dài, huyện Vũng Liêm, tỉnh Vĩnh Long *Tạp chí Khoa học Trường Đại học Cần Thơ*, 57(1), 79-89.
- [12]. Nguyễn Thanh Giao và Trương Hoàng Đan (2021). Hàm lượng kim loại nặng trong đất nông nghiệp tỉnh Bạc Liêu. *Tạp chí Khoa học đất*, 61, 47-52.
- [13]. Cao Việt Hà (2012). Đánh giá tình hình ô nhiễm chì và đồng trong đất nông nghiệp huyện Văn Lâm, tỉnh Hưng Yên. *Tạp chí Khoa học và Phát triển*, 10(4), 648-653.
- [14]. Phạm Quang Hà (2024). *Quản lý đất ô nhiễm cadimi và các loại kim loại nặng bằng cách nào*, Báo Nông nghiệp (<https://nongnghiep.vn/tri-thuc-nong-dan/quan-ly-dat-o-nhiem-cadimi-va-cac-loai-kim-loai-nang-bang-cach-nao-d82381.html>).
- [15]. Đồng Thị Minh Hậu, Hoàng Thị Thanh Thủy, Đào Phú Quốc (2008). Nghiên cứu và lựa chọn một số thực vật có khả năng hấp thu các kim loại nặng (Cr, Cu, Zn) trong bùn nạo vét kênh Tân Hóa - lò gốm. *Tạp chí Phát triển Khoa học công nghệ*, 11(4), 1-8.
- [16]. Hoàng Thị Thái Hòa, Hồ Huy Cương, Trần Thị Mai, Hồ Sĩ Công, Nguyễn Hoà Hân, Phạm Văn Nhân, Trần Quang Long (2023). Ảnh hưởng của lượng giống gieo và liều lượng phân đạm đến giống lúa BDR 36 tại tỉnh Bình Định. *Tạp chí Khoa học Đất*, 72, 25-29.
- [17]. Nguyễn Văn Hòa (2022). *Hiệu quả mô hình sản xuất lúa thích ứng khí hậu vùng ven phá*. Viện KHKT Nông nghiệp Bắc Trung Bộ.
- [18]. Phạm Thị Lệ Huyền, Võ Quang Minh. (2014). Đánh giá khả năng mô phỏng chỉ số diện tích lá lúa bằng phần mềm Oryza 2000. *Tạp chí Khoa học Trường Đại học Cần Thơ*, (3), 57-62.
- [19]. Đỗ Hương (2021). *Phụ phẩm nông nghiệp: Nguồn tài nguyên đang bị lãng phí* (<https://baochinhphu.vn>).
- [20]. Phạm Công Khải (2018). *Cẩm nang kỹ thuật nông nghiệp cho nhà nông* (<https://nanobacsuper.com/vai-tro-cua-silic-va-ung-dung-cua-nano-silic-tren-cay-trong>).
- [21]. Vũ Thị Khắc, Đinh Thị Lan Phương, Lê Thị Thắng, Nguyễn Thị Hằng Nga (2022). Sử dụng phụ cây lúa cải tạo đặc tính đất, hạn chế tích lũy cadimi (cd) trong hạt dưới điều kiện đất trồng ô nhiễm. *Khoa học kỹ thuật thủy lợi và môi trường*, 78 (3), 22-30.

- [22]. Lê Văn Khoa, Nguyễn Xuân Cự, Bùi Thị Ngọc Dung, Lê Đức, Trần Khắc Hiệp, Cái Văn Tranh (2001). Phương pháp phân tích đất nước phân bón cây trồng. NXB Giáo dục, Hà Nội.
- [23]. Trần Anh Khoa, Nguyễn Phan Khánh Thịnh, Phan Đình Tuấn (2017). Khảo sát khả năng xử lý nước của than hoạt tính sản xuất từ trấu. *Tạp chí Môi trường*, 1, 41-44.
- [24]. Đặng Đình Kim (2013). Dùng cây xanh xử lý đất ô nhiễm kim loại nặng, bộ khoa học và công nghệ (<https://www.most.gov.vn/cchc/tin-tuc/593/535/dung-cay-xanh-xu-ly-dat-o-nhiem-kim-loai-nang.aspx>).
- [25]. Trần Bá Linh, Trần Sỹ Nam, Mitsunori Tarao (2021). Nghiên cứu tính chất vật lý và hóa học đất phù sa canh tác lúa dưới tác động của đê bao ngăn lũ ở huyện Châu Phú - tỉnh An Giang. *Tạp chí Khoa học và Công nghệ Nông nghiệp Việt Nam*, 9 (130).
- [26]. Trần Thị Tường Linh, Võ Đình Quang, Lê Thị Hằng, Phan Liêu (2005). Ảnh hưởng của việc bón lân, Silicate natri và Silicoflouride natri đến sự sinh trưởng và hấp thu dinh dưỡng của cây lúa trồng trên đất phèn trong nhà lưới. *Tạp chí Nông nghiệp và phát triển nông thôn*, (3+4), 33-36.
- [27]. Nguyễn Quang Lịch, Nguyễn Hồ Lam (2023). Nghiên cứu sự biến động của một số tính chất hóa học của đất trồng lúa nhiễm mặn và ngập lụt ở tỉnh Thừa Thiên Huế. *Tạp chí Khoa học và Công nghệ Nông nghiệp*, 7(2)-2023, 3598-3608.
- [28]. Nguyễn Ngọc Minh (2018). *Nghiên cứu dòng Si trên đất lúa đồng bằng sông Hồng*. Cục Thông tin Khoa học và Công nghệ quốc gia.
- [29]. Trần Sỹ Nam, Nguyễn Thị Huỳnh Như, Nguyễn Hữu Chiêm, Nguyễn Võ Châu Ngân, Lê Hoàng Việt và Kjeld Ingvorsen (2014). Ước tính lượng và các biện pháp xử lý rơm rạ ở một số tỉnh đồng bằng sông Cửu Long. *Tạp chí Khoa học Trường Đại học Cần Thơ*, 32, 87-98.
- [30]. Đỗ Thành Nhân, Lại Đình Hòa, Nguyễn Thị Thương, Huỳnh Thanh Trà My, Lê Đức Dũng, Lê Hồng Ân, Nguyễn Đức Chí Công và Trần Thu Nga (2020). Tính chất vật lý và hóa học của đất canh tác lúa hàng hóa khu vực miền Trung. *Tạp chí Viện khoa học Nông nghiệp Việt Nam*, 8 (105), 117-122.
- [31]. Nguyễn Đăng Nghĩa (2014). *Vai trò của than sinh học (biochar) sản xuất và ứng dụng hiệu quả than sinh học*. Sở khoa học và công nghệ thành phố Hồ Chí Minh.
- [32]. Niên giám thống kê tỉnh Thừa Thiên Huế 2024, Cục thống kê tỉnh Thừa Thiên Huế. *Nhà xuất bản Thuận Hóa*.

- [33]. Đinh Thị Lan Phương, Vũ Thị Khắc, Nguyễn Thị Hằng Nga, Đặng Tuấn Anh (2021). Giảm độc tố Cd di động trong đất nông nghiệp ô nhiễm bằng than sinh học (phụ phẩm cây lúa) và đá perlite. *Tạp chí Khoa học kỹ thuật Thủy lợi và Môi trường*, 74, 144-150.
- [34]. Đinh Thị Lan Phương, Phạm Thị Thư, Vũ Thị Khắc, Nguyễn Phan Việt (2022). Giảm độc tố Cd trong đất ô nhiễm bởi vật liệu chi phí rẻ từ phụ phẩm nông nghiệp. *Tạp chí Khoa học kỹ thuật Thủy lợi và Môi trường*, 81, 56-64.
- [35]. Trần Thị Xuân Phương, Hoàng Trọng Nghĩa, Hồ Đăng Khoa, Tôn Thất Các, Phùng Viên, Trương Phước Hiếu, Nguyễn Hoàng Linh (2021). Hiện trạng sản xuất lúa và xử lý rơm rạ sau thu hoạch ở tỉnh Thừa Thiên Huế. *Tạp chí Khoa học và Công nghệ Nông nghiệp*, 5 (3), 2720-2726
- [36]. Trần Thị Xuân Phương, Nguyễn Thị Giang, Hoàng Trọng Nghĩa, Trần Đức Hạnh, Phạm Xuân Phương, Nguyễn Thị Ngọc, Đỗ Minh Cường, Trần Lâm Sinh (2023). Hiệu quả của biochar trong canh tác lúa ở Thừa Thiên Huế. *Tạp chí khoa học và công nghệ nông nghiệp, Trường Đại học Nông Lâm Huế*, 6 (3), 3196-3204.
- [37]. Nguyễn Thị Kim Phượng, Nguyễn Thị Huỳnh Như, Trần Anh Đức, Đặng Duy Minh, Đoàn Thị Trúc Linh, Châu Minh Khôi (2022). Ảnh hưởng của bón biochar đến sự thay đổi tính chất hóa học đất nhiễm mặn và năng suất lúa trên hệ thống lúa – tôm. *Tạp chí Nông nghiệp và Phát triển nông thôn*, 2 (6), 62-70.
- [38]. QCVN 03: 2023/BTNMT (2023). *Quy chuẩn kỹ thuật quốc gia về chất lượng đất*. Bộ Tài nguyên và Môi trường.
- [39]. QCVN 01-38:2010/BNNPTNT (2010). *Quy chuẩn kỹ thuật quốc gia về Phương pháp điều tra phát hiện dịch hại cây trồng*. Bộ Nông nghiệp và phát triển nông thôn.
- [40]. QCVN 01-166:2014/BNNPTNT (2014). *Quy chuẩn kỹ thuật quốc gia về Phương pháp điều tra phát hiện dịch hại lúa*. Bộ Nông nghiệp và phát triển nông thôn.
- [41]. QCVN 01-55:2011/BNNPTNT (2011). *Quy chuẩn kỹ thuật Quốc gia Khảo nghiệm giá trị canh tác và sử dụng giống lúa*. Bộ Nông nghiệp và phát triển nông thôn
- [42]. QCVN 03:2015/BTNMT (2015), *Quy chuẩn kỹ thuật quốc gia về chất lượng đất*, Bộ Tài nguyên và Môi trường.
- [43]. Trịnh Thị Sen (2023). *Giáo trình Cây lương thực*, NXB Đại học Huế, Huế.

- [44]. Trần Thanh Sơn, Đinh Việt Chiến, Nguyễn Thị Ánh Hương, Kim Kyoung-Woong (2021). Kim loại nặng và nồng độ asen trong nước, đất nông nghiệp và lúa ở huyện Ngân Sơn, tỉnh Bắc Kạn, Việt Nam. *Tạp chí Kiểm soát thực phẩm Việt Nam*, 3 (4), 270-282.
- [45]. Nguyễn Hồng Sơn, Nguyễn Thị Nguyệt Thu (2015). Nghiên cứu khả năng sử dụng TSH để thay thế phân chuồng và phân vô cơ trong sản xuất lúa. *Tạp chí Khoa học và Công nghệ Nông nghiệp Việt Nam*, (2), 66-74.
- [46]. Sổ tay Phân tích đất, nước, phân bón, cây trồng (1989). Viện Thổ nhưỡng Nông hóa, NXB Nông nghiệp.
- [47]. Sở NN&PTNT Thừa Thiên Huế (2023). *Báo cáo tổng kết sản xuất vụ xuân và vụ hè thu*.
- [48]. Ngô Nam Thanh, Võ Quang Minh, Lê Việt Dũng (2018). Đánh giá hàm lượng kim loại nặng trong đất phèn trồng lúa có bón phân xi thép tại tỉnh Kiên Giang và Hậu Giang. *Tạp chí Khoa học trường Đại học Cần Thơ*, 54, 157-163.
- [49]. Vũ Thắng, Nguyễn Hồng Sơn (2011). Nghiên cứu ứng dụng TSH nâng cao sức sản xuất của đất: ảnh hưởng loại và lượng bón TSH đến sinh trưởng và năng suất lúa. *Tạp chí Khoa học và Công nghệ Nông nghiệp Việt Nam*, 3 (24), 56-61.
- [50]. Lê Hồng Thía, Nguyễn Văn Phương (2022). Đánh giá ô nhiễm kim loại nặng trong trầm tích hạ lưu sông Vàm Thuật. *Tạp chí Khoa học và Công nghệ*, 59, 133-144
- [51]. Tiêu chuẩn Quốc gia (2007). *Lấy mẫu đất trồng trọt*. TCVN 7538-2:2007. Hà Nội.
- [52]. Tiêu chuẩn Quốc gia (2007). *Chất lượng đất - Xác định pH*. TCVN 5979:2007. Hà Nội.
- [53]. Tiêu chuẩn Quốc gia (2007). *Rau, quả và sản phẩm rau, quả - Xác định hàm lượng chì - Phương pháp đo phổ hấp thụ nguyên tử không ngọn lửa*. TCVN 7766:2007. Hà Nội.
- [54]. Tiêu chuẩn Quốc gia (2007). *Xác định hàm lượng cadimi sản phẩm rau quả*. TCVN 7768-2:2007. Hà Nội.
- [55]. Tiêu chuẩn Quốc gia (1991). *Rau quả và các sản phẩm chế biến - xác định hàm lượng kẽm bằng phương pháp quang phổ hấp thụ nguyên tử*. TCVN 5487:1991. Ủy ban Khoa học Nhà nước. Hà Nội
- [56]. Tiêu chuẩn Quốc gia (2010). *Chất lượng đất - Phương pháp xác định dung lượng cation trao đổi (CEC) - Phương pháp dùng amoni axetat*. TCVN 8568:2010. Hà Nội.

- [57]. Tiêu chuẩn Quốc gia (2016). *Xác định hàm lượng silic dioxide bằng phương pháp khối lượng*. TCVN 7131:2016. Hà Nội.
- [58]. Tiêu chuẩn Quốc gia (2019). *Xác định hàm lượng silic hữu hiệu bằng phương pháp phổ hấp thụ phân tử*. TCVN 11407:2019. Hà Nội.
- [59]. Tiêu chuẩn Quốc gia (2011). *Chất lượng đất - Phương pháp xác định kali tổng số*. TCVN 8660:2011. Hà Nội.
- [60]. Tiêu chuẩn Quốc gia (2011). *Chất lượng đất - xác định nguyên tố vết trong dịch chiết xuất đất bằng phổ phát xạ nguyên tử plasma cặp cảm ứng (ICP-AES)*. TCVN 8885:2011. Hà Nội.
- [61]. Tiêu chuẩn Việt Nam (2011). *Chất lượng đất - Xác định Phospho tổng số - Phương pháp so màu*. TCVN 8940:2011. Hà Nội.
- [62]. Tiêu chuẩn Việt Nam (1985). *Đất trồng trọt - Phương pháp xác định tổng số chất hữu cơ*. TCVN 4050:1985. Hà Nội.
- [63]. Tiêu chuẩn Việt Nam (2009). *Chất lượng đất - Xác định Cadimi, crom, coban, chì, đồng, kẽm, mangan và Niken trong dung dịch chiết đất bằng cường thủy - các phương pháp quang phổ hấp thụ nguyên tử ngọn lửa và nhiệt điện (không ngọn lửa)*, TCVN 6496:2009, Hà Nội.
- [64]. Tiêu chuẩn Việt Nam (1999). *Chất lượng đất - Xác định Nito tổng - Phương pháp Kendan (kjeldahl) cải biên*. TCVN 6698:1999. Hà Nội.
- [65]. Tiêu chuẩn Việt Nam (1999). *Xác định hàm lượng đồng - Phương pháp quang phổ hấp thụ nguyên tử ngọn lửa*. TCVN 6541:1999. Hà Nội.
- [66]. Trần Thị Minh Thu, Trần Anh Tuấn, Trần Minh Tiến (2018). Đánh giá thực trạng ô nhiễm kim loại nặng trong đất nông nghiệp tỉnh Bắc Ninh. *Tạp chí Khoa học Công nghệ Nông nghiệp Việt Nam*, 8 (93), 102-107.
- [67]. Võ Thị Minh Thảo, Nguyễn Minh Khánh, Nguyễn Thị Hạnh Nguyên, Trần Tuấn Anh, Phạm Thị Ái Niệm, Nguyễn Tấn Đức, Nguyễn Ngọc Phi, Nguyễn Thị Bích Tuyền, Đoàn Ngọc Ngân, Trần Ngọc Quốc Tường (2021). Ảnh hưởng của nhiệt độ nhiệt phân đến tính chất hóa lý của than sinh học từ trấu. *HCMCOUJS-Kỹ thuật và Công nghệ*, 16 (1), 121-135.
- [68]. Mai Văn Trịnh (2011). *Nghiên cứu sử dụng rơm rạ sản xuất TSH nhằm cải tạo đất, giảm thiểu ô nhiễm môi trường tại Sóc Sơn - Hà Nội*. Báo cáo Tổng kết đề tài. Viện Môi trường Nông nghiệp.
- [69]. Tổng cục thống kê (2023). *Số liệu thống kê về diện tích, năng suất lúa*. NXB Hà Nội.

- [70]. Trung tâm khí tượng thủy văn Thừa Thiên Huế (2024). *Khí hậu thủy văn năm 2023, 2024*. Thừa Thiên Huế.
- [71]. Đàm Xuân Vận, Ông Á Huân, Trần Thị Phả (2018). Nghiên cứu hàm lượng một số kim loại nặng trong đất nông nghiệp tại huyện Phú Lương, tỉnh Thái Nguyên ở các loại địa Hình và chế độ canh tác khác nhau. *Tạp chí Khoa học Nông nghiệp*, 4, 23-28.
- [72]. Đỗ Năng Vịnh, Hà Thị Thúy, Lê Quốc Hùng, Dương Ngô Thành Trung và Nguyễn Văn Toàn (2020). Nghiên cứu năng suất hạt và tiềm năng sinh khối cây lúa và một số định hướng ứng dụng. *Tạp chí Khoa học Nông nghiệp Việt Nam*, 18(8), 570 - 579.

Tài liệu tiếng Anh

- [73]. Abbas T, Rizwan M, Ali S, Zia-ur-Rehman M, Qayyum MF, Abbas F, Hannan F, Rinklebe J, Ok YS. (2017). Effect of biochar on cadmium bioavailability and uptake in wheat (*Triticum aestivum* L.) grown in a soil with aged contamination. *Ecotoxicology Environment Safety*, 140, 37-47.
- [74]. Abdelhafez AA, Li J, Abbas MHH. (2014). Feasibility of biochar manufactured from organic wastes on the stabilization of heavy metals in a metal smelter contaminated soil. *Chemosphere*, 117: 66-71.
- [75]. Abdullah EHE, Misran A, Yaapar MN, Yusop MR, Ramli A. (2021). The potential of silicon in improving rice yield, grain quality, and minimising chalkiness: A Review. *Pertanika Journal of Tropical Agriculture Science*, 44 (3), 655 - 672.
- [76]. Abiven S, Hund A, Martinsen V, Cornelissen G. (2015). Biochar amendment increases maize root surface areas and branching: a shovelomics study in Zambia. *Plant and Soil*, 7, 19-27.
- [77]. Abrishamkesh S, Gorji M, Asadi H, Bagheri-Marandi GH, Pourbabae AA. (2015). Effects of rice husk biochar application on the properties of alkaline soil and lentil growth. *Plant, Soil and Environment*, 61 (11), 475-482
- [78]. Abulaiti A, She D, Liu Z, Sun X, Wang H. (2023). Application of biochar and polyacrylamide to revitalize coastal saline soil quality to improve rice growth. *Environment Science Pollution Research*, 30 (7), 18731-18747.
- [79]. Adrees M, Ali S, Rizwan M, Zia-ur-Rehman M, Ibrahim M, Abbas F, Farid M, Qayyum MF, Irshad MK. (2015). Mechanisms of Sion-mediated alleviation of heavy metal toxicity in plants: A review. *Ecotoxicology Environment Saf*, 119, 186-197.

- [80]. Ahmad M, Lee SS, Dou X, Mohan D, Sung JK, Yang JE, Ok YS. (2012). Effects of pyrolysis temperature on soybean stover-and peanut shell-derived biochar properties and TCE adsorption in water. *Bioresource Technology*, 118, 536-544.
- [81]. Ahmad M, Wang X, Hilger TH, Luqman M, Nazli F, Hussain A, Zahir ZA, Latif M, Saeed Q, Malik HAJA. (2020). Evaluating biochar-microbe synergies for improved growth, yield of maize, and post-harvest soil characteristics in a semi-arid climate. *Agronomy*, 10, 1055.
- [82]. Ahmed, M., Hossain, M. A., & Rahman, M. M. (2023). Enhancement of lead (Pb) removal from contaminated agricultural soils using *Vetiveria zizanioides* associated with *Bacillus subtilis*. *Environmental Science and Pollution Research*, 30, 17652–17665.
- [83]. Ahmed, A., & Aidi, H. (2025). Biochar for heavy metal remediation: Mechanisms, modifications, and environmental applications. *Environmental Science and Pollution Research*.
- [84]. Ali I, Ullah S, He L, Zhao Q, Iqbal A, Wei S, Shah T, Ali N, Bo Y, Adnan M, Amanullah, Jiang, L. (2020). Combined application of biochar and nitrogen fertilizer improves rice yield, microbial activity and N-metabolism in a pot experiment. *Peer Journal*, 8, e10311.
- [85]. Al-Dabbas M, A. Abdullah M. (2020). Assessment of soil pollution in the Ishaqi project area – Salah Al-Dean Governorate, Iraq. *Iraqi Journal of Science*, 61(2), 382-388.
- [86]. Al-Khuzaie, AA., & Maulud, KNA. (2022). Assessment of heavy metals pollution in the soil of Al-Shamiyah city, Iraq using pollution load index (PLI). *Environmental Earth Sciences*, 23(3), 206-213.
- [87]. Alloway B. J. (2013). *Heavy Metals in Soils: Trace Metals and Metalloids in Soils and their Bioavailability (3rd ed.)*. Springer
- [88]. Angulo-Bejarano P I, Martínez-Téllez M A, & Vargas-Arispuro I. (2021). Heavy metal stress and plant response: Physiological, biochemical and molecular mechanisms. *Plants (Basel)*, 10 (11), 2316.
- [89]. Anwaar SA, Ali S, Ali S, Ishaque W, Farid M, Farooq MA, Najeeb U, Abbas F, Sharif M. (2015). Sion (Si) alleviates cotton (*Gossypium hirsutum* L.) from zinc (Zn) toxicity stress by limiting Zn uptake and oxidative damage. *Environment Science Pollution Research*, 22, 3441- 3450.

- [90]. Asadi H, Ghorbani M, Rezaei-Rashti M, Abrishamkesh S, Amirahmadi E, Chengrong C, Gorji M. (2021). Application of Rice Husk Biochar for Achieving Sustainable Agriculture and Environment, *Rice Science*, 28 (4): 325-343.
- [91]. Baccio D, Tognetti R, Minnocci A, Sebastiani L. (2015). Responses of the *Populus×euramericana* clone I-214 to excess zinc: Carbon assimilation, structural modifications, metal distribution and cellular localization. *Environmental and Experimental Botany*, 67 (1), 153-163.
- [92]. Bebeley HA, Mabey PT, Norman PE. (2021). Effects of biochar, plant density and spacing on growth and yield of rice in a tropical inland valley swamp. *International Journal of Applied Agriculture Science*, 7(2), 77-83.
- [93]. Bhat JA, Shivaraj SM, Singh P, Navadagi DB, Tripathi DK, Dash PK, Solanke AU, Sonah H, Deshmukh R. (2019). Role of silicon in mitigation of heavy metal stresses in crop plants. *Plants*, 8: 71.
- [94]. Cao X, Ma L, Liang Y, Gao B, Harris W. (2011). Simultaneous immobilization of lead and atrazine in contaminated soils using dairy-manure biochar. *Environment Science Technology*, 45, 4884-4889.
- [95]. Cedeño A, Manuel Olmo, Galo Cedeño, María Lucas, Veris Saldarriaga, Rafael Villar. (2024). Effects of Different Biochar Types on the Growth and Functional Traits of Rice (*Oryza sativa* L.). *Journal of Ecological Engineering*, 25 (3), 282–290.
- [96]. Chen L, Li Z, Li W, Chen Z, Chen G, Yang W, Zhang X, Liu X. (2021). Investigation of adsorption kinetics and the isotherm mechanism of manganese by modified diatomite. *ACS Omega*, 6, 16402-6409.
- [97]. Chen X, Yang S, Ding J, Jiang Z, Sun X. (2021). Effects of Biochar Addition on Rice Growth and Yield under Water-Saving Irrigation. *Water*, 13 (2) : 209.
- [98]. Chen L, Li X, Peng Y, Zhou Y, Yao B, Zho Y, Sun C. (2022). Co-application of biochar and organic fertilizer promotes the yield and quality of red pitaya (*Hylocereus polyrhizus*) by improving soil properties. *Chemosphere*, 294, 133619.
- [99]. Chen L, Guo L, Xiong Q, Liao P, Deng X, Pan X, Tan X, Xie X, Dai Q, Gao H, Wei H, Zeng Y, Zhang H. (2023). Biochar-mediated Cd accumulation in rice grains through altering chemical forms, subcellular distribution, and physiological characteristics. *Biochar*, 5, 48.

- [100]. Cocker KM, Evans DE, Hodson MJ. (1998). The amelioration of aluminum toxicity by Si in higher plants: Solution chemistry or a plant mechanism. *Physiologia Plantarum*, 104(4), 608-614.
- [101]. Cui YF, Jun MENG, Wang QX, Zhang WM, Cheng XY, Chen WF. (2017). Effects of straw and biochar addition on soil nitrogen, carbon, and super rice yield in cold waterlogged paddy soils of North China. *Journal of Integrated Agriculture*, 16 (5), 1064-1074.
- [102]. Cuong TX, Ullah H, Datta A, Hanh TC. (2017). Effects of silicon-based fertilizer on growth, yield and nutrient uptake of rice in tropical zone of Vietnam. *Rice Science*, 24 (5), 283-290.
- [103]. Dan Tan, Chuang Mei, Liwen Yang, Jianzhu Chen, Fahd Rasul, Kunzheng Cai (2024). Si-enriched biochars improved soil properties, reduced Cd bioavailability while enhanced Cd translocation to grains of rice. *Environmental Science and Pollution Research International*, 31(8): 12194-12206.
- [104]. Desplanques V, Cary L, Mouret JC. (2006). Silicon transfers in a rice field in Camargue (France). *Journal of Geochemical Exploration*, 88 (1-3), 190-193.
- [105]. Deshmukh RK, Ma JF, Belanger. (2017). The role of Silicon in plant. *Frontiers in Plant Science*, 8, 1858.
- [106]. Dey S, Purakayastha TJ, Sarkar B, Rinklebe J, Kumar S, Chakraborty R, Datta A, Lal K, Shivay YS. (2023). Enhancing cation and anion exchange capacity of rice straw biochar by chemical modification for increased plant nutrient retention. *Science of The Total Environment*, 886, 163681.
- [107]. Deyi Hou, Xiyue Jia , Liuwei Wang, Steve P. McGrath, Yong-Guan Zhu, Qing Hu, Fang-Jie Zhao, Michael S. Bank, David O'Connor, Jerome Nriagu (2025), Global soil pollution by toxic metals threatens agriculture and human health. *Science* 388, 316 (2025) DOI: 10.1126/science.adr5214
- [108]. Ding W, Dong X, Ime IM, Gao B, Ma LQ. (2014). Pyrolytic temperatures impact lead sorption mechanisms by bagasse biochars. *Chemosphere*, 105, 68-74.
- [109]. Ding X, Zhang S, Li S, Liao X, Wang R. (2011). Silicon mediated the detoxification of Cr on Pakchoi (*Brassica Chinensis* L.) in Cr-contaminated soil. *Procedia Environment Science*, 18, 58-67.
- [110]. Dinh Xuan Thanh, Nguyen Thuy Duong, Nguyen Van Huong, Dinh Van Thai, Chan Thi Dung, Nguyen Hong Quan. (2024). Assessment of sediment quality of some heavy metals in the Con Lu Bay area, Giao Thuy district, Nam Dinh

- province. *VNU Journal of Science: Earth and Environmental Sciences*, 40(4), 26-42.
- [111]. Divyangkumar N, Panwar NL. (2025). Optimizing high performance biochar from sugarcane bagasse and corncob via vacuum pyrolysis. *Energy*, 360(3), 100014.
- [112]. Dobermann A, Fairhurst T. (2000). *Rice: nutrient disorders and nutrient management*. IRRI. Philippine.
- [113]. Driesen E, Van W den Ende, De Proft M, Saeys W. (2020). Influence of environmental factors light, CO₂, temperature, and relative humidity on stomatal opening and development: A Review. *Agronomy*, 10 (12), 1975.
- [114]. Ebido, N.E., Edeh, I.G., Unagwu, B.O., Nnadi, A.L., Ozongwu, O.V., Obalum, S.E., Igwe, C.A. (2021). Ricehusk biochar effects on organic carbon, aggregate stability and nitrogen-fertility of coarse-textured Ultisols evaluated using *Celosia argentea* growth. *Sains Tanah Journal of Soil Science and Agroclimatology*, 18 (2): 177-187.
- [115]. Elkhilifi Z, Iftikhar J, Sarraf M, Ali B, Saleem MH, Ibranshabib I, Bispo MD, Meili L, Ercisli S, Torun Kayabasi E. (2023). Potential role of biochar on capturing soil nutrients, carbon sequestration and managing environmental challenges: A Review. *Sustainability*, 15(3), 2527.
- [116]. Ernest B, Yanda PZ, Hansson A. (2024). Long-term effects of adding biochar to soils on organic matter content, persistent carbon storage, and moisture content in Karagwe, Tanzania. *Scientific Reports*, 14, 30565.
- [117]. Etesami H, Jeong BR. (2018). Silicon (Si): Review and future prospects on the action mechanisms in alleviating biotic and abiotic stresses in plants. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 147, 881-896.
- [118]. Farooq MA, Dietz KJ. (2015). Silicon as versatile player in plant and human biology: Overlooked and poorly understood. *Frontier Plant Science*, 6, 1-14.
- [119]. Ghime D, Ghosh P. (2017). Heterogeneous Fenton degradation of oxalic acid by using Sia supported iron catalysts prepared from raw rice husk. *Journal Water Process Engineering*, 19, 156-163.
- [120]. Gu HH, Qiu H, Tian T, Zhan SS, Chaney RL, Wang SZ, Tang YT, Morel JL, Qiu RL. (2013). Mitigation effects of silicon rich amendments on heavy metal accumulation in rice (*Oryza sativa* L.) planted on multi-metal contaminated acidic soil. *Chemosphere*, 83, 1234-1240.

- [121]. Gujre N, Soni A, Rangan L, Tsang DC, Mitra S. (2021). Sustainable improvement of soil health utilizing biochar and arbuscular mycorrhizal fungi: a review. *Environment Pollution*, 268, 115549.
- [122]. Guo H, Zhang Q, Chen Y, Lu H. (2023). Effects of biochar on plant growth and hydro-chemical properties of recycled concrete aggregate. *Science Total Environment*, 882, 163557.
- [123]. Guo Y, Yi Yang, Ruxia Li, Xiaoyong Liao, Yonghua Li. (2023). Distribution of cadmium and lead in soil–rice systems and their environmental driving factors at the island scale. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 265, 115530.
- [124]. Ha Thu Trinh, Cuc Thi Dinh, Hanh Thi Duong, Giang Truong Le. (2021). Heavy metals in flooded paddy soil in central Vietnam. *Journal of Analytical Chemistry, Physics and Biology*, 26(3B): 288-292.
- [125]. Hafeez A, Pan T, Tian J, Cai K. (2022). Modified biochars and their effects on soil quality: a review. *Environments*, 9 (5), 60.
- [126]. Hamzah Z, Shuhaimi SNA. (2018). Biochar: effects on crop growth. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 215 (1).
- [127]. Han L, Sun K, Yang Y, Xia X, Li F, Yang Z, Xing B. (2020). Biochar's stability and effect on the content, composition and turnover of soil organic carbon. *Geoderma*, 364, 114184.
- [128]. Hasan R, Chong CC, Bukhari SN, Jusoh R, Setiabudi HD. (2019). Effective removal of Pb(II) by low-cost fibrous Sia KCC-1 synthesized from silica-rich rice husk ash. *Journal of Industry and Engineering Chemistry*, 75, 262-270.
- [129]. Hasan GMNA, Das AK & Satter MA. (2022). Accumulation of heavy metals in rice (*Oryza sativa*. L) grains cultivated in three major industrial areas of Bangladesh. *Journal of Environmental and Public Health*, ID 1836597 (1-8).
- [130]. Hasanuzzaman M, Banerjee A, Borhannuddin Bhuyan MHM, Roychoudhury A, Mahmud J Al, Fujita M. (2019). Targeting glycinebetaine for abiotic stress tolerance in crop plants: physiological mechanism, molecular interaction and signaling. *Phyton*, 88, 185-221.
- [131]. Haynes RJ, Belyaeva O, Kingston GM. (2013). Evaluation of industrial wastes as sources of fertilizer silicon using chemical extractions and plant uptake. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 176 (2), 238-248.
- [132]. Haynes RJ, Zhou YF. (2022). Retention of heavy metals by dredged sediments and their management following land application. *Advances in Agronomy*, Sparks D L (Ed), Academic Press, Cambridge, MA, USA, 172, 191-254.

- [133]. He, X., Zhang, J., Wang, S., Li, Q., Chen, W., & Liu, J. (2023). Influence of soil amendments on heavy metal bioavailability and rice uptake in contaminated paddy soils: A meta-analysis. *Science of the Total Environment*, 869, 161706. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.161706>
- [134]. Hu, Z.-W., Wu, D.-J., Wu, J.-F., Wei, Z.-Q., & Xia, L.-J. (2022). Silicon-rich biochar effectively increases the availability of soil silicon and rice yield in reddish paddy soil. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 28 (8), 1421-1429.
- [135]. Hughes HJ, Hung DT, Sauer D. (2020). Silicon recycling through rice residue management does not prevent Sion depletion in paddy rice cultivation. *Nutrient Cycling Agroecosystem*, 118, 75-89.
- [136]. IBI. (2014). *Standardized Product Definition and Product Testing Guidelines for Biochar That Is Used in Soil, IBI-STD-2.0*, IBI Biochar Standards. International Biochar Initiative (IBI). Accessed July 15, 2016, p. 60. www.biochar-international.org/characterizationstandard.
- [137]. IRRI. (2020). *The value of sustainable rice straw management*. Retrieved from on 17 Feb, 2020, <https://www.irri.org/rice-straw-management>.
- [138]. Islam MdS, Kormoker T, Ali MM, Proshad R. (2018). Ecological risk analysis of heavy metals toxicity from agricultural soils in the industrial areas of Tangail district, Bangladesh. *SF Journal of Environmental and Earth Science*, 1(2), 1022.
- [139]. Jennifer G. (2022). *Application, performance, and costs of biotreatment technologies for contaminated Soils,*” U.S. Environmental protection agency national risk management research laboratory, Ohio 45268.
- [140]. Jha SK, Gao Y, Liu H, Huang Z, Wang G, Liang Y, Duan A. (2017). Root development and water uptake in winter wheat under different irrigation methods and scheduling for North China. *Agriculture Water Management*, 182, 139-150.
- [141]. Jaswal A, Mehta CM, Singh A. (2022). Probing the impact of biochar combined with organic and inorganic amendments on soil carbon pools of rice (*Oryza sativa*) - wheat (*Triticum aestivum*) cropping system. *Research on Crops*, 23, 508-515.
- [142]. Jiang H, Xu X, Sun A, Bai C, Li Y, Nuo M, Shen X, Li W, Wang D, Tian P, Wei X, Wang G, Yang M, Wu Z, (2024). Silicon nutrition improves the quality and yield of rice under dry cultivation. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 104 (4), 1897-1908.

- [143]. Jiang Y, Wang X, Li L, & Chen Y. (2024). *Microbial contributions to heavy metal phytoremediation in agricultural soils: Mechanisms and prospects*. *Microorganisms*, 12(10), 1945.
- [144]. John SO, Sato K, Yamamoto S, Masunaga T. (2024). Influence of rice husk biochar and its application methods on silicon and rice yield in sandy-loam soil. *Applied and Environmental Soil Science*, 2024, 697604.
- [145]. Khac Thi Vu, Phuong Dinh Thi Lan, Nga Nguyen Thi Hang, Hoa Nguyen Thanh (2022). Cadmium immobilization in the rice - Paddy soil with biochar additive. *Journal of Ecological Engineering*, 23(4), 85-95.
- [146]. Kamani H, Mirzaei N, Ghaderpoori M, Bazrafshan E, Rezaei S, Mahvi A H. (2018). Concentration and ecological risk of heavy metal in street dusts of Eslamshahr, Iran. *Human and Ecological Risk Assessment*, 24(4), 961-70.
- [147]. Karam DS, Prakash Nagabovanalli, Keeren Sundara Rajoo, Che Fauziah Ishak, Arifin Abdu, Zamri Rosli, Farrah Melissa Muharam, Dzarifah Zulperi. (2022). An overview on the preparation of rice husk biochar, factors affecting its properties, and its agriculture application. *Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences*, 21 (3): 149-159.
- [148]. Khan K., Mohsin A., Sharif, H.M.A, Maryam A. (2022). Heavy metal pollution in the soil of a riverine basin: distribution, source, and potential hazards. *Environmental Monitoring and Assessment*, 194 (618).
- [149]. Khan KY, Ali B, Cui X, Feng Y, Yang X, Stoffella PJ. (2017). Impact of different feedstocks derived biochar amendment with cadmium low uptake affinity cultivar of pak choi (*Brassica rapa* ssb. *Chinensis* L.) on phytoavoidation of Cd to reduce potential dietary toxicity. *Ecotoxicology Environment Safety*, 141, 129-138.
- [150]. Khan, Wang Z, Chen J, Raza MA, Zhang J, Tan X, Saeed A, Jun Ma, Yang F, Yang W. (2022). Predicting maize leaf area index by partial least square combined with wavelet transform, *Agronomy Journal*, 114 (5), 2860-2873
- [151]. Kavitha B, Reddy PVL, Kim B, Lee SS, Pandey SK, Kim KH. (2018). Benefits and limitations of biochar amendment in agricultural soils: a review. *Journal Environment Management*, 227, 146-154.
- [152]. Klotzbücher T, Marxen A, Jahn R, Vetterlein D. (2016). Silicon cycle in rice paddy fields: insights provided by relations between Sion forms in topsoils and plant. *Nutrien Cycling Agroecosyst*, 105, 157-168 .

- [153]. Kong L, Luo L, Liu Y, He Y, Wang Y, & Wang S. (2022). Long-term effects of silicon-rich biochar on cadmium and lead accumulation in rice in contaminated soil. *Environmental Pollution*, 105(2), 157-168.
- [154]. Lakitan B, Alberto B, Lindiana L, Kartika K, Herlinda S, Kurnianingsi A. (2018). The benefits of biochar on rice growth and yield in tropical Riparian wetland, South Sumatra, Indonesia. *Chiang Mai University Journal of Natural Sciences*, 17(2), 10-16.
- [155]. Lehmann J, Rillig MC, Thies J, Masiello CA, Hockaday WC, Crowley D. (2002). Biochar effects on soil biota—a review. *Soil Biology Biochemistry*, 43 (9), 1812-1836.
- [156]. Lee S, Masclaux-Daubresse C. Current. (2021). Understanding of Leaf Senescence in Rice. *International Journal of Molecular Sciences*, 22 (9) : 4515.
- [157]. Leksungnoen P, Wisawapipat W, Ketrot D, Aramrak S, Nookabkaew S, Rangkadilok N and Satayavivad J. (2019). Biochar and ash derived from Sion-rich rice husk decrease inorganic arsenic species in rice grain. *Science of the Total Environment*, 684, 360-370.
- [158]. Li Z, Song Z, Singh BP, Wang H. (2019). The impact of crop residue biochars on silicon and nutrient cycles in croplands. *Science Total Environ*, 659, 673-680.
- [159]. Li AY, Deng H, Jiang YH, Ye CH, Yu BG, Zhou XL, Ma AY. (2020). Super efficient removal of heavy metals from wastewater by Mg-loaded biochars: Adsorption characteristics and removal mechanisms. *Langmuir*, 36, 9160-9174.
- [160]. Liang, Y., Nikolic, M., Bélanger, R., Gong, H., Song, A., & Wei, Y. (2015). The role of silicon in higher plants: Implications for agriculture. *Frontiers in Plant Science*, 6, 154.
- [161]. Li X, Yao T, Huang X, Li X, Li P, Du S, Wang W, Miao S, Wang D, Jin F, Shao X. (2022). Biochar increases rice yield by improving root morphological and root physiological functions in heavily saline-sodic paddy soil of Northeast China. *BioResources*, 17 (1), 1241-1256.
- [162]. Li Z, Zhiwei Zheng, Hongcheng Li, Dong Xu, Xing Li, Luoqing Xiang, Shuxin Tu. (2023). Review on rice husk biochar as an adsorbent for soil and water remediation. *Plants*, 12(7), 1524.
- [163]. Li Z, Song Z, Singh BP, Wang H. (2019a). The impact of crop residue biochars on Sion and nutrient cycles in croplands. *Science Total Environment*, 659, 673-680.

- [164]. Li Z, Unzué-Belmonte D, Cornelis JT, Linden CV, Struyf E, Ronsse F. (2019b). Effects of phytolithic rice-straw biochar, soil buffering capacity and pH on Sion bioavailability. *Plant Soil*, 438 (1), 187-203.
- [165]. Li J, Zheng L, Wang SL, Wu, Z, Wu W, Niazi NK, Shaheen SM, Rinklebe J, Bolan N, Ok YS, Wang H. (2019c). Sorption mechanisms of lead on Sion-rich biochar in aqueous solution: spectroscopic investigation. *Science of the Total Environment*, 672, 572-582.
- [166]. Lim TJ, Spokas KA, Feyereisen G, Novak JM. (2016). Predicting the impact of biochar additions on soil hydraulic properties, *Chemosphere*, 142: 136-144.
- [167]. Limmer MA, Linam FA, Seyfferth, AL. (2023). The effect of rice residue management on rice paddy Si, Fe, As, and methane biogeochemistry. *Science of The Total Environment*, 903, 166496.
- [168]. Liu Y, Li H, Hu T, Mahmoud A, Li J, Zhu R, Jiao X, Jing P. (2022). A quantitative review of the effects of biochar application on rice yield and nitrogen use efficiency in paddy fields: A meta-analysis. *Science of The Total Environment*, 830, 154792,
- [169]. Lu T, Ge W, Li A, Deng S, Min T, Qiu G. (2024). Endogenous silicon-activated rice husk biochar prepared for the remediation of cadmium-contaminated soils: Performance and mechanism. *Environmental Pollution*, 362, 125030.
- [170]. Ma JF, Takahashi. (2002). *Soil, fertilizer and plant Sion research in Japan*, Elsevier, Amsterdam.
- [171]. Ma JF, Tamai K, Yamaji N, Mitani N, Konishi S, Katsuhara M, Ishiguro M, Murata Y, Yano M. (2006). A Sion transporter in rice. *Nature*, 440 (7084), 688-691.
- [172]. Ma J, Cai H, He C, Zhang W, Wang L. (2015). A hemicellulose-bound form of Sion inhibits cadmium ion uptake in rice (*Oryza sativa*) cells. *New Phytology*, 206, 1063-1074.
- [173]. Mackie KA, Marhan S, Ditterich F, Schmidt HP, Kandeler E. (2015). The effects of biochar and compost amendments on copper immobilization and soil microorganisms in a temperate vineyard. *Agriculture Ecosystem Environment*, 201, 58-69.
- [174]. Miandad R, Barakat MA, Aburiazaiza AS, Rehan M, Nizami AS. (2016). Catalytic pyrolysis of plastic waste: A review. *Process Safety Environment Protection*, 102, 822-838.

- [175]. Miao W, Fengcheng Li, Jiancheng Lu, Donglei Wang, Mingkai Chen, Liang Tang, Zhengjin Xu, Wenfu Chen. (2023). Biochar application enhanced rice biomass production and lodging resistance via promoting co-deposition of silica with hemicellulose and lignin. *Science of The Total Environment*, 855, 158818.
- [176]. Minh VQ, Vu PT, Giao NT. (2024). Soil properties characterization and constraints for rice cultivation in Vinh Long province, Vietnam. *Journal of Applied Biology Biotechnology*, 12 (1), 98-105.
- [177]. Mohamed, H. I., El-Sawy, M. B., & El-Sayed, M. A. (2025). Heavy metals toxicity in plants: Impacts and detoxification mechanisms. *Bioresources and Bioprocessing*, 12, 93.
- [178]. Mohammad, S. J., Ling, Y. E., Halim, K. A., Sani, B. S., & Abdullahi, N. I. (2025). Heavy metal pollution and transformation in soil: A comprehensive review of natural bioremediation strategies. *Journal of Umm Al-Qura University for Applied Sciences*, 11.
<https://link.springer.com/article/10.1007/s43994-025-00241-6>
- [179]. Nagajyoti PC, Lee KD, Sreekanth T. (2010). Heavy metals, occurrence and toxicity for plants: A review. *Environment Chemical Letter*, 8, 199-216.
- [180]. Natasha N, Shahid M, Khalid S, Bibi I, Naeem MA, Niazi NK, Tack FM, Ippolito JA, Rinklebe J. (2022). Influence of biochar on trace element uptake, toxicity and detoxification in plants and associated health risks: A critical review. *Critical Review Environment Science Technology*, 52, 2803-2843.
- [181]. Nie X, Zhang Y, Liu H et al. (2024). Mechanistic insights into the synergetic remediation and amendment of red soil using zeolite/biochar composites. *Journal of Environmental Sciences*.
<https://link.springer.com/article/10.1007/s11783-024-1874-6>
- [182]. Ninkuu V, Liu Z, Qin A, Xie Y, Song X, & Sun X. (2025). Impact of straw returning on soil ecology and crop yield. *Heliyon*, 11 (2), e11748.
- [183]. Ning C, Liu R, Kuang X, Chen H, Tian J, & Cai K. (2022). Nitrogen fertilizer reduction combined with biochar application maintain the yield and nitrogen supply of rice but improve the nitrogen use efficiency. *Agronomy*, 12(12), 3039.
- [184]. Nguyen Thanh Giao, Huynh Thi Hong Nhlen, Phan Kim Anh. (2022). Evaluating ecological risk associated with heavy metals in agricultural soil in Dong Thap province, Vietnam. *Environment and Natural Resources Journal*, 20, 585-597.

- [185]. Nguyen Tri Quang Hung, Le Kien Thong, Nguyen Minh Ky, Le Truong Ngoc Han (2018). Potential of biochar production from agriculture residues at household scale: A case study in Go Cong Tay district, Tien Giang province, Vietnam. *Environment and Natural Resources Journal*, 16(2), 68-78.
- [186]. Nguyen Quoc Viet, Le Xuan Anh, Nguyen Thi Thanh Tam, Pham Anh Hung, Nguyen Ba Trung, Tran Thi Hong, Nguyen Xuan Hai, Phan Thi Thanh Nhan, Le Thi Kim Dung (2019). Study on the effect of biochar combined with organic fertilizer on the development of plants on sandy soil in the Central Coast. *VNU Journal of Science: Earth and Environmental Sciences*, 35(1), 33-41.
- [187]. Novair SB, Cheraghi M, Faramarzi F, Lajayer BA, Senapathi V, Astatkie T, Price GW. (2023). Reviewing the role of biochar in paddy soils: An agricultural and environmental perspective. *Ecotoxicology Environment Safety*, 263, 115228.
- [188]. Nwajiaku, I. M., Luo, L., & Zhang, H. (2023). Silicon supplementation alleviates heavy metal-induced oxidative stress in rice: Mechanisms and potential. *Environmental Science and Pollution Research*, 30, 8922–8934.
- [189]. NzereoguPU, Omah AD, Ezema FI, Iwuoha EI, Nwanya AC. (2023). Silica extraction from rice husk: Comprehensive review and applications. *Hybrid Advances*, 4, 100111.
- [190]. Ogawa M, Okimori Y. (2010). Pioneering works in biochar research, Japan. *Australian Journal Soil Research*, 48, 489-500.
- [191]. Oladele S. Adeyemo A, Awodun M, Ajayi A, & Fasina A. (2019). Effects of biochar and nitrogen fertilizer on soil physicochemical properties, nitrogen use efficiency and upland rice (*Oryza sativa*) yield grown on an Alfisol in Southwestern Nigeria. *International Journal of Recycling of Organic Waste in Agriculture*, 8, 295-308.
- [192]. Park JH, Choppala GK, Bolan NS, Chung JW, Chuasavathi T. (2011). Biochar reduces the bioavailability and phytotoxicity of heavy metals. *Plant Soil*, 348, 439-451.
- [193]. Pati S, Pal B, Badole S, Hazra GC, Mandal B. (2016). Effect of silicon fertilization on growth, yield, and nutrient uptake of rice. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 47, 284-290.
- [194]. Patil AA, Durgude AG, Pharande AL. (2018). Effect of silicon application along with chemical fertilizers on nutrient uptake and nutrient availability for rice plants. *International Journal of Communication Systems*, 6, 260-266.

- [195]. Penido ES, Martins GC, Mendes TBM, Carrijo L, Melo A, Guimarães IDR, Guilherme LRG. (2019). Combining biochar and sewage sludge for immobilization of heavy metals in mining soils. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 172, 326-333.
- [196]. Peng S, Chen Y, Dai Y, (2024). Composite Building Materials Prepared from Bioresources: Use of Rice Husk for Autoclaved Lightweight Concrete Production. *Journal of Composites Science*, 8(9), 359.
- [197]. Pham VD, Fatimah MS, Sasaki A Duong VH, Pham KL, Susan P, Watanabe T. (2021). Seasonal variation and source identification of heavy metal (loid) contamination in peri-urban farm of Hue city, Vietnam. *Environmental Pollution*, 278, 116813.
- [198]. Purakayastha T.J, Bera T., Debarati Bhaduri, Binoy Sarkar, Peter Wade, Savita Kumari, Manoj Menon, H. Pathak, Daniel C. W. Tsang. (2019). A review on biochar modulated soil condition improvements and nutrient dynamics concerning crop yields: Pathways to climate change mitigation and global food security. *Chemosphere*, 227, 345-365.
- [199]. Puri L, Hu Y, Naterer G. (2024.) Critical review of the role of ash content and composition in biomass pyrolysis. *Frontier Fuels*, 2, 1378361.
- [200]. Qian LB, Chen BL, Chen MF. (2016). Novel alleviation mechanisms of aluminum phytotoxicity via released bioSion from rice straw-derived biochars. *Scientific Report*, 6, 29346.
- [201]. Rahim H.U., Akbar W.A., Alatalo J.M. (2022). A Comprehensive Literature Review on Cadmium (Cd) Status in the Soil Environment and Its Immobilization by Biochar-Based Materials. *Agronomy*, 12 (4), 877.
- [202]. Rahman, M. S., Ahmed, S., & Hasan, M. M. (2023). Frequency of respiratory symptoms among rice mill workers in Bangladesh. *Journal of Occupational Health*, 65(1), e12349.
- [203]. Ramamoorthy P. and Porkodi G. (2024). Impact of silicon fertilizer on soil and plant: a review. *Plant Archives*, 24 (1), 735 -742.
- [204]. Raji Z, Karim A, Karam A, Khalloufi S. (2023). Adsorption of heavy metals: Mechanisms, kinetics, and applications of various adsorbents in wastewater remediation-A Review. *Waste*, 1(3), 775-805.
- [205]. Rashid, A., et al. (2023). Heavy metal contamination in agricultural soil: Impacts and management. *Agronomy*, 13 (6), 1521.

- [206]. Ratnadass, A., Llandres, A.L., Goebel, F.R., Husson, O., Jean, J., Napoli, A., Sester, M., Joseph, S. (2023). Potential of silicon-rich biochar (Sichar) amendment to control crop pests and pathogens in agroecosystems: A review. *Science of The Total Environment*, 910, 168545.
- [207]. Raychaudhuri SS, Paulami Pramanick, Pratik Talukder, Apaala Basak. (2021). Chapter 6 - Polyamines, metallothioneins, and phytochelatins—Natural defense of plants to mitigate heavy metals, Editor(s): Atta-ur-Rahman, Studies in Natural Products Chemistry. *Elsevier*, 69, 227-261.
- [208]. Rehman MZ, Zafar M, Waris AA, Rizwan M, Ali S, Sabir M, Usman M, Ayub MA, Ahmad Z. (2020). Residual effects of frequently available organic amendments on cadmium bioavailability and accumulation in wheat. *Chemosphere*, 244, 125548.
- [209]. Richard T (1992), Ratio of C and N. www.compost.css.cornell.edu/calc/cn_ratio.html.
- [210]. Riyazuddin, R., Khan, S., Ahmad, M., & Khan, M. N. (2021). A comprehensive review on the heavy metal toxicity and tolerance in plants. *Plant Physiology Reports*, 26, 787-802.
- [211]. Rizwan M, Meunier JD, Davidian JC, Pokrovsky OS, Bovet N, Keller C. (2016). Sion alleviates Cd stress of wheat seedlings (*Triticum turgidum* L. cv. Claudio) grown in hydroponics. *Environment Science Pollution Research*, 23 (2), 1414-1427.
- [212]. Rizwan M, Ali S, Adrees M, Ibrahim M, Tsang D. C. W, Zia-ur-Rehman M, Zahi Z. A, Rinklebe J, Tack F. M. G, & Ok Y. S. (2017). A critical review on effects, tolerance mechanisms and management of cadmium in vegetables. *Chemosphere*, 182, 90-105.
- [213]. Rizwan M, Ali S, Abbas T, Adrees M, Zia-ur-Rehman M, Ibrahim M, Abbas F, Qayyum MF, Nawaz R. (2018). Residual effects of biochar on growth, photosynthesis and cadmium uptake in rice (*Oryza sativa* L.) under Cd stress with different water conditions. *Journal of Environmental Management*, 206, 676-683.
- [214]. Rizwan M, Rehman MZ, Ali S, Abbas T, Maqbool A, Bashir A. (2019). *Biochar is a potential source of Sion fertilizer: An overview*. Elsevier, The Netherland, 225-238.
- [215]. Rizwan M, Ali S, Adrees M, Arif MS, Hussain A, Zia-ur-Rehman M. (2023). Role of silicon in reducing heavy metal stress in rice: A review. *Environmental Science and Pollution Research*, 30 (5), 5222-5235.

- [216]. Roussos PA, Gasparatos D, Kechrologou K, Katsenos P, Bouchagier P. (2017). Impact of organic fertilization on soil properties, plant physiology and yield in two newly planted olive (*Olea europaea* L.) cultivars under Mediterranean conditions. *Scientia Horticulturae*, 220, 11-19.
- [217]. Saffari M. (2018). Chemical stabilization of some heavy metals in an artificially multi-elements contaminated soil, using rice husk biochar and coal fly ash. *Pollution*, 4(4), 547-562.
- [218]. Sahebi M, Hanafi MM, Siti Nor Akmar A, Rafii MY, Azizi P, Tengoua F, Nurul Mayzaitul Azwa J, Shabanimofrad M. (2015). Importance of Sion and mechanisms of bioSia formation in plants. *BioMed Research International*, 2015, 396010.
- [219]. Saifullah, S. Dahlawi, A. Naeem, Z. Rengel, and R. Naidu. (2018). Biochar application for the remediation of salt-affected soils: Challenges and opportunities. *Science Total Environment*, 625, 320-335.
- [220]. Sattar A, Sher A, Abourehab MAS, Ijaz M, Nawaz M, Ul-Allah S, Abbas T, Shah AN, Imam MS, Abdelsalam NR, Hasan ME, Abbas A, Javaid MM. (2022) Application of Sion and biochar alleviates the adversities of arsenic stress in maize by triggering the morpho-physiological and antioxidant defense mechanisms. *Frontier Environment Science*, 10, 979049.
- [221]. Shakoor SA. (2014). Sion biomineralisation plants: A Tool to Adapt Global Climate Change. *Journal of Research and Biological Science*, 1, 1-3.
- [222]. Sharma A, Gursharan Singh, Shailendra Kumar Arya. (2020). Biofuel from rice straw. *Journal of Cleaner Production*, 277: 124101.
- [223]. Shen Z, Hou D, Jin F, Shi J, Fan X, Tsang DC, Alessi DS. (2019). Effect of production temperature on lead removal mechanisms by rice straw biochars. *Science Total Environment*, 655, 751-758.
- [224]. Shi Z, Yang S, Han D, Zhou, Z, Li X, Liu Y, Zhang B. (2018). Sion alleviates cadmium toxicity in wheat seedlings (*Triticum aestivum* L.) by reducing cadmium ion uptake and enhancing antioxidative capacity, *Environment Science Pollution Research*, 25, 7638-7646.
- [225]. Shi X, Zhang C, Wang H, Zhang F. (2005). Effect of Si on the distribution of Cd in rice seedlings. *Plant Soil*, 272, 53-60.
- [226]. Shim J, Shea PJ, Oh BT. (2014). Stabilization of heavy metals in mining site soil with Sia extracted from corn cob. *WaterAir Soil Pollution*, 225(10), 2152.

- [227]. Sirisuntornlak N, Ullah H, Sonjaroon W, Anusontpornperm S, Arirob W, Datta A. (2021). Interactive effects of Sion and soil pH on growth, yield and nutrient uptake of maize. *Silicon*, 13 (2), 289-299.
- [228]. Snehal S, Lohani P. (2018). Sia nanoparticles: its green synthesis and importance in agriculture. *Journal Pharmacogn Phytochemistry*, 7(5), 3383-3393.
- [229]. Sohi SP, Krull E, Lopez-Capel E. (2010). A review of biochar and its use and function in soil. *Advance in Agronomy*, 105, 47-82.
- [230]. Sotoudehnia, F, Baba Rabiou A, Alaya, A, McDonald AG. (2020). Characterization of bio-oil and biochar from pyrolysis of waste corrugated cardboard. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 145, 104722.
- [231]. Sow S., Ranjan S., Mainak Ghosh M., Kumar S., and Choudhury S., (2020). Crop Residues as Potential Sustainable Source of Silica in the Era of Climate Change: A Review. *International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences*, 11, 1629-1641.
- [232]. Su Y, Huang X, Li L, Muhammad ZA, Li M, Zheng T, Guo Z, Zhang Y, Luo D, Ye X, Jia X, Hussain Panhwar F, Tun MT, Zhu J. (2023) Comparative Responses of Silicon to Reduce Cadmium and Enrich Selenium in Rice Varieties. *Foods*, 12 (8), 1656.
- [233]. Sun Y., Wu L., Li X. (2016). Silicon Isotope Fractionation in Rice (*Oryza sativa* L.) Seedlings Grown with Low Temperature or Metabolic Inhibitors: Evidence for Active and Passive Uptake Mechanisms. *Plos one*, 11(12), e0168970.
- [234]. Sun X, Liu Q, Tang T, Chen X, Luo X. (2019). Sion fertilizer application promotes a phytolith accumulation in rice plants. *Frontier Plant Science*, 10, 425.
- [235]. Swe MM, Mar SS, Naing TT, Zar T, Ngwe K. (2021). Effect of Sion application on growth, yield and uptake of rice (*Oryza sativa* L.) in two different soils. *Open Access Library Journal*, 8(10), e7937.
- [236]. Teasley WA, Limmer MA, Seyfferth AL. (2017). How rice (*Oryza sativa* L.) responds to elevated as under different Si-rich soil amendments. *Environment Science Technology*, 51(18), 10335-10343.
- [237]. Tran TD, Tran VT, Bui TPL, Dinh QH, Nguyen TNM, Hoang TTH. (2024). Efficiency of biochar and bioorganic fertilizer from crop residues on rice (*Oryza sativa* L.) productivity in Central Vietnam. *Research on Crops*, 25(3), 363-368.

- [238]. Tsai CC, Chang YF. (2021). Higher biochar rate can be efficient in reducing nitrogen mineralization and nitrification in the excessive compost-fertilized soils. *Agronomy*, 11, 617.
- [239]. Ullah S, Zhao Q, Wu K, Ali I, Liang H, Iqbal A, Wei S, Cheng F, Ahmad S, Jiang L, Gillani S, Amanullah W, Anwar S, Khan Z. (2021). Biochar application to rice with 15N-labelled fertilizers, enhanced leaf nitrogen concentration and assimilation by improving morpho-physiological traits and soil quality. *Saudi Journal Biology Science*, 28 (6), 3399-3413.
- [240]. Wang X, Zhai M, Guo H, Panahi A, Dong P, Levendis YA. (2021). High-temperature pyrolysis of biomass pellets: the effect of ash melting on the structure of the char residue. *Fuel*, 285, 119084.
- [241]. Wang Y., Xiao X., Chen B., (2018). Biochar impacts on soil silicon dissolution kinetics and availability. *Scientific Reports*, 8, 8040.
- [242]. Wang Y, Liu Y, Liu R, Zhang A, Yang S, Liu H, Zhou Y, Yang Z. (2017). Biochar amendment reduces paddy soil nitrogen leaching but increases net global warming potential in Ningxia irrigation, China. *Scientific Report*, 7 (1), 1-10.
- [243]. Weber K, Quicker P. (2018). Properties of biochar. *Fuel*, 217, 240-261.
- [244]. Wei Miao, Fencheng Li, Jiancheng Lu, Donglei Wang, Mingkai Chen, Liang Tang, Zhengxin Xu, Wenfu Chen. (2023). Biochar application enhanced rice biomass production and lodging resistance via promoting co-deposition of Si with hemicellulose and lignin. *Science of the Total Environment*, 855, 158818.
- [245]. Wu, J., Guo, J., Hu, W., Chen, M., & Liu, Y. (2020). Silicon reduces cadmium accumulation in rice grains by modulating transporter gene expression and limiting root-to-shoot translocation. *Plant Physiology and Biochemistry*, 148, 80-87.
- [246]. Wu L, Zhang SH, Chen M, Liu J, Ding X. (2021). A sustainable option: Biochar addition can improve soil phosphorus retention and rice yield in a saline-alkaline soil. *Environment Technology Innovation*, 24 (2021), 102070.
- [247]. Wu Y, Li X, Yu L, Wang T, Wang J, Liu T. (2022). Review of soil heavy metal pollution in China: Spatial distribution, primary sources, and remediation alternatives, *Resources, Conservation & Recycling*, 181, 106261.
- [248]. Xiang Y, Deng Q, Duan H, Guo Y. (2017). Effects of biochar application on root traits: a meta-analysis. *GCB Bioenergy*, 9, 1563-1572.

- [249]. Xiao L, Meng F. (2020). Evaluating the effect of biochar on salt leaching and nutrient retention of Yellow River Delta soil. *Soil Use and Management*, 36(4), 740-750 .
- [250]. Xiao X, Chen BL, Zhu LZ. (2014). Transformation, morphology, and dissolution of Sion and carbon in rice straw-derived biochars under different pyrolytic temperatures. *Environment Science Technology*, 48, 3411-3419.
- [251]. Xie W, Li C, Sun H, Yu D, & Zhou D. (2021). Speciation and mobility of heavy metals in paddy soils amended with biochar: Role of Fe-Mn oxides and soil properties. *Journal of Hazardous Materials*, 403, 123684.
- [252]. Xie Y, Chen W, Zhang Y, Chen J, Zheng Y, Lin Q, & Li Y. (2023). Significant synergy effects of biochar combined with topdressing silicon on Cd reduction and yield increase of rice in Cd-contaminated paddy soil. *Agronomy*, 14(3), 568.
- [253]. Xu X, Cao X, Zhao L. (2013). Comparison of rice husk and dairy manure-derived biochars for simultaneously removing heavy metals from aqueous solutions: Role of mineral components in biochars. *Chemosphere*, 92, 955-961.
- [254]. Viet Dung Pham, Mila Siti Fatimah, Atsushi Sasaki, Van Hieu Duong, Khac Lieu Pham, Praise Susan, Toru Watanabe (2021). Seasonal variation and source identification of heavy metal(loid) contamination in peri-urban farms of Hue city, Vietnam. *Environmental Pollution*, 278, 116813.
- [255]. Yadav A, Yadav PK. (2018). Pollution load index (PLI) of field irrigated with wastewater of Mawaiya drain in Naini Suburbs of Allahabad district. *Current World Environment*, 13(1), 159-164.
- [256]. Yadav M, Singh G, Jadeja R N. (2021). Physical and Chemical Methods for Heavy Metal Removal. In *Pollutants and Water Management* (pp. 203-228).
- [257]. Yao R, Hongqiang L, Jingsong Y, Wei Z, Chunyan Y, Xiangping W, Wenping X, Xing Z. (2022). Combined application of biochar and N fertilizer shifted nitrification rate and amoA gene abundance of ammonia-oxidizing microorganisms in salt-affected anthropogenic-alluvial soil. *Applied Soil Ecology*, 171, 104348.
- [258]. Yaofeng Wang, Kun Zhang, Lun Lu, Xin Xiao, Baoliang Chen. (2020). *Novel insights into effects of silicon-rich biochar (Sichar) amendment on cadmium uptake*, translocation and accumulation in rice plants, 265 (B), 114772.
- [259]. Yang W, Liao Q, & Gusiatin M. Z. (2024). Remediation and health risks of heavy metal contaminated soils. *Frontiers in Environmental Science*, 12, Article 1501443.

- [260]. Yan H, Zhang A, Ye Y, Xu B, Chen J, He X, Wang C, Zhou S, Zhang X, Peng Y. (2017). Genomewide survey of switchgrass NACs family provides new insights into motif and structure arrangements and reveals stress-related and tissue-specific NACs. *Scientific reports*, 7(1), 1-15.
- [261]. Yang X, Liu J, McGrouther K, Huang H, Lu K, Guo X, He L, Lin X, Che L, Ye Z, Wang H. (2016). Effect of biochar on the extractability of heavy metals (Cd, Cu, Pb, and Zn) and enzyme activity in soil. *Environmental Science and Pollution Research*, 23, 974-984.
- [262]. Yang CD, Lu SG. (2021). Effects of five different biochars on aggregation, water retention and mechanical properties of paddy soil: A field experiment of three-season crops. *Soil Tillage Research*, 205, 104798.
- [263]. Yu H, Zou W, Chen J, Chen H, Yu Z, Huang J, Tang H, Wei X, Gao B. (2019). Biochar amendment improves crop production in problem soils: A review. *Journal Environment Management*, 232, 8-21.
- [264]. Zaky RR, Hessien MM, El-Midany AA, Khedr MH, Abdel-Aal EA, El-Barawy KA. (2008). Preparation of Sia nanoparticles from semi-burned rice straw ash. *Powdertechology*, 185(1), 31-35.
- [265]. Zehui Niu, Jiayan Ma, Xianzhi Fang, Zhaokun Xue & Zhengqian Ye. (2022). Effects of application of rice husk biochar and limestone on cadmium accumulation in wheat under glasshouse and field conditions. *Scientific Reports*, 12, 21929.
- [266]. Zewdie I, Reta Y. (2021). Review on the role of soil macronutrient (NPK) on the improvement and yield and quality of agronomic crops. *Journal of Agriculture and Food Research*, 9 (1), 7-11.
- [267]. Zhang C, Shan B, Zhu Y, Tang W. (2018). Remediation effectiveness of phyllostachys pubescens biochar in reducing the bioavailability and bioaccumulation of metals in sediments. *Environmental Pollution*, 242, 1768-1776.
- [268]. Zhang Q, Liu Y, & Hu S. (2025). Advancing phytoremediation: A review of soil amendments for heavy metal contamination management. *Sustainability*, 17 (13), 5688.
- [269]. Zhao R, Jiang D, Coles N, Wu J. (2015). Effects of biochar on the acidity of a loamy clay soil under different incubation conditions. *Journal of Soils and Sediments*, 15 (9), 919-1926.
- [270]. Zhao F, Liu Q, Tang W, & Sun J. (2023). Integrated strategies to reduce heavy metals in rice grains: A field study of Si fertilization and water management. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 344, 108304.

PHỤ LỤC

1. ĐIỀU KIỆN THỜI TIẾT KHÍ HẬU

Diễn biến điều kiện khí hậu thời tiết năm 2023 - 2024 được thể hiện ở Bảng 2.8.

Bảng 1. Diễn biến thời tiết khí hậu năm 2023 - 2024

Tháng	Nhiệt độ (°C)			Độ ẩm (%)		Mưa	
	T ⁰ _{TB}	T ⁰ _{max}	T ⁰ _{min}	TB	Min	Số ngày	Lượng mưa (mm)
Vụ xuân 2023							
1/2023	19,0	32,4	12,4	93	39	24	296,5
2/2023	22,2	34,8	14,9	91	54	14	234,2
3/2023	23,5	36,5	15,8	87	48	8	2,3
4/2023	27,4	38,4	21,7	86	48	11	44,6
5/2023	28,9	40,4	23,3	83	43	11	142,5
Vụ hè thu 2023							
6/2023	29,9	37,9	24,0	79	46	8	92,3
7/2023	30,1	40,0	24,7	78	41	7	10,6
8/2023	30,4	39,6	24,8	75	39	8	41,8
Vụ xuân 2024							
1/2024	21,4	28,4	15,0	75	60	11	91,3
2/2024	23,4	34,3	15,3	72	54	7	34,0
3/2024	24,6	37,3	16,2	72	45	14	38,6
4/2024	30,4	42,2	23,3	55	36	2	6,6
5/2024	29,1	42,1	22,7	82	36	15	237,1
Vụ hè thu 2024							
6/2024	30,1	38,3	25,2	79	45	10	91,1
7/2024	29,1	37,4	24,3	80	48	15	197,8
8/2024	29,8	38,4	24,6	76	44	9	93,5

(Nguồn: Trung tâm Khí tượng Thủy văn Thừa Thiên Huế, 2024 [70])

2. HÌNH ẢNH THỰC HIỆN ĐỀ TÀI



Vỏ trấu trước khi đốt



Vỏ lác trước khi đốt



Lò đốt TSH



Sản phẩm TSH sau khi đốt



Chuẩn bị thí nghiệm trong phòng



Chuẩn bị thí nghiệm trong chậu



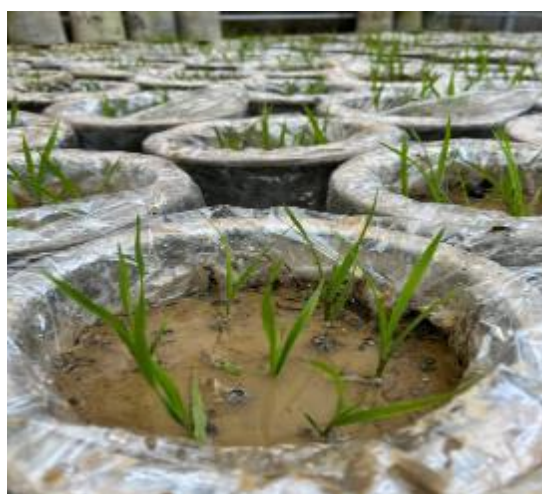
Thí nghiệm trong phòng (bảo hòa nước)



Thí nghiệm trong phòng (nước + TSH)



Chuẩn bị chậu thí nghiệm và TSH



Giai đoạn lúa bắt đầu cấy



Cấy lúa thí nghiệm



Giai đoạn đẻ nhánh



Theo dõi thí nghiệm



Giai đoạn đẻ nhánh tối đa



Thu hoạch lúa



Phân tích mẫu



Theo dõi thí nghiệm đồng ruộng



Thí nghiệm đồng ruộng giai đoạn đẻ nhánh



Theo dõi các chỉ tiêu khi thu hoạch



Thí nghiệm đồng ruộng giai đoạn
lúa chín



Mô hình lúa



Mô hình lúa

3. KẾT QUẢ XỬ LÝ THỐNG KÊ MỘT SỐ CHỈ TIÊU

2.1. Thí nghiệm trong phòng: Hiệu quả hấp thu KLN trên đất trồng lúa

HSD All-Pairwise Comparisons Test of Cd for Luong*CT

Luong CT	Mean	Homogeneous Groups
----------	------	--------------------

1 1	1.2700	A
2 1	1.2700	A
2 2	1.2400	AB
1 2	1.2200	ABC
2 3	1.2100	ABC
1 3	1.2000	ABCD
2 4	1.1800	BCDE
1 4	1.1400	CDE
2 5	1.1100	EF
1 5	1.0400	FG
2 6	1.0100	G
1 6	0.9800	G

Comparisons of means for the same level of Luong

Alpha	0.05	Standard Error for Comparison	0.0408
Critical T Value	2.021	Critical Value for Comparison	0.1925

Error term used: LNL*Luong*CT, 40 DF

Comparisons of means for different levels of Luong

Alpha	0.05	Standard Error for Comparison	0.0417
Critical T Value	2.106	Critical Value for Comparison	0.1917

Error terms used: LNL*Luong and LNL*Luong*CT

There are 7 groups (A, B, etc.) in which the means are not significantly different from one another.

HSD All-Pairwise Comparisons Test of Pb for Luong*CT

Luong CT	Mean	Homogeneous Groups
----------	------	--------------------

1 1	38.640	A
2 1	38.640	A
2 2	35.410	ABCD
1 2	34.210	ABCDE
2 3	33.220	ABCDE
2 4	31.560	ABCDE
1 3	30.450	BCDE
2 5	30.120	BCDE

1 4	29.250	CDE
1 5	28.340	DE
2 6	27.870	DE
1 6	26.780	E

Comparisons of means for the same level of Luong

Alpha	0.05	Standard Error for Comparison	4.0520
Critical T Value	2.021	Critical Value for Comparison	19.4415
Error term used: LNL*Luong*CT, 40 DF			

Comparisons of means for different levels of Luong

Alpha	0.05	Standard Error for Comparison	3.7184
Critical T Value	2.026	Critical Value for Comparison	19.4427
Error terms used: LNL*Luong and LNL*Luong*CT			

There are 5 groups (A, B, etc.) in which the means are not significantly different from one another.

2.2. Thí nghiệm trong chậu

HSD All-Pairwise Comparisons Test of Diện tích lá 1 for CT

CT Mean Homogeneous Groups

5	33,830	D
4	32,834	AB
8	32,701	ABC
3	32,35	BC
2	31,917	CDE
7	31,916	BCD
11	31,551	BCD
6	31,523	BCD
10	30,714	D
1	30,301	D
9	30,652	D

Alpha	0,05	Standard Error for Comparison	0,6443
Critical T Value	2,042	Critical Value for Comparison	1,4691

There are 5 groups (A, B, etc.) in which the means are not significantly different from one another.

HSD All-Pairwise Comparisons Test of Diện tích lá 2 for CT

CT Mean Homogeneous Groups

8	29,785	AB
4	29,424	AB

6	29,411	AB
5	29,412	AB
11	29,412	AB
7	29,295	AB
10	29,004	AB
3	28,701	AB
2	28,652	AB
9	28,351	AB
1	27,152	B

Alpha	0,05	Standard Error for Comparison	0,6841
Critical T Value	2,042	Critical Value for Comparison	1,5531

There are 5 groups (A, B, etc.) in which the means are not significantly different from one another.

HSD All-Pairwise Comparisons Test of CSDTL1 for CT

CT Mean Homogeneous Groups

5	0,684	A
4	0,657	AB
8	0,655	ABC
3	0,645	BC
2	0,641	BCD
7	0,641	BCD
11	0,632	BCD
6	0,614	BCD
9	0,612	D
10	0,610	D
11	0,602	D

Alpha	0,05	Standard Error for Comparison	0,0115
Critical T Value	2,042	Critical Value for Comparison	0,0314

There are 5 groups (A, B, etc.) in which the means are not significantly different from one another.

HSD All-Pairwise Comparisons Test of CSDTL2 for CT

CT Mean Homogeneous Groups

5	0,594	A
4	0,587	AB
8	0,586	AB
7	0,584	AB

10	0,583	AB
11	0,580	AB
3	0,571	AB
9	0,570	AB
2	0,570	AB
6	0,567	AB
1	0,552	A

Alpha 0,05 Standard Error for Comparison 0,0131

Critical T Value 2,042 Critical Value for Comparison 0,0441

There are 5 groups (A, B, etc.) in which the means are not significantly different from one another.

2.3. Thí nghiệm đồng ruộng

HSD All-Pairwise Comparisons Test of SoBongM2 for CT

CT Mean Homogeneous Groups

2	365.33	A
1	360.67	AB
6	348.67	C
4	347.67	C
5	345.00	CD
3	337.00	D

Alpha 0.05 Standard Error for Comparison 4.3698

Critical T Value 2.145 Critical Value for Comparison 9.3723

There are 4 groups (A, B, etc.) in which the means are not significantly different from one another.

HSD All-Pairwise Comparisons Test of CDBong for CT

CT Mean Homogeneous Groups

4	25.340	A
3	24.907	AB
1	24.413	AB
2	24.093	ABC
5	24.080	ABC
8	23.887	BC
7	22.707	CD
6	22.287	D

Alpha 0.05 Standard Error for Comparison 0.6539

Critical T Value 2.145 Critical Value for Comparison 1.4025

There are 4 groups (A, B, etc.) in which the means are not significantly different from one another.

HSD All-Pairwise Comparisons Test of TyLeHatCh for CT

CT Mean Homogeneous Groups

2	84.650	A
6	83.820	AB
4	83.820	AB
5	83.433	BC
1	82.967	C
3	82.653	C

Alpha	0.05	Standard Error for Comparison	0.3908
Critical T Value	2.145	Critical Value for Comparison	0.8382

There are 3 groups (A, B, etc.) in which the means are not significantly different from one another.

HSD All-Pairwise Comparisons Test of P1000 for CT

CT Mean Homogeneous Groups

4	25.800	A
2	25.700	A
3	25.533	AB
1	25.067	BC
5	25.067	BC
6	24.767	C

Alpha	0.05	Standard Error for Comparison	0.2574
Critical T Value	2.145	Critical Value for Comparison	0.5520

There are 3 groups (A, B, etc.) in which the means are not significantly different from one another.

HSD All-Pairwise Comparisons Test of NSLT for CT

CT Mean Homogeneous Groups

2	10.583	A
1	9.900	BC
4	9.777	BC
3	9.183	D
6	9.183	D
5	9.073	D

Alpha	0.05	Standard Error for Comparison	0.2336
Critical T Value	2.145	Critical Value for Comparison	0.5011

There are 4 groups (A, B, etc.) in which the means are not significantly different from one another.

HSD All-Pairwise Comparisons Test of NSTT for CT

CT Mean Homogeneous Groups

2	7.5167	A
4	7.0500	ABC
1	6.9000	BCD
6	6.6667	CD
3	6.5167	DE
5	6.1667	E

Alpha	0.05	Standard Error for Comparison	0.2185
Critical T Value	2.145	Critical Value for Comparison	0.4686

There are 5 groups (A, B, etc.) in which the means are not significantly different from one another.

2.4. Mô hình

Two-Sample T Tests for bong by CT

CT	N	Mean	SD	SE
1	3	318.33	22.811	13.170
2	3	334.00	20.075	11.590
Difference		-15.667	21.486	17.544

Homogeneity of Variances	DF	F	P
Folded F Test (two-sided)	2,2	1.29	0.8729

Cases Included 6 Missing Cases 0

Two-Sample T Tests for hat by CT

CT	N	Mean	SD	SE
1	3	127.13	2.6858	1.5506
2	3	129.33	2.4685	1.4252
Difference		-2.2000	2.5794	2.1061

Homogeneity of Variances	DF	F	P
Folded F Test (two-sided)	2,2	1.18	0.9158

Cases Included 6 Missing Cases 0

Two-Sample T Tests for hatcha by CT

CT	N	Mean	SD	SE
1	3	106.87	2.6102	1.5070
2	3	109.53	2.6026	1.5026

Difference	-2.6667	2.6064	2.1281
------------	---------	--------	--------

Homogeneity of Variances	DF	F	P
Folded F Test (two-sided)	2,2	1.01	0.9971

Cases Included 6 Missing Cases 0

Two-Sample T Tests for tlhat by CT

CT	N	Mean	SD	SE
1	3	84.043	0.3166	0.1828
2	3	84.680	0.6023	0.3478
Difference		-0.6367	0.4812	0.3929

Homogeneity of Variances	DF	F	P
Folded F Test (two-sided)	2,2	3.62	0.4329

Cases Included 6 Missing Cases 0

Two-Sample T Tests for P1000 by CT

CT	N	Mean	SD	SE
1	3	26.810	0.5881	0.3396
2	3	27.360	0.5505	0.3179
Difference		-0.5500	0.5696	0.4651

Homogeneity of Variances	DF	F	P
Folded F Test (two-sided)	2,2	1.14	0.9341

Cases Included 6 Missing Cases 0

Two-Sample T Tests for NSLT by CT

CT	N	Mean	SD	SE
1	3	8.9733	0.2194	0.1267
2	3	9.1967	0.2201	0.1271
Difference		-0.2233	0.2197	0.1794

Homogeneity of Variances	DF	F	P
Folded F Test (two-sided)	2,2	1.01	0.9969

Cases Included 6 Missing Cases 0

Two-Sample T Tests for NSTT by CT

CT	N	Mean	SD	SE
1	3	6.0567	0.0757	0.0437
2	3	6.4100	0.1900	0.1097
Difference		-0.3533	0.1446	0.1181

Homogeneity of Variances	DF	F	P
Folded F Test (two-sided)	2,2	6.30	0.2741

Cases Included 6 Missing Cases 0

4. MẪU PHIẾU ĐIỀU TRA NÔNG HỘ

PHIẾU ĐIỀU TRA NÔNG HỘ

Về tình Hình sử dụng phụ phẩm cây trồng trong sản xuất lúa

Họ và tên chủ hộ:

Địa chỉ:.....Xã:.....Huyện:.....Tỉnh.....

Họ và tên người điều tra.....Ngày điều tra:.....

Vị trí địa lý:.....

1. Hiện trạng sử dụng đất và cơ cấu giống lúa

Thửa đất	Diện tích (sào, m ²)	Giống lúa sử dụng		Năng suất thực thu (tạ)	
		ĐX	HT	ĐX	HT

2. Tình Hình sử dụng phân bón trong sản xuất lúa

Nhóm phân	Loại phân	Tổng lượng PB (kg/sào,ml/sào)	Bón lót	Thúc 1	Thúc 2	Thúc 3
Phân chuồng	Trâu, bò					
	Lợn					
	Gia cầm					

Phân hữu cơ vi sinh	Sông Gianh (Ghi rõ tên thương mại)					
	Quê Lâm					
	Sông Hương					
Phân xanh						
U rê						
Kali clorua						
Supe lân						
NPK.....	Ghi rõ loại NPK					
Vôi						
Phân bón lá	(Ghi rõ)					
Phân khác	(Ghi rõ)					

3. Tình Hình sử dụng phân bón hữu cơ trong sản xuất lúa

3.1. Phân hữu cơ vi sinh

TT	Loại phân	Công ty sản xuất	Nơi mua	Giá	Tại sao sử dụng (Code: điền số)
1					
2					
3					
4					

Code: tại sao anh chị lại sử dụng sản phẩm đó?

1. Sự giới thiệu của đại lý, công ty

2. Chất lượng tốt
3. Mẫu mã bao bì đẹp mắt
4. Giá cả hợp lý
5. Giới thiệu của khuyến nông viên
6. Giới thiệu của bạn bè

3.2. Nhận thức về sử dụng phân hữu cơ cho sản xuất lúa

1. Làm tăng năng suất lúa	2. Tăng phẩm chất gạo
3. Tăng độ phì đất/đất tốt	4. Đảm bảo gạo an toàn
5. Giảm lượng phân hóa học	6. Cây lúa sinh trưởng tốt
7. Bảo vệ môi trường	8.

3.3. Nguồn phân chuồng

- a. Tự có b. Mua c. Cả hai (chỉ rõ bao % mua)

3.4. Nguồn phân xanh

- a. Tự có b. Mua c. Cả hai (chỉ rõ bao % mua)

4. Tình Hình thu hoạch lúa và sử dụng phụ phẩm sau khi thu hoạch

4.1. Hình thức thu hoạch

- a. Bằng máy gặt liên hợp b. Máy gặt tuốt c. Thủ công

4.2. Phụ phẩm nông nghiệp sau khi thu hoạch xử lý như thế nào

Hình thức	Rơm rạ (Tỷ lệ %)		Vỏ trấu (Tỷ lệ %)		Vỏ lạc (Tỷ lệ %)	
	Đông Xuân	Hè Thu	Đông Xuân	Hè Thu	Đông Xuân	Hè Thu
Đốt trực tiếp						
Vùi lấp trên ruộng						
Thức ăn gia súc						
Làm nấm						
Tủ chuồng trại						

Đốt thành than sinh học						
Phân bón cho cây						

4.3. Chiều cao gốc rạ để lại khi thu hoạch

< 20 cm

20-30 cm

> 30 cm

5. Tình Hình sử dụng than sinh học bón cho các cây trồng

Loại cây	Loại than sinh học sử dụng	Số lượng bón (kg/sào)	Thời kỳ bón		
Lúa	Than trấu				
	Than vỏ lạc				
	...				

6. Tình Hình sử dụng phụ phẩm cây trồng bón cho các cây trồng

Loại cây	Loại than phụ phẩm sử dụng	Số lượng bón (kg/sào)	Thời kỳ bón		
Lúa					

5. CHI PHÍ THÍ NGHIỆM

5.1. Chi phí đầu tư ở các vụ thí nghiệm

CT	Số công LĐ	Giá công LĐ	Lượng phân bón	Giá phân	Thuốc BVTV	Giống	Cày đất Thu hoạch	Tổng chi
1 (ĐC 1)	130	250.000	1. 217 kg Ure 2. 375 kg Lân Supe 3. 117 kg KaCl 4. 500 kg vôi	1. 2.200.000 đ/tấn PC 2. 11.500 đ/kg Ure 3. 10.000 đ/kg Lân Supe 4. 11.000 đ/kg KaCl 5. 3.000.000 đ/tấn than trấu 6. 3.500.000 đ/tấn than lạc 7. 450.000 đ/tạ Vôi	2.000.000	1.800.000	1. Cày đất: 220.000 đ/sào 2. Thu hoạch: 130.000 đ/sào	53.082.500
2 (ĐC 2)	135	250.000	1. 5 tấn PC 2. 217 kg Ure 3. 375 kg Lân Supe 4. 117 kg KaCl 5. 500 kg vôi		2.000.000	1.800.000		65.332.500
3	135	250.000	1. 10 tấn than trấu 2. 500 kg vôi		0	1.800.000		74.800.000
4	135	250.000	1. 15 tấn than trấu 2. 500 kg vôi		0	1.800.000		89.800.000
5	135	250.000	1. 10 tấn than lạc 2. 500 kg vôi		0	1.800.000		79.800.000
6	135	250.000	1. 15 tấn than lạc 2. 500 kg vôi		0	1.800.000		97.300.000

5.2. Chi phí mô hình

CT	Số công LĐ	Giá công LĐ	Lượng phân bón	Giá phân	Thuốc BVTV	Giống	Cày đất Thu hoạch	Tổng chi
1 (ĐC)	130	250.000	1. 217 kg Ure 2. 375 kg Lân Supe 3. 117 kg KaCl 4. 500 kg vôi	1. 11.500 đ/kg Ure 2. 10.000 đ/kg Lân Supe 3. 11.000 đ/kg KaCl 4. 3.000.000 đ/tấn than trấu 6. 450.000 đ/tạ Vôi	2.000.000	1.800.000	1. Cày đất: 220.000đ/sào 2. Thu hoạch: 130.000đ/sào	53.082.500
2	135	250.000	1. 15 tấn than trấu 2. 500 kg vôi		0	1.800.000		89.800.000

7. KẾT QUẢ PHÂN TÍCH MẪU ĐẤT VÀ CÂY



TRƯỜNG ĐẠI HỌC NÔNG LÂM
KHOA NÔNG HỌC

102 Phùng Hưng, thành phố Huế

Điện thoại: 0234.3525544 Fax: 0234.3524923

Email: hoangthithaihoa@hual.edu.vn



KẾT QUẢ PHÂN TÍCH MẪU

Bảng 1. Tính chất than sinh học giàu Si từ vỏ trấu và vỏ lạc

Loại TSH	Cd (mg/kg)	Pb (mg/kg)	Cu (mg/kg)	Zn (mg/kg)	Si (%)
Vỏ trấu	0,02	2,56	9,28	5,23	27,22
Vỏ lạc	0,03	4,72	10,41	7,21	12,66

Bảng 2. Một số tính chất hóa học đất trồng lúa

Chỉ tiêu	Huyện Quảng Điền		Thị xã Hương Thủy
	Xã Quảng Thọ	Xã Quảng Phú	Phường Thủy Phương
pH _{KCl}	4,32	4,41	4,54
OM (%)	3,30	3,43	2,89
N (%)	0,15	0,16	0,13
P ₂ O ₅ (%)	0,087	0,079	0,081
P ₂ O ₅ (mg/100 g)	12,80	10,20	9,54
K ₂ O (%)	0,18	0,20	0,25
CEC (ldl/100g)	10,23	10,12	8,97
SiO ₂ (%)	25,31	26,50	26,45
SiO ₂ (mg/100 g)	9,09	10,80	9,85

Thừa Thiên Huế, ngày 5 tháng 3 năm 2023

TRƯỞNG KHOA

Hoàng Thị Thái Hoà



TRƯỜNG ĐẠI HỌC NÔNG LÂM
KHOA NÔNG HỌC



182 Phùng Hưng, thành phố Huế
Điện thoại: 0234.3525544 Fax: 0234.3524923
Email: hoangthithaihoa@hual.edu.vn

KẾT QUẢ PHÂN TÍCH MẪU

Bảng 1. Hàm lượng Cd, Pb, Cu và Zn tổng số trên đất trồng lúa

STT	Xã Quảng Thọ, huyện Quảng Điền				Phường Thủy Phương, thị xã Hương Thủy			
	Cd (mg/kg)	Pb (mg/kg)	Cu (mg/kg)	Zn (mg/ kg)	Cd (mg/kg)	Pb (mg/kg)	Cu (mg/kg)	Zn (mg/kg)
1	0.83 ^{ab}	21.20 ^{ab}	23.26 ^b	35.25 ^a	21.12 ^a	81.3 ^a	34.54 ^d	28.47 ^f
2	1.14 ^b	30.14 ^a	28.58 ^{ab}	33.56 ^a	22.14 ^a	75.18 ^{ab}	47.65 ^a	35.74 ^{cf}
3	0.65 ^{ab}	34.54 ^a	34.15 ^{ab}	39.51 ^a	19.31 ^{ab}	54.47 ^{cd}	24.18 ^f	46.49 ^c
4	1.05 ^{ab}	35.25 ^a	38.14 ^a	41.12 ^a	15.27 ^{bc}	45.67 ^d	48.54 ^a	35.72 ^{cf}
5	0.94 ^{ab}	35.56 ^a	30.25 ^{ab}	39.25 ^a	18.25 ^{abc}	75.23 ^{ab}	37.57 ^d	55.12 ^b
6	1.27 ^b	38.64 ^a	27.45 ^{ab}	38.24 ^a	10.25 ^d	78.65 ^{ab}	45.13 ^{ab}	38.21 ^{dc}
7	1.04 ^b	41.15 ^a	35.36 ^{ab}	31.47 ^a	14.27 ^{cd}	71.34 ^{ab}	38.45 ^{cd}	54.47 ^b
8	1.12 ^b	30.47 ^{ab}	34.24 ^{ab}	35.23 ^a	21.64 ^a	59.32 ^c	29.47 ^e	65.42 ^a
9	0.75 ^{ab}	19.48 ^b	30.18 ^{ab}	34.26 ^a	17.47 ^{abc}	69.45 ^b	42.41 ^{bc}	44.45 ^{cd}
10	0.56 ^a	33.25 ^a	31.05 ^{ab}	32.25 ^a	18.56 ^{abc}	73.14 ^{ab}	45.79 ^{ab}	46.54 ^c

Thừa Thiên Huế, ngày 5 tháng 3 năm 2023
TRƯỞNG KHOA

Hoàng Thị Thái Hoà



TRƯỜNG ĐẠI HỌC NÔNG LÂM
KHOA NÔNG HỌC

Phùng Hưng, thành phố Huế
Điện thoại: 0234.3525544 Fax: 0234.3524923
Email: hoangthithaihoa@hual.edu.vn

KẾT QUẢ PHÂN TÍCH MẪU

Bảng 1. Hàm lượng Cd, Pb, Cu và Zn dễ tiêu trên đất trồng lúa

STT	Xã Quảng Thọ, huyện Quảng Điền			
	Cd (mg/kg)	Pb (mg/kg)	Cu (mg/kg)	Zn (mg/kg)
1	0,025	0,72	0,57	0,79
2	0,034	0,83	0,63	0,53
3	0,012	0,85	0,75	0,65
4	0,025	0,78	0,79	0,79
5	0,021	0,87	0,65	0,64
6	0,041	0,89	0,56	0,69
7	0,032	0,88	0,83	0,52
8	0,034	0,79	0,76	0,51
9	0,012	0,45	0,63	0,58
10	0,010	0,73	0,71	0,56

Thừa Thiên Huế, ngày 5 tháng 3 năm 2023
TRƯỞNG KHOA

Hoàng Thị Thái Hoà



TRƯỜNG ĐẠI HỌC NÔNG LÂM
KHOA NÔNG HỌC



Phùng Hưng, thành phố Huế
Điện thoại: 0234.3525544 Fax: 0234.3524923
Email: hongthithaihoa@huaf.edu.vn

KẾT QUẢ PHÂN TÍCH MẪU

Bảng 1. Hàm lượng kim loại nặng trên đất trồng lúa thí nghiệm trong phòng

Công thức	Xã Quảng Thọ				Phường Thủy Phương			
	Cd (mg/kg)	H (%)	Pb (mg/kg)	H (%)	Cd (mg/kg)	H (%)	Pb (mg/kg)	H (%)
1	1,27 ^a	0,00	38,64 ^a	0,00	21,12 ^a	0,00	81,30 ^a	0,00
2	1,22 ^{abc}	3,94	34,21 ^{a-c}	11,46	19,21 ^{bcd}	9,04	76,44 ^c	5,98
3	1,20 ^{a-d}	5,51	30,45 ^{b-c}	21,20	16,56 ^f	21,59	70,25 ^e	13,59
4	1,14 ^{a-d}	10,24	29,25 ^{cde}	24,30	15,89 ^{fgh}	24,76	68,47 ^h	15,78
5	1,04 ^{cde}	18,11	28,34 ^{de}	26,66	14,54 ⁱ	31,16	62,32 ^j	23,35
6	0,98 ^{fg}	22,83	26,78 ^e	30,69	12,98 ^l	38,54	55,67 ^l	31,53
7	1,27 ^a	0,00	38,64 ^{a-d}	0,00	21,12 ^a	0,00	81,30 ^a	0,00
8	1,24 ^{ab}	2,36	35,41 ^{a-c}	8,36	20,22 ^{ab}	4,26	78,96 ^b	2,88
9	1,21 ^{abc}	4,72	33,22 ^{a-c}	14,03	17,96 ^{de}	14,96	74,56 ^d	8,29
10	1,18 ^{b-c}	7,09	31,56 ^{a-c}	18,32	16,89 ^{ef}	20,03	69,45 ^{gh}	14,58
11	1,11 ^{ef}	12,60	30,12 ^{b-c}	22,05	15,21 ^{ghi}	27,98	63,26 ^{ij}	22,19
12	1,01 ^g	20,47	27,87 ^{de}	27,87	14,88 ^{hi}	29,55	59,54 ^k	26,77
13	1,27 ^a	0,00	38,64 ^a	0,00	21,12 ^a	0,00	81,30 ^a	0,00
14	1,26 ^{ab}	0,79	38,25 ^a	1,01	20,95 ^a	0,80	80,29 ^{ab}	1,26
15	1,21 ^{abc}	4,76	36,47 ^{abc}	5,67	19,52 ^{bc}	7,64	79,36 ^b	2,44
16	1,19 ^{a-c}	6,61	35,12 ^{a-d}	9,65	19,21 ^{bcd}	9,78	75,65 ^{cd}	7,47
17	1,14 ^{cde}	10,92	33,84 ^{a-c}	13,67	18,54 ^{cd}	13,43	74,25 ^{de}	9,49
18	1,11 ^{ef}	14,04	33,78 ^{a-c}	14,36	17,96 ^{de}	17,04	72,21 ^f	12,59

Thừa Thiên Huế, ngày 15 tháng 3 năm 2023

TRƯỞNG KHOA

Hoàng Thị Thái Hoà



TRƯỜNG ĐẠI HỌC NÔNG LÂM
KHOA NÔNG HỌC

Đường Hùng, thành phố Huế
Điện thoại: 0234.3525544 Fax: 0234.3524923
Email: hoangthithaihoa@huaf.edu.vn



KẾT QUẢ PHÂN TÍCH MẪU

Bảng 1. Một số tính chất hóa học của đất trồng lúa của thí nghiệm trong chậu

CT	pH _{KCl}	OM (%)	CEC (ldl/100 g)	SiO _{2ls} (%)	SiO _{2dt} (g/kg)
1	4,87	3,53	9,58	26,1	8,2
2	4,83	3,57	9,67	29,5	10,1
3	4,87	3,58	9,69	30,4	11,5
4	4,95	3,69	9,76	34,4	15,6
5	5,02	3,71	9,78	35,6	16,4
6	4,94	3,68	9,70	28,1	9,4
7	4,97	3,73	9,79	29,9	12,4
8	4,94	3,79	9,89	30,6	16,5
9	5,02	3,60	9,65	25,3	9,1
10	5,05	3,69	9,70	26,6	11,5
11	5,15	3,71	9,78	27,7	14,7

Thừa Thiên Huế, ngày 15 tháng 6 năm 2023

TRƯỞNG KHOA

Hoàng Thị Thái Hoà



TRƯỜNG ĐẠI HỌC NÔNG LÂM

KHOA NÔNG HỌC

Đường Hùng, thành phố Huế
Điện thoại: 0234.3525544 Fax: 0234.3524923
Email: hithaihoa@huaf.edu.vn



KẾT QUẢ PHÂN TÍCH MẪU

Bảng 1. Hàm lượng Si (SiO_2) và Cd, Pb tổng số trong cây lúa ở thí nghiệm trong chậu

Công thức	Cd (mg/kg)	Pb (mg/kg)	SiO_2 (%)
1	0,041	0,21	11,7
2	0,035	0,18	12,6
3	0,029	0,17	13,1
4	0,027	0,15	13,4
5	0,026	0,12	13,6
6	0,020	0,10	13,9
7	0,040	0,23	11,5
8	0,037	0,20	11,9
9	0,032	0,18	12,6
10	0,029	0,17	13,2
11	0,024	0,14	13,3
12	0,022	0,13	13,5

Thừa Thiên Huế, ngày 15 tháng 7 năm 2023

TRƯỞNG KHOA

Hoàng Thị Thái Hoà



TRƯỜNG ĐẠI HỌC NÔNG LÂM
KHOA NÔNG HỌC

Phùng Hưng, thành phố Huế
Điện thoại: 0234.3525544 Fax: 0234.3524923
Email: hongthithaihoa@huaf.edu.vn



KẾT QUẢ PHÂN TÍCH MẪU

Bảng 1. Hàm lượng Cd và Pb trên đất trồng lúa thí nghiệm trong chậu

Công thức	Hàm lượng tổng số		Hàm lượng dễ tiêu	
	Cd (mg/kg)	Pb (mg/kg)	Cd (mg/kg)	Pb (mg/kg)
1	1,26	38,62	0,041	0,89
2	1,20	31,12	0,035	0,72
3	1,14	26,78	0,032	0,65
4	1,09	26,23	0,024	0,58
5	1,07	25,67	0,019	0,53
6	0,98	24,32	0,018	0,47
7	1,27	38,63	0,042	0,89
8	1,22	33,45	0,037	0,75
9	1,16	27,89	0,035	0,68
10	1,11	26,45	0,028	0,61
11	1,08	26,02	0,022	0,60
12	1,01	25,76	0,020	0,55

Thừa Thiên Huế, ngày 15 tháng 7 năm 2023

TRƯỞNG KHOA

Hoàng Thị Thái Hoà



TRƯỜNG ĐẠI HỌC NÔNG LÂM
KHOA NÔNG HỌC

Phùng Hưng, thành phố Huế
Điện thoại: 0234.3525544 Fax: 0234.3524923
Email: hoangthithaihoa@huaf.edu.vn



KẾT QUẢ PHÂN TÍCH MẪU

Bảng 1. Một số tính chất hóa học của đất sau thí nghiệm trong chậu

CT	pH _{KCl}	OM (%)	CEC (ldl/100 g)	SiO ₂ (%)	SiO ₂ (g/kg)
1	4,87	3,48	9,61	27,1	9,4
2	4,94	3,61	9,68	29,3	10,5
3	4,96	3,63	9,75	30,3	10,9
4	4,94	3,73	9,79	31,5	11,3
5	4,96	3,79	9,85	35,4	12,1
6	4,98	3,81	9,88	36,2	12,6
7	4,78	3,54	9,60	26,3	9,4
8	4,98	3,62	9,65	26,2	9,8
9	4,99	3,60	9,71	28,3	10,6
10	5,09	3,61	9,82	29,4	11,1
11	5,07	3,64	9,84	29,6	12,2
12	5,17	3,70	9,86	32,3	12,5

Thừa Thiên Huế, ngày 15 tháng 7 năm 2023

TRƯỞNG KHOA

Hoàng Thị Thái Hoà



TRƯỜNG ĐẠI HỌC NÔNG LÂM
KHOA NÔNG HỌC

Địa chỉ: Phường Hưng, thành phố Huế
Điện thoại: 0234.3525544 Fax: 0234.3524923
Email: hoangthithaihoa@huaf.edu.vn



KẾT QUẢ PHÂN TÍCH MẪU

Bảng 1. Một số tính chất hóa học của đất sau thí nghiệm đồng ruộng

CT	pH _{KCl}	OM%	CEC (ldl/100 g)	SiO ₂ (%)	SiO ₂ (g/kg)
1 (ĐC1)	4,49	3,35	9,49	26,51	9,44
2 (ĐC2)	4,90	3,56	9,63	28,43	10,83
3	4,70	3,74	9,55	27,35	9,85
4	4,64	3,84	9,65	28,92	11,92
5	4,87	3,82	9,57	27,14	9,53
6	4,59	3,97	9,68	28,65	11,23
7	4,81	3,69	9,56	26,92	9,54
8	5,14	3,79	9,70	28,32	10,81

Bảng 2. Hàm lượng Cd và Pb, Si của đất và cây sau thí nghiệm đồng ruộng

Công thức	Trong đất				Trong cây		
	Hàm lượng tổng số		Hàm lượng dễ tiêu		Hàm lượng tổng số		
	Cd (mg/kg)	Pb (mg/kg)	Cd (mg/kg)	Pb (mg/kg)	Cd (mg/kg)	Pb (mg/kg)	SiO ₂ (%)
1 (ĐC1)	1,10	38,75	0,043	0,79	0,043	0,20	11,5
2 (ĐC2)	1,15	38,45	0,045	0,76	0,042	0,22	11,8
3	1,03	29,25	0,031	0,52	0,030	0,10	12,7
4	0,91	25,12	0,025	0,44	0,024	0,08	13,6
5	1,04	31,89	0,033	0,54	0,032	0,12	12,3
6	0,95	26,12	0,026	0,47	0,026	0,08	13,3
7	1,06	32,74	0,035	0,58	0,031	0,13	12,0
8	0,97	27,45	0,026	0,50	0,028	0,10	13,1

Thừa Thiên Huế, ngày 15 tháng 6 năm 2024

TRƯỞNG KHOA

Hoàng Thị Thái Hoà



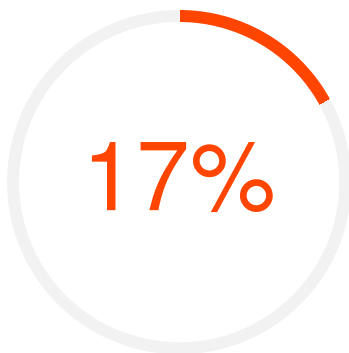
BÁO CÁO KIỂM TRA TRÙNG LẶP

Thông tin tài liệu

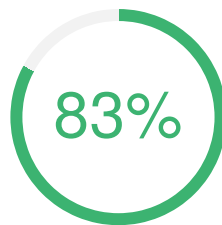
Tên tài liệu:	14.11.2025. LUAN AN CAP DHH. Truong Thi Dieu Hoa
Tác giả:	Truong Thi Dieu Hoa
Điểm trùng lặp:	17
Thời gian tải lên:	06:20 14/11/2025
Thời gian sinh báo cáo:	06:22 14/11/2025
Các trang kiểm tra:	110/110 trang



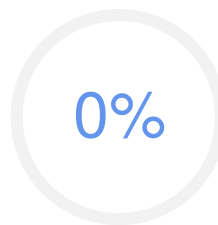
Kết quả kiểm tra trùng lặp



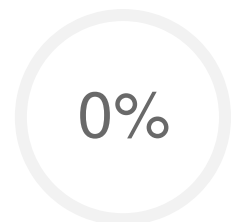
Có 17% nội dung trùng
lặp



Có 83% nội
dung không
trùng lặp



Có 0% nội dung
người dùng loại
trừ



Có 0% nội dung
hệ thống bỏ qua

Nguồn trùng lặp tiêu biểu

luanvan.moet.gov.vn tailieu.vn 123docz.net