

BIOCHAR STORAGE CARBON AND REDUCES GREENHOUSE GAS EMISSION (CH₄ and N₂O)

Nguyen Dat Phuong

Mien Tay Construction University

ARTICLE INFO	ABSTRACT
<p>Received: 13/5/2024</p> <p>Revised: 17/6/2024</p> <p>Published: 18/6/2024</p>	<p>The aim of this review is to show the applications of the biochar in carbon storage in the land and reducing greenhouse gas emissions to reduce the air environment pollution. The article is compiled from research published in the journals of the national and the international with ISI or Scopus index. These results show that the biochar has the ability to store carbon in the land and reduce greenhouse gas emissions (CH₄ and N₂O) to reduce the air environment pollution; the highest emission reduction ability of CH₄ is 50% and N₂O emission reduction is 39%. However, there are some studies show that biochar added to the soil does not reduce CH₄ emissions and N₂O emissions, even increases CH₄ emissions and N₂O emissions. This may be due to different databases and meta-analytic approaches. Therefore, there should be many more studies to clearly demonstrate the mechanism of reducing CH₄ and N₂O emissions of biochar.</p>
<p>KEYWORDS</p> <p>Biochar</p> <p>CH₄</p> <p>Greenhouse gas</p> <p>N₂O</p> <p>Storage carbon</p>	

THAN SINH HỌC LƯU GIỮ CARBON VÀ GIẢM PHÁT THẢI KHÍ NHÀ KÍNH (CH₄ và N₂O)

Nguyễn Đạt Phương

Trường Đại học Xây dựng Miền Tây

THÔNG TIN BÀI BÁO	TÓM TẮT
<p>Ngày nhận bài: 13/5/2024</p> <p>Ngày hoàn thiện: 17/6/2024</p> <p>Ngày đăng: 18/6/2024</p>	<p>Mục tiêu của bài báo này là trình bày về các ứng dụng của than sinh học trong việc lưu giữ carbon và giảm phát thải khí nhà kính. Bài báo được tổng hợp từ các nghiên cứu đã công bố trên các tạp chí uy tín trong nước và quốc tế có chỉ số ISI hoặc Scopus. Kết quả các nghiên cứu này cho thấy than sinh học có khả năng lưu giữ carbon và giảm phát thải khí nhà kính (CH₄ và N₂O), khả năng giảm phát thải cao nhất của CH₄ là 50% và giảm phát thải N₂O là 39%. Tuy nhiên, vẫn có một số nghiên cứu cho rằng than sinh học bổ sung vào đất không làm giảm phát thải CH₄ và N₂O mà thậm chí còn làm tăng phát thải CH₄ và N₂O. Điều này có thể do cơ sở dữ liệu và cách tiếp cận phân tích tổng hợp khác nhau. Do đó cần có nhiều nghiên cứu nữa để chứng minh rõ cơ chế làm giảm phát thải CH₄ và N₂O của than sinh học.</p>
<p>TỪ KHÓA</p> <p>CH₄</p> <p>Khí nhà kính</p> <p>Lưu giữ carbon</p> <p>N₂O</p> <p>Than sinh học</p>	

DOI: <https://doi.org/10.34238/tnu-jst.10381>

Email: nguyendatphuong@mtu.edu.vn

<http://jst.tnu.edu.vn>

303

Email: jst@tnu.edu.vn

1. Giới thiệu

Than sinh học (TSH) là một sản phẩm giàu carbon thu được do nhiệt phân sinh khối các sản phẩm từ thực vật, động vật, kể cả các loại phân chuồng, ... được đốt trong điều kiện ít hoặc không có oxygen; hay TSH là sản phẩm bởi sự phân hủy các chất hữu cơ dưới điều kiện giới hạn oxygen và nhiệt độ thấp ($< 700\text{ }^{\circ}\text{C}$) [1]; theo Wu và cộng sự [2] TSH là sản phẩm bởi nhiệt phân sinh khối chất thải dưới điều kiện giới hạn oxygen; còn theo Verheijen và cộng sự [3] TSH được định nghĩa là vật liệu giàu carbon, cấp hạt mịn, xấp xỉ được sản xuất tương tự [1].

Hiện nay, TSH đã được nghiên cứu ứng dụng trong xử lý môi trường như: TSH bổ sung cho đất để cải tạo và duy trì độ màu mỡ của đất [4]; TSH có khả năng giữ nước và giữ dinh dưỡng trong đất [3]; TSH cải thiện tính chất của đất và nâng cao độ phì đất bằng cách cải thiện độ ẩm và duy trì chất dinh dưỡng [5], làm tăng sự hoạt động của các loài vi khuẩn trong đất [6], tác động tích cực đến sức khỏe nền đất canh tác [7]. Ngoài các ứng dụng trong xử lý môi trường trên, TSH còn được biết đến ở khả năng giảm tác động của biến đổi khí hậu như việc chuyển hóa carbon từ sinh khối thành carbon ổn định để lưu giữ trong đất và giảm phát thải khí nhà kính (KNK) trong sản xuất nông nghiệp khi bổ sung TSH vào đất trồng lúa nước [3]. Vậy TSH có khả năng lưu giữ carbon và giảm phát thải khí nhà kính thế nào, dưới đây là tổng hợp các kết quả nghiên cứu về khả năng lưu giữ carbon và giảm phát thải khí nhà kính của TSH.

2. Phương pháp nghiên cứu

Phương pháp được tác giả sử dụng trong nghiên cứu này là tổng hợp các công trình, nghiên cứu về TSH đã được công bố trên các tạp chí trong nước và quốc tế để tổng quan về khả năng ứng dụng của TSH trong lưu giữ carbon và giảm phát thải KNK. Các nội dung của 38 bài báo nghiên cứu khoa học đã được tác giả tổng hợp thể hiện cụ thể qua Bảng 1.

Bảng 1. Tổng hợp các nghiên cứu về TSH trong nước và quốc tế

STT	Nội dung của nghiên cứu	Nguồn
1	Khái niệm về TSH	[1] – [3]
2	TSH hấp phụ dinh dưỡng	[3]
3	TSH cải tạo đất	[4] – [7]
4	TSH lưu giữ carbon trong đất và giảm phát thải KNK	[7] – [38]

3. Kết quả nghiên cứu

TSH được xem như là một công cụ hiệu quả cho việc lưu giữ carbon trong đất nhằm giảm lượng phát thải KNK [7] - [9] từ các nguồn sinh khối hữu cơ trong thiên nhiên, theo kết quả nghiên cứu của Lin và cộng sự [10] chứng minh rằng hầu hết carbon của TSH (82,3 – 99,4%) thì được cô lập trong đất nhưng đối với carbon của thân cây ngô thì chỉ cô lập được 16,8% vào đất trong vòng 1 năm. Các mối tương tác giữa việc sử dụng TSH với đất và sự phát thải CH_4 thì chưa được hiểu rõ, bởi các kết quả báo cáo khác nhau. Việc bổ sung TSH cho đất trồng lúa đã được chứng minh là làm tăng phát thải khí CH_4 [11] - [14], nhưng đa số các nghiên cứu thì đều cho rằng là giảm phát thải khí CH_4 [10], [15] - [18], hoặc không có ảnh hưởng đáng kể đến phát thải CH_4 [19]. Trong môi trường yếm khí, về mặt lý thuyết, các thành phần không bền của TSH có thể bị phân hủy và trở thành nguồn cơ chất methanogen chủ yếu do đó thúc đẩy sản xuất CH_4 [14]. Tuy nhiên, nhóm C không bền của dịch tiết ra từ rễ và chất thải ra ở rễ của cây lớn hơn nhiều so với C không bền của TSH, do đó, C không bền của TSH có thể chỉ đóng một vai trò (i) ban đầu, (ii) khi TSH được sản xuất ở nhiệt độ thấp (tức là, phần C không bền lớn hơn), (iii) ở đất trồng hoặc đất bỏ hoang không có nguồn cung cấp carbon của rễ, và (iv) khi lượng TSH được bổ sung lớn ($> 40\text{ tấn ha}^{-1}$) [20]. Ví dụ, Zhang và cộng sự [21] không quan sát thấy sự gia tăng CO_2 trong đất qua các năm trồng trọt với sự bổ sung TSH từ 10 – 40 tấn ha^{-1} , nhưng giảm lượng phát thải N_2O , tăng phát thải CH_4 ; Từ kết quả nghiên cứu [20] và [21] cho thấy cách giải thích C không bền của TSH là một giải thích không chắc. Theo Feng và cộng sự [22], CH_4 giảm là nhờ chức

năng “lọc sinh học” của vi khuẩn oxy hóa CH_4 với sự có mặt của TSH tại vùng rễ thiếu khí, chúng làm giảm lượng CH_4 có thể xâm nhập vào nhu mô của thực vật để thoát ra ngoài.

Các đặc tính lý hóa của đất bao gồm độ dẫn không khí đã được tăng lên đáng kể nhờ TSH, tức là TSH có thể làm cải thiện việc cung cấp O_2 cho các chất oxy hóa CH_4 . Một phân tích tổng hợp gần đây [23] về lượng phát thải CH_4 đã được báo cáo rằng việc sử dụng TSH làm tăng đáng kể lượng khí thải CH_4 là 19%. Trong một nghiên cứu khác, Jeffery và cộng sự [24] báo cáo rằng việc bổ sung TSH cho đất bị ngập úng hoặc đất chua có khả năng làm giảm đáng kể lượng phát thải CH_4 . Hai kết quả nghiên cứu này ([23] và [24]) khác nhau về kết luận, có thể là do cơ sở dữ liệu và cách tiếp cận phân tích tổng hợp khác nhau. Việc bổ sung TSH cũng có thể làm giảm lượng KNK trên một đơn vị sản phẩm nông nghiệp bằng cách giảm đầu vào phân bón N và C không bền mà năng suất không thay đổi hoặc tăng. Qian và cộng sự [17] báo cáo rằng việc sử dụng 4 loại TSH khác nhau kết hợp với phân bón hóa học như sau: TSH và bentonit, với tỷ lệ dưới 1 tấn TSH ha^{-1} đã 1) làm tăng năng suất ngũ cốc từ 10 – 31%; và 2) giảm phát thải CH_4 từ 25 – 50% và giảm phát thải N_2O từ 17 – 39%. Do đó, việc sử dụng TSH có một tiềm năng đáng kể trong việc giảm cường độ phát thải KNK trong sản xuất lúa, đặc biệt là ở đất chua [24], và tiềm năng này vượt ra ngoài tiềm năng hấp thụ C. Theo Qian và cộng sự [17], không cần sử dụng một lượng lớn TSH cùng một lúc vì lượng TSH bổ sung cho đất đã được tìm thấy ở tỷ lệ TSH < 1 tấn ha^{-1} đã làm tăng năng suất ngũ cốc và giảm phát thải KNK. Tóm lại, tác động của việc bổ sung TSH vào đất đối với việc phát thải CH_4 trong đất vẫn chưa có kết luận thống nhất, rõ ràng.

Cho đến nay có nhiều giả thuyết về tác động của TSH được bổ sung vào đất đối với sự phát thải N_2O có liên quan đến đặc tính của TSH, đất và các điều kiện môi trường như nhiệt độ và lượng mưa [24]. Các nghiên cứu chủ yếu được thực hiện trong phòng thí nghiệm bằng cách sử dụng các mẫu đất đã được xáo trộn làm ướt đến cùng độ ẩm, hoặc đến cùng một không gian lỗ rỗng chứa đầy nước, khả năng giữ nước hoặc tiềm năng của nước. Các nghiên cứu khác kết hợp với sự phát triển của thực vật trong nhà lưới hoặc trong các điều kiện ít được kiểm soát hơn trên đồng ruộng cũng cho thấy TSH có thể ảnh hưởng đến sự phát thải N_2O trong đất. Với sự hiện diện của giun đất sinh ra khí N_2O (tương tác với động vật trong đất), lượng phát thải N_2O được giảm thiểu bằng cách sử dụng TSH [26]. Ngược lại, trong các nghiên cứu Scheer và cộng sự [27], Clough và cộng sự [28], Troy và cộng sự [19] cho thấy bổ sung TSH còn làm tăng phát thải N_2O . Tuy nhiên, các kết quả trong phòng thí nghiệm thì không thể khẳng định cho thực tế ở ngoài đồng. Một số nghiên cứu ngoài thực địa lại cho thấy không có sự khác biệt thống kê nào giữa đất được bổ sung TSH so các nghiệm thức đối chứng [29], [30]. Theo Hüppi và cộng sự [31] một lý do tiềm ẩn cho việc không có ảnh hưởng đáng kể của TSH đối với sự phát thải N_2O có thể là do liều lượng sử dụng, sự phân bố kích thước TSH kém đồng nhất và sự không đồng nhất của đất (và thực vật) trên các cánh đồng.

Tuy nhiên, về mặt tổng thể, các phân tích tổng hợp xác nhận rằng lượng phát thải N_2O giảm với tỷ lệ sử dụng TSH từ 1 – 2% trọng lượng [32], [33]. Mặc dù đã có nhiều tài liệu được công bố trong nhiều năm qua về chủ đề này, vậy TSH có hiệu quả trong việc giảm thiểu phát thải N_2O trong lĩnh vực nông nghiệp hay không vẫn rất khó đoán. Do đó, hầu hết các nỗ lực nghiên cứu hiện nay đều hướng tới mục tiêu đạt được mức giảm phát thải N_2O lớn nhất (loại TSH sử dụng trong loại đất nào) bằng cách phân tích các cơ chế liên quan. Nhiều nghiên cứu đã chỉ ra rằng khả năng giảm thiểu N_2O của TSH sẽ không chỉ phụ thuộc vào đặc tính của TSH mà còn phụ thuộc vào loại đất và các điều kiện môi trường chủ yếu [34], [35]. Một kết quả đáng chú ý là, trong các điều kiện môi trường giống hệt nhau, cùng một loại TSH có thể làm tăng lượng khí thải ở một vùng đất này nhưng giảm lượng khí thải ở vùng đất khác [36]. Thực tế này dường như có liên quan đến các cơ chế hình thành N_2O hoạt động trong các loại đất khác nhau, trong đó TSH có thể ảnh hưởng khác nhau. Theo nghĩa này, TSH tương tác với các con đường vi sinh vật quan trọng điều chỉnh sự hình thành và tiêu thụ N_2O trong đất là rất quan trọng để phát triển và thực hiện các chiến lược giảm thiểu hiệu quả. Tuy nhiên, số lượng các nghiên cứu xem xét các con đường hình thành N_2O cụ thể vẫn còn rất hạn chế và các cơ chế trung gian

ngăn chặn N₂O vẫn chưa được giải quyết.

Cho đến nay, hầu hết các nghiên cứu về TSH giảm thiểu N₂O đã lựa chọn các điều kiện môi trường nhất định và giả định hoặc suy đoán các cơ chế hình thành N₂O là chủ yếu. Ví dụ, các nghiên cứu ở môi trường đất chứa đầy nước, do đó dự đoán rằng con đường hình thành N₂O chính sẽ là quá trình khử nitrogen dị dưỡng. Tuy nhiên, suy luận này được chứng minh là không chính xác. Trong môi trường đất phức tạp, quá trình oxy hóa ammonium và quá trình khử nitrate thường cùng tồn tại với quá trình khử nitrogen dị dưỡng [37] và tỷ lệ N₂O được tạo ra trong mỗi con đường phụ thuộc vào nhiều yếu tố, không chỉ là không gian lỗ rỗng chứa đầy nước [38]. Do đó, các nghiên cứu để phân biệt thực sự giữa N₂O được tạo ra từ các nguồn khác nhau để bổ sung thêm TSH vẫn còn rất cần thiết.

4. Kết luận và kiến nghị

Từ các kết quả nghiên cứu trên cho thấy TSH có khả năng lưu giữ carbon và giảm phát thải khí CH₄ và N₂O. Tuy nhiên, vẫn có khá nhiều nghiên cứu cho rằng TSH bổ sung vào đất không làm giảm phát thải CH₄ và thậm chí còn làm tăng phát thải CH₄.

Cần có nhiều nghiên cứu hơn nữa để chứng minh rõ cơ chế làm giảm phát thải CH₄ và N₂O của TSH.

TÀI LIỆU THAM KHẢO/ REFERENCES

- [1] J. Lehmann and S. Joseph, *Biochar for Environmental Management: Science and Technology*, Earthscan, 2012.
- [2] S. Wu, H. He, X. Inthapanya, C. Yang, L. Lu, G. Zeng, *et al.*, "Role of biochar on composting of organic wastes and remediation of contaminated soils—a review," *Environmental Science and Pollution Research*, vol. 24, pp. 16560-16577, July 01, 2017.
- [3] F. Verheijen, S. Jeffery, A. Bastos, M. Velde, and I. Diafas, "Biochar Application to Soils – A Critical Scientific Review of Effects on Soil Properties," *Report. 149*, Processes and Functions, EUR 24099 EN, Office for the Official Publications of the European Communities, Luxembourg, 2010.
- [4] K. Y. Chan, L. V. Zwieter, I. Meszaros, A. Downie, and S. Joseph, "Using Poultry Litter Biochars as Soil Amendments," *Australian Journal of Soil Research*, vol. 46, no. 5, pp. 437-444, 2008.
- [5] D. A. Laird, "The Charcoal Vision: A Win–Win–Win Scenario for Simultaneously Producing Bioenergy, Permanently Sequestering Carbon, while Improving Soil and Water Quality," *Agronomy Journal*, vol. 100, pp. 178-181, 2008.
- [6] J. Lehmann, M. C. Rillig, J. Thies, C. A. Masiello, W. C. Hockaday, and D. Crowley, "Biochar effects on soil biota – A review," *Soil Biology and Biochemistry*, vol. 43, pp. 1812-1836, 2011.
- [7] T. D. Vu, M. K. Nguyen, T. H. N. Nguyen, N. P. Nguyen, and T. D. Nguyen "Biochar and its effects on Soil Health," *Journal of Science and Technology of Vietnam*, vol. 7A, pp. 48-50, 2018.
- [8] A. Mukherjee and R. Lal, "Biochar Impacts on Soil Physical Properties and Greenhouse Gas Emissions," *Agronomy*, vol. 3, pp. 313-339, 2013.
- [9] T. Xie, Y. Sadasivam, C. Wang, and K. Spokas, "Review of the Effects of Biochar Amendment on Soil Properties and Carbon Sequestration," *Journal of Hazardous, Toxic, and Radioactive Waste*, vol. 20, p. 04015013, 2015.
- [10] X. W. Lin, Z. Xie, J. Zheng, Q. Liu, Q. Bei, and J. Zhu, "Effects of biochar application on greenhouse gas emissions, carbon sequestration and crop growth in coastal saline soil," *European Journal of Soil Science*, vol. 66, pp. 329-338, 2015.
- [11] B. Fungo, D. Guereña, M. Thiongo, J. Lehmann, H. Neufeldt, and K. Kalbitz, "N₂O and CH₄ emission from soil amended with steam-activated biochar," *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, vol. 177, pp. 34-38, 2014.
- [12] A. Singla and K. Inubushi, "Effect of biochar on CH₄ and N₂O emission from soils vegetated with paddy," *Paddy and Water Environment*, vol. 12, pp. 239-243, 2013.
- [13] L. Yu, J. Tang, R. Zhang, Q. Wu, and M. Gong, "Effects of biochar application on soil methane emission at different soil moisture levels," *Biology and Fertility of Soils*, vol. 49, pp. 119-128, 2012.
- [14] A. Zhang, L. Cui, G. Pan, L. Li, Q. Hussain, X. Zhang, *et al.*, "Effect of Biochar Amendment on Yield and Methane and Nitrous Oxide Emissions from a Rice Paddy from Tai Lake Plain, China," *Agriculture Ecosystems & Environment*, vol. 139, pp. 469-475, 2010.
- [15] Y. Liu, M. Yang, Y. Wu, H. Wang, Y. Chen, and W.-X. Wu, "Reducing CH₄ and CO₂ emissions from waterlogged paddy soil with biochar," *Journal of Soils and Sediments*, vol. 11, pp. 930-939, 2011.

- [16] G. Yoo and H. Kang, "Effects of Biochar Addition on Greenhouse Gas Emissions and Microbial Responses in a Short-Term Laboratory Experiment," *Journal of environmental quality*, vol. 41, pp. 1193-1202, 2012.
- [17] L. Qian, L. Chen, S. Joseph, K. Cheng, L. Li, J. Zheng, *et al.*, "Biochar compound fertilizer as an option to reach high productivity but low carbon intensity in rice agriculture of China," *Carbon Management*, vol. 5, pp. 145-154, 2014.
- [18] S. Khan, C. Chao, M. Waqas, H. Arp, and Y. Zhu, "Sewage sludge biochar influence upon rice (*Oryza sativa* L) yield, metal bioaccumulation and greenhouse gas emissions from acidic paddy soil," *Environmental Science & Technology*, vol. 47, no. 15, pp. 8624-8632, 2013.
- [19] S. Troy, P. Lawlor, C. Flynn, and M. Healy, "Impact of biochar addition to soil on greenhouse gas emissions following pig manure application," *Soil Biology and Biochemistry*, vol. 60, pp. 173-181, 2013.
- [20] S. Saarnio, "Impacts of Biochar Amendment on Greenhouse Gas Emissions from Agricultural Soils," *Agricultural and Environmental Applications of Biochar: Advances and Barriers*, vol. 63 pp. 259-293, 2015.
- [21] A. Zhang, R. Bian, G. Pan, L. Cui, Q. Hussain, L. Li, *et al.*, "Effects of biochar amendment on soil quality, crop yield and greenhouse gas emission in a Chinese rice paddy: A field study of 2 consecutive rice growing cycles," *Field Crops Research*, vol. 127, pp. 153-160, 2012.
- [22] Y. Feng, Y. Xu, Y. Yu, Z. Xie, and X. Lin, "Mechanisms of biochar decreasing methane emission from Chinese paddy soils," *Soil Biology and Biochemistry*, vol. 46, pp. 80-88, 2012.
- [23] X. Song, G. Pan, C. Zhang, L. Zhang, and H. Wang, "Effects of biochar application on fluxes of three biogenic greenhouse gases: a meta-analysis," *Ecosystem Health and Sustainability*, vol. 2, no. 2, pp. 1-13, 2016.
- [24] S. Jeffery, F. Verheijen, C. Kammann, and D. Abalos, "Biochar effects on methane emissions from soils: A meta-analysis," *Soil Biology and Biochemistry*, vol. 101, pp. 251-258, 2016.
- [25] K. Spokas and D. Reicosky, "Impacts of sixteen different biochars on soil greenhouse gas production," *Ann. Environ. Sci.*, vol. 3, pp. 179-193, 2009.
- [26] C. Augustenborg, S. Hepp, C. Kammann, D. Hagan, O. Schmidt, and C. Müller, "Biochar and Earthworm Effects on Soil Nitrous Oxide and Carbon Dioxide Emissions," *Journal of Environmental Quality*, vol. 41, pp. 1203-1209, 2012.
- [27] C. Scheer, P. Grace, D. Rowlings, S. Kimber, and L. V. Zwieten, "Effect of biochar amendment on the soil-atmosphere exchange of greenhouse gases from an intensive subtropical pasture in northern New South Wales, Australia," *Plant and Soil*, vol. 345, pp. 47-58, 2010.
- [28] T. J. Clough, J. E. Bertram, J. L. Ray, L. M. Condrón, M. O'Callaghan, R. R. Sherlock, *et al.*, "Unweathered Wood Biochar Impact on Nitrous Oxide Emissions from a Bovine-Urine-Amended Pasture Soil," *Soil Science Society of America Journal*, vol. 74, pp. 852-860, 2010.
- [29] S. Castaldi, M. Riondino, S. Baronti, F. R. Esposito, R. Marzaioli, F. A. Rutigliano, *et al.*, "Impact of biochar application to a Mediterranean wheat crop on soil microbial activity and greenhouse gas fluxes," *Chemosphere*, vol. 85, pp. 1464-1471, 2011.
- [30] S. Schimmelpfennig, C. Müller, L. Grünhage, C. Koch, and C. Kammann, "Biochar, hydrochar and uncarbonized feedstock application to permanent grassland Effects on greenhouse gas emissions and plant growth," *Agriculture, Ecosystems & Environment*, vol. 191, pp. 39-52, 2014.
- [31] R. Hüppi, R. Felber, A. Neftel, J. Six, and J. Leifeld, "Effect of biochar and liming on soil nitrous oxide emissions from a temperate maize cropping system," *Soil*, vol. 1, pp. 707-717, 2015.
- [32] M. L. Cayuela, L. V. Zwieten, B. P. Singh, S. Jeffery, A. Roig, and M. A. Sánchez-Monedero, "Biochar's role in mitigating soil nitrous oxide emissions: A review and meta-analysis," *Agriculture, Ecosystems & Environment*, vol. 191, pp. 5-16, 2014.
- [33] L. Zwieten, C. Kammann, M. Cayuela, B. Singh, S. Joseph, S. Kimber, *et al.*, *Biochar effects on nitrous oxide and methane emissions from soil*, 2nd ed. Taylor & Francis, 2015.
- [34] V. Nelissen, B. K. Saha, G. Ruyschaert, and P. Boeckx, "Effect of different biochar and fertilizer types on N₂O and NO emissions," *Soil Biology and Biochemistry*, vol. 70, pp. 244-255, 2014.
- [35] S. Malghani, G. Gleixner, and S. E. Trumbore, "Chars produced by slow pyrolysis and hydrothermal carbonization vary in carbon sequestration potential and greenhouse gases emissions," *Soil Biology and Biochemistry*, vol. 62, pp. 137-146, 2013.
- [36] M. A. Sánchez-García, A. N. Roig, M. A. Sánchez-Monedero, and M. A. L. Cayuela, "Biochar increases soil N₂O emissions produced by nitrification-mediated pathways," *Frontiers in Environmental Science*, vol. 2, pp. 1-10, 2014.
- [37] H. Hu, D. Chen, and J.-Z. He, "Microbial regulation of terrestrial nitrous oxide formation: Understanding the biological pathways for prediction of emission rates," *FEMS microbiology reviews*, vol. 39, pp. 729-749, 2015.
- [38] N. Wrage, G. L. Velthof, M. L. V. Beusichem, and O. Oenema, "Role of nitrifier denitrification in the production of nitrous oxide," *Soil Biology and Biochemistry*, vol. 33, pp. 1723-1732, 2001.