

生物质炭修复重金属-盐渍化复合污染土壤研究现状

隋凤凤*, 华倚墨, 高 张, 马建君, 崔立强, 全桂香, 严金龙

盐城工学院 江苏盐城

【摘要】 气候变化背景下, 由于海水倒灌引起的土壤盐渍化问题会日益严峻, 土壤盐渍化过程会导致土壤质量下降并增加土壤中重金属有效性。本文通过相关文献的综合对比发现, 生物质炭的施用看有效改良重金属-盐渍化复合污染土壤, 其主要机制包括两个方面, 一方面, 生物质炭的施用可有效降低土壤中 Na^+ 等盐基离子的含量, 从而降低盐碱土的 EC 并提高土壤 CEC, 进而降低盐碱土中养分离子的淋溶, 提高土壤的保肥保水能力; 另一方面, 生物质炭具有的高比表面积、丰富的孔隙结构、较高的有机质含量、丰富的表面官能团结构以及较高的碳氮比等特性, 可有效吸附络合盐碱土中游离态的重金属离子, 增加稳定态重金属离子的形成及比例。然而, 未改性生物质炭的施用可能会增加盐碱土中砷的迁移风险及毒性, 相比于未改性生物质炭, 铁改性生物质炭对砷污染盐碱土具有显著的改良效果。综上, 生物质炭的改性处理可能为解决复杂的重金属-盐渍化污染土壤提供有效途径, 然而, 未来研究应深度挖掘利用不同改性生物质炭改良重金属-盐碱化土壤的生态效应及环境稳定性。

【关键词】 海水倒灌; 重金属-盐渍化复合污染; 生物质炭

【基金项目】 国家自然科学基金(42207547); 江苏省研究生科研与实践创新计划(SJ CX25_XY014); 江苏省自然科学基金(SBK2022020100)

【收稿日期】 2025 年 11 月 25 日 **【出刊日期】** 2025 年 12 月 20 日 **【DOI】** 10.12208/j.ijms.20250001

Current status of biochar remediation of heavy metal-salinization complex polluted soils

Fengfeng Sui*, Yimo Hua, Zhang Gao, Jianjun Ma, Liqiang Cui, Guixiang Quan, Jinlong Yan

Yancheng Institute of Technology, Yancheng, Jiangsu

【Abstract】 Against the backdrop of climate change, the problem of soil salinization caused by seawater intrusion will become increasingly severe. Furthermore, heavy metal pollution will further exacerbate the decline in soil quality and heighten the risk of soil degradation. Through a comprehensive comparative analysis of relevant literature, this paper finds that the application of biochar can effectively remediate soils affected by combined heavy metal and salinization pollution. The main mechanisms behind this effect include two aspects: On one hand, the application of biochar can effectively reduce the content of base ions such as Na^+ in the soil, thereby lowering the electrical conductivity (EC) of saline-alkali soils and increasing the soil's cation exchange capacity (CEC). This, in turn, reduces the leaching of nutrient ions from saline-alkali soils and enhances the soil's ability to retain fertilizers and water. On the other hand, biochar possesses characteristics such as a high specific surface area, abundant porous structure, high organic matter content, rich surface functional group structure, and a high carbon-to-nitrogen ratio. These properties enable it to effectively adsorb and complex free heavy metal ions in saline-alkali soils, promoting the formation of stable heavy metal ions and increasing their proportion in the soil. Notably, modified treatment of biochar may serve as an effective measure to address the issue of complex heavy metal-salinization contaminated soils.

【Keywords】 Seawater intrusion; Heavy metal-salinization pollution; Biochar

*通讯作者: 隋凤凤

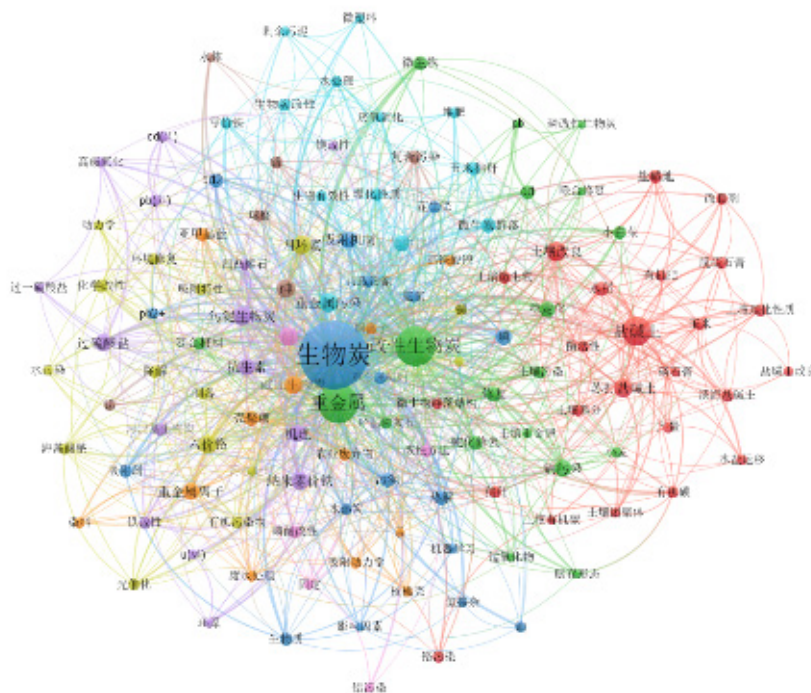
1 引言

升温以及大气中温室气体浓度的增加导致冰川融化, 进而引起海平面上升以及海水倒灌现象^[1]。世界范围内, 湄公河、尼罗河、长江等全球各大三角洲地区, 极易受到海平面上升、风暴活动以及海水倒灌引发的复杂海陆交互作用影响^[2-4]。这种复杂的海陆交互作用会导致土壤 pH、盐碱度、以及 Eh 的变化, 从而对土壤及沉积物中重金属的迁移及生物有效性产生显著影响^[5]。

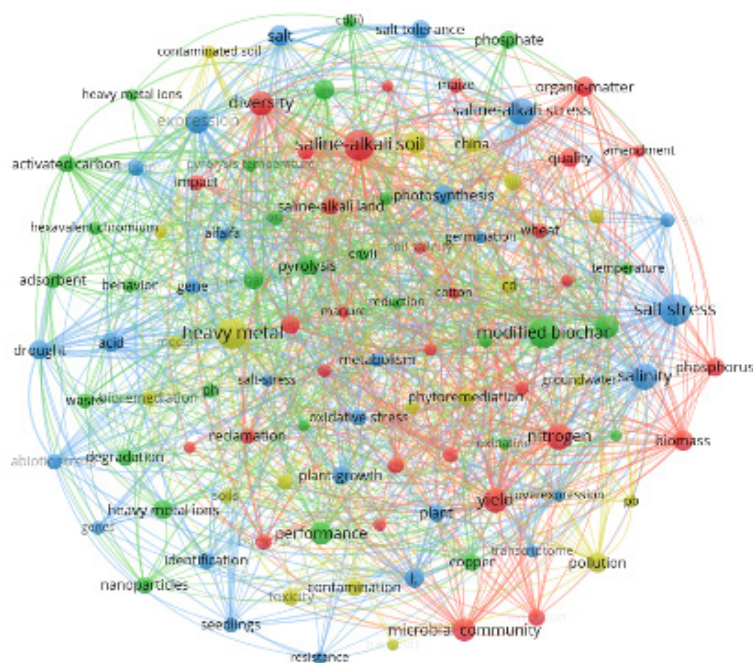
其中, 土壤盐渍化会显著影响重金属的迁移特性, 当土壤中的盐基离子 (如 Ca^{2+} 、 Mg^{2+}) 浓度较高时, 会与土壤中的重金属离子 (如 Pb^{2+} 、 Cd^{2+}) 产生竞争吸附, 从而促进重金属离子从土壤团聚体吸附位点的解离。另外, 重金属离子与盐渍化土壤中的阴离子, 如 SO_4^{2-} 、 Cl^- 、 OH^- 、以及 CO_3^{2-} 形成的化合物会显著促进重金属的迁移^[6]。研究表明, 由于氯化钙、氯化镁、氯化钠以及硫酸钠引起的盐度上升的土壤中, 镉会与氯离子形成了 CdCl^+ 、 CdCl_2 、 CdCl_3^- 以及 CdCl_4^{2-} , 从而导致土壤中镉的迁移性及生物有效性增加^[7,8]。类似地, Usman 等 (2005) 发现, 利用高盐度灌溉水会显著增加土壤中氯化物的种类, 其中镉的浓度最高。Raiesi 等 (2018) 证实 NaCl 胁迫 (15 dSm^{-1}) 会显著增加粘

壤土中镉的毒性以及生物有效性^[9,10]。Chi 等 (2023) 发现 1.8% 盐度处理显著增加了 CdCl_2 化合物的形成, 并且增加了水稻根系及籽粒中的镉含量, 其主要原因在于 1.8% 盐度处理促进了镉从有机质以及铁锰氧化物表面的解离。据统计, 我国盐碱土的面积高达 $3.47 \times 10^7 \text{ hm}^2$ ^[11]。我国盐碱土主要分布在东北平原、西北干旱区、半干旱区、东部沿海地区以及黄淮平原^[12], 这些地区作为水稻、小麦等粮食作物主产区, 土壤中重金属的迁移性及有效性关乎着我国食品安全问题。因此, 重金属污染盐碱土的修复在气候变化背景下尤为重要。

生物质炭是一种在高温限氧条件下热裂解产生的一种具有环境修复作用的功能材料, 其含有较高的碳含量、有机质及无机矿物组分丰富、炭结构稳定, 同时具有较高的阳离子交换量^[13]。与其他修复措施相比, 利用生物质炭进行盐碱土的化学改良表现出诸多优势, 包括改良效果多样性 (土壤理化性质改良、土壤结构优化、养分提升以及重金属钝化等) 以及成本低、效率高等。因此, 本文基于中文及英文数据库的文献统计, 综述了利用生物质炭进行重金属-盐渍化复合污染土壤的改良效应及作用机制, 以期在气候变化背景下盐碱土的综合改良提供基础理论参考。



a 基于中文文献的网络可视化分析



b 基于英文文献的网络可视化分析

图 1 基于 2020-2025 年已发表文献网络聚类的文献计量分析

2 生物质炭对盐碱土改良效应及主要机制

基于生物质炭结构及组分方面的优势, 其在盐碱土中的施用可显著提高土壤的有机质含量, 同时降低盐碱胁迫下的氮素及磷素养分的淋失风险^[12]。此外, 生物质炭的施用还能够提高土壤的阳离子交换量 (CEC), 改善土壤结构, 降低土壤容重, 并且提高土壤的渗透性^[16-17]。

研究表明, 生物质炭调控土壤盐碱度的主要机制之一在于其对离子交换的协调能力。生物质炭较高的比表面积及丰富的孔隙度使得生物质炭能够从土壤溶液中有效吸附并储存 Na^+ , 从而降低 Na^+ 对植物根系的有效性^[18]。此外, 生物质炭的施用能够提高土壤 CEC, 这是由于生物质炭富含 K^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 等必需养分离子, 这些养分离子能够与 Na^+ 发生离子交换, 从而降低钠吸附比, 以此缓解盐渍化对土壤的损害^[19]。生物质炭的施用能够有效提升土壤质量, 一方面, 生物质炭的施用能够提高土壤团聚体的稳定性, 从而提高土壤的水分涵养能力及土壤湿度, 进而防止根系受到渗透胁迫; 另一方面, 生物质炭的施用能够通过增加土壤碳含量, 同时维持土壤中必需养分 (如氮、磷、钾) 的有效性。此外, 生物质炭的施用可以显著提高土壤中的微生物

活性, 进一步促进促生物质的释放, 从而提高植物对土壤盐渍化的抗逆性^[20]。

总体而言, 上述效应的主要机制在于生物质炭的施用可以有效提高土壤阳离子交换量, 从而提高土壤对植物所需养分离子的交换能力, 生物质炭施用对土壤保水保肥性能的提高可以有效缓解盐渍化对土壤的胁迫。相关研究证实, 生物质炭的施用可以促进盐碱土中可溶性盐的淋出, 从而降低土壤剖面的电导率和盐度。在此基础上, 生物质炭的施用可提高土壤孔隙度和电导率, 进而加快土壤中可溶性盐的淋溶速率, 最终降低土壤饱和提取液电导率 (ECe) ^[21-24]。

一般地, 生物质炭对盐碱土的作用效应会随着生物质炭的制备条件的变化而变化。生物质炭对土壤有机质含量的提高可以促进土壤中负电荷位点, 从而提高土壤对阳离子的吸附能力; 同时, 生物质炭丰富的官能团结构可以促进土壤中阳离子的交换容量, 这些机制是生物质炭调控土壤盐碱性胁迫的关键。因此, 生物质炭中官能团结构、有机质含量、孔隙结构以及比表面积等性质决定了生物质炭对盐碱土的改良效应。据此, 生物质炭对盐碱土的综合改良效应一般取决于生物质炭的原料种类、热裂解

参数(如热裂解温度、升温速率、热裂解时间等)以及生物质炭的理化特性。研究表明, 畜禽粪便生物质炭一般具有适宜的灰分含量以及较低的碳氮比, 因此, 此类生物质炭可有效提高土壤微生物量以及养分有效性^[25]; 农家肥类生物质炭对农林作物生长及其生理功能的改善具有显著成效^[26]; 对于石灰性土壤, 则更适宜于利用甘蔗渣类生物质炭进行改良, 甘蔗渣生物质炭可有效改良石灰性土壤理化性质, 并促进石灰性土壤中作物的生长及产量^[27]; 进一步地, 研究表明, 木质生物质炭的施用可有效缓解土壤的盐渍化胁迫, 同时, 稻草秸秆生物质炭的施用可以维持土壤钾含量并提高土壤的固碳潜力, 从而促进生物质炭对盐渍化土壤状况的改良效果。

在生物质炭制备过程中, 生物质炭的热裂解温度、升温速率以及停留时间是影响生物质炭性质以及功能的核心要素。研究发现, 升温速率在 10℃/min, 加热处理时间为 30-60min 制备的生物质炭具有更优的结构及稳定性, 有利于养分存储, 更适宜于盐碱土的改良^[14]。

进一步地, 研究发现, 热裂解温度在 550℃以上制备的生物质炭, 其表面官能团数量会减少, 但仍具有良好的结构完整性, 这种特性使得生物质炭可高效缓解土壤盐渍化, 并且能有效促进植物生长^[28,29]。在 350-550℃范围内制备的生物质炭的作用效果最为突出, 这是由于此温度范围内制备的生物质炭具有较高的比表面积和孔隙度, 因而具有较高的吸附容量^[14,30]。

3 生物质炭对重金属污染盐碱土的改良效应及主要机制

研究表明, 盐碱土(pH: 7.64)中重金属镉的有效性会显著增加, 土壤溶液中, 镉有效性的增幅可达 34.1%-49.7%, 土壤浸提态镉有效性增加 32.0%-51.6%^[31]。而在干旱或半干旱地区(如新疆、宁夏、内蒙古), 土壤盐渍化与地下水砷污染可能同时发生, 例如, 在宁夏银川平原, 可溶性砷浓度范围为 0.04-263mg/L, 近半数样本超过了世界卫生组织设定的安全阈值^[32]。在干旱及半干旱地区的不合理灌溉会加剧土壤盐渍化问题, 盐碱地的碱性、有氧环境会促进砷从所吸附的矿物表面解离并释放到水体系统中, 进而增加农业生产风险^[33]。

重金属污染盐碱土的改良技术多样, 其中, 施

用生物质炭对盐碱土具有显著的改良效果。Sun 等(2020)发现, 在有重金属镉污染的盐碱土中施用生物质炭显著降低了蔬菜中的镉含量, 并且降低了土壤中可交换态的镉含量, 同时, 生物质炭的施用减少了盐碱土中镉的纵向迁移^[34]。生物质炭的施用可以增加表层土壤中的有机质含量, 由于生物质炭能够提供丰富的有机碳, 从而促进土壤团聚体的形成, 进而调控土壤的理化性质(如提高土壤固碳以及土壤肥力), 并钝化土壤中的重金属^[35,36]。此外, 生物质炭对土壤 pH、Eh、有机质含量以及 CEC 等基本性质的改变会直接影响土壤中重金属的赋存形态。研究表明, 碱性生物质炭的施用可以促进低迁移态镉的形成, 如不溶性沉淀化合等^[37]。进一步地, 生物质炭的官能团以及微孔结构能够显著影响镉离子的水解, 并且促进碳酸键及有机键的形成^[38]。

4 改性生物质炭对重金属污染盐碱土的改良效应及主要机制

然而, 未改性生物质炭的施用可能会增加土壤中砷的生物有效性。研究表明, 未改性生物质炭的施用提高了土壤 pH 以及土壤中可溶性有机质的含量, 从而提高了我国南方酸性水稻土中砷的迁移性^[39]。另外, 未改性生物质炭还可能作为电子供体促进五价砷还原为三价砷, 进而提高土壤砷的生物毒性^[40]。研究发现, 相对于未改性生物质炭, 铁改性生物质炭对砷污染盐碱土具有更为显著的改良效果。铁氧化物可与氧化态砷或还原态砷结合形成稳定络合物, 从而有效降低土壤中砷的迁移性与生物有效性^[41]。Zhang 等(2025)的研究表明, 铁改性生物质炭的施用有效降低了盐碱土中砷的迁移性。一方面, 铁改性生物质炭中 FeOOH 以及 Fe₂O₃ 的水解产酸的酸性物质能够中和盐碱土(pH: 8)的碱性, 从而降低碱性导致的砷迁移性增加的风险; 另一方面, 铁氧化物(如 FeOOH 以及 Fe₂O₃)能够与砷形成表面络合物或共沉淀, 并且可以通过氧化还原反应促进砷的固定及形态转化。在二甲基砷(DMA)污染的土壤中, 铁改性生物质炭可通过其表面的羧基等含氧官能团与 DMA 形成氢键或配位键, 以此促进铁改性生物质炭对 DMA 的吸附^[42]。另外, Fe³⁺的氧化作用能够促进无机三价砷向稳定的五价砷的转化, 在此基础上, 五价砷会与铁的氧化物形成铁-砷复合物, 这一过程可显著提高残渣态砷的形成及所占比例^[43]。

尽管铁改性生物质炭对无机砷和有机砷的钝化机制及修复效果存在差异, 但铁改性生物质炭对砷污染的盐碱土的改良仍然具有较好的效果。铁改性生物质炭在有效降低土壤砷有效性及迁移性的基础上, 铁改性生物质炭可进一步缓解土壤的盐渍化胁迫。研究表明, 铁改性生物质炭的施用可增加土壤有机质含量, 且能够通过吸附作用减少土壤有机质的流失; 另一方面, 铁改性生物质炭较高的比表面积及丰富的孔隙结构可以提高土壤 CEC, 从而促进土壤中 Na^+ 等盐基离子的吸附及淋溶。此外, 铁改性生物质炭中 Fe^{3+} 的解离能够与土壤胶体络合, 从而增加土壤结构的稳定性, 并缓解盐碱土常见的板结和渗透性差的问题^[44,17,45]。

5 总结及展望

总体来说, 土壤盐渍化是我国农业与生态领域的重要隐患: 一方面它严重影响粮食的产量和品质, 另一方面, 盐渍化导致的土壤重金属迁移性、毒性增强, 会进一步衍生食品安全问题, 加速土壤退化进程。目前的研究现状表明, 生物质炭的施用可有效改良盐碱土的理化性质, 例如中和碱性 pH, 改善土壤结构, 提高土壤 CEC, 提高土壤有机质含量及土壤固碳潜力; 另外, 生物质炭的施用可以有效降低盐碱土的 EC 及盐碱度, 从而缓解盐渍化对土壤的胁迫。对于重金属-盐渍化复合污染土壤, 生物质炭的施用能够通过其丰富的官能团、较高的比表面积以及丰富的孔隙结构对盐碱土中的重金属离子产生吸附络合作用, 进而钝化土壤中游离态的重金属, 并促进稳定态重金属的形成。进一步地, 与未改性炭相比, 改性炭的施用, 尤其是铁改性生物质炭的施用可有效改良砷污染的盐碱土, 但钝化效应会随着土壤污染情况及生物质炭的种类而产生变化。因此, 未来研究应基于生物质炭制备条件、改性技术及重金属-盐渍化复合污染土壤的具体情况对生物质炭应用的综合效应及机制探究。

参考文献

- [1] Mukhopadhyay R, Sarkar B, Jat H S, et al. Soil Salinity under Climate Change: Challenges for Sustainable Agriculture and Food Security[J]. *Journal of Environmental Management*, 2020, 280: 111736.
- [2] Ding Z, Koriem M A, Ibrahim S M, et al. Seawater Intrusion Impacts on Groundwater and Soil Quality in the Northern Part of the Nile Delta, Egypt[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2020, 79: 313.
- [3] Dun O. Migration and Displacement Triggered by Floods in the Mekong Delta[J]. *International Migration*, 2011, 49: 1.
- [4] Han D, Cheng J, Hu X, et al. Spatial Distribution, Risk Assessment and Source Identification of Heavy Metals in Sediments of the Yangtze River Estuary, China[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2016, 115(1-2): 141-148.
- [5] Wong V N L, Johnston S G, Burton E D, et al. Seawater Causes Rapid Trace Metal Mobilisation in Coastal Lowland Acid Sulfate Soils: Implications of Sea Level Rise for Water Quality[J]. *Geoderma*, 2010, 160(2): 252-263.
- [6] Sruthi P, Shackira A M, Puthur J T. Heavy Metal Detoxification Mechanisms in Halophytes: An Overview[J]. *Wetlands Ecology and Management* 2016, 25: 129-148.
- [7] Acosta J A, Jansen B, Kalbitz K, et al. Salinity Increases Mobility of Heavy Metals in Soils[J]. *Chemosphere*, 2011, 85(8): 1318-1324.
- [8] Rasa K, Peltovuori T, Hartikainen H. Effects of De-Icing Chemicals Sodium Chloride and Potassium Formate on Cadmium Solubility in a Coarse Mineral Soil[J]. *Science of the Total Environment*, 2005, 366(2-3): 819-825.
- [9] Usman A R A, Kuzyakov Y, Stahr K. Effect of Immobilizing Substances and Salinity on Heavy Metals Availability to Wheat Grown on Sewage Sludge-Contaminated Soil[J]. *Soil & Sediment Contamination*, 2005, 14(4): 329-344.
- [10] Raiesi F, Razmkhah M, Kiani S. Salinity Stress Accelerates the Effect of Cadmium Toxicity on Soil N Dynamics and Cycling: Does Joint Effect of These Stresses Matter?[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2018, 153: 160-167.
- [11] Chi W, Chen G, Hu S, et al. A Small Extent of Seawater Intrusion Significantly Enhanced Cd Uptake by Rice in Coastal Paddy Fields[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2023, 458: 131945.
- [12] Li Z, Kekeli M A, Jiang Y, et al. Progress and Prospect of Saline-Alkaline Soil Management Technology: A Review[J]. *Applied Sciences*, 2025, 15 (8).

- [13] Das S K, Ghosh G K, Avasthe R K, et al. Compositional Heterogeneity of Different Biochar: Effect of Pyrolysis Temperature and Feedstocks[J]. *Journal of Environmental Management*, 2020, 278(2): 111501.
- [14] HAIDER F U, COULTER J A, CAI L, et al. An Overview on Biochar Production, Its Implications, and Mechanisms of Biochar-Induced Amelioration of Soil and Plant Characteristics[J]. *Pedosphere*, 2021, 32(1): 107-130.
- [15] Indren M, Cheruvu N, Birzer C, et al. Biochar Production and Characterisation — A Field Study[C]. In 2017 IEEE Global Humanitarian Technology Conference (GHTC), 2017, 1–5.
- [16] Mia S, Suhi A, Makino T, et al. Biochar Impacts on Plant Water Dynamics under Drought and Salinity Stress[J]. *Biochar in Mitigating Abiotic Stress in Plants*, 2025, 87–100.
- [17] Zhao W, Zhou Q, Tian Z, et al. Apply Biochar to Ameliorate Soda Saline-Alkali Land, Improve Soil Function and Increase Corn Nutrient Availability in the Songnen Plain[J]. *Science of The Total Environment*, 2020, 722, 137428.
- [18] Umer S, Akram N A, Bukhari I, et al. Biochar for Alleviation of Salinity Stress in Plants[J]. In *Biochar in Mitigating Abiotic Stress in Plants*, 2025, 173–192.
- [19] Zhang Y, Miao S, Song Y, et al. Biochar Application Reduces Saline-Alkali Stress by Improving Soil Functions and Regulating the Diversity and Abundance of Soil Bacterial Community in Highly Saline-Alkali Paddy Field[J]. *Sustainability*, 2024, 16 (3).
- [20] Huang J, Zhu C, Kong Y, et al. Biochar Application Alleviated Rice Salt Stress via Modifying Soil Properties and Regulating Soil Bacterial Abundance and Community Structure[J]. *Agronomy*, 2022,12(2): 409.
- [21] Sudratt N, Faiyue B. Biochar Mitigates Combined Effects of Soil Salinity and Saltwater Intrusion on Rice (*Oryza Sativa* L.) by Regulating Ion Uptake[J]. *Agronomy*, 2023, 13 (3).
- [22] Yanfei Y, Qiang L, Hao Z, et al. Biochar as a Sustainable Tool for Improving the Health of Salt-Affected Soils[J]. *Soil & Environmental Health*, 2023, 1 (3).
- [23] Saifullah null, Dahlawi S, Naem A, et al. Biochar Application for the Remediation of Salt-Affected Soils: Challenges and Opportunities[J]. *Science of the Total Environment*, 2017, 625: 320-335.
- [24] Tuyishimire E, Cui J, Tang X, et al. Interactive Effects of Honeysuckle Planting and Biochar Amendment on Soil Structure and Hydraulic Properties of Hillslope Farmland[J]. *Agriculture*, 2022, 12 (3).
- [25] Mavi M S, Bhullar R S, Choudhary O P. Differential Ability of Pyrolysed Biomass Derived from Diverse Feedstocks in Alleviating Salinity Stress[J]. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 2022, 12 (11), 5229–5240.
- [26] Yousaf M T B, Nawaz M F, Zia ur Rehman M, et al. Effect of Three Different Types of Biochars on Eco-Physiological Response of Important Agroforestry Tree Species under Salt Stress[J]. *International Journal of Phytoremediation*, 2021, 23(13): 1412-1422.
- [27] Rassaei F. Effects of Different Rates of Sugarcane Biochar on Amelioration of Adverse Salinity Effects in Calcareous Clay Soil[J]. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 2024, 55(9): 1349-1360.
- [28] Tan H, Ong P, Li C, et al. Mitigation of Soil Salinity Using Biochar Derived from Lignocellulosic Biomass[J]. *chemical engineering*, 2021, 83: 2283-9216.
- [29] Tang J, Zhang S, Zhang X, et al. Effects of Pyrolysis Temperature on Soil-Plant-Microbe Responses to *Solidago Canadensis* L.-Derived Biochar in Coastal Saline-Alkali Soil[J]. *Science of The Total Environment*, 2020, 731, 138938.
- [30] da Rocha A R, Soares F L F, Mangrich A S, et al. Synergetic Effect of Heating Rate, Temperature, and Residence Time of Modified Agro-Industrial Waste Biochars on Phosphate Adsorption[J]. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 2024, 22: 4203-4214.
- [31] Wang M, Chen S, Chen L, et al. Responses of Soil Microbial Communities and Their Network Interactions to Saline-Alkaline Stress in Cd-Contaminated Soils[J]. *Environmental Pollution*, 2019, 22(B): 1609-1621.
- [32] Feng S, Guo H, Sun X, et al. Relative Importance of Hydrogeochemical and Hydrogeological Processes on Arsenic Enrichment in Groundwater of the Yinchuan Basin,

- China[J]. *Applied Geochemistry*, 2022, 137: 105180.
- [33] Liu N, Gao R, Guo J, et al. Mechanisms of Calcium-Mediated As(V) Immobilization by Undissolved and Dissolved Biochar in Saline-Alkali Environments[J]. *Journal of Environmental Management*, 2024, 370: 122775.
- [34] Sun J, Fan Q, Ma J, et al. Effects of Biochar on Cadmium (Cd) Uptake in Vegetables and Its Natural Downward Movement in Saline-Alkali Soil[J]. *Environmental Pollutants and Bioavailability*, 2020, 32(1): 34-46.
- [35] Chen, Baoliang, Zhou, et al. Transitional Adsorption and Partition of Nonpolar and Polar Aromatic Contaminants by Biochars of Pine Needles with Different Pyrolytic Temperatures[J]. *Environmental Science & Technology*, 2008, 42(14): 11.
- [36] Jeffery S, Bezemer T M, Cornelissen G, et al. The Way Forward in Biochar Research: Targeting Trade-Offs between the Potential Wins[J]. *Global Change Biology Bioenergy*, 2013, 7(1): 1-13.
- [37] Anderson C R, Condon L M, Clough T J, et al. Biochar Induced Soil Microbial Community Change: Implications for Biogeochemical Cycling of Carbon, Nitrogen and Phosphorus[J]. *Pedobiologia*, 2011, 54(5-6): 309-320.
- [38] Chen H, Yang X, Wang P, et al. Dietary cadmium intake from rice and vegetables and potential health risk: A case study in xiangtan, southern China[J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 639: 271-277.
- [39] Yang Y.-P, Zhang H.-M, Yuan H.-Y, et al. Microbe Mediated Arsenic Release from Iron Minerals and Arsenic Methylation in Rhizosphere Controls Arsenic Fate in Soil-Rice System after Straw Incorporation[J]. *Environmental Pollution*, 2018, 236: 598-608.
- [40] El-Naggar A, Chang S X, Cai Y, et al. Mechanistic Insights into the (Im)Mobilization of Arsenic, Cadmium, Lead, and Zinc in a Multi-Contaminated Soil Treated with Different Biochars[J]. *Environment International*, 2021, 156: 106638.
- [41] Miretzky P, Cirelli A F. Remediation of Arsenic-Contaminated Soils by Iron Amendments: A Review[J]. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 2010, 40(2): 93-115.
- [42] Wei J, Liu Y, Li J, et al. Adsorption and Co-Adsorption of Tetracycline and Doxycycline by One-Step Synthesized Iron Loaded Sludge Biochar[J]. *Chemosphere*, 2019, 236: 124254.
- [43] Zhang D, Lin J, Luo J, et al. Rapid Immobilization of Arsenic in Contaminated Soils by Microwave Irradiation Combined with Magnetic Biochar: Microwave-Induced Electron Transfer for Oxidation and Immobilization of Arsenic (III)[J]. *Science of the Total Environment*, 2024, 919: 170916.
- [44] Wang X, Riaz M, Babar S, et al. Alterations in the Composition and Metabolite Profiles of the Saline-Alkali Soil Microbial Community through Biochar Application[J]. *Journal of Environmental Management*, 2024, 352, 120033.
- [45] Li G, Khan S, Ibrahim M, et al. Biochars Induced Modification of Dissolved Organic Matter (DOM) in Soil and Its Impact on Mobility and Bioaccumulation of Arsenic and Cadmium[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2018, 348: 100-108.

版权声明: ©2025 作者与开放获取期刊研究中心(OAJRC)所有。本文章按照知识共享署名许可条款发表。

<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



OPEN ACCESS