

改性生物炭在镉离子污染修复中的研究进展

杨吉元^{1,2}

1.山西地质集团检测技术有限公司, 山西 太原 030001

2.山西省地质矿产二一三实验室有限公司, 山西 太原 030001

DOI:10.61369/EAE.2025040016

摘要：镉离子 (Cd^{2+}) 污染对生态环境和人体健康构成严重威胁, 开发高效、经济的修复材料已成为环境领域的研究热点。生物炭因其来源广泛、成本低廉、环境友好等优点, 在 Cd^{2+} 吸附方面表现出良好潜力, 但原始生物炭存在吸附容量低、选择性差等问题。通过物理、化学和生物改性可显著提升其性能。本文系统综述了改性生物炭在 Cd^{2+} 污染修复中的研究进展, 重点分析了气体活化、球磨、酸碱处理、金属/非金属掺杂、微生物改性等策略对其结构特性、表面化学性质及吸附性能的调控机制, 总结了不同改性方法对 Cd^{2+} 的去除效果与作用机理, 并对未来研究方向与实际应用中面临的挑战进行了展望, 以期对改性生物炭在重金属污染修复中的进一步开发与应用提供参考。

关键词：生物炭; 改性; 镉离子; 吸附

Research Progress of Modified Biochar in Remediation of Cadmium Ion Pollution

Yang Jiyuan^{1,2}

1.Shanxi Geological Group Testing Technology Co., Ltd., Taiyuan, Shanxi 030001

2.Shanxi Geological and Mineral Resources 213 Laboratory Co., Ltd., Taiyuan, Shanxi 030001

Abstract : Cadmium ion (Cd^{2+}) pollution poses a severe threat to both the ecological environment and human health, making the development of efficient and cost-effective remediation materials a research hotspot in the environmental field. Biochar exhibits excellent potential for Cd^{2+} adsorption due to its wide availability, low cost, and environmental friendliness. However, raw biochar suffers from issues such as low adsorption capacity and poor selectivity. Physical, chemical, and biological modifications can significantly enhance its performance. This paper systematically reviews the research progress of modified biochar in remediation of Cd^{2+} pollution, focusing on the regulatory mechanisms of strategies such as gas activation, ball milling, acid-base treatment, metal/non-metal doping, and microbial modification on its structural characteristics, surface chemical properties, and adsorption performance. It summarizes the removal efficiency and mechanisms of different modification methods for Cd^{2+} and provides insights into future research directions and challenges in practical applications, aiming to offer references for the further development and application of modified biochar in remediation of heavy metal pollution.

Keywords : biochar; modification; cadmium ion; adsorption

引言

随着金属冶炼、电镀、电池制造等工业的发展, 重金属镉 (Cd) 污染日益加剧。Cd 在环境中常以二价镉离子 (Cd^{2+}) 的形式存在, 具有流动性强, 易迁移, 难以生物降解等特点, 对环境和生态系统造成持久危害^[1,2]。此外, Cd^{2+} 易通过食物链富集进入人体, 具有致畸致癌性, 影响神经系统, 造成肝肾损伤, 引发高血压、骨质疏松等疾病^[3-5]。其危害性已获国际广泛共识, 世界卫生组织 (WHO) 将其定义为食品污染物监测核心指标, 我国《生活饮用水卫生标准》(GB 5749-2022) 明确规定 Cd 含量限值为 $0.005 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ^[6]。因此, 高效去除环境中 Cd^{2+} 具有重要意义。

目前已开发多种 Cd^{2+} 去除方法, 包括化学沉淀法、膜分离法^[1]、离子交换法等。但以上方法存在官能团有限、吸附量偏低以及缺乏选择性等问题, 在实际 Cd^{2+} 去除应用中仍面临诸多挑战^[7]。为改善以上问题, 研究者已开发多种生物炭改性方法, 主要包括物理改性、化学改性和生物改性。通过增大生物炭比表面积、丰富其表面官能团、增强表面负电性等角度构建高效去除 Cd^{2+} 污染的生物炭材料^[8]。本文对近年来改性生物炭用于 Cd^{2+} 污染去除的研究成果进行了系统的综述, 以期对改性生物炭用于 Cd^{2+} 去除的相关研究提供新思路。

一、改性生物炭制备及其 Cd²⁺ 去除性能

(一) 物理改性

物理改性是利用物理手段调控生物炭孔隙结构与表面特性的技术,主要包括气体活化法和机械处理法两类。其中气体活化法通过高温分阶段处理生物炭,先在碳化阶段以中温去除挥发性物质,再于活化阶段通入水蒸气、二氧化碳或空气等含氧气体,借助气化反应扩展微孔通道并清除残留焦油,从而显著提升比表面积、孔隙率及表面反应活性^[9]。

机械处理法则以球磨和超声为代表,球磨是通过机械力将生物炭颗粒破碎至纳米级,既减小粒径以暴露内部孔隙网络、增加内外表面积,又在破碎过程中生成酸性官能团改善表面化学特性^[10]。超声主要利用超声波清除生物炭内部杂质,提高比表面积。气体活化法通过热力学调控优化孔隙分布,机械处理法依靠机械作用提升比表面积和表面官能团含量,两者均能显著增强生物炭对污染物的吸附能力。

(二) 化学改性

化学改性是通过化学试剂与生物质协同热解或后处理调控生物炭理化性质的技术,通常在较低热解温度下利用试剂与生物质组分间的相互作用,构建高比表面积、可控孔径分布的多孔碳结构,并同步引入官能团或负载金属氧/硫化物^[11]。化学改性可在分子层面精准调控生物炭表面特性与孔隙结构,显著提升吸附性能,主要包括酸碱改性、氧化剂改性、金属掺杂、非金属杂原子掺杂、有机化合物改性等。

酸改性可以去除生物炭表面沉积的矿物和杂质成分改变其比表面积、孔隙结构和灰分含量,同时引入更多的含氧官能团^[12]。酸性试剂主要包括盐酸(HCl)、硫酸(H₂SO₄)、硝酸(HNO₃)和磷酸(H₃PO₄),其中磷酸由于较弱的腐蚀性得到广泛应用。相较于原始生物炭,H₃PO₄改性显著提升了对Cd²⁺和Pb²⁺的吸附能力。碱改性可以有效改变生物炭的比表面积、含氧官能团含量和表面碱度,常用的碱性试剂主要包括氢氧化钾(KOH)和氢氧化钠(NaOH)。通常KOH改性生物炭的比表面积高于NaOH改性生物炭,而NaOH改性生物炭的-OH和C=C含量高于KOH改性生物炭^[13]。热解过程完全灭活了病原体,确保了材料的环境安全性。改性后生物炭的比表面积和孔径大幅增加,其对Cd²⁺的最大吸附容量达到150.09 mg/g。机理分析表明,Cd²⁺的去除主要通过表面含氧官能团的络合作用以及CdCO₃沉淀的生成共同实现^[14]。

氧化改性是提升生物炭吸附性能的重要手段,其通过物理、化学或生物方法在生物炭表面引入羟基、羧基等含氧官能团,从而增强材料亲水性及对污染物的亲和能力。常用氧化剂包括高锰酸钾(KMnO₄)、过氧化氢(H₂O₂)和臭氧(O₃)等。研究表明,高锰酸钾改性不仅可引入含氧官能团,还可实现金属氧化物的同步负载^[15]。综上所述,氧化改性能够有效调控生物炭表面化学性质,通过引入含氧官能团及伴生的物理结构变化共同增强对重金

属的吸附能力,是一种具有良好应用前景的生物炭修饰策略。

金属盐或金属氧化物(如Fe、Mn、Zn、Mg、Al等)对生物炭进行改性,可显著调控其金属元素组成、阳离子交换能力(CEC)及表面电荷性质,从而有效增强对重金属(如Cd²⁺)的吸附性能^[16]。综上所述,金属改性生物炭通过优化结构特性与表面化学性质,显著提升了吸附性能,且复合改性策略在多元污染协同治理方面展现出广阔前景。

氮(N)、磷(P)、硫(S)和氧(O)等非金属杂原子改性可有效调控生物炭的比表面积、孔隙结构和表面化学性质,通过引入丰富官能团并以络合、沉淀等机制显著提升对重金属的吸附容量与选择性,在污染治理中展现出良好应用潜力。除有机非金属改性外,无机复合改性也表现出优异性能^[17]。综上,非金属及无机改性可通过多元化官能团引入、表面组成调控和微观结构优化,协同增强生物炭对重金属的吸附能力,在环境修复中具有广阔前景。

(三) 生物改性

生物改性技术通过微生物作用优化生物炭结构与表面性质,显著提升其对重金属离子的吸附能力,已成为环境修复领域的研究热点^[18]。该方法主要包括厌氧消化和细菌转化两种途径,其核心机制在于微生物代谢过程能够增加生物炭的比表面积、孔隙结构和含氧官能团(如羧基、酚羟基)数量,从而通过表面络合、离子交换、静电吸附及沉淀等作用高效固定重金属离子。

二、改性方法对比与评价

总体而言,物理改性(如气体活化、球磨)主要通过提升比表面积和孔隙结构增强物理吸附能力,适用于高比表面积需求的场景,但官能团引入有限;化学改性(如酸碱处理、金属/非金属掺杂)能显著引入活性官能团和金属位点,通过络合、沉淀等机制大幅提升吸附容量与选择性,尤其适用于复杂水体中Cd²⁺的高效去除,但可能存在化学试剂残留与二次污染风险;生物改性则依托微生物代谢优化生物炭结构与表面性质,环境友好且具备一定的生物协同效应,但制备周期较长、工艺稳定性有待提升^[19-20]。复合改性(如物理-化学、化学-生物联合)往往能兼具多方法优势,表现出更高的吸附容量与更好的实际应用前景。

三、结论

改性生物炭作为一种环境友好、高效的重金属吸附材料,在镉离子(Cd²⁺)污染修复中展现出显著潜力。本文系统综述了物理改性、化学改性和生物改性等策略对生物炭结构与性能的调控作用及其对Cd²⁺的吸附机制。未来研究应侧重于开发绿色、低成本的改性工艺,深化多介质(水-土-沉积物)体系中Cd²⁺的迁移转化机制研究,推动改性生物炭与其他修复技术的联用,并加强其环境安全性与生态可持续性评估,以促进改性生物炭在实际Cd²⁺污染修复中的规模化应用。

参考文献

- [1] Hou L, Ji S, Zhang Y, et al. The mechanism of silicon on alleviating cadmium toxicity in plants: A review[J]. *Frontiers in Plant Science*, 2023, 14: 1138.
- [2] Deng M H, Malik A, Zhang Q, et al. Improving Cd risk managements of rice cropping system by integrating source-soil-rice-human chain for a typical intensive industrial and agricultural region[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2021, 313: 127883.

- [3] 王振, 韩永胜, 张淑芬, 等. 改性牛粪生物炭对铅、镉复合污染土壤的钝化研究 [J]. 家畜生态学报, 2025, 46(05): 59-66.
- [4] Shao Y T, Zheng L T, Jiang Y G. Cadmium toxicity and autophagy: a review[J]. Biometals, 2024, 37(3): 609-629.
- [5] 王泽亚, 龚香宜, 任大军, 等. β -环糊精改性梧桐叶基生物炭对水中镉离子的去除研究 [J]. 功能材料, 2022, 53(08): 8092-8098.
- [6] 木丽远, 周洪印, 韩宇, 等. 磷酸改性生物炭对小白菜镉吸收的阻控效果 [J]. 中国土壤与肥料, 2025, 9(04): 202-210.
- [7] 周晗, 丁永丰, 丁壬淇, 等. Si-P 改性生物炭对弱碱性 Cd 污染土壤肥力调控效应及小白菜生长的影响 [J]. 农业环境科学学报, 2025, 44(04): 930-941.
- [8] Li P F, Lan H L, Chen K, et al. Novel high-flux positively charged aliphatic polyamide nanofiltration membrane for selective removal of heavy metals[J]. Separation and Purification Technology, 2022, 280: 119949.
- [9] 雷静, 樊敏敏, 吴国照, 等. 生物炭改性技术对土壤污染修复的协同效应与优化创新 [J]. 资源节约与环保, 2025, 7(03): 117-121.
- [10] Sonali R D, Satyajit M D, Ajinkya K, et al. A review outlook on methods for removal of heavy metal ions from wastewater[J]. Separation and Purification Technology, 2024, 350: 127868.
- [11] 吕鹏, 李莲芳, 黄晓雅. 改性生物炭修复砷镉复合污染土壤研究进展 [J]. 环境科学, 2023, 44(07): 4077-4090.
- [12] Lan Z, Zhibo Z, Lusi W, et al. Mechanism and application of sulfhydryl-modified chitosan derivative for decontamination of Pb^{2+} and Cd^{2+} in water bodies[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2025, 306: 141535.
- [13] 姚克峰, 孙延康, 李飞跃, 等. 金属改性生物炭对污染土壤中镉的钝化修复效果 [J]. 安徽科技学院学报, 2025, 39(02): 42-48.
- [14] 木丽远, 周洪印, 黄祖志, 等. 改性生物炭对小白菜中镉吸收累积的影响 [J]. 生态与农村环境学报, 2025, 41(08): 1086-1094.
- [15] Tan W-T, Zhou H, Tang S-F, et al. Enhancing Cd^{2+} adsorption on rice straw biochar by modification of iron and manganese oxides[J]. Environmental Pollution, 2022, 300: 118899.
- [16] 刘蕊, 杨绍辉, 邓志华, 等. 氢氧化钾改性咖啡渣生物炭对重金属污染土壤的影响 [J]. 应用与环境生物学报, 2025, 31(07): 1134-1144.
- [17] 罗莹莹, 华碧成, 吴钦鸿, 等. 草酸改性生物炭对重金属铬污染土壤的修复研究 [J]. 广州化工, 2024, 52(19): 136-138.
- [18] Li J, Li M, Wang S, et al. Key role of pore size in Cr(VI) removal by the composites of 3-dimensional mesoporous silica nanospheres wrapped with polyaniline[J]. Science of The Total Environment, 2020, 729: 139009.
- [19] 栗泽红, 宋慧佳, 张新月, et al. 生物炭改性策略及其在铬(VI)污染修复中的研究进展 [J]. 分析化学, 2024, 52(03): 323-335.
- [20] 李文章, 胡亚茹, 李法云, 等. 铁改性生物炭-凹凸棒石载体固定化菌剂制备及其对氯苯污染土壤修复作用 [J]. 生态环境学报, 2024, 33(11): 1782-1791.