

生物炭复合材料对重金属污染土壤的修复效果评价

宋阳

台州职业技术学院, 浙江 台州 318000

DOI: 10.61369/VDE.2026070010

摘 要： 当前，土壤重金属污染已经成为威胁耕地安全、农产品品质和生态系统健康的全球性环境问题。如何对重金属污染土壤进行科学修复，已经成为亟待解决的难题之一。作为绿色高效的稳定化修复材料，生物炭复合材料具有孔隙结构发达、表面官能团丰富、可调控等功能特性，在重金属污染土壤修复中具有显著优势。对此，本文就生物炭复合材料对重金属污染土壤的修复效果评价进行深入分析，旨在为生物炭复合材料在重金属污染土壤修复中的科学应用提供一些参考和借鉴。

关 键 词： 生物炭复合材料；重金属污染；修复效果评价

Evaluation of Remediation Effects of Biochar Composite Materials on Heavy Metal-Contaminated Soil

Song Yang

Taizhou Vocational and Technical College, Taizhou, Zhejiang 318000

Abstract： Currently, soil heavy metal pollution has become a global environmental issue threatening cultivated land security, agricultural product quality, and ecosystem health. How to scientifically remediate heavy metal-contaminated soil has become one of the urgent problems to be solved. As a green and efficient stabilizing remediation material, biochar composite materials possess functional characteristics such as well-developed porous structure, abundant surface functional groups, and adjustability, demonstrating significant advantages in the remediation of heavy metal-contaminated soil. In this regard, this paper conducts an in-depth analysis of the remediation effect evaluation of biochar composite materials on heavy metal-contaminated soil, aiming to provide reference for the scientific application of biochar composite materials in the remediation of heavy metal-contaminated soil.

Keywords： biochar composite materials; heavy metal pollution; remediation effect evaluation

引言

随着工业化、城市化、农业集约化进程的推进，铅、铜、锌、铬等重金属通过化肥农药、污水灌溉、大气沉降等方式持续进入土壤环境，进而造成严重的重金属污染^[1]。根据《全国土壤污染状况调查公报》，中国耕地土壤点位超标率达19.4%，其中重金属污染占比在80%以上。与其他类型的土壤污染相比，重金属污染无法被微生物降解，极易在土壤中积累，并通过食物链进入人体，可能会引发人体重金属中毒、器官损伤甚至癌变，给社会公共健康造成巨大威胁^[2]。

传统重金属污染土壤治理方法有多种，如电动修复、化学固化、物理淋洗等，但这些修复方法普遍存在一定缺陷，如经济成本高、易造成二次污染、破坏生态环境等。生物炭具有表面积大、表面负电性强等特点，可以通过离子交换、吸附、络合沉淀等作用固定重金属，显著提升重金属污染处理效果，成为当前土壤修复领域的研究热点。

然而，当前，生物炭复合材料的修复效果评价存在诸多问题，如评价指标单一、标准不统一等，导致修复效果评价结果缺乏准确性和全面性。对此，本文首先阐述生物炭复合材料修复效果的核心评价指标，其次，深入分析关键影响因素，最后，提出行之有效的优化路径，进而为推动生物炭复合材料修复技术从实验室走向规模化工程应用提供支撑^[3]。

一、生物炭复合材料修复效果的核心评价指标

（一）土壤重金属形态转化效果

生物炭复合材料修复重金属污染土壤的核心机制是通过改变

重金属在土壤中的存在形态，降低其生物有效性和迁移性。对此，评价修复效果的首要指标是重金属形态转化率。通过运用连续浸提法，可将土壤重金属的形态划分为可交换态、碳酸盐结合态、铁锰氧化物结合态、有机物结合态和残渣态。其中，前两种

课题基金：台州市科技计划项目，《基于生物炭与纳米材料协同的土壤重金属污染修复技术研究》（项目编号25sfb25）。

形态下的重金属容易被生物吸收利用，毒性、迁移性最强，后三种形态相对较为稳定，难以被生物吸收利用。对此，将可交换态、碳酸盐结合态重金属转化为稳定性更强的低活性形态，进而实现重金属污染土壤的修复。因此，可通过对修复前和修复后不同形态重金属占比进行分析，进而能够直观反映出生物炭复合材料对重金属污染土壤修复效果的强弱^[4]。

（二）土壤理化性质改善效果

生物炭复合材料不仅具备固定重金属功能，还能改良土壤理化性质，如土壤孔隙度、酸碱度、通气性、保水性等，而土壤理化性质的改善又会在一定程度上促使重金属稳定。因此，土壤理化性质的变化也是评价重金属污染土壤修复效果的关键指标之一。通过测量修复前后土壤容重、孔隙度、含水率等参数，能够判断出生物炭复合材料对土壤物理结构的改善效果。

（三）土壤生态毒性降低效果

化学指标的改善并不等同于生态风险的消除。因此，必须开展生态毒性评价，以此验证重金属污染土壤修复的实际效果^[5]。主要评价内容包括土壤中微生物群落结构、生物活性以及植物生长发育情况等方面的检测分析。土壤中的微生物对环境变化非常敏感，其群落多样性、酶活性、丰度等方面的变化，都能在一定程度上反映出重金属污染土壤修复情况。可以通过检测修复前后土壤中酶的活性和分析土壤中微生物群落变化情况，进而判断出土壤生态环境改善情况。除此之外，还可以通过植物生长毒性实验、植物发芽实验等方式，观测植物发芽、株高、生物量等情况，观察结果也能够直接反映修复后土壤的生态毒性水平。

（四）修复长效性与稳定性

重金属污染土壤修复的长效性和稳定性也是衡量生物炭复合材料修复效果的关键。生物炭复合材料对重金属的固定效果会随着环境和时间因素的变化而发生改变^[6]。例如，土壤中微生物活动可能会导致已经被固定的重金属重新活化，造成重金属污染。对此，应在不同时间段，对修复后的土壤重金属活性、形态分布和环境效应等进行检测，通过对比检测数据，评估在不同环境下生物炭复合材料的结构稳定性和对重金属的固定能力，才能全面准确判断修复的实际成效。

二、提升生物炭复合材料修复效果的优化路径

（一）靶向研发多功能绿色复合材料

生物炭复合材料的性能是提升修复效果的重要基础。因此，针对不同类型的污染和土壤环境，可设计和制备多种类型的生物炭复合材料^[7]。具体来讲：

首先，开展靶向改性。针对单一重金属或复合污染，可选择适当的改性组成。例如，针对铅、铜、镉等阳离子重金属土壤污染，应重点研发钙基、磷基、羟基磷灰石负载材料，通过强大的沉淀和络合作用，固定重金属；针对砷、铬等变价重金属土壤污染，应优先开发铁基、锰基、硫基复合材料，通过氧化还原作用，实现重金属的固定；针对复合污染，可构建多组分协同改性体系，实现对多种金属的固定。

其次，推行绿色低碳制备^[8]。在“双碳”目标背景下，优先选用农林废弃物、有机固废等作为原料，制备生物炭复合材料，以此降低制备成本，避免资源浪费；同时，还应推广绿色工艺，如低能耗热解、原位沉淀、机械球磨等，减少化学试剂的使用，避免对环境造成二次污染。最后，提升材料的环境适应性。可通过先进的技术手段，如纳米位点分散技术、多孔结构调控技术等，增强材料抗老化、抗淋溶等方面的能力，使其在复杂土壤环境中长期保持稳定的修复效果。

（二）科学制定精准施用管控策略

精准施用是提升重金属土壤修复效果、实现成本控制的重要举措^[9]。对此，有必要科学制定精准施用管控策略。具体来讲，首先，构建施用量决策模型。对重金属污染土壤的 pH 值、质地、有机质含量、重金属污染程度等进行全面检测，充分考量各种因素，借助人工智能、机器学习等技术，构建量化关系模型，以此实现施用量的精准预测，避免资源损耗。其次，调整施用方式和时间。可采用“分层施用+均匀混施”相结合的方式，以此提升生物炭复合材料与根际土壤的接触面积，确保材料与污染土壤充分混合，以此提升修复效率。同时，在作物播种前 1-2 周施用，为重金属稳定化反应预留充足的时间。最后，开展动态调控和养护。定期对重金属污染土壤进行全面检测，根据土壤检测结果，及时调整施用方案，以此提升土壤修复效果。

（三）构建多技术联合修复体系

单一生物炭复合材料难以满足复杂污染环境的修复需求^[10]。对此，有必要构建多技术联合修复体系。具体来讲：

首先，采用“生物炭复合材料+植物”联合修复。可利用生物炭复合材料与超富集植物联合施用的方式，对复杂污染环境进行修复。其次，还可以采用“生物炭复合材料+微生物”联合修复。可以引入芽孢杆菌、假单胞菌、硫酸盐还原菌等耐重金属功能菌，利用微生物的吸附、沉淀、氧化还原作用，与生物炭复合材料协同修复重金属土壤污染，以此提升修复效率。再次，可采用“生物炭复合材料+化学调理剂”联合修复。将生物炭复合材料与化学调理剂，如石灰、磷肥、膨润土等联合施用，以此改善土壤环境，降低材料损耗和经济成本。需要注意的是，针对不同场景，应制定针对性的修复方案，确保更好地修复重金属土壤污染。

（四）建立全过程效果监测与评估体系

科学的检测和评估体系是保障修复效果的重要手段。对此，有必要构建全过程修复效果检测与评估体系，以此为修复方案调整和优化奠定数据基础。具体来讲，首先，制定标准化、科学化的评价流程，统一相关指标的测定方法和评价标准，以此确保评价结果真实、可靠。其次，加强长期定位检测。开展 1~3 年的田间长期定位试验，检测自然与人为因素对修复效果的影响。同时，构建风险预警机制，及时发现并防控重金属再活化风险。最后，引入大数据与智能化技术。在数智时代背景下，可利用物联网、大数据等先进技术，实现对修复区域土壤环境参数的实时监测。同时，结合机器学习与数值模拟，预测修复效果的长期变化趋势，为修复方案的优化与调整提供数据支撑。

（五）完善产业化应用保障体系

推动生物炭复合材料的规模化应用，需从标准制定、风险评估、产业链构建等方面提供保障。一是加快制定行业标准，明确生物炭复合材料的原料要求、制备工艺、性能指标、安全阈值、施用技术规范与修复效果验收标准，规范市场秩序，避免劣质产品进入市场。二是强化生态风险评估，开展改性组分、纳米材料、残留物质的长期生态毒理研究，建立全生命周期评价体系，兼顾修复效果、成本、碳排放与环境安全性。三是构建完整的产业链，整合生物质收储、热解炭化、改性复合、田间施用、效果监测等环节，形成规模化、集约化的生产与服务模式；支持政产学研用协同创新，建立企业、高校、科研院所与地方政府的合作机制，推动技术成果转化与工程化应用。四是加大政策扶持力度，将生物炭复合材料修复技术纳入土壤污染防治专项资金支持范围，对采用该技术的农田修复项目给予补贴，降低应用成本。

三、结语

总之，在新时期，生物炭复合材料凭借其绿色高效、改良土壤功能、环境友好等优势，已经成为修复重金属污染土壤的重要手段之一。开展生物炭复合材料修复效果的科学评价，是推动其合理应用的重要前提。本文深入分析了生物炭复合材料修复效果的核心评价指标，并从多个角度和方向，提出靶向研发多功能绿色复合材料、科学制定精准施用管控策略、构建多技术联合修复体系等多种策略，以此提升修复效果。未来，随着科学技术的不断发展和进步，生物炭复合材料的性能将持续优化，评价体系将更加完善，产业化应用路径也会更加清晰顺畅。在各方的共同推动下，生物炭复合材料定能在重金属污染土壤修复领域发挥更大作用，为保障土壤生态安全、推动农业绿色可持续发展提供有力支撑。

参考文献

- [1] 滕克勇. 生物炭复合材料对重金属污染土壤的修复效果评价 [J]. 当代化工, 2025, 54(11): 2623-2626+2631.
- [2] 魏玉珍. 生物炭-铁复合材料对重金属污染土壤的修复及微生物的影响研究 [D]. 甘肃农业大学, 2024.
- [3] 杨鲲鹏. MgO 改性生物炭 / 凹凸棒石复合材料对土壤重金属镉的钝化作用及机理研究 [D]. 东南大学, 2024.
- [4] 李英超. 铁镁类水滑石修饰生物炭复合材料的制备及对重金属污染农田土壤的修复 [D]. 华南理工大学, 2024.
- [5] 谭双琴. 生物炭纳米零价铁复合材料对土壤重金属离子的去除研究 [D]. 天津工业大学, 2023.
- [6] 梁亚峰. 球磨电气石-生物炭复合材料对地下水、场地土壤 / 底泥重金属污染修复 [D]. 南开大学, 2022.
- [7] 董文菁, 欧阳峰. 生物炭复合材料在土壤重金属污染修复领域的研究进展 [J]. 四川环境, 2022, 41(01): 272-278.
- [8] 吕宏虹, 张慧, 刘颖, 等. MnOx / 生物炭复合材料对土壤重金属的固化效果及其机理研究 [J]. 环境化学, 2021, 40(09): 2704-2714.
- [9] 陈晨, 温欣, 宋泽华, 等. 磁性生物炭复合材料修复重金属污染土壤机理及室内试验研究 [J]. 工业技术与职业教育, 2021, 19(02): 11-14.
- [10] 陈鸿鹄. 羟基磷灰石-硅酸钙复合材料与生物炭联合修复重金属污染土壤的研究 [D]. 湖南大学, 2020.