

# 固体废弃物在修复重金属污染土壤中的研究进展

闫沛鑫, 唐玉兰, 张萧汉

沈阳建筑大学市政与环境工程学院, 辽宁 沈阳

收稿日期: 2026年3月4日; 录用日期: 2026年3月23日; 发布日期: 2026年3月30日

## 摘要

采矿、冶炼等工业活动引发的土壤重金属污染具有持久性和生物累积性, 已成为土壤环境风险的重要来源。以工农业固体废弃物制备修复材料, 兼具资源化利用与成本优势, 符合“以废治废”的绿色理念。本文系统综述了适用于土壤修复的工业与农业固体废弃物的主要类型及其理化特性; 深入剖析了固废材料通过物理化学吸附、离子交换、表面络合、化学沉淀以及微生物介导等途径固定靶向重金属的作用机制。针对原始固废直接施用存在的修复效率受限及二次污染风险, 探讨了当前固废深度改性的前沿进展, 以及固废材料与电动、化学淋洗和植物、微生物等多技术联合协同修复的最新成效。并对固体废弃物修复重金属污染土壤的稳定性、环境安全性进行概述。

## 关键词

固体废弃物, 重金属污染土壤, 土壤环境, 废弃物资源化

# Research Progress in the Application of Solid Waste for the Remediation of Heavy Metal-Contaminated Soils

Peixin Yan, Yulan Tang, Xiaohan Zhang

School of Municipal and Environmental Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang Liaoning

Received: March 4, 2026; accepted: March 23, 2026; published: March 30, 2026

## Abstract

Soil heavy metal contamination induced by industrial activities such as mining and smelting is characterized by persistence and bioaccumulation, constituting a significant source of soil environmental

risk. Producing remediation materials from industrial and agricultural solid wastes offers both resource utilization and cost advantages, aligning with the green concept of “treating waste with waste”. This paper systematically reviews the major types and physicochemical properties of industrial and agricultural solid wastes suitable for soil remediation. It provides an in-depth analysis of the mechanisms by which solid waste materials immobilize target heavy metals through physicochemical adsorption, ion exchange, surface complexation, chemical precipitation, and microbially mediated pathways. Addressing the limitations in remediation efficiency and the risk of secondary pollution associated with the direct application of raw solid wastes, this study discusses recent advances in the deep modification of solid wastes, as well as the latest achievements in synergistic remediation combining solid waste materials with electrokinetics, chemical leaching, phytoremediation, and microbial technologies. Furthermore, it summarizes the stability and environmental safety of using solid wastes for remediating heavy metal-contaminated soils.

## Keywords

Solid Waste, Heavy Metal-Contaminated Soils, Soil Environment, Waste Resource Utilization

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

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



Open Access

## 1. 引言

随着城市化快速推进,采矿、冶炼、机械制造及金属加工等工业活动造成大量重金属离子污染土壤,造成土壤重金属污染问题日趋严峻[1]。这些重金属在环境中难以降解,以多种形态共存并难以去除。通过食物链逐级富集,对人体健康构成严重威胁[2]。不同种类重金属形态与生物有效性差异显著。随着污染加重,重金属还可能渗入至地下水,引发更广泛的环境风险[3]。

同时工农业生产活动带来大量固体废弃物,这些废弃物易通过风沙扬尘、雨水淋溶等方式导致土壤重金属迁移,引发次生环境污染与土壤生态破坏[4]。粉煤灰、炉渣等工业固废具备孔隙度高,富含表面活性官能团、碱性物质、活性矿物组分等理化特征[5][6]。农业废弃物经腐殖化或热解处理后,能够形成富含有机质或多孔结构的功能材料。这些特征使其具备吸附、离子交换和改善土壤结构等多种功能,为其在重金属污染土壤修复中的应用提供了理论基础。

基于上述背景,本文旨在系统梳理工农业固体废弃物在重金属污染土壤修复领域的研究现状与前沿进展。归纳适用于土壤修复的主要工业与农业固体废弃物类型及其关键理化性质,以及探讨了固废材料通过物理化学吸附、离子交换、表面络合、化学沉淀以及微生物介导与氧化还原等途径固定重金属的内在作用机制,并概述对固废深度改性技术以及固废与其他修复方法协同联用的研究进展。以期为实现重金属污染土壤的安全、高效治理以及固体废弃物的高值资源化利用提供科学的理论参考与创新思路。

## 2. 不同类型固体废弃物用于重金属污染土壤修复的性质、机制与应用

为更清晰地比较不同固废材料在土壤修复中的性能差异,本文整理了各类材料的理化性质、主导机制及应用特征,见表1。

### 2.1. 工业固废:理化性质、核心机制及应用

工业固体废弃物是指在工业生产活动中产生的固态或半固态废弃物。工业固体废弃物类型包括粉煤灰、炉渣与污泥等[7]。目前,大量的工业固废仍以露天堆放为主,造成次生污染风险。如油页岩残渣

在长期堆积过程中，其含有的金属离子随着渗透液等方式向周边土壤及地下水迁移[8]；而大量的粉煤灰露天堆积则容易引发严重的扬尘污染及组分淋溶[9]。

**Table 1.** Properties, dominant mechanisms, advantages, and risk comparison of different types of solid waste in the remediation of heavy metal contaminated soil

**表 1.** 不同类型固体废弃物在重金属污染土壤修复中的性质、主导机制、优势与风险对比

类型	材料	理化性质	修复机制	优势	局限性	潜在风险
工业固废	粉煤灰、钢渣、赤泥、炉渣	碱性强，比表面积较大，富含 Ca、Mg、Fe、Al、Si 等矿物组分	提高土壤 pH，促进重金属形成沉淀；同时通过吸附等固定重金属	来源广、成本低、对 Cd、Pb、Cu 等钝化见效快	材料组分波动大，长期稳定性受环境影响较大	可能伴生 As、Cr、Pb 等有害元素；过量施用易导致土壤过碱化或盐分累积
农业固废	秸秆生物炭、稻壳炭、花生壳炭、木屑炭	孔隙结构发达，比表面积大，富含表面官能团	物理吸附、表面络合、离子交换、静电吸附，	兼具重金属固定和土壤改良双重作用，提升保水保肥能力	性能受原料和热解温度影响大	若制备不当，可能含有多环芳烃等副产物；
畜牧业固废	堆肥产物、腐熟畜禽粪肥、腐殖质材料	富含稳定有机质、腐殖酸及 N、P、K 等养分，具有较强络合能力	腐殖质与重金属络合、吸附和还原；促进团聚体形成，降低重金属迁移性	可改善土壤肥力，促进土壤结构恢复，适合生态修复	腐熟程度和品质差异大	若未充分腐熟，可能携带病原菌或释放可溶性有机物
矿物固废	煤矸石、尾矿、建筑废弃物、矿物残渣	硅铝矿物含量高，结构较稳定，有吸附位点，但活性通常较低	表面吸附、矿物包裹、晶格固定、物理稳定化	来源丰富，结构稳定	单独使用时反应活性较低，需改性后应用	可能存在浸出毒性或伴生重金属释放风险

工业固废在修复重金属污染土壤中表现特殊的理化性质。如粉煤灰具有比表面积大、孔隙度高等功能优势。可为重金属吸附和界面反应提供丰富活性位点；其含有的碱性物质能够提高土壤 pH 值，促使重金属离子形成金属盐沉淀，实现化学钝化，从而降低土壤重金属的生物有效性与迁移能力[10] [11]。

粉煤灰、钢渣和赤泥等已被广泛研究用于重金属污染土壤稳定化修复。周勇威[12]在 Pb、Cd 和 Cu 污染土壤中添加改性粉煤灰活化材料后发现，该材料中的碱性物质可显著提高土壤 pH，并通过吸附等作用使 Pb、Cd 和 Cu 的有效态含量分别下降 42%、48%和 57% [13]。

但碱性工业固废来源复杂、成分波动大，导致其修复效果和安全性存在不确定性；某些工业固废本身可能伴生重金属等污染物，存在二次污染风险[14]。因此，工业固废在土壤修复中应强化材料筛选、预处理和风险控制。

## 2.2. 农业固废：理化性质、核心机制及应用

农业固体废弃物主要包括在种植业、畜禽养殖及农产品初加工过程中产生的各类残余物质[15]。与工业固废相比，农业固废通常富含有机质以及 N、P、K 等营养元素，具有良好的生物可利用性和土壤改良潜力。农业固体废弃物的资源化利用在重金属污染修复中主要依仗腐殖化与热解炭化两条途径[15]。

腐殖化能将新鲜的有机废弃物转化为较稳定的腐殖质，不仅能促进土壤团聚体形成，还能通过广泛的吸附、络合和还原作用，显著降低游离重金属的迁移率与生物有效性[16]。高温热解炭化能将果壳、林木等硬质木质化生物质资源转化为高孔隙度、高比表面积、表面含氧官能团丰富的多孔生物炭。生物炭

表面羧基、羟基和酚羟基等官能团可与金属离子发生络合，其多孔结构也有利于重金属在孔隙和表面活性位点上的吸附固定[17][18]。

生物炭是当前农业固废资源化修复中研究最活跃的一类材料。姜萌萌等[19]研究发现，向重金属污染土壤中添加3%生物炭后，Pb和Ni有效性分别降低62%和71%，表明其在降低重金属生物有效性方面具有显著作用。高瑞丽等[11]也证实，秸秆生物炭能够促进Cd和Pb由活性形态向较稳定形态转化。除污染控制外，碳基农业固废还可改善土壤有机质水平、增强保水保肥能力，并通过缓解重金属胁迫促进植物和微生物恢复，因此在农田修复中具有独特优势。

应当注意的是未经无害化处理的新鲜农业废弃物，不仅可能携带病原菌并引发土壤缺氧，其释放的大量可溶性有机分子甚至还可能与重金属结合形成水溶性络合物，反而提升了重金属向下淋溶的环境风险[4]。此外，生物炭性能受原料种类、热解温度和改性工艺影响较大，其修复效果存在明显差异；部分高温热解材料还可能伴随多环芳烃等副产物风险。因此，碳基农业固废的应用需强调标准化制备和全过程安全评价。

### 2.3. 本章小结

本章比较了工业固废与农业固废在重金属污染土壤修复中的作用。工业固废以碱性强、矿物活性高为特点，主要通过提高土壤pH和促进沉淀实现重金属钝化；在农业固废中，生物炭因有机质和表面官能团丰富，在重金属吸附固定和土壤改良方面更具优势。但两类材料均存在成分波动、修复效果不稳定及潜在二次污染风险等风险，需结合不同污染类型和土壤性质合理选择。

## 3. 固体废弃物修复重金属污染土壤的技术强化与协同应用

### 3.1. 固体废弃物的改性

原始的工业或农业固体废弃物虽然能在重金属污染土壤修复中展现出了部分修复能力，但其存在修复效率受限、重金属易重新溶入土壤以及自身可能残存微量毒性等问题，直接施用往往受到许多限制。因此，对固废材料进行深度改性已成为提升修复性能的重要方向。当前常见改性方法包括酸碱改性、热处理改性、矿物负载改性以及金属氧化物负载改性等。

对于农业固废，改性主要目标在于增大比表面积、丰富官能团种类、提高表面活性和增强对特定金属的选择性固定能力。季晓莲等[20]以玉米秸秆制备生物炭，并采用壳聚糖进行改性，结果显示改性后生物炭孔径增大、pH和电导率明显升高，且对Pb、Cd的吸附和钝化效果显著提升。罗莹莹等[21]利用草酸改性花生壳生物炭，发现其孔隙结构和含氧官能团均得到增强，从而提高了对Cr污染土壤的修复能力。魏华[22]制备的镁改性生物炭表面成功负载MgO晶体，施入污染土壤后可使有效态Pb显著降低，并促进Pb向残渣态转化。

改性重点在降低原始材料的环境风险与提升活性位点数量。例如，粉煤灰、钢渣、赤泥等材料具有较强的碱性和吸附能力，但可能因碱度过强或微量污染物浸出而影响土壤生态环境。多组分协同改性是解决该问题的重要途径。Fang等[23]通过将固体废弃物与高岭土、FeSO<sub>4</sub>进行研磨和共热解处理，构建出复合修复材料，显著降低了As、Cd、Cu、Pb和Zn的生物有效性，并促进其向铁砷酸盐、硫酸盐和氢氧化物等稳定形态转化，显示出较好的综合修复性能。

总体来看，改性技术可以在一定程度上弥补原始固废材料性能上的不足，使其在重金属吸附、络合和稳定化方面表现更好。不过，改性过程往往也会增加制备步骤、药剂投入和成本。今后的研究除了继续提升材料性能外，还应重视制备工艺的绿色化和规模化应用的可行性。

### 3.2. 固废材料与其他技术的协同修复

在重金属污染土壤治理中,单一修复技术通常很难同时满足效率、稳定性和适用范围等多方面要求。固废材料虽然在重金属钝化方面具有一定优势,但单独使用时,对高浓度污染或复杂污染情形的处理能力仍然有限。其他修复方法也各有不足,例如电动修复可能导致局部酸碱失衡和土壤板结[24];化学淋洗可能引起养分流失和淋洗液处置问题[25];植物和微生物修复则容易受到高浓度重金属毒性的影响,修复周期也相对较长[26]。因此,将固废材料与其他修复方法结合起来,逐渐成为该领域的重要研究方向。

#### 3.2.1. 固废协同电动修复

电动修复主要依靠外加电场促进土壤中离子迁移,较适用于低渗透性土壤中重金属的处理。不过,该技术在运行过程中容易形成明显的酸碱梯度,影响土壤环境稳定性。高等人,利用铁锰改性生物炭作为电极,对比传统电动修复,使用该电极的电流密度显著提高(初始电流增加 40%),且 pH 梯度更平缓,有效缓解了聚焦效应。修复 108 h 后, Cr 平均去除率达 58.69%,总铬去除率为 34.8%,而传统修复方法分别为 42.1%和 26.5% [27]。这种协同方式兼顾了电场迁移和材料固定两方面作用,在黏性土壤或局部高污染区域中具有一定应用价值。

#### 3.2.2. 固废协同化学淋洗

化学淋洗能够较快地将土壤中的重金属从固相转移到液相,因此在高污染土壤处理中具有一定优势。但淋洗过程也可能破坏土壤结构,并造成养分流失或二次污染。李鸿博将生物炭加入受镉污染稻田中,相较于单独化学淋洗,使土壤有效态 Cd 再降 60.4%,糙米中 Cd 降至 0.12/0.04mg·kg<sup>-1</sup>,并增产 9.1%~11.8% [28]。

#### 3.2.3. 固废协同植物修复

植物修复具有成本较低、对土壤扰动小和生态友好等优点,适合用于大面积轻中度污染土壤治理。但在重金属含量较高的条件下,植物往往会受到明显毒害,进而影响生长和修复效果。姜萌萌等人利用生物炭强化黑麦草的吸附能力,结果表明,在低污泥比例情况下,生物炭对 Pb、Ni、Cu 这 3 种重金属的钝化作用明显,对黑麦草生长促进效果显著,生物炭和污泥同时施用可提高黑麦草对 Zn 的富集能力[19]。因此,固废与植物修复联用,不仅有利于控制重金属风险,也有助于植被恢复和土壤生态功能改善,在农田修复中具有较强的应用潜力。

#### 3.2.4. 固废协同微生物修复

微生物修复主要依赖微生物的氧化还原、生物矿化和络合作用来降低重金属活性,但其修复效果容易受到外界环境影响。多孔固废材料可为微生物提供附着位点和相对稳定的生存环境,同时还能提供一定的矿物元素和缓冲条件,从而增强微生物在重金属胁迫下的活性和稳定性[29]。例如,钙基生物炭、油页岩残渣等材料可为矿化菌提供有利条件,促进 Cd、Pb 等重金属形成稳定矿物相[30]。总体来看,固废与微生物协同修复的关键在于发挥材料和微生物各自的优势,但其长期效果仍有待进一步研究。

### 3.3. 本章小结

本章概述了固废材料的改性及协同修复研究进展。酸碱处理、热处理和负载改性等方法可提高材料活性位点和重金属稳定化能力;与电动修复、化学淋洗、植物修复和微生物修复联用,则有助于弥补单一技术的不足。总体来看,固废修复正由单一施用转向改性强化和多技术协同,但实际应用仍需兼顾成本、环境安全和长期稳定性。

## 4. 固废修复技术的环境安全与长期有效性

### 4.1. 固废材料中伴生污染物的环境风险评估

固体废弃物成分复杂,部分材料在资源化利用过程中可能带入新的污染风险。工业固废如粉煤灰、赤泥、冶炼渣和煤矸石等,常含有 As、Cr、Pb、Cd、Hg 等潜在有害元素,部分还可能含有可溶盐、氟化物等成分[8][9][14]。如果未经筛查直接用于土壤修复,可能引发二次污染。

因此,在固废材料施用前,应开展固废的总量分析、浸出毒性试验和风险筛查,获取其伴生污染物含量及在土壤中的迁移性。同时,应控制原料施用量,必要时对材料进行预处理,以降低环境风险。

### 4.2. 修复后重金属的长期稳定性及影响因素

固废材料对重金属的修复作用主要依赖吸附、沉淀、络合、离子交换和共沉淀等过程。在恶劣环境下,如酸雨、淹水等环境下都可能导致已固定的重金属再次活化[4][31]。因此,仅依据短期试验结果判断修复效果并不能完全说明。未来应结合老化实验、不同时间段提取、矿物相分析以及长期盆栽和田间试验,系统评估重金属在不同环境条件下的稳定性和再释放风险。

### 4.3. 修复后土壤生态功能恢复与生态毒理学评价

重金属污染土壤修复的目的,不只是降低重金属有效性,还应恢复土壤生态功能和利用价值。固废材料进入土壤后,会影响土壤结构、养分循环、微生物群落和酶活性等多个方面[29][32][33]。因此,修复效果评价不能只看重金属含量以及重金属形态变化。

在评价时,还应综合考虑土壤理化性质、植物生长以及农产品安全等指标,如土壤氮、磷、钾含量以及植物生物量变化等。对于农田土壤,尤其需要关注作物对重金属的吸收积累情况。同时,应加强生态毒理学评价,避免出现污染物指标下降但生态风险仍然存在的情况。

### 4.4. 固废资源化利用的生命周期评价(LCA)

固废用于重金属污染土壤修复虽然具有资源化利用优势,但材料在改性和施用过程中也可能带来能耗、碳排放和其他环境负荷[34]。特别是高温改性和化学负载等工艺,带来极大的消耗以及化学品废液。

因此,有必要将 LCA 引入使用固废修复土壤重金属的研究中,对不同修复路线的资源消耗、综合环境效益进行比较[35]。这有助于筛选更加绿色、可持续的修复方案,并为工程应用提供参考。

### 4.5. 本章小结

本章从环境安全和长期有效性两方面分析了固废修复技术的关键问题。虽然固废材料具有较大应用潜力,但伴生污染物风险、重金属再活化以及土壤生态恢复效果仍需重点关注。今后应加强原料筛查、长期试验、生态评价和生命周期分析,以提升固废修复技术的安全性和可持续性。

## 5. 结论

固体废弃物在重金属污染土壤修复中具有较好的应用前景。工业固废适合通过调节 pH 和促进矿物沉淀实现重金属快速钝化,农业固废则在吸附固定重金属和改善土壤性质方面表现突出。通过材料改性及与植物、微生物、电动修复、化学淋洗等技术协同,可进一步提升对土壤重金属的修复效果。

但目前该领域仍面临材料来源复杂、伴生污染物风险、长期稳定性不足和生态安全评价不完善等问题。未来应加强材料标准化、安全筛查、长期田间验证及绿色评价,推动固废修复技术向安全、稳定和规模化应用发展。

## 致 谢

在论文完成之际,我怀着真诚而感恩的心,向在学习和研究过程中给予我帮助的老师 and 师兄致以衷心感谢。首先,特别感谢唐玉兰老师在论文选题、研究开展和写作修改过程中给予我的悉心指导与耐心帮助。唐老师严谨认真的治学态度和温和细致的关怀,让我受益良多。其次,感谢张萧汉师兄和盛泽生师兄在科研学习和论文撰写过程中给予我的鼓励、支持与帮助。两位师兄耐心解答我的疑问,并提出了许多宝贵建议。谨以此文,向你们表达我最诚挚的谢意。

## 基金项目

国家重点研发计划项目(2018YFC1801203)。

## 参考文献

- [1] 袁俊山, 崔景辉, 申亮. 土壤修复剂在重金属污染土壤中的应用研究[J]. 辽宁化工, 2019, 48(2): 134-136.
- [2] 任宇, 曹文庚, 肖舜禹. 重金属在土壤中的分布、危害与治理技术研究进展[J]. 中国地质, 2024, 51(1): 118-142.
- [3] 汪媛媛, 廖启林, 李文博. 江苏典型农田土壤重金属形态分布初步研究[J]. 土壤, 2024, 56(6): 1326-1338.
- [4] Temminghoff, E.J.M., Van der Zee, S.E.A.T.M. and de Haan, F.A.M. (1997) Copper Mobility in a Copper-Contaminated Sandy Soil as Affected by Ph and Solid and Dissolved Organic Matter. *Environmental Science & Technology*, **31**, 1109-1115. <https://doi.org/10.1021/es9606236>
- [5] 袁帅, 赵立欣, 孟海波. 生物炭主要类型、理化性质及其研究展望[J]. 植物营养与肥料学报, 2016, 22(5): 1402-1417.
- [6] 雷瑞, 付东升, 李国法. 粉煤灰综合利用研究进展[J]. 洁净煤技术, 2013, 19(3): 106-109.
- [7] 朱磊, 吴红艳. 工业固体废弃物利用与处置方案分析及规范化建议[J]. 冶金标准化与质量, 2025, 63(5): 16-20, 31.
- [8] 王淑娟, 雒锋. 油页岩半焦堆放对周围环境的影响[J]. 黑龙江科学, 2023, 14(4): 57-59.
- [9] 芮玥纪, 王兴明, 陈继旺. 粉煤灰堆放对周边环境危害的研究进展[J]. 农业与技术, 2024, 44(3): 98-101.
- [10] 吴求刚, 余文理, 赵恒. 改性粉煤灰对 Cu、Cd 和 Pb 的吸附效果研究[J]. 环境科学与技术, 2025, 48(8): 39-48.
- [11] 高瑞丽, 朱俊, 汤帆. 水稻秸秆生物炭对镉、铅复合污染土壤中重金属形态转化的短期影响[J]. 环境科学学报, 2016, 36(1): 251-256.
- [12] 周勇威. 改性粉煤灰土壤调理剂对重金属污染土壤的改良[D]: [硕士学位论文]. 南昌: 南昌大学, 2025.
- [13] 吴丽梅, 马俊亮, 唐宁. 钢渣微粉对重金属污染土壤的改良效果研究[J]. 山东化工, 2024, 53(20): 243-247.
- [14] Cai, Y., Jiang, J., Zhao, X., Zhou, D. and Gu, X. (2024) How Fe-Bearing Materials Affect Soil Arsenic Bioavailability to Rice: A Meta-Analysis. *Science of the Total Environment*, **912**, Article ID: 169378. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.169378>
- [15] 马骁轩, 蔡红珍, 付鹏. 中国农业固体废弃物秸秆的资源化处置途径分析[J]. 生态环境学报, 2016, 25(1): 168-174.
- [16] 吴浩玮, 孙小淇, 梁博文. 我国畜禽粪便污染现状及处理与资源化利用分析[J]. 农业环境科学学报, 2020, 39(6): 1168-1176.
- [17] 孙晨. 改性生物炭对于水中重金属与有机污染物去除的性能与机理[D]: [博士学位论文]. 杭州: 浙江大学, 2021.
- [18] 黄卫, 庄荣浩, 刘辉. 农田土壤镉污染现状与治理方法研究进展[J]. 湖南师范大学自然科学学报, 2022, 45(1): 49-56.
- [19] 姜萌萌, 钟崇巍, 胡蝶. 生物炭-污泥协同黑麦草修复煤基固废堆场表层土壤及重金属污染风险评价[J]. 环境工程学报, 2025, 19(6): 1455-1463.
- [20] 季晓莲, 李松. 固体废弃物材料的改性及对重金属修复实验[J]. 化学工程师, 2024, 38(9): 5-8, 94.
- [21] 罗莹莹, 华碧成, 吴钦鸿. 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.
- [22] 魏华. 镁改性生物炭回收厌氧消化上清液氮磷及修复铅污染土壤研究[D]: [硕士学位论文]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2025.
- [23] Fang, J., Yang, H., Sun, Q. and Zhao, T. (2024) Evaluation of the Remediation Effect of Solid Waste Synergistic

- Materials on Heavy Metal-Contaminated Soil. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, **12**, Article ID: 114140. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2024.114140>
- [24] 黄金鹏, 韦行, 孙梦强. 重金属污染土壤电动修复技术研究进展及展望[J]. 土壤, 2024, 56(6): 1173-1183.
- [25] 水新芳, 赵元艺, 王强. 矿山重金属污染土壤修复技术进展及展望[J]. 地质论评, 2021, 67(3): 752-766.
- [26] 侯亮辉, 郝志鹏, 陈保冬. 我国煤矿区重金属污染土壤的生物修复技术研究及应用前景[J]. 中国煤炭, 2025, 51(11): 55-69.
- [27] 高晓宇. 铁锰改性生物炭强化三维电动修复铬污染的土壤[D]: [硕士学位论文]. 北京: 北京建筑大学, 2025.
- [28] 李鸿博. 化学淋洗联合生物炭协同修复镉污染稻田土壤的效能与机制研究[D]: [博士学位论文]. 武汉: 华中科技大学, 2022.
- [29] 邱若琪, 赵欣鑫, 刘惠. 微生物-生物炭协同修复土壤重金属复合污染相互作用机制与应用进展[J/OL]. 应用化工: 1-10. <https://doi.org/10.16581/j.cnki.issn1671-3206.20260114.003>, 2026-01-15.
- [30] Zhang, L., Wang, W., Yue, C. and Si, Y. (2024) Biogenic Calcium Improved Cd<sup>2+</sup> and Pb<sup>2+</sup> Immobilization in Soil Using the Ureolytic Bacteria *Bacillus pasteurii*. *Science of The Total Environment*, **921**, Article ID: 171060. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.171060>
- [31] 徐子博. 生物炭促进土壤六价铬还原稳定化的电子传递机制研究[D]: [硕士学位论文]. 上海: 上海交通大学, 2020.
- [32] 李瑤, 王雅璇, 罗廷. 利用生物炭负载微生物修复石油烃-镉复合污染土壤[J]. 环境工程学报, 2021, 15(2): 677-687.
- [33] 牛磊, 郑春丽. 生物炭协同微生物矿化技术修复复合重金属污染农田土壤[J]. 有色金属工程, 2023, 13(11): 141-155.
- [34] Yang, H., Tian, H., Xing, T., Yan, M., Wen, C., Sun, Y., *et al.* (2025) Life Cycle Assessment and Cost Analysis of Typical Remediation Technologies for Cadmium-Contaminated Soil. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, **13**, Article ID: 118765. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2025.118765>