

Advances in heavy metal contaminated soil remediation technologies and case studies

Zhiqiang Gu

Huludao Ecological Environment Monitoring Center Station Dongdaihe New District Branch Station, Huludao, Liaoning, 125000, China

Abstract

Heavy metal contaminated soil has become a critical challenge in current ecological and environmental management. The pollution sources are complex, the pollutants migrate easily, and their toxicity persists for long periods, posing serious threats to agricultural production and human health. To address this issue, soil remediation technologies have advanced in recent years, encompassing physical, chemical, and biological methods, gradually forming a diversified and integrated technical system. Physical remediation focuses on isolating and intercepting pollutants and in-situ treatment, chemical remediation emphasizes reaction conversion and stabilization, while biological remediation aims at ecological reconstruction and pollution degradation. Different remediation approaches exhibit diverse trends in practical applications due to differences in pollution characteristics, regional conditions, and costs. By comprehensively analyzing the technical selection, implementation process, and effectiveness evaluation of typical remediation cases, we can provide theoretical support and practical references for the efficient remediation of heavy metal contaminated soil in the future, promoting the scientific and standardized development of remediation projects.

Keywords

heavy metal pollution; soil remediation; physical technology; chemical method; bioremediation

重金属污染土壤修复技术进展与案例分析

谷志强

葫芦岛市生态环境监测中心站东戴河新区分站, 中国·辽宁 葫芦岛 125000

摘要

重金属污染土壤已成为当前生态环境治理中的重点难题, 其污染源复杂、迁移性强、毒性长期滞留, 对农业生产和人体健康构成严重威胁。针对这一问题, 近年来土壤修复技术不断发展, 涵盖物理、化学和生物多种手段, 并逐步形成以多元集成为导向的技术体系。物理修复强调污染物的迁移隔断与原位处理, 化学修复注重反应转化与稳定固持, 生物修复则兼顾生态重建与污染降解功能。不同修复路径在实际应用中因污染特征、区域条件及成本差异而呈现出多样化趋势。通过对典型修复案例的技术选型、实施过程与效果评价的综合分析, 可为今后重金属污染土壤的高效修复提供理论支撑与实践参考, 推动修复工程的科学化与规范化发展。

关键词

重金属污染; 土壤修复; 物理技术; 化学方法; 生物修复

1 引言

土壤作为农业生态系统的重要组成部分, 其环境质量直接关系到食品安全与生态健康。然而, 随着工业化进程的加快和城镇扩张, 重金属污染问题日益严重, 成为制约土地可持续利用的突出障碍。重金属具有不可降解性, 易在土壤中富集并通过食物链向人体转移, 造成潜在的健康风险。不同于一般有机污染物, 重金属污染的治理需要长期稳定的处理手段与多元化技术支撑。在此背景下, 土壤修复技术作为控制和削减重金属污染的重要工具, 已引起广泛关注。本文

将从当前主流修复路径出发, 系统梳理物理、化学、生物等多种技术的原理与应用进展, 并结合典型案例, 分析其在工程实践中的效果与可行性, 旨在为重金属污染土壤修复工作的科学决策提供理论依据。

2 重金属污染土壤的成因与危害

2.1 典型重金属污染物种类与来源分析

土壤中常见的重金属污染物包括铅、镉、汞、砷、铬、铜和锌等, 这些元素大多来源于工业废弃物排放、矿产资源开采、冶炼加工、农业施肥及交通运输等人类活动。金属冶炼过程中排放的粉尘与废渣、电子废弃物拆解过程中产生的残留金属、含重金属农药及污水灌溉等均可导致土壤中金属元素富集。部分区域还存在自然背景值偏高现象, 但其影响

【作者简介】谷志强(1974-), 男, 中国辽宁葫芦岛人, 本科, 高级工程师, 从事环境监测、污染治理研究。

远低于人为污染。随着城市扩张和工业布局下沉,工业企业周边成为重金属污染的高发区,农业土壤中重金属残留超标问题频发,污染物在土壤中累积并形成污染源,对环境安全与资源利用构成挑战。

2.2 重金属在土壤中的迁移转化机制

重金属进入土壤后并不以单一形态存在,而是受土壤pH值、有机质含量、氧化还原条件、水分状况等因素影响而发生络合、沉淀、吸附、解吸等物理化学过程,最终形成可交换态、碳酸盐结合态、铁锰氧化物结合态、有机质结合态和残渣态等多种形态。形态的不同直接影响其在土壤中的活性和迁移能力。某些重金属在水溶性状态下易被植物吸收或随地表径流迁移至地下水系统,部分在还原条件下易被还原为毒性更强的形态,导致环境风险升高。重金属在垂直方向上的迁移速度较慢,但长期累积会造成深层土壤甚至地下水污染,增强了治理难度。

3 物理修复技术的原理与应用进展

3.1 土壤置换与客土技术

土壤置换是通过挖除受污染的土壤并用清洁土壤进行回填,从而降低重金属浓度和污染强度的修复方式,适用于污染深度较浅、污染范围明确的地块。该技术能在短时间内实现污染剥离,具有处理效果直观、修复周期短的优点。客土技术则是在原地土壤表层覆盖或掺混外源清洁土壤,以稀释污染浓度并改善土壤结构和理化性质,从而降低重金属的生物有效性。二者操作简便但成本较高,需处理挖除土壤的后续转运与填埋问题,并易破坏原有生态结构,对修复区的再利用规划提出更高要求。

3.2 土壤固化/稳定化处理

固化/稳定化处理技术通过添加特定修复材料,与土壤中的重金属发生物理包裹或化学反应,生成难溶于水的沉淀或复合物,降低其迁移性和生物可利用性。常用的固化剂包括水泥、石灰、磷酸盐、粘土矿物等,通过与重金属形成吸附、沉淀或复合络合物使其固定于土壤中。该技术操作性强,适应性广,尤其适用于工程场地修复和建筑用地治理,但无法彻底去除污染,存在长期稳定性问题,需结合后续监管与长期监测机制保障修复效果。随着新型稳定化材料的研究发展,其处理效率和环境兼容性不断提升。

4 化学修复技术的发展动态

4.1 药剂淋洗与钝化处理

药剂淋洗通过向污染土壤中注入螯合剂、酸类或表面活性剂,促使重金属从固相中释放转入液相,再通过液体收集系统实现污染物的迁移和去除。常用药剂有EDTA、柠檬酸等有机螯合剂以及氯化钠、硝酸等无机药剂,处理效率高但存在对土壤结构和微生物的影响风险。钝化处理则是添加改良剂与重金属发生稳定化反应,降低其生物有效性,常用钝化剂包括生物炭、赤泥、粉煤灰、石灰等。两类方法在工

程中多结合使用,通过调控pH、离子强度等提高反应效率,具有较好的实用性与推广潜力。

4.2 纳米材料在重金属去除中的应用

纳米材料因其比表面积大、反应活性强和界面效应显著,已成为重金属修复领域的研究热点。纳米氧化铁、纳米零价铁、纳米羟基磷灰石等具有良好的吸附和还原能力,能有效捕获和沉淀重金属离子,形成稳定形态。其应用方式包括直接掺混、浆液注入或复合载体投加,能在较短时间内降低污染浓度,并对微环境改良有一定作用。然而纳米材料可能对土壤生态系统带来潜在风险,存在迁移性强、生物毒性和不可降解等问题,因此在实际应用中需结合场地条件、材料剂量和环境风险评估合理使用。

4.3 化学氧化还原技术研究进展

化学氧化还原技术通过向污染土壤中添加氧化剂或还原剂,使重金属转化为低毒性、低迁移性或难溶形态。氧化剂如高锰酸钾、臭氧、过硫酸盐等常用于汞、砷等金属的氧化转化,还原剂如亚硫酸钠、零价铁等常用于铬、六价钒等还原沉淀。该方法操作简便,见效快,适合高浓度点源污染的应急处置。其效果受土壤pH、温度、水分及反应剂分布均匀性等因素影响显著,且存在副产物生成、处理残液排放等次生问题。为提升其稳定性与环境安全性,研究正朝向复合催化氧化还原体系与反应过程精准控制方向发展,图1为重金属污染土壤修复剂及其使用方法的流程图。

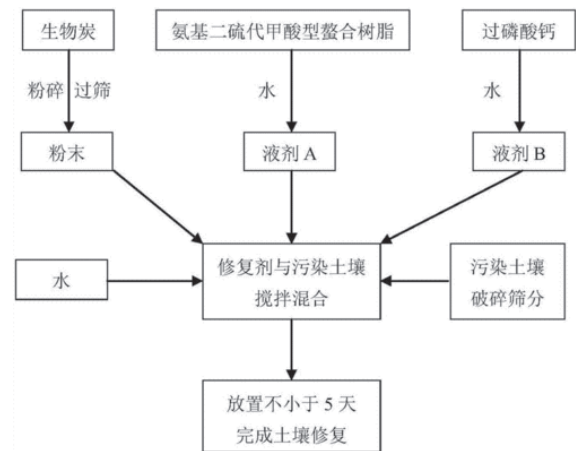


图1 重金属污染土壤修复剂及其使用方法的流程图

5 生物修复技术的创新路径

5.1 植物修复技术类型与适用条件

植物修复技术依靠特定植物对重金属的富集、稳定或转移能力,降低土壤中重金属的生物有效性,主要包括植物提取、植物稳定和植物阻隔等类型。超富集植物能在不影响生长的前提下积累大量重金属,是提取修复的核心资源。不同植物对重金属的吸收能力具有选择性,适用于铅、镉、铜、锌等中等迁移性的重金属污染场地。修复效果受土壤类型、气候条件和重金属种类影响显著,周期较长但成本较低,

对生态系统的扰动较小。通过施加螯合剂、微生物共生或调节土壤理化性状可提升植物修复效率，具备较强的生态重建功能。

5.2 微生物修复机制与工程菌应用

微生物修复技术利用土壤微生物对重金属的吸附、沉淀、转化与挥发能力，通过调控微生物群落结构实现污染控制。天然菌种在土壤中可形成生物膜或胞外聚合物，与金属离子结合生成稳定复合物。部分微生物具备氧化还原功能，能将高毒性金属转化为低毒或难迁移状态。工程菌的应用引入了基因改造技术，使微生物具备特定金属的高效处理能力，提升修复选择性和反应强度。微生物修复过程受 pH、水分、有机质等影响较大，需维持良好的生物活性环境。工程菌的释放与扩散控制是研究重点，其环境安全性和长期稳定性需通过严格评估与管控。

5.3 联合修复技术的集成模式

联合修复技术通过整合多种修复机制，实现对重金属污染土壤的协同治理，提升整体修复效率与生态兼容性。常见组合包括植物与微生物联用、化学稳定与生物恢复并行、物理隔离与生态修复相结合等模式。在植物修复中引入促生微生物可提高金属吸收率并增强植物耐性，结合钝化剂的使用能有效降低金属迁移性并促进植物根系生长。电动技术与微生物或药剂结合可增强污染物迁移与降解过程，提高深层污染处理能力。联合修复强调技术间的协同效应与系统集成，适用于污染复杂、分布不均或多金属共存的场地，是当前研究与工程应用的重点方向之一，图 2 为解磷微生物修复土壤重金属污染研究的流程。

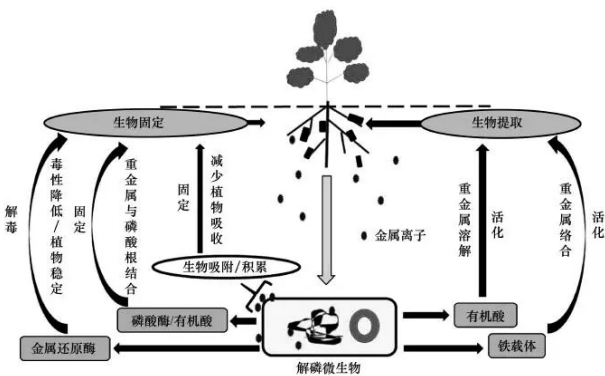


图 2 解磷微生物修复土壤重金属污染研究的流程

6 典型重金属污染场地修复案例分析

6.1 工业遗址类污染场地的修复工程实践

工业遗址通常因长期排放金属废渣、废液和粉尘而造成多种重金属复合污染，具有污染浓度高、空间分布复杂、历史信息缺失等特点。某退役冶炼厂地块在修复过程中采用固化/稳定化与表层封盖联合方式，先通过掺加磷酸盐与水泥固化土壤中高浓度铅和砷，再覆土并植被恢复以阻断污染物暴露途径。修复后经监测重金属生物有效性大幅下降，

土壤 pH 和有机质显著改善，实现土地的安全再利用。工程实践中注重与城市规划对接，控制施工扰动范围，结合在线监测系统保障施工过程安全，具有典型的代表意义和示范价值。

6.2 矿区废弃地重金属修复应用实例

矿区废弃地常因尾矿堆积、矿渣泄漏及采矿活动引起大面积土壤重金属富集，污染类型以铅、锌、镉、铜为主，表现为酸性强、植物难以生长、土壤结构破坏严重。某金属矿区采用生物炭钝化与植物联合修复策略，投加改良剂稳定土壤重金属活性，并种植虎杖、苎麻等耐污植物进行生态覆盖，在三年治理周期内实现土壤重金属有效态下降 40% 以上，植物生长率明显提升。修复过程以生态恢复为导向，结合水土保持工程减少污染扩散，形成了集土壤修复、植被恢复和景观建设于一体的复合治理体系，对同类污染区域治理具有现实指导意义。

6.3 城市污染地块治理中的技术集成案例

城市建设过程中遗留的老工业基地、拆迁地块和垃圾填埋场常含复杂重金属污染，其修复涉及生态、环境与土地利用的多重目标。一城市棚改项目地块在修复中采用了电动修复、原位钝化与地表客土联用方式，电极布设提升了重金属离子迁移效率，钝化剂抑制金属活性，客土提高地表生态承载力。全过程纳入环境影响评估与多轮土壤检测，实现污染物指标达标、安全转化与地块再开发。该案例突出技术耦合、分区治理与全过程监管，有效缓解土地资源紧张与环境风险压力，为城市更新背景下的污染土壤修复提供了可复制的工程模板与管理经验。

7 结语

重金属污染土壤修复是实现土地资源可持续利用与生态环境保护的重要途径。随着修复技术体系的不断丰富，物理、化学、生物及其联合技术在不同类型污染场地中的应用成效日益显著。各类技术在实践中表现出差异化优势与局限，需根据具体污染特征与场地条件科学选型。典型案例的成功经验为修复路径优化与技术集成提供了有益参考。推动修复工程向高效、绿色、低扰动方向发展，有赖于跨学科协同创新、政策支持与监管机制完善，构建符合区域特征的修复技术体系将成为未来治理工作的关键。

参考文献

- [1] 俞明,席杰君,徐鑫,王习羽,毕宁.某重金属复合污染地块修复工程及其效果评估研究[J].广州化工,2025,53(10):166-169+176.
- [2] 任姝昕.基于AHP的区域土壤修复技术方案研究[J].清洗世界,2025,41(05):71-73.
- [3] 徐志永,陈富宁,赵驱云,黄鹏,姚静林,胡伟.4种纤维作物在铅锌矿区土壤中的生长及其对重金属的富集效果[J].河南农业科学,2025,54(05):68-77.
- [4] 纪元.有机污染和重金属污染土壤修复工程应用实例[J].山西化工,2025,45(04):240-243.