

Research and application of remediation technology for heavy metal contaminated soil

Senhai Su

Zhonghuan (Guangdong) Environmental Technology Co., Ltd., Guangzhou, Guangdong, 510000, China

Abstract

Heavy metal pollution of soil, due to its long-term accumulation and the difficulty in remediation, has become a critical issue in global environmental governance. Heavy metal pollution can affect soil fertility and pose a threat to human health through the food chain. Research and application of heavy metal contaminated soil remediation technologies are essential. This article begins with an overview of heavy metal contaminated soil, then explores the principles, application status, and limitations of various remediation techniques, including physical, chemical, biological, and integrated methods. It also provides criteria for selecting remediation technologies, economic cost and benefit assessments, and environmental risk management measures, offering scientific basis and practical guidance for soil pollution remediation.

Keywords

heavy metals; soil pollution; remediation technology; applied research

重金属污染土壤修复技术研究与应用

苏森海

中环(广东)环境技术有限公司, 中国·广东广州 510000

摘要

重金属污染土壤由于其长期积累所产生的效应以及难以治理的特质,成为全球环境治理当中的一项关键议题。重金属污染会对土壤肥力造成影响,而且还会借助食物链传递对人体健康形成威胁,开展重金属污染土壤修复技术的研究以及应用有意义。本文从重金属污染土壤的概述开始,探讨了物理修复、化学修复、生物修复以及综合修复等多种技术的原理、应用状况以及存在的局限性,给出了修复技术的选择标准、经济成本与效益评估以及环境风险与管理措施等内容,为土壤污染修复给予科学依据以及实践指导。

关键词

重金属; 土壤污染; 修复技术; 应用研究

1 引言

重金属污染土壤成为全球性的环境治理方面的难题。本文对重金属污染土壤的相关情况进行了综述,其中囊括了重金属污染土壤的概述、修复技术研究以及应用策略等内容,同时还提及了污染土壤的环境行为以及生态效应。本文为重金属污染土壤修复技术的选择与应用给予科学的指导,推动土壤环境质量的改善。

2 重金属污染土壤的概述

2.1 重金属种类与土壤污染特征

在环境科学领域,重金属特指密度超过 4.5 克/立方厘米的金属元素,其中镉、铅、汞、铬和砷等元素因有较大环

境风险而备受关注。这类金属的污染机制呈现独特特征:其稳定化学性质决定其无法被微生物分解,仅能凭借形态转化或空间迁移改变存在状态,导致在土壤系统内形成长期累积效应,金属离子易与土壤有机质及黏土矿物产生配位作用,生成结构稳定的络合物,这种结合过程会较大改变土壤的物理化学特性,削弱土地生产力^[1]。此类污染有滞后显现特征,初期难以借助常规监测发现,当重金属经作物吸收后沿食物链逐级传递至人体时,已形成不可逆的生态威胁,加之治理周期漫长且技术复杂,使其成为全球性环境治理难题。

2.2 污染土壤的环境行为与生态效应

土壤中重金属的迁移转化过程呈现出多维度动态特征,其在污染介质中的动态变化过程涉及离子态与固相间的吸附与解吸交替变化、溶解与沉淀的形态转换、氧化还原状态的价态演变以及生物体内的蓄积效应等关键环节。调控重金属生物有效性的环境要素中,土壤酸碱度、氧化还原状态和有机质水平共同构成形态转化的核心驱动力体系,其中酸性

【作者简介】苏森海(1996-),男,中国广东普宁人,本科,助理工程师,从事土壤重金属污染研究。

环境会较大提升金属离子的溶出效率，而厌氧还原条件则会提高特定金属元素的生物毒性。从生态链视角分析，重金属污染会瓦解土壤微生物的群落平衡，使得微生物种群数量锐减及酶系统功能失活，更会对植物产生生长抑制效应，阻滞根系正常生长、扰乱叶绿体能量代谢，致使农作物产量下降，重金属沿食物链逐级放大的生物放大效应，在高等生物体内形成渐进性累积态势，诱发神经传导障碍、免疫应答异常等多系统功能紊乱，这种跨介质、跨物种的复合污染效应已构成区域生态安全和人群健康的关键风险源^[2]。

3 重金属污染土壤修复技术研究

3.1 物理修复技术

土壤物理修复技术主要依靠调控土壤的物理状态来实现重金属污染物的分离或固定化。典型技术手段包括土壤置换、土层更新及热解析三种形式，土壤置换借助掺入洁净基质降低污染物比例，而土层更新则采取污染土方整体移除后回填清洁土壤的策略，这两种方式虽能快速实现污染削减，但在工程实施中面临土方调配量大、经济成本较高及污染物扩散隐患等共性问题。热解析技术依靠热传导系统将土壤加热至特定温度区间，促使重金属元素发生相变后经气体收集装置捕集，虽然在处理小面积重度污染场地时呈现出周期短、见效快的优势，但其应用存在能耗强度大、土壤团粒结构受损以及高温工况下可能生成气态污染物等较大缺陷，需同步安装尾气净化装置以防范次生环境风险。

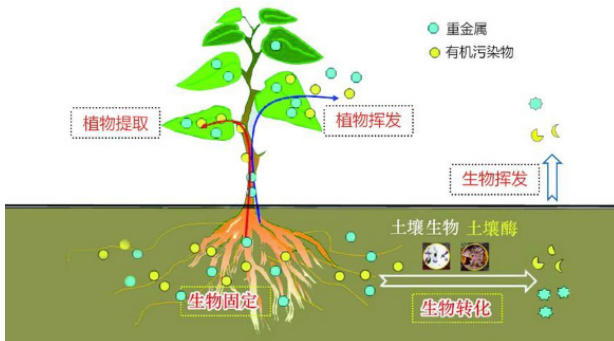


图1 土壤物理修复技术

3.2 化学修复技术

土壤重金属污染的化学治理手段主要基于试剂与污染物间的相互作用机制，凭借改变金属元素的赋存形态影响其环境行为。目前工程实践中主要采用淋溶法和钝化/固定化两类技术体系，淋溶法借助酸性溶液、碱性物质或螯合剂等化学介质，凭借溶解作用将土壤中的重金属污染物转移至液相，随后借助重金属回收系统实现资源化处理。该方法在实施过程中需对废液进行专门处置，且操作过程中存在淋洗剂渗漏风险，可能破坏土壤团粒结构影响耕作性能，钝化技术则凭借投加无机改良剂或有机改性材料，使重金属离子与改良组分形成难溶复合物，抑制其生物迁移能力，而固定化技

术依靠构建物理屏障将污染物包裹在稳定基质中。虽然该工艺操作简便且经济性较好，但本质上属于重金属形态转化技术，并未实现污染物彻底清除，其长效稳定性仍需持续观察。

3.3 生物修复技术

生物修复体系凭借植物、动物和微生物的协同作用，对土壤重金属污染实施生态化治理。在各类生物处理手段中，植物修复占据主导地位，其核心机制包括超积累植物如同天然净化器般大量吸收重金属并转运至茎叶部位，后续收割处理即可完成污染物转移，另有特殊植物能将重金属转化为挥发性物质释放至大气层。微生物群体则依靠氧化还原或络合反应改变重金属形态，实现毒性消减或促进矿化沉淀，动物修复主要依赖蚯蚓等土壤动物富集体内重金属的特性，借助生物体收集实现污染清除，该技术具有生态友好性和经济性优势，却面临修复周期漫长、环境因子敏感性强及高浓度污染区域治理效能不足等现实瓶颈，这些特性使其更适用于中低污染场地的长期生态恢复工程。

3.4 综合修复技术

复合型土壤修复体系借助集成多技术协同作用机制，针对污染物的空间异质性和生态毒性差异，建立分级治理路径。典型应用模式表现为物理-生物耦合修复策略，采用表层置换法快速削减重金属负荷后，引入耐性植物实施二次净化，另一常见模式为化学-生物联合技术，借助钝化剂原位固定活性态重金属，同步利用根际促生菌与超积累植物重塑微域环境^[3]。这种多维治理框架能突破单一手段的局限性，还可实现污染物清除效率与生态风险管控的平衡，但实施过程需兼顾技术协同性与管理精细化，特别需重视修复剂投放参数与生物群落演替规律的匹配度，在保障治理效果的同时控制二次污染风险。

4 重金属污染土壤修复技术应用策略

4.1 修复技术选择标准与决策流程

土壤修复技术的优选需要系统性地考虑科学合理性与经济可行性，结合污染物的赋存形态、超标幅度、治理目标及场地特征进行多维评估。首要评价指标在于治理效果，要保证技术手段可稳定实现重金属含量达标，技术适用性则需重点考察场地的土壤酸碱度、颗粒结构等理化特性与区域气候特征的适配度。技术实施过程是否产生二次污染、治理周期长短、经济投入成本以及社会认可度等因素都需要统筹考量，完整的决策体系包含三个递进阶段，初期凭借污染源解析与风险评估锁定关键污染物及其空间分布，中期阶段采用层次分析法对物理隔离、化学钝化、植物提取及联合修复等技术的效能进行量化比选，后期凭借构建污染地块实体模型开展实证研究，结合中试数据优化工艺参数。以镉污染场地为例，当污染浓度超过100mg/kg且面积小于5公顷时，热解析联合固化稳定化技术有较大优势，而针对广泛分布的轻度砷污染区域，种植蜈蚣草等超积累植物则能实现生态化

修复。

4.2 修复技术的适用性与局限性分析

各类土壤修复技术的应用场景与效能制约存在明显差异。在物理修复领域，客土置换与表层换土法虽能快速处理浅层小范围污染，但容易破坏原有土壤层理结构并引发二次污染扩散，热脱附技术虽能有效处理挥发性重金属污染物，但其运行需要消耗大量能源且经济成本较高，难以应用于大范围污染治理。化学修复手段中，淋洗工艺虽有较高重金属脱除率，却潜在地下水污染风险并导致土壤养分流失，稳定固化操作尽管实施便捷且投入较少，但本质上仅实现重金属形态转化而非彻底清除，其长期环境安全性仍存争议，以植物修复和微生物处理为代表的生物技术，在生态友好性与经济性方面优势突出，特别适合中低浓度污染场地的原位修复，但存在修复周期漫长、受限于生物生长规律及对高浓度污染耐受性不足等现实瓶颈。集成化修复方案借助技术耦合可应对复合型污染难题，但在多技术参数匹配、工程协调管理等方面面临严峻挑战，实际工程应用中，要结合场地污染特征进行系统评估，在技术选择时注重优势互补与风险控制。

4.3 修复技术的经济成本与效益评估

在土壤修复实践中，经济成本与效益的权衡是方案选择的核心考量。修复工程的经济支出主要覆盖设备采购、药剂消耗、人力投入、运输支出以及后续维护等维度，以物理修复领域的热脱附工艺为例，高温反应装置购置成本高企，其能源消耗带来的经济负担同样较大，化学淋洗法虽然除污效率可观，但淋洗试剂的持续消耗及废液处理系统的建设成本极易形成资金黑洞，相对而言，生物修复虽然初期投资门槛较低，但修复周期往往以年计，持续的养护开支可能超过初期预算。效益评估体系需要构建多维模型，要评估污染物的去除效率，也要统筹分析环境-社会-经济的协同效应，环境维度关注土壤微生态重构与重金属迁移阻断，社会层面涉及农作物安全阈值保障和居民健康风险管控，经济层面则需核算土地溢价空间与潜在环境负债消减，基于全周期成本核算框架的实证研究说明，城市工业地块修复采用复合技术虽需承受较高初始投入，但地块功能升级可能产生数倍于投

入的回报，而耕地修复场景中，兼顾成本可控性与生态安全性的生物修复技术往往成为优选方案。

4.4 修复技术的环境风险与管理措施

重金属污染土壤修复工程面临多维环境风险挑战。在技术应用层面，机械翻耕等物理手段容易引发粉尘扩散和废气排放等问题，化学淋洗剂长期残留可能对地下水系统构成渗透性威胁，而固化稳定化材料存在时效性衰减隐患，生物修复若管理失当，可能形成重金属沿食物链的生物放大效应。针对复合型风险特征，需建立全流程风险防控机制，项目启动前应开展多介质环境诊断，运用模型推演潜在风险场景并编制分级响应预案，实施阶段需建立动态监测体系，对修复区域及周边环境的土壤、水体和大气污染物进行追踪分析，优先选用环境友好型修复材料，例如可生物降解的腐植酸类淋洗剂、无毒晶格固定的磷酸盐稳定剂。同步构建废弃物分类处置规范，对工程衍生的含重金属固液废弃物实施闭环管理，借助社区听证和技术简报等形式提高公众知情权，建立风险沟通机制以提升社会监督效能，保障修复工程的环境安全性与社会接受度。

5 结语

综上所述，重金属污染土壤修复技术的选择及应用要综合考量污染特征、技术适用性、经济成本以及环境风险。把物理修复技术、化学修复技术、生物修复技术以及综合修复技术有机结合起来，可实现重金属污染土壤的有效治理。未来需强化修复技术的研究以及创新，提升修复效率，降低治理成本，加强环境风险防控，保证修复工程安全性以及可持续性。

参考文献

- [1] 李晓春. 重金属污染土壤修复技术的可行性研究与实践 [J]. 黑龙江环境通报, 2025, 38 (01): 131-133.
- [2] 高晓雨. 重金属污染土壤修复技术及其修复实践研究 [J]. 山西化工, 2024, 44 (10): 235-236+243. DOI:10.16525/j.cnki.cn14-1109/tq.2024.10.082.
- [3] 谢丹. 重金属污染土壤修复技术及其修复实践 [J]. 清洗世界, 2024, 40 (10): 175-177.