

Discussion on remediation methods of heavy metal pollution in soil

Xikun Jia

Shandong Provincial Geological and Mineral Exploration and Development Bureau, Fourth Geological Brigade (Shandong Provincial Fourth Geological and Mineral Exploration Institute), Weifang, Shandong, 261021, China

Abstract

Soil heavy metal pollution remains one of the primary environmental threats to agricultural ecological security and human health. With the advancement of industrialization, urbanization, and intensive agriculture, heavy metals such as lead, cadmium, mercury, arsenic, and chromium have entered soil systems through smelting emissions, wastewater irrigation, mining discharges, and the application of chemical fertilizers and pesticides. This contamination leads to ecological degradation and cumulative risks in food chains. This study systematically examines the mechanisms and applicability of heavy metal pollution control through three approaches: physicochemical remediation, bioremediation, and integrated remediation. Research findings indicate that while physicochemical methods demonstrate rapid effectiveness, they carry risks of secondary pollution. Conversely, bioremediation offers ecological benefits, lower costs, and stronger sustainability. Future efforts should focus on integrating multiple technologies and implementing in-situ ecological restoration, while establishing intelligent monitoring and evaluation systems to achieve coordinated pollution control and ecological recovery.

Keywords

soil pollution; heavy metals; physicochemical remediation; biological remediation; ecological management

土壤重金属污染修复方法探讨

贾西坤

山东省地质矿产勘查开发局第四地质大队（山东省第四地质矿产勘查院），中国·山东 潍坊 261021

摘要

土壤重金属污染是当前威胁农业生态安全和人类健康的主要环境问题之一。随着工业化、城镇化及集约化农业的发展，铅、镉、汞、砷、铬等重金属通过冶炼废气、污水灌溉、矿山排放及化肥农药施用等途径进入土壤体系，造成生态功能退化和食物链累积风险。本文从物理化学修复、生物修复及联合修复三方面系统探讨了重金属污染治理的机理与适用条件。研究发现，物理化学修复见效快但存在二次污染隐患，而生物修复具有生态友好、成本低和可持续性强的优势。未来应推动多技术集成与原位生态修复，构建智能化监测与评估体系，实现污染治理与生态恢复的协同统一。

关键词

土壤污染；重金属；物理化学修复；生物修复；生态治理

1 引言

土壤是生态系统中极为重要的环境介质，其健康直接影响生态平衡与人类生存安全。随着工业排放、城市固废堆放、矿山冶炼以及农业高强度耕作的累积效应，重金属逐渐成为土壤主要污染因子。我国土壤环境质量状况调查结果表明，约 16.1% 的土壤存在不同程度的重金属超标问题，其中镉、铅、汞、砷、铬等重金属在部分耕地中呈现富集趋势。重金属污染具有难降解、持久性与隐蔽性等特征，且可通过植物吸收进入食物链，对人体健康造成慢性毒性累积。本文

将从污染特征、修复机理与应用实践三个层面，系统分析土壤重金属污染修复的主要技术路径，探讨其在未来发展中的融合趋势与实施策略。

2 土壤重金属污染的特征与危害

2.1 污染来源与分布特征

重金属污染的形成与人类工业化活动密切相关。工业冶炼、化工、电镀、采矿等过程排放的废气、废水与固体残渣，是土壤中金属累积的主要外源。与此同时，农业生产中长期施用含镉磷肥、污泥施肥及农药残留，也使金属元素在耕层中不断富集。交通排放、城市垃圾渗滤液及大气沉降则进一步加重了污染的广域扩散。不同地区受气候、地质及土地利用差异影响，污染分布呈现明显地域性特征：如华南酸

【作者简介】聂西坤（1984-），男，中国山东临朐人，本科，高级工程师，从事水工环地质、物探研究。

性土壤中镉的迁移性和生物有效性较强,而华北平原以铅、铬污染为主,西北干旱区则易形成砷、铜等金属的局部富集。这种空间差异性使得区域化治理与精准修复成为当下治理的重要方向。

2.2 重金属的迁移与生态风险机制

重金属在土壤中的迁移转化行为受土壤理化性质显著影响。其在土壤中的存在形态包括可交换态、碳酸盐结合态、铁锰氧化物结合态、有机结合态及残渣态,不同形态决定其环境活性与生物可利用性。当土壤酸化、氧化还原条件或离子强度变化时,金属可由稳定形态转化为活性态重新进入环境循环。镉、汞、砷等高迁移性元素容易被植物吸收并经食物链富集,对人体造成神经系统损伤、肾功能障碍及致癌风险。同时,重金属能破坏土壤微生物多样性,抑制关键酶活性,削弱土壤自净能力与养分循环功能,最终导致生态系统退化与农业生产力下降。

2.3 污染评估与监测现状

当前土壤重金属的监测主要依赖电感耦合等离子体质谱(ICP-MS)等精密分析技术,虽具高灵敏度和精确度,但受制于检测成本高、样品量大、周期长等问题,难以满足区域动态监测需求。污染风险评估通常采用地累积指数(Igeo)和潜在生态风险指数(RI)等模型进行定量分析,以评估金属污染程度及其生态威胁。近年来,基于遥感影像和机器学习算法的空间预测方法逐渐应用于重金属污染识别与趋势模拟,实现了从点位监测到区域化动态监测的跨越。我国正在构建多尺度土壤环境质量数据库与重金属污染预警系统,通过数据共享与智能分析,为治理规划与修复决策提供科学支撑,推动土壤环境管理向信息化与精细化方向发展。

3 物理化学修复技术的原理与应用

3.1 固化/稳定化技术(S/S)

固化/稳定化技术是当前重金属污染土壤治理中应用最广泛的物理化学修复方法之一,其原理是通过添加特定稳定剂或固化剂,将活性较高的重金属离子转化为难溶、难迁移的化学形态,从而减少其生物有效性与环境风险。常用材料包括石灰、磷酸盐、硅酸盐、黏土矿物以及生物炭等。石灰通过提高土壤pH值,促使金属形成氢氧化物或碳酸盐沉淀;磷酸盐可与金属形成稳定的磷酸盐矿物,如 $Pb_3(PO_4)_2Cl$ 等;生物炭因其发达的孔隙结构和表面含氧官能团,能实现吸附、络合与离子交换的多重作用。研究表明,添加2%石灰能有效降低镉、铅的活性,而掺入5%竹炭则显著提高镍和锌的固定效率。固化/稳定化法操作简便、成本较低,适合大面积推广,但存在“治标不治本”的局限,其长期稳定性仍受土壤酸化、氧化还原变化及有机酸分解等因素影响。因此,在工程实践中常与生态修复技术联合使用,以兼顾污染控制与生态恢复的双重目标。

3.2 土壤淋洗技术

土壤淋洗技术以溶剂萃取和化学络合原理为基础,通过向受污染土壤中引入螯合剂或表面活性剂,使重金属从固相迁移至液相,再将富集液体收集处理,实现污染物的去除与土壤再利用。常用淋洗剂包括乙二胺四乙酸(EDTA)、柠檬酸、草酸及生物表面活性剂。EDTA由于具有多配位络合结构,对铅、铜等重金属具有优异去除效果,实验表明其去除率可达80%以上。然而,EDTA难降解的特性可能导致淋洗后液体的二次污染。为此,研究者开发了可生物降解的有机酸、氨基酸及植物源螯合剂,如柠檬酸和苹果酸,既保持良好的络合能力,又降低环境残留风险。该技术的优点在于修复速度快、效果显著,但在大规模耕地应用中需平衡成本投入与生态安全。近年来,利用超声波强化、磁性纳米材料辅助及封闭循环系统的创新工艺显著提升了淋洗效率与溶液回收率,推动了其绿色化与工程化发展。

3.3 电动修复技术

电动修复技术利用直流电场或脉冲电场在土壤中建立电势梯度,驱动带电重金属离子通过电迁移、电渗流和电泳作用向电极移动,并在阴阳极区域被富集、还原或沉积,实现污染控制与去除。该方法特别适用于传统机械修复难以触及的黏质土壤与深层污染区域。在操作过程中,阳极区常伴随酸化作用,促进金属溶出;阴极区因碱化效应使金属沉积,从而实现空间分离。针对传统电动修复存在能耗高、电极钝化及迁移不均的问题,研究者引入脉冲电场与多电极布设技术,提高电流分布均匀性与迁移效率;结合化学淋洗剂或螯合剂可进一步增强金属溶解与迁移能力。例如,在镉污染黏土修复中,采用“电动-淋洗”协同模式,去除率可提高30%以上。该方法的优势在于适应性强、过程可控,但需要配合精确的场地勘测与能量管理,以实现高效与经济性的平衡。未来,结合太阳能供电与智能控制系统的电动修复技术有望成为深层重金属治理的重要方向。

4 生物修复技术的原理与发展方向

4.1 植物修复技术(Phytoremediation)

植物修复是目前研究与应用最广泛的生态修复方法之一,其基本原理是通过特定植物对重金属的吸收、转运、富集或稳定作用,降低土壤中污染物的生物有效性,实现生态系统的净化与恢复。植物在修复过程中主要表现出三种机制:吸收富集型、固定稳定型与挥发转化型。前者依靠超富集植物将金属离子积累于地上组织,如蜈蚣草(*Phytolacca americana*)、蓖麻(*Ricinus communis*)等对镉、铅等金属具有较强的吸收能力;固定稳定型植物如狗牙根可通过根际分泌物将金属离子固定在土壤表层;而挥发转化型植物能将部分汞、硒等元素转化为气态形态排出体外。植物修复具有生态友好、低成本、操作简便等优势,但受制于气候、季节及植物生长周期,修复时间较长。为提高效率,近年来研究

者引入外源促生菌（PGPR）与螯合剂协同技术，改善根际环境，增强金属活化与植物吸收能力，从而加速污染物迁移与固定过程，实现修复效率与生态可持续性的双提升。

4.2 微生物修复技术（Microbial Remediation）

微生物修复通过微生物的代谢活动改变重金属在土壤中的形态，实现毒性降低与稳定化转化。该过程主要包括生物吸附、胞外络合、还原沉淀及甲基化等机制。微生物修复的优势在于其生态安全性高、适应性强，可与土壤微生态系统共生共存。随着分子生物学与基因编辑技术的发展，研究者已可通过合成生物学手段构建高效耐金属工程菌株，使其具备靶向识别与高效代谢能力，从而在复杂污染条件下保持稳定修复功能。此外，微生物修复常被用作前处理或后强化环节，与植物修复或化学稳定化技术结合，形成多层次的生态修复体系。

4.3 联合生物修复策略

由于单一生物修复方法在效率、适应性与时效性方面均存在局限，联合修复策略成为近年来的研究热点。植物—微生物联合体系可在根际区域形成良性协同机制：植物通过根系分泌物促进重金属活化与微生物繁殖，微生物则通过分泌有机酸、胞外多糖与酶类物质增强植物吸收与抗逆性，从而显著提升整体修复效率。例如，蜈蚣草与耐镉芽孢杆菌协同修复镉污染土壤，可在短期内将可溶性镉降低40%以上。同时，生物炭、纳米氧化物等环境功能材料的引入，进一步提升了系统的稳定性与修复深度。这类“材料—生物”协同修复模式通过物理吸附、化学络合与生物降解的多重效应，兼顾短期污染控制与长期生态恢复。未来，联合修复研究将更加注重机制解析与系统优化，建立多因子耦合模型，形成可推广的生态修复技术体系，以实现污染治理与生态重建的协调发展。

5 综合修复与未来发展趋势

5.1 多技术集成的协同修复体系

复合污染情境下，单一技术难以同时满足去除效率、生态安全与经济可行性等多维目标，因而需构建“物理—化学—生物”协同集成的分阶段治理框架。前期以固化/稳定化、土壤淋洗或电动修复快速降低生物有效性和环境暴露风险；中期导入植物修复与微生物强化，在根际界面实现金属活化—吸收—转化的联动；后期通过生物炭、矿物改性剂与生态覆绿恢复土壤结构与功能。工程实施应采用“模型化设计+现场监测”双轮驱动：以地球化学—水文地球化学耦合模型优化药剂投加与电极布设，以在线传感与分区考核动态校准工艺参数，形成“快速控险—长期稳态—生态重建”

的精细化治理路径。

5.2 绿色可持续修复理念的确立

面向“双碳”与生态文明目标，修复材料与工艺需兼顾低能耗、低毒性与资源循环。技术选择上优先采用可降解螯合剂、天然多糖稳定剂与农业废弃物来源生物炭等绿色材料，降低二次污染与隐性环境成本；工艺组织上将修复与土地再开发统筹，推进“修复—再生—利用”一体化：受污染地块在达标控险后，引入生态农业、城市绿地或低敏感性用地，实现功能替代与价值回补。建立“材料环境足迹—修复绩效—长期风险”三维评价体系，把寿命期温室气体排放、残留风险与维护成本纳入决策，推动从“末端治理”转向“系统减污与生态增汇”并重的可持续范式。

5.3 智能化与数据驱动的修复决策

数字技术为修复提供从识别到评估、从设计到运维的全链条支撑。以多源数据融合（遥感、近地传感、原位电化学探针与实验室 ICP-MS）构建高分辨率污染图谱，结合机器学习完成热区识别与分区定级，实现差异化处置；在实施阶段布设物联网传感网络，实时获取 pH、Eh、含水率与孔隙水金属通量等关键指示，驱动数字孪生模型进行参数同化与情景推演，滚动优化药剂浓度、灌洗强度与电场强度。决策层引入多目标优化算法，平衡去除率、能耗、成本与生态服务提升，形成“监测—诊断—优化—评估”的闭环。项目收尾通过长期跟踪数据库与风险预警阈值体系，实现由经验管理向证据与算法驱动的自适应治理。

6 结语

土壤重金属污染治理是生态文明建设的重要组成部分，其复杂性决定了修复工作需跨学科、多层次综合推进。物理化学修复以高效率著称，生物修复以可持续见长，两者结合可形成“快速见效+长效稳定”的系统化解决方案。未来应以绿色低碳理念为核心，推动修复技术标准化与智慧化发展，加强监测评估体系建设，实现从污染控制向生态恢复的转变。通过多技术融合与政策协同，土壤修复将从“治理末端污染”迈向“生态系统修复与再生利用”的新阶段，为保障粮食安全与生态健康提供坚实支撑。

参考文献

- [1] 吕昆,吴治陵,邓丽.土壤重金属污染修复技术的演进与研究进展[J].环境科学与技术,2025,48(81):52-61.
- [2] 陈兆祺,朱丹丹.土壤重金属污染治理存在的问题及对策研究[J].皮革制作与环保科技,2023,4(07):98-100.
- [3] 鞠雪峰.土壤重金属污染修复方法研究[J].资源节约与环保,2022,(10):121-124.