

Comparison of soil heavy metal pollution remediation technology

Guangyu Liang

School of Environment and Health, Jiangnan University, Wuhan, Hubei, 430056, China

Abstract

The article systematically discusses the physical, chemical, and biological remediation techniques for soil heavy metal pollution. In physical remediation, the backfill method and soil replacement are intuitive and effective but costly and prone to secondary pollution; leaching is suitable for soils with good permeability, offering high efficiency but at the cost of soil structure damage. In chemical remediation, chemical fixation is simple to operate and can fix the form of heavy metals, but it carries the risk of reactivation. Oxidation-reduction methods can alter the valence state of heavy metals but require precise control of reaction conditions. For biological remediation, phytoremediation is environmentally friendly and economical but has a long cycle, while microbial remediation is widely applicable but is sensitive to the environment and slow in restoration. Each technique has its advantages and disadvantages, and practical application should consider the soil condition and pollution level comprehensively, choosing or combining them appropriately.

Keywords

soil remediation; heavy metal pollution; technical research

土壤重金属污染修复技术比较

梁光愉

江汉大学环境与健康学院, 中国 · 湖北 武汉 430056

摘要

文章系统阐述了土壤重金属污染的物理、化学及生物修复技术。物理修复中, 客土法与换土法直观有效但成本高、易二次污染, 淋洗法适用于透水性好的土壤, 修复效率高却破坏土壤结构; 化学修复里, 化学固定法操作简便、可固定重金属形态, 但存在重新活化风险, 氧化还原法能改变重金属价态, 却需精准控制反应条件; 生物修复方面, 植物修复绿色经济但周期长, 微生物修复适用范围广, 不过对环境敏感、修复缓慢。这些技术各有优劣, 实际应用需综合考量土壤状况与污染程度, 合理选择或联用。

关键词

土壤修复; 重金属污染; 技术研究

1 引言

土壤作为人类生存和发展的重要自然资源, 其质量直接关系到生态安全与粮食安全。然而, 随着工业化、城市化进程加快, 重金属污染问题日益严峻。重金属在土壤中具有难降解、易积累等特性, 严重威胁生态环境与人体健康。为此, 物理、化学、生物等多种修复技术应运而生。本文将对这些修复技术进行系统比较, 分析其原理、适用场景及优缺点, 为土壤重金属污染治理提供参考。

2 物理修复

2.1 客土法与换土法

客土法是一种通过“物理覆盖”实现污染稀释的修复技术, 即在受重金属污染的土壤表层均匀覆盖一层未受污染的优质土壤, 通过增加土壤厚度来降低污染物浓度, 进而削弱重金属对植物根系的毒性作用。以镉污染农田为例, 研究表明当客土厚度达到 20 厘米时, 表层土壤中镉的有效态含量可降低 60% 以上, 显著减少农作物对镉的吸收。换土法则是更为彻底的物理置换手段, 需将污染土壤全部挖除, 替换为清洁土壤, 这种方式能直接移除污染源, 常用于重金属集中分布的点状污染区域。

这两种技术特别适用于污染程度较轻、范围相对局限的场景, 例如城市公园、校园绿地等小型场地的土壤修复。某一线城市在地铁施工后发现周边绿地土壤铅含量超标, 通

【作者简介】梁光愉 (1998-), 男, 中国广西合浦人, 硕士, 从事环境科学与工程研究。

过客土法覆盖 30 厘米厚的新土，并种植适应性强的草本植物，三个月后土壤铅的生物有效性降低了 75%，植物生长指标恢复正常。其优势在于修复效果立竿见影，能在短时间内改善土壤环境，快速恢复植被生长。但局限性同样显著：首先，资源消耗巨大，每公顷客土修复需运输 300 - 500 立方米新土，不仅增加了运输成本，还可能因大规模取土破坏取土区的生态平衡；其次，两种方法都属于“污染转移型”修复，被移除的污染土壤若处置不当，会引发新的环境问题^[1]；此外，换土过程涉及机械挖掘、运输、回填等多道工序，据测算每立方米土壤处理成本高达 200 - 300 元，对于大面积污染区域，经济成本难以承受。

2.2 淋洗法

淋洗法是基于化学作用原理，通过向污染土壤中注入特定淋洗剂，促使土壤固相中的重金属与淋洗剂发生离子交换、络合、溶解等化学反应，将重金属从土壤颗粒表面或内部释放并转移至液相，随后借助淋洗、分离等后续操作，实现重金属从土壤中的有效去除^[2]。

在淋洗剂的选择上，种类丰富且各具特性。无机酸类如盐酸、硫酸，凭借其强酸性，能通过溶解作用打破重金属与土壤矿物之间的化学键，使其释放到溶液中，但这类强酸在淋洗过程中会显著降低土壤 pH 值，破坏土壤原有酸碱平衡。例如，使用盐酸淋洗铅污染土壤时，虽然能快速溶解土壤中的铅化合物，但淋洗后土壤 pH 值可能从初始的 6.5 骤降至 3.0 - 3.5，导致土壤结构恶化，团粒结构被破坏，进而出现板结现象，同时强烈抑制土壤中微生物的活性，影响土壤生态功能。碱类淋洗剂如氢氧化钠、氢氧化钙，适用于处理一些在碱性条件下能形成沉淀或稳定化合物的重金属，如重金属锌、镉等。不过，碱的过量使用同样会导致土壤 pH 值过高，影响土壤中养分的有效性和植物根系的正常生长。

螯合剂是当前应用广泛且效果显著的一类淋洗剂，以乙二胺四乙酸（EDTA）为例，它能与镉等重金属离子形成稳定的环状络合物，大幅提升重金属在土壤溶液中的溶解度和迁移性。研究数据显示，在镉污染浓度为 50mg/kg 的土壤中，使用 0.1mol/L 的 EDTA 溶液进行淋洗，经过 48 小时的反应，土壤中镉的去除率可达 85% - 90%。

3 化学修复

3.1 化学固定法

化学固定法是基于土壤化学原理，通过向污染土壤中添加特定化学固定剂，利用沉淀、吸附、络合等化学反应，将土壤中具有高迁移性和生物有效性的重金属转化为低活性、低迁移性的化学形态，从而降低重金属对生态环境和人体健康的潜在风险。该技术的核心在于通过改变重金属在土壤中的赋存状态，使其难以被植物吸收或进入地下水循环系统。

在众多化学固定剂中，石灰、磷酸盐、生物炭是应用最为广泛的类型，且各自具有独特的作用机制。石灰作为碱性物质，主要通过提高土壤 pH 值来促进重金属的沉淀。当土壤 pH 值升高时，重金属离子如镉（Cd²⁺）、铅（Pb²⁺）等会与氢氧根离子结合，形成难溶性的氢氧化物沉淀。例如，在酸性镉污染土壤（pH 4.5）中添加石灰后，当土壤 pH 值提升至 7.5 - 8.0 时，镉的有效态含量可降低 60% - 70%，显著减少了镉被植物吸收的可能性。磷酸盐则主要通过与重金属发生沉淀反应来实现固定。以铅污染土壤修复为例，向土壤中添加磷酸二氢钙等磷酸盐，磷酸盐会与铅离子发生反应，生成难溶性的磷酸铅（Pb₃(PO₄)₂）沉淀。研究表明，在铅含量为 500mg/kg 的污染土壤中，添加适量磷酸盐后，土壤中可交换态铅的含量下降了 80%，极大地降低了铅在土壤中的迁移性和生物有效性。

表 1 化学固定法中不同化学固定剂的相关信息

化学固定剂	作用机制	具体实例及效果
石灰	提高土壤 pH 值，促进重金属沉淀	在酸性镉污染土壤（pH 4.5）中添加石灰，提升土壤 pH 值至 7.5 - 8.0，镉的有效态含量降低 60% - 70%，减少镉被植物吸收的可能性
磷酸盐	与重金属发生沉淀反应	在铅含量为 500mg/kg 的污染土壤中添加磷酸二氢钙等磷酸盐，生成难溶性的磷酸铅（Pb ₃ (PO ₄) ₂ ）沉淀，土壤中可交换态铅的含量下降 80%，降低铅在土壤中的迁移性和生物有效性

3.2 氧化还原法

氧化还原法是基于土壤中重金属元素具有不同氧化态且各态化学性质存在显著差异的特性，通过人为添加氧化剂或还原剂，促使重金属发生氧化还原反应，改变其价态，进而实现降低重金属毒性、迁移性和生物有效性的目的。这种方法的核心在于精准调控化学反应，使重金属转化为更稳定、危害更小的存在形态。

在实际应用中，该方法对特定价态的重金属污染修复表现出高度针对性。以六价铬（Cr（VI））污染修复为例，六

价铬具有强氧化性，水溶性好且毒性极高，其毒性约为三价铬（Cr（III））的 100 倍。利用硫酸亚铁（FeSO₄）作为还原剂，在酸性条件下（pH 2 - 4），Fe²⁺ 可与 Cr（VI）发生氧化还原反应，将 Cr（VI）还原为 Cr（III），生成的 Cr（III）会进一步水解形成难溶性氢氧化物沉淀。研究数据显示，在初始 Cr（VI）浓度为 100mg/kg 的污染土壤中，添加适量硫酸亚铁并控制反应条件，24 小时内 Cr（VI）的去除率可达 95% 以上，显著降低了铬对环境和人体健康的危害。除铬污染外，氧化还原法在其他重金属污染修复中也有应用。对于砷污染

土壤, 可通过添加氧化剂如高锰酸钾 (KMnO_4), 将毒性较高的三价砷 (As (III)) 氧化为五价砷 (As (V)), As (V) 在土壤中更易与铁、铝氧化物结合形成稳定的化合物, 从而降低其迁移性。在汞污染土壤修复方面, 利用零价铁等还原剂, 可将毒性较强的甲基汞还原为金属汞, 减少其生物累积风险。

4 生物修复

4.1 植物修复

植物修复是一种基于生态原理的绿色土壤修复技术, 其核心在于利用植物对重金属独特的耐受、吸收、积累和转化能力, 实现污染土壤中重金属的去除、固定或无害化。该技术主要分为植物提取、植物稳定和植物挥发三种类型, 每种类型都依赖植物与土壤环境的复杂互作机制^[3]。

植物提取技术依赖超富集植物对重金属的高效富集能力。这类植物能够在体内积累比普通植物高出数十倍甚至数百倍的重金属, 且不会出现明显的中毒症状。以遏蓝菜属植物为例, 其对锌和镉的富集能力尤为突出, 研究数据显示, 某些遏蓝菜品种在锌污染土壤 (锌含量 1000mg/kg) 中生长一个生长季, 地上部分锌含量可高达 30000mg/kg , 富集系数 (植物地上部重金属含量与土壤重金属含量比值) 超过 30。另一种典型超富集植物蜈蚣草, 对砷具有超强的富集能力, 在砷污染土壤中种植蜈蚣草, 经过两个生长周期后, 土壤砷含量可降低 15% - 20%。通过连续种植和收割超富集植物地上部分, 能够逐步降低土壤中重金属含量。

4.2 微生物修复

微生物修复是一种基于土壤微生物代谢特性与重金属相互作用原理的绿色修复技术, 通过土壤中天然存在或人工添加的细菌、真菌、藻类等微生物, 对重金属进行吸附、转化、氧化还原等作用, 降低重金属的毒性、迁移性和生物有效性, 从而实现污染土壤的修复。

在作用机制上, 微生物对重金属的吸附作用是其重要的修复途径之一。许多细菌能够分泌胞外聚合物 (EPS), 这些由多糖、蛋白质、核酸等组成的大分子物质, 含有大量

的羧基、羟基、磷酸基等官能团, 可通过离子交换、络合、静电吸附等方式与重金属离子结合。例如, 芽孢杆菌分泌的胞外聚合物对镉离子具有较强的吸附能力, 在含镉浓度为 50mg/L 的溶液中, 芽孢杆菌分泌的胞外聚合物对镉的吸附率可达 80% 以上^[4]。此外, 一些真菌如木霉菌, 其细胞壁上的几丁质、纤维素等成分也能与重金属发生吸附作用, 将重金属固定在细胞表面, 降低其在土壤中的迁移性。微生物的转化作用也是修复重金属污染的关键。部分微生物能够通过氧化还原反应改变重金属的价态, 进而改变其化学性质和毒性。例如, 在铬污染土壤修复中, 某些硫还原细菌可以将毒性强、迁移性高的六价铬 (Cr (VI)) 还原为毒性较低、易沉淀的三价铬 (Cr (III))。研究表明, 在添加硫还原细菌的铬污染土壤中, 经过 30 天的处理, Cr (VI) 的去除率可达 70% - 80%。对于汞污染土壤, 一些细菌含有汞还原酶, 能将毒性较高的甲基汞转化为低毒的金属汞。

5 结语

土壤重金属污染修复技术各有优劣, 物理修复见效快但资源消耗大、易引发二次污染; 化学修复可快速改变重金属形态, 却存在长期风险; 生物修复绿色可持续, 不过修复周期长且受环境制约明显。实际应用中, 单一技术常难以满足复杂污染需求, 需依据土壤类型、污染程度、地理环境等因素, 灵活选择或联合运用多种技术。未来, 应加强技术创新, 研发高效、低成本、环境友好的修复技术, 同时完善监测体系, 确保修复效果长效稳定, 推动土壤重金属污染修复工作迈向新台阶。

参考文献

- [1] 邓芊. 土壤重金属污染的电动力学高效修复技术研究[J]. 黑龙江环境通报, 2024, 37 (11): 136-138.
- [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.
- [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.
- [4] 王勇. 土壤重金属污染特征与状况调查分析[J]. 西部探矿工程, 2024, 36 (10): 12-15.