

矿区土壤重金属污染生态修复技术分析

廖昕玥 朱存金*

四川省天晟源环保股份有限公司

DOI:10.32629/gmsm.v8i6.2356

[摘要] 矿区土壤重金属污染因隐蔽性、不可逆性及强迁移性,严重威胁生态系统稳定与人体健康,生态修复已成为矿区环境治理的核心任务。本文系统梳理植物修复、微生物修复、化学-生物联合修复等主流生态修复技术,分析各技术的作用机制、适用场景及优劣特征;结合典型矿区修复案例,通过对比不同技术的修复效率与成本效益,明确联合修复技术的协同优势;基于现有研究与工程实践,提出技术优化与应用推广的关键方向。研究可为矿区土壤重金属污染修复工程的科学实施提供技术参考,对推动矿区生态系统重建、保障土地资源可持续利用具有重要意义。

[关键词] 矿区土壤; 重金属污染; 生态修复; 联合修复

中图分类号: TD88 **文献标识码:** A

Analysis of Ecological Restoration Technology of Heavy Metal Pollution in Mine Area

Xinyue Liao Cunjin Zhu*

Sichuan Tianshengyuan Environmental Protection Co., Ltd.

[Abstract] The hidden, irreversible, and highly mobile nature of heavy metal pollution in mining area soils poses a severe threat to ecosystem stability and human health, making ecological restoration a core task in mining environment remediation. This paper systematically reviews mainstream ecological restoration technologies including phytoremediation, microbial remediation, and chemical-biological combined remediation, analyzing their mechanisms, applicable scenarios, and comparative advantages. Through case studies of typical mining area remediation projects, the study compares the efficiency and cost-effectiveness of different technologies to highlight the synergistic benefits of combined approaches. Based on existing research and engineering practices, key directions for technological optimization and application promotion are proposed. The findings provide technical references for the scientific implementation of heavy metal pollution remediation in mining areas, which is crucial for promoting ecosystem reconstruction and ensuring sustainable land resource utilization.

[Key words] mine soil; heavy metal pollution; ecological restoration; combined remediation

引言

矿产资源的大规模开采与加工,在支撑国民经济发展的同时,也产生了大量含重金属的废渣、废液,经雨水淋溶、地表径流等途径渗入土壤,导致矿区及周边土壤重金属污染问题日益突出^[1]。据统计,我国矿业废弃地面积已超200万公顷,其中近70%存在不同程度的重金属污染,镉、铅、砷等超标现象尤为严重^[2]。重金属可通过食物链累积放大,对农作物质量安全、周边居民健康造成持续性危害,同时破坏土壤结构、抑制微生物活性,导致生态系统退化^[3]。

当前,矿区土壤重金属污染修复技术可分为物理修复、化学修复与生态修复三大类。物理修复成本高昂、对土壤扰动大,化学修复易引发二次污染,而生态修复因环境友好、成本可控、

可持续性等优势,成为国内外研究与应用的主流方向^[4]。目前已开发的生态修复技术类型多样,但不同技术的适用条件差异显著,修复效果受土壤理化性质、重金属形态、污染程度等多重因素影响,实际工程中常存在技术选型不合理、修复效率偏低等问题。

因此,系统分析各类矿区土壤重金属污染生态修复技术的核心机制与应用特性,明确不同场景下的最优技术方案,对提升修复工程质量、降低治理成本具有重要现实意义。本文通过梳理主流生态修复技术的研究进展,对比分析各技术的性能参数,结合工程实践提出优化建议,为矿区土壤重金属污染治理提供科学依据与技术支撑。

1 矿区土壤重金属污染生态修复主流技术

1.1 植物修复技术

植物修复技术是利用植物的吸收、富集、固定等作用降低土壤重金属含量或活性的修复方法,根据作用机制可分为植物提取、植物稳定、植物阻隔三类,具有操作简便、环境友好、可同步实现生态重建等优势^[5]。

植物提取技术核心是筛选超富集植物,通过其根系吸收土壤中的重金属并转运至地上部分,待植物成熟后收割处置,实现重金属的移除^[6]。仇荣亮教授团队筛选出多种多金属超富集植物品种,为复合污染土壤的植物提取修复提供了重要种质资源,在广东翁源县上坝村酸性多金属污染农田的修复中,采用超富集植物与螯合剂联合模式,实现了污染土壤的高效修复。植物稳定技术则通过种植耐性植物,结合土壤改良剂降低重金属生物有效性,减少其迁移扩散,适用于高浓度重金属污染土壤。中国林科院亚林所团队研究表明,种植木本耐性植物并施加生物炭改良剂,可显著增强根际微生物网络稳定性,提升重金属固定效率^[7]。植物阻隔技术主要针对中低污染农田,通过种植低累积农作物,结合改良剂调控,减少重金属向作物可食部分迁移,保障农产品安全。

但植物修复技术存在明显局限性:超富集植物普遍生长缓慢、生物量小,修复周期长;多数超富集植物仅针对单一重金属,对复合污染修复效果有限;受土壤pH值、养分含量等环境条件影响较大^[8]。

1.2 微生物修复技术

微生物修复技术利用微生物的代谢活动改变重金属的化学形态,降低其毒性与迁移性,主要包括微生物吸附、微生物转化、微生物促植物修复等类型^[9]。其核心机制是微生物通过分泌有机酸、多糖等物质,将重金属转化为沉淀态、络合态等稳定形态,或通过细胞膜吸附富集重金属。

解磷微生物是重金属污染修复的重要功能微生物,可将土壤难溶性磷转化为有效磷,同时通过代谢产物实现重金属解毒,促进修复植物生长,增强植物在重金属毒害环境下的生存竞争力^[10]。研究表明,解磷微生物中的phoD基因编码细菌可通过调控土壤磷循环,间接提升重金属修复效能,其多样性与网络复杂性对修复效果具有显著影响。此外,微生物与植物的协同修复模式已成为研究热点,微生物可通过改善土壤微环境、促进植物根系生长,提升植物对重金属的吸收与固定效率。

微生物修复技术具有反应温和、成本低、无二次污染等优势,但也存在不足:功能微生物的活性易受土壤环境影响,在极端污染或恶劣理化条件下修复效果不稳定;微生物的培养与接种技术要求较高,大规模工程应用难度较大。

1.3 化学-生物联合修复技术

单一修复技术往往难以满足复杂矿区土壤重金属污染的修复需求,化学-生物联合修复通过整合化学改良与生物修复的优势,实现修复效率的协同提升,已成为矿区修复的主流发展方向^[4]。其核心思路是通过施加化学改良剂改善土壤理化性质,为生物修复提供适宜环境,同时借助生物作用增强化学改良

剂的稳定效果。

常见的联合修复模式包括“超富集植物+螯合剂”“耐性植物+生物炭”“微生物+化学稳定剂”等。仇荣亮团队提出的“耐性植物+改良剂”联合修复模式,在大宝山矿区高污染土壤修复中取得显著成效,通过筛选的耐性植物与自主研发的化学改良剂协同作用,有效固定尾矿中的重金属,控制二次污染,保障了下游农田的安全生产。中国林科院亚林所的研究表明,生物炭-凹凸棒土复合改良剂与木本植物协同使用,可通过调控根际微生物网络结构,显著提升镉、锌重度污染土壤的修复效能。

联合修复技术克服了单一技术的局限性,具有修复效率高、适用范围广、稳定性强等优势,但技术组合方案的优化、改良剂用量的调控等仍是工程应用中需重点解决的问题。

2 不同生态修复技术性能对比与工程应用

2.1 技术性能对比

为明确不同生态修复技术的适用场景与应用价值,从修复效率、成本、周期、适用污染程度及环境影响等维度,对主流技术进行对比分析,结果见表1。

表1 主流技术进行对比分析

修复技术类型	核心优势	修复效率	单位成本 (元/m ²)	修复 周期	适用污染 程度	环境影响
植物提取	环境友好、生态重建	中低(单一重金属 15%-30%/年)	80-150	2-5年	中低污染	无二次污染
植物稳定	操作简便、周期较短	中(重金属活性降 低40%-60%)	50-100	1-3年	高污染	无二次污染
微生物修复	反应温和、成本较低	中(重金属活性降 低30%-50%)	60-120	1-2年	中低污染	无二次污染
生物炭-植物联合	修复效率高、稳定性强	高(重金属活性降 低60%-80%)	120-200	1-3年	中高污染	无二次污染
超富集植物-螯合剂联合	针对性强、移除效果好	高(单一重金属移 除40%-60%/年)	100-180	2-4年	中污染	需控制螯合剂用量防止二次迁移

注:数据来源于国内典型矿区修复工程实测结果及文献[1,7,8]汇总。

2.2 典型工程应用案例

广东大宝山矿区是我国典型的多金属污染矿区,土壤中镉、铅、砷含量远超国家标准,生态环境严重退化。仇荣亮教授团队针对该矿区污染现状,采用“耐性植物+化学改良剂”联合修复技术,筛选重金属耐性能源植物与经济植物,搭配自主研发的铁硅基重金属固定剂,对矿区废弃地进行修复。工程实施后,土壤中重金属活性降低72%-85%,有效控制了酸性矿废水的重金属迁移,保障了下游10000亩农田的安全生产,修复区域植被覆盖率从不足10%提升至65%,生态效益与社会效益显著。

在浙江某镉锌重度污染矿区,中国林科院亚林所团队采用

“木本植物+生物炭-凹凸棒土复合改良剂”修复技术,通过3年野外试验,使土壤中镉、锌的生物可利用性分别降低68%和75%,木本植物生物量较对照组提升42%。该技术通过改良剂调控根际微生物网络结构,增强了微生物与植物的协同作用,实现了污染修复与植被恢复的同步推进,为重金属重度污染矿区的生态重建提供了有效模式。

3 生态修复技术优化与发展方向

尽管矿区土壤重金属污染生态修复技术已取得显著进展,但在实际应用中仍面临诸多挑战,需从技术创新、方案优化、机制研究等方面持续突破。一是加强超富集植物与功能微生物的筛选与培育,通过基因编辑、微生物驯化等技术,提升其重金属富集能力、生长速率与环境适应性;二是优化联合修复技术方案,根据土壤污染程度、重金属类型、场地条件等,精准匹配修复技术组合与改良剂用量,实现修复效率与成本的平衡;三是深化修复机制研究,明确植物-微生物-土壤-重金属的相互作用关系,揭示联合修复的协同机理,为技术优化提供理论支撑;四是推动修复技术的工程化与标准化,制定不同类型矿区的修复技术规范,开发低成本、易操作的修复设备,提升技术推广应用效率。

4 结论

矿区土壤重金属污染生态修复是保障生态安全与土地资源可持续利用的关键举措,主流修复技术各有优劣,联合修复技术展现出显著协同优势。

(1) 植物修复、微生物修复技术环境友好、成本可控,但修复效率与适用范围有限。

(2) 化学-生物联合修复通过技术协同克服了单一技术的局限性,提升了修复效率与稳定性,是中高污染矿区的优选方案。

(3) 未来需聚焦技术创新、方案优化与机制研究,推动修复

技术的工程化标准化,为矿区生态重建提供更高效的技术支撑。

[参考文献]

[1]仇荣亮,周建利,吴启堂.土壤重金属污染植物修复技术体系与工程应用[J].环境科学学报,2021,41(5):1681-1692.

[2]王金满,张萌,白中科.矿区土壤重金属污染修复技术研究进展[J].农业工程学报,2020,36(12):201-212.

[3]李芳柏,刘同旭,陈俊坚.矿区重金属污染土壤的生态风险评估与修复策略[J].生态环境学报,2022,31(3):598-606.

[4]周东美,王玉军,仓龙.土壤重金属污染修复技术及其发展趋势[J].土壤学报,2021,58(2):247-260.

[5]骆永明,滕应,周静.植物修复重金属污染土壤的关键科学问题与技术瓶颈[J].土壤,2020,52(4):641-648.

[6]陈同斌,韦朝阳,黄泽春.超富集植物的筛选与重金属污染土壤修复[J].中国环境科学,2023,43(7):1521-1530.

[7]王海燕,李冬林,丁贵杰.生物炭强化木本植物修复重金属污染土壤的机理与效应[J].林业科学,2024,60(12):1-10.

[8]赵方杰,杨肖娥,龙新宪.重金属污染土壤联合修复技术的协同机制与应用[J].环境科学,2022,43(8):4289-4298.

[9]沈德中,李培军,周启星.微生物修复重金属污染土壤的研究进展[J].应用生态学报,2021,32(6):2215-2224.

[10]林先贵,施卫明,胡锋.解磷微生物在重金属污染土壤修复中的作用机制[J].生态学报,2023,43(11):4401-4410.

作者简介:

廖昕玥(1993--),男,汉族,四川省彭州市人,研究生,中级工程师,研究方向:水文地质,环境地质,环境工程。

*通讯作者:

朱存金(1990--),男,汉族,四川省泸州市人,研究生,高级工程师,研究方向:环境岩土工程、环境地质、环境工程。