

矿区重金属污染土壤原位修复技术研究

雷金勇^{1,2}

1 中国有色桂林矿产地质研究院有限公司

2 广西环境污染控制理论与技术重点实验室

DOI:10.32629/eep.v9i5.3221

[摘要] 矿产开发过程中产生的重金属污染是制约矿区生态环境可持续发展、危及人类健康的十分突出的问题,而矿区土壤重金属污染有易累积、难降解、隐蔽性强、复合污染突出等典型特征,因此其治理已经成为环境科学领域的研究热点。原位修复技术由于不需要大规模搬运土壤、对生态扰动极小、成本易于控制,故相较于异位修复更具推广应用价值。为此,本文首先系统、严谨地厘清矿区重金属污染的来源及主要特征,继而对物理、化学、生物及联合原位修复技术的原理、技术要点、适用范围予以逐类解析,再讨论影响修复效果的关键因素,客观分析现有技术的不足及今后研究方向,由此为矿区重金属污染土壤的科学治理及生态恢复提供理论支撑。

[关键词] 矿区; 重金属污染; 原位修复技术; 植物修复; 固化稳定化

中图分类号: J522.3 文献标识码: A

Research on In-Situ Remediation Technologies for Heavy Metal-Contaminated Soils in Mining Areas

Jinyong Lei^{1,2}

1 China Nonferrous Metals (Guilin) Geology And Mining Co.,Ltd.

2 Guangxi Key Laboratory of Environmental Pollution Control Theory and Technology

[Abstract] Heavy metal pollution generated during mineral development is a prominent problem that restricts the sustainable development of the ecological environment in mining areas and endangers human health. Soil heavy metal pollution in mining areas has typical characteristics such as easy accumulation, difficult degradation, strong concealment, and prominent composite pollution. Therefore, its treatment has become a research hotspot in the field of environmental science. In situ remediation technology is more valuable for promotion and application compared to ex situ remediation because it does not require large-scale soil transportation, has minimal ecological disturbance, and is easy to control in cost. To this end, this article first systematically and rigorously clarifies the sources and main characteristics of heavy metal pollution in mining areas. Then, the principles, technical points, and scope of application of physical, chemical, biological, and combined in-situ remediation technologies are analyzed category by category. The key factors affecting remediation effectiveness are discussed, and the shortcomings of existing technologies and future research directions are objectively analyzed. This provides theoretical support for the scientific treatment and ecological restoration of heavy metal polluted soil in mining areas.

[Key words] mining area; heavy metal pollution; in situ repair technology; plant restoration; solidification stabilization

1 引言

矿产开采、选矿与冶炼活动导致重金属向土壤迁移富集,形成大范围污染。矿区重金属污染具有面积广、程度深、复合共存、难降解等特点,长期存在会破坏土壤肥力、抑制植物生长,并通过食物链威胁人体健康。

土壤修复分为原位与异位两类。异位修复需挖运污染土壤

至专门场地处理,虽短期效果好,但工程量大、成本高、易造成二次污染,不适宜大面积矿区治理。原位修复以“原地治理、微创干预”为理念,不搬运土壤,能最大限度保留土壤原有结构与功能,兼顾治理效果与生态效益,已成为矿区重金属污染治理的主流方向。因此,系统研究原位修复技术的适用条件与优化路径,对矿区生态修复及土地可持续利用具有重大意义。

2 矿区重金属污染的来源与特征

2.1 污染来源

矿区土壤重金属污染以人为因素为主,集中于矿产开发全流程,核心分为三类:一是采矿时,矿石开采、破碎产生的粉尘与废水,通过大气沉降、地表径流进入土壤;二是选矿环节,含重金属的选矿药剂、尾矿废水直接排放,加速重金属累积;三是冶炼时,废气、废渣无序排放,使重金属在矿区及周边扩散。此外,矿山废弃物长期堆放,经雨水淋溶会缓慢释放重金属,形成长期污染。

2.2 污染特征

矿区重金属污染的特征与矿产开发模式、土壤性质密切相关,核心表现为四点:其一,复合污染显著,矿区土壤中往往同时存在铅、锌、镉、砷等多种重金属,且不同重金属之间可能产生协同毒性,加剧污染危害;其二,隐蔽性强、难降解,重金属进入土壤后,会与土壤颗粒、有机质结合,形成稳定的结合态,难以通过自然过程降解,污染持续时间长;其三,空间分布不均,受采矿、选矿、冶炼场地分布的影响,矿区土壤重金属污染呈现“点源集中、面源扩散”的特点,污染浓度从污染源向周边逐渐降低;其四,生物有效性差异大,不同形态的重金属对植物、微生物的毒性不同,其中可交换态、碳酸盐结合态重金属的生物有效性较高,对生态环境的威胁更为突出^[1]。

3 矿区重金属污染土壤原位修复技术分类及原理

当前,矿区重金属污染土壤原位修复技术已形成物理、化学、生物三大体系,各类技术基于不同的作用原理,针对不同污染场景具有各自的优势与局限,联合修复技术则通过技术融合,弥补单一技术的不足,提升治理效果。

3.1 物理原位修复技术

物理原位修复技术以物理手段改变重金属在土壤中的赋存状态或空间分布,核心是降低重金属的生物有效性,无需改变重金属的化学性质,具有操作简便、见效快的特点,其中客土法是应用最广泛的技术之一。客土法的核心原理是向污染土壤中添加一定量的清洁土壤,充分混匀后降低土壤中重金属的浓度,或通过覆盖清洁土壤,减少重金属与植物根系的接触,从而减轻污染危害。

由于客土选择必须因地制宜、就地取材,因此宜优先选用黏重或有机质含量高的土壤,厚度一般不宜小于15厘米,用量则要根据原污染土壤及客土颗粒组成、污染浓度予以合理估算。故此该技术很自然地适用于移动性差的重金属污染及浅根植物种植区,能快速、有效地改善污染状况,但其成本较高,适用范围有限,宜用于小面积快速修复,且使用时要注意使客土与原土壤的理化性质彼此协调,切忌破坏原有生态结构。

3.2 化学原位修复技术

化学原位修复技术通过向土壤中添加化学药剂,与土壤中的重金属发生化学反应,改变重金属的化学形态,使其转化为稳定态、低毒性或易去除的形态,核心包括固化/稳定化技术、化学淋洗技术等,其中固化/稳定化技术因成本低、易规模化,成为

矿区重金属污染土壤修复的核心化学技术。

固化/稳定化技术的原理是向污染土壤中添加固化剂、稳定剂,通过螯合、离子键合、沉淀、吸附等物理化学作用,将重金属固封为结构完整、低渗透性的固化体,或转化为化学性质不活泼的形态,降低重金属在环境中的迁移与扩散能力。该技术的核心在于药剂的选择,需根据土壤重金属种类、污染程度及土壤理化性质,选择高效、环保、低成本的药剂,常用的固化剂包括水泥、磷酸盐等,稳定剂包括石灰、沸石等。

与其它技术相比,固化/稳定化技术治理周期短、适用范围广,能很好地处理各种重金属污染,成本低,也有利于规模化推广,但是,该技术并未彻底去除重金属,只是改变了其化学形态,因此必须对固化体的长期稳定性予以严格监测,防止二次污染。另外,药剂用量、搅拌均匀程度、养护条件都直接影响修复效果,故宜先做小试、中试确定最佳参数^[2]。

3.3 生物原位修复技术

生物原位修复技术以土壤中的植物、微生物为核心,利用生物的吸收、转化、降解能力,降低土壤中重金属的含量或生物有效性,具有环境友好、生态效益突出、成本低廉的优势,是当前绿色修复技术的研究热点,主要包括植物修复技术与微生物修复技术,其中植物修复技术应用最为广泛。

植物修复技术的核心原理是利用特定植物(超富集植物)对土壤中重金属的选择性吸收、富集能力,将重金属吸收并转运至植物地上部分,通过收割植物将重金属从土壤中移除,同时也可通过植物根系的分泌物,改变重金属的形态,降低其生物有效性。植物修复技术主要分为提取、稳定、挥发、转化四种类型,其中提取修复是最常用的方式,适用于可移动性较强的重金属污染土壤。

超富集植物筛选是植物修复的关键,需结合野外考察与室内实验,以富集系数和转运系数为核心指标,优先选择生长快、生物量高、富集能力强、适应性广的植物,蜈蚣草、印度芥菜是常用高效品种。土壤pH值、有机质含量、植物特性及外界温湿度,均会影响修复效果,可通过调节土壤pH、添加改良剂、调控微生物群落提升效率。

微生物修复技术是以微生物的代谢作用为基础,将土壤中重金属转化为低毒性、易挥发或可固定的形态,因而能切实降低重金属的生物有效性。具体而言,微生物可通过吸附、沉淀、氧化还原诸种方式改变重金属的化学形态,更有甚者,某些微生物能与植物形成共生关系,直接促进植物对重金属的吸收,故而该技术修复效率高,又无二次污染。不过,微生物的存活、繁殖对土壤pH值、温度、湿度等环境因素十分敏感,因此目前微生物修复技术尚处在实验室研究及小规模应用阶段^[3]。

3.4 联合原位修复技术

由于单一的原位修复技术不能很好地解决矿区复合重金属污染、大面积污染的治理问题,故联合原位修复技术应运而生,即把两种或多种修复技术合理、有层次地结合起来,充分发挥各技术之长,做到协同增效,因此也成了近年来矿区土壤修复技术

最明确、最成熟的发展趋势。典型的联合修复模式有植物-微生物联合修复、化学-植物联合修复、固化-植物联合修复等。

植物-微生物联合修复是把超富集植物与功能微生物结合起来,让微生物改善土壤环境、促进植物生长,因而提高植物对重金属的吸收能力,又让植物为微生物提供生长必需的营养物质,故能很好地形成协同修复效应。化学-植物联合修复是以少量化学改良剂调节土壤pH值,活化土壤中重金属,促进其被植物吸收,且由于化学药剂用量极小,因此对生态环境的影响极小。固化-植物联合修复先用固化/稳定化技术降低重金属的迁移性,之后种植超富集植物逐步移除土壤中重金属,真正把短期稳定与长期修复两者结合起来。因此联合修复技术能弥补单一技术的种种不足,修复效率高、稳定性好,十分适合于复杂矿区重金属污染的治理^[4]。

4 矿区重金属污染土壤原位修复技术的影响因素

矿区重金属污染土壤原位修复效果的好坏,不仅取决于修复技术的选择,还受到土壤自身特性、修复技术参数及外界环境条件的综合影响,明确各类影响因素,可为修复技术的优化与推广提供依据。

土壤自身特性是基础影响因素,主要包括pH值、有机质含量、质地及重金属形态。酸性土壤中重金属多为可交换态,生物有效性高,利于植物吸收与药剂反应;碱性土壤中重金属易沉淀,生物有效性低但不利于植物吸收。土壤有机质可固定重金属、提供营养,质地则影响重金属迁移与吸附能力,黏质土壤吸附性强,砂质土壤则相反。

由于修复技术参数是影响修复效果的根本因素,而不同修复技术有各自明确、独立的关键参数,因此可以总结:固化/稳定化技术中药剂的种类、用量、搅拌均匀程度及养护时间直接决定重金属固化效果,植物修复技术中所选超富集植物的品种、种植密度及生长周期影响重金属的吸收及移除效率,联合修复技术中各修复技术的搭配比例及实施顺序决定了协同修复效应。合理优化技术参数有利于降低成本又提高修复效率。

外界环境条件可以归纳为温度、湿度、光照,其中适宜的条件有利于植物生长及微生物代谢,因此有利于提高生物修复的效率,而极端温湿度、干旱洪涝都会抑制植物生长、不利微生物生存,从而直接降低修复效果。与此相关的是,矿区周边水文、气象条件也影响重金属迁移扩散^[5]。

5 研究结论与展望

5.1 研究结论

矿区重金属污染土壤原位修复技术是解决矿区生态问题成熟可行的手段,具有生态扰动小、成本可控、利于规模化推广等优势。物理技术见效快但成本高、适用范围有限;化学技术成本低、易规模化但不能彻底去除重金属,需长期监测;生物技术

环境友好但修复周期长、受环境因素影响大。联合修复技术整合各技术优势,是复杂矿区污染修复的极佳方向。

由于土壤特性、技术参数及环境条件均直接影响修复效果,今后应从高效修复材料研发、协同机制厘清、长效监测体系建立、工程化应用推进等方面系统优化该技术,为矿区土壤治理与生态恢复提供可靠支撑,实现土地资源可持续利用与生态文明建设协调发展。

5.2 展望

当前矿区重金属污染土壤原位修复技术虽取得了一定的研究进展,但仍存在诸多不足:单一修复技术的局限性突出,联合修复技术的协同机制尚未完全明确;高效修复材料(超富集植物、固化剂、微生物菌株)的筛选与培育难度较大,修复效率有待提升;修复技术的长效性不足,部分技术存在二次污染的风险;修复成本与工程化推广之间存在矛盾。

未来的研究应聚焦于以下几个方向:一是加强高效低成本修复材料的研发与培育,筛选适应性更强、富集能力更高的超富集植物,开发环保、高效的固化剂与微生物菌株;二是深入研究联合修复技术的协同机制,优化技术搭配与工艺参数,提升修复效率与稳定性;三是加强修复技术的长效性研究,建立长期监测体系,防范二次污染风险;四是推动修复技术的工程化应用,优化修复工艺,降低修复成本,实现技术的规模化推广;五是完善矿区土壤污染修复的政策与标准,为修复技术的应用提供制度保障,推动绿色矿山建设与生态文明发展。

[基金项目]

广西科技计划项目(桂科FN2600640467,桂科AD25069074)。

[参考文献]

- [1]李京芳,郭婷,李叶欢.有色金属矿区重金属污染土壤的植物修复技术研究[J].农业开发与装备,2026,(01):75-77.
- [2]刘洋,王道涵.矿区土壤重金属污染评价与生态修复技术研究进展[J].安徽农业科学,2025,53(24):16-20.
- [3]史雁冰,刘冰权,李淑梅,等.金属矿区土壤重金属污染生态风险评价及修复技术[J].中国地质,2026,53(2):551-574.
- [4]曾德华,卢李一宁,郭尚其,等.固化稳定化技术对广西某铅锌矿废矿区重金属污染土壤长效修复效果研究[J].生态与资源,2025,(04):43-45.
- [5]陈英.铅锌矿区土壤重金属污染及生态修复技术研究进展[J].中国战略新兴产业,2024,(32):122-124.

作者简介:

雷金勇(1981--),男,广西玉林人,高级工程师/本科,研究方向:环境工程与研究,环境影响评价,矿山采选治重金属污染修复,环保材料,工程咨询。