

土壤重金属污染修复技术的工程应用研究

张宝同

济宁市泗水生态环境监控中心

DOI:10.32629/eep.v8i11.2946

[摘要] 为解决土壤重金属污染引发的土壤安全危机与生态退化问题,破解修复工程中技术适配不足、成本管控困难、二次污染风险突出、长效性保障欠缺等瓶颈,聚焦土壤重金属污染修复技术工程应用展开研究。梳理物理化学、生物、联合三类修复技术的核心特征及工程适配场景,深入剖析工程应用关键制约因素,提出精准化技术选型、全流程成本管控、全链条二次污染防控、一体化长效性提升四大优化策略,构建修复技术应用-制约因素-优化路径的完整逻辑框架,以期为土壤重金属修复工程实践、技术推广落地及行业规范化发展提供参考。

[关键词] 土壤重金属污染; 修复技术; 工程应用; 制约因素; 优化策略

中图分类号: Q938.1+3 **文献标识码:** A

Engineering Application Research on Soil Heavy Metal Pollution Remediation Technology

Baotong Zhang

Jining Sishui Ecological Environment Monitoring Center

[Abstract] To address the soil safety crisis and ecological degradation caused by heavy metal pollution in soil, and to break through the bottlenecks in remediation projects such as insufficient technical adaptation, difficult cost control, prominent risks of secondary pollution, and lack of long-term guarantee, research is focused on the engineering application of soil heavy metal pollution remediation technologies. Sort out the core features and engineering adaptation scenarios of the three types of remediation technologies: physical and chemical, biological, and combined. Deeply analyze the key constraints of engineering application. Propose four optimization strategies: precise technology selection, full-process cost control, full-chain secondary pollution prevention and control, and integrated long-term improvement. Construct a complete logical framework of remediation technology application - constraints - optimization paths. With the aim of providing references for the practical application of soil heavy metal remediation projects, the promotion and implementation of related technologies, and the standardized development of the industry.

[Key words] Soil heavy metal pollution Repair technology; Engineering application Constraints; Optimization strategy

引言

土壤作为生态系统核心载体与土地资源核心构成,重金属污染引发的土壤质量退化、农产品安全隐患、地下水污染等连锁问题,已成为制约生态环境保护、粮食安全保障与高质量发展的突出瓶颈。当前,我国深入推进土壤污染防治行动,锚定“筑牢土壤生态安全屏障”目标,统筹污染治理与生态修复,对重金属污染修复工程的适配性、经济性与长效性提出更高要求。现有修复技术在工程落地中仍面临场景适配不足、成本高企、二次污染防控薄弱等现实难题,制约规模化推进。本文聚焦土壤重金属污染修复技术工程应用,梳理技术适配规律、剖析核心制约因素、提出优化策略,为提升修复工程实效、推动土壤污染治理

提质增效提供支撑。

1 土壤重金属污染修复核心技术类型及工程适配性

1.1 物理化学修复技术及工程适配

物理化学修复技术以技术成熟度高、修复周期短、重金属去除效率显著为核心特征,精准适配复杂重度污染场地的工程修复需求,其核心逻辑是通过物理迁移、化学转化等方式改变土壤中重金属的存在形态或空间位置,降低其生物有效性与迁移风险。固化稳定化技术是工矿场地重金属固定工程的优选技术,通过向污染土壤中投加水泥、石灰、磷酸盐等固化剂,与重金属离子发生化学反应生成稳定的化合物,形成致密晶格结构锁定重金属,有效阻止其向地下水、农作物迁移,适配冶炼厂、矿山

尾矿库等重金属浓度高、成分复杂且迁移风险突出的场地。土壤淋洗技术依托淋洗剂的络合、螯合作用,剥离土壤颗粒表面吸附的重金属离子,适配土壤渗透性较好、重金属以可交换态、碳酸盐结合态为主的高浓度污染场地,尤其适用于需快速降低土壤重金属总量的应急修复工程。

1.2 生物修复技术及工程适配

生物修复技术以环境友好性强、修复成本低廉、无二次污染风险为显著优势,聚焦中低浓度重金属污染场地的长效修复需求,核心是借助土壤生物体系的代谢活动转化、吸收或富集重金属,实现土壤生态功能的同步恢复。植物修复技术以超富集植物为核心载体,通过植物根系吸收、转运并富集土壤中的重金属,待植物生长成熟后收割处置即可降低土壤重金属含量,适配大面积轻度污染农田、城郊绿地等场地的修复工程,其修复过程不破坏土壤结构、不影响土壤耕作功能,能同步实现重金属修复与土壤生态维持,契合农田生态保护与农业安全生产的双重需求^[1]。微生物修复技术利用细菌、真菌等功能微生物的代谢作用,将土壤中高毒性重金属离子转化为低毒性形态,或通过微生物胞外分泌物吸附重金属,适配废弃矿区、封闭性工业场地等中低浓度重金属污染场地的改良工程,尤其适用于土壤理化性质较差、需同步提升土壤肥力的污染场地。

1.3 联合修复技术及工程适配

联合修复技术通过整合不同类型修复技术的优势,形成功能互补、效能协同的修复体系,专门适配复合型重金属污染场地、高难度污染场地的高效修复需求,核心是规避单一技术的局限性,实现修复效率、生态安全性与工程经济性的平衡。物理化学-生物联合修复模式是复杂污染场地综合修复工程的核心选择,通过物理化学技术快速降低土壤重金属浓度至中低水平,再依托生物修复技术长效净化残留重金属、修复土壤生态,例如先采用淋洗技术剥离高浓度重金属,后续接种功能微生物修复土壤结构、降解残留重金属,适配冶炼场地、化工园区等重金属浓度高、土壤理化性质恶劣的复合型污染场地。不同物化技术联合修复模式聚焦高难度污染场地的深度修复,通过两种及以上物理化学技术的协同作用突破单一技术瓶颈,如固化稳定化技术与淋洗技术联合,先通过淋洗去除易迁移的重金属,再通过固化稳定化固定残留重金属,适配重度复合污染场地的深度净化工程。

2 土壤重金属修复工程应用关键制约因素

2.1 修复技术与工程场景适配性不足

修复技术与工程场景适配性不足,本质是技术选型未精准匹配污染特征与场地条件,直接抑制工程修复效能的充分释放。不同污染土壤的质地、pH值、有机质含量存在显著差异,这些理化性质直接影响修复技术的作用效率,比如适用于砂质土壤的淋洗技术,在黏质土壤中会因渗透受阻大幅降低效果。污染程度的差异进一步加剧适配偏差,重度污染场地需高效快速的物化技术,中轻度污染场地更适配低成本生物修复技术,若技术选型与污染程度错位,会造成修复不彻底或资源浪费。耕地、矿山等

特殊场地有专属功能需求,耕地修复需保障土壤耕作性,矿山修复需兼顾生态重建,现有技术多聚焦重金属去除,未能充分适配这些场地的特殊要求,导致适配性受限。

2.2 工程实施成本管控难度大

工程实施成本管控难度大,核心是高投入与低效益的失衡关系,严重制约修复工程的规模化推进。修复工程的核心成本集中在材料与设备,优质固化剂、高效淋洗剂等核心材料价格偏高,电动修复仪、土壤淋洗设备等专用设备购置与维护成本高昂,构成成本管控的首要障碍^[2]。施工工艺的复杂性直接推高人力成本,低渗透土壤修复需增设预处理工序,复合型污染修复需多工艺衔接,工序增多导致人力投入增加、施工周期延长。修复后土壤资源化利用不足进一步拉高综合成本,多数工程仅完成重金属去除,未对修复后土壤进行改良再利用,土壤处置与运输成本叠加,导致工程经济效益偏低。

2.3 工程二次污染风险防控薄弱

工程二次污染风险防控薄弱,根源是修复全流程风险管控机制缺失,直接威胁修复工程的环境安全性。化学修复剂的不当使用会引发土壤理化性质恶化,部分化学淋洗剂、固化剂会改变土壤pH值、破坏土壤微生物群落,导致土壤肥力下降,形成新的土壤生态问题。修复废弃物处置环节存在明显漏洞,淋洗废水、固化废渣等废弃物若未经过无害化处理直接排放,会造成重金属二次迁移,污染周边水体与土壤。生物修复过程中存在潜在风险,功能微生物代谢产物可能改变土壤化学环境,部分微生物还可能与本土生物竞争资源,破坏土壤原有生态平衡,这些风险均未得到有效防控。

2.4 修复工程长效性保障不足

修复工程长效性保障不足,核心是修复效果缺乏长期稳定性,短期达标与长期安全的矛盾突出,影响工程修复质量。修复后土壤中重金属易再次活化,部分固化稳定化处理的重金属,在土壤pH值、湿度变化等外界条件影响下,会重新转化为可交换态,再次具备生物有效性及迁移性^[3]。修复工程与土壤生态系统协同性不足,多数工程仅聚焦重金属去除,忽视土壤微生物群落、有机质含量等生态指标的修复,导致土壤生态功能难以恢复,无法形成长效自我净化能力。缺乏完善的长效监测与维护机制,工程验收后未开展持续跟踪监测,重金属活化、土壤退化等问题无法及时发现,后续维护措施缺失,导致修复效果难以长期维持。

3 土壤重金属修复工程优化实施策略

3.1 精准化修复技术选型策略

精准化修复技术选型的核心是建立“场地诊断-技术匹配-方案优化”的闭环体系,通过精准对接污染特征与场地需求,最大化提升工程修复效能与资源利用效率。首先需构建全面的污染场地特征诊断指标体系,不仅要监测土壤中重金属的总量,更要精准分析其存在形态、土壤理化性质,同时明确场地功能定位与修复目标,为技术选型提供精准依据。在此基础上,建立修复技术-场地类型的适配决策模型,明确不同技术的适用边界,比

如砂质土壤高浓度污染适配淋洗技术、黏质土壤污染适配电动修复技术、农田污染适配植物修复技术。进一步优化技术方案,单一技术需针对性调整关键参数,如固化剂投加量、植物种植密度;联合技术需科学设计组合顺序与衔接流程,如先采用物化技术快速降污、再用生物技术长效净化,确保技术组合既发挥各自优势,又规避协同冲突,实现修复效果与工程适配性的双重提升。

3.2 工程成本优化管控策略

工程成本优化管控需立足全流程视角,通过技术创新、工艺简化与资源循环,实现修复成本与工程效益的动态平衡,破解规模化推进的成本瓶颈。核心路径之一是强化低成本高效修复材料与设备的研发应用,聚焦现有高价材料的替代方案,比如研发工业废渣改性固化剂、生物基淋洗剂等低成本材料,降低核心材料采购成本;优化专用设备设计,开发小型化、多功能集成修复设备,减少设备购置与维护费用^[4]。同步简化施工工艺流程,结合场地特征优化施工工序,比如低渗透土壤修复可提前增设土壤改良预处理环节,避免后续工序返工;复合型污染修复采用一体化施工设备,减少工序衔接时间与人力投入。更要推动修复后土壤的资源化利用,根据修复后土壤质量等级,针对性改良其理化性质,使其适配绿化用土、复垦用土等需求,降低土壤处置与运输成本,同时挖掘工程附加价值。通过材料替代、工艺优化与资源循环的多重举措,构建全流程成本管控体系,在保障修复质量的前提下,最大限度降低单位面积修复成本。

3.3 二次污染风险防控策略

二次污染风险防控需构建“源头管控-过程监测-末端处置”的全链条防控体系,从风险源头规避、过程阻断到末端治理,全方位保障修复工程的环境安全性。源头管控聚焦修复材料的环保性筛选,优先选用环境友好型、可降解的修复材料,如生物固化剂、天然淋洗剂,避免使用易引发土壤酸化、微生物群落破坏的化学药剂;对必须使用的化学材料,严格控制投加量与使用范围,降低其对土壤生态的负面影响^[5]。过程监测需建立实时动态监测机制,重点跟踪修复过程中重金属的迁移转化规律、土壤理化性质变化、修复剂残留情况,同时监测周边水体、大气中的重金属含量,及时发现风险隐患。末端处置需规范修复废弃物的处理流程,淋洗废水需经过沉淀、吸附等无害化处理达标后排放,固化废渣需进行稳定性检测,符合标准后方可处置或资源化利用;生物修复产生的植物残体、微生物载体,需经过集中收集、无害化处理,避免重金属二次富集迁移。

3.4 修复工程长效性提升策略

修复工程长效性提升需打破“重修复、轻维护”的传统模式,构建“修复-监测-维护”一体化体系,通过技术优化、生态

重构与机制保障,实现修复效果的长期稳定。技术层面需优化修复工艺提升重金属固定稳定性,比如改进固化剂配方,增强其与重金属的结合强度,降低外界环境对重金属形态的影响,避免修复后重金属再次活化;对生物修复技术,可通过接种功能微生物、优化植物群落配置,提升生物体系对重金属的持续富集与转化能力。同步推进土壤生态系统修复与重建,修复过程中同步添加有机肥、微生物菌剂,提升土壤有机质含量,恢复土壤微生物群落多样性,改善土壤结构,构建具备自我净化能力的土壤生态系统,从根本上增强土壤对重金属的缓冲能力。建立长期监测与动态维护机制,工程验收后持续跟踪监测土壤中重金属形态、土壤理化性质、生态指标,监测周期覆盖数年甚至数十年;制定常态化维护方案,定期补充修复材料、抚育修复植物、调控土壤环境,及时应对重金属活化、土壤退化等问题,确保修复效果长期稳定,实现土壤生态功能的可持续恢复。

4 结语

土壤重金属修复工程是守护土壤生态安全、保障土地资源可持续利用的核心抓手,更是推进生态环境保护与高质量发展的重要支撑。本文系统梳理不同类型修复技术的工程适配规律,精准定位工程应用中的核心梗阻问题,针对性提出兼具科学性与实操性的优化实施策略,厘清技术效能与工程需求的适配逻辑、问题破解与长效发展的内在关联。当前修复工程仍面临技术协同不足、生态适配性待提升等挑战,未来需进一步强化低成本高效技术研发、完善全流程管控体系、深化技术与生态的协同融合。持续推动修复工程规范化、规模化推进,方能筑牢土壤生态安全屏障,为土地资源永续利用、生态环境持续改善提供坚实保障。

[参考文献]

- [1]王黎彬,马振萍.土壤重金属污染钝化修复技术研究综述[J].青海环境,2024,34(04):189-194+210.
- [2]孙玉阳,谭涛.基于多评价因子的土壤重金属污染生态环境评价方法研究[J].环境科学与管理,2024,49(12):174-179.
- [3]何磊.土壤重金属污染修复技术及环境风险评估[J].清洗世界,2024,40(11):184-186.
- [4]崔保玉.锰矿区土壤重金属污染风险评估与生态监测研究[J].中国资源综合利用,2024,42(11):167-170.
- [5]张中桥.土壤重金属污染监测技术及其数据处理方法探究[J].皮革制作与环保科技,2024,5(21):93-95+107.

作者简介:

张宝同(1968--),男,汉族,山东省济宁市人,工程师,大学本科,研究方向:环境监测。