

重金属污染土壤原位修复技术应用与效能提升

李瑞栋

利诚检测认证集团股份有限公司

DOI:10.32629/eep.v9i7.3255

[摘要] 工业生产、矿产开采与集约化农业发展过程中,大量重金属持续进入土壤环境,引发大面积土壤污染问题,对耕地生产能力、区域生态平衡以及人体健康造成多重威胁。原位修复技术对原状土壤扰动较小,治理成本可控,能够适应不同场地条件,现阶段已成为重金属污染土壤治理的主流方式。

[关键词] 重金属污染; 土壤修复; 原位修复; 技术应用

中图分类号: X53 文献标识码: A

Application and Performance Enhancement of In-Situ Remediation Technologies for Heavy Metal-Contaminated Soils

Ruidong Li

Licheng Testing and Certification Group Co., Ltd.

[Abstract] During industrial production, mineral extraction, and the development of intensive agriculture, large quantities of heavy metals continuously enter the soil environment, causing widespread soil contamination and posing multiple threats to arable land productivity, regional ecological balance, and human health. In-situ remediation technologies cause minimal disturbance to the original soil conditions, feature manageable remediation costs, and can adapt to various site conditions; they have thus become the mainstream approach for remediating heavy metal-contaminated soil at this stage.

[Key words] heavy metal contamination; soil remediation; in-situ remediation; technological application

1 引言

土壤是支撑农业生产、维持陆地生态系统稳定的基础性资源。国内城镇化与工业化快速推进以来,矿产冶炼、化工加工、农田污水灌溉、农资过量使用等生产活动,使得镉、铅、汞、铬、铜、锌等重金属不断在土壤中累积。重金属难以在自然环境中降解,具备隐蔽性强、易生物富集、迁移周期长等特点,不仅会破坏土壤团粒结构、降低土壤肥力、抑制作物正常生长,还能通过土壤—作物食物链进入人体,长期积累下会诱发各类健康问题。同时,土壤中的重金属会随雨水下渗迁移,污染浅层地下水,对区域生态环境可持续发展造成不利影响。

目前土壤重金属修复技术主要分为异位修复与原位修复两类。异位修复需要对污染土壤进行开挖、转运和异地处理,施工过程对场地破坏大、整体造价高、施工周期长,仅适合小范围、高污染程度的场地治理。与之相比,原位修复无需扰动原有土壤结构,通过就地转化、固定、吸收等方式降低重金属的迁移能力和生物可利用性,对场地生态干扰小,治理成本更低,能够适配大面积农田、工矿遗留场地、废弃矿区等多种污染场景,实际应用范围更广。2023年生态环境部发布《关于促进土壤污染风险管控和绿色低碳修复的指导意见》,也强调“一地一策”优先采

用原位修复等低碳技术,而作为原位修复类型之一的生物修复技术,还具备成本低、可大面积推广的优势,进一步印证了原位修复的实用价值。

2 常见原位修复技术及应用现状

2.1 化学原位钝化修复

化学原位钝化是目前土壤重金属治理中应用最普遍的技术。该技术通过向污染土壤施加钝化材料,经物理化学反应将土壤中活性高的重金属转化为性质稳定、毒性较低的残渣态,降低重金属环境风险。技术操作简单、见效快,适用于多数中轻度污染土壤,广泛用于农田耕地和普通工业污染场地修复。

常用钝化材料分为无机材料和有机材料两类。无机材料包含生物炭、黏土矿物、磷基材料、铁基氧化物等,不同材料可通过不同反应固化对应重金属,适配多类污染场景。有机材料以腐殖酸、改性秸秆生物炭、有机肥为主,可络合固定重金属,还能补充土壤有机质、改善土壤结构,实现修复培肥。

长期工程实践发现,化学钝化技术短期修复效果稳定,但长期治理效果存在不确定性:常规钝化材料稳定性有限,土壤环境变化和农事、微生物活动都可能导致固化重金属重新活化,造成

污染反弹;部分无机钝化材料过量施用易引发土壤板结、酸碱失衡,破坏土壤原有生态结构,不利于土地长期利用。

2.2 植物原位修复

植物原位修复属于绿色生态修复技术,依托超富集植物吸收转运土壤重金属至地上组织,经收割处置后降低土壤重金属含量,包含植物富集、植物固定、植物挥发三种形式,超富集植物富集应用最广。相较于其他治理手段,该技术成本低、场地扰动小、无二次污染,适合大面积轻度污染农田和废弃矿区治理。

现阶段常用超富集植物包括东南景天、蜈蚣草、羽叶鬼针草、黑麦草等,不同植物富集偏好不同:蜈蚣草富集砷效果显著,东南景天可高效吸收镉和锌,黑麦草适配铜、铅污染修复。该技术单位治理成本为100~500元/t,远低于化学修复,可在不中断农田生产的前提下开展原位治理,适配规模化耕地污染修复易于推广。

同时,植物修复短板突出:修复周期偏长,单次修复通常需要2至3年;超富集植物个体矮小、生长缓慢、生物量小,治理效率不高,难以满足快速修复需求,且生长状态易受自然条件影响,极端天气会降低重金属富集量;此外,植物对重金属富集具有选择性,难以应对多重金属复合污染场地,修复效果不理想。

2.3 微生物原位修复

微生物原位修复依靠土壤功能微生物的代谢活动,通过表面吸附、胞外沉淀、氧化还原、络合固定等方式改变重金属存在形态,降低重金属毒性和迁移能力。同时,外源功能微生物的介入可以优化土壤菌群结构,提升土壤自我修复能力。目前常用的修复微生物主要为硫酸盐还原菌、芽孢杆菌、假单胞菌等,这类菌株对镉、铅、镉等重金属具备良好的固化效果,在农田污染治理中具备较好的应用前景。

相关田间试验结果显示,兼性硫酸盐还原菌用于镉污染稻田修复,可在一个作物生长季内显著降低稻米镉积累量,削减效果可达90%以上,修复效果优于常规化学钝化技术,且不会对农田生态造成破坏。微生物修复的优势在于施工扰动极小,能够激活土壤土著微生物,在治理污染的同时恢复土壤生态功能,适配高标准生态农田的修复需求。

2.4 联合原位修复技术

单一修复技术存在明显短板,无法满足复杂复合污染场地治理需求。多种技术协同的联合修复可互补优势,提升修复效率与稳定性,是土壤修复领域研究应用热点,常见模式包括化学-植物联合、植物-微生物联合、改性材料-微生物复合修复等。

植物-微生物联合修复技术体系最为成熟,功能微生物可活化重金属、改善植物根际环境,提升植物吸收效率;植物可为微生物提供养分和定植载体,保障微生物活性。二者协同可将传统植物修复周期缩短至12个月左右,修复效率提升40%以上。柠檬酸淋洗耦合铁基稳定化工艺可同时实现重金属总量削减和毒

性控制,柠檬酸淋洗对镉、铅去除效果优异,研究显示,适宜工艺条件下,污泥中镉、铅的最大去除率分别为91.5%和96.5%,同时稳定化修复可使土壤中镉的浸出率从33.3%降低到14.3%,有效降低生物毒性,适合重度污染场地治理。改性生物炭负载功能微生物复合技术可提升镉、铅、镉固化效果,大幅提升修复长效性。

3 原位修复技术应用现存问题

3.1 单一技术适配范围有限

国内多数重金属污染场地并非单一元素污染,而是多种重金属叠加的复合污染,且不同场地的污染程度、土壤理化性质差异较大。现有单一修复技术都存在明显的应用局限,化学钝化是通过往土壤中加入钝化剂,调节和改变重金属在土壤中的物理化学性质,降低其生物有效性和可迁移性,但只能降低重金属活性,无法有效削减土壤重金属总量;植物修复中虽有超积累植物可吸收积累特定重金属,但整体效率低、对多重金属污染适配性差;微生物修复抗干扰能力弱、效果不稳定,难以应对复杂场地的治理需求,部分场地修复后仍存在重金属超标问题。

3.2 修复长效性不足

大量工程监测数据表明,各类原位修复技术的短期治理效果均可达到标准要求,但长期稳定性难以保障。化学钝化形成的稳定态重金属,会在土壤环境变化、雨水长期淋溶、田间耕作扰动和微生物代谢作用下重新活化,引发污染反弹。植物修复仅能去除土壤浅层重金属,深层残留重金属未得到有效处理,长期存在迁移扩散隐患。微生物菌群会随时间逐渐衰退失活,修复效果无法长期维持,不利于场地长效管控。

3.3 修复材料与工艺适配性不足

现阶段市面上的修复材料通用性较强,针对性不足。针对酸性矿区、盐碱农田、老旧工业场地等特殊场景的专用修复材料研发滞后,部分通用材料施用后会破坏土壤原有结构,降低土壤肥力,引发次生生态问题。同时,国内原位修复施工尚未形成完善的标准化体系,材料施用量、修复周期、施工方式多依据工程经验确定,未结合场地污染特征精准调整。比如作为原位修复方式之一的植物修复,其修复周期一般需要3年以上,若施工中植物根系没清除干净,还会造成更大的污染,这类因缺乏标准化规范导致的问题,造成不同项目修复效果参差不齐,技术推广稳定性不足。

4 原位修复效能提升优化路径

4.1 改良修复材料

针对传统修复材料靶向性弱、稳定性差、易引发生态问题的不足,可通过物理、化学、生物改性方式优化材料结构与性能,研发新型复合功能修复材料。纳米改性、有机-无机复合改性等技术,可制备出纳米羟基磷灰石改性生物炭、铁基-磷基复合钝化材料、微生物负载型材料等新型修复产品。这类材料比表面积更大、吸附固化能力更强,能够同时固定多种重金属,还可以改善土壤孔隙结构、提升有机质含量,兼顾污染治理与土壤生态改良。

实际应用中需结合场地特征匹配专用修复材料,提升治理精准度。酸性矿区污染土壤可选用磷基复配材料,同步实现土壤酸碱调节和重金属沉淀固化;轻度污染农田优先采用生物炭与有机肥复合材料,在钝化重金属的同时改良土壤、保障农耕生产;重度复合污染场地选用纳米改性铁基材料,强化重金属去除与活性管控,从材料层面提升修复效果与长效性。

4.2 优化多技术联合体系

为解决单一技术治理不彻底、适配性差的问题,可构建“材料钝化-微生物强化-植物富集”一体化联合修复体系,通过多技术协同提升治理效果。针对中轻度农田复合污染土壤,先利用改性钝化材料降低重金属活性,规避短期迁移风险;再通过功能微生物优化根际环境、活化惰性重金属,提升植物吸收效率;最后依靠超富集植物移除土壤重金属,降低总量,缩短修复周期。

对于重度工业和矿区污染场地,可采用“原位淋洗+稳定化固化+微生物调控”复合工艺。先通过原位淋洗削减土壤重金属总量,降低污染负荷,如铬重度污染土壤可去除70%-80%的铬;再施用复合钝化材料固定残留活性重金属,控制污染扩散,处理后铬残留量可降至160mg/kg以下,符合土壤环境标准;最后接入功能微生物菌群,修复土壤微生态,同步实现污染治理与生态恢复。该工艺的原位淋洗技术已有成熟装备,德森淋洗装备已应用于多个重金属污染修复项目,累计处理量超100万吨,效果良好,同时可结合场地特征优化工艺参数,形成标准化施工方案,提升工程适配性。

4.3 精准调控场地环境

植物修复与微生物修复对场地环境敏感度较高,环境波动是造成修复效果不稳定的主要原因。开展修复施工前,需全面勘察场地条件,精准检测土壤酸碱度、含水率、有机质含量、重金属形态及土著菌群结构等指标,结合检测结果制定个性化修复方案,避免统一化施工带来的效果偏差。修复过程中,根据土壤环境变化动态调整管控措施,通过酸碱调节剂、水肥管控等方式维持土壤稳定环境,为功能微生物定植、超富集植物生长提供适

宜条件。利用高通量测序技术监测土壤菌群结构变化,及时补充衰退菌群、调整菌群配比,保障微生物修复持续有效。同时,结合气候条件和植物生长规律调整收割、补种节奏,降低极端天气对修复工作的干扰,减少效能损耗。

5 总结

原位修复技术因扰动小、成本低、适用范围广,已成为国内重金属污染土壤治理的主要技术方式。化学钝化、植物修复、微生物修复等单一技术难以独立治理复杂复合污染场地,多技术联合修复可优势互补,提升修复效率与稳定性,是当前土壤修复技术的主要发展方向。现阶段原位修复技术存在复合污染适配性不足、长效治理效果差、施工工艺不规范、后期运维缺失等问题,制约其规模化落地与高质量应用。

未来可从三个方向推进:一是研发生态友好、适配性强、稳定性高的改性修复材料,突破传统材料短板;二是优化多技术联合修复工艺,制定不同污染场景的标准化施工流程,提升工程应用稳定性;三是深化修复机理研究,结合智能监测、微生物组学等前沿技术,实现修复过程精准调控和长效风险管控。

[参考文献]

- [1]冯敬云,聂新星,刘波,等.镉污染农田原位钝化修复效果及其机理研究进展[J].农业资源与环境学报,2021,38(5):764-777.
- [2]毛欣宇,翟森茂,姜小三,等.不同改性生物炭对农田土壤理化性质及铅、镉钝化的影响机制研究[J].环境工程,2023,41(2):113-121+139.
- [3]朱煜.硫酸盐还原菌对重金属污染土壤的处理研究[J].环境污染与防治,2021,43(8):952-955.

作者简介:

李瑞栋(1994--),男,汉族,江西省高安市人,硕士研究生,单位:利诚检测认证集团股份有限公司,职称:工程师,研究方向:固体废物与土壤污染防治。