

土壤重金属污染固化稳定化技术对比研究

刘铁军 梅宏然

承德市生态环境局, 河北省承德市, 067000;

摘要: 本文聚焦土壤重金属污染固化稳定化技术, 详细阐述了不同固化稳定化技术的原理、特点及应用情况。通过对比分析不同技术在处理效果、成本、适用范围等方面的差异, 旨在为土壤重金属污染治理提供科学依据, 以选择更合适、高效的治理技术, 促进土壤生态环境的修复与改善。

关键词: 土壤重金属污染; 固化稳定化技术; 对比分析; 治理策略

DOI: 10.64216/3080-1508.25.03.028

土壤重金属污染已成为全球性的环境问题, 对生态系统和人类健康构成严重威胁。重金属在土壤中具有持久性、难降解性和生物累积性等特点, 会通过食物链传递危害人体健康。固化稳定化技术作为一种常用的土壤重金属污染治理方法, 能够有效降低重金属的迁移性和生物有效性。不同的固化稳定化技术在原理、效果和适用条件等方面存在差异, 因此对其进行对比研究具有重要的现实意义。

1 土壤重金属污染概述

1.1 土壤重金属污染的来源

土壤重金属污染的来源主要包括工业活动、农业活动和交通运输等^[1]。工业生产过程中, 如采矿、冶炼、电镀等, 会产生大量含重金属的废水、废渣和废气, 这些废弃物未经有效处理直接排放到环境中, 导致周边土壤重金属含量超标。农业活动中, 农药、化肥的不合理使用以及污水灌溉也会使重金属在土壤中累积。此外, 交通运输过程中汽车尾气排放、轮胎磨损等也会向土壤中释放重金属。

1.2 土壤重金属污染的危害

重金属污染对土壤生态系统危害显著, 会干扰土壤微生物的正常活动, 改变其多样性组成, 进而削弱土壤肥力, 影响土地生产力。被污染土壤中的重金属易被植物吸收并逐渐蓄积, 这不仅会阻碍农作物的健康生长, 还会降低农产品品质。更值得警惕的是, 重金属会借助食物链传递, 最终威胁人类健康。像铅元素可能对儿童的神经系统发育产生不良影响, 镉元素则可能损害人体肾脏功能, 还与骨骼健康问题存在关联, 给人体健康带来多方面的潜在风险。

2 固化稳定化技术原理

2.1 固化技术原理

固化技术通过将污染土壤与固化剂充分混合, 借助

物理或化学作用使土壤形成具备特定强度与稳定性的固化体, 以此将重金属禁锢在固化结构内, 抑制其迁移扩散。实际应用中, 水泥、石灰、粉煤灰等是较为常用的固化剂类型。以水泥固化为例, 其主要依靠水泥水化反应生成的水化产物, 将重金属颗粒包裹并镶嵌于密实的矿物骨架中, 构建起稳定的固化结构; 而石灰固化技术则侧重于通过提升土壤 pH 值, 促使重金属离子与氢氧根结合生成难溶性氢氧化物沉淀, 从化学层面降低重金属的溶解迁移能力。这些技术通过不同作用机制实现对重金属的固定, 在土壤污染修复领域发挥着重要作用。

2.2 稳定化技术原理

稳定化技术是通过向污染土壤中添加稳定剂, 使重金属发生化学反应, 转化为低溶解性、低迁移性和低生物有效性的形态^[2]。稳定剂主要包括无机稳定剂和有机稳定剂。无机稳定剂如磷酸盐、硫化物等, 它们可以与重金属形成难溶性的化合物, 如磷酸铅、硫化镉等。有机稳定剂如腐殖酸、生物质炭等, 它们可以通过络合、吸附等作用降低重金属的活性。

3 常见固化稳定化技术对比

3.1 水泥固化技术

水泥固化技术是应用最为广泛的固化技术之一。其优点是固化效果好, 能够显著降低重金属的浸出率, 固化体具有较高的强度和稳定性。同时, 水泥来源广泛, 成本相对较低。然而, 水泥固化也存在一些缺点。水泥的大量使用会增加土壤的碱性, 可能对土壤生态环境造成一定影响。此外, 固化过程中需要消耗大量的水泥, 增加了处理成本和能源消耗。而且, 对于某些重金属如汞, 水泥固化的效果相对较差。

3.2 石灰固化技术

石灰固化技术因操作简便、成本亲民而具备一定应用优势。其核心原理是通过提升土壤 pH 值, 促使重金

属离子形成氢氧化物沉淀,进而降低重金属的迁移活性;同时,石灰对土壤物理性状也有改良作用,可增强土壤压实度,优化结构稳定性。不过,该技术存在明显局限性:固化后的土壤长期稳定性欠佳,随着时间推移,土壤pH值可能逐渐回落,导致已沉淀的重金属重新释放,增加二次污染风险;此外,大量施用石灰易引发土壤板结问题,破坏土壤原有的孔隙结构,致使透气性与透水性下降,对土壤生态功能产生不良影响。因此,在应用石灰固化技术时,需充分考量其短期效益与长期潜在风险,结合场地条件合理控制用量并配套后续监测措施。

3.3 磷酸盐稳定化技术

磷酸盐稳定化技术是通过向土壤中添加磷酸盐,使重金属与磷酸盐反应形成难溶性的磷酸重金属盐。该技术对铅、镉等重金属具有良好的稳定化效果,能够显著降低重金属的生物有效性。而且,磷酸盐对土壤的物理性质影响较小,不会改变土壤的结构和质地。但是,磷酸盐的添加量需要严格控制,过量的磷酸盐可能会导致土壤中磷素流失,造成水体富营养化。

3.4 硫化物稳定化技术

硫化物稳定化技术是利用硫化物与重金属反应形成难溶性的硫化物沉淀^[3]。该技术对多种重金属都有较好的稳定化效果,尤其是对汞、镉等重金属的稳定化效果显著。硫化物稳定化产物具有较高的化学稳定性,在不同的环境条件下都能保持较好的稳定性。然而,硫化物在土壤中容易被氧化,导致重金属重新释放,因此需要采取适当的措施来防止硫化物的氧化。

3.5 生物炭稳定化技术

生物炭是一种富含碳的多孔材料,具有较大的比表面积和丰富的官能团。生物炭稳定化技术是通过生物炭的吸附、络合等作用降低重金属的活性。生物炭可以改善土壤的物理、化学和生物学性质,提高土壤肥力。同时,生物炭的制备原料来源广泛,如农业废弃物、林业废弃物等,具有资源循环利用的优点。但是,生物炭的稳定性受土壤环境条件的影响较大,在不同的土壤类型和环境条件下,其稳定化效果可能会有所不同。

4 固化稳定化技术效果评估

4.1 重金属浸出率

重金属浸出率是衡量固化稳定化技术成效的关键指标,其通过模拟自然环境开展浸出试验,测定修复后土壤中重金属的溶出浓度,以此评估技术对重金属迁移性的抑制能力。一般而言,浸出率越低,表明重金属被固定得越充分,技术效果越理想。不同技术对浸出率的

改善差异显著:水泥固化依靠水化产物的包裹作用,将重金属封存于稳定矿物结构中,能有效降低其溶出风险;磷酸盐稳定化技术则通过与重金属发生化学反应,生成难溶性磷酸盐化合物,从化学层面阻断迁移路径。实际应用中,可根据目标污染物特性与修复需求,选择浸出率控制效果更优的技术方案,以确保土壤中重金属的长期环境安全性。

4.2 土壤物理性质变化

固化稳定化过程可能改变土壤容重、孔隙度、渗透性等物理性质,而科学的技术应用需尽可能降低此类负面影响,维持土壤通气透水性能^[4]。部分技术在修复污染的同时,可对土壤物理结构起到优化作用:如生物炭稳定化技术,其本身具有多孔结构,添加到土壤后能增加孔隙空间,改善通气性与透水性,提升土壤生态功能;而传统固化工艺若使用不当,可能因过度胶结导致土壤板结,破坏原有孔隙结构。因此,在技术选型与工艺设计中,需充分考量材料特性与土壤本底条件,平衡重金属固定效果与土壤物理健康,避免因修复导致土壤功能退化,确保修复后的土壤既能实现污染防控目标,又能维持良好的物理生态性能。

4.3 土壤生物活性

土壤生物活性是反映土壤生态功能的重要指标。固化稳定化技术可能会对土壤微生物的活性和多样性产生影响。一些固化剂如水泥和石灰可能会抑制土壤微生物的生长,而生物炭稳定化技术则可以促进土壤微生物的生长和繁殖,提高土壤生物活性。因此,在选择固化稳定化技术时,需要考虑其对土壤生物活性的影响。

5 固化稳定化技术成本分析

5.1 原材料成本

不同固化稳定化技术的原材料成本存在明显差异。以水泥、石灰为代表的传统固化剂,因价格低廉且来源丰富,在土壤修复中应用广泛。而生物炭、纳米材料等新型稳定剂,由于制备工艺复杂、技术要求高,成本显著高于传统材料,这在一定程度上制约了其大规模推广。实际应用中,需综合考量污染类型、修复目标及场地条件等因素,权衡材料性能与经济性,合理选择性价比高的原材料,在确保修复效果的前提下,尽可能降低技术应用成本,实现环境效益与经济效益的平衡。

5.2 设备和运行成本

固化稳定化技术的应用离不开配套设备与设施,像搅拌机、压实机等都是常见的工艺装备,而设备的采购费用及后续维护开支,往往是总成本控制的关键环节。

除了设备成本,技术运行中的能源消耗、人工成本等也不容忽视——例如水泥固化工艺里,水泥水化反应需消耗大量能源,这类持续性支出会直接推高项目运行成本。实际应用中,需全面评估设备选型的适配性,通过优化设备组合、提升操作效率来降低购置与维护成本;同时,还应关注工艺能耗水平,探索节能技术或可再生能源替代方案,并合理规划人员配置,从多维度综合管控成本,以保障固化稳定化技术在实际工程中的经济性与可行性。

5.3 综合成本评估

在筛选固化稳定化技术时,需全面权衡多重因素。原材料成本、设备投入及运行开销是基础考量——传统材料与设备虽成本较低,但可能在处理效能或环境友好性上存在局限;新型技术或许初期投入较高,却能凭借更优的污染治理效果和更小的生态影响,实现长期效益的提升。此外,技术的环境兼容性亦不容忽视,部分工艺虽短期成本可控,却可能在反应过程中产生二次污染或消耗大量资源,反而增加后续环境治理负担。因此,科学的技术选型需在经济成本与环境效益间寻找平衡点,既要关注当下的资金投入,也要预判长期的生态回报,通过综合评估材料适配性、设备能效、工艺可持续性等维度,选出既符合现实需求又具备长远价值的解决方案。

6 固化稳定化技术的适用范围

6.1 不同重金属污染类型

不同的固化稳定化技术对不同类型的重金属污染具有不同的适用性^[5]。例如,水泥固化对多种重金属都有较好的固化效果,但对汞的固化效果相对较差;磷酸盐稳定化技术对铅、镉等重金属具有良好的稳定化效果;硫化物稳定化技术对汞、镉等重金属的稳定化效果显著。因此,在选择技术时需要根据土壤中重金属的种类和含量来确定。

6.2 不同土壤类型

土壤自身性质如 pH 值、有机质含量、质地等,对固化稳定化技术的实际效果影响显著。不同土壤条件需匹配适宜的修复工艺:酸性土壤中,石灰固化技术可通过提升 pH 值,有效降低重金属离子活性,抑制其迁移扩散;而在有机质含量丰富的土壤里,生物炭稳定化技术更具优势,生物炭能与土壤有机质产生协同作用,通过吸附、络合等机制增强对重金属的固定效果。此外,土壤质地(如黏土、砂土比例)也会影响药剂扩散与反应效率,黏粒含量高的土壤往往需调整固化剂用量以保

证渗透均匀性。因此,开展修复前需深入分析土壤理化特性,针对性选择技术方案,方能最大限度发挥固化稳定化工艺的效能,实现重金属污染的高效治理。

7 结论与展望

7.1 结论

综上所述,不同的土壤重金属污染固化稳定化技术在原理、效果、成本和适用范围等方面存在差异。水泥固化技术处理效果好,但成本较高且可能对土壤环境有一定影响;石灰固化技术成本低,但长期稳定性较差;磷酸盐稳定化技术对部分重金属效果好,但需注意磷素流失问题;硫化物稳定化技术对特定重金属效果显著,但存在氧化风险;生物炭稳定化技术具有改善土壤性质的优点,但稳定性受环境影响较大。在实际应用中,需要根据土壤重金属污染的具体情况,综合考虑各种因素,选择合适的固化稳定化技术。

7.2 展望

未来,土壤重金属污染固化稳定化技术的发展方向主要包括以下几个方面。一是研发新型的固化剂和稳定剂,提高其处理效果和环境友好性。例如,开发纳米材料、生物制剂等新型稳定剂,以提高对重金属的吸附和稳定化能力。二是加强不同技术的联合应用,充分发挥各种技术的优势,提高处理效率和效果。例如,将固化技术和稳定化技术相结合,实现对重金属的双重固定。三是开展固化稳定化技术的长期稳定性研究,建立完善的效果评估体系,确保治理后的土壤长期安全。同时,还需要加强对固化稳定化技术的推广应用,提高公众对土壤重金属污染治理的认识和重视程度。

参考文献

- [1] 吴嘉煜. 重金属污染对荒漠草原土壤微生物活性的影响[D]. 宁夏大学, 2022.
- [2] 李军辉. 基于稻壳灰的中温热处理稳固化垃圾飞灰实验研究[D]. 东南大学, 2019.
- [3] 单晖峰, 陈俊华, 胡浩, 等. 重金属稳定化技术的最新进展及工程实践[C]//环境工程 2017 增刊 2. 北京宜为凯姆环境技术有限公司, 2017: 448-452.
- [4] 杨超. 工业地块中重金属污染土壤典型修复技术研究进展[J]. 广东化工, 2023, 50(19): 134-135+106.
- [5] 庞少浦, 房振宇. 我国土壤污染防治及修复研究[J]. 河南农业, 2016, (19): 14-15.

作者简介: 刘铁军, 出生年月: 1986-08-17, 性别: 男, 民族: 汉, 籍贯: 河北承德, 学历: 大学本科, 职称: (现目前的职称) 初职, 研究方向: 生态环保。