

Research progress on solidification and stabilization technology of heavy metal polluted soil

Dongmei Lai¹ Xiaorui Mu^{2*}

1. Xinjiang Hengzhong Deli Environmental Protection Technology Co., Ltd., Urumqi, Xinjiang, 830000, China

2. Xinjiang Qingfeng Langyue Environmental Protection Technology Co., Ltd., Urumqi, Xinjiang, 830000, China

Abstract

Due to its unique distribution of mineral resources and industrial development pattern, the soil in some areas of Xinjiang is subject to varying degrees of heavy metal pollution, posing a serious threat to ecosystem security and sustainable agricultural development. Solidification stabilization, as the current mainstream soil remediation method, has broad application prospects in the complex soil environment of drought, wind erosion, and salt alkali interweaving in Xinjiang due to its controllable cost and stable treatment effect. By investigating the distribution of typical pollution sources and soil heavy metal migration characteristics in the region, combined with common soil types and climate characteristics in Xinjiang, the effects of different stabilizer materials on fixing pollutants and reducing bioavailability are analyzed. This article systematically summarizes the stabilization technology routes, material ratio principles, and engineering implementation points applicable to Xinjiang region, explores regional remediation models and future research directions, in order to provide theoretical support and technical references for soil pollution control and ecological restoration work in Xinjiang.

Keywords

heavy metal pollution; Soil remediation; Solidification stabilization; Xinjiang region; ecological security

重金属污染土壤固化稳定化技术研究进展

赖冬梅¹ 慕晓瑞^{2*}

1. 新疆恒中德利环保科技有限公司, 中国·新疆 乌鲁木齐 830000

2. 新疆清风朗月环保科技有限公司, 中国·新疆 乌鲁木齐 830000

摘 要

新疆地区因其独特的矿产资源分布和工业发展格局, 部分区域土壤受到不同程度的重金属污染, 严重威胁生态系统安全与农业可持续发展。固化稳定化作为当前主流的土壤修复手段, 因其成本可控、处理效果稳定, 在新疆干旱、风蚀和盐碱交织的复杂土壤环境中具有广泛应用前景。通过调研区域内典型污染源分布与土壤重金属迁移特征, 结合新疆地区常见土质类型和气候特征, 分析不同稳定剂材料在固定污染物、降低生物可利用性方面的作用效果。本文系统梳理了适用于新疆地区的稳定化技术路线、材料配比原则和工程实施要点, 探讨区域化修复模式与未来研究方向, 以期新疆土壤污染治理与生态修复工作提供理论支撑与技术参考。

关键词

重金属污染; 土壤修复; 固化稳定化; 新疆地区; 生态安全

1 引言

新疆作为我国重要的矿产能源开发区和农业生产基地, 受冶炼工业、交通运输、农用化学品等多重因素影响, 部分区域土壤中镉、铅、铬、砷等重金属含量已超过国家土壤环境质量标准限值, 对区域生态环境构成长期潜在风险。由于新疆地区地理跨度大、气候差异显著, 土壤类型包括灰漠土、

盐土、棕钙土等, 重金属在不同类型土壤中的迁移转化过程复杂, 修复难度较高。固化稳定化技术因其工程实施便捷、修复周期短、处理后风险释放低, 成为目前新疆地区应用最为广泛的修复技术路径之一。本文聚焦该地区土壤污染特征与稳定化技术适配问题, 综合分析主流稳定剂材料、作用机制与修复工艺, 为推动区域土壤环境质量提升与绿色发展提供支持。

2 重金属污染土壤的基本特征与环境危害

新疆地区重金属污染土壤主要分布于矿产开采区、冶金加工区、工业集聚区及农用地带。矿区尾矿堆放与废水渗漏易使周边土壤富集铅、镉、铜等重金属。工业区在长期排

【作者简介】赖冬梅(1985-), 女, 中国重庆人, 硕士, 工程师, 从事环保、水保、节能评估研究。

【通讯作者】慕晓瑞(1987-), 女, 中国河南许昌人, 本科, 工程师, 从事环保、水保咨询研究。

放过程中释放多种重金属烟尘与沉降物积聚于表层土壤。农田区域则多因长期使用含重金属的农药、化肥和污水灌溉，导致砷、汞、铬类元素在土壤中逐渐积累。新疆地形复杂、风力强劲、植被稀疏，这些自然因素使污染物在空间上呈现斑块式分布，易在风蚀和水蚀过程中发生迁移扩散，形成由点源转为面源的扩散模式，导致污染区域不断扩大，影响土壤生态系统结构与土壤生产力。风沙运动可将干燥表层的金属尘粒带入大气环境，形成空气中二次污染，并通过沉降作用在更广范围内再度污染土壤。在不同地貌和土地利用条件下，重金属在新疆土壤中的赋存状态与环境行为存在显著差异，导致生态毒性水平波动性强。

3 固化稳定化技术的原理与作用机制

固化稳定化技术是一种将污染土壤中重金属通过物理包裹和化学固定方式转变为低活性形态的原位或异位修复方法。固化是通过稳定剂与污染土体反应形成固结体，增强其物理结构、降低渗透性，减少重金属随水迁移的可能。稳定化则侧重于通过化学反应将重金属转变为难溶、难迁移的低毒形态，从而减少其生物可利用性。两者在实际工程中往往联合使用，达到提高土壤结构强度与降低重金属释放风险的双重目标。在新疆等极端干旱地区，固化作用更有利于提升抗风蚀能力，稳定化过程则需精准匹配土壤类型与污染物性质，确保其在复杂自然环境下的长期修复效果。在新疆地区，干燥环境和强烈温差对材料稳定性和反应活性提出较高要求，因此常采用兼具缓释性和耐候性的材料以确保处理效果稳定。物理与化学过程的协同可实现多路径固定重金属，提高对多种污染物的适应能力，为复杂污染场地的修复提供更具韧性的技术支持。

4 常用固化稳定剂类型及其改良策略

4.1 无机稳定剂：水泥、石灰、磷酸盐等

无机稳定剂因其稳定性高、反应条件明确，在新疆地区重金属污染修复中广泛应用。水泥通过水化反应生成硅酸钙和铝酸钙水合物，不仅固结土体，还可封闭金属离子，降低其可迁移性。石灰具有快速提升土壤 pH 的能力，有助于形成氢氧化物沉淀，抑制金属的活性。磷酸盐则通过生成金属磷酸盐沉淀，使铅、镉等金属稳定于土壤中。这些无机材料适用于新疆多种污染类型土壤，但在高盐、高碱等特殊环境中，需优化材料配比与施用方式，避免次生反应引发二次污染。其工程适应性强、易于批量操作，是目前区域修复中的主力技术路径之一。

4.2 有机稳定剂：腐殖酸、生物炭、树脂类等

有机稳定剂因其良好的络合吸附能力及对土壤结构的改善作用，在新疆重金属污染治理中具有特殊优势。腐殖酸分子结构复杂，富含羧基、羟基等功能团，能有效络合重金属并提高土壤团粒结构稳定性。生物炭具有比表面积大、孔隙丰富等特性，不仅吸附金属离子，还能调节土壤酸碱度、

增强土壤保水性能，特别适用于新疆干旱沙地。树脂类高分子材料在处理高浓度污染或深层土壤方面表现出优越的离子交换性能，适合小范围高强度修复。有机稳定剂的持效期及环境相容性需结合新疆的气候与土壤条件进行长期性评价，以实现高效、安全的应用目标。

5 重金属稳定化效果的评价方法与标准

5.1 毒性浸出试验与重金属形态分析

毒性浸出试验用于评价固化稳定化后土壤中重金属的潜在释放风险，通过模拟酸雨或地下水等环境条件，检测处理后样品中重金属的浸出浓度，判断其环境迁移能力。该试验是衡量修复效果的重要指标之一，常采用水平振荡法、连续流动法等标准操作流程。重金属形态分析则通过分级提取法将金属在土壤中的存在形态划分为交换态、碳酸盐态、铁锰氧化物态、有机态和残渣态等几类，用以揭示其生物有效性和环境活性。二者结合可以全面判断稳定化处理对金属活性降低程度及其转化路径。新疆地区多为盐碱土和干旱气候条件，形态分析应充分考虑土壤类型与离子交换反应影响，确保对实际环境中的释放行为做出准确评估，图 1 为毒性浸出试验中的相关土壤数据。

测量参数	量程	精度	分辨率
土壤温度	-30~70℃	±0.3℃	0.1℃
土壤水分	0~100%	±3%	0.1%
电导率	0~20 mS/cm	0~5mS/cm 以内为±5%，5~20mS/cm 以内为±20%	0.01mS/cm
盐分	0~7500mg/L	0~1875mg/L 以内为±5%，1875~7500mg/L 以内为±20%	1mg/L
氮	0~500mg/kg	±5%	1mg/kg
磷	0~20000mg/kg	±10%	
钾	0~30000mg/kg	±5%	
pH	0~14	±0.1	0.01

图 1 毒性浸出试验中的相关土壤数据

5.2 固结强度、渗透性能与抗蚀能力检测

固化稳定化修复不仅要求污染物的活性降低，也需确保处理后土壤具备良好的工程物理性能。固结强度反映了土体的整体结构稳固性，可通过无侧限抗压强度、剪切强度等指标评估其适用于回填、垫层或防护结构的可行性。渗透性能测试可判断水分在处理土体中的迁移速度，影响重金属再扩散的风险水平。抗蚀能力包括耐酸、耐盐、抗风蚀等多种属性，决定修复效果在新疆极端气候下的持久性。测试过程中应结合不同试剂、环境模拟与力学加载条件，评估土体在实际应用场景中的性能表现。在高风速、剧烈温差和强辐射等区域环境背景下，对稳定材料提出了更高的抗劣化要求，需通过多重物理性能指标判定其实际适用性与安全性。

5.3 短期稳定性与长期环境适应性的综合评估

短期稳定性主要考察修复完成后一定时间内重金属的固定效果及材料物理性能保持情况，通过定期检测土壤中金属浸出量、形态变化和结构完整性等指标加以验证。长期环

境适应性评价则更关注材料与土壤在多年尺度下的相互作用，包括干湿交替、冻融循环、盐碱胁迫等自然因素对修复效果的影响。在新疆特殊地理与气候条件下，干旱、风蚀和温度剧变等环境因素可能导致部分稳定产物结构失稳，引发重金属二次释放。因此，在评估中需引入时间序列监测、模拟环境变化试验和寿命预测模型，增强对处理材料在自然环境中长期行为的判断能力，为区域修复提供可靠的风险控制依据和技术修正方案。

6 固化稳定化技术的工程应用与研究趋势

6.1 场地修复中的技术集成与工艺流程

在新疆重金属污染土壤治理实践中，固化稳定化技术已广泛应用于工业遗址、矿区周边、农田和道路建设用地等区域。工程实施通常包括污染识别与采样、稳定剂筛选与试验、材料均匀混合与深层搅拌、修复区域覆盖与压实等多个步骤。实际修复过程中需根据土壤结构、污染类型及深度，灵活采用原位搅拌、浅层铺撒或异位混合等操作方式，保障修复材料与污染因子的充分接触。为提高修复效率与可控性，常辅以自动控制设备、混合剂量反馈系统与施工机械化流程。在施工管理上强调施工时效、污染扩散控制及修复区环境扰动最小化。为适应新疆复杂地形及资源条件，工程应用不断探索与其他修复技术如植物修复、覆盖封闭、地下隔离等手段的协同模式，以增强综合治理效能，图 2 为一种用于治理铅污染土壤的稳定剂及其应用。

反应物	(CH ₃) ₂ NCS ₂ Na	Na ₃ PO ₄	Pb
相对分子质量 (g/mol)	143.2	164	207
配比系数	4	3	2
理论摩尔计量 (mg/kg)	22380	8544	16176 (酸提取态)
实际添加质量 (mg/kg)	44000	44000	16176 (酸提取态)
过量倍数	1.97	5.15	-

图 2 一种用于治理铅污染土壤的稳定剂及其应用

6.2 区域差异性条件下的适配性调整

新疆地域辽阔，地貌多样，土壤类型从灰漠土、棕钙土到盐渍土差异明显，不同区域间的气候、水文与生态环境存在显著差异。在具体修复实践中，需对不同区域土壤理化性质进行全面调查，依据 pH 值、有机质含量、阳离子交换能力等指标调整稳定化材料配方与投加量。干旱区需增强保水功能，沙质地需提升结构稳定性，盐渍化地区需防范盐溶

解与重金属协同迁移。在技术适配中还应兼顾本地资源可得性、材料运输成本及施工机械通达性，优化修复路径与工艺配置。针对高海拔、低温或风蚀严重的区域，应加强对材料耐久性、抗侵蚀性能与长期持效能力的验证，从而构建适用于不同地貌单元的稳定性修复模式，确保技术措施落地效果与环境条件之间实现动态匹配。

6.3 绿色低碳方向下的新型稳定材料研发路径

在碳达峰与生态文明建设背景下，土壤修复领域技术研发正朝着绿色、低碳、高效方向演进。新型稳定材料强调可再生、低污染、资源化利用与环境友好性，常见路径包括利用工业副产物如粉煤灰、钢渣、磷石膏等进行改性开发，降低修复成本并推动固废资源循环。生物质炭、壳聚糖、天然多糖等绿色有机物亦成为研究热点，其对重金属具备良好络合能力与生态相容性。功能型材料如负载型纳米粒子、磁性稳定剂和响应型聚合物在提升修复精准性与适应性的同时，也增强了材料对极端环境的抵抗力。在新疆地区，应优先发展原地材料资源化利用技术，推广节能低耗的现场施工工艺，构建全周期环境影响评估机制，推动重金属土壤治理实现经济性、生态性与可持续性的协同发展。

7 结语

重金属污染土壤的修复已成为新疆生态治理与土地可持续利用中的重要课题，固化稳定化技术因其适用性广、实施效率高，在实际工程中展现出强大潜力。通过科学选择稳定剂材料、优化配比策略、结合区域环境特征实施差异化修复路径，可有效降低重金属迁移性和生态风险，提升土壤系统的安全性与功能性。在推进技术应用的同时，更需加强对修复效果的动态评估与长期监测，推动绿色低碳材料研发与工程集成创新，为新疆土壤污染防治提供稳定持久的技术保障和理论支撑。

参考文献

[1] 朱方旭,程绍鹏,熊震宇,刘江浩.异位固化/稳定化技术修复重金属污染土壤案例分析[J].有色金属(冶炼部分),2023,(08):139-148.

[2] 张群丽,谢海云,陈家灵,宋紫欣,晋艳玲,陈海君,曾鹏,刘殿文.重金属污染土壤修复固化/稳定化技术研究现状及存在问题分析[J].环境保护科学,2024,50(03):96-102.

[3] 张志生.固化稳定化技术处理重金属类污染土壤效果及应用前景的研究[J].皮革制作与环保科技,2021,2(07):57-58.

[4] 夏威夷,丁亮,王栋,朱迟,曲常胜,王水,蔡光华,郭乾.重金属有机物复合污染土壤固化稳定化技术研究进展[J].绿色科技,2021,23(06):16-19+22.