

工业场地重金属污染土壤环境生态修复治理技术研究

靳 菲

廊坊市生态环境局 河北 廊坊 065000

摘 要：工业场地重金属污染具有隐蔽性、持久性和高生态风险，是土壤环境治理的重点与难点。针对该问题，本文系统研究了重金属污染特征、修复技术体系、联合修复策略及效果评价方法。通过分析污染来源、空间分布、形态转化及风险等级，为技术选型提供依据。同时，构建了涵盖理化指标、生态毒性、长期稳定性的综合评价体系。本研究旨在为工业场地重金属污染提供系统化、绿色化的生态修复方案，支撑污染场地的可持续再开发。

关键词：工业场地；重金属污染；土壤修复；生态修复；联合修复技术

引言：随着产业结构调整与城市用地更新，大量遗留工业场地面临再开发需求。冶炼、电镀、化工等行业长期生产导致场地土壤遭受铅、镉、砷等重金属严重污染。这类污染具备难降解、易富集、迁移性强的特征，对生态环境与人体健康构成潜在威胁。近年来，基于植物、微生物的生态修复技术因其环境友好特性受到广泛关注。本文从污染特征出发，系统梳理各类修复技术，重点研究联合修复策略的增效机制，并建立多维度效果评价体系，以期工业场地重金属污染治理提供科学参考。

1 工业场地重金属污染特征与风险评估

1.1 污染来源与类型

工业场地重金属污染主要源于生产过程中的原料泄漏、废水渗排、废渣堆存及大气沉降。不同行业排放的重金属种类具有显著特征：电镀行业以铬、镍、铜为主；铅蓄电池生产以铅为首要污染物；冶炼活动常导致铅、镉、砷、锌的复合污染；化工行业可能伴随汞、铬等污染。除单一元素污染外，复合污染更为普遍，多种重金属间存在拮抗或协同效应，增加了治理难度。从输入途径看，废水垂直入渗是深层土壤污染的主要原因，废渣堆放则形成表层高浓度污染区。明确污染来源与类型是开展针对性修复的前提，也是制定风险管控策略的基础。

1.2 污染空间分布特征

重金属在工业场地土壤中的空间分布受污染源位置、土壤性质及地下水流向共同控制。水平方向上，污染浓度随与污染源距离增加呈衰减趋势，核心区域常形成高浓度热点区。垂直方向上，重金属主要富集于表层0至20厘米土壤，但在砂性土或长期废水渗漏条件下可迁移至更深土层。土壤pH值降低、有机质含量减少会增强重金属迁移能力，扩大污染范围。空间异质性要求

开展高密度采样调查，采用地统计方法绘制污染物空间分布图。基于空间分布特征，可划分重点修复区域与风险管控区域，优化修复工程布局，避免过度治理或治理盲区。

1.3 重金属形态与生物有效性

重金属在土壤中以不同化学形态存在，其生物有效性取决于形态分布特征。采用BCR连续提取法可将重金属划分为酸溶态、可还原态、可氧化态和残渣态四种形态。酸溶态和可还原态具有较高的生物有效性和迁移性，是生态风险的主要来源；可氧化态在强氧化条件下可被释放；残渣态则稳定存在于矿物晶格中，环境风险较低。不同重金属的形态分布存在差异：铅多以可还原态存在，镉的酸溶态比例较高，砷则以残渣态为主。修复技术的选择应考虑目标重金属的优势形态，通过化学固定、植物提取等手段实现高风险形态的转化或去除^[1]。

1.4 生态与健康风险评估

生态与健康风险评估是确定修复目标和优先次序的科学依据。生态风险评估采用潜在生态风险指数法，综合考量重金属浓度、毒性响应系数及生态敏感性，计算单一及复合生态风险指数。健康风险评估则依据美国环保署模型，分析经口摄入、皮肤接触及呼吸吸入三途径的暴露剂量，计算致癌与非致癌风险值。评估结果显示，铅、镉、砷通常构成主要风险元素，儿童面临的风险高于成人。风险等级的空间分布指导修复分区：高风险区采取主动修复措施，中低风险区可实施风险管控。评估过程需定期更新，反映修复效果及残余风险。

2 重金属污染土壤生态修复技术体系

2.1 物理化学修复技术

物理化学修复技术通过改变重金属赋存状态或将其从土壤中分离实现治理目标。固化稳定化技术投加磷酸

盐、黏土矿物等材料,将重金属转化为难溶形态,降低其浸出毒性。土壤淋洗技术使用酸、螯合剂等溶液冲洗土壤,使重金属进入液相后集中处理。电动修复技术施加直流电场驱动带电重金属离子向电极定向迁移。上述技术适用于高风险点源区域或应急治理场景,修复周期短、效果明显。然而,物理化学方法存在成本较高、可能破坏土壤结构、产生二次废液等问题,限制了其在大面积低污染场地的应用。

2.2 生物修复技术

生物修复技术利用植物、微生物的自然代谢能力富集或转化土壤重金属。植物修复依赖超富集植物如蜈蚣草富集砷、东南景天富集锌镉,通过收割地上部逐步移除土壤重金属。微生物修复利用硫酸盐还原菌将硫酸盐转化为硫化物,促使重金属沉淀;或利用耐性细菌分泌铁载体、有机酸等物质改变重金属形态^[2]。生物修复技术环境友好、成本较低,不破坏土壤结构,适用于大面积中度污染场地。其主要限制在于修复周期较长,超富集植物生物量普遍偏小,低温季节修复效率下降。通过农艺调控及微生物强化可部分克服上述不足。

2.3 生态修复技术

生态修复技术侧重恢复土壤生态功能而非单纯降低重金属总量。生物炭改良通过施用水稻壳、秸秆制备的生物炭,增加土壤有机质,吸附固定重金属,同时改善土壤通气保水性能。植被重建选择耐性非食用植物构建稳定植被覆盖,减少水土流失与扬尘扩散,促进土壤微生物群落恢复。有机质调控投加腐殖酸、堆肥等物质,调节土壤pH及阳离子交换量,抑制重金属活化。生态修复技术适用于中低风险场地及修复后期生态恢复阶段,强调长期监测与适应性管理,实现污染治理与生态重建双重目标。

2.4 修复技术对比与适用性分析

通过对物理化学、生物、生态三类修复技术的原理、优势、短板及适用场景进行对比分析,可明确各类技术的适配边界。物理化学技术修复效率高、可控性强,适配重度污染、紧急治理的工业场地,但成本高、生态破坏性强,难以实现生态长效恢复。生物技术绿色环保、成本低廉,适配中轻度污染场地批量治理,但修复周期长、稳定性不足,单独应用治理效果有限。生态修复技术侧重生态系统重构,无二次污染、治理持久性强,适用于修复后期生态提质,但无法快速削减高浓度重金属污染。总体来看,单一修复技术均存在明显局限性,无法兼顾治理效率、治理成本、生态安全性与长效稳定性。因此,结合场地污染程度、土壤条件、治理需

求搭配多元技术,形成联合修复体系,是当前工业场地土壤修复的主流发展趋势。

3 联合修复技术与优化策略

3.1 植物-化学联合修复

植物-化学联合修复通过投加螯合剂或调理剂提升植物提取效率。乙二胺四乙酸等螯合剂可与重金属形成可溶性络合物,增加土壤溶液中重金属浓度,促进根系吸收并向地上部转运。研究表明,添加乙二胺四乙酸可使东南景天镉富集量提升2至4倍。但过量螯合剂可能引发重金属淋溶风险,需优化投加剂量与施用时间。缓释螯合剂及分次投加策略可降低环境风险。此外,施用硫酸铵、磷酸二氢钾等肥料可改善超富集植物营养状况,同步提升生物量与富集浓度。植物-化学联合修复在铅、镉、锌污染场地表现出良好应用前景。

3.2 微生物-化学联合修复

微生物-化学联合修复利用化学材料改善微生物生存环境,或利用微生物代谢增强化学固定效果。生物炭、零价铁等材料投加后可降低土壤酸度,为功能微生物提供适宜生存条件。硫酸盐还原菌与零价铁联合施用,零价铁腐蚀产生氢气供微生物代谢,硫化物沉淀效率提升1.5倍以上。针对六价铬污染,添加乳酸盐等碳源促进土著还原菌生长,配合亚铁盐化学还原,可快速将高毒性六价铬转化为三价铬沉淀。微生物-化学联合缩短修复周期并降低化学材料用量,适用于铬、砷等变价重金属污染场地^[3]。

3.3 植物-微生物-化学三元联合

三元联合修复体系整合植物提取、微生物强化及化学调控三重优势,形成高效协同机制。根际促生菌分泌植物激素及铁载体,促进超富集植物根系发育与生物量积累。螯合剂低剂量投加活化土壤重金属,菌根真菌扩大根系吸收范围,三者协同显著提升修复效率。典型应用模式为:东南景天与芽孢杆菌联合种植,配合低浓度乙二胺四乙酸诱导。实测数据表明,三元联合模式下镉年提取量较单一植物修复提升3至5倍。该技术需精细调控各要素配比与施用时序,避免微生物与植物竞争营养或螯合剂抑制菌群活性,适用于重度复合污染场地的高效修复。

4 生态修复效果评价体系

4.1 理化指标评价

理化指标评价是土壤修复效果最基础、最直观的评价方式,主要检测土壤重金属含量、形态分布及土壤基础理化性质,判定污染治理是否达标。核心检测指标包含土壤中各类重金属总含量、可交换态重金属占比、土

壤pH值、有机质含量、土壤孔隙度、养分含量等。通过对比修复前后土壤重金属总量变化,可直观判定重金属去除效果;通过检测活性重金属形态占比,评估重金属钝化效果;通过分析土壤理化性质改善情况,判断土壤结构与土壤肥力的恢复程度。理化指标评价严格遵循国家土壤环境质量标准,划定达标阈值,精准量化修复成效,是判定修复工程是否达标的核心依据,也是后续生态评价、稳定性评估的基础前提,保障修复效果的客观性与准确性。

4.2 生态毒性评价

生态毒性评价聚焦修复后土壤的生物安全性,弥补理化指标仅检测数值、无法判定生态危害的评价短板,核心评估土壤对动植物、微生物的毒性影响。主要评价内容包括土壤微生物活性、土壤酶活性、植物种子发芽率、幼苗生长状况、土壤生物多样性等指标。重金属污染会抑制土壤酶活性、降低微生物群落丰富度,修复完成后,通过检测土壤脲酶、磷酸酶活性及微生物数量变化,可判定土壤微生态毒性消除情况;通过植物毒性试验,观测植物生长状态,评估土壤是否具备安全植被生长条件。生态毒性评价可有效识别理化指标达标但仍存在隐性生态风险的土壤,规避修复后土壤毒性残留问题,保障修复场地生态环境安全,提升治理质量。

4.3 长期稳定性评估

长期稳定性评估用于判定修复后土壤重金属是否存在二次活化、污染反弹风险,是保障工业场地长效安全利用的关键环节。短期修复达标仅能实现瞬时污染管控,土壤环境条件变化易导致稳定态重金属重新活化,引发二次污染。长期稳定性评估主要通过为期数月至数年的持续监测,追踪土壤重金属含量、形态的动态变化,同时结合场地降水、温度、土壤酸碱环境等外界因素,分析重金属迁移转化规律。重点评估钝化后重金属的稳定性、土壤生态系统的自我维持能力、植被群落的存活稳定性,预判污染反弹风险^[4]。针对评估中发现的不稳定问题,及时优化修复方案,补充钝化、生态养护措施,确保修复效果长期稳定,满足工业场地土地长期安全再利用需求。

4.4 综合评价方法

综合评价方法整合理化指标、生态毒性、长期稳定性三类评价维度,构建全方位、多层次的修复效果评价体系,实现修复效果的科学化、系统化判定。本文采用层次分析法与模糊综合评价法相结合的评价模式,筛选核心评价指标,赋予各指标科学权重,量化水质达标率、生态安全性、稳定性、经济性等多维要素。通过构建评价模型,将零散的检测数据转化为量化评分,划分优秀、良好、合格、不合格四个修复等级。同时兼顾治理成本、施工周期、二次污染防控等工程要素,实现修复效果、生态效益、经济效益的综合评估。该评价方法可全面规避单一指标评价的片面性,精准判定工业场地土壤修复整体成效,为后续场地运维、土地利用、技术优化提供数据支撑

结束语

工业场地重金属污染治理是土壤环境保护的重要内容。本文从污染特征识别出发,系统分析了物理化学、生物及生态修复技术的适用边界,重点探讨了联合修复策略的协同增效机制。研究指出,单一技术难以应对复杂污染场景,而植物-微生物-化学三元联合体系在提升效率、控制成本与保护生态功能之间展现出显著优势。此外,建立涵盖理化、生态毒性与长期稳定性的综合评价体系,对于验证修复成效至关重要。未来研究应聚焦绿色修复材料的开发、修复过程智能监测以及场地再利用的风险管控,推动土壤修复向低碳、高效、可持续方向发展。

参考文献

- [1]王媛.工业场地重金属污染土壤环境生态修复治理技术研究[J].环境科学与管理,2025,50(8):157-161,166.
- [2]孔祥林.重金属污染对土壤微生物多样性的影响及生态修复技术研究[J].生态环境保护与修复,2026,39(2):83-85.
- [3]毕良绣.浅谈土壤重金属污染环境评价与环保科技修复路径[J].皮革制作与环保科技,2025,6(24):56-58.
- [4]张祥明,罗帅.土壤重金属污染治理及生态修复研究[J].皮革制作与环保科技,2025,6(22):117-119.