

稀土矿区土壤-植物系统重金属迁移的阻控技术对比

孟凡峰

山东义能煤矿有限公司 山东济宁

【摘要】稀土矿区土壤-植物系统中重金属的迁移会引发生态风险与食品安全问题，阻控技术的选择直接影响修复效果与成本。物理阻控技术通过隔离或固定重金属降低其生物有效性，化学技术借助改良剂改变重金属形态，生物技术则利用植物或微生物吸收转化重金属。不同技术在适用场景、阻控效率、环境影响等方面存在差异：物理技术见效快但成本高，化学技术易造成二次污染，生物技术更具可持续性但周期长。对比分析各类技术的核心机制、应用条件及实际效能，可为稀土矿区重金属污染治理提供科学选择依据，对推动矿区生态修复与可持续发展具有重要价值。

【关键词】稀土矿区；土壤-植物系统；重金属迁移；阻控技术；技术对比

【收稿日期】2025 年 6 月 13 日

【出刊日期】2025 年 7 月 11 日

【DOI】10.12208/j.jer.20250323

Comparison of control technologies for heavy metal migration in soil-plant system of rare earth mining areas

Fanfeng Meng

Shandong Yineng Coal Mine Co., Ltd., Jining, Shandong

【Abstract】The migration of heavy metals in the soil-plant system of rare earth mining areas can trigger ecological risks and food safety issues, and the selection of control technologies directly affects the remediation effect and cost. Physical control technologies reduce the bioavailability of heavy metals through isolation or immobilization; chemical technologies alter the forms of heavy metals with modifiers; biological technologies utilize plants or microorganisms to absorb and transform heavy metals. Different technologies vary in applicable scenarios, control efficiency, and environmental impacts: physical technologies take effect quickly but with high costs; chemical technologies are prone to causing secondary pollution; biological technologies are more sustainable but require a long cycle. Comparative analysis of the core mechanisms, application conditions, and actual effectiveness of various technologies can provide a scientific basis for selecting heavy metal pollution control measures in rare earth mining areas, which is of great value for promoting ecological remediation and sustainable development of mining areas.

【Keywords】Rare earth mining areas; Soil-plant system; Heavy metal migration; Control technologies; Technology comparison

引言

稀土矿区长期开采导致土壤中重金属富集，通过土壤-植物系统迁移后，不仅破坏生态平衡，还可能经食物链威胁人体健康。当前阻控技术种类繁多，却因矿区土壤特性、重金属种类差异，效果参差不齐。如何从物理、化学、生物等技术中筛选适配方案，成为污染治理的关键。深入对比各类阻控技术的优劣，既能破解实际修复中的技术选型难题，也为提升矿区环境质量提供有效路径。

1 稀土矿区土壤-植物系统重金属迁移的特征及阻控需求

稀土矿区土壤-植物系统中重金属迁移呈现复杂的多路径特征，受矿区特殊环境条件与元素化学性质共同调控^[1]。土壤介质中重金属以离子交换态、碳酸盐结合态、铁锰氧化物结合态等多种形态存在，其中生物有效态比例显著高于普通农田土壤，这与矿区长期采矿活动中酸碱废水淋溶、尾矿粉尘沉降引发的土壤理化性质改变密切相关^[2]。酸性土壤环境（pH 值常低于 5.5）会促进重金属离子解吸，使铅、镉、铜等元素在土壤溶液中浓度升高，为向植物根系迁移提供物质基础。重金属在土壤-植物系统中的迁移路径具有选择性差异。根系吸收是主要途径，植物通过主动运输或被动

扩散吸收土壤中的重金属离子，其吸收效率与植物种类的富集特性直接相关。部分矿区优势植物如鬼针草、小飞蓬等表现出较强的重金属富集能力，其根系分泌物可通过螯合作用活化土壤中的难溶性重金属，加速迁移过程。此外，重金属还可通过叶片气孔沉降直接进入植物体内，在矿区粉尘污染严重区域，这种气-叶迁移路径占比可达 30% 以上，形成双通道迁移模式^[3]。

迁移过程中的空间异质性是另一显著特征。矿区土壤重金属含量呈现以采矿点为中心的梯度分布，距离尾矿库越近，土壤中重金属总量越高，且垂直方向上表现为表层土壤(0-20cm)富集明显，向下随土层深度增加逐渐递减。这种分布特征导致植物体内重金属积累量呈现相应的空间差异，靠近污染源的植物体内重金属浓度可达到对照区域的 5-10 倍，且不同器官积累量存在差异，通常根系含量最高，叶片次之，果实或籽粒中积累量受植物转运能力影响呈现显著种间差异。

重金属形态转化对迁移效率的影响尤为突出。在氧化还原电位交替变化的矿区土壤中，重金属价态易发生转变，如三价铬可在强氧化条件下转化为毒性更强的六价铬，其迁移能力与生物毒性均显著提升。土壤有机质含量与黏土矿物组成也会通过吸附-解吸平衡影响迁移过程，低有机质含量的矿区土壤对重金属的吸附容量有限，导致更多重金属处于游离态，增加植物吸收风险^[4]。

基于上述迁移特征，稀土矿区重金属阻控存在多维度需求。首先需降低土壤中生物有效态重金属含量，切断迁移源头，这要求阻控技术具备高效的形态转化能力，将活性态重金属转化为稳定态。其次需抑制植物根系吸收与体内转运，针对不同植物种类的富集特性制定靶向措施，尤其需控制可食用植物的重金属积累量。此外，针对矿区空间异质性特征，阻控技术需具备区域适配性，能适应不同污染程度与土壤理化性质的区域。同时，长期采矿活动导致的重金属复合污染(如铅-镉-砷复合污染)，要求阻控技术具备广谱性，可同步抑制多种重金属的迁移，最终实现生态风险与健康风险的双重降低。

2 不同类型重金属迁移阻控技术的作用机制与应用条件

物理阻控技术通过改变土壤物理结构或隔离污染介质阻断重金属迁移路径^[5]。土壤覆盖技术采用惰性材料如膨润土、沸石等构建隔离层，利用材料的低渗透性阻止重金属向深层土壤和植物根系扩散，其核心机制在于形成物理屏障切断毛细作用引发的迁移通道。电

动修复技术借助直流电场驱动重金属离子向电极区域富集，通过土壤孔隙中电渗流与电泳作用的协同，实现重金属的定向迁移与分离，该过程受土壤质地影响显著，黏粒含量过高会因孔隙阻塞降低迁移效率。物理技术的应用条件呈现明显场景依赖性。土壤覆盖技术适用于重金属污染浓度高但分布浅层的区域，需保证覆盖材料厚度与污染深度匹配，避免因降水渗透破坏屏障完整性；电动修复技术在砂质土壤中表现更优，且需控制土壤含水率在适宜范围，过低会导致电阻增大，过高则稀释离子浓度影响富集效果。此类技术对施工设备要求较高，且难以应对土壤异质性带来的局部污染残留问题。

化学阻控技术依托材料与重金属的化学反应改变其赋存形态。石灰、氧化镁等碱性改良剂通过提高土壤 pH 值，促使重金属形成氢氧化物沉淀，降低其在土壤溶液中的溶解态比例；磷基材料则通过配位作用生成难溶性磷酸盐，固定效果受土壤氧化还原电位调控，在厌氧环境中易因磷酸根释放导致固定态重金属重新活化。纳米材料凭借高比表面积与表面活性基团，通过吸附、络合等作用强化重金属固定，其表面电荷特性决定了对不同价态重金属的选择性吸附能力^[6]。化学技术的应用需精准匹配土壤理化性质。碱性改良剂适用于酸性土壤，过量使用会引发土壤板结与养分失衡，需通过预实验确定最佳施用量；磷基材料在高有机质土壤中效果受限，有机质分解产生的有机酸会干扰磷酸盐沉淀形成；纳米材料的应用需考虑其生物毒性，避免因材料残留对土壤微生物群落造成负面影响。此外，化学试剂的持久性是关键指标，易降解材料可能导致重金属二次释放。

生物阻控技术利用生物有机体的代谢活动实现重金属迁移阻控。超富集植物通过根系分泌物活化土壤重金属，经细胞膜上转运蛋白吸收并积累于植物体内，其富集能力具有物种特异性，如蜈蚣草对砷的吸收效率显著高于其他重金属。微生物修复依托功能菌株的生物转化作用，将重金属离子还原为低毒性形态，或通过胞外聚合物吸附固定，菌株活性受土壤温度、湿度及碳源供应影响较大，低温环境会显著抑制代谢速率。生物技术的应用条件与生态适应性密切相关。超富集植物的种植需匹配矿区气候与土壤条件，在干旱或贫瘠土壤中需辅以水肥管理提升生物量；微生物修复对土壤 pH 值敏感，中性至弱碱性环境更利于功能菌株繁殖，且需避免重金属浓度过高对菌株产生毒性抑制。此类技术具有环境友好性，但受生物生长周期限制，修复

周期较长,不适用于急需快速控制的污染场景。

3 稀土矿区重金属阻控技术的综合效能对比及优化策略

稀土矿区重金属阻控技术的综合效能需从阻控效率、环境风险、经济成本及可持续性四个维度展开对比。物理阻控技术在短期阻控效率上表现突出,能快速降低土壤表层重金属生物有效性,但材料铺设与更换过程易扰动土壤结构,长期使用可能导致土壤透气性下降,且耗材成本较高,在大面积污染区域应用受限^[7]。化学阻控技术通过改良剂快速固定重金属,但其效果受土壤 pH 值与有机质含量制约,部分化学试剂可能引发土壤酸化或重金属形态可逆转化,存在二次污染风险,且长期使用会改变土壤理化性质,影响植物生长基质稳定性。生物技术的阻控效率随修复周期逐步提升,超富集植物与功能微生物协同作用可实现重金属的长效去除,且对土壤生态系统扰动较小,能维持土壤原有肥力与生物多样性。但该技术受环境条件影响显著,低温、干旱或土壤养分匮乏会抑制生物活性,导致修复周期延长,在高浓度污染区域单独应用时,生物量易受重金属毒性抑制,阻控效果不稳定。

基于效能对比的优化策略需立足矿区污染特征构建技术组合体系。针对浅层高浓度污染区域,可采用物理隔离与化学固定结合的方式,先用惰性材料阻断迁移路径,再施加环境友好型改良剂降低重金属活性,快速控制污染扩散风险。对于中低浓度污染区域,推行生物-化学联合修复,通过化学试剂适度活化重金属提升生物可利用性,配合超富集植物吸收与微生物转化,在提高修复效率的同时减少化学试剂用量^[8]。长期优化需注重技术的生态兼容性。物理技术应优先选用可降解隔离材料,避免土壤结构永久破坏;化学改良剂需筛选低毒、缓释型产品,通过定期监测土壤重金属形态变化调控施用量;生物技术可通过基因编辑优化超富集植物与功能微生物的环境适应性,结合土壤调理剂改善生物生长条件,缩短修复周期。不同矿区需根据污染程度、土壤类型及生态保护目标制定差异化方案,建立“快速控制-深度修复-长效维持”的技术链条,在保障阻控效能的同时降低经济成本与环境风险,实现稀

土矿区土壤-植物系统重金属污染的可持续治理。

4 结语

稀土矿区土壤-植物系统重金属迁移的阻控技术各有其适用场景与局限。物理技术的快速性、化学技术的针对性、生物技术的可持续性,在对比中得到清晰呈现。综合考虑矿区实际条件、成本与长期效果,优化技术组合是提升阻控效能的关键。通过科学选型与集成应用,可有效切断重金属迁移链,为稀土矿区生态修复提供有力支撑,助力实现生态保护与资源开发的协调发展。

参考文献

- [1] 赖劲虎.赣南钨和稀土矿区土壤重金属分布及其健康风险[D].南昌大学,2024.
- [2] 张塞,于扬,王登红,等.赣南离子吸附型稀土矿区土壤重金属形态分布特征及生态风险评估[J].岩矿测试,2020,39(05): 726-738.
- [3] 陈鹏.植物生态缓冲带构建及其对硫铁矿尾矿库重金属迁移的阻滞研究[D].四川大学,2023.
- [4] 陈菲然,许一诺,杜昊,等.纳米材料与环境抗生素耐药性:抗性基因流在土壤-植物系统中的迁移与阻断[J].科学通报,2022,67(35):4206-4223.
- [5] 宋超,贾伟丽,应光国.土壤-植物系统中抗生素抗性的传播过程与影响机制[J].生态毒理学报,2023,18(03):79-93.
- [6] 杨士.脐橙皮生物炭负载氧化石墨烯对稀土矿区土壤重金属阻控效应及机制[D].江西理工大学,2021.
- [7] 陈淑英,熊鸿斌,刘桂建,等.铜陵杨山冲尾矿库土壤-植物系统重金属迁移过程及健康风险评估[J].合肥工业大学学报(自然科学版),2022,45(02):282-288.
- [8] 安立进,赵礼鹏,魏奥,等.硒阻控作物吸收重金属机制研究进展[J].华中农业大学学报,2024,43(04):112-120.

版权声明: ©2025 作者与开放获取期刊研究中心(OAJRC)所有。本文章按照知识共享署名许可条款发表。

<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

