

Integrated remediation of groundwater contaminated by high difficulty heavy metals

Shuo Huang

Chongqing Derun Xinbang Environmental Restoration Co., Ltd., Chongqing, 400084, China

Abstract

Heavy metal pollution has become a global environmental issue, with complex behaviors of multivalent heavy metals such as chromium, lead, and cadmium in soil-groundwater systems posing unique governance challenges. These pollutants have the characteristic of easily transforming their forms under varying hydrogeological conditions, often exceeding the boundaries of conventional remediation techniques. They can form persistent environmental risks in deep aquifers and fractured rock formations. For high-difficulty scenarios involving cross-media migration, multiple form transformations, and cumulative pollution effects, traditional remediation methods suffer from limitations such as rapid degradation of remediation efficiency and high risks of secondary activation. The proposal of an integrated soil-groundwater remediation concept marks a shift in pollution control from single-medium treatment to systematic ecological regulation, thus opening up new avenues for addressing technical bottlenecks such as deep pollution spread and fracture medium permeation.

Keywords

heavy metal pollution; soil remediation; groundwater remediation; integrated remediation

高难度重金属污染土壤地下水一体化修复方案

黄硕

重庆德润新邦环境修复有限公司，中国·重庆 400084

摘要

重金属污染已成为全球性环境问题，其中铬、铅、镉等多价态重金属在土壤-地下水系统中的复杂行为构成特殊治理挑战，此类污染物有着易随水文地质条件改变而发生形态转化的特性，其迁移范围往往会突破常规修复技术作用的边界，在深层含水层、裂隙岩脉等场景中形成持续性的环境风险。对于污染物跨介质迁移、多形态转化以及复合污染叠加效应等高难度场景，传统治理方法存在诸如修复效率衰减快、二次活化风险高的局限性。而土壤地下水一体化修复理念的提出，标志着污染治理的方向从单一介质处理开始转变为系统生态调控，如此就为破解深层污染扩散、裂隙介质渗透等技术瓶颈开辟了新的思路。

关键词

重金属污染；土壤修复；地下水修复；一体化修复

1 引言

多价态重金属在氧化还原交替环境下呈现动态赋存状态，其迁移转化过程把溶解吸附、络合沉淀等多重界面反应涉及其中，使得传统固化稳定化技术难以实现长效控制。深层地下水污染以及裂隙岩层扩散场景的出现，更是让污染物突破了常规阻隔屏障，形成了具有隐蔽性的污染通道。现有修复体系存在技术模块衔接薄弱、动态响应能力不足等缺陷，在应对污染物跨介质迁移的时空差异性显得颇为吃力。本文聚焦于重金属污染物的形态调控机制以及迁移阻断策略上，构建起一个完整的技术框架，此框架包含了靶向修复

材料开发、多技术联用优化、智能监测反馈等内容。通过对污染物在固-液界面的动态转化规律进行解析，提出基于污染物迁移路径逆向干预的系统治理方案，从而为解决深层污染扩散、裂隙介质渗透等现实难题提供相应的理论支撑和技术路径。

2 重金属污染特性与修复挑战

2.1 污染特征

重金属污染指由重金属或其化合物造成的环境污染，主要由采矿、废气排放、污水灌溉和使用重金属超标制品等人为因素所致。因人类活动导致环境中的重金属含量增加，超出正常范围，直接危害人体健康，并导致环境质量恶化。2011年4月初，中国首个“十二五”专项规划——《重金属污染综合防治“十二五”规划》获得国务院正式批复，防

【作者简介】黄硕（1989-），男，中国山东菏泽人，本科，工程师，从事污染土壤和地下水修复研究。

治规划力求控制 5 种重金属。以六价铬为例，其在氧化环境下形成可溶性铬酸盐阴离子，随地下水径流形成条带状污染羽，而在还原区域则转化为难迁移的三价铬氢氧化物沉淀，这种价态驱动的形态转变导致污染空间分布呈现显著异质性。铅离子易与土壤有机质及铁锰氧化物发生特异性吸附，形成表层富集现象，但在酸性淋溶作用下部分结合态铅可能解吸进入液相，引发垂向渗透风险。镉的生物有效性与其可交换态含量呈正相关，其离子半径与钙元素相近的特性促使镉通过竞争吸附在黏土矿物界面发生离子交换，同时羧酸类溶解性有机物可显著提升镉的络合迁移能力。不同重金属在固液界面的分配系数受控于矿物类型和腐殖酸含量，而地下水位波动引发的干湿交替过程会加速铁氧化物胶体的胶溶作用，进而改变重金属的载体传输模式^[1]。

2.2 高难度场景

高难度重金属污染场景的复杂性源于污染物赋存介质与地质条件的深度耦合，深层地下水系统中重金属受含水层交替氧化还原环境影响呈现多形态动态转化，其垂向迁移受地层结构非均质性制约形成隐蔽扩散通道，常规监测手段难以精准捕捉污染锋面运移轨迹。裂隙岩层内重金属污染物沿结构面快速渗透时易与围岩矿物发生离子交换反应，溶解态重金属在裂隙网络内反复经历吸附解吸过程，导致污染范围随地下水季节性波动呈现三维不规则扩展。复合污染叠加场景下多价态重金属之间发生氧化还原电位竞争，异质重金属离子在固液界面形成竞争吸附位点，不同金属的络合溶解特性差异引发修复药剂选择性失活现象，污染物归趋路径的不可预测性显著增加修复策略制定难度。地下环境封闭性导致污染过程缺乏有效缓冲机制，岩土孔隙内重金属的物理化学行为与地表暴露环境存在显著差异，传统阻隔技术难以适应深层介质中水力梯度的剧烈变化，污染物跨介质迁移过程产生的次生界面反应进一步加剧污染羽空间异质性。

2.3 修复瓶颈

固化稳定化技术常因土壤矿物组分动态变化导致封存结构逐渐瓦解，胶结剂与重金属离子的结合位点在长期水岩作用下发生解离，使得部分被固定的污染物重新释放至环境中。化学淋洗过程虽能快速去除可交换态重金属，但强酸强碱试剂的引入往往破坏土壤团粒结构，造成次生盐渍化与养分流失，修复后的土地难以恢复原有生态功能。电动修复技术受制于地层渗透性差异与离子迁移速率限制，在低渗透黏土层中易形成电流屏蔽效应，致使修复效率随处理时间延长呈指数级衰减。植物提取技术面临超富集植物生物量低、根系穿透深度有限等现实制约，且收割后的植物体处置可能引发二次污染风险^[2]。物理换土法尽管能彻底清除污染介质，但挖掘运输过程产生的扬尘与渗滤液极易扩大污染范围，工程成本随修复深度增加呈现非线性增长。多数技术对复合污染体系中多金属竞争吸附行为缺乏针对性调控，修复后土壤中残留的重金属在干湿交替或冻融循环作用下可能发生形

态转化，导致污染物活性反弹。

3 高难度重金属污染土壤地下水一体化修复技术体系

3.1 靶向材料研发

靶向材料的分子结构设计需综合考虑污染物赋存形态与地质介质的相互作用特性，基于重金属离子外层电子轨道排布规律开发的配位基团可定向捕获特定价态金属元素。多孔载体表面功能化处理赋予材料选择性吸附能力，其孔径分布范围需匹配地下水中胶体颗粒的流体力学直径，防止孔隙堵塞导致渗透效率下降。污染物在固液界面的动态络合行为要求材料表面活性位点具备氧化还原电位响应特性，在含水层环境波动时维持吸附容量稳定性。复合污染场景下不同重金属离子的竞争吸附效应促使材料研发转向多官能团协同作用方向，通过调控功能基团空间排布方式平衡吸附选择性与反应动力学之间的矛盾。地下环境中溶解性有机质的存在可能遮蔽材料表面活性位点，材料改性过程中引入的疏水涂层可有效阻隔腐殖酸类大分子的干扰。裂隙岩层修复需控制材料胶体颗粒的 Zeta 电位值，利用岩体表面电荷异质性实现修复剂在裂缝网络中的定向富集^[3]。

3.2 多技术协同应用

在场地修复实施过程中，缓释型氧化还原调节材料可依据地下水流速梯度逐步释放电子供体，在非均质含水层中建立连续还原屏障，促使六价铬沿污染羽迁移路径发生原位价态转化。功能菌群定向激活技术结合生物刺激与生物强化策略，在含铅污染区域形成优势菌落空间定殖，利用微生物代谢产物改变重金属结合形态。植物-微生物联合修复体系通过根系分泌物调控根际微域环境酸碱度，驱动镉离子从残渣态向可溶态转化并完成跨膜运输，同时菌丝网络延伸增强污染物的立体截获能力。渗透反应屏障系统采用多层介质耦合设计，在含水层关键通道交替布置离子交换树脂与吸附材料，针对不同价态重金属的迁移特性实施动态拦截。地下水循环井装置整合了水力控制与化学氧化功能，在污染晕外围形成环状对流场，迫使游离态重金属向预设反应区定向富集。电动-植物协同修复模式利用电场力驱动深层土壤中的铅离子向浅层根区迁移，借助植物蒸腾作用产生的负压梯度提升重金属的纵向迁移通量。

3.3 智能调控与监测

智能调控系统依托原位传感器网络实时捕捉土壤孔隙水重金属离子浓度波动，其布设密度需匹配地层渗透系数的空间变异特征以避免监测盲区。地下水循环路径的三维重构技术结合示踪剂迁移数据动态修正水力传导模型，为修复剂注入速率优化提供流体力学依据。多参数融合分析平台整合氧化还原电位、溶解氧含量及微生物群落结构变化趋势，生成污染界面迁移预测图谱指导修复策略动态调整。自适应控制阀组根据污染物浓度梯度变化自动调节化学氧化剂投加

比例,在维持修复效率的同时避免药剂过量引发的二次污染风险。地下环境修复进程的可视化展示模块将电导率异常区与重金属吸附热区进行空间叠合分析,辅助判断污染羽扩展边界与修复盲点分布特征。云端数据库持续积累不同地质条件下修复剂扩散速率与污染物去除效率的关联性数据,为后续工程参数优化提供机器学习样本^[4]。

4 高难度场景下的技术突破

4.1 深层污染治理

高压注射系统利用定制化注浆管阵列将胶凝固化剂以脉冲式注入裂隙发育带,修复浆液在地层孔隙内形成三维网状结构,有效填充基岩裂隙与沉积层间的优势渗流通道。垂直阻隔屏障采用改性膨润土与纳米硅酸盐复合基材分层构筑,其遇水膨胀特性促使屏障界面与周围岩土体产生自愈合式紧密接触,层间穿插的热塑性树脂薄膜在温度梯度下形成连续抗渗膜结构。修复浆液配方整合了缓释氧化剂与螯合载体,在高压驱动下沿含水层走向形成多级反应带,其中微米级铁粉在浆液固化后仍保持长期活性,可响应地下水中溶解氧浓度变化持续释放电子。阻隔屏障底部锚固段嵌入螺旋式钢绞线骨架,通过预应力张拉抵消土体侧向位移造成的结构变形,顶部衔接的虹吸排水槽主动导排层间滞水以降低静水压力。注射作业与屏障构筑实行错位时序施工,前者产生的液压劈裂效应为后者创造致密化的地层接合面,两者协同作用抑制了污染物沿构造软弱面的侧向绕渗。

4.2 裂隙岩层修复

胶体材料的粒径分布调控需匹配裂缝开度变化特征,通过表面电荷改性使胶体颗粒与岩壁形成可控吸附效应,防止材料过早沉积导致裂隙通道堵塞。地下水流速脉动特征驱动注入工艺采用脉冲式加压模式,利用压力波震荡作用促进胶体悬浮液在分支裂隙中的均匀渗透,克服毛细管力对细颗粒运移的阻滞效应。裂隙网络中优先流路径的识别依赖示踪剂运移轨迹的三维重构技术,据此优化注浆孔排布方式形成多级拦截屏障,胶体材料在运移过程中逐步释放活性组分实现污染物的原位稳定化。岩体应力场变化引起的裂缝扩展风险促使胶体悬浮液黏度具备剪切变稀特性,在高压注入阶段维持流动性,进入低流速区域后恢复凝胶状态锁定污染物。修复过程中实时监测注浆压力与地层响应信号的关联性,动态调节胶体浓度梯度避免岩层渗透率骤降引发的液压劈裂现象。胶体颗粒表面修饰的疏水基团可降低腐殖酸吸附概率,在裂隙水离子强度波动时保持胶体分散稳定性,延长材料在地下水环境中的有效作用周期。

4.3 长期稳定性保障

在修复后场地维护阶段,长效稳定剂通过周期性施加与土壤矿物相形成共生结构,其表面羟基位点与重金属离子产生特异性络合作用,促使铬铅镉等元素逐步转化为类质同象矿物相。生态风险预警系统整合了生物有效性监测模块与地电法传感器阵列,依据地下水中溶解态重金属浓度波动趋势构建三维迁移模型,当根际微域氧化还原电位突破临界阈值时触发分级预警信号。钝化材料再生技术采用梯度式pH-Eh调控策略,在雨季来临前向表层土壤注入缓冲溶液以中和酸性淋溶产生的氢离子冲击,同时向深层包气带扩散缓释氧阻隔剂抑制铁锰氧化物还原溶解。生物屏障构建选用本地适生植被与菌根真菌组合,其发达根系网络在土体裂隙处形成生物毡层,利用菌丝分泌物竞争吸附孔隙水中的游离态重金属。智能响应型修复体搭载光敏触发装置,在太阳辐射强度达到预设值时自动释放腐殖酸前驱体,通过光催化反应生成具有持久螯合能力的小分子有机酸。污染反弹抑制体系建立多介质协同监控机制,将土壤溶液离子强度变化与地下水微生物群落代谢活性进行耦合分析,动态调整钝化剂投加频次与生物刺激方案^[5]。

5 结语

环境治理进入系统调控新阶,这一进程由重金属污染土壤地下水一体化修复技术的突破而标志,深层污染扩散与裂隙介质渗透难题的有效破解,得益于基于污染物迁移路径逆向干预的协同治理体系;修复过程可控性的显著提升,则是靶向材料与智能调控技术融合带来的结果。在工程实践方面,建议对污染场地的原位转化能力监测加以强化,建立基于生态风险预警的动态修复机制。未来研究要着重解决复杂地质条件下修复材料的长效稳定性问题,探索污染物形态转化与微生物群落的耦合作用机制。

参考文献

- [1] 赵陈龙,周世跃,陶燕蓝. 某铜尾矿堆渣场重金属污染特征与风险评估[J]. 有色金属(冶炼部分), 2025, (05): 181-193.
- [2] 詹明晔,孙言秋,周涛,等. 填埋场周边土壤重金属时空分布及污染评价[J]. 西南大学学报(自然科学版), 2025, 47 (04): 167-179.
- [3] 秦维,曾维军,牟桂婷,等. 废弃矿区土壤重金属污染特征及健康风险评估[J/OL]. 环境保护科学, 1-13[2025-05-06].
- [4] 韩俊斌. 重金属污染土壤的防治技术研究[J]. 山西化工, 2025, 45 (03): 261-263.
- [5] 张鹏,崔金英. 重金属污染土壤与地下水修复工程环境监测策略[J]. 中国资源综合利用, 2025, 43 (03): 175-177.