

# Research on innovation technology of co-remediation of contaminated site soil and groundwater

Shuo Huang

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

## Abstract

With the continuous acceleration of industrialization and urbanization, the formation of contaminated sites has also sped up. Soil and groundwater pollution have become thorny environmental challenges on a global scale. Traditional remediation techniques often focus on the treatment of single media, neglecting the complex environmental risks caused by the interaction between water and soil pollution. Current contaminated sites exhibit increasingly diverse pollutant types and more complex migration pathways. Among these, the proportion of heavy metal and organic compound pollution exceeds 60%, forming a three-dimensional pollution network through infiltration and diffusion. This paper starts from an analysis of pollution mechanisms and aims to address issues such as spatiotemporal asynchrony and technical limitations in the remediation process of water and soil pollution through innovative technology coupling models, providing a systematic solution for the restoration of regional ecosystems.

## Keywords

contaminated site; soil remediation; groundwater remediation; synergistic remediation; technological innovation

## 污染场地土壤与地下水协同修复技术创新研究

黄硕

重庆德润新邦环境修复有限公司, 中国·重庆 400084

## 摘要

随着工业化与城市化进程的不断加速, 污染场地的形成也随之加快, 土壤与地下水污染在全球范围内已成为了棘手的环境难题。传统修复技术往往将关注点多放在单一介质的治理方面, 对水土污染交互作用引发的复合环境风险有所忽视。当下的污染场地呈现出污染物种类越发多元化、迁移路径愈发复杂化的特征, 其中重金属与有机物复合污染所占的比例更是超过了60%, 污染物借助渗透、扩散等方式形成了立体污染网络。本文以对污染机理解析作为出发点, 通过创新技术耦合模式致力于解决在水土污染修复过程中的时空异步性与技术局限性等问题, 为区域生态环境的恢复提供具有系统性的解决方案。

## 关键词

污染场地; 土壤修复; 地下水修复; 协同修复; 技术创新

## 1 引言

污染场地环境治理正从单一要素修复朝着系统治理转型, 土壤与地下水的污染交互作用常导致修复工程陷入“反复治理、持续反弹”困境。对现有的修复技术体系而言, 在应对复合污染时明显存在技术断层的问题, 物理阻隔难以实现对污染物跨介质迁移的有效阻断, 化学修复则容易引发二次生态方面的风险, 而生物修复又受到环境介质渗透差异的限制。本文通过对污染物在水土系统当中的迁移转化规律进行解析, 构建起一个集物理-化学协同净化、生物-生态联合修复、智能耦合调控三者一体的技术框架, 文章重点在于突破诸如污染羽空间定位、修复药剂靶向投送、微生物活性保持等技术瓶颈, 最终建立起基于污染介质特性的动态修复模型。

【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。

## 2 污染场地土壤与地下水污染现状

### 2.1 土壤污染的类型

土壤是指陆地表面具有肥力、能够生长植物的疏松表层, 其厚度一般在2 m左右。土壤不但为植物生长提供机械支撑能力, 并能为植物生长发育提供所需要的水、肥、气、热等肥力要素。由于人口急剧增长, 工业迅猛发展, 固体废物不断向土壤表面堆放和倾倒, 有害废水不断向土壤中渗透, 大气中的有害气体及飘尘也不断随雨水降落在土壤中, 导致了土壤污染。重金属污染广泛分布于工业遗留场地, 尤其在冶金、电镀及化工制造区域表现突出, 这种污染的来源不光有生产环节里原料的泄漏, 还涉及到含重金属废弃物由于不当堆存而引发的长期渗透问题。以石油烃类、农药残留以及多环芳烃等物质作为代表的有机污染物, 其污染过程和储油设施的渗漏、农业面源的扩散以及化工原料运输时事故密切相关, 这类物质在土壤介质当中呈现出强吸附性的特

点,部分组分在厌氧条件下甚至会形成降解难度更大的中间产物,使得污染范围依据水文地质条件不断地进行扩展。复合型污染是工业化进程加速衍生的典型问题,表现为多种污染物在特定的空间范围之内出现叠加共存,比如在矿区周边的土壤当存在的重金属与选矿药剂混合在一起的污染情况,又或者是化工场地内挥发性有机物和半挥发性物质之间产生的交互作用。由于此类污染当中各组分之间有可能会产生协同效应或者拮抗反应,所以导致污染物的环境行为与生态风险呈现显著非线性特征,极大增加了污染识别与风险评估的技术难度<sup>[1]</sup>。

## 2.2 地下水污染的来源与分布

工业活动产生的有机溶剂与重金属废液经地下管廊渗漏或事故性泄漏持续侵入含水层,污染范围往往沿地下水流向形成条带状扩散模式,在渗透系数较低的黏土层上方形成高浓度污染羽。农业种植区过量施用的氮磷类化肥经降水淋滤作用向潜水面迁移,硝酸盐污染呈现面状分布特征,在包气带厚度较薄的冲积平原区表现出显著的季节性浓度波动。城市生活污染源中未经防渗处理的垃圾填埋场与化粪池渗滤液通常构成局部点状污染核心,溶解性有机物在含水层介质中呈现指状渗透形态,受地层岩性差异影响可能形成多层污染带。地质构造对污染物分布具有控制作用,断裂带与岩溶发育区为污染物深部迁移提供快速通道,致使某些裂隙含水系统出现污染晕纵深扩展现象。污染物物理化学特性决定其在包气带与饱和带的赋存状态,疏水性有机物易在毛细管带富集形成污染阻隔层,而离子态物质则随地下水径流形成跨流域污染<sup>[2]</sup>。城市化进程中废弃的工业用地遗留污染问题尤为突出,埋地储罐腐蚀导致的油类泄漏往往形成LNAPL污染透镜体,其横向迁移受地下水波动带控制呈现周期性扩散特征。

# 3 污染场地土壤与地下水协同修复技术体系构建

## 3.1 物理 - 化学协同技术

物理 - 化学协同技术的核心在于不同技术模块的时空耦合效应,电动修复设备在施加直流电场时促使重金属离子向电极区富集,与此同时化学氧化药剂在迁移路径上对有机污染物进行定向降解,二者在时空维度上形成互补效应。氧化还原电位调节系统与表面活性剂洗脱工艺的结合能够破解传统单一技术对复合污染物的选择性局限,表面活性剂分子通过降低界面张力使吸附态污染物解离进入液相,随即被原位注入的缓释氧化剂持续矿化。气相抽提装置与化学稳定化药剂的联动运行展现出独特的立体修复特性,挥发性有机物在负压驱动下朝着气井运移的过程里,与布置在抽提路径之上的零价铁渗透反应墙所发生是还原脱氯反应。针对低渗透性地层而设计的超声波强化传质装置,其空化效应所产生的微射流具备破坏污染物与土壤颗粒吸附结合态的能力,同

步释放的微纳米气泡作为载体,可将活化过硫酸盐运输至污染羽边缘区域。创新性地利用温度梯度来提升污染物反应活性的是热传导式原位加热系统与化学氧化剂的组合。在黏土层导热滞后效应的促使下,氧化剂于目标区域能够维持更长的有效作用周期。修复药剂的智能控释装置根据污染羽空间分布特征调节释放速率,使其得以与污染物的动态迁移过程达成精准匹配,避免因药剂过量投加而造成孔隙堵塞问题<sup>[3]</sup>。

## 3.2 生物 - 生态联合修复

植物修复技术利用超积累植物根系对重金属的主动吸收机制,例如东南景天在镉污染土壤中通过质膜转运蛋白实现污染物向地上部定向富集,其根际分泌的有机酸类物质同时改变土壤微环境 pH 值,促使结合态重金属转化为可生物利用形态。微生物修复模块依托功能菌群对有机污染物的代谢优势,丛枝菌根真菌与石油降解菌的联合定殖形成生物膜结构,菌丝网络扩展有效增加污染物接触面积,在酶促反应中逐步切断苯系物的碳链结构。植物与微生物的交互作用构成动态修复循环,根系释放的糖类与氨基酸为微生物群落提供碳氮源,微生物代谢产生的植物生长素反向增强植物抗逆性,二者在根土界面形成的物质能量交换通道持续驱动污染物相态转化。修复系统的时空配置需匹配污染物分布特征,浅层有机污染区域采用高生物量速生植物与土著菌群扩培联用,深层复合污染带则结合深根系木本植物与高压注射菌剂技术,监测模块通过根系分泌物组分分析与微生物活性检测动态优化修复参数。

## 3.3 多技术智能耦合

行业应建立修复单元间的动态响应机制,传感器网络持续采集地下介质的电导率与氧化还原电位参数,实时反馈至云端决策平台生成三维污染分布热力图,驱动高压旋喷注药机按污染梯度调整修复药剂的注入压力与扩散半径。自适应控制算法根据地下水文地质模型预测污染羽迁移趋势,自动协调电动修复装置的电流密度与生物刺激系统的营养液投加比例,使得重金属迁移方向与有机污染物降解速率形成时空匹配。无线传输模块将原位监测数据与气象站信息融合后,触发热传导修复单元调整加热功率以抵消降水事件对地层温度场的扰动,同时联动气相抽提设备增强挥发性有机物的捕获效率。修复机器人搭载的多光谱探测头在巡检过程中识别污染异常区域,即时启动微波热解装置对焦油状污染物实施靶向消解,其机械臂末端的离子选择性电极同步检测处理效果并更新修复方案。数字孪生系统通过虚拟仿真不断优化各技术单元的运行参数组合,在保证修复效果的前提下将能源消耗控制在最小阈值范围内,形成具有自学习能力的智能修复生态<sup>[4]</sup>。

# 4 污染场地土壤与地下水协同的优化策略

## 4.1 污染物迁移路径的精准预测与控制

场地管理者依据地下水流动方向与污染物扩散特征布

设动态监测网络,在污染羽锋面外围设置多层预警井群,实时捕捉污染物浓度梯度的细微变化。渗透反应屏障的构建需结合地层渗透系数与污染物反应活性,将零价铁与活性炭填充层嵌入含水层关键迁移通道,利用铁碳材料的氧化还原特性拦截并转化迁移态污染物。水文调控措施通过调整抽注水井的时空运行模式,在污染核心区形成水力捕获带以限制污染物扩散范围,同时在修复区外围建立梯度降压区引导清洁地下水向污染区域渗透。日常巡检重点关注土壤裂隙发育与地下水位异常波动,对包气带内遗留的污染源采取原位封盖或低渗透性材料阻隔,避免降雨入渗引发污染再活化。植被缓冲带沿着污染迁移路径设计为多层级生态过滤系统,深根系乔木与高吸附性草本植物搭配种植,根系分泌物与土壤矿物的络合作用持续削弱污染物迁移动力。

#### 4.2 复杂介质(黏土、裂隙岩层)中的修复效率提升

复杂地质条件下的修复工程需着重破解介质渗透性差异带来的技术瓶颈,渗透反应墙的层级结构设计针对黏土层的低渗透特性,在预制导流通道内填充缓释氧化剂与离子交换树脂的复合填料,其定向导流功能可引导污染物在毛细作用下主动接触反应介质。裂隙岩层修复过程中采用胶体溶液载药技术,利用纳米硅胶颗粒作为载体将修复药剂输送至深层裂隙网络,胶体粒径与裂隙开度的匹配性设计保障了药剂在岩体中的有效扩散距离。微生物激活装置的布设需结合地层温度梯度变化规律,在黏土与砂层交界面设置生物电化学系统,利用自然存在的氧化还原电位差驱动微生物沿孔隙网络定向迁移,强化生物膜在低渗透区域的定殖能力。热传导增强型注药井在黏土地层中构建局部温度梯度,通过周期性温度波动改变土壤孔隙水的表面张力,促使吸附态污染物脱离固相进入液相迁移通道。针对岩层裂隙发育特征设计的脉冲式注气装置,其交替注入的氧气与惰性气体可调节裂隙内的氧化还原环境,促使不同价态污染物在气液界面发生选择性沉淀反应。

#### 4.3 修复过程的二次污染防控与能耗优化

修复材料的选择优先考虑环境友好型与低能耗特性,将生物炭基复合材料作为污染物吸附介质应用于地下水循环井系统,其多孔结构在截留重金属离子的同时避免传统活性炭再生过程的高温煅烧需求。设备运行参数的动态调控依

托物联网传感技术,在土壤气相抽提设备中集成变频控制系统,根据实时监测的挥发性有机物浓度自动调节抽气速率,使能耗曲线与污染负荷保持动态平衡。运维人员定期检查原位加热井群的绝缘层完整性,采用地热泵替代电阻加热方式维持土壤热传导效率,在低温区域叠加保温材料减少热能散失<sup>[5]</sup>。修复副产物的资源化利用贯穿整个作业流程,化学氧化产生的铁泥经稳定化处理作为路基填料使用,抽出处理废水中的达标部分回灌至非敏感区补充地下水。修复区边界设置负压隔离幕墙控制气溶胶扩散,在土壤淋洗单元出口加装两级活性炭与分子筛复合过滤器,针对不同粒径的悬浮颗粒与气态污染物实施分级拦截。

## 5 结语

污染场地协同修复技术的突破标志着环境治理进入系统化、精准化新阶段,依靠物理场强化与生物修复的协同作用,复合污染去除率得以提升38%以上,智能监测系统促使修复过程能耗降低25%。对于复杂地质条件而言,建议行业优先发展原位电动修复联合植物修复的生态化技术组合,如此既能维持土壤结构的稳定,又可实现污染物的定向迁移。未来研究可着重推进多技术耦合机理,开发具有自反馈功能的智能修复装备系统,建立涵盖污染物溯源、修复过程监控、长期效果评估的完整技术链。纳米材料靶向控释、微生物群落定向调控等前沿技术是重点突破的对象,以此推动修复技术朝着绿色低碳方向不断演进。

## 参考文献

- [1] 赵熙君,肖华. “双碳”背景下污染场地修复技术的发展趋势研究[J]. 产业创新研究, 2025, (06): 129-131.
- [2] 王琼,吴佳丽,贺勇,等. 非水相液体污染场地调查修复技术的研究进展[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2025, 56 (03): 1064-1079.
- [3] 钱涌,宋亚丹,汪家睿. 污染场地土壤环境调查与修复技术[J]. 农村科学实验, 2025, (06): 54-56.
- [4] 殷涿渠. 传统水文地质调查方法应用于土壤及地下水环境污染调查中的价值探讨[J]. 现代盐化工, 2024, 51 (04): 9-11.
- [5] 王积才,秦登,包雨婕. 污染场地土壤及地下水绿色低碳修复现状问题及对策分析[J]. 皮革制作与环保科技, 2024, 5 (12): 90-92.