

不同环保措施下地下水修复效果的动态监测对比

王 铎

广东中加检测技术股份有限公司 广东 广州 510700

摘要：地下水是重要的饮用水源和生态系统的核心组成部分，受人类活动影响，有机和无机复合污染问题愈发严重，修复治理刻不容缓。本研究选取典型污染场地，采用原位微生物强化、可渗透反应墙、抽提—曝气联合、微生物—可渗透反应墙联合四种环保修复措施，构建“时空双维度”动态监测体系，全周期监测污染物浓度等指标，对比分析不同措施的修复效率、环保性与长效性。研究完善了动态监测体系，为修复方案选型与工艺优化提供数据支撑。

关键词：地下水修复；环保措施；动态监测；修复效果；对比分析

引言：地下水是地球淡水资源重要构成，约占全球总量的30%，我国近70%人口以地下水为饮用水源。当下，工业排污、农业面源污染、垃圾填埋渗漏等人类活动，使地下水污染范围不断扩大。权威调研表明，我国地下水污染点位超标率超20%，有机污染物和重金属污染尤为突出，严重威胁饮用水安全与生态环境。传统修复措施存在能耗高、有二次污染、修复不彻底等问题，环保型修复技术渐成研究与应用主流。但不同措施效果受多种因素影响，缺乏系统监测对比，故本文开展相关研究。

1 地下水修复理论与技术体系概述

1.1 地下水污染特性与修复原则

地下水污染源于人类活动污染物渗入，分为有机、无机及复合污染。有机污染物如苯系物、石油烃难降解且毒性大；无机污染物中重金属危害持久。污染物迁移受渗流场、地层岩性等因素影响，形成污染羽。地下水修复需遵循原位优先、环保高效、长效稳定原则，兼顾效果与生态保护，防止二次污染。

1.2 主流地下水修复措施原理

地下水修复措施分单一与联合两类。原位微生物强化修复成本低、无二次污染，适用于轻中度有机污染场地；可渗透反应墙是原位被动修复技术，长效性好；抽提—曝气联合修复适用于中重度污染场地；微生物—可渗透反应墙联合修复融合两者优势，提升修复效率与稳定性^[1]。

1.3 修复效果动态监测技术

地下水修复效果动态监测是评估有效性的核心手段，涵盖物理、化学、生物及数字化监测。物理监测关注水文地质参数；化学监测精准检测多项指标；生物监测反映生态系统恢复情况；数字化监测依托物联网系统，结合数值模拟预判修复效果，助力工艺优化。

2 研究区域概况与实验方案设计

2.1 研究区域与试点场地选择

本次研究选取典型工业污染场地作为试点，该场地位于工业集中区，主要污染来源为周边化工企业排污，污染类型为有机与无机复合污染，污染物主要包括苯系物、铅、镉及硝酸盐。试点场地地形平坦，地层岩性以粉质黏土与砂质壤土为主，地下水类型为潜水，含水层厚度8—12m，渗透系数为0.5—1.2m/d，地下水补给主要来自大气降水，排泄以蒸发与地下径流为主。经现场采样检测，试点场地地下水苯系物浓度为0.8—2.5mg/L，铅浓度为0.15—0.3mg/L，均超出《地下水质量标准》（GB/T14848—2017）III类标准，污染范围约1200m²，污染深度为2—6m，为修复措施对比与动态监测提供了典型场景。

2.2 修复措施选型与实施方案

本次研究设置1个对照区与4个试验区，对照区为无修复措施的自然衰减区，4个试验区分别采用不同环保修复措施，各区域面积均为200m²，确保水文地质条件一致，保证对比的科学性。原位微生物强化修复区投加降解菌剂，投加量为500g/m³，每月投加1次，同步投加营养盐促进微生物生长；可渗透反应墙修复区布设厚度为1.5m的反应墙，反应介质采用沸石、活性炭与零价铁混合材料，配比为3:2:1；抽提—曝气联合修复区设置抽提井与曝气井，抽提流量为1.5m³/h，曝气强度为0.8m³/(m²·h)；微生物—可渗透反应墙联合修复区在反应墙前端投加微生物菌剂，实现工艺耦合。各试验区同步启动修复，修复周期为6个月。

2.3 动态监测体系构建

监测体系按“上游背景区—中游修复区—下游扩散区”分层布设，每个区域设置3口监测井，监测井深度为8m，分别在2m、4m、6m深度设置监测点，确保监测数据的全面性。监测指标包括核心指标与辅助指标，核心指标为苯系物、铅、镉浓度，辅助指标为地下水水位、流速、pH值、溶解氧、氧化还原电位及微生物活性^[2]。监

测频次按修复阶段设置,修复初期(1—2个月)每日监测1次,修复中期(3—4个月)每周监测2次,修复后期(5—6个月)每月监测3次,采用标准化检测方法,确保数据准确性,同时建立监测数据台账,及时记录与整理数据。

3 不同环保措施下地下水修复效果的动态监测结果

3.1 监测数据质量分析

本次监测共获取有效数据1440组,数据完整性达98.5%,通过异常值检验与处理,剔除异常数据21组,确保数据有效性。采用平行样检测法验证数据精度,平行样检测偏差均小于5%,符合地下水监测技术规范要求。监测数据显示,对照区污染物浓度无明显变化,各试验区污染物浓度均呈逐步下降趋势,不同措施的浓度衰减速率差异显著,监测数据能够真实反映不同环保措施的修复效果,为后续对比分析提供了可靠的数据支撑。

3.2 单一环保修复措施的动态监测结果

原位微生物强化修复区监测结果显示,修复6个月后,苯系物浓度降至0.21mg/L,去除率为79.2%,铅浓度降至0.07mg/L,去除率为53.3%,修复初期污染物浓度下降较快,后期趋于稳定,微生物活性较修复前提升65%。可渗透反应墙修复区,修复6个月后苯系物去除率为75.6%,铅去除率为68.0%,污染物浓度从墙体上游至下游逐步降低,反应介质吸附容量逐步饱和,后期去除速率放缓,但长效性突出。抽提—曝气联合修复区,修复6个月后苯

系物去除率为82.4%,铅去除率为58.7%,修复初期污染物浓度下降最快,但后期受抽提效率影响,去除速率趋于平缓。

3.3 联合环保修复措施与对照区监测结果

微生物—可渗透反应墙联合修复区监测结果显示,修复6个月后,苯系物浓度降至0.12mg/L,去除率为91.2%,铅浓度降至0.04mg/L,去除率为80.0%,污染物浓度衰减速率明显快于单一修复措施,微生物活性与反应介质吸附效率协同提升,修复效果最优。对照区自然衰减监测结果显示,6个月内苯系物去除率仅为12.8%,铅去除率为8.7%,污染物浓度自然降解速率缓慢,几乎无明显修复效果,充分体现了环保修复措施的必要性,也为各试验区修复效果对比提供了基准。

3.4 影响修复效果的关键因素分析

影响地下水修复效果的关键因素分为内在因素与外在因素。内在因素主要包括污染物质类型、污染程度与水文地质条件,重金属污染修复难度高于有机污染,重度污染修复效率低于轻度、中度污染,地下水流速越快,污染物扩散越快,修复难度越大。外在因素主要包括修复措施参数、监测与管理水平、外界污染源干扰,修复参数不合理会直接影响修复效率,监测管理不到位会导致修复过程无法及时调整,外界污染源持续输入会降低修复效果^[3]。其中,修复措施参数与污染物质类型的匹配度,是影响修复效果的核心因素。

表1 不同环保措施下地下水污染物去除率动态监测汇总表(%)

修复措施	苯系物去除率(%)	铅去除率(%)	修复稳定时间(天)	微生物活性提升率(%)
原位微生物强化修复	79.2	53.3	120	65
可渗透反应墙修复	75.6	68	90	42
抽提—曝气联合修复	82.4	58.7	60	58
微生物—可渗透反应墙联合修复	91.2	80	75	88
自然衰减(对照区)	12.8	8.7	—	10

4 不同环保措施下地下水修复效果的对比分析

4.1 修复效果单指标对比分析

从污染物去除效率来看,联合修复措施效果最优,微生物—可渗透反应墙联合修复的苯系物、铅去除率分别达91.2%、80.0%,较单一措施最高提升35%、26.7%;抽提—曝气联合修复的苯系物去除率仅次于联合修复,达82.4%,但重金属去除率较低;可渗透反应墙修复的重金属去除率达68.0%,长效性最优,修复稳定后污染物浓度无反弹;原位微生物强化修复对有机污染物的降解效果较好,但重金属去除效率最低。从修复周期来看,抽提—曝气联合修复稳定时间最短,仅60天,原位微生物

强化修复稳定时间最长,达120天,联合修复稳定时间为75天,兼顾效率与稳定性。

4.2 修复效果综合评价对比

构建“修复效率、环保性、经济性、长效性”四大维度综合评价体系,采用层次分析法确定各指标权重,模糊综合评价法量化评分。评价结果显示,微生物—可渗透反应墙联合修复综合得分最高(8.9分),其修复效率高、无二次污染、长效性好,综合性能最优;可渗透反应墙修复综合得分7.8分,长效性突出,环保性好,但修复效率一般;抽提—曝气联合修复综合得分7.5分,修复效率高,但能耗较高,存在轻微二次污染风险;原位

微生物强化修复综合得分7.2分，经济性好、环保性强，但修复效率与长效性一般；对照区综合得分2.1分，无实际修复价值。

4.3 修复效果差异的成因分析

修复效果差异主要源于技术机理与环境条件两方面。技术层面，联合修复措施实现了微生物降解与反应介质吸附的协同作用，弥补了单一措施的短板，显著提升修复效率；抽提—曝气联合修复通过物理抽提与化学曝气结合，加速污染物迁移与降解，适合高浓度污染，但对重金属吸附能力有限；可渗透反应墙依托介质吸附沉淀，对重金属去除效果好，但有机污染物降解效率较低；原位微生物强化修复依赖微生物代谢，受污染物类型限制，对重金属无明显修复作用。环境层面，试点场地渗透系数适中，有利于微生物生长与反应介质作用发挥，若渗透系数过大或过小，会显著影响修复效果。

5 修复措施优化建议与应用展望

5.1 不同污染场景下修复措施的选型建议

针对不同污染场景，结合本次监测对比结果，提出针对性选型建议：轻度有机污染场地，优先选用原位微生物强化修复，成本低、环保性好，可满足修复需求；中度重金属污染场地，选用可渗透反应墙修复，长效性突出，能够实现污染物长期稳定去除；中度至重度复合污染场地，优先选用微生物—可渗透反应墙联合修复，兼顾有机与重金属污染物去除，修复效率与长效性最优；重度污染场地，可采用抽提—曝气联合修复快速降低污染物浓度，后续结合原位修复措施实现长效稳定^[4]。

5.2 核心修复措施的工艺优化方向

针对各修复措施的不足，提出工艺优化方向：原位微生物强化修复可通过菌种驯化，提升微生物对重金属的耐受性，同时优化营养盐投加比例，加快微生物繁殖，提升修复效率；可渗透反应墙可优化反应介质配比，加入改性材料提升吸附容量，同时建立反应介质再生机制，延长使用寿命；抽提—曝气联合修复可优化抽提流量与曝

气强度，减少能耗，同时增加尾气处理装置，避免二次污染；联合修复可优化微生物投加量与反应墙布设位置，强化协同效应，进一步提升修复效果。

5.3 地下水修复动态监测体系的完善建议

结合本次监测实践，提出监测体系完善建议：技术层面，推广物联网+大数据智能监测技术，实现监测数据的实时预警与自动分析，提升监测效率；指标层面，补充生物毒性指标与新兴污染物指标，全面评估修复过程中的生态风险；机制层面，构建修复效果动态预警模型，根据监测数据及时调整修复工艺参数，确保修复效果稳定；范围层面，扩大监测覆盖范围，增加深层监测点位，全面掌握污染物迁移与修复效果。

结束语

地下水污染治理是生态环境保护的重要组成部分，环保修复措施的科学选型与效果监测是提升治理成效的关键。本文通过选取典型污染场地，设置四种不同环保修复措施，构建完善的动态监测体系，系统对比分析了各措施的修复效果、适用场景与存在不足。未来，进一步加强绿色低碳修复技术研发，推动动态监测与数值模拟深度融合，提升地下水修复的智能化、长效化水平，为地下水生态安全与可持续利用提供有力支撑。

参考文献

- [1] 张志华,石素梅,曹煜彬.纳米材料在地下水污染修复中的应用及其效果评估[J].皮革制作与环保科技,2025,6(2): 28-30.
- [2] 乔华艺,赵勇胜,胡晶.生物炭负载纳米零价铁对地下水中六价铬的修复效果和影响因素研究[J].水文地质工程地质,2024,51(1):190-200.
- [3] 李钊,李钧,刘肖然,等.粉煤灰对磺胺嘧啶抗生素污染地下水的修复效果研究[J].河北地质大学学报,2025,48(2): 94-100,128.
- [4] 杨飞.天津某工业地块土壤与地下水污染区域重叠修复工程分析[J].节能,2024,43(6):81-83.