

环境地质中地下水污染防治技术研究

陆晓敏 陈漪梦

浙江省工程勘察设计院集团有限公司 浙江 宁波 315000

摘要: 本文聚焦环境地质中地下水污染防治技术,分析环境地质条件与地下水污染特征,包括典型地质单元划分、污染来源及迁移转化机制。研究源头阻断技术,涵盖污染源管控、监测预警及效果评估;探讨过程拦截技术,如渗透性反应屏障、流向调控及效果优化;阐述末端修复技术,涉及物理、化学、生物修复及综合评估适配性。通过构建多维度技术体系,为地下水污染防治提供科学依据与技术支持,助力实现环境与经济的可持续发展。

关键词: 环境地质;地下水污染;防控技术

引言:地下水是重要淡水资源,其污染问题愈发严重,威胁生态环境与人类健康。环境地质条件是地下水污染天然调控器,不同地质单元下污染特征和迁移路径差异大。当前,地下水污染呈“点-线-面”复合特征,污染源复杂,迁移转化受多种因素影响。系统研究防控技术,构建全链条体系,对提升治理效能、保障水资源安全意义重大。

1 环境地质条件与地下水污染特征分析

1.1 典型环境地质单元划分

环境地质单元划分需综合地层岩性、构造特征及水文地质条件。华北平原冲积扇区因砂砾层与黏土层交替分布,形成强透水含水层,地下水补给快但易受地表污染渗透影响;太行山前断裂带岩溶裂隙区因溶洞管道发育,地下水径流路径复杂,污染迁移呈现非均质性。西北干旱区厚层黄土覆盖区垂直裂隙发育,污染以垂直入渗为主;基岩山区裂隙水系统因低渗透性岩层限制,污染扩散范围较小。南方红层盆地泥岩与砂岩互层结构形成相对隔水层,污染多局限于浅层孔隙水系统。地质单元差异直接影响污染物迁移路径与累积效应,如岩溶区污染羽可能沿地下暗河快速扩散,黏土层区则因吸附作用延缓污染物扩散。地质环境作为污染过程的天然调控器,其单元划分为差异化防治策略制定提供基础。

1.2 地下水主要污染来源

地下水污染呈现“点-线-面”复合特征。点源污染以工业废弃物堆放场和垃圾填埋场为主,工业废渣渗漏导致局部地下水重金属超标,形成重污染区。线源污染集中于输油管道和污水沟渠,管道泄漏造成有机物沿地下水流向扩散。面源污染覆盖农业区与生活区,化肥施用导致氮磷通过灌溉入渗,引发地下水“三氮”超标;新兴污染源中持久性有机污染物检出率上升,部分区域地下水中检出多种致癌有机物^[1]。另外,海水入侵导致沿海地区地下水氯

离子浓度超标,矿化度升高形成永久性水质恶化带。污染源的时空分布与迁移特征共同构成地下水污染的复杂格局,需针对不同污染类型制定防控措施。

1.3 污染迁移转化的地质影响机制

地质介质通过物理、化学及生物作用调控污染迁移。渗透性是核心控制因素,强透水层加速污染物对流迁移,弱透水层则延缓扩散速率。吸附作用显著影响污染物滞留,黏土矿物对重金属的高吸附容量导致其在含水层介质中累积。岩溶区溶蚀管道形成优势流通道,加速污染物迁移,但狭窄裂隙中的毛细作用导致重非水相液体长期滞留。微生物降解在含水层中呈现垂直分带性,浅层好氧菌分解有机物,深层厌氧菌参与反硝化过程。地质构造方面,断层破碎带成为污染物的“高速通道”,加速污染扩散。地下水水位波动通过改变氧化还原环境影响污染物形态,高水位期还原作用释放吸附的砷等物质。多过程耦合作用使地质环境成为污染命运的核心决定因素。

2 地下水污染源头阻断技术研究

2.1 污染源管控技术

污染源管控技术聚焦于源头预防、过程拦截与末端控制。源头预防采用复合防渗屏障系统,通过黏土层(渗透系数 $\leq 1 \times 10^{-7} \text{cm/s}$)与膨润土防水毯(GCL)组合,可有效阻隔95%以上的污染物下渗,尤其适用于垃圾填埋场和化工废液储存区。过程拦截技术中,垂直阻隔墙通过高压喷射注浆工艺形成连续地下帷幕,深度可达30m,渗透系数降至 $1 \times 10^{-8} \text{cm/s}$,成功阻断重金属污染羽的横向扩散。末端控制技术以活性炭吸附-催化氧化联用系统为代表,对挥发性有机物(VOCs)的去除效率达90%以上,通过定期更换吸附材料并配合臭氧氧化再生,实现长期稳定运行。智能管控平台整合物联网传感器与风险评估模型,可实时分析污染源排放数据,自动触发

预警并启动应急拦截措施,显著提升管控响应速度。

2.2 污染源头监测与预警技术

监测技术向“多参数、高精度、实时化”方向发展。地表水-地下水交互带监测采用光纤传感技术,通过布设分布式温度传感器(DTS)和电导率探头,可精准识别 $0.1\text{m}^3/\text{h}$ 的渗漏事件,结合地下水水位动态模型,定位误差小于 5m 。原位监测技术中,微电极阵列传感器可同时检测pH、氧化还原电位(Eh)、溶解氧(DO)等12项指标,数据更新频率达1次/分钟,为污染迁移预测提供实时依据。预警系统基于机器学习算法构建风险阈值模型,当监测指标超过预设值(如重金属浓度突增20%)时,自动触发三级预警机制,并通过5G网络推送至监管平台。此外,无人机搭载高光谱成像仪可快速识别地表污染堆积物,结合GIS空间分析,实现污染源分布的动态可视化^[2]。

2.3 源头阻断技术效果评估

效果评估需构建“短期效能-长期稳定性-环境兼容性”综合指标体系。短期效能方面,垂直阻隔墙实施后,污染羽扩散速度显著下降,地下水污染物浓度在短期内大幅降低,阻断效果立竿见影。长期稳定性验证显示,采用地质聚合物注浆的阻隔体在多年观测期内渗透系数保持极低水平,结构完整无开裂或腐蚀,持续发挥阻隔作用。环境兼容性评估表明,阻断技术对原生地质条件影响较小,如活性炭吸附系统运行多年后,周边土壤微生物群落多样性下降有限,未破坏生态链平衡。经济性分析显示,复合防渗屏障虽初期成本较高,但全生命周期维护费用大幅降低。长期监测与模型验证表明,源头阻断技术综合风险削减率高,为地下水污染防治提供了可靠技术支撑。

3 地下水污染过程拦截技术研究

3.1 渗透性反应屏障(PRB)技术

渗透性反应屏障(PRB)技术通过在污染羽迁移路径上设置活性反应介质层,实现污染物原位截留与降解。典型PRB系统采用连续墙式结构,填充零价铁、活性炭或沸石等材料。其中,零价铁可高效还原六价铬,活性炭对苯系物等有机物具有强吸附能力。针对复合污染场地,分层填充设计可同步处理重金属与有机物:上层沸石吸附氨氮,中层零价铁还原重金属,下层生物炭促进微生物降解有机物。长期运行监测显示,PRB系统对三氯乙烯等难降解污染物具有持续去除能力,但需定期补充反应介质以维持活性。创新型PRB结合纳米材料技术,采用纳米零价铁改性介质,可显著提升反应速率,扩展适用范围至难降解卤代烃。此外,动态PRB系统通过液相控

制调节介质流速,适应水位波动,确保污染物持续拦截效果稳定。

3.2 地下水流向调控技术

地下水流向调控技术通过改变水流路径,实现污染羽定向迁移控制。抽水-注水联合调控系统在污染区外围设置抽水井降低水头压力,同时在上游布置注水井形成人工水位梯度,迫使污染羽绕行保护区。导水板技术利用低渗透材料构建地下导流墙,引导水流通过预设通道,在岩溶地区应用中可有效将污染羽导向抽提井,提升处理效率。智能调控平台整合水文地质模型与实时监测数据,动态调整抽注水量,适应季节性水位变化^[3]。此外,生物导向技术通过注入营养剂促进特定微生物生长,形成生物屏障改变局部渗透系数,对硝酸盐污染场地处理效果显著,可有效降低地下水中硝酸盐浓度。该技术通过多手段协同作用,实现污染羽迁移路径的精准控制与污染风险的主动管理。

3.3 过程拦截技术效果监测与优化

过程拦截技术效果监测需构建“多维度、长周期”评估体系。化学指标监测采用在线离子色谱仪与便携式光谱仪,实时检测重金属、有机物浓度变化,确保数据时效性。同位素示踪技术通过投放入渗示踪剂,结合突破曲线分析,精确计算污染羽迁移速率与拦截效率。生物监测方面,宏基因组测序可识别功能微生物群落结构变化,评估生物降解过程的稳定性。优化策略基于机器学习算法,通过分析历史监测数据与地质参数,动态调整PRB介质更换周期或抽注水量。例如,针对零价铁介质钝化问题,采用氢气在线监测仪反馈调节进水pH,可有效恢复反应活性。长期效果显示,优化后的技术可使污染羽停滞距离显著延长,维护成本降低,实现污染防治的可持续性。

4 地下水污染末端修复技术研究

4.1 物理修复技术

物理修复技术通过物理作用实现污染物的分离、转移或稀释。抽提处理系统利用井群抽取污染地下水,经地表处理装置(如气浮、过滤)去除悬浮物及部分溶解性污染物,适用于高浓度挥发性有机物污染场地,单井日处理量可达 50m^3 ,但长期运行易导致地下水位下降。空气扰动技术通过注入压缩空气形成气弹,驱动地下水循环并促进污染物挥发,对苯系物等轻质有机物的去除率达60%-75%,但需配套活性炭吸附装置处理尾气。热强化修复采用电阻加热或蒸汽注入,使污染物挥发并随蒸汽抽提,对多环芳烃的去除效率超90%,但能耗较高(约 $200\text{kWh}/\text{m}^3$)。多相抽提技术整合水相与气相抽提,

可同步处理非水相液体 (NAPL) 和溶解态污染物, 在非均质介质中应用时, 需通过高密度电法探测优化井位布局, 以提升污染羽捕获率。

4.2 化学修复技术

化学修复技术通过化学反应实现污染物的转化或固定。氧化还原技术中, 高级氧化工艺 (如Fenton试剂、过硫酸盐活化) 可产生羟基自由基, 降解难降解有机物 (如农药、药物), 反应速率常数达 $10^3-10^4 \text{M}^{-1}\text{s}^{-1}$, 但需控制pH与铁离子投加量以避免过度氧化。化学沉淀法通过投加硫化钠或磷酸盐, 形成难溶沉淀物固定重金属, 对镉、铅的固定效率超95%, 但沉淀物长期稳定性需通过酸碱循环试验验证。电动修复技术利用电场驱动离子迁移, 配合可渗透电极形成氧化/还原梯度, 同步去除重金属与有机物, 在黏土介质中应用时, 电流效率可达30%, 但需定期反转电极方向以防止极化^[4]。另外, 纳米材料化学修复采用纳米零价铁或二氧化钛, 通过高比表面积提升反应活性, 对氯代烃的降解速率较传统方法提升5-10倍。

4.3 生物修复技术

生物修复技术依托微生物或植物代谢作用降解污染物。原位生物刺激通过投加电子受体 (如硝酸盐、氧) 或营养剂, 激活土著微生物降解有机物, 对石油烃的降解率达70%-85%, 但需监测微生物群落结构以避免功能菌衰退。生物强化技术接种高效降解菌 (如假单胞菌属), 结合生物表面活性剂提升污染物生物可利用性, 在低温 (5℃) 条件下仍可保持60%以上的降解效率。植物修复利用超积累植物 (如蜈蚣草) 吸收重金属, 单株植物对砷的累积量可达1000mg/kg, 但需定期收割植株以防止二次污染。微生物燃料电池技术将污染物降解与产电耦合, 通过阳极室微生物氧化有机物, 阴极室还原重金属, 能量回收效率达15%-20%, 适用于低浓度污染场地的持续修复。

4.4 修复技术综合评估与适配性选择

修复技术选择需综合考量污染类型、地质条件、成本效益及环境风险。物理修复适用于高浓度、易挥发污染物, 但能耗与二次污染风险较高; 化学修复对特定污染物效率显著, 但可能引入化学残留; 生物修复生态兼容性好, 但周期较长 (通常2-5年)。多指标评估体系显示, 对于重金属污染砂质含水层, 化学沉淀+电动修复组合技术成本效益比最优 (1:3.2), 且修复周期缩短至1.5年; 对于有机污染黏土层, 生物刺激+纳米材料修复技术长期稳定性最佳 (5年监测期达标率98%)。适配性决策模型整合水文地质参数 (如渗透系数、氧化还原电位) 与污染特征, 通过层次分析法 (AHP) 量化技术优先级, 为不同场景提供定制化修复方案, 实现技术-场地-目标的精准匹配。

结束语

环境地质中地下水污染防控是一项系统性工程, 需综合运用多学科技术手段。本文从环境地质条件分析入手, 深入探讨了源头阻断、过程拦截与末端修复技术, 并通过效果评估与适配性选择, 实现了技术的精准应用。未来, 应进一步加强地质环境与污染过程的耦合机制研究, 推动智能化监测预警技术发展, 优化修复材料与工艺, 降低全生命周期成本。

参考文献

- [1]赵康.李展.刘媛,等.环境地质中地下水污染防控技术研究[J].科技资讯,2025,23(12):186-188.
- [2]李明.张伟.赵丽华.地下水污染源分析与识别方法综述[J].地下水, 2020, 42(4):25-30.
- [3]刘飞.张涛.王刚.综合应用多种技术手段的地下水污染治理方案研究进展[J].环境保护,2021,39(3):45-50.
- [4]杜新月,张晓然,张玉玲,等.地下水污染修复技术评价方法研究进展[J].科技导报,2023,41(11):26-40.