

水工环技术在地下水环境保护中的应用探讨

李 敏

山西金地源地质科技有限公司 山西 晋中 030600

摘 要：地下水作为重要的饮用水源和生态载体，其保护对水资源安全与生态平衡至关重要。本文聚焦“水工环技术”（水资源保护技术、工程干预技术、生态修复技术）在地下水环境保护中的协同应用，剖析传统地下水保护模式的局限性，构建“监测—防控—修复”全流程技术体系。通过分析不同污染场景下的技术适配性，结合典型案例论证技术应用效果，为地下水污染防治与生态安全维护提供可操作的技术路径与实践参考。

关键词：水工环技术；地下水环境保护；污染防治；生态修复；技术应用

1 引言

地下水占全球淡水资源的30%，是16亿人口的主要饮用水源，也是维持湿地生态的关键要素。然而，矿产开发、工业废水下渗、农业面源污染等人类活动，导致地下水面临水质恶化（重金属、有机物超标）、水位下降、生态功能退化等问题。“水工环技术”以“水资源保护（Water）、工程干预（Engineering）、生态修复（Environment）”的协同整合为核心，通过技术集成实现地下水环境的系统性保护。本文围绕该技术体系的核心逻辑、关键技术及应用场景展开研究，旨在为地下水环境保护提供兼具创新性与实用性的解决方案。

2 地下水环境面临的核心问题与传统保护模式缺陷

2.1 水质污染类型与成因

点源污染：工业废液池渗漏、矿山尾矿库淋滤液下渗，导致重金属（铅、镉、砷）与有毒有机物（氰化物、苯系物）污染。例如，某化工园区地下水中苯并芘浓度超标10倍，源于储罐区防渗层破损^[1]。

面源污染：农业化肥（氮肥、磷肥）、农药随地表径流渗透，引发地下水硝酸盐（NO₃⁻）、农药残留超标。华北平原某农田区监测显示，地下水硝酸盐浓度年均增长2.3mg/L，远超WHO饮用水标准（50mg/L）。

生态型污染：过度开采导致地下水水位下降，引发海水倒灌（沿海地区）、土壤盐渍化（内陆干旱区），破坏地下水-地表水交互生态。如某滨海矿区因地下水超采，海水入侵距离达5km，地下水氯离子浓度从200mg/L升至1500mg/L。

2.2 生态功能退化

地下水水位下降导致地表缺水死亡（如西北干旱区胡杨林衰退）、湿地萎缩（如三江平原沼泽面积减少60%），破坏“地下水、土壤、环境”生态链，加剧区域生态脆弱性。

2.3 传统保护模式的局限性

2.3.1 技术碎片化：

水质监测、污染治理、生态修复分属不同技术单元，缺乏协同。例如，某重金属污染场地仅采用化学淋洗修复地下水，未同步实施地表防渗工程，导致降雨后污染物再次下渗，修复效果下降40%。

2.3.2 重末端轻源头

依赖“污染后治理”，忽视开采、工业布局等源头防控。传统矿山开发中，疏干排水直接排放导致地下水漏斗形成，后期需投入数倍成本进行人工回灌。

2.3.3 生态适配性不足：

工程措施（如混凝土防渗墙）虽能阻隔污染，但切断地下水自然循环，破坏土壤微生物生态。某工业园区建设全封闭防渗地面后，周边地下水补给量减少30%，土壤板结问题凸显^[2]。

3 水工环技术的核心理念与协同应用框架

3.1 核心理念：“监测—防控—修复”全流程协同

“水工环技术”以地下水环境质量改善与生态功能维持为目标，整合水资源保护技术（水质净化、水量调控）、工程干预技术（污染阻隔、防渗加固）、生态修复技术（环境重建、微生物修复），构建“源头预防—过程控制—末端修复”闭环体系。其核心是通过技术集成实现“水质—水量—水生态”的协同保护，避免单一技术的局限性。

3.2 技术协同应用框架

3.2.1 监测要素：布设地下水水质传感器（监测pH、电导率、重金属离子、硝酸盐）、水位计、水温仪，覆盖重点污染区域（工业区、矿区、农田）与生态敏感区（饮用水源地、湿地补给区）。

3.2.2 技术手段：结合无人机遥感（监测地表污染扩散）、物联网（IoT）实时传输数据，接入智慧管理平

台,形成“地表—地下一生态”多维度监测体系。

3.2.3 风险预警模型开发:基于大数据分析,建立“污染源强度—地下水迁移路径—生态响应”耦合模型,预测污染扩散范围与速度。例如,当某尾矿库下游地下水砷浓度超过预警值(0.01mg/L)时,系统自动触发三级响应:一级(现场排查渗漏点)、二级(启动应急截污工程)、三级(周边居民饮水应急替代)。

3.3 源头防控与过程阻断(关键技术)

涵养技术:在地下水补给区(如山前冲洪积扇)建设人工渗滤场(铺设砾石+砂层,面积 $\geq 1000\text{m}^2$),引导雨水、再生水回灌,提升地下水补给量(目标年补给率增加10%-15%)。

循环利用:工业废水经“预处理(沉淀+过滤)—深度处理(膜分离)—回灌”流程,实现“废水资源化—地下水补源”双重目标。某电厂每年回灌处理后废水50万 m^3 ,使周边地下水水位年均回升0.3m。

污染源头控制技术:针对工业企业,推行“清污分流”管网改造(清洁废水与污染废水分管排放)、储罐区“双层防渗+泄漏监测”(内层HDPE膜,外层混凝土,中间设压力传感器),将渗漏风险降低90%以上。

工程干预技术:污染阻隔与防渗加固

水平阻隔工程:在污染场地周边埋设HDPE防渗墙(深度至不透水层,厚度1.5mm,渗透系数 $< 10^{-12}\text{cm/s}$),阻隔污染物水平迁移。案例:某农药厂地下水有机污染场地,建设防渗墙后,下游100m处监测井苯系物浓度下降85%。

垂直防渗与截污工程:针对地下水径流方向,设置“排水沟+集水井”截污系统(排水沟深度低于污染羽流底部,坡度 $\geq 0.5\%$),将污染地下水抽提至地表处理(如活性炭吸附、高级氧化),形成“截流—处理—回灌”闭环。某重金属污染场地应用该技术,年均处理污染地下水2万 m^3 ,重金属去除率达98%。

3.4 末端修复与生态重建(核心目标)

渗透反应墙(PRB):在地下水径流路径填充铁屑、活性炭等反应介质,通过还原、吸附去除重金属(如 Fe^0 还原 Cr^{6+} 为 Cr^{3+})。某铬污染场地PRB运行1年后, Cr^{6+} 浓度从1.2mg/L降至0.05mg/L(达标限值)。

电动修复:在污染区域布设电极,利用电场驱动重金属离子向电极迁移并富集,适用于渗透性差的黏土类地层(修复效率较传统方法提升30%)。

3.5 生物修复技术:

微生物强化:向污染地下水注入功能菌剂(如脱氮菌、硫酸盐还原菌),降解有机物(如苯系物)、固定

重金属(如将 Cd^{2+} 转化为 CdS 沉淀)。某石油烃污染场地投加菌剂3个月后,总石油烃(TPH)浓度从500mg/L降至50mg/L。通过地表种植特定功能性载体(如具备定向富集能力的生物单元),构建“吸收—转运—富集”污染去除链条,实现地下水中目标污染物的削减。该过程依托载体根系的物质交换功能,在吸附、富集重金属(如砷、镉等)的同时,通过根系代谢产物激发土壤微生物活性,促进微生物群落的多样性与代谢效率,形成“污染修复—生态激活”的协同效应,为地下水污染场地的原位修复提供生物化解决方案。

3.6 生态功能修复技术:“地下水—地表生态”联动

地下水水位调控与湿地重建:对超采区实施人工回灌(水源为处理后的再生水、雨水),将地下水水位恢复至有效吸收层(埋深 $< 5\text{m}$),同步重建地表湿地(种植芦苇、香蒲),利用“地下水—湿地水体”交互作用净化水质,形成生态缓冲带。某湖泊周边湿地修复后,地下水硝酸盐浓度下降40%,鸟类种类增加20种^[1]。

土壤—地下水生态链修复:针对污染场地,先通过生物炭改良土壤(添加量5%-10%,吸附重金属与有机物),再种植耐污染草本植物(如黑麦草、高羊茅),利用植物根系呼吸作用提升土壤透气性,促进地下水与土壤的物质交换,逐步恢复“土壤过滤—地下水补给”的自然净化功能。

4 典型案例:水工环技术在某矿区地下水环境保护中的应用

4.1 矿区概况

某铅锌矿位于西南山区,属岩溶地貌,开采历史30年,因早期尾矿库防渗措施缺失,导致下游地下水铅(Pb^{2+})、镉(Cd^{2+})超标(分别达0.3mg/L、0.1mg/L,远超GB/T 14848-2017Ⅲ类标准0.01mg/L、0.005mg/L),且地下水水位年均下降1.5m,周边农田土壤重金属含量超标2-5倍,环境覆盖率不足20%。

4.2 水工环技术实施方案

监测与预警体系:布设15眼监测井(污染核心区5眼,扩散区8眼,对照区2眼),实时监测 Pb^{2+} 、 Cd^{2+} 、pH、水位,数据接入矿区智慧平台,设定超标预警值($\text{Pb}^{2+} \geq 0.02\text{mg/L}$, $\text{Cd}^{2+} \geq 0.01\text{mg/L}$)。

4.3 源头防控与过程阻断

尾矿库改造:清除原有渗漏尾矿渣,底部铺设“HDPE膜(2mm厚)+膨润土防渗层(50cm厚)”,周边建设截洪沟(防止雨水冲刷尾矿),渗滤液经“中和沉淀(投加石灰)—硫化物处理(去除重金属)”后,回用于矿山降尘(回用率100%)。

地下水截污工程：在尾矿库下游50m处，沿地下水径流方向建设PRB（长度100m，深度至基岩，填充铁屑:活性炭=3:1），拦截迁移的 Pb^{2+} 、 Cd^{2+} 。

4.4 末端修复与生态重建

水质生物修复：向污染核心区地下水注入硫酸盐还原菌菌剂（浓度 10^8 CFU/mL），通过还原反应将 Pb^{2+} 、 Cd^{2+} 转化为硫化物沉淀；同时，在地表污染区域种植超富集植物遏蓝菜（种植密度8株/ m^2 ），每年收割2次，经测算，年去除 Pb 约5kg/亩、 Cd 约1kg/亩。

生态功能恢复：建设人工回灌池（容积2000 m^3 ），将处理后的矿坑水与雨水混合，通过渗滤沟回灌至地下水含水层，2年后地下水水位回升1.2m。

对周边农田实施“客土覆盖（30cm厚）+微生物菌剂改良（接种枯草芽孢杆菌）”，种植耐重金属作物（如向日葵、苕麻），配套建设农田防护林（杨树+紫花苜蓿），1年后土壤 Pb 、 Cd 有效态含量下降35%，环境覆盖率提升至65%。

4.5 实施效果

水质改善：3年后，监测井 Pb^{2+} 、 Cd^{2+} 浓度分别降至0.008mg/L、0.003mg/L，达标率100%。

生态恢复：地下水水位稳定在地表以下3m，适合草本植物根系吸收；农田土壤有机质含量从0.8%提升至1.5%，蚯蚓等土壤生物密度增加2倍，生态系统逐步向“草本—灌木”群落演替。

5 水工环技术应用的挑战与优化路径

5.1 主要挑战

技术适配性难题：不同地质条件（如岩溶区、松散孔隙区）下，地下水迁移规律差异显著，需针对性研发技术组合（如岩溶区优先采用PRB+注浆封堵，孔隙区适用电动修复+植物修复）。

长效运维成本高：生物修复、人工回灌等技术需长期投入（如菌剂定期投加、监测设备维护），中小企业环保投入能力有限，制约技术推广。

多要素协同机制缺失：地下水保护涉及水利、生态环境、自然资源等多部门，存在“监测数据共享难、治理责任划分模糊”等问题，需强化跨部门协同管理。

5.2 优化路径

技术创新与集成：研发“低成本、易操作”的模块

化技术装备（如集装箱式地下水处理设备、可降解PRB材料），降低中小企业应用门槛。

推动“物联网+区块链”技术在监测数据共享中的应用，确保数据真实可信，支撑跨部门协同决策。

5.3 政策激励与资金保障

将水工环技术应用纳入地下水污染防治专项资金支持范围，对采用先进技术的企业给予补贴（如按处理水量补贴1-3元/ m^3 ）。

推行“环境修复+资源开发”联动模式，如在回灌区划定地下水储备区，允许企业在达标前提下优先使用回灌水资源，实现“保护—利用”良性循环。

5.4 标准体系与管理创新

制定《水工环技术地下水环境保护应用指南》，明确不同污染场景下的技术选型、施工标准与运维要求（如PRB填充材料更换周期、菌剂投加浓度阈值）。

建立“污染者付费+生态受益者补偿”机制，例如，对超采地下水的企业征收水资源补偿费，用于补给区的人工回灌与生态修复。

6 结论

水工环技术通过整合水资源保护、工程干预与生态修复，为地下水环境保护提供了“监测精准化、防控系统化、修复生态化”的解决方案。其核心价值在于打破传统技术的碎片化局限，实现“水质改善、水量平衡、生态恢复”的协同目标。未来，需进一步聚焦技术适配性创新、成本优化与跨部门协同机制建设，推动水工环技术从“示范应用”向“规模化推广”转变，为地下水这一战略资源的可持续利用筑牢技术与管理防线，助力我国水生态安全与绿色发展目标的实现。

参考文献

- [1]张永进,张志栋.矿山水工环技术在地质灾害防治中得应用分析[J].世界有色金属,2023(19):139-141. DOI:10.3969/j.issn.1002-5065.2023.19.047.
- [2]赵丹.地下水环境保护对策研究分析[J].西部探矿工程,2024,36(5):74-76. DOI:10.3969/j.issn.1004-5716.2024.05.022.
- [3]高瑶瑶,普强,王震.地下水数值模拟技术及应用综述[J].资源环境与工程,2025,39(2):197-205. DOI:10.16536/j.cnki.issn.1671-1211.2025.02.010.