

岩溶地区地下水污染特征与修复技术适配性研究

梁 信

江苏众川生态环境有限公司 江苏 南京 210019

摘 要：本文针对岩溶地区地下水污染问题开展系统调查，通过建立科学监测体系，对物理指标与化学污染物谱系进行全面分析，探究污染成因及传播规律。探究揭示岩溶地区地质构造、人为活动与水文地质条件对污染物迁移转化影响机制，筛选评估物理、化学及生物修复技术适用性。通过区域地质条件匹配、技术经济效益评价及试点示范应用，提出岩溶区地下水污染修复技术适配性提升策略，为岩溶地区地下水污染防治提供科学依据与技术支撑。

关键词：岩溶地区；地下水污染；修复技术

引言：岩溶地区因特殊地质构造与水文地质条件，地下水系统复杂，污染物迁移转化规律独特，污染防控难度大。随着工农业发展与城镇化进程加速，岩溶地区地下水污染日益严重，威胁区域水资源安全与生态环境健康^[1]。针对岩溶地区地下水污染特征与修复技术适配性研究具有重要理论价值与实践意义，可为区域地下水污染防治提供科学理论指导与技术方法支撑，促进岩溶地区水资源可持续利用与生态环境保护。

1 地下水污染特征分析

1.1 采样监测体系建立

针对岩溶地区地下水系统结构复杂性，建立科学合理采样监测体系，对准确掌握污染特征至关重要。采样点布设需充分考虑岩溶发育程度、地下河分布、溶洞连通性等因素，构建包含泉点、溶洞、钻孔等多类型监测点网络，确保采样点覆盖面广且具代表性。监测频率应根据季节变化与降雨特征合理安排，丰水期适当增加采样频次，枯水期保持基本监测，形成长期稳定监测序列。

采样过程中需严格遵循技术规范，采用标准化采样设备与保存容器，确保样品代表性与完整性^[2]。现场监测项目包括水位、水温、pH值以及电导率等快速变化参数，实验室检测项目则包括常规理化指标与特征污染物，所有采样与分析过程均需保证质量控制，建立完善监测数据库为后续污染特征分析奠定基础。

1.2 物理指标系统评估

物理指标评估是了解岩溶地区地下水基本特性重要手段，通过对水温、pH值、电导率、浊度以及溶解氧等物理参数系统监测分析，可初步判断地下水质状况与异常变化^[3]。温度波动性反映岩溶系统开放程度，稳定温度区域可能暗示封闭性较强地下水体；pH值变化则直接关联溶蚀作用强度，高pH值区域往往石灰岩溶蚀强烈；电导率高低则反映水体矿化程度与污染物含量，异常电导

率常提示污染物质输入。

在系统评估方法上采用时空变异分析，绘制物理指标空间分布图与时间序列变化曲线，确定各指标异常区域与变化趋势。应用主成分分析、聚类分析等多元统计方法，挖掘各物理指标间内在联系，建立物理指标评价体系，为污染风险评估提供科学依据。物理指标异常区域往往成为污染物调查重点，指导后续化学污染物分析方向，提高监测效率^[4]。

1.3 化学污染物谱系分析

化学污染物谱系分析旨在全面掌握岩溶地区地下水污染物种类、含量与分布规律。监测内容包括常规污染物如氮、磷、硫化物、氯化物、硫酸盐等离子浓度，特征无机污染物如重金属元素（铅、汞、镉、铬）含量，以及特征有机污染物如石油类、挥发性有机物、持久性有机污染物含量。通过多元统计分析 with 地球化学模拟，建立岩溶地区地下水化学污染物指纹特征，识别主控污染物与潜在风险物质^[5]。

污染物谱系空间分布规律研究表明，岩溶地区污染物分布极不均匀，呈现明显点源、线源特征，溶洞发育区域成为污染物快速迁移通道，导致远距离污染扩散现象。时间序列分析显示，降雨期间污染物浓度变化显著，部分区域表现为稀释效应，污染物浓度降低而部分区域却因地表污染物快速入渗而浓度升高，充分体现岩溶地区地下水系统对外部环境响应敏感性特点。

2 污染成因及迁移

2.1 地质构造对污染迁移影响

岩溶区域断裂构造形成地下水主要径流通道，对污染物迁移方向与速率产生决定性影响，岩溶裂隙网络发育程度直接控制污染物扩散范围与强度。溶洞系统连通性显著影响污染物运移方式与停留时间，高连通性区域污染物迁移速率可达数百倍于一般地区。通过地质雷达

探测与电法勘测结合钻孔验证,已完成岩溶区地质构造精细刻画为污染物迁移模拟提供构造基础数据支撑。

岩溶区含水层结构复杂导致污染物迁移呈现多路径特征,垂向上形成多层次污染分带现象,水平方向则沿优势通道快速扩散。大型溶洞与暗河系统内污染物运移速度可达非岩溶区数十倍且流动性强,难以形成稳定降解环境。区域岩溶发育不均匀性造成自净能力空间差异显著,高渗透区域自净能力往往极弱而含泥质溶洞区域则表现出较强吸附降解能力,这种不均一性特征为污染物迁移模拟与修复治理带来巨大挑战。

2.2 人为因素导致的污染源

人为因素导致的污染源认定是判断污染成因关键环节,本文采用环境调查、污染源解析与同位素示踪技术手段确定主要污染源类型与贡献率。工业来源污染主要包括矿山开采与选矿过程中重金属渗漏,工业园区废水处理不当排放,工业固废堆场淋溶液渗透等呈现典型点源高浓度污染特征。农业来源污染则主要由化肥农药过量使用,养殖场粪污管理不善,灌溉回归水携带污染物入渗等形成,表现为面源低浓度污染特点。

生活来源污染涵盖城镇生活污水收集处理系统不完善,农村分散式污水直接排放,垃圾填埋场渗滤液下渗等方面具有污染范围广泛且持续性强特点。通过建立污染物特征比值分析方法,结合主成分分析与聚类分析等统计技术,应用氮氧同位素与锶同位素环境示踪技术,构建区域污染源解析模型,精确量化各类污染源对地下水质量贡献比例为污染成因判断提供科学依据。

2.3 水文地质条件对污染迁移影响

通过系统水文地质调查工作,成功划分主要含水层单元,确定区域地下水流场结构,识别关键地下水补给区、径流区与排泄区,建立岩溶地区地下水系统运行模型。完成水文地质参数测定工作获取含水层渗透系数、给水度、弥散度等关键指标数据为污染物迁移数值模拟提供必要参数支持。

岩溶区降雨入渗机制研究表明,区域地表水与地下水转换关系复杂,存在多种入渗途径包括漏斗型洼地集中入渗模式、裂隙网络分散入渗模式以及溶蚀裂隙带带状入渗模式,不同入渗方式对污染物携带能力与入渗速率差异显著。区域地下水流速分带现象广泛存在,主要通道流速可达每天数千米而边缘区域流速可能低至每天几米,这种流速差异导致污染物在系统中形成复杂时空分布格局,显著增加污染风险预测难度与修复工程实施复杂程度。

3 修复技术路径探索

3.1 筛选物理修复方法

物理修复方法主要依靠物理作用原理实现污染物去除或隔离,针对岩溶地区特点,筛选评估适用性强物理修复技术方案。水力阻隔技术通过构建抽水井系统,形成水力坡度,控制污染羽扩散范围;渗透性反应墙技术则在污染物迁移路径上设置特殊填料墙体,利用吸附、过滤等作用截留污染物;土工材料隔离技术则在关键区域构筑防渗屏障,切断污染物迁移通道。

物理修复方法适用性评估结果表明,常规抽出处理技术在岩溶区应用受限,抽水影响半径小,污染物去除效率低而针对性开发水动力调控技术则表现较好,通过控制地下水流场引导污染物向指定区域集中,提高处理效率。原位吸附技术结合岩溶区流场特性,在关键节点投放环保型吸附材料,能有效截留重金属与有机污染物。物理修复方法的优势在于见效快,适用污染物类型广泛但修复深度有限,往往需与其他技术组合应用。

3.2 试验化学修复方案

化学修复技术通过化学反应或化学物质添加,改变污染物理化性质,实现污染物降解、转化或固定。针对岩溶地区地下水污染特征,开展多种化学修复方案试验研究。原位氧化还原技术利用高锰酸钾、过硫酸盐等强氧化剂注入地下水系统,降解有机污染物。原位化学还原技术则通过投加零价铁、硫化物等还原剂,将高价态重金属转化为低毒性形态。

化学修复试验结果表明,岩溶区高渗透性特点导致化学药剂停留时间短,反应效率低,常规注入方式难以覆盖主要污染区域。针对这一问题开发脉冲式可控释放技术,通过将化学药剂包裹于特殊载体中实现在目标区域缓慢释放,延长反应时间,提高处理效率。化学稳定剂筛选实验显示,改性沸石、膨润土等材料在岩溶地区地下水环境中表现良好,能有效固定重金属污染物且不会引入二次污染风险。

3.3 推广生物修复技术

生物修复技术依托微生物变化的活动,实现污染物降解、转化或固定,因环境友好性与持续作用能力,成为岩溶地区地下水污染修复重要方向。基于岩溶区地下水微生物群落结构特征,筛选本土高效功能菌株,包括降解有机污染物细菌、固定重金属微生物以及氮磷转化微生物。构建复合型生物修复菌剂,开发生物强化与生物刺激技术,针对岩溶地区不同污染类型,确定最优生物修复方案。

生物修复技术推广应用实践表明,岩溶区水流速度快、环境变化剧烈特点对微生物定植形成挑战。通过开发生物载体定植技术,利用多孔介质(如活性炭、沸石

等)作为微生物附着载体,显著提高生物修复系统稳定性。生物-物理-化学联合修复体系构建研究显示,前期采用物理方法控制污染扩散,中期应用化学方法降低污染负荷,后期引入生物修复技术实现长效治理能够实现岩溶区地下水污染高效修复。

4 技术适配性提升策略

4.1 匹配区域地质条件

通过开展地质条件精细刻画,将岩溶区划分为强溶蚀带、中等溶蚀带与弱溶蚀带,针对不同溶蚀带特点选择适宜修复技术。强溶蚀带特征是溶洞发育、地下河系统完善、地下水流速快,适宜采用水动力控制技术结合生物载体技术,中等溶蚀带裂隙发育中等、地下水流速适中可采用原位化学修复结合生物强化技术;弱溶蚀带岩溶不发育、地下水流速慢,传统抽出处理技术效果较好。

地质构造影响因素综合考量模型建立,通过将岩性组合、构造裂隙、溶洞发育程度、覆盖层厚度等关键参数纳入评价体系,构建修复技术适配性定量评估模型。修复工程实践证明,基于地质条件精细刻画结果选择修复技术,能显著提高修复效率,降低工程风险。

4.2 评价技术经济效益

技术经济效益评价是修复方案优化选择关键环节,通过构建综合评价体系,权衡技术可行性与经济合理性。建立包含修复效率、时间周期、成本投入、环境影响等因素多维评价指标体系,采用层次分析法确定各指标权重,应用模糊综合评价方法对候选技术方案进行排序。成本效益分析表明,岩溶区地下水污染修复成本普遍高于非岩溶区,主要原因在于修复周期长、工程难度大、材料消耗量大。

不同规模污染场地经济效益比较研究显示,大型污染场地适宜采用分区治理策略,重点污染区采用高效快速技术,一般污染区选用经济型长效技术,可显著降低整体修复成本。技术组合应用经济性分析结果表明,单一技术修复效果往往难以满足要求而多技术协同应用虽前期投入较大,但长期效益显著,总体经济性优于单一技术。

4.3 开展试点示范应用

试点示范应用是技术适配性验证与推广关键环节,通过在典型岩溶区开展修复技术示范工程,积累实践经

验,完善技术体系。示范工程区域选择原则是具代表性、典型性与可推广性,覆盖不同岩溶发育程度、污染类型与污染程度场地。示范工程实施采用小规模试验—中试放大—工程应用渐进模式,每阶段均设立严格效果评估标准,达标后方可进入下一阶段,确保技术可靠性与安全性^[6]。

示范工程实践经验总结表明,岩溶区地下水污染修复需特别注重前期勘察评估工作,投入足够资源开展地质构造调查与污染特征分析,为技术选择提供科学依据。技术应用过程中需加强实时监测与动态调整,针对岩溶区环境变化快特点,建立响应灵敏监测网络与快速决策机制。成功经验推广体系构建,通过编制技术指南、建立案例库、组织现场观摩等方式,促进先进适用技术推广应用。

结论

本文针对岩溶地区地下水污染特征与修复技术适配性开展系统探究,通过建立科学监测体系,全面分析岩溶区地下水物理指标变化规律与化学污染物谱系分布特征,揭示岩溶地区地下水污染呈现点源高浓度与面源低浓度并存、季节性变化显著、垂向分带明显等特点。基于污染特征与传播机制,筛选评估物理修复、化学修复与生物修复技术适用性,提出了不同类型修复技术适配条件与优化组合方案。

参考文献

- [1]黄福杨,单婷倩,林静,等.典型西南岩溶地下水抗生素污染指示因子识别[J].地质科技通报,2024,43(2):283-292.
- [2]刘伟,刘昊洋,朱天龙,等.人工神经网络在我国西南地区岩溶地下水污染评价中的应用[J].河北建筑工程学院学报,2024,42(3):127-135.
- [3]罗林,郑明英,王万金.典型非均质岩溶地下水污染治理新思路及关键技术[J].地下水,2024,46(3):77-79.
- [4]梁川,陈志宇,李伟,等.示踪试验在岩溶地区金属矿山地下水污染调查中的应用[J].国土资源导刊,2024,21(3):43-47.
- [5]王波,王宇,张贵,等.滇东南泸江流域岩溶地下水质量及污染影响因素研究[J].地球学报,2021,42(3):352-362.
- [6]刘长礼,王秀艳,赵悦文,等.一种岩溶地下水污染风险的源径标值评价方法[J].地球学报,2021,42(3):363-372.