

浅层地下水污染水文地质调查与防渗治理方案研究

张玉春

巴彦县自然资源局 黑龙江 巴彦县 151800

摘要：浅层地下水作为水资源系统的重要组成部分，其污染问题日益严峻，直接威胁生态安全与供水安全。本文立足水文地质学视角，系统论述浅层地下水污染调查的核心内容与方法体系，重点分析污染物的迁移转化规律及水文地质控制因素，进而提出以防渗为核心的分级分区治理方案框架。研究强调，精细化水文地质调查是污染识别与风险评估的基础，而多技术耦合的防渗治理体系是实现污染管控的关键路径。本文旨在为区域地下水污染防控提供理论依据与技术参考，同时探讨调查数据质量管理和治理工程全生命周期评价等现实议题。

关键词：浅层地下水；水文地质调查；污染迁移；防渗治理；地下水保护

引言

浅层地下水通常指埋藏于地表以下第一个稳定隔水层之上的含水层中的重力水，其与地表水联系密切，更新周期短，易受人类活动影响。近年来，工业泄漏、农业面源污染、生活污水下渗等导致浅层地下水污染事件频发，污染物种类涵盖重金属、有机溶剂、硝酸盐及新兴微量有机污染物。与深层地下水相比，浅层含水层的自净能力有限，一旦污染，治理修复成本极高且周期漫长。因此，构建科学的水文地质调查方案并据此制定有效的防渗治理策略，是当前地下水环境保护领域的紧迫课题。

1 浅层地下水污染的水文地质调查

1.1 调查目标与总体框架

浅层地下水污染水文地质调查的根本目标是查明污染源特征、含水层结构、水文地球化学环境以及污染羽的时空分布，为污染风险评估和治理设计提供数据基础。调查工作应遵循“由面到点、由粗到精”的递进原则，划分为预备调查、系统调查和专项调查三个阶段。预备调查侧重于资料收集与现场踏勘，包括区域地质图、水文地质图、土地利用现状及潜在污染源清单。系统调查则通过钻探、物探和井网布设，获取含水层厚度、岩性分层、渗透系数、水力梯度等参数。专项调查聚焦于特征污染物的浓度分布、赋存形态及迁移速率，必要时开展示踪试验或同位素分析。整体框架应涵盖地质结构调查、地下水动力场调查、水化学场调查和污染源追溯四个维度，各维度之间相互校核，形成闭合证据链。同时，调查方案应参照现行技术标准（如《地下水环境监测技术规范》和《水文地质调查规范》），确保数据采集、保存和处理的规范化，并建立数据质量三级审核制度，降低人为误差。

1.2 关键调查技术手段

在野外调查中，高密度电阻率法和浅层地震反射法可用于快速圈定含水层边界和隐伏断裂，而地质雷达则适用于探测近地表非均质体。钻探取心需严格控制岩心采取率，并在现场进行编录和简易水文观测。井孔设计应考虑污染源方位和地下水流向，采用三角形或放射状布孔方案，确保控制住污染羽的主体范围。水位监测应覆盖丰枯季节，至少持续一个水文年，以获取动态变化规律。水样采集须遵循“低流量、低扰动”原则，现场测试pH、电导率、溶解氧、氧化还原电位等指标，实验室分析依据国家或行业标准执行^[1]。此外，地层渗透性试验（如微水试验、抽水试验）可定量获取含水层水力参数，为后续迁移预测提供依据。值得注意的是，调查中应同步记录包气带厚度与岩性特征，因为包气带对污染物下渗具有显著的阻滞和衰减作用，其属性直接影响污染风险等级。近年来，无人机遥感与热红外成像技术也开始应用于大面积污染痕迹识别，可作为辅助手段纳入调查流程，提高前期靶区选定的效率。

1.3 污染源识别与风险等级划分

基于调查数据，需对潜在污染源进行清单式识别，并按释放可能性、毒性强度和迁移潜力进行评分排序。污染源可分为点源（如储罐泄漏、废井直排）、线源（如排污河道、农业灌渠）和面源（如化肥农药施用区）。同时，结合含水层脆弱性评价，采用DRASTIC模型或其改进形式，对研究区进行污染风险等级划分。该模型考虑地下水位埋深、净补给量、含水层介质、土壤类型、地形坡度、包气带影响和水力传导系数等因子。通过叠加分析，可生成风险分区图，分为高风险、中等风险和低风险三级。高风险区应作为后续防渗治理的重点靶区，中等风险区实施常规监控，低风险区以预防为

主。这一分级思路有助于合理配置治理资源,避免“一刀切”式的过度治理或治理不足。需要强调的是,风险等级并非一成不变,应随着监测数据的积累定期更新,当发现污染趋势恶化或新污染源出现时,及时升格管控级别。

2 污染物迁移的水文地质机制

2.1 对流-弥散作用与吸附降解

污染物在浅层地下水中的迁移主要受对流、机械弥散、分子扩散以及物理化学吸附、生物降解等共同控制。对流作用驱动污染物沿水力梯度方向整体运移,其速率取决于含水层有效孔隙度和水力坡降。弥散作用则使污染羽在纵向和横向上不断扩展,其宏观弥散度具有尺度效应,在场地尺度上通常比实验室值高出数个数量级。吸附作用显著影响重金属和疏水性有机物的迁移速度,分配系数与有机碳含量呈正相关。生物降解则主要针对可生化有机物,在好氧和厌氧条件下分别遵循不同的代谢路径,但降解速率受电子受体供给和营养盐限制。这些过程的耦合效应决定了污染羽的形态、浓度峰值位置及衰减趋势,需要在调查阶段通过参数反演加以量化。

2.2 水文地质条件对迁移的控制作用

含水层岩性、厚度、层间连通性以及隔水层完整性是控制污染物空间分布的内因。粗砂砾石层渗透性强,污染羽扩散速度快,但吸附容量相对较低;细砂或粉砂层渗透性弱,但比表面积大,吸附能力强,可延缓污染物前缘推进。层间连通性若较强,则污染物可能向下穿越弱透水层,威胁更深部含水层。地下水的季节性波动亦不可忽视,水位抬升时,包气带中蓄积的污染物可能被重新溶解释放,形成“二次污染”脉冲^[2]。此外,地形地貌和地表水系切割程度影响地下水的排泄基准,从而改变污染物的最终归宿。在调查中,应特别关注优势通道(如裂隙、古河道、废弃井孔)的存在,它们可导致污染物发生“非达西”式快速迁移,使得基于均匀介质假定的预测模型出现严重偏差。

2.3 时空尺度效应与不确定性

污染迁移具有显著的时空尺度效应。在时间尺度上,短期泄漏事件形成高浓度、小范围的污染斑块,而长期缓慢渗漏则导致大范围、低浓度的弥散污染。在空间尺度上,场地级调查(百米级)与区域级调查(千米级)所揭示的规律可能截然不同,前者强调局部非均质性,后者侧重于整体流场格局。不确定性来源于水文地质参数的空间变异性、污染源释放历史的不明确性以及边界条件的模糊性。为此,调查方案应引入多源数据融合方法,如贝叶斯反演或集合卡尔曼滤波,以量化不确定

性并优化监测井位。同时,应设置备用监测点,以便在发现新污染线索时动态加密,确保调查结果的稳健性。

3 浅层地下水污染防治治理方案

3.1 防渗治理的基本原则

防渗治理的核心理念在于“源头阻截—路径隔断—受体保护”三层防线。源头阻截针对污染源本身,采取物理封闭、化学固定或原位处理等方式,削减污染物持续释放通量。路径隔断则通过构建垂直或水平防渗屏障,切断污染羽向下游或深层迁移的通道。受体保护则侧重于对供水井、地表水体等敏感目标的应急防护,设置抽取-处理系统或水力截获带。三项措施应依据风险等级和污染阶段进行组合,形成“一区一策”的差异化方案。治理设计还需兼顾可持续性,优先选用低能耗、低材料消耗的生态型防渗技术,避免治理过程本身产生二次污染。同时,应制定长期监测与维护计划,因为防渗工程的实效性需通过持续观测进行验证和调整。在全生命周期内,还需纳入成本-效益分析,综合考虑初期建设投资、运行维护费用以及环境损益,确保治理方案在经济上可承受、在环境上有效。

3.2 防渗技术体系分类

目前成熟的防渗技术可划分为物理屏障、化学稳定和生物-水力联合三大类。物理屏障包括柔性膜(HDPE土工膜)、刚性墙(混凝土连续墙)、深层搅拌桩墙、高压喷射注浆墙以及可渗透反应墙(PRB)等。其中,HDPE膜适用于地表封闭或垂直帷幕,防渗性能优异,但对施工质量和接缝处理要求较高;深层搅拌桩墙适宜在黏土层中建造,成本适中;PRB则兼具隔断与降解功能,内填零价铁或活性炭,可原位处理氯代烃和重金属^[3]。近年来,膨润土防水毯(GCL)作为复合衬层被广泛应用于水平防渗,其自愈性能较好。化学稳定技术通过向含水层注入胶凝材料(如水泥浆、水玻璃)或氧化还原剂,改变土壤孔隙结构或污染物形态,降低其迁移性。生物-水力联合技术利用抽水井形成局部降落漏斗,辅以生物刺激药剂注入,在定向流场中促进降解。不同技术有各自适用条件和局限性,选择时需综合考虑污染深度、含水层渗透性、污染物化学性质及治理周期要求。防渗墙施工过程中,应严格控制墙体垂直度、搭接宽度和完整性,并通过取芯或跨孔CT检测进行质量验收。

3.3 分级分区综合治理方案设计

以水文地质调查成果和风险分区为基础,设计如下分级分区治理方案:

3.3.1 高风险核心区(污染源附近及污染羽前缘密集区)

实施垂直防渗帷幕结合源头固化稳定化。沿污染羽边界施工水泥-膨润土连续墙,墙深嵌入隔水层至少0.5米,确保封闭效果。墙内区域采用高压旋喷注浆改良浅层土壤,降低渗透系数至 1×10^{-7} 厘米每秒以下。同时,在核心区内部布设抽水井群,抽出污染水经地面处理设施(如活性炭吸附和化学氧化)净化后回注或外排,以降低污染物浓度梯度。治理初期宜加大抽水强度,后期逐步调整至维持平衡。

3.3.2 中等风险过渡区(污染羽外围及潜在影响带)

采用可渗透反应墙与水力截获相结合的方案。依据地下水流向,在污染羽下游方向设置多条PRB沟槽,沟槽内填充复合反应介质(如零价铁与生物炭混合物),针对主要污染物类型设计吸附-降解组合材料^[4]。同时,在过渡区外围布置观测井和应急抽水井,当监测到污染物浓度突破阈值时启动抽水截获,形成动态调控屏障。该区域应每季度开展一次全面水质评估,根据评估结果灵活调整PRB介质更换周期。

3.3.3 低风险监控区(其余范围)

以自然衰减监测为主,辅以地表防渗覆盖。对于农田或绿地等面源区域,推广使用生物炭改良表层土,减少降雨淋滤下渗量。建立全区域的地下水水质在线监测网络,每季度取样分析一次,数据实时上传至管理平台。当监测发现风险等级上升时,及时调整治理措施,实现“监测—预警—响应”闭环管理。此外,应制定应急预案,明确突发泄漏情况下的关停、围堵和快速抽取操作流程。

整体方案实施过程中,需同步记录施工参数和维护记录,建立治理效果评估指标体系,包括地下水位恢复程度、特征污染物去除率、防渗屏障完整性指数等。治理后期,可逐步减少主动干预强度,过渡到以自然衰

减为主的人为监控阶段,最终实现地下水环境质量的长期稳定。建议在治理启动后的第一年内每两个月评估一次,后续可延长至半年一次,确保治理效果持续可控。

4 结语

浅层地下水污染防治是一项系统工程,其成败关键在于对水文地质条件的精准认知和对防渗治理措施的科学部署。本文通过系统梳理调查方法、迁移机制与治理方案,阐明了三者之间的逻辑递进关系:调查为治理提供靶向依据,机制研究为技术选择提供理论支撑,而分区治理框架则实现了资源的最优配置。当前研究仍面临参数不确定性、长期耐久性评估不足以及新兴污染物治理手段欠缺等挑战。未来应着力发展原位、实时、多维度的监测传感技术,以及绿色低碳的仿生防渗材料,同时构建融合地质统计与人工智能的决策支持系统,持续提升浅层地下水污染治理的精细化与智能化水平。还需加强治理后生态恢复评价,将地下水质量与地表生态系统健康关联,推动形成“调查-治理-修复-管护”全链条技术标准。

参考文献

- [1]王超,陈建生,李明亮.基于DRASTIC模型的浅层地下水脆弱性评价改进方法[J].水文地质工程地质,2022,49(3):12-20.
- [2]张海涛,刘国华,王珊.典型有机污染物在非均质含水层中的迁移规律研究综述[J].环境科学学报,2023,43(1):88-97.
- [3]刘新平,吴浩,郑天元.地下水污染监测网优化设计及不确定性分析方法[J].中国环境监测,2025,41(1):45-54.
- [4]何强,朱文斌,黄金良.基于自然衰减的浅层地下水污染长期管理策略[J].水资源保护,2023,39(4):76-83.