

黑龙江典型矿区地下水污染现状、迁移规律及修复技术研究

那帅博宁^{1,2}, 王洋^{1,2}, 赵剑^{1,2}, 徐磊^{1,2*}

1. 中国地质调查局哈尔滨自然资源综合调查中心, 黑龙江 哈尔滨 150086

2. 自然资源部哈尔滨黑土地地球关键带野外科学观测研究站, 黑龙江 哈尔滨 150086

DOI:10.61369/EAE.2025020001

摘要 : 本研究聚焦黑龙江典型矿区地下水问题, 分析其地质与水文条件, 发现矿区地层结构复杂, 地下水赋存模式多样, 补给、径流、排泄受多因素影响。矿区地下水污染以重金属和有机物为主, 污染范围与程度受地质、水文及开采方式制约。污染物迁移受地下水流动特性、地质条件和温度、pH 值等环境因素影响。物理、化学、生物修复技术在矿区地下水治理中各有应用, 但存在成本高、局限性大等问题。研究成果为黑龙江典型矿区地下水污染防治与修复提供理论依据和技术参考。

关键词 : 黑龙江典型矿区; 地下水污染; 迁移规律; 修复技术

Research on Groundwater Pollution Status, Migration Patterns, and Remediation Techniques in Typical Mining Areas of Heilongjiang Province

Na Shuaiboning^{1,2}, Wang Yang^{1,2}, Zhao Jian^{1,2}, Xu Lei^{1,2*}

1. Harbin Natural Resources Comprehensive Survey Center, China Geological Survey, Harbin, Heilongjiang 150086

2. Harbin Black Soil Earth Critical Zone Field Scientific Observation and Research Station, Ministry of Natural Resources, Harbin, Heilongjiang 150086

Abstract : This study focuses on groundwater issues in typical mining areas of Heilongjiang Province, analyzing their geological and hydrological conditions. The results reveal complex stratigraphic structures and diverse groundwater occurrence patterns in these mining areas, with recharge, runoff, and discharge influenced by multiple factors. Groundwater pollution in these mining areas is primarily caused by heavy metals and organic compounds, and the scope and extent of pollution are constrained by geological, hydrological, and mining methods. The migration of pollutants is affected by groundwater flow characteristics, geological conditions, temperature, pH value, and other environmental factors. While physical, chemical, and bioremediation techniques have been applied to groundwater management in mining areas, they face challenges such as high costs and limitations. The research findings provide a theoretical basis and technical reference for groundwater pollution prevention, control, and remediation in typical mining areas of Heilongjiang Province.

Keywords : typical mining areas of Heilongjiang Province; groundwater pollution; migration patterns; remediation techniques

引言

黑龙江省作为中国重要能源矿产基地, 其典型矿区支撑国家工业发展并带动区域经济。但长期开采与废弃矿井管理不当容易导致地下水污染, 矿井水中悬浮物、酸性物质及重金属威胁生态与健康。三江平原等地工业、农业、生活污染叠加, 加剧治理难度。亟须通过科学研究查明污染现状、迁移规律, 开发修复技术, 以保障生态安全、实现可持续发展。

一、黑龙江典型矿区基础信息

(一) 地质条件

黑龙江典型矿区的地质结构复杂, 主要由新生界第四系松散沉积物、古近系和新近系碎屑岩以及白垩系火山岩组成。这些地

层在空间分布上呈现出明显的非均质性, 对地下水的赋存和流动具有显著影响^[1]。第四系松散沉积物以砂砾石为主, 孔隙度较高, 是地下水的主要赋存层位, 其渗透性较强, 有利于地下水的水平流动。而古近系和新近系碎屑岩则多为泥岩与砂岩互层, 其中泥岩作为相对隔水层, 限制了地下水的垂向运移, 形成了局部承压

通讯作者: 徐磊, 邮箱: 2368918632@qq.com

含水层。此外，白垩系火山岩由于风化程度和裂隙发育程度的差异，其含水性和透水性也存在较大变化，进一步增加了矿区地下水系统的复杂性。总体而言，矿区的地质条件决定了地下水的赋存模式以孔隙水和裂隙水为主，并且不同地层之间的水力联系受到岩性特征的严格控制。

（二）水文条件

黑龙江典型矿区的地下水补给、径流和排泄特征受区域气候、地形地貌以及地质条件的共同作用。大气降水是矿区地下水的主要补给来源，尤其在雨季，降水通过入渗作用直接补充浅层地下水。由于矿区地形较为平坦，地下水流速较慢，径流方向主要受地势控制，总体由南向北流动。在排泄方面，地下水主要通过蒸发、人工开采以及向地表水体排泄的方式消耗。值得注意的是，矿区地下水与地表水之间存在密切的水力联系，特别是在河流附近，地下水和河水之间的水量交换频繁。以嫩江县为例，嫩江县位于黑龙江省西北部，兴安山地与松嫩平原过渡地带，其分布有嫩江断裂及其次级构造，侵入岩主要为华力西期侵入岩。而嫩江县主要地表河流为嫩江，属于松花江水系。嫩江流域河流众多，遍布多种特殊地貌特征。因此其地下水的总体运移规律是由东向西迳流，地下水赋存于松散岩类孔隙水，接受大气降水的渗入补给^[2]。

二、黑龙江典型矿区地下水污染现状

（一）污染物种类

黑龙江典型矿区地下水中常见的污染物主要包括重金属和有机物两大类，其来源与矿区开发活动密切相关。在重金属污染方面，铅、镉、砷等元素是主要污染物，这些重金属通常来源于矿石开采过程中产生的废渣堆放以及尾矿库渗漏。例如，在煤矿开采中，矿坑排水中的硫酸根离子、钠离子和钙离子会与围岩发生化学反应，导致重金属元素的释放并随地下水迁移。此外，废弃矿井关闭后，地下水位恢复进一步加剧了重金属的溶解和扩散，对周边地下水环境造成长期威胁。在有机物污染方面，苯系物、多环芳烃等有机污染物主要来源于矿区工业活动中的化学品泄漏或不当处理。研究表明，矿山工程在开采过程中会产生大量含有有机污染物的废水，这些废水未经处理直接排放或渗入地下，会对地下水体造成严重污染^[3]。结合具体案例来看，黑龙江省某金矿废弃地的地下水监测结果显示，挥发性酚类和氨氮含量超过《地下水质量标准》(GB/T14848-93)Ⅲ类标准，表明该区域存在显著的有机污染问题^[4]。

（二）污染范围与程度

为了全面评估黑龙江典型矿区地下水污染的范围与程度，研究人员通过实地监测和数据分析，结合地图展示污染分布情况，并采用污染指数等评价指标进行量化分析。根据实际监测数据，黑龙江部分矿区地下水中重金属和有机物的浓度显著高于背景值，尤其是在矿区周边一定范围内，污染程度较为严重。例如，在某煤矿矿区，距排水池不同距离节点的采样分析显示，随着距离的增加，主要污染物的含量逐渐降低，但在近距离范围内仍远超本底值。此外，通过对多个矿区的对比研究发现，不同矿区的污染范围和程度存在显著差异。这种差异主要受矿区地质条件、水文特征以及开采方式的影响。例如，某金矿废弃地的地下水监测结果显示，除锰含量普遍偏高外，其他指标基本符合Ⅲ类水质

标准，表明该区域地下水整体质量较好；而在另一煤矿区，由于长期矿坑排水的影响，硫酸盐、铁等污染物的含量大幅增加，导致地下水污染指数显著高于其他区域^[4]。通过梅罗综合指数法对污染因子进行识别和评价，可以更清晰地反映矿区地下水污染的空间分布特征及其对环境的影响程度^[5]。

三、黑龙江典型矿区地下水污染物迁移规律

（一）地下水流动特性对迁移的影响

地下水流速与流向是影响污染物迁移路径和速度的关键因素。在黑龙江典型矿区，地下水的流动特性受到地形地貌、水文地质条件以及人类活动的共同作用^[6]。研究表明，地下水流速较高的区域，污染物往往呈现快速扩散的趋势，而流速较低的区域则可能导致污染物局部累积^[6]。此外，流向的变化决定了污染物的迁移方向，尤其是在矿区周边存在河流或湖泊等水体的情况下，地下水与地表水之间的水力联系进一步加剧了污染物的扩散范围。例如，在三江平原典型区的研究中发现，松花江富锦段的地下水位与河水位相关性较强，这种强水力联系促进了污染物的跨介质传输^[6]。因此，深入分析地下水流场特征对于理解污染物的迁移规律具有重要意义。

（二）地质条件对迁移的影响

地质条件通过岩层的渗透性和吸附性等特性对污染物迁移产生显著影响。在黑龙江典型矿区，不同地层的岩性差异导致了污染物运移行为的空间异质性。例如，砂岩和砾石层因其高渗透性通常成为污染物快速迁移的主要通道，而黏土层则因其较强的吸附能力能够有效减缓污染物的扩散速度。结合实际地质情况，废弃煤矿矿井水的污染调查表明，矿区地下水中重金属和有机污染物的迁移路径明显受到地质结构控制，特别是在断层或裂隙发育区域，污染物更容易发生垂向迁移。此外，土壤吸附作用对污染物运移的影响也不容忽视，研究表明，考虑吸附作用时，COD和氨氮污染物的迁移距离和运移面积显著减小^[6]。这些结果表明，地质条件在污染物迁移过程中起到了至关重要的调控作用。

（三）其他因素影响

温度、pH值、氧化还原电位等环境因素对污染物迁移转化的影响机制复杂且多样。在黑龙江典型矿区，这些因素不仅影响了污染物的化学形态，还改变了其在地下水中的迁移能力^[7]。例如，温度升高通常会加速微生物活性，从而促进有机污染物的降解；然而，过高的温度也可能增强某些重金属的溶解度，导致其迁移性增强。此外，pH值和氧化还原电位的变化直接影响污染物的化学稳定性。以“三氮”污染为例，研究发现硝酸盐氮和氨氮的迁移转化行为与人类活动密切相关，同时受到地下水环境的氧化还原条件制约^[7]。在酸性环境中，重金属污染物更容易释放到地下水中，而在还原条件下，部分有机物可能被转化为更稳定的形式^[8]。因此，综合考虑多种环境因素的作用对于全面理解污染物迁移规律至关重要。

四、黑龙江典型矿区地下水修复技术

（一）物理修复技术

物理修复技术是通过物理手段对地下水中的污染物进行分离、去除或隔离的一种修复方法，主要包括泵抽处理、空气注入

等技术。泵抽处理技术通过抽取受污染的地下水并将其输送至地面进行处理，从而降低地下水中污染物的浓度；空气注入技术则是通过向地下水中注入空气，促进污染物的挥发和生物降解。在黑龙江典型矿区，泵抽处理技术已被应用于某些重金属污染区域，通过建立抽水井网络将含重金属的地下水抽出后进行沉淀处理，显著降低了地下水中铅、镉等污染物的浓度^[9]。然而，该技术存在运行成本较高且难以彻底清除深层污染的问题。此外，空气注入技术在处理苯系物等有机污染物方面表现出一定的效果，但其应用受地质条件限制较大，尤其是在低渗透性岩层中效果有限。因此，物理修复技术虽然在短期内能够快速减少污染物浓度，但其高成本和局限性仍需进一步优化。

（二）化学修复技术

化学修复技术是通过化学反应改变污染物的化学性质，从而实现污染物固定、转化或降解的一种修复方法，主要包括化学沉淀、氧化还原等技术。化学沉淀技术通过向受污染地下水中添加化学试剂，使污染物形成不溶性沉淀物而从水中分离出来；氧化还原技术则利用氧化剂或还原剂将污染物转化为低毒或无毒的形式^[9]。在黑龙江典型矿区的实际应用中，化学沉淀技术被广泛用于处理含重金属的地下水，例如通过添加石灰或硫化钠生成金属氢氧化物或硫化物沉淀，有效降低了地下水中重金属离子的浓度。然而，该技术可能因试剂过量使用而导致二次污染问题。此外，氧化还原技术在处理有机物污染方面表现出良好的效果，例如通过注入过氧化氢或高锰酸钾将苯系物氧化为二氧化碳和水，但其高昂的成本和复杂的操作限制了其大规模应用。

（三）生物修复技术

生物修复技术是利用微生物或其他生物体的代谢活动对地下水中的污染物进行降解或转化的一种修复方法，主要包括微生物降解技术。微生物降解技术通过接种特定的微生物或优化土著微生物的生长条件，使其能够高效分解有机物或将重金属转化为低毒形式。在黑龙江典型矿区，微生物降解技术已被尝试用于处理含苯系物等有机污染物的地下水。研究表明，在适宜的温度、pH值和营养条件下，某些土著微生物能够显著降解地下水中的苯系物，且具有成本低、环境友好等优势^[10]。然而，该技术在应用过程中面临诸多挑战，例如矿区地下水中的低温环境和复杂污染物成分可能抑制微生物的活性，同时污染物的生物可利用性也影响修复效果。此外，生物修复技术的修复周期较长，且在某些情况下可能需要与其他修复技术联用以提高效率。因此，尽管生物修

复技术在理论上具有较高的应用潜力，但在实际工程中的应用仍需进一步研究和优化。

五、未来展望

针对黑龙江省典型矿区地下水污染问题的研究，未来应以科学严谨的态度聚焦多技术协同创新与精准防控体系建设，推动治理工作向系统化、智能化方向发展。在技术创新层面，需突破单一修复技术的局限性，构建物理、化学与生物技术的多维协同治理体系。考虑到矿区复杂地质条件，还应开展定制化技术研发攻关，在高渗透性岩层区域开发功能性吸附材料以强化污染物原位固定能力，在低渗透性岩层探索精准注入技术路径，确保修复剂均匀扩散与效能最大化。

与此同时，强化地下水污染预测预警与智能防控技术研发同样关键。基于数值模拟平台，整合气象水文、地质构造、水质监测等多源数据，构建高分辨率污染迁移模拟模型，为防治策略制定提供精准理论支撑。并且，构建立体化监测网络体系也不可或缺，综合运用遥感解译技术、地球物理勘查方法及物联网传感设备，实现污染动态的实时追踪与三维可视化展示。

值得注意的是，构建长效机制是保障治理成效的重要环节。一方面，强化政策法规体系建设，完善矿区地下水环境保护标准与监管制度；另一方面，推动公众参与机制的制度化发展，通过科普宣传、环境教育等手段提升全社会生态责任意识。最终形成“技术创新－智能监测－系统管理”三位一体的综合治理模式，确保矿区地下水环境实现根本性改善，为区域可持续发展提供坚实的水生态安全保障。

六、结束语

黑龙江典型矿区复杂的地质与水文条件，导致地下水污染问题突出且污染物迁移规律复杂。重金属和有机物污染威胁矿区及周边地下水环境，不同矿区污染程度因多种因素存在显著差异。地下水流动、地质条件和环境因素共同作用，决定污染物迁移路径与速度。物理、化学、生物修复技术虽能一定程度处理污染，但都存在各自弊端。未来需综合考虑矿区实际情况，探索多技术联用方案，优化修复技术，同时加强监测与预防，以实现黑龙江典型矿区地下水环境的有效保护与可持续修复。

参考文献

- [1] 王玮，邓治国，姚荣胜. 废弃煤矿矿井水污染调查技术方案 [J]. 西部探矿工程, 2024, 36(6): 117-119.
- [2] 侯圣琦. 嫩江县地下水环境问题分析及污染防治措施 [D]. 哈尔滨商业大学, 2021. DOI: 10.27787/d.cnki.ghrbs.2021.000274.
- [3] 刘志杰. 矿山工程地下水污染因子识别及修复技术研究 [J]. 中国金属通报, 2021, (18): 284-285.
- [4] 宋海涛，王海波，刁云飞，郑红. 黑龙江省乌拉嘎金矿废弃地植被恢复情况研究 [J]. 森林工程, 2011, 27(5): 29-34.
- [5] 束龙仓，殷晓然，袁亚杰，吕岩，鲁程鹏，刘波. 三江平原典型区河水与地下水水量交换的时空变化规律分析 [J]. 水利学报, 2021, 52(10): 1151-1162.
- [6] 郑玉虎，吴明洲，徐爱兰，杨道军. 考虑土壤吸附作用的地下水污染物运移特征研究 [J]. 地下水, 2017, 39(3): 4-7.
- [7] 李丽君，刘强. 黑龙江省海伦地区浅层地下水中“三氮”分布特征及来源解析 [J]. 岩矿测试, 2023, 42(4): 809-822.
- [8] 卢文保. 浅谈八段沟水系北部流域水文地质条件及地下水污染防治对策 [J]. 西部资源, 2021, (3): 92-94.
- [9] 安宝明，徐从海，黄永军. 基于地理信息技术的典型地下水污染评析 [J]. 工业安全与环保, 2019, 45(12): 88-92.
- [10] 郑盛楠. 松嫩平原（黑龙江）地下水污染调查评价项目进展顺利 [J]. 黑龙江国土资源, 2014, (11): 16-16.