

可借助其与金属离子（如铁离子）的配位作用，改变电极表面敏感材料的电子传递情形，利用电流或阻抗变化实现检测。无机阴离子传感器检测速度较为迅速，一般在几分钟内完成一次检测工作，且对 pH 值变化存有一定适应性，可针对生活污水、工业废水及农业面源污染废水开展检测。

4 电化学传感器在废水检测应用策略

4.1 增强抗干扰能力

材料层面在敏感材料表面构建“选择性的屏障”，诸如包覆离子交换膜（如 Nafion 膜）阻挡阴离子干扰，或采用分子印迹聚合物制造特异性识别孔道，仅让目标污染物进入。技术层面借助先进电化学检测方法，借助施加脉冲电位降低背景电流^[4]。借助化学计量学算法（如偏最小二乘法）剖析混合信号，辨别目标污染物与干扰物质的响应。样品预处理针对高浊度以及高干扰废水，构建“传感器-预处理模块”集成系统，采用微型过滤装置去除悬浮的颗粒物，或添加掩蔽剂（如 EDTA）以络合干扰离子，简化预处理流程提升抗干扰能力。同时，在复杂废水体系中，可结合在线监测与实时数据反馈机制，通过自适应算法动态调整检测参数，以进一步提升抗干扰性能。这种智能化的抗干扰策略不仅能减少环境因素对检测结果的影响，还能为不同类型废水的现场检测提供灵活、高效的解决方案。

4.2 提升稳定性

运用化学键合、溶胶-凝胶法等稳定固定技术对敏感材料进行固定，令敏感材料（如纳米材料、酶）与电极表面构成共价键连接，借助硅烷偶联剂把石墨烯修饰在电极表面，提升其长期使用时的稳定性。材料改性与保护针对酶等生物敏感材料实施固定化及改性，增进其抗失活能力。对电极表面实施耐腐蚀涂层处理，延长其于复杂废水环境下的使用寿命。针对环境适应性对温度、pH 值补偿机制进行优化设计，在传感器之中集成微型温度传感器及 pH 传感器，经信号校正，消除环境因素对检测结果的影响。研发宽温域、宽 pH 范围适用的敏感材料，拓宽传感器应用范围。此外，可引入自清洁电极技术，通过周期性电化学反应或微流控冲洗机制去除电极表面的沉积物，维持长期稳定的检测性能。这种设计尤其适用于连续监测场景，能够显著降低维护成本并延长传感器的实际使用寿命。

4.3 拓展检测范围与多组分检测能力

量程优化凭借敏感材料修饰量调节或检测原理切换，扩大传感器检测范围。借助增加敏感材料负载量提升高浓度污染物检测上限，采用信号放大技术来降低低浓度污染物检出限。借助多组分检测开发阵列电极传感器，在同一基底对多种敏感材料进行修饰，采用多通道信号采集与解析技术，达成对重金属、有机污染物、阴离子的同步检测^[5]。集成碳基石墨烯修饰电极、聚苯胺修饰电极与离子选择性电极，一同检测铅离子、酚类及氰根离子。模块化设计组建“通用电极基底+可更换敏感材料模块”的传感器系统，依照废水污染物类型更换不一样的敏感材料模块，提高传感器的通用性及经济性。同时，可引入人工智能算法对多通道检测数据进行模式识别与分类，提高复杂体系中多组分污染物的定性分析与定量分析精度。这种智能化的多组分检测系统将为水环境监测提供更加全面、实时的信息支持。

5 结语

电化学传感器依靠快速、便携、低成本等优势，在废水污染物检测领域正逐步取代传统检测技术，成为水环境监测的关键途径。其技术开发需以敏感材料功能化、电极结构优化及信号抗干扰为核心展开，针对重金属离子、有机污染物、无机阴离子等典型废水污染物做到精准检测。伴随智能化、微型化技术的进步，电化学传感器会达成从“单一检测”到“多组分、实时、远程监测”的跨越，同时需加大标准化与产业化建设力度，推动其于工业废水排放监测、水环境应急检测及农村面源污染监测等场景广泛应用。

参考文献

- [1] 刘超,王顺. BDD电化学在电镀废水处理中去除有机物的应用研究[J/OL].清洗世界,2025,11(03):1-5.
- [2] 李正超,张燕玲,詹道平,等. 湿法脱硫废水多污染物深度净化及作用机制[J].中国环境科学,2025,45(06):3073-3083.
- [3] 程晓越,范保喜,牛梦娴,等. 机械-电-催化材料在有机废水处理中的应用进展[J].化工新型材料,2024,52(12):63-67.
- [4] 宋泽稼,张晶,胡越,等. 染料废水的电化学处理技术研究进展[J].染料与染色,2024,61(02):54-61.
- [5] 刘浩,李猛,张烨,等. 高盐废水处理研究方法及应用现状分析——以电化学法处理某化工企业生产废水为例[J].环境保护与循环经济,2024,44(04):22-26+71.

Research on Groundwater-Surface Water Interaction and Pollution Prevention in Coal Mines of the Inner Mongolia Section of the Yellow River

Pengcheng Wu

Inner Mongolia Coal Geology Exploration (Group) 151 Co., Ltd., Baotou, Inner Mongolia, 014010, China

Abstract

This paper focuses on coal mines along the Yellow River Basin in Inner Mongolia, exploring the interaction mechanisms between groundwater and surface water and the pathways for pollution prevention and control. Taking the Zhungeer and Dongsheng mining areas as typical cases, field monitoring, indoor analysis, numerical simulation, and isotope tracing methods were employed to reveal the following: under natural conditions, the Yellow River replenishes part of the shallow groundwater; coal mining leads to groundwater level decline and disruption of hydraulic connectivity, with mine water contaminating water bodies through runoff and infiltration. Surveys indicate that groundwater mercury levels exceed Class III standards by 2-5 times, and conventional ions are 超标. Most surface water tributaries are classified as Class IV/V or even inferior to Class V, with pollution originating from mine water and coal gangue leaching. Based on these findings, prevention and control strategies are proposed from the source, process, and end stages, supplemented by regulatory safeguards. The study has limitations such as limited data coverage and insufficient model accuracy, necessitating future efforts to expand monitoring, optimize models, validate measures, and strengthen multidisciplinary collaboration.

Keywords

Inner Mongolia Yellow River Basin; Coal mines; Prevention and control strategies; isotope tracing

黄河内蒙古段煤矿地下水地表水交互及污染防控研究

邬鹏程

内蒙古煤炭地质勘查(集团)一五一有限公司, 中国·内蒙古 包头, 014010

摘要

本文聚焦内蒙古黄河流域沿线煤矿, 探究地下水与地表水交互机制及污染防控路径。以准格尔、东胜矿区为典型, 用野外监测、室内分析、数值模拟及同位素示踪法发现: 天然状态下黄河水补给部分浅层地下水; 煤矿开采致地下水位下降、水力联系破坏, 矿井水经径流与渗透污染水体。调查显示, 地下水汞超Ⅲ类标准2-5倍、常规离子超标, 地表水支流多为Ⅳ/Ⅴ类甚至劣Ⅴ类, 污染源于矿井水、煤矸石淋溶。据此从源头、过程、末端提防控策略, 辅以监管保障。研究存在数据覆盖有限、模型精度不足等问题, 未来需扩大监测、优化模型、验证措施并加强多学科交叉。

关键词

内蒙古黄河流域; 煤矿; 防控策略; 同位素示踪

1 引言

内蒙古黄河流域是重要煤炭区, 煤炭开采推动经济却破坏地下水与地表水平衡, 致水位下降、矿井水污染水体, 还引发土壤退化、植被死亡等生态问题及经济损失, 故研究该区域煤矿水交互机制意义重大, 可护水资源、助煤炭可持续开发。研究内容含分析煤矿开采前后水交互模式及地质、工艺差异, 调查水污染物特征与影响, 制定多环节防控策略; 方法采用野外设点监测水位水质、室内分析水样与岩土参

数、用 MODFLOW 等软件模拟水运动及污染扩散, 再综合数据评价并提防控策略。

2 内蒙古黄河流域沿线煤矿区水交互作用实地研究

内蒙古黄河流域煤矿众多, 选取准格尔与东胜矿区为典型研究区, 准格尔矿区位于黄河东缘邻万家寨水库, 地处地质过渡带, 主要供水层为寒武系、奥陶系碳酸盐岩含水岩组, 岩溶地下水受黄河补给, 水交互受黄河影响显著, 且为国家重点项目, 开采规模大、水资源矛盾突出, 研究价值高; 东胜矿区与神府煤田合称世界最大煤田之一, 地处干旱-半干旱区, 水资源匮乏, 开采频繁多样, 地下水扰动大、水位

【作者简介】邬鹏程(1986-), 男, 中国内蒙古鄂尔多斯人, 本科, 高级工程师, 从事矿产地质研究。

降明显,具人类活动干扰下的水交互典型特征。在水位动态变化监测方面,准格尔矿区未受开采区域黄河汛期水位升、浅层地下水同步变化,黄河侧向补给地下水,非汛期地下水排泄水位降,开采强烈区因抽采矿井水,地下水位年降1-3米并形成降落漏斗,还逆转补给关系致地表水水位降^[1];东胜矿区降水补给弱,开采前地下水稳定,开采后部分区域十年累计降5-10米,近河区河水难补给地下水引发生态问题,地下水水位降呈阶段性,地表水枯水期降甚至断流。水化学特征分析显示,准格尔矿区黄河水为 $\text{HCO}_3\text{-Ca}$ 型,开采区地表水受污染 SO_4^{2-} 升高、水化学类型改变,近黄河浅层地下水水化学特征与黄河相似,开采区深层地下水与矿井水混合后离子异常;东胜矿区远离开采区地表水为 $\text{HCO}_3\text{-Ca}\cdot\text{Mg}$ 型,开采区地表水向 $\text{SO}_4\text{-Ca}\cdot\text{Mg}$ 型转变,开采区地下水因抽采和混合离子升高,对比水化学特征可判断水交互程度。基于同位素技术的示踪表明,准格尔矿区大气降水同位素夏高冬低,黄河水显降水补给,近黄河浅层地下水同位素与黄河相近,开采区矿井水同位素异于降水、黄河,可追踪其污染地表水和地下水的途径;东胜矿区降水同位素具蒸发富集特征,浅层地下水受降水影响大,深层或有其他补给,水力联系密切区同位素交换频繁,借模型可算水混合比,动态监测能揭示水交互时间演化规律。

3 内蒙古黄河流域沿线煤矿水环境污染现状

为掌握内蒙古黄河流域煤矿区水污染状况,对地下水和地表水开展监测并解析污染源:地下水方面,检测重金属、常规离子等指标,部分区域汞浓度超《地下水质量标准》Ⅲ类限值2-5倍,镉超1-3倍,源于煤矸石淋溶与矿井水排放;硫酸根浓度部分超1000mg/L,氯离子也偏高,因硫化物氧化及化学药剂使用,高矿化度影响水质与健康,石油类、挥发酚个别超标,微生物指标也常超标,威胁饮水安全。地表水方面,黄河干流多数断面达Ⅱ/Ⅲ类,但近煤矿断面氨氮接近限值、石油类检出;支流多为Ⅳ/Ⅴ类甚至劣Ⅴ类,某支流COD达60mg/L、 BOD_5 达15mg/L,总磷最高1.5mg/L,因矿井水、煤矸石淋溶液直排及土壤磷流失致污染与富营养化。污染来源上,矿井水排放量巨大(每吨煤产2-5立方米),含多种污染物,直排危害大;煤矸石年产生数百万吨,淋溶释放高浓度硫酸根与重金属;此外,煤炭运输洒落、工业场地径流也携带污染物入水体。

4 污染防控策略与建议

4.1 源头控制措施

优化开采工艺是从源头减少煤矿开采对地下水与地表水影响及污染的关键举措。在井工开采方面,推广采用保水开采技术,如煤与瓦斯共采技术,在开采煤炭的同时,对煤层气进行有效抽采利用。这不仅可以减少瓦斯事故隐患,还能避免煤层气大量排放到大气中,降低温室气体排放。通过合理设计采煤方法和开采顺序,减少对含水层的破坏,降

低矿井水的涌出量。例如,采用条带开采、房柱式开采等采煤方法,控制开采强度,减小导水裂隙带的发育高度,从而减少对地下水的扰动。在露天开采中,采用先进的剥离和采煤工艺,提高资源回收率,减少煤炭和矸石的损失。同时,对露天开采过程中的表土进行分层剥离和保存,以便后续进行土地复垦和生态修复时使用,减少对地表生态环境的破坏,进而减少因地表生态破坏导致的水土流失和水体污染。

减少废水废渣产生也是源头控制的重要环节。对于矿井水,应加强矿井水的资源化利用,提高矿井水的回用率。根据矿井水的水质特点,采用不同的处理工艺,将处理后的矿井水用于煤矿生产用水,如井下防尘洒水、消防用水、设备冷却用水等,以及周边地区的农业灌溉、工业用水等。例如,对于水质较好的矿井水,经过简单的沉淀、过滤处理后,可直接用于井下防尘洒水;对于含有重金属等污染物的矿井水,采用化学沉淀、离子交换等深度处理工艺,去除污染物后再进行回用。同时,加强对矿井水排放的监管,严格控制矿井水的排放指标,确保达标排放。对于煤矸石,应加大煤矸石的综合利用力度。一方面,将煤矸石用于发电,建设煤矸石发电厂,利用煤矸石的热值进行发电,既可以减少煤矸石的堆积量,又能产生电能,实现资源的二次利用。另一方面,利用煤矸石生产建筑材料,如煤矸石砖、煤矸石水泥、煤矸石骨料等,将煤矸石转化为有价值的产品,减少煤矸石对环境的污染。此外,还可以将煤矸石用于充填开采,将煤矸石填充到采空区中,减少地表塌陷,同时也减少了煤矸石的堆放空间^[2]。

4.2 过程阻断技术

采用防渗材料是阻断污染扩散的重要工程技术手段。在煤矿开采区域,对工业场地、煤矸石堆放场、矿井水储存池等可能产生污染物泄漏的区域,铺设高性能的防渗材料。例如,采用高密度聚乙烯(HDPE)土工膜作为防渗层,HDPE土工膜具有良好的化学稳定性、抗老化性能和防渗性能,其渗透系数可达到 10^{-12}cm/s 以下,能够有效阻止污染物的渗漏。在铺设HDPE土工膜时,要确保膜的完整性和密封性,避免出现破损和缝隙。同时,在膜的上下两面铺设保护层,如土工布等,防止膜受到外力破坏。对于矿井水输送管道,采用耐腐蚀、高强度的管材,并定期进行检测和维修,防止管道破裂导致矿井水泄漏污染地下水和地表水。在管道连接处,采用密封性能好的连接方式,如热熔连接、电熔连接等,确保管道的密封性。

设置隔离带也是一种有效的污染阻断措施。在煤矿开采区与周边水体之间,建立生态隔离带。生态隔离带可以由湿地、林地、草地等组成,通过植物的根系吸收、土壤的吸附和微生物的降解等作用,净化和过滤污染物,减少污染物向水体的迁移。例如,在煤矿周边的河流或湖泊岸边,种植芦苇、菖蒲等湿地植物,形成湿地生态隔离带。这些湿地植物能够吸收水中的氮、磷等营养物质,吸附和降解有机物和