

地下水硝酸盐污染来源与修复技术分析

王利新

北京市京密引水管理处

DOI:10.12238/hwr.v9i9.6566

[摘要] 地下水作为集中式饮用水源的核心组成部分,其硝酸盐污染直接威胁公众饮水安全。本文结合饮用水源地保护实际需求,系统梳理地下水硝酸盐污染的识别方法与修复技术原理,剖析当前技术在源头精准识别、复杂水文地质适配、二次污染防控及长效稳定性方面的突出难点,进而提出多维度源解析、水文地质适配工艺、全流程防控及动态监测调控的优化路径。研究表明,通过技术整合与工艺优化,可显著提升硝酸盐污染修复的精准性与安全性,为饮用水源地地下水水质保障提供技术支撑,对维护公众健康与生态安全具有重要意义。

[关键词] 地下水硝酸盐污染; 污染来源; 修复技术; 二次污染防控

中图分类号: X171.5 文献标识码: A

Analysis of Groundwater Nitrate Pollution Sources and Remediation Technologies

Lixin Wang

Beijing Jingmi Water Diversion Management Office

[Abstract] Groundwater serves as a critical component of centralized drinking water supply systems, and its contamination by nitrate poses a significant threat to public health and drinking water safety. In response to the practical requirements of drinking water source protection, this study systematically reviews methodologies for identifying nitrate pollution sources and the underlying principles of remediation technologies. It further examines key challenges currently faced in achieving accurate source apportionment, adapting to complex hydrogeological settings, preventing secondary pollution, and ensuring long-term remediation effectiveness. To address these challenges, the paper proposes an integrated optimization framework encompassing multi-dimensional source apportionment, hydrogeologically adaptive treatment processes, comprehensive prevention and control strategies throughout the remediation process, and dynamic monitoring coupled with regulatory feedback mechanisms. The findings demonstrate that through technological integration and process refinement, the accuracy, efficiency, and safety of nitrate contamination remediation can be substantially improved. This approach provides robust technical support for safeguarding groundwater quality in drinking water source areas and holds substantial significance for protecting public health and maintaining ecological security.

[Key words] Groundwater nitrate pollution; Pollution source identification; Remediation technologies; Secondary pollution prevention; Long-term stability

引言

地下水是我国北方地区重要的饮用水水源,尤其在以地下水为核心供水保障的区域,其水质优劣直接关系到居民日常生活与身体健康。近年来,受农业生产、生活排污及人类活动强度增加的影响,地下水硝酸盐污染问题逐渐凸显。硝酸盐进入人体后可能转化为亚硝酸盐,引发高铁血红蛋白血症,长期摄入还可能增加消化系统疾病风险,对饮用水源地水质安全构成严重威胁。为保障供水质量,亟需精准识别硝酸盐污染来源、明晰修复

技术作用机制、破解技术应用瓶颈并优化实施路径。在此背景下,开展地下水硝酸盐污染来源与修复技术研究,不仅是环境工程领域的重要课题,更是维护公众饮水安全与社会稳定现实需求。

1 地下水硝酸盐污染识别与修复技术原理

1.1 地下水硝酸盐污染识别

1.1.1 硝酸盐污染来源

地下水硝酸盐污染来源解析遵循“特征识别-精准溯源-量

化贡献”逻辑,通过多技术协同界定污染源。先依托水化学指标初步识别,利用硝酸盐氮与氯离子比值区分污染类型(农业面源比值较高,生活污水较低),结合pH、溶解氧判断污染迁移阶段;再用同位素技术精准溯源,依据氮同位素($\delta^{15}\text{N}$)特征值区分来源(化肥-10‰~10‰、畜禽粪便10‰~25‰、生活污水8‰~15‰),比对污染源特征库确定主因;最后借源解析模型(如正定矩阵因子分解模型)整合数据,计算不同来源贡献率,为源头管控提供依据。

1.1.2 地下水硝酸盐迁移转化动力学原理

地下水硝酸盐迁移转化受水文地质与环境因素调控,是修复技术设计核心。迁移含对流、弥散与吸附:对流遵循达西定律,流速与水力梯度、渗透系数正相关;弥散符合菲克第一定律,介质颗粒越细、孔隙越复杂则作用越强;吸附依赖含水层介质,硝酸盐为弱吸附性离子,阻滞效果有限。转化以硝化、反硝化为主:硝化是好氧条件下氨氧化细菌将氨氮转化为硝酸盐的过程,20~30℃、溶解氧>2mg/L时速率最快;反硝化是厌氧条件下反硝化细菌将硝酸盐还原为氮气的过程(符合Monod方程),溶解氧<0.5mg/L且有充足可降解有机碳时高效进行,是修复关键路径。

1.2 地下水硝酸盐污染的修复技术原理

1.2.1 物理化学修复技术作用机制

物理化学修复通过分离或转化去除硝酸盐,不同技术特性各异。离子交换技术利用树脂可交换阳离子与 NO_3^- 交换,选择性高、去除稳定,但树脂饱和需再生且产生高浓度废液;反渗透技术借半透膜截留 NO_3^- ,去除率超95%、适配高浓度污染,却能耗高且产浓水;电渗析技术依托离子交换膜与电场使 NO_3^- 向阳极迁移,水质适应性强,但处理高硬度水易结垢;零价铁还原技术通过零价铁腐蚀释放 Fe^{2+} ,在厌氧条件下将 NO_3^- 还原为氮气,反应温和,却可能导致地下水铁含量升高。

1.2.2 生物修复技术降解代谢原理

生物修复依托微生物代谢与植物吸收去除硝酸盐。异养反硝化依赖假单胞菌等细菌,以可降解有机碳为碳源与能源,将 NO_3^- 逐步还原为氮气(需经 $\text{NO}_3^- \rightarrow \text{NO}_2^- \rightarrow \text{NO} \rightarrow \text{N}_2\text{O} \rightarrow \text{N}_2$ 步骤, NO_2^- 还原酶、NO还原酶为限速酶),投加甲醇等易降解碳源可提效;自养反硝化利用脱氮硫杆菌等,以无机碳为碳源、 H_2 或 S^{2-} 为电子供体还原 NO_3^- ,无需有机碳源但反应较慢;植物修复通过芦苇、菖蒲等水生植物根系吸收 NO_3^- ,转化为体内有机氮后收割移除,兼具生态与景观功能,却受植物生长周期、根系分布影响,仅适用于浅层地下水^[1]。

2 地下水硝酸盐污染修复技术现存难点

2.1 污染源头精准识别技术局限

当前源头识别技术在复杂场景下难以满足饮用水源地精准管控需求。同位素技术虽能区分污染源类型,但部分污染源存在特征重叠,如缓释化肥与畜禽粪便的 $\delta^{15}\text{N}$ 值范围交叉,仅依靠同位素数据无法精准区分,需额外指标辅助判断而现有技术整合度不足,易导致溯源偏差。水化学指标易受环境因素干扰,蒸

发浓缩作用会升高地下水中氯离子浓度,改变硝酸盐氮/氯离子比值,使农业面源污染特征偏向生活污水污染,对识别结果产生误导^[2]。源解析模型对数据量与质量要求较高,部分饮用水源地监测网络覆盖不足,缺乏长期连续的水化学与同位素数据,模型输入参数不完备导致贡献率计算误差较大,无法为源头管控提供精准量化依据。

2.2 复杂水文地质条件下修复效率受限

复杂水文地质条件是制约修复效率的核心因素,尤其对饮用水源地影响显著。含水层非均质性导致修复剂分布不均,高渗透通道中修复剂快速迁移,低渗透区域修复剂难以到达形成修复盲区,污染羽核心区硝酸盐无法有效去除。地下水流动状态动态变化影响修复效果,饮用水源地为保障供水需维持一定开采量,导致地下水流速与流向频繁变化,原本设计的修复范围与投加点位无法匹配污染羽迁移路径,修复效率大幅下降。多层含水层结构存在越流补给问题,若仅修复污染含水层而未阻断越流通道,其他含水层的硝酸盐污染会持续补给,导致修复效果反复,难以实现水质达标^[3]。

2.3 修复过程二次污染防控不足

修复过程中的二次污染风险威胁饮用水源地水质安全。物理化学技术易产生二次污染物,离子交换树脂再生废液若处置不当,可能通过渗滤重新进入地下水形成“修复-污染”循环;反渗透浓水不仅富集硝酸盐,还可能含有重金属等污染物,直接排放会污染地表水体进而影响地下水补给水质。化学还原技术中零价铁腐蚀释放的 Fe^{2+} ,若投加量控制不当会导致地下水铁含量超过《地下水质量标准》(GB/T14848-2017)中饮用水源地限值。生物修复技术中投加的有机碳源若过量,会导致地下水COD升高,为微生物滋生提供条件引发水体富营养化或异味,现有防控措施多针对单一技术设计,缺乏适用于饮用水源地的综合防控体系。

2.4 长效修复效果稳定性技术缺陷

当前技术难以保障饮用水源地长期水质稳定。物理化学技术依赖耗材持续作用,离子交换树脂需定期再生、反渗透膜需定期更换,若维护不及时或缺乏耗材寿命预警机制,修复系统去除效率会骤降导致硝酸盐浓度反弹;部分小型饮用水源地因运维资金与技术力量不足,难以实现耗材及时更新,加剧效果不稳定。生物修复技术受环境因素波动影响显著,冬季低温会抑制微生物活性,使反硝化速率下降导致修复效果减弱;雨季地下水位上升稀释碳源浓度,影响微生物代谢效率,现有技术缺乏针对环境波动的动态调控机制,无法及时调整参数维持效果稳定。植物修复技术中植物收割后若未及时补种,裸露区域可能成为新污染载体,且植物生长周期长,修复效果连续性难以保障。

3 地下水硝酸盐污染修复技术优化实施路径

3.1 污染源头多维度识别技术方案

针对饮用水源地需求,构建“遥感监测-原位监测-模型优化”的多维度识别方案。利用无人机遥感技术开展地表污染源调查,通过高分辨率影像识别保护区内农业种植区、畜禽养殖场

及污水排放口,记录污染源分布与规模,结合植被覆盖度、土地利用类型数据,分析农业面源污染潜在贡献区域,为原位监测布设提供依据。优化原位监测网络,在水源地核心区、缓冲区及潜在污染源周边布设监测井,同步监测硝酸盐氮、氯离子、pH、溶解氧及 $\delta^{15}\text{N}$ 、 $\delta^{18}\text{O}$,增加监测频次至每月1次,针对同位素特征重叠的污染源,补充监测四环素类抗生素(畜禽粪便特征)、表面活性剂(生活污水特征)等指标,通过多指标协同实现精准区分^[4]。改进源解析模型,将遥感获取的地表污染源强度数据作为模型先验信息,引入随机森林、神经网络等机器学习算法优化正定矩阵因子分解模型参数,减少数据缺失对结果的影响,提高贡献率计算精度;基于识别结果,核心区优先管控生活污水与工业废水,缓冲区推广精准施肥与畜禽粪便资源化利用,从源头减少硝酸盐输入。

3.2 水文地质适配性修复工艺优化

建立“参数监测-工艺选型-数值模拟”的工艺优化体系,提升修复效率与环境适配性。开展详细水文地质勘察,通过钻孔取样与现场试验,获取含水层渗透系数、孔隙度、地下水水流速流向等参数,明确含水层非均质性分布与越流通道位置;针对多层含水层结构,采用分层止水技术实现独立监测,确定污染含水层空间范围。根据水文地质参数适配修复工艺,高渗透含水层(渗透系数 $>10^{-4}\text{cm/s}$)采用渗透反应墙技术,填充零价铁-生物炭复合材料作为反应介质,利用地下水对流作用实现硝酸盐降解;低渗透含水层(渗透系数 $<10^{-6}\text{cm/s}$)采用注入井投加缓释碳源-纳米零价铁复合修复剂,通过高压注入提高修复剂在低渗透区域的扩散范围;存在越流补给的区域,在越流通道布设防渗帷幕阻断污染补给。利用数值模拟工具优化参数,采用MODFLOW模型模拟地下水水流场,结合RT3D模型预测硝酸盐迁移与修复效果,调整渗透反应墙长度、修复剂投加量与注入频率,在满足水质标准前提下实现成本最低化;建立工艺适应性评估机制,定期根据监测数据调整参数,确保工艺与水文地质条件动态适配。

3.3 修复过程二次污染防控技术措施

构建“源头减量-过程控制-末端治理”的二次污染防控体系,保障饮用水源地安全。物理化学修复中,离子交换树脂再生废液采用电解还原技术处理,通过电极反应将硝酸盐还原为 N_2 实现无害化;反渗透浓水采用“高级氧化-膜浓缩”联合工艺,臭氧氧化降解有机污染物后,纳滤膜进一步浓缩硝酸盐,浓缩液经蒸发结晶处理后作为工业原料回收,实现浓水零排放。化学还原技术中,采用 SiO_2 包覆型纳米零价铁作为修复剂,通过包覆层抑制 Fe^{2+} 释放并提升分散性与稳定性,投加过程采用分段投加方式,结合溶解氧实时监测数据调整投加速率,避免局部溶解氧过低引发其他污染物释放^[5]。生物修复技术中,开发淀粉-聚乙稀醇凝胶缓释碳源,通过调控凝胶交联度控制碳源释放速率,避免COD升高;在修复区域布设 N_2O 监测仪,浓度超阈值时适当提高

溶解氧浓度(控制在 $0.5\sim1\text{mg/L}$)抑制 N_2O 产生;修复系统下游增设监测点,监测指标涵盖硝酸盐氮、Fe、COD、 N_2O ,确保符合《地下水质量标准》(GB/T14848-2017)要求。

3.4 长效修复效果监测与调控技术

建立“实时监测-动态调控-应急保障”的长效管理体系,维持饮用水源地水质稳定。构建多参数实时监测系统,在修复区域、下游保护目标及水源井布设自动监测站,监测硝酸盐氮、溶解氧、pH、温度、电导率及修复剂浓度,采用物联网技术实现数据实时传输与存储,建立数据可视化平台便于实时掌握修复效果;针对生物修复系统,增设生物传感器监测微生物活性,通过反硝化酶活性变化预判效果波动趋势。开发动态调控策略,基于实时监测数据采用PID控制算法自动调整修复参数,硝酸盐氮浓度升高时增加修复剂投加量或延长树脂再生周期;温度降低时通过电加热装置将含水层温度控制在 $15\sim20^\circ\text{C}$,或投加低温适应性反硝化菌剂维持反硝化速率;植物修复系统建立生长周期管理台账,提前培育备用苗木确保收割后及时补种。制定应急保障方案,在水源地周边储备移动式反渗透装置、应急碳源投加设备等,修复系统故障导致硝酸盐氮超限时立即启动应急设备;每半年开展一次全面监测与模型校准,根据评估结果优化修复方案与调控策略,保障修复效果长期稳定。

4 结束语

综上所述,地下水硝酸盐污染修复是饮用水源地水质安全保障的关键环节,其核心在于通过技术整合破解源头识别、工艺适配、污染防控与长效稳定的难题。本文研究表明,当前修复技术在复杂场景适应性与安全稳定性方面仍存在不足,而多维度源解析方案、水文地质适配工艺、全流程防控体系及动态监测调控机制,可有效提升修复技术的精准性与实用性,为饮用水源地地下水安全保障提供更有力的技术支撑,助力实现生态保护与公众健康的协同发展。

参考文献

- [1] 刘玉莲,李捷,姜颖,等.地下水硝酸盐污染研究热点与趋势分析[J].水文地质工程地质,2024,51(05):221-230.
- [2] 涂春霖,陈庆松,尹林虎,等.我国地下水硝酸盐污染及源解析研究进展[J].环境科学,2024,45(06):3129-3141.
- [3] 张吉强,刘斐,段申璇,等.地下水硝酸盐污染生物电化学修复技术研究[J].绿色科技,2022,24(16):79-82.
- [4] 冯英明,杨帆,杨楠,等.地下水污染治理与防治技术研究[J].能源与环保,2022,44(07):54-58+66.
- [5] 王毅,王军召.地下水污染溯源技术应用进展[J].海河水利,2022,(01):93-96.

作者简介:

王利新(1986--),女,汉族,北京人,大学本科,工程师,研究方向:地下水硝酸盐污染来源与修复技术分析。