

Exploration of Remediation and Management Approaches for Urban Groundwater Pollution

Wai Han

Inner Mongolia Academy of Ecological Environment Sciences Co., Ltd., Hohhot, Inner Mongolia, 010010, China

Abstract

With the acceleration of urbanization and industrialization, urban groundwater, as a strategic water resource, has become increasingly important both ecologically and in terms of supply value. However, its pollution problem is becoming more severe, exhibiting complex pollution characteristics such as ‘wide range, diverse types, high severity, and difficult remediation,’ directly threatening drinking water safety and sustainable urban development. Based on the current status and causative mechanisms of urban groundwater pollution in China, this paper systematically reviews the application scenarios and suitability of physical, chemical, biological, and combined remediation technologies. It provides an in-depth analysis of the core challenges in current governance, including policy systems, technological research and development, regulatory mechanisms, and funding support. Furthermore, it establishes an integrated governance framework of ‘source prevention - process interception - end-point remediation - long-term control’ and proposes differentiated and precise remediation pathways, offering theoretical support and practical guidance for urban groundwater pollution management in China.

Keywords

urban groundwater; pollution remediation; management approaches; long-term control; complex pollution

城市地下水污染的修复治理路径探讨

韩外

内蒙古生态环境科学研究院有限公司, 中国·内蒙古 呼和浩特 010010

摘 要

随着城市化与工业化进程加速, 城市地下水作为战略水资源的生态功能与供给价值凸显, 但其污染问题日益严峻, 呈现“范围广、种类杂、程度深、修复难”的复合污染特征, 直接威胁饮水安全与城市可持续发展。本文基于我国城市地下水污染现状与成因机制, 系统梳理物理、化学、生物及联合修复技术的应用场景与适配性, 深度剖析当前治理在政策体系、技术研发、监管机制、资金保障等方面的核心困境, 构建“源头防控-过程拦截-末端修复-长效管控”四位一体的综合治理框架, 提出差异化、精准化的修复治理路径, 为我国城市地下水污染治理提供理论支撑与实践指引。

关键词

城市地下水; 污染修复; 治理路径; 长效管控; 复合污染

1 引言

地下水是城市水资源体系的核心组成部分, 凭借水量稳定、水质优良的优势, 成为我国近 60% 城市的主要饮用水源, 北方干旱半干旱地区供水占比超 85%。然而, 伴随城市化率突破 66%, 城市地下水污染态势愈发严峻《2024 年中国地下水环境质量公报》显示, 我国城市地下水 I - III 类优良水质比例仅 35.2%, IV - V 类劣质水质占比达 64.8%, 京津冀、长三角等城市群呈现重金属与有机污染物叠加的复合污染特征。

从国家战略层面, 党的二十大报告明确“加强地下水

污染防治”, 《“十四五”生态环境保护规划》提出“推进地下水污染风险管控与修复”。在此背景下, 系统构建科学高效的修复治理路径, 既是落实生态环保战略的必然要求, 也是保障城市水资源安全、推动新型城镇化高质量发展的关键举措。

2 研究意义

理论意义: 完善地下水污染治理的学术框架, 丰富复合污染修复的理论体系, 填补跨区域协同治理与长效管控的研究空白, 为后续学术研究提供参考。

实践意义: 结合我国城市污染实际, 提出可落地的技术路径与管理方案, 为环保、水利等部门决策提供依据, 助力地下水环境质量改善与水资源可持续利用。

【作者简介】韩外 (1992-), 中国内蒙古人, 本科, 工程师, 从事环保咨询研究。

3 城市地下水污染的现状特征与成因机制

3.1 污染现状与核心特征

3.1.1 污染范围：全域蔓延与重点集聚并存

我国城市地下水污染呈全域扩散态势，且在重点区域高度集聚。东部工业城市以复合污染为主，污染集中于工业园区、老城区，长三角某城市工业园区污染羽扩散面积达12平方公里；中西部城市以生活污水与农业面源污染为主，污染向周边农村延伸。全国80%以上工业园区存在地下水污染，部分老城区浅层地下水几乎无优良水质区域。

3.1.2 污染类型：复合污染凸显

污染已从单一类型转向多污染物叠加，重金属中铅、镉、砷超标严重，北方资源型城市砷含量最高超标40倍；挥发性有机物（VOCs）、半挥发性有机物（SVOCs）检出率高，东部电子产业城市三氯乙烯检出率100%；氮、磷等营养盐超标普遍，南方农业周边城市硝酸盐含量远超饮用水标准。多数区域存在“重金属+有机物+营养盐”三重叠加污染，治理难度剧增。

3.1.3 污染程度：浅层污染加剧与深层渗透

浅层地下水（0-50米）污染最为严重，全国Ⅳ-V类水质比例超60%，部分工业城市V类水质占比达72%；深层地下水（>50米）污染渗透趋势明显，北方部分省会城市已检出VOCs。部分老工业城市污染深度超100米，形成立体污染格局，2020-2024年重金属、有机污染物超标倍数年均分别增长8.5%、12.3%。

3.2 城市地下水污染成因解析

城市地下水污染是点源污染、面源污染与自然及人为因素耦合作用的综合结果，其成因机制复杂且具有显著的叠加效应，核心可归纳为四大维度的协同影响。

工业污染是核心点源驱动力，贡献了约30%的地下水污染总量，部分重污染工业区占比达到45%左右。石油化工、电镀、制药等行业的生产废水未经达标处理便渗漏排放，携带重金属、含氯烃、酚类等高毒性污染物渗入地下；矿山开采产生的废液经淋溶作用迁移，导致地下水出现硫酸盐型或重金属复合型污染，工业废渣的随意堆放进一步加剧了污染物的累积渗透。

城市生活污染形成持续面源压力，污染贡献占比约18%，部分老旧城区可达37%左右。市政污水管网破损渗漏、垃圾填埋场渗滤液下渗，将大量有机物、病菌及洗涤剂残留带入含水层；地下储罐、管道的泄漏还会导致油类污染物扩散，逐步污染深层地下水，成为隐蔽性污染来源。

农业面源污染的叠加效应突出，集约化农业区地下水硝酸盐超标率达28%左右，抗生素残留检出率达到10%左右。农药、化肥的过量施用经降雨淋溶渗透，畜禽养殖废水及不当施用的沼肥、有机肥，携带氮、磷及病原体进入浅层地下水，加速地下水富营养化，威胁饮用水安全。

自然与人为因素的耦合进一步放大污染风险，含水层渗

透率、地下水位变化影响污染物迁移速率，极端降雨加剧面源污染入渗，持续城市化导致的包气带破坏，使地下水防护屏障失效，最终形成多源叠加、多路径迁移的复杂污染格局。

4 城市地下水污染修复治理的核心技术路径与适配性分析

4.1 单一修复技术的原理与应用边界

4.1.1 物理修复技术

抽出-处理技术：抽取污染地下水至地表处理后回灌，适配浅层高浓度重金属污染，去除率达90%，但对深层、低渗透性地层效果差，成本高且易引发地面沉降。

膜分离技术：利用膜的选择性透过性，反渗透技术污染物去除率超99%，适配高浓度有机与重金属污染，但能耗高、膜组件易堵塞，设备投资大，难以大规模推广。

4.1.2 化学修复技术

原位化学氧化/还原技术（ISCO/ISCR）：注入氧化剂或还原剂转化污染物，适配有机与重金属污染，1个月内挥发性有机物浓度下降70%，但药剂注入均匀性难控制，易破坏局部生态。

吸附修复技术：利用活性炭、生物炭吸附污染物，适配低浓度污染，农药残留去除率达85%，但对高浓度污染效果差，吸附剂更换繁琐。

4.1.3 生物修复技术

原位生物修复技术：注入营养物质促进微生物降解有机物，适配低浓度大面积污染，石油类去除率达75%，成本低但修复周期长（1-3年），受温度、pH值影响大。

植物修复技术：利用植物吸收污染物，向日葵、印度芥菜适配重金属污染，芦苇适配营养盐污染，去除率分别达60%、80%，但受生长条件限制，高浓度污染下植物易死亡。

4.2 联合修复技术的协同机制与实践成效

4.2.1 物理-化学联合技术

“抽出-处理+活性炭吸附”适配高浓度复合污染，某工业园区应用后重金属、有机污染物去除率分别达92%、95%，效率提升30%，周期缩短40%；“膜分离+化学沉淀”适配高浓度重金属污染，去除率达98%，延长膜使用寿命30%。

4.2.2 化学-生物联合技术

“原位化学氧化+生物修复”适配中低浓度复合污染，某地级市应用后挥发性有机物去除率达90%，成本降低25%；“吸附+植物修复”适配重金属与营养盐污染，某农业区域应用后重金属去除率85%、氮磷去除率80%，兼具生态效益。

4.2.3 典型工程案例适配性

某化工园区采用“ISCO+活性炭吸附+生物修复”技术，污染物全部达标，成本降低20%；某低渗透性地层采用“电动修复+吸附”联合技术，效率较单一技术提升45%，破解低渗透地层修复难题。

4.3 修复技术的差异化选型框架

4.3.1 基于污染类型的适配

重金属污染：高浓度采用“化学沉淀+膜分离”，低浓度采用“吸附+植物修复”。

有机污染：VOCs采用“原位化学氧化+生物修复”，SVOCs采用“抽出-处理+吸附”。

复合污染：优先采用三级联合技术，按需组合物理、化学、生物手段。

4.3.2 基于地质条件的调整

浅层地下水：高渗透地层采用“抽出-处理+吸附”，低渗透地层采用“原位化学氧化+生物修复”。

深层地下水：优先采用原位修复技术，辅以监测井管控。

特殊地质：岩溶地区采用“拦截墙+吸附井”，砂质地层采用抽出-处理，黏土地层采用“电动+化学”联合技术。

5 城市地下水污染修复治理的现存困境与瓶颈

5.1 政策体系与监管机制不完善

法律法规比较碎片化，现有条款原则性强、可操作性不足。跨部门协同缺失，环保、水利等部门权责交叉，缺乏协同与信息共享机制。执法监管效能不足，地下水污染隐蔽性强，源头排查与取证难，违法处罚力度不足，震慑力薄弱。

5.2 技术研发与成果转化滞后

核心技术自主创新不足，复合污染与深层污染修复技术瓶颈。高端修复材料、设备依赖进口，成本高昂；复合污染、深层及低渗透性地层修复技术瓶颈未突破，治理效率低、成本高。

5.3 管理体系与资金保障不足

监测预警体系不健全，点位布局不合理，特征污染物监测能力薄弱。全过程管理缺失，资金投入机制单一，监测修复全过程管理缺位，前期调研不充分、中期管控不足、后期评估长效性差。

6 城市地下水污染修复治理的优化路径与创新机制

源头防控是治理的根本，过程拦截是遏制污染蔓延的关键。重点区域拦截工程，在工业园区、垃圾填埋场周边建设膨润土阻隔墙与活性炭吸附井群，拦截污染物横向扩散；还有地下水动态调控，科学制定开采规划，2025年前实现采补平衡；推进再生水回灌工程，补充地下水水量，提升自净能力，某省会城市日回灌5万立方米，地下水水位回升0.5米。生态敏感区红线管控，划定地下水保护红线，将饮用水源地、补给区纳入严格保护；设置加密监测点位，实现污染物超标实时预警，一旦发现污染立即启动应急处置。末端修复需提升技术适配性与工程规范化水平。一方面是核心技术研发攻关，依托科研院所重点研发复合污染修复材料、深层原位修复设备，利用农业废弃物制备低成本生物炭吸附剂；针对低渗透性地层研发改良型电动修复技术，提升治理效率。另一方面是修复工程规范化实施，前期开展详细勘察，采用钻探、物探明确污染范围与浓度；中期加强施工监测，实时调整参数；后期开展三年以上跟踪监测，建立水质档案，

及时处置反弹问题。

长效管控是保障治理成果的核心，需要构建多维度保障机制。一方面是完善政策法规体系，细化修复责任、监管执法等条款；建立跨部门协同机制，由政府牵头统筹政策制定与实施；每两年开展政策评估，动态优化调整。另一方面是提升监管监测能力，构建“全域覆盖、精准监测”的监测网络，优化点位布局，完善特征污染物监测指标；搭建智慧监管平台，整合数据实现智能化溯源、预警与处置；加强基层人员培训，提升专业监管能力。还有就是创新资金与社会参与机制，设立专项基金，加大财政投入，优化资金分配向中小城市倾斜；出台激励政策，对社会资本给予税收减免、补贴，建立风险分担机制；探索“治理-开发”联动模式，提升社会资本参与积极性；畅通公众监督渠道，设立举报热线，形成共治格局。

7 结语

我国城市地下水污染呈现“范围广、种类杂、程度深、修复难”的复合特征，全域蔓延与重点集聚并存，浅层污染加剧且向深层渗透，区域差异显著，核心成因包括工业污染管控缺失、城市基建滞后、农业面源扩散及制度监管缺位，多因素交织导致治理难度极大。

单一修复技术存在适用局限，物理技术适配浅层、高浓度污染，化学技术效率高但存在二次污染风险，生物技术生态友好但周期长；联合技术通过协同互补提升效能，物理-化学联合适配高浓度复合污染，化学-生物联合兼顾效率与生态性，需结合污染类型、地质条件科学选型。

优化路径需突出精准化与差异化，通过源头闭环管控切断污染路径，过程拦截阻断扩散，末端科学修复提升效能，长效机制保障成果，才能实现地下水环境质量持续改善。

未来研究需聚焦三大方向：一是深化新型修复材料研发，重点开发低成本、高效能的复合污染吸附材料与功能微生物菌剂，提升技术经济性与适配性；二是构建跨区域协同治理机制，针对城市群、流域特征，建立监测数据共享、治理措施协同、风险联防联控的一体化体系；三是完善长效管控动态评估，建立修复效果长期跟踪机制，结合城市发展定位优化治理策略，实现治理与城市发展的协同共进。实践层面，需加快技术成果转化，推广差异化治理模式，推动地下水污染治理从“被动修复”向“主动防控”转变，助力水资源安全保障与生态环境高质量发展。

参考文献

- [1] 中华人民共和国生态环境部. 中国地下水环境质量公报[R]. 北京: 中国环境科学出版社, 2024.
- [2] 张旭, 李铁龙, 刘杰. 城市地下水复合污染修复技术研究进展[J]. 环境科学学报, 2023, 43(5): 1689-1702.
- [3] 刘敏, 张昊, 李丽. 城市地下水污染修复治理的困境与优化策略[J]. 环境保护, 2023, 51(12): 45-50.
- [4] 赵勇, 崔亚伟, 李娟. 基于“源头-过程-末端”的城市地下水污染综合治理体系构建[J]. 中国环境科学, 2023, 43(7): 3015-3024.
- [5] 席北斗, 姜永海, 李发生. 我国地下水污染防治的现状、挑战与长效管控机制[J]. 生态环境学报, 2024, 33(8): 1561-1568.