

# Research on the Characteristics of Groundwater Pollution in Industrial Agglomeration Areas and the Synergistic Remediation Technology of Water, Geotechnical and Environmental Engineering

Shiling Wu

Qinghai Province Fifth Geological Prospecting Institute, Xining, Qinghai, 810000, China

## Abstract

Intensive production activities in industrial agglomeration zones are prone to causing composite groundwater pollution, which threatens the regional water ecological security and human health. Taking a typical industrial agglomeration zone as the research object, this paper clarifies the spatiotemporal distribution characteristics, types of pollutants, and pollution degree of regional groundwater pollution through field sampling monitoring and indoor analysis, identifying heavy metals and persistent organic pollutants as the main pollution factors. On this basis, combined with hydrogeological, engineering geological, and environmental geological (water, engineering, and environment) conditions, a "source control - process blocking - in-situ remediation" water, engineering, and environment collaborative remediation technology system is proposed, and the feasibility and effectiveness of the technology are verified through case studies. The research results can provide scientific basis and technical support for the governance of groundwater pollution and risk management in industrial agglomeration zones.

## Keywords

Industrial Agglomeration Area; Groundwater Pollution Characteristics; Hydro-Engineering and Environmental Synergistic Remediation; Pollution Control; Risk Management

## 工业集聚区地下水污染特征及水工环协同修复技术研究

吴世玲

青海省第五地质勘查院, 中国·青海 西宁 810000

## 摘要

工业集聚区的高强度生产活动易引发地下水复合型污染, 威胁区域水生态安全与人体健康。本文以典型工业集聚区为研究对象, 通过野外采样监测与室内分析, 明确了区域地下水污染的时空分布特征、污染物种类及污染程度, 识别出重金属、持久性有机物为主要污染因子。在此基础上, 结合水文地质、工程地质与环境地质(水工环)条件, 提出“源头管控-过程阻断-原位修复”的水工环协同修复技术体系, 并通过案例验证了该技术的可行性与有效性。研究结果可为工业集聚区地下水污染治理与风险管控提供科学依据和技术支撑。

## 关键词

工业集聚区; 地下水污染特征; 水工环协同修复; 污染治理; 风险管控

## 1 引言

工业集聚区是区域工业化发展的核心载体, 集聚了化工、冶金、机械制造等多类高耗水、高排污企业。随着工业生产规模的持续扩大, 废水渗漏、固废堆场淋溶、原料及产品泄漏等问题日益突出, 导致地下水污染风险不断加剧。地下水具有隐蔽性、流动性和难恢复性等特点, 一旦遭受污染, 治理周期长、成本高, 且会对区域生态系统和居民饮用水安全构成长期威胁。

当前, 关于工业集聚区地下水污染的研究多集中于单一

污染因子的识别或单一修复技术的应用, 忽视了水文地质条件、工程地质结构与环境地质问题的关联性, 导致修复方案针对性不足、治理效果难以达到预期。水工环协同修复理念强调结合区域水文地质参数、地层岩性特征及污染物迁移规律, 构建多技术融合的修复体系, 为破解工业集聚区地下水污染治理难题提供了新思路。基于此, 本文通过分析典型工业集聚区地下水污染特征, 研发适配的水工环协同修复技术, 以为同类区域地下水污染治理提供理论参考与技术支撑。

## 2 工业集聚区地下水污染特征分析

### 2.1 研究区概况与研究方法

选取某典型工业集聚区作为研究对象, 该区域占地面积约 8.2 km<sup>2</sup>, 主导产业为化工原料生产、金属表面处理及

【作者简介】吴世玲(1987—), 女, 中国青海人, 本科, 初级工程师, 从事水工环研究。

农药制造。区域地层结构自上而下依次为素填土(0-3 m)、粉质黏土(3-10 m)、粉砂(10-18 m)及砂岩(18 m以下),地下水类型为松散岩类孔隙水,潜水含水层埋深5-8 m,承压水含水层埋深15-20 m,地下水流向总体为自西北向东南。

研究采用网格布点法,在集聚区内部及周边共布设25个地下水监测井,其中集聚区内部18个、边界4个、外围对照区3个。于丰水期和枯水期分别采集地下水样品,检测指标包括pH值、总硬度、溶解性总固体(TDS)等常规指标,铅(Pb)、镉(Cd)、铬(Cr<sup>6+</sup>)等重金属指标,以及苯、甲苯、氯仿等挥发性有机物(VOCs)指标。检测方法参照《地下水质量标准》(GB/T 14848-2017)和《水质 挥发性有机物的测定 吹扫捕集/气相色谱-质谱法》(HJ 639-2012)执行。

## 2.2 地下水污染时空分布特征

### 2.2.1 时间分布特征

丰水期与枯水期地下水污染程度存在显著差异,枯水期地下水污染浓度整体高于丰水期。以Cr<sup>6+</sup>和苯为例,枯水期集聚区内部监测井中Cr<sup>6+</sup>浓度范围为0.05-0.82 mg/L,超标率达61.1%;苯浓度范围为0.01-0.35 mg/L,超标率为50.0%。<sup>[1]</sup>丰水期受降水入渗稀释作用影响,Cr<sup>6+</sup>浓度降至0.03-0.56 mg/L,超标率降至38.9%;苯浓度降至0.005-0.21 mg/L,超标率降至33.3%。

### 2.2.2 空间分布特征

地下水污染呈现显著的空间集聚性,高浓度污染区主要分布于化工车间、固废堆场及废水处理站周边。由图1可知,集聚区西北部化工原料生产区为重度污染区,存在Cr<sup>6+</sup>、苯、甲苯等复合型污染,部分监测井污染物浓度超出《地下水质量标准》(GB/T 14848-2017)Ⅲ类标准5-10倍;中部金属表面处理区以Pb、Cd等重金属污染为主;东南部农药制造区则存在有机磷农药残留污染。集聚区外围对照区地下水水质良好,各项指标均符合Ⅲ类标准,表明污染未扩散至外围区域。

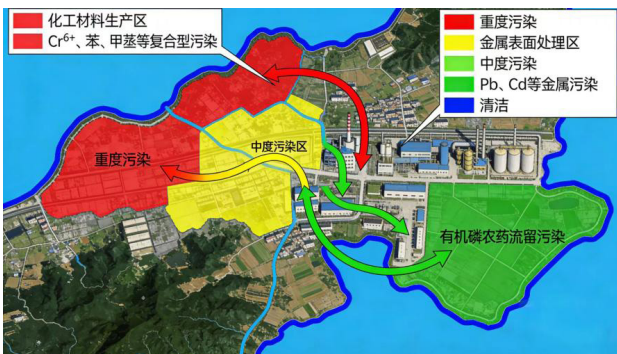


图1 研究区地下水污染空间分布示意图

(注:图中不同颜色代表不同污染等级,红色为重度污染区,黄色为中度污染区,绿色为轻度污染区,蓝色为清洁区;箭头方向为地下水流向。)

## 2.3 主要污染因子及污染成因

检测结果显示,研究区地下水主要污染因子分为两大类:一是重金属类,包括Cr<sup>6+</sup>、Pb、Cd,主要来源于金属表面处理过程中的电镀废水渗漏及含重金属固废淋溶;二是有机污染类,包括苯、甲苯、氯仿等VOCs,主要来源于化工原料储罐泄漏、生产废水排放及有机溶剂挥发后的大气沉降。

污染成因主要包括三方面:①防渗措施不完善,部分老旧车间地面未做防渗处理,废水直接渗入地下含水层;②固废堆场管理不规范,废渣随意堆放,降雨淋溶产生的渗滤液携带污染物进入地下水;③地下水流动路径复杂,粉砂含水层渗透性较强,加速了污染物的迁移扩散。

## 3 水工环协同修复技术体系构建

水工环协同修复技术体系的核心是基于区域水文地质、工程地质与环境地质条件,整合源头管控、过程阻断、原位修复三类技术,实现“控源-截污-修复”的一体化治理。在具体实施中,源头管控技术通过精准识别污染源分布,结合水文地质勘察数据,对工业废水排放口、农业面源污染区、生活污水渗漏点等进行动态监测与智能调控,例如利用物联网传感器实时采集水质参数,通过大数据分析预测污染扩散趋势,从而制定针对性的减排方案。过程阻断技术则依托工程地质条件,采用物理屏障与生物拦截相结合的方式,在地下水污染羽流迁移路径的关键节点构建防渗帷幕或生态缓冲带,如利用高压旋喷注浆技术形成连续的防渗墙体,或种植具有强吸附能力的水生植物群落,有效阻断污染物向清洁区域扩散。<sup>[2]</sup>原位修复技术针对已受污染的土壤和地下水,采用化学氧化、微生物降解、热脱附等方法,在不扰动地层结构的前提下实现污染物的原位降解与转化,例如通过注入氧化剂引发自由基反应分解有机污染物,或投加高效降解菌剂激活土著微生物群落,促进污染物的生物矿化。整个技术体系通过多学科交叉融合,将水文循环规律、工程力学原理与生态环境修复理论有机结合,形成从污染预防到生态恢复的全链条解决方案,最终实现区域水环境质量的持续改善与生态系统功能的稳定提升。

### 3.1 基于水文地质条件的源头管控技术

源头管控是减少地下水污染负荷的关键,需结合地下水含水层分布特征与渗透系数,针对性采取污染源隔离措施。对于研究区粉质黏土层分布较厚的区域,采用垂直防渗帷幕技术,利用膨润土防水毯(GCL)结合水泥搅拌桩构建防渗墙,防渗墙深度穿透潜水含水层,进入下伏相对隔水的粉质黏土层,阻断污染物垂直下渗路径。对于粉砂含水层渗透性较强的区域,采用水平防渗膜技术,在污染源头下方铺设高密度聚乙烯(HDPE)防渗膜,防止废水渗漏。同时,建立污染源实时监测系统,对储罐、废水池等重点区域的渗漏情况进行24 h监控,实现污染早发现、早处理。

### 3.2 基于工程地质结构的过程阻断技术

过程阻断技术的核心是利用工程地质结构特征，构建污染物迁移拦截屏障。研究区地下水流向为西北向东南，在中度污染区与轻度污染区之间的粉砂含水层中，构建渗透反应墙（PRB）。PRB 填充材料选用零价铁（ZVI）和活性炭的混合物，零价铁可通过氧化还原反应降解  $\text{Cr}^{6+}$  等重金属离子，活性炭可吸附苯、甲苯等有机污染物。结合工程地质钻探数据，PRB 墙体深度设置为 10 - 18 m，与粉砂含水层厚度匹配，墙体长度沿地下水流向垂直布设，确保污染地下水全部经过反应墙处理。此外，在 PRB 下游布设监测井，实时监测出水水质，评估拦截效果。图 2 为水工环协同修复技术体系流程图，清晰展示了源头管控、过程阻断、原位修复的技术衔接关系。



图 2 工业集聚区地下水水工环协同修复技术体系流程图

### 3.3 基于环境地质问题的原位修复技术

针对已渗入含水层的污染物，结合区域环境地质问题（如土壤盐碱化、地层透气性差等），采用原位化学氧化 - 生物修复联合技术。首先，向污染含水层注入过硫酸钠氧化剂，通过化学反应快速降解难生物降解的有机污染物，氧化过程中产生的自由基可破坏苯环结构，提高污染物的生物可利用性。然后，接种耐重金属的高效降解菌剂，利用微生物代谢作用进一步降解残留的有机污染物，并固定重金属离子。同时，考虑到研究区部分区域地层透气性差，采用曝气增氧技术，通过注入空气提高含水层溶解氧含量，促进微生物的生

长繁殖。原位修复过程中，需结合环境地质监测数据，调整氧化剂和菌剂的注入量及注入深度，避免引发二次污染。<sup>[3]</sup>

## 4 技术应用效果验证

为验证水工环协同修复技术的有效性，在研究区重度污染区选取 1 个典型地块开展工程应用。修复工程实施前，该地块地下水  $\text{Cr}^{6+}$  浓度为 0.75 mg/L，苯浓度为 0.32 mg/L，均远超 III 类标准。通过实施垂直防渗帷幕 + PRB 渗透反应墙 + 原位化学氧化 - 生物修复的协同技术方案，经过 6 个月的治理，地下水  $\text{Cr}^{6+}$  浓度降至 0.02 mg/L，苯浓度降至 0.003 mg/L，各项指标均达到《地下水质量标准》（GB/T 14848 - 2017）III 类标准要求。

治理后 1 年的跟踪监测结果显示，该地块地下水水质保持稳定，未出现污染物反弹现象，表明水工环协同修复技术具有良好的长效性。同时，该技术方案的治理成本相较于传统单一修复技术降低约 25%，具有显著的经济效益和环境效益。

## 5 结语

工业集聚区地下水污染呈现复合型、时空差异性的特征，其治理需突破单一技术的局限性，充分考虑水文地质、工程地质与环境地质条件的关联性。本文构建的水工环协同修复技术体系，通过源头管控切断污染来源、过程阻断拦截污染物迁移、原位修复降解含水层污染物，实现了地下水污染的全链条治理。案例应用结果表明，该技术体系可有效降低地下水污染物浓度，且具有成本低、长效性好等优势。

未来研究需进一步深化不同工业类型集聚区地下水污染特征的差异性分析，研发适配不同地层条件的高效修复材料，同时结合大数据、物联网等技术，构建智能化的地下水污染监测与修复预警系统，为工业集聚区地下水生态安全保障提供更全面的技术支撑。

### 参考文献

- [1] 韩弟宏,任润锐,商佐,等.天津某地块土壤污染分析及修复技术研究[C]//《施工技术(中英文)》杂志社,亚太建设科技信息研究院有限公司.2024年全国工程建设行业施工技术交流会论文集(中册).天津市勘察设计院集团有限公司;天津市博川岩土工程有限公司;2024:524-528.
- [2] 赵胜楠.河间地块浅层地下水中 $\text{SO}_4^{2-}$ 污染的时空分布特征研究[D].河南理工大学,2017.
- [3] 鲍海霞,李文辉,陈斌,等.工业集聚区污水管道病害多元水质成因研究[J].市政技术,2024,42(08):191-198.