

园区地下水污染溯源与防控体系构建

贺莹莹

奎屯—独山子经济技术开发区环境保护局, 中国·新疆 奎屯 833200

摘要: 工业化集聚发展下, 工业园区地下水复合型污染问题日益突出, 成为制约区域绿色发展的关键瓶颈。当前国内园区地下水治理存在溯源技术单一、重末端轻源头、溯源防控脱节等诸多弊端, 治理成效难以保障。本文剖析园区地下水污染成因与隐蔽性、复合型等核心特征, 整合多类技术搭建层级化污染溯源体系, 同时构建源头防控、过程阻断、末端修复、长效监管一体化防控架构。结合行业现存落地成本高、联动机制缺失等问题提出优化策略, 旨在完善园区地下水治理模式, 为同类园区地下水污染综合治理提供参考。

关键词: 工业园区; 地下水污染; 多技术溯源; 全周期防控

Establishment of groundwater pollution tracing and prevention and control system in the park

He Yingying

Kuitun Dushanzi Economic and Technological Development Zone Environmental Protection Bureau, China Xinjiang Kuitun 833200

Abstract: Under the development of industrial agglomeration, the issue of composite groundwater pollution in industrial parks has become increasingly prominent, posing a key bottleneck that restricts regional green development. Currently, domestic groundwater governance in parks faces numerous drawbacks, such as the use of singular traceability technology, an emphasis on end-of-pipe treatment and neglect of source control, and a disconnect between traceability and prevention and control, making it difficult to ensure effective governance. This paper analyzes the causes and core characteristics of groundwater pollution in parks, including its concealment and composite nature. It integrates multiple technologies to establish a hierarchical pollution traceability system and constructs an integrated prevention and control framework encompassing source control, process interruption, end-of-pipe remediation, and long-term supervision. Considering issues such as high implementation costs and the lack of a linkage mechanism in the industry, optimization strategies are proposed to improve the groundwater governance model in parks and provide a reference for comprehensive groundwater pollution control in similar parks.

Keywords: Industrial park; Groundwater pollution; Multi-technique source tracing; Full-cycle prevention and control

0 引言

工业园区是区域产业升级与经济增长的重要载体, 但是由于产业集聚而产生的地下水污染问题越来越严重。园区高危污染物种类繁多, 受水文地质环境影响, 污染具有多源叠加、跨介质扩散等特点, 治理难度远远大于普通的生活类污染。现阶段大部分园区治理模式存在着明显的不足, 溯源技术碎片化、常态化排查机制缺乏、闭环管控体系没有建立, 不能适应复杂的污染治理要求。在这种情况下, 研究科学有效的污染溯源方法, 建立一体化防控体系, 对于解决园区地下水污染问题, 促进园区生态和经济协调发展具有十分重要的现实意义。

1 园区地下水污染主要成因及污染特征

1.1 主要污染成因

园区地下水污染的形成是人为排放、水文地质条件、

管理机制缺失多要素协同作用的结果, 其中人为因素是主要的主导因素, 可分为直接污染和间接污染两种。直接污染主要是由企业生产环节造成的, 生产装置老化破损、污水收集管道防渗层失效、危废暂存区防渗不达标, 会使液态污染物直接渗入包气带, 慢慢迁移至含水层, 形成点状污染源; 部分企业违法偷排、夜间超标排放废水, 废水经由地表裂隙下渗, 扩大污染的覆盖范围。间接污染包含大气干湿沉降、地表径流耦合污染, 园区生产排放的气态污染物经大气沉降落到地表, 随降雨入渗到地下水; 园区地表堆积的固废、受污染土壤, 在雨水冲刷作用下形成含污染物地表径流, 实现跨介质污染传递。

水文地质条件属于基础性的制约因素, 它直接影响到污染物迁移扩散的速度和污染的形态。松散型包气带孔隙度大、防渗性能差, 污染物入渗速度快, 短时间内就能渗

透到浅层地下水；含水层水力连通性较好的园区，污染物会随着地下水流向上下游快速扩散，由点状污染变成面状复合型污染。岩土介质对于一些污染物有吸附、解吸作用，会造成污染物在岩土介质中长期滞留、富集，成为隐蔽的污染源，加大后期治理的难度。管理层面的漏洞会加重污染态势，大部分中小园区没有建立全覆盖地下水监测网，企业排污审核、环境巡检制度不健全，缺少针对污染的应急处置方案，污染发生之后不能及时干预，导致污染范围不断蔓延。

1.2 核心污染特征

相比于城乡生活型地下水污染，工业区地下水污染也有它自身的特点。其一就是隐蔽性和滞后性，地下水存在于地下岩石的孔隙、裂隙中，污染初期没有直接的表现特征，常规环境巡检不能发现；污染物从地表入渗到含水层的时间跨度从数月到数年不等，污染爆发存在明显的滞后性，很容易错过最佳治理窗口期。第二是复合性和叠加性，园区产业类型多样，各个企业的排放污染物种类不同，重金属、有机污染物、无机盐污染物互相影响，形成复合型污染，各种污染物之间存在着协同毒害效应，而且不同的污染源污染区域也相互重叠，加大了溯源和治理的难度。第三点是不可逆性、长期性，地下水含水层自我净化能力差，岩土吸附的持久性污染物会逐渐释放，形成长效二次污染源；对于深层地下水污染，目前，的修复技术成本高，难以完全净化，大多数污染区域只能达到风险控制的效果，不能完全恢复到原生水环境的状态^[1]。

2 园区地下水多技术融合污染溯源体系构建

污染溯源是地下水污染精准防控的前提，针对园区复合型污染溯源难点，融合“定性筛查、定量解析、数值模拟、智能识别”技术，构建“初筛－解析－验证－定位”一层级溯源体系，契合各种污染程度以及不同水文地质状况下的溯源工作需求。

2.1 基础筛查层：污染源初步识别

基础筛查层以水化学特征分析与特征指纹识别技术为核心，对污染源进行定性判定，适合于污染初期排查和大面积园区初步溯源。水化学分析法从不同的含水层、不同的空间点位上采集地下水样品，测定 pH 值、溶解氧、总硬度、特征污染物浓度等，结合地下水水化学组分的变化规律，划分污染区域、区分天然本底值和人为污染值，初步确定污染高发片区。特征指纹识别技术依靠各个产业污染物特有的指纹特征，利用主成分分析、化学质量平衡模型区分工业排污、地表径流、地质本底等污染来源，很好地解决了复合型污染，源的分类问题，对于重金属、特异性有机污染物的溯源具有很强的适应性。

2.2 精准解析层：量化溯源与迁移模拟

在初步筛查基础上，用地下水数值模拟技术对污染源进行量化定位，并对污染物的迁移进行预测。结合园区水文地质勘查数据，建立可视化地下水水流－溶质耦合模型，输入含水层渗透系数、孔隙度、水力梯度等主要参数，模拟污染物的时空迁移途径、扩散区域和衰减特性，倒推出污染源的具体位置、排放时间、排放量，由“片区筛查”变为“点位定位”^[2]。

2.3 智能优化层：降低溯源误差

针对传统数值模型参数求解效率低、非线性污染溯源适配性差等问题，用机器学习的方法，建立智能溯源模块，从而形成闭环的溯源系统。采用随机森林、梯度提升决策树等算法，对数值模型敏感参数进行优化，用 GSA-SHAP 敏感性分析法筛选出影响污染物迁移的主要参数，削弱冗余参数的干扰，减少模型模拟误差；并且利用算法挖掘出低方差、高风险的隐性污染变量，准确找到隐蔽性很强的浅层滞留污染源。基础筛查、精准解析、智能优化三者互相补充、层层推进，既可满足低成本常态化排查的需求，又可达到复杂复合型污染高精度溯源的目的，完全适应园区多元化溯源的需要。

3 全周期一体化地下水污染防控体系构建

结合园区地下水污染形成的规律和溯源结果，按照预防为主、源头控制、分级治理、长效运维的原则，建立以“源头控制、过程阻断、末端修复、动态监管”为内容的全过程管控体系，消除溯源和治理之间的障碍，达到地下水污染全过程管控的目的。

3.1 源头防控：从根源降低污染发生概率

源头防控是成本最低、效率最高的防控手段，主要是对园区企业的排污行为进行规范，完善基础设施的防渗体系。一方面，优化园区产业空间布局，结合地下水水流方向、含水层分布特点，将高污染风险企业安排到地下水下游地区，防止高危企业集中布局造成集中污染风险；严格执行企业入园环境准入制度，对高污染项目开展专项地下水环境影响评价，从源头控制新增污染风险。另一方面，对园区的防渗设施进行升级改造，督促企业对生产车间、污水池、危废仓库等重点部位做双层防渗处理，更新老旧污水输送管网，采用密闭式输送方式减少污染物渗漏隐患。建立企业排污清单管理制度，确定各个行业的特征污染物排放标准，定期对排污进行专项巡检，落实企业主体责任。

3.2 过程阻断：遏制污染物扩散蔓延

过程阻断集中于已经出现轻微污染或者潜在污染的区域，依靠监测预警和工程控制技术，阻止污染物的移动。其一，搭建网格化多层级监测网络，结合溯源体系筛查出

的污染高发区,设置浅层和深层两个层次的监测井,实现对地下水水质、水位数据的实时监测;与溯源智能算法一起建立预警模型,一旦发现特征污染物浓度超过预警阈值,则立刻发出分级预警,为应急处理留出窗口时间^[3]。其二,分区工程阻断,对于点状的轻度污染区,采用渗透反应墙技术拦截降解地下水中游离态污染物,对于面状污染区,结合地下水流向设置防渗帷幕,阻止污染物跨区域扩散,防止浅层污染向深层含水层渗透,达到污染范围动态控制的目的。

3.3 末端修复:差异化开展污染治理

末端修复是对已经形成了规模化污染的区域,摒弃一刀切的修复方式,结合溯源定位得到的污染范围、污染物种类、污染程度等信息,对污染进行分级分类修复。浅层小规模污染优先采用原位修复技术,依托原位化学氧化、微生物修复技术,直接在含水层内降解污染物,降低修复成本,规避异位修复带来的二次污染;深层重度复合型污染,采用异位抽注修复联合岩土吸附技术,抽取受污染地下水处理后回灌含水层,同步优化岩土介质吸附性能,逐步降低污染物浓度。

3.4 长效监管:完善制度与运维保障

长效监管为防控体系落地提供制度支撑,突破重治理、轻运维的行业难题。行政上地方生态环境部门应出台园区地下水污染控制方案,明确园区管委会、入驻企业和监管部门三者责任,建立跨部门联合执法机制,加强违规排污的惩罚力度;技术上构建一体化数字化管控平台,整合溯源数据、监测数据和修复数据,达成数据共享、动态更新,从而完成园区地下水环境全域可视化治理;经济上实施地下水生态补偿制度,建立企业排污付费、污染追责赔付的机制,促使企业落实污染防控举措;人才上定时开展企业环保人员、园区巡检人员的溯源技术、防控技术、应急处置知识等方面的培训工作,筑牢防控体系运行根基^[4]。

4 现存问题与优化建议

4.1 现存核心问题

结合目前,国内园区地下水治理的现状可知,溯源和防控体系的落地还存在着许多的限制。第一,溯源技术落地成本偏高,智能化溯源、数值模拟等高精度技术对水文地质数据和设备硬件有较高的要求,中小型园区资金有限,只能使用基础水化学溯源技术进行普及,不能满足复杂的污染溯源需求。第二,溯源与防控联动机制不完善,大部分园区的溯源工作只起到定位污染源的作用,没有将溯源数据同步对接到防控、修复环节,数据资源利用率低。第三,差异化管控机制缺失,大部分园区沿用通用的防控方案,没有考虑到自身的水文地质状况和产业结构调整防

控策略,造成防控资源的浪费和治理的缺失。第四,应急处置能力薄弱,未形成统一的地下水污染应急处置程序,一旦发生污染事件,处置速度慢,容易导致污染事态扩大。

4.2 针对性优化建议

针对上述问题,结合园区发展实际提出优化路径。一是推行分级溯源模式,按照园区的经济实力和污染风险等级,选择不同的溯源技术,高风险大型园区采用多技术融合溯源体系,中小园区只用基础筛查技术,加上简单的数值模拟技术,从而达到平衡溯源精度和投入成本的目的。二是搭建溯源—防控数据联动端口,将溯源找到的污染点位、迁移走向、污染物种类等信息,马上同步到数字化防控平台上,为防控分区、修复方案制订赋予直接的数据支持,塑造闭环治理体系。三是制定个性化防控方案,结合园区水文地质勘查结果及产业分布特点,将园区分为高风险区、中风险区、低风险区,分别制定出不同的准入、监测、修复要求。四是完善应急处置体系,编制标准的应急处置预案,确定预警等级、处理程序、责任部门,组织应急演练,储备应急防渗、修复物资,提高园区突发地下水污染事件的处置能力。

5 结语

本文结合工业园区地下水污染的形成机理和传播特点,建立了由基础筛查、精准解析、智能优化组成的多层次溯源体系,构建地下水治理全过程的全周期一体化防控体系。研究表明,园区污染治理不能用单一的技术和末端治理的思想去解决,需结合园区的大小、污染风险,分层次溯源、分层次管控。就技术落地难、联动性弱的问题而言,要从成本适配、数据联动、制度完善等各方面着手,打通溯源和治理的壁垒。研究结果可弥补园区地下水环境治理的不足,有利于地下水污染常态化、精准化长效管控。

参考文献:

- [1] 王娜. 工业园区地下水污染防控与风险管控策略研究[J]. 清洗世界, 2026, 42(5): 163-165.
- [2] 刘颖荣, 宋春侠, 钱钦等. 基于特征指纹的化工园区地下水污染物溯源研究进展[J]. 生态与农村环境学报, 2025, 41(11): 1402-1411.
- [3] 占升, 纪斌, 潘晓波等. 工业园区地下水污染管控分区分级的方法及实践[J]. 环境科技, 2024, 37(6): 55-59.
- [4] 叶琼. 工业园区地下水污染防控与治理方法分析[J]. 皮革制作与环保科技, 2025, 6(1): 182-184.

作者简介: 贺莹莹(1987.05-), 女, 汉族, 山西大宁人, 硕士研究生、工程师。研究方向: 环境保护。