

工业园区地下水污染风险评价与防治

孙彦香

吴忠市生态环境监测站盐池工作站 宁夏 吴忠 751500

摘要: 工业园区是地下水污染的高风险区域,其隐蔽性和滞后性对生态环境与饮水安全构成严重威胁。本文系统分析工业园区地下水污染的来源特征与迁移转化机制,构建基于“源-径-汇”全过程的风险评价体系,综合运用脆弱性评价与危害性评价方法进行风险等级划分。研究目的在于为园区管理部门提供风险识别与管控决策支持,从源头预防地下水污染事件发生。本文成果可为工业园区规划环评及地下水污染防治提供技术参考。

关键词: 工业园区;地下水污染;风险评价

引言: 我国工业园区数量众多,涉及化工、电镀、印染等高污染行业,地下水污染问题日益突出。由于地下水流动缓慢、自净能力有限,一旦受到污染,治理修复难度大、成本高、周期长。因此,有必要针对工业园区特殊条件,系统梳理地下水污染特征与迁移规律,建立科学的风险评价方法,并配套形成全链条防控策略。本文结合水文地质学与环境工程理论,从污染特征、迁移机制、风险评价到防控策略四个层面展开探讨,以期同类园区的环境管理提供借鉴。

1 工业园区地下水污染特征

工业园区地下水污染具有来源多样、污染物复杂、空间分布差异显著等突出特征。从污染来源看,主要包括生产车间的跑冒滴漏、储罐区的渗漏破损、污水处理设施的防渗失效、固体废物堆场的渗滤液下渗以及历史遗留污染地块。这些污染源往往呈点状或带状分布,与园区产业布局密切相关。从污染物类型看,重污染行业各有典型特征:化工园区以苯系物、氯代烃等有机污染物为主;电镀园区以六价铬、镍、铜等重金属为主;印染园区则以苯胺类、总氮等为特征污染物。多种污染物复合共存的情况也较为常见。从空间分布看,污染主要集中在浅层地下水,垂向上受包气带岩性控制,水平上沿地下水流向形成污染羽,扩散范围可达数百米至数千米。部分园区还发现污染向深层含水层迁移的趋势,这与隔水层的连续性和厚度密切相关。了解这些污染特征是开展风险评价和制定防控策略的基础前提^[1]。

2 地下水污染迁移转化机制

2.1 水文地质条件对污染迁移的控制作用

水文地质条件是控制地下水污染迁移的核心因素。包气带的岩性、厚度及有机质含量决定了污染物进入含

水层前的阻滞能力,黏性土吸附截留作用强,砂砾石阻隔能力有限。含水层的渗透系数、水力梯度和孔隙度直接影响迁移速度与范围,高渗透性介质中污染羽扩散迅速,低渗透性介质中以弥散作用为主。隔水层的连续性和厚度决定污染物能否垂向迁移进入深层含水层,存在天窗或断裂时浅层污染可快速下渗。地下水流向与流速受地形地貌控制,污染物沿主流方向呈羽状扩散。水文地质条件的空间变异性要求在风险评价中充分开展野外调查与参数测试,避免均匀化假设导致评价失真。

2.2 主要污染物的迁移转化过程

污染物进入地下水后经历复杂的物理、化学和生物过程。对流-弥散是最基本的物理过程:对流驱动污染物向下游迁移,弥散使污染羽逐渐扩大。吸附-解吸显著影响迁移速率,分配系数越大、阻滞因子越高,迁移越慢。生物降解在有机物衰减中作用关键,好氧条件下微生物矿化苯系物,厌氧条件下还原脱氯降解氯代烃,但速率较低。化学反应包括氧化还原、沉淀溶解和络合作用,如六价铬还原为三价铬沉淀,重金属与腐殖酸形成络合物则增强迁移^[2]。对于非水相液体,轻质非水相液体浮于潜水面,重质非水相液体下渗至隔水层,形成长期污染源。

2.3 迁移转化影响的控制因素

污染物迁移转化效率受污染物性质、环境条件和微生物群落三类因素控制。污染物性质方面,高溶解度污染物易形成大范围污染羽;重质非水相液体密度大,穿透含水层底部增加修复难度;挥发性影响气相迁移。环境条件方面,pH控制重金属形态,酸性增强迁移、碱性促进沉淀;氧化还原电位决定电子受体,好氧利于有机物降解、厌氧适合还原脱氯;温度降低显著减缓生物降

解。微生物群落方面,降解菌种类、数量和活性直接影响修复潜力,长期驯化可形成高效菌群加速自然衰减。各因素存在交互作用,增加预测复杂性,需在风险评价中综合考虑。

3 地下水污染风险评价方法体系

3.1 风险评价的总体框架与工作流程

地下水污染风险评价基于“源-径-汇”全过程控制理论,划分为污染源危害性、地下水脆弱性和污染危害性三个模块。污染源危害性评价解决“污染源有多强”的问题;地下水脆弱性评价刻画含水层抵抗污染的内在能力;污染危害性评价衡量污染物毒性及敏感受体暴露程度。三者叠加构成综合风险等级。工作流程遵循四步法:前期准备收集园区水文地质资料与污染源清单;现场调查补充采样测试;风险计算逐项评分并绘制分区图;成果应用提出分区管控建议与监测方案。整个流程强调迭代修正,通过监测数据验证调整,提高可靠性。

3.2 污染源危害性评价方法

污染源危害性评价以指数法为核心,从源强、释放机制和污染物毒性三个维度构建指标体系。源强维度包括污染物种类数量、浓度水平、存储总量;释放机制涵盖污染源类型、防渗设施状况、距含水层距离、包气带岩性;污染物毒性依据国际癌症研究机构分级。各指标评分后加权求和计算综合危害指数,权重通过层次分析法确定。评价结果划分极高、高、中、低四个危害等级,以风险地图呈现。评价需建立动态更新的污染源清单,高风险源优先纳入整治计划,限期完成防渗改造或搬迁^[3]。

3.3 地下水脆弱性评价方法

地下水脆弱性分为固有脆弱性和特殊脆弱性。固有脆弱性采用 DRASTIC 模型,选取地下水位埋深、净补给量、含水层介质、土壤介质、地形坡度、包气带介质、水力传导系数七个参数评分加权,指数越高脆弱性越强。应用时需进行参数本地化修正,删除与园区特征无关的指标、调整权重分配。特殊脆弱性针对特定污染物增加参数,如有机碳含量影响有机物迁移,阳离子交换容量影响重金属阻滞。脆弱性评价不依赖污染源信息,适合数据有限的园区初步筛查,局限性在于无法反映污染源差异,必须与污染源危害性评价叠加使用。

3.4 污染危害性评价方法

污染危害性评价关注污染后果严重程度,包括污染物毒性和受体敏感性两个维度。污染物毒性从致癌和非致癌两方面评估,迁移能力影响扩散范围和暴露概率。

受体敏感性重点评估饮用水源井、集中供水含水层、生态敏感区及居民区三类目标,距离越近、价值越高,危害性评分越高。具有供水潜力的含水层即使未开采也应赋予较高分值。评价结果以危害指数表示,与污染源危害性评价和脆弱性评价相互补充。对于已发生污染的场地,还应纳入实际污染羽范围和浓度分布数据,动态修正危害性等级。

3.5 综合风险等级划分与分区分管

综合风险等级由污染源危害性、地下水脆弱性、污染危害性三项结果耦合确定,采用矩阵法或指数叠加法。矩阵法将三项结果划分为高、中、低三档,通过三维矩阵确定等级;指数叠加法对三项指数加权求和。最终将风险划分为四级:高风险区需立即采取管控措施并启动修复工程;中高风险区应加密监测并限期完成防渗改造;中风险区按常规监测计划执行并定期巡查;低风险区保持常规管理。划界采用自然断点法或分位数法,绘制园区风险分区图,向社会公开^[4]。

4 工业园区地下水污染防控策略

4.1 防控的总体原则与框架

工业园区地下水污染防控遵循“预防为主、防治结合、分类管理、风险管控”的总体原则。预防为主强调防线前移,从源头阻断污染物进入地下水,是成本最低、效果最好的策略。防治结合要求在预防同时积极采取修复措施,防止污染羽扩大。分类管理依据风险评价结果对不同区域采取差异化管控强度,优化资源配置。风险管控承认完全修复至背景值在某些场地不可行或不经济,转而采取阻隔、制度控制等手段保障受体安全。基于上述原则,构建源头控制、过程阻隔、末端修复、长期监测四位一体防控框架:源头控制减少污染物排放量;过程阻隔切断迁移通道;末端修复处理已扩散污染羽;长期监测验证效果并提供预警。四个环节相互衔接、层层递进,形成闭环防控链条。园区管理部门应据此编制实施方案,明确责任主体、时间节点和考核指标。

4.2 源头控制策略

源头控制是地下水污染防治的第一道防线,核心在于减少污染物向地下环境释放。清洁生产与工艺改进是最根本手段,包括替代有毒有害原辅材料、优化反应条件、实施水循环利用等。分区防渗设计是关键措施,根据包气带防护能力和污染源危害程度,将园区划分为重点防渗区、一般防渗区和简单防渗区。重点防渗区包括储罐区、危废暂存库等,等效黏土防渗层不小于 6.0 米;

一般防渗区为生产车间等,不小于1.5米;简单防渗区做地面硬化即可。储罐区应推广双层罐或防渗池,配备泄漏检测报警装置。污水管网定期开展泄漏检测与修复。关停或搬迁污染源须规范拆除并开展场地调查。园区应建立巡查制度和台账记录,将防渗设施纳入日常维护范围,每年至少检测一次防渗层完整性^[5]。

4.3 过程阻隔措施

当源头控制未能完全阻止污染物释放时,过程阻隔措施用于切断迁移通道。垂直阻隔技术在污染源周边或下游建造地下屏障,常用方法包括水泥帷幕墙、钢板桩墙和土-膨润土墙。水泥帷幕墙适用于砂砾石含水层,钢板桩墙适合临时应急,土-膨润土墙具有良好柔性。墙体须嵌入隔水层以下至少0.5米。水平阻隔技术防止降水入渗淋洗,在污染区上方铺设黏土或防渗膜。水力控制技术通过抽水井群形成水力截获带,适用于高渗透性含水层。可渗透反应墙是主动式阻隔技术,在污染羽下游建造填充反应介质的墙体,污染物通过时发生吸附、沉淀或降解。处理重金属用零价铁,处理有机物用活性炭。过程阻隔措施不能替代源头控制,应与其他措施协同使用。

4.4 末端修复技术

末端修复针对已扩散的污染羽,目标是降低浓度、缩小范围、消除长期风险。原位修复技术不扰动地层,成本较低。抽出-处理技术通过抽水井抽出污染地下水处理,适合高浓度污染羽,但能耗高且可能出现拖尾效应。原位化学氧化通过注入过硫酸盐等氧化剂快速降解有机物,适合源区处理。原位生物修复通过注入碳源刺激降解菌活性,适合中低浓度污染,周期较长。监测自然衰减利用天然过程削减污染物,适合低风险场地。异位修复包括挖掘-处置和土壤气相抽提。挖掘-处置效果彻底但影响大,适合浅层热点区。土壤气相抽提通过负压抽取挥发性有机物,适用于汽油类污染。技术比选需综合考虑污染物类型、水文地质条件、修复目标、成本工期,建议采用组合技术达到快速启动与长期维持效果。

4.5 长期监测与预警体系

长期监测是验证防控效果、发现新污染趋势的最后

屏障。监测井网至少布设背景井、污染源监测井、污染羽内部井、边界控制井和下游敏感点井五类。井间距以有效捕捉污染羽边界为原则。监测指标包括常规水质参数和特征污染物。监测频率差异化:高风险区每月一次,中高风险区每季度一次,中风险区每半年一次,低风险区每年一次。在线监测技术实时获取参数,通过物联网传输至平台,实现快速响应。预警阈值参考标准限值或背景值加两倍标准差,突破阈值自动报警并启动应急程序。大数据预测运用时间序列分析和机器学习,识别浓度变化规律,预测未来污染扩散范围。园区应建立监测数据库,定期编制年度监测报告,向社会公开关键数据,接受第三方评估。

结束语

工业园区地下水污染防治是保障区域生态安全与饮水健康的重要任务。本文从污染特征与迁移机制出发,系统梳理了风险评价方法体系,构建了源头控制、过程阻隔、末端修复与长期监测四位一体的防控策略。基于“源-径-汇”全过程的风险评价能有效识别高风险区域,为分级管控提供科学依据。源头控制最为经济有效,应优先实施;过程阻隔与末端修复适用于已发生污染的情景;长期监测是验证成效和预警新风险的必要保障。未来应在推广高分辨率调查技术、发展绿色修复材料、建设智慧化平台等方面持续探索,推动管理从被动应对向主动预防转变。

参考文献

- [1] 华兴国,龙泉,张雨晴,等. 迭置指数法在工业园区地下水污染风险评价中的应用[J]. 四川环境,2024,43(3):19-28.
- [2] 王帅,肖卓斌,张公. 济源市虎岭工业园区地下水环境质量现状及防治措施探析[J]. 地下水,2022,44(5):59-61.
- [3] 张云,岳齐浩,冯发青. 遵义市某工业园区地下水污染现状及方式[J]. 地下水, 2024, 46(1):97-101.
- [4] 叶琼. 工业园区地下水污染防治与治理方法分析[J]. 皮革制作与环保科技, 2025,6(1):182-184.
- [5] 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.