

化工园区地下水污染监测与 污染修复技术对比分析

郭静丽

山东建树环境监测有限公司

摘要: 化工园区地下水污染已成为严重制约区域可持续发展的环境难题。本文以某典型化工园区为研究对象, 基于现场水文地质调查数据, 构建了区域水文地质概念模型, 深入分析了地下水污染物的迁移规律及其分布特性。

关键词: 化工园区; 地下水污染; 监测技术; 修复技术

化工园区因生产活动强度大、污染物种类复杂, 已成为地下水污染的高风险区域。地下水污染不仅威胁水资源安全, 还对生态系统和公众健康造成严重影响。本文构建水文地质概念模型, 结合监测数据和修复技术对比分析, 旨在为化工园区地下水污染治理提供理论依据与实践参考。

1 化工园区地下水污染概述

1.1 污染来源与成因

化工园区地下水污染主要源于多环节、多途径的复合型排放。在生产工艺中, 原料预处理、化学合成及废液浓缩等操作常产生含重金属和高毒性有机废水, 一旦储存或排放不当, 极易通过土壤空隙或地质裂隙向含水层迁移。园区危废储存区、储罐区以及输送管线存在的跑、冒、滴、漏等现象, 是造成持久性慢性渗漏的重要因素。突发事故(如罐体爆裂、管道破裂)则会导致大量高浓度污染物在短期内直接进入地下水体系。理论上, 污染物在下渗过程中将经历吸附/解吸、络合、离子交换及氧化还原等复杂物理化学反应过程, 其迁移速度和范围还受土层渗透系数、孔隙度

以及饱和-非饱和带水力特性的影响。若园区周边缺乏有效的防渗措施或地质屏障, 污染物会在含水层中进一步扩散并累积, 对区域水质及生态环境带来长期潜在威胁。

1.2 污染特征与危害

化工园区地下水污染具备多组分、高毒性与迁移途径复杂等典型特征。从物理化学角度看, 不同类型污染物在地下介质中表现出各异的扩散-对流-吸附行为; 而有机污染物则易通过溶解、挥发、残留在非水相液体中, 且在特定微生物环境下还会产生毒性更强的代谢中间产物。由于地下水流动缓慢且自净能力有限, 所以这些污染物易形成持续性、高风险污染带, 严重威胁居民饮水安全^[1]。多种污染物的复合存在会产生协同或拮抗效应, 增加风险评估和修复决策的复杂度。若长期得不到有效治理, 不仅会引发严重的公共健康问题(如潜在的致癌、致畸作用), 还会导致土壤环境功能丧失等一系列生态危害。

2 地下水污染监测技术

2.1 常规监测方法

常规监测主要依托观测井布设、现

场采样与实验室分析。通常在确立监测方案时, 会根据含水层结构、水力梯度以及潜在污染源分布, 合理设置监测井的深度与空间位置。采样后采用经典分析方法, 如化学滴定法、原子吸收光谱、气相色谱-质谱联用等, 对样品中重金属离子、挥发性有机物及常规理化指标等进行定量检测。为了保证数据的准确性, 需要对采样频率、样品保存条件及质控流程进行统一规范, 并结合空白样、平行样和加标回收试验等手段进行质量控制。该方法的优势在于技术路线成熟、检测精度高、定量结果可靠, 可为后续的污染分析与风险评价提供扎实的基准数据。但其不足之处在于采样与检测周期较长、难以及时反映地下水污染的动态变化; 面临多组分复合污染时, 实验室方法的灵敏度与前处理工艺也需针对性优化, 以确保检测结果的有效性与科学性。

2.2 新型监测技术

在线监测系统可在观测井中布设多参数传感器, 实时跟踪 pH 值、电导率、浊度等指标, 并通过物联网将数据上传至云平台, 实现对地下水水质的连续观测与智能预警。高分辨率现场监测

技术能在短时间内识别局部高浓度污染区；同位素示踪技术可从同位素分馏和迁移规律角度深度剖析污染源解析及其在含水层内的迁移转化机制。地球物理探测方法则可为地下水流动结构和污染羽状带范围提供辅助判别。与常规方法相比，这些新型技术在动态响应与空间分辨率上具有明显优势，但往往成本较高，对仪器性能及现场操作要求也更为严格，需结合实际需求及预算规划与常规监测相配合，方能构建集时效性、准确性与可操作性于一体的监测体系。

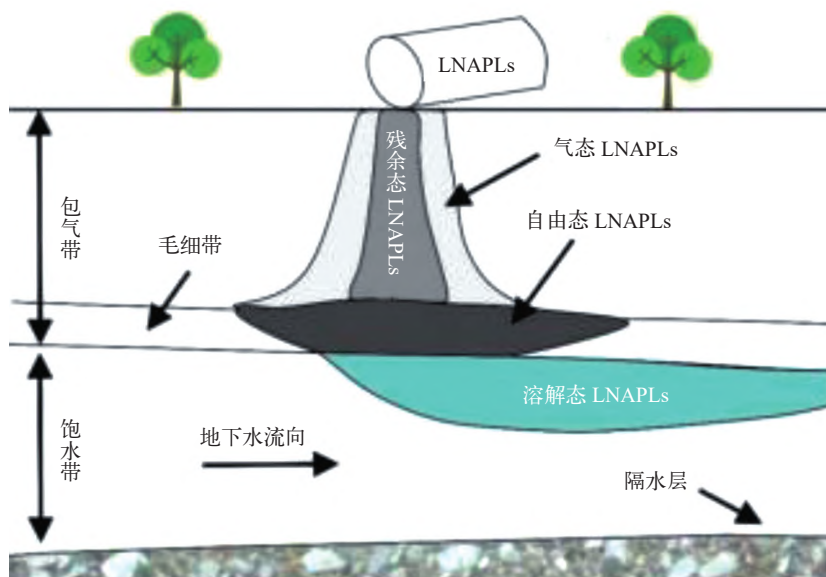


图1 LNAPL在地下水环境中的迁移转化过程

3 地下水污染修复技术

3.1 物理修复技术

化工园区地下水污染中，轻非水相液体是一类常见且危害显著的污染物。由于其密度低于水，LNAPL通常悬浮在地下水水面之上，或者在土壤毛细带及包气带中以自由相、溶解相或气相等多种形态存在。在受到降雨或地下水流动的影响时，LNAPL可进一步向更大范围扩散，并形成污染羽状带，增加后续修复的难度和成本^[2]。如图1所示，LNAPL会随水力梯度沿垂向和水平方向同时迁移，并在土壤孔隙介质中不断转化为不同相态。针对LNAPL的物理修复常采用抽提处理（Pump & Treat）或隔离技术等方式，力图从源头遏制并削减污染。抽提处理通常在地下水水面之上及以下同时布设抽水井或抽气井，将自由相或溶解相的LNAPL抽出后进行物理分离、吸附或气提处理。该方法对中高渗透系数场地成效显著，便于集中控制与再生利用，但在低渗透土层和多相态共存情况下，修复周期较长且能量消耗大。隔离技术则通过在受污染区域周边设置垂直防渗墙或潜壁，阻断污染物向下游扩散；也可结合地下水动力条件，在一定区域内构建水力屏障，控制地下水流向。在实际工程中，往往将抽提处理与隔离措施相配合，并辅以实时监测数据校正模型预测，以动态优化修

复范围和运行模式，从而兼顾经济效益与生态安全。通过上述物理修复手段，可在较短时间内降低场地内自由相LNAPL的浓度与扩散速度，为后续化学修复或生物修复奠定基础。

3.2 化学修复技术

化学修复主要依靠氧化、还原、沉淀或络合等反应，将污染物转化为毒性更低或更易去除的形态。常见的化学氧化剂包括高锰酸钾、过硫酸盐和臭氧等，可在地下水中降解卤代烃、多环芳烃等难降解有机物。化学还原法常借助零价铁或纳米铁等还原剂，将重金属离子沉淀或使有机氯化物脱氯生成低毒副产物。通过注入碳酸钠、磷酸盐等络合/沉淀剂，可稳定化含砷、铅等有毒重金属，避免其在含水层内进一步扩散。这类修复技术反应效率高、见效快，但需充分考虑地下水水质、pH值、氧化还原环境等因素，并防范化学药剂过量投加或副产物积累导致的二次污染。

3.3 生物修复技术

生物修复依赖微生物、植物或酶促过程对污染物进行降解、转化或固定，被视为相对温和且可持续的治理手段。原位生物修复通常通过调控营养盐和电子受体（如硝酸盐、硫酸盐）浓度，提升地下水中微生物活性，从而促进有机污染物的降解。针对重金属污染，可利

用微生物代谢产物进行络合或沉淀，将金属离子固化在矿物或生物膜中。植物修复则借助植物根系吸收、转运或降解部分有毒物质，常与微生物修复手段耦合使用，实现更高的净化效率。生物修复过程较为缓慢，且对环境条件（温度、pH值、含氧量等）依赖度高，需要前期充分的现场试验和生物群落优化，以确保修复效果稳定，并避免外源微生物的生态风险。

3.4 地下水污染的监测与模型构建

3.4.1 水文地质概念模型

为准确描述研究区域内地下水的流动规律及污染物迁移路径，构建了区域水文地质概念模型。研究区被概化为均质且各向同性的潜水含水层，地下水运动特性为三维非稳态流，流向以东北-南西为主。图2展示了研究区地下水的流动方向、边界条件及研究范围，描述了地下水系统的空间分布特征^[3]，其关键参数初始值如表1所示。数据包括渗透率、孔隙度及水相与油相的分散度参数，为模型的数值模拟提供了输入依据。

3.4.2 地下水监测井布设与污染分布

结合水文地质模型，为研究区的地下水污染源监测与动态迁移特性，布设了3口监测井（W1、W2、W3），分别位于研究区的北部、中部及南部区域，以捕捉污染物在地下水中的时空分布变

化。污染源的潜在分布范围根据现场调查和初步分析确定，如图 3 所示。该图展示了潜在污染源分布范围(黄色区域)及监测井的具体布置位置(蓝点)，为监测数据采集与模型校准提供了支持。监测井的布设原则为尽可能覆盖污染源区域及其下游迁移方向，确保数据能够反映污染物的实际迁移特性。监测数据将用于验证模型的合理性，并对污染物的迁移行为进行动态模拟，进一步指导修复方案的设计与实施。

4 监测与修复技术对比分析

4.1 技术适用性与成本分析

地下水污染监测与修复技术的选择应综合考虑目标污染物类型、场地水文地质条件以及整体经济成本。常规监测多采用观测井采样与实验室分析，技术门槛相对较低，初始投资和运营费用可控，但难以及时捕捉动态变化；新型监测技术（如在线监测、同位素示踪）在灵敏度与时效性方面具有优势，然而对仪器维护、现场环境适应性以及技术人员要求更高，往往带来较高的投入。修复方面，物理修复适用面广且工艺相对成熟，但通常需要长时间运行与能量投入，成本随污染规模和运行年限增大

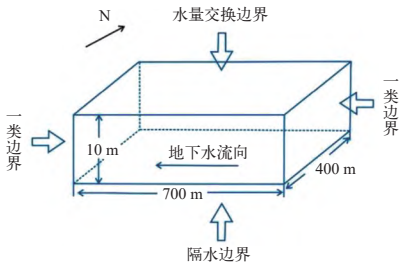


图 2 研究区水文地质概念模型示意图

表 1 水文地质概念模型的主要参数初值

变量	取值
渗透率	4 000 md
孔隙度	0.4
纵向水相弥散度	50 m
横向弥散度	12.0 m
纵向油相弥散度	2.0 m
横向油相弥散度	0.8 m

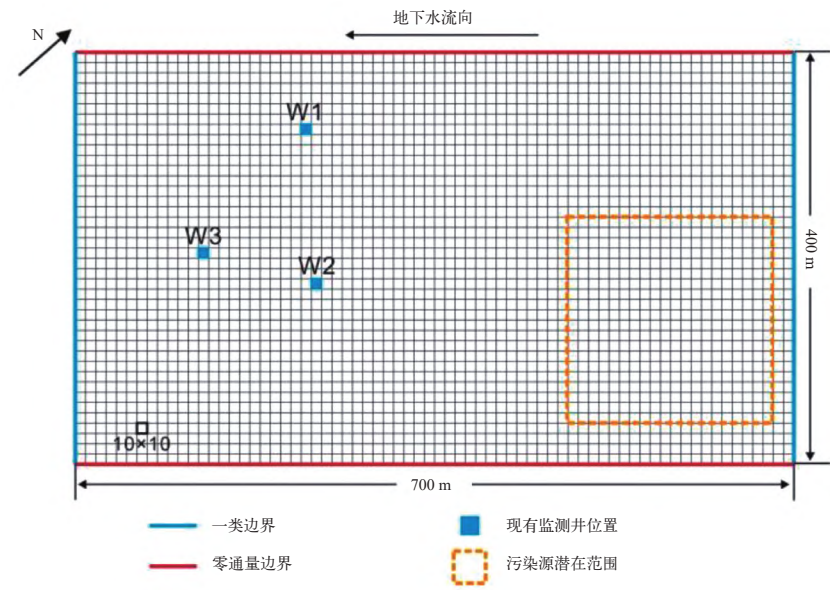


图 3 现有监测井位置及地下水污染潜在范围

而上升；化学修复见效快，适合高浓度、毒性较强的污染，但药剂成本和副产物监控费用较高。生物修复虽整体费用相对低廉且生态友好，却对场地环境条件（pH 值、氧化还原电位等）依赖度高，并可能需要额外的营养物质。在实际场景中，应结合污染特征、修复目标与预算约束进行综合评估，必要时采用多种技术耦合的“多阶段、多梯度”修复模式，以实现经济性与有效性的平衡。

4.2 环境影响与案例比较

在环境影响层面，各类监测技术对场地原有生态系统的干扰程度不同。常规采样和离线分析往往需布设观测井，对土层及地下水流场会产生一定扰动；而地球物理探测与在线监测技术则相对“非侵入式”，更适用于对脆弱生态区的动态监测。就修复技术而言，物理修复在抽提与处理期间可能改变地下水的流场与水力梯度，若处置不当，还会在地表产生浓缩污染物二次污染风险。化学修复过程中，氧化剂或还原剂的注入可能对原生微生物群落造成冲击，需在投加浓度与修复速率之间寻找平衡。生物修复对环境友好度相对较高，但可能出

现外源菌种入侵、微生物代谢过程中副产物累积等问题。国内某工业园区尝试“化学氧化 + 微生物修复”联用，有效

5 结语

本研究揭示了化工园区地下水污染物的迁移特性，分析了物理、化学和生物修复技术的适用性与实施效果。结果表明单一技术难以全面解决多相污染问题，多技术协同修复能显著提升治理效率和安全性。应结合实时监测技术与数值模拟，优化监测与修复联动机制，同时加强政策支持与多方协作，实现地下水污染的高效治理。

参考文献：

[1] 闫小刚, 刘海宁, 余泽洋. 生活垃圾填埋场地下水污染监测分析 [J]. 中国资源综合利用, 2024, 42 (12): 188-190.

[2] 汪思颖, 韩绮, 张立秋, 等. 中国地下水污染防治技术研究进展与展望 [J]. 环境污染与防治, 2024, 46 (12): 1834-1840.

[3] Ahlam Rais. 洞察埃及 Bahr El Baqar 污水处理项目 [J]. 流程工业, 2023 (11): 24-25.