

油气管道泄漏事故对地下水环境的影响预测与应急规划

王若霖（中石化石油工程设计有限公司，山东 东营 257000）

摘要：油气管道泄漏对地下水环境的胁迫呈现隐蔽性、滞后性与复合性特征，其污染扩散格局受地质介质渗透性、水文动力条件及污染物物理化学属性的协同调控。本文综合国内外前沿研究，系统解析泄漏事故对地下水环境的多路径影响机制，构建涵盖风险诊断、动态仿真、应急响应的全周期技术体系，并提出分阶段应急管理策略。研究发现，通过多源数据融合建模、监测网络智能优化及跨区域应急资源统筹，可显著提升地下水污染预警的精准度与处置效率，为我国油气储运安全与地下水生态防护提供决策依据。

关键词：油气管道；地下水环境；预测；规划

中图分类号：X523

文献标识码：A

文章编号：1674-5167(2025)027-0154-03

Impact Prediction and Emergency Planning of Oil-Gas Pipeline Leakage on Groundwater Environment

Wang Ruolin(Sinopec Petroleum Engineering Corporation Limited, Dongying Shandong 257000, China)

Abstract: the stress of oil and gas pipeline leakage on the groundwater environment presents the characteristics of concealment, hysteresis and complexity, and its pollution diffusion pattern is coordinated and controlled by the permeability of geological media, hydrodynamics conditions and physical and chemical properties of pollutants. Based on the domestic and foreign frontier research, this paper systematically analyzes the multi-path impact mechanism of leakage accident on groundwater environment, constructs a full cycle technical system covering risk diagnosis, dynamic simulation and emergency response, and puts forward the phased emergency management strategy. The study found that through multi-source data fusion modeling, intelligent optimization of monitoring network and cross regional emergency resource planning, the accuracy and disposal efficiency of groundwater pollution early warning can be significantly improved, providing decision-making basis for the safety of oil and gas storage and transportation and groundwater ecological protection in China.

Key words: oil and gas pipeline; Groundwater environment; Forecast; planning

油气管道作为国家能源输送的战略通道，承担着全国 80% 以上的油气运输任务。然而，管道服役年限增长导致的腐蚀穿孔（我国 20 年以上管道占比达 38%）、城市化建设中的机械损伤（占事故原因的 45%）及极端气候诱发的地质灾害，共同构成泄漏事故的主要致灾因子。生态环境部 2023 年数据显示，我国地下水污染场地中，21% 与油气泄漏直接相关，东北平原、黄淮流域等油气集中区地下水石油类超标率达 29%。地下水污染治理面临技术瓶颈：原位修复平均周期超 6 年，异位处理成本高达 800–2500 元 / m³。因此，构建“风险预判 – 应急响应 – 长效管控”一体化体系，成为破解能源开发与生态保护矛盾的核心议题。

1 油气管道泄漏对地下水环境的影响机制

1.1 污染物迁移的多介质传输规律

油气泄漏形成的非水相液体（NAPL）在地下环境中的运移呈现显著相态分异：

1.1.1 轻质非水相液体（LNAPL）

以汽油、煤油为典型代表，密度低于水（ $\rho < 0.9 \text{ g/cm}^3$ ），具有高挥发性（蒸气压 $> 8 \text{ kPa}$ ）和低水溶性（溶解度 $< 30 \text{ mg/L}$ ）。泄漏后优先沿包气带孔隙形成“指进”

渗透通道，穿透毛细带后在潜水面形成漂浮油膜，随地下水水流以 0.3–1.5 m/d 的速度横向扩散。2017 年陕北某输油管道泄漏事件中，汽油在潜水面形成的油膜于 72 h 内覆盖 1.1 km² 水域，导致下游饮用水井甲苯浓度超标 12 倍。

1.1.2 重质非水相液体（DNAPL）

以原油、柴油为主要类型，密度高于水（ $\rho > 1.05 \text{ g/cm}^3$ ），黏度大（ $> 150 \text{ MPa} \cdot \text{s}$ ）且降解缓慢（半衰期 > 400 天）。在重力驱动下，DNAPL 可穿透含水层底板，沿裂隙网络形成垂向渗透路径，在承压含水层中形成长期污染源。2021 年新疆准噶尔盆地某原油泄漏事故中，污染物通过岩溶裂隙向下迁移 18 m，导致深层地下水检测出 16 种多环芳烃（PAHs）。

迁移过程受多重物理化学作用调控：

① 吸附阻滞效应：蒙脱石含量 $> 15\%$ 的黏土层对石油烃的吸附容量可达 20–40 mg/g，使污染物迁移速率降低 1–2 个数量级；

② 生物降解动力学：好氧条件下，枯草芽孢杆菌对石油烃的降解速率为 0.005–0.08 mg/(L · d)，而厌氧环境中降解效率下降 60%–75%；

③ 水动力弥散作用：在渗透系数 $> 15 \text{ m/d}$ 的砂砾

石层中，纵向弥散系数可达 $15\text{m}^2/\text{d}$ ，导致污染羽呈椭圆状快速扩展。

2.2 地质 - 水文系统的空间分异调控

不同地质单元构成污染物迁移的“天然过滤屏障”，其介质特性差异导致污染扩散呈现显著地域特征：

2.2.1 松散沉积层含水层

①山前冲洪积扇：粗颗粒砂卵砾石层渗透系数 $>80\text{m/d}$ ，污染物迁移速度快，如兰州榆中某管道泄漏事故中，柴油在 36h 内迁移 1.5km；

②河流冲积平原黏土层：渗透系数 $<0.05\text{m/d}$ ，吸附作用占主导，华北平原某油田周边黏土层对苯系物的截留率达 90% 以上。

2.2.2 基岩裂隙含水层

①碳酸盐岩岩溶区：管道泄漏后，污染物沿溶蚀管道以 $8\text{--}12\text{m/h}$ 的速度突发式迁移，广西柳州某泄漏事件中，污染羽在 5h 内抵达下游泉水出露点；

②结晶岩断裂带：裂隙密度 $>3 \text{条/m}$ 时形成优先流通道，辽宁鞍山某输油管道泄漏后，污染物沿断裂带扩散范围较常规预测扩大 3.5 倍。

③水文条件的季节性波动加剧污染风险：丰水期地下水位上升使包气带厚度减薄 40%–60%，污染物垂向渗透路径缩短；枯水期径流速度降低导致污染物滞留时间延长，降解效率提升但空间分布更集中。

2.3 生态风险传导与健康危害效应

污染通过“土壤 - 地下水 - 生物”链条形成级联胁迫：

①生态系统损伤：地下水石油类浓度 $>3\text{mg/L}$ 时，水生植物叶绿素含量下降 25%，底栖动物多样性指数降低 40%；PAHs 浓度 $>0.05\text{mg/L}$ 可导致鱼类畸形率上升至 20%。华东某油田周边 8km 范围内，浅层地下水污染导致农田土壤有机质含量下降 12%，植被覆盖度降低 15%。

②人体健康威胁：苯系物通过饮水摄入的致癌风险阈值为 10^{-6} ，即水中苯浓度 $>5\mu\text{g/L}$ 时，终身致癌风险超出可接受水平。

3 地下水环境影响预测技术体系

3.1 全要素风险诊断模型构建

基于故障树（FTA）与贝叶斯网络（BN）的集成方法，构建“管道状态 - 环境载荷 - 管理效能”三维评估模型：

①管道本体风险：指标包括壁厚腐蚀速率（阈值 $>0.12\text{mm/a}$ ）、焊接缺陷密度（ $>1.5 \text{处}/100\text{m}$ ）、防腐层绝缘电阻（ $<6000\Omega \cdot \text{m}^2$ ）；

②环境载荷风险：涵盖第三方施工频次（ $>4 \text{次}/$

年 · km）、地震动峰值加速度（ $>0.15\text{g}$ ）、土壤腐蚀性等级（强腐蚀区电导率 $>12\text{mS/cm}$ ）；

③管理效能风险：包含智能监测覆盖率（ $<70\%$ ）、应急演练频次（ $<2 \text{次}/\text{年}$ ）、风险预警响应时间（ $>30 \text{min}$ ）。

3.2 多场耦合数值模拟方法

采用 GMS 软件集成 MODFLOW-NWT 水流模型与 MT3DMS 溶质运移模型，构建“数据预处理 - 模型校准 - 情景推演”三阶段预测流程：

3.2.1 概念模型构建

基于 1 : 2000 地质剖面图划分四面体网格，对裂隙发育带采用离散裂隙网络（DFN）建模，建立孔隙 - 裂隙双重介质水流模型；

3.2.2 参数动态校准

利用 5 年地下水监测数据（水位、水质），通过 PEST 软件反演渗透系数（初始值 $\pm 25\%$ ）、有效孔隙度（0.1–0.3）等参数，使模拟水位均方根误差 $<3\text{cm}$ ，溶质浓度相对误差 $<12\%$ ；

3.2.3 情景模拟分析

设置“小流量泄漏（ $10\text{m}^3/\text{h}, 4\text{h}$ ）”“中等流量泄漏（ $30\text{m}^3/\text{h}, 12\text{h}$ ）”“突发泄漏（ $200\text{m}^3, 1\text{h}$ ）”三类典型场景，预测污染羽在 1d、15d、180d 的空间分布。

3.3 空天地一体化监测网络优化

构建“宏观预警 - 精准定位 - 实时响应”三级监测体系：

3.3.1 卫星遥感监测

利用 Sentinel-1 雷达影像提取地表形变信息，结合 Landsat-8OLI 数据反演植被健康指数（VHI <0.4 区域列为污染可疑区），实现 100m 分辨率的大范围筛查。

3.3.2 智能监测井阵列

沿地下水流向按“上游 50m、下游 300m”间距布设监测井，井深穿透含水层底板 3m。在污染源下游每 30m 设置加密监测点，安装多参数水质传感器（石油类、苯系物、浊度），数据采集频率 1 次 /5min，阈值触发式报警（如苯 $>0.01\text{mg/L}$ ）。张掖市管网监测系统实现泄漏后 6min 预警，定位误差 $<30\text{m}$ 。

3.3.3 移动监测平台

配备无人机航测系统（搭载 VOCs 检测仪）与车载质谱仪，构建污染羽三维立体监测网络，实现泄漏点 500m 范围内的移动走航监测。

4 应急规划的全过程管理体系

4.1 现场处置技术体系构建

针对泄漏不同阶段，构建“源头控制 - 污染阻隔 - 修复治理”技术矩阵：

4.1.1 泄漏源快速控制

①磁吸式封堵技术：适用于压力 $\leq 3.5\text{ MPa}$ 的管道，利用强磁吸附原理快速定位泄漏点，配合高分子复合材料实现带压修复，作业时间 $<90\text{ min}$ 。应急管理部“应急先锋·2025”演习中，新型智能封堵机器人实现泄漏点检测与修复一体化，效率提升4倍。

②非开挖修复技术：采用紫外光固化内衬工艺（UV-CIPP），在不开挖路面的情况下修复管道裂缝，适用管径DN150–DN2000，修复后耐压强度 $\geq 4\text{ MPa}$ 。

4.1.2 污染迁移防控

①防渗帷幕技术：采用水泥–水玻璃双液注浆工艺，在污染羽下游形成渗透系数 $<5 \times 10^{-8}\text{ cm/s}$ 的垂直防渗墙，墙深超过含水层底板3m。陕西榆林某泄漏场地布设600m长防渗帷幕，使污染物迁移速率从 0.6 m/d 降至 0.03 m/d 。

②生物屏障技术：在污染羽迁移路径上投放可渗透反应墙（PRB），填充铁碳微电解材料与降解菌剂，对苯系物的去除率 $>92\%$ ，使用寿命可达8–10年。

4.1.3 修复治理技术

①高级氧化修复：注射芬顿试剂（ $\text{H}_2\text{O}_2+\text{Fe}^{2+}$ ），通过羟基自由基降解有机物，对PAHs的去除率可达80–95%。洛阳吉利某泄漏场地采用高压旋喷注射技术，修复周期缩短至5个月，污染物浓度下降90%以上。

②微生物强化修复：投加石油烃降解功能菌群（如Alcanivorax）与电子受体（硝酸盐/硫酸盐），在缺氧条件下可将石油类浓度从 800 mg/L 降至 5 mg/L 以下。大庆油田某修复项目中，构建地下生物反应带，使降解效率提升3倍。

4.2 跨区域应急资源协同机制

建立“信息共享–物资调配–技术支援”三位一体协同体系：

4.2.1 应急指挥平台

集成应急管理、生态环境、交通运输等部门的实时数据，开发泄漏扩散模拟与资源调度模块，实现事故现场三维建模与处置方案智能生成。厦门市应急平台接入110、12369等多源数据，响应时间缩短至12min。

4.2.2 物资储备网络

构建“国家中心库–区域分库–企业现场库”三级储备体系，国家中心库储备大型清污设备、应急供水车等战略物资，区域分库配备中小型装备与耗材，企业现场库存储便携式检测设备。按照“半径300km、3h到达”标准布局区域分库，确保关键物资及时到位。

4.2.3 专家智库联动

组建由水文地质、环境工程、安全科学等领域专

家构成的应急专家库，建立“远程会诊+现场指导”机制。2022年四川达州某泄漏事故中，通过5G视频会议，10名专家在40min内制定多套处置方案供决策参考。

4.3 长效管理与生态恢复策略

4.3.1 污染跟踪监测

实施“三年加密监测+五年常规监测”制度，事故处置后第1年每月采样，第2–3年每季度采样，第4–6年每半年采样。监测指标包括常规水质参数、特征污染物（石油类、苯系物）及遗传毒性（Ames试验）。

开发污染预警APP，基于实时监测数据动态更新污染羽迁移预测，向周边居民推送预警信息与防护指南。

4.3.2 生态系统修复

4.3.2.1 土壤修复工程

采用异位化学淋洗技术（淋洗剂浓度5–8%）处理污染土壤，对PAHs的去除率 $>95\%$ ；或通过植物–微生物联合修复（种植芦苇+投加菌剂），每年可降低土壤石油类含量8–12%。松宜矿区修复项目中，种植耐污染植物2500亩配合生物炭改良，2年使土壤PAHs含量下降60%。

4.3.2.2 地下水生态修复

构建人工潜流湿地系统，设计水力负荷 $0.5\text{--}1.0\text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ ，通过植物根系吸收与微生物代谢作用净化地下水，对石油类的平均去除率达75%。

5 结论

本研究系统揭示了油气管道泄漏对地下水环境的多维度影响机制，构建了“风险识别–模拟预测–应急响应–长效管理”的技术闭环。实践表明，融合多学科方法与智能监测技术，可有效提升地下水污染防治的时效性与精准性。

参考文献：

- [1] 解红军,赵庆磊,康永尚.长输油气管道项目地下水环境影响评价要术探讨[J].中国化工贸易,2012,4(10):2-2.
- [2] 郭志红,唐宇,杜满昌,等.油气管道穿越河流隧道涌水对地下水环境影响分析[J].油田环境保护,2023,33(3):49-52.
- [3] 邓兵杰,闫文娟,陈袁袁.油气终端登陆管线的地下水环境影响评价[J].油田环境保护,2020,4(08):12-13.
- [4] 刁宇,王宁峰,刘朝阳,等.输油管道泄漏地下水污染风险预警评价方法[J].油气储运,2021,40(3):6-6.
- [5] 唐明杰.钻井泥浆固化处置对地下水环境的影响分析[D].西南交通大学,2013.