

石化企业地下设施渗漏污染排查与 源头管控研究进展

曹兴涛*, 曹保久, 王教凯, 谷广锋, 王国柱, 任艳艳
(中国海洋石油集团有限公司节能减排监测中心, 天津 300457)

摘要:土壤污染源头防控可有效降低土壤与地下水污染风险,通过分析石化企业地下设施渗漏污染源的特征,结合土壤地下水特征污染因子检出情况,讨论基于土壤-地下水-土壤气多要素污染监测分析、示踪剂渗漏检测、管道机器人检测、基于储罐计量的综合分析4种地下渗漏污染排查方法的主要原理与应用案例,从池体防渗改造、地下管道渗漏修复、阴极保护建设3个方面提出地下设施渗漏管控技术,为石化企业土壤与地下水污染源头管控提供借鉴。

关键词:土壤与地下水;地下设施;渗漏污染排查;源头管控

中图分类号:X53

文献标志码:A

文章编号:0253-4320(2026)06-0081-05

DOI:10.16606/j.cnki.issn0253-4320.2026.06.015

Research progress on leakage detection and source control of underground facilities in petrochemical enterprises

CAO Xing-tao*, CAO Bao-jiu, WANG Jiao-kai, GU Guang-feng, WANG Guo-zhu, REN Yan-yan
(CNOOC Energy Conservation & Emission Reduction Monitoring Center, Tianjin 300457, China)

Abstract: Source prevention and control of soil pollution can effectively reduce the risks of soil and groundwater pollution. By analyzing the characteristics of leakage sources from underground facilities in petrochemical enterprises and combining the detection results of characteristic soil and groundwater pollutants, this paper discusses the main principles and application cases of 4 underground leakage pollution investigation methods, including multi-element pollution monitoring and analysis of soil-groundwater-soil gas, tracer leakage detection, pipeline robot detection, and comprehensive analysis based on tank metering. Furthermore, it proposes underground facility leakage control technologies from 3 aspects: anti-seepage transformation of sewage pools, leakage repair of underground pipelines, and construction of cathodic protection, providing references for the source prevention and control of soil and groundwater pollution in petrochemical enterprises.

Key words: soil and groundwater; underground facilities; leakage detection; source control

石化企业生产工艺种类多、储罐与管道分布范围广,地下设施一旦发生泄漏,将造成土壤地下水污染。经验表明,通过源头预防土壤污染的成本仅为污染治理修复成本的1%,对于土壤地下水污染防控,我国已初步建立“预防为主、保护优先、风险管控”的思路^[1-2]。根据《环境监管重点单位名录管理办法》的要求,规模以上的石油加工、化工企业属于土壤污染重点监管单位。石化企业作为重点监管对象,需通过防渗工程防止地下池体、管道等设施泄漏导致的土壤和地下水污染,避免污染物迁移扩散形成地下水污染羽,降低后续治理修复成本。

“十四五”期间,我国启动实施了124项土壤污染源头管控项目,其中75个为在产企业源头管控项

目,主要措施有:地面防渗改造、储罐改造、地下池体与管道渗漏排查、地下管道防腐改造、污水管道可视化改造等,目前我国已有的防渗漏标准体系有《石油化工工程防渗技术规范》(GB/T 50934—B/T 21448—2013)、《双层罐渗漏检测系统》(GB/T 30040.1—2013)、《埋地钢质钢制管线阴极保护技术规范》(G2013)、《埋地钢质钢制管线阴极保护技术规范》(G2018)、《地下水污染源防渗技术指南(试行)》(环办土壤函[2020]72号)等^[3-5]。地下设施渗漏排查与管控是落实《土壤污染防治法》和《土壤污染源头防控行动计划》的重要举措,重点监管单位主要通过定期开展土壤地下水自行监测、隐患排查地下设施的渗漏,由于监测点位数量有限、监

收稿日期:2025-08-19;修回日期:2026-04-07

基金项目:海油发展安全环保公司项目(SSKJ-YY-JCZX-2025-23)

作者简介:曹兴涛(1985-),男,博士,高级工程师,研究方向为石油污染调查、污染修复,通讯联系人,cao-xingtiao@163.com。

测频次不足、监测技术单一,有的企业甚至刻意要求布点远离污染高风险区域,导致现有的数据难以全面反映地下设施渗漏状况^[5-6]。为更好地发现地下渗漏,目前正探索基于土壤-地下水-土壤气监测的泄漏检测、地下管道可视化泄漏检测等^[7-9]。

本文中针对石化企业地下设施渗漏污染,结合渗漏源分布以及污染因子检出的特征,探索地下设施渗漏排查技术,分析适用于石化企业实际情况的渗漏污染管控方法,以期为石化企业土壤污染源头防控提供支持。

1 石化企业渗漏污染源特征分析

1.1 渗漏源特征

在产石化企业的主要渗漏源包括储运系统、生产装置、公用工程设施等,如表 1 所示。储运系统方面,储油罐、输油管线、装车台因跑冒滴漏或地下储油罐泄漏、输油管道腐蚀破损是重要污染源,此外浮顶罐密封失效会导致挥发性有机物无组织排放,通过大气沉降造成污染^[10-11]。生产装置方面,装置的管线法兰、阀门连接处发生跑冒滴漏,以及反应器残液排放操作不当,均可造成土壤污染^[11-14]。公用工程方面,污水池等混凝土结构因沉降、年久失修、腐蚀导致含油污水泄漏,废催化剂、含油污泥、热电厂燃煤灰渣固体废物暂存点的渗漏风险高,尤其是

混凝土结构腐蚀后会导致石油烃等污染物渗入深层土壤^[11,4-16]。

表 1 渗漏源分类与特征

渗漏源分类	特征
储运系统	污染物浓度相对较高,石油烃等泄漏时,在地下水上层可形成轻质非水相液体
生产装置	装置管线、阀门等,因腐蚀、老化导致,腐蚀或反应器操作不当,污染集中于浅层土壤及地下水水位波动带
公用工程	被雨水淋溶的铅、石油烃及卤代烃等污染物通过包气带垂直迁移向下迁移

1.2 土壤与地下水污染因子检出分析

通过对 20 余家石化企业生产工艺、原辅料、现场污染调查数据的研究,筛选出了土壤特征污染因子 26 项,其中包含挥发性有机物 11 项、半挥发性有机物 8 项、重金属 5 项、石油烃 2 项,以及 21 项地下水特征污染因子,在《土壤环境质量 建设用地土壤污染风险管控标准》(GB 36600—2018)的基础上,进一步完善了石化地块的特征污染因子^[12]。结合现场条件、渗漏源特征、污染物迁移规律等,部分石化地块特征污染因子检出情况如表 2 所示^[10-11,17]。

表 2 部分石化地块特征污染因子检出情况

污染因子类别	介质	污染因子	最高检出浓度	超标倍数	高浓度区域
石油烃	土壤	石油烃(C ₆ ~C ₉)	5302 mg/kg	—	地下水位附近
	土壤	石油烃(C ₁₀ ~C ₄₀)	8541 mg/kg	0.9	调节池、隔油池附近
	地下水	石油烃(C ₁₀ ~C ₄₀)	407.5 mg/L	1358	上层滞水
挥发性有机物	土壤	苯	31.6 mg/kg	7	油库下游、储罐区
	土壤	乙苯	76 mg/kg	1.7	油库下游
	土壤	1,2,3-三氯丙烷	6.55 mg/kg	12	调节池、隔油池附近
半挥发性有机物	地下水	苯并[a]芘	4.324 μg/L	431	上层滞水
重金属	地下水	铅	0.285 mg/L	27	老厂区及灰库附近

2 石化企业地下渗漏排查技术

2.1 土壤-地下水-土壤气监测

石化企业管道、储罐等设施分布广,仅依靠土壤或地下水样品的总石油烃指标,难以直接找到渗漏源。由于在工艺流程中物料成分不同,当土壤地下水自行监测发现石油烃浓度升高时,可与厂内的原料指纹图谱进行比较,有助于更好地锁定地下设施

的渗漏^[18-19]。2021 年我国西部一石化企业连续催化重整装置周边地下水监测井发现石油烃,有重整原料油、脱戊烷油、汽油、地下污油罐油、柴油 5 种潜在渗漏源,通过指纹图谱与特征比的分析,地下水中的石油烃与重整原料、脱戊烷油匹配度较高,结合现场排查最终证实了渗漏源^[19]。

由于污染物分布的非均质性,实践中有时土壤存在异味,而检测结果不超标;有时地下水中的污染

物浓度较低,未超过对比的标准,将会延误发现渗漏的情况^[20]。通过建立地下水污染在线监测,并结合地下水污染迁移路径模拟监测预警系统,有助于及时掌握地下水环境现状。我国东部沿海一石化企业试点了基于水文地质数值模型的地下水污染在线监测预警系统,该系统包括7口厂界地下水监测井、7口应急抽水防控井、1口对照井,可对总石油烃、化学需氧量等8项参数进行在线监测,提升了渗漏的发现与管控能力^[21]。

土壤气在地下空间内具有一定的流动性,比土壤样品更能真实地反映某一区域土壤与地下水中的挥发性有机物分布情况。同时通过土壤气组分分析,识别有机气体的组成,结合厂区生产工艺物料的组分,从而用于辅助识别泄漏来源^[7-8]。对华北某石化地块采用土壤气调查,在石脑油源(区域1)和裂解油源(区域2)的2个区域,布设了32口土壤气监测井,研究了105种挥发性有机物组分浓度分布,揭示了有机污染物在土壤中的垂向变化特征(表3^[7-8]),结合诊断标志物烷基环戊烷的比值,进行污染溯源分析^[7-8]。由于在好氧环境下,有机气体可被微生物转化为CO₂,在厌氧环境下,有机气体可转化为CH₄,因此在应用土壤气监测布点时,应考虑有机气体在地层中的生物降解等自然衰减过程,确保监测井的分布、监测井的深度位于有机气体捕捉范围内^[9]。

表3 土壤气组成垂向变化特征

	区域1	区域2
污染源	石脑油源,主要为轻质烷烃	裂解油源,主要为芳香烃
深层土壤气特征	C ₄ ~C ₆ 脂肪烃主导 (>99%)	芳烃占50%(苯、甲苯为主)
浅层土壤气衰减特征	链烷烃衰减>异构烷烃、环烷烃	芳烃显著衰减(6.44%), C ₅ ~C ₆ 脂肪烃相对富集
衰减主要因素	好氧生物降解选择性(链烷烃>支链、环状)	芳烃高水溶性、生物降解性

2.2 示踪剂渗漏检测

示踪剂法是通过在管道、储罐或池体加入与其液体性质相似、能够互溶、不与管道和储罐内液体发生化学反应、无毒害、不易被土壤吸附、易检出的示踪剂,在预设采样点采集气体或地下水样品,根据示踪剂的检出情况查找渗漏源,该方法适用于生产阶段的渗漏排查,无需停产或大规模开挖。

某炼厂为检测污水处理厂生化池的沉降导致的渗漏,将1500 kg示踪剂NaCl加入生化池中,根据生化池周边6口地下水监测井中Cl⁻浓度在示踪实验前后的变化情况,找到存在渗漏风险的区域,最终完成渗漏修复^[22]。美国一石化企业在地下水监测井中发现了轻质石脑油,采用示踪剂法对一座直径21 m的储罐及其1 km配套埋地管道进行渗漏检测,通过对土壤气体检测,24 h内找到了管道的渗漏点,1 d后发现罐底存在渗漏^[23]。

2.3 管道机器人检测

管道机器人检测是地下的污水管道渗漏排查的有效方法之一,管道机器人由管道内检测设备、控制器、收放线部分等组成,检测时首先确认管道水位,当管道水位较高时,则安装封堵气囊对管道上下游封堵,抽取管道内的污水,再通过高压冲洗清除管道内的污泥,经受限空间气体检测合格后放入管道机器人,通过检测视频直观地发现管道内部腐蚀、错位、破损、裂缝、堵塞等情况,并确定存在问题的位置。

为进一步提升管道机器人的检测效率,研究将其与人工智能技术结合应用,降低人工审查时间,如基于YOLO的智能化缺陷检测跟踪与管理系统,通过融合检测特征与重识别外观特征,对管道内部图像进行分析,解决了镜头旋转、抖动和模糊等复杂工况下的匹配问题,此系统对坑洞、错位和堵塞、类缺陷的识别置信度分别达到87%、78%和80%以上^[24]。

2.4 储罐计量分析

通过连续监测储罐内液位、温度和油品体积变化,实时计算油品体积修正系数,剔除温度膨胀或收缩的影响,从而识别微小的体积异常。国内研究采用液位仪浮子与渗漏模型算法结合,在627次动态实验中对0.38、0.6 L/h泄漏,分别实现96.4%、91.5%的检测成功率;现场进行0.35、0.70 L/h渗漏模拟,测试结果均显示发生渗漏^[25]。

为提升在线检测渗漏发现速度,研究基于在线变化点的渗漏检测方法,将储罐每30 min的燃油差值视为实时数据流,通过大小受限的记忆库保存代表性历史样本,并用自适应阈值判断最新窗口与历史分布的差异,当差异超过阈值即触发泄漏报警。记忆库定期以随机采样方式更新,保证历史与近期数据的多样性,兼顾召回率与精度。在澳大利亚160个油罐的真实数据与0.2、0.4、0.8 L/h模拟渗漏测试表明,渗漏检测延迟缩短至2~7 d,显著优于

传统 20 d 级周期,通过将算法联网,可实时对多个储罐渗漏情况进行监控^[26]。

3 石化企业地下设施渗漏管控技术

3.1 池体防渗改造

地下池体作为石化企业土壤与地下水污染防治的重要组成部分,其防渗性能对土壤和地下水环境质量直接相关。《石油化工工程防渗技术规范》(GB/T 50934—2013)、《地下水污染源防渗技术指南(试行)》的发布实施,为地下池体防渗建设提供了技术要求和指导方向。《地下水污染源防渗技术

指南(试行)》将 2011 年前获得环评批复的石化企业建设项目,判定为重点污染源,当钢筋混凝土与砌体结构的池体渗漏量分别高于 0.2、0.3 L/(d·m²) 时,需要开展防渗设计。石化装置区各类污水池,石化公用工程区事故油池、排污池、排污水池、污泥池、油泥池等,各类池体的底板与壁板均属于重点污染防治区。

常用的防渗材料有膨润土防水毯(GCL)、高密度聚乙烯(HDPE)膜、抗渗混凝土和水泥基渗透结晶型防水材料等,各类防渗材料的结构与特性如表 4 所示^[27-28]。

表 4 常用的防渗材料、结构与特性

防渗材料类别	防渗结构	特性
天然防渗材料,如黏土、膨润土、GCL 等	天然或改性黏土压实防渗层、GCL 复合衬垫	吸附性强、可阻滞有机污染物迁移;分布广、成本低;需改性提高对高浓度有机污染物的稳定性,适合一般污染防治区
人工合成有机防渗材料,如 HDPE 膜	连续、柔性 HDPE 薄膜层的衬垫结构	耐化学腐蚀、耐老化;对有机污染物分配系数低、不造成二次污染;需与刚性或复合结构配合使用以防止穿刺,适用于重点污染防治区
掺钢纤维抗渗水泥	钢纤维增强混凝土形成刚性或半刚性结构层	钢纤维形成立体网状结构堵塞毛细通道,防渗性比普通混凝土高;抗裂、抗渗性能好,造价高、施工难度大,用于池体的内表面涂刷或内掺加
水泥基渗透结晶型防渗材料	在混凝土内部或表面形成结晶层	活性化学物质渗入混凝土毛细孔,生成不溶性晶体堵塞通道;具有自我修复微裂缝能力;化学稳定性好、耐高温耐湿;用于地下污水池、废渣填埋场等

3.2 地下管道渗漏修复

当地下管道存在渗漏时,可采用非开挖的方式进行修复,常用的方法有内衬管法、原位固化法、喷涂法等。

内衬管法是通过专用设备,将内衬管变为 U 型、C 型或 H 型来减小横截面积,随后将内衬管牵入至待修复的管道中,再通过加压或加热使其恢复到原来的尺寸和形状,实现管道修复。常用的内衬管材料有聚氯乙烯、高密度聚乙烯等,当转弯角度增大时,修复时摩擦阻力增加,应提升内衬管的牵引力或在管壁处采取润滑措施降低阻力^[29]。

原位固化法(cured-in-place pipe, CIPP)通过原管道内原位固化树脂-纤维复合内衬,实现管线结构更新与腐蚀防护,主要工艺包括:首先通过高压冲洗,确保管壁洁净并满足表面锈蚀等级要求;然后将树脂浸渍软管在真空负压下充分浸渍,借助静水压力或气压翻转置入目标管段;最后通过热水、蒸气或紫外光,使内衬恢复或提升设计承压能力。CIPP 技术适用于管径 150~2 400 mm,施工周期短,修复后内表面阻力降低,修复后可提升输送能力,使用时需注意树脂迁移、固化温度监控、挥发性有机气

体等因素^[30]。非开挖修复在石油领域已取得良好效果,某输油管道 $\phi 159 \text{ mm} \times 4 \text{ mm}$,因穿孔频繁,选用聚合物-环氧胶泥-玻璃鳞片复合衬里,对 3 100 m 长度的管道采进行修复,修复后 10 a 内无穿孔,且阻力损失由 1.8 MPa 降至 1.3 MPa^[31]。

3.3 阴极保护建设

阴极保护是石化企业储罐、地下金属管道等设施常用的防腐技术,主要包括牺牲阳极法和外加电流法^[32]。牺牲阳极法是通过原电池反应,用比被保护目标电位更低的材料,如镁合金、铝合金、锌合金等作为阳极,消耗阳极以实现目标对象的保护,该方法操作便捷,但无法控制电流的强度。外加电流法,通过外接电源,向被保护对象通入电流,从而达到防腐目的,这种方法适用范围广,可用于电阻率较高的环境,使用时需要外接电源,并考虑厂区地下设施的分布。

在石化企业中,阴极保护技术已覆盖循环水、污水管网及接地网储罐等,形成全厂一体化保护格局。西北某炼厂对 130 km 地下管线、接地网等,以混合金属氧化物阳极,采用点式均匀分布方式埋深 1.5~2.0 m,设立 23 座阴极保护站,并结合智能检测技

术,使地下设施渗漏得到有效保护^[32]。

4 结论与展望

为更好地开展石化企业土壤污染隐患排查,需要分析地下设施渗漏排查污染源特征,筛选出特征污染因子,结合土壤-地下水-土壤气多要素监测、示踪剂渗漏检测、管道机器人排查等,当发现渗漏后需进行管控,如池体防渗、管道修复、阴极保护等。当前仍存在地下设施排查难、隐蔽性设施检测标准不足、整改标准不健全、质量监管不完善等问题,需针对性优化。

下一步可梳理石化企业土壤污染排查、自行检测、污染源头防控工作的特征,突出隐蔽性设施排查重点,完善隐患判定与整改规则,制定石化等行业专项指南,细化排查范围、方法和整改措施,从而提升石化企业土壤污染隐患排查工作的科学性、规范性和有效性,助力精准识别土壤与地下水污染隐患,及时采取有效的管控措施,推动石化企业土壤污染源头防控效能提升。

参考文献

- [1] 侯德义.如何从源头协同防治土壤地下水污染[J].中国环境监察,2025,(1):25-27.
- [2] 宋志晓,魏楠,崔轩,等.中国土壤污染源头管控现状及对策研究[J].环境科学与管理,2022,47(12):5-9.
- [3] 沈宗泽,郭观林,李慧颖,等.关于健全我国土壤污染隐患排查整改标准体系的若干思考[J].环境科学研究,2025,38(4):872-882.
- [4] 王赫婧,王永,陈运帷,等.我国石油炼制工业全生命周期土壤污染防治分析[J].化工环保,2025,45(1):121-126.
- [5] 洪亚雄.我国土壤污染源头防控的现状、问题及建议[J].环境保护,2023,51(20):12-16.
- [6] 王莹,王水.江苏省土壤污染重点监管单位管理现状与对策建议[J].环境监控与预警,2024,16(1):104-108.
- [7] Guan J, Li C, Yu W, *et al.* Impacts of LNAPL types on mechanisms and rate of natural source zone depletion[J]. Environmental Pollution, 2024, 356: 124380.
- [8] Guan J, Huang J, Sun Y, *et al.* Understanding petroleum vapor fate and transport through high resolution analysis of two distinct vapor plumes[J]. Science of the Total Environment, 2024, 912: 169464.
- [9] 关俊杰,熊峰,蒋雨,等.基于碳排放的石化场地气相自然衰减定量研究[J].中国环境科学,2024,44(2):1064-1070.
- [10] 叶翔宇,陈雪霞,于波,等.长江经济带某石化场地土壤中污染物分布与微生物特征[J].地学前缘,2022,29(3):239-247.
- [11] 任黎明,高雨函,杨宇宁,等.某炼化污水处理场污染物迁移分布规律[J].石油炼制与化工,2023,54(5):88-96.
- [12] 林笑雨,张树才.典型炼油场地特征污染物识别研究[J].安全、健康和环境,2024,24(11):48-53.
- [13] 丁海,欧阳振宇,张德永,等.某在产石化企业土壤和地下水污染特征分析[J].油气田环境保护,2024,34(6):14-18,24.
- [14] 孙建成.在役石油石化场地土壤污染识别进展研究[J].安全、健康和环境,2024,24(1):45-49,56.
- [15] 李煜婷,许德刚,李巨峰,等.典型石油炼制厂地下水中优先控制污染物识别方法的建立和验证[J].环境工程学报,2019,13(11):2770-2780.
- [16] 李婷.石油炼制场地土壤典型污染物分布及迁移特征研究[D].青岛:中国石油大学(华东),2020.
- [17] 姚洪华,郑丽波,张达政.浙江沿海某石油化工类企业地下水污染特征[J].环境科学与管理,2012,37(3):39-45.
- [18] 曹兴涛,曹保久,王教凯,等.场地石油烃污染物特征及化学氧化修复副产物研究[J].环境科学与管理,2023,48(9):54-59.
- [19] Sun J, Wang X Y, Song Q, *et al.* Fingerprint characteristics of refined oils and their traceability in the groundwater environment[J]. Chemosphere, 2023: 138868.
- [20] 马杰.土壤气监测在污染地块调查评估中的优势、局限及解决思路[J].环境工程学报,2021,15(8):2531-2535.
- [21] 孙爱丽,苏俊涛,王利刚.炼化企业地下水污染管控技术及工程示范[J].石油石化节能,2022,12(12):66-71.
- [22] 宋相和.污水场生化池防渗示踪试验研究[J].工业水处理,2020,40(1):112-114.
- [23] Golding R, Evans S. Tracer applications in integrity assessments for tanks, terminals and transportation piping [C]. 2008 7th International Pipeline Conference, 2008: 447-455.
- [24] Wang N, Duan Y, Li S, *et al.* Advanced YOLO-DeepSort-based system for drainage pipeline defects intelligent detection[J]. IEEE Access, 2024, 12: 145857-145870.
- [25] 蔡玉臣.实时监测埋地油罐渗漏技术的研究[J].安全、健康和环境,2016,16(9):26-29,51.
- [26] Chu R, Chik L, Song Y, *et al.* Real-time fuel leakage detection via online change point detection[J]. International Journal of Data Science and Analytics, 2025, 20: 6583-6600.
- [27] 吴维洋,孙垦,刘玉龙,等.我国大型石油炼化基地防渗工程研究[J].华北水利水电大学学报:自然科学版,2014,35(3):43-48.
- [28] 王苏敏,申满对.石油化工项目防渗设计回顾与展望[J].炼油技术与工程,2023,53(7):57-59.
- [29] Lu H, Liu C, Zou X, *et al.* Prediction of construction traction force for corroded pipeline rehabilitation using multilayer composite liners [J]. Journal of Pipeline Systems Engineering and Practice, 2025, 16(2): 04024080.
- [30] Das S, Bayat A, Gay L, *et al.* A comprehensive review on the challenges of cured-in-place pipe (CIPP) installations[J]. Journal of Water Supply: Research and Technology—AQUA, 2016, 65(8): 583-596.
- [31] 武玉双,马永忠,李渊,等.管线非开挖内衬修复技术在油田建设中的应用[J].油气田地面工程,2017,36(5):72-74.
- [32] 何向国,玄晓阳.石化厂区地下金属结构物阴极保护技术及效果[J].全面腐蚀控制,2016,30(3):29-32. ■