

油田区域地下水环境质量检测与污染溯源研究

孔海燕

郑州德析检测技术有限公司

DOI : 10.32629/jpm.v7i7.8985

[摘要] 聚焦典型油田开发区，通过优化监测井网布设，系统采集地下水样品并检测常规离子与特征污染物。综合运用气相色谱质谱指纹比对、多元统计模型及水文地质耦合分析，厘清石油烃、苯系物等污染物的时空分布规律，精准识别钻井漏失、管线腐蚀及历史遗留井等主导污染源。结果显示，污染羽沿地下水流向呈条带状展布，老开发区污染负荷相对较高。据此提出分区分类防控策略，为油田绿色开发与地下水环境风险管理提供科学依据。

[关键词] 油田；水环境质量检测；污染溯源

Research on Groundwater Environmental Quality Assessment and Pollution Source Tracing in Oilfield Areas

Kong Haiyan

Zhengzhou Dexi Testing Technology Co., Ltd.

[Abstract] Focusing on typical oilfield development zones, this study optimizes the layout of monitoring well networks to systematically collect groundwater samples and analyze conventional ions as well as characteristic pollutants. By comprehensively employing gas chromatography–mass spectrometry (GC–MS) fingerprint comparison, multivariate statistical modeling, and hydrogeological coupling analysis, this study elucidates the spatiotemporal distribution patterns of pollutants such as petroleum hydrocarbons and benzene series compounds, and accurately identifies the dominant pollution sources—including drilling leaks, pipeline corrosion, and legacy wells. The results indicate that the pollution plume exhibits a strip-like distribution along the direction of groundwater flow, with relatively higher pollution loads observed in older development zones. Based on these findings, this study proposes zoned and categorized prevention and control strategies, providing a scientific basis for the green development of oilfields and the management of groundwater environmental risks.

[Key words] oilfield; water environmental quality monitoring; pollution source tracing

引言

伴随油气资源长期高强度开发，油田区域地下水环境面临严峻挑战，采油废水回注、管线老化渗漏及钻井废液处置不当等问题，导致石油烃、苯系物及重金属等污染物入渗风险加剧。鉴于油田开发活动的广泛性与隐蔽性，环境监测工作常涉及各大采油厂、采气厂的地下水、废水、废气及土壤等多要素协同监测。针对地下水环境，现行监测工作通常遵循“监测井网布设—现场快速采集—实验室精准分析—综合评价”的标准化流程，重点监测常规理化指标、无机离子及石油类特征污染物。然而，当前评价体系多侧重单一指标评价，缺乏多源复合污染的系统甄别，难以支撑精细化环境管理需求。

1 地下水环境污染特征分析

研究区地下水污染空间分异显著，且具备隐蔽性强的典型

特点。浅层地下水整体矿化度水平偏高，部分监测井的硫酸盐、氯化物浓度异常升高，初步判定与油田作业废水下渗污染密切相关。区域地下水核心污染指标为总石油烃，全域检出范围极广；其中苯系物多富集于集输管线沿线及老旧油井周边，形成局部高污染区，酚类污染物则主要在联合站周边地下水出现超标问题。区域重金属污染整体程度较轻，仅在废弃泥浆池局部点位观测到镉、砷含量小幅上升。地下水污染垂向分层特征突出，浅层潜水受地表油气生产跑冒滴漏影响最为直接，水质波动较大；深层承压水水质整体稳定，但断裂带构造发育地段存在污染物越层迁移的污染风险。污染羽整体沿地下水径流方向呈条带状展布，受水文季节变化调控明显，丰水期地下水动力条件活跃，污染物迁移扩散速率显著高于枯水期。

2 油田开发对地下水环境的影响

2.1 钻井与井下作业的直接扰动影响

油田钻井及井下作业会直接扰动地层结构，对地下水环境造成原生污染扰动。钻井施工产生的废弃泥浆与地层岩屑，若未落实无害化处置，可借助井口周边岩土裂隙渗入浅层含水层体系。这类废弃物含大量悬浮颗粒物与人工钻井助剂，可长期滞留于包气带介质中，形成长效持续性污染源头。压裂施工所用化学药剂组分复杂，作业返排液若因地层防渗结构破损发生渗漏，其中的交联剂、杀菌剂等成分可快速穿透浅层弱透水层，彻底改变原生地下水化学组分平衡。酸化、堵水等井下工程会打破地层原有物化稳定状态，促使岩层中固化的重金属元素活化迁移，伴随采出水汇入地下水循环体系。同时，长期服役的老旧油井易出现套管腐蚀穿孔问题，引发原油持续性渗漏，在井周形成高浓度石油烃污染区域，且污染范围随地下水径流逐步侧向扩散，老开发区块此类遗留污染问题突出，治理修复难度极大。

2.2 集输系统与储存设施的间接累积影响

油田集输、储集设施的老化破损与运维疏漏，会引发渐进式、累积性的地下水污染问题。输油管线长期埋设于地下，受土壤腐蚀、外力扰动影响易产生细微渗漏点，初期污染迹象隐蔽且难以监测，长期渗漏累积后会形成连片的石油烃污染区，污染物整体沿管线延展路径呈串珠状分布。储油罐区因罐体沉降、防腐层老化失效，含油污水可通过基础缝隙持续下渗，污水中的多环芳烃组分吸附性极强，易在下部黏性土层富集留存，并通过缓慢解吸持续污染地下水。联合站堆放的含油污泥若未规范管控，经降雨冲刷淋滤后会形成高浓度污染渗滤液，垂直入渗后直接污染浅层潜水。此外，不达标的回注水会造成注水层堵塞、地层压力失衡，诱发污染物跨层越流，该类污染隐蔽性极强，滞后性显著，对深层地下水环境构成长期潜在威胁。

3 油田区域地下水环境质量检测

3.1 监测井网优化布设

结合油田区块开发布局与污染分布特征，本次监测井网布设严格参照《地下水环境监测技术规范》（HJ 164-2020）相关要求，兼顾污染源定位与污染扩散追踪的双重需求。布点工作聚焦核心污染源头，在采油井场、联合站及输油干线等重点区域加密监测点位，同时依托区域地下水径流规律，在上游、中游及下游梯度布设对照、监控与扩散监测井，实现污染全程追踪。为精准掌握垂向污染差异，对典型区块实施分层成井，分别覆盖浅层潜水与深层承压水含水层。针对老旧油井历史渗漏遗留的污染问题，采用放射状布点方式刻画污染晕边界，同时在农田灌溉、居民饮用水源等敏感区域增设监测点位。所有监测井统一完成洗井作业与信息建档，精准记录井口坐标与标高参数，保障监测数据的空间准确性与连续性，为后续污染溯源与机理分析夯实基础。

3.2 现场参数快速采集

本次地下水现场监测严格遵循地下水环境监测技术规范，以实时参数采集为核心工作，精准获取场地地下水理化特性与水质基础指标。现场作业采用便携式多参数水质分析仪，对监测点位地下水水温、pH值、电导率、溶解氧、氧化还原电位、浊度等关键现场理化参数进行实时测定。

所有地下水监测井采样前，严格执行洗井作业规范，采用低流量洗井方式对监测井进行充分抽水洗井，彻底排出井内滞留积水，同步精准测量地下水埋深、水位，持续对地下水出水进行测定，待水体参数稳定、水质均匀后方可开展数据采集与水样采集工作。

现场监测全过程落实仪器质量控制要求，现场同步记录监测时段气象条件、井体完好状况、周边污染源及场地施工情况，重点规避短时降雨、地表径流汇入等外界因素对地下水水位、水质的扰动干扰。通过原位参数采集方式，有效避免水样转运、储存过程中理化参数发生异变，最大程度保留地下水真实环境特征，为后续实验室特征污染物检测分析、场地地下水污染评价提供精准、严谨、有效的现场基础数据支撑。

3.3 特征污染物实验室分析

本次室内检测工作同步覆盖地下水常规水化学指标与油田特征污染物，形成系统化检测分析体系。常规阴阳离子组分中，钾、钠、钙、镁等阳离子及重碳酸根、硫酸根、氯离子等阴离子，依托离子色谱仪与原子吸收光谱仪完成精准定量检测。针对油田专属污染特征，重点锁定总石油烃、苯系物等核心污染物，借助气相色谱-质谱联用技术，实现水体中挥发性与半挥发性有机物的定量检测。挥发酚采用4-氨基安替比林分光光度法开展测定，各类重金属痕量组分则通过电感耦合等离子体质谱法完成超痕量分析。为规避复杂水体基质对检测结果的干扰，样品预处理阶段严格落实液液萃取与固相萃取工艺，充分富集目标污染物。同时通过空白样、平行样与有证标准物质同步比对，严控仪器检测精度，有效保障检测数据的真实性与规范性。

3.4 数据质量控制与评价

本次研究构建了贯穿采样、运输、检测、分析全流程的精细化质量管控体系，从采样器具选型、水样低温避光保存运输，到野外采样规范执行，全程遵循行业标准作业规程。实验室内部通过密码盲样考核与加标回收率双重质控手段，严控各项检测指标的相对误差，确保数据精度符合规范要求。水质评价以地下水质量标准为依据，结合单因子指数法与内梅罗综合污染指数法完成水质等级划分，依托克里金空间插值技术绘制污染物浓度等值线，直观呈现污染羽空间分布与扩散特征。借助主成分分析法甄别各类污染源的贡献占比，精准识别区域主导污染因子。同时对异常监测数据逐一溯源核查，剔除采样操作与仪器漂移带来的误差干扰，形成完整的数据溯源档案，为油田地下水污染防控、预警及修复治理提供可靠的数据支撑与理论

依据。

4 地下水污染溯源分析与防控建议

4.1 基于监测数据的污染源初步研判

依据《地下水环境监测技术规范》(HJ 164-2020)，本次溯源摒弃了实验室依赖度极高的有机指纹图谱技术，转而采用基于长期监测数据的“证据链”推理法。核心工作在于建立背景对照井与污染监控井的动态数据库，重点锁定石油烃(C10-C40)、挥发酚及苯系物等关键指标。在分析过程中，不仅关注污染物是否超标，更注重分析其伴生关系，例如检出高浓度氯化物、硫酸盐与石油烃共存时，往往指示油田采出水的混入。针对每一个异常点位，技术人员将其坐标叠加至油田地面工程分布图，结合区域地下水流向(由水力梯度计算得出)，进行空间拓扑分析。例如，若位于某老旧油井下游的监控井检出总石油烃呈上升趋势，且检出特征离子与井口返出液一致，即可依据“上游源一下游汇”的水文逻辑，初步判定该油井为疑似污染源。这种“特征因子匹配+空间位置关系”的双重验证模式，无需昂贵的大型仪器测试，仅通过常规监测数据的深度挖掘，即可实现对疑似污染源的快速、低成本筛查，极大提高了基层环境巡查的针对性。

4.2 多元统计辅助分析污染关联性

利用历年积累的理化指标大数据，运用 SPSS 统计软件开展深度数据挖掘，以区分自然地质背景与人类活动的影响。首先进行 Pearson 相关性分析，重点识别 pH、溶解性总固体(TDS)、总硬度与特征有机物(如苯、甲苯)之间的相关性。实践中发现，氯离子常作为稳定的示踪剂，其与总石油烃的显著正相关($r>0.8$)是判定采出水渗漏的重要依据。其次，采用主成分分析(PCA)对多指标数据进行降维处理，提取主成分因子。通常第一主成分(PC1)载荷较高的变量包括石油烃、TDS 和硫化物，这直接反映了油田开发活动的强度。通过绘制主成分载荷图，可以清晰地看到监测井的聚类情况：远离油区的背景井多聚集于坐标原点附近，而受影响的监控井则沿 PC1 轴正向偏移。这种基于统计学的可视化表达，能够将隐晦的数据规律转化为直观的管理依据，有效解决了单一指标评价无法反映复合污染的问题，为环境管理人员判定污染成因提供了客观、量化的决策支持，避免了仅凭经验判断的主观性。

4.3 水文地质条件与污染扩散路径分析

污染溯源必须建立在坚实的水文地质基础上，否则极易产生误判。本节紧密结合《水文地质勘察规范》，依据实测的地下水流向、水力坡度及含水层渗透系数，绘制污染羽平面图，分析污染物在多孔介质中的对流弥散规律。工作中特别重视对监测井井身结构的核查，排除了因井管破损导致的层间窜流等假阳性结果。针对污染高值区，技术人员开展实地踏勘，详细记录周边集输管线走向、废弃井封堵状况及储油罐区防渗性能，并与历史维修台账(如管线穿孔记录)进行交叉验证。同

时，利用长期监测数据，重点分析了丰水期与枯水期水位动态变化对污染物迁移速率的影响。数据显示，雨季地下水位抬升往往驱动浅层污染物向下游加速迁移，导致污染羽范围扩大。基于这些实证分析，不仅验证了数据统计推断的可靠性，还为动态调整监测频率(如丰水期加密监测)和优化监测点位布局提供了科学依据，确保了地下水环境风险防控的时效性与精准性。

4.4 分区分类防控对策建议

基于前述溯源结果及污染风险评估等级，制定具有针对性的分区分类地下水污染防治策略。在污染高风险区，重点推进老旧集输管网的更新改造与加油站双层罐体的置换工程，建立基于物联网技术的实时压力监测与泄漏预警系统，从源头大幅削减污染物的产生与排放概率。对中低风险区实施常态化监测机制，优化监测井布局，加密总石油烃及苯系物等特征污染物的检测频次，构建污染趋势预测模型，及时捕捉污染变化趋势。针对已查明受污染的含水层，依据污染物类型及水文地质参数，科学筛选适宜的修复技术：对轻质非水相液体污染优先采用多相抽提技术，对溶解态污染物则考虑实施可渗透反应墙拦截或在原地实施化学氧化修复。同时，从管理机制层面完善油田企业内部的环境管理体系，建立严格的地下水污染责任追究与生态赔偿机制，强化一线作业人员的环保技能培训与意识教育，将地下水环境保护核心指标纳入绿色矿山建设考核体系，最终构建起涵盖预防、监测、治理、管控四个维度的长效保护机制，保障油田区域的生态环境安全。

结束语

典型油田区地下水污染的空间异质性及主控因素，证实了基于常规监测数据比对、多元统计分析结合水文地质条件研判的溯源技术路线在基层环境监测工作中的实用性与可靠性。结果表明，源头管控与路径阻断是防治关键。后续需进一步强化长期动态监测，深化污染物迁聚数值模拟，探索绿色原位修复技术。成果可为同类油田地下水环境风险评估、责任界定及生态修复提供实践范式，助力能源开发与生态保护协同发展。

[参考文献]

- [1]孙秀秀,徐忠凯,白晓骏,等.硝酸银滴定法测定油田地下水中氯化物浓度的不确定度评估[J].油气田地面工程,2025,44(9):28-33.
- [2]黄欣悦.油田净化水灌溉对两种荒漠植物生长的影响[D].新疆农业大学,2025.
- [3]王诗函.基于 DPSIR 模型的华北油田土壤生态环境风险评估方法研究[D].中国环境科学研究院,2025.
- [4]柳晓晨,李姗姗,蔡新毅,等.江汉油田集中开采区地下水质量及健康风险评价[J].环境污染与防治,2025,47(2):35-43.
- [5]苗月.甲苯在冻融土壤-地下水系统中迁移转化规律及热强化修复效能研究[D].东北石油大学,2024.