

陈窈君,杨 洁,李青青.多相抽提条件下 NAPL 相赋存特征和生态风险评估 [J]. 中国环境科学, 2025,45(6):3331-3342.

Chen Y J, Yang J, Li Q Q. Occurrence characteristics of NAPL phase and its ecological risk assessment based on multi-phase extraction [J]. China Environmental Science, 2025,45(6):3331-3342.

## 多相抽提条件下 NAPL 相赋存特征和生态风险评估

陈窈君,杨 洁,李青青\* (上海市环境科学研究院,国家环境保护城市土壤污染控制与修复工程技术中心,上海 200233)

**摘要:** 针对上海市某大型退役化工区场地内高浓度污染区域采用多相抽提技术开展源削减工程清除污染物,阻止污染物进一步扩散,降低污染物健康和生态风险,并同步分析 NAPLs 在多相抽提作用下的赋存特征.通过全场浅层地下水中污染物监测,刻画在抽提影响下污染物在潜水含水层中的空间分布变化,并评估生态风险.研究表明,实施为期 1a 的多相抽提工程效果显著,重污染区污染物在不同深度下的去除率达 64.56%~99.26%.抽提前 NAPLs 之间保持较高的同源性和空间自相关性,相关系数达 0.26~0.72,抽提过程影响了污染物的分布和浓度,污染物之间的相关性发生变化.场地中 DNAPLs 的含量和深度始终保持显著的正相关,LNAPLs 表现为负相关.在抽提作用下,整场污染物空间分布拟合显示,中心区域和周边污染晕范围大幅度收缩,其中 1,4-二氯苯污染范围降幅最大,污染面积减少了 91.98%.经评估,抽提后期场地内高生态风险的点位比例显著减少,多相抽提全面降低了该场地的生态风险.但是依然存在零星的中高生态风险点位(主要为总石油烃污染物),应在后续监测和治理修复中进一步关注.

**关键词:** 污染场地; 非水相有机污染物; 多相抽提; 赋存特征; 生态风险评估

中图分类号: X523 文献标识码: A 文章编号: 1000-6923(2025)06-3331-12

**Occurrence characteristics of NAPL phase and its ecological risk assessment based on multi-phase extraction.** CHEN Yao-jun, YANG Jie, LI Qing-qing\* (Shanghai Academy of Environmental Sciences, State Environmental Protection Engineering Center for Urban Soil Contamination Control and Remediation, Shanghai 200233, China). *China Environmental Science*, 2025,45(6): 3331-3342

**Abstract:** A multi-phase extraction technology was implemented to reduce the source of pollutants within a large retired chemical area in Shanghai, prevent further diffusion, and lower the health and ecological risks associated with the pollutants, while simultaneously analyzing the characteristics of NAPLs under the influence of multi-phase extraction. Through monitoring pollutants in the shallow groundwater across the site, changes in the spatial distribution of pollutants in the aquifer under extraction influence were characterized and ecological risks were assessed. The study indicated that the one-year multi-phase extraction project was significantly effective, with removal rates of pollutants in heavily contaminated areas reaching 64.56% to 99.26% at varying depths. A high degree of homogeneity and spatial autocorrelation was maintained among NAPLs prior to extraction, with correlation coefficients ranging from 0.26 to 0.72. The extraction process influenced the distribution and concentration of pollutants, resulting in changes in the correlations among them. The content and depth of DNAPLs in the site maintained a significant positive correlation, while LNAPLs exhibited a negative correlation. Under the extraction influence, the spatial distribution fitting of pollutants showed a substantial reduction in the central area and surrounding contamination halo, with the range of 1,4-dichlorobenzene pollution experiencing the largest decline, reducing the contaminated area by 91.98%. The assessment indicated that the proportion of high ecological risk points within the site significantly decreased post-extraction, and the multi-phase extraction comprehensively reduced the ecological risk of the site. However, some points of medium to high ecological risk still exist (primarily related to total petroleum hydrocarbon pollutants), which should be monitored and addressed in future remediation efforts.

**Key words:** contaminated site; non-aqueous phase organic pollutants; multi-phase extraction; occurrence characteristics; ecological risk assessment

化工企业生产过程会对周边土壤和地下水环境造成严重污染,企业涉及的基础化学原料、农药、合成材料等产品制造往往伴随着高毒、高持久性污染物的产生<sup>[1]</sup>.上海市化工污染地块中典型污染物主要包括苯系物、石油烃、多环芳烃和氯代烃类等,且溶解度较低的有机污染物通常以非水相液体(NAPL)存在于含水层中<sup>[2]</sup>.

NAPL 相存在的污染地块通常采取修复治理辅以风险管控措施清理和控制污染物扩散.抽出处理技术由于水相无法与 NAPLs 相物质混合,导致

收稿日期: 2024-11-16

基金项目: 2022 年东方英才计划领军项目(第十六批上海领军人才,编号 135)

\* 责任作者,高级工程师,1621412505@qq.com

NAPLs 相物质难以从含水层中去除,并且土壤颗粒的吸附作用也会降低抽出处理的修复效率<sup>[3-4]</sup>.化学氧化技术将氧化剂注入污染区域,但是产生的次生物质可能会对土壤和地下水质量产生不利影响<sup>[5-6]</sup>.多相抽提技术(MPE)通过抽提井产生的压力梯度,污染物被抽离土壤流入井中<sup>[7]</sup>,土壤孔隙中的有机物由于空气渗透率增加,加速向土壤气相转移,污染物随气流被抽离去除<sup>[8]</sup>,大量削减土壤环境中污染物含量.风险管控技术主要通过采取工程控制或制度控制措施,阻止污染物扩散,该技术通常辅以定期监测手段评估污染物的迁移扩散趋势.常用的场地监测方法包括采样与实验室分析以及现场快速连续采样检测与探测方法,前者获得的实验室数据精准、定量,后者高密度、半定量、可快速且连续获取现场监测数据<sup>[9-10]</sup>.

目前,场地中污染物赋存特征的研究多集中于室内实验模拟和数值模拟分析<sup>[11-12]</sup>,在实地工程因素影响下的污染物赋存状况和迁移规律研究较少.本研究以上海市某大型有机污染退役化工场地为研究区,以高密度非水相液体(DNAPL)和低密度非水相液体(LNAPL)类污染物作为研究对

象,在多相抽提作用下,定期监测超高污染区和周边区域的目标污染物浓度,将克里金浓度插值算法与生态风险熵值法结合,探究污染物在该场地潜水含水层中的赋存状态和生态风险,旨在为我国复杂有机污染场地的修复治理和协同监测提供参考.

## 1 材料与方法

### 1.1 地块信息

研究区地块位于上海市南部,紧邻杭州湾,主要为长江口泥沙堆积而成的滩涂.该地区属于亚热带季风气候,雨水充沛,常年降雨量 1191.5mm,平均气温 16.1℃.地块占地面积 6.83 万 m<sup>2</sup>,历史上共有 7 家化工企业,生产历史达 20a 以上,以生产还原染料、荧光增白剂、粘胶剂、各类有机颜料和无机颜料为主(图 1).前期调查发现地块内地下水污染物主要为 1,2-二氯苯、1,4-二氯苯、氯苯、苯、总石油烃,污染面积达 3.53 万 m<sup>2</sup>,见图 1 中污染羽区域,其中黑色阴影区域为 NAPLs 重污染区(污染物浓度含量超过该污染物在水中溶解度的 10%),污染深度至地下埋深 15.5m 左右.

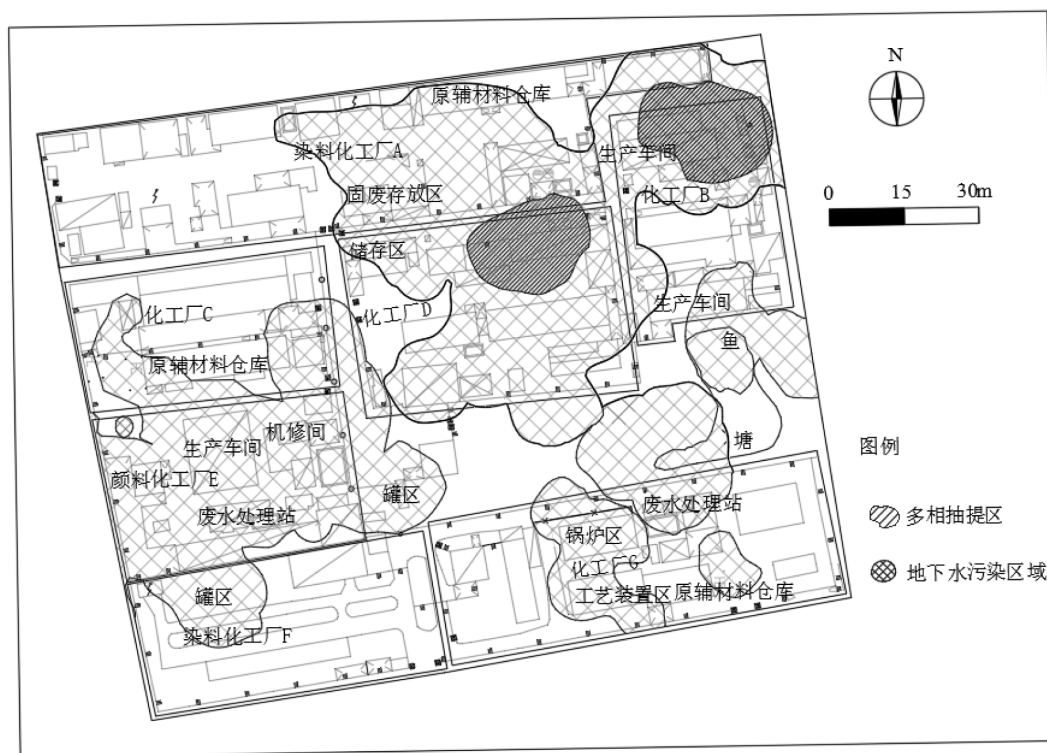


图 1 化工区生产车间分布布

Fig.1 Distribution map of chemical production workshop

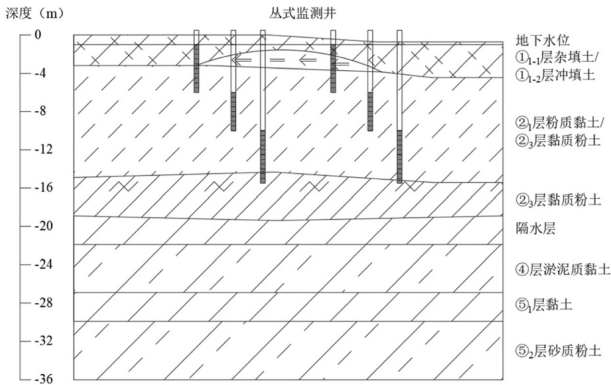


图 2 研究区地层结构示意图

Fig.2 Diagram of the stratigraphic structure of the study area

在地下环境中,区域水文地质特征是决定污染物迁移和扩散的关键因素.水文地质构成决定了污染物迁移的深度与范围,地下水含水层的流向决定了污染羽迁移的方向.受河道变迁、人类活动等因素的长期影响,上海地区浅部地层具有组合复杂、各向异性显著等突出特点,进而导致地下水中污染物分布规律复杂<sup>[13]</sup>.本研究地块内土层特性如下(图2):第①<sub>1-2</sub>层冲填土,该层土壤透水性较好,有利于污染物迁移扩散,地下水易通过大气降水和人类活动影响的方式向下层入渗,导致污染范围增大.第②<sub>3</sub>层黏质粉土,夹黏性土,浅部局部以砂质粉土为主,该层厚度大,渗透性良好,污染物在该层易产生垂直和水平向迁移扩散,由于土层的不均匀易导致弥散作用显著<sup>[14]</sup>.第④层淤泥质黏土和第⑤<sub>1</sub>层黏土,分布稳定,渗透系数较小,污染物在该层中迁移缓慢,有较好的隔

离作用.一般情况下,第②<sub>1</sub>层粉质黏土层也可作为良好的天然隔污层,但在本场地中其埋深浅、厚度薄,污染物仍可通过该层进入更深的含水层中.本场地内地下水污染物种类繁多,部分区域污染程度严重,地下水中污染物超标深度最深达 15.5m.地层平均垂直和水平渗透系数分别约为  $2.93 \times 10^{-5} \text{cm/s}$  和  $1.60 \times 10^{-4} \text{cm/s}$ .潜水含水层稳定水位埋深为 -0.6~-1.3m.

### 1.2 多相抽提工程

重污染区占地 3100m<sup>2</sup>,污染深度达 15.5m,共布设 300 口多相抽提井,井间隔根据技术规范 and 现场中试结果确定,设置为 3.5m,搭接宽度 0.5m,呈正三角形布置.多相抽提井直径设计为 110mm,内部抽水管直径为 50mm,抽提井均采用 UPVC 材质,激光割缝筛管,筛管开筛位置为 1~15m,15~15.5m 为沉淀管,开筛部分外面包裹 120 目钢丝网,多相抽提井外侧为石英砂过滤层.

抽提动力装置主要为空心耐腐蚀钢管和排气管,钢管外直径 15cm,长度 200cm,压缩空气动力泵工作压力为 0.6MPa,抽提速率为 0.4~0.6m<sup>3</sup>/min.空气从钢管上端进气口注入,地下水从钢管下端筛孔进入,再通过出水管将钢管内水压至出水口.抽提模块主体钢管直径小、形状细长,设置在待抽提的深井底部水体中,可以应用于狭窄的井下空间内,提升充气效率,将地下水快速抽提至地表.抽提水经管道汇总后进入水处理装置.工程实施时间为 2023 年 5 月~2024 年 4 月,为期 1a,总抽提时长约 2900h.

### 1.3 布点和采样

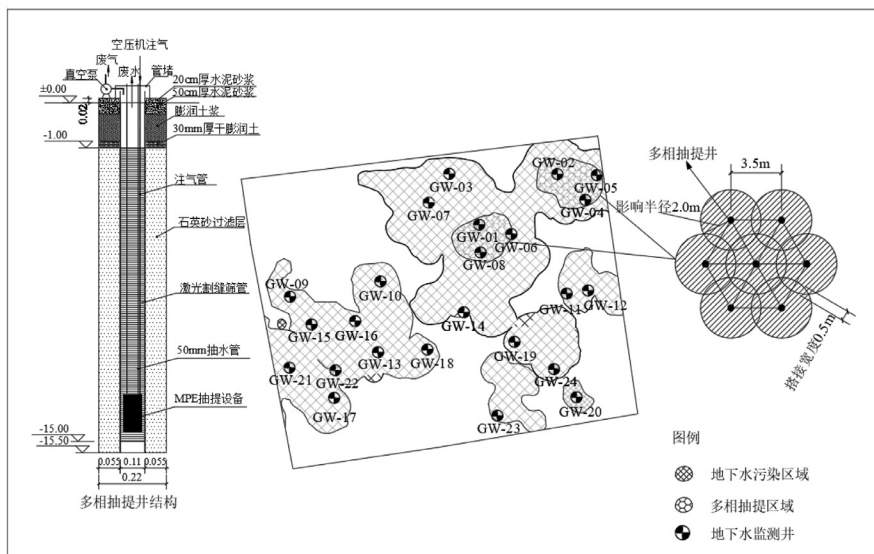


图 3 抽提区域及地下水监测点布设

Fig.3 Layout of extraction area and groundwater monitoring point

地下水监测井点位布设按照专业判断布点法,主要布设在企业生产区、储存区、废水治理区、固废/危废存放区以及 NAPLs 重污染区,布点位置示意如图 3 所示.地块内共布设 24 组地下水监测井(均为丛井),丛井深度为 6,10 和 15.5m,开筛深度分别为 1~6,6~10,10~15.5m,采样频率为 2 个月 1 次,第一年度共开展了 6 批次的地下水采样,每批次采集 72 个地下水样品.按照《建设用土壤污染风险管控和修复监测技术导则》(HJ25.2-2019)<sup>[15]</sup>开展样品的采集工作.样品装入棕色玻璃瓶密封后,贴上标签,样品运送过程中,在密封性良好的泡沫箱内保存,内置蓝冰或冰袋维持箱内温度不高于 4℃.现场采集的质控样包括现场空白、运输空白、设备淋洗空白、现场平行样等,质控样数量不少于样品总数 10%.

#### 1.4 实验室分析和质量控制

样品中苯、氯苯、1,2-二氯苯、1,4-二氯苯含量采用标准方法<sup>[16]</sup>测定,检出限均为 0.0005mg/L.石油烃(C10-C40)含量采用标准方法<sup>[17]</sup>测定,检出限为 0.01mg/L.为保证数据的准确性,设置了方法空白样品、加标样品、加标平行样品和质控样品.苯、氯苯、1,2-二氯苯、1,4-二氯苯的加标回收率为 60%~130%,石油烃(C10-C40)加标回收率为 70%~120%.样品平行质控的相对标准偏差均小于 30%,方法空白样品的检测结果均低于检出限.本研究中的测试均遵循 CMA 要求.

#### 1.5 生态风险评估

采用风险熵值(RQ)法公式计算污染物的生态风险,通过将污染物检测得到的含量水平与生物毒理性数据得来的预测无效应浓度比较得到熵值,利用熵值大小作为风险评价的依据<sup>[18]</sup>,具体公式为:

$$RQ = \frac{MEC}{PNEC} \quad (1)$$

式中:MEC 为水中污染物的实际检测浓度,mg/L;PNEC 为环境无效应浓度,mg/L.

PNEC 根据《化学物质环境风险评估技术方法框架性指南(试行)》<sup>[19]</sup>相关规定推导获得:

$$PNEC = \frac{LC_{50}}{AF} \quad (2)$$

式中:LC<sub>50</sub> 为半数致死浓度;AF 为评估因子.半数致死浓度来源于美国环境保护署(EPA)开发的 EPI

Suit4.1 软件,1,2-二氯苯、1,4-二氯苯、氯苯、苯和总石油烃均的 LC<sub>50</sub> 值分别为 188.186、188.186、168.064、136.037、113.787.本研究毒害有机污染物毒性值(AF)参照文献提供的参数<sup>[20]</sup>,考虑研究对象为野外样本,AF 评估系数取 1000.

若 RQ≥1,表示生态风险高;若 0.1≤RQ<1,表示生态风险中等;若 0.01≤RQ<0.1,表示生态风险低.

## 2 结果与讨论

### 2.1 化工区地下水中污染物含量变化和影响因素

**2.1.1 地下水中污染物含量变化** 地下水中污染物的赋存含量变化受到一系列因素的影响,包括外界引导下的污染介质的扩散效应、地下含水层结构变化以及含水层中污染物的释放等.表 1 所示,地下水中 1,2-二氯苯、1,4-二氯苯、氯苯、苯和总石油烃均超过了《地下水质量标准》中的 IV 类水标准<sup>[21]</sup>,最大超标倍数分别为 54 倍、88.17 倍、55.67 倍、69 倍和 32.33 倍.污染物含量变异系数较高,不同抽提阶段下 1,2-二氯苯、1,4-二氯苯、氯苯、苯和总石油烃变异系数范围分别为 2.05~3.77、1.28~2.49、1.8~2.9、2.7~3.89 以及 2.46~2.61,均表现出高度非均相性.污染物检出率最高的为总石油烃,检出率均为 100%;其次为 1,2-二氯苯、1,4-二氯苯、氯苯和苯,苯的检出率最低,为 13.89%~33.33%.随着抽提的进行,污染物超标率呈现逐渐降低的趋势,1,2-二氯苯超标率由 13.89%降至 2.78%,1,4-二氯苯超标率由 13.89%降至 0,氯苯超标率由 22.22%降至 5.56%,总石油烃超标率由 25%降至 13.89%,苯的超标率均维持在较低水平,为 2.78%~6.94%.

**2.1.2 抽提影响因素** 研究期间全场浅层地下水流向和水位变化主要受到抽提作用的影响,地下水逐步向重污染区汇聚,地下水水位随着抽提量增加逐渐下降.抽提后期,6m 监测井的水位降深为 0.30~2.32m;10m 监测井的水位降深为 0.33~2.5m;15.5m 监测井的水位降深为 0.53~2m.多相抽提期间的地下水流向如图 4 所示.多相抽提运行前,地下水中污染物呈现出由北侧向东侧和南侧扩散的趋势,越往下游污染物浓度越低.在多相抽提运行期间,区域内地下水向抽提区汇聚,抽提区域附近污染羽范围明显缩小,污染晕浓度也明显下降.经监测分析,抽提设备每日运行 8~12h,抽提效率 200~300m<sup>3</sup>/d 的情

况下,抽提区对周边主要影响范围在 30m 左右,抽提 时间越久,影响半径越大。

表 1 抽提期间潜水含水层中污染物浓度水平

Table 1 Concentration levels of contaminants in the aquifer during extraction period

抽提阶段	超标污染物	检出率 (%)(n=72)	最小值 (mg/L)	最大值 (mg/L)	平均值 (mg/L)	标准差 (mg/L)	变异系数	修复目标值* (mg/L)	超标率 (%)(n=72)
抽提前本底监测(第 1 轮)	1,2-二氯苯	54.17	0.0008	110.00	16.82	34.49	2.05	2.00	13.89
	1,4-二氯苯	43.06	0.0008	53.50	6.85	14.33	2.09	0.60	13.89
	氯苯	31.94	0.001	25.60	4.22	7.60	1.80	0.60	22.22
	苯	13.89	0.0014	8.40	1.09	2.95	2.70	0.12	2.78
	总石油烃	100.00	0.06	20.00	1.78	4.61	2.60	0.60	25.00
抽提中期监测(第 3 轮)	1,2-二氯苯	61.11	0.0008	67.2	8.85	18.69	2.11	2	16.67
	1,4-二氯苯	45.83	0.0008	30.7	3.18	7.91	2.49	0.6	13.89
	氯苯	44.44	0.001	34	3.15	7.65	2.43	0.6	15.28
	苯	33.33	0.0014	7.93	0.45	1.76	3.89	0.12	6.94
	总石油烃	100.00	0.04	16.6	1.12	2.92	2.61	0.6	16.67
抽提后期监测(第 6 轮)	1,2-二氯苯	30.56	0.0008	20.2	1.26	4.75	3.77	2	2.78
	1,4-二氯苯	22.22	0.0008	0.09	0.02	0.03	1.28	0.6	0.00
	氯苯	27.78	0.001	20.9	1.81	5.26	2.9	0.6	5.56
	苯	20.83	0.0014	4.23	0.41	1.21	2.94	0.12	5.56
	总石油烃	100.00	0.03	7.89	0.74	1.81	2.46	0.6	13.89

注:修复目标值设定为我国《地下水质量标准GB14848-2017》IV类水标准值<sup>[21]</sup>。

污染物在含水层中的迁移主要受含水层自身的非均质性、土层结构以及地下水的渗流特征影响<sup>[22]</sup>。多相抽提过程则通过改变水动力条件造成水流变化、污染物迁移速率加快,地下水抽取

加速了抽提区域影响范围内的地下水流动,改变了自然状态下地下水的流向,导致污染羽向抽提井方向移动、集中,随着持续抽提,污染去除区域不断扩大<sup>[23]</sup>。

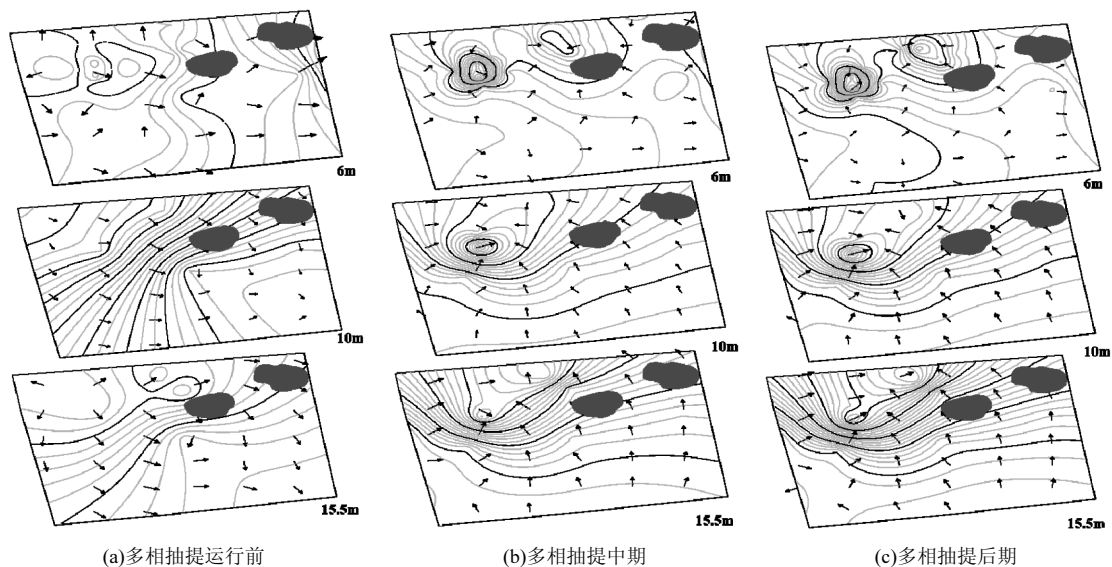


图 4 场地多相抽提期间地下水流向模拟

Fig.4 Simulation of groundwater flow direction during multiphase extraction

## 2.2 重污染区 NAPLs 含量变化和垂向自相关性

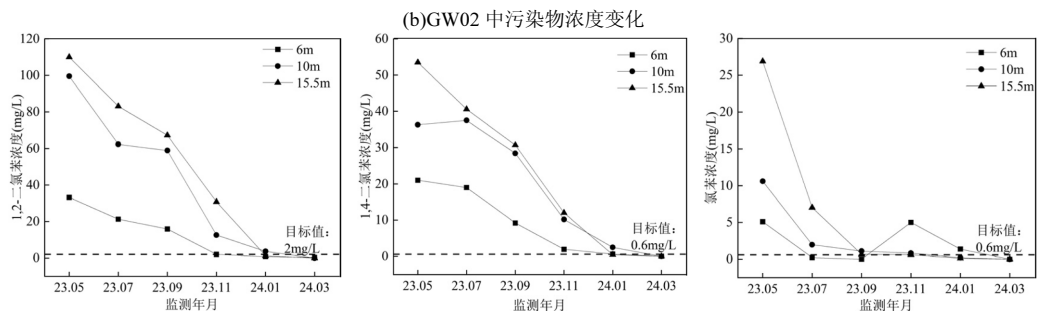
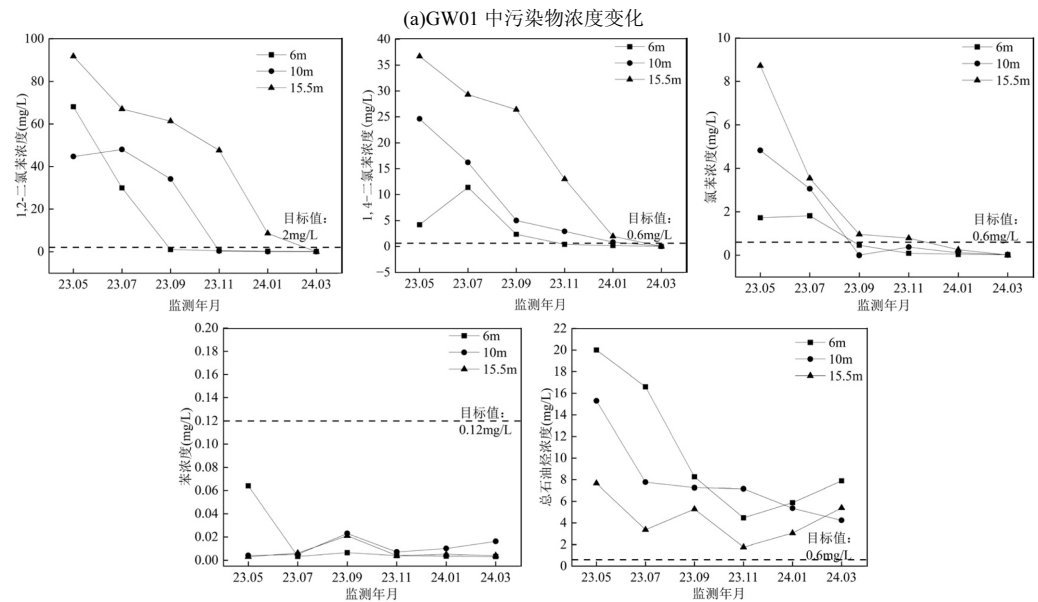
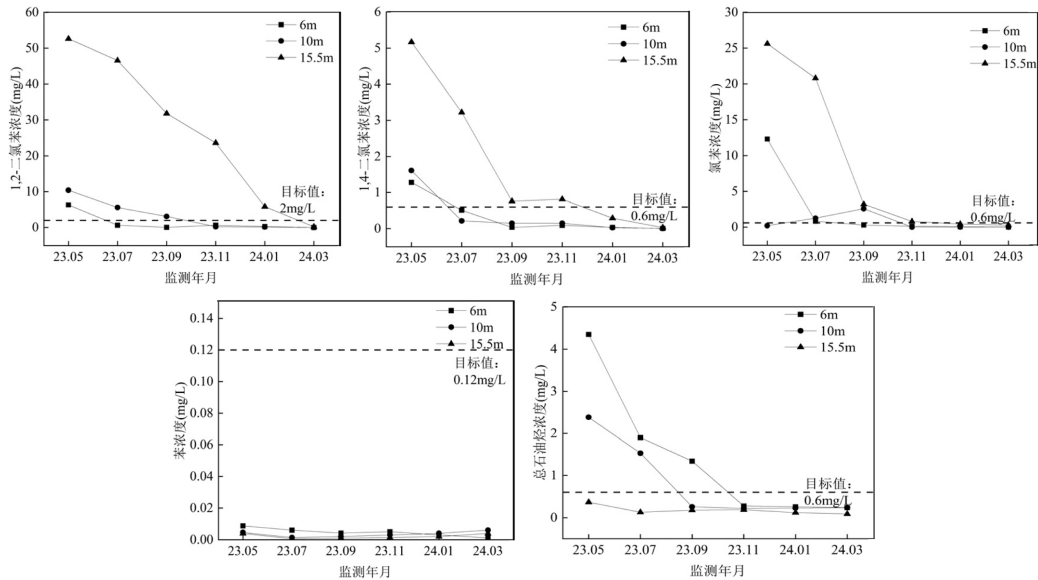
### 2.2.1 重污染区 NAPLs 含量变化 重污染区高浓度有机污染物聚集,分析 GW01、GW02、GW04、

GW06、GW08 监测井中污染物浓度变化规律.图 5 表明,NAPLs 随着抽提时间延长,浓度水平显著下降. 3 种 DNAPLs 污染物在抽提作用下呈现良好

的去除效果.1,2-二氯苯在 6,10,15.5m 深度下的平均浓度降幅分别为 82.02%、89.90%、90.38%,1,4-二氯苯在 6,10,15.5m 深度下的平均浓度降幅分别为 80.35%、84.92%、89.44%,氯苯在 3 个深度下的平均浓度降幅分别为 95.47%、97.78%、99.26%.深度越深,3 种 DNAPLs 污染物的浓度降幅越大,深层污染物含量水平降低趋势

更加明显.

2 种 LNAPLs 污染物,苯在 6,10 和 15.5m 深度处平均浓度降幅分别为 88.40%、90.88%、79.36%,总石油烃在 6,10 和 15.5m 深度处平均浓度降幅分别为 81.05%、69.31%、64.56%,浅层苯、总石油烃随着多相抽提运行浓度下降幅度较大,深层苯、总石油烃有一定的去除率,但浓度下降较为平缓.



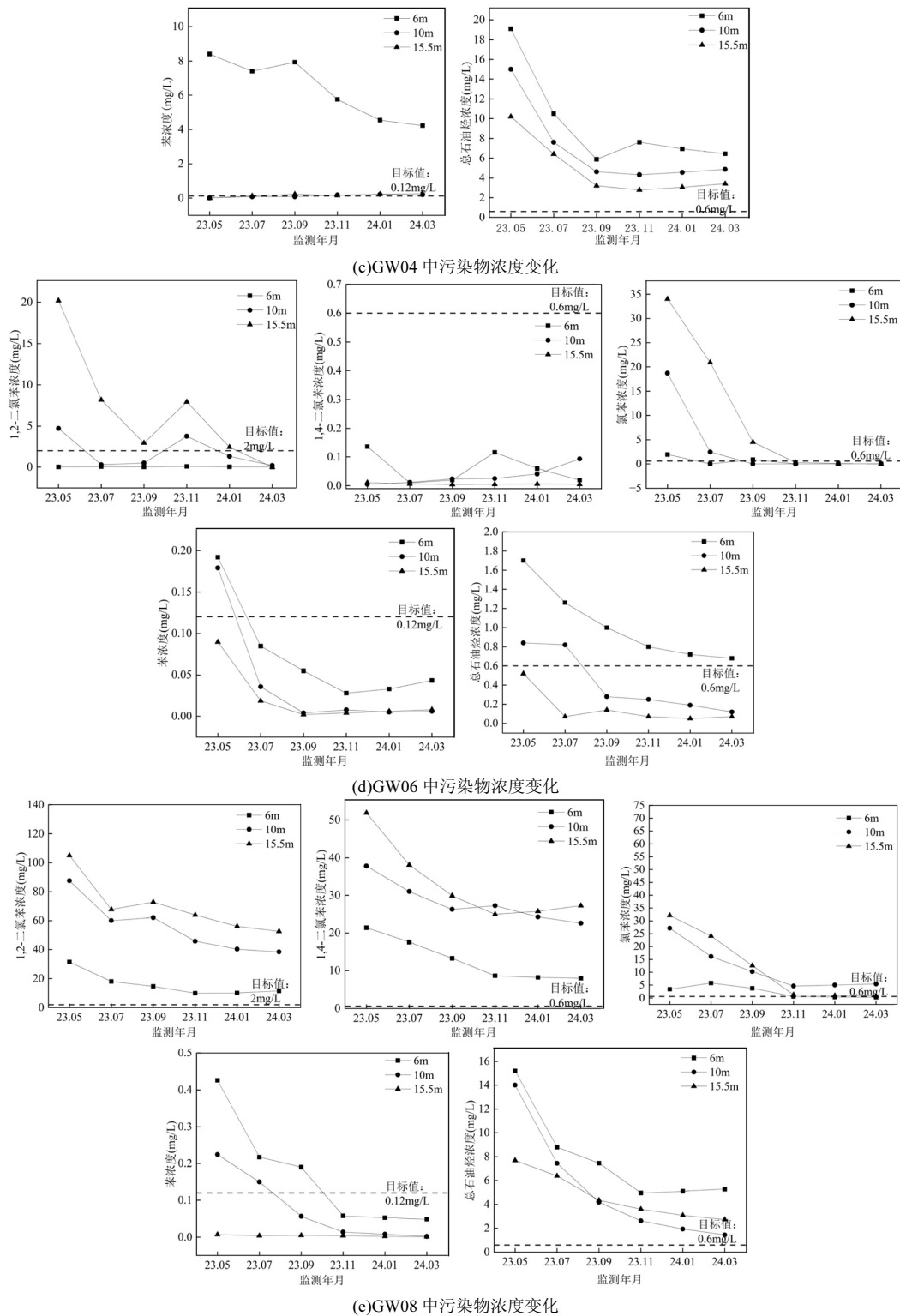


图 5 丛式监测井中不同深度污染物浓度变化趋势

Fig.5 Variation of pollutant concentration at different depths of groundwater

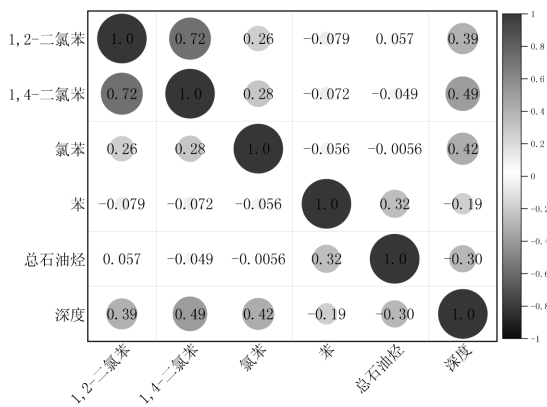
本场地抽提井井位深,DNAPLs(1,2-二氯苯、1,4-二氯苯、氯苯)修复效率较高,更易达到修复目标值;LNAPLs(苯、总石油烃)修复效率较低.抽提效果受地块环境条件和污染物性质影响,场地地层渗透

性较好,DNAPLs 由于其高密度会更容易沉降和集中,在地层较低的位置形成集聚,使得 DNAPLs 的污染物位置相对固定,更容易通过 MPE 系统抽提<sup>[24]</sup>. LNAPLs 通常漂浮在地下水的表面或在饱和区的顶

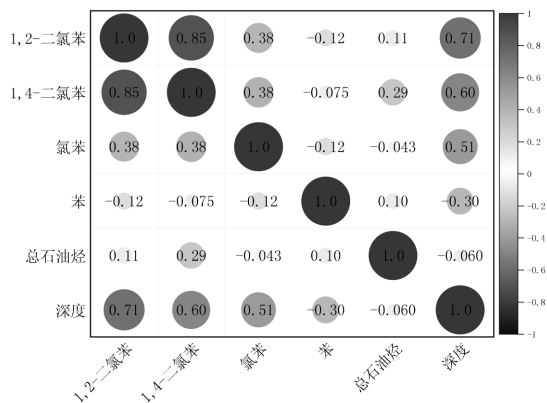
部,这些轻质污染物在地下水系统中更易迁移和扩散,增加了捕捉和抽提的难度<sup>[25-26]</sup>.

**2.2.2 重污染区 NAPLs 垂向自相关性** 如图 6(a)所示,未经扰动(抽提前)含水层中 DNAPLs 污染物含量水平均为正相关,其中 1,2-二氯苯与 1,4-二氯苯相关性最强,相关系数达 0.72.LNAPLs 污染物苯和总石油烃含量水平也为正相关,相关系数为 0.32,较强的相关系数体现了两类污染物之间的同源性和空间自相关性<sup>[27]</sup>.由图 6(b)和(c)可以看出,在多相抽提作用下,污染物迁移能力和流动性的差异影响了污染物的分布和浓度,导致污染物之间的相关性发生变化<sup>[28]</sup>.

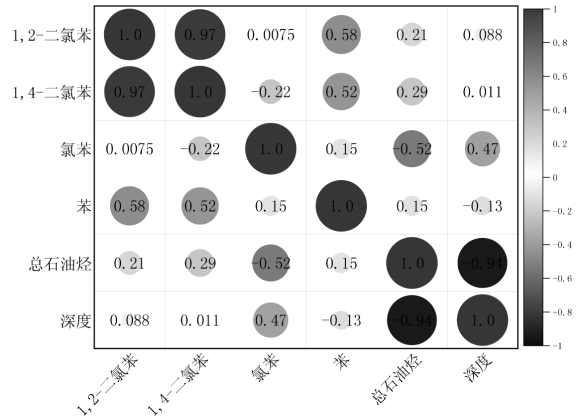
1,2-二氯苯、1,4-二氯苯、氯苯为重质非水相液体,污染物密度较高,聚积于潜水含水层底部,其浓度往往随着深度增加而增加<sup>[29]</sup>,本地块 DNAPLs 污染物浓度与深度呈显著正相关(相关系数 0.011~0.71),在垂向上的浓度分布均呈现为上部低、下部高,从 6~15.5m 处,随着土层的加深,同一监测点位 1,2-二氯苯浓度增加 0.98~830 倍,1,4-二氯苯浓度增加 1.25~31.99 倍,氯苯浓度增加 0.51~682.5 倍.



(a)多相运行抽提前



(b)多相抽提中期



(c)多相抽提后期

图 6 污染物垂向分布相关性分析

Fig.6 Correlation hot map of contaminant vertical transport

苯、总石油烃垂向分布则呈现明显不同的格局,苯、总石油烃为轻质非水相液体,浮于潜水含水层浅部,两种污染物在垂向上的浓度分布均呈现为上部高,下部低,与深度呈负相关(相关系数-0.06~-0.94).6~15.5m 处,同一监测点位苯浓度降低 52.38%~99.94%,总石油烃浓度降低 27.22%~94.44%.

地块内不同深度、不同土层所面临的主要污染物不一致,深层黏质粉土含水层中 1,2-二氯苯、1,4-二氯苯和氯苯的浓度高,而浅层粉黏土含水层中苯和总石油烃的浓度高,污染物垂向分布差异明显,部分监测点位上层和深层污染物含量差别最高可达 3 个数量级.污染物垂向分布差异与污染物的类型和特性、土层的物理和化学性质、水力流场、场地地形以及距污染源的距离等多种因素相关<sup>[30-31]</sup>.

**2.3 化工区地下水污染物空间分布拟合**

为进一步分析污染物在潜水含水层中的空间分布,采用基于样品数据的克里金浓度插值算法<sup>[32]</sup>,呈现污染物在水平和垂向上的分布情况.每种污染物的修复目标被设定为等高线图例上标示的最小值,地下水中 1,2-二氯苯、1,4-二氯苯、氯苯、苯和总石油烃的修复目标值分别为 2,0.6,0.6,0.12 和 0.6mg/L.从水平分布来看,地块内污染分布格局表现出一定的空间异质性,污染羽随着地下水流动逐步向下游方向扩散,形成椭圆状<sup>[33]</sup>,场地南侧污染物浓度均未超标.1,2-二氯苯、1,4-二氯苯和总石油烃呈现明显的重污染程度(红色和黄色覆盖区域较多),苯和氯苯大部分为蓝色覆盖区域,污染程度较轻.在重污染区开展多相抽提修复削减高浓度污染物并控制污染羽进一步扩散.

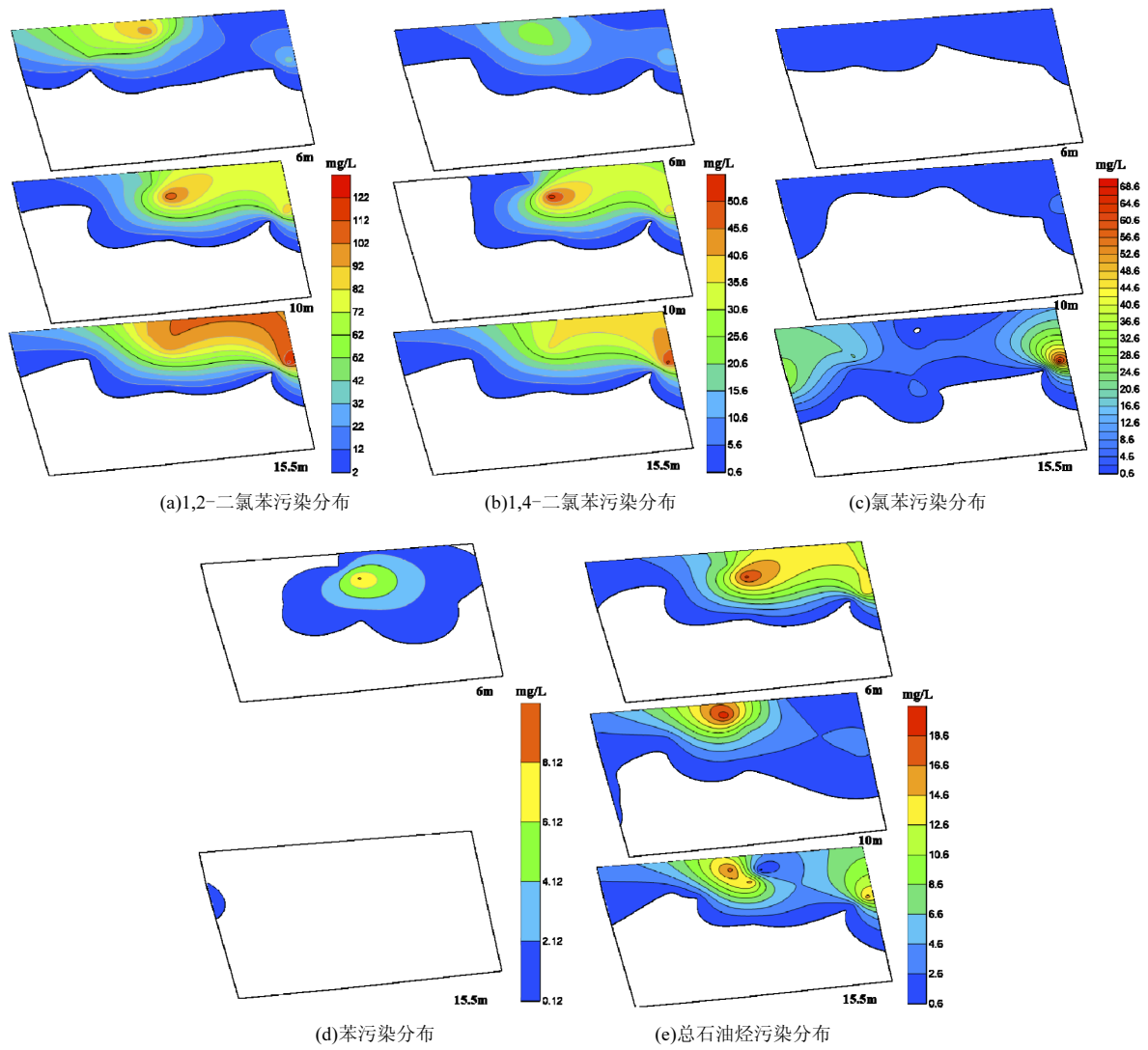
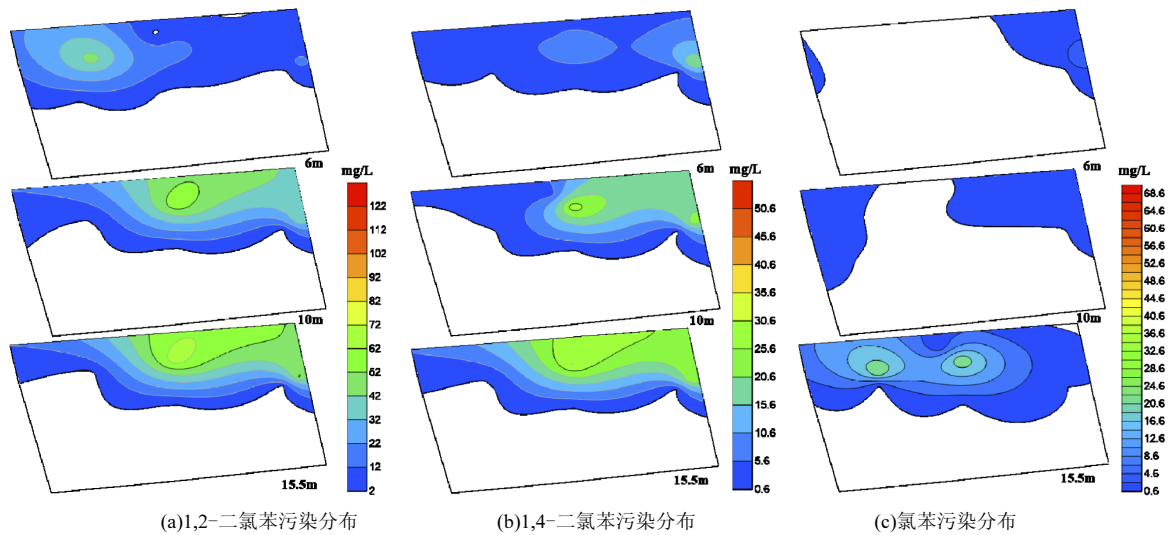


图 7 使用克里金法插值的污染物初始空间分布  
Fig.7 Spatial distribution of contaminants using Kriging method during the initial period



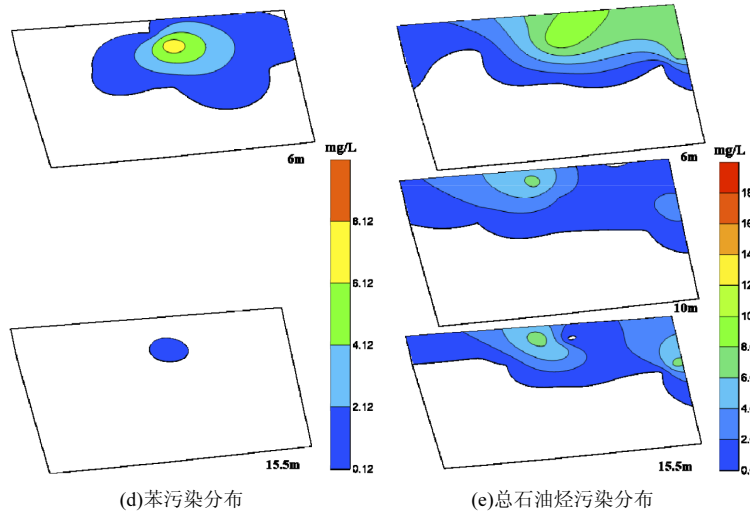
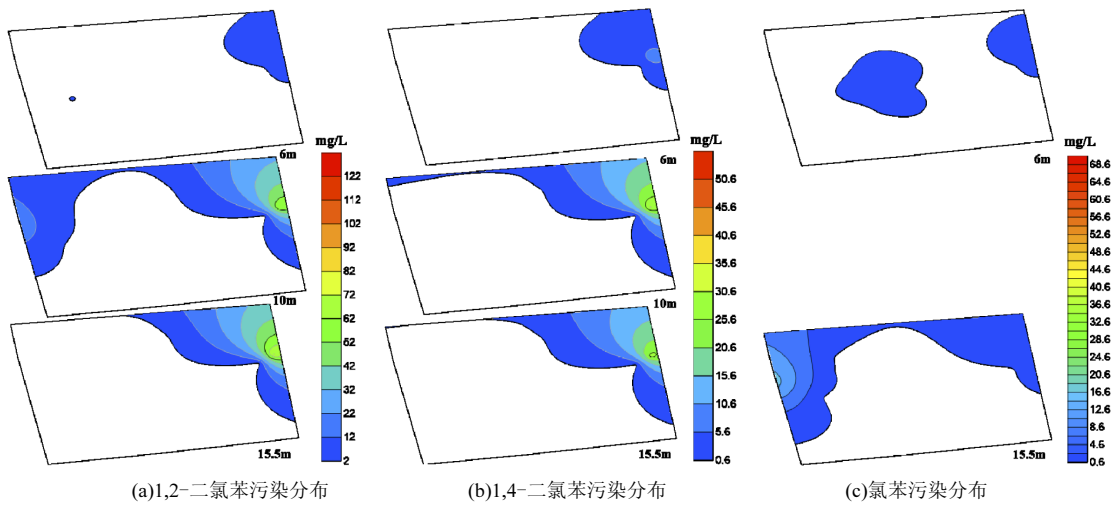
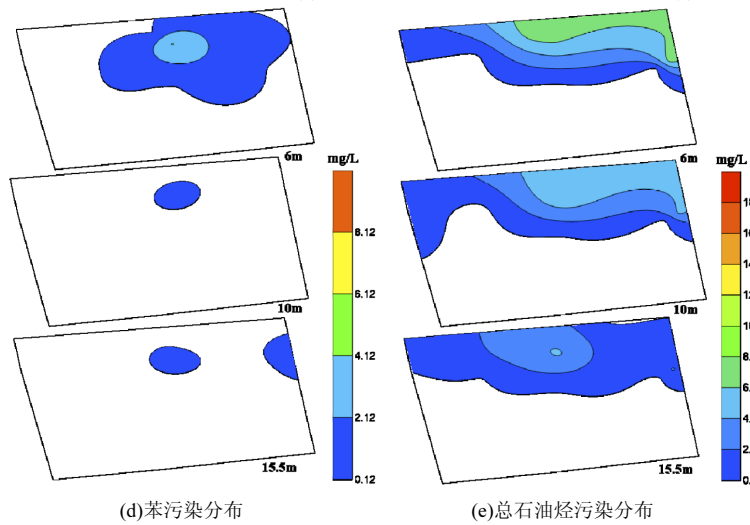


图 8 多相抽提中期污染物空间分布

Fig.8 Spatial distribution of pollutants during the intermediate period of multiphase extraction



(a)1,2-二氯苯污染分布 (b)1,4-二氯苯污染分布 (c)氯苯污染分布



(d)苯污染分布 (e)总石油烃污染分布

图 9 多相抽提后期污染物空间分布

Fig.9 Spatial distribution of contaminants during the later phase of multiphase extraction

从图 7、图 8、图 9 可看出,随着多相抽提运行, 地下水污染晕颜色发生变化,污染晕中心浓度明显

下降,场地内污染物浓度有效降低.此外,地下水污染晕范围明显缩小,将每种污染物在 3 种深度下的污染范围进行叠加,得到各个污染物的总面积,从修复前到修复后期,1,4-二氯苯污染总面积降幅最大,由 3.11 万  $m^2$  降低到了 1.62 万  $m^2$ ,面积减少了 91.98%;其次为 1,2-二氯苯,污染总面积由 3.08 万  $m^2$  降低到了 2.36 万  $m^2$ ,面积减少了 30.3%;总石油烃污染总面积由 3.71 万  $m^2$  降低到了 2.90 万  $m^2$ ,面积减少了 27.82%;氯苯和苯污染面积降幅较小,分别从 3.49 万  $m^2$ 、2.64 万  $m^2$  降低到了 3.18 万  $m^2$ 、2.32 万  $m^2$ ,降幅达 9.70%和 13.92%.多相抽提可以显著降低污染物的浓度,污染羽的浓度梯度减小,污染羽的扩散范围也会相应缩小,导致污染羽形态发生改变.同时某些吸附在土壤颗粒上的污染物可能会解吸进入水相或气相,导致污染物的重新分布.

## 2.4 生态风险评估

表 2 地下水有机污染物生态风险评价

Table 2 Ecological risk assessment of organic pollutants in groundwater

抽提阶段	污染物	PNEC (mg/L)	比例( $n=72$ )		
			RQ<0.1 (%)	0.1<RQ<1 (%)	RQ>1 (%)
抽提前期 (第一轮监测)	1,2-二氯苯	0.188	68.06	6.94	25
	1,4-二氯苯	0.188	74.58	10.17	15.25
	氯苯	0.168	72.22	0	27.78
	苯	0.136	94.44	2.78	2.78
	总石油烃	0.114	0.00	22.22	77.78
抽提中期 (第三轮监测)	1,2-二氯苯	0.188	52.54	22.03	25.42
	1,4-二氯苯	0.188	73.61	9.72	16.67
	氯苯	0.168	62.5	15.28	22.22
	苯	0.136	80.56	12.5	6.94
	总石油烃	0.114	0.00	51.39	48.61
抽提后期 (第五轮监测)	1,2-二氯苯	0.188	91.53	5.08	3.39
	1,4-二氯苯	0.188	94.44	5.55	0
	氯苯	0.168	86.11	5.56	8.33
	苯	0.136	86.11	8.33	5.56
	总石油烃	0.114	0.00	66.67	33.33

如表 2 所示,多相抽提治理措施有效降低了地块的生态风险,5 种污染物具有高生态风险(RQ>1)的样品数占比逐渐减小,低生态风险(RQ<0.1)的点位比例逐渐增大.1,2-二氯苯、1,4-二氯苯、氯苯、总石油烃存在高生态风险的点位比例分别由抽提前期的 25%、15.25%、27.78%、77.78%降低至抽提后期的 3.39%、0%、8.33%、33.33%.苯的高生态风险点位占比均维持在较低水平,在 2.78%~6.94%之间波动,5 种污染物

中总石油烃 RQ>1 的比例最高.此外,1,2-二氯苯、1,4-二氯苯、氯苯和苯 4 种污染物大部分点位均为低等生态风险,而总石油烃 RQ<0.1 的点位比例均为 0,所有点位均存在中等~高等生态风险.地下水中总石油烃对生态系统造成的风险仍然需要重视,应在后续的长期监测中密切关注.

## 3 结论

3.1 大型化工区浅层地下水中 1,2-二氯苯、1,4-二氯苯、氯苯、苯和总石油烃均存在不同程度的超标,污染物变异系数较高,表现出空间异质性和高度非均相性.采用多相抽提技术取得了良好的修复治理效果,地下水污染晕中心浓度明显下降,污染晕范围明显缩小,5 种污染物浓度局部出现反弹,总体上表现为显著下降趋势.

3.2 相关性分析结果表明,多相抽提前污染物之间具有较高的同源性和空间自相关性,多相抽提后污染物之间的相关性发生变化.地下水中 1,2-二氯苯、1,4-二氯苯、氯苯的浓度与深度之间有较为明显的正相关关系,苯和总石油烃主要为负相关关系,上层和深层污染物含量差别可达 3 个数量级.

3.3 多相抽提技术是一种原位高效、绿色低碳的土壤地下水联动修复治理技术.本研究采用的多相抽提治理措施全面降低了地块的生态风险,高生态风险(RQ>1)的点位比例大幅度减小,转化为低生态风险(RQ<0.1).但是地下水中总石油烃仍存在中等~高等生态风险的点位,对生态系统造成的风险需要重视.

## 参考文献:

- [1] Liu W, Yao H Y, Liu G B, et al. Suspect screening and risk assessment of pollutants in the wastewater from a chemical industry park in China [J]. Environmental Pollution, 2020,263:114493.
- [2] 宋易南,侯德义,赵勇胜,等.京津冀化工场地地下水污染修复治理对策研究 [J]. 环境科学研究, 2020,33(6):1345-1356.  
Song Y N, Hou D Y, Zhao Y S, et al. Remediation strategies for contaminated groundwater at chemical industrial sites in the Beijing-Tianjin-Hebei Region [J]. Research of Environmental Sciences, 2020,33(6):1345-1356.
- [3] Ciampi P, Esposito C, Bartsch E, et al. Pump-and-treat (P&T) vs groundwater circulation wells (GCW): which approach delivers more sustainable and effective groundwater remediation? [J]. Environmental Research, 2023,234:116538.
- [4] Pradhan B, Chand S, Chand S, et al. Emerging groundwater contaminants: A comprehensive review on their health hazards and remediation technologies [J]. Groundwater for Sustainable Development, 2023,20:100868.
- [5] Liu B, Huang B, Wang Z, et al. Homogeneous/heterogeneous metal-catalyzed persulfate oxidation technology for organic pollutants

- elimination: A review [J]. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 2023,11(3):109586.
- [6] 陈斌,徐江,周文军,等.有机污染场地土壤化学氧化耦合微生物修复技术[J]. *中国环境科学*, 2024,44(6):3280-3288.  
Chen B, Xu J, Zhou W J, et al. Chemical oxidation and microbial remediation coupled technology for the soil remediation of organic contaminated sites [J]. *China Environmental Science*, 2024,44(6): 3280-3288.
- [7] Mishra M, Singh S K, Kumar A. Microbe mediated remediation of environmental contaminants: Chapter 5-environmental factors affecting the bioremediation potential of microbes [M]. Cambridge UK: Woodhead Publishing, 2021:47-58.
- [8] 田蕾,胡立堂,张梦琳.低渗透石化污染场地多相抽提修复效率的数值模拟[J]. *中国环境科学*, 2022,42(2):925-935.  
Tian L, Hu L T, Zhang M L. A numerical simulation study on remediation efficiency of Multi-Phase Extraction (MPE) in petrochemical contaminated sites of low permeability [J]. *China Environmental Science*, 2022,42(2):925-935.
- [9] Stephen D. Using high resolution site characterization to improve remedy design and implementation [R]. Washington DC: Office of Superfund Remediation and Technology Innovation, 2015.
- [10] 姜林,梁竞,钟茂生,等.复杂污染场地的风险管理挑战及应对[J]. *环境科学研究*, 2021,34(2):458-467.  
Jiang L, Liang J, Zhong M S, et al. Challenges and response to risk management of complex contaminated sites [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2021,34(2):458-467.
- [11] 刘秀丽,崔成杨.饱和黏土中甲苯吸附性能及迁移规律的研究[J]. *环境工程*, 2016,34(S1):1049-1052.  
Liu X L and Cui C Y. Study of adsorption characteristics parameters and transport behavior of toluene in saturated clayed soil [J]. *Environmental Engineering*, 2016,34(S1):1049-1052.
- [12] 王刘炜,杨小东,侯德义.裂隙介质 VOCs 赋存迁移特征与场地修复难点[J]. *中国环境科学*, 2022,42(10):4780-4789.  
Wang L W, Yang X D, Hou D Y. VOCs in fractured aquifers: presence, migration characteristics, and difficulties for contaminated site remediation [J]. *China Environmental Science*, 2022,42(10):4780-4789.
- [13] 李韬.上海地区浅部水文地质条件对地下水污染物迁移的影响研究[J]. *上海国土资源*, 2018,9(2):78-83.  
Li T. Influence of shallow hydrogeological conditions on the migration of groundwater pollutants in Shanghai [J]. *Shanghai Land & Resources*, 2018,9(2):78-83.
- [14] 葛佳,陈敏.上海地区浅层土壤中污染物运移特征分析[J]. *上海国土资源*, 2017,38(4):93-96.  
Ge J and Chen M. Analysis of pollutant migration characteristics in shallow soil in Shanghai [J]. *Shanghai Land & Resources*, 2017,38(4):93-96.
- [15] HJ 25.2-2019 建设用地土壤污染风险管控和修复监测技术导则[S].  
HJ 25.2-2019 Technical guidelines for monitoring during risk control and remediation of soil contamination of land for construction [S].
- [16] HJ 639-2012 水质 挥发性有机物的测定吹扫捕集/气相色谱-质谱法[S].  
HJ 639-2012 Water quality-Determination of volatile organic compounds-Purge and trap/gas chromatography-mass spectrometer [S].
- [17] HJ 894-2017 水质 可萃取性石油烃(C10-C40)的测定 气相色谱法[S].  
HJ 894-2017 Water quality — Determination of extractable petroleum hydrocarbons (C10-C40)—Gas chromatography [S].
- [18] 张银天,游俊杰,王维,等.海南陵水潟湖典型持久性有机污染物的赋存、来源及生态风险[J]. *海洋环境科学*, 2024,43(4):619-626.  
Zhang Y T, You J J, Wang W, et al. Occurrence, sources and ecological risk of typical persistent organic pollutants in tropical coastal lagoons [J]. *Marine Environmental Science*, 2024,43(4):619-626.
- [19] 环办固体(2019)54号.化学物质环境风险评估技术方法框架性指南(试行)[S].
- [20] 赵建亮,应光国,魏东斌,等.水体和沉积物中毒害污染物的生态风险评估方法体系研究进展[J]. *生态毒理学报*, 2011,6(6):577-588.  
Zhao J L, Ying G G, Wei D B, et al. Ecological risk assessment methodology of toxic pollutants in surface water and sediments: A review [J]. *Asian Journal of Ecotoxicology*, 2011,6(6):577-588.
- [21] GB/T 14848-2017 地下水质量标准[S].  
GB/T 14848-2017 Quality standard for ground water [S].
- [22] 肖鹏,刘汉乐.饱和砂土中 DNAPL 污染物迁移过程及数值模拟[J]. *中国环境科学*, 2024,44(1):386-395.  
Xiao P, Liu H L. Transport processes and numerical simulation of DNAPL contaminants in saturated sandy soils [J]. *China Environmental Science*, 2024,44(1):386-395.
- [23] Ciampi P, Esposito C, Cassiani G, et al. A field-scale remediation of residual light non-aqueous phase liquid (LNAPL): Chemical enhancers for pump and treat [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2021,28(26):35286-35296.
- [24] 郑菲.典型 DNAPLs 在饱和多孔介质中的运移及修复研究[D].南京:南京大学,2015.  
Zheng F. Investigation on the migration and remediation of typical DNAPLs in saturated porous media [D]. Nanjing: University, 2015.
- [25] Bortoni S F, Schlosser R T, Barbosa M C. Numerical modeling of multiphase extraction (MPE) aiming at LNAPL recovery in tropical soils [J]. *Water*, 2019,11(11):2248.
- [26] 谭畅.LNAPLs 污染场地多相抽提数值模拟与修复方案优选[D].长春:吉林大学,2023.  
Tan C. Numerical simulation of multiphase extraction and remediation options for sites contaminated with LNAPLs [D]. Changchun: Jilin: University, 2023.
- [27] Sheng D, Meng X, Wen X, et al. Contamination characteristics, source identification, and source-specific health risks of heavy metal(loid)s in groundwater of an arid oasis region in Northwest China [J]. *Science of The Total Environment*, 2022,841:156733.
- [28] Li S, Zhao B, Jin M, et al. A comprehensive survey on the horizontal and vertical distribution of heavy metals and microorganisms in soils of a Pb/Zn smelter [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2020,400: 123255.
- [29] Karaoglu A G, Coptay N K, Akyol N H, et al. Experiments and sensitivity coefficients analysis for multiphase flow model calibration of enhanced DNAPL dissolution [J]. *Journal of contaminant hydrology*, 2019,225:103515.
- [30] Chen Y, Liu D, Ma J, et al. Assessing the influence of immobilization remediation of heavy metal contaminated farmland on the physical properties of soil [J]. *Science of The Total Environment*, 2021,781: 146773.
- [31] Cui X, Mao P, Sun S, et al. Phytoremediation of cadmium contaminated soils by *Amaranthus Hypochondriacus* L.: The effects of soil properties highlighting cation exchange capacity [J]. *Chemosphere*, 2021,283:131067.
- [32] Cattle J A, McBratney A B, Mienasny B. Kriging method evaluation for assessing the spatial distribution of urban soil Lead contamination [J]. *Journal of Environmental Quality*, 2002,31(5):1576-1588.
- [33] 徐铁兵,刘思言,阎秀兰,等.某化肥厂污染场地土壤和地下水中氨氮分布特征及其非致癌风险评估[J]. *环境污染与防治*, 2021,43(2): 211-216.  
Xv T B, Liu S Y, Yan X L, et al. Distribution characteristics and non-carcinogenic risk assessment of ammonia nitrogen in the soil and groundwater polluted by a chemical fertilizer contaminated site [J]. *Environmental Pollution & Control*, 2021,43(2):211-216.

作者简介: 陈窈君(1994-),女,江苏省盐城市,中级工程师,硕士,研究方向:污染场地调查和修复.发表论文 11 篇.1192603583@qq.com.