

石油化工储运场地土壤和地下水污染物迁移特征分析

Analysis of pollutant migration characteristics in soil and groundwater of petrochemical storage and transportation site

王岚婷 (中石化石油工程设计有限公司, 山东 东营 257000)

Wang Lanting (Sinopec Petroleum Engineering Corporation. Shandong Dongying 257000)

摘要: 在石油化工产品的运输、储存和加工过程中, 石油烃及其制备材料的泄露会对地下水、土壤和空气造成环境污染。本研究对某石油化工厂拆迁场地的土壤及地下水进行调查分析, 确定该场地污染物多为氯代烃以及 C10~C40 石油烃, 大多数为轻质非水相液体 (LNAPL), 测得超标重金属种类主要为镁、锑、锌、镉。通过对污染物浓度分布的扩散分析, 发现该场地主要污染源为废弃磺酸盐储罐, 且 LNAPL 在场地的横向迁移扩散趋势不明显。在该场地地下水水位埋藏较浅地区, 发现污染泄漏初期应尽早清除污染源。本文结合该场地实际情况对非水相流体 (NAPLs) 在多孔介质中的渗流与迁移特性进行了阐述与总结, 对类似的修复工程有借鉴意义。

关键词: 石油化工储运场地; 石油烃; 非水相流; 污染物迁移模拟

Abstract: During the transportation, storage, and processing of petrochemical products, the leakage of petroleum hydrocarbons and their preparation materials can cause environmental pollution to groundwater, soil, and air. This study investigated and analyzed the soil and groundwater of a petrochemical plant demolition site, and determined that the pollutants in the site were mainly chlorinated hydrocarbons and C10-C40 petroleum hydrocarbons, with the majority being light non-aqueous liquids (LNAPL). The types of heavy metals exceeding the standard were mainly magnesium, antimony, zinc, and cadmium. Through diffusion analysis of pollutant concentration distribution, it was found that the main source of pollution in the site is abandoned sulfonate storage tanks, and the lateral migration and diffusion trend of LNAPL on the site is not obvious. In the area where the groundwater level is buried shallowly at the site, the pollution source should be removed as soon as possible in the early stage of discovering a pollution leak. This article elaborates and summarizes the seepage and migration characteristics of non-aqueous fluids (NAPLs) in porous media based on the actual situation of the site, which has reference significance for similar restoration projects.

Keywords: Petrochemical storage and transportation site; Petroleum hydrocarbons; NAPL; Simulation of pollutant migration

0 引言

石油化工污染场地中释放到土壤环境的石油烃类污染物可能会威胁空气质量、水安全、人类健康和其他环境受体^[1]。本文针对华北某市石油化工厂拆迁场

地为研究对象, 分析污染物在环境中分布特征, 为类似场地污染防治、环境调查和修复提供基础资料, 并对多孔介质中 NAPL 渗流与迁移特性及其相关研究现状进行归纳总结, 对石油化工污染场地污染控制和修

复具有重要的指导意义。

1 场地概况

该化工厂占地面积 24000 平方米, 1985 年~2015 年间一直为化工厂。根据收集的资料, 结合现场钻探情况, 本次调查将 6m 内的土层分为 3 大层和 2 个夹层。各层地质特征自上而下分别为 1 层素填土、2 层粉土、2-1 层粉质黏土、3 层黏土以及 3-1 层粉土; 地下水埋深 0.43~0.87m。根据现场实地调查, 由于助剂厂的污染情况不均匀, 其中石油磺酸盐生产装置区域污染可能较为严重, 而其他区域污染程度较轻, 因此采用分区布点的方法, 对重点生产区进行布点调查。各调查点深度为 5~6m, 共取地下水样 7 组。厂区内点位如图 1。

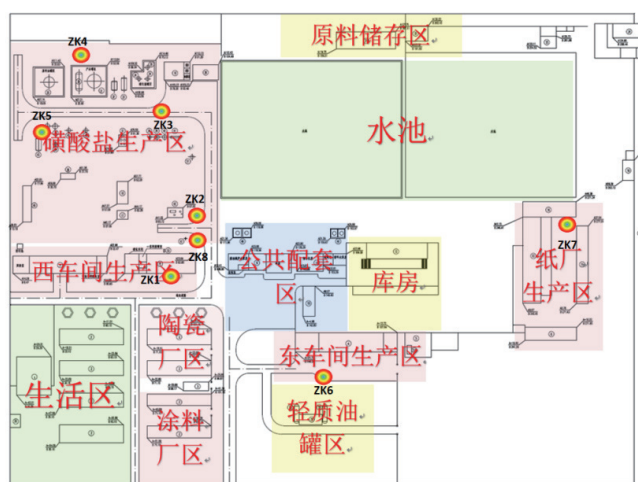


图 1 厂区调查点分布图

2 场地内污染物迁移分布特征

2.1 主要污染物检测结果

土壤污染调查结果表明, 该场地土壤已造成污染, 但所有地下水样品中 VOCs 均未检出。检测结果显示: 所有探井中均检测出浓度超标的挥发性有机污染物为三氯丙烷、苯乙烯, 以及石油烃 $C_{10}-C_{40}$; 另外还有一溴二氯甲烷、二溴氯甲烷、1,1,2,2-四氯乙烷、二溴氯甲烷、1,1,2-三氯乙烷等浓度超标的挥发性有机污染物出现在不同探井的不同层位; 测得超标重金属种类较少, 主要为镁、镉、锌、镉。

2.2 场地内污染物来源分析

本次调查检验出的挥发性有机物多为氯代烃以及 $C_{10}-C_{40}$ 石油烃, 大多数为轻质非水相液体 (LNAPL)。本次调查探井主要分布于磺酸盐生产区, 对原化工厂磺酸盐生产工艺进行分析, 得出石油磺酸盐生产装置设备及管道主要污染风险点为 500T/a 磺酸盐连续工艺装置、二氯乙烷精馏塔装置、卧式氨水罐、立式原料

油储罐、搪玻璃磺化剂储罐、磺化剂调配罐、原料油管线。

2.3 石油烃 ($C_{10}-C_{40}$) 迁移特征分析

该场地内地下水稳定在 0.43~0.87 m, 1 层素填土平均厚度 0.89m, 包气层土壤呈湿润或饱和状态。2 层粉土平均厚度 2.66m, 1、2 层渗透系数较大, 有利于污染物迁移; 而 3 层黏土渗透系数较小, 不利于污染物迁移, 对阻止污染物向深部迁移有正向作用, 各土层渗透系数见表 1 所示。绘制石油烃 ($C_{10}-C_{40}$) 土壤中不同深度的浓度分布图 (如图 2), 显然以最靠近磺酸盐储罐的 ZK3 和 ZK8 处浓度最高, 其中 ZK8 处石油烃污染且集中在 0.5m 左右的深度范围, ZK3 处污染物明显在垂直方向上迁移率较高, 在 2.5m 深度范围仍有较高浓度的石油烃检出。大多数探井在 4.5m 深度检测出的石油烃浓度均约为 0.5m 处浓度的 50%。

表 1 主要地层渗透系数平均值

层号	土层名称	垂直渗透系数 K_v	水平渗透系数 K_H
		cm/s	cm/s
1	素填土	5.40E-06	6.80E-06
2	粉土	1.92E-05	2.65E-05
3	黏土	6.86E-08	2.32E-07

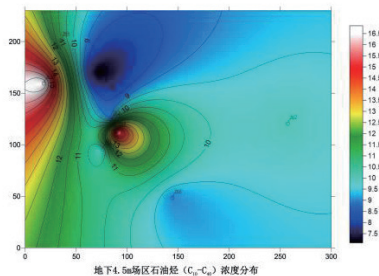
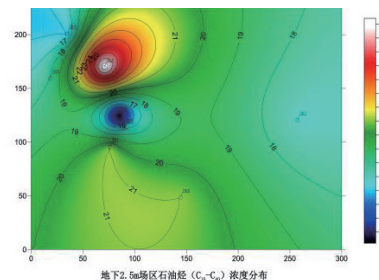
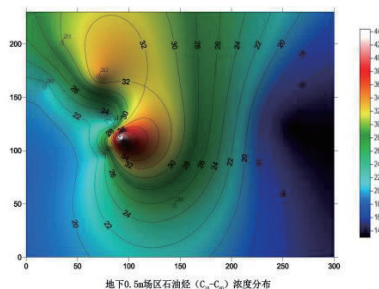


图 2 场地石油烃 ($C_{10}-C_{40}$) 在土壤中不同深度浓度分布图

自然条件下受到降雨影响,储罐或管道内残留污染物溢出罐体,经地表径流水平迁移,石油烃污染物在水平迁移过程中,在重力和毛细力作用下垂直向下运动,其中大多数残留在非饱和区的孔隙和裂隙中,部分穿过包气带直至饱和区,进入饱和区后在地下水水流作用下发生横向迁移^[2]。地表的石油烃污染物途经素填土、粉土、粉质粘土进入到3层黏土,在随向下过程中,分别以不同的相态滞留在土层各介质中^[3]。场地内3层黏土渗透系数较小,对NAPL有阻截、抑制扩散的作用^[6],因此污染物并未产生明显的横向迁移扩散。

3 场地石油烃 C_{10} – C_{40} 迁移数值模拟

根据场地实际情况,以探井 ZK3 至 ZK2 剖面建立二维数值模型。污染来源为 ZK3 临近储罐,地表初始污染物浓度按 34mol/m^3 进行计算, ZK3 与 ZK2 之间的水头差按照高差考虑。由于场地地下水埋深较浅,模型中两探井地下水埋深均小于 0.5m ,且包气层土壤呈湿润或饱和状态,地下水流以饱和流考虑,使用理查兹方程进行计算。污染物迁移使用经典的对流-弥散偏微分方程(ADE)^{[4][5]}。

为了查明污染物的平面扩散边界范围,整个场地以2层粉土为多孔介质考虑,流入边界与流出边界水头差按照 0.15m 考虑。其他参数及计算模型与剖面模型相同。剖面概念模型如图5所示。

通过有限元模型计算出一年后污染物迁移的分布,从污染物分布变化可以看出,石油烃在2层粉土中运移最快,且随着深度增加,迁移范围逐渐缩小。这是由于称为“残留 NAPL”的污染物被土壤颗粒保留,无法继续迁移^[6]。NAPL 在粉土层中经过一年的传输,最大传输距离也仅有 15m 。平原地区高差小,地下水流速较低,为减缓污染物迁移有着正向作用^[7]。通过数值模拟计算出的浓度分布结果与实际检测结果较为一致,这表明经典的对流-弥散偏微分方程(ADE)在模拟 NAPL 的迁移方面有很大的适用性^[8]。

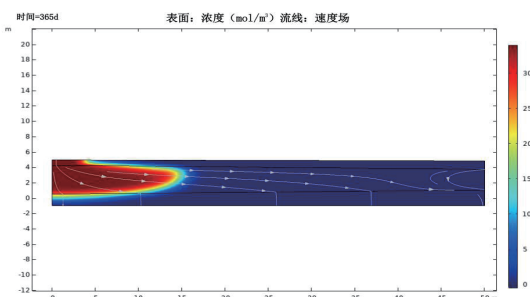


图3 污染物浓度分布剖面图 (365d)

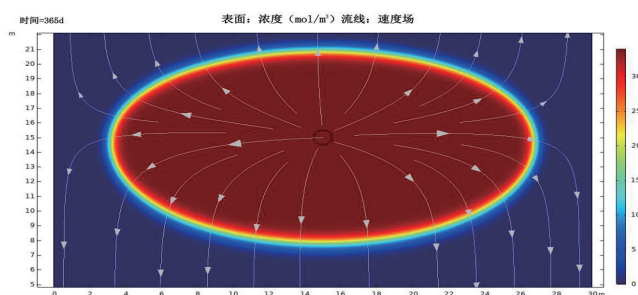


图4 污染物浓度分布平面图 (365d)

4 总结

本文调查场地内石油磺酸盐生产装置设备及管道中残留污染物溢出罐体,经地表径流水平迁移,其投影范围内的土壤也收到了污染。本次调查检验出的挥发性有机物多为氯代烃以及 C_{10} – C_{40} 石油烃,大多数为轻质非水相液体(LNAPL)。测得超标重金属种类较少,主要为镉、锑、锌、镉。LNAPL 在场地的横向迁移扩散趋势不明显,通过数值模拟计算出该场地内石油烃污染物一年的最大迁移距离约为 15m 且集中在2层粉土。建议地下水水位埋藏较浅地区,发现污染泄漏初期应尽早清除污染源,并对污染土壤进行修复,防止污染物进一步扩散。

参考文献:

- [1] 谷广锋,曹兴涛,刘铭辉等. 滨海地区石化行业地下水污染物迁移转化研究[J]. 中国石油和化工标准与质量,2022,42(11):93-95.
- [2] 陈峰,欧前美,王凌文. 某储罐泄露场地土壤和地下水污染特征分析[J]. 广东化工,2020,47(08):117-119.
- [3] 从辉,牛真茹,张有军等. 某典型污染场地地下水中氯代烃类的污染分布及迁移转化分析[J]. 环境污染与防治,2023,45(10):1343-1351.
- [4] 杜兆宁,黄勇. 基于FEFLOW的油库污染物渗漏模拟研究[J]. 能源与环保,2022,44(03):42-47.
- [5] 郭芷琳,马瑞,张勇等. 地下水污染物在高度非均质介质中的迁移过程:机理与数值模拟综述[J]. 中国科学:地球科学,2021,51(11):1817-1836.
- [6] 沈欢,黄勇,苏悦等. 裂隙介质中LNAPL 污染物迁移研究进展[J]. 环境科技,2021,34(02):68-72.
- [7] 张家兴,王楠. 渗漏区地下水水位波动对石油类污染物迁移影响模拟研究[J]. 环境科学与管理,2023,48(11):79-83.
- [8] 鞠天宇. 石化场地地下水典型复合有机污染物迁移规律研究[D]. 哈尔滨:东北农业大学,2023.