

DOI: 10.13671/j.hjkxxb.2015.0737

陆强, 李辉, 林匡飞, 等. 2016. 上海浦东某氯代烃场地地下水污染现状调查[J]. 环境科学学报, 36(5): 1730-1737

Lu Q, Li H, Lin K F, et al. 2016. Investigation of chlorinated hydrocarbons in groundwater from a typical contaminated site in Pudong District, Shanghai [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 36(5): 1730-1737

上海浦东某氯代烃场地地下水污染现状调查

陆强, 李辉*, 林匡飞*, 刘勇弟, 吕树光

华东理工大学资源与环境工程学院, 国家环境保护化工过程环境风险评价与控制重点实验室, 上海 200237

收稿日期: 2015-09-06 修回日期: 2015-11-04 录用日期: 2015-11-04

摘要: 氯代烃曾经广泛用作工业清洗剂, 由于过度使用和储存不当, 造成严重的土壤和地下水污染. 本研究选取上海浦东某 1, 1, 1-三氯乙烷 (1, 1, 1-TCA) 污染场地作为研究对象, 连续 5 年观测了 75 个监测井的地下水样品氯代烃分布. 采用吹扫捕集和气相色谱联用法检测了地下水样品中氯代烃的种类和浓度, 运用 GMS 软件构建了污染场地水文地质模型和氯代烃污染羽分布图. 结果表明, 氯代烃污染羽主要分布在 5 个区域, 面积达 5000 m² 左右, 深度主要在地下 4~8 m 的粘土层中, 污染土壤和地下水总量为 50000 m³ 左右; 2 号区域的污染情况最为严重, 氯代烃浓度范围为 10~1700 mg·L⁻¹, 发现 50 m³ 左右的自由相 (DNAPL). 研究结果将为揭示该场地污染物迁移转化规律, 为后续的人体健康风险评估和制定修复方案提供数据支撑.

关键词: 氯代烃; 污染场地; 地下水; 污染调查

文章编号: 0253-2468(2016)05-1730-08 中图分类号: X523 文献标识码: A

Investigation of chlorinated hydrocarbons in groundwater from a typical contaminated site in Pudong District, Shanghai

LU Qiang, LI Hui*, LIN Kuangfei*, LIU Yongdi, LÜ Shuguang

State Environmental Protection Key Laboratory of Environmental Risk Assessment and Control on Chemical Process, School of Resources and Environmental Engineering, East China University of Science and Technology, Shanghai 200237

Received 6 September 2015; received in revised form 4 November 2015; accepted 4 November 2015

Abstract: Chlorinated hydrocarbons (CHs) as cleaning solvents in manufacturing factories widely contaminate soil and groundwater due to their extensive usage and inappropriate disposal practices. This study is focused on a site contaminated by 1, 1, 1-Trichloroethane (1, 1, 1-TCA) in Pudong district, Shanghai. CHs in groundwater samples from 75 monitoring wells during 5 years were determined using purge/trap-GC system, and the hydrologic model of the site and the map of CHs plume distribution were constructed by Groundwater Modeling Software (GMS). The results show that 5 plumes of contaminated groundwater covered an area about 5000 m² with volume of 50000 m³, located in the 4~8 m clay bed underground. The concentration of CHs in the No. 2 plume ranged from 10 to 1700 mg·L⁻¹, including about 50 m³ of dense non-aqueous phase liquid (DNAPL). This study gives insight into the migration and transformation of CHs in the site.

Keywords: chlorinated hydrocarbons; contaminated site; groundwater; pollution investigation

基金项目: 国家自然科学基金 (No.41003031, 41273109); 环保部公益性行业科研专项 (No.200909089, 201109013); 教育部高校博士点基金优先发展领域项目 (No.20110074130002); 上海市青年科技启明星计划项目 (No.12QA1400800); 中国博士后科学基金资助项目 (No.2012M510811); 中央高校基本科研业务费专项资金 (No.WB1014004)

Supported by the National Natural Science Foundation of China (No.41003031, 41273109), the National Environmental Protection Public Welfare Science and Technology Research Program of China (No.200909089, 201109013), the Specialized Research Fund for the Doctoral Program of Higher Education (No.20110074130002), the Shanghai Rising-Star Program (No.12QA1400800), the China Postdoctoral Science Foundation (No.2012M510811) and the Fundamental Research Funds for the Central Universities (No.WB1014004)

作者简介: 陆强 (1986—), 男, E-mail: qianglu@mail.ecust.edu.cn; * 通讯作者 (责任作者), E-mail: huili@ecust.edu.cn; E-mail: kflin@ecust.edu.cn

Biography: LU Qiang (1986—), male, E-mail: qianglu@mail.ecust.edu.cn; * **Corresponding author**, E-mail: huili@ecust.edu.cn; E-mail: kflin@ecust.edu.cn

1 引言(Introduction)

氯代脂肪烃曾经广泛用于机械、电子、皮革、干洗行业和化工企业(Stroo *et al.*, 2003; Scheutz *et al.*, 2011),但由于储存和处置不当,已经造成全球数千个场地的土壤和地下水污染。据统计,目前世界上许多国家存在大量的氯代烃污染场地,特别是发达国家,由于工业高度发展,污染场地数量多、种类全、危害严重。美国环保局检测的美国 39 个小城镇地下水供水的水源地及常用场地的结果表明,有 11 种挥发性的氯代链烃在未处理过或处理过的地下水中都被检出,其中,检出率最高的是三氯乙烯及三氯甲烷,分别是 36% 及 31%(卢杰等,2008)。德国 Bitterfeld 地区经过近百年的化学工业发展,当地的地下水及土壤受到了氯代烃的严重污染,涉及的土壤和地下水面积达 25 km²,约有 2 亿 m³的地下水遭受污染(Susanne *et al.*, 2004),成为欧洲最臭名昭著的氯代烃污染场地。

随着我国经济社会的快速发展、产业结构的优化及国家“退二进三”政策的推进,许多污染企业陆续搬出城市中心区。由于管理不善和历史遗留问题,绝大多数搬迁企业都会发生原址的土壤和地下水污染。何江涛等(2005)针对我国北方某城市浅层地下水进行了有机污染物的调查,发现在局部地区出现了严重的氯代烃污染,四氯化碳(CT)、四氯乙烯(PCE)、三氯乙烯(TCE)和三氯甲烷(CF)是污染区主要的污染物,其中,TCE 与 PCE 污染程度严重,最高浓度分别达到了 63.74 μg·L⁻¹ 和 487.55 μg·L⁻¹。路国慧等(2009)选择了沈阳地区主要河流的沿岸地下水及地表水其进行了卤代烃的分析,调查发现,13 个检测的井点中有 1 个站点井水里的 1,2-二氯乙烷(101.1 μg·L⁻¹) 超标,30 个地表水站点的样品里有 6 个站点的卤代烃化合物浓度超过了我国生活饮用水的卫生标准。俞光明等(2007)对杭州市浅层地下水里的有机污染物进行了调查,发现杭州市的浅层地下水中除了四氯化碳之外还含有其它的卤代烃,包括三溴甲烷、1,1-二氯乙烯、三氯乙烷、三氯甲烷和四氯乙烯,调查工业区、垃圾场和农业区浅层的地下水有机污染情况时发现存在明显的潜在的危害作用,

1,1,1-TCA 主要作为建筑材料、清洗剂和金属除油剂使用。由于不恰当的储存及处置产生的泄漏导致 1,1,1-TCA 已经成为大多数工业污染场地地

下水中普遍存在的污染物之一(Groster *et al.*, 2006)。美国 EPA 筛选的“国家优先场地名录”中受到 1,1,1-TCA 污染的场地数量为 393 个,大约占总数的 30%(USEPA, 2012)。1,1,1-TCA 在地下水厌氧条件下可以脱氯生成一系列低氯产物(1,1-DCA、1,1-DCE、CA、VC),这些产物较 1,1,1-TCA 毒性大而且稳定(Scheutz *et al.*, 2011),它们经常同时出现在污染场地地下水中。

基于此,本研究选取上海浦东某 1,1,1-TCA 典型污染场地,调查场地地下水中氯代烃污染物种类和浓度分布情况,并通过 GMS 软件描绘出该场地地下水中氯代烃污染羽分布及迁移规律,以期为该场地的健康风险评估和今后可能的污染场地修复工作提供技术支持。

2 材料与方法(Materials and methods)

2.1 场地概述

该场地之前主要从事汽车空调系统的生产,在生产过程中,一度使用氯代烃类物质(1,1,1-三氯乙烷,TCA)对金属部件进行除油处理。场地上使用的其它化学品包括润滑油、机油、柴油、煤油和液压油等。该氯代烃污染场地整体形状不规则,占地面积约为 98600 m²(图 1)。场地西面有一条约 400 m 的河流,通向更西边的一条南北走向的小河,进而汇入黄浦江的一条支流,而该支流向东具有通往东海的出口。

场地内 101A 车间北面原有一块三氯乙烷原料桶的存储区;101A 车间南面原有一个老 TCA 清洗单元,运行于 1996—2006 年,据了解,期间三氯乙烷年消耗量约 240 t;101B 车间北面另有一座新 TCA 清洗单元,较前一单元 6 年后投入使用,已于 2008 年 5 月被拆除。另外,101B 车间南面及 102 车间南面自从工厂成立早期就是三氯乙烷和油类等原料的堆放区域,区域内并无污染隔离措施(图 1)。此次研究共安装 75 口监测井(图 1)。

2.2 样品采集

本研究使用 Sample ProTM(Type MP-SPK-6P-T, QED, USA)采集地下水样品。为了保证采集到的地下水样品具有代表性,在样品采集前抽出 3~5 倍体积的井中地下水,直到地下水的温度、pH、溶解氧(DO)及电导率(EC)稳定。样品采集的同时,测定地下水的 pH、DO、EC 值。将采集到的样品迅速转移到 40 mL 的挥发性有机物分析瓶(VOA)中。瓶子用带

有聚四氟乙烯膜塞子的盖子封口,保存在 4 °C 左右的保温箱中,运送到实验室进行分析。

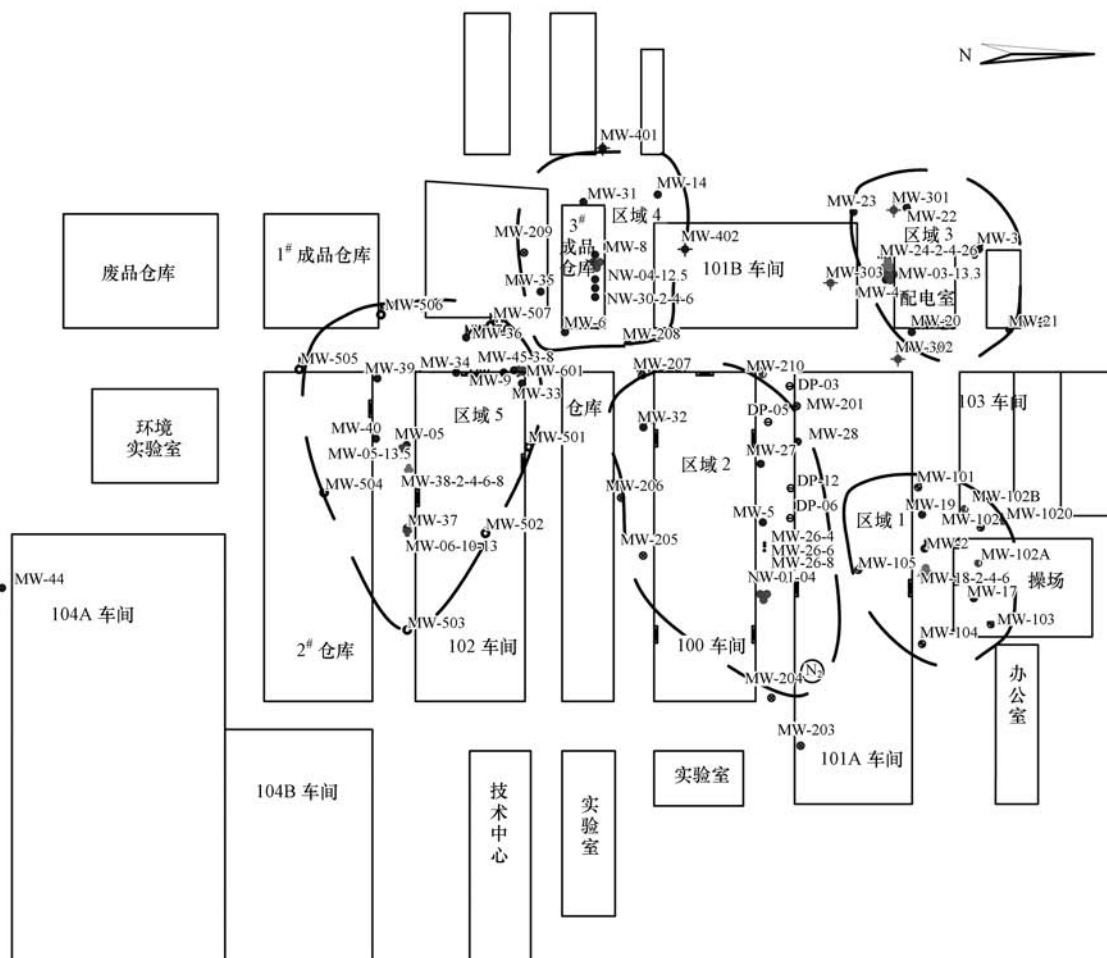


图1 场地功能区域与井位分布图(图中井位编号 DP 代表 DNAPL 监测井, MW 和 NW 代表地下水监测井,其中 MW-26-4 为丛井,代表地下水监测井编号 26, 虑管深度 4 m, 其余类推)

Fig.1 Functional area and wells location of the site

2.3 仪器与试剂

仪器:吹扫捕集装置(Tekma Atomx), Agilent 7890A 气相色谱仪。

试剂:氯代烃混合标准溶液购买自 Accustandards(USA), 替代品(甲苯-d8, 4-溴氟苯、二溴氟甲烷)购买自 Accustandards(USA), 高纯氮。

2.4 分析方法

吹扫捕集条件:捕集管型号 OI-10#; U 型管(5 mL); 气体流量 $40 \text{ mL} \cdot \text{min}^{-1}$; 最初捕集温度 $20 \text{ }^\circ\text{C}$ (根据环境温度); 解吸温度 $180 \text{ }^\circ\text{C}$; 烘烤温度 $210 \text{ }^\circ\text{C}$; 吹扫时间 11 min; 解吸时间 4 min; 阀温度 $110 \text{ }^\circ\text{C}$; 传输线温度 $110 \text{ }^\circ\text{C}$; 烘烤时间 2 min; 样品间的洗涤次数为 2 次。

气相色谱条件: Agilent 7890A 气相色谱; Agilent

化学工作站; 毛细管色谱柱 (DB-VRX $60 \text{ m} \times 0.25 \text{ mm (ID)} \times 1.4 \text{ } \mu\text{m}$); 进样温度 $240 \text{ }^\circ\text{C}$; 柱流速 (氮气) $2 \text{ mL} \cdot \text{min}^{-1}$; 初始温度 $45 \text{ }^\circ\text{C}$, 保持 0 min; 升温程序: $12 \text{ }^\circ\text{C} \cdot \text{min}^{-1}$ 升至 $190 \text{ }^\circ\text{C}$, 保持 2 min; 运行时间 12.3 min; 分流比为 20:1; 终止运行温度 $235 \text{ }^\circ\text{C}$, 保持 0 min; 传输线温度 $230 \text{ }^\circ\text{C}$ 。本研究中 5 种氯代烃的检出限为 $0.5 \text{ } \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ 。

2.5 数据处理

本研究利用 GMS (Version 7.1) 进行数据处理, 采用克里金空间插值法。首先考虑的是各个井位浓度在空间位置上的变异分布, 确定对一个待插点值有影响的距离范围, 然后用此范围内的采样点污染物浓度值来估计待插点的属性值, 描绘场地地下水污染现状。

3 结果与讨论 (Results and discussion)

3.1 污染场地水文地质

3.1.1 地质构造模型的建立 根据钻井时取得的静力触探数据对场地内的土壤进行分类,确定每个监测井垂直方向上的土层分布状况.该场地土壤主要分为回填土、粉质粘土、粉质砂土、淤泥质粉质粘土、淤泥质粘土、淤泥质砂质粉土和淤泥质粘质粉土.据此首先在 GMS (Version 7.1) 软件中用 Borehole 模块描绘出检测井的空间位置,由软件自动形成监

测井之间的断层带及分配滑动面代号,勾画出监测区域边界后,构建区域内不规则三角形网络 (Triangulated Irregular Network, 简称 TIN), 最终绘制整个污染场地中监测井所代表区域的地下三维地质实体 (Solid) 构造图 (图 2), 以便了解水文地质状况.

所构建的实体表明,浦东污染场地地层构造较为简单,各地层层次分明,应该是上海地处长江出海口,属冲积平原的原因.区域内地表为 1 m 左右的填土层,主要为褐色,中到低可塑性;以下是 1~3 m 的粉质粘土层;再下面为 4 m 左右的淤泥质粉质粘土层,两层中间部分区域夹杂有粉质砂土及淤泥质

砂质粉土层;场地最下部是淤泥质粘土层,主要为灰色,低可塑性,部分位置含薄砂层.

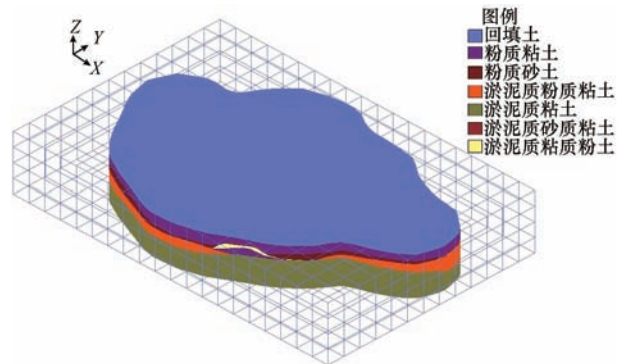


图 2 场地三维地质构造模型 (X 轴正向代表北向)
Fig.2 3D Geological structure model of the site

3.1.2 地下水流向 利用油水界面仪测量地下水水位,根据测量结果了解地下水水流方向.地下水高程测量结果和地下水流向如图 3 所示,场地内地下水位无明显差异与变化趋势,地下水流向总体上为由东南流向西北.但在 MW-4、MW-5 和 MW-8 附近区域出现地下水“山峰”,这可能是由于场地内管道泄漏导致的.

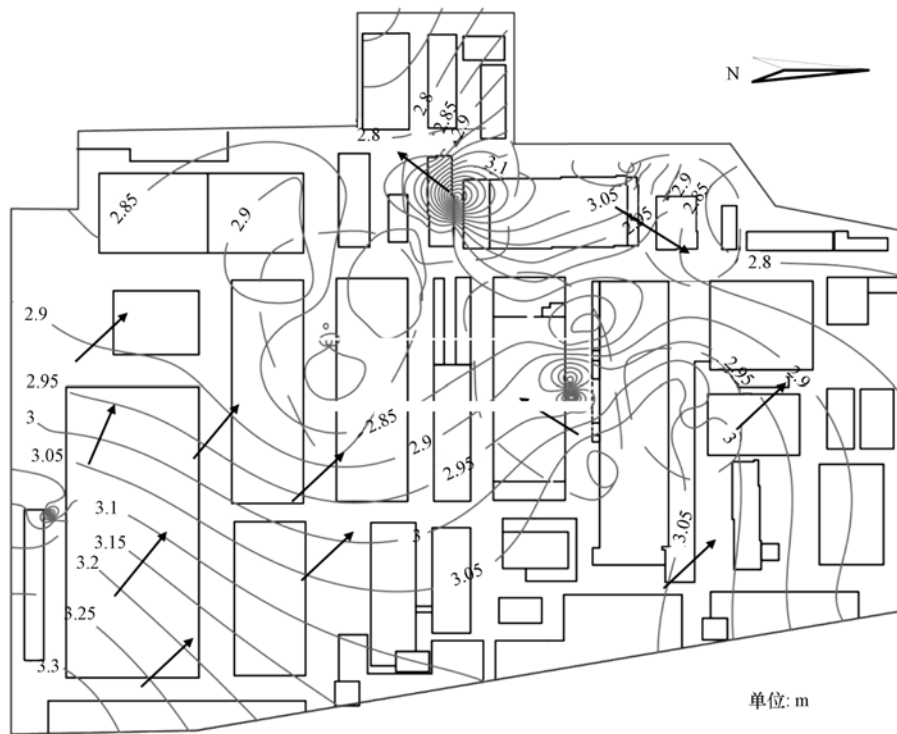


图 3 场地地下水高程图
Fig.3 The groundwater elevation chart of the site

3.2 污染场地污染羽分布情况

分别于 2011 年 3 月 9 日、4 月 29 日及 5 月 13 日在浦东污染场地进行了 3 次采样,将场地内 75 口监测井分成了 5 个区域.综合水质分析结果,将氯乙烯(VC)、氯乙烷(CA)、1,1-二氯乙烯(DCE)、1,1-二氯乙烷(DCA)和三氯乙烷(TCA)共 5 种氯代烃的浓度进行加和,把监测井的地理位置数据与氯代烃浓度数据相结合,构成一个新的数据库,将该数据库导入到 GMS(Version 7.1)中,手动选择每组数据的特定属性,用 GMS 软件分别绘制出 5 块区域的污染物总量分布图,分析每块区域各自的污染特点.

3.2.1 区域 1 污染羽分布 1 号区域中污染物总量检出浓度均在 $20 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 以下,各井位中 5 种氯代烃的浓度见表 1.多深度关联井中, MW-18-2 显示出此区域内的污染物最高浓度,约 $16 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$. MW-103 监测井中污染物浓度最低,仅有 $1.2 \text{ } \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$. 在 MW-18-2、MW-18-4、MW-18-6 这一组多深度关联井中污染物浓度依次递减,显示了污染物在地表浅层聚积,向地下渗透困难的状况.

表 1 区域 1 各污染物浓度

Table 1 The concentration of each CH in the area 1 $\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$

井位编号	VC	CA	DCE	DCA	TCA
MW-2	15.5	405	12.2	141	21.4
MW-17	126	384	393	23.5	ND
MW-18-2	77.2	8690	1080	6010	12.2
MW-18-4	69.6	6650	350	3360	6
MW-18-6	ND	21.8	ND	0.9	ND
MW-19	ND	ND	21.5	1.5	ND
MW-101	107	ND	ND	ND	ND
MW-102	14.3	1070	3.1	2.7	2.3
MW-103	ND	ND	ND	ND	1.2
MW-104	ND	ND	ND	1.2	3.7

注:ND 表示未检出.

从污染物总量分布图(图 4)上来看,1 号区域污染羽以 MW-18-2-4-6 一组多深度关联井为中心,呈环状向四周扩散.污染羽到达 MW-2 及 MW-17 地下监测井时氯代烃总浓度降至 $1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 以下.总体上 1 号区域污染范围较小,就整个场地而言污染程度较轻,污染物迁移扩散模式简单.

3.2.2 区域 2 污染羽分布 2 号区域污染情况最为严重,各井位中 5 种氯代烃的浓度见表 2. MW-210、DP-01、DP-03 及 DP-16 四口监测井中氯代烃总量均接近甚至超过 $1000 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 水平, MW-210 更是

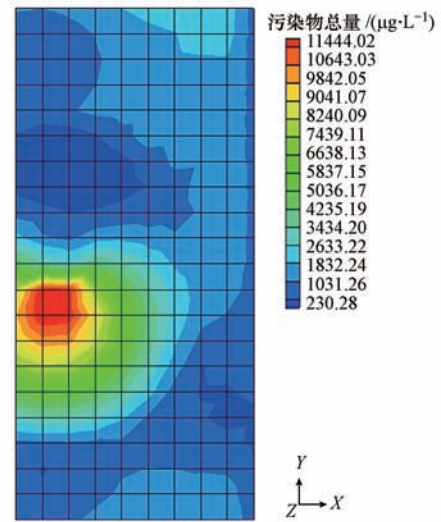


图 4 区域 1 污染物总量分布图(X 轴正向代表北,Y 正向代表西,下同)

Fig.4 The distribution of total CHs of the area 1

整个污染场地中污染物浓度最高的井位. MW-05 监测井中氯代烃浓度与该区域其他监测井数据相比差异较大,表现出独特的低浓度特性,可能是处于地下水水位较高区域,污染物迁出量较大造成的.

表 2 区域 2 各污染物浓度

Table 2 The concentration of each CH in the area 2 $\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$

井位编号	VC	CA	DCE	DCA	TCA
DP-01	ND	46300	5940	189000	340000
DP-03	3680	62600	ND	310000	211000
DP-05	16.3	2320	75	7390	39200
DP-16	ND	56700	1840	7920	405000
MW-201	50	43500	105	4460	2320
MW-203	ND	ND	ND	ND	5.6
MW-205	ND	ND	ND	ND	ND
MW-206	ND	ND	ND	ND	ND
MW-207	ND	ND	ND	ND	0.6
MW-210	579	82700	4680	206000	971000
MW-26-4	154	7780	741	35600	96200
MW-27	50	5560	50	12500	1880
MW-28	ND	574	ND	1.8	1.4
MW-32	ND	9.1	ND	58.6	137
NW-01-14	212	298	5190	326000	1370000

注:ND 表示未检出.

2 号区域与 1 号区域最大的不同就是区域内有两个明显的高浓污染物聚集点,在 GMS 软件中可清楚地看到两个污染源分别位于 MW-210 和 NW-01 监测井附近,该区域位于 101A 车间南面已拆除的 TCA 清洗单元,该清洗单元运行时间为 1996—

2006 年.可能因为长时间的清洗过程中不规范的操作及废水排放,造成了该区域污染最为严重,并且场地总体水位变化并不明显,使得地下水流动缓慢,污染物扩散较为缓慢.2 号区域污染物总量分布图(图 5)中,两块污染羽在 100 车间中段偏西处有交汇迹象.另外,两块污染羽并不完整,有向 1 号和 3 号区域运动的趋势.

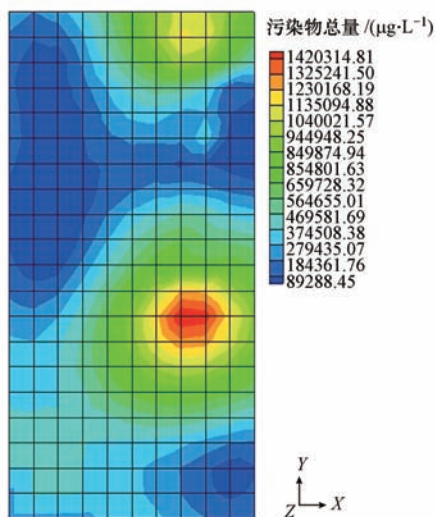


图 5 区域 2 污染物总量分布图

Fig.5 The distribution of total CHs of the area 2

3.2.3 区域 3 污染羽分布 3 号区域污染状况介于 1 号和 2 号场地之间,各井位中 5 种氯代烃的浓度见表 3.MW-24-2 监测井为污染物浓度的最高点.与 1 号区域类似,多深度关联井 MW-24-2、MW-24-4、MW-24-6 显示出浓度依次下降的趋势,反映了污染物在浅层地层的积累现状.

表 3 区域 3 各污染物浓度

Table 3 The concentration of each CH in the area 3 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$

井位编号	VC	CA	DCE	DCA	TCA
MW-3	ND	ND	ND	ND	ND
MW-20	24.5	799	252	2030	105
MW-21	2.3	72.9	16.1	2.2	ND
MW-22	ND	ND	ND	ND	ND
MW-23	ND	ND	ND	ND	ND
MW-04	41.7	4330	256.6	3150	795
MW-24-2	6.58	1180	129	8280	922
MW-24-4	31.66	2200	204	152000	ND
MW-24-6	223	4150	336	60400	152

注:ND 表示未检出.

3 号区域内氯代烃的迁移扩散现象十分明显(图 6).污染羽中心位于 MW-24 地下水监测井附

近,浓度在 $600\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 左右,聚集区域呈狭小扁平状,而后迅速以环状方式扩散开来,污染物浓度在区域边缘降至 $1\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 以下.

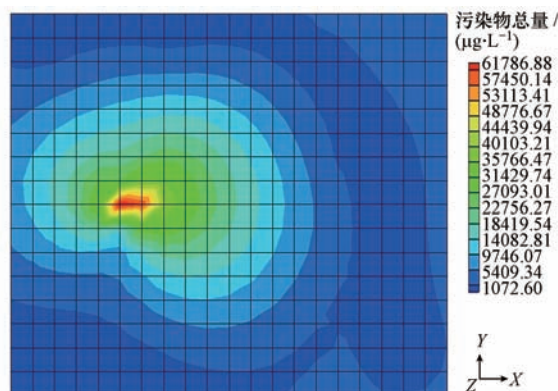


图 6 区域 3 污染物总量分布图

Fig.6 The distribution of total CHs of the area 3

3.2.4 区域 4 污染羽分布 4 号区域总体污染情况(图 7)不太严重,只在 MW-30 多深度关联井系列中有高浓度的污染物,表现为区域内的一个污染源.各井位中 5 种氯代烃的浓度见表 4.MW-08、MW-35 监测井中污染物浓度低于污染源,可能是污染物迁移扩散的结果.

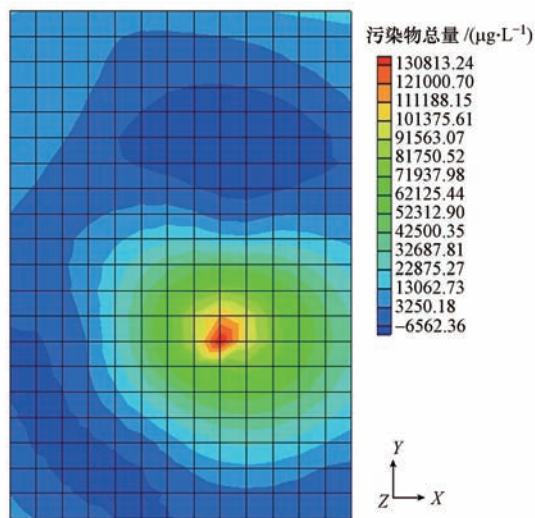


图 7 区域 4 污染物总量分布图

Fig.7 The distribution of total CHs of the area 4

4 号区域的污染现状与 3 号区域有相似之处,污染源附近氯代烃浓度不是太高,没有因为迁移阻力而形成大面积的污染物聚集.此区域现为油品仓库,氯代烃物质积累较少,可能是没有形成 2 号区域的大面积高浓污染物聚集区的一个原因.

表 4 区域 4 各污染物浓度

Table 4 The concentration of each CH in the area 4 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$

井位编号	VC	CA	DCE	DCA	TCA
MW-06	ND	ND	7.55	4.54	1.74
MW-08	500	2110	3890	76200	232000
MW-30-2	ND	ND	ND	ND	ND
MW-30-4	ND	9.49	11.75	4.89	1.65
MW-30-6	32.57	168.1	45.14	14.18	5.25
MW-31	ND	ND	ND	ND	ND
MW-35	16	30200	27.89	12200	557
MW-208	402	10100	2.2	355	11.2
MW-209	220	33000	8.04	7.22	38.58

注:ND 表示未检出.

3.2.5 区域 5 污染羽分布 5 号区域污染状况仅次于 2 号区域,污染物浓度最大值出现在 MW-38-6 和 MW-38-8 两口监测井中,是该区域的污染源.各井位中 5 种氯代烃的浓度见表 5.其他井位中, MW-10、MW-37、MW-38-2 和 MW-38-4 中污染物浓度均在 $100\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 附近. MW-34、MW-36、MW-45-3、MW-601 监测井中氯代烃总量在 $1\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 以下.

表 5 区域 5 各污染物浓度

Table 5 The concentration of each CH in the area 5 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$

井位编号	VC	CA	DCE	DCA	TCA
MW-10	154.96	33700	590	22100	34700
MW-33	ND	195.2	0.56	1.96	ND
MW-34	ND	9.47	2.83	261.4	218.5
MW-36	455	25700	2270	32500	919
MW-37	79	23100	133	23700	115000
MW-38-2	1310	31100	3940	337000	154000
MW-38-4	103	63500	378	39100	421000
MW-38-6	ND	3.02	ND	6.32	1.2
MW-38-8	ND	24.77	37.25	1880	5000
MW-39	3.22	34.42	50.86	92.7	53.73
MW-40	ND	4.39	ND	6.73	ND
MW-45-3	ND	5	ND	1.78	2.2
MW-45-8	ND	3.77	ND	1.22	1.56
MW-501	ND	3.84	ND	1.04	1.38
MW-503	ND	3.58	ND	0.74	1.03
MW-505	ND	3.62	ND	0.82	0.96
MW-506	ND	3.71	ND	0.75	1.01
MW-507	ND	3.37	3.12	1.67	1.03
MW-601	7.49	146.1	43.34	240.8	38.57

注:ND 表示未检出.

如图 8 所示,5 号区域高浓污染物聚集区域较 3、4 号区域稍大,污染羽形状不规则,显然是受到场地内地下水流向的影响,对照前述 4 块区域的污染

羽形状,可以看出,污染物均有向西北方向运动的趋势.5 号区域污染羽末端浓度约为 $10\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 左右,明显高于 3、4 号区域,说明该区域是 2 号区域之外的又一个治理重点.

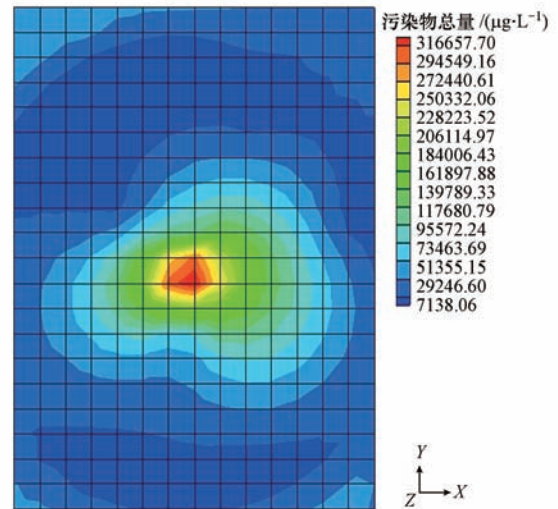


图 8 区域 5 污染物总量分布图

Fig.8 The distribution of Total CHs of the area 5

3.2.6 场地地下水总体污染羽分布 将 5 片研究区域的氯代烃总量数据汇总,再绘制出浦东场地的整体污染物分布图(图 9).可以看出,场地内的污染物主要集中在 2 号区域,尤其是以 NW-01 污染源为代表,此点位附近氯代烃总浓度超过 $1000\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$.5 号区域 MW-38-2-4-6-8 多深度关联井附近显示有一污染物聚集区(浓度在 $400\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 左右),形成了一个相对独立的污染羽,但仅与 2 号区域污染羽末端水平相当.其他区域内污染程度较轻.

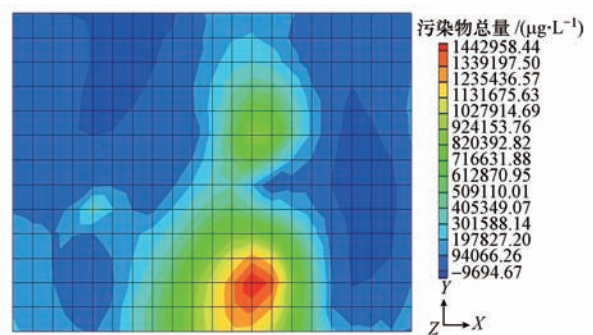


图 9 场地地下水污染物总量分布图

Fig.9 The distribution of total CHs of the site

3.2.7 场地 DNAPL 分布 2 号区域地下水出现了自由相(DNAPL),因此,本文对 2 号区域的地质构造进行了详细的剖析.图 10 所示的是 2 号区域两

个污染源之间的地层剖面,剖面最底层为淤泥质粘土层,其上大多为淤泥质粉质粘土,仅在 MW-210 监测井处有一层粉质砂土;再向上依次为粉质砂土、砂质粘土及填杂土。

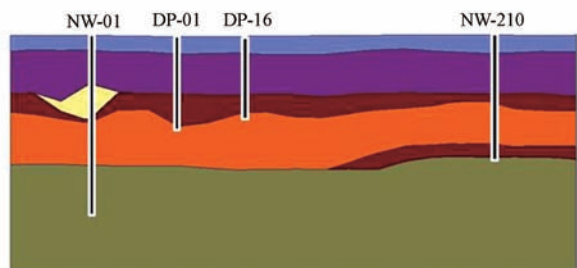


图 10 场地 2 号区域地层剖面图

Fig.10 The stratum profile of the area 2

目前研究认为,砂质土壤有利于 DNAPL 污染物迁移扩散,而粘质土壤对 DNAPL 污染物有阻截、抑制扩散的作用(Dickson *et al.*, 2003).按照这一观点,DP-01、DP-16 监测井深度较浅,仅到达淤泥质粉质粘土层上部,井底部有漏斗形构造对于氯代烃的积累有利,有很大几率形成 DNAPL 池.NW-01 监测井深度达地下 14 m,已近到达淤泥质粘土层,这里透水性极差,也不利于污染物的扩散,估计氯代烃主要被限制在粉质砂土层中,但由于监测井对天然底层有破坏作用,作者认为氯代烃污染物有可能深入到不透水层,并积累.MW-210 的情况与以上 3 口监测井类似,这里不予赘述.如若按照打井数据所描绘的地层结构表达的地理信息完全正确,可以按照以上结果对以后的场地修复提出以下建议:氯代烃污染物在粉质砂土层大量积累,假如利用吹脱等物理化学方法先行对场地进行修复,需要将汲水井打至地下 4~8 m 的深度;若 NW-01 监测井确实已破坏了地层结构,使 DNAPL 池中的污染物下渗至不透水层,需要对该点位进行特殊处理。

4 结论(Conclusions)

该场地氯代烃污染物主要分布在 5 个区域,占地面积 5000 m²左右,污染羽深度在地下 4~8 m 的粘土层中,污染地下水总量 50000 m³左右.2 号区域

的污染情况最为严重,发现自由相 50 余 t,氯代烃污染浓度范围为 10~1700 mg·L⁻¹.该区域污染物主要是由于原 TCA 清洗单元不合理的清洗和排放造成了地下水的污染,该区域内污染物的迁移扩散趋势不明显.建议在污染物浓度调查的基础上,进行人体健康风险评估,为可能进行的场地修复提供数据支撑.该场地附近河流较多,建议在厂区西边至厂界以外区域布设地表水监测点,连续观察污染物的迁移扩散情况,并根据监测结果采取防扩散措施。

责任作者简介:李辉(1979—),男,副研究员,博导,主要研究方向为污染场地地下水生态毒理效应;林匡飞(1963—),男,教授,博导,主要研究方向为污染场地调查、风险评估及修复。

参考文献(References):

- Dickson S E, Thomson N R. 2003. Dissolution of entrapped DNAPLs in variable aperture fractures: Experiments and empirical model development [J]. *Environmental Science & Technology*, 37: 4128-4137
- Grosten A, Edwards E A. 2006. A 1, 1, 1-trichloroethane-degrading anaerobic mixed microbial culture enhances biotransformation of mixtures of chlorinated ethenes and ethanes [J]. *Applied Environmental Microbiology*, 72(12): 7849-7856
- 何江涛,李焯,刘石. 2005. 浅层地下水氯代烃污染的天然生物降解[J]. *环境科学*, 26(2): 121-125
- 路国慧,杨永亮. 2009. 沈阳地区河水及沿岸地下水中卤代烃的污染特征[J]. *岩矿测试*, 28(4): 316-320
- 卢杰,李梦红,潘嘉芬. 2008. 有机氯代烃污染地下水环境的治理与修复[J]. *山东理工大学学报(自然科学版)*, 22(4): 27-30
- Scheutz C, Durant N D, Hansen M H, *et al.* 2011. Natural and enhanced anaerobic degradation of 1, 1, 1-trichloroethane and its degradation products in the subsurface—a critical review[J]. *Water Research*, 45(9): 2701-2723
- Stroo H F, Unger M, Ward C H, *et al.* 2003. Remediating chlorinated solvent source zones[J]. *Environmental Science & Technology*, 37(11): 224-230
- Susanne H, Holger W, Arno K. 2004. Attenuation reactions in a multiple contaminated aquifer in Bitterfeld (Germany) [J]. *Environmental Pollution*, 129: 277-288
- USEPA. 2012. Search Superfund Site Information [OL]. 2012-09-24. <http://cfpub.epa.gov/supercpad/cursites/srchsites.cfm>
- 俞光明,刘红樱. 2007. 杭州市浅层地下水有机污染及其风险初步评价[J]. *资源调查与环境*, 28(3): 198-204