

上海某氯代烃污染场地抽水试验研究

邱月峰

上海建工环境科技有限公司

DOI:10.12238/eep.v7i12.2379

[摘要] 通过上海某氯代烃污染场地地下水修复现场抽水试验,验证抽出处理技术用于该场地污染地下水修复的可行性及获取抽出-处理工程设计所需要的水文地质参数,同时增设污染物浓度监测井,了解抽出处理过程中氯代烃类污染物的浓度变化特征。本次抽水试验最大降深度3.91m,对应的抽水影响半径 $R=30.64\text{m}$,抽水试验测得渗透系数 K 为 $2.53\text{E}-03\text{cm/s}$,属透水级。研究表明该场地实施抽出处理是可行的,同时可采取注水回灌措施减缓抽水量下降趋势,但此过程也影响地下水的流动方向。同时;随着抽水的进行,污染物的浓度总体显现降低的趋势。

[关键词] 氯代烃; 抽水试验

中图分类号: TV53+3 文献标识码: A

Pollution distribution of chlorinated hydrocarbon in groundwater of a contaminated site in shanghai

Yuefeng Qiu

Shanghai Construction Environmental Technology Co., Ltd.

[Abstract] A field pumping test for groundwater remediation in a chlorinated hydrocarbon contaminated site in Shanghai was carried out to verify the feasibility of P&T for the contaminated groundwater remediation in this site and to obtain the hydrogeological parameters required engineering design. Meanwhile, pollutant concentration monitoring wells were added to understand the concentration variation characteristics of chlorinated hydrocarbon pollutants during P&T. The maximum drop depth of this test is 3.91m, the pumping influence radius $R=30.64\text{m}$, and the hydraulic conductivity K measured in the pumping test is $2.53\text{E}-03\text{cm/s}$, which belongs to the permeable level. The study showed that it is feasible to implement P&T in this site, and water injection can be used to slow down the decline trend of the water pumped during the restoration process, but this process also affects the flow direction of groundwater. Meanwhile, With the progress of pumping, the concentration of pollutants decreased obviously.

[Key words] chlorinated hydrocarbons; P&T

引言

氯代烃(CAHs)作为工业生产中的有机溶剂、金属脱脂剂、干洗剂和工业生产原料等得到广泛的应用^[1]。在氯代烃类有机溶剂的使用、生产、运输、存储的过程中,由于跑冒滴漏及管理处置不当等原因,通过泄露、地表渗透等途径进入地下水环境中,造成了土壤和地下水的严重污染^[2-4]。目前,针对地下水污染,国内外主要的治理技术有:抽出-处理技术(pump and treat, P&T)、水力隔离技术、曝气修复技术(Air sparing, AS)、多相抽提(Multi-Phase Extraction, MPE)、生物修复技术、可渗透反应格栅技术(Permeable Reactive Barriers, PRB)、自然衰减法等。其中抽出-处理技术相对成熟,工艺成本较其它修复技术较低,因此在地下水污染控制及修复中应用广泛^[5,6]。

本文以上海某氯代烃污染场地为研究对象,在前期场地调

查及风险评估的技术上,综合评价多种地下水修复技术方案后,采用抽出处理技术。因此在制定详细的工程设计前,应根据本场地水文地质条件、污染空间分布等,在污染场地现场开展抽水试验中试。本研究通过抽水试验验证采用抽出处理技术的可行性,同时监测抽水试验过程中地下水中污染物浓度变化,为后续工程设计及施工提供理论依据,并获取相关设计参数。

1 材料与方法

1.1 污染场地概述

场地历史上主要为各种机加工小作坊,但由于管理缺失,存在违建、群租、污水直排等乱象,造成了场地内地下水的严重污染。根据场地调查结果显示,地块内地下水受氯代烃污染严重,主要污染物为二氯甲烷($2.14 \times 10^4 \mu\text{g/L}$, 调查最大值)。地块内场地现状为搬迁后空地,场地区域内地势平坦。

表1 区域水文地质条件特征

水文地质层	地质时代	成因类型	分布特征	主要岩性	顶板埋深(m)	厚度(m)
潜水含水层	Qh3	河口-滨海	普遍分布	黏性土		
微承压含水层	Qh1	河口-滨海	④a: 东北部 ⑤ ₂ : 古河道区域	砂质粉土	④a: 7.0~13.4 ⑤ ₂ : 14.3~35.0	④a: 2.5~15.0 ⑤ ₂ : 3.6~18.0
第一承压含水层	Qp32	河口-滨海	普遍分布	砂质粉土、粉砂	上段: 16.2~20.6 下段: 24.1~38.0	上段: 3.2~6.9 下段: 3.2~45.2
第二承压含水层	Qp31	河口-滨海	均有分布	粉细砂	53.7~87.5	13.5~27.8
第三承压含水层	QP21	河口-滨海	均有分布	粉细砂、细砂	122~139	11~22
第四承压含水层	Qp12-3	河流	均有分布	细砂、含砾中粗砂	154~176	24~27

表2 抽水试验成果表

序号	延续时间/h	稳定时间/h	稳定水位高程/m	抽水孔水位降深 S/m	观测孔1水位降深 S ₁ /m	观测孔2水位降深 S ₂ /m	含水层厚度/m	涌水量 m ³ /d	影响半径 /m	渗透系数 m/d	渗透系数平均值 m/d
1	23.5	10	0.37	3.91	0.49	0.37	7	15.69	30.64	2.19	2.19

表3 压水试验成果表

试验孔位置	孔口标高(m)	水位/孔深(m)	第四系地层名称(m)		试验段起、止深度(m)	
地块内	4.57	1.25/10.0	砂质粉土		2.50~9.50	
最终流量(m ³ /s)	压力水头数(N/cm ²)	水柱压力(N/cm ²)	水管长度(m)	水管内径(m)	试验段长度(m)	试验孔半径(m)
0.00039	3.2	9.88	10	0.063	7	0.22
0.00035	2.9					
0.00036	3.1					
0.00034	2.6					
0.00032	2.2					
摩擦系数 f	重力加速度 g(m/s ²)	压力水头损失值 P(N/cm ²)	总压力 S(N/cm ²)	单位压力流量 q(L/min.m)	平均单位压力流量 q(L/min.m)	单位吸水量 w(L/min.m)
0.03	9.81	0.00	13.08	1.78951	1.66447	0.23778
		0.00	12.78	1.64359		
		0.00	12.98	1.66451		
		0.00	12.48	1.63499		
		0.00	12.08	1.58974		
计算公式			渗透系数 K(m/d)	适应条件		
K=0.525*w*lg(1.32*1/r)			0.2026	试验段底部距隔水层之厚度小于试验段长度		

注: 1m 水柱压力=0.98N/cm²=9.8kPa, 近似于 1N/cm²; 水在铁管中流动时的 f 值, 一般为 0.02~0.03; 地下静止水位面为压力计算零点。

1.2 区域水文地质条件

区域上第四系松散层中发育有潜水含水层、微承压含水层和第一、二、三、四承压含水层, 基本缺失第五承压含水层。各含水层因形成地质时代、水动力条件和成因类型的不同, 水文地质条件有较大差异。上述各含水层中, 与本项目污染相关的主要为潜水含水层, 微承压含水层。

根据区域水文地质监测资料, 上海地区潜水埋深通常在 0.5~1.0m 之间, 根据地块南侧潜水监测井自 2003 年以来水位动态监测结果, 该孔近年来水位标高在 1.5~3.7m 之间波动, 目前

水位标高在 3.2m 左右。潜水位年内变幅大小与相应时期大气降水量大小与持续时间有关。潜水水位普遍高于地表水位, 与附近地表水有一定水力联系。

1.3 工程地质条件

区域 70m 深度范围内的地基土均属第四纪沉积物, 主要由黏性土、粉性土和砂性土组成。根据各土层的地质时代、成因类型、物理力学性质等特征综合分析, 浅层地基土层划分为 7 个工程地质层和分属不同层次的若干个亚层: ①素填土、②灰黄色粉质粘土、③灰色淤泥质粉质粘土、③₁灰色砂质粉土、⑤₁₋₁灰

色粘土、⑤₁₋₂灰色粉质粘土、⑤₃灰~褐灰色粉质粘土、⑤₃灰色粉质粘土、粉质粘土互层、⑥暗绿色粉质粘土、⑦1-1灰黄色砂质粉土、⑦1-2灰黄~灰色砂质粉土、⑦2灰黄~灰色粉砂。

1.4 抽水试验

1.4.1 抽水试验布置

本次抽水试验共设抽水孔2个,观测井2个,以查明孔隙潜水地下水水位及含水层岩性。共布设潜水抽水试验2组,在试验井中测量其稳定水位,进行1次降深的潜水完整井稳定流抽水试验。抽水井布置位置位于地下水污染范围内,现场布置如下图1所示:

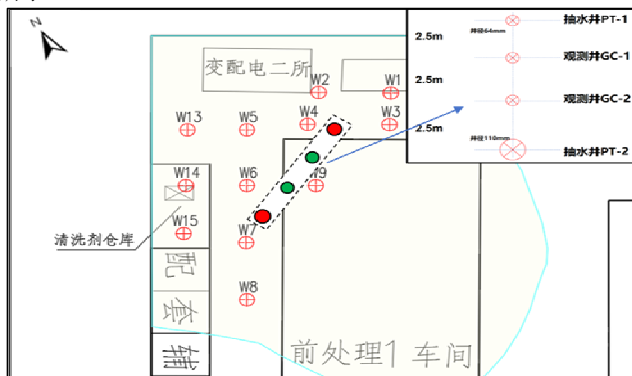


图1 地下水抽水试验布置示意图

1.4.2 成井方法

本次抽水试验井采用完整井,开孔口径220mm,管径110mm,井深10.0m,成井深度10.0m。为保证抽水试验顺利进行,试验井均采用增强PVC管,管外包扎80目尼龙网3层,回填滤料采用颗粒较小的石英砂,止水封孔采用膨润土。成井后按规范要求洗井,并达到试验要求。

1.4.3 试验方法

(1) 抽水试验。本次抽水试验为稳定流抽水试验,抽水试验含水层为孔隙水,根据《抽水试验规程》(YS/T 5215-2021)及《工程地质手册》(第五版)中计算渗透系数的有关公式,可采用《抽水试验规程》(YS/T 5215-2021)中5.3.6公式计算潜水含水层渗透系数及影响半径,即:

$$k = \frac{0.732Qlg \frac{r_2}{r_1}}{(S_1 - S_2)(2H - S_1 - S_2)}$$

其中: k —渗透系数(m/d); Q —抽水井涌水量(m^3/d); H —潜水含水层厚度(m); r —抽水孔与观测孔的距离(m); S —抽水井水位下降值(m)。

(2) 灌水试验。钻孔压水试验主要任务是测定裂隙岩体的单位吸水量,从而论证地基岩体的完整性和透水程度,为回灌作业提供重要依据。本次压水试验严格遵循《工程勘察通用规范》(GB55017-2021)、《水电工程钻孔压水试验规程》(NB/T 35113-2018)等相关国家及地方标准。选用压抽井作为试验点。

注水与观测: 开启注水装置,按预定压力梯度逐级加压,同时观测并记录流量变化,直至达到稳定状态。详细记录试验过程

中的压力、流量等参数,根据达西定律计算渗透系数,并进行数据分析和处理。

(3) 连续抽灌水试验。在地块内完成抽水及灌水试验获取相关参数后,进行连续抽水灌水结合试验(其中,两口抽水井进行抽水、观测井进行灌水)。连续抽灌水试验持续2个月,并对周边区域布置的12口污染监测井进行采样监测,考察抽出处理作用下地下水中二氯甲烷浓度变化分布规律。

2 结果与讨论

2.1 抽水试验结果分析

抽水试验开始前,通过污染监测井水位监测可知,本地地地下水流向为由南向北,该区域南侧有地表水,地下水由该河道进行补给。本次抽水试验为个观测孔的潜水完整井抽水试验,抽水试验最大降深3.91m,对应的抽水影响半径 $R=30.64m$,抽水试验测得渗透系数 K 为 $2.53E-03cm/s$,属透水性。涌水量为 $15.60m^3/d$ 。根据抽水试验得到的上述参数可知,该区域采取抽出-处理方式进行地下水污染修复具有可行性,能有效抽出该区域污染地下水^[7]。

2.2 抽压水试验结果分析

考虑到抽出-处理修复工程中抽水量较大,因此需采取清水回灌措施促进地下水抽出-处理修复,进而开展本次抽压水试验。本次抽压水试验,使用80井点降水泵抽水,QBY5-40F压水。抽水额定流量 $60m^3/h$,转速2900r/min,功率7.5kW;压水额定流量 $0-8m^3/h$ 。实际压水过程中,在压水流量 $6m^3/h$ 下进行,测得渗透系数 K 为 $2.33E-04cm/s$,属透水性。涌水量为 $27.84m^3/d$ 。根据抽压水试验结论可知,在抽压水过程中,能有效提高地下水流动性,从而提高地下水抽出-处理效果,但同时采取清水回灌方式可能对地下水中污染物进行稀释^[8,9]。

2.3 连续抽水试验的地下水污染监测结果分析

为研究场地内地下水实际抽出处理的修复效果,进行现场连续抽水试验,连续抽水期间,对试验区域内12口污染监测井进行持续采样,采样周期为3d、7d、14d、30d、60d。同时在开展抽出处理前采集了12口监测井二氯甲烷污染浓度,连续抽水期间污染区域地下水中二氯甲烷分布特征如图2所示。整个连续抽水试验过程中,抽水区域范围内二氯甲烷浓度持续降低,抽出处理工程前期14d时间内,区域地下水中二氯甲烷浓度降低较为明显,后续抽出处理过程中,地下水中污染物浓度降低速率逐渐放缓。同时,长期抽水情况下,单口井抽水量减少幅度较小,这与陈^[9]等发现的情况一致,该场地日抽水量的影响较小,区域地下水丰富,补给速度较快,可进行长期抽水,但随着时间推移,地下水抽出处理工序对实际场地内地下水中污染浓度降低效果逐渐减弱,说明抽出-处理技术在地下水污染修复过程中存在瓶颈期,单纯采用地下水抽出-处理技术,可能存在修复未能达标的情况,需根据地下水污染情况,采取与其他修复技术联用的组合工艺^[10]。如多相抽提、原位化学氧化^[11-13]。

3 结论

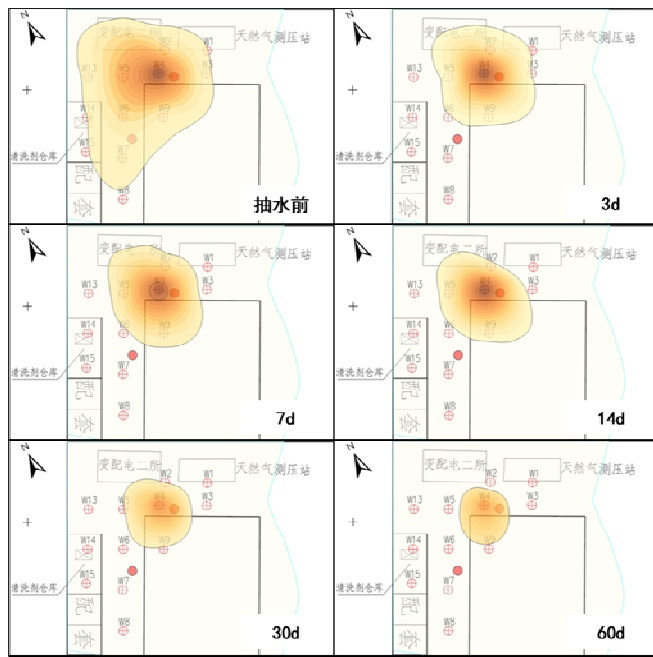


图2 连续抽水期间地下水二氯甲烷污染浓度分布

(1) 该污染场地水文地质条件有利于地下水抽出-处理工艺实施, 区域地下水补给较快, 区域地下水丰富, 可进行长期抽水, 抽出-处理技术在该污染场地应用是可行的。

(2) 抽出过程可抽出大量污染物, 地下水中的污染物浓度降低速度在前期较快, 随着时间的推移, 地下水抽出处理工序对实际场地内地下水中的污染浓度降低效果逐渐减弱, 地下水抽出处理技术在实际应用中存在瓶颈期, 在制定修复技术方案时应进行充分考虑, 可采用与其他修复技术联用。

[基金项目]

上海建工集团股份有限公司重点科研项目, “改性纳米零价铁材料制备及其在地下水修复中的应用” (No.23YJKF-28); 上海建工环境科技有限公司科研项目, “纳米铁基材料规模化制备及其应用” (No.42K2023K002)。

[参考文献]

[1] MORAN M J, ZOGORSKI J S, SQUILLACE P J. Chlorinated Solvents in Groundwater of the United States[J]. Environ Sci Technol,

2007,41(1):74-81.

[2] ANNABLE M D, BORDEN R C, BROOKS M C, et al. Chlorinated Solvent Source Zone Remediation[M]. Springer New York, 2014.

[3] LE Y, THOMPSON K E, VALSARAJ K T, et al. In-situ control of DNAPL density using polyaphrons[J]. Environ Sci Technol, 2003,37(19):4487-4493.

[4] MALAGUERRA F, CHAMBON J C, BJERG P L, et al. Development and sensitivity analysis of a fully kinetic model of sequential reductive dechlorination in groundwater[J]. Environ Sci Technol, 2011,45(19):8395-8402.

[5] 王文兵, 李春阳, 董纤凌, 等. 双碳背景下污染场地修复策略与技术前景[J]. 环境工程学报, 2023,17(01):188-196.

[6] 杜川, 李厚恩, 陈素云. 数值模拟技术在污染地下水抽出-处理运行中的应用[J]. 环境工程, 2023,41(07):102-108.

[7] 徐中华, 宗露丹, 王卫东, 等. 基于群井抽水试验的承压含水层水文参数反演分析[J]. 地下空间与工程学报, 2024,20(S1):180-187.

[8] 李东炎, 戚俊杰, 胡睿. 基于抽水试验的地下含水层水动力学参数分析[J]. 武汉大学学报(工学版), 2019,52(06):482-488.

[9] 陈莉娜, 滕加泉, 尹勇, 等. 有机氯农药污染场地地下水抽水试验[J]. 农业环境科学学报, 2012,31(06):1223-1229.

[10] 陈恺, 关林瑞, 王瑜瑜, 等. 基于数值模拟的地下水污染抽出-处理优化设计[J]. 环境工程, 2023,41(S1):13-20+116.

[11] 李学绅, 赵婧, 谢厦, 等. 原位化学氧化技术在某氯代烃污染场地地下水修复中的应用[J]. 化纤与纺织技术, 2023,52(02):50-52.

[12] 陈窈君. 多相抽提-原位化学氧化协同修复技术研究[J]. 环境科学与技术, 2023,46(02):1-9.

[13] 张云. 地下水原位化学修复数值模拟研究进展[J]. 环境工程, 2022,40(05):197-204+217.

作者简介:

邱月峰(1991--), 男, 汉族, 上海人, 中级工程师, 硕士研究生, 主要从事污染场地调查修复工作。