

# 有机氯农药污染场地地下水抽水试验

陈莉娜, 滕加泉, 尹 勇, 蒋 鹏, 张 华, 胡林潮\*

(常州市环境科学研究院, 江苏 常州 213022)

**摘 要:**伴随城市化进程和产业结构调整,我国出现许多污染场地亟待修复。通过某典型有机氯农药污染场地抽水试验论证抽出-处理修复方案应用于该污染场地地下水修复的可行性及获取抽出-处理工程设计所需要的参数,同时监测了特征污染物的浓度变化特征。该污染场地的地下水渗透系数为  $8.03 \text{ m} \cdot \text{d}^{-1}$ ,抽水井影响半径为  $117.1 \text{ m}$ ,长期抽水试验获得的单口井抽水量不低于  $170 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$ ,回灌速度达到  $7 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ 。结果表明:该污染场地实施抽水是可行的,地下水量满足后续抽出-处理修复工程,可通过自来水回灌减缓修复过程抽水量下降趋势,但此过程也影响地下水的流动方向。同时,抽水过程可抽出大量的污染物,越靠近污染区域,抽提污染物的效果越明显;随着抽水的进行,污染物的浓度总体显现降低的趋势。此外,自来水回灌可稀释地下水中的污染物。

**关键词:**有机氯农药;污染场地;地下水;抽水试验

中图分类号:X523 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2012)06-1223-07

## Conduction of a Pumping Test in a Typical Organo-chlorine Pesticide Contaminated Site

CHEN Li-Na, TENG Jia-quan, YIN Yong, JIANG Peng, ZHANG Hua, HU Lin-chao\*

(Changzhou Academy of Environmental Sciences, Changzhou 213022, China)

**Abstract:** During the process of industrial development and urban restructuring, a lot of contaminated sites evolved, that yield danger for human beings and the environment and therefore need do be remediated. In order to remediate contaminated sites a lot of remediation techniques are available. One of the conventional site remediation is the so called “pump & treat” technique, in which the groundwater is pumped and treated above the ground “on-site”. In order to examine the feasibility of pump-treat remediation on a specific site in Changzhou, contaminated with organo-chlorine pesticides and to obtain relative design parameters for the pump-treat remediation, a pumping test was conducted. During the pumping test contaminants concentrations were monitored. According to the pumping test, the permeability coefficient of this contaminated site was  $8.03 \text{ m} \cdot \text{d}^{-1}$ , the radius of influence was  $117.1 \text{ m}$ , respectively. The amount of single well pumping was not lower than  $170 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$  and the recharge was  $7 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$  at an average. These results indicated that the pump & treat remediation might be used for groundwater remediation at this site. The manner of recharge tap water could be used to slow down the decrease of water budget, but it affected the flow directions of groundwater. At the same time, the contaminants were pump out during the pumping process, and the closer to contaminated area, the more effectively it worked. Altogether, the concentrations of contaminants became lower during the pumping test conduction.

**Keywords:** organo-chlorine pesticide; contaminated site; groundwater; pumping test

有机氯农药如六六六在环境中具有高毒性、持久性和生物富集性等特征,对人体健康和生态环境均具有严重危害<sup>[1]</sup>。我国经于 1983 年停止生产和使用,但因其很难在环境中迁移转化,至今在环境中仍能监测

到不同含量的六六六<sup>[2]</sup>。随着我国城市化进程和产业转移步伐的加快,大量的化工企业搬迁或关停,从而涌现大量的各类型的污染场地亟待修复。农药(如滴滴涕、六六六、三氯杀螨醇等)污染场地是其中较为典型的一类,且大部分场地处于复、混合污染状态,进而增加了污染场地土壤和地下水修复工作的难度。隐蔽性、延缓性和难以逆转性的特点致使地下水污染修复周期长、费用高,难度大。发达国家在 20 世纪 80 年代就开始了地下水有机污染的修复研究,取得了重要进

收稿日期:2011-12-20

基金项目:江苏省环保科研计划项目(201015);常州市社会发展科技计划项目(CS20100014)

作者简介:陈莉娜(1984—),硕士,主要从事污染场地修复研究工作。

\* 通讯作者:胡林潮 E-mail:linchao.hu@hotmail.com

展<sup>[3-8]</sup>,而我国地下水污染研究及修复工程则刚刚起步<sup>[9]</sup>。目前国内外地下水有机污染治理技术主要有:抽出-处理技术(pump-treat)、水力隔离技术、曝气技术(Air sparging, AS)、生物修复技术、渗透反应格栅技术、监测自然衰减法等<sup>[10]</sup>。其中抽出-处理技术相对成熟,成本较其他方法低,而且修复周期也较短,是去除和控制地下水有机污染广泛采用的一种方法<sup>[11]</sup>。据最新的美国超级基金年度报告,选择抽出-处理地下水技术已逐渐减少,但其在地下水修复方面起着实质性的作用<sup>[12]</sup>,更适合我国化工企业遗留污染场地的地下水修复。

经前期场地污染调查与评估,本文所研究场地的土壤和地下水已受污染,需要修复。从工程造价及可操作性等方面综合评价多种地下水修复技术方案后,理论上得出抽出-处理技术处理该场地污染地下水最为合适。而抽出-处理修复技术的工程实施需要大量的实地参数的支撑,更重要的是确定污染物能够抽出,所以需要在污染场地现场实施小规模的水抽水试验。本研究通过抽水试验论证抽出-处理技术应用于该污染场地地下水处理的工程操作可行性,同时跟踪监测抽水试验过程中该场地特征有机污染物的变化,为后续修复工程提供理论依据并获取相关的设计参数。目前我国污染场地更多关注于土壤的修复,而该

技术应用于有机污染场地地下水处理在国内尚属首例,对以后相关污染场地地下水修复工作具有实践指导意义。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验场地概况

当地有机氯农药厂于1952年建厂并投入使用,长期生产氯碱及其衍生产物、农药(六六六)等有机化工产品。经过前期调查得出场地内地下水的主要超标特征污染物有:六六六( $1\ 658\ \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ ,调查最大值),苯( $283\ 000\ \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ ),氯苯( $5\ 620\ \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ ),二氯苯( $3\ 477\ \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ ),三氯苯( $3\ 780\ \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ )等。该场地地下水的污染与产品生产过程以及事故状态时所产生的跑、冒、滴、漏,物料存放、废水排放、废物废液管理不规范有密切关联。

抽水井位于地下水污染面积最大的新、老六六六车间区域。考虑到此区域也是土壤修复工程用地初选位置,因此预留土壤修复工程用地初选的西侧一带区域,将试验井布设在该区域东侧一带。井位大致位于土壤修复区域外侧、地下水修复区域范围内,北侧布置1口井(MW-1),南侧布置2口井(MW-2与MW-3),3口井布置呈三角形之势,井间距约40 m,具体位置如图1所示。

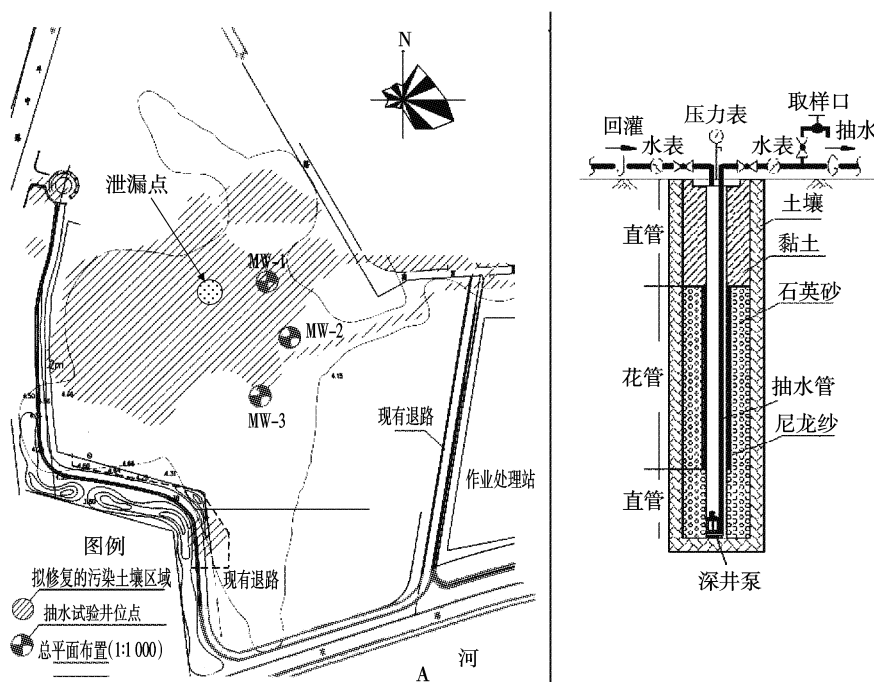


图1 污染场地中抽水试验井位及抽水井构造示意图

Figure 1 Map of pumps in contaminated site and structure sketch

经江苏省纺织工业设计研究院通过双桥静力触探测试获得该污染场地内的地质结构(自上至下20 m)分别为:杂填土(厚度1.3~2.2 m),粘土(厚度4.0~4.5 m),粉砂夹粉土(厚度4.7~7.2 m),粉细砂(厚度5.6~7.3 m),粉质粘土,至20 m未钻穿。

## 1.2 抽水试验井

抽水试验井的构造如图1所示。其中抽水井挖掘孔内径1000 mm。该地块地下含水层在地下10~18 m左右,含水层厚度约7.35 m,约18 m以下为透水性差的粉质粘土层,因而此次试验所用抽水井掘井深度均为20 m。抽水井井管的花管和直管都采用钢管,其中花管外径325 mm,内径313 mm,管长4 m。抽水井的井管总长大于20 m,其近地面直管段长度大于3 m(保证埋地部分为3 m),井底沉砂段0.5 m,并用5 mm钢板焊接封底,井管升出地面0.5~0.8 m,管顶焊接一片法兰,带法兰管井盖上分别焊接DN10 mm、DN65 mm和DN75 mm钢管短头各1根。其中:DN10 mm短管伸出井盖150 mm,用于安装压力表;DN75 mm管伸出井盖100 mm,用于连接回灌用自来水管;DN65 mm管在井盖2侧各伸出100 mm,用于焊接抽水井出水管。井泵为合金钢组合件4级深井泵(型号为200QJ20-54/4)。花管段过滤网为3层60目尼龙布,过滤料为4号石英砂。直管段井孔填封料为黏土。

## 1.3 抽水试验方案

(1)连续抽水试验:抽水井挖掘安装完成并经验收后,立即组织3口试验井72 h抽水试验。

(2)动水位稳定试验:以MW-1为抽水井,MW-2和MW-3为观测井。

(3)灌水试验:动水位下降试验完成后,72 h连续向3口试验井同时灌注自来水。

(4)抽灌结合试验:抽水井灌水试验完成后,在3口试验井之间,进行抽灌结合试验(其中MW-2井抽水,MW-1与MW-3井灌水)。为加快场地地下水的修复进度,充分利用修复工程资源,同时也为了避免抽水井泵、排水管道的二次拆装,节约修复经费,完成第一阶段抽水试验任务后,将立即转入第二阶段的长期连续抽水试验。

(5)长期连续抽水试验:长期抽水试验期间实施24 h连续值守,管理与维护抽水设备,使其能正常运行。

以上(1)和(2)是为了获得相关的地下水参数,(3)和(4)是为了验证回灌的可行性,而(5)是探究场地内地下水量是否能够满足长期后续的抽出-处理

过程。

## 1.4 水样采集及检测

每口井设计时都预留了取样口(阀门),将地下水分别灌入不同检测需要的采样瓶中(上海澳实分析检测有限公司提供)后送ALS按照USEPA80818、USEPA82700及USEPA8260c分别测定相关项目。采样时,水样必须小心采满,尽量避免水样溢出,以免保护剂被冲走,且瓶内不得有气泡。所有采样瓶采完水样后立即按原样封好瓶盖,盖紧,缩短瓶子开放的时间。采样后,将水样冷藏,等待送检。

## 2 结果与讨论

### 2.1 连续抽水试验

进行抽水试验前,测得3口井静水位分别为-2.44、-2.25 m和-1.97 m,由此可见,从MW-1至MW-3,由北向南,水位依次降低,地下水位南浅北深。该区域南边为A河,该区域地下水由A河补给,越靠近A河,地下水水位越高。连续抽水过程中3口井的抽水速度相对稳定,分别为8.02、9.42、12 m<sup>3</sup>·h<sup>-1</sup>。抽水试验结束时,MW-1、MW-2、MW-3的稳定动水位为-8.78、-11.62 m和-12.31 m。经计算,连续抽水试验期间,MW-1、MW-2与MW-3分别累计抽水591.75、779.49、885.07 m<sup>3</sup>。3口井共抽水2256.31 m<sup>3</sup>。因MW-3井离A河最近,所以其抽水速率、总抽水量最大,符合现实条件。

连续抽水试验期间相关特征污染物数据如表1所示。可以看出,整个连续抽水试验过程中,3口井抽出水检测出大部分场地内主要超标特征污染物。MW-1中污染物浓度基本呈现出随着抽水的进行而增加的趋势,其中抽水初期六六六(3.68~11.10 μg·L<sup>-1</sup>)就已超出荷兰地下水干预标准值(DIV-2009 荷兰土壤和地下水环境质量标准)。抽水18 h后检出的1,2,4-三氯苯(28.00 μg·L<sup>-1</sup>)也超出干预标准值。随抽水试验的进行,1,2,3-三氯苯(28.9~62.2 μg·L<sup>-1</sup>)的浓度也超过了干预标准。MW-2抽出水中的六六六、氯苯、1,2-二氯苯、1,4-二氯苯、1,2,3-三氯苯从抽水初期起就已超出标准,并一直延续到连续抽水结束。这些污染物浓度都呈现出在一定范围内波动的趋势。MW-3中的氯苯、1,2-二氯苯、1,3-二氯苯及1,4-二氯苯在抽水初期超出了标准。对比3口井抽出水中的污染物浓度,六六六与三氯苯浓度为MW-1>MW-2>MW-3,而氯苯、苯及二氯苯浓度为MW-3>MW-2>MW-1。该结果与前期调查得出场地内主要特

表 1 各井连续抽水试验中主要特征污染物浓度(μg·L<sup>-1</sup>)

Table 1 Concentrations of main contaminants in continuous pumping test(μg·L<sup>-1</sup>)

| 特征污染物     | 标准值    | MW-1 井 |       |       |        |        | MW-2 井 |          |          |          |          | MW-3 井   |          |          |          |          |
|-----------|--------|--------|-------|-------|--------|--------|--------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
|           |        | 2 h    | 8 h   | 32 h  | 52 h   | 72 h   | 2 h    | 8 h      | 32 h     | 52 h     | 72 h     | 2 h      | 8 h      | 32 h     | 52 h     | 72 h     |
| α-六六六     | 1.00 * | 0.86   | 0.78  | 1.84  | 4.70   | 8.50   | 3.10   | 1.16     | 1.60     | 0.97     | 1.03     | 0.15     | 0.06     | 0.05     | 0.05     | 0.05     |
| β-六六六     |        | 1.58   | 0.72  | 0.54  | 0.50   | 0.50   | 0.10   | 0.06     | 0.30     | 0.11     | 0.09     | 0.45     | 0.05     | 0.05     | 0.05     | 0.05     |
| γ-六六六     |        | 0.48   | 0.31  | 0.56  | 1.10   | 1.90   | 0.40   | 0.20     | 0.30     | 0.19     | 0.18     | 0.05     | —        | —        | —        | —        |
| δ-六六六     |        | 0.76   | 0.44  | 0.30  | —      | 0.20   | —      | —        | 0.20     | 0.05     | —        | —        | —        | —        | —        | —        |
| 氯苯        | 180.00 | 12.40  | 23.00 | 39.50 | 37.20  | 40.50  | 832.00 | 2 060.00 | 2 030.00 | 1 930.00 | 1 930.00 | 4 320.00 | 4 170.00 | 3 840.00 | 3 620.00 | 3 770.00 |
| 苯         | 100.00 | 2.60   | 4.40  | 6.20  | 5.40   | 5.80   | 21.10  | 18.70    | 22.70    | 25.50    | 25.60    | 29.30    | 20.50    | 24.60    | 23.40    | 39.60    |
| 1,3-二氯苯   | 50.00* | —      | —     | 2.00  | 3.00   | 6.00   | 7.00   | 4.00     | 7.00     | 7.00     | 7.00     | 57.00    | 62.00    | 71.00    | 71.00    | 72.00    |
| 1,4-二氯苯   |        | 2.00   | 8.00  | 15.00 | 16.00  | 26.00  | 83.00  | 96.00    | 130.00   | 143.00   | 151.00   | 595.00   | 441.00   | 485.00   | 496.00   | 492.00   |
| 1,2-二氯苯   |        | 2.00   | 6.00  | 9.00  | 8.00   | 17.00  | 112.00 | 60.00    | 91.00    | 108.00   | 105.00   | 282.00   | 274.00   | 257.00   | 270.00   | 267.00   |
| 1,2,4-三氯苯 | 10.00* | 5.00   | 28.00 | 52.00 | 145.00 | 236.00 | 92.00  | 35.00    | 51.00    | 29.00    | 31.00    | 4.00     | 1.00     | 2.00     | 2.00     | 3.00     |
| 1,2,3-三氯苯 |        | 2.30   | 8.80  | 28.90 | 62.30  | 62.20  | 32.00  | 9.90     | 15.50    | 9.90     | 12.00    | 1.80     | —        | 0.80     | 0.90     | 1.30     |

注:“—”表示污染物浓度低于检出限;“标准值”为《荷兰土壤和地下水环境质量标准(DIV,2009)》;“\*”表示总和。下同。

征污染物的分布趋势是一致的。结合井位看,MW-1 和 MW-3 较靠近污染区域,因而这两口井抽提出的地下水中污染物浓度较 MW-2 高,说明越靠近污染区域,抽提污染物的效果越明显。

六六六的 4 种异构体在其产品中所占的比例为:α-六六六 55%~80%、β-六六六 5%~14%、γ-六六六 12%~14%、δ-六六六 2%~10%<sup>[13]</sup>。因结构上的差异造成六六六 4 种异构体理化性质的差别,进而影响其在环境中的迁移转化行为。环境中六六六的稳定顺序大致为:γ-六六六>α-六六六>δ-六六六>β-六六六<sup>[14]</sup>,大量的 α-六六六可以转化为 β-六六六<sup>[15]</sup>。MW-1 初期抽出六六六污染物的前端,可能受到微生物作用,其中主要为 β-六六六;随着抽水的进行,抽出的 α-六六六/γ-六六六接近一般混合六六六中二者的比值范围(4~7)<sup>[13]</sup>,表明后续抽出的六六六受环境影响较小。

2.2 动水位稳定试验

第一阶段动水位下降试验测定了抽水井 MW-1、观测井 MW-2 和 MW-3 的水位变化(图 2),并阶段性记录 MW-1 的抽水量。此阶段 MW-1 共抽水 737.7 m<sup>3</sup>,抽水速度较为稳定,为 10.25 m<sup>3</sup>·h<sup>-1</sup>。第二阶段的水位恢复试验,观察 MW-1 停止抽水后水位回升情况,并定时记录动水位。根据 MW-1 抽水停止后恢复水位的观测数据(图 2),可见随着时间的延长,周围地下水补给,水位上升,水力梯度变小,回升速度逐渐减慢。3 口井计划保留并应用到后续的抽出一处理修复工程,结合该场地将来的规划,而无法布置于同一直线。又因试验时间有限,无法对抽水井进行 3

次降深抽水,但 3 口试验井构造属于承压含水层完整井,通过如下相关公式<sup>[16]</sup>可估算得该场地的渗透系数 K 为 8.03 m·d<sup>-1</sup>,抽水井的影响半径 R 为 117.1 m。

$$K=\frac{0.366\cdot Q\cdot\lg(r_2-r_1)}{m\cdot(S_1-S_2)}$$
$$\lg R=\frac{S_1\cdot\lg r_2-S_2\cdot\lg r_1}{S_1-S_2}$$

式中:K 为抽水井周围地下水的渗透系数(m·d<sup>-1</sup>);Q 为抽水量(m<sup>3</sup>·d<sup>-1</sup>),通过抽水过称对抽水量的记录算得 Q 为 245.89 m<sup>3</sup>·d<sup>-1</sup>;r<sub>1</sub>、r<sub>2</sub> 分别为观测井 MW-2 和观测井 MW-3 与抽水井 MW-1 的距离(m),根据测量得 r<sub>1</sub> 为 43.05 m,r<sub>2</sub> 为 84.15 m;S<sub>1</sub>、S<sub>2</sub> 分别为观测井 MW-2 和观测井 MW-3 的水位升降,即抽水过程中的水位下降量(m);m 为含水层厚度(m),根据地质调查,该处含水层为 7.35 m;R 为水力影响半径(m)。

试验进行到第 3 d 分别对 2 口井进行抽出水监测,结果见图 2。此阶段,仅 MW-1 单独抽水,与连续抽水试验时相比,其抽出水中六六六、氯苯、1,2-二氯苯、1,3-二氯苯、1,2,3-三氯苯、苯等浓度继续增加,说明靠近污染中心较高浓度的污染地下水随抽水的进行继续往抽水井方向渗透。MW-2 和 MW-3 作为观测井,受 MW-1 抽水的影响,除 MW-3 的六六六浓度增加,其余各污染物浓度都较连续抽水时低。

在此期间对 MW-1 和 MW-2 的抽出水进行了生物毒性试验检测分析。发光细菌急性毒性试验对 MW-1 评价结果为中毒性,而 MW-2 为低毒性;叶绿素荧光毒性检测结果发现两者均无毒性。由此说明,动水位下降试验时,抽水井 MW-1 中地下水污染物较

多,部分污染物浓度较高,毒性较未抽水井中的地下水高。

### 2.3 抽灌结合试验

考虑到后续抽出-处理修复工程中抽水量较大,需要通过自来水回灌以促进地下水修复工程的进度,进而开展了自来水回灌与抽灌结合试验。3 口井的灌水速度比较稳定,分别为 7.66、7.21、7.05 m<sup>3</sup>·h<sup>-1</sup>,可见向地下灌水是可行的。因之前对 MW-1 抽水较多,所以该井灌注速度最快,而 MW-3 地下水静止水位最浅,地下水补给最快,造成其回灌速度最小。在整个回灌与抽灌结合试验过程中,共灌入自来水 2 960.28 m<sup>3</sup>,抽提出地下水 3 060 m<sup>3</sup>。

由于灌水时不能采样,仅在抽灌结合试验中,监测了 MW-1 和 MW-3 的抽出水,相关污染物的浓度数据如表 2 所示。依据 3 口井同时灌水停止后立即采样监测结果(第 1 次),可见各种污染物浓度都较前阶段低,表明向井中灌入自来水后可稀释地下水中的污染物。第 2 次和第 3 次是抽灌结合试验进行 2 d 和 4 d 后各种污染物浓度监测数据,可见各种污染物浓度分别较第 1 次高,表明向抽水井中灌水影响地下水的流动方向。

### 2.4 长期连续抽水试验

为探究场地内地下水量是否能够满足后续的抽出-处理过程,进行了长达 5 个月的长期连续抽水试

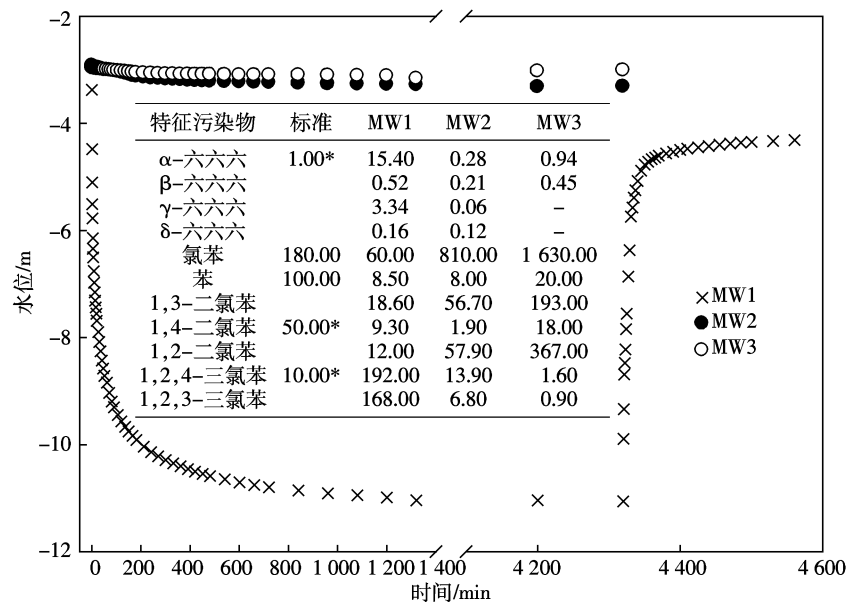


图 2 动水位下降试验中各井水位变化及污染物浓度(μg·L<sup>-1</sup>)

Figure 2 Water level change in dynamic water level drop test and contaminants concentrations(μg·L<sup>-1</sup>)

表 2 两口井抽灌结合试验中污染物浓度(μg·L<sup>-1</sup>)

Table 2 Contaminants concentrations during pumping-recharging combination test(μg·L<sup>-1</sup>)

| 特征污染物     | 标准     | MW-1 井 |        |        | MW-3 井 |          |          |
|-----------|--------|--------|--------|--------|--------|----------|----------|
|           |        | 第 1 次  | 第 2 次  | 第 3 次  | 第 1 次  | 第 2 次    | 第 3 次    |
| α-六六六     | 1.00*  | 1.72   | 24.80  | 37.00  | 0.10   | 0.11     | 0.24     |
| β-六六六     |        | 4.99   | 0.90   | 1.32   | 0.14   | 0.16     | -        |
| γ-六六六     |        | 0.46   | 6.80   | 10.6   | -      | -        | -        |
| δ-六六六     |        | 0.49   | 0.41   | 0.56   | -      | -        | -        |
| 氯苯        | 180.00 | 10.00  | 142.00 | 112.00 | 45.60  | 3 000.00 | 2 930.00 |
| 苯         | 100.00 |        | 16.30  | 16.90  | -      | 68.00    | 64.00    |
| 1,2-二氯苯   | 50.00* | 4.70   | 19.80  | 18.20  | 12.80  | 341.00   | 454.00   |
| 1,3-二氯苯   |        | 1.40   | 11.70  | 10.30  | -      | 49.40    | 64.70    |
| 1,4-二氯苯   |        | 5.70   | 16.80  | 14.50  | 27.70  | 693.00   | 795.00   |
| 1,2,4-三氯苯 | 10.00* | 30.60  | 249.00 | 320.00 | 0.60   | 3.70     | 12.30    |
| 1,2,3-三氯苯 |        | 13.50  | 116.00 | 111.00 | -      | 1.70     | 7.10     |

验。通过对每日抽水量数据的整理(图 3),得出 MW-1、MW-2 和 MW-3 平均日抽水量分别为 173.1、171.3、190.9 m<sup>3</sup>·d<sup>-1</sup>,总抽水量分别为 26 427、26 008、28 377 m<sup>3</sup>。由图 3 可见长期抽水情况下,3 口抽水井每日抽水量仅有小幅度的降低,对日抽水量的影响较小,说明该地区地下水丰富,补给速度快,可以长期抽水。

由表 3 可见,在此阶段,MW-1 中几乎所有污染物浓度都较前阶段检测出的结果大幅升高,随着抽水的继续而不断增加且严重超出荷兰地下水干预标准值。MW-2 中氯苯和 1,4-二氯苯随抽水时间的延长而浓度逐渐降低,苯的浓度在不断升高,其他污染物浓度变化则有所波动,但同样也都严重超出标准值。MW-3 中六六六和三氯苯到后期基本未检出,而氯苯、苯及二氯苯浓度一直在波动且仍超标。随着长时间抽水重污染区域的地下水已被抽至抽水井所在位

置。由此说明通过长期连续抽水,可将大量污染物抽出。此外,长期连续抽水区域影响面积很大,已经将非本场地所有的较高浓度的双(2-氯乙基)醚(数据未列出)抽出。

对第 45 d 和第 100 d 抽出的地下水也进行了生物毒性试验分析。发光细菌毒性监测结果表明,MW-1 和 MW-2 第 100 d 抽出水对发光细菌平均相对发光度的抑制作用较第 45 d 的大,而 MW-3 现象则与之相反,该结果与 3 口抽水井地下水污染物浓度变化一致。所采地下水样品对藻类叶绿素荧光也有一定的影响,同时部分地下水样品检测发现具有一定毒性。

### 3 结论

(1)该场地周边地下水补给快,水位回升迅速,区

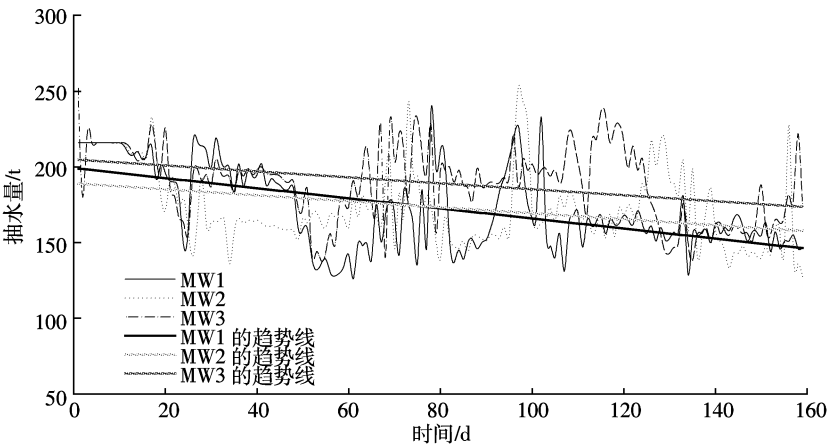


图 3 长期连续抽水试验中每日抽水量随时间的变化

Figure 3 Pumping speed change with time in long-term continuous water-pump experiment

表 3 长期连续抽水试验中污染物浓度变化(μg·L<sup>-1</sup>)

Table 3 Concentration change of contaminants in long-term continuous pumping test(μg·L<sup>-1</sup>)

| 特征污染物     | 标准     | MW-1 井 |          |          | MW-2 井   |          |        | MW-3 井   |          |          |
|-----------|--------|--------|----------|----------|----------|----------|--------|----------|----------|----------|
|           |        | 45 d   | 100 d    | 140 d    | 45 d     | 100 d    | 140 d  | 45 d     | 100 d    | 140 d    |
| α-六六六     | 1.00*  | 37.50  | 112.00   | 142.00   | 24.40    | 98.00    | 103.00 | 0.10     | -        | -        |
| β-六六六     |        | 1.70   | 11.00    | 18.00    | 1.10     | 13.00    | 11.00  | 0.08     | -        | -        |
| γ-六六六     |        | 11.30  | 28.00    | 38.00    | 6.50     | 25.00    | 22.00  | 0.12     | -        | -        |
| δ-六六六     |        | 0.60   | 12.00    | 22.00    | 0.80     | 10.00    | 9.00   | -        | -        | -        |
| 氯苯        | 180.00 | 147.00 | 253.00   | 346.00   | 1 380.00 | 1 100.00 | 915.00 | 2 140.00 | 1 560.00 | 1 900.00 |
| 苯         | 100.00 | 55.20  | 1 160.00 | 1 720.00 | 27.20    | 119.00   | 180.00 | 142.00   | 115.00   | 204.00   |
| 1,3-二氯苯   | 50.00* | 23.50  | 128.00   | 105.00   | 17.20    | 47.00    | 30.80  | 24.20    | 16.50    | 14.40    |
| 1,4-二氯苯   |        | 7.90   | 42.00    | 68.10    | 114.00   | 89.00    | 56.20  | 710.00   | 369.00   | 456.00   |
| 1,2-二氯苯   |        | 34.80  | 241.00   | 260.00   | 111.00   | 141.00   | 113.00 | 407.00   | 248.00   | 278.00   |
| 1,2,4-三氯苯 | 10.00* | 732.00 | 1 800.00 | 2 250.00 | 265.00   | 936.00   | 508.00 | 22.00    | -        | 2.00     |
| 1,2,3-三氯苯 |        | 379.00 | 1 160.00 | 662.00   | 114.00   | 572.00   | 268.00 | 11.40    | -        | -        |

域地下水丰富,可长期抽水,即抽出-处理技术在该场地的应用是可行的。

(2)MW-1、MW-2、MW-3 单井灌注量分别为 7.66、7.21、7.05  $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ ,可见向地下灌水解决长期抽水后地下水量不足是可行的。灌水过程可以稀释地下水中的污染物,同时也影响地下水的流动方向。

(3)抽水过程可抽出大量的污染物,但污染物浓度变化各异;越靠近污染区域,抽提污染物的效果越明显;长时间抽水影响的地下水污染面积较广,可将重污染区域的污染物抽出,甚至抽出了非本场地内的污染物;随着抽水的进行,污染物的浓度总体呈现降低的趋势。

#### 参考文献:

- [1] Gillian L D, Ying D L, Camilla T, et al. Organo-chlorine pesticides in the soils and atmosphere of Costa Rica[J]. *Environment Science & Technology*, 2007, 41: 1124-1130.
- [2] 丛 鑫, 薛南冬, 梁 刚, 等. 某有机氯农药企业搬迁遗留场地表层土壤中污染物残留特征研究[J]. *农业环境科学学报* 2008, 27(3): 850-854.  
CONG Xin, XUE Nan-dong, LIANG Gang, et al. Residual characteristics of pollutants in topsoil of a former organochlorine pesticide manufacturing enterprise[J]. *Journal of Agro-environment Science*, 2008, 27(3): 850-854.
- [3] Tiburtius E R L, Peralta-Zamora P, Emmel A. Treatment of gasoline-contaminated waters by advanced oxidation processes[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2005, 126(1-3): 86-90.
- [4] Watts R J, Haller D R, Jones A P, et al. A foundation for the risk-based treatment of gasoline-contaminated soils using modified Fenton's reactions[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2000, 76(1): 73-89.
- [5] Lou J C, Lee S S. Chemical oxidation of BTX using Fenton's reagent[J]. *Hazardous Waste & Hazardous Materials*, 1995, 12(2): 185-193.
- [6] Gabriel J, Baldrian P, Verma P, et al. Degradation of BTEX and PAHs by  $\text{Co}(\text{II})$  and  $\text{Cu}(\text{II})$ -based radical-generating systems[J]. *Applied Catalysis B: Environmental*, 2004, 51(3): 159-164.
- [7] Bergendahl J, Hubbard S, Grasso D. Pilot-scale Fenton's oxidation of organic contaminants in groundwater using autochthonous iron[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2003, 99(1): 43-56.
- [8] Liang C, Huang C F, Chen Y J. Potential for activated persulfate degradation of BTEX contamination[J]. *Water Research*, 2008, 42(15): 4091-4100.
- [9] 赵勇胜. 地下水污染场地污染的控制与修复[J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 2007, 37(2): 303-3  
ZHAO Yong-sheng. Groundwater Pollution Control and Remediation[J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 2007, 37(2): 303-3.
- [10] 钟佐桑. 地下水有机污染控制及就地恢复技术研究进展(一)[J]. *水文地质工程地质*, 2001(3): 1-3.  
ZHONG Zuo-shen. The control and in situ remediation of groundwater contaminated with organic contaminants(1)[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2001(3): 1-3.
- [11] Zhang W, Bouwer E, Wilson L, et al. Biotransformation of aromatic hydrocarbons in subsurface biofilms[J]. *Water Science & Technology*, 1995, 31(1): 1-14.
- [12] US EPA (United States Environmental Protection Agency). Superfund Remedy Report[R]. Thirteenth Edition, September, 2010.
- [13] 李常亮, 刘文彬, 汪 莉, 等. 典型污染场地六六六残留特征分析[J]. *环境科学*, 2008, 29(3): 809-813.  
LI Chang-liang, LIU Wen-bin, WANG Li, et al. Analysis of HCH in a typical waste contaminated site[J]. *Environmental Science*, 2008, 29(3): 809-813.
- [14] Willett K L, Ulrich E M, Hites R A. Differential toxicity and environmental fates of hexachlorocyclohexane isomers[J]. *Environment Science & Technology*, 1998, 32(15): 2197-2207.
- [15] 朴秀英, 王学军, 陶澍, 等. 有机氯农药在天津耕作土壤剖面中的分布[J]. *环境科学研究*, 2004, 17(2): 26-29.  
PIAO Xiu-ying, WANG Xue-jun, TAO Shu, et al. Vertical distribution of organochlorine pesticides in farming soils in Tianjin area [J]. *Research of Environmental Science*, 2004, 17(2): 26-29.
- [16] 束仓龙, 陶月赞, 张元禧. 地下水水文学[M]. 中国水利水电出版社, 2009.  
Su Canglong, Tao Yuezan, Zhang Yuanxi. Groundwater hydrology[M]. China WaterPower Press, 2009.