

DOI:10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202001019

# 含单裂隙非饱和带中轻非水相流体修复的数值模拟

赵科锋<sup>1,2</sup>, 王锦国<sup>2</sup>, 曹慧群<sup>1</sup>

(1. 长江科学院流域水环境研究所, 湖北 武汉 430010;

2. 河海大学地球科学与工程学院, 江苏 南京 211100)

**摘要:** 针对非饱和带中油类污染物时空分布的研究, 室内实验很难定量分析运移机理, 野外检测成本高且破坏地层。数值模拟法作为一种应用广且成熟的方法, 可以用来分析油类污染物在非饱和带中的运移规律。为了研究单井抽提及原位冲洗修复时, 含单裂隙非饱和带中轻非水相流体 (Light non-aqueous phase liquids, LNAPL) 的时空变化规律, 建立了数值模型, 分析不同条件下 LNAPL 的修复效果及时空变化规律。模拟结果发现, LNAPL 注入时优先流入裂隙, 停止注入时优先流出裂隙。单井抽提修复模拟表明, 抽提流量越大, 修复效率越高。原位冲洗技术能有效补充地下水, 防止产生新的环境问题; 注水井起到“冲洗”及稀释污染物的作用, 模拟最优方案修复面积达到 96%, 修复率达到 75%, LNAPL 饱和度控制在约 0.05; 对比分析发现, 注水井布设在污染物范围的上边界时修复效果最好, 能有效“冲洗”污染物并携带至抽提井中抽出地表。该研究为受轻油污染的土壤及地下水修复提供了科学的理论依据及有效的评估方法。

**关键词:** 数值模型; 轻非水相流体修复; 非饱和带; 原位冲洗; TOUGH2

中图分类号: P641.2

文献标识码: A

文章编号: 1000-3665(2020)05-0043-13

## Numerical simulation of light non-aqueous phase liquids remediation in the unsaturated zone with single fractures

ZHAO Kefeng<sup>1,2</sup>, WANG Jinguo<sup>2</sup>, CAO Huiqun<sup>1</sup>

(1. Basin Water Environmental Research Department, Changjiang River Scientific Research Institute,

Wuhan, Hubei 430010, China; 2. School of Earth Science and Engineering, Hohai University,

Nanjing, Jiangsu 211100, China)

**Abstract:** For the study of the spatial and temporal distribution of oil pollutants in unsaturated zones, it is difficult to quantitatively analyze the migration mechanism in laboratory and field tests are costly and damages the foundation. Numerical simulation, as a widely used and mature method, can be used to analyze the movement of oil pollutants in unsaturated zones. In order to examine the spatial and temporal distribution law of LNAPL (light non-aqueous phase liquids) in the unsaturated zone with single fractures during the single-well extraction and in-situ flushing remediation, in this paper a numerical model is established to analyze the effect under different conditions. The results show that LNAPL preferentially flows into fractures when injected, and preferentially flows out of the fractures when the injection is stopped. The single well extraction remediation simulation show that the larger the extraction flow, the higher the remediation efficiency. The in-situ flushing technology can effectively replenish groundwater and prevent new environmental problems. The injection wells play the role of “flushing” and diluting pollutants. Under the optimal scheme, the remediation area reaches 96%, the remediation rate reaches 75%, and the LNAPL saturation is controlled at 0.05. The comparative analysis indicates that the water injection wells have the best effect when placed on the upper

收稿日期: 2019-12-13; 修订日期: 2020-02-04

基金项目: 江苏省自然科学基金项目 (BK2012814)

第一作者: 赵科锋 (1989-), 男, 硕士, 主要研究方向为地下水环境。E-mail: zhaokefeng\_hhu@163.com

boundary of the pollutant, and can effectively “flush” the pollutants and carry them to the extraction well and to the land surface. The research conclusions provide a scientific theoretical basis and effective assessment methods for the remediation of soil and groundwater contaminated by light oil.

**Keywords:** numerical simulation; LNAPL remediation; unsaturated zone; in-situ flushing; TOUGH2

随着石油工业的不断发展,输油管线、储油罐、油槽车和油轮的泄漏事故不断增加,受石油污染的土壤和水体显著增加。为此,针对土壤和地下水中有有机污染开展调查、评价,进行污染控制和治理已势在必行<sup>[1-3]</sup>。目前,土壤及地下水污染物理修复方法已有多种,包括:抽水处理法、污染土壤气提法、地下水曝气法和自然衰减法等。其中,多相抽提(Multi-Phase Extraction, MPE)技术属于抽水处理法的一种土壤原位修复技术,主要通过使用真空抽提手段,同时抽取污染区域中的气体、地下水及浮油层,达到降低污染物浓度的目的<sup>[4-5]</sup>。相比传统的修复技术,多相抽提影响半径更大,可减少布井数量,能同时清除非饱和带及饱水带中的轻非水相流体(Light Non-Aqueous Phase Liquids, LNAPL),尤其适合挥发性较强的污染物,同样适合渗透性较低的介质<sup>[6-8]</sup>。但 MPE 系统抽提设备复杂,启动及调试时间较长,修复成本高,限制了其使用及推广<sup>[9-10]</sup>。

国内外学者在油污染治理方面做了一些研究。王晓燕等<sup>[11]</sup>综合分析了 SEAR 技术修复土壤及地下水中 NAPL 污染的原理及发展。胡黎明等<sup>[1]</sup>通过离心模型试验研究了石油烃在非饱和土体中的迁移过程及 SVE 修复过程中浓度变化特征。王磊等<sup>[12]</sup>介绍了 MPE 技术的工艺特点和技术原理,总结了非饱和带、含水层性质和污染物特性的 MPE 适用性评估方法。张晶等<sup>[13]</sup>应用多相抽提技术回收土壤及地下水中的 LNAPL,并评估了修复效果。白静<sup>[14]</sup>通过试验,利用表面活性剂强化 GCW 修复效果,为地下水中挥发性和半挥发性有机物的去除提供新途径。Leif Nelson 等<sup>[15]</sup>通过试验,评估了在抽提井两侧注入水-CO<sub>2</sub> 混合物,治理 LNAPL 污染的可行性。Jaehak Jeong 等<sup>[16]</sup>建立数学模型预测了多层含水介质受到污染时 LNAPL 迁移与修复特征。Fateme Ebrahimi 等<sup>[17]</sup>建立了一个分析模型,用于估算非均质含水层中 LNAPL 的分布和回收率。国外在油污染修复治理方面已有丰富的经验,相关研究成果已用于治理场地土壤及地下水污染。国内学者研究主要集中在污染物迁移规律及物理化学修复,相关学者虽已开展污染物控制与治理方面的研究<sup>[18]</sup>,但在原位冲洗修复技术方面的研究较

少,鲜见原位冲洗技术相关机理方面的研究。在原位冲洗修复过程中,对污染物迁移规律认识不足,且限于技术与设备的因素,国内在应用相关技术修复土壤及地下水污染的工作较少。本文研究了土壤及地下水中 LNAPL 在单井抽提修复及原位冲洗修复时的运移规律,检验了 LNAPL 修复效果。

在评估修复可行性时,数值模拟相比物理试验具有技术成本低廉、可模拟复杂边界条件、模拟尺度大等优势。本文通过建立数值模型,分析了 LNAPL 在含裂隙基质中迁移与分布的规律。以此为基础,建立 MPE 抽提修复模型,分析抽提井的流量、位置及原位冲洗方法中注水井的位置等对修复效果的影响及 LNAPL 的时空分布规律。

## 1 模型网格剖分方案

TOUGH2 (transport of unsaturated groundwater and heat) 是由美国劳伦斯-伯克利国家实验室开发,用于模拟多维孔隙或裂隙介质中,多相、多组分混合水流及热运移的通用数值模拟程序<sup>[19]</sup>。T<sub>2</sub>VOC 是 TOUGH2 中侧重于研究多孔介质或裂隙介质中水相、气相、非水相(NAPLs)三相流问题的子模块。主要用来模拟非水相流体(NAPLs)在饱水带及非饱水带中时空变化规律,包括非饱水带中有机污染物挥发、扩散及真空抽取模拟,向污染介质中注入空气及液体修复等模拟。

本文采用 TOUGH2 软件的 T<sub>2</sub>VOC 模块建立二维数值模型,模型网格按 X、Z 方向剖分,模拟区域有效网格长 30 cm,高 40 cm,模型网格剖分见图 1。网格为不均匀剖分,X 方向剖分规则为: -0.5 ~ 0 和 30.0 ~ 30.5 为左右隔水边界; 0 ~ 14 和 16 ~ 30 分别平分 7 个长度为 2 cm 的网格; 14.00 ~ 14.85 和 15.15 ~ 16.00 剖分为长度 0.85 cm 的网格,14.85 ~ 15.15 剖分为中间长为 0.3 cm 的网格,有效网格总长度为 30 cm,网格不规则剖分的目的,主要是为了刻画中间 0.3 cm 宽的裂隙。Z 方向剖分规则为: -0.5 ~ 0 为底部隔水边界,边界中间处有 0.3 cm 宽的排泄孔; 0 ~ 3 为饱水带,水的模拟饱和度为 1; 3 ~ 14 为毛细带,总高度为 11 cm,平分为 5 组单元格,每格高 2.2 cm; 14 ~ 37 为土壤带,此带与大气相通,14 ~ 15 为 1.0 cm 厚的

网格,15~37 平分为 11 组,每组高为 2.0 cm;37~40 为 LNAPL 注入区,平均分为三组,每组高 1.0 cm。根据以上规则,共剖分 357 个有效单元格,61 个无效单元格。

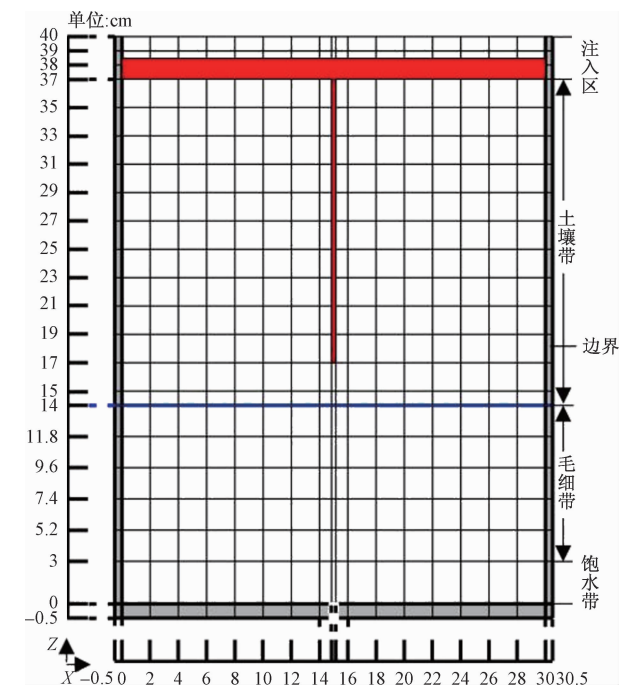


图 1 网格剖分图  
Fig. 1 Schematic diagram of the grid design

2 定解条件及参数

- 建立模型时假定：
- (1) 模拟的基质中存在水相、气相、LNAPL 三相，油、水不混溶，模型中的渗流为等温的三相渗流。
  - (2) 基质和流体不可压缩，水和油的密度不变。
  - (3) 不考虑水的蒸发，不考虑油的挥发。
  - (4) LNAPL 渗入前，模型中不存在油相。
  - (5) 考虑毛细力、重力及吸附作用，忽略降解作用。

2.1 边界条件

模型的上边界为注入区，无基质，与大气相通，压强为大气压，无水相。油相均匀从上边界注入，注油速率为  $1.44 \times 10^{-4}$  kg/s。下边界为饱水带，水的饱和度为 1，底部有排泄孔；侧面边界，为隔水边界，水相与油相均不能透过。

2.2 初始条件

模拟初始时刻模型中没有油相，饱水带水面水平，水的饱和度为 1，高度为 3 cm；毛细带从上至下水的饱和度逐渐增加，高度为 14 cm；土壤带只有气相，压强

为大气压强。初始条件见表 1。

表 1 初始条件  
Table 1 Initial conditions

|                                               |                       |
|-----------------------------------------------|-----------------------|
| 基质干容重/( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ )       | 1 540                 |
| LNAPL 密度/( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ )    | 915                   |
| LNAPL 黏滞性/( $\text{mm}^2\cdot\text{s}^{-1}$ ) | 8.5                   |
| 基质孔隙度                                         | 0.41                  |
| X 方向渗透率/ $\text{m}^2$                         | $4.0 \times 10^{-12}$ |
| Z 方向渗透率/ $\text{m}^2$                         | $8.0 \times 10^{-12}$ |
| 土壤带水饱和度                                       | 0.01                  |
| 毛细带水饱和度                                       | 0.9                   |
| 饱水带水饱和度                                       | 1                     |
| 温度/ $^{\circ}\text{C}$                        | 20                    |
| 大气压强/Pa                                       | $1.01 \times 10^5$    |
| 裂隙长度/cm                                       | 20                    |

注：模型参数引用自文献[20]。

3 模拟结果及分析

3.1 LNAPL 注入后运移分布

LNAPL 均匀注入裂隙-基质系统后，平铺在系统表面，在重力作用下向下迁移<sup>[21-22]</sup>，湿润性液体 LNAPL 进入干燥的土壤带后，优先进入裂隙中。LNAPL 初始干-湿界面呈狭长形，污染区域饱和度相对较低；随着 LNAPL 的不断注入，污染面积不断增大，LNAPL 到达裂隙底部后，在裂隙中聚集，以裂隙为核心向四周扩散，饱和度以裂隙为中心向外逐渐减小<sup>[20]</sup>。LNAPL 迁移图像见图 2。

从模拟结果可以看出，LNAPL 在 10 min 到达毛细带，由于毛细力的作用，LNAPL 主要以横向扩散为主，干-湿界面由狭长形逐渐变成椭圆形（图 2 中 20~40 min），最后填充整个系统，形状如矩形（LNAPL 运移 50 min 以后）。相对于裂隙，两侧基质中 LNAPL 入渗明显滞后，初始锋面较为均匀、平行，随着时间的推移，由于受到裂隙的影响，裂隙入渗口处的基质受到越来越多的污染，相比距裂隙较远的基质，LNAPL 的入渗深度较大，从图 2 图像变化可以看出，距离裂隙越远，基质受到裂隙的影响越小，入渗深度也相对较小。LNAPL 入渗干-湿界面不是平行地到达饱水带，而是以裂隙为中心，呈圆滑的锥形迁移到饱水带。LNAPL 入渗的过程就是一个油相驱替水相、气相，并占据其空间的过程，LNAPL 在裂隙-基质系统中主要以裂隙为介质向下入渗至饱水带<sup>[23-24]</sup>，裂隙的存在，起到了“快速通道”的作用，降低了 LNAPL 在中砂基质顶部向下入渗的速率，在整体上缩短了 LNAPL 入渗至饱水

带的时间,加速了基质污染的速率,加重了污染程度。

### 3.2 LNAPL 停止注入后饱和度分布

LNAPL 在模拟的第 50 min 到达饱水带,之后停止注入,由于密度比水小, LNAPL 漂浮在饱水带表面,不断聚集, LNAPL 停止注入后的迁移图像见图 3。从图中看出, LNAPL 停止注入后,裂隙中 LNAPL 饱和度相比两侧基质中的 LNAPL 饱和度小,停止注入 20 min

时,裂隙中 LNAPL 的饱和度已经降到 0.10,并且随着时间延长仍在继续减小,到停止注入 120 min 时,裂隙中 LNAPL 饱和度为 0.07,饱和度幅度变化较小;基质中 LNAPL 饱和度很大,停止注入 20 min 时最大饱和度为 0.40,到第 120 min 时,最大饱和度为 0.20,饱和度随着时间变化幅度较大。这说明,孔隙越大,吸附性越差,残留的 LNAPL 越少。

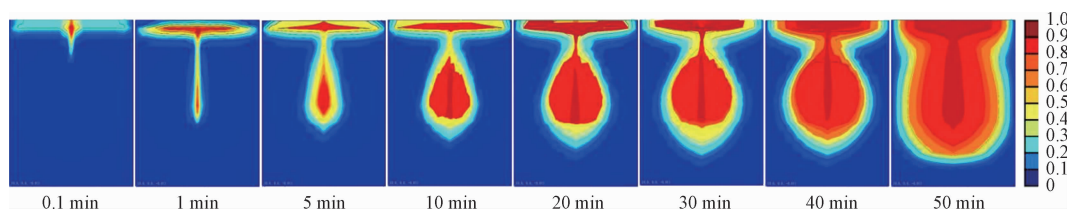


图 2 LNAPL 注入时饱和度变化图像

Fig. 2 Migrate images during the LNAPL injection

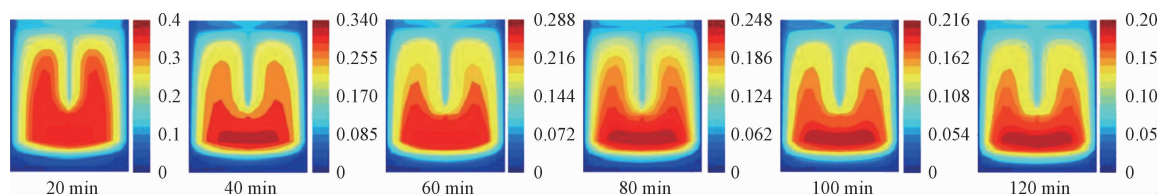


图 3 LNAPL 停止注入后饱和度变化图像

Fig. 3 Migrate images after the LNAPL injection

LNAPL 在饱水带聚集一定量后,由于重力作用,继续向下运移,饱水带水面向下凹陷,中间凹陷比两侧大,这主要是因为, LNAPL 通过中间的裂隙首先达到饱水带,并大量聚集,中间聚集的 LNAPL 较两侧多,因此会形成图 3 中所示的中间凹陷较多的情形。LNAPL 聚集一定量后,迫使水面下移,饱水带中的水从底部的排泄孔排出,多余的 LNAPL 从排泄孔排出,最终形成油-水平衡状态,饱水带中同时存在油相、水相。

LNAPL 在迁移到饱水带的过程中,仍有部分 LNAPL 由于受到土壤颗粒的吸附作用长期残留在基质中,同时饱水带表面也会漂浮大量的 LNAPL,这些微溶于水的污染物会长期存在,对土壤和地下水造成严重的污染,因此,对污染区域进行修复显得很有必要。

### 3.3 单井抽提修复

单井抽提修复是 MPE 修复的一种,抽提量是影响抽提修复的关键因素之一。抽提量过小,残留污染物难以被抽出且抽取时间长,效率低;抽提量过大,对设备要求高,成本费用高。抽提井真空泵位置同样影响抽提修复效果。因此,针对污染区域及 LNAPL 的性质,选择合适的抽提量及抽提井布置位置,将有助于提

高污染区域的修复效果。

为了研究抽提量对受污染土壤修复的影响,设计井深 30 cm,最大抽提量分别为  $1.0 \times 10^{-4}$ ,  $3.0 \times 10^{-4}$ ,  $5.0 \times 10^{-4}$ ,  $7.0 \times 10^{-4}$  kg/s 四种方案(图 4a);为了研究抽提井深对修复效果的影响,设计抽提流量为  $3.0 \times 10^{-4}$  kg/s,井深 20, 25, 30, 35 cm 四种方案(图 4b)。抽提压强均为 370 Pa,模拟时长为 2 h。

#### 3.3.1 抽提量的影响

不同抽提量下 LNAPL 饱和度随时间变化见图 5。从模拟结果可以看出,在无抽提井时,毛细水带基质中的 LNAPL 饱和度随着时间逐渐减小,饱和度最大值由 0 min 的 0.20 减小到 120 min 的 0.15,同时受污染的面积及污染程度也在减小。这表明, LNAPL 在重力作用下仍向饱水带迁移,但迁移速率越来越小。从图 5(a)可以看出,在第 100 ~ 120 min, LNAPL 饱和度几乎没有变化,油相、水相逐渐达到平衡。在有抽提井且抽提流量不为 0 的模型中, LNAPL 饱和度随时间逐渐减小,不同抽提流量下, LNAPL 饱和度变化程度不同。从图 5(b) ~ (e) 图像变化可以看出,同一时刻,模型抽提流量越大, LNAPL 饱和度变化越大,说明从基质中抽取出的 LNAPL 越多,修复效果越好。从修复效果



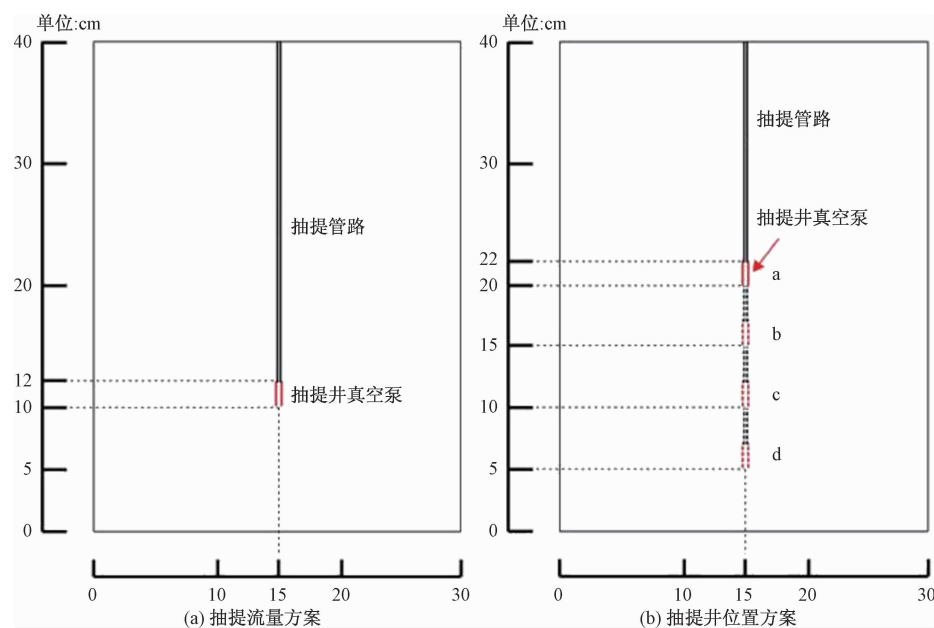


图4 抽提井抽提修复方案

Fig.4 Extraction remediation scheme

看,抽提量为  $1.0 \times 10^{-4} \text{ kg/s}$  时,在第 120 min,饱和度最大值为 0.13,下降了 0.07,仍有较大面积的污染,且污染区域的 LNAPL 饱和度大于 0.10,修复效果最差。抽提量为  $3.0 \times 10^{-4} \text{ kg/s}$  时,在第 60 min,饱和度最大值为 0.12,在 120 min 时,污染区域 LNAPL 饱和度在 0.10 以下,裂隙中饱和度最小,修复效果较好。修复效果最好的是抽提量为  $7.0 \times 10^{-4} \text{ kg/s}$  的模型,在第 20 min 饱和度达到约 0.12,在第 120 min,饱和度最大值为 0.07,下降了 0.13,污染程度减小的最多,大部分污染区域经抽取 LNAPL 后,饱和度下降到约 0.05。

由此可以看出,抽提流量越大,修复效果越好,但是水相、气相、油相被抽取出的越多,造成地下水面下降,可能形成新的环境问题;抽提量越大,成本费用越高。因此,在修复 LNAPL 造成的污染时,要充分考虑修复效果与成本两方面的因素,合理设置抽提流量及时间,在达到修复污染场地的同时,节约人力、物力、财力。

### 3.3.2 抽提井位置的影响

图 6 显示了抽提井真空泵在不同深度下, LNAPL 饱和度随时间的变化。从模拟结果可以看出,方案 a 与方案 b 修复效果差别不大,且效果较差,到模拟结束时,仍有较大面积的污染区域 LNAPL 饱和度在 0.16 以上。相比而言,方案 c 与方案 d 修复效果较好,方案 d 修复效果最好,在模型运行到第 80 min 时,饱和度降到了 0.06 以下,而方案 c 在模型运行结束时,仍有部

分区域 LNAPL 饱和度约为 0.11,修复效果稍差。对比图像发现,在毛细带及土壤带,方案 c 修复效果比方案 d 好,模型运行结束时,方案 c 毛细带及土壤带中 LNAPL 饱和度及污染区域明显比方案 d 的小。

由此看来,抽提井真空泵深度对修复效果影响较大。LNAPL 在重力作用下主要聚集在饱水带表面及毛细带下部,这部分是 LNAPL 饱和度最大的区域,方案 a 与方案 b 抽提井真空泵埋深太浅,距 LNAPL 聚集的区域较远,由于抽提流量及抽提压强的限制,很难清除深部的污染物;方案 d 抽提井真空泵位于饱水带上部 2 cm 处,也是大部分 LNAPL 聚集的区域,因而抽提效果最好,由此可以看出合理的布设井位能弥补设备不足的缺点。方案 d 相比方案 c,毛细带上部的修复效果稍差。抽提井真空泵埋深越大,对设备的要求越高。因此,在实际操作时,需充分了解 LNAPL 污染物的分布范围及污染程度,合理设计抽提井真空泵埋深,在设备允许的范围内,同时达到规定的修复效果及节约成本的目的。

### 3.4 注水井位置对原位冲洗修复的影响

单井修复影响半径有限,针对大的污染区域,修复效果不理想,实际操作时,多采用群井的方式进行修复<sup>[25-27]</sup>。由于水泵对地下水的抽提作用,潜水位下降,原来被水浸没的土壤暴露出来,造成部分区域水位下降,引起新的环境问题。鉴于此,在抽提井两侧添加注水井,通过向土壤污染带或饱水带中注水的方式修

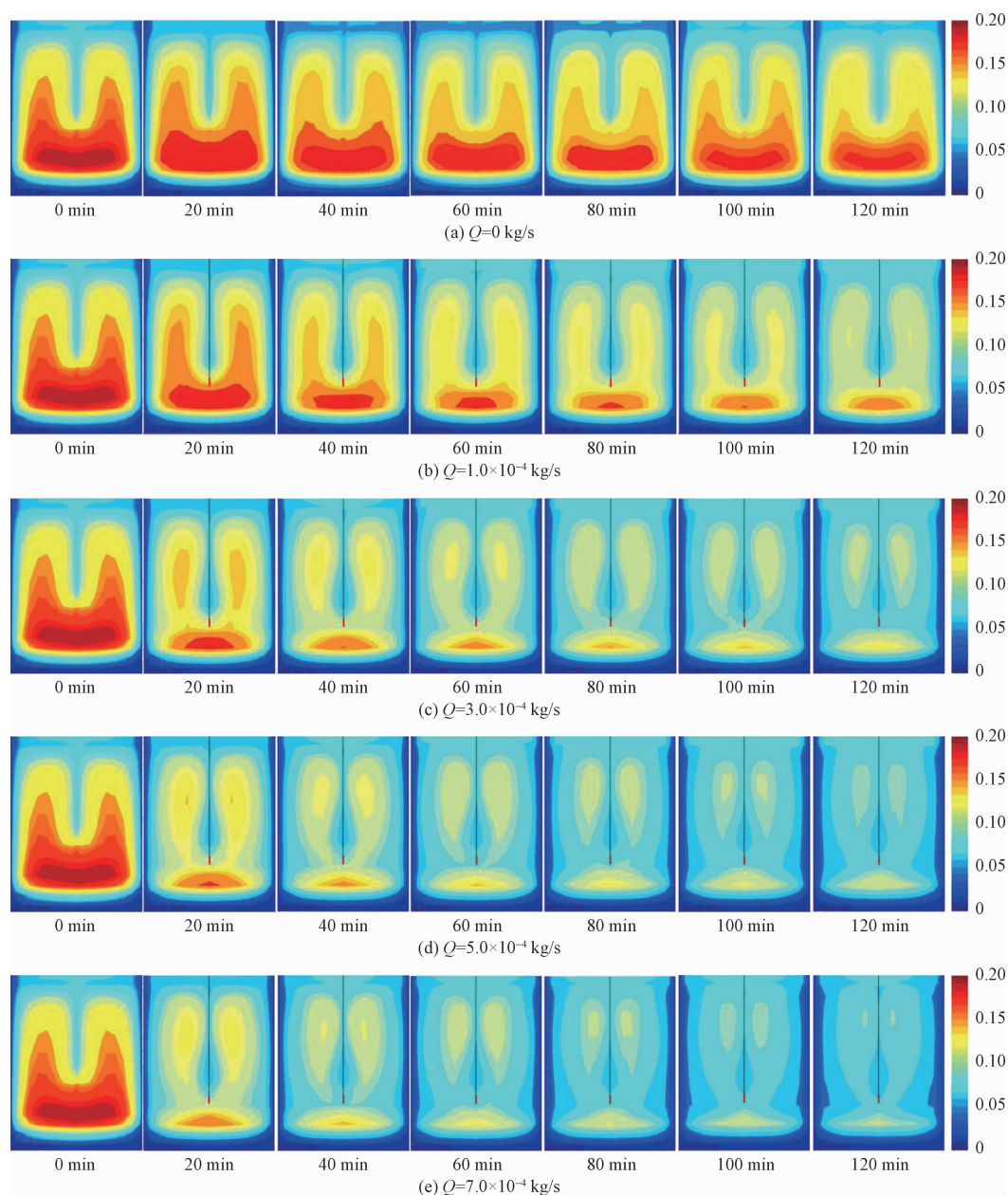


图 5 不同抽提量下 LNAPL 饱和度随时间变化图像

Fig. 5 Images of the LNAPL saturation change under different extraction volumes

复污染区域,这是单井抽水处理法的衍生方法,称为原位冲洗技术。

原位冲洗技术既弥补了单井抽提影响半径过小的问题,又补充地下水,防止水位下降过多的问题,是较为理想的清除 LNAPL 污染的方法。注水井的布设尤其重要,为此建立相关模型研究注水井布设位置对原位冲洗法修复效率的影响。设计方案如图 7 所示,抽提井真空泵长度均为 2 cm,位于横向中间位置,竖直方向位于 10 ~ 12 cm,抽提流量为  $3.0 \times 10^{-4}$  kg/s,抽提压强为 370 Pa。两口注水井流量均为  $1.0 \times$

$10^{-4}$  kg/s,其中横向(X 方向)注水井布设见图 7(a)。竖直方向滤网长度为 10 cm,位于 10 ~ 20 cm 处,抽提井两侧对称布设注水井。方案 a ~ d 注水井距抽提井距离分别确定为 11,8,5,2 cm。竖直向(Z 方向)布设见图 7(b)。两口注水井在抽提井两侧,对称分布,距抽提井距离均为 8 cm,竖直方向设计 4 种方案,方案 A 注水井滤网位于 20 ~ 30 cm,方案 B 注水井滤网位于 15 ~ 25 cm,方案 C 注水井滤网位于 10 ~ 20 cm,方案 D 注水井滤网位于 5 ~ 10 cm。通过不同布设方案探究注水井位置对修复效果的影响。

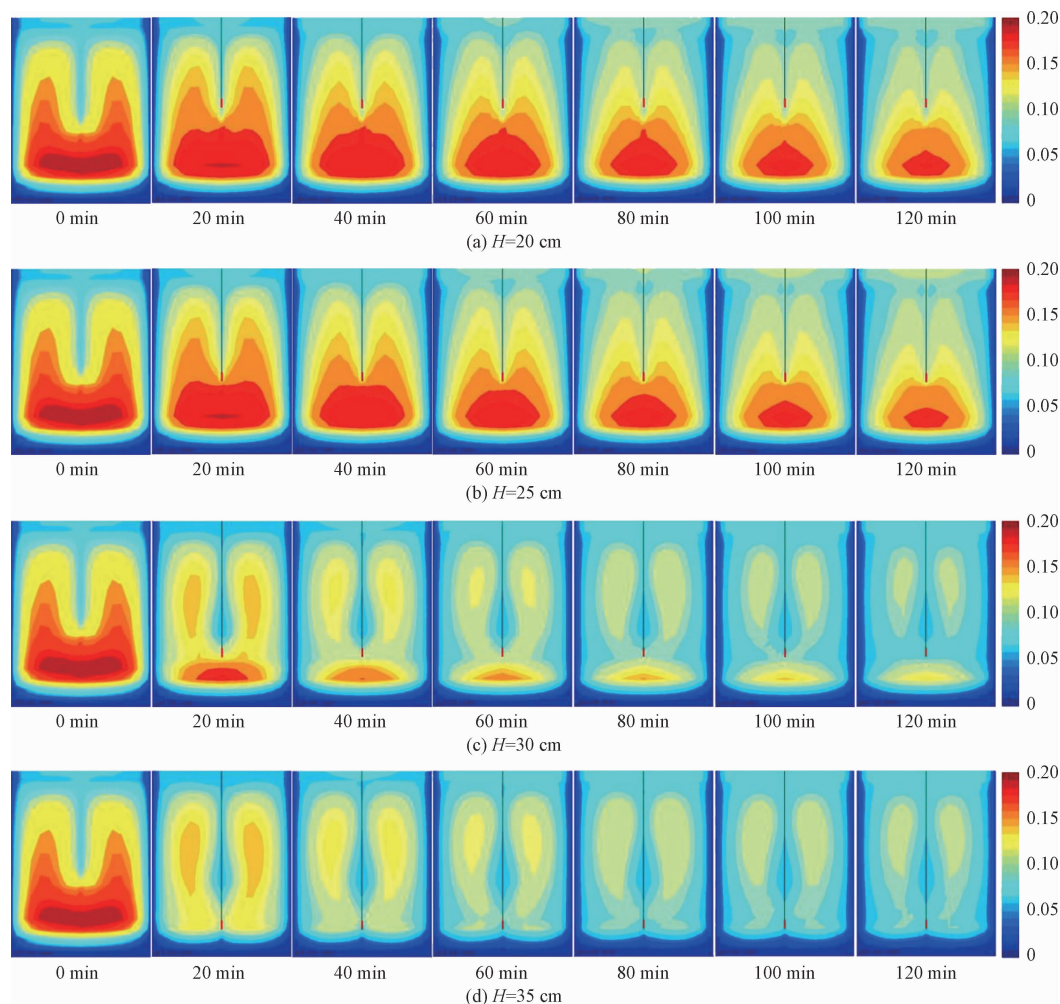


图6 不同井深下 LNAPL 饱和度随时间变化图像

Fig. 6 Images of the LNAPL saturation change at different well depths

### 3.4.1 注水井横向位置的影响

为了研究注水井与抽提井之间的距离对修复效果的影响,设计了4种横向( $X$ 方向)注水井方案,研究 LNAPL 饱和度随时间变化(图8)。从模拟结果可以看出, LNAPL 饱和度随时间减小,模型运行结束时,注水井附近 LNAPL 饱和度均保持在约 0.05,比抽提井附近 LNAPL 饱和度小,且以注水井为中心,向外 LNAPL 饱和度有变大的趋势。方案 a 在模拟的第 40 min,注水井附近的 LNAPL 饱和度明显降低,低饱和度的分布区有向上部及下部扩散的趋势,这是由于注水井距隔水边界较近,注入大量的水受到阻挡后,向竖直方向扩散的缘故。方案 a 中注水井距抽提井较远,大于两者共同作用下的影响半径;方案 b 位于抽提井影响半径边缘。方案 b 修复效果明显优于方案 a 和方案 c,图 8(c) LNAPL 饱和度变化图像显示,注水井与隔水边界之间的污染物浓度变化较小,模型结束时,

LNAPL 饱和度最小的区域集中在注水井与抽提井之间,这是因为注水井距抽提井太近,注水井注入的水很快运移到抽提井中,被抽取出,由于运移距离过短而未能携带大量的污染物,导致只有注水井与抽提井附近污染物被抽取出,边界附近的污染物浓度依然很大。方案 d 修复效果最差, LNAPL 饱和度只在注水井与抽提井附近的小范围内比较小,相比图 5(c)同等状态下(不存在注水井的情况),修复效果差。

由此看出,注水井与抽提井的距离不宜过大或过小。距离过大或超出影响半径,注入的水运移速率较慢,修复时间长,效果差;距离过小,注入的水很快进入抽提井被抽出,携带的污染物量小,修复效率低。实际布井时,需根据场地土壤的渗透性、颗粒大小及污染物的分布范围及污染物的性质进行合理布井<sup>[28-30]</sup>。

### 3.4.2 注水井埋深的影响

从图 8 看出,方案 b 是最优的修复方案,但注水井



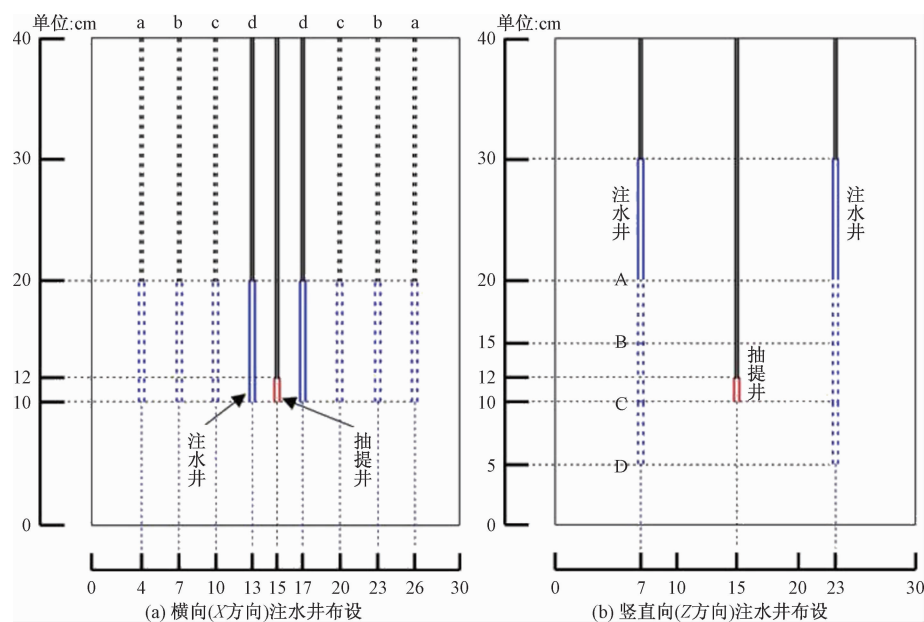


图7 注水井布设示意图

Fig. 7 Schematic diagram of the water injection well design

上部与下部 LNAPL 饱和度依然很大,污染物依旧大量存在。可见,注水井滤网埋深的布设存在不合理之处。为此,设计了图 7(b) 所示的布井方案,探究注水井埋深对修复效果的影响。LNAPL 饱和度随时间变化图像见图 9。

抽提井的位置直接影响了污染物的抽取效率,注水井的位置影响到污染物除去的范围以及修复程度。从模拟结果看,方案 D 至方案 A 修复效果依次变好。方案 D 的修复效果最差, LNAPL 去除程度最低,残留的污染物主要集中在远离注水井的非饱和带上部,饱和度约为 0.10。对比方案 A 与方案 D,方案 A 饱水带以上区域 LNAPL 饱和度已降到 0.07 以下,在第 80 min 时 LNAPL 饱和度变化已较缓慢,基本达到稳定状态,总体修复效果最好;方案 D 只有饱水带附近污染物浓度较低,土壤带及毛细带污染物浓度依然较高。

注水井在向受污染区域注水的过程中,除了向两侧扩散外,还在重力作用下向下扩散,注入的水不仅降低了污染物浓度,而且起到了“冲洗”吸附在土壤颗粒上污染物的作用。注水井周围的污染物随着水的注入不断被稀释,并被携带到非饱和带下部,被抽取至地表。

从图 9 看出,方案 B、方案 C、方案 D 修复效果不明显,主要是因为,注水井滤网距离污染范围的上边界较远,而水受重力作用只会向下运移,故而起不到稀释与“冲洗”的作用,导致修复效果不理想。在采用注水

井与抽提井同时工作时,需充分掌握污染物的分布范围,注水井埋深不宜过大,滤网上部与修复范围的上边界齐平为最佳。

### 3.5 原位冲洗修复下 LNAPL 饱和度变化规律

原位冲洗技术设计主要有布井位置、数量、滤网位置、运行参数等。井位布设建立在充分了解污染物分布的基础上,在设计时要充分考虑设备的可行性、成本费用及环境保护等问题<sup>[31-32]</sup>。

#### 3.5.1 布井方案

设计注水井、抽提井及观测点位置,如图 10 所示。考虑到效率因素,抽提井流量取  $3.0 \times 10^{-4} \text{ kg/s}$ ,抽提真空泵位于 5~7 cm 处(图 6 中最优方案),注水井综合考虑横向与竖直方向的影响,选取最优方案(横向距抽提井 8 cm,竖直方向滤网位于 20~30 cm 处)。观测点监测相应点位 LNAPL 饱和度的变化,因 LNAPL 饱和度分布以中间裂隙为轴左右对称,故点位布设裂隙左侧。观测点 Ob1、Ob2、Ob3 探究不同深度 LNAPL 饱和度的变化,观测点 Ob4、Ob5、Ob6 分别监测邻近裂隙、裂隙中及抽提真空泵处的 LNAPL 饱和度变化。从模型运行开始到结束,6 个观测点共采集数据 180 组。

#### 3.5.2 不同位置 LNAPL 饱和度变化规律

图 11 为各观测点 LNAPL 饱和度变化情况。观测点 Ob1、Ob2、Ob3、Ob6 处 LNAPL 饱和度均是随时间逐渐减小,四个观测点饱和度降幅分别为 0.108, 0.196,

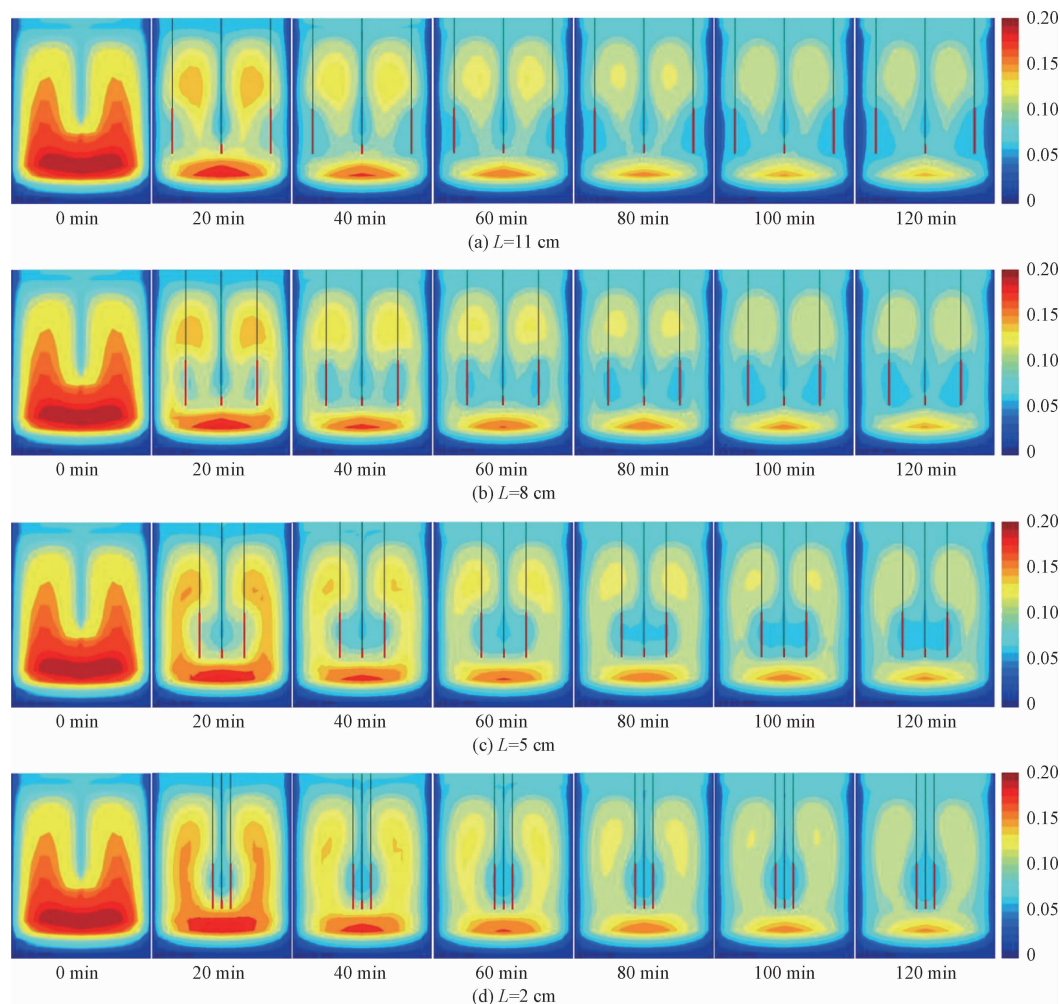


图 8 注水井距抽提井不同距离时 LNAPL 饱和度随时间变化图像

Fig.8 Images of the LNAPL saturation at different distances between the injection well and extraction well

0.122,0.128。同一时刻,各观测点 LNAPL 饱和度: Ob1 < Ob2 < Ob6 < Ob3。

从观测井 Ob1、Ob2、Ob3 处饱和度对比看出,深度越大,LNAPL 饱和度越大;从饱和度变化速率看,Ob2 处饱和度变化最大(Ob1、Ob2、Ob3 处前 4 000 s LNAPL 饱和度下降平均速率分别为  $2.61 \times 10^{-5}$ ,  $2.90 \times 10^{-5}$ ,  $2.73 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ )。对比 Ob4、Ob5、Ob6 处饱和度,前 1 300 s,Ob5 < Ob4 < Ob6;对比 Ob4、Ob5 处饱和度,1 300 s 之后,Ob5 < Ob4;对比 Ob5、Ob6 处饱和度,4 800 s 前 Ob5 < Ob6,4 800 s 之后 Ob5 > Ob6。

观测点 Ob4 位于注水井中下部分靠近裂隙的地方,当注水井开始注水,会迫使水-油锋面向 Ob4 迁移,增大 LNAPL 的浓度,当水-油锋面过后,注入的水开始运移到 Ob4 处,此时 LNAPL 浓度逐渐降低。图 11 中观测点 Ob4 处 LNAPL 饱和度在 615 s 之前增大,在之后缓慢降低。随后水-油锋面到达裂隙中的观测点

Ob5 处,导致 LNAPL 饱和度缓慢增大,这是由于裂隙渗透性很大,模型未运行之前 LNAPL 饱和度已近乎最低,处于平衡状态,随着注水井的注水,水-油混合物迁移到裂隙中,增加了裂隙中污染物浓度。当注水井继续工作时,大量的水运移到裂隙中,稀释了裂隙中的混合物,同时裂隙中的水-油混合物在重力作用下向下运移,进入到抽提井中抽出至地表,于是在模型运行 4 800 s 后,Ob5 处再次出现 LNAPL 饱和度下降。初始时刻观测点 Ob6 处 LNAPL 饱和度最大(饱和度为 0.2),相比观测点 Ob3 初始值 0.197 略大,但随模型运行饱和度很快变小,并在同时刻小于 Ob3 处的值。

观测点 Ob6 位于抽提井真空泵处,随着抽提作用,大量的水相、气相、油相混合物被迅速抽出系统,因而 LNAPL 饱和度会在短时间内下降;观测点 Ob3 距抽提井相对较远,受抽提作用影响较小,在 359 s 之前饱和度和降速较慢,在之后抽提作用影响扩展到观测点



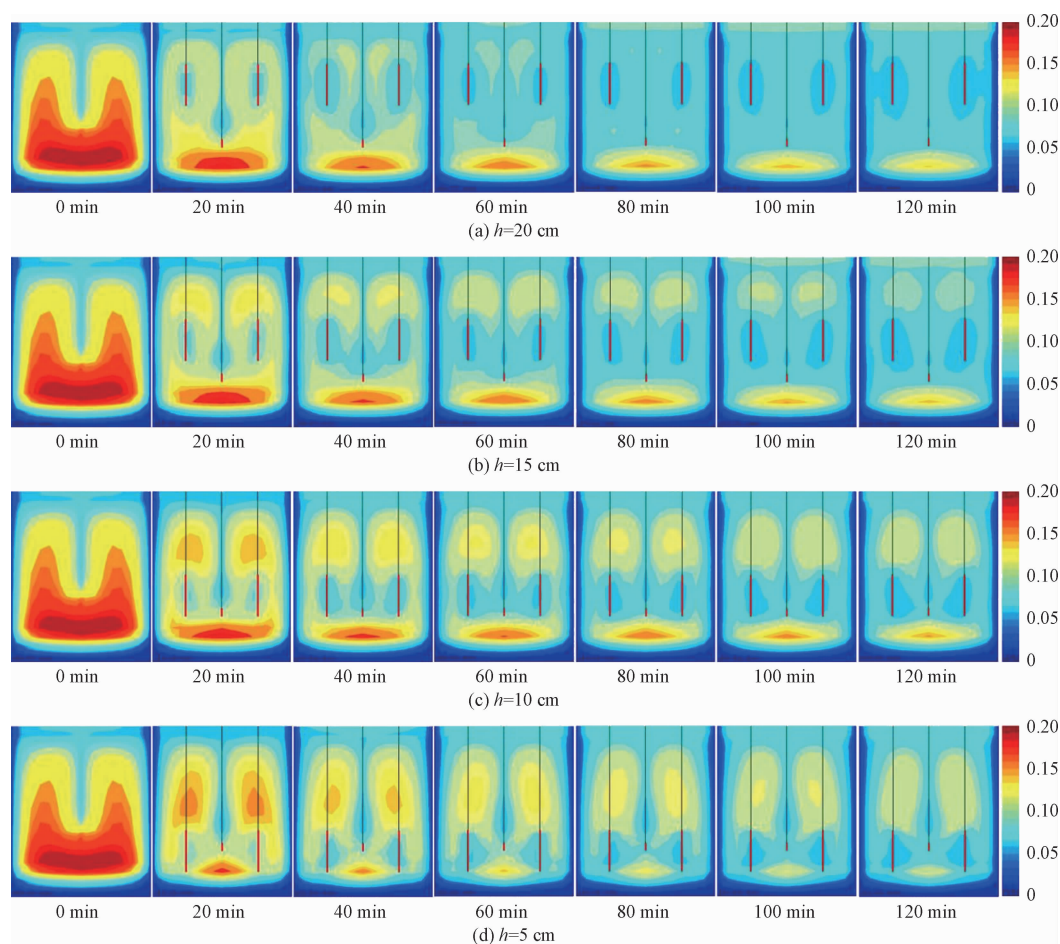


图9 注水井筛管距底部边界不同距离时 LNAPL 饱和度随时间变化图像

Fig. 9 Images of the LNAPL saturation at different distances from the bottom border of the injection well screen

Ob3,故而在 359 s 之后,LNAPL 饱和度迅速下降。对比 Ob4 与 Ob6,Ob6 处 LNAPL 下降平均速率为  $2.10 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ ,远离注水井与抽提井的 Ob4 处 LNAPL 饱和度变化相对缓慢很多,速率为  $5.79 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1}$ 。由于远离注水井,LNAPL 得不到有效“冲洗”,无法在短时间内被携带至抽提井处抽出,同时由于没有有效的稀释,故而变化速率较为缓慢。

### 3.6 原位冲洗修复效果检验

根据原位冲洗修复时 LNAPL 饱和度变化规律及井位布设规律,原位冲洗修复最优模式为:抽提井埋深到达饱水带(35 cm 处),注水井横向位于抽提井影响半径边缘(距抽提井 8 cm),竖向位于污染区域上边缘。

图 12 为原位冲洗修复最优模拟方案下,LNAPL 饱和度随时间变化图像。从模拟结果可以看出,在第 80 min 时,污染物已得到有效控制,修复面积达到 96%,修复率达到 75%。在第 80 ~ 120 min 污染物浓度变化不大,但仍在继续减小。到第 120 min 时,修复面积接近 100%,LNAPL 饱和度控制在 0.05。由此看

出,原位冲洗方法能较好地清除 LNAPL。相比单井抽提模式,原位冲洗模式修复效率高、效果好,在某种程度上能弥补对设备要求较高的限制,而且不会引起大面积的地下水位下降,避免在修复污染物时造成新的环境问题。

## 4 结论

(1) LNAPL 均匀注入裂隙-基质系统后,优先进入裂隙,形成狭长形的入渗通道,LNAPL 随时间逐渐以横向扩散为主,干-湿界面变成椭圆形,直至充填整个系统。裂隙起到了“快速通道”的作用,缩短了污染物迁移到饱水带的时间。

(2) LNAPL 停止注入后,裂隙中污染物快速向下迁移,形成以裂隙为中心的饱和度向外逐渐增大的污染区。水-油界面非均匀向下推移,裂隙中污染物首先迁移到饱水带表面,在其表面形成向下的凹液面,逐渐迫使水排出系统。

(3) 抽提井流量与布井位置是影响修复效率的主

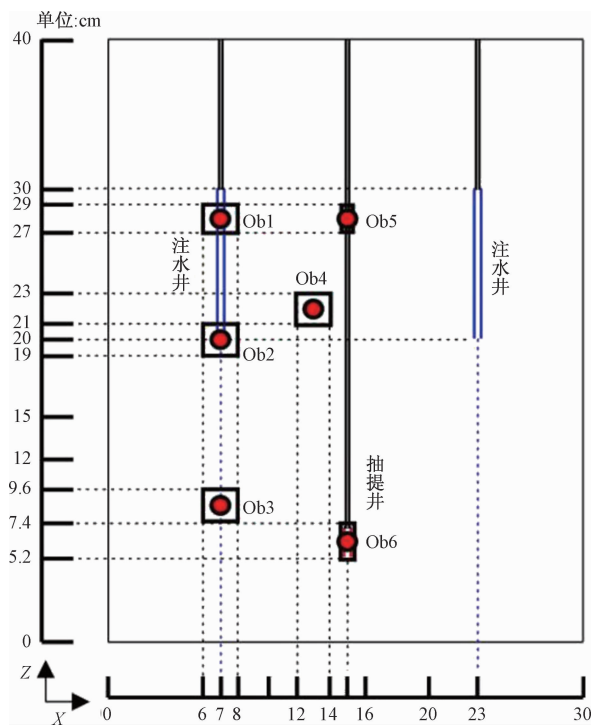


图 10 井位布设及 LNAPL 饱和度观测点位置示意图  
Fig. 10 Schematic diagram of the well position and the LNAPL saturation observation points

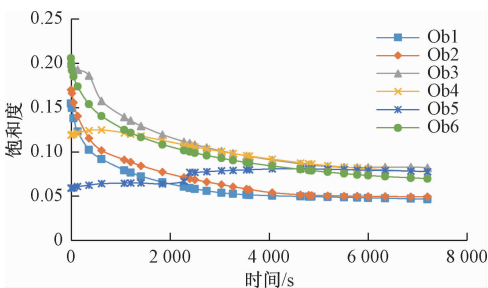


图 11 各观测点 LNAPL 饱和度变化  
Fig. 11 Change of the LNAPL saturation at different observation wells

要因素。抽提流量过小,污染物难以被抽取出且修复时间较长;抽提井真空泵埋深浅,则难以影响到深部污染物,埋深过大或深入饱水带,则抽取物中水占比重较大,同样降低修复效率。

(4)单井抽取三相混合物时,同时减少了土壤及地下水含水量,甚至导致地下水水位下降,造成新的环境问题。相比单井抽提修复,原位冲洗方法在修复污染时,注入的水有效补充了地下水,并对污染物起到了“冲洗”与稀释作用,迫使污染物随水流运移到抽提井中抽取至地表,增加修复效率。

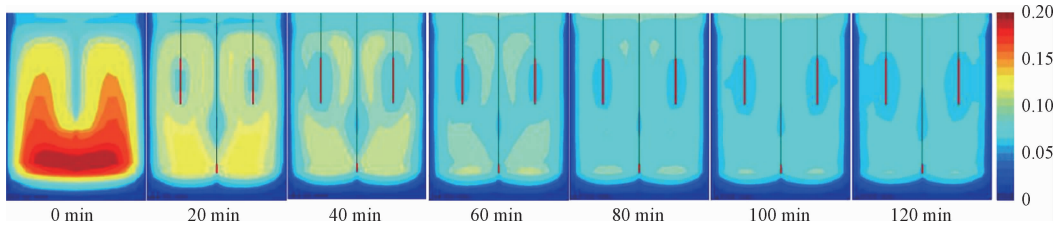


图 12 LNAPL 饱和度随时间变化图像  
Fig. 12 Images of the LNAPL saturation at different times

(5)MPE 系统能有效清除非饱和带中轻油类污染物,实际操作中,需充分了解污染物的分布,合理设计抽取流量、抽提压强、布井位置及滤网埋深等,达到既高效修复污染,又节约成本的目的。

参考文献 (References):

[ 1 ] 胡黎明,武晓峰,刘培斌,等. 储油设施渗漏污染过程与修复技术[C]//岩石力学与工程的创新和实践:第十一次全国岩石力学与工程学术大会论文集. 北京:中国岩石力学与工程学会,2010:98 - 105. [ HU L M, WU X F, LIU P B, et al. Contamination process and remediation technology due to leakage of petroleum storage facilities[C]//Chinese Society for Rock Mechanics & Engineering. Innovation and Practice of Rock Mechanics and Engineering:

Proceedings of the 11th National Conference on Rock Mechanics and Engineering. Beijing: Chinese Society for Rock Mechanics and Engineering, 2010:98 - 105. (in Chinese) ]  
[ 2 ] 李晔. LNAPLs 在包气带中运移的算法研究及其数值模拟 [ D ]. 长春: 吉林大学, 2014. [ LI Y. Algorithm of LNAPLs migration and its numerical simulation [ D ]. Changchun: Jilin University, 2014. (in Chinese) ]  
[ 3 ] 李永涛. LNAPLs 在包气带中运移机理及模拟研究 [ D ]. 西安: 长安大学, 2010. [ LI Y T. Study on migration mechanism and simulation of light nonaqueous-phase liquids in vadose zone [ D ]. Xi'an: Chang'an University, 2010. (in Chinese) ]  
[ 4 ] 王磊,龙涛,张峰,等. 用于土壤及地下水修复的多相抽提技术研究进展[J]. 生态与农村环境学报,

- 2014,30(2):137-145. [WANG L, LONG T, ZHANG F, et al. Advancement in development of multi-phase extraction (MPE) technology for remediation of soil and groundwater[J]. Journal of Ecology and Rural Environment,2014,30(2):137-145. (in Chinese)]
- [5] RALENA RACHEVA, NICK TIETGENS, MARTIN KERNER, et al. In situ continuous countercurrent cloud point extraction of microalgae cultures [J]. Separation and Purification Technology, 2018, 190: 268-277.
- [6] 张祥. 有机污染场地原位多相抽提修复研究进展[J]. 应用化工, 2020, 49(1): 207-211. [ZHANG X. Research progress in the organic contaminated sites remediation by in situ multi-phase extraction technology[J]. Applied Chemical Industry, 2020, 49(1): 207-211. (in Chinese)]
- [7] 王静, 张峰, 刘路. 多相抽提技术的发展现状与展望[J]. 广州化工, 2019, 47(8): 14-18. [WANG J, ZHANG F, LIU L. Overview and prospect of multi-phase extraction (MPE) technology[J]. Guangzhou Chemical Industry, 2019, 47(8): 14-18. (in Chinese)]
- [8] 张云达, 顾春杰, 何健, 等. 多相抽提技术在有机复合污染场地治理中的应用[J]. 上海建设科技, 2018(1): 71-74. [ZHANG Y D, GU C J, HE J, et al. Application of multiphase extraction technology in the treatment of organic compound polluted sites [J]. Shanghai Construction Technology, 2018(1): 71-74. (in Chinese)]
- [9] 王锦淮, 顾春杰. 多相抽提+原位化学氧化联合技术在有机污染场地的工程应用[J]. 上海化工, 2017, 42(12): 20-24. [WANG J H, GU C J. Engineering application of multiphase extraction and in-situ chemical oxidation combined technology in organic contaminated sites [J]. Shanghai Chemical Industry, 2017, 42(12): 20-24. (in Chinese)]
- [10] 桂时乔, 马烈, 张芝兰, 等. 石油烃类污染地下水的汽提和原位化学氧化修复[J]. 环境科技, 2013, 26(3): 48-50. [GUI S Q, MA L, ZHANG L Z, et al. Remediation of TPH contaminated site by air lifting recovery and in situ chemical oxidation [J]. Environmental Science and Technology, 2013, 26(3): 48-50. (in Chinese)]
- [11] 王晓燕, 郑建中, 翟建平. SEAR 技术修复土壤和地下水中 NAPL 污染的研究进展[J]. 环境污染治理技术与设备, 2006(10): 1-5. [WANG X Y, ZHENG J Z, ZHAI J P. Advances in surfactant enhanced aquifer remediation of NAPL-contaminated soil and groundwater systems [J]. Techniques and Equipment for Environmental Pollution Control, 2006(10): 1-5. (in Chinese)]
- [12] 王磊, 龙涛, 祝欣, 等. 用于土壤及地下水修复的多相抽提技术原理及其有效性评估方法[C]//2013 中国环境科学学会学术年会论文集(第五卷). 北京: 中国环境科学学会, 2013: 7. [WANG L, LONG T, ZHU X, et al. Principles and effectiveness evaluation method of multiphase extraction technology for soil and groundwater remediation [C]//Proceedings of the 2013 Chinese Academy of Environmental Sciences Annual Conference (Volume 5). Beijing: Chinese Society for Environmental Sciences, 2013: 7. (in Chinese)]
- [13] 张晶, 张峰, 马烈. 多相抽提和原位化学氧化联合修复技术应用——某有机复合污染场地地下水修复工程案例[J]. 环境保护科学, 2016, 42(3): 154-158. [ZHANG J, ZHANG F, MA L. Combined application of multiple remediation technologies by multi-phase extraction and in-situ chemical oxidation—A case study of one groundwater remediation engineering project at an organic compound contaminated site [J]. Environmental Protection Science, 2016, 42(3): 154-158. (in Chinese)]
- [14] 白静. 表面活性剂强化地下水循环井技术修复 NAPL 污染含水层研究[D]. 长春: 吉林大学, 2013. [BAI J. Remediation of NAPL contaminated aquifer with surfactant-enhanced groundwater circulation well [D]. Changchun: Jilin University, 2013. (in Chinese)]
- [15] LEIF NELSON, JAMES BARKER, TOM LI, et al. A field trial to assess the performance of CO<sub>2</sub>-supersaturated water injection for residual volatile LNAPL recovery [J]. Journal of Contaminant Hydrology, 2009, 109(1/2/3/4): 82-90
- [16] JAEHAKJEONG, RANDALL J, CHARBENEAU. An analytical model for predicting LNAPL distribution and recovery from multi-layered soils [J]. Journal of Contaminant Hydrology, 2014, 156(1): 52-61
- [17] FATEMEH EBRAHIMI, ROBERT JAMES LENHARD, MOHAMMAD NAKHAEI, et al. An approach to optimize the location of LNAPL recovery wells using the concept of a LNAPL specific yield[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2019,

- 26(28): 28714 – 28724.
- [18] W WANG, T KUO, Y CHEN, et al. Effect of precipitation on LNAPL recovery performance: An integration of laboratory and field results[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2014, 116: 1 – 7
- [19] 施小清, 张可霓, 吴吉春. TOUGH2 软件的发展及应用[J]. 工程勘察, 2009, 37(10): 29 – 34. [SHI X Q, ZHANG K N, WU J C. The history and application of TOUGH2 code [J]. Geotechnical Investigation & Surveying, 2009, 37(10): 29 – 34. (in Chinese)]
- [20] 赵科锋, 王锦国. 包气带中裂隙对轻非水相流体运移和分布影响的模拟研究[J]. 水利学报, 2016, 47(7): 891 – 899. [ZHAO K F, WANG J G. Simulation of fracture impacts on LNAPL migration and distribution in the unsaturated zone[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2016, 47(7): 891 – 899. (in Chinese)]
- [21] 黄倩, 王锦国, 陈舟, 等. 黏滞性对 LNAPL 在非饱和多孔介质中优先流影响的试验研究[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2015, 43(1): 66 – 71. [HUANG Q, WANG J G, CHEN Z, et al. Experimental study of impacts of viscosity of LNAPL on preferential flow in unsaturated porous media[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2015, 43(1): 66 – 71. (in Chinese)]
- [22] 赵科锋, 王锦国, 黄倩, 等. 包气带中轻非水相流体运移速率的研究[J]. 工程勘察, 2016, 44(3): 34 – 41. [ZHAO K F, WANG J G, HUANG Q, et al. Study on migration rate of LNAPL in vadose zone [J]. Geotechnical Investigation & Surveying, 2016, 44(3): 34 – 41. (in Chinese)]
- [23] 卢斌, 邵军荣, 张源, 等. 裂隙地下水中残留 LNAPL 物理驱替冲洗实验[J]. 中国环境科学, 2020, 40(1): 182 – 189. [LU B, SHAO J R, ZHANG Y, et al. Physical displacement and flush of entrapped LNAPL in fractured media groundwater [J]. China Environmental Science, 2020, 40(1): 182 – 189. (in Chinese)]
- [24] 卢斌, 吴时强, 谈叶飞, 等. 单裂隙中 LNAPL 残留特点及残留体对水流运动的影响[J]. 水科学进展, 2015(1): 107 – 113. [LU B, WU S Q, TAN Y F, et al. Characterization of residual LNAPL and effect of LNAPL entrapment configuration on water flow in a single fracture [J]. Advances in Water Science, 2015(1): 107 – 113. (in Chinese)]
- [25] EBRAHIMI F, LENHARD R J, NAKHAEI M, et al. An approach to optimize the location of LNAPL recovery wells using the concept of a LNAPL specific yield [J]. Environmental Science and Pollution Research International, 2019, 26(28): 28714 – 28724.
- [26] ATTEIA O, PALMIER C, SCHÄFER G. On the influence of groundwater table fluctuations on oil thickness in a well related to an LNAPL contaminated aquifer[J]. Journal of Contaminant Hydrology, 2019, 223: 103476.
- [27] ATTEIA O, PALMIER C, SCHÄFER G. On the influence of groundwater table fluctuations on oil thickness in a well related to an LNAPL contaminated aquifer[J]. Journal of Contaminant Hydrology, 2019, 223: 103476.
- [28] SOOKHAK LARI K, DAVIS G B, RAYNER J L, et al. Natural source zone depletion of LNAPL: A critical review supporting modelling approaches [J]. Water Research, 2019, 157: 630 – 646.
- [29] QI S Q, LUO J, O'CONNOR D, et al. A numerical model to optimize LNAPL remediation by multi-phase extraction [J]. Science of the Total Environment, 2020, 718: 137309.
- [30] LONGPRÉ-GIRARD M, MARTEL R, ROBERT T, et al. Surfactant foam selection for enhanced light non-aqueous phase liquids (LNAPL) recovery in contaminated aquifers [J]. Transport in Porous Media, 2020, 131(1): 65 – 84.
- [31] GARCÍA-RINCÓN JONÁS, GATSIOS EVANGELOS, RAYNER JOHN L, et al. Laser-induced fluorescence logging as a high-resolution characterisation tool to assess LNAPL mobility [J]. The Science of the Total Environment, 2020, 725: 138 – 480.
- [32] MOTASEM Y D ALAZAIZA, MOHAD HARRIS RAMLI, NADIM K COPTY, et al. LNAPL saturation distribution under the influence of water table fluctuations using simplified image analysis method [J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment: The official journal of the IAEG, 2020, 79(8): 1543 – 1554.

编辑: 张若琳