

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2015.01.013

黏滯性对 LNAPL 在非饱和 多孔介质中优先流影响的试验研究

黄倩, 王锦国, 陈舟, 张文喆

(河海大学地球科学与工程学院, 江苏 南京 210098)

摘要: 为探究轻非水相液体(LNAPL)在非饱和带通过裂隙快速通道产生的优先流对地下含水层造成污染的影响,选取大豆油和 0 号柴油 2 种不同黏滯性的 LNAPL,通过室内试验,研究不同黏滯性的 LNAPL 在通过非饱和多孔介质中单裂隙快速通道产生的优先流迁移规律。试验结果表明:黏滯性小的 LNAPL 通过裂隙产生的优先流的运移速度快;LNAPL 进入地下水毛细带后受毛细水的顶托力作用,垂向迁移速率减缓,横向扩散速度增大, LNAPL 优先流锋面形态逐渐变缓;优先流不仅能通过裂隙非均质条件产生,而且可以在基质中以指流的形式存在,黏滯性大的 LNAPL 更容易产生多个狭长形的指流。

关键词: 优先流;轻油黏滯性;LNAPL;裂隙;大豆油;0 号柴油

中图分类号: P641 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-1980(2015)01-0066-06

Experimental study of impacts of viscosity of LNAPL on preferential flow in unsaturated porous media

HUANG Qian, WANG Jinguo, CHEN Zhou, ZHANG Wenzhe

(School of Earth Science and Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: In order to study the influence of the preferential flow formed in the fracture by light non-aqueous phase liquids (LNAPLs) in the unsaturated zone on contamination of the aquifer, we experimentally investigated the migration behavior of the preferential flow formed in a single fracture by LNAPLs with different viscosities in the unsaturated porous media, selecting soybean oil and No.0 diesel fuel as two LNAPLs with different viscosities. The results indicate that the LNAPL with lower viscosity forms a faster preferential flow in the fracture, and, after entering the capillary zone, the LNAPL migrates more slowly in the vertical direction, and disperses faster in the horizontal direction under the action of uplift force. The preferential flow not only occurs in fractured heterogeneous media, but also exists in homogeneous media in the form of finger flow, and the LNAPL with larger viscosity tends to form more narrow finger flows.

Key words: preferential flow; viscosity of light oil; LNAPL; fracture; soybean oil; No.0 diesel fuel

非水相液体(NAPL)对地下水的污染已成为一个普遍问题,由于 NAPL 对含水层会产生长久的污染,而且对土壤和地下水造成的污染很难修复,NAPL 污染含水层问题一直受到广泛关注^[1]。一般将密度比水轻的非水相液体称为轻非水相液体(LNAPL),俗称轻油,诸如汽油、柴油、喷气燃料等与水不相溶混的有机液体。由于人类对 LNAPL 的开采、加工、储存和运输等过程中发生的泄漏进入到非饱和带土壤中,进而渗流到地下含水层中,造成地下水污染。绝大多数 LNAPL 泄漏后迁移 20 a 依然会以自由相残存滞留^[2],因此, LNAPL 长期的迁移会对地下水和大面积的土壤产生持久性污染。

对 LNAPL 的研究始于 20 世纪 60 年代末,建立了多种数学模型来描述气-油-水三相流动的物理机

收稿日期: 2014-09-09

基金项目: 国家自然科学基金(41172204);江苏省自然科学基金(BK2012814);江苏省自然科学基金青年基金(BK20130830)

作者简介: 黄倩(1989—),女,江苏东台人,硕士研究生,主要从事水文地质与环境地质研究。E-mail: huangqianhu@163.com

通信作者: 王锦国,教授。E-mail: wang_jinguo@hhu.edu.cn

制^[3-4],而在数值模拟方面,研究重点在相对渗透率 k 、饱和度 s 、毛细压力 p 三者的关系上^[5-6],将测定值与 k - s - p 模型的模拟值进行对比。试验研究致力于定量分析 LNAPL 泄漏后的运移与物理机制,并在此基础上建立检验数学模型^[7-8]。目前大部分研究都是建立在均质条件下进行的试验模拟,分析油流锋面分布和扩展规律、透镜体形状等^[9-11]。对非均质条件下 LNAPL 的研究较少,刘汉乐等^[12-13]进行了粗、细砂相间的层状非均质条件下 LNAPL 的运移和分布试验研究。在现实情况中,由植物根系、动物虫孔等形成于土壤基质中的天然裂隙会为 LNAPL 迁移到地下含水层提供优先通道^[1],由裂隙引起土壤介质的各向异性导致 LNAPL 产生优先流,这种优势流动路径驱使污染物质向土壤深层快速迁移。在时间上使轻油更快地抵达地下水含水层,在空间上扩大了轻油污染地下水的面积。

本文通过室内试验模拟,测定不同黏滯性的 LNAPL 在非饱和含裂隙多孔介质中迁移对地下含水层的影响。通过数码相机获取 LNAPL 在裂隙-基质中迁移的瞬时变化图像,分析 2 种不同黏滯性 LNAPL 迁移过程的特点,探讨流体黏滯性对 LNAPL 在裂隙-基质系统中产生优先流的分布运移规律的影响。

1 试验材料和方法

1.1 试验装置

试验装置主要由:有机玻璃槽试验模型、可调节支架、马氏瓶、水槽、载物台、PU 管、摄影灯、数码相机、计算机等组成,试验装置整体布局如图 1 所示。LNAPL 在非饱和裂隙-基质系统中的迁移主要在有机玻璃槽试验模型中进行,该试验设备为自主开发,主要由有机玻璃槽(高×宽×厚为 40 cm×30 cm×2 cm)、水槽(长×宽×高为 40 cm×25 cm×15 cm)等组成,如图 2 所示,使用 PU 管将马氏瓶与模型装置连接,通过马氏瓶将 LNAPL 恒压注入装置中,马氏瓶的高度固定以及 2 次装入瓶中的 LNAPL 量相同,以确保 2 组试验的油压相同。有机玻璃槽底部设有 1 个排泄孔,向水槽中装入一定高度的水后将装置放入水槽中静置足够长时间,让水从底部排泄孔自由上升进入试验介质中,形成稳定水位和毛细带。为了保证试验拍摄图像不受外界光线及强度的影响,试验在暗室中进行,并在其内左右两边各放置 1 台摄影灯提供恒定光源,图像采集使用 Nikon D90 数码相机。

1.2 试验材料

2 组试验中模拟基质的材料均采用 ISO 标准砂,砂样粒径主要为 0.5 mm,有效粒径 $D_{10}=0.28$,平均粒径 $D_{50}=0.33$,不均匀系数 $C_u=1.25$,曲率系数 $C_c=0.98$,试验干密度 $\rho_d=1.5\text{ g/cm}^3$ 。砂样填充前在烘干箱中进行 6 h 烘干,确保砂样达到干燥状态。模拟裂隙材料选用一种表面带有锯齿状的塑料纤维,该纤维疏水疏油,在横向上渗透有限,通过内表锯齿黏合形成厚度 3 mm 的人工竖直单裂隙,2 组试验设计的裂隙长度均为 20 cm。在基质下方布置 3.5 cm 砾石反滤层,砾石的粒径范围在 7 ~ 12 mm。LNAPL 试剂分别采用大豆油和 0 号柴油,其物理性质如表 1 所示。为了获得轻油在砂样中流动的清晰图像,试验前先采用苏丹红 III 号将 LNAPL 均匀染色。

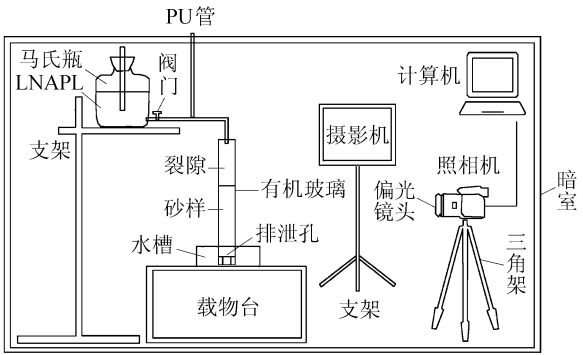


图 1 试验设备布局

Fig. 1 Layout of experimental apparatus

大豆油和 0 号柴油,其物理性质如表 1 所示。为了获得轻油在砂样中流动的清晰图像,试验前先采用苏丹红 III 号将 LNAPL 均匀染色。

表 1 LNAPL 试剂物理性质参数

Table 1 Physical property parameters of LNAPL

LNAPL 类型	密度/($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	沸点/ $^{\circ}\text{C}$	20 $^{\circ}\text{C}$ 下表面张力/ ($\text{MN} \cdot \text{m}^{-1}$)	20 $^{\circ}\text{C}$ 下运动黏度/ ($\text{mm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$)
大豆油	0.915	230	33	8.5
0 号柴油	0.840	180	26	3.6

1.3 试验过程

a. 在向装置内填充砂样前,先在装置底部排泄孔处垫一小块纱布以防砂样外漏。在装置底部开始均匀地铺一层厚约 3.5 cm 的砾石,然后开始向上分层均匀地填入砂样,每填满 2 ~ 3 cm 的砂层后静置一段时间使

砂样变形稳定,并使其与装置内壁充分接触。在砂样填到距离装置顶部 20 cm 处时将模拟裂隙的材料预先固定于装置中间设计位置,将裂隙材料的位置调整完毕后分别向模拟裂隙两侧继续填充砂样,并使砂样充分均匀填满。

b. 裂隙-介质材料填充完毕后,装置静置于水槽中足够长时间,待水位自由上升并形成稳定的毛细带。静置 20 h 后,毛细上升高度为 11.0 cm。以水槽中的水位作为饱水带的水位,水位高度为 5 cm。

c. 2 组试验均是在 28 ℃ 恒定室温条件下进行,采用的是马氏瓶恒压注油,注油入渗压强为 250 Pa。为了实现 LNAPL 在入渗瞬间能够均匀地注入裂隙-基质系统中,注油前在砂层上方铺一层塑料薄膜,让 LNAPL 先注入薄膜上方,等到液面水平稳定后迅速将保鲜膜抽取掉,从而可以使 LNAPL 在初始入渗的瞬间均匀地到达裂隙-基质系统表面,抽取保鲜膜过程中马氏瓶保持溢流状态,压力差恒定,注油压力保持为 250 Pa。

d. 准备工作完成,试验开始后用数码相机拍照采集图像。开始阶段 LNAPL 经过裂隙通道时速率较快,拍照频率控制在每 10 s 一张,进入毛细带后迁移速度变慢,改为每 30 s 一张,在进入饱水带锋面基本稳定后将拍照频率定为每 2 min 一张。

2 试验结果和分析

2.1 LNAPL 入渗过程

LNAPL 均匀注入裂隙-基质系统表面后开始下渗, LNAPL 在裂隙处形成一个尖锐狭长的优先流锋面,并沿着裂隙优先通道迅速向下渗透,初始锋面形态呈锥形;相对于中间的裂隙,两侧基质中的 LNAPL 入渗迁移明显滞后于中间的优先流,锋面以均匀平行的形态向下缓慢入渗。2 种不同黏滞性的 LNAPL 产生的优先流锋面随时间变化如图 3 所示。

从试验结果可以看出,大豆油和 0 号柴油在重力作用下向下迁移,在毛细带以上以竖向扩散为主,同时由于界面张力的作用,也产生了横向扩散。大豆油和 0 号柴油前锋到达毛细带的时间不同。大豆油于第 20 min 前锋运移到毛细带的上边界,优先流锋面长度为 22.76 cm,锋面宽度为 9.12 cm,优先流锋面竖向的平均扩散速度为 0.190 mm/s,横向平均扩散速率为 0.076 mm/s。0 号柴油仅用了 3 min 便到达毛细带的上边界,优先流锋面长度为 20.29 cm,锋面宽度为 15.91 cm,优先流锋面竖向的平均扩散速率为 1.127 mm/s,横向平均扩散速率为 0.884 mm/s。由于裂隙存在产生的优先流进入到毛细带之后下渗速度减缓,横向扩散的速度增大,锋面逐渐变宽,形态变缓趋于半圆形。LNAPL 在毛细带运移的过程也是油相驱替水相、气相的一个过程,油相驱替水和气从装置底部的排泄孔排出,当大部分水和气体被驱替排出后(也有小部分残留在 LNAPL 中),由于试验采用的是定压力的补给,因此 LNAPL 在连续油压的作用下继续向下迁移,穿过毛细带后进入饱水带,然后从排泄孔排出进入水槽。大豆油进入饱水带后整个优先流锋面呈现为“凸”字状,锋面在毛细带边缘交界处形似纺锤体状;0 号柴油进入饱水带以后,优先流锋面几乎完全与两侧的基质流锋面平行融合。

2.2 不同黏滞性 LNAPL 对优先流影响分析

2.2.1 锋面长度和曲率

为了定量描述黏滞性对 LNAPL 在裂隙-基质系统中迁移的影响,选取锋面长度和锋面曲率进行定量描述。锋面长度定义为优先流锋面前端到达点与入渗位置之间的垂直距离;锋面曲率定义为以锋面曲线上一点取该曲线的密切圆,此密切圆的曲率近似看作该锋面曲线的曲率,曲率越大则说明锋面的弯曲程度越大。

2 种黏滞性不同的 LNAPL 产生的优先流锋面长度和曲率对比曲线如图 4 所示。从图 3 可见,不同黏滞性的 LNAPL 穿透整个非饱和带的时间不同。大豆油穿透整个非饱和带用了 60 min,0 号柴油仅用了 8 min,前者穿透非饱和带的时间是后者的 7.5 倍,可见黏滞性对 LNAPL 的迁移行为有很大影响。试验结果表明大豆油在常温条件下的运动黏度为 8.5 mm²/s,0 号柴油的运动黏度为 3.6 mm²/s(表 1)。大豆油的运动黏度

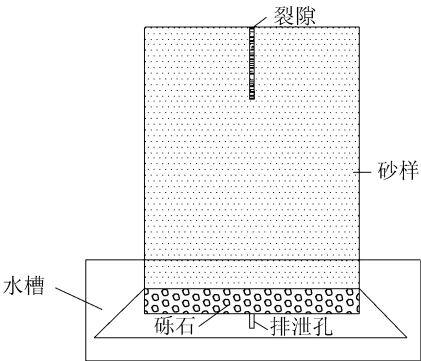


图 2 试验模型装置

Fig. 2 Equipment of experimental model

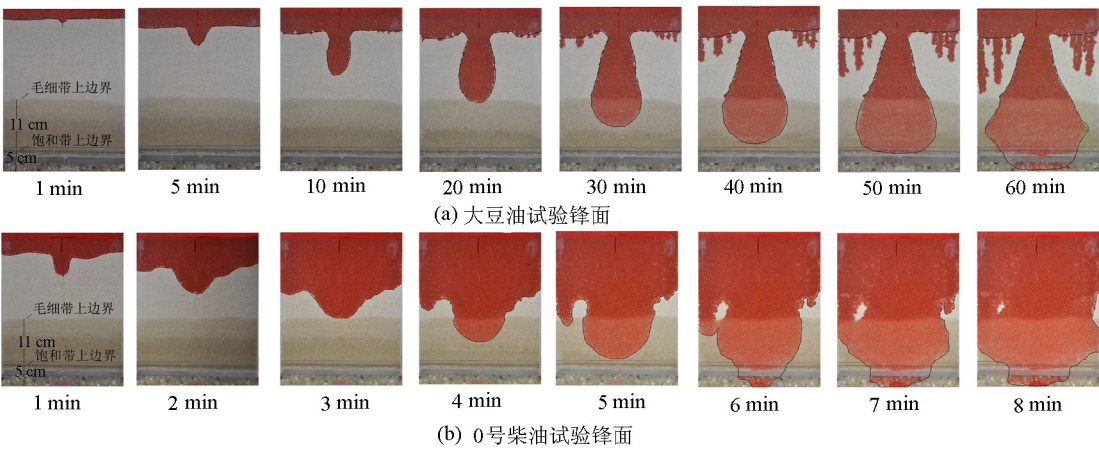


图 3 不同黏滯性的 LNAPL 优先流锋面随时间变化图像

Fig. 3 Variations of edge curve of preferential flow of LNAPLs with different viscosities with time

是 0 号柴油的 2.4 倍,大豆油在迁移过程中需要克服的内摩擦力远远大于 0 号柴油。

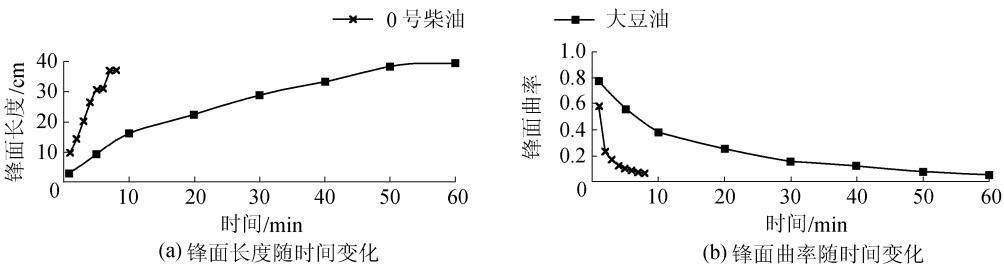


图 4 不同黏滯性的 LNAPL 试验锋面对比

Fig. 4 Comparison of edge curves of preferential flow of LNAPLs with different viscosities

0 号柴油和大豆油产生的锋面长度变化曲线如图 4(a) 所示,在同一时刻,0 号柴油锋面的长度总是大于大豆油,并且前者锋面长度变化曲线的斜率也大于后者,说明 0 号柴油的迁移速度大于大豆油, LNAPL 的黏滯性越小,优先流前锋的运移速度越快。0 号柴油和大豆油产生的锋面曲率变化曲线如图 4(b) 所示,二者锋面曲率都由大变小,说明优先流锋面形态都由尖锐变平缓。锋面曲率变化曲线的斜率在入渗初期都大于入渗中期和后期,这是因为入渗初期 LNAPL 经过裂隙通道的入渗速度很快。而 0 号柴油曲率变化曲线的斜率在入渗初期大于大豆油,说明在入渗初期 0 号柴油的锋面形态变化速率大于大豆油,其形态变化的剧烈程度大于大豆油。

2.2.2 入渗面积和锋面周长

LNAPL 入渗面积和锋面周长可以反映其在非饱和带裂隙-基质系统中穿透的程度和形状。不同黏滯性的 LNAPL 产生的入渗面积和锋面周长对比曲线分别见图 5、图 6。由图 5 可知,0 号柴油从入渗初期开始到入渗结束,其入渗面积在相同高度上总是比大豆油大,由斜率看出,0 号柴油入渗面积的增长速率大于大豆油。该结果说明 LNAPL 通过裂隙-基质系统快速进入毛细带,黏滯性小的 LNAPL 入渗过程中需要克服的内摩擦阻力小,优先流锋面和两侧的基质流锋面增长速率都很快并且迅速相融合,入渗范围大于黏滯性较大的 LNAPL,并且增长速率更快。

对比锋面周长曲线(图 6)可以看出,在相同高度上,0 号柴油锋面周长在试验全过程中小于大豆油,黏滯性大的大豆油优先流前锋面与基质流锋面之间的融合度不如黏滯小的 0 号柴油,再加上基质流锋面上出现的多个指流,使大豆油产生的锋面轮廓周长大于 0 号柴油的锋面轮廓。锋面周长反映的是优先流锋面与基质流锋面的融合程度。0 号柴油锋面周长的增长速率相对较小,大豆油在非饱和带入渗锋面周长增长速率相对较大,在锋面进入饱和带后周长出现突然增长,这主要是因为横向扩散开展变快的原因。LNAPL 黏滯性越小,优先流锋面与基质流锋面的融合程度越好,锋面融合速度越平缓,锋面变化越稳定。

2.2.3 锋面优先流程度

为了刻画不同黏滯性的 LNAPL 产生优先流的突出程度,用优先流锋面长与两侧基质流锋面长之比 $R =$

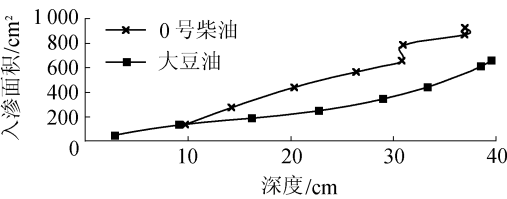


图 5 不同黏滞性 LNAPL 入渗面积

Fig. 5 Infiltration area of preferential flow of LNAPLs with different viscosities

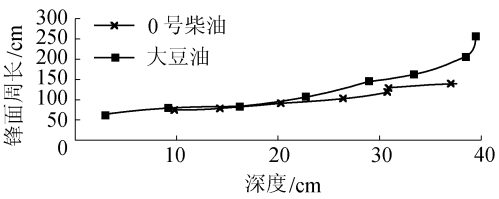


图 6 不同黏滞性 LNAPL 锋面周长

Fig. 6 Perimeter of edge curve of preferential flow of LNAPLs with different viscosities

L_1/L_2 来描述优先流的程度,其中 L_1 为优先流前锋面长度, L_2 为优先流两侧的基质流锋面长度^[14]。 R 越大, 优先流程度越明显。不同黏滞性的 LNAPL 产生优先流的 R 值对比如图 7 所示,大豆油的 R 值由小变大,说明优先流的程度在不断变大, R 值曲线的斜率也相对较大,优先流变化程度剧烈;0 号柴油的 R 值由大变小,说明优先流的程度在不断变小, R 值曲线斜率变化总体较小,优先流变化程度较弱。总体而言,大豆油产生的 R 值比 0 号柴油大。在基质中,黏滞性小的液体渗透系数大,流动快,优先流不明显;黏滞性大的液体渗透系数小,流动慢,优先流明显。因此,黏滞性越小的 LNAPL 通过裂隙优先通道运移的速度越剧烈,到达地下饱水带的时间远远小于黏滞性较大的 LNAPL,通过裂隙污染地下含水层的速度则越快。

2.3 均匀介质中出现的指流现象

试验过程中除了在裂隙处产生明显的优先流现象外,在两侧基质中也产生了程度不一的指流现象,如图 3 所示。以大豆油为 LNAPL 试剂的试验中,出现了多个形态细长的指流,而以 0 号柴油为试剂的试验仅产生单个形态粗短的指流,并且其迅速与中间裂隙产生的优先流相融合,继而消失^[15]。这种形态上的差异主要是由 LNAPL 的黏滞性差异引起的,0 号柴油黏滞性较小,垂向流动与横向扩散速度的比值相对较小,因此较难产生指流现象,产生指流后由于横向扩散速度较大,也容易与裂隙产生的优先流相融合。黏滞性相对较大的大豆油垂向上的速度远远大于横向上的扩散速度,因此更容易产生指流现象。

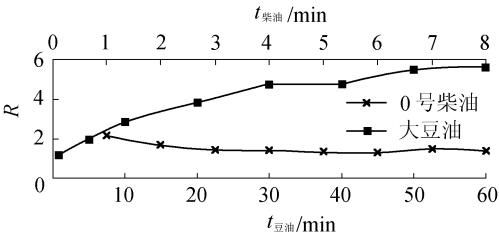


图 7 2 种不同黏滞性油类产生的优先流程度对比

Fig. 7 Comparison of extent of preferential flow of LNAPLs with different viscosities

3 结 论

- a. LNAPL 的黏滞性决定其在非饱和带中迁移的时间,黏滞性越小的 LNAPL 到达饱水带的时间小于黏滞性大的 LNAPL,通过裂隙通道产生的优先流抵达饱水带的速度更快。
- b. 黏滞性较小的 0 号柴油锋面曲率小于黏滞性较大的大豆油,且变化速率较快,横向扩散速度较快,黏滞性较大的大豆油横向扩散速度则较慢。
- c. 在相同入渗深度上,0 号柴油的入渗面积大于大豆油的入渗面积,但由于裂隙优先流及基质指流的存在,大豆油的锋面周长在相同入渗深度上要大于柴油。
- d. 黏滞性较大的 LANPL 裂隙优先流及基质指流明显,即优先流锋面长与基质流锋面的长度之比相对较大。

参考文献:

[1] 叶为民,金麒,黄雨,等. 地下水污染试验研究进展[J]. 水利学报,2005,36(2):1-6. (YE Weimin, JIN Qi, HUANG Yu, et al. Progress study of experiments on groundwater contaminants[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2005, 36(2): 1-6. (in Chinese))

[2] FETTER C W. 污染水文地质学[M]. 周念清,黄勇,译. 北京:高等教育出版社,2011.

[3] YANG Zhibing, HANNA Z, AULI N, et al. The role of geological heterogeneity and variability in water infiltration on non-aqueous phase liquid migration[J]. Environmental Earth Science, 2013, 68(7):2085-2097.

[4] JAEHAK J, RANDALL J C. An analytical model for predicting LNAPL distribution and recovery from multi-layered soils[J].

- Journal of Contaminant Hydrology,2013,156:52-61.
- [5] SENTENAC P, MONTINARO A, KULESSA B. Diesel transport monitoring in simulated unconfined aquifers using miniature resistivity arrays[J]. Environmental Earth Science,2010, 61(1):107-114.
- [6] SLEEP B E, SYKES J F. Compositional simulation of groundwater contamination by organic compounds:1. model development and verification[J]. Water Resources Research, 1993, 29(6):1697-1708.
- [7] KECHAVARZI C, SOGA K, LLLANGASEKARE T H. Two-dimensional laboratory simulation of LNAPL infiltration and redistribution in the vadose zone[J]. Journal of Contaminant Hydrology,2005,76(3/4):211-233.
- [8] SIMANTIRAKI F, AIVALIOTI M, GIDARAKOS E. Lmplementation of an image analysis technique to determine LNAPL infiltration and distribution in unsaturated porous media[J]. Desalination,2009,248(1/2/3):705-715.
- [9] 武晓峰,唐杰,藤间幸久. 地下水中轻质有机污染物(LNAPL)透镜体研究[J]. 环境污染与防治,2000,22(3):17-20. (WU Xiaofeng,TANG Jie,FUJIMA Y. Study on LNAPLs lens in subsurface water[J]. Environmental Pollution and Control,2000,22(3):17-20. (in Chinese))
- [10] 邢巍巍,胡黎明. 轻非水相流体污染物运移的离心模型[J]. 清华大学学报:自然科学版,2006, 46(3):341-345. (XING Weiwei,HU Liming. Centrifuge modeling of light non-aqueous phase liquid migration[J]. Journal of Tsinghua University:Natural Sciences,2006,46(3): 341-345. (in Chinese))
- [11] 李永涛,王文涛,王丽,等. 轻非水相液体在地下多相渗流的 K - S - P 关系研究[J]. 灌溉排水学报,2008,27(6):117-119. (LI Yongtao,WANG Wentao,WANG Li,et al. Relative K - S - P relationship of LNAPLs for infiltration in porous media[J]. Journal of Irrigation and Drainage,2008,27(6):117-119. (in Chinese))
- [12] 刘汉乐,周启友,徐速. 非饱和带中非均质条件下 LNAPLs 运移与分布特性实验研究[J]. 水文地质工程地质,2006,33(5):52-57. (LIU Hanle,ZHOU Qiyu,XU Su. The experimental study of LNAPL migration and distribution in heterogeneous media of unsaturated zone[J]. Hydrogeology and Engineering Geology,2006,33(5):52-57. (in Chinese))
- [13] 刘汉乐,马腾飞,程亚平. LNAPLs 污染物在层状非均质多孔介质中的运移试验研究[J]. 环境科学与技术,2013,36(1):31-34. (LIU Hanle,MA Tengfei,CHENG Yaping. Migration of LNAPLs contamination in layered heterogeneous porous media [J]. Environmental Science and Technology,2013,36(1):31-34. (in Chinese))
- [14] 周志芳,王锦国,黄勇. 裂隙介质水动力学原理[M]. 北京:高等教育出版社,2006.
- [15] 杨宾,李慧颖,伍斌,等. 4 种 NAPLs 污染物在二维砂箱中的指进锋面形态特征研究[J]. 环境科学,2013,34(4):1545-1552. (YANG Bin,LI Huiying,WU Bin,et al. Sand box study on fingering front morphology for NAPLs infiltrated in homogeneous porous media[J]. Environmental Science,2013,34(4):1545-1552. (in Chinese))