

DOI: 10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.2019.05.22

多孔介质界面对重非水相液体迁移过程影响的图像法研究

刘汉乐^{1,2}, 郝胜瑶^{1,2}, 马建初^{1,2}

(1. 桂林理工大学广西环境污染控制理论与技术重点实验室, 广西 桂林 541004;
2. 桂林理工大学广西岩溶地区水污染控制与用水安全保障协同创新中心, 广西 桂林 541004)

摘要: 重非水相液体(dense nonaqueous phase liquid, DNAPL)污染土壤和地下水的问题已引起广泛关注。研究其在不同粒径多孔介质及其界面的运移特征形态是确定污染区域、修复治理土壤和地下水环境的前提。文章通过室内试验研究多孔介质界面对DNAPL运移与分布特性的影响。首先在二维砂槽上进行DNAPL污染物的入渗试验,试验过程中用数码相机拍照,将DNAPL扩散过程以图像的形式记录下来;然后用AutoCAD对图片进行处理,绘制出DNAPL迁移过程的锋面变化图。结果表明:DNAPL入渗过程中,迁移主要受到重力作用与毛细作用的控制,毛细作用力随着介质粒径的增大逐层减小,重力作用逐渐起主导作用使污染物入渗速度逐层增大;介质结构影响DNAPL的迁移形态,介质粒径逐层增大, DNAPL污染物的渗流面与指进扩散宽度逐层减小,扩散方式由面状变为指状;在不同粒径介质界面介质结构发生突变时, DNAPL迁移锋面线曲率也相应变大,此时DNAPL的迁移呈现“凸”型特征,另外,不同的界面横向扩散的滞留宽度不同,随着介质粒径的增大,界面的横向扩散宽度相对变短。

关键词: 重非水相液体; 多孔介质界面; 锋面曲线; 迁移和分布

中图分类号: X523; X53

文献标识码: A

文章编号: 1000-3665(2019)05-0169-06

Investigation on the influence of porous media interface on DNAPL migration based on image methods

LIU Hanle^{1,2}, HAO Shengyao^{1,2}, MA Jianchu^{1,2}

(1. Guangxi Key Laboratory of Environmental Pollution Control Theory and Technology, Guilin University of Technology, Guilin, Guangxi 541004, China; 2. Guangxi Collaborative Innovation Center for Water Pollution Control and Water Safety in Karst Area, Guilin University of Technology, Guilin, Guangxi 541004, China)

Abstract: The problem of dense nonaqueous phase liquid (DNAPL) polluting soil and groundwater has attracted extensive attention. The study of the transport characteristics of porous media with different particle sizes and their interfaces is the premise for determining the pollution area and repairing the groundwater environment. The effects of porous media interface on the migration and distribution of heavy non-aqueous liquids (DNAPL) are investigated by laboratory experiments. DNAPL infiltration experiment is conducted in a 2-D sand tank and pictures are taken to record the diffusion process using the digital camera. The image is processed with AutoCAD to draw DNAPL migration and the infiltration frontal variation pictures in different times are obtained. The results show that during the process of DNAPL infiltration, the migration is mainly controlled by gravity and capillary action. The capillary force decreased with the increasing particle size of the

收稿日期: 2018-11-14; 修订日期: 2019-02-19

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(41662022); 广西自然科学基金项目资助(2017GXNSFAA198233); 广西高等学校高水平创新团队及卓越学者计划项目(002401013001); 广西危险废物处置产业化人才小高地

第一作者: 刘汉乐(1979-), 博士, 教授, 主要从事地下水污染方面的教学和研究工作。E-mail: 715254178@qq.com

media, and the gravity plays a leading role in increasing the infiltration rate of the pollutants. The medium structure affects the migration pattern of DNAPL. The particle size of the medium increases layer by layer, the percolation area and the diffusion width of the DNAPL contaminant decrease layer by layer, the diffusion mode changes from planar to finger. When the interface structure is abrupt, the curvature of the DNAPL migration front line is correspondingly larger. At this time, the migration pattern of DNAPL exhibits a “convex” shape. In addition, different interfaces have different retention widths for lateral diffusion. As the particle size of the medium increases, the lateral diffusion width of the interface becomes relatively short. The results are of important practical significance for the evaluation of DNAPL contamination and the restoration of contaminated sites.

Keywords: DNAPL; porous media interface; front curve; migration and distribution

重非水相液体 (dense nonaqueous phase liquid, DNAPL) 密度比水大, 常见的有三氯乙烯 (Trichloroethylene, TCE)、四氯乙烯 (Perchloroethylene, PCE) 等含氯有机溶剂。随着石油工业及其相关有机化工产业的发展, 这类污染物进入地下环境污染土壤和地下水, 因难溶或微溶于水而以单独的相存在, 已经成为土壤和地下水污染的长期污染源。DNAPL 具有低水溶性、弱迁移性、难降解性, 相较于轻非水相液体 (LNAPL), 它能穿透含水层而滞留在含水层底部, 迁移行为十分复杂, 为修复治理增加了难度。因此, 研究 DNAPL 的污染迁移过程与分布特性对预防和治理这类污染物有着重要意义。

近年来, 国内外学者开展了大量室内砂箱试验探讨 DNAPL 在多孔介质中的运移特征, 从不同机理分析影响 DNAPL 运移路径的主要因素及其作用机制^[1-3]。Held 等^[4]研究了 DNAPL 在饱和均质三维砂槽中的运移规律, 发现 DNAPL 的指进现象与多孔介质的颗粒大小、DNAPL 的性质及泄漏条件相关。Chambers 等^[5]采用电阻抗成像法对室内砂柱饱水带中的 DNAPL 运移过程进行了监测, 得到不同时刻 DNAPL 运移的电阻率图像, 清晰描绘出 DNAPL 的运移特征及范围。Khalifa 等^[6]通过建立孔隙模型并应用于均质砂柱室内试验, 模拟研究饱和介质排水过程中 DNAPL 与水两相流的重力驱散指进现象, 再现了流体相对给定流动模式及流速变化的重新分布, 但却没有考虑介质的非均质性。Deng 等^[7]结合运用高密度电阻率成像法与光透射可视化方法研究了 DNAPL 在非均质介质中的入渗行为, 电阻率成像法监测到高渗透性透镜体周围的污染羽流范围比低渗透性透镜体的要大, 表明低饱和度 DNAPL 区域的电阻率增加不够明显。D'Aniello 等^[8]采用 γ 射线法监测非均质介质中饱水条件下 DNAPL 的迁移特征, 表明非均质性显著影响 DNAPL 的运移路径及空

间分布。Earning 等^[9]从数值模拟角度出发, 对比非均质性因素, 研究地下水流速对 DNAPL 在均质介质中运移行为的影响, 得出不同流速对 DNAPL 运移的位置、结构和几何特征的影响更为敏感。相对而言, 国内在此方面的研究起步较晚。郑菲等^[10]采用光透射可视化 (LTV) 方法监测 DNAPL 在随机非均质介质内的迁移行为并定量分析 DNAPL 的饱和度, 在非均质介质中四氯乙烯 (PCE) 绕开细砂透镜体, 沿着粗砂透镜体构成的优势通道运移, 运移路径的不规则性及饱和度分布的空间变异性增强。郭健等^[11]利用光透法和高密度电阻率法监测二维均质孔隙介质中 DNAPL 迁移过程的电阻率值, 再利用 Archie 公式获得 DNAPL 饱和度的空间分布, 与光透法结合后的高密度电阻率成像法能定量监测饱和孔隙介质中 DNAPL 的入渗过程, 克服了传统方法获取 β 值时存在的困难。乔文静等^[12]通过开展二维砂箱实验, 应用光透法对非均质孔隙介质中两相流进行了定量试验, 发现 DNAPL 运移在透镜体处无法克服介质毛细压力, 停止垂向入渗并在其表面堆积, 开始横向迁移, 绕过透镜体后继续向下迁移, 最终在砂槽底部形成连续 DNAPL 污染池。目前, 这些研究大多数仅考虑均质介质或含有层状透镜体的情境, 对于非均质介质突变交界面的 DNAPL 运移特征研究尚未见报道^[13]。

光学图像分析法具有较高的空间和时间分辨率, 能够快速、准确、非侵入地一次性获取整个区域上的动态流体分布^[14-15]。本文通过二维砂槽研究 DNAPL 在非均质介质中的运移行为, 选择三氯乙烯 (TCE) 作为特征污染物, 采用数码照相机拍照获取 TCE 的迁移过程并结合图像得到锋面变化曲线, 探讨非均质介质界面对 DNAPL 污染物迁移行为特征的影响, 以期对 DNAPL 污染的污染源调查、修复治理提供理论参考。

1 试验材料及方法

1.1 试验装置

砂槽材料选用无色透明的有机玻璃,尺寸为长×宽×高=80 cm×3 cm×60 cm,在距离底部5 cm处设置注水小孔。砂槽由上至下分别为细砂、中砂、粗砂、砾石、卵砾石,每层高10 cm,一共分为5层,布置及相关参数如表1。

表1 介质分布及相关参数

Table 1 Arrangement and parameters of sand media

砂层	介质	粒径/mm	孔隙度
1	细砂	0.160~0.315	0.265
2	中砂	0.315~0.450	0.421
3	粗砂	0.45~0.90	0.579
4	砾石	0.9~4.0	0.748
5	卵砾石	4.0以上	0.823

1.2 试验方法

首先使用标准规格的筛砂网取一定量的细砂、中砂、粗砂、砾石、卵砾石。分选好砂子后,开始装砂,用烧杯装取一定质量的砂填入装置内,层层压实。首先装入约10 cm高的卵砾石层,依次装入砾石、粗砂、中砂、细砂,每层高均为10 cm,装至离砂槽顶部约10 cm处,停止装砂(图1)。

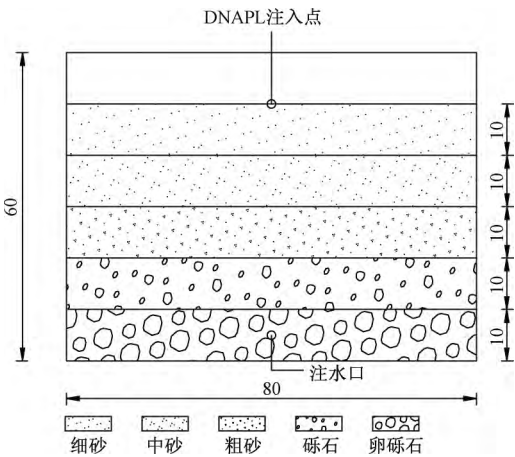


图1 二维砂槽试验装填示意图(单位:cm)

Fig. 1 Schematic diagram of the sand box (cm)

本试验选用三氯乙烯(TCE)作为DNAPL污染物的代表物。用溶于有机溶剂不溶于水的苏丹红作为染料将其染色,提高DNAPL与砂土的对比度。将砂槽静置2 d后开始注入DNAPL污染物,每小时平均注入约为125 mL,历时4 h。注入总量约为500 mL。

在注入DNAPL污染物开始之前,将数码照相机架好放置于砂槽之前,整个砂槽在数码照相机的拍摄范

围内,让数码照相机能完全记录整个砂槽内DNAPL的迁移入渗情况;将试验室内的灯光关闭,将两盏台灯放在装置的两侧供给光源,保证拍摄的图像清晰。每次拍摄的平均间隔时长为5 min,在迁移到多孔介质界面时缩短间隔时间,拍摄多组DNAPL入渗到界面的图像。

2 结果与讨论

试验过程中,采用数码照相机拍摄DNAPL污染物在层状多孔介质中的入渗迁移过程,得到图2。

在DNAPL污染物垂直下渗4 mm时,出现横向扩散。入渗50 min后,DNAPL污染物到达细砂与中砂界面(第一界面,以此类推),DNAPL在细砂层中的入渗速度为0.2 cm/min。DNAPL污染物在界面处滞留90 min,入渗140 min时在第一界面横向扩散宽度达到25 cm,颜色不断加深,由于介质结构突变使DNAPL污染物迁移方式发生了明显改变,迁移锋面线密集,主要表现为横向扩散。入渗155 min,DNAPL污染物发生突进,垂向入渗3 cm,第一层界面横向扩散宽度达到37.2 cm;入渗170 min,DNAPL污染物到达第二层界面,DNAPL污染物在中砂层中的入渗速度为0.33 cm/min,此时第一层界面横向扩散宽度达48 cm。DNAPL污染物在第二层界面滞留时间为10 min,横向扩散宽度为8 cm。180 min时DNAPL污染物开始在粗砂层中呈“指状”入渗,200 min时DNAPL污染物入渗到达第三界面,DNAPL污染物在粗砂层中的迁移速度为0.5 cm/min,此时DNAPL污染物在第一界面横向扩散宽度达到58 cm。在第三界面滞留约15 min并不断地横向扩散,扩散宽度达到24 cm。215 min时DNAPL污染物开始下渗,在砾石层迁移10 min后即225 min时污染物通过砾石与卵砾石层界面,在砾石层中DNAPL污染物迁移的速度约为1 cm/min。介质粒径变大后,颗粒间的孔隙度变大,DNAPL污染物流动速度也相应变大。注完污染物后,DNAPL在入渗270 min时,第一界面最终横向扩散宽度达到72.5 cm,第二界面达到33 cm,第三界面达到39 cm,第四界面达到15 cm。

将数码照相机拍摄到的图像导入AutoCAD2014制图软件内,绘制不同时刻的DNAPL污染物迁移过程的锋面变化曲线,然后将不同时刻DNAPL的锋面曲线重叠到一幅图上,得到整个试验过程中DNAPL锋面的空间变化图(图3)。由图可知,锋面曲线形状不规则,呈现为指状扩散。DNAPL污染物主要在重力和毛细

作用力下迁移入渗,以垂向入渗为主,局部区域孔喉尺寸的大小决定了迁移路径。在不同粒径介质界面介质

结构发生突变,DNAPL 迁移锋面线曲率也相应变大,此时 DNAPL 的迁移呈现“凸”型特征。

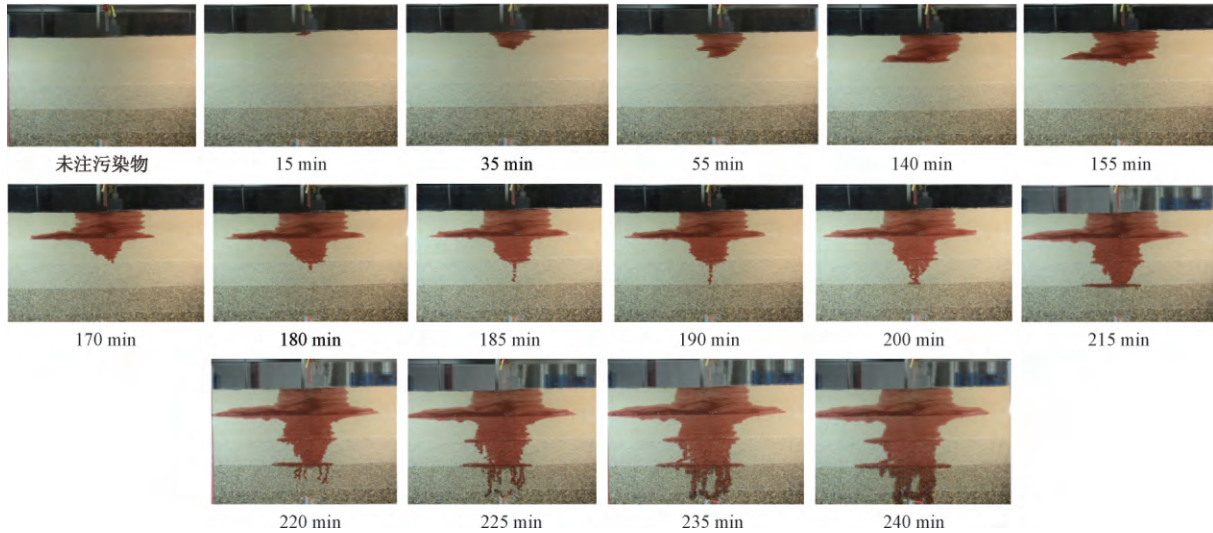


图2 DNAPL 污染物入渗过程

Fig. 2 DNAPL infiltration process image

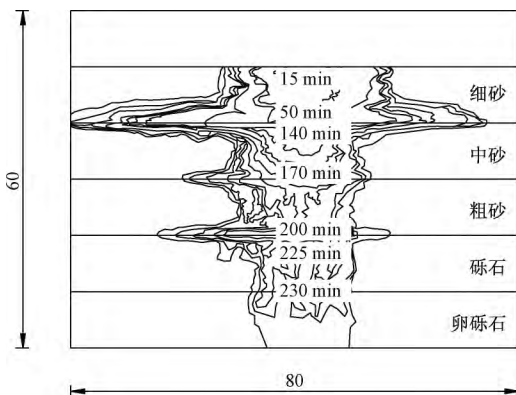


图3 DNAPL 迁移锋面曲线(单位: cm)

Fig. 3 Migration front curve of DNAPL (cm)

随着时间的推移,DNAPL 污染范围逐渐扩大,可以明显地看到其在界面的分布以及滞留宽度。在每个层 DNAPL 污染物运移的时间、速度以及界面横向扩散宽度具体见表 2。

注入 DNAPL 污染物初期,介质上方污染物堆积量少,细砂层中受到较强的毛细作用力,其渗流面积与指流扩散宽比其它层大,测得污染物在介质层横向扩散宽度达 26.7 cm,迁移历时 50 min,迁移速度 0.2 cm/min。对比在中砂层与粗砂层 DNAPL 污染物的迁移特征,首先从运移时间方面分析,污染物在中砂层运移时间为 30 min,在粗砂层运移时间为 20 min,表明粒径越大运移速度越快。其次在迁移形态方面,进入中砂层后,污染物以面状向下迁移,指流宽度大,渗

流面积大;相比较进入粗砂层后,污染物则是呈指状入渗向下迁移,指流较细,渗流面积小,说明粒径变化使得污染物迁移形态也发生了明显的改变。再次在作用力影响方面,观察 140 ~ 170 min(中砂层)与 180 ~ 200 min(粗砂层)的运移过程图可以发现,140 min 时污染物开始向下迁移,经过 15 min(即 155 min)观察到迁移横向距离为 14.8 cm,比垂向距离长 8.1 cm,明显反映出毛细力占主导作用为主要驱动力;相比较粗砂层,180 min 时污染物开始下渗,主要迁移方式以垂向迁移为主,经过 5 min(即 185 min)观察到污染物已经形成一道向下的指状流,表明重力占主导作用为主要驱动力。单独每层作为不同粒径的均质介质我们发现,同样的注入速率下,粒径越大,污染物渗流面与指进扩散宽度越小,逐渐表现出指状迁移形态,即重力作用明显增强,毛细作用逐渐减弱,污染物迁移速度由 0.2 cm/min 增加到 1 cm/min,呈现不断增大的趋势。

通过表 2 可知,DNAPL 污染物在第一界面的横向扩散宽度最大,滞留时间最久。对比第二界面与第三界面,污染物在第二界面滞留时间与宽度比第三界面要稍短,这可能是由于污染物在细砂层及第一界面处长时间堆积产生较强压力,在第二界面滞留 10 min 后重力作用力成为主要驱动力使其向下迁移。随着污染物到达第三界面,来自上方堆积量的压力也逐渐削弱。由于所选砾石与粗砂粒径差值为 1.7 cm,大于中砂与粗砂粒径差值(0.3 cm),因而毛细作用力有明显差

异,且砾石层粒径大小在 0.9~4.0 cm 之间,分选性较差,在界面处的砾石层介质相对密实,从而污染物主要受到界面处粗砂层介质相对较强的毛细作用力,在第三界面滞留时间比第二界面久,迁移扩散宽度(39 cm)也长于第二界面(33 cm)。与第一界面相比,第二界面与第三界面污染物迁移扩散宽度可看作相当,第四界面污染物迁移扩散宽度最短。随着介质毛细作用力逐层减弱,DNAPL 污染物在界面的扩散宽度由 72.5 cm 缩短至 15 cm,总体呈现逐渐减小的趋势。

表2 砂层及界面 DNAPL 迁移特征相关参数

Table 2 Parameters related to DNAPL migration characteristics in the sand layer and medium interface

砂层及界面	迁移历时/min	速度/(cm·min ⁻¹)	界面滞留时间/min	界面滞留宽度/cm	界面最终横向扩散宽度/cm
细砂	50	0.20	—	—	—
第一界面	—	—	90	25.0	72.5
中砂	30	0.33	—	—	—
第二界面	—	—	10	8.0	33.0
粗砂	20	0.50	—	—	—
第三界面	—	—	15	24.0	39.0
砾石	10	1.0	—	—	—
第四界面	—	—	0	0	15

3 结论

(1) 介质结构影响 DNAPL 的迁移形态。介质粒径逐层增大,DNAPL 污染物的渗流面积与指进扩散宽度逐层减小,扩散方式由面状变为流状。在不同粒径介质界面介质结构发生突变,DNAPL 迁移锋面线曲率也相应变大,此时 DNAPL 的迁移呈现“凸”型特征。

(2) DNAPL 在迁移过程中主要受到重力与毛细力的控制,污染物在界面迁移时毛细作用力起主导作用为主要驱动力。毛细力随着介质粒径的增大逐层降低,重力作用逐渐起主导作用为主要驱动力,使得污染物入渗速度逐层增大。

(3) DNAPL 在迁移过程中向下入渗的同时,界面处也发生较快的横向扩散现象,锋面曲线密集。不同的界面横向扩散宽度不同,随着介质粒径的增大,界面的横向扩散宽度相对变短,其中第一界面横向扩散宽度最长,为 72.5 cm,第四界面最短,为 15 cm。

参考文献:

[1] WU M, CHENG Z, WU J, *et al.* Estimation of representative elementary volume for DNAPL saturation and DNAPL-water interfacial areas in 2D

heterogeneous porous media [J]. *Journal of Hydrology*, 2017, 549: 12–26.

[2] ALAZAIZA M Y D, SU K N, BOB M M, *et al.* Non-aqueous Phase Liquids Distribution in Three-Fluid Phase Systems in Double-Porosity Soil Media: Experimental Investigation Using Image Analysis [J]. *Groundwater for Sustainable Development*, 2018, 7: 133–142.

[3] HALIHAN T, SEFA V, SALE T, *et al.* Mechanism for detecting NAPL using electrical resistivity imaging [J]. *Journal of Contaminant Hydrology*, 2017, 205: 57–69.

[4] HELD R J, ILLANGASEKARE T H. Fingering of dense non aqueous phase liquids in porous media: 2. Analysis and classification [J]. *Water Resources Research*, 1995, 31(5): 1223–1231.

[5] CHAMBERS J E, LOKE M H, OGILVY R D, *et al.* Noninvasive monitoring of DNAPL migration through a saturated porous medium using electrical impedance tomography [J]. *Journal of Contaminant Hydrology*, 2004, 68(1): 1–22.

[6] KHALIFA NSIR, GERHARD SCHÄFER, RAPHAEL DI CHIARA ROUPERT *et al.* Pore scale modelling of DNAPL migration in a water-saturated porous medium [J]. *Journal of Contaminant Hydrology*, 2018, 215: 39–50.

[7] DENG Y, SHI X, XU H, *et al.* Quantitative assessment of electrical resistivity tomography for monitoring DNAPLs migration-Comparison with high-resolution light transmission visualization in laboratory sandbox [J]. *Journal of Hydrology*, 2017, 544: 254–266.

[8] D'ANIELLO A, HARTOG N, SWEIJEN T, *et al.* Infiltration behaviour of elemental mercury DNAPL in fully and partially water saturated porous media [J]. *Journal of Contaminant Hydrology*, 2018, 209: 14–23.

[9] ERNING K, DAHMKE A, SCHÄFER D. Simulation of DNAPL infiltration and spreading behaviour in the saturated zone at varying flow velocities and alternating subsurface geometries [J]. *Environmental Earth Sciences*, 2012, 65(4): 1119–1131.

[10] 郑菲, 高燕维, 徐红霞, 等. 非均质性对 DNAPL 污染源区结构特征影响的实验研究 [J]. *水文地质工程地质*, 2016, 43(5): 140–148. [ZHENG F, GAO Y W, XU H X, *et al.* An experimental study of the influence of heterogeneity on the DNAPL source-zone architecture [J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2016, 133(5): 140–148. (in Chinese)]

- [11] 郭健,叶淑君,肖安林,等. 二维孔隙介质中重非水相液体饱和度测定与分析[J]. 高校地质学报, 2014, 20(2): 324–332. [GUO J, YE S J, XIAO A L, *et al.* DNAPL saturation measurements and analysis in 2-D porous media[J]. Geological Journal of China Universities, 2014, 20(2): 324–332. (in Chinese)]
- [12] 乔文静,叶淑君,吴吉春. 非均质孔隙介质中两相流的光透法应用研究[J]. 水文地质工程地质, 2015, 42(2): 112–119. [QIAO W J, YE S J, WU J C, *et al.* A study of the two-phase flow in heterogeneous porous media with the light transmission method[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2015, 42(2): 112–119. (in Chinese)]
- [13] 邓亚平,郑菲,施小清,等. 多孔介质中 DNAPLs 运移行为研究进展[J]. 南京大学学报(自然科学版), 2016, 52(3): 409–420. [DENG Y P, ZHENG F, SHI X Q, *et al.* Review on the transport of dense non-aqueous phase liquids in porous media[J]. Journal of Nanjing University (Natural Sciences), 2016, 52(3): 409–420. (in Chinese)]
- [14] 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 H L, MA T F, CHENG Y P, *et al.* Migration of LNAPLs Contaminant in Layered Heterogeneous Porous Media [J]. Environmental Science & Technology, 2013, 36(1): 31–34. (in Chinese)]
- [15] 刘汉乐,张晨富,刘宝臣,等. 轻非水相液体在不同粒径多孔介质中的运移与分布特性[J]. 水文地质工程地质, 2014, 41(2): 105–110. [LIU H L, ZHANG C F, LIU B C, *et al.* Experimental investigation of migration and distribution characteristics of LNAPL contaminants in porous media of different particle sizes [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2014, 41(2): 105–110. (in Chinese)]

编辑: 汪美华

(上接第 160 页)

- [15] 崔激,杨建,刘丽. 连续降雨作用下非饱和土边坡的稳定性分析[J]. 水文地质工程地质, 2007, 34(3): 55–58. [CUI W, YANG J, LIU L. Analysis of continuous rainfall conditions on stability of unsaturated soil slope [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2007, 34(3): 55–58. (in Chinese)]
- [16] 李俊业,唐红梅,陈洪凯,等. 考虑饱和–非饱和和渗流作用的重庆奉节鹤峰乡场镇滑坡稳定性分析[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2010, 21(4): 1–7. [LI J Y, TANG H M, CHEN H K, *et al.* Stability analysis of Changzhen landslide in considering saturated and unsaturated seepage effects [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2010, 21(4): 1–7. (in Chinese)]
- [17] 周建烽,王均星,陈炜. 非饱和非稳定渗流作用下边坡稳定的有限元塑性极限分析下限法[J]. 岩土工程学报, 2014, 36(12): 2300–2305. [ZHOU J F, WANG J X, CHEN W. Lower bound analysis of slope stability subjected to transient unsaturated seepage [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2014, 36(12): 2300–2305. (in Chinese)]
- [18] 刘子振,言志信. 降雨入渗非饱和黏土边坡稳定性的极限平衡条分法研究[J]. 岩土力学, 2016, 37(2): 350–356. [LIU Z Z, YAN Z X. Limit equilibrium slice method for unsaturated clay slope under rainfall infiltration [J]. Rock and Soil Mechanics, 2016, 37(2): 350–356. (in Chinese)]
- [19] 王新刚,谷天峰,王家鼎. 基质吸力控制下的非饱和黄土三轴蠕变试验研究[J]. 水文地质工程地质, 2017, 44(4): 57–61. [WANG X G, GU T F, WANG J D. Research on the triaxial creep test of unsaturated loess under the matric suction control [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2017, 44(4): 57–61. (in Chinese)]
- [20] ROBERTO R. Seismically induced landslide displacements: a predictive model [J]. Engineering Geology, 2000, 58(3/4): 337–351.
- [21] SWETS J A. Measuring the accuracy of diagnostic systems [J]. Science, 1988, 240: 1285–1293.

编辑: 汪美华