

## 基于竖管法的轻非水相液体毛细上升特性研究

李志萍, 刘宇, 赵贵章, 周汇, 刘少康, 刘文辉

### A study of the capillary rise characteristics of LNAPL based on the vertical pipes method

LI Zhiping, LIU Yu, ZHAO Guizhang, ZHOU Hui, LIU Shaokang, and LIU Wenhui

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202209020>

## 您可能感兴趣的其他文章

### Articles you may be interested in

#### 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

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

刘汉乐, 郝胜瑶, 马建初 水文地质工程地质. 2019, 46(5): 169-174

#### 毛细水作用下非饱和土压缩过程的微观非连续变形数值分析

Numerical analysis of evolution of the unsaturated soil micro-structure with capillary action during compression

李强, 李同录, 李华, 沈伟, 李萍, 张常亮 水文地质工程地质. 2022, 49(4): 135-143

#### 含单裂隙非饱和带中轻非水相流体修复的数值模拟

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

赵科锋, 王锦国, 曹慧群 水文地质工程地质. 2020, 47(5): 43-55

#### 地下水典型非水相液体污染运移模拟的尺度提升研究

§{suggestArticle.titleEn}

陈梦佳, 吴剑锋, 孙晓敏, 林锦, 吴吉春 水文地质工程地质. 2020, 47(1): 11-18

#### 井间分溶示踪估计重非水相污染物残留量的影响因素数值分析

Numerical analysis of the influencing factors for estimating DNAPL residual by the partitioning interwell tracer tests

郭琼泽, 施小清, 王慧婷, 徐红霞, 吴吉春 水文地质工程地质. 2019, 46(6): 165-172

#### 半干旱地区地表-地下水系统水热运移与裸土蒸发研究

Hydrothermal transfer and bare soil evaporation in surface-groundwater systems in semi-arid areas

马稚桐, 王文科, 赵明, 黄金廷, 卢艳莹, 侯昕悦, 王一 水文地质工程地质. 2021, 48(4): 7-14



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

DOI: 10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202209020

李志萍, 刘宇, 赵贵章, 等. 基于竖管法的轻非水相液体毛细上升特性研究 [J]. 水文地质工程地质, 2023, 50(4): 105-114.  
LI Zhiping, LIU Yu, ZHAO Guizhang, et al. A study of the capillary rise characteristics of LNAPL based on the vertical pipes method[J].  
Hydrogeology & Engineering Geology, 2023, 50(4): 105-114.

## 基于竖管法的轻非水相液体毛细上升特性研究

李志萍<sup>1,2</sup>, 刘宇<sup>1</sup>, 赵贵章<sup>1</sup>, 周汇<sup>1</sup>, 刘少康<sup>1</sup>, 刘文辉<sup>1</sup>

(1. 华北水利水电大学地球科学与工程学院, 河南 郑州 450045;

2. 河南质量工程职业学院, 河南 平顶山 467000)

**摘要:** 被称为“工业血液”的轻非水相液体 (LNAPL) 及其衍生物在开采、生产、运输过程中所产生的污染已经成为常见的污染物, 目前诸多学者对 LNAPL 污染进行了广泛研究, 但对于 LNAPL 在土壤中的迁移及毛细作用研究尚不充分。本次试验的目的是通过室内模拟试验分析不同竖管直径条件下 LNAPL 在不同介质中的毛细上升规律, 为研究 LNAPL 对地下水污染提供一定的理论依据。结果表明: 影响毛细上升高度的因素大小依次为: 溶液>介质>竖管直径; 竖管直径与最大毛细上升高度并不是完全成比例关系, 并且对毛细上升高度的影响相对较小; 水与柴油在不同介质中毛细上升高度、毛细上升速率变化趋势基本一致, 但是具体数值上存在差异, 柴油的最大毛细上升高度与水相比降低了 40%~50%, 柴油的最大毛细上升速率与水相比降低 30%~50%。这些特征都能够较好地体现 LNAPL 在不同介质中的毛细上升规律, 在认识 LNAPL 对地下水的污染以及污染土地修复方面具有重要意义。

**关键词:** 轻非水相液体; 竖管直径; 毛细上升高度; 毛细上升速率

中图分类号: P641.2

文献标志码: A

文章编号: 1000-3665(2023)04-0105-10

## A study of the capillary rise characteristics of LNAPL based on the vertical pipes method

LI Zhiping<sup>1,2</sup>, LIU Yu<sup>1</sup>, ZHAO Guizhang<sup>1</sup>, ZHOU Hui<sup>1</sup>, LIU Shaokang<sup>1</sup>, LIU Wenhui<sup>1</sup>

(1. College of Geosciences and Engineering, North China University of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou, Henan 450045, China; 2. Henan Quality Institute, Pingdingshan, Henan 467000, China)

**Abstract:** The pollution caused by light non-aqueous phase liquid (LNAPL) and its derivatives, known as "industrial blood", in the process of mining, production and transportation, has become a common pollutant. At present, many researchers have carried out extensive researches on LNAPL pollution, but the researches on the migration and hairiness of LNAPL in soil is still insufficient. The purpose of this test is to study and analyze the capillary rise law of LNAPL in different media under different standpipe diameters through indoor simulation tests, so as to provide a certain theoretical basis for studying the groundwater pollution caused by LNAPL. The results show that the factors influencing the height of capillary rise are, in order, the solution > medium > vertical tube diameter. The diameter of the vertical tube is not completely proportional to the maximum capillary rise height, and the influence on the capillary rise height is relatively small. The capillary rise height and capillary rise

收稿日期: 2022-09-14; 修订日期: 2022-12-25

投稿网址: [www.swdzgcdz.com](http://www.swdzgcdz.com)

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41372260; 41972261); 第十四届研究生创新能力提升工程项目 (NCWUYC-2023038)

第一作者: 李志萍 (1971-), 女, 博士, 教授, 主要从事地下水污染控制与环境影响评价等研究。E-mail: [lizhiping@ncwu.edu.cn](mailto:lizhiping@ncwu.edu.cn)

通讯作者: 赵贵章 (1975-), 男, 博士, 副教授, 主要从事水文地质与环境地质等研究。E-mail: [guizhangzhao@163.com](mailto:guizhangzhao@163.com)

rate of water and diesel in different media are basically the same, but there are differences in specific values. The maximum capillary rise height of diesel is 40%–50% lower than that of water, and the maximum capillary rise rate of diesel is 30%–50% lower than that of water. The average particle size of sand is inversely proportional to the capillary rise height and rate. These characteristics can better reflect the capillary rise law of LNAPL in different media, which are of important significance to understand the pollution of LNAPL to groundwater and the remediation of contaminated lands.

**Keywords:** LNAPL; vertical pipe diameter; capillary rise height; capillary rise rate

轻非水相液体(light non-aqueous phase liquids, LNAPL)污染是最严重的环境风险之一,是全世界地下水污染的重要来源。LNAPL具有密度低于水,水溶性差,挥发性强等特点。常见的LNAPL有汽油、煤油、柴油等轻质油品,应用于交通、塑料、化纤制造等多个行业,可以说是现代工业的血液<sup>[1]</sup>。但是,在LNAPL类产品生产过程中时常会出现跑、冒、滴、漏等事故,对土壤和地下水造成非常严重的污染<sup>[2]</sup>。LNAPL渗漏后会在重力和毛细力的作用下在土壤和地下水中进行扩散,并且地下水水位的波动会导致LNAPL在毛细作用下被上层土壤吸收<sup>[3]</sup>。段纪森等<sup>[4]</sup>开展了室内土柱试验,分别研究了0#柴油在含水土壤中毛细上升、下渗及水平运移的特性。Alazaiza等<sup>[5]</sup>进行室内模拟试验,评估不同LNAPL体积对多孔介质毛细管区LNAPL迁移行为的影响。童玲等<sup>[6]</sup>通过室内土柱模拟试验,对有柴油残留的土壤的毛细水上升规律进行了研究,发现污染砂土的毛细水上升高度与含油率呈规律的负线性相关。潘明浩等<sup>[7]</sup>基于实际场地状况,利用TOUGH2模拟LNAPL在包气带中的迁移过程,揭示LNAPL在包气带内的迁移规律和分布等特征。赵科锋等<sup>[8]</sup>利用数值模拟研究LNAPL在单井抽提及原位冲洗条件下,单裂隙非饱和带中LNAPL的时空变化规律,为LNAPL修复提供科学的理论依据。杜川等<sup>[9]</sup>研究发现LNAPL主要是受毛细作用影响,导致其无法到达潜水面,而在毛细水带或局部透镜体蓄积;并且发现包气带的最大毛细上升高度范围附近、地下水水位附近、土层岩性变化界面等区域属于易污染区也是重污染区。因此研究LNAPL在土壤中的毛细作用对进一步了解LNAPL的运移机理具有重要意义。

毛细作用是指浸润液体在细管里升高和不浸润液体在细管里降低的现象,是液体的表面张力、内聚力和附着力等共同作用的结果<sup>[10]</sup>。最能体现毛细水上升的3个基本物理特征是:毛细上升高度、上升过程中地下补给量、毛细上升速率<sup>[11]</sup>。国内外学者利用多

种方法开展了不同介质的毛细上升特征研究。Mol等<sup>[12]</sup>利用电阻率法研究毛细上升过程,揭示了该过程随时间和空间的运动特征。

崔浩浩等<sup>[13]</sup>利用室内土柱释水试验研究分析不同包气带岩性结构与地下水耦合作用的生态效应。董斌等<sup>[14]</sup>通过12种不同粗细土料进行室内竖管法毛细水上升高度试验,得到毛细上升高度与时间关系曲线,并分析了影响因素和变化规律。何建新等<sup>[15]</sup>通过粉土、砂土和黏土3种不同土质的室内竖管法毛细水上升试验,优选出毛细水上升高度高、速度快的土壤。洒永芳<sup>[16]</sup>设计了3组不同地下水径流量和3组不同地下水埋深条件的试验,研究其对毛细上升高度、含水率和对重金属污染物Cr、Cd垂向迁移的影响。刘佳伟等<sup>[17]</sup>通过研究不同地下水埋深条件下均质土壤的毛细水上升运动过程,分析了不同地下水埋深对均质土壤毛细水上升高度、毛细水上升速率、地下水补给量、地下水补给速率的影响,并对其机理进行了分析。Baldovino等<sup>[18]</sup>基于基质吸力模型对几种土壤中的毛细上升现象进行了理论和试验研究,分析细—粗土壤的毛细上升速率的最佳方程。姚华等<sup>[19]</sup>通过对7种粗粒土料进行室内竖管法毛细上升高度试验,建立了粗粒土毛细水上升高度与时间的关系曲线,分析了变化规律和原因。王兴照等<sup>[20]</sup>通过研究土壤修复中常用的3种表面活性剂对土壤毛细上升高度和速度的影响,探明表面活性剂对污染土壤理化性质的影响。邓改革等<sup>[21]</sup>通过数值模拟、室内及现场试验开展了不同粒径砂性土条件下的毛细水上升高度的研究,得到多孔介质内部毛细流动现象是由惯性、黏性力、毛细力与重力共同作用产生。魏样等<sup>[22]</sup>研究了3种不同土质土壤在5个不同污染梯度下的毛细上升规律,被污染土壤的毛细上升高度明显低于未污染土。王聪等<sup>[23]</sup>研究了不同浓度盐溶液和盐渍土对毛细水上升的影响。张平等<sup>[24]</sup>研究了同一含水量的土样在不同颗粒大小或不同颗粒级配条件下,毛细水上升速度、高度与时间的关系。沈宇鹏等<sup>[25]</sup>研究纯

石英砂中掺入不同类型和含量盐分,对比分析在不同粒径级配、初始含水率条件下的毛细上升规律。董荣泽等<sup>[26]</sup>研究不同地下水水质对不同粒径沙土中的地下水补给以及水盐运移分布的影响。何艳平<sup>[27]</sup>进行室内毛细上升试验,分析了压实系数、尺寸效应、粗颗粒含量等因素对神朔铁路低液限粉土填料毛细水上升特征的影响,分析讨论了降低毛细上升高度以缓解路基冻胀的可行性。苗强强等<sup>[28]</sup>通过自制研发一套毛细上升试验系统,对非饱和含黏土砂做了3组不同初始含水率的毛细上升试验,得到了试样各个断面的含水率和吸力随时间的变化规律。Liu等<sup>[29]</sup>对不同粒径尾矿进行毛细上升试验,揭示了尾矿毛细水的迁移规律。综上,目前对地下水毛细上升现象的机理、特征、影响因素的研究已经较为成熟,大部分研究是基于某种特定环境以及室内试验为主,并且多数研究成果已经应用到实践活动中。但是对于LNAPL在土壤中的毛细上升现象的研究相对较少,对其机理、特征、影响因素等尚不明确,还需要更深入的研究探讨。

因此,本文将结合前人对地下水毛细上升现象的研究方法以及室内试验模拟LNAPL在粉砂、细砂和粗砂中的毛细上升现象,分析不同竖管直径条件下, LNAPL在3种不同介质中的毛细上升规律,为研究LNAPL污染地下水的规律提供科学依据。

## 1 试验原理与方案

### 1.1 竖管法试验机理

竖管法试验原理是利用毛细效应机制。液体的毛细效应是液体在自由液面处体现的一种物理力学性质。其主要有2个方面,一方面是自由液面内的表面张力,另一方面是水和土壤接触线处的浸湿特性。

液体中每一个分子都会受到其周围一定范围内其他分子的作用,远离自由液面的分子对称分布,合力为0;靠近自由液面的分子分布不对称,合力指向液体内部,自由液面表现出内凹的形状,呈现出向内部收紧的趋势,因此在自由液面内会产生表面张力;并且加上水有浸湿接触土壤的倾向,水在表面张力的作用下向上运动。根据以往的研究,简化毛细上升过程中的力学行为,当水柱的重量和表面张力在垂直方向上的分量相等时,竖管内液体停止上升达到最大上升高度。最大毛细上升高度( $h_c$ )可以通过计算得到:

$$h_c = \frac{2T_s \cos\theta}{\rho g d_m} \quad (1)$$

式中:  $T_s$ ——表面张力/N;

$\theta$ ——接触角/( $^\circ$ ),即表面张力与垂直面的夹角;

$\rho$ ——溶液密度/( $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ );

$g$ ——重力加速度/( $\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$ );

$d_m$ ——毛细管半径/cm。

通过式(1)可以看出,当选取的介质、竖管直径和溶液不同时,都会导致最大毛细上升高度的不同。综合考虑毛细上升高度会受到介质颗粒大小、级配、液体、毛细管断面、温度、密度等各种因素相互作用影响,不能够只使用式(1)对毛细上升最大高度进行简单计算。因此,本次试验只选取不同介质、竖管直径和液体3种因素为研究对象,进行室内试验,研究和分析LNAPL的毛细上升规律。

### 1.2 试验材料

本次试验的砂样取自河南省郑州市惠济区北郊花园口的黄河南岸,将砂样经过自然风干、除杂、研碎、筛选后方可使用。通过实验室土工试验,将3组砂样分为粉砂、细砂和粗砂,砂样颗粒级配见表1。

表1 试验砂样颗粒级配

Table 1 Particle gradation of the experimental sand samples

试样	不均匀系数	曲率系数	平均粒径/mm	质量占比/%				
				0.5~2.0	0.25~<0.5	0.075~<0.25	0.005~<0.075	<0.005
粉砂	1.89	0.87	0.131			94.4	3	2.6
细砂	30.67	4.78	0.205	17.5	26.2	38.1	12.9	5.3
粗砂	5.37	1.16	0.610	58.3	24.7	15.3	1.2	0.5

注:表中空白表示无此项。

根据表中数据和土工试验规范<sup>[30]</sup>可以得到:对于粉砂样,0.075~<0.25 mm的粒径占94.4%,并且不均匀系数小于5,曲率系数小于1,因此属于匀粒砂,但

级配不良;对于细砂样,不均匀系数过大(远大于10),曲率系数大于3,可以判断此砂样可能缺少中间粒径,属于不连续级配;对于粗砂组,不均匀系数在5~10



区内, 曲率系数在 1~3 之间, 此砂样级配良好; 砂粒粒径大于 0.25 mm 的占 83%。

### 1.3 试验装置

本试验采用自行设计的简易毛细水上升装置, 主要由注液装置、试验竖管、盛水槽、纱网、溢流孔等组成。本次试验为了研究不同竖管直径对毛细上升高度的影响, 分别选用 1.6, 3.0, 5.0 cm 3 种不同的直径, 壁厚 0.5 cm, 高度为 100 cm 的有机玻璃竖管进行试验。通过注液装置注入液体以及溢流孔排出多余液体从而使得盛水箱内的液面保持不变。装置示意图见图 1。

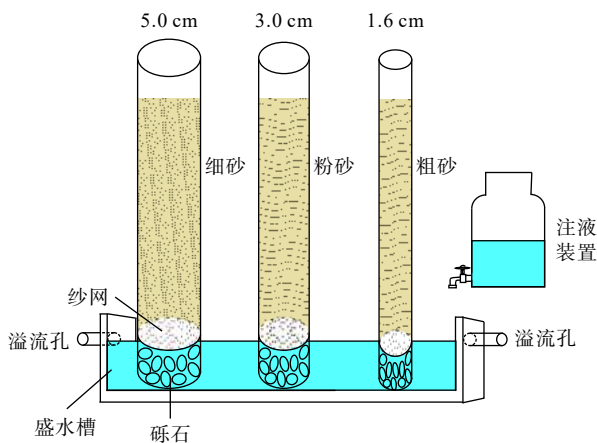


图 1 试验装置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the test device

### 1.4 试验方案与步骤

为探究 LNAPL 的毛细上升过程, 本试验分别研究了不同介质和竖管直径条件下的室内毛细上升试验, 其中 LNAPL 以 0#柴油为代表, 一共展开了 18 组不同的试验, 见表 2。

表 2 毛细上升试验方案

Table 2 Capillary rise test schemes

试验编号	介质	竖管直径/cm	溶液	试验编号	介质	竖管直径/cm	溶液
1#	粉砂	1.6	水	10#	细砂	3.0	柴油
2#	粉砂	1.6	柴油	11#	细砂	5.0	水
3#	粉砂	3.0	水	12#	细砂	5.0	柴油
4#	粉砂	3.0	柴油	13#	粗砂	1.6	水
5#	粉砂	5.0	水	14#	粗砂	1.6	柴油
6#	粉砂	5.0	柴油	15#	粗砂	3.0	水
7#	细砂	1.6	水	16#	粗砂	3.0	柴油
8#	细砂	1.6	柴油	17#	粗砂	5.0	水
9#	细砂	3.0	水	18#	粗砂	5.0	柴油

毛细上升试验的主要步骤如下:

#### (1) 土样制备

将试验样品自然烘干并且去除杂物, 之后再将试

验样品放入 105 °C 烘箱中持续烘干 12 h 并称其质量, 之后每间隔 2 h 称一次质量, 直至样品质量不变为止。

#### (2) 装填土柱

在竖管底部用透水性较好的土工布密封以防止试样颗粒外漏, 并且在竖管底部装入略低于溢流孔高度的砾石层, 约为 3 cm。为保证压实度和试样的均匀性, 装填土柱时采用重型击实锤进行分层击实。计算得到每次所需加入试样质量:

$$m = \frac{1}{4} \pi d_m^2 h \rho_d \quad (2)$$

式中:  $m$ ——加入试样质量/g;

$d_m$ ——竖管直径/cm;

$h$ ——装填土层厚度/cm;

$\rho_d$ ——干密度/( $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ )。

#### (3) 供水并记录数据

打开注液装置开关, 当液体接触到试样底部时开始计时, 观测并记录湿润锋上升高度和时间, 竖管外壁贴有标尺贴便于观察。前期上升速度较快, 前 10 min 每隔 1 min 记录 1 次, 之后随着上升速度变慢, 记录时间间隔逐渐延长; 试验过程中保持室内温度基本不变化。

## 2 试验结果

### 2.1 正交试验结果分析

本次试验以最大毛细上升高度为试验指标, 以竖管直径、介质和溶液为 3 个水平因素进行分析。采用正交试验表并且通过极差分析, 得出本试验中各种因素对毛细上升最大高度的影响程度, 分析结果见表 3。

表 3 极差分析结果

Table 3 Range analysis results

因素	类别	$K_{avg}/\text{cm}$	$R/\text{cm}$	$d$	$R'/\text{cm}$
竖管直径	1.6 cm	36.92	2.23	0.52	2.84
	3.0 cm	39.15			
	5.0 cm	38.18			
介质	粉砂	48.48	21.10	0.52	26.88
	细砂	38.38			
	粗砂	27.38			
溶液	水	48.26	20.35	0.71	43.55
	柴油	27.91			

注:  $K_{avg}$  为某因素某水平最大毛细上升高度试验数据的平均值;  $R$  为指某因素条件下最大毛细上升高度的极差, 该值等于某因素时  $K_{avg}$  最大值减去  $K_{avg}$  最小值;  $d$  为折算系数;  $R'$  为折算后的极差。

根据表 3 中毛细上升最大高度指标的极差大小可知, 介质和溶液对毛细上升高度有显著影响, 而竖管直径影响非常小, 各因素影响程度顺序依次为: 溶液 >

介质>竖管直径。

## 2.2 毛细上升高度与竖管直径关系

依据前人研究,何艳平<sup>[27]</sup>认为试验竖管直径越大,自由液面与竖管壁形成的湿润角越小,导致毛细上升高度越大。但是,黄志全<sup>[31]</sup>认为在表面张力不变的情况下,竖管直径越小,毛细上升高度越大。然而,通过图2的试验结果分析可以得出,其他影响因素控制在相同的条件下,竖管直径与最大毛细上升高度之间并不是完全成比例关系,并且介质不同时,竖管直径对最大毛细上升高度影响程度也不同;总体来说,竖管直径的变化对毛细上升高度的影响相对较小。

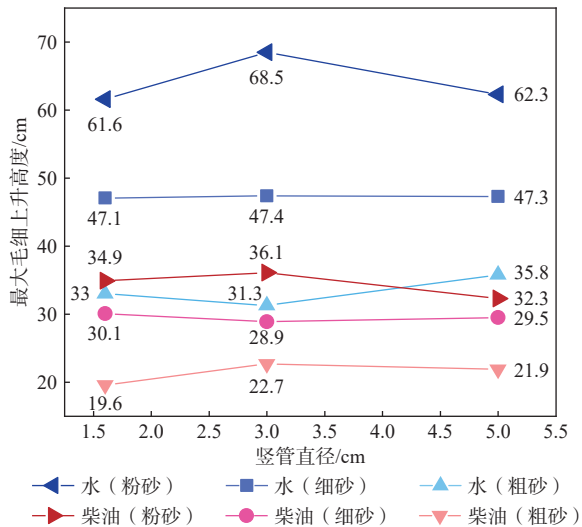


图2 介质不同时毛细上升高度随竖管直径的变化

Fig. 2 Changes of capillary rise height with the diameter of the vertical pipe when the medium is different

## 2.3 不同介质和溶液条件下的毛细上升高度与时间关系

图3为不同竖管直径条件下毛细上升高度随时间变化曲线。由图3可见,所有曲线都有相似的变化趋势,在前期阶段,毛细上升高度随时间迅速增加几乎呈直线式上升;随后速度减缓,上升高度接近稳定,直至达到稳定状态。当竖管直径为1.6 cm,溶液为水时,各组试验的最大毛细上升高度大小依次为:粉砂>细砂>粗砂;溶液为柴油时,不同介质的最大毛细上升高度大小依次为:粉砂>细砂>粗砂。当竖管直径为3.0, 5.0 cm时,毛细上升高度随时间变化的规律仍然相同,在溶液为水和柴油2种情况下,最大毛细上升高度大小依次为:粉砂>细砂>粗砂。

由图3(d)可知,竖管直径为1.6 cm时,在介质相同的条件下,柴油的最大上升高度明显低于水的最大

上升高度。对于粉砂而言,柴油的最大上升高度相对于水而言下降了43.3%;对于细砂,柴油的最大上升高度相对于水而言下降了39.9%;对于粗砂,柴油的最大上升高度相对于水而言下降了40.6%。当竖管直径为3.0 cm时,分别在粉砂、细砂、粗砂3种介质试验中,柴油的最大上升高度相对于水而言分别下降了47.3%、42.1%、27.5%。当竖管直径为5.0 cm时,分别在粉砂、细砂、粗砂3种介质试验中,柴油的最大上升高度相对于水而言分别下降了48.2%、41.4%、38.8%。由此可以初步推断,在同种介质中,柴油的最大毛细上升高度与水相比一般会降低40%~50%。

## 2.4 不同介质和溶液条件下的毛细上升速率与时间关系

依据以往研究,毛细上升过程与入渗过程相似,因此毛细上升过程符合一定的非线性函数关系,前人<sup>[10-21]</sup>大多采用幂函数或对数函数拟合毛细上升高度与时间关系。利用Origin软件对当前实测数据进行曲线拟合和分析,最终决定采用对数函数对毛细上升高度 $h$ 和时间 $t$ 的关系进行回归分析:

$$h = a + blnt \quad (3)$$

式中: $h$ ——毛细上升高度/cm;

$t$ ——时间/h;

$a$ 、 $b$ ——无量纲系数,拟合情况见表4。

由表4可以看出,每组试验回归方程的 $R^2$ 都大于0.96,说明实测数据与拟合函数曲线拟合度很高。

毛细上升速率( $v$ )为毛细上升高度与时间的导数,将式(3)对时间求导,即可得到毛细上升速率关于时间的方程,即:

$$v = \frac{dh}{dt} = \frac{b}{t} \quad (4)$$

式中: $v$ ——毛细上升速率/( $\text{cm} \cdot \text{h}^{-1}$ )。

根据式(4)和表4中的拟合参数值,分别对每组试验的毛细上升速率随时间变化进行拟合。由于毛细上升速率在2 h内已经降到5 cm/h以下,并且上升高度已经达到毛细上升最大高度的50%左右,因此,为了研究毛细上升速率随时间的变化规律,绘制了前2 h内毛细上升速率随时间的变化曲线见图4。

由图4可见,每组试验毛细上升速率随时间变化呈现出相同的规律,即在试验初期毛细上升速率很大,随后呈直线式急剧下降,之后缓慢降低逐渐趋于0。当竖管直径为1.6 cm,溶液为水时,试验初期最大毛细上升速率的大小依次为:粉砂(667.2  $\text{cm/h}$ )>细砂(591.9  $\text{cm/h}$ )>粗砂(286.3  $\text{cm/h}$ ),在2 h之内分别迅速

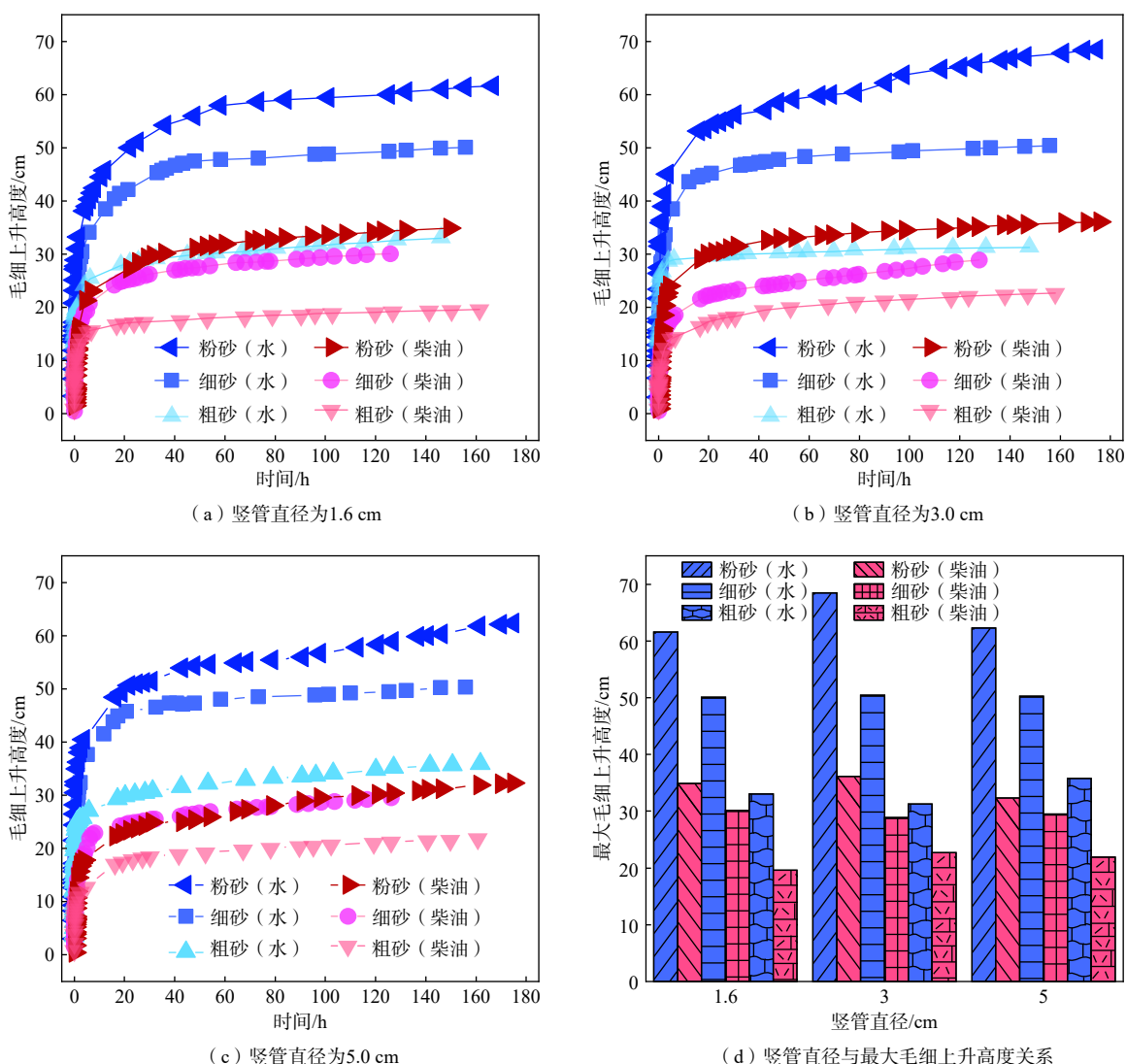


图 3 竖管直径不同时毛细上升高度变化规律

Fig. 3 Variations of capillary rise height with different diameters of the vertical tube

表 4 毛细上升高度与时间关系拟合参数

Table 4 Fitting parameters of the relationship between capillary rise height and time

竖管直径/cm	系数	水			柴油		
		粉砂	细砂	粗砂	粉砂	细砂	粗砂
1.6	<i>a</i>	28.855	23.649	19.239	13.085	13.067	10.571
	<i>b</i>	6.672	5.919	2.863	4.570	3.726	1.939
	<i>R</i> <sup>2</sup>	0.996	0.990	0.985	0.996	0.995	0.977
3.0	<i>a</i>	31.446	26.440	20.339	15.143	11.408	10.181
	<i>b</i>	7.155	5.938	2.888	4.374	3.480	2.438
	<i>R</i> <sup>2</sup>	0.994	0.991	0.918	0.990	0.994	0.997
5.0	<i>a</i>	29.673	25.220	21.058	13.315	12.536	10.295
	<i>b</i>	6.466	6.300	3.045	3.454	3.692	2.287
	<i>R</i> <sup>2</sup>	0.990	0.992	0.969	0.996	0.989	0.998

下降到 3.336, 2.960, 1.432 cm/h; 溶液为柴油时, 试验初期最大毛细上升速率的大小依次为: 粉砂(457 cm/h)>

细砂(372.6 cm/h)>粗砂(193.9 cm/h), 在 2 h 之内分别迅速下降到 2.285, 1.863, 0.970 cm/h。当竖管直径为 3.0, 5.0 cm 时, 溶液分别为水和柴油时, 最大毛细上升速率大小仍然依次为: 粉砂>细砂>粗砂, 并且在 2 h 之内毛细上升速率均迅速下降到 5 cm/h 以下。

由图 4(d)可见, 竖管直径为 1.6 cm 时, 介质相同的情况下, 柴油的最大上升速率明显低于水的最大上升速率。对于粉砂, 柴油的最大上升速率相对于水而言下降了 32.3%; 对于细砂, 柴油的最大上升速率相对于水而言下降了 37.1%; 对于粗砂, 柴油的最大上升速率相对于水而言下降了 31.5%; 当竖管直径为 3.0 cm 时, 分别在粉砂、细砂、粗砂 3 种介质试验中, 柴油的最大上升速率相对于水而言分别下降了 38.9%、41.4%、15.6%。当竖管直径为 5.0 cm 时, 分别在粉砂、细砂、

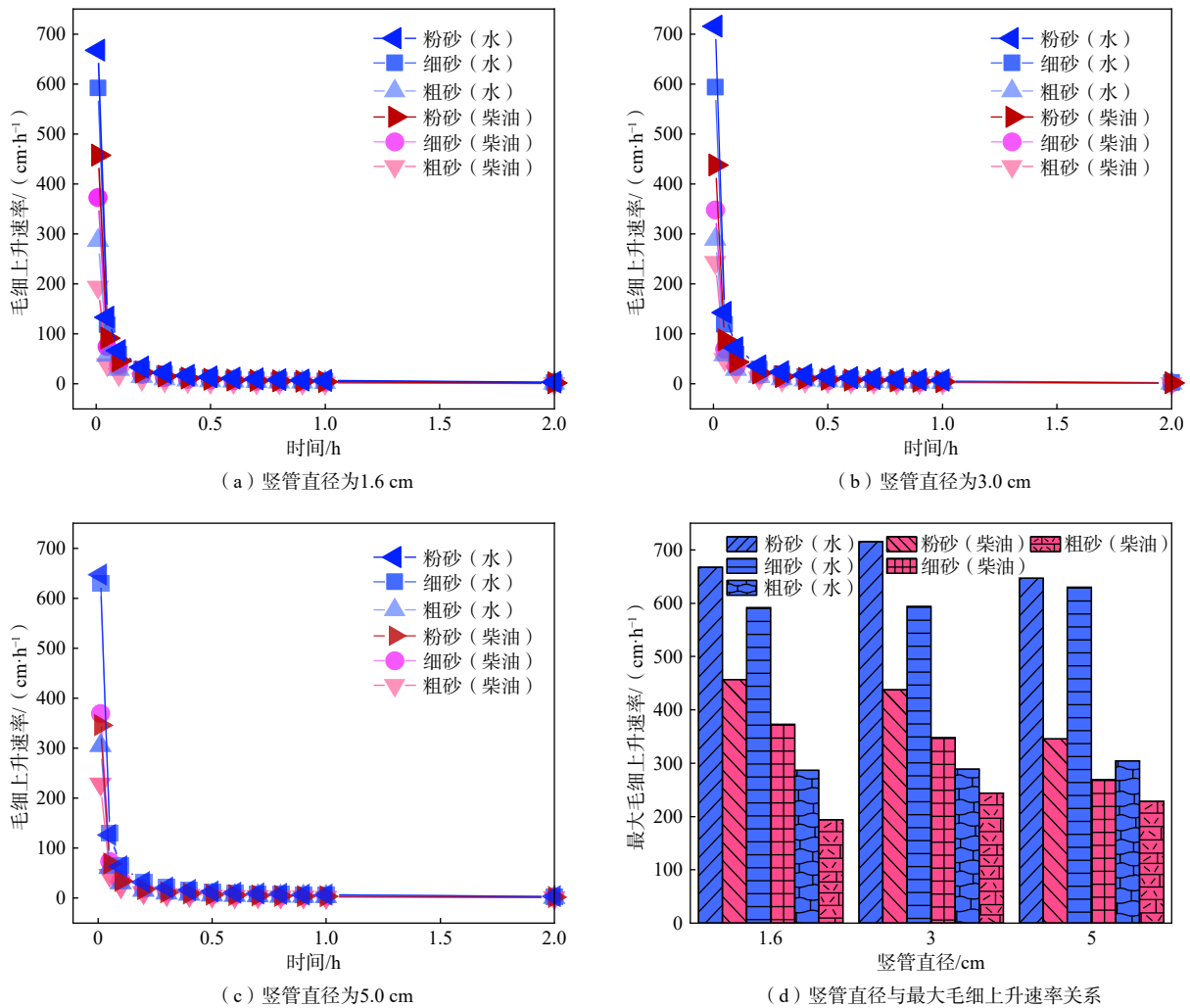


图 4 竖管直径不同时毛细上升速率变化规律

Fig. 4 Variations of capillary rise rate with different diameters of the vertical tube

粗砂 3 种介质试验中, 柴油的最大上升速率相对于水而言分别下降了 46.4%、57.3%、24.9%。由此可以初步推断, 柴油的最大毛细上升速率与水相比大约会降低 30%~50%。同时分析可知, 竖管直径相同条件下, 在细砂组试验中, 柴油最大上升速率相对于水而言下降的比率最大, 其次为粉砂组试验, 影响程度最小的为粗砂组试验。这可能与砂样级配之间存在一定的关系, 需要进一步试验验证。

### 3 讨论

#### 3.1 竖管直径对毛细上升高度的影响

试验发现, 不同竖管直径条件下的毛细上升高度变化相对较小。由式(1)可知, 不同竖管直径会对自由液面与竖管壁之间形成的接触角造成影响, 但是其影响程度较小, 导致毛细上升高度产生微小变化。根据结果分析, 在进行室内毛细上升试验时, 可以尽可

能选取直径较大的竖管进行室内试验, 可以更好消除尺寸效应, 从而使试验条件更接近自然界中的实际情况。

#### 3.2 介质对毛细上升现象影响

试验发现, 毛细上升高度和速率与介质的平均粒径成反比例关系, 平均粒径越小, 毛细上升高度和速率越大。本试验中细砂和粉砂都属级配不良, 但是由于粉砂的平均粒径(0.131 mm)小于细砂的平均粒径(0.205 mm), 因此粉砂组的毛细上升高度和速率大于细砂组; 虽然粗砂组属级配良好, 但其颗粒粒径较大, 平均粒径为 0.610 mm, 因此粗砂组毛细上升高度和速率最低。研究可知, 即使颗粒级配不良, 但细颗粒含量较多, 平均粒径越小, 颗粒孔隙越小且连通性越好, 产生附加压力越大, 细小孔径中会产生更强烈的毛细作用, 从而使得毛细上升高度越大以及速率越快。

#### 3.3 LNAPL 毛细上升特性

试验发现, 柴油的最大毛细上升高度和最大上升



速率与水相比分别降低了 40%~50% 和 30%~50%。根据式(1)可知,毛细上升高度受表面张力和密度的影响,表面张力越小,密度越大,则毛细上升高度越低。而柴油的表面张力小于水,毛细上升高度会降低;但柴油密度小于水,毛细上升高度应增加。由此可见,在两者正反作用下,表面张力占据主导地位,最终使得柴油上升高度低于水上升高度。这是因为柴油高分子会包裹附着在颗粒表面,柴油高分子链会把介质像链条一样连接在一起,产生链接效应,导致砂样之间的摩擦力、黏聚力和接触角增大,从而导致毛细上升高度降低以及上升速率减慢。

结合本试验的分析与讨论以及前人经验<sup>[16]</sup>可知,毛细水的上升过程与入渗过程相似,只是与入渗过程方向相反,因此可以根据柴油的毛细上升过程初步推测柴油泄漏后在地下的入渗距离和速率。目前国内外存在许多地下输油管道泄漏事件,LNAPL 类污染物渗漏后,一部分会向下渗透到地下水水面附近,另一部分则会由于毛细压力作用向上运动,因此研究 LNAPL 的毛细上升特性对了解 LNAPL 迁移过程以及进一步治理 LNAPL 类污染具有重要意义。

本试验研究 LNAPL 在干砂介质中的毛细上升现象,而实际情况下, LNAPL 泄漏后通常发现在非饱和带中,因此,可以进一步研究 LNAPL 在不同含水率介质中毛细上升现象,为研究 LNAPL 的迁移机理提供更全面的理论支持。

## 4 结论

(1)通过对 3 种因素进行极差分析,得到毛细上升高度影响因素依次为:溶液>介质>竖管直径。

(2)竖管直径与最大毛细上升高度并不是完全成比例关系,其对毛细上升高度的影响相对较小,因此进行试验时可以选择直径较大的竖管进行试验,从而消除尺寸效应,使得试验结果与实际情况更符合。

(3)砂粒的平均粒径与毛细上升高度成反比,平均粒径越大,毛细上升高度越小;在控制试验条件相同的情况下,柴油的最大毛细上升高度与水相比会降低 40%~50%。

(4)本试验中毛细上升高度与时间符合关系式:  
 $h = a + blnt$ 。

(5)砂粒的平均粒径与毛细上升速率成反比例关系,平均粒径越大,毛细上升速率越小;在控制试验条件相同的情况下,柴油的最大毛细上升速率与水相比会降低 30%~50%。

## 参考文献 (References) :

- [ 1 ] 沈欢,黄勇,苏悦,等.裂隙介质中LNAPL污染物迁移研究进展[J].环境科技,2021,34(2):68-72. [ SHEN Huan, HUANG Yong, SU Yue, et al. Research progress on the migration of LNAPL pollutants in fractured media[J]. Environmental Science and Technology, 2021, 34(2): 68 - 72. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 2 ] XIA Teng, DONG Yanhui, MAO Deqiang, et al. Delineation of LNAPL contaminant plumes at a former perfumery plant using electrical resistivity tomography[J]. Hydrogeology Journal, 2021, 29(3): 1189 - 1201.
- [ 3 ] PAN Yuying, ZHANG Qian, YU Yewei, et al. Three-dimensional migration and resistivity characteristics of crude oil in heterogeneous soil layers[J]. Environmental Pollution, 2021, 268: 115309.
- [ 4 ] 段纪森,王岩,刘慧姝,等.油品在土壤中的运移特性[J].油气储运,2019,38(7):798-803. [ DUAN Jimiao, WANG Yan, LIU Huishu, et al. Migration characteristics of oils in soil[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2019, 38(7): 798 - 803. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 5 ] ALAZAIZA M Y D, TAHRA A M, AHMED A, et al. Diesel migration and distribution in capillary fringe using different spill volumes via image analysis[J]. Fluids, 2021, 6(5): 189.
- [ 6 ] 童玲,陈伟胜,郑西来,等.柴油污染土壤中毛细水上升规律研究[J].灌溉排水学报,2011,30(6):131-134. [ TONG Ling, CHEN Weisheng, ZHENG Xilai, et al. Capillary rise of water in diesel oil contaminated soils[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2011, 30(6): 131 - 134. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 7 ] 潘明浩,时健,左锐,等.水位波动下包气带透镜体影响LNAPL迁移的数值模拟研究[J].水文地质工程地质,2022,49(1):154-163. [ PAN Minghao, SHI Jian, ZUO Rui, et al. A numerical simulation study of the effect of the vadose zone with lenses on LNAPL migration under the fluctuating water table[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2022, 49(1): 154 - 163. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 8 ] 赵科锋,王锦国,曹慧群.含单裂隙非饱和带中非水相流体修复的数值模拟[J].水文地质工程地质,2020,47(5):43-55. [ ZHAO Kefeng, WANG Jinguo, CAO Huiqun. Numerical simulation of flight non-aqueous phase liquids remediation in the unsaturated zone with single fractures[J]. Hydrogeology & Engineering

- Geology, 2020, 47(5): 43 – 55. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 9 ] 杜川, 李厚恩. 有机污染场地LNAPL分布特征与形成机理分析[C]//中国环境科学学会2021年科学技术年会在——环境工程技术创新与应用分会场论文集(三). 2021: 602 – 606. [ Du Chuan, LI Houen. Distribution characteristics and formation mechanism of LNAPL in organic contaminated sites[C]//Proceedings of the 2021 Annual Conference of Science and Technology of the Chinese Society of Environmental Sciences: Technological Innovation and Application of Environmental Engineering (III). 2021: 602 – 606. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 10 ] 胡明鉴, 张晨阳, 崔翔, 等. 钙质砂中毛细水高度与影响因素试验研究[J]. 岩土力学, 2019, 40(11): 4157 – 4164. [ HU Mingjian, ZHANG Chenyang, CUI Xiang, et al. Experimental study on capillary rise and influencing factors in calcareous sand[J]. Rock and Soil Mechanics, 2019, 40(11): 4157 – 4164. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 11 ] LIU Qiang, YASUFUKU N, MIAO Jiali, et al. An approach for quick estimation of maximum height of capillary rise[J]. *Soils and Foundations*, 2014, 54(6): 1241 – 1245.
- [ 12 ] MOL L, VILES H. Exposing drying patterns: using electrical resistivity tomography to monitor capillary rise in sandstone under varying drying conditions[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2013, 68(6): 1647 – 1659.
- [ 13 ] 崔浩浩, 张光辉, 刘鹏飞, 等. 包气带岩性结构对地下水生态功能影响特征[J]. 水文地质工程地质, 2022, 49(5): 52 – 62. [ CUI Haohao, ZHANG Guanghui, LIU Pengfei, et al. Characteristics of influence of lithologic structure of vadose zone on groundwater ecological function [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2022, 49(5): 52 – 62. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 14 ] 董斌, 张喜发, 李欣, 等. 毛细水上升高度综合试验研究[J]. 岩土工程学报, 2008, 30(10): 1569 – 1574. [ DONG Bin, ZHANG Xifa, LI Xin, et al. Comprehensive tests on rising height of capillary water[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2008, 30(10): 1569 – 1574. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 15 ] 何建新, 糟凯龙, 杨海华. 塔里木河胡杨实现自我恢复的新方法探索[J]. 水电能源科学, 2021, 39(7): 33 – 37. [ HE Jianxin, ZAO Kailong, YANG Haihua. Exploration of new methods to realize self-recovery of populus euphonium from Tarim River[J]. Water Resources and Power, 2021, 39(7): 33 – 37. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 16 ] 洒永芳. 含水层中污染物向土壤垂向迁移的水力调控措施及其影响研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2018. [ SA Yongfang. Study on hydraulic control measures and its influence of vertical migration of pollutants from aquifer to soil[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2018. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 17 ] 刘伟佳, 吴军虎, 裴青宝, 等. 不同地下水埋深条件下均质土壤毛管上升水运动特性试验研究[J]. 水资源与水工程学报, 2010, 21(1): 67 – 70. [ LIU Weijia, WU Junhu, PEI Qingbao, et al. Experimental research on capillary water upward movement in homogeneous soil under different ground water tables[J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2010, 21(1): 67 – 70. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 18 ] JAIR A B, RONALDO I, CARLOS M P, et al. The capillary rise in fine and coarse-grained soils considering the matric suction[J]. Journal of Xi'an Unniversity of Architecture & Technology 2021, 29(4): 1608 – 1615.
- [ 19 ] 姚华, 张喜发, 张冬青. 影响粗粒土毛细水上升高度的因素研究[J]. 勘察科学技术, 2007(1): 10 – 12. [ YAO Hua, ZHANG Xifa, ZHANG Dongqing. Research on affecting factors of rising height of capillary water on coarse grained soil[J]. Site Investigation Science and Technology, 2007(1): 10 – 12. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 20 ] 王兴照, 李英杰, 胡晶, 等. 表面活性剂对土壤毛细水上升特性的影响[J]. 安徽农业科学, 2018, 46(18): 98 – 101. [ WANG Xingzhao, LI Yingjie, HU Jing, et al. Effects of surfactants on the characteristic of soil capillary water rising[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2018, 46(18): 98 – 101. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 21 ] 邓改革, 何建国, 康宁波. 基于多物理场耦合的毛细水高度研究[J]. 水土保持研究, 2021, 28(4): 136 – 141. [ DENG Gaige, HE Jianguo, KANG Ningbo. Research on capillary water height based on multi-physical field coupling[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2021, 28(4): 136 – 141. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 22 ] 魏祥, 王益权, 蔡苗, 等. 石油污染对土壤毛细水上升特性的影响[J]. 灌溉排水学报, 2017, 36(9): 50 – 56. [ WEI Fan, WANG Yiquan, CAI Miao, et al. Effects of petroleum pollution on the rising characteristics of

- soil capillary water[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2017, 36(9): 50 – 56. (in Chinese with English abstract) ]
- [23] 王聪, 张平, 谢长青, 等. 不同浓度盐溶液及盐渍土对毛细水上升影响的研究[J]. *节水灌溉*, 2014(12): 26 – 28. [ WANG Cong, ZHANG Ping, XIE Changqing, et al. Effect of different concentration salt solution and saline soil on capillary water upward movement[J]. *Water Saving Irrigation*, 2014(12): 26 – 28. (in Chinese with English abstract) ]
- [24] 张平, 吴昊, 殷洪建, 等. 颗粒级配毛细水上升影响的研究[J]. *节水灌溉*, 2010(7): 24 – 26. [ ZHANG Ping, WU Hao, YIN Hongjian, et al. Effect of particle size distribution on capillary water upward movement[J]. *Water Saving Irrigation*, 2010(7): 24 – 26. (in Chinese with English abstract) ]
- [25] 沈宇鹏, 曹权, 陈芷航, 等. 含盐石英砂的毛细上升特性及其影响因素研究[J]. *铁道工程学报*, 2022, 39(3): 13 – 18. [ SHEN Yupeng, CAO Quan, CHEN Zhihang, et al. Research on the capillary rising characteristics and influencing factors of salt-containing quartz sand[J]. *Journal of Railway Engineering Society*, 2022, 39(3): 13 – 18. (in Chinese with English abstract) ]
- [26] 董荣泽, 于明英, 邱照宁, 等. 沙土上升毛管水运动特性研究[J]. *节水灌溉*, 2018(4): 19 – 25. [ DONG Rongze, YU Mingying, QIU Zhaoning, et al. A study on capillary water movement characteristics in sandy soil[J]. *Water Saving Irrigation*, 2018(4): 19 – 25. (in Chinese with English abstract) ]
- [27] 何艳平. 低液限粉土毛细上升特征的影响因素研究[J]. *工程勘察*, 2020, 48(4): 11 – 18. [ HE Yanping. Study on influencing factors of capillary rise characteristics of low liquid limit silt[J]. *Geotechnical Investigation & Surveying*, 2020, 48(4): 11 – 18. (in Chinese with English abstract) ]
- [28] 苗强强, 陈正汉, 田卿燕, 等. 非饱和含黏土砂毛细上升试验研究[J]. *岩土力学*, 2011, 32(增刊1): 327-333. [ MIAO Qiangqiang, CHEN Zhenghan, TIAN Qingyan, et al. Experimental study of capillary rise of unsaturated clayey sand[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2011, 32(Sup 1): 327-333. (in Chinese with English abstract) ]
- [29] LIU Di, LU Caiwu, LIAN Minjie, et al. Experimental study on capillary water migration characteristics of tailings with different particle sizes[J]. *Geofluids*, 2022, 2022: 1 – 12.
- [30] 中华人民共和国水利部. 土工试验规程: SL237—1999[S]. 北京: 中国水利水电出版社, 1999. [ Ministry of Water Resources of the People's Republic of China. Soil test regulations: SL237—1999[S]. Beijing: China Water Power Press, 1999. (in Chinese) ]
- [31] 黄志全. 土力学[M]. 郑州: 黄河水利出版社, 2011: 221 – 223. [ HUANG Zhiquan. Soil mechanics[M]. Zhengzhou: Yellow River Water Conservancy Press, 2011: 221 – 223. (in Chinese) ]

编辑: 张若琳