

## 江汉平原过渡带黏性层状土弥散试验与模拟研究

刘泳佚, 史婷婷, 王清, 刘添文, 刘亚磊, 李梦茹

### A study of dispersion experiment and simulation of the cohesive layered soil in the transition zone of the Jiangnan Plain

LIU Yongyi, SHI Tingting, WANG Qing, LIU Tianwen, LIU Yalei, and LI Mengru

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202201036>

## 您可能感兴趣的其他文章

### Articles you may be interested in

#### 江汉平原东北部地区高铁锰地下水成因与分布规律

Distribution and genesis of high Fe and Mn groundwater in the northeast of the Jiangnan Plain

蔡玲, 胡成, 陈植华, 王清, 王宁涛, 常威, 黄琨 水文地质工程地质. 2019, 46(4): 18-25

#### 无侧限压缩条件下黏性土磁各向异性研究

A study of anisotropy of magnetic susceptibility of cohesive soil under unconfined compression

孙茜, 阎长虹, 刘羊 水文地质工程地质. 2021, 48(1): 123-130

#### 层状非均质结构包气带入渗过程单相流与两相流数值模拟对比研究

A comparative numerical simulation study of single-phase flow and water-gas two-phase flow infiltration process in the vadose zone with the layered heterogeneous structure

高靖勋, 冯洪川, 祝晓彬, 吴吉春, 吴剑锋, 卫云波, 王水 水文地质工程地质. 2022, 49(2): 24-32

#### 基于黏聚力裂缝模型的反倾层状岩质边坡倾倒破坏模拟

A numerical study of the toppling failure of an anti-dip layered rock slope based on a cohesive crack model

马文著, 徐衍, 李晓雷, 陈敏 水文地质工程地质. 2020, 47(5): 150-160

#### 典型黄土滑坡滑带土不同含水率下蠕变特性试验研究

An experimental study of the creep characteristics of loess landslide sliding zone soil with different water content

王新刚, 刘凯, 王友林, 张培栋, 石卫, 罗力 水文地质工程地质. 2022, 49(5): 137-143

#### 基于圆弧主应力迹线的黏性土主动土压力分析

An analysis of active earth pressure of cohesive soil based on the layering of principal stress traces

王佳宇, 曹文贵, 王雨波, 张慧姐 水文地质工程地质. 2021, 48(6): 81-88



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

DOI: 10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202201036

刘泳佚, 史婷婷, 王清, 等. 江汉平原过渡带黏性层状土弥散试验与模拟研究 [J]. 水文地质工程地质, 2023, 50(1): 41-50.  
LIU Yongyi, SHI Tingting, WANG Qing, *et al.* A study of dispersion experiment and simulation of the cohesive layered soil in the transition zone of the Jianghan Plain[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2023, 50(1): 41-50.

## 江汉平原过渡带黏性层状土弥散试验与模拟研究

刘泳佚<sup>1,2</sup>, 史婷婷<sup>1,2</sup>, 王清<sup>3</sup>, 刘添文<sup>4</sup>, 刘亚磊<sup>3</sup>, 李梦茹<sup>3</sup>

(1. 中国地质大学湖北巴东地质灾害国家野外科学观测研究站, 湖北 武汉 430074; 2. 教育部长江三峡库区地质灾害研究中心, 湖北 武汉 430074; 3. 中国地质调查局武汉地质调查中心, 湖北 武汉 430205; 4. 中国地质大学(武汉)环境学院, 湖北 武汉 430074)

**摘要:** 为研究江汉平原一大别山区过渡带黏性层状土中溶质迁移的规律, 以保守性阴离子 Br<sup>-</sup> 为示踪剂, 通过等温吸附试验、一维弥散试验、HYDRUS-1D 软件模拟反演手段, 研究了 Br<sup>-</sup> 在黏性层状土中的吸附参数、迁移规律, 模拟反演其弥散参数。结果表明: (1) Freundlich 模型和 Langmuir 模型均能较好的拟合吸附试验结果, 随着土壤中黏粒比例的增大, 土壤对 Br<sup>-</sup> 的饱和吸附量有所增加; (2) 层状土中土壤质地与结构均会影响穿透曲线的形状, 但一维饱和土柱中的弥散过程主要取决于含水介质系统中黏性颗粒的占比, 黏粒的增加会对溶质运移产生阻碍作用; (3) 通过 HYDRUS-1D 软件构建模型反演弥散参数, R<sup>2</sup> 均大于 0.991, 拟合效果较好, 分析发现层状土中无论土壤组成类型还是层厚及排序的影响, 其本质都是改变了土壤的平均孔隙流速从而影响弥散作用, 平均孔隙流速越小其弥散系数越小; (4) 试验中粉质黏土弥散系数约为 0.005 ~ 0.048 cm<sup>2</sup>/d, 远远小于下部砂土弥散系数 0.524 ~ 7.477 cm<sup>2</sup>/d, 差值达到了至少两个数量级, 表明研究区内厚层黏土为控制地层, 会较大程度阻碍地下水中溶质运移, 上部含水层中的污染物或有机质很难穿透该层向下迁移, 具有良好的截污性能。研究结果对江汉平原过渡带地下水环境保护、水质治理具有重要应用价值。

**关键词:** 江汉平原过渡带; 黏性层状土; 弥散试验; 等温吸附; HYDRUS-1D 软件; 反演

中图分类号: S153

文献标志码: A

文章编号: 1000-3665(2023)01-0041-10

## A study of dispersion experiment and simulation of the cohesive layered soil in the transition zone of the Jianghan Plain

LIU Yongyi<sup>1,2</sup>, SHI Tingting<sup>1,2</sup>, WANG Qing<sup>3</sup>, LIU Tianwen<sup>4</sup>, LIU Yalei<sup>3</sup>, LI Mengru<sup>3</sup>

(1. Badong National Observation and Research Station of Geohazards, China University of Geosciences, Wuhan, Hubei 430074, China; 2. Three Gorges Research Center for Geohazards, Ministry of Education, Wuhan, Hubei 430074, China; 3. Wuhan Center of China Geological Survey, Wuhan, Hubei 430205, China; 4. School of Environmental Studies, China University of Geosciences (Wuhan), Wuhan, Hubei 430074, China)

**Abstract:** In order to study the law of solute migration in the cohesive stratified soil in the transitional zone of the Jianghan Plain-Dabie Mountain area, the conservative anion Br<sup>-</sup> is taken as a tracer agent in the isothermal adsorption experiment. One-dimensional dispersion experiment and HYDRUS-1D software simulation inversion method are used, and the adsorption parameter, migration law and migration inversion dispersion parameter of Br<sup>-</sup>

收稿日期: 2022-01-19; 修订日期: 2022-03-02

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

基金项目: 中国地质调查局地质调查项目(DD20160290; DD20190315); 国家自然科学基金项目(42002262)

第一作者: 刘泳佚(1996-), 男, 硕士研究生, 主要从事水文地质方面的研究。E-mail: [841698713@qq.com](mailto:841698713@qq.com)

通讯作者: 王清(1986-), 男, 硕士, 高级工程师, 主要从事水文地质、生态地质方面的研究。E-mail: [wangqing@mail.cgs.gov.cn](mailto:wangqing@mail.cgs.gov.cn)

in the cohesive stratified soil are examined. The results indicate that (1) both the Freundlich model and Langmuir model can well fit the adsorption experiment results, along with the increase of proportion of clay particle in the soil, and the saturation adsorption amount of the soil to  $\text{Br}^-$  increases. (2) Both the soil texture and structure in the stratified soil can influence the shape of the breakthrough curve, but the dispersion process in one-dimensional saturation earth pillar mainly depends on the proportion of clay particles in the water-bearing media system, and the increase of clay particles will produce resistance for solute transport. (3) The invert dispersion parameter through the HYDRUS-1D software construction model,  $R^2$  is always larger than 0.991, and the fitting effect is good. The analysis results show that no matter soil component type or layer thickness and ordering in the stratified soil, the essence to influence dispersion function is by changing the average hole flow velocity of the soil, and the dispersion coefficient becomes smaller as the average hole flow velocity is smaller. (4) The silty clay dispersion coefficient in the experiment ranges from 0.005 to 0.048  $\text{cm}^2/\text{d}$ , far less than the sand dispersion coefficient 0.524 to 7.477  $\text{cm}^2/\text{d}$  in the under part, the difference value reaches two order of magnitudes, indicating that the thick layer clay soil is a control layer and will greatly resist solute transport of groundwater. The pollutant or organic matter in the upside water-bearing stratum is very hard to penetrate this layer and migrate downward, and this layer has very good sewage removal performance. The results are of great application value for groundwater environmental protection and water quality control in the transition zone of the Jiangnan Plain.

**Keywords:** transition zone of Jiangnan Plain; cohesive layered soil; dispersion experiment; isotherm adsorption; HYDRUS-1D software; inversion

近年来,地下水环境质量问题愈发受到重视,地下水水分、溶质迁移规律的研究作为地下水环境质量问题的基础因而具有十分重要的意义<sup>[1]</sup>。地下水溶质运移本质是不同浓度溶液的混合置换作用,弥散系数与弥散度是控制溶质运移过程的重要参数,会直接影响水盐运移模拟计算的精确性和准确性<sup>[2-5]</sup>。现阶段,主要通过室内土柱试验和野外场地示踪试验获取弥散系数,室内土柱试验主要指一维弥散试验,即通过获得示踪溶质纵向穿透曲线从而求取纵向弥散系数。

自然环境中的土体大多成层分布,众多学者研究发现层状土因其粒径组成<sup>[6]</sup>、排列顺序<sup>[7-8]</sup>、土体厚度<sup>[9]</sup>等因素的影响,水分运移规律十分复杂,而水分作为溶质的载体对其影响巨大,因此层状土对溶质运移影响的研究显得十分必要。赵小二等<sup>[10]</sup>研究了流量条件对岩溶管道中溶质运移的影响,发现流量增大会使穿透曲线峰值浓度增大,拖尾缩短。郭蕾蕾等<sup>[11]</sup>开展室内土柱试验,发现黏土含量较高的壤土夹层对  $\text{Br}^-$  穿透曲线有明显影响。Selim 等<sup>[12]</sup> 和 Sharma 等<sup>[13]</sup> 均对  $\text{Cl}^-$  在层状土柱中的穿透曲线进行研究,发现层状土的排列顺序对非饱和带水盐迁移影响尤其剧烈,而对于饱和带影响则相对较小。卜新峰等<sup>[14]</sup> 通过室内和野外试验结果对比研究了弥散系数的空间尺度效应,认为室内试验所得参数不可直接用于场地,但是可以用于数值模拟迭代获取场地弥散规律。溶

质运移研究中数值模拟的应用也十分广泛,郇托娅等<sup>[15]</sup> 通过 HYDRUS-1D 建立了一维土柱溶质运移模型,模拟结果比较理想。葛建等<sup>[16]</sup> 利用 HYDRUS-1D 软件对分层土柱进行模拟分析,发现上覆细粒会影响土壤持水能力。马蒙蒙等<sup>[17]</sup> 通过 HYDRUS-1D 模型分析,发现饱和导水率和弥散度的差异使得入渗率有所不同,进而使  $\text{Br}^-$  的穿透曲线差异明显。但是,目前层状土溶质运移试验研究多基于砂土、壤土为研究对象,黏性土中水盐运移缓慢同时受吸附影响较大但相关研究较少,同时试验土体多为人为设置土壤质地与容重,对于实际场地原状层土还原度不高。

基于此,本文以江汉平原一大别山区过渡带三水转换 1# 试验场为研究区,根据实际土层排列顺序、厚度比例采取钻孔原状黏性土等容重填充土柱,选取保守性阴离子  $\text{Br}^-$ <sup>[18]</sup> 进行系列穿透试验获取穿透曲线,并在等温吸附试验获取相关参数的条件下,基于一维水动力弥散方程通过 HYDRUS-1D 软件构建考虑吸附作用的一维土柱模型,对穿过程进行反演从而获取各土柱弥散度及弥散系数等黏性土中溶质运移的相关参数,以实测穿透曲线与模拟穿透曲线对比,获取决定系数,验证模拟结果的准确性,并系统的探讨了研究区内不同土壤类型、层状结构对溶质运移的影响。成果可为黏性土中污染物或水盐运移研究提供参考,同时对江汉平原过渡带地下水环境保护、水质

治理也具有重要应用价值。

### 1 研究区概况

研究区位于湖北省孝感市肖港镇三水转换 1#试验场,地处江汉平原一大别山区过渡带洪水的二级阶地上,属亚热带季风气候,雨热同期,多年平均年降雨量 1 112 mm。区内主要出露地层为第四系上更新统(Qp<sub>3</sub><sup>al</sup>)地层,下伏为古近系云台观组(Ey)基岩,其中第四系上更新统(Qp<sub>3</sub><sup>al</sup>)二元结构明显,上部为厚层低渗黏性土层,下部为细粒砂质土层、砂砾石层,地下水主要赋存于下部砂砾石层中(图 1)。已有研究表明,区内的上覆低渗黏土层和骤变的地层结构会对降水入渗和含水层补给产生巨大的影响,Liu 等<sup>[19]</sup>通过试验场原位动态监测数据分析了不同深度层位黏性土中水分对大气降水和微承压地下水的动态响应关系,并总结了土壤水分运移的不同分带特征,其水盐运移规律可在此基础上进一步研究<sup>[20-22]</sup>。

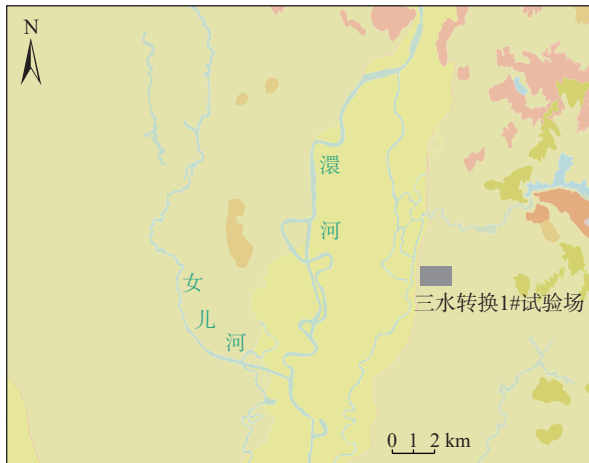


图 1 研究区地质平面图  
Fig. 1 Geologic ichnography of the study area

### 2 材料与方法

#### 2.1 土样采集与测定

以前期试验场区钻孔揭露的地质结构分层为依据,结合不同层位土壤质地分类<sup>[23]</sup>及砂粒(粒径 0.05 ~ 2 mm)、粉粒(粒径 0.005 ~ 0.05 mm)、黏粒(粒径 < 0.005 mm)含量,选择垂向 5 个深度钻孔原状土样进行试验,深度分别为 2.0 m(粉质亚黏土)、5.0 m(粉质黏土)、6.5 m(粉质亚黏土)、13.5 m(砂质亚黏土)、

14.2 m(砂质亚黏土)。供试土样于试验室用削土刀削成片状,放置于干燥通风处进行风干,研磨过筛(孔径 2 mm)放入自封袋备用。供试土壤基本理化性质见表 1。

表 1 研究区土壤颗粒分级数据  
Table 1 Soil particle classification data in the study area

编号	深度/m	砂粒/%	粉粒/%	黏粒/%	土壤质地类型
1号	2.0	1.17	75.07	23.76	粉质亚黏土
2号	5.0	1.20	62.15	36.65	粉质黏土
3号	6.5	3.00	79.42	17.58	粉质亚黏土
4号	13.5	45.10	41.54	13.36	砂质亚黏土
5号	14.2	66.17	26.43	7.40	砂质亚砂土

#### 2.2 等温吸附试验

对 5 个深度的供试土壤,各取 8 个 50 ml 的 PET 取样瓶,编号从 0 号到 7 号,按照土水比 1 : 5 的比例分别称取 5.0 g 研磨后的风干土放入 0—7 号 PET 取样瓶。1—7 号 PET 取样瓶中移入 25.0 ml 浓度分别为 1, 5, 10, 50, 100, 125, 150 g/L 的 NaBr 溶液,0 号 PET 取样瓶中移入 25.0 ml 去离子水作为空白对照组。置于恒温振荡器中振荡 4 h 后静置 24 h 备用。取 10 ml 静置后样品上清液,离心过滤(0.45 μm 滤头),通过离子色谱仪(Metrohm 883 Basic IC plus 型)对浸出液中的 Br 浓度进行测量。

#### 2.3 土柱穿透试验

土柱制备:根据试验场地土壤质地及地层结构共设计 9 个土柱(图 2),其中 1—5 号是单层均匀土柱,材料分别为试验场垂向结构的 5 个深度土样(2.0, 5.0,

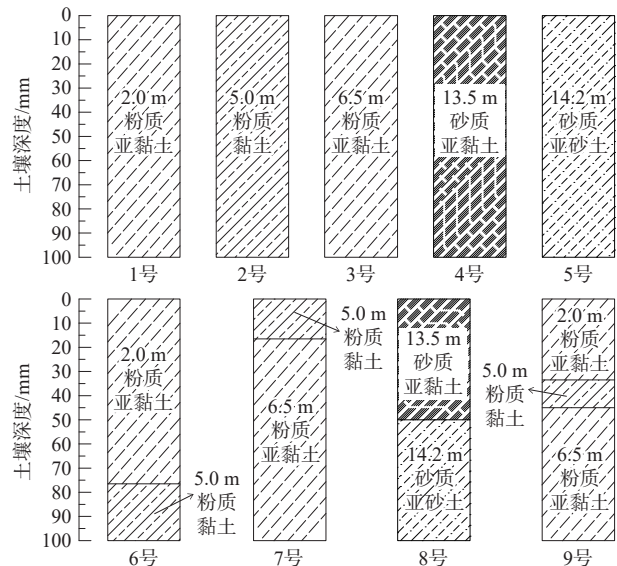


图 2 土柱构型示意图

Fig. 2 Schematic diagram of soil column configuration

6.5, 13.5, 14.2 m); 6—9 号是按照实际场地地层排列顺序及地层之间厚度比, 用上述 5 个深度土样填土的层状土柱, 各土柱构型组成见表 2。试验土样填充于内径 4.0 cm, 高为 14.8 cm 的塑料管中, 管内侧进行磨砂处理, 底部垫单层纱布, 上铺 1.5 cm 厚的细沙, 等容重填土后, 土面铺 1.0 cm 的粗砂, 管上部加盖用防水乳胶封死, 盖壁接外径 4 mm 的长乳胶导管输送示踪溶液。

表 2 试验各土柱具体构型

Table 2 Specific configurations of soil columns in the experiment

编号	总长度/cm	土柱构型及厚度(由上至下)
1号	10	粉质亚黏土(10 cm)
2号		粉质黏土(10 cm)
3号		粉质亚黏土(10 cm)
4号		砂质亚黏土(10 cm)
5号		砂质亚砂土(10 cm)
6号		粉质亚黏土(7.6 cm)+粉质黏土(2.4 cm)
7号		粉质黏土(1.6 cm)+粉质亚黏土(8.4 cm)
8号		砂质亚黏土(5 cm)+砂质亚砂土(5 cm)
9号		粉质亚黏土(3.5 cm)+粉质黏土(1 cm)+粉质亚黏土(5.5 cm)

试验过程: 以定水头饱水入渗方式测定穿透曲线, 先用去离子水使土柱自下而上完全饱水, 稳定后计算各土柱的孔隙水流速, 同时改用 1 号马氏瓶以 2 m 的固定水头在土柱上层通入浓度为 5 g/L 的 NaBr 溶液(图 3)。为保证 1 号马氏瓶液面稳定, 通过 2 号马氏瓶对 1 号瓶以 10 ml/h 流速供液, 超过固定液面的溶液通过溢流孔流入收集瓶后重复利用。在各土柱底部用 20 ml PET 瓶承接出流液, 通过离子色谱仪(Metrohm 883 Basic IC plus 型)测定不同时段内出流液中 Br<sup>-</sup> 的质量浓度, 从而得到穿透曲线。

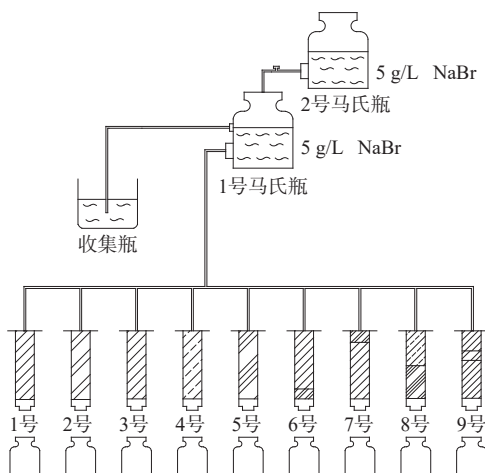


图 3 试验装置示意图

Fig. 3 Schematic diagram of experimental device

## 2.4 试验数据分析方法

### (1) 等温吸附模型

Br<sup>-</sup> 等温吸附试验所得数据采用 Freundlich 吸附模型和 Langmuir 吸附模型进行拟合, 模型表达式及参数如下<sup>[24]</sup>:

Freundlich 吸附模型方程:

$$q_e = K_f C_e^{\left(\frac{1}{n}\right)} \quad (1)$$

Langmuir 吸附模型方程:

$$\frac{C_e}{q_e} = \frac{1 + C_e K_L}{q_m K_L} \quad (2)$$

式中:  $C_e$ ——溶液中 Br<sup>-</sup> 平衡质量浓度/(mg·L<sup>-1</sup>);

$q_e$ ——单位土体 Br<sup>-</sup> 的平衡吸附量/(mg·g<sup>-1</sup>);

$K_f$ ——Freundlich 吸附常数/(L·mg<sup>-1</sup>);

$n$ ——非线性程度拟合参数/(L·mg<sup>-1</sup>);

$q_m$ ——单位土体 Br<sup>-</sup> 的最大吸附量/(mg·g<sup>-1</sup>);

$K_L$ ——Langmuir 吸附常数。

### (2) 溶质运移模型

使用 HYDRUS-1D 建立一维土柱溶质运移模型, 定量模拟 Br<sup>-</sup> 随水分进入土柱后在吸附作用和不同土体构型的影响下在土柱中的迁移过程, 从而反演出弥散度和弥散系数。模拟土柱均按实际填充情况设置参数, 建立土壤水流模型设置上边界为定水头边界, 下边界为自由排水边界。溶质运移过程考虑土壤对 Br<sup>-</sup> 吸附作用得到一维弥散方程<sup>[25]</sup>:

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \frac{1-N}{n} \frac{\partial S}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} - V \frac{\partial C}{\partial x} \quad (3)$$

确定模型初始条件和边界条件:

初始条件:

$$C(x, 0) = C_0, 0 \leq x \leq L, t = 0$$

上边界条件:

$$C(0, t) = C_i, x = 0, t > 0$$

下边界条件:

$$\frac{\partial C}{\partial x} = 0, x = L, t > 0$$

式中:  $D$ ——弥散系数/(cm<sup>2</sup>·d<sup>-1</sup>);

$S$ ——单位土体 Br<sup>-</sup> 吸附量/(g·L<sup>-1</sup>);

$C$ ——溶液中 Br<sup>-</sup> 质量浓度/(g·L<sup>-1</sup>);

$C_0$ ——土柱液相 Br<sup>-</sup> 背景质量浓度/(g·L<sup>-1</sup>);

$C_i$ ——穿透溶液中 Br<sup>-</sup> 质量浓度/(g·L<sup>-1</sup>), NaBr 溶液质量浓度为 5 g/L, Br<sup>-</sup> 质量浓度为 3.88 g/L;

$N$ ——土壤有效孔隙度;

$V$ ——土壤孔隙流速/(cm·d<sup>-1</sup>)。

HYDRUS-1D 软件可以利用土壤颗分数据预测水力特征参数,将表 1 各层土颗分数据输入“Neural Network Prediction”系统,从而获得残余含水率、饱和含水率、进气值、饱和渗透系数和特定参数的取值<sup>[26]</sup>。

模型中描述各类层状土吸附作用所需相关参数  $K_L$  和  $K_F$  均由室内试验获得,各参数见表 3,溶质穿透曲线及实测数据由一维土柱弥散试验提供,同时获取渗出液孔隙流速,从而可以对弥散参数进行反演。

表 3 Freundlich 方程和 Langmuir 方程拟合参数结果  
Table 3 Fitting parameter results of Freundlich equation and Langmuir equation

样品	Langmuir模型拟合			Freundlich模型拟合		
	$q_m/(mg \cdot g^{-1})$	$K_L$	$R^2$	$K_F/(L \cdot mg^{-1})$	$n/(L \cdot mg^{-1})$	$R^2$
1号 粉质亚黏土	5.988±0.433	0.065	0.970	0.836	2.488	0.921
2号 粉质黏土	10.169±1.995	0.023	0.957	0.557	1.809	0.927
3号 粉质亚黏土	3.831±0.373	0.052	0.960	0.451	2.324	0.924
4号 砂质亚黏土	3.522±0.230	0.039	0.987	0.324	2.113	0.986
5号 砂质亚砂土	2.651±0.254	0.087	0.926	0.429	2.624	0.922

### 3 结果

#### 3.1 不同分层土壤对 Br<sup>-</sup> 的等温吸附结果

采用 Freundlich 吸附模型和 Langmuir 吸附模型对不同浓度条件下的吸附试验结果进行拟合。通过 Freundlich 模型和 Langmuir 模型的拟合曲线和拟合决定系数 ( $R^2$ ),可以发现二者对 Br<sup>-</sup> 等温吸附结果的拟合效果均良好, Freundlich 模型  $R^2$  在 0.921 ~ 0.986 之间,而 Langmuir 等温模型  $R^2$  在 0.926 ~ 0.987 之间,综合比较下 Langmuir 等温模型对土壤中 Br<sup>-</sup> 的吸附拟合效果较好。

#### 3.2 一维土柱 Br<sup>-</sup> 穿透曲线特征

穿透曲线是描述溶质在土壤运移过程中,渗出液

相对浓度 ( $C/C_0$ ) 与相对应时间 ( $t$ ) 的关系曲线,它可以直观的反映溶质在土壤介质运移过程中的浓度变化趋势<sup>[27]</sup>。试验中各土柱中 Br<sup>-</sup> 的穿透曲线如图 4 所示,对照各土柱具体构型(表 2),可以看出各土柱渗出液中 Br<sup>-</sup> 的浓度在开始时均基本为 0,在定水头的作用下,Br<sup>-</sup> 的浓度开始变化同时曲线变陡,将此时定义为开始穿透时间,而后相对浓度逐渐增大到接近于 1,曲线也随之变缓至基本水平,此时穿透结束,定义为完全穿透时间。

由图 4(a) 研究区各深度均质土柱穿透曲线可知,在其他条件均相同的情况下,穿透历时及完全穿透时间均表现为: 2 号 > 1 号 > 3 号 > 4 号 > 5 号,即 5.0 m 粉质

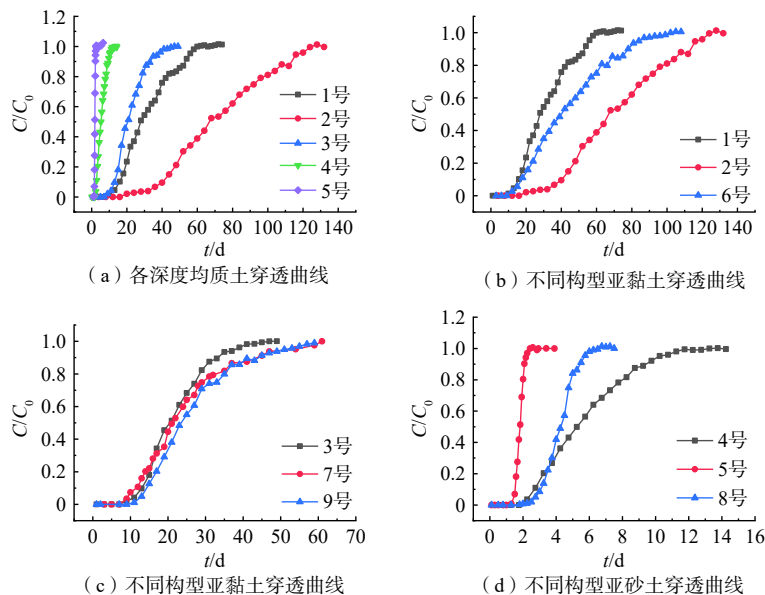


图 4 试验各土柱溶质穿透曲线图

Fig. 4 Solute penetration curve of each soil column in the experiment

黏土>2.0 m 粉质亚黏土>6.5 m 粉质亚黏土>13.5 m 砂质亚黏土>14.2 m 砂质亚砂土。各类型土中 Br<sup>-</sup>的穿透历时相差很大,其中穿透最快的 5 号土柱穿透历时为 1.14 d 左右,而最慢的 2 号穿透历时为 106 d 左右。

### 3.3 弥散试验的模拟反演结果

本文通过 HYDRUS-1D 软件基于一维水动力弥散方程对土柱中 Br<sup>-</sup>的弥散过程进行模拟反演从而求得弥散度及弥散系数,反演过程中通过实测穿透曲线与拟合曲线比较,获取 R<sup>2</sup> 验证模拟结果的准确性。各土柱穿透曲线模拟结果如图 5 所示,图中离散点为不同时间渗出液相对浓度的实测值。模型对弥散参数反演结果如表 4 和表 5 所示,可以看出模型拟合值与实测值 R<sup>2</sup> 均大于 0.991,这说明模拟出的穿透曲线拟合程度较高,反演得到的弥散度(α)可信度较高,结合实测平均孔隙流速(V)可得到不同土体构型的弥散系数(D)。

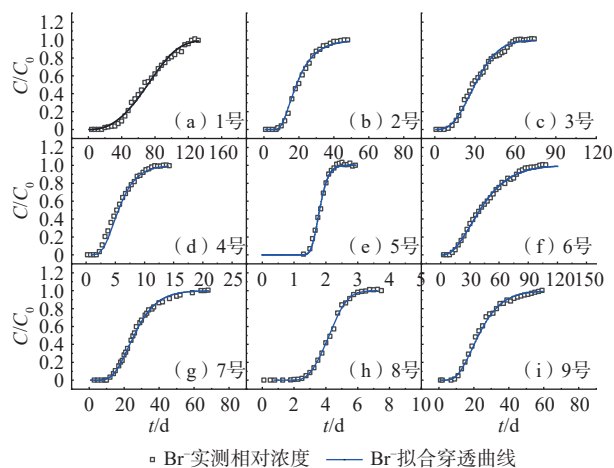


图 5 各土柱穿透曲线拟合效果图

Fig. 5 Fitting effect diagram of penetration curve of each soil column

表 4 均质土柱 HYDRUS 模型反演弥散参数

Table 4 Dispersion parameters inversed by Hydrus model of homogeneous soil column

土柱编号	V/(cm·d <sup>-1</sup> )	Br <sup>-</sup> 质量浓度/(g·L <sup>-1</sup> )	α/cm	D/(cm <sup>2</sup> ·d <sup>-1</sup> )	R <sup>2</sup>
1号 粉质亚黏土	0.15	3.883	0.327	0.048	0.992
2号 粉质黏土	0.04	3.883	0.118	0.005	0.991
3号 粉质亚黏土	0.24	3.883	0.481	0.118	0.997
4号 砂质亚黏土	0.44	3.883	1.200	0.524	0.997
5号 砂质亚砂土	2.92	3.883	2.561	7.477	0.993

## 4 讨论

### 4.1 黏性土对 Br<sup>-</sup>的等温吸附分析

Langmuir 吸附模型主要描述土壤颗粒表面单层

表 5 层状土柱 HYDRUS 模型反演弥散参数

Table 5 Dispersion parameters inversed by Hydrus model of layered soil column

土柱编号	V/(cm·d <sup>-1</sup> )	Br <sup>-</sup> 质量浓度/(g·L <sup>-1</sup> )	α/cm	D/(cm <sup>2</sup> ·d <sup>-1</sup> )	R <sup>2</sup>
6号	0.08	3.883	粉质亚黏土(上)	0.382	0.031
			粉质黏土(下)	0.129	0.010
7号	0.23	3.883	粉质黏土(上)	0.125	0.029
			粉质亚黏土(下)	0.513	0.118
8号	1.23	3.883	砂质亚黏土(上)	1.385	1.704
			砂质亚砂土(下)	2.455	3.020
9号	0.24	3.883	粉质亚黏土(上)	0.313	0.075
			粉质黏土(中)	0.133	0.032
			粉质亚黏土(下)	0.490	0.118

活性吸附中心的吸附作用,土壤颗粒表面活性点位的数量影响着吸附量的大小,当活性吸附点位占满后,吸附量达到最大值<sup>[28]</sup>。试验中,Langmuir 等温吸附模型能较好描述土壤中 Br<sup>-</sup>吸附过程,说明供试黏性土对 Br<sup>-</sup>的吸附以弱的化学单分子层吸附为主,这也与黏土矿物吸附点位较多有关<sup>[29,30]</sup>。

通过表 3 对 Langmuir 等温吸附方程拟合结果中的 q<sub>m</sub> 分析,可以发现不同类型土壤对 Br<sup>-</sup>的吸附量存在着明显差异,5.0 m 粉质黏土饱和吸附量最大为 10.169 mg/g,而 13.5 m 以下的砂质土则基本上小于粉质亚黏土,基本上呈现出粉质黏土>粉质亚黏土>砂质亚黏土>砂质亚砂土的特征,表明供试土壤对于 Br<sup>-</sup>的吸附呈现出吸附量随黏粒含量增多而增大的趋势。

Freundlich 模型为经验模型,对多种吸附过程都有较好的适用性,可以很好的描述低浓度环境下的吸附作用<sup>[31]</sup>。Freundlich 等温模型中 1/n 也称为吸附指数,是衡量吸附强弱的参数,一般情况下 1/n 的值在 0~1 左右,当 1/n 越小则表明吸附越容易发生,当 1/n 介于 0.1~0.5 时吸附易于进行<sup>[32]</sup>。试验中土壤对 Br<sup>-</sup>吸附拟合的 1/n 值接近 0.5,说明供试黏性土类矿物对 Br<sup>-</sup>的吸附较易发生但吸附强度不高。

### 4.2 层状土中 Br<sup>-</sup>穿透曲线特征分析

试验中随着土壤颗粒黏性的增大出流液流量减少,穿透历时及完全穿透时间延长,曲线斜率逐渐变小,这说明黏性土对 Br<sup>-</sup>的穿透具有一定的阻碍作用。其原因是黏性细颗粒的增加使得土壤介质有效孔隙度变小,穿透路径变得曲折从而使渗透流速减小,同时也增加了含水介质中不动水区的体积,削弱了机械弥散对溶质的置换作用,这也佐证了虎胆·吐马尔白等<sup>[33]</sup>在砂壤土研究中提出的土壤渗透流速越大穿透到达峰值时间越短的观点,该规律同样适用于江

汉平原过渡带黏性土。

图4(b)为亚黏土、黏土成层、两种均质土穿透曲线比较。图4(d)为粉质亚砂土、砂土成层、两种均质土穿透曲线的比较。可以发现将某种均质土中的一部分换为黏性较大、渗透性更差的第二种土后,土中Br<sup>-</sup>的穿透历时及达到峰值时间均会延后,但不会超过第二种土。这主要是因为土柱系统中细小的黏性颗粒增加,系统渗透性更差,同时不同类型土层交界面会形成水分横向流动对溶质迁移有一定的阻隔作用所导致<sup>[34]</sup>。图4(c)为均质亚黏土、上黏土下亚黏土、亚黏土夹黏土的穿透曲线图,7号和9号土柱中粉质黏土所占比例均参考研究区土层实际厚度比例接近1/10,与3号相比穿透曲线均出现了右移,这也是由于系统黏粒的增加和不同类型土层交界面对溶质迁移产生了阻碍导致,但二者穿透历程相差不大,这与同构型土柱在非饱和条件溶质运移过程中,上细下粗结构阻碍溶质迁移的规律有所矛盾<sup>[35]</sup>。其原因是本试验中土柱已充分饱水,并不会出现非饱和条件下水分先被上层细粒截流吸收的情况,由此可以认为,在饱和条件下层状土中溶质运移过程主要取决于含水介质中黏性颗粒的占比。

### 4.3 模拟反演参数分析

对比1~5号均质土柱(表4),弥散度在不同类型土壤中总体呈现出砂质亚砂土>砂质亚黏土>粉质亚黏土>粉质黏土的规律,随着土壤黏粒含量的增多,土壤平均粒径减小,弥散度同样呈减小趋势,这在一定程度上可以反映出孔隙介质的骨架特征。土壤孔隙流速与弥散系数均呈现出2号<1号<3号<4号<5号的规律,这是因为黏性土的增加使有效孔隙减少、水分溶质运移途径曲折所致,可以认为不同的土壤因其质地差异导致渗流速度不同从而影响弥散系数,土壤黏粒含量越高,渗流越差,弥散系数也越小。试验中5.0 m深度的粉质黏土弥散度为0.118 cm,而弥散系数仅为0.005 cm<sup>2</sup>/d,这也说明研究区内粉质黏土层的存在会很大程度的阻碍地下水的水分、溶质运移,上部含水层中的污染物或有机质很难穿透该层向下运移。

对比表5中HYDRUS模型反演出的4个层状土柱中各层土壤的弥散参数,并和与之相对应的均质土柱各参数比较,弥散系数变化幅度均大于弥散度变化幅度,如:6号,上层2.0 m深粉质亚黏土弥散度为0.382 cm,弥散系数为0.031 cm<sup>2</sup>/d,而与之对应的1号弥散度为0.327 cm,相差14.39%,弥散系数为0.048 cm<sup>2</sup>/d,相差54.84%。这说明了在试验的层状土柱中,因为运

移距离较短,渗流速度较慢,弥散度空间尺度效应较小,变化幅度不大,但是因为层状结构的存在导致土柱平均孔隙流速变化剧烈,从而明显改变了弥散系数<sup>[36]</sup>。由此,结合上文对不同类型层状土穿透曲线的分析可以认为:在同一尺度下,对于层状土无论其土壤组成类型还是层厚及排序,其本质都是改变了土柱平均孔隙流速从而影响弥散作用,平均孔隙流速越小其弥散系数越小。

综上,通过各参数对江汉平原过渡带试验场地纵向弥散规律进行整体分析,此次反演结果表明:研究区内0.2~4.4 m及5.7~12.5 m亚黏土弥散度范围为0.327~0.481 cm,4.4~5.7 m粉质黏土弥散度约为0.118 cm,13.0~15.0 m砂土弥散度范围在1.200~2.561 cm,反演结果与李培月等<sup>[37]</sup>和司高华等<sup>[38]</sup>对砂土、黏土弥散度的室内研究结果相似。同时,由室内试验得出,研究区内0.2~12.5 m上覆黏性土渗透系数小(10<sup>-6</sup> cm/s数量级),且弥散系数为0.005~0.048 cm<sup>2</sup>/d,远小于下部13.0~14.0 m砂土含水层弥散系数0.524~7.477 cm<sup>2</sup>/d,差值达到了至少两个数量级,这进一步说明了研究区0.2~12.5 m上覆厚层亚黏土夹黏土结构对区域垂向渗流及弥散具有主要控制作用,也说明江汉平原过渡带厚层黏土的存在会较大程度上阻碍了土壤水分、溶质的运移。在黏土垫层隔污防渗的实际研究中,学者们发现厚度大于2 m,饱和渗透系数在10<sup>-7</sup> cm/s数量级左右的黏土衬层对渗滤液有明显的阻隔作用<sup>[39-40]</sup>。这也从实际应用层面定性说明研究区上部含水层具有良好的截污性能,后期依据本文所得各项参数,结合研究区实际边界条件开展数值计算,可以定量表征水盐及污染物在江汉平原过渡带土体中的具体运移过程。

## 5 结论

(1)采用Freundlich模型和Langmuir模型均能较好的拟合吸附试验结果,研究区不同类型土壤对Br<sup>-</sup>的饱和吸附量有所差异,基本上呈现出粉质黏土>粉质亚黏土>砂质亚黏土>砂质亚砂土的规律,随着土壤中黏粒比例的增大,表面活性点位增多,土壤对溶质吸附作用愈发明显。

(2)层状土中土壤质地与结构均会影响穿透曲线的形状。试验中研究区各深度均质土穿透历时及完全穿透时间均表现为:5.0 m粉质黏土>2.0 m粉质亚黏土>6.5 m粉质亚黏土>13.5 m砂质亚黏土>14.2 m砂质亚砂土,黏粒的增加会对溶质运移产生阻碍。对试验



中层状非均质构型土柱与均质土柱比较,发现土柱系统渗透性和层状土交界面均会对弥散作用产生一定影响,但一维饱和土柱中的弥散过程主要取决于含水介质系统中黏性颗粒的占比。

(3)通过 HYDRUS-1D 软件构建模型反演弥散参数,  $R^2$  均大于 0.991, 拟合效果较好。考虑吸附作用的影响,研究区内粉质黏土弥散系数为  $0.005 \sim 0.048 \text{ cm}^2/\text{d}$ , 远远小于下部  $13.0 \sim 14.0 \text{ m}$  砂土含水层弥散系数  $0.524 \sim 7.477 \text{ cm}^2/\text{d}$ 。同时分析发现在同一尺度下,对于层状土无论其土壤组成类型还是层厚及排序的影响,其本质都是改变了土壤的平均孔隙流速从而影响弥散作用,平均孔隙流速越小其弥散系数越小。

### 参考文献 (References) :

- [ 1 ] 魏山忠. 贯彻实施《地下水管理条例》切实履行地下水保护治理法定职责[J]. 水利发展研究, 2021, 21(11): 1 - 3. [ WEI Shanzhong. Implement the regulations on the administration of groundwater and earnestly perform the legal responsibilities of groundwater protection and governance[J]. Water Resources Development Research, 2021, 21(11): 1 - 3. (in Chinese) ]
- [ 2 ] KUMAR G S. Effect of sorption intensities on dispersivity and macro-dispersion coefficient in a single fracture with matrix diffusion[J]. *Hydrogeology Journal*, 2008, 16(2): 235 - 249.
- [ 3 ] WANG Chaozi, WANG Ruoyu, HUO Zailin, et al. Colloid transport through soil and other porous media under transient flow conditions: A review[J]. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Water*, 2020, 7(4): e1439.
- [ 4 ] WANG Tieliang, ZHANG Kan, FENG Xue. The concentration and dispersion coefficient of the advection dispersion equation[J]. *Journal of Modern Mathematics Frontier Volume*, 2013, 2(3): 85 - 91.
- [ 5 ] 孙启明, 高茂生, 党显璋. 垃圾填埋场渗滤液变密度的地下水溶质运移模拟[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2022, 52(4): 1265 - 1274. [ Sun Qiming, Gao Maosheng, Dang Xianzhang. Simulation of solute transport in variable-density groundwater for landfill leachate[J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 2022, 52(4): 1265 - 1274. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 6 ] BOURAZANIS G, PSYCHOGIOU M, NIKOLAOU N. Chloride transport parameters prediction for a clay-loam soil column[J]. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 2017, 98(3): 378 - 384.
- [ 7 ] GUPTA P, ALAM J, MUZZAMMIL M. Influence of thickness and position of the individual layer on the permeability of the stratified soil[J]. *Perspectives in Science*, 2016, 8: 757 - 759.
- [ 8 ] 郝瑞, 施斌, 曹鼎峰, 等. 层状土毛细水上升过程中 Lucas-Washburn 模型评价及修正[J]. *水文地质工程地质*, 2018, 45(6): 84 - 92. [ HAO Rui, SHI Bin, CAO Dingfeng, et al. Evaluation and modification of the Lucas-Washburn model during capillary water rising in the layered soil[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2018, 45(6): 84 - 92. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 9 ] 孙芳强, 尹立河, 王晓勇, 等. 新疆三工河流域厚层包气带区地下水垂向补给量的厘定[J]. *中国地质*, 2017, 44(5): 913 - 923. [ SUN Fangqiang, YIN Lihe, WANG Xiaoyong, et al. Determination of vertical infiltration recharge of groundwater in the thick unsaturated zone of Sangong River Basin, Xinjiang[J]. *Geology in China*, 2017, 44(5): 913 - 923. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 10 ] 赵小二, 常勇, 吴吉春, 等. 穿透曲线随流量升高的变化特征及预测[J]. *水文地质工程地质*, 2018, 45(4): 21 - 30. [ ZHAO Xiaoe, CHANG Yong, WU Jichun, et al. Change characteristics of breakthrough curves with increasing flow rate and prediction[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2018, 45(4): 21 - 30. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 11 ] 郭蕾蕾, 许模, 王璐, 等. 定流量条件下壤土夹层对苯和 Br<sup>-</sup> 穿透包气带的影响[J]. *环境工程学报*, 2017, 11(12): 6524 - 6531. [ GUO Leilei, XU Mo, WANG Lu, et al. Effect of loam interlayer on benzene and Br<sup>-</sup> breakthrough vadose zone under constant flow[J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2017, 11(12): 6524 - 6531. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 12 ] SELIM H M, DAVIDSON J M, RAO P S C. Transport of reactive solutes through multilayered soils[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1977, 41(1): 3 - 10.
- [ 13 ] SHARMA P K, SAWANT V A, SHUKLA S K, et al. Experimental and numerical simulation of contaminant transport through layered soil[J]. *International Journal of Geotechnical Engineering*, 2014, 8(4): 345 - 351.
- [ 14 ] 卜新峰, 万伟锋. 豫西丘陵地带黄土介质水动力弥散特性试验研究[J]. *中国农村水利水电*, 2021(12): 27 - 31. [ BU Xinfeng, WAN Weifeng. Experimental research on the hydrodynamic dispersion characteristics of loess

- medium in hilly area of western Henan Province[J]. *China Rural Water and Hydropower*, 2021(12): 27 - 31. (in Chinese with English abstract) ]
- [15] 邵托娅, 郑跃军, 王金生. 应用HYDRUS-1D模型模拟分析PFCs在土壤中的迁移特征[J]. *农业环境科学学报*, 2018, 37(10): 2175 - 2182. [ TAI Tuoya, ZHENG Yuejun, WANG Jinsheng. Simulation and analysis of PFCs migration in the soil column using the Hydrus-1D model[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2018, 37(10): 2175 - 2182. (in Chinese with English abstract) ]
- [16] 葛建, 黄德文, 高旭, 等. 分层土壤的持水性能研究[J]. *西南农业学报*, 2019, 32(9): 2126 - 2132. [ GE Jian, HUANG Dewen, GAO Xu, et al. Water retention capacity of drained soil columns with grained layers[J]. *Southwest China Journal of Agricultural Sciences*, 2019, 32(9): 2126 - 2132. (in Chinese with English abstract) ]
- [17] 马蒙蒙, 林青, 徐绍辉. 不同因素影响下层状土壤水分入渗特征及水力学参数估计[J]. *土壤学报*, 2020, 57(2): 347 - 358. [ MA Mengmeng, LIN Qing, XU Shaohui. Water infiltration characteristics of layered soil under influences of different factors and estimation of hydraulic parameters[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2020, 57(2): 347 - 358. (in Chinese with English abstract) ]
- [18] BECH T B, ROSENBOM A E, SORENSEN S R, et al. Conservative tracer bromide inhibits pesticide mineralisation in soil[J]. *Environmental Pollution*, 2017, 222: 404 - 411.
- [19] LIU Tianwen, HU Cheng, WANG Qing, et al. Conversion relationship of rainfall-soil moisture-groundwater in Quaternary thick cohesive soil in Jianghan Plain, Hubei Province, China[J]. *China Geology*, 2020, 3(3): 462 - 472.
- [20] 刘添文, 潘越, 胡成, 等. 应用D、<sup>18</sup>O同位素示踪孝感市厚层黏性土中土壤水入渗补给及其生态环境效应[J]. *中国地质*, 2021, 48(5): 1429 - 1440. [ LIU Tianwen, PAN Yue, HU Cheng, et al. Tracing infiltration and recharge of thick silt by using D and <sup>18</sup>O isotopes of soil moisture in Xiaogan, Hubei and its ecological effects[J]. *Geology in China*, 2021, 48(5): 1429 - 1440. (in Chinese with English abstract) ]
- [21] 蔡玲, 胡成, 陈植华, 等. 江汉平原东北部地区高铁锰地下水成因与分布规律[J]. *水文地质工程地质*, 2019, 46(4): 18 - 25. [ CAI Ling, HU Cheng, CHEN Zhihua, et al. Distribution and genesis of high Fe and Mn groundwater in the northeast of the Jianghan Plain[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2019, 46(4): 18 - 25. (in Chinese with English abstract) ]
- [22] 常威, 黄琨, 胡成, 等. 云应盆地东北部含水层结构特征及地下水转化模式[J]. *水文地质工程地质*, 2019, 46(5): 9 - 15. [ CHANG Wei, HUANG Kun, HU Cheng, et al. Characteristics of the aquifer structure and groundwater conversion model in the northeastern Yunying Basin[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2019, 46(5): 9 - 15. (in Chinese with English abstract) ]
- [23] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑地基基础设计规范: GB50007—2011[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012. [ Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Code for design of building foundation: GB50007—2011[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2012. (in Chinese) ]
- [24] 魏亮, 郭华明, 谢振华, 等. 北京平原包气带典型沉积物对NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N吸附特性研究[J]. *水文地质工程地质*, 2012, 39(1): 81 - 88. [ WEI Liang, GUO Huaming, XIE Zhenhua, et al. Adsorption characteristics of typical sediments from unsaturated zone of Beijing Plain, China[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2012, 39(1): 81 - 88. (in Chinese with English abstract) ]
- [25] 张效先. 饱和条件下田间土壤纵向及横向弥散系数的试验和计算[J]. *水利学报*, 1989, 20(1): 1 - 8. [ ZHANG Xiaoxian. A method for determining the longitudinal and lateral dispersion parameters of field soils under saturated condition[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 1989, 20(1): 1 - 8. (in Chinese with English abstract) ]
- [26] MOHAMMED E, ALANI E, ABID M. Modeling infiltration and water distribution process of layered soils using HYDRUS-1D[J]. *Indian Journal of Ecology*, 2021, 48(1): 66 - 71.
- [27] 刘勇, 郑军芳, 贾海红. 西北某黏土矿水动力弥散系数的室内测定[J]. *环境科学与技术*, 2012, 35(增刊2): 319 - 321. [ LIU Yong, ZHENG Junfang, JIA Haihong. In-lab determination of northwest clay mine hydrodynamic dispersion coefficient[J]. *Environmental Science & Technology*, 2012, 35(Sup 2): 319 - 321. (in Chinese with English abstract) ]
- [28] 孙庆超, 王旭东, 乔建晨, 等. 不同质地土壤对镉的吸附特性及影响因子研究[J]. *土壤*, 2020, 52(3): 545 - 551. [ SUN Qingchao, WANG Xudong, QIAO Jianchen, et al. Study on Cd adsorption characteristics and

- influencing factors of soils with different textures[J]. *Soils*, 2020, 52(3): 545 – 551. (in Chinese with English abstract) ]
- [29] GOLDBERG S, J KABENGI N. Bromide adsorption by reference minerals and soils[J]. *Vadose Zone Journal*, 2010, 9(3): 780 – 786.
- [30] KOROM S F, SEAMAN J C. When “conservative” anionic tracers aren’t[J]. *Groundwater*, 2012, 50(6): 820 – 824.
- [31] 杨晨, 向本富, 董高峰, 等. 加热卷烟不同类型专用基片水吸附特性研究[J]. *中国造纸*, 2021, 40(8): 56 – 63. [ YANG Chen, XIANG Benfu, DONG Gaofeng, et al. Study on vapor adsorption characteristics of heated substrate with different types[J]. *China Pulp & Paper*, 2021, 40(8): 56 – 63. (in Chinese with English abstract) ]
- [32] 陈孜涵, 汪丙国, 赵建芳. 江汉平原旱地和水田土壤镉的吸附与解吸特征及影响因素[J]. *地球科学*, 2022, 47(2): 544 – 555. [ CHEN Zihan, WANG Bingguo, ZHAO Jianfang. Adsorption and desorption characteristics of Cd in upland and paddy soil of Jianghan plain[J]. *Earth Science*, 2022, 47(2): 544 – 555. (in Chinese with English abstract) ]
- [33] 虎胆·吐马尔白, 穆丽德尔·托伙加, 朱珠. 北疆典型土壤纵向弥散系数试验[J]. *新疆农业科学*, 2021, 58(1): 151 – 158. [ HUDAN Tumaerbai, MULIDEER Tuohuojia, ZHU Zhu. Experimental study on longitudinal dispersion coefficient of typical soil in northern Xinjiang[J]. *Xinjiang Agricultural Sciences*, 2021, 58(1): 151 – 158. (in Chinese with English abstract) ]
- [34] 涂安国. 层状土壤水分入渗与溶质运移研究进展[J]. *江西农业大学学报*, 2017, 39(4): 818 – 825. [ TU Anguo. Advances in water infiltration and solute transport in layered soil[J]. *Acta Agriculturae Universitatis Jiangxiensis*, 2017, 39(4): 818 – 825. (in Chinese with English abstract) ]
- [35] 甯娜, 许模, 段永祥, 等. 保守性离子在包气带层状土中运移规律研究[J]. *环境工程*, 2015, 33(5): 70 – 74. [ NING Na, XU Mo, DUAN Yongxiang, et al. Research on the migration law of conservative ion in layered soil under unsaturated zone[J]. *Environmental Engineering*, 2015, 33(5): 70 – 74. (in Chinese with English abstract) ]
- [36] 苑绍东, 张文杰, 袁姗姗. 溶质迁移的弥散度取值试验研究[J/OL]. *岩土力学*. (2020-10-13)[2021-10-21]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/detail.aspx?FileName=YTLX20201012003&DbName=DKFX2020>. [ YUAN Shaodong, ZHANG Wenjie, YUAN Shanshan. Dispersion values in solute migration tests[J]. *Rock and soil mechanics*. (2020-10-13)[2021-10-21]. (in Chinese with English abstract) ]
- [37] 李培月, 钱会, 吴健华, 等. 银川地区饱和细砂含水介质弥散实验研究[J]. *水资源与水工程学报*, 2012, 23(4): 69 – 74. [ LI Peiyue, QIAN Hui, WU Jianhua, et al. Experiment on the mass dispersion in porous media of saturated fine sand in Yinchuan area[J]. *Journal of Water Resources and Water Engineering*, 2012, 23(4): 69 – 74. (in Chinese with English abstract) ]
- [38] 司高华, 于静, 王青海, 等. 钚在黏土中的迁移试验[J]. *核化学与放射化学*, 2013, 35(1): 29 – 33. [ SI Gaohua, YU Jing, WANG Qinghai, et al. Migration experiment of plutonium in clay[J]. *Journal of Nuclear and Radiochemistry*, 2013, 35(1): 29 – 33. (in Chinese with English abstract) ]
- [39] 城市建设研究院. 生活垃圾卫生填埋场防渗系统工程技术规范: CJJ 113—2007[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2007. [ Technical code for liner system of municipal solid waste landfill: CJJ 113—2007[S]. Beijing: China Architecture Publishing & Media Co., Ltd, 2007. (in Chinese) ]
- [40] 黎艺明, 李才. 垃圾污染质在粉质黏土包气带中运移情况的调查[J]. *环境化学*, 2013, 32(1): 166 – 167. [ LI Yiming, LI Cai. Investigation on the transport of waste pollutants in the aerated zone of silty clay[J]. *Environmental Chemistry*, 2013, 32(1): 166 – 167. (in Chinese) ]

编辑: 宗 爽