

普吉土介质弥散试验研究

刘文连¹, 蒯斌¹, 韦立德², 睢素刚¹, 李欣³

(1. 中国有色金属工业昆明勘察设计院, 昆明 650051; 2. 中科院武汉岩土力学研究所 岩土力学与工程国家重点实验室, 武汉 430071; 3. 昆明理工大学建筑工程学院, 昆明 650224)

摘要: 普吉渣场黏土的水动力弥散特征是该地区地下水环境评价关键内容。以普吉地区非饱和红色黏土和黄色黏土为对象, 以氯化钾为溶质, 采用水平土柱入渗法对非饱和土壤水动力弥散系数 $D_{sh}(\theta)$ 进行了试验和分析。试验结果表明, 对该2种土壤, 非吸附性溶质 Cl^{-1} 的水动力弥散系数 $D_{sh}(\theta)$ 与土壤含水率 θ 成幂函数关系; 同一含水量条件下红色黏土中渣溶质运移的速率要大于黄色黏土。

关键词: 普吉土; 非饱和; 水动力弥散系数; 含水率

中图分类号: S151 **文献标识码:** A

Experimental Research on Hydrodynamic Dispersion Coefficient of Soil in Puji

LIU Wen-lian¹, DING Mao-bin¹, WEI Li-de², SUI Su-gang¹, LI Xin³

(1. Kunming Prospecting Design Institute of China Nonferrous Metals Industry, Kunming 650051, China;

2. Institute of Rock and Soil Mechanics Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China;

3. College of Architectural Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650224, China)

Abstract: The hydrodynamic dispersion characteristic of soil is a key research project for the assessment of water environment in Puji. In this paper, KCl is used as solute, the hydrodynamic dispersion coefficient $D_{sh}(\theta)$ of the unsaturated soil (red clay soil and yellow clay soil) in Puji are measured by horizontal infiltration method. Experiment results show that the hydrodynamic dispersion coefficient has a relation of power function with water content θ and the hydrodynamic dispersion coefficient of red soil is greater than that of the yellow one if they are with the same percentage of water-containing.

Key words: soil in Puji; unsaturation; hydrodynamic dispersion coefficient; percentage of water-containing

0 引言

昆明市普吉渣场于1958年开始使用, 经过近50年的运营, 目前已经堆至2 036 m(独立高程系), 相对于场地东南侧合田磷肥厂地面, 高差为71 m; 相对于场地南部昆明三养肥料有限公司地面, 高差为56 m; 相对于场地西南部西山区看守所大门地面, 高差为50 m。渣场未设置专门拦挡坝和防渗设施, 渣场地下水环境评价成为闭库研究的重要研究课题, 因此普吉渣场下部和周围的非饱和红色黏土和黄色黏土的水动力弥散特征成为重要研究内容。到目前为止, 该地区土水动力弥散特征

研究还未见报道。

关于非饱和土壤溶质弥散系数的测定, 目前国内外较为普遍采用的方法是水平土柱入渗的方法^[1], 张富仓等学者利用该方法对国内的几种土壤进行分析测试, 效果很好^[2-3]。本文采用此方法对普吉土介质水动力弥散系数进行了试验测定研究。

1 理论分析

实验的理论根据如下。对于非吸附性溶质如 Cl^{-1} 离子, 非稳态一维土壤水平流条件下, 溶质运移的基本方程为:

$$\frac{\partial(\theta C)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left[\theta D_{sh}(\theta, v) \frac{\partial C}{\partial x} \right] - \frac{\partial(qC)}{\partial x} \quad (1)$$

式中: q 为水流通量; x 为水平距离。对于土壤非饱和流, 孔隙平均水流速度 v 很小, 因此可以假定水动力弥散系数 D_{sh} 只是土壤含水量 θ 的函数, 这样式(1)成为:

$$\frac{\partial(\theta C)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left[\theta D_{sh}(\theta) \frac{\partial C}{\partial x} \right] - \frac{\partial(qC)}{\partial x} \quad (2)$$

收稿日期: 2011-04-07

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51074152)。

作者简介: 刘文连(1964-), 男, 博士研究生, 教授级高级工程师, 主要从事岩土工程、工程勘察等方面勘察、设计和科研工作。E-mail: LWENL702@sina.com。

对于具有均匀初始含水量和盐分含量的半无限土柱, 一端施加一定浓度的盐分溶液, 以 KCl 溶液为例, 其定解条件为^[2,3]:

$$\theta = \theta_i, C = C_p, x > 0, t = 0 \quad (3a)$$

$$\theta = \theta_0, C = C_0, x = 0, t > 0 \quad (3b)$$

若不考虑滞后现象和盐分对水分运动的影响, 对于水平入渗有:

$$q = -D(\theta) \frac{\partial \theta}{\partial x} \quad (4)$$

式中: $D(\theta)$ 为土壤水分扩散率。

连续方程:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial q}{\partial x} \quad (5)$$

将式(2)展开, 再将式(4)、式(5)代入化简得:

$$\theta \frac{\partial C}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left[\theta D_{sh}(\theta) \frac{\partial C}{\partial x} \right] - D(\theta) \frac{\partial \theta}{\partial x} \frac{\partial C}{\partial x} \quad (6)$$

式(6)中: θ 为土壤平均含水量, 并假定 Cl^{-1} 离子与土壤无吸附作用; $D_{sh}(\theta)$ 为非吸附性溶质 Cl^{-1} 离子的表观水动力弥散系数^[2,3]。

利用 Boltzman 变换, 令 $\lambda = x t^{-1/2}$, 求导后代入式(6)并化简得^[2,3]:

$$-\frac{1}{2} \left[\theta \lambda + 2 D(\theta) \frac{d\theta}{d\lambda} \right] \frac{dC}{d\lambda} = \frac{d}{d\lambda} \left[\theta D_{sh}(\theta) \frac{dC}{d\lambda} \right] \quad (7)$$

令:

$$g(\theta) = \theta \lambda + 2 D(\theta) \frac{d\theta}{d\lambda} \quad (8)$$

式(7)中:

$$D(\theta) = -\frac{1}{2} \frac{d\lambda}{d\theta} \int_{\theta_i}^{\theta} \lambda d\theta \quad (9)$$

则式(7)变为:

$$-\frac{1}{2} g(\theta) \frac{dC}{d\lambda} = \frac{d}{d\lambda} \left[\theta D_{sh}(\theta) \frac{dC}{d\lambda} \right] \quad (10)$$

因 $\lambda = x t^{-1/2}$, 则水分和溶质的定解条件变为^[2,3]:

$$\theta = \theta_i, C = C_p, \lambda \rightarrow \infty \quad (11a)$$

$$\theta = \theta_0, C = C_0, \lambda = 0 \quad (11b)$$

对式(10)进行积分, 得:

$$D_{sh}(\theta) = -\frac{1}{2\theta} \frac{d\lambda}{dC} \int_{C_i}^C g(\theta) dC \quad (12)$$

为了计算方便, 令无因次的相对浓度 C 为^[2,3]:

$$C = \frac{C - C_i}{C_0 - C_i} \quad (13)$$

代入式(12)得:

$$D_{sh}(\theta) = -\frac{1}{2\theta} \frac{d\lambda}{dC} \int_0^C g(\theta) dC \quad (14)$$

式(14)为非吸附性溶质 Cl^{-1} 离子的非饱和水动力弥散系数 $D_{sh}(\theta)$ 的计算公式。这样, 当半无限土柱的水平入渗停止时, 测出土柱的含水量分布和盐分浓度分布, 用坐标纸点绘出 $\theta \sim \lambda$ 和 $C \sim \lambda$ 关系曲线, 利用式(14)就可计算出 Cl^{-1} 离子的非饱和水动力弥散系数^[2,3]。

2 试验方法

非饱和土壤水动力弥散系数 $D_{sh}(\theta)$ 的测定采用水平土柱

法^[2,3]。本文水平土柱试验是在每 2 cm 分割的有机玻璃土柱中进行的, 柱长为 30 cm, 内径 5 cm, 由固定夹固定, 入渗溶液由马氏瓶控制一定水位, 进水高度处于水平土柱的下限, 进水端有滤纸与土壤接触。入渗溶液为 KCl 溶液, 浓度为 2 mg/L, 试验设计为半无限土柱。试验完毕, 分层取土壤样品, 测定土壤含水率和 Cl^{-1} 离子含量。供试土壤含水量用烘干法测定, 土壤 Cl^{-1} 离子含量用 5 : 1 水土比浸提土壤, $AgNO_3$ 滴定法测定。

3 结果与分析

依据试验研究方法, 分别进行了红色黏土和黄色黏土 2 组 4 次试验, 见表 1。

表 1 各次试验情况

Tab. 1 The experiment conditions

供试土壤	红色黏土		黄色黏土	
	1	2	3	4
试验次序				
时间 t/min	720.45	670.73	3145.20	3120.45
湿润锋距离 x/cm	24	24	24	24
密度 $BD/(\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	1.22	1.22	1.29	1.29

图 1 和图 2 分别为红色黏土和黄色黏土用 KCl 溶液入渗时点绘的 $\theta \sim \lambda$ 和 $C \sim \lambda$ 关系曲线, 图 3 是 2 种土壤湿润锋距离 x 与时间平方根 $t^{1/2}$ 关系曲线, 可见 x 与 $t^{1/2}$ 具有良好线性关系^[2,3]。

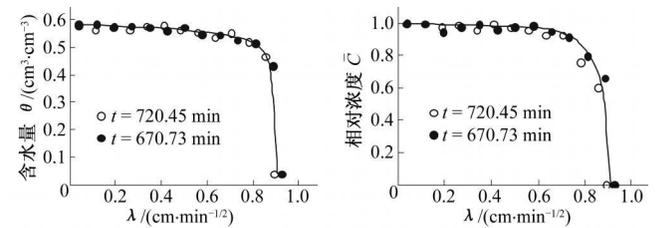


图 1 红色黏土 $\theta \sim \lambda, C \sim \lambda$ 关系曲线

Fig. 1 The curves of $\theta \sim \lambda, C \sim \lambda$ of red clay soil

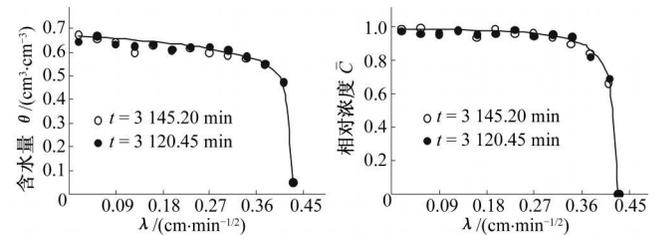


图 2 黄色黏土 $\theta \sim \lambda, C \sim \lambda$ 关系曲线

Fig. 2 The curves of $\theta \sim \lambda, C \sim \lambda$ of yellow clay soil

根据实测土壤含水率 θ 和 Cl^{-1} 离子浓度分布及 $\theta \sim \lambda$ 和 $C \sim \lambda$ 关系曲线, 用式(9)和式(14)可分别计算出 2 种土壤水扩散率 $D(\theta)$ 和非吸附性溶质 Cl^{-1} 离子的水动力弥散系数 $D_{sh}(\theta)$, 其结果如表 2 和表 3 所示, 用回归方程可概化为经验公式如表 4 所示, 概化曲线如图 4 所示。

由表 4 可见, 2 种土壤水扩散率 $D(\theta)$ 和非吸附性溶质 Cl^{-1} 的水动力弥散系数 $D_{sh}(\theta)$ 与土壤含水率 θ 成显著幂函数关系^[2,3], 在试验含水量范围内, 红色黏土的 $D(\theta)$ 和 $D_{sh}(\theta) >$ 黄

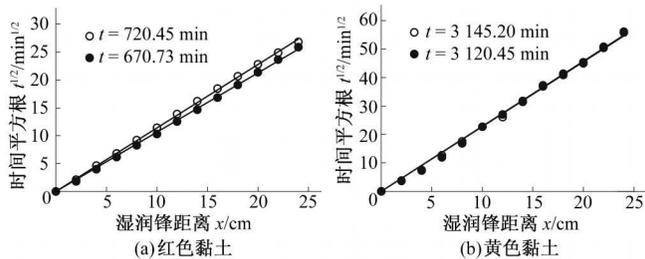


图3 $x \sim t^{1/2}$ 关系曲线

Fig. 3 The curves of $x \sim t^{1/2}$

表2 红色黏土 $D(\theta)$ 值和 $D_{sh}(\theta)$ 值试验结果

Tab. 2 The test value of $D(\theta)$ and $D_{sh}(\theta)$ of red clay soil

序号	土壤含水量 $\theta/$ ($\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$)	土壤水扩散率 $D/$ ($\text{cm}^2 \cdot \text{min}^{-1}$)	土壤水动力弥散系数 $D_{sh}/$ ($\text{cm}^2 \cdot \text{min}^{-1}$)
1	0.517 2	0.474 7	0.701 3
2	0.538 8	1.187 2	1.681 0
3	0.549 1	1.855 9	5.277 4
4	0.557 2	2.142 1	10.602 3
5	0.565 1	3.177 2	18.483 1
6	0.569 2	4.654 9	28.794 0
7	0.572 6	5.326 3	36.160 3
8	0.575 7	5.764 1	44.324 1
9	0.578 6	6.342 1	60.444 1
10	0.581 2	7.568 2	80.429 9
11	0.583 3	8.474 5	89.837 5

表3 黄色黏土 $D(\theta)$ 值和 $D_{sh}(\theta)$ 值试验结果

Tab. 3 The test value of $D(\theta)$ and $D_{sh}(\theta)$ of yellow clay soil

序号	土壤含水量 $\theta/$ ($\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$)	土壤水扩散率 $D/$ ($\text{cm}^2 \cdot \text{min}^{-1}$)	土壤水动力弥散系数 $D_{sh}/$ ($\text{cm}^2 \cdot \text{min}^{-1}$)
1	0.550 0	0.080 7	0.195 6
2	0.580 2	0.158 4	0.419 3
3	0.600 8	0.221 2	0.840 8
4	0.616 9	0.312 1	1.438 6
5	0.627 8	0.402 1	2.077 4
6	0.637 5	0.470 2	3.154 7
7	0.645 7	0.551 1	4.898 0
8	0.652 7	0.639 9	7.054 0
9	0.658 9	0.713 6	9.032 4
10	0.664 6	0.762 4	10.125 6
11	0.670 0	0.784 6	10.360 2

表4 2种土壤 $D(\theta)$ 和 $D_{sh}(\theta)$ 的经验公式

Tab. 4 The fitting equation of $D(\theta)$ and $D_{sh}(\theta)$ for the two soils

土壤类型	经验公式	相关系数	显著水平
红色黏土	$D = 3 \times 10^6 \theta^{23.932}$	0.994 7	0.01
	$D_{sh} = 8 \times 10^{11} \theta^{42.748}$	0.991 0	0.01
黄色黏土	$D = 96.217 \theta^{11.832}$	0.998 9	0.01
	$D_{sh} = 64.494 \theta^{21.757}$	0.991 4	0.01

色黏土的 $D(\theta)$ 和 $D_{sh}(\theta)$; 对同一土壤而言, 在相同含水量条件下, 水力弥散系数 $D_{sh}(\theta) >$ 土壤水扩散率 $D(\theta)$ 。

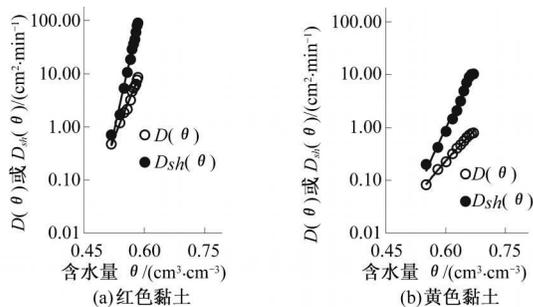


图4 $D(\theta)$ 、 $D_{sh}(\theta)$ 与 θ 关系曲线

Fig. 4 The curves of $D(\theta) \sim \theta$ and $D_{sh}(\theta) \sim \theta$

4 结 语

普吉铜渣场未设置专门拦挡坝和防渗设施, 渣场地下水环境评价成为闭库研究的重要研究课题, 因此普吉渣场下部和周围的非饱和红色黏土和黄色黏土的水动力弥散特征成为重要研究内容。到目前为止, 该地区土水动力弥散特征研究还未见报道。本文采用水平土柱法测定非饱和土壤非吸附性溶质的综合扩散弥散系数 $D_{sh}(\theta)$, 包括分子扩散和机械弥散的综合。从测定结果看, 基本反映了2种不同土壤这一溶质运移参数的变化特征, 这种特征与土壤水分的运动有很大的密切关系, 即在非饱和土壤水分过程中, 入渗的快慢直接影响溶质的运移状况。对该2种土壤, 非吸附性溶质 Cl^{-1} 的水动力弥散系数 $D_{sh}(\theta)$ 与土壤含水率 θ 成幂函数关系, 在同一含水量条件下红色黏土渣溶质运移的速率要大于黄色黏土。本文实验结果所表现出来的一般规律和文献[2-3]实验结果比较一致, 表明了本文实测过程是正确可行的。

参考文献:

- [1] 史海滨. 饱和-非饱和流溶质运移的实验及数值模拟研究[J]. 内蒙古农牧学院学报, 1991, (4): 8-15.
- [2] 杨金忠, 叶自桐, 贾维钊. 壤土水动力弥散系数的测定试验研究[J]. 西北水资源与水工程, 1995, 6(2): 34-39.
- [3] 张富仓, 康绍忠, 潘英华. 饱和-非饱和土壤中吸附性溶质水动力弥散实验研究[J]. 水利学报, 2002, (3): 84-90.
- [4] 孙志高, 刘景双. 三江平原典型草甸小叶章湿地土壤水分扩散率研究[J]. 干旱区资源与环境, 2008, 22(2): 152-156.
- [5] 杨金忠, 叶自桐, 贾维钊. 野外非饱和土壤中溶质运移的试验研究[J]. 水科学进展, 1993, (4): 245-252.
- [6] 西北农林科技大学. 普吉铜渣场土介质弥散试验研究报告[R]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2010.
- [7] 中国有色金属工业昆明勘察设计院. 云铜股份弃渣场地质环境恢复治理研究[R]. 昆明: 中国有色金属工业昆明勘察设计院, 2011.
- [8] 中国科学院武汉岩土力学研究所. 普吉铜渣场土介质实验与地下水环境数值模拟研究报告[R]. 武汉: 中国科学院武汉岩土力学研究所, 2011.