

DOI: 10.11779/CJGE202109022

# 非饱和土中氯离子扩散规律的试验研究

季永新<sup>1</sup>, 张文杰<sup>2\*</sup>

(1. 中国建筑第四工程局有限公司工程技术研究院(技术中心), 广东 广州 510665; 2. 上海大学力学与工程科学学院, 上海 200072)

**摘要:** 土中污染物迁移涉及对流和扩散, 低流速情况下扩散起主导作用, 当前对非饱和土中渗流的研究较为成熟, 但对非饱和土中污染物扩散规律的认识还不够深入, 其中饱和度控制是非饱和扩散系数测试的技术瓶颈。自制非饱和对流-扩散试验装置, 控制入渗过程中土的含水率恒定, 以氯离子为示踪剂进行对流-扩散土柱试验, 通过切片法测得氯离子浓度剖面, 使用非饱和对流-扩散解析解拟合得到氯离子水动力弥散系数, 进而求得非饱和有效扩散系数, 通过不同含水率下的试验得出有效扩散系数随含水率的变化规律; 依据3层土渗流模型计算得到非饱和渗透系数随含水率的变化规律。试验结果表明, 试验过程中渗透吸力对含水率的影响可以忽略, 本文试验装置含水率控制精确可靠, 测得0~100 kPa基质吸力下土中氯离子的有效扩散系数在 $1.59 \times 10^{-6}$ ~ $5.22 \times 10^{-6}$  cm<sup>2</sup>/s之间, 氯离子的非饱和有效扩散系数随无量纲含水率的减小而线性减小; 溶质迁移的弥散度随含水率减小而增大; 对数的非饱和渗透系数随含水率线性减小。

**关键词:** 非饱和土; 污染物迁移; 有效扩散系数; 对流-扩散试验

中图分类号: TU431 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2021)09-1755-06

**作者简介:** 季永新(1981—), 男, 内蒙古赤峰人, 学士, 高级工程师, 从事岩土工程测试与污染土修复方面的技术研发与生产工作。E-mail: jiyongxin1981@126.com。

## Experimental study on diffusion of chloride ions in unsaturated soils

JI Yong-xin<sup>1</sup>, ZHANG Wen-jie<sup>2</sup>

(1. Engineering Technology Research Institute (Technology Center) of China Construction Fourth Engineering Division Co., Ltd.,  
Guangzhou 510665, China; 2. School of Mechanics and Engineering Science, Shanghai University, Shanghai 200072, China)

**Abstract:** Advection and diffusion are the mechanisms involved in contaminant transport in soils. The diffusion will be the dominant process when seepage velocity is low. At present the unsaturated hydraulic conductivity has been studied intensively, however, the study on diffusion mechanism in unsaturated soils is limited. Controlling of water content in unsaturated soils is a technical bottleneck that restricts the study. Here, an advection-diffusion column test apparatus is developed for the precise control of water content during the tests. Chloride ion is selected as the tracer in the column tests and the slice method is used to get the concentration distributions in the soil column. The results are fitted by an advection-diffusion analytical solution to determine the hydraulic dynamic dispersion coefficient. The effective diffusion coefficient is then calculated, and the relationship between water content and effective diffusion coefficient is examined. The unsaturated hydraulic conductivity is obtained by considering seepage in the three-layered soils. The results show that the influences of the osmotic suction on the water content are insignificant and that the control of water content in the test is reliable. The effective diffusion coefficients corresponding to matric suctions of 0 to 100 kPa range from  $1.59 \times 10^{-6}$  to  $5.22 \times 10^{-6}$  cm<sup>2</sup>/s. The effective diffusion coefficient decreases linearly with the decreasing dimensionless water content. The dispersivity increases with the decreasing water content. The logarithmic unsaturated hydraulic conductivity decreases linearly with the decreasing dimensionless water content.

**Key words:** unsaturated soil; contaminant transport; effective diffusion coefficient; advection-diffusion test

## 0 引言

由于降雨和蒸发交替作用, 自然界的地表土普遍为非饱和土。地表污染物污染地下水的过程, 实际上是污染物在非饱和土中向下迁移的过程, 研究非饱和土中的污染物迁移规律, 对于土和地下水污染防治具

有积极的现实意义。当前对饱和土中污染物迁移的研究较多, 而对非饱和土的相关研究还不够深入, 试验

基金项目: 国家自然科学基金项目(41772300); 中建四局科技项目(CSCEC4B-2020-KT-06)

收稿日期: 2020-12-08

\*通信作者(E-mail: zhwjyl@163.com)

研究非饱和土中污染物迁移机理具有重要科学意义。

当前国内外学者对非饱和土中污染物迁移开展了一些试验研究。Sharma 等<sup>[1]</sup>研究了杀菌剂在非饱和土中的吸附及迁移情况; Stanislaw<sup>[2]</sup>研究了非饱和土中溶质迁移的水动力弥散问题, 研究了碘在非饱和土中的迁移、衰减及吸附规律; 杨金忠等<sup>[3]</sup>用氯化钠作为示踪剂研究非饱和土中污染物运移, 得到土中污染物浓度剖面的空间变异性; 王超等<sup>[4]</sup>等进行惰性污染物在非饱和土中迁移的土柱试验, 建立了描述污染物迁移的可动水和不可动水数学模型; 李旭<sup>[5]</sup>进行土柱试验研究了不同降雨量条件下非饱和黏土中重金属镉、锌的运移; 周念清等<sup>[6]</sup>通过 CT 扫描技术研究了污染物在非饱和砂土中的运移规律; Cooke<sup>[7]</sup>、Knight 等<sup>[8]</sup>、张建红等<sup>[9]</sup>采用土工离心机进行了溶质在非饱和土中迁移的离心模型试验, 验证了离心模拟污染物迁移的可行性, 并得出非饱和土中污染物迁移的一些定性规律。上述试验研究多针对影响污染物迁移的对流或弥散作用, 实际上, 机械弥散对污染物迁移的作用随流速降低而减小, 如 Rowe<sup>[10]</sup>指出, 当达西流速小于  $3 \times 10^{-7}$  cm/s 时, 分子扩散就开始占主导; 而非饱和土中流速往往较低, 通常也属于扩散作用占主导的情况<sup>[11]</sup>。另外, 由于非饱和土含水率控制的技术瓶颈, 上述研究多采用含水率变化的瞬态试验方法, 多为定性研究, 目前针对非饱和土中扩散系数随含水率变化的试验研究尚不多见。

本文设计了能够控制非饱和土样含水率在对流-扩散试验过程中保持不变的试验装置, 进行了不同含水率土样的土柱试验, 通过解析解拟合浓度分布剖面, 求得水动力弥散系数和有效扩散系数, 研究了有效扩散系数随含水率的变化规律。

## 1 试验装置

自制非饱和对流-扩散试验装置(发明专利: ZL201510224714.5)如图 1 所示, 装置(自下而上)由土样桶、溶液桶和变形控制装置 3 部分组成。土样桶内径 9 cm, 底部和顶部各有一块多孔陶土板 (Soilmoisture Ltd., 2Bar, 厚度 1 cm, 饱和渗透系数  $1.73 \times 10^{-7}$  cm/s), 中间放置直径 7 cm, 高度 5 cm 的圆柱形土样, 土样外包裹多孔橡皮膜(孔径 5 mm, 孔距 5 mm), 陶土板与桶壁间设密封圈, 通过土样桶壁上的进气孔施加指定气压, 通过土样与桶壁间 1 cm 的间隙和多孔橡皮膜, 气压可均匀施加于土样, 类似于压力板仪测试土-水特征曲线(SWCC)时控制含水率的原理, 通过气压也即基质吸力, 可以控制土样含水率。

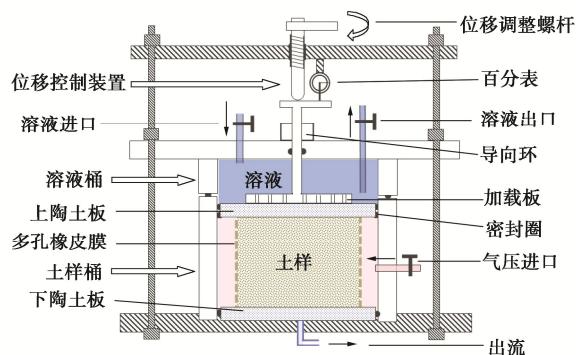


图 1 试验装置示意图

Fig. 1 Sketch diagram of test apparatus

上陶土板在对流-扩散试验过程中的工作原理如图 2 所示, 在用目标溶液饱和上陶土板后, 陶土板中所有微孔隙充满溶液, 其中部分微孔隙与空气接触(包括土样和桶间隙处以及与已排水大孔隙接触的微孔隙), 试验中控制土样桶内气压大于上部溶液桶水头压力, 则这些微孔隙水气界面处的弯液面将阻止孔隙内的溶液向下流动, 同时阻止土样桶内气体通过, 从而起到密闭作用; 另一部分微孔隙直接与土样中充水小孔隙接触, 微孔隙中没有水气界面, 溶液桶中溶液可通过这些孔隙向下流动, 逐渐驱替土样原孔隙中的去离子水, 即实现溶质的对流-扩散, 在这一过程中, 气压保持不变, 则土样含水率不变(与浓度差相关的渗透吸力的影响, 将在后面讨论)。

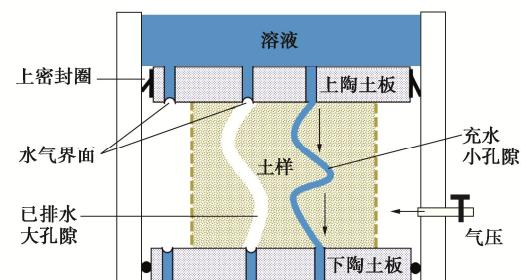


图 2 非饱和渗透控制原理

Fig. 2 Principle of unsaturated flow

在土样由饱和到非饱和的过程中, 基质吸力增大将导致一定量体缩, 土样将与上陶土板脱离, 此时, 上陶土板所有微孔隙中都将产生弯液面, 阻止溶液下渗到土样中, 因此, 本装置通过位移控制将上陶土板下移, 保持土样与陶土板密切接触。控制的位移量由事先进行的 SWCC 试验中每级气压对应的土样高度改变量确定, 并稍加保守控制。为保证陶土板移动过程中的密封性, 上陶土板采用倒“V”型密封圈(图 2), 一侧用胶粘于陶土板侧壁, 一侧靠弹性与桶壁贴紧, 当土样桶施加气压后, 贴合更加紧密。某一级气压下的具体试验操作步骤如下: ①用去离子水饱和土样和

下陶土板, 用目标溶液饱和上陶土板, 将土样放置在下陶土板中央位置, 按图 1 组装装置。②向土样桶施加指定气压, 平衡后土样达到目标含水率, 平衡标准参照压力板仪试验, 此时土样干缩已完成。③根据事先标定的该气压对应的干缩量, 控制上陶土板向下位移。④向溶液桶注入溶液, 通过马氏瓶保持水头恒定(本文各试验中均为 50 cm), 通过蠕动泵外接溶液瓶实现进口和出口溶液循环(1 mL/h), 保持浓度恒定, 开始对流-扩散试验, 从底部定时收集出流溶液测浓度。⑤当底部溶质出流达到源浓度 10%~20% 时, 终止试验, 撤掉气压, 将土样取出切片, 测孔隙溶液浓度, 得到沿土样深度的溶质浓度分布。

## 2 对流-扩散试验

### 2.1 饱和土样制备

试验最初选择使用天然的砂质壤土, 大于 0.075 mm 颗粒含量为 75%, 试验过程中遇到的问题包括: 由于大颗粒含量较多, 其 SWCC 和渗透系数曲线较陡, 在较高的气压下出水特别缓慢, 给出流浓度测量造成困难, 因此只能选择 5, 10 和 20 kPa 的气压; 土样的渗透系数明显大于陶土板渗透系数, 使得最终计算的非饱和渗透系数误差较大; 并且含水率降低时土样明显发生干缩变形。后来改用粉土, 取自钱塘江边, 含有 15% 砂粒、80% 粉粒、5% 黏粒, 因其中黏粒含量不多, 失水时体缩较小; 为了增加其持水能力以使 SWCC 更平缓, 掺入了 3% 的钙基膨润土, 膨润土中蒙脱石含量 71.4%, 液限 332%、塑限 25%。这两种土曾被用于土-膨润土防渗墙的试验研究, 具体性质指标可参见文献[12]。

首先将膨润土混入去离子水中, 搅拌制成 5% 的膨润土泥浆, 将泥浆与粉土混合搅拌, 得到膨润土含量为 3% 的混合土。将混合土放入内径 7 cm 的模具中, 在 10 kPa 压力下固结制样, 同时从试样底部进水饱和, 维持 80 cm 水头, 固结和饱和过程持续 120 h, 得到的试样高度为 5 cm、干密度 1.41 g/cm<sup>3</sup>、孔隙率 0.477、液限 34%、塑限 22.5%。

### 2.2 压力板仪试验

使用压力板仪(Model 1250, Soilmoisture Ltd.) 测得上述土样的 SWCC, 为后面对流-扩散试验中含水率和位移控制提供基本参数。图 3 中 SWCC 上的含水率为按试样实测高度计算的含水率, 即已经考虑了体缩的影响。

SWCC 试验时使用无气水(由去离子水制备), 后续对流-扩散试验中使用氯化钠溶液, 关于渗透吸力

的影响讨论如下: 渗透吸力主要与土粒外围双电层有关, 而基质吸力主要与水气界面有关, 盐浓度对渗透吸力影响很大, 但对基质吸力(或含水率)的影响因土而异, Miller 等<sup>[13]</sup>的研究表明, 离子浓度对低塑性粉质黏土基质吸力的影响不大, 孙德安等<sup>[14]</sup>也发现氯盐含量对粉土 SWCC 的影响不大。本文试验混合土样中粉土含量为 97%, 混合土塑性指数小于 17, 与上述研究的土类接近。且试验结束后将试样烘干测得的含水率(表 1), 与图 3 相应气压下(试验拟控制的)的含水率完全一致, 因此试样含水率基本没有受到溶液浓度的影响, 对流-扩散试验中使用气压控制含水率是精准的。

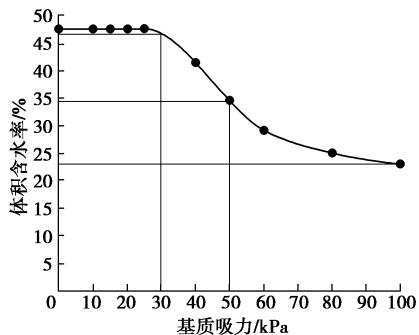


图 3 土样的土水特征曲线

Fig. 3 SWCC of soil sample

按 SWCC 选择后续对流-扩散试验的控制气压(即土样中基质吸力), 考虑两方面, 一是不同基质吸力对应的含水率要明显不同, 这样测得的非饱和渗透、扩散参数才会明显不同; 二是试样含水率不能太低, 否则出流溶液浓度测量难度较大。综合考虑, 取试验气压为 0, 30, 50 和 100 kPa, 对应含水率分别为 47.70%, 46.05%, 34.69% 和 23.21%, 对应上陶土板需调整位移量为 0, 0.1, 0.3 和 0.5 cm。

### 2.3 对流-扩散试验

目标溶质选用惰性离子氯离子, 在土中基本不发生吸附, 故溶质迁移过程中仅有对流和扩散起作用, 试验使用浓度为 0.1 mol/L 的氯化钠溶液。先按溶液池法<sup>[15]</sup>测得饱和土样中氯离子的有效扩散系数为  $D^* = 5.22 \times 10^{-6} \text{ cm}^2/\text{s}$ , 结合氯离子的水相自由扩散系数  $D_0 = 20.3 \times 10^{-6} \text{ cm}^2/\text{s}$ , 可知弯曲因子  $\tau = D^*/D_0 = 0.26$ 。

溶质对流-扩散迁移过程中, 机械弥散和分子扩散同时发生, 这两个作用合起来被称为水动力弥散:

$$D = D^* + \alpha v \quad , \quad (1)$$

式中,  $D$  为水动力弥散系数,  $\alpha$  为弥散度,  $v$  为孔隙水流速。通过土柱试验测定水动力弥散系数时, 可采用切片法或累积浓度法<sup>[15]</sup>, 若采用累积浓度法, 就需要计入下陶土板对溶质的迁移的影响, 所以这里采用切

片法, 只需分析土样孔隙中的溶质浓度。为获得理想的浓度剖面, 当出流浓度达到源浓度 10%~20%时, 终止入渗试验, 取出土样切片。

将切片烘干, 烘干前后的质量差记为  $\Delta m$ , 烘干后的切片碾碎, 放入 150 mL 去离子水中制成悬浊液, 震荡 24 h, 然后在 3500 rpm/s 转速下离心 30 min, 取上清液测得浓度  $C_{\text{sup}}$ , 则可得到土中孔隙水浓度  $C$ :

$$C = C_{\text{sup}} \frac{\rho_w V_{\text{dl}}}{\Delta m} , \quad (2)$$

式中,  $\rho_w$  为试验温度下水的密度,  $V_{\text{dl}}$  为制备悬浊液的去离子水体积。

气压 0, 30, 50 和 100 kPa 下试验分别进行 3, 3.6, 13.5 和 25 d, 得到的浓度剖面如图 4 所示。

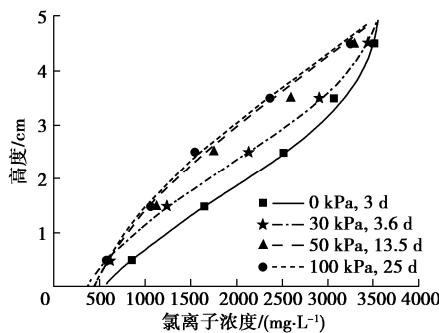


图 4 土样中氯离子浓度实测值及拟合

Fig. 4 Pore-water concentration of chloride ion and fitting curves

### 3 结果拟合与分析

使用一维对流-弥散方程解析解拟合试验结果, 求水动力弥散系数  $D$ 。本文试验中, 控制含水率不变, 因此污染物在非饱和土中运移的控制方程与饱和土中的方程具有相同形式, 仅需将孔隙率  $n$  改写为体积含水率  $\theta$ , 方程如下:

$$\frac{\partial C(x,t)}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C(x,t)}{\partial x^2} - \frac{V}{\theta} \frac{\partial C(x,t)}{\partial x} , \quad (3)$$

式中,  $x$  为坐标,  $t$  为时间,  $V$  为实测出流量对应的达西流速,  $\theta$  为试样体积含水率。试验开始时土样孔隙中为去离子水, 氯化钠浓度为 0, 初始条件:

$$C(x,0) = 0, t = 0 , \quad (4)$$

试验时上陶土板用盐溶液饱和, 溶液桶中浓度恒定, 可认为土样上表面入渗浓度不变:

$$vC(0,t) - D \frac{\partial C(0,t)}{\partial x} = vC_0, x = 0 . \quad (5)$$

对于底部定期收集溶液的土柱试验, 常使用半无限边界<sup>[15]</sup>:

$$\frac{\partial C(\infty,t)}{\partial x} = 0 , \quad (6)$$

拟合时流速  $v$  已知, 且使用的是土柱高度范围内的浓

度值, 因此虽然式 (6) 定义无限远处的边界, 但与土柱是有限长度并不矛盾<sup>[15-17]</sup>。

式 (3) ~ (6) 的解为<sup>[15]</sup>

$$C(x,t) = \frac{C_0}{2} [\text{erfc}(\xi_1) + 2 \sqrt{\frac{\xi_4}{\pi}} \exp(-\xi_1^2) - (1 + \xi_2 + \xi_4) \exp(\xi_2) \text{erfc}(\xi_3)] , \quad (7)$$

式中,  $\text{erfc}$  为残差函数,  $\xi_1$ ,  $\xi_2$ ,  $\xi_3$  和  $\xi_4$  为无量纲的简写参数, 具体可参文献[15]。

各级气压下的试验和拟合参数列入表 1, 表中含水率是试验后烘干法实测, 流速按实际出流量计算。表中拟合  $D$  值时的确定系数  $R^2$  均接近 1, 说明试验数据离散性较小, 拟合精确。对于气压 0 kPa (即饱和) 的情况, 因为已通过溶液池法测得了有效扩散系数, 根据式 (1) 可计算得到  $\alpha = 0.04 \text{ cm}$ , 对于非饱和的情形,  $D^*$  和  $\alpha$  均未知, 试算步骤如下:

实验室土柱试验的弥散度  $\alpha$  的范围一般在 0.01~1 cm<sup>[18]</sup>, 对于气压 50 和 100 kPa, 取此界限值依据前面拟合出的  $D$  计算  $D^*$ , 对于气压 30 kPa 的情形,  $\alpha = 1 \text{ cm}$  会导致  $D^*$  值为负, 考虑到此时含水率 (45.95%) 与饱和状态 (47.73%) 接近, 因此  $\alpha$  应与饱和时的 0.04 cm 接近, 故取其范围为 0.01~0.1 cm 计算。定义无量纲含水率  $\Theta = (\theta - \theta_r)/(\theta_s - \theta_r)$ , 其中  $\theta_r$  和  $\theta_s$  分别为残余和饱和体积含水率, 得到  $D^*$  与  $\Theta$  的关系如图 5 所示, 可见在试验的气压范围内,  $D^*$  与  $\Theta$  之间基本呈线性关系。因此, 下面按拟合得到的线性关系计算  $D^*$  和  $\alpha$ , 30, 50 和 100 kPa 下  $D^*$  分别为  $4.99 \times 10^{-6}$ ,  $3.11 \times 10^{-6}$  和  $1.59 \times 10^{-6} \text{ cm}^2/\text{s}$ ,  $\alpha$  分别为 0.04, 0.29 和 0.59 cm,  $\alpha$  值都在前述假定范围之内, 随含水率降低而增大, 这是因为  $\alpha$  值与特征流程长度有关<sup>[19]</sup>, 随饱和度降低, 流动绕曲度增加, 特征流程长度增加。

试验过程中, 两块陶土板也参与了溶质迁移, 使用解析解拟合求  $D$  的过程中, 使用了土样内的浓度分布, 而不是下陶土板底部的出流浓度, 避免了下陶土板的干扰, 而上陶土板预先使用目标溶液饱和, 其影响也很大程度减小。然而, 在计算土样非饱和渗透系数时, 因为实测的是下陶土板底部的出流量, 所以必须考虑陶土板对渗流的影响, 这里将陶土板也视为土层, 采用 3 层土中渗流模型计算土样非饱和渗透系数:

$$\bar{k} = H / \left( \frac{2H_c}{k_{\theta_c}} + \frac{H_s}{k_{\theta_s}} \right) , \quad (8)$$

式中,  $\bar{k}$  为 3 层土的平均渗透系数, 按实际出流量计算,  $H$  为 3 层土总厚度,  $H_c$  为单块陶土板厚度,  $H_s$  为土样高度,  $k_{\theta_s}$  为土样非饱和渗透系数,  $k_{\theta_c}$  为陶土板非饱和渗透系数, 可根据陶土板饱和渗透系数计算如

表1 对流-扩散试验数据及拟合  
Table 1 Parameters of advection-diffusion tests

气压 /kPa	$t$ /d	$\theta$ /%	$v$ ( $\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$ )	$\alpha$ /cm	$D$ ( $\text{cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ )	$R^2$	$D^*$ ( $\text{cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ )	$\tau$
0	3	47.73	$1.13 \times 10^{-5}$	0.04	$5.71 \times 10^{-6}$	0.998	$5.22 \times 10^{-6}$	0.26
30	3.6	45.95	$7.41 \times 10^{-6}$	0.04	$5.26 \times 10^{-6}$	0.999	$4.99 \times 10^{-6}$	0.25
50	13.5	33.32	$5.74 \times 10^{-7}$	0.29	$3.28 \times 10^{-6}$	0.998	$3.11 \times 10^{-6}$	0.15
100	25	22.82	$1.70 \times 10^{-7}$	0.59	$1.69 \times 10^{-6}$	0.998	$1.59 \times 10^{-6}$	0.08

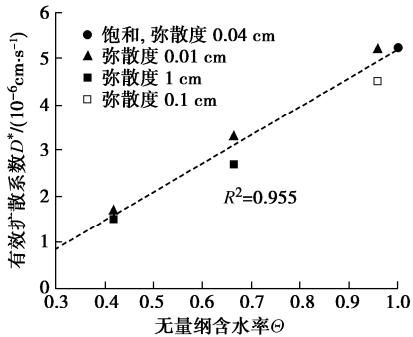


图5 土样无量纲体积含水率与有效扩散系数的关系

Fig. 5 Relationship between  $\Theta$  and  $D^*$

下：试验中陶土板处于非饱和状态时，只有与土样充水孔隙接触的陶土板微孔隙透水，陶土板中微孔隙分布是均匀的，假定土中孔隙分布也均匀，那么陶土板与土样接触面上充水孔隙比例与土样中一致，即等于土样体积含水率， $k_{\theta c}$  可近似为

$$k_{\theta c} = \frac{\theta}{n} k_c \quad , \quad (9)$$

式中， $n$  为土样孔隙率， $\theta/n$  为透水微孔隙比例， $k_c$  为陶土板饱和渗透系数。根据式(8)可计算得到  $k_{\theta s}$ ，将相对渗透系数  $k_{\theta s}/k_s$  与无量纲含水率  $\Theta$  的关系示于图6。可见在本文试验范围内 ( $\Theta=0.417 \sim 1$ )，对数的渗透系数与  $\Theta$  近似呈线性关系。

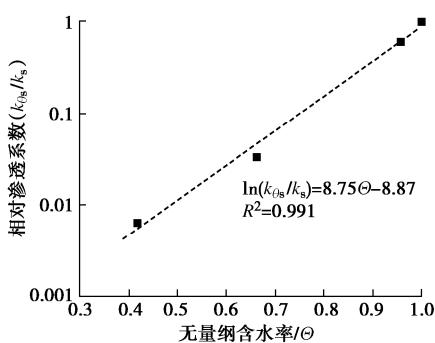


图6 相对渗透系数与无量纲含水率的关系

Fig. 6 Relationship between relative unsaturated hydraulic conductivity and  $\Theta$

扩散系数、渗透系数和弥散度都是污染物迁移模拟分析中的基本参数，饱和土中上述参数尚且容易测定，而相应非饱和参数的测试费时费力，上述线性关

系为基于饱和参数预测非饱和参数提供了依据，为涉及非饱和土中污染物迁移模拟时的参数选取提供了便利。本文试验方法也可为非饱和土中其它污染物迁移参数测试提供借鉴。因采用的试验装置所限，本文无法在很低的含水率下进行试验，而 Hu 等<sup>[11]</sup>指出，在低含水率下，土中水以薄膜水形式存在，此时溶质扩散变得极其缓慢，有效扩散系数与含水率之间将不再是线性关系；同样，对数的非饱和渗透系数与含水率也将偏离线性关系。因此在运用相关线性规律时尚需注意土的含水率范围。

## 4 结论

本文自制试验装置，以氯离子为示踪剂，旨在研究非饱和土中的溶质扩散规律，主要结论如下：

(1) 自制的非饱和对流-扩散试验装置通过两块陶土板间的气压控制土样含水率，通过变形控制装置补偿干缩变形保证对流和扩散连续，试验过程中渗透吸力的影响可以忽略不计，含水率控制精确可靠。

(2) 根据切片法测得土中氯离子浓度剖面，使用解析解拟合得到水动力弥散系数，进一步分析得到有效扩散系数，基质吸力由 0 增至 100 kPa，土中氯离子有效扩散系数由  $5.22 \times 10^{-6}$  降至  $1.59 \times 10^{-6} \text{ cm}^2/\text{s}$ ，随无量纲含水率线性减小。

(3) 溶质迁移的弥散度随含水率降低而增大，本文试验范围内，对数的非饱和渗透系数随含水率线性减小。

## 参考文献：

- [1] SHARMA D, AWASTHI M D. Adsorption and movement of metalaxyl in soils under unsaturated flow conditions[J]. Plant and Soil, 1997, **195**(2): 293 – 298.
- [2] STANISLAW M. Numerical and experimental study of solute transport in unsaturated soil[J]. Journal of Contaminant Hydrology, 1993, **14**: 193 – 206.
- [3] 杨金忠, 叶自桐, 贾维钊, 等. 野外非饱和土壤中溶质迁移的试验研究[J]. 水科学进展, 1993, **4**(4): 245 – 252. (YANG Jin-zhong, YE Zi-tong, JIA Wei-zhao, et al. Field experiment on solute transport in an unsaturated soil[J]. Advances in Water Science, 1993, **4**(4): 245 – 252. (in Chinese))

- [4] 王超, 阮晓红, 朱亮. 污染物在非饱和土壤中迁移规律的试验研究[J]. 河海大学学报, 1996, 24(2): 7 - 13. (WANG Chao, RUAN Xiao-hong, ZHU Liang. Experimental study of contaminant transport in unsaturated soils[J]. Journal of Hohai University, 1996, 24(2): 7 - 13. (in Chinese))
- [5] 李旭. 南昌地区镉、锌离子在非饱和土中迁移规律研究[D]. 南昌: 华东交通大学, 2009. (LI XU. Study on Migration of Cadmium and Zinc Ions in the Unsaturated Soils in Nanchang Area[D]. Nanchang: East China Jiaotong University, 2009. (in Chinese))
- [6] 周念清, 宋玮, 大谷顺, 等. 应用 CT 扫描研究非饱和砂土中污染物的迁移规律[J]. 水文地质工程地质, 2010, 37(6): 97 - 106. (ZHOU Nian-qing, SONG Wei, JUN O, et al. A study of the pollutant migration in unsaturated sand by CT scanning[J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 2010, 37(6): 97 - 106. (in Chinese))
- [7] COOKE A B. Centrifuge Modeling of Flow and Contaminant Transport Through Partially Saturated Soils[D]. Kingston: Dept of Civil Engineering, Queen's University, 1991.
- [8] KNIGHT M A, MITCHELL R J. Modeling of light non-aqueous phase liquid release into unsaturated sand[J]. Journal of Contaminant Hydrology, 1995(20): 1 - 25.
- [9] 张建红, 劳敏慈, 胡黎明, 等. 非饱和土中水分迁移及污染物扩散的离心模拟[J]. 岩土工程学报, 2002, 24(5): 622 - 625. (ZHANG Jian-hong, LO M-C I, HU Li-ming, et al. Centrifuge modeling of moisture and contaminant migration in unsaturated soils[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2002, 24(5): 622 - 625. (in Chinese))
- [10] ROWE R K. Pollution Transport Through Barriers[M]// WOODS R D, ed. Geotechnical Practice for Waste Disposal, American Society of Civil Engineering, Special Publication, 1987, 13: 159 - 181.
- [11] HU Q H, WANG J S Y. Aqueous-phase diffusion in unsaturated geologic media: a review[J]. Critical Reviews in Environmental Science and Technology, 2003, 33(3): 275 - 297.
- [12] 张文杰, 顾晨, 楼晓红. 低固结压力下土膨润土防渗墙填料渗透和扩散系数测试[J]. 岩土工程学报, 2017, 39(10): 1915 - 1921. (ZHANG Wen-jie, GU Chen, LOU Xiao-hong. Measurement of hydraulic conductivity and diffusion coefficient of soil-bentonite cutoff wall backfill under low consolidation pressure[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2017, 39(10): 1915 - 1921. (in Chinese))
- [13] MILLER D J, NELSON J D. Osmotic suction in unsaturated soil mechanics[C]// Proceedings of the Fourth International Conference on Unsaturated Soils, 2006, Arizona.
- [14] 孙德安, 张谨绎, 宋国森. 氯盐渍土土-水特征曲线的试验研究[J]. 岩土力学, 2013, 34(4): 955 - 960. (SUN De-an, ZHANG Jin-yi, SONG Guo-sen. Experimental study of soil-water characteristic curve of chlorine saline soil[J]. Chinese Journal of Rock and Soil Mechanics, 2013, 34(4): 955 - 960. (in Chinese))
- [15] SHACKELFORD C D. Laboratory diffusion testing for waste disposal: a review[J]. Journal of Contaminant Hydrology 1991, 7(3): 177 - 217.
- [16] VANGENUCHTEN M T, PARKER J C. Boundary conditions for displacement experiments through short laboratory soil columns[J]. Soil Science Society of America Journal, 1984, 48(4): 703 - 708.
- [17] 张文杰, 赵培, 贾文强. 一维对流-扩散试验各种边界条件及其统一形式解析解[J]. 岩土力学, 2015, 36(10): 2759 - 2764. (ZHANG Wen-jie, ZHAO Pei, JIA Wen-qiang. Boundary conditions of one-dimensional convection-diffusion column tests and unified analytical solution[J]. Rock and Soil Mechanism, 2015, 36(10): 2759 - 2764. (in Chinese))
- [18] FETTER C W. Contaminant Hydrogeology[M]. Long Grove: Waveland Press, Inc, 2008.
- [19] BEAR J. Dynamics of Fluids in Porous Media[M]. New York: American Elsevier Publishing Company, Inc, 1972.