

DOI:10.3969/j.issn.1003-5060.2025.08.021

大孔隙数量和孔径组合对土壤溶质运移影响研究

张瑞钢^{1,2}, 汤志恒¹, 还小翔¹, 夏冰³, 钱家忠⁴

(1. 合肥工业大学 土木与水利工程学院, 安徽 合肥 230009; 2. 蚌埠投资集团有限公司, 安徽 蚌埠 233499; 3. 安徽省生态环境科学研究院, 安徽 合肥 230071; 4. 合肥工业大学 资源与环境工程学院, 安徽 合肥 230009)

摘要:大量野外观测与试验表明,土壤因植物根系发育、蚯蚓活动等形成的不同密度、数量和孔径的大孔隙优势通道影响水分和溶质优势流运移特征。当前对大孔隙度影响的关注较多,而对相同大孔隙度条件下因数量和孔径组合不同带来的影响关注不足。文章通过相同大孔隙度的 3 组不同数量和孔径组合的土柱及对照均质土柱的溶质运移试验,探究其对土壤水分和溶质运移的影响,并利用 Hydrus 中的双重渗透模型探究其在数值模拟中的影响。结果表明:相同大孔隙度条件下细而多的大孔隙组合土柱出流速度更快,溶质平均停留时间更短,优势流程度更高;在双重渗透模型中大孔隙数量和孔径组合的改变由参数 a 体现,且细而多的大孔隙组合 a 取值更小; a 对溶质运移结果的影响表现为 a 值越小,溶质穿透更快、更集中,峰值质量浓度更高,但是初始穿透更晚。

关键词:优势流;大孔隙度;渗流试验;穿透曲线;双重渗透模型

中图分类号:TV139.16 **文献标志码:**A **文章编号:**1003-5060(2025)08-1146-07

Effect of macropore number and size combination on solute transport in soil

ZHANG Ruigang^{1,2}, TANG Zhiheng¹, HUAN Xiaoxiang¹, XIA Bing³, QIAN Jiazhong⁴

(1. School of Civil and Hydraulic Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China; 2. Bengbu Investment Group Co., Ltd., Bengbu 233499, China; 3. Anhui Provincial Academy of Eco-Environmental Science Research, Hefei 230071, China; 4. School of Resources and Environmental Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

Abstract: A large number of field observations and experiments have shown that the macropore preferential channels with different densities, numbers and sizes formed by plant root development and earthworm activities affect the transport characteristics of water and solute preferential flow. Currently, more attention has been paid to the effect of macroporosity, while less to the effect of different number and size combinations with the same macroporosity. In this paper, solute transport experiments of soil columns with three different macropore number and size combinations with the same macroporosity and one homogeneous soil column were conducted to explore the effects of the combinations on water and solute transport in soil. The dual permeability model in Hydrus was used to investigate their effects in numerical simulation. The results show that under the same macroporosity, the discharge rate of the soil column with fine and more macropore combination is faster, the average residence time of solute is shorter, and the degree of preferential flow is higher. In the dual permeability model, the change of the number and size combination of macropores is reflected by the parameter a , and the value of a is smaller for fine and more macropore combination. The effect of a on solute transport is that, with a smaller value of a , the breakthrough will be faster and more concentrate, and peak concentration value is higher, but initial penetration is later.

收稿日期:2023-05-11; **修回日期:**2023-05-27

基金项目:国家自然科学基金资助项目(41831289);安徽省自然科学基金资助项目(200805MD107)

作者简介:张瑞钢(1980—),男,山西朔州人,博士,合肥工业大学讲师,硕士生导师;

钱家忠(1968—),男,安徽凤阳人,博士,合肥工业大学教授,博士生导师,通信作者, E-mail: qjiazhong@gmail.com.

Key words: preferential flow; macroporosity; percolation experiment; breakthrough curve; dual permeability model

0 引 言

优势流又称优先流、非均匀流,其是由土壤异质性引起的一种常见的土壤水分运动形式^[1]。优势流种类众多,其中大孔隙流是最常见的一种。土壤大孔隙的存在可以造成土壤优先水流和溶质优先迁移,成为水分和化学物质快速、远距离运移的主要甚至可能是唯一的通道^[2-3]。影响大孔隙流的因素众多,主要包含影响大孔隙结构的孔径、数量^[4]、位置^[5]以及土壤质地、耕作方式等。

大量野外观测表明,不同土地利用类型土壤内优先通道因植物根系和蚯蚓活动等造成的大孔隙在密度、数量和孔径上均不同,例如蚯蚓在土壤内活动造成的大孔隙直径一般为 2~12 mm^[6],植物根系在地表以下延伸范围可达 18 m,直径大小一般为 0~4 mm^[7]。森林、农田和草地等在降雨、喷洒农药时受土壤大孔隙结构影响而出现不同污染物优势流运移过程。

相同大孔隙度可以由大孔隙数量、孔径等结构因素以不同的组合形成,例如仅包含垂直圆柱形大孔隙土体,就可以将大孔隙组合分为细而多和粗而少 2 种典型特征。大孔隙度作为关键参数在土壤优势流观测与试验中已有相关研究^[8],但在相同大孔隙度取值下,不同数量、孔径组合对优势流的影响规律与机理尚不清楚,特别在大孔隙优势流数值模型中,一般仅把大孔隙度作为一个整体的参数来取值,忽视了大孔隙结构因素对结果的影响。

因此本文采用人造大孔隙进行室内土柱渗流试验,探究相同大孔隙度条件下不同数量和孔径的组合对土壤水分和溶质运移的影响,并采用 Hydrus-1D 软件中双重渗透模型拟合试验结果,探究大孔隙数量和孔径组合的改变,对应在模型中参数的改变规律,以及这些参数的改变对溶质优势流运移过程的影响,以期对有大孔隙存在的土壤污染物运移研究提供借鉴。

1 材料与方 法

1.1 试验装置

试验装置示意图如图 1 所示,装置主要由长 29.4 cm、高 50 cm 和厚 1 cm 的亚克力板拼接而成。装置顶部设进水口,进水口通过连接马氏瓶

来控制水头边界条件。装置内部采用高 25 cm 颗粒级配良好的细石英砂填料,按 1.93 g/cm³ 的堆积密度分层装填,并在其中插入 25 cm 边壁开有微孔的 3D 打印大孔隙作为人造大孔隙材料^[9]。装置底部设有分水格栅、多孔底板和出流液收集装置。分水格栅由厚 3 mm、高 7 cm 的亚克力板拼接而成,格栅中按照 1.38 g/cm³ 堆积密度填充 7 cm 高的粗石英砂作为反滤层,设置分水格栅目的在于防止装置底部壅水引起大孔隙流和基质流混合的影响。每个分水格栅下面接有一个收集装置出水口,分水格栅与收集装置之间设置多孔底板目的在于分隔土柱与收集装置,防止底部反滤层落入收集装置分格中影响到土柱整体的稳定性。为减小试验过程中边壁流效应,用砂纸打磨整个装置边壁形成粗糙面并涂抹凡士林。为防止因顶部水流冲刷导致细石英砂流入大孔隙中造成大孔隙堵塞,在土柱顶部铺设 1 张 30 cm×30 cm 不锈钢丝网,然后在铁丝网表面装填 1 cm 高粗砂。

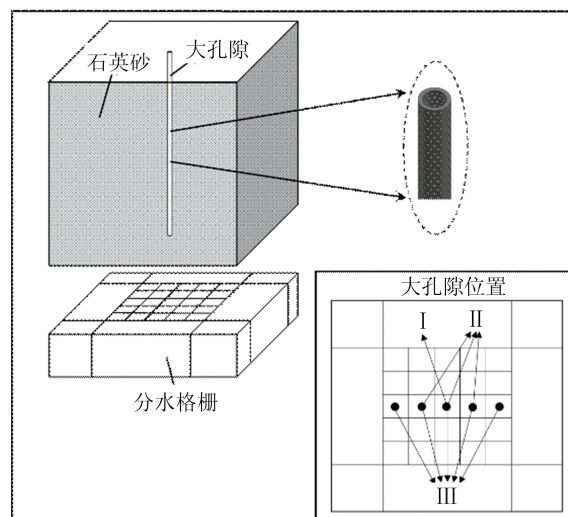


图 1 试验装置示意图

1.2 试验方案

本试验在土柱中埋入连通型大孔隙,大孔隙高度与土柱高度一致,因此有效面大孔隙度与有效大孔隙度(5.56%)相等,参考现实中各类大孔隙孔径^[6-7]大小,本试验设置大孔隙横截面积相同且都是 16π mm²,而各组试验方案中大孔隙数量和孔径设置分别为 5 根 3.58 mm 大孔隙,3 根 4.62 mm 大孔隙和 1 根 8 mm 大孔隙。5 根 3.58 mm 大孔隙

作为自然界土壤中“细而多”的大孔隙组合,1根8 mm大孔隙看作为“粗而少”的大孔隙组合。各试验组大孔隙在土柱中位置分布(见图1)与文献[10]做法类似,为与含大孔隙土柱流速和出流液溶质质量浓度作对比,并为后文中模拟部分各参数(孔隙度、渗透系数和弥散系数等)取值提供参考,还将空白均质土柱渗流试验作为试验对照组。

试验开始前使用去离子水淋洗土柱以降低土壤内初始溶质质量浓度,之后从上至下对土柱进行饱和处理。采用5 g/L的NaBr(9.4 mS/cm)溶液,使用一次性脉冲式的施加方式,在试验开始时加入1个孔隙体积(29.7%)的溶液,后用马氏瓶控制4 cm恒定水头边界。试验过程中每2 min收集1次各分格出流液,汇总后记录出流液水量和溶质质量浓度。溶液电导率与离子质量浓度成正比,为便于操作,使用雷磁公司生产的电导率仪测定的电导率表示Br离子质量浓度,为防止电导率仪的测量误差影响,还对样品进行抽样,并使用比色法和离子色谱仪测量进行数值核查。

1.3 定量化评价优势流程度

时间矩法已经被普遍应用于定量化刻画溶质穿透曲线^[11-12],一阶标准矩 μ_1' 可用来表示溶质平均停留时间,其大小代表着溶质穿透土体平均速度的快慢,可以用来定量化评价优势流程度大小,即 μ_1' 值越小表示优势流程度越明显。时间矩^[13-14]的计算公式为:

$$M_p = \int_0^{\infty} \frac{T^p \rho(Z, T)}{\rho_0} dT, \quad p = 0, 1, 2, \dots \quad (1)$$

其中: p 为时间矩的阶数; T 为无量纲时间; Z 为无量纲的空间坐标; ρ 和 ρ_0 分别为实测溶质质量浓度和初始溶质质量浓度。出流液溶质质量用0阶矩 M_0 表示,1~4阶矩分别表示溶质穿透曲线的均值、偏差系数、偏态系数和峰态系数。标准矩 μ_p' 的计算公式为:

$$\mu_p' = M_p / M_0 \quad (2)$$

$$\mu_1' = M_1 / M_0 \quad (3)$$

1.4 数值模拟

本文使用Hydrus-1D软件中的双重渗透模型,探究不同大孔隙数量和孔径组合与模型中相关参数取值的关系,以及这些参数改变对溶质运移结果的影响。该模型是Gerke和Genuchten^[15-16]基于双重孔隙度模型^[17-18]建立起的更为完善的土壤水分和溶质运移模型。

双重渗透模型中溶质运移控制方程是Gerke和Genuchten基于大孔隙域和基质域的对流-弥

散方程提出的,相关方程表达式^[19]为:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\theta_f R_f) = \frac{\partial}{\partial z} \left(\theta_f D_f \frac{\partial \rho_f}{\partial z} - q_f \rho_f \right) - \frac{\Gamma_s}{\omega} \quad (4)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\theta_m R_m \rho_m) =$$

$$\frac{\partial}{\partial z} \left(\theta_m D_m \frac{\partial \rho_m}{\partial z} - q_m \rho_m \right) + \frac{\Gamma_s}{1 - \omega} \quad (5)$$

其中:下标 f 表示大孔隙域或裂隙域;下标 m 表示基质域,这两2个域分别拥有各自的含水率、孔隙度、渗透系数、弥散度等参数,使用大孔隙域或基质域占土壤系统总体积 ω 来确定两域尺度范围; θ 为含水量; R 为考虑线性平衡的无量纲因子; ρ 为溶质质量浓度; D 为弥散系数; q 为流量; Γ_s 为溶质传递系数,其计算公式^[19]描述如下。

$$\Gamma_s = \alpha_s (1 - \omega_f) \theta_m (\rho_f - \rho_m) + \begin{cases} \Gamma_w \rho_f, & \Gamma_w \geq 0; \\ \Gamma_w \rho_m, & \Gamma_w < 0 \end{cases} \quad (6)$$

其中: Γ_w 为水分传递系数; α_s 为一阶溶质传递系数,其被认为是与多孔介质几何形状有关的参数^[20-22]。

$$\alpha_s = \frac{\beta}{a^2} D_a \quad (7)$$

其中: D_a 为大孔隙域与基质域之间界面的有效溶质弥散系数; a 为特征长度; β 为无量纲的几何形状因子。

$$\beta = \frac{2(\delta_0 - 1)^2}{\delta_0^2 (\ln \delta_0 - 1)}, \quad \delta_0 \gg 1 \quad (8)$$

其中, $\delta_0 = \frac{a+b}{b}$ 。本试验使用3D打印的人造空心圆柱作为大孔隙,对于空心圆柱体, b 的计算公式^[19]为:

$$b = a \frac{\omega^{\frac{1}{2}}}{1 - \omega^{\frac{1}{2}}} \quad (9)$$

双重渗透模型中初始边界条件包含水分边界条件和溶质边界条件两部分。本次模拟过程中,水分上边界条件定为4 cm固定水头,下边界条件定为0 cm固定水头,表达式为:

$$h(z, 0) = \begin{cases} h_{of}(z), & 0 \leq z \leq L; \\ h_{om}(z), & 0 \leq z \leq L \end{cases} \quad (10)$$

其中, h_{of} 和 h_{om} 分别为大孔隙域和土壤基质域压力水头。

上边界条件:

$$h(0, t) = h_s, \quad t > 0 \quad (11)$$

下边界条件:

$$h(z, t) = 0, \quad t > 0 \quad (12)$$

其中, h_s 为给定的4 cm固定水头。

溶质上边界条件采用定溶质质量浓度边界条件,通过调整溶液施加时间来控制施加溶质量,下边界条件采用质量浓度零梯度边界条件,表达式为:

$$\rho(z, 0) = 0, \quad 0 \leq z \leq L \quad (13)$$

上边界条件:

$$\rho(0, t) = \begin{cases} 5, & 0 \leq t \leq T_1; \\ 0, & t > T_1 \end{cases} \quad (14)$$

下边界条件:

$$\frac{\partial \rho}{\partial z} = 0, \quad z = L, t > 0 \quad (15)$$

2 结果与讨论

2.1 出流速度

土柱出流速度反映了优势流影响下土柱的总体渗流能力,是判断土壤优势流程度的关键参数之一。各试验组出流速度随时间变化曲线如图 2 所示,出流速度统计参数见表 1 所列。图 2、表 1 中 v_5 、 v_3 、 v_1 、 $v_{均}$ 分别为 5 根、3 根、1 根和均质土柱的出流速度。由图 2、表 1 可知,出流速度在细而多的大孔隙组合土柱中最大,粗而少的次之,而在均质土柱中最小,这表明相同大孔隙度条件下,细而多的组合比粗而少的组合优势流程度更明显。由于土壤的非平衡结构和优势流的存在,各土柱出流速度均存在一定程度的波动性,结合表 1 中变异系数可知,试验中各土柱出流速度较为稳定,波动程度较小。

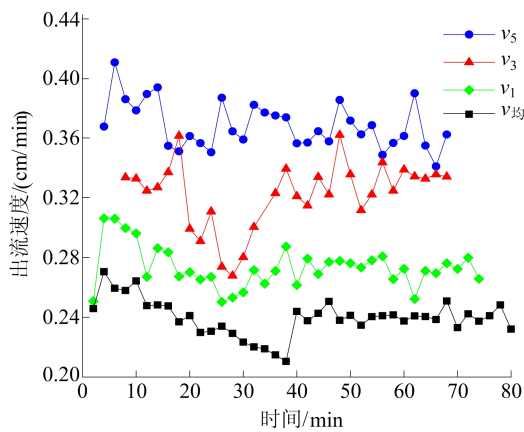


图 2 出流速度随时间的变化曲线

本试验结果与文献[8]的试验结果相似,其试验采用黏壤土填充的含大孔隙土柱进行了相同大孔隙度不同组合的影响研究,结果表明,大孔隙土柱的出流速度为含 4 根 1 mm 土柱大于含 1 根 2 mm 大孔隙,含 16 根 1 mm 大孔隙土柱大于含

1 根 4 mm 大孔隙土柱,同样体现出细而多的大孔隙组合优势流程度更明显。

由上述分析可知,在相同大孔隙度条件下,不同数量和孔径的组合对土壤内优势流产生影响。原因可能是大孔隙组合的改变影响了大孔隙和基质的接触面积以及水流动力场的分布,从而改变了大孔隙向基质的水流侧向交换量,在总体效果上表现为土柱出流速度的改变。

表 1 出流速度统计参数

| 流速 | v_5 | v_3 | v_1 | $v_{均}$ |
|--------------|-------|-------|-------|---------|
| 最小值/(cm/min) | 0.34 | 0.27 | 0.25 | 0.21 |
| 最大值/(cm/min) | 0.41 | 0.36 | 0.31 | 0.27 |
| 平均值/(cm/min) | 0.37 | 0.32 | 0.27 | 0.24 |
| 标准差 | 0.015 | 0.022 | 0.014 | 0.012 |
| 变异系数 | 0.04 | 0.07 | 0.05 | 0.05 |

文献[23]在进行土壤大孔隙连续性试验时发现染色示踪剂总是集中在大孔隙及其周围基质区域,大孔隙流的侧向入渗能显著影响大孔隙周围基质区域的水分和溶质运移过程,形成基质中的快速流区域。在相同大孔隙度条件下,细而多的大孔隙组合与基质区域接触面积更大,侧向入渗更多;同时因大孔隙渗透性远高于基质,水在其中渗流的压损很小,细而多的大孔隙可以将土柱表面高水头压力在更多位置上传递到基质内部,在压力差的作用下增加侧向交换量,引起基质中流量的增加,最终表现为土柱出流速度的增加,即优势流程度更明显。

2.2 溶质穿透过程

土壤中优势流的存在不仅会对水分快速运移产生影响,同时也影响溶质污染物快速运移过程,溶质穿透曲线如图 3 所示。

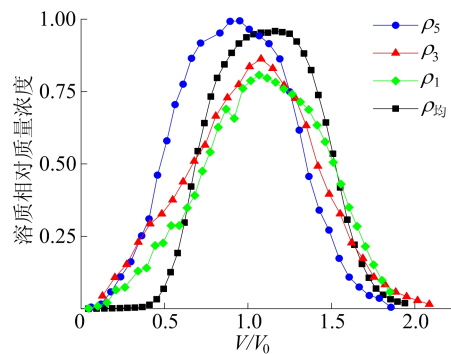


图 3 溶质穿透曲线

图 3 中:横坐标为相对孔隙体积(V/V_0),即累计出流液体积与孔隙体积的比值;纵坐标为溶

质相对质量浓度,即出流液溶质质量浓度和初始溶质质量浓度的比值。采用该种横、纵坐标是由于通常溶质穿透曲线与通过土壤样本的孔隙体积的数量有关^[24],本试验研究主要为溶质相对质量浓度的变化而非溶质质量浓度绝对值变化,为消除出流速度对穿透曲线的影响,采用该种模式更为合适。

含大孔隙土柱与均质土柱溶质运移试验的区别是含大孔隙土柱会出现溶质早期穿透现象,这是因为大孔隙的存在使得水分和溶质在出流前期绕过土壤基质区域直接到达土壤深层位置,所以在试验前期几分钟内即可在出流液中检测到溶质的存在。

从图 3 可以看出,在相同大孔隙度条件下,细而多的大孔隙组合土柱中溶质穿透所需相对孔隙体积更小,其峰值相对质量浓度大于粗而少的组合,峰值孔隙体积小于粗而少的组合。这是由于在土柱表面投加溶质后,细而多的大孔隙组合出流速度更快,溶质沿大孔隙路径及大孔隙周围基质域路径快速运移到土柱底部量更大,导致峰值相对质量浓度更高。在相同累计出流液体积下,细而多的大孔隙组合在溶质穿透曲线上阶段相对质量浓度更高,在下降阶段相对质量浓度更低,体现出在相同大孔隙度条件下,细而多的组合土壤溶质优势流现象更明显。文献[8]研究发现密集型小直径大孔隙相较于单个大孔隙会产生更明显的优势流溶质运移现象,与本文研究结果相似。

本文通过计算溶质穿透曲线的一阶标准时间矩(即溶质平均停留时间),定量化评价了在相同大孔隙度条件下,不同数量和孔径的组合对优势流程度的影响,结果见表 2 所列。

表 2 一阶标准时间矩 μ_1'

| 质量浓度 | ρ_5 | ρ_3 | ρ_1 | $\rho_{0.5}$ |
|----------|----------|----------|----------|--------------|
| μ_1' | 0.94 | 0.96 | 1.02 | 1.12 |

由表 2 可知,均质土柱的 μ_1' 值最大,相同大孔隙度条件下,细而多大孔隙的组合相较于粗而少组合, μ_1' 更小,溶质平均停留时间更短,穿透速度更快,优势流程度更强。

以上水分出流速度、溶质穿透曲线以及优势流定量评价结果都表明,在大孔隙度相同条件下,细而多的大孔隙组合优势流程度更明显。因此,在地下水污染防治中,更应注意因植物根系、蚯蚓活动等引起的大孔隙细而多的土壤条件,可能引

起更多的污染物的优势流迁移。

2.3 大孔隙组合在双重渗透模型中的体现

依据前文分析,大孔隙组合改变引起流速增加,优势流程度改变,主要是由于侧向交换量的增加,在双重渗透模型中一阶溶质传递系数 α_s 起到确定大孔隙域与基质域之间侧向交换量作用,进而影响溶质穿透曲线形态。由式(7)可知, α_s 由几何形状因子 β 和土壤基质结构的特征长度 a 共同确定,其中 β 在大孔隙为空心圆柱形状时取值仅与 δ_0 有关,由式(8)、式(9)可知 δ_0 取值仅与 ω 有关,因此在本试验大孔隙度 ω 相等为 0.056 的情况下, β 取值恒定为 2.421,仅与大孔隙度有关,不能反映相同大孔隙度不同数量和孔径组合的影响,由上可得 α_s 仅由 a 的取值大小确定。依据^[19] a 的取值在圆柱形单大孔隙土柱中取土柱半径与大孔隙半径的差值,在多大孔隙土柱中取大孔隙与土壤基质之间的半宽扩散长度(基质层厚度),在实际应用中仅能作为经验值拟合确定,而与大孔隙组合关系尚不明确。因此,本模拟研究主要为探究大孔隙不同组合与 a 取值的关系,以及 a 的改变对优势流溶质运移的影响。

首先使用单孔隙度模型拟合均质土柱试验结果,通过对空白对照试验方案结果数据分析计算得到的饱和含水量、渗透系数、表观密度和弥散度等相关参数进行调参,确定物理、水力以及溶质运移等一系列参数取值,并将这些参数应用到双重渗透模型的基质域相关参数中;接着使用双重渗透模型拟合含大孔隙土柱试验结果,首先计算^[19] 含 1 根大孔隙域土柱的 a 值,拟合确定大孔隙域其他参数,再把由均质土柱和含 1 根大孔隙土柱拟合确定的基质域与大孔隙域参数应用于含 3 根和 5 根大孔隙土柱中,仅改变参数 a 的取值拟合试验结果。模型拟合结果如图 4 所示,不同大孔隙组合对应的参数 a 取值以及一阶溶质传递系数 α_s 大小见表 3 所列。

在含 1 根大孔隙土柱条件下,参数 a 按照经验公式,取土柱半径与孔隙半径的差值,为 14.6 cm,而在含多根大孔隙土柱条件下缺乏相关经验公式,经模型调参过程后,得出在含 3、5 根大孔隙土柱条件下 a 分别取 90、30 cm 得到的模拟结果较好。结果表明,在相同大孔隙度条件下,细而多的大孔隙组合在双重渗透模型中 a 取值越小, α_s 越大,即溶质侧向交换量更大,进而优势流程度更明显。

为了探究 a 的改变对溶质穿过程的影响,

在含 5 根大孔隙土柱试验结果上对 a 进行敏感性分析,分别将 a 的取值增大到 2、3 倍和减小到 1/2、1/3 倍,其他参数取值不变,模拟结果如图 5 所示,模型参数 α_s 见表 4 所列。

更趋向偏态分布,这与含粗而少大孔隙土柱的结构非均衡性更强一致。由表 4 可知, a 对 α_s 影响显著,且 a 越小, α_s 越大,表明 a 越小,溶质侧向交换量越大,进而优势流程度更明显。

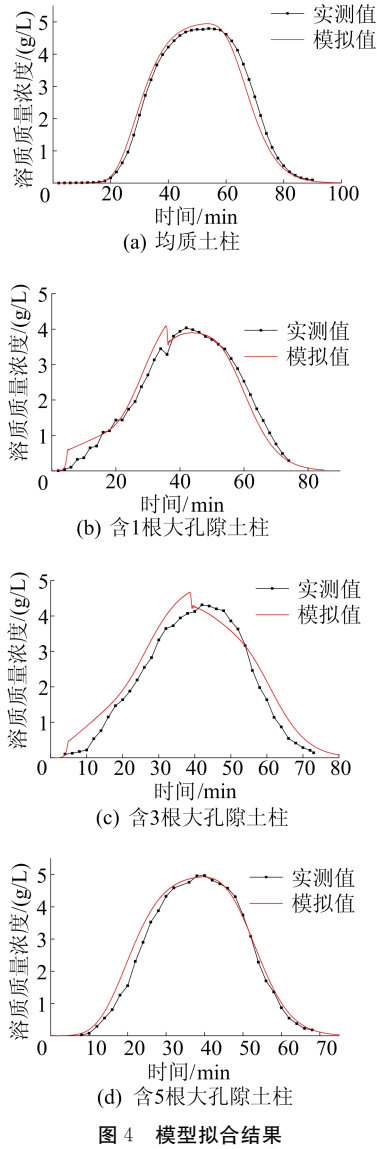


图 4 模型拟合结果

表 3 双重渗透模型 a 和 α_s 取值

| 土柱根数 | 5 | 3 | 1 |
|------------|-------|-------|-------|
| a/cm | 3.0 | 9.0 | 14.6 |
| α_s | 0.210 | 0.020 | 0.009 |

由图 5 可知,参数 a 对溶质穿透曲线影响显著,其规律为 a 的取值越小,溶质初始穿透时间越晚,曲线峰值越高,拖尾开始时间越早,整体穿透更快,更趋向正态分布,这与细而多相较于粗而少的大孔隙土柱“结构更均衡”相一致;而 a 值越大对应粗而少的大孔隙则更容易引起早期快速穿透,但是峰值质量浓度更低、整体穿透时间更长,

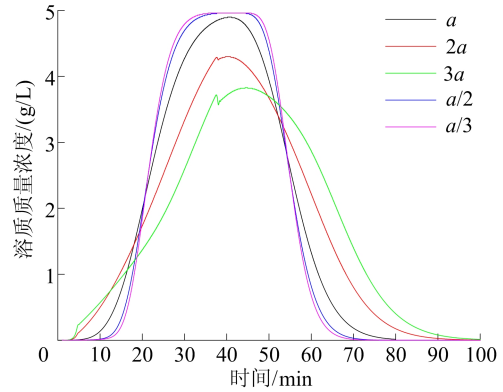


图 5 a 的敏感性分析

表 4 一阶溶质传递系数 α_s

| 参数 | $a/3$ | $a/2$ | a | $2a$ | $3a$ |
|------------|-------|-------|------|------|------|
| α_s | 5.04 | 0.81 | 0.21 | 0.05 | 0.02 |

综上所述,在相同大孔隙度条件下,不同数量和孔径的组合在双重渗透模型由参数 a 的不同取值体现, a 的取值影响溶质侧向交换量大小,最终影响到溶质优势流程度。

3 结 论

本文通过开展室内土柱渗流试验,探究相同大孔隙度条件下,大孔隙不同数量和孔径组合对水分和溶质运移的影响,得到的结论如下:

1) 相同大孔隙度条件下,含细而多组合的大孔隙土柱出流速度更大,溶质穿透曲线峰值质量浓度更高,到达峰值质量浓度所需累计出流液体积更小。一阶标准时间矩大小表明大孔隙细而多的组合相较于粗而少的组合溶质平均停留时间更短,优势流程度更明显。

2) 不同大孔隙数量与孔径组合引起大孔隙与基质间,水与溶质侧向交换量的改变,进而影响土柱水分出流与溶质穿透的优势流程度。

3) 通过双重渗透模型拟合试验结果,得出不同数量和孔径组合的改变对应于双重渗透模型中土壤基质特征长度 a 的改变,在相同大孔隙度条件下,细而多的大孔隙组合参数 a 取值更小。通过对参数 a 进行敏感性分析,得出 a 对 α_s 影响显著,且 a 取值越小,一阶溶质传递系数 α_s 越大,优势流程度越明显。

[参 考 文 献]

- [1] 盛丰,张利勇,吴丹. 土壤优先流模型理论与观测技术的研究进展[J]. 农业工程学报,2016,32(6):1-10.
- [2] GERMAN P F, BEVEN K. Kinematic wave approximation to infiltration into soils with sorbing macropores[J]. *Water Resources Research*,1985,21(7):990-996.
- [3] 程竹华,张佳宝,徐绍辉. 黄淮海平原三种土壤中优势流现象的试验研究[J]. 土壤学报,1999,36(2):154-161.
- [4] 张瑞钢,杨梦,张振坤,等. 大孔隙位置对饱和土壤水及溶质运移影响的实验研究[J]. 地下水,2021,43(6):7-9,28.
- [5] 张振坤. 积水深度与大孔隙位置对土壤中水分与溶质大孔隙优势流影响的实验研究[D]. 合肥:合肥工业大学,2022.
- [6] ZEHE E, FLUHLER H. Preferential transport of isoproturon at a plot scale and a field scale tile-drained site[J]. *Journal of Hydrology*,2001,247(1/2):100-115.
- [7] EDWARDS W M, NORTON L D, REDMOND C E. Characterizing macropores that affect infiltration into nontilled soil [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1988, 52(2):483-487.
- [8] 杨梦. 土壤大孔隙特征对水分及溶质优势流运移影响的实验研究[D]. 合肥:合肥工业大学,2021.
- [9] RAIMBAULT J, PEYNEAU P E, COURTIERMURIAS D, et al. Investigating the impact of exit effects on solute transport in macroporous media[J]. *Hydrology and Earth System Sciences*,2021(2):671-683.
- [10] KOHNE J, MOHANTY B P. Water flow processes in a soil column with a cylindrical macropore; experiment and hierarchical modeling [J]. *Water Resources Research*, 2005,41(3):W03010.
- [11] KITANIDIS P K, LUO J, CIRPKA O A. Temporal-moment matching for truncated breakthrough curves for step or step-pulse injection[J]. *Advances in Water Resources*, 2006,29(9):1306-1313.
- [12] JAWITZ J W. Moments of truncated continuous univariate distributions [J]. *Advances in Water Resources*, 2004, 27(3):269-281.
- [13] KOESTEL J K, MOEYS J, JARVIS N J. Evaluation of nonparametric shape measures for solute breakthrough curves[J]. *Vadose Zone Journal*,2011,10(4):1261-1275.
- [14] 郭会荣. 基于室内土柱穿透实验的优先流定量评价[J]. 地质科技情报,2009,28(6):101-106.
- [15] GERKE H H, GENUCHTEN M T. Evaluation of a first-order water transfer term for variably saturated dual-porosity flow models[J]. *Water Resources Research*, 1993, 29(4):1225-1238.
- [16] GERKE H H, GENUCHTEN M T. A dual-porosity model for simulating the preferential movement of water and solutes in structured porous media[J]. *Water Resources Research*,1993,29(2):305-319.
- [17] ZHENG C M, BIANCHI M, GORELICK S M. Lessons learned from 25 years of research at the MADE site[J]. *Ground Water*,2011,49(5):649-662.
- [18] BATANY S, PEYNEAU P E, LASSABATERE L, et al. Interplay between molecular diffusion and advection during solute transport in macroporous media [J]. *Vadose Zone Journal*,2019,18(1):1-15.
- [19] GERKE H H, GENUCHTEN M T. Macroscopic representation of structural geometry for simulating water and solute movement in dual-porosity media [J]. *Advances in Water Resources*,1996,19(6):343-357.
- [20] RAATS P A C. Transport in structured porous media[J]. *Transport in Porous Media*,1981,143:221-226.
- [21] VALOCCHI A J. Use of temporal moment analysis to study reactive solute transport in aggregated porous media [J]. *Geoderma*,1990,46(1/2/3):233-247.
- [22] URBINA C A F, DAM J C V, BERG F V D, et al. Determination of the relative macroporosity and the effective aggregate width for different macropore geometries with disk infiltrometers[J]. *Vadose Zone Journal*,2020,19(1):e20048.
- [23] ALLAIRE-LEUNG S E, GUPTA S C, MONCRIEF J F. Water and solute movement in soil as influenced by macropore characteristics: 1. macropore continuity[J]. *Journal of Contaminant Hydrology*,2000,41(3/4):283-301.
- [24] LARSBO M, KOESTEL J, JARVIS N. Relations between macropore network characteristics and the degree of preferential solute transport[J]. *Hydrology and Earth System Sciences*,2014,18(12):5255-5269.

(责任编辑 吴 亮)