

Characterizing Preferential Flow Using Iodine-Starch Staining Method and Active Region Model*

Feng Sheng¹, Kang Wang², Renduo Zhang³

¹School of Hydraulic Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha

²State Key Laboratory of Water Resources and Hydropower Engineering Science, Wuhan University, Wuhan

³School of Environmental Science and Engineering, Zhongshan University, Guangzhou

Email: fsaint8586@163.com

Received: May 4th, 2012; revised: May 21st, 2012; accepted: May 29th, 2012

Abstract: To capture the heterogeneous flow pattern and enhance the prediction accuracy of preferential flow in unsaturated soil, the iodine-starch staining method was applied to visualize the preferential flow pattern from the background in this research. The digital imaging procedure was conducted to obtain the heterogeneous distribution pattern of preferential flow paths, and soil sampling was conducted to obtain the heterogeneous distributions of soil water content and solute concentration in the preferential flow region. The measured distributions of soil water content and solute concentration resulted from preferential flow were simulated and predicted using the active region model (ARM) and the mobile-immobile region model (MIM). The modeling efficiency using ARM and MIM were quantitatively evaluated and compared using the relative root mean square error (RRMSE) analysis. The model evaluation and comparison revealed that, ARM produced more accurate infiltration depth, and soil water and solute concentration distributions predictions, showing the ARM captured the macroscopic behavior of preferential flow and transport well.

Keywords: Preferential Flow; Dye Tracing Technique; Fractal; Active Region Model; Mobile-Immobile Region Model

土壤优先流的离子显色示踪技术与分形模型模拟方法研究*

盛丰¹, 王康², 张仁铎³

¹长沙理工大学水利工程学院, 长沙

²武汉大学水资源与水电工程科学国家重点实验室, 武汉

³中山大学环境科学与工程学院, 广州

Email: fsaint8586@163.com

收稿日期: 2012年5月4日; 修回日期: 2012年5月21日; 录用日期: 2012年5月29日

摘要: 为获得优先流的非均匀运动模式、提高优先流模拟预测的精度, 本文运用碘-淀粉显色示踪技术, 将优先流流场从流动背景中显示出来, 通过数字图像分析技术和采样分析, 获得优先流流场及流场内的土壤含水率和溶质浓度的非均匀分布模式; 在此基础上, 分别运用活动流场模型和二域模型对试验条件下的水流运动和溶质运移结果展开模分析, 并通过相对标准偏差分析定量评价活动流场模型和二域模型模拟预测优先流发展的有效性。相对标准偏差分析显示, 相对于二域模型, 活动流场模型对土壤水流运动和溶质运移的模拟预测精度均较高。研究结果表明, 活动流场模型较好的捕捉到了土壤优先流的整体非均匀信息。

*基金项目: 国家自然科学基金(51109017)、湖南省教育厅优秀青年项目(10B006)。

作者简介: 盛丰(1981-), 男(汉族), 湖南株洲人, 讲师, 博士, 主要从事非饱和带土壤水文学与水土环境方面的研究。

关键词: 优先流; 溶质运移; 显色示踪技术; 分形; 活动流场模型

1. 引言

优先流也称非均匀流, 是水和溶质沿某些特定路径运动而绕过部分多孔介质的现象, 是土壤中常见的和重要的但又难于被捕捉和描述的水流运动和溶质运移形式^[1]。优先流增大了农业灌水和施肥的渗漏损失、缩短了污染物在土壤中停留降解的时间、减少了土壤颗粒对污染物的吸附和截留、改变了降雨在地面和土壤中的重分配过程、提高了地下径流对降雨的响应速度、加剧了流域土壤的地下侵蚀强度、降低了坡体的结构稳定性。因此, 准确描述、模拟和预测非饱和带土壤中的优先流过程对农业资源的高效利用、污染控制和生态环境保护、流域水文过程精准预报以及地质灾害防治等都具有极其重要的意义。

近年来, 许多新方法(如地面雷达穿透技术、核磁共振成像技术、X射线计算机断层摄影技术等)被应用于直接观测田间条件下的全局流动模式; 但是这些观测技术通常需要昂贵的仪器设备, 使用方法也比较复杂^[2]。离子显色示踪技术由于它们能直观的显示土壤水流运动的非均匀分布模式且无需大量的经费投入而广泛应用于各种室内和野外研究中^[3]。其中碘-淀粉显色示踪技术由于碘离子较高的溶解度、具有与土壤水流几乎相同的运移性能、低毒、氧化后与淀粉反应生成的蓝紫色易于被识别和提取等优点被广泛应用于土壤(尤其是粘性土壤)优先流的示踪研究中^[4]。

由于优先流发展变化受气候条件、土地利用类型、土壤性质以及农业耕作措施等因素的影响, 造成试验观测时存在着较大的不确定性^[2]。加之土壤优先流的时空变异性很大, 所以观测操作非常困难。因此, 定量研究优先流的发展变化及其环境水文效应尤其需要借助模型模拟和预报的强大功能^[5]。目前为止,

考虑流动非均匀性的模型和理论可以归为2类: 连续性模型和离散模型^[6]。传统的连续性模型可用来表征大尺度的实际问题, 但是这类方法不能用来预测非饱和系统中流体运动的一些局部的但非常重要的特征; 而另一方面, 离散模型却能捕捉着到这些小尺度上的、重要的运移特征, 但这类方法还不能用来解决大尺度的实际问题。分形是自然界的普遍特征^[7]。近年来的试验研究不断观测到非均匀流动表现出明显的分形特征^[8]。Liu等^[6]指出离散模型之所以能被用来描述优先流的细部特征, 正是在于这类模型具有与优先流所表现出来的分形特征相一致的分形(多重分形)特征, 并在此基础上提出了描述非饱和带土壤中水流运动和溶质运移过程的活动流场模型(Active Region Model, ARM)。

本文采用碘-淀粉显色示踪技术获得土壤优先流的非均匀分布模式, 分别运用活动流场模型和二域模型模拟试验条件下入渗水和溶质的分布模式, 通过相对标准偏差(Relative Root Mean Square Error, RRMSE)^[9]分析来定量评价和比较两个模型对优先流条件下的土壤水流运动和溶质运移的模拟预测精度, 在此基础上分析采用分形模型模拟方法研究非饱和带土壤中优先流运动的可行性。

2. 离子显色示踪技术

2.1. 碘-淀粉显色示踪试验

试验于2007年3月在武汉大学水资源与水电工程国家重点实验室灌溉排水与水环境综合试验场进行。试验区域土壤为粉质粘土(土壤物理性质参数如表1所示)。试验采用类似双套环的试验装置(如图1所示)。在平整后的试验区域同心安置两个正方形框,

Table 1. Soil physical and hydraulic properties
表 1. 试验区土壤的物理性质参数

土壤类型	深度/cm	土壤质地/%			容重/(g·cm ⁻³)	孔隙度/%	饱和水力传导度/(cm·s ⁻¹)
		>50 μm	2~50 μm	<2 μm			
粉质粘土	0~10	3.5	55.0	44.5	1.44	40.2	5.8 × 10 ⁻⁵
	10~20	4.4	51.5	44.4	1.50	42.7	2.1 × 10 ⁻⁵
	20~50	4.3	51.4	44.3	1.50	44.8	2.2 × 10 ⁻⁵
	50~100	4.7	50.7	44.6	1.59	45.1	1.4 × 10 ⁻⁵

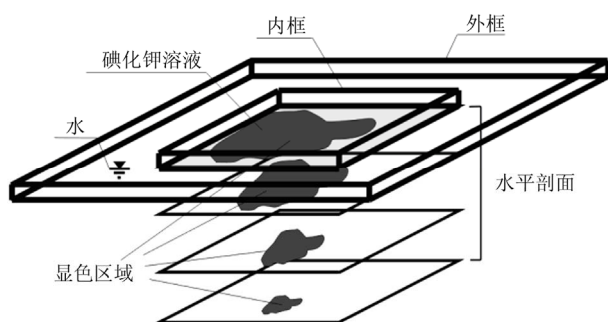


Figure 1. Diagram of experimental set-up for iodine-starch staining experiment

图 1. 碘 - 淀粉显色示踪试验设计

其中内框尺寸(即试验尺度) $1.0 \times 1.0 \text{ m}^2$ 、外框尺寸为 $2.0 \times 2.0 \text{ m}^2$ 。试验开始时,在内框中首先注入 20 mm 碘化钾($20 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$)和溴化钾($4 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$)混合溶液(阶段 1), 15 min 后,该混合溶液完全入渗;此时,迅速在内框中注入 20 mm 碘化钾($20 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$)和氯化钾($4 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$)混合溶液(阶段 2), 29 min 后,该混合溶液完全入渗;此时,迅速在内框中注入 20 mm 碘化钾($20 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$)和硝酸钾($4 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$)混合溶液(阶段 3), 49 min 后该混合溶液完全入渗。整个渗透过程持续 93 min。在每个入渗阶段往内框中注入混合溶液的同时,在外框中注入同等高度的清水。碘化钾 - 硝酸钾混合溶液完全入渗(阶段 3)后,用防水和隔热材料覆盖试验区域, 24 hr 后自上向下逐层开挖水平剖面,间距 2~5 cm。剖面形成后,喷洒淀粉(浓度 50 g/L)和硝酸铁(浓度 20 g/L)的混合溶液。水流经过的区域含有碘离子,在硝酸铁的氧化作用下被氧化成碘分子,碘分子与淀粉反应变蓝紫色从而显示出土壤水流运动区域。显色完成后,照相记录剖面显色模式。照相后,在显色区随机采 5 个土样、未显色区随机采 3 个土样以确定入渗前后的土壤含水率分布和 Br^- 、 Cl^- 和 NO_3^- 三种离子浓度分布。由于显色反应时喷洒了少量的淀粉和硝酸铁的混合溶液,因此采样时须刮去表层土壤,而取表层以下 0.5 cm 深处的土壤作为采样样品。

2.2. 数字图像分析

所有的照片均按照 Morris 和 Mooney^[10]提出的临界值方法进行处理,根据照相图片的 RGB(R: red, G: green, B: blue)值信息将显色图片转化成黑(显色)白(未显色)的二元化信息图片;在此基础上,可运用计算机对优先流分布和运动模式进行定量分析计算。

3. 分形模型模拟

3.1. 本构方程

根据 Liu 等^[6]提出的活动流场模型理论,整个流场可以分成活动流场和不活动流场两个部分,水和溶质的输移只发生在活动流场中,不活动流场不产生流动和运移;活动流场具有分形特征,活动流场占整个流场的比例可表示为土壤含水率与活动流场模型分形特征参数的函数,即:

$$f = (S_e^*)^\gamma \quad (1)$$

式中: f 为活动流场占整个流场的比例,简称为活动流场比例; γ 为活动流场模型分形特征参数; S_e^* 为整个研究区域上的平均活动水饱和度。它与活动流场含水率的关系可用以下两个公式表示:

$$S_e^* = fS_a; \quad S_a = \frac{\theta_a - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \quad (2)$$

式中: S_a 为流动区域(即活动区域)的平均活动水饱和度; θ_a 为活动流场的平均体积含水率, $\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$; θ_s 和 θ_r 分别为土壤的饱和体积含水率和剩余体积含水率, $\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$ 。

活动流场模型分形特征参数(γ)是用来描述优先流运动非均匀程度的参数。 γ 越大,表明流动的非均匀程度越强; $\gamma = 0$,表明流动为均匀流形态,活动流场模型转变为传统的连续性模型。Liu 等^[6]同时建立了活动流场模型分形特征参数与非均匀流场分形维数之间的理论关系,因此,活动流场模型在本质上抓住了小尺度上流体运动的细部(分形)特征。Sheng 等^[11]通过系统的试验研究证明活动流场模型很好的捕捉到了不同入渗条件下优先流运动整体的非均匀信息,并且用于描述优先流非均匀特征的模型参数(γ)表现出一定的标度不变性。该研究结果表明通过小尺度试验获得的研究结果可用于解决大尺度的实际问题。

3.2. 控制方程

根据活动流场模型基本理论和质量守恒原理,盛丰等^[12]以微小矩形土块(即单元土体)中发生的土壤水流运动和溶质运移过程为研究对象,建立了一维垂直土壤水流运动(由于活动流场模型中使用的土壤含水率都在水平方向上进行了平均,因此仅考虑一维垂直

土壤水流运动情形)条件下的土壤水流运动控制方程和溶质运移控制方程, 如式(3)和式(4)所示:

$$-\frac{\partial}{\partial z} \left[fK_a \left(\frac{\partial h_a}{\partial z} + 1 \right) \right] + \frac{\partial (f\theta_a)}{\partial t} - \theta_i \frac{\partial f}{\partial t} + fr_{aw} = 0 \quad (3)$$

$$-\frac{\partial}{\partial z} \left(f\theta_a D_a \frac{\partial c_a}{\partial z} \right) + \frac{\partial (fq_a c_a)}{\partial z} + \frac{\partial (f\theta_a c_a)}{\partial t} + \frac{\partial (f\rho_b s_a)}{\partial t} - (\theta_i c_i + \rho s_i) \frac{\partial f}{\partial t} + fr_{aw} c_{as} = 0 \quad (4)$$

式中: z 为垂直坐标(向上为正), cm ; $K_a(\text{cm}\cdot\text{s}^{-1})$ 和 $h_a(\text{cm})$ 分别为活动流场区的非饱和和水力传导度和土壤水势头; t 为时间, s ; θ_i 为不活动流场区内的土壤含水率, $\text{cm}^3\cdot\text{cm}^{-3}$; r_{aw} 为活动流场区域内土壤水消耗(正)和补充(负)的速率, s^{-1} ; D_a 为溶质的扩散-弥散系数, $\text{cm}^2\cdot\text{s}^{-1}$; q_a (单位时间单位面积上的流量)为活动流场区 z -方向上的土壤水流达西流速(正号向上), $\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$; c_a 和 c_i (单位体积土壤溶液中的溶质质量)分别为活动流场区和不活动流场区溶解在土壤水中的溶质浓度, $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$; s_a 和 s_i (单位质量干土吸附的溶质质量)分别为活动流场区和不活动流场区被吸附的溶质浓度, $\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$; ρ_b 为土壤容重, $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$; c_{as} 为活动流场区域内土壤水源汇项中的溶质浓度, $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ 。 K_a 和 h_a 均可表示为活动流场内土壤含水率的函数^[6], 并由 van Genuchten 土壤水分特征函数方程^[13]求出。

活动流场模型下土壤水流运动和溶质运移控制方程(即式(3)和式(4))分别与二域模型(Mobile-immobile Region Model, MIM)^[5,14]下土壤水流运动和溶质运移的控制方程相似。当活动流场模型和二域模型均不考虑活动流场区域和不活动流场区域之间的土壤水和溶质的交换作用时, 活动流场模型与二域模型的根本区别即在于它们对活动流场的处理上: 活动流场模型中, 活动流场是随着优先流发展而不断变化的; 而在二域模型中, 活动流场是固定的。

3.3. 模拟条件设置

采用活动流场模型(ARM)和二域模型模(MIM)分

别对剖面开挖时刻显色区内的土壤含水率和溶质 (Br^- 、 Cl^- 和 NO_3^-) 浓度分布进行模拟。试验土壤的 van Genuchten 土壤水分特征曲线参数^[13]根据土壤质地由 RETC 程序^[15]确定, 其它土壤物理和水动力参数根据实测结果(表 1)取整个入渗深度上的平均值; Br^- 、 Cl^- 和 NO_3^- 在纯水中的扩散系数(D_d)、在粉质粘土中的纵向弥散系数(D_l)分别根据相关文献^[16,17]设定。试验条件下数值模拟的水动力参数和溶质运移参数设置如表 2 所示。土壤初始含水率分布根据实测土壤含水率分布设定, 初始 Br^- 、 Cl^- 和 NO_3^- 浓度均为 0。活动流场模型中, 活动流场区域面积通过本构方程(即式(1))由活动流场区内的土壤含水率确定; 二域模型中, 活动区域面积根据实测的显色面积分布作为已知量输入。活动流场模型分形特征参数(简称分形特征参数, γ)根据测定的显色面积分布和显色区土壤含水率分布由本构方程拟合得出, 拟合的分形特征参数(γ)值及决定系数(R^2)如表 2 所示。

3.4. 模型模拟分析

采用活动流场模型(ARM)和二域模型(MIM)模拟试验条件下的土壤水流运动和溶质 (Br^- 、 Cl^- 和 NO_3^-) 运移结果分别如图 2(土壤含水率分布模拟结果)和图 3(溶质浓度分布模拟结果)所示。试验实测最大入渗深度与活动流场模型和二域模型模拟预测的最大入渗深度如表 3 所示。表 3 显示, 相同入渗条件下, 活动流场模型模拟预测的最大入渗深度比二域模型模拟预测的最大入渗深度大, 活动流场模型模拟预测的结果也更接近实测结果。根据图 2 和图 3 计算活动流场模型和二域模型模拟预测入渗后显色区土壤含水率和溶质 (Br^- 、 Cl^- 和 NO_3^-) 浓度分布的相对标准偏差 ($RRMSE$)^[9]如表 3 所示。表 3 显示, 活动流场模型模拟计算的入渗后显色区内的土壤含水率和溶质浓度分布结果比二域模型的模拟预测结果具有更小的相对标准偏差, 表明活动流场模型的模拟结果更接近于实测结果。

Table 2. Hydraulic and solute transport parameters for modeling
表 2. 模型模拟分析的水动力和溶质运移输入参数设置

水动力参数					溶质运移参数			分形特征参数	
$\theta_r/(\text{cm}^3\cdot\text{cm}^{-3})$	$\theta_s/(\text{cm}^3\cdot\text{cm}^{-3})$	$a/(\text{cm}^{-1})$	n	$K_s/(\text{cm}\cdot\text{s}^{-1})$	$\rho_b/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	$D_d/(\text{cm}^2\cdot\text{s}^{-1})$	$D_l/(\text{cm})$	γ	R^2
0.12	0.443	0.019	1.31	2.15×10^{-5}	1.54	2.0×10^{-5}	1.0	0.74	0.923

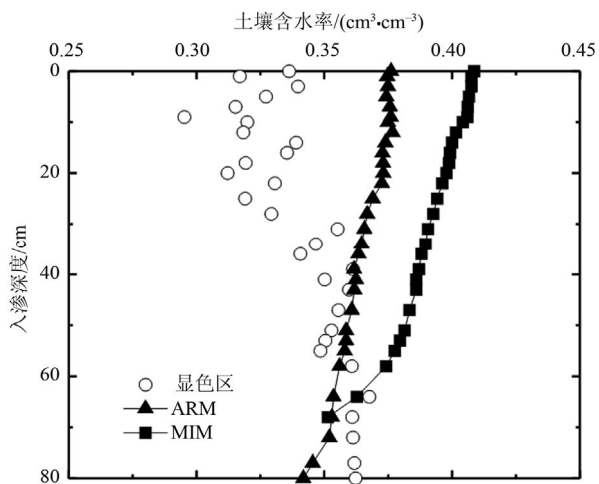


Figure 2. Predicted distributions of soil water content in the stained region after infiltration using the ARM and MIM
 图2. 活动流场模型(ARM)和二域模型(MIM)模拟入渗后显色区土壤含水率分布图

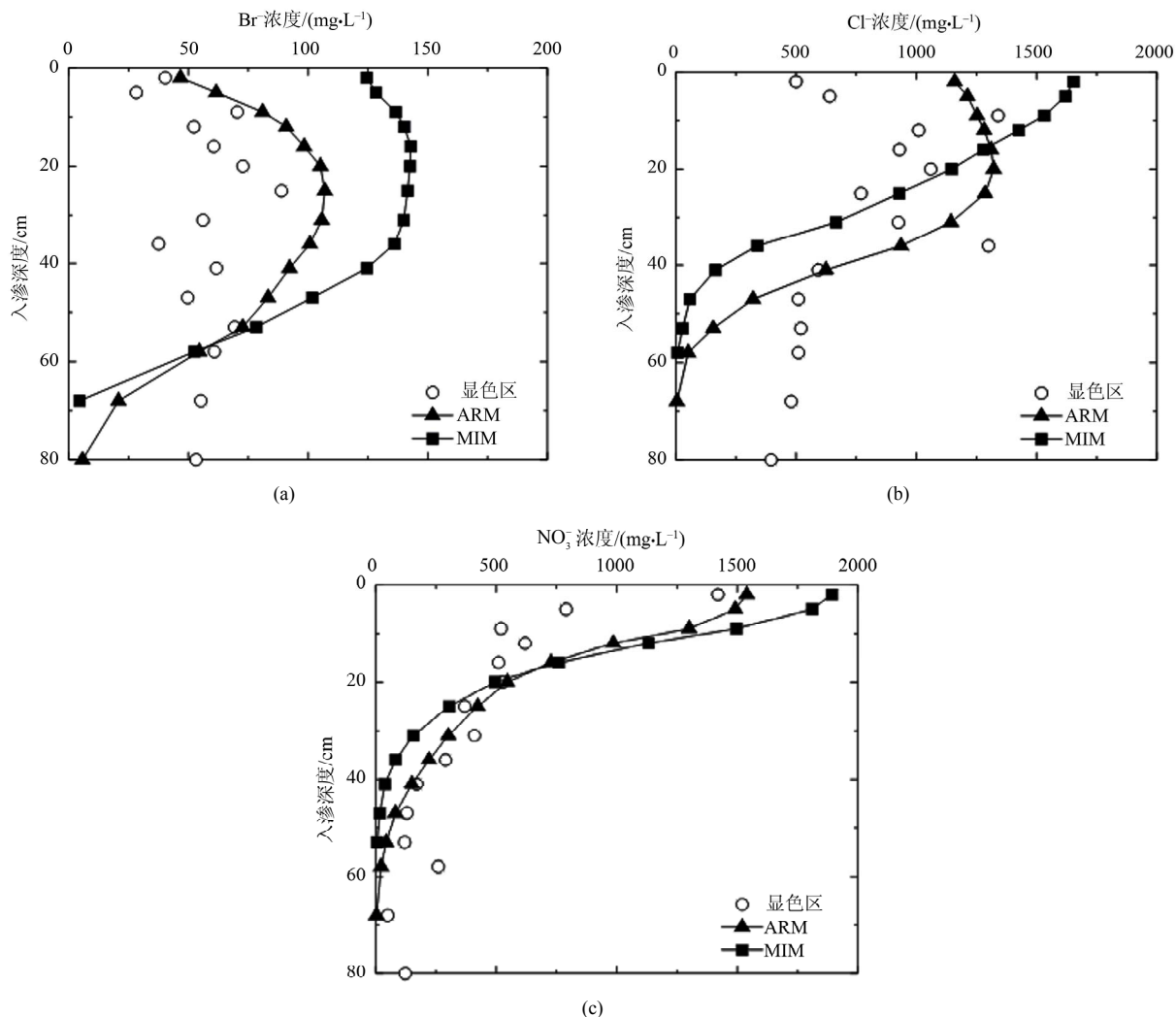


Figure 3. Predicted distributions of Br⁻ (a), Cl⁻ (b) and NO₃⁻ (c) concentration after infiltration using the ARM and MIM
 图3. 活动流场模型和二域模型模拟入渗后显色区 Br⁻ (a), Cl⁻ (b)和 NO₃⁻ (c)浓度分布图

Table 3. Simulated results from ARM and MIM for the iodine-starch staining experiment
表 3. 活动流场模型和二域模型的模拟计算结果

Z_{max}/cm			土壤含水率 RRMSE		Br^- 浓度 RRMSE		Cl^- 浓度 RRMSE		NO_3^- 浓度 RRMSE	
实测	ARM	MIM	ARM	MIM	ARM	MIM	ARM	MIM	ARM	MIM
94	86	70	0.17	0.37	0.60	1.22	0.51	0.75	0.73	1.02

由于实际的优先流流场是随着土壤水流动和入渗发展而不断变化的^[18,19], 活动流场模型中通过分形本构关系建立了优先流流场面积(即活动流场面积)与流场内土壤含水率之间的函数关系, 从而抓住了优先流流场在入渗过程中的发展和变化特征; 而二域模型却将优先流流场视为固定而不随时间变化的。活动流场模型比二域模型更能真实的反映实际的流动情况, 因而也就具有更高的预测精度。这一结果同时表明活动流场模型较好的捕捉到了土壤水流运动和溶质运移的整体非均匀信息, 尤其是考虑到该预测精度是在除了通过实测数据拟合出活动流场模型分形特征参数值外模型没有做其它校正的情况下获得的。值得注意的是, 表 3 显示活动流场模型模拟预测溶质运移的精度要低于土壤水流运动的预测精度。这主要是由于土壤中的溶质运移过程具有比水流运动更高的不确定性^[20]。

由于活动流场模型分形特征参数具有标度不变性, 通过小尺度试验获得的结果可用来解决大尺度的实际问题^[11]; 此外, 活动流场模型分形特征参数只与入渗的初始条件和边界条件有关, 在入渗过程中不随时间变化^[6]。而实际的流动模式(显色面积分布, 二域模型的输入参数)是随着入渗时间和试验尺度不断变化的。因此, 相比于二域模型, 活动流场模型能更方便的用于解决实际的优先流流动和运移问题。

4. 小结

在粉质粘土条件下采用碘 - 淀粉显色示踪方法对非饱和带土壤中的优先流过程展开了示踪研究。试验过程中, 通过在不同入渗阶段注入的 Br^- 、 Cl^- 和 NO_3^- 三种离子来研究优先流对溶质运移过程的影响。通过剖面开挖和数字图像分析获得优先流流场的非均匀分布模式; 通过采样分析, 获得优先流通道内的土壤含水率分布和溶质(Br^- 、 Cl^- 和 NO_3^- 三种离子)浓度分布。文章同时采用活动流场模型和二域模型对试验条件下的土壤含水率分布和溶质(Br^- 、 Cl^- 和 NO_3^- 三种离子)浓度分布展开模拟分析, 并通过相对

标准偏差分析来定量评价和比较两个模型对优先流条件下的土壤水流运动和溶质运移的模拟预测精度。模型对比分析结果表明, 由于活动流场模型对优先流流场的处理更接近于实际情况, 因此活动流场模型对土壤水流运动和溶质运移的模拟预测精度均明显高于二域模型的模拟预测结果。研究表明, 活动流场模型较好的捕捉到了土壤水流运动和溶质运移的整体非均匀信息。

参考文献 (References)

- [1] HENDRICKX, J. M. H., FLURY, M. Uniform and preferential flow mechanisms in the vadose zone. In: National Research Council: Conceptual Models of Flow and Transport in the Fractured Vadose Zone, Washington DC: National Academy Press, 2001: 149-187.
- [2] ALLAIRE, S. E., ROULIER, S. and CESSNA, A. Quantifying preferential flow in soils: A review of different techniques. *Journal of Hydrology*, 2009, 378(1-2): 179-204.
- [3] HANGEN, E., GERKE, H. H., SCHAAF, W., et al. Flow path visualization in a lignitic mine soil using iodine-starch staining. *Geodema*, 2004, 120(1-2): 121-135.
- [4] VAN OMMEN, H. C., DEKKER, L.W., DIJKSMA, R., et al. A new technique for evaluating the presence of preferential flow paths in nonstructured soils. *Soil Science Society of America Journal*, 1988, 52(4): 1192-1193.
- [5] ŠIMŮNEK, J., JARVIS, N. J., VAN GENUCHTEN, M. T., et al. Review and comparison of models for describing non-equilibrium and preferential flow and transport in the vadose zone. *Journal of Hydrology*, 2003, 272(1-4): 14-35.
- [6] LIU, H., ZHANG, R. and BODVARSSON, G. S. An active region model for capturing fractal flow patterns in unsaturated soils: Model development. *Journal of Contaminant Hydrology*, 2005, 80(1-2): 18-30.
- [7] MANDELROT, B. B. *The fractal geometry of nature*. New York: W.H. Freeman, 1982.
- [8] SMITH, J. E., ZHANG, Z. F. Determining effective interfacial tension and predicting finger spacing for DNAPL penetration into water-saturated porous media. *Journal of Contaminant Hydrology*, 2001, 48(1-2): 167-183.
- [9] BASILE, A., COPPOLA, A., DE MASCELLIS, R., et al. Scaling approach to deduce field unsaturated hydraulic properties and behavior from laboratory measurements on small cores. *Vadose Zone Journal*, 2006, 5(3): 1005-1016.
- [10] MORRIS, C., MOONEY, S. J. A high-resolution system for the quantification of preferential flow in undisturbed soil using observations of tracers. *Geoderma*, 2004, 118(1-2): 133-143.
- [11] SHENG, F., WANG, K., ZHANG, R., et al. Characterizing soil preferential flow using iodine-starch staining experiments and the active region model. *Journal of Hydrology*, 2009, 367(1-2): 115-124.
- [12] 盛丰, 张仁铎, 刘会海. 基于分形理论的土壤优先流运动控制方程[J]. *农业工程学报*, 2011, 27(2): 52-56.

- SHENG Feng, ZHANG Renduo and LIU Huihai. Governing equations for modeling preferential flow in unsaturated soil based on fractal theory. *Transaction of CSAE*, 2011, 27(2): 52-56. (in Chinese)
- [13] VAN GENUCHTEN, M. T. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Science Society of America Journal*, 1980, 44(5): 892-898.
- [14] VAN GENUCHTEN, M. T., WIERENGA, P. J. Mass transfer studies in sorbing porous media. I. Analytical solutions. *Soil Science Society of America Journal*, 1976, 40(4): 473-481.
- [15] VAN GENUCHTEN, M. T., LEIJ, F. J. and YATES, S. R. The RETC code for quantifying the hydraulic functions of unsaturated soils. US Environmental Protection Agency, 1991.
- [16] VANYSEK, P. Ionic conductivity and diffusion at infinite dilution. In: LIDE, D. R., Ed., *CRC Handbook of Chemistry and Physics*, 83rd Edition, Boca Raton: CRC Press, 2002.
- [17] ŠIMŮNEK, J., VOGEL, T. and VAN GENUCHTEN, M. T. The SWMS_2D code for simulating water flow and solute transport in two-dimensional variably saturated media. Version 1.21, Research Report No. 132, Riverside: US Salinity Laboratory, 1994.
- [18] LARSSON, M. H., JARVIS, N. J., TORSTENSSON, G., et al. Quantifying the impact of preferential flow on solute transport to tile drains in a sandy field soil. *Journal of Hydrology*, 1999, 215(1-4): 116-134.
- [19] VAN DAM, J. C., WOSTEN, J. H. M. and NEMES, A. Unsaturated soil water movement in hysteretic and water repellent field soils. *Journal of Hydrology*, 1996, 184(3-4): 153-173.
- [20] WANG, K., ZHANG, R. and YASUDA, H. Characterizing heterogeneous soil water flow and solute transport using information measures. *Journal of Hydrology*, 2009, 370(1-4): 109-121.