

土壤优先流运动的活动流场模型模拟和敏感性分析

盛 丰^{1,2}, 张仁铎³, 刘会海⁴

(1. 长沙理工大学水利学院, 长沙 410114; 2. 水沙科学与水灾害防治湖南省重点实验室, 长沙 410114;
3. 中山大学环境科学与工程学院, 广州 510275; 4. 美国劳伦斯伯克利国家实验室, 伯克利 94720)

摘 要: 在壤土和砂土条件下分别采用碘-淀粉染色示踪方法和亮蓝染色示踪方法各开展了 2 个染色示踪试验, 分别采用活动流场模型和二域模型模拟计算了各试验入渗后染色区内的土壤含水率和溶质浓度分布, 通过相对均方根误差分析评价了两个模型模拟预测优先流发展的有效性; 此外, 通过敏感性分析研究了不同入渗条件(土壤质地、入渗水量和土壤初始含水率)下活动流场模型模拟预测结果(入渗深度)对活动流场模型分形特征参数变化的敏感度。模型检验分析结果显示活动流场模型对土壤水入渗深度、入渗后染色区内土壤含水率和溶质浓度分布的预测精度要明显高于二域模型的模拟预测精度; 活动流场模型较好的捕捉到了优先流运动整体的非均匀特征。敏感性分析结果显示, 当降雨入渗水量和土壤初始含水率相同时, 入渗深度对活动流场模型分形特征参数(γ)的敏感度随着 γ 的增大而增大; 相同活动流场模型分形特征参数(γ)值条件下(即流动非均匀程度相同), 入渗深度对活动流场模型分形特征参数(γ)的敏感度随着入渗水量的增大和土壤初始含水率的升高而减小。

关键词: 分形, 溶质运移, 土壤, 优先流, 活动流场模型, 二域模型, 染色示踪试验, 敏感性分析

doi: 10.3969/j.issn.1002-6819.2011.04.0013

中图分类号: S152.7

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2011)-04-0072-09

盛 丰, 张仁铎, 刘会海. 土壤优先流运动的活动流场模型模拟和敏感性分析[J]. 农业工程学报, 2011, 27(4): 72-80.

Sheng Feng, Zhang Renduo, Liu Huihai, et al. Modeling preferential flow in unsaturated soil using active region model and its sensitivity analysis [J]. Transactions of the CSAE, 2011, 27(4): 72-80. (in Chinese with English abstract)

0 引 言

准确地模拟和预测水流运动和溶质传输的非均匀特性以及流体运动过程中流动非均匀特性的时空变化规律对于农业资源高效利用、污染控制和环境保护都有重要的意义^[1]。目前为止, 基于试验尺度和均匀介质假设条件下建立的连续性模型理论(如二域模型(mobile-immobile region model, MIM)^[2-3])仍是描述土壤水运动和溶质运移的主要理论方法。连续性模型理论^[4]中, 土壤基质与大孔隙相互影响和作用, 认为在同一位置基质流运动和大孔隙流运动是共同存在的, 不同的方法分别用于描述基质流动(如 Richard 方程)和大孔隙流动, 实际水流运动被认为是 2 种流动某种程度的耦合; 土壤水动力参数是影响和控制水及化学物质迁移和传输的关键资料。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, 特别是不能预测非饱和系统中快速的指状流, 而快速指状流对环境问题的研究具有特别重要的意义^[5]。分形是自然界的普遍特征^[6]。在理论上, 分形数学通过“仿射自身相似”的方法将在不同尺度上

的性质系统地联系起来, 而且可以从一个尺度的测量值来预测另外尺度的值^[6]。近年来的试验研究不断观测到优先流流动和运移过程表现出明显的分形特征^[7]。Liu 等^[7]指出离散模型之所以能被用来描述非均匀流的细部特征, 正是在于这类模型所具有的与非均匀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水流运动的活动流场模型(active region model, ARM)^[8]。活动流场模型通过模型参数与流体运动分形维数之间的关系从本质上抓住了小尺度上流体运动的细部(分形)特征^[8]。然而, 相对于土壤介质的物理和水动力性质的分形而言, 非饱和带土壤中流体运动和溶质运移分形性质的研究才刚刚起步, 对于活动流场模型模拟预测优先流运动的有效性等问题还需要进一步的研究。本文同时采用活动流场模型和二域模型模拟预测入渗后土壤含水率和溶质浓度的分布, 通过相对均方根误差(relative root mean square error, RRMSE)^[9]分析来定量评价活动流场模型预测优先流发展的有效性, 通过敏感性分析研究活动流场模型模拟预测结果(入渗深度)对模型输入参数(活动流场模型分形特征参数, γ)变化的敏感性。

1 基本理论

1.1 活动流场模型控制方程

活动流场模型下土壤水流运动和溶质运移控制方程可表示为:

收稿日期: 2010-08-29 修订日期: 2010-11-15

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(No. 50528910, No. 50609019); 湖南省教育厅优秀青年基金资助项目(10B006); 港口海岸及近海工程湖南省重点学科建设经费资助项目。

作者简介: 盛 丰(1981-), 男, 湖南株洲人, 讲师, 博士, 主要从事非饱和带土壤水动力学与水土环境方面的研究。长沙 长沙理工大学水利学院, 410114。Email: shengf.china@gmail.com

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

$$-\frac{\partial}{\partial z} \left(f\theta_a D_a \frac{\partial c_a}{\partial z} \right) + \frac{\partial(fq_a c_a)}{\partial z} + \frac{\partial(f\theta_a c_a)}{\partial t} + \frac{\partial(f\rho_b s_a)}{\partial t} - (\theta_i c_i + \rho_b s_i) \frac{\partial f}{\partial t} + fr_{aw} c_{as} = 0 \quad (2)$$

式中, z 为垂直坐标 (向上为正), cm ; f 为活动流场比例; K_a (cm/s) 和 h_a (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_a 和 θ_i 分别为活动流场和不活动流场区内的土壤含水率, cm^3/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, $1/\text{s}$; D_a 为溶质的扩散-弥散系数, cm^2/s ; 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), cm/s ; 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, g/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质量分数, g/g ; ρ_b 为土壤体积质量, g/cm^3 ; c_{as} 为活动流场区域内土壤水源汇项中的溶质浓度, g/cm^3 . f 、 K_a 和 h_a 分别由以下公式确定:

$$f = \left(\frac{\theta_a - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \right)^{\frac{\gamma}{1-\gamma}} \quad (3)$$

$$h_a = \frac{1}{\alpha} \left[\left(\frac{\theta_a - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \right)^{\frac{1}{m}} - 1 \right]^{\frac{1}{n}} \quad (4)$$

$$K_a = K_s \left(\frac{\theta_a - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \right)^{\frac{1}{2}} \left[1 - \left\{ 1 - \left(\frac{\theta_a - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \right)^{\frac{1}{m}} \right\}^m \right] \quad (5)$$

式中, γ 为活动流场模型分形特征参数; θ_s 和 θ_r 分别为土壤的饱和和体积含水率和剩余体积含水率, cm^3/cm^3 ; α (cm^{-1})、 n 、和 $m=1-1/n$ 均为 van Genuchten 土壤水分特征函数方程^[10]中的参数; K_s 为土壤的饱和水力传导度, cm/s .

1.2 二域模型控制方程

二域模型下土壤水流运动和溶质运移的控制方程可表示为:

$$-\frac{\partial}{\partial z} \left[fK_a \left(\frac{\partial h_a}{\partial z} + 1 \right) \right] + f \frac{\partial \theta_a}{\partial t} - fr_{aw} = 0 \quad (6)$$

$$-\frac{\partial}{\partial z} \left(f\theta_a D_a \frac{\partial c_a}{\partial z} \right) + \frac{\partial(fq_a c_a)}{\partial z} + f \frac{\partial(\theta_a c_a)}{\partial t} + f \frac{\partial(\rho_b s_a)}{\partial t} - fr_{aw} c_{as} = 0 \quad (7)$$

形式上, 二域模型可视为活动流场模型在活动流场区域不随时间变化 (即 f 为常数) 条件下的特例。因此, 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。

1.3 敏感性分析

敏感度的定义为: 自变量的变化率引起函数的变化率^[11]。本文仅研究不同降雨入渗水量和土壤初始含水率条件下入渗深度对活动流场模型分形特征参数 (γ) 变化的敏感度及其变化特征。

设 γ 分别等于 γ_1 和 γ_2 时, 土壤水入渗深度分别为 D_1 和 D_2 (cm), 则入渗深度对活动流场模型分形特征参数 (γ) 变化的敏感度 (SD) 可表示为:

$$SD = \frac{(D_2 - D_1)/D_1}{(\gamma_2 - \gamma_1)/\gamma_1} \quad (8)$$

SD 既可能大于 0 也可能小于 0; 大于 0 时表示参数 γ 增大引起入渗深度 (D) 增大, 反之则表示参数 γ 增大引起入渗深度 (D) 减小。| SD | 越大, 表示活动流场模型分形特征参数 (γ) 发生较小的变化时将引起入渗深度 (D) 发生较大的变化, 即入渗深度 (D) 对活动流场模型特征参数 (γ) 越敏感。

1.4 相对均方根误差和加权变异系数

1.4.1 相对均方根误差

相对均方根误差 ($RRMSE$)^[9] 通过计算模型模拟预测结果相对于实测结果的偏离程度来评价模型的有效性, 其计算公式如下:

$$RRMSE = \frac{\sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (X_{Pi} - X_{Oi})^2}}{\bar{X}_O} \quad (9)$$

式中, X_{Pi} 为变量的第 i 个模拟预测值; X_{Oi} 为变量的第 i 个观测值; \bar{X}_O 为变量观测值的平均值。

相对均方根误差 ($RRMSE$) 越大, 表明模型模拟预测结果偏离实测结果越大, 模型的模拟预测精度越低、有效性越差^[9]。

1.4.2 加权变异系数

加权变异系数^[12]用来衡量变量观测值的离散程度, 计算公式如下:

$$V_w = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2 \cdot P_i}}{\bar{X}} \quad (10)$$

式中, V_w 为变量观测值的加权变异系数; X_i 为变量的第 i 个观测值; P_i 为变量的第 i 个测量值 X_i 的权重, $\sum_{i=1}^n P_i = 1$;

\bar{X} 为变量观测值的加权平均值, 即 $\bar{X} = \sum_{i=1}^n X_i P_i$ 。

加权变异系数 V_w 越大表明变量观测值分布的离散程度越高^[12]。

2 试验设计和模拟条件设置

2.1 染色示踪试验设计

碘-淀粉染色示踪试验采用类似双套环^[13]的试验装

置(如图 1a 所示),在壤土(土壤物理性质参数^[14]如表 1 所示)条件下开展两个(试验 1 和试验 2)入渗水量均为 40 mm、试验尺寸(即内框尺寸)均为 1.0 m×1.0 m 的碘-淀粉染色示踪试验。在平整后的试验区域同心安置两个正方形框,试验开始时,在内框中注入高度为 40 mm、浓度为 20 g/L 的碘化钾溶液,同时在外框中注入与内框水头高度相等的纯水。为避免试验之间相互影响,两试验区域的间距控制在 2.0 m 以上。待碘化钾溶液完全入渗后,用防水和隔热材料将试验区覆盖,12 h 后逐层开挖水平剖面(如图 1a 所示),剖面间距 1~5 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,照相记录剖面染色模式。照相后,在染色区和未染色区分别随机采取 5 个和 3 个土样测定土壤含水率和 I 浓度分布;未染色区内的土壤含水率分布即为土壤初始含水率分布;根据测定结果, I 的初始浓度可视为 0。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。

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

土壤类型	深度/cm	土壤质地/%			体积质量/(g·cm ⁻³)	孔隙度/%	饱和水力传导度/(cm·s ⁻¹)
		>50 μm	2~50 μm	<2 μm			
壤土	0~10	29.4	49.2	21.4	1.38	38.8	3.4×10 ⁻⁴
	>10~20	28.2	49.4	22.4	1.40	40.2	1.2×10 ⁻⁴
	>20~50	31.3	46.2	22.5	1.44	40.6	1.1×10 ⁻⁴
	>50~100	32.1	44.8	23.1	1.45	44.4	1.1×10 ⁻⁴
砂土	0~10	100	0	0	1.45	40.2	6.44×10 ⁻⁴
	>10~20	100	0	0	1.46	40.4	4.24×10 ⁻⁴
	>20~50	100	0	0	1.48	39.2	3.76×10 ⁻⁴
	>50~100	100	0	0	1.50	38.9	3.76×10 ⁻⁴

亮蓝染色示踪试验在砂土(土壤物理性质参数^[14]如表 1 所示)条件下进行,共开展两个试验(试验 3 和试验 4)。在选定的区域(均为 4.0 m×3.0 m)内,通过微喷灌系统(如图 1b 所示)将浓度均为 4 g/L 的亮蓝染色剂和 CI 混合溶液以 0.015 mm/s 的强度均匀喷洒到土壤表面(实测灌水均匀度为 90.2%),喷洒持续时间为 40 min(即总的入渗水量为 36 mm)。为了避免试验之间相互影响,两试验区域的间距控制在 2.0 m 以上。待溶液完全入渗后,用防水和隔热材料将试验区上层覆盖,防止水分蒸发。试验开始前在保护区的一侧开挖一个工作剖面,取样测定土壤初始含水率分布。24 h 后,沿 x 方向逐层挖取土壤,剖面间距为 10 cm(如图 1b 所示)。形成垂直方向的剖面后照相记录染色示踪剂所显示的水流运动空

间分布模式(染色模式)。照相后,在每一剖面深度为 0、10、20、30、40、50、60、80 和 100 cm 处按水平间距为 50 cm 取样测定土壤含水率和 CI 浓度的分布(如图 1b 所示)。此外,在每一剖面上优先流最明显的区域(具有最大宽度和深度的优先流通道,如图 1b 所示)按水平和垂直间距均为 5 cm 采样测定土壤含水率和 CI 浓度的分布。未染色区内的土壤含水率分布即为土壤初始含水率分布;根据测定结果, CI 的初始浓度可视为 0。除了取土样测定入渗前后土壤含水率和 CI 浓度分布之外,在剖面位置为 X=0、150 和 300 cm 处、深度分别为 0~10、>10~20、>20~50 和 >50~100 cm 处取土样测定土壤水分特征曲线^[14](如图 2 所示)。

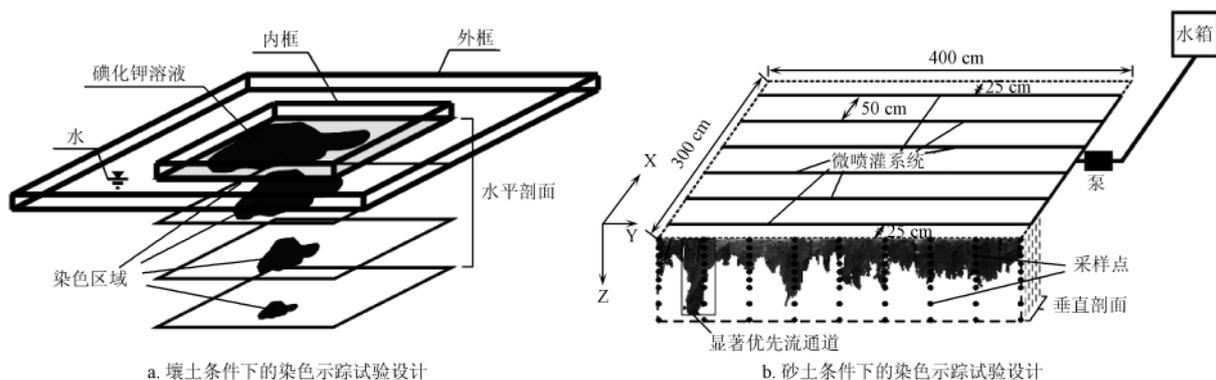


图 1 壤土(a)和砂土(b)条件下的染色示踪试验设计

Fig.1 Diagram of experimental set-up for dye staining experiments conducted in loam (a) and sand (b)

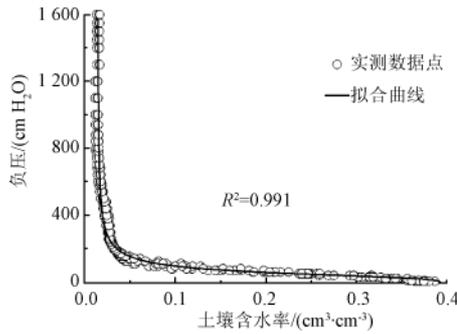


图 2 砂土的土壤水分特征曲线
Fig.2 Soil water retention curve of sand

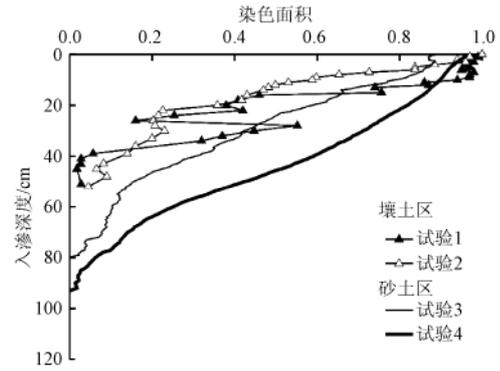


图 3 各染色示踪试验的染色面积分布
Fig.3 Stained coverage distributions for the plots

所有的照片均按照 Morris 和 Mooney 提出临界值方法^[15]进行处理, 根据照相图片的 RGB(R: red, G: green, B: blue) 值信息将染色照片转化成黑 (染色) 白 (未染色) 的二元化信息图片。

2.2 模型检验的模拟条件设置

采用活动流场模型和二域模型分别对剖面开挖时刻染色区内的土壤含水率和溶质 (I 和 CI) 浓度分布以及最大入渗深度 (Z_{max}) 进行模拟。根据试验设置, 上边界设定为大气边界条件, 下边界设定为渗透面边界条件^[16]。活动流场模型中, 活动流场区域面积通过本构方程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染色面积分布作为已知量输入。土壤初始含水率分布根据实测土壤含水率分布设定, 初始 I (试验 1 和试验 2) 和 CI (试验 3 和试验 4) 浓度均为 0。壤土的 van Genuchten 土壤水分特征曲线参数根据土壤质地由 RETC 程序^[17]确定, 砂土的 van Genuchten 土壤水分特征曲线参数由试验直接确定 (如图 2 所示)。壤土和砂土的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加权平均值。I 和 CI 在纯水中的扩散系数 (D_d)、在壤土和砂土中的纵向弥散系数 (D_l) 分别根据相关文献^[16,18]设定。壤土和砂土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。

表 2 模型检验的水动力和溶质运移输入参数设置

Table 2 Hydraulic and solute transport parameters for model evaluation

土壤类型	水动力参数					溶质运移参数		
	θ_r ($\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$)	θ_s ($\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$)	α cm^{-1}	n	K_s ($\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$)	ρ_b ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	D_d ($\text{cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$)	D_l cm
壤土	0.067	0.409	0.0075	1.565	1.50×10^{-4}	1.425	2.032×10^{-5}	1.0
砂土	0.015	0.393	0.0195	3.095	4.08×10^{-4}	1.485	2.045×10^{-5}	1.0

注: θ_r 为剩余含水率, θ_s 为饱和含水率, α 和 n 均为 van Genuchten 土壤水分特征函数方程^[9]中的参数, K_s 为饱和水力传导度, ρ_b 为土壤的体积质量, D_d 为离子在纯水中的扩散系数, D_l 为离子在壤土和砂土中的纵向弥散系数。

2.3 敏感性分析的模拟条件设置

根据染色示踪试验设计, 同时为了研究方便, 对敏感性分析模拟计算的初始条件、边界条件和模拟时长做如下简化和规定: 1) 上边界设定为大气边界条件, 下边界设定为渗透面边界条件^[16]; 2) 土壤初始含水率在整个

入渗深度范围内均匀分布, 当没有降雨时, 土壤初始含水率在整个模拟时间段内不发生明显的重分布; 3) 降雨发生在整个入渗过程的初始阶段, 降雨持续时间 2 h, 模拟入渗时间 24 h, 以保证降雨集中并提高模拟计算精度; 4) 降雨在降雨持续期内均匀分布, 降雨强度能保证在入渗时间段内湿润锋具有较大的迁移距离以提高计算精度。综合考虑以上 4 个条件的入渗水量和初始含水率设置如表 3 所示。4 种土壤的土壤水动力参数按照文献^[19]设定, 如表 3 所示。

表 3 敏感性分析的土壤水动力参数和入渗条件设置

Table 3 Hydraulic parameter and infiltration condition settings for sensitivity analysis

土壤类型	θ_r ($\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$)	θ_s ($\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$)	α cm^{-1}	n	K_s ($\text{cm} \cdot \text{d}^{-1}$)	入渗水量/cm		土壤初始含水率/ ($\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$)	
						下限	上限	下限	上限
黏土	0.068	0.38	0.008	1.09	4.80	0.02	0.20	0.17	0.25
粉土	0.034	0.46	0.016	1.37	6.00	0.04	0.40	0.12	0.20
壤土	0.078	0.43	0.036	1.56	24.96	0.10	1.00	0.12	0.20
砂土	0.045	0.43	0.145	2.68	712.8	1.20	12.0	0.06	0.10

注: θ_r 为剩余含水率, θ_s 为饱和含水率, α 和 n 均为 van Genuchten 土壤水分特征函数方程^[9]中的参数, K_s 为饱和水力传导度。

3 结果与分析

3.1 活动流场模型分形特征参数计算

图 3 为各试验条件下染色面积随入渗深度的分布, 各试验入渗前后土壤含水率分布分别如图 4a 和 b 所示。由于入渗水重分布过程中使得上层土壤含水率下降和活动流场收缩, 从而导致活动流场区域和染色区域不重合。因此, 拟合活动流场模型分形特征参数时应仅选择活动流场区域和染色区域相重合深度范围内的数据点 (染色面积和染色区内的土壤含水率)。对试验 1 和试验 2, 它们染色区内的土壤含水率沿入渗方向逐渐减小, 最大土壤含水率出现在土壤表层且接近饱和含水率, 因此, 在试验 1 和试验 2 中, 整个入渗深度范围内染色区与活动流场区都是基本重合的。对试验 3 和试验 4 来说, 仅在最大染色区含水率发生深度以下的土层中, 染色面积与染色区内土壤含水率具有相同的分布模式: 随入渗深度的增大而减小。因此, 试验 3 和试验 4 中, 仅在最大染色区含水率发生深度以下土层中, 染色区与活动流场区

是基本重合的。Sheng 等^[20]的研究表明,由于深层土壤的初始含水率对入渗后染色区内土壤含水率分布的影响较大,拟合活动流场模型分形特征参数值时需剔除这一部分数据点。因此,对试验 1 和试验 2 采用 0~0.75 Z_{\max} 深度范围内的数据点拟合活动流场模型分形特征参数;对试验 3 和试验 4 分别采用 35~70 和 40~80 cm 深度范围内的数据拟合活动流场模型分形特征参数(即剔除最下两层受土壤初始含水率影响较大的数据点)。各试验拟合的 γ 值及决定系数 (R^2) 如表 4 所示。

表 4 各试验的模型参数拟合结果和模型模拟计算结果
Table 4 Fitted and simulated results for the dye staining experiments

土壤类型	试验	γ	R^2	Z_{\max}/cm			土壤含水率 $RRMSE$		溶质浓度 $RRMSE$	
				实测	ARM	MIM	ARM	MIM	ARM	MIM
壤土	试验 1	0.788	0.954	51	46	39	1.66	2.60	1.12	1.44
	试验 2	0.720	0.943	54	48	43	1.40	2.72	1.27	1.52
砂土	试验 3	0.571	0.982	80	78	69	0.86	1.86	0.80	1.87
	试验 4	0.459	0.963	93	86	77	0.32	0.78	0.42	1.12

注: γ 为活动流场模型分形特征参数, R^2 为拟合结果的决定系数, Z_{\max} 为最大入渗深度, $RRMSE$ 为相对均方根误差, ARM 为活动流场模型模拟结果, MIM 为二域模型模拟结果。

3.2 模型模拟结果分析

活动流场模型和二域模型模拟预测土壤水流运动结果分别如图 4a 和 b 所示。各试验的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 4 所示。表 4 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。活动流场模型和二域模型对最大入渗深度预测的差异在于两个模型对活动流场区域的不同处理上:活动流场模型中活动流场是可变的,是土壤含水率的函数;而二域模型中活动流场是不随时间变化的。由于活动流场模型中活动流场是可变的并能随着活动流场区内土壤含水率的降低而收缩,因此使得活动流场模型下的活动流场

具有更高的土壤含水率和更大的非饱和水力传导度,进而在湿润锋附近形成更高的水势梯度。因此,在相同的入渗条件下,活动流场模型模拟预测的土壤水流比二域模型模拟预测的土壤水流具有更大的流速。

活动流场模型和二域模型模拟预测染色区内溶质浓度分布(试验 1 和试验 2 中模拟计算的是 I 浓度分布,试验 3 和试验 4 中模拟计算的是 Cl 浓度分布)结果分别如图 5a 和 b 所示。根据图 4a 和 b 及图 5a 和 b 的结果计算活动流场模型和二域模型模拟预测各试验入渗后染色区土壤含水率和溶质浓度分布的相对均方根误差 ($RRMSE$) 如表 4 所示。表 4 显示,活动流场模型模拟计算的各试验入渗后染色区内的土壤含水率和溶质浓度分布结果比二域模型模拟预测的结果具有更小的相对均方根误差,表明活动流场模型的模拟预测结果更接近于实测结果。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^[21-22],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^[8],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。因此,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。Sheng 等^[20]的研究表明,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;此外,Liu 等^[8]的研究表明,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。而实际的流动模式(染色面积分布,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。

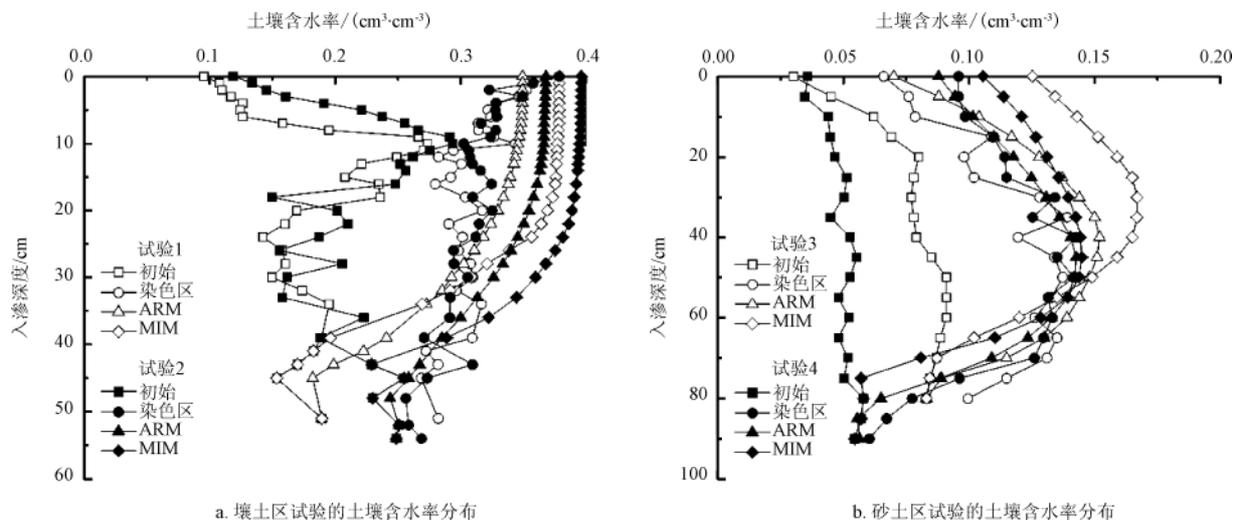


图 4 活动流场模型和二域模型模拟壤土区 (a) 和砂土区 (b) 入渗后染色区土壤含水率分布图

Fig.4 Predicted distributions of soil water content after infiltration for the plots conducted in loam (a) and sand (b) using the ARM and MIM

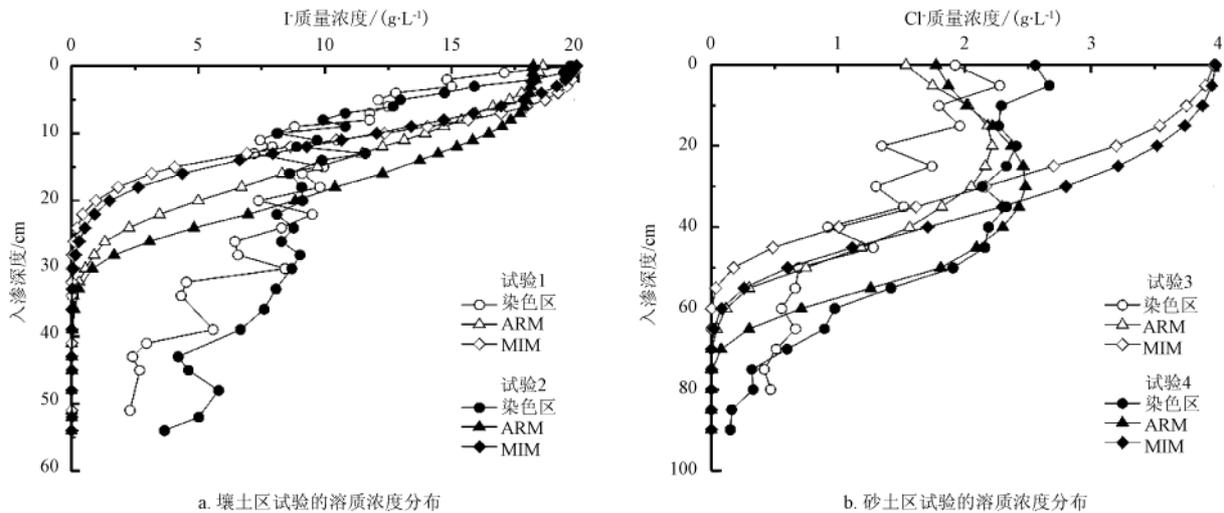


图5 活动流场模型和二域模型模拟壤土区 (a) 和砂土区 (b) 入渗后染色区溶质浓度分布图

Fig.5 Predicted distributions of solute concentration after infiltration for the plots conducted in loam (a) and sand (b) using the ARM and MIM

相对均方根误差 (*RRMSE*) 计算结果 (表4) 显示, 砂土条件下活动流场模型模拟计算的土壤含水率和溶质浓度分布结果要比壤土条件下活动流场模型模拟计算结果的准确度高 (即砂土条件下活动流场模型模拟计算结果具有较小的相对均方根误差值)。这主要是由两个因素所形成的:

首先, 壤土和砂土的土壤水分特征曲线参数的确定方法和准确度不同。壤土的 *van Genuchten* 土壤水分特征曲线参数是根据土壤质地由 *RETC* 程序确定的, 而砂土的 *van Genuchten* 土壤水分特征曲线参数是由试验直接测定的。因此, 模型模拟时, 砂土试验输入的土壤水分特征曲线参数更准确, 从而可以得到更为精确的预测结果。

其次, 壤土和砂土的土壤物理性质参数随深度变化的变异程度不同。相对而言, 壤土的土壤物理性质参数随入渗深度分布的变异性更大。根据表1计算壤土的孔隙度和饱和水力传导度在入渗深度范围内的加权变异系数^[12] (物理量不同深度范围测量值的权重 P_i = 各测量值的取值深度范围/总的采样深度) 分别为 0.05 和 0.51, 而砂土的孔隙度和饱和水力传导度在入渗深度范围内的加权变异系数分别为 0.01 和 0.20。加权变异系数计算结果表明壤土的土壤物理性质参数在入渗深度范围内的变异程度明显高于砂土的土壤物理性质参数在入渗深度范围内的变异程度。模型模拟时, 用土壤物理性质参数在整个入渗深度范围内测量值的加权平均值作为输入值, 由于壤土的物理性质参数的变异程度较大, 因而模型输入参数的代表性较差、模型模拟计算结果的精度较低; 砂土的物理性质参数的变异程度较小, 因而模型输入参数的代表性较好、模型模拟计算结果的精度较高。

3.3 敏感性分析

不同土壤质地、入渗水量和土壤初始含水率条件下, 活动流场模型模拟预测的入渗深度对活动流场模型分形特征参数 (γ) 变化的敏感度的计算结果如图 6a~d 所示。图 6a~d 表明:

1) 不论土壤类型、入渗水量和土壤初始含水率如何, 入渗深度对活动流场模型分形特征参数的敏感度始终大于 0。说明在任意入渗条件下, 活动流场模型分形特征参数 (γ) 的增大, 都能引起模型预测入渗深度的增大。这是因为, 当其它入渗条件相同而活动流场模型分形特征参数值增大时, 活动流场区域面积将进一步收缩, 从而使得优先流流场内的水势梯度和非饱和水力传导度都进一步增大, 由此活动流场模型将产生更大的土壤水入渗深度预测结果。

2) 当降雨入渗水量和土壤初始含水率相同时, 入渗深度对活动流场模型分形特征参数 (γ) 的敏感度随着 γ 的增大而增大。说明优先流的发展程度越高时 (γ 越大), 活动流场模型模拟预测结果 (如入渗深度) 对输入的活动的流场模型分形特征参数 (γ) 的变化越敏感。研究结果同时表明, 土壤优先流越发达时, 流动非均匀程度的微小增大将引起流速 (也即入渗深度) 的剧烈增大, 大幅降低污染物的降解时间和到达地下水位的时间; 此外, 土壤水流运动非均匀程度越高时 (γ 越大), 污染物迁移时所通过的土壤范围越小^[8,20], 从而减少了土壤颗粒对污染物的吸附和截留。所有这些都将增大地下水受污染的风险。

3) 相同活动流场模型分形特征参数 (γ) 值条件下, 活动流场模型模拟预测的入渗深度对 γ 的敏感度随着降雨入渗水量的增大和土壤初始含水率的升高而减小。也就是说, 入渗水量增大和土壤初始含水率升高时, 将降低活动流场模型分形特征参数对模型模拟预测结果 (入渗深度) 的影响。当入渗水量足够大时, 活动流场内的土壤含水率将上升到饱和含水率状态, 活动流场也将扩张到整个流动区域 (即 $f=1$); 当土壤初始含水率为饱和含水率状态时, 土壤水也将整个流动区域上运动 (即 $f=1$)。此时, 活动流场模型分形特征参数的变化将不会再引起活动流场区域面积和流场内土壤含水率的变化, 因此对模型模拟预测的入渗深度将不再产生影响。

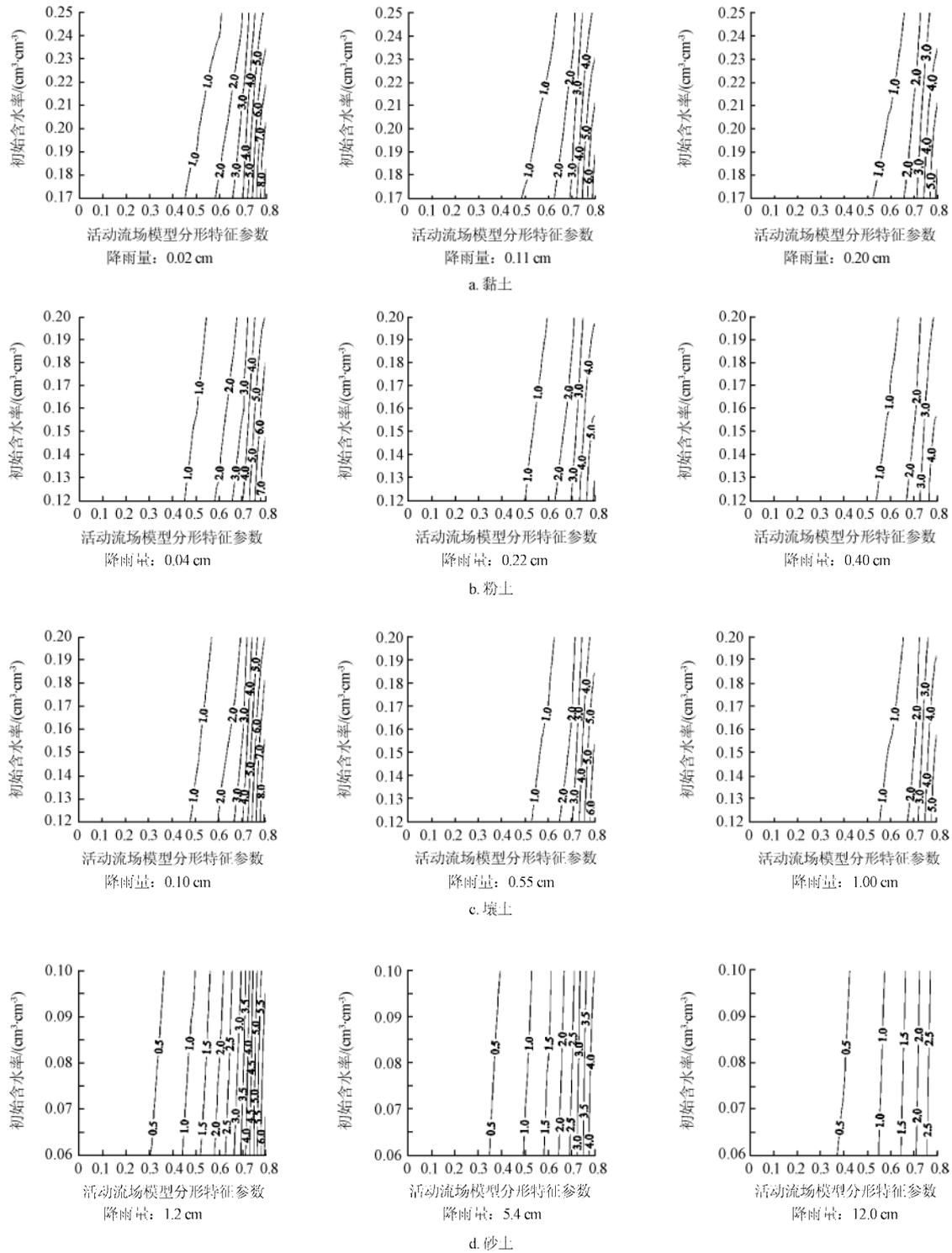


图6 不同土壤质地、入渗量和土壤初始含水率条件下, 入渗深度对活动流场模型分形特征参数(γ)变化的敏感度
Fig.6 Sensitivity of infiltration depth with respect to ARM parameter (γ) under different soil texture, initial soil water content and infiltration amount conditions

4 结论

活动流场模型中, 优先流流场是变化的, 优先流流场面积可表示为流场内土壤含水率的函数, 模型通过输入的活动流场模型分形特征参数控制优先流的形成和发展; 二域模型中, 优先流流场是固定不变的, 优先流流场面积分布作为已知参数输入模型。研究结果显示, 由

于活动流场模型中活动流场是可变的并能随着活动流场区内土壤含水率的降低而收缩, 使得活动流场模型下的土壤水流运动和溶质运移发生在较小的土壤范围, 从而具有更高的流动和运移速度, 活动流场模型模拟预测的入渗深度较二域模型模拟预测的入渗深度大, 也更接近于染色示踪试验实测的入渗深度。相对均方根误差分析显示, 活动流场模型模拟计算的各试验入渗后染色区内

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更接近于实测结果, 活动流场模型较好的捕捉到了优先流运动整体的非均匀特征。敏感性分析结果显示, 在任意入渗条件下, 活动流场模型分形特征参数 (γ) 的增大, 都能引起模型预测优先流入渗深度的增大; 优先流的发展程度越高时 (γ 越大), 活动流场模型模拟预测结果 (如入渗深度) 对输入的活动流场模型分形特征参数 (γ) 的变化越敏感; 土壤初始含水率升高和入渗水量增大时, 将削弱活动流场模型分形特征参数值对模拟入渗预测结果的影响。

[参 考 文 献]

- [1] Quisenberry V L, Phillips R E, Zeleznik J M. Spatial distribution of water and chloride flow in a well-structured soil[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1994, 58(5): 1294—1300.
- [2] Šimůnek J, Jarvis N J, van Genuchten M Th, et al. Review and comparison of models for describing non-equilibrium and preferential flow and transport in the vadose zone[J]. *Journal of Hydrology*, 2003, 272(1/4): 14—35.
- [3] van Genuchten M Th, Wierenga P J. Mass transfer studies in sorbing porous media. I. Analytical solutions[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1976, 40(4): 473—481.
- [4] Luding R, Gerke H H, Wendroth O. Describing water flow in macroporous field soils using the modified macro model[J]. *Journal of Hydrology*, 1999, 215(1/4): 135—152.
- [5] Lipsius K, Mooney S J. Using image analysis of tracer staining to examine the infiltration patterns in a water repellent contaminated sandy soil[J]. *Geoderma*, 2006, 136(3/4): 865—875.
- [6] Mandelbrot B B. *Fractals*. Encyclopedia of Physical Science and Technology[C]//Academic Press, Inc., San Diego CA, 1987: 579—593.
- [7] Liu H, Zhang G, Bodvarsson G S. The active fracture model: Its relation to fractal flow behavior and a further evaluation using field observations[J]. *Vadose Zone Journal*, 2003, 2(2): 259—269.
- [8] Liu H, Zhang R, Bodvarsson G S. An active region model for capturing fractal flow patterns in unsaturated soils: Model development[J]. *Journal of Contaminant Hydrology*, 2005, 80(1/2): 18—30.
- [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[J]. *Vadose Zone Journal*, 2006, 5(3): 1005—1016.
- [10] van Genuchten M Th. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1980, 44(5): 892—898.
- [11] Coleman G, DeCoursey D G. Sensitivity and model variance analysis applied to some evaporation and evapotranspiration models[J]. *Water Resources Research*, 1976, 12(5): 873—879.
- [12] Bechar A, Vitner G. A weight coefficient of variation based mathematical model to support the production of 'packages labelled by count' in agriculture[J]. *Biosystems Engineering*, 2009, 104(3): 362—368.
- [13] Yasuda H, Berndtsson R, Persson H, et al. Characterizing preferential transport during flood irrigation of a heavy clay soil using the dye Vitasyn Bluea[J]. *Geoderma*, 2001, 100(1/2): 49—66.
- [14] Dane J H, Topp G C. *Methods of Soil Analysis. Part 4. Physical Methods*[M]. SSSA Book Series, Volume 5. Soil Science Society of America Journal, Madison, WI, 2002.
- [15] Morris C, Mooney S J. A high-resolution system for the quantification of preferential flow in undisturbed soil using observations of tracers[J]. *Geoderma*, 2004, 118(1/2): 133—143.
- [16] Šimůnek J, Vogel T, van Genuchten M Th. The SWMS_2D code for simulating water flow and solute transport in two-dimensional variably saturated media[R]. Version 1.21, Research Report No. 132. US Salinity Laboratory, Riverside, CA, 1994.
- [17] van Genuchten M Th, Leij F J, Yates S R. *The RETC Code for Quantifying the Hydraulic Functions of Unsaturated Soils*[R]. US Environmental Protection Agency, 1991.
- [18] Vanysek P. Ionic conductivity and diffusion at infinite dilution[M]. In: *CRC Handbook of Chemistry and Physics* (83rd Edn; ed. D.R. Lide). CRC Press, Boca Raton, 2002.
- [19] Carsel R F, Parrish R S. Developing joint probability distributions of soil water retention characteristics[J]. *Water Resources Research*, 1988, 24(5): 755—769.
- [20] Sheng F, Wang K, Zhang R, et al. Characterizing soil preferential flow using iodine-starch staining experiments and the active region model[J]. *Journal of Hydrology*, 2009, 367(1/2): 115—124.
- [21] 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[J]. *Journal of Hydrology*, 1999, 215(1/4): 116—134.
- [22] van Dam J C, Wosten J H M, Nemes A. Unsaturated soil water movement in hysteretic and water repellent field soils[J]. *Journal of Hydrology*, 1996, 184(3/4): 153—173.

Modeling preferential flow in unsaturated soil using active region model and its sensitivity analysis

Sheng Feng^{1,2}, Zhang Renduo³, Liu Huihai⁴

(1. School of Hydraulic Engineering, Changsha University of Science and Technology, Changsha 410114, China; 2. Hunan Provincial Key Laboratory of Water and Sediment Science and Water Hazard Prevention, Changsha University of Science and Technology, Changsha 410114, China; 3. School of Environmental Science and Engineering, Zhongshan University, Guangzhou 510275, China; 4. Earth Sciences Division, Lawrence Berkeley National Laboratory, Berkeley, CA 94720, USA)

Abstract: A total of 4 dye infiltration experiments, using iodine-starch staining method and Brilliant Blue dye staining method, were conducted in loam and sand with various initial and boundary conditions. The measured soil water content and solute concentration distributions resulted from preferential flow were simulated and predicted using active region model (ARM) and mobile-immobile region model (MIM), and were evaluated and compared using the relative root mean square error (RRMSE) analysis. Furthermore, sensitivity analysis was conducted to study the impacts of ARM parameter (γ) on the predictions using ARM with various infiltration conditions. The model evaluation and comparison revealed that, ARM produced more accurate infiltration depth, and soil water content and solute concentration distributions predictions; the ARM captured the macroscopic behavior of preferential flow and transport. Sensitivity analysis revealed that, the predicted infiltration depth using ARM was more sensitive to ARM parameter (γ) when the ARM parameter (γ) was higher; while the predicted infiltration depth using ARM was less sensitive to the ARM parameter (γ) under higher infiltration amount and higher initial soil water content conditions.

Key words: fractal, solute transport, soils, preferential flow, active region model, mobile-immobile region model, dye infiltration experiment, sensitivity analysis