

入渗水量和试验尺度对土壤水非均匀流动的影响

唐泽华^{1,2}, 盛丰^{1,2}, 高云鹏¹

(1. 长沙理工大学 水利工程学院, 湖南 长沙 410114; 2. 武汉大学 水资源与水电工程科学国家重点实验室, 湖北 武汉 430072)

摘要: [目的] 研究入渗水量和试验尺度对土壤水非均匀流动(最大入渗深度和平均入渗深度、土壤水流运动非均匀程度和土壤优先流尺寸的影响)的影响,为农业灌溉施肥的高效利用、地下水环境保护以及流域水文过程预测等方面提供理论支撑。[方法] 采用亮蓝染色示踪方法在砂土条件下开展了 9 组 18 个(每组 2 个重复)不同入渗水量(分别为 1.25、2.5 和 5.0 cm)和试验尺度(分别为 0.25 m×0.25 m、0.5 m×0.5 m 和 1.0 m×1.0 m)的入渗试验。[结果] (1) 相同试验尺度条件下,土壤水最大入渗深度和平均入渗深度均随着入渗水量的增大而增大;土壤水流运动非均匀程度随入渗水量的增大而先增大后减小。(2) 相同入渗水量条件下,当入渗水量较小时,土壤水最大入渗深度和土壤水流运动非均匀程度随着试验尺度的增大而增大;当入渗水量很大时,试验尺度的变化对最大入渗深度和土壤水流运动非均匀程度的影响不明显。(3) 入渗水量的增加和试验尺度的增大都将使得优先流通道尺寸增大。[结论] 入渗水量和试验尺度对土壤优先流运动有重要影响。

关键词: 入渗水量; 试验尺度; 染色示踪试验; 非均匀特征

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2015)02-0173-06

中图分类号: S152

Effects of Infiltration Amount and Experimental Scale on Heterogeneous Soil Water Flow

TANG Ze-hua^{1,2}, SHENG Feng^{1,2}, GAO Yun-peng¹

(1. School of Hydraulic Engineering, Changsha University of Science &

Technology, Changsha, Hu'nan 410114, China; 2. State Key Lab. of Water

Resources and Hydropower Engineering Science, Wuhan University, Wuhan, Hubei 430072, China)

Abstract: [Objective] To study the effects of infiltration amount and experimental scale on heterogeneous soil water flow (including both the maximum infiltration depth and the average infiltration depth, preferential flow heterogeneity and the size of preferential flow path), in order to provide theoretical support for efficient use of agricultural irrigation-fertilization, protection of groundwater environment and prediction of hydrological process etc. [Methods] 18 infiltration experiments, using the comassie brilliant blue staining as the dye tracer, were conducted in sand soil with various infiltration amounts (i. e. 1.25, 2.5 and 5.0 cm) and experimental scales (i. e. 0.25 m×0.25 m, 0.5 m×0.5 m and 1.0 m×1.0 m). [Results] (1) Both the maximum infiltration depth and the average infiltration depth increase with the increasing of infiltration amount under the same experimental scale, and the preferential flow heterogeneity increases firstly and then decreases with the increasing of the infiltration amount under the same experimental scale; (2) While under the same infiltration amount condition, the maximum infiltration depth and the preferential flow heterogeneity increase with the experimental scale when the infiltration amount is relatively small but the maximum infiltration depth and the preferential flow heterogeneity keep almost unchanged when the infiltration amount is considerably high; (3) Furthermore, the increasing of infiltration amount and experimental scale both make the preferential flow path expanded. [Conclusion] The infiltration amount and experimental scale have obvious impacts on the heterogeneous soil water flow.

Keywords: infiltration amount; experimental scale; dye infiltration experiment; heterogeneity

收稿日期: 2014-06-30

修回日期: 2014-07-20

资助项目: 国家自然科学基金项目“土壤优先流流动分形的时空特征和两区一两阶段分形模型研究”(51109017); 湖南省自然科学基金项目(13JJ3069); 水资源与水电工程科学国家重点实验室开放基金项目(2012B097)

第一作者: 唐泽华(1989—), 男(汉族), 湖南省湘潭市人, 硕士研究生, 研究方向为农田水利工程。E-mail: tzh7017@hotmail.com。

通信作者: 盛丰(1981—), 男(汉族), 湖南省株洲市人, 副教授, 主要从事水土环境方面的研究。E-mail: fsaint8586@163.com。

水和溶质在下渗过程中,沿某些特定路径运动而绕过绝大部分土壤的现象称之为优先流^[1]。优先流是自然土壤中常见的和重要的水和溶质运动形式。土壤中的水和溶质在优先流通道内快速移动,增大了农业灌水和施肥的渗漏损失,也缩短了污染物在土壤中停留降解的时间^[2]。而且,由于优先流只沿某些特定路径运动而绕过绝大部分土壤,减少了土壤颗粒对污染物的吸附和截留^[2]。所有这些都极大地增加地下水和地表水受污染的风险。因此,准确描述土壤中的优先流过程对农业灌溉施肥的高效利用、地下水环境的保护以及流域水文过程的预测都有着重要的意义^[3]。优先流表现形式很多,如大孔隙流、环绕流、管流、沟槽流、指流、漏斗流、短路流、部分置换流、地下强径流、非饱和重力流、异质流、摆动流及低洼再蓄满等,其运移过程一般具有环绕性和非平衡性两个重要特征^[1]。由于内在和外在因素的影响,导致优先流路径具有空间可变性。其中内在因素主要包括土壤性质、生物因素、土壤初始含水量等因素;外在因素主要有降雨强度和灌溉方法、耕作方式、干湿和冻融交替等因素,并且外在因素的影响程度也是最大的^[1]。由于优先流表现形式多样、影响因素众多,因此增加了对研究的难度。近些年来,染色示踪方法被广泛用来研究土壤优先流运动。该方法将颜色不同于土壤底色的染色剂溶于水并随水流入渗,水流经过的区域由于含有染色剂而被染成明显不同于土壤原来的颜色,从而将水流流过的区域(优先流区域)与水流未流经的区域(优先流绕过的区域)区分开来^[4]。其中,食品级亮蓝由于其价格便宜、在水中的溶解度高、随水流运动的一直性较好和无毒等优点,已被广泛应用于各种室内和野外试验研究中^[5-6]。通过对染色模式信息的提取和分析,可以定量研究土壤优先流流场的非均匀分布特征^[4]以及非均匀水流运动和溶质输移特征^[7],进而可对相关模型进行检验和评价^[8]。由于土壤黏粒对亮蓝分子的吸附作用,特别是黏粒含量较高时引起亮蓝分子的迁移速率明显小于土壤水流入渗湿润锋的迁移速率,限制了亮蓝作为染色示踪剂在黏性土壤中的应用^[9-11]。但对于砂性土壤,亮蓝仍

然是最为常用的染色示踪剂。近年来,一些在黏性土壤条件下开展的示踪试验同时使用亮蓝和无机离子(如 Cl^- , I^- 和 NO_3^- 等)作为示踪剂,通过亮蓝来示踪大孔隙和裂隙中的水流运动,通过无机离子来示踪土壤基质中的水流运动,以此来研究不同介质之间流动的联系和差异^[12]。此外,亮蓝染色示踪技术也被与 CT 扫描技术结合使用,用来可视化优先流运动的动态特征^[13]。本研究采用染色示踪方法,利用亮蓝溶液示踪砂土中的非均匀水流运动路径,分析不同入渗条件下染色模式(即优先流通道)的分布特征,在此基础上研究入渗水量和试验尺度对土壤水非均匀流动的影响。

1 理论和方法

1.1 染色示踪试验技术

田间试验于 2004 年 4—8 月在日本鸟取大学干燥地研究中心进行。试验区域土壤为砂土,土壤的物理和水动力参数详见表 1。试验采用类似于双套环试验的试验装置。在 1 hm^2 的试验场地内开展了 9 组共 18 个(每组两个重复)不同入渗水量(共 3 种,分别为 1.25、2.5 和 5.0 cm)和不同试验尺度(即内框尺寸,共 3 个尺度,分别为 $0.25 \text{ m} \times 0.25 \text{ m}$, $0.5 \text{ m} \times 0.5 \text{ m}$ 和 $1.0 \text{ m} \times 1.0 \text{ m}$)的染色示踪试验(各试验的详细入渗水量和试验尺度条件设置详见表 2)。每个试验的外框尺寸均为 $2.0 \text{ m} \times 2.0 \text{ m}$ 。为了避免试验之间的相互影响,各试验处理之间的间距控制在 3 m 以上。试验开始前先对试验区域土壤进行平整,并小心的剪去地表植物,尽可能的不破坏土壤的原状结构。考虑到土壤含水量不同对于试验结果可能造成的影响,试验前用 5~6 d 的时间将试区土壤充分饱和^[5]。试验开始时,在内框中注入设定高度的浓度为 4 g/L 亮蓝溶液,同时在外框中注入与内框水头高度相等的清水。待亮蓝溶液完全入渗后,用防水和隔热材料将试验区覆盖 24 h 后开挖水平剖面,剖面间距控制在 1~5 cm 之内。水平剖面形成后用数码相机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)。

表 1 试验区域土壤的物理性质参数

深度/cm	土壤质地/%			容重/ ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	孔隙度/%	饱和水力传导度/ ($\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$)
	>50 μm	2~50 μm	<2 μm			
0—10	88	4	8	1.55	39.53	3.30×10^{-3}
10—20	96.5	0.2	3.3	1.52	40.21	2.66×10^{-2}
20—50	100	0	0	1.43	38.67	3.76×10^{-2}
50—100	100	0	0	1.51	38.55	3.76×10^{-2}

表 2 各试验的试验条件设置和相关计算结果

试验尺度/m ²	入渗水量/cm	试验编号	Z _{max} /cm	Z _{mean} /cm	C _u /%	X/cm	Y/cm
0.25×0.25	1.25	E(1)	52	23.2	31.11	10.0	9.0
		E(2)	32	20.7	21.71	8.0	7.0
0.25×0.25	2.5	E(3)	48	23.4	40.29	12.0	9.0
		E(4)	56	26.2	46.43	18.0	13.0
0.25×0.25	5.0	E(5)	115	61.3	42.04	18.0	21.0
		E(6)	118	68.3	28.61	18.0	22.0
0.5×0.5	1.25	E(7)	34	16.3	28.67	21.0	14.0
		E(8)	62	21.3	38.48	16.0	32.0
0.5×0.5	2.5	E(9)	75	38.1	40.33	35.0	28.0
		E(10)	72	29.9	52.93	28.0	34.0
0.5×0.5	5.0	E(11)	116	61.4	26.80	45.0	50.0
		E(12)	106	50.2	25.67	20.0	25.0
1.0×1.0	1.25	E(13)	79	34.8	52.84	41.0	90.0
		E(14)	73	22.1	47.67	52.0	37.5.0
1.0×1.0	2.5	E(15)	77	42.2	44.55	37.5	60.0
		E(16)	100	40.8	56.40	67.5	67.5.0
1.0×1.0	5.0	E(17)	113	67.5	32.79	75.0	80.0
		E(18)	100	54.9	29.79	60.0	45.0

注:Z_{max}为土壤水最大入渗深度;Z_{mean}为土壤水平均入渗深度;C_u为入渗深度分布非均匀系数;X和Y分别为X方向和Y方向的优先流尺寸。

1.2 数字图像处理技术

所有照片均采用 Morris 和 Mooney 提出的临界值方法^[14],根据照片的 RGB 值信息将染色图片转化成黑(染色)和白(未染色)二值化图片。在此基础上,运用计算机对土壤水流分布和运动模式进行定量的分析计算。

1.3 入渗深度分布非均匀系数

由于侧向入渗和流动的非均匀性等因素,最大入渗深度以上的土壤并未完全染色,因此最大入渗深度分布并不能完全描述土壤水流运动的非均匀特征,由此引入实际入渗深度^[3,15-16]:

$$h_a(x,y) = \sum_{i=1}^k \beta(x,y,z) \Delta h_i \quad (1)$$

式中: $h_a(x,y)$ —— (x,y) 位置的实际入渗深度(cm),如果水流运动经过 (x,y,z) 位置(被染色),则 $\beta(x,y,z)=1$,反之, $\beta(x,y,z)=0$; Δh_i ——相邻两水平剖面的垂直间距(cm); k ——试验的总剖面数。

土壤水实际入渗深度分布非均匀系数^[4,15]定义为:

$$C_u = \frac{\sum |h_a(x,y) - \bar{h}_a|}{N \bar{h}_a} \times 100\% \quad (2)$$

式中: C_u ——土壤水实际入渗深度分布非均匀系数; \bar{h}_a ——实际入渗深度平均值(cm); N ——试验区域(X—Y平面)的像素点总数。

对每个试验所开挖的所有剖面进行综合分析,可

以计算出土壤水入渗深度分布非均匀系数(C_u)。 C_u 越大表明流动的非均匀性越强, C_u 越小表明流动的非均匀性越弱。

1.4 互相关函数理论

互相关函数分析可用于研究和计算入渗区域上土壤优先流通道的尺寸(也即最可能尺寸)^[3,17]。互相关函数是数据矩阵阵列两两做相关分析后,计算各相同间距数列的平均相关值,最后求得相关性的空间特征(即相关值随间距的变化)。互相关函数表示入渗深度沿不同方向(即X方向和Y方向)分布的相关程度。互相关函数曲线总是从间距为0,相关度为1开始下降,经过一定距离后(相关尺度)或者达到某一定值(平台值)后相关度不再因距离的增加而发生变化或者互相关函数曲线变化趋势发生逆转;相关尺度对应着土壤优先流通道的尺寸^[3,17]。

2 结果与分析

2.1 染色面积分布

各组试验的染色面积分布如图1所示。由图1可以看出,各试验的染色面积分布明显不同,即使是在相同入渗水量和相同试验尺度条件下,两个重复试验的染色面积分布模式也存在明显的差异,表明土壤水流运动具有高度的非均匀性和不确定性。

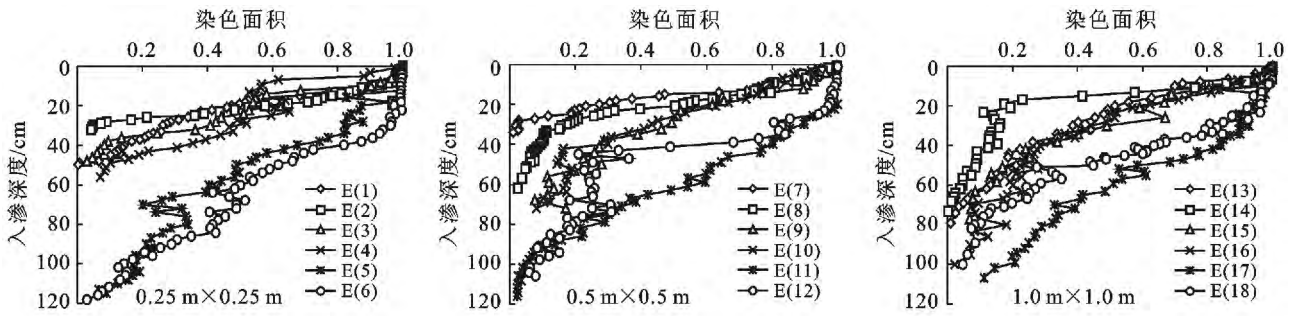


图 1 不同试验尺度条件下的染色面积分布

2.2 入渗条件对土壤水入渗深度的影响

2.2.1 入渗水量对土壤水入渗深度的影响 根据各试验的染色模式分布,计算出各试验的土壤水最大入渗深度(Z_{max})和平均入渗深度(Z_{mean}),计算结果详见表 2。根据表 2 计算出相同试验尺度条件下土壤水最

大入渗深度和平均入渗深度随入渗水量变化情况如图 2 所示。由图 2 可知,在相同试验尺度条件下,最大入渗深度和平均入渗深度都随着入渗水量的增加而增大。这说明随着入渗水量的增加,局部优先流通道中的和优先流整体的水流迁移深度都将增大。

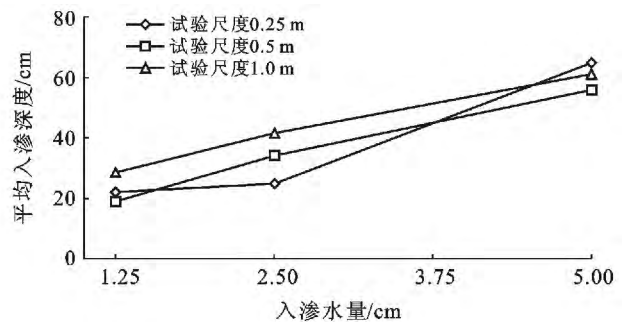
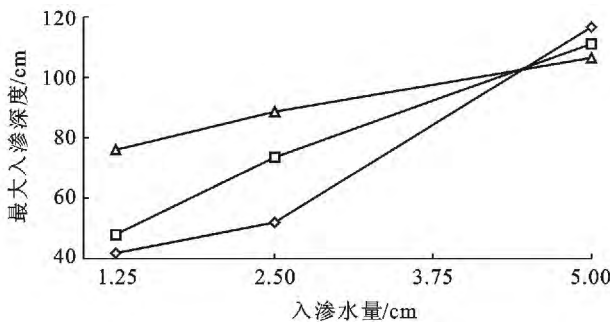


图 2 入渗水量对最大入渗深度和平均入渗深度的影响

2.2.2 试验尺度对土壤水入渗深度的影响 根据表 2 计算出相同入渗水量条件下,土壤水最大入渗深度和平均入渗深度随试验尺度变化情况如图 3 所示。图 3 显示,当入渗水量较小时(1.25 和 2.5 cm),土壤水最大入渗深度随着试验尺度的增大而增大;当入渗水量较大时(5.0 cm),试验尺度的变化对土壤水最大入渗深度的影响不明显。这主要是因为,当入渗水量较小时,入渗水流主要集中在局部快速优先流通道中

迅速运动。随着试验尺度的增大,传导到局部快速优先流通道中的水流总量也增加,因此这部分优先流通道(快速优先流通道)发展越充分,土壤水最大入渗深度也越大。当入渗水量很大时,几乎所有的优先流通道都能得到充分的发展和扩张,因此不同尺度条件下的最大入渗深度相差不明显。与最大入渗深度不同,图 3 显示试验尺度对土壤水平均入渗深度影响的规律性不明显。

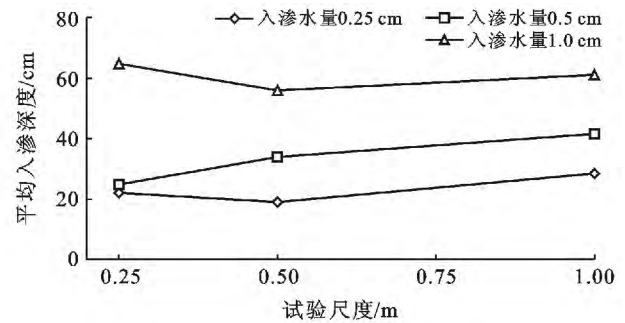
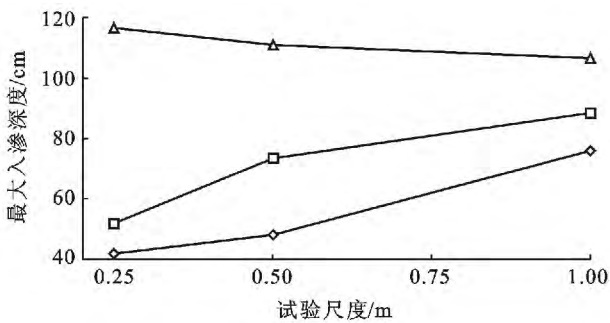


图 3 试验尺度对最大入渗深度和平均入渗深度的影响

2.3 入渗条件对土壤水流运动非均匀特征的影响

2.3.1 入渗水量对土壤水流运动非均匀特征的影响

根据各试验的染色模式分布,由公式(1)–(2)计算出各试验的入渗深度分布非均匀系数 C_u (表 2)。根

据表 2 计算出相同试验尺度条件下,土壤水入渗深度分布非均匀系数随入渗水量变化的情况如图 4 所示。图 4 显示,在试验尺度一定的条件下,土壤水入渗深度分布非均匀系数随入渗水量的增大呈现出先增大后减小的变化趋势。这主要是因为当入渗水量较小时,限制了优先流通道的发展;优先流还未充分发展即停止了运动,因而优先流的非均匀程度较低,导致土壤水入渗深度分布非均匀系数也较小。随着入渗水量的增大,优先流通道得以充分发展,因此非均匀特征明显,导致土壤水入渗深度分布非均匀系数增大。但当入渗水量增加到一定程度后,由于优先流通道扩张并彼此联接,因而土壤水流运动的非均匀程度降低,导致土壤水入渗深度分布非均匀系数相应减小。

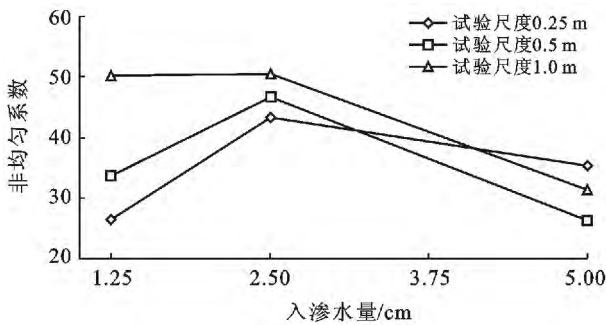


图 4 入渗水量对非均匀系数的影响

2.3.2 试验尺度对入渗深度分布非均匀特征的影响

根据表 2 计算出相同入渗水量条件下,土壤水入渗深度分布非均匀系数随试验尺度变化的情况如图 5 所示。图 5 显示,当入渗水量较小时(1.25 和 2.5 cm),土壤水入渗深度分布非均匀系数随着试验尺度的增大而增大;当入渗水量很大时(5.0 cm),试验尺度的变化对土壤水入渗深度分布非均匀系数的影响不明显。表明试验尺度对土壤水流运动非均匀特征的影响只有在入渗水量较小时才比较明显;当入渗水量较大时,试验尺度对土壤水流运动非均匀特征的影响降低。这主要是因为,当入渗水量较小时,入渗水流主要集中在局部快速优先流通道中迅速运动。随着试验尺度的增大,传导到局部快速优先流通道中的水流总量也增加,因此这部分优先流通道(快速优先流通道)发展越充分,与其它水流通道(慢速优先流通道和部分基质流通道)的差异越明显,因此,土壤水流运动的非均匀程度增大。当入渗水量很大时,过高的入渗水量不但使得慢速优先流通道和基质流通道得以充分发展,还使得优先流通道宽度扩张和联接,导致流动的差异性降低,因此,土壤水流运动的非均匀程度降低。

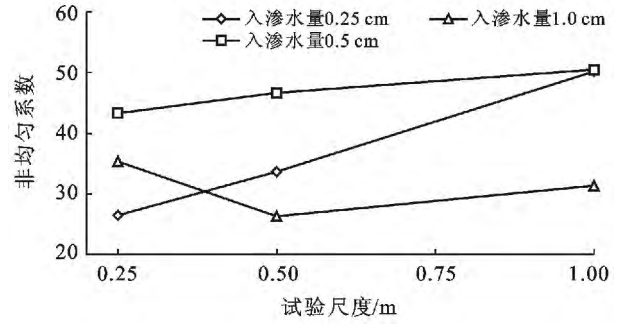


图 5 试验尺度对非均匀系数的影响

2.4 入渗条件对优先流尺寸的影响

将每一试验的试验区域均匀离散成 32×32 个小正方形网格,计算每个小正方形网格区域范围内的平均入渗深度。在此基础上计算每一个试验区域内沿不同方向(X 方向和 Y 方向)的入渗深度分布互相关函数,根据入渗深度分布的互相关函数,计算各试验不同方向(X 方向和 Y 方向)的优先流最可能尺寸(表 2)。

2.4.1 入渗水量对优先流尺寸的影响 由表 2 计算出相同试验尺度条件下,优先流尺寸随入渗水量变化如图 6 所示。由图 6 可知,在试验尺度一定的条件下,入渗水量增加,优先流尺寸也相应增大。这主要是因为,入渗水量的增大导致优先流通道内外的水势梯度增大,使得优先流横向扩张加剧,因而优先流通道尺寸增大。

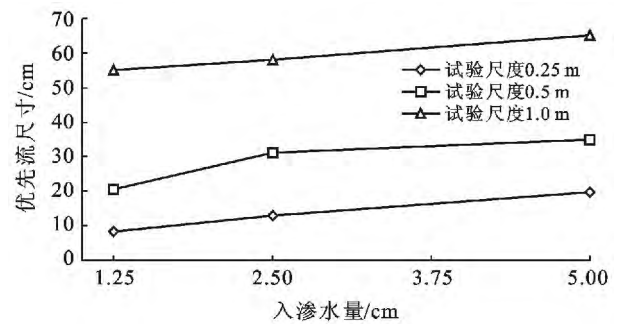


图 6 入渗水量对优先流尺寸的影响

2.4.2 试验尺度对优先流尺寸的影响 根据表 2 计算出相同入渗水量条件下,优先流尺寸随试验尺度的变化如图 7 所示。由图 7 可知,在初始水头一定的条件下,随着试验尺度增大优先流尺寸也相应增加。这主要是因为,正如前面所揭示的,在较大尺度的试验中,传导到局部快速优先流通道中的水流总量增加,从而增大了优先流通道内外的水势梯度,导致优先流在纵向迁移深度增大的同时横向扩张也增大,因此,优先流通道尺寸也增大。

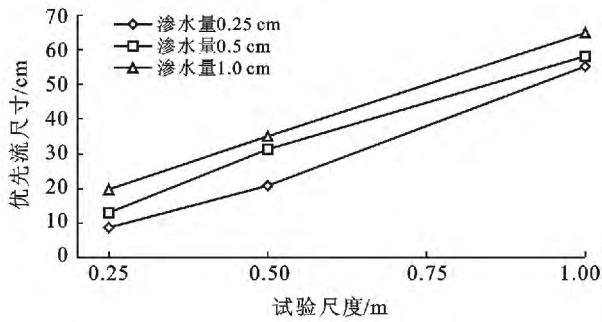


图 7 试验尺度对优先流尺寸的影响

3 结论

(1) 土壤水流运动具有高度的非均匀性和不确定性,即使是在相同入渗水量和相同试验尺度条件下,两个重复试验的染色面积分布模式也存在明显的差异。

(2) 随着入渗水量的增加,局部优先流通道中的和优先流整体的水流迁移深度都将增大。入渗水量较小时(1.25 和 2.5 cm),土壤水最大入渗深度随着试验尺度的增大而增大;当入渗水量较大时(5.0 cm),试验尺度的变化对土壤水最大入渗深度的影响不明显。试验尺度对土壤水平平均入渗深度的影响无明显规律性。

(3) 土壤水流运动的非均匀程度随入渗水量的增大呈现出先增大后减小的变化趋势。当入渗水量较小时,土壤水流运动的非均匀程度随着试验尺度的增大而增大;当入渗水量较大时,试验尺度的变化对土壤水流运动非均匀程度的影响不明显。

(4) 入渗水量的增加和试验尺度的增大都将使优先流通道尺寸增大。

[参 考 文 献]

[1] 牛健植,余新晓. 优先流问题研究及其科学意义[J]. 中国水土保持科学, 2005, 3(3): 110-116.

[2] 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): 865-875.

[3] 盛丰,王康,张仁铎,等. 田间尺度下土壤水流非均匀运动特征的染色示踪研究[J]. 水利学报, 2009, 40(1): 101-108.

[4] 王康,张仁铎,缴锡云. 多孔介质中非均匀流动特性的染色示踪试验研究[J]. 水科学进展, 2007, 18(5): 662-667.

[5] Wang Kang, Zhang Renduo, Yasuda H. Characterizing heterogeneity of soil water flow by dye infiltration experiments[J]. Journal of Hydrology, 2006, 328(3): 559-571.

[6] Flury M, Flühler H. Modeling solute leaching in soils by diffusion-limited aggregation: Basic concepts and applications to conservative solutes[J]. Water Resources Research, 1995, 31(10): 2443-2452.

[7] Wang Kang, Zhang Renduo, Sheng Feng. Characterizing heterogeneous processes of water flow and solute transport in soils using multiple tracer experiments[J]. Vadose Zone Journal, 2013, 12(3): 100-105.

[8] Sheng Feng, Wang Kang, Zhang Renduo, et al. Modeling preferential water flow and solute transport in unsaturated soil using the active region model[J]. Environmental Earth Sciences, 2011, 62(7): 1491-1501.

[9] Ketelsen H, Meyer W S. Adsorption of brilliant blue FCF by soils[J]. Geoderma, 1999, 90(1/2): 131-145.

[10] Kasteel R, Vogel H J, Roth K. Effect of non-linear adsorption on the transport behavior of brilliant blue in a field soil[J]. European Journal of Soil Science, 2002, 53(2): 231-240.

[11] Nobles M M, Wilding L P, Lin H S. Flow pathways of bromide and Brilliant Blue FCF tracers in caliche soils[J]. Journal of Hydrology, 2010, 393(1): 114-122.

[12] Wang Kand, Zhang Renduo. Heterogeneous soil water flow and macropores described with combined tracers of dye and iodine[J]. Journal of Hydrology, 2011, 397(1): 105-117.

[13] Mooney S J, Morris C. A morphological approach to understanding preferential flow using image analysis with dye tracers and X-ray computed tomography[J]. CATENA, 2008, 73(2): 204-211.

[14] 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): 133-143.

[15] 谢华,王康,张仁铎,等. 土壤水入渗均匀特性的染色示踪试验研究[J]. 灌溉排水学报, 2007, 26(1): 1-4.

[16] 王康,张仁铎,周祖昊,等. 土壤非均匀水流运动和溶质迁移显色示踪方法研究[J]. 土壤学报, 2009, 46(4): 603-610.

[17] Öhrström P, Persson M, Albergel J, et al. Field-scale variation of preferential flow as indicated from dye coverage[J]. Journal of Hydrology, 2002, 257(1/4): 164-173.