

土壤水非均匀流动的碘-淀粉染色示踪研究^①

盛 丰^{1,2}, 方 妍³

(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 湖南新华水利电力有限公司, 长沙 410007)

摘 要: 在壤土和粉质黏土条件下采用碘-淀粉染色示踪方法分别开展了 6 个和 4 个不同土壤初始含水率和入渗水量的示踪试验, 通过分析入渗深度和染色面积分布模式来研究入渗条件(土壤初始含水率、入渗水量和土壤质地)对土壤水非均匀流动特征的影响。研究表明: ①土壤初始含水率升高时, 土壤水入渗深度增大, 但土壤初始含水率对染色面积分布模式无明显影响; ②土壤水入渗深度随入渗水量的增大而增大, 但入渗水量的增大对土壤水入渗深度增大的影响有限; ③当入渗水量较小时, 土壤水流运动以优先流为主; 随着入渗水量的增大, 土壤水流运动逐渐转变成以基质流为主的流动形态; ④土壤水在细质地土壤(粉质黏土)中运动具有更高的非均匀程度, 非均匀流通道总宽度较窄。

关键词: 碘-淀粉染色示踪试验; 土壤水; 优先流; 入渗; 非均匀

中图分类号: S152.7

优先流是一种仅在局部土壤中运动而绕过其他部分土壤的水流和溶质运移形式^[1]。大量的研究表明, 只要入渗水通过土壤中的渗透区域, 土壤中就会形成优先流^[2]。由于优先流只在局部土壤中运动, 从而降低了土壤对入渗水的保持和对溶质(如化肥和农药等)的吸附和截留^[3]; 此外, 由于水流和溶质在优先流通道中具有更快的运动速度, 从而缩短了水和溶质在土壤中停留的时间^[4]。所有这些都将加大农业灌水和施肥的渗漏损失, 并增大地下水受污染的风险。由于土壤高度的空间变异性和各向异性, 以及土壤水流运动的非线性, 使得土壤优先流难以被捕捉和描述^[5]。碘离子由于其较高的溶解度、无毒、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, 越来越广泛地被用于土壤优先流的染色示踪研究^[6-7]。更重要的是, 由于碘离子带负电荷, 与土壤颗粒所带电荷相同, 使得碘离子几乎不被土壤颗粒所吸附, 因而具有与土壤水流几乎相同的运移性能^[6], 特别适用于黏性土壤中优先流的染色示踪研究。本文即采用碘-淀粉染色示踪方法研究土壤优先流运动与入渗条件(土壤初始含水率、入渗水量和土壤质地)之间的关系。

1 试验方法

碘-淀粉染色示踪试验在壤土和粉质黏土两种土

壤中进行, 两种土壤的物理和水动力参数如表 1 所示。在平整后的试验区域同心安置两个正方形框, 其中内框的边长为 1.0 m, 外框的边长为 2.0 m(如图 1 所示)。壤土条件下开展 6 个试验, 入渗水量分别为 20 mm(试验 1)、40 mm(试验 2 和试验 3)、60 mm(试验 4 和试验 5)和 80 mm(试验 6); 粉质黏土条件下开展 4 个试验, 入渗水量分别为 20 mm(试验 7)、40 mm(试验 8)、60 mm(试验 9)和 80 mm(试验 10)。为了避免试验之间相互影响, 各试验区域的间距控制在 2.0 m 以上。试验开始时, 在内框中注入设定高度(即 20、40、60 和 80 mm)的浓度为 20 g/L 碘化钾溶液, 同时在外框中注入与内框水头高度相等的清水。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 后逐层开挖剖面。其中, 壤土区的试验开挖水平剖面, 剖面间距 1 ~ 5 cm; 粉质黏土区的试验开挖垂直剖面, 剖面间距 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采样测定土壤含水率, 未染色区内的土壤含水率分布即为土壤初始含水率分布。其中, 壤土区的试验每层在染色区

①基金项目: 国家自然科学基金项目(51109017)、湖南省教育厅优秀青年项目(10B006)和港口与航道工程湖南省重点学科开放基金项目资助。

作者简介: 盛丰(1981—), 男, 湖南株洲人, 博士, 讲师, 主要从事非饱和带土壤水动力学与水土环境方面的研究。E-mail: fsaint8586@163.com

随机采 5 个土样、未染色区随机采 3 个土样；粉质黏土区的试验每个剖面在深度为 0、10、20、30、40、50、60、70、80、90 和 100 cm 处的染色区和未染色区分别采 3 个和 2 个土样。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。所有的照片均按照 Morris 和 Mooney 提出临界值方法^[8]进行处理，根据照相图片的 RGB 值信息将原始照片转化成黑（染色）白（未染色）的二元化信息图片。

表 1 试验区域土壤的物理性质参数

Table 1 Physical properties of soils at experimental sites

土壤类型	深度 (cm)	土壤质地 (g/kg)			体积质量 (g/cm ³)	孔隙度 (%)	饱和水力传导度 (cm/s)
		>50 μm	2~50 μm	<2 μm			
壤土	0~10	294	492	214	1.38	38.8	3.4×10 ⁻⁴
	10~20	282	494	224	1.40	40.2	1.2×10 ⁻⁴
	20~50	313	462	225	1.44	40.6	1.1×10 ⁻⁴
	50~100	321	448	231	1.45	44.4	1.1×10 ⁻⁴
粉质黏土	0~10	35	550	445	1.44	40.2	5.8×10 ⁻⁵
	10~20	44	515	444	1.50	42.7	2.1×10 ⁻⁵
	20~50	43	514	443	1.50	44.8	2.2×10 ⁻⁵
	50~100	47	507	446	1.59	45.1	1.4×10 ⁻⁵

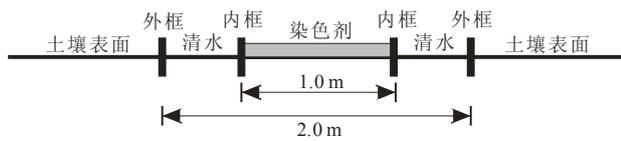


图 1 碘-淀粉染色示踪试验示意图

Fig. 1 Diagram of iodine-starch staining experiment

2 结果与分析

2.1 染色模式和含水率分布

图 2 分别为壤土区 (a) 和粉质黏土区 (b) 各试验条件下染色面积随入渗深度的分布。图 2 显示，任意入渗条件下，各试验的染色面积均呈现出随入渗深

度的增大而减小的趋势。各试验区土壤的平均初始含水率 (θ_i) 如表 2 所示。表 2 中同时列出了各试验的最大入渗深度 (Z_{max}) 以及染色面积 ≥ 0.75 、0.50 和 0.25 的深度值 (即 $Z_{0.75}$ 、 $Z_{0.50}$ 和 $Z_{0.25}$)。染色面积 ≥ 0.75 的入渗区间 (即 $0 \sim Z_{0.75}$) 为基质流占优势的区间；染色面积 < 0.25 的入渗区间 (即 $Z_{0.25} \sim Z_{max}$) 为优先流占优势的区间。因此， $Z_{0.75}$ 和 $Z_{0.25}$ 越大，表明土壤水流运动中基质流运动越显著而优先流运动越不明显，此时土壤水流运动的非均匀程度相对较低；反之， $Z_{0.75}$ 和 $Z_{0.25}$ 越小，表明土壤水流运动中基质流运动越不明显而优先流运动越显著，此时土壤水流运动的非均匀程度相对较高。

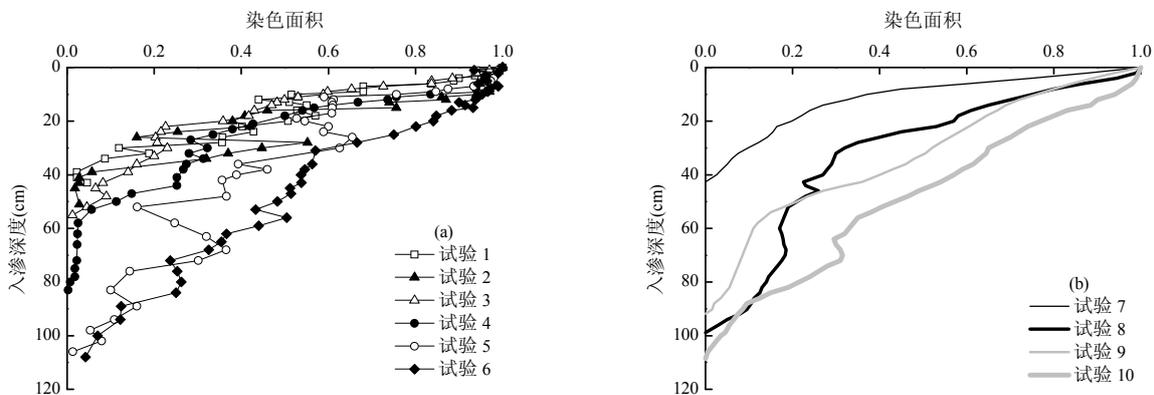


图 2 壤土区 (a) 和粉质黏土区 (b) 各试验的染色面积分布图

Fig. 2 Dye-stained coverage distributions for plots conducted in loam (a) and silty clay (b)

表 2 各试验的测量和计算结果
Table 2 Measured and calculated results for plots

土壤质地	试验编号	入渗水量(mm)	θ_i (cm^3/cm^3)	Z_{\max} (cm)	$Z_{0.75}$ (cm)	$Z_{0.50}$ (cm)	$Z_{0.25}$ (cm)
壤土	试验 1	20	0.283	43.0	6.5	11.5	29.0
	试验 2	40	0.177	51.0	13.0	16.0	22.0
	试验 3	40	0.215	54.0	6.5	12.0	21.0
	试验 4	60	0.208	84.0	11.0	18.0	45.0
	试验 5	60	0.278	106.0	11.0	37.0	74.0
	试验 6	80	0.247	108.0	25.0	49.0	84.0
粉质黏土	试验 7	20	0.333	42.7	3.8	6.8	15.0
	试验 8	40	0.299	99.2	9.9	21.8	40.7
	试验 9	60	0.280	91.8	10.1	29.4	46.8
	试验 10	80	0.312	108.6	20.6	44.5	74.9

注: Z_{\max} 为最大入渗深度; $Z_{0.75}$ 、 $Z_{0.50}$ 和 $Z_{0.25}$ 分别为染色面积 ≥ 0.75 、 0.50 和 0.25 的深度。

2.2 初始含水率对土壤水非均匀流动特征的影响

壤土条件下的试验 2 和试验 3、以及试验 4 和试验 5 的入渗水量分别相同 (分别为 40 和 60 mm), 试验 3 和试验 5 的土壤初始含水率 (分别为 0.215 和 0.278 cm^3/cm^3) 要分别高于试验 2 和试验 4 的土壤初始含水率 (分别为 0.177 和 0.208 cm^3/cm^3), 表 2 显示试验 3 和试验 5 的土壤水入渗深度 (分别为 54.0 和 106.0 cm) 要分别高于试验 2 和试验 4 的土壤水入渗深度 (分别为 51.0 和 84.0 cm)。该试验结果说明, 土壤初始含水率对土壤水入渗深度有影响: 相同条件下, 土壤水在较高初始含水率的土壤中具有较大的迁移距离。

壤土条件下的试验 4 与试验 5 具有相同的入渗水量 (60 mm) 和不同的初始含水率 (分别为 0.208 和 0.278 cm^3/cm^3), 表 2 显示试验 5 的 $Z_{0.75}$ 、 $Z_{0.50}$ 和 $Z_{0.25}$ 值要明显大于试验 4 的相应值。与试验 4 和试验 5 的比较结果相反, 表 2 显示壤土条件下的试验 2 与试验 3 也具有相同的入渗水量 (均为 40 mm) 和不同的土壤初始含水率 (分别为 0.177 和 0.215 cm^3/cm^3), 但土壤初始含水率较高的试验 3 具有较小的 $Z_{0.75}$ 、 $Z_{0.50}$ 和 $Z_{0.25}$ 值。这说明, 土壤初始含水率对染色面积分布模式 (也即非均匀特征) 的影响不明显。Flury 等^[9]对 14 种不同类型土壤开展干湿条件不同的重复试验也得到了相同的结果, 即土壤初始含水率对土壤水入渗深度有一定影响, 但土壤初始含水率的高低对染色面积分布模式无明显影响。de Rooij^[10]的研究则表明, 土壤初始含水率对染色面积分布模式的影响只有在土壤初始含水率很低情况下才比较明显。而我们所开展的试验的土壤初始含水率都相对较高, 因此土壤初始含水率对染色面积分布模式 (非均匀程度) 的影响不明显。

2.3 入渗水量对土壤水非均匀流动特征的影响

尽管壤土条件下各试验的土壤初始含水率各不相同, 但随着入渗水量的增大, 土壤水入渗深度逐渐增大。粉质黏土条件下, 60 mm 入渗水量试验的土壤水入渗深度要略小于 ($< 10\%$) 40 mm 入渗水量试验的土壤水入渗深度。这主要是因为粉质黏土条件下 60 mm 入渗水量试验所在区域的土壤初始含水率 (0.280 cm^3/cm^3) 要小于 40 mm 入渗水量试验所在区域的土壤初始含水率 (0.299 cm^3/cm^3) 所造成的。以上结果说明, 相同条件 (土壤质地和土壤初始含水率) 下, 土壤水入渗深度随着入渗水量的增大而增大。但是, 入渗水量对土壤水入渗深度增大的影响不是无限的。如粉质黏土条件下的试验 7、试验 8 和试验 10, 当入渗水量从 20 mm (试验 7) 增加到 40 mm (试验 8) 时, 尽管土壤初始含水率降低了不少 (从 0.333 cm^3/cm^3 减小到 0.299 cm^3/cm^3), 但入渗深度却从 42.7 cm 激增到 99.2 cm (增幅超过 100%); 但当入渗水量从 40 mm 增大到 80 mm 时, 此时尽管入渗水量增大了 40 mm, 且土壤初始含水率也从 0.299 cm^3/cm^3 增大到 0.312 cm^3/cm^3 , 但是土壤水入渗深度仅增大了 9.4 cm (增幅 $< 10\%$)。

总的说来, 壤土和粉质黏土条件下试验的 $Z_{0.75}$ 、 $Z_{0.50}$ 和 $Z_{0.25}$ 值均呈现出随入渗水量的增大而增大的趋势 (如表 2 所示)。这说明, 当入渗水量较小时, 土壤水流运动以优先流为主; 随着入渗水量的增大, 土壤水流运动逐渐转变成以基质流为主的流动形态。图 3 为粉质黏土条件下各试验 (即试验 7~ 试验 10) 染色模式分布直观上优先流动最明显的剖面、典型剖面 (介于优先流动最明显和基质流动最明显之间) 和基质流动最明显的剖面。由图 3 可知, 当入渗水量较小时 (如 20 mm), 土壤水的最大入渗深度主要是由优先流运动

所决定的；当入渗水量较大时（如 80 mm），土壤水的最大入渗深度主要是由基质流运动所决定的。该结果与 Wang 等^[11]和王康等^[12]通过染色示踪方法研究入渗水量与农业灌水和施肥的深层渗漏之间的关系所得到

的结果是一致的：当灌水量（即入渗水量）较小时，灌水和施肥的深层渗漏主要是由于土壤优先流运动所造成的；当灌水量较大时，灌水和施肥的深层渗漏主要是由于土壤水基质流运动所造成的。

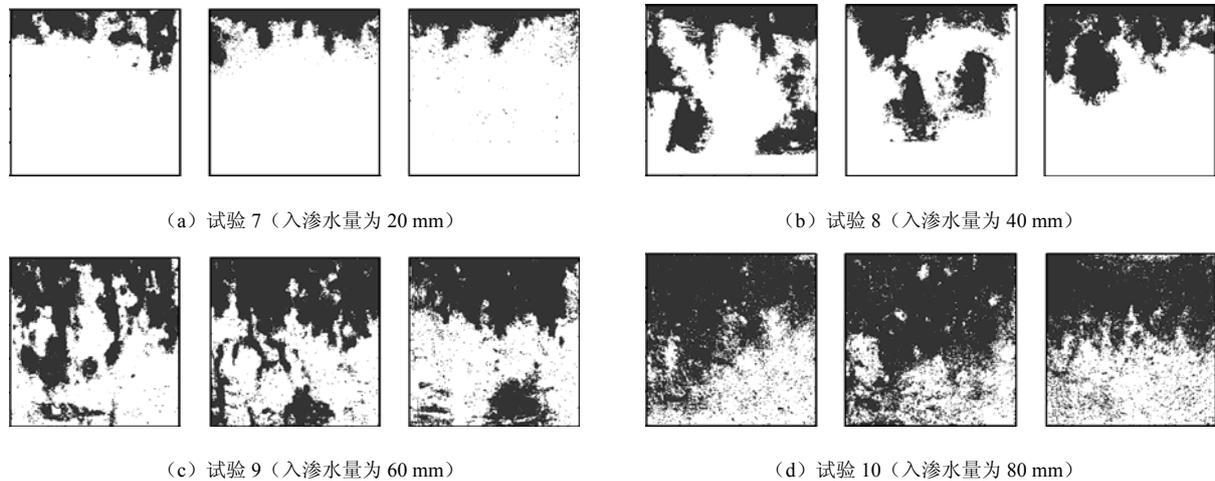


图 3 粉质黏土不同入渗水量条件下的流动模式

Fig. 3 Flow patterns of plots conducted in clay with different infiltration amounts

2.4 土壤质地对土壤水非均匀流动特征的影响

尽管壤土的饱和水力传导度比粉质黏土的饱和水力传导度高一个数量级（如表 1 所示），但是表 2 显示相同入渗水量条件下壤土区试验和粉质黏土区试验的最大入渗深度无明显差别。土壤初始含水率较高固然是使得粉质黏土条件下土壤水入渗深度增大的一个原因，但是土壤初始含水率升高对土壤水入渗深度增大的影响是有限的^[9-10]。表 2 显示，尽管粉质黏土区试验的土壤初始含水率要高于相同入渗水量条件下壤土区试验的土壤初始含水率，但粉质黏土区试验的 $Z_{0.75}$ 、 $Z_{0.50}$ 和 $Z_{0.25}$ 值要比相同入渗水量条件下壤土区试验的相应值小。这表明，相同入渗水量条件下，粉质黏土区试验的优先流特征更明显（即非均匀程度更高）。盛丰^[13]的研究表明，土壤水流运动非均匀程度的增大对土壤水入渗深度的增大有显著影响，且这种影响是高阶（大于 1）非线性的。由于粉质黏土中的土壤水流运动具有更高的非均匀程度，因而土壤水入渗深度增大。

在不存在大孔隙结构的土壤中，土壤自身性质的非均匀性（变异性）和土壤水流运动的非线性是引起土壤水非均匀运动的主要原因^[14]。根据表 1 计算入渗深度范围内壤土和粉质黏土体积质量的加权变异系数分别为 0.02 和 0.03，孔隙度的加权变异系数分别为 0.05 和 0.04，饱和水力传导度的加权变异系数分别为

0.51 和 0.59。加权变异系数的计算结果表明粉质黏土的土壤物理性质参数在入渗深度范围内的变异程度高于壤土的土壤物理性质参数在入渗深度范围内的变异程度，因此，土壤水在粉质黏土中运动时呈现出更高的非均匀形态。此外，Flury 等^[9]研究表明，即使在均质土壤中，细质地土壤中的水流运动由于流动的非均匀性较强也更容易形成更高形态的非均匀流。因此，相同条件下，粉质黏土（细质地）中的土壤水流运动的非均匀程度更高，非均匀流通道总宽度（即染色面积）更窄（即 $Z_{0.75}$ 、 $Z_{0.50}$ 和 $Z_{0.25}$ 值较小），从而增大了土壤水的入渗深度，并使得相同入渗水量条件下粉质黏土和壤土中的土壤水入渗深度无明显差别。

3 结论

应用碘-淀粉染色示踪方法研究了不同入渗条件（土壤初始含水率、入渗水量和土壤质地）对土壤水非均匀流动特征（入渗深度和染色面积分布模式）的影响，研究结果表明：

（1）土壤初始含水率对土壤水入渗深度有一定影响：相同条件下，初始含水率较高的土壤中土壤水的入渗深度较大；但土壤初始含水率对染色面积分布模式无明显影响。

（2）土壤水入渗深度随入渗水量的增大而增大，但入渗水量增大对土壤水入渗深度增大的影响不是无

限的。当入渗水量较小时，土壤水流运动以优先流为主；随着入渗水量的增大，土壤水流运动逐渐转变成以基质流为主的流动形态。

(3) 相同条件下，土壤水流在粉质黏土中运动具有更高（相对于壤土）的非均匀程度，非均匀流通道总宽度较窄，土壤水流流速增大，导致相同入渗水量条件下粉质黏土和壤土中土壤水的入渗深度无明显差别。

参考文献:

- [1] Hendrickx JMH, Flury M. Uniform and Preferential Flow, Mechanisms in the Vadose Zone, Conceptual Models of Flow and Transport in the Fractured Vadose Zone. Washington, DC: National Research Council, National Academy Press, 2001: 149-187
- [2] Hangen E, Gerke HH, Schaaf W, Hüttl RF. Flow path visualization in a lignitic mine soil using iodine-starch staining. *Geoderma*, 2004, 120: 121-135
- [3] Reichenberger S, Amelung W, Laabs V, Pinto A. Pesticide displacement along preferential flow pathways in a Brazilian Oxisol. *Geoderma*, 2002, 110: 63-86
- [4] Chen CC, Roseberg RJ, Selker JS. Using microsprinkler irrigation to reduce leaching in a shrink/swell clay soil. *Agriculture Water Management*, 2002, 54: 159-171
- [5] Liu H, Zhang R, Bodvarsson GS. An active region model for capturing fractal flow patterns in unsaturated soils: Model development. *Journal of Contaminant Hydrology*, 2005, 80: 18-30
- [6] van Ommen HC, Dekker LW, Dijkema R, Hulshof J, van der WH. A new technique for evaluating the presence of preferential flow paths in nonstructured soils. *Soil Science Society of American Journal*, 1988, 52: 1192-1193
- [7] 盛丰, 王康, 张仁铎, 李萼. 田间尺度下土壤水流非均匀运动特征的染色示踪研究. *水利学报*, 2009, 40(1): 101-108
- [8] Morris C, Mooney J. A high-resolution system for the quantification of preferential flow in undisturbed soil using observations of tracers. *Geoderma*, 2004, 118: 133-143
- [9] Flury M, Flühler H, Jury WA, Leuenberger J. Susceptibility of soils to preferential flow of water: A field study. *Water Resources Research*, 1994, 30(7): 1945-1954
- [10] de Rooij GH. Modeling fingered flow of water in soils owing to wetting front instability: A review. *Journal of Hydrology*, 2000, 232: 277-294
- [11] Wang K, Zhang R, Sheng F. Effects of irrigation efficiency on chemical transport processes. *Science in China Series E: Technological Science*, 2009, 52(11): 1-6
- [12] 王康, 张仁铎, 周祖昊. 灌水效率碘—淀粉显色示踪试验. *农业工程学报*, 2009, 25(12): 38-44
- [13] 盛丰. 土壤优先流的活动流场模型理论研究 (博士学位论文). 广州: 中山大学, 2009: 81-83
- [14] Diment GA, Watson KK. Stability analysis of water movement in unsaturated porous media. 3. Experimental studies. *Water Resources Research*, 1985, 21: 979-984

Study On Preferential Soil Water Flow Using Iodine-starch Staining Method

SHENG Feng^{1,2}, FANG Yan³

(1 *Changsha University of Science and Technology, Changsha 410114, China*; 2 *Hunan Provincial Key Laboratory of Water & Sediment Science and Water Hazard Prevention, Changsha 410114, China*; 3 *Hunan Xinhua Water Resources & Electric Power Co., Ltd, Changsha 410007, China*)

Abstract: A total of 10 iodine-starch staining experiments with different initial soil water contents and infiltration amounts were conducted in loam (6 plots in total) and silty clay (4 plots in total). The infiltration depth and distribution pattern of dye-stained region were measured and calculated to study the impacts of infiltration backgrounds (i.e. initial soil water content, infiltration amount, and soil texture) on preferential soil water flow. This results indicated that, (1) a higher initial soil water content tended to make a larger maximum infiltration depth, while the initial soil water content displayed no obvious impacts on the distribution pattern of dye-stained region. (2) The maximum infiltration depth increased with the increment of infiltration amount, but the impact of the increment of infiltration amount on the increment of the maximum infiltration depth was not unlimited. (3) As the infiltration amount increases, the flow pattern transferred from the flow pattern dominated by the preferential flow to the flow pattern dominated by the matrix flow. (4) The soil water flow in the finer-textured soil (silty clay in this research) was more heterogeneous when under the same infiltration amount and initial soil water content, and the total area of the flow paths was narrower in the finer-textured soil.

Key words: Iodine-starch staining experiment, Soil water, Preferential flow, Infiltration, Heterogeneity