DOI: 10.13758/j.cnki.tr.2015.05.031

土壤大孔隙发育特征对水和溶质输移的影响①

盛 丰[1, 2]，张利勇[1, 2]，王 康[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 武汉大学水资源与水电工程科学国家重点实验室，武汉 430072)

摘 要：在原状土条件下采用单离子示踪和多离子示踪技术各开展了两个入渗试验，通过对比分析试验观测结果研究了各试验区域土壤中大孔隙的存在状况、发育特征及其对入渗示踪剂溶液输移的影响。研究结果表明，试验 1(单离子示踪)所在区域土壤中存在贯穿型土壤大孔隙(大孔隙贯穿整个入渗深度范围土层)，试验 3(多离子示踪)所在区域土壤中存在非贯穿型土壤大孔隙(大孔隙仅发生在上层部分土壤中)，而试验 2(单离子示踪)和试验 4(多离子示踪)所在区域土壤中不存在土壤大孔隙。示踪剂溶液在含有贯穿型土壤大孔隙的试验 1 中运移速度更快、入渗深度更大、输移到深层土壤时的浓度更高；贯穿型土壤大孔隙对不同阶段注入的示踪剂溶液的输移能力无显著差异。与贯穿型土壤大孔隙不同，试验 3 中出现的非贯穿型土壤大孔隙对中间阶段(第二阶段)注入的示踪剂溶液的输移能力最大，而对第一、三阶段注入的示踪剂溶液的输移能力相对较小。

关键词：优先流；土壤大孔隙；大孔隙流；指流；单离子示踪试验；多离子示踪试验

中图分类号：S152.7

优先流也称非均匀流，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]。优先流形成因素众多，而土壤大孔隙是形成优先流的众多因素中最重要和最活跃的因素[2]。尽管土壤大孔隙通常仅占土壤总孔隙体积的一小部分，但土壤大孔隙为入渗水及溶解在其中的化学物质提供了快速通过土壤介质的通道[3]。由于大孔隙的屏蔽作用，在大孔隙中快速运动的水流几乎不与周围土壤基质作用[2]。因此相对于在土壤基质中运动的指状流，在土壤大孔隙中运动的水流(大孔隙流)不仅速度更快，而且污染物的浓度更高，因此对地下水的污染风险也更大[4]。

目前，有很多试验方法被用来研究分析土壤中是否存在大孔隙及其对水和溶质输移过程的影响。由于土壤大孔隙的复杂性，野外条件下很难准确测得大孔隙的详细分布与结构特征。因此，大多数研究都是从野外取原状土柱[5–6]或人工填充含有大孔隙的土柱[7–8]，通过观测土柱中水和溶质的输移过程与分布规律来分析土壤大孔隙的存在状况及其对水和溶质输移的影响。但由于不同尺度下的大孔隙流特征差异明显，因此还无法将室内小尺度条件下的研究结果用于有效解决野外大尺度的实际问题[9]。近年来，许多新方法(如地面雷达穿透技术[10]、核磁共振成像技术[11]和 X 射线计算机断层摄影技术等[12])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[13]。示踪技术由于它们能直观地显示入渗水和溶质的非均匀分布模式且无需大量的经费投入而被广泛应用于各种室内和野外研究中[14–15]。由于示踪试验通常需要开挖剖面以测定流动路径和示踪剂溶液分布，因此工作量较大。加之土壤的空间变异性以及水和溶质在土壤中输移的复杂性，准确描述田间尺度下的大孔隙流动过程以及入渗过程中大孔隙与土壤基质之间的水和溶质交换过程都还是远没有解决的问题。

本文采用单离子示踪和多离子示踪方法研究田间自然条件下的优先流过程。通过对比分析试验观测结果来研究各试验区域土壤中的流动结构(优先流和大孔隙流)、大孔隙发育类型(贯穿型土壤大孔隙和非贯穿型土壤大孔隙)及其对水流运动和溶质输移的影响。

1 材料与方法

1.1 试验场地特征

田间试验在武汉大学水资源与水电工程科学国家

①基金项目：国家自然科学基金项目(51109017)和湖南省自然科学基金项目(13JJ3069)资助。

作者简介：盛丰(1981—)，男，湖南株洲人，博士，副教授，主要从事土壤物理学与土壤水文学方向的研究。E-mail: fsaint8586@163.com

重点实验室灌溉排水与水环境综合试验场进行。试验土壤为壤土，土壤物理性质参数和水动力参数如表 1 所示。

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

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 ($\times10^{-4}$ cm/s)
	>50 μm	2 ~ 50 μm	<2 μm			
0 ~ 10	294	492	214	1.38	38.8	3.4
10 ~ 20	282	494	224	1.40	40.2	1.2
20 ~ 50	313	462	225	1.44	40.6	1.1
50 ~ 100	321	448	231	1.45	44.4	1.1

1.2 单离子示踪试验

共开展两个试验(试验 1 和试验 2)。试验采用类似双套环的试验装置[16–17](如图 1 所示)。试验前，平整试验区域土壤，并用水准尺沿不同方向测定，确保整个试验区域基本水平，并尽可能避免破坏土壤的原状结构。在平整后的试验区同心安置两个尺寸分别为 1.0 m × 1.0 m(内框)和 2.0 m × 2.0 m(外框)的矩形框。

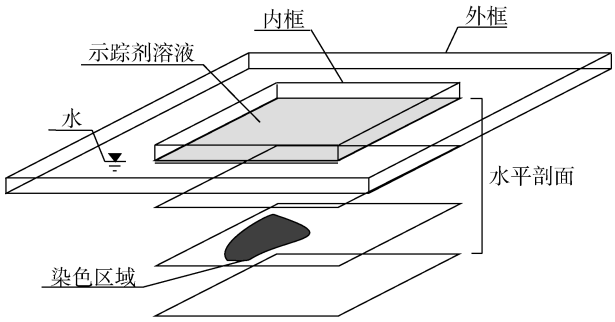


图 1 示踪试验设计图
Fig. 1 Diagram of experimental set-up for tracer infiltration experiment

试验开始时，在内框中注入 20 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。测量并记录碘化钾溶液完全渗入土壤的时间，如表 2 所示。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 后沿垂直方向逐层开挖水平剖面，剖面间距为 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(即显色反应)；而水流未经过的区域不含碘离子，因此不会发生显色反应，土壤保持基底颜色(砖红色)[16–17]。

表 2 各试验注入的示踪剂溶液完全渗入土壤的时间**(min)**
Table 2 Time periods for applied mixture solutions to completely infiltrate into soil in each step for the plots

	单离子示踪试验	多离子示踪试验		
	KI 溶液	第一阶段：KI 和 KBr 混合溶液	第二阶段：KI 和 KNO_3 混合溶液	第三阶段：KI 和 KBr 混合溶液
试验 1	4	–	–	–
试验 2	52	–	–	–
试验 3	–	33	88	104
试验 4	–	45	260	–

在显色反应发生 5 min 后开始照相记录染色模式[17]。按照临界值理论[18]将照相记录的剖面染色水流分布模式图片转化成黑白二元化信息图片，并计算各剖面的染色面积。照相后，在显色区和未显色区各随机采取 5 个土样测定入渗前(未显色区)、后(显色区)的土壤含水率分布和 I^- 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[16–17]。试验在白天进行，照相时对光线进行散射，图像解析度为 1 mm^2/像素。

1.3 多离子示踪试验

共开展两个试验(试验 3 和试验 4)。多离子示踪试验与单离子示踪试验的试验设计基本相同。不同的地方主要有两个：①多离子示踪试验的整个入渗过程分 3 个阶段连续进行：第一个阶段用 20 mm 碘化钾(20 g/L)和溴化钾(10 g/L)混合溶液作为示踪剂溶液注入内框形成入渗；当第一阶段注入的示踪剂溶液完全渗入地面之后，立即用 20 mm 碘化钾(20 g/L)和硝酸钾(10 g/L)混合溶液作为示踪剂溶液注入内框继续入渗；当第二阶段注入的示踪剂溶液完全渗入地面之后，紧接着用 20 mm 碘化钾(20 g/L)和溴化钾(10 g/L)混合溶液作为示踪剂溶液注入内框继续入渗。试验过程中，测量并记录各阶段注入的示踪剂溶液完全渗入土壤的时间，如表 2 所示。入渗过程中，每次在内框中注入示踪剂溶液的同时，在外框中注入与内框高度相等的纯水，以控制边界条件。②多离子示踪试验中所取得的土样主要用于测定入渗前后的土壤含水率分布和示踪剂(NO_3^- 和 Br^-)浓度分布。

2　结果与分析

2.1　田间试验结果

图 2 为各试验的染色面积随入渗深度的分布图。图 2 显示，尽管试验 1 和试验 2 中入渗示踪剂溶液的量相同，但这两个试验的染色面积分布明显不同。试验 1 的染色面积分布存在一个明显的染色面积极小(<0.03)的细长拖尾(其长度占试验 1 整个入渗深度的 70%)，而试验 2 的染色面积分布不存在拖尾。此外，示踪剂溶液在试验 1 中的最大迁移深度(Z_{max})也明显大于其在试验 2 中的最大迁移深度(分别为 46 cm 和 35 cm)。与试验 1 和试验 2 不同，试验 3 和试验 4 的染色面积分布和示踪剂溶液最大迁移深度(分别为 66 cm 和 68 cm)均基本一致，仅在 10 ~ 20 cm 深度范围内染色面积分布有较明显的差异。图 2 显示，试验 3 在 10 ~ 20 cm 深度范围内的染色面积明显小于 0 ~ 10 cm 和 20 ~ 25 cm 土层的染色面积，也明显小于同深度(10 ~ 20 cm)上试验 4 的染色面积。

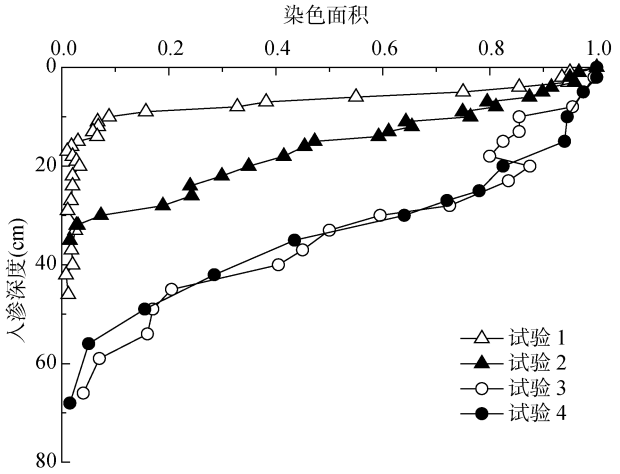


图 2　各试验的染色面积分布

Fig. 2　Distributions of stained coverage for the plots

图 3 为离子示踪试验入渗前后的土壤含水率分布图。图 3a 显示，试验 1 和试验 2 入渗后的土壤含水率分布均呈现出沿入渗方向减小的趋势。但从总体上来说，在 0 ~ 10 cm 深度范围土层中，试验 1 入渗后的土壤含水率要低于试验 2 入渗后的土壤含水率(含水率平均值分别为 0.34 cm^3/cm^3 和 0.36 cm^3/cm^3)；在 20 cm 以下的土层中，试验 1 入渗后的土壤含水率要高于试验 2 入渗后的土壤含水率(含水率平均值分别为 0.32 cm^3/cm^3 和 0.29 cm^3/cm^3)。图 3b 显示试验 3 和试验 4 入渗后的土壤含水率分布存在明显差异。试验 4 入渗后的土壤含水率分布呈现出随入渗深度增加而逐渐减小的趋势；而试验 3 中，在 35 ~ 60 cm 深度范围内出现土壤含水率峰值(0.40 cm^3/cm^3)，且试验 3 该土层深度范围内土壤的平均含水率(0.39 cm^3/cm^3)明显高于其上层(0 ~ 35 cm)土壤的平均含水率(0.35 cm^3/cm^3)。

图 4 为离子示踪试验入渗后的离子浓度分布。图 4a 显示，在 0 ~ 10 cm 深度范围土层中，试验 1 和试验 2 的 I^- 浓度分布无明显差异；在 10 cm 以下的土层中，试验 1 的 I^- 浓度要明显高于试验 2 的 I^- 浓度。此外，试验 2 中的 I^- 浓度分布在整个入渗深度范围内的土层中呈随深度增大而减小的趋势；而试验 1 中的 I^- 浓度在 10 cm 以下的土层中几乎不随入渗深度的增大而变化。图 4b 显示，试验 3 在 30 ~ 50 cm 深度范围内出现明显的 NO_3^- 浓度峰值(4.0 g/L)；而试验 4 则在整个入渗深度范围内没有出现明显的 NO_3^- 浓度峰值。与 NO_3^- 浓度分布不同，图 4b 显示试验 3 和试验 4 的 Br^- 浓度分布模式相似，均呈现出随入渗深度增大而减小的趋势。

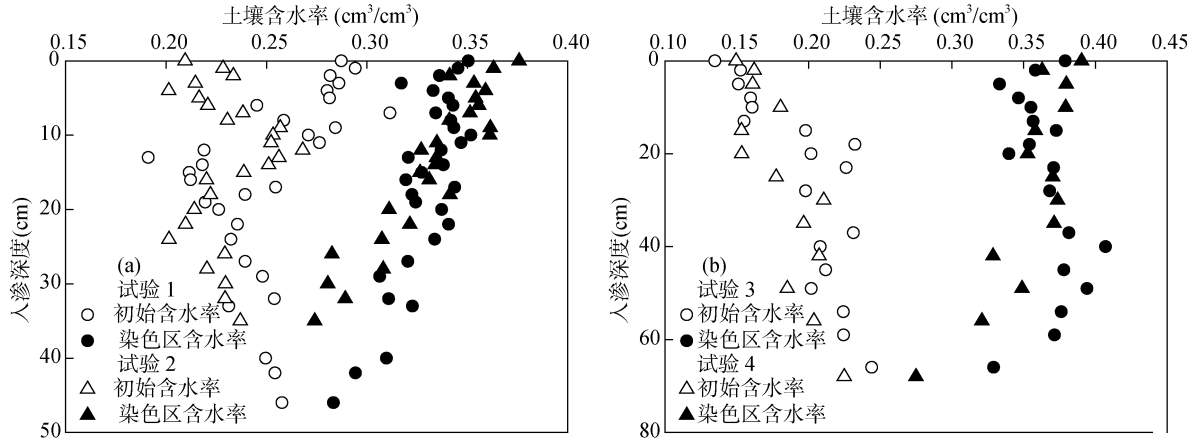


图 3　单离子示踪试验**(a)**和多离子示踪试验**(b)**入渗前后的土壤含水率分布

Fig. 3　Distributions of soil water content before and after infiltration for the solo-tracer (a) and multiple-tracer (b) infiltration experiments

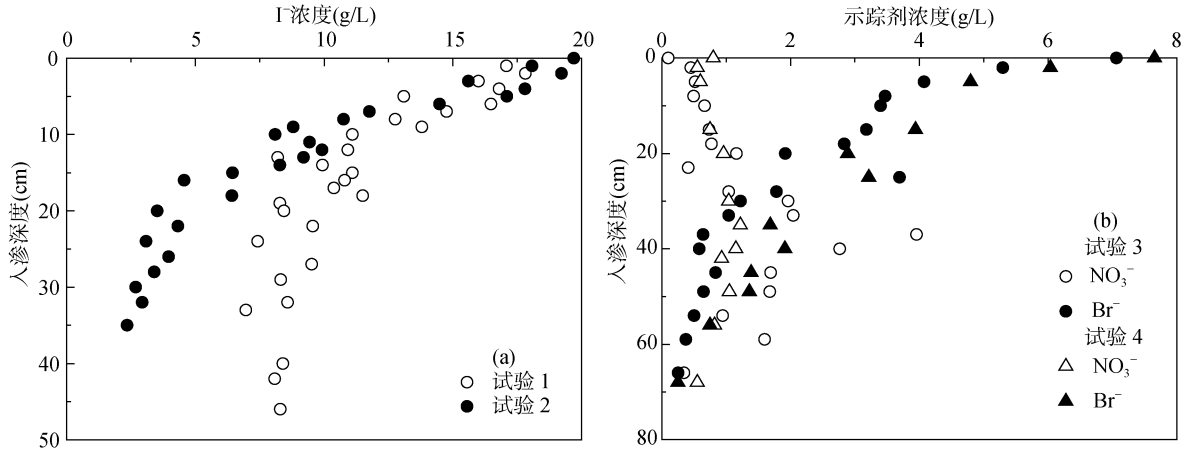


图 4 单离子示踪试验**(a)**和多离子示踪试验**(b)**入渗后的离子浓度分布

Fig. 4 Distributions of solute concentrations after infiltration for the solo-tracer (a) and multiple-tracer (b) infiltration experiments

2.2 流动结构分析

2.2.1 单离子示踪试验的流动结构分析 试验 1 的染色面积分布存在一个明显的染色面积极小的细长拖尾(图 2)，表明该试验区域的土壤中存在大孔隙；相反，试验 2 所在区域的土壤中则不存在大孔隙，其流动结构主要为由入渗湿润锋不稳定而形成的指状流(也称为非稳定指流或指流)。相对于指流(试验 2)，示踪剂溶液沿土壤大孔隙以更快的速度传播到深层土壤而绕过绝大部分土壤基质。由于绝大部分示踪剂溶液通过大孔隙快速运动到深层土壤，从而显著降低了从地表渗入土壤基质的示踪剂溶液的量。因此，在存在土壤大孔隙的试验 1 中，染色面积从地表开始沿入渗方向迅速减小(图 2)。由于大孔隙的屏蔽作用，使得示踪剂溶液在通过大孔隙向深层土壤快速运动时几乎不与周围的土壤基质相互作用(即向周围土壤基质侧向渗透)[4]，从而在试验 1 的染色面积分布图中形成一个染色面积极小的细长拖尾。由于试验 2 所在区域的土壤中不存在大孔隙，因此试验 2 的染色面积随入渗深度递减的趋势相对比较平缓且不存在细长拖尾。

2.2.2 多离子示踪试验的流动结构分析 尽管试验 3 和试验 4 的染色面积分布模式基本一致，但这两个试验中的流动结构完全不同。如图 3b 和图 4b 所示，在试验 3 的深层土壤中观测到了明显的土壤含水率峰值和 NO_3^- 浓度峰值，而试验 4 中则没有出现这样的峰值。这些结果表明，试验 3 中发生了大孔隙流，而试验 4 中的流动结构主要为非稳定指流。如前面的讨论，由于示踪剂溶液沿大孔隙迅速输移到深层土壤且较少与周围的土壤基质作用，因此在深层土壤中形成明显的土壤含水率峰值和示踪剂(NO_3^-)浓度峰值。此外，表 2 显示试验 3 中各阶段注入的示踪剂溶液完全渗入土壤的时间均明显小于试验 4 中相同阶段注入的示踪剂溶液完全渗入土壤的时间(尽管没有测定试验 4 中第三阶段注入的示踪剂溶液完全渗入土壤的时间，但考虑到第三阶段入渗时的土壤已被第一、二阶段注入的示踪剂溶液充分湿润，因此，第三阶段的入渗时间必然大于第二阶段的入渗时间(260 min))。考虑到试验 3 的土壤初始含水率相对较高(图 3b)，而其各阶段注入的示踪剂溶液却能以更快的速度渗入土壤，这也说明试验 3 中的流动结构为大孔隙流，而试验 4 中的流动结构为指流。

2.3 土壤大孔隙发育特征分析

2.3.1 试验 1 中的土壤大孔隙发育特征 试验 1 存在一个染色面积小于 0.03 的细长拖尾(图 2)，表明该试验区域土壤中的大孔隙贯穿整个入渗深度范围内的土层，属于贯穿型土壤大孔隙。图 5a 为试验 1 中的土壤大孔隙发育特征与流动结构示意图。由于贯穿型土壤大孔隙贯穿整个入渗深度范围内的土层，使得示踪剂溶液在沿大孔隙运动时无法注满整个土管(即大孔隙)；因此，从地表注入的示踪剂溶液能在极短的时间内(4 min，表 2)完全渗入土壤[7]。同样，由于示踪剂溶液无法完全注满大孔隙，因此，由地表注入的示踪剂溶液被迅速导入大孔隙并向深层土壤快速运动，从而使得通过地表渗入土壤基质中的示踪剂溶液显著减少。加之示踪剂溶液在通过大孔隙中向深层土壤快速运动时几乎不渗入周围土壤(图 5a)。因此，试验 1 的染色面积分布从地表开始即迅速减小，并形成一个染色面积极小的细小拖尾。

2.3.2 试验 3 中的土壤大孔隙发育特征 与试验 1 不同，试验 3 的染色面积分布和示踪剂溶液最大迁移深度与相同试验条件下试验 4 的染色面积分布和示踪剂溶液最大迁移深度均无显著差异，且试验 3 中

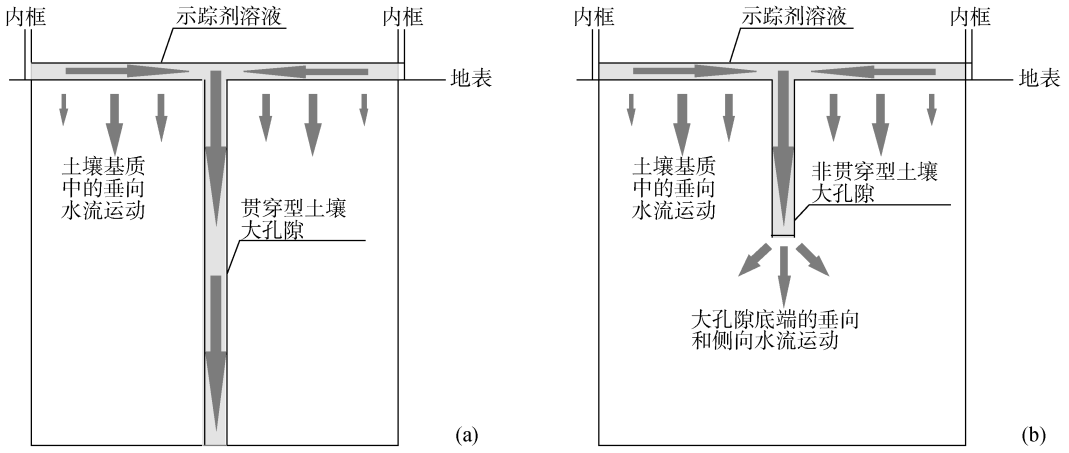


图 5　试验 **1(a)**和试验 **3(b)**中的土壤大孔隙发育特征与流动结构示意图

Fig. 5　Conceptual model illustrating developmental characteristics of macropores and flow mechanisms in Plot 1 (a) and Plot 3 (b)

第一阶段注入的示踪剂溶液完全渗入土壤的时间(33 min)远大于试验 1 中注入的示踪剂溶液完全渗入土壤的时间(4 min)，而与试验 4 中第一阶段注入的示踪剂溶液完全渗入土壤的时间(45 min)相差相对较小。这些结果都表明，试验 3 中的土壤大孔隙并非贯穿整个入渗深度范围内的土层，而是仅发生在上层一定深度的土壤中，属于非贯穿型土壤大孔隙。试验 3 的染色面积分布(图 2)、入渗前后的土壤含水率分布(图 3b)和 NO_3^- 浓度分布(图 4b)均表明，试验 3 所在区域的土壤大孔隙主要发生在表层 0 ~ 20 cm 深度范围土层。图 5b 为试验 3 中的土壤大孔隙发育特征与流动结构示意图。由于试验 3 表层 0 ~ 20 cm 深度土壤的初始含水率很低(图 3a)，加之总的入渗水量较大(60 mm)，施加到试验区域的示踪剂溶液迅速渗入土壤中并使表层土壤达到饱和或接近饱和状态，从而限制了从大孔隙向周围土壤基质的侧向入渗。因此，试验 3 表层 0 ~ 20 cm 深度范围内土壤基质中的水流运动主要为垂向运动(图 5b)，染色面积沿入渗方向逐渐减小。由于试验 3 土壤积水入渗时间较长(3 个阶段共 225 min)，因此 0 ~ 20 cm 深度范围内的染色面积较大(>0.80)。特别是在 0 ~ 10 cm 深度范围，由于长时间的积水入渗，其染色面积分布与试验 4 该深度上的染色面积分布几乎完全一致。但由于试验 3 中的大孔隙将更多的示踪剂溶液迅速输入深层土壤，加之表层(尤其是 0 ~ 10 cm 深度)土壤被示踪剂溶液饱和而使由地表渗入的示踪剂溶液(相对于试验 4)减少，因此在 10 ~ 20 cm 深度范围内，试验 3 的染色面积要明显小于试验 4 的染色面积。与表层 0 ~ 20 cm 深度范围内土壤基质中的水流运动形式(主要为垂向运动)不同，由于没有外围垂向水流(类似外框中注入的水流)的限制，示踪剂溶液在大孔隙底部同时沿垂向和侧向渗入周围土壤[7](图 5b)。由于大孔隙底部的侧向入渗，使得该深度(20 cm)处的染色面积相对于上层土壤明显增大(图 2)。此外，在 20 cm 以下土层中，试验 3 的土壤含水率和 NO_3^- 浓度均要大于试验 4 的土壤含水率和 NO_3^- 浓度，这也表明试验 3 中的土壤大孔隙主要发生在 20 cm 以上土层。因为正是由于试验 3 中的非贯穿型大孔隙将更多的入渗水和溶解于其中的 NO_3^- 输入到这一土层深度(20 cm 以下)，才使得在该土层深度内试验 3 的土壤含水率和 NO_3^- 浓度高于试验 4 的土壤含水率和 NO_3^- 浓度。

2.4　大孔隙效应分析

2.4.1　贯穿型土壤大孔隙的效应分析　　由于大孔隙贯穿整个入渗深度范围内的土层，因此示踪剂溶液沿大孔隙迁移的速度快、深度大。如表 2 所示，相对于其他试验，试验 1 中注入的示踪剂溶液在极短的时间内(4 min)即完全渗入土壤。图 2 显示，试验 1 中示踪剂溶液的最大迁移深度(46 cm)要明显大于相同入渗水量条件下试验 2 中示踪剂溶液的最大迁移深度(35 cm)。由于试验 1 中绝大部分示踪剂溶液通过土壤大孔隙快速输移到深层土壤，从而使得通过地表渗入土壤基质中的示踪剂溶液减少；加之大孔隙的屏蔽作用，使得渗入深层土壤中的示踪剂溶液集中分布在土壤大孔隙及其附近很小范围的土壤基质中[7]。因此，在上层(0 ~ 10 cm)土壤中，试验 1 入渗后的土壤含水率要低于试验 2 入渗后的土壤含水率(平均值分别为 0.34 cm^3/cm^3 和 0.36 cm^3/cm^3，图 3a)；而在深层(20 cm 以下)土壤中，试验 1 入渗后的土壤含水率要高于试验 2 入渗后的土壤含水率(平均值分别为 0.32 cm^3/cm^3 和 0.29 cm^3/cm^3)。此外，由于示踪剂溶液沿贯穿型大孔隙输移时绕过绝大部分土壤，显著降低了入渗示踪剂溶液与土壤基质之间的水量和溶质交换作用。因此，示踪剂溶液迁移到深层土壤时的浓度大且其分布几乎不随深度变化(图 4a)。尽管在试验 1 中没有进行

多离子示踪试验、无法定量研究贯穿型土壤大孔隙对不同阶段注入的示踪剂溶液输移的影响，但由于贯穿型土壤大孔隙发育深度大、在入渗过程中难于被入渗示踪剂溶液饱和，因此不同阶段注入的示踪剂溶液均能被迅速传导至深层土壤。

2.4.2 非贯穿型土壤大孔隙的效应分析 表 3 为试验 3 和试验 4 中 0 ~ 0.5 Z_{max} 和 0.5 ~ 1.0 Z_{max} 土层中分布的入渗水量和示踪剂质量占入渗总量的百分比。图 4b 和表 3 均显示，由于非贯穿型土壤大孔隙的存在，试验 3 中更多的入渗水(17.3%)和 NO_3^-(50.5%)被输入到深层土壤。与入渗水和 NO_3^-在试验 3 和试验 4 中的分布差异不同，图 4b 和表 3 均显示试验 3 和试验 4 中的 Br^- 浓度分布无明显差异。这表明非贯穿型土壤大孔隙对不同阶段注入的示踪剂溶液的输移能力不同：非贯穿型土壤大孔隙对第二阶段注入的示踪剂溶液(NO_3^-)的输移能力最强，而对第一、三阶段注入的示踪剂溶液(Br^-)的输移能力相对较弱。这主要是由入渗过程中土壤含水率变化引起的。由于试验 3 所在区域土壤(尤其是表层土壤)的初始含水率较低，加之大孔隙发育深度较小(0 ~ 20 cm)、易于被入渗示踪剂溶液饱和，因此，绝大部分第一阶段注入的示踪剂溶液(Br^-)迅速被表层土壤吸收而较少的被大孔隙输送到深层土壤。当第一阶段入渗完成后，表层土壤基本饱和；因此，第二阶段注入的示踪剂溶液优先通过土壤大孔隙迅速渗入到大孔隙以下(20 cm 以下)的土层中。在这一土层(20 cm 以下)中，示踪剂溶液以运移速度相对较小的指状流形式继续向深层土壤运动，因而在该层(20 cm 以下)土壤中形成明显的土壤含水率峰值和 NO_3^- 浓度峰值。由于经过第一、二阶段入渗后，大孔隙下层土壤的含水率显著升高，从而减弱了第三阶段注入的示踪剂溶液(Br^-)向深层土壤运动的速度。因此，第三阶段入渗结束时，第一、三阶段注入的示踪剂溶液(Br^-)仍被保存在较上层的土壤基质中，进行类似于试验 4 中的入渗过程(即指流运动)。因此，试验 3 和试验 4 中的 Br^-运移行为和浓度分布相似。

表 3 多离子示踪试验不同土层深度范围内的入渗水量和示踪剂质量占入渗总量的百分比**(%)**

Table 3 Percentage of applied water and solutes stored in different soil layers of multiple-tracer infiltration experiments

试验	土壤水		NO_3^-		Br^-	
	0 ~ 0.50 Z_{max}	0.50 ~ 1.0 Z_{max}	0 ~ 0.50 Z_{max}	0.50 ~ 1.0 Z_{max}	0 ~ 0.50 Z_{max}	0.50 ~ 1.0 Z_{max}
试验 3	82.7	17.3	49.5	50.5	94.7	5.3
试验 4	94.3	5.7	93.4	6.6	94.8	5.2

3 结论

在原状土条件下采用单离子示踪和多离子示踪技术各开展了两个试验，通过剖面开挖、数字图像分析和采样分析确定了各试验的染色面积分布及入渗后的土壤含水率和示踪剂溶液浓度分布，在此基础上研究了各试验区域土壤中的优先流结构、大孔隙发育特征及其对入渗示踪剂溶液输移的影响。研究结果表明，试验 1(单离子示踪)和试验 3(多离子示踪)中存在明显的大孔隙流结构，而试验 2(单离子示踪)和试验 4(多离子示踪)中的优先流结构主要为非稳定指流。研究结果同时表明，尽管试验 1 和试验 3 两个试验所在区域的土壤中都存在大孔隙，但是这两个试验区域土壤中大孔隙的发育特征是不同的。试验 1 中的土壤大孔隙为贯穿型土壤大孔隙，示踪剂溶液沿贯穿型土壤大孔隙迁移的速度更快、深度更大、浓度更高，且不同阶段注入的示踪剂溶液沿贯穿型土壤大孔隙迁移时无显著差异。与试验 1 不同，试验 3 中的土壤大孔隙为非贯穿型土壤大孔隙，示踪剂溶液沿非贯穿型土壤大孔隙迁移的速度相对于贯穿型土壤大孔隙要小，非贯穿型土壤大孔隙对不同阶段注入的示踪剂溶液的输移能力是不同的，其输移能力受入渗过程中土壤含水率的变化影响。

参考文献：

[1] Vogel HJ, Cousin I, Ippisch O, Bastian P. The dominant role of structure for solute transport in soil: Experimental evidence and modelling of structure and transport in a field experiment[J]. Hydrology and Earth System Sciences Discussions, 2006, 10: 495–506

[2] Alaoui A, Helbling A. Evaluation of soil compaction using hydrodynamic water content variation: Comparison between compacted and non compacted soil[J]. Geoderma, 2006, 134: 97–108

[3] Alaoui A, Goetz B. Dye tracer and infiltration experiments to investigate macropore flow[J]. Geoderma, 2008, 144: 279–286

[4] Carey SK, Quinton WL, Goeller NT. Field and laboratory estimates of pore size properties and hydraulic characteristics for subarctic organic soils[J]. Hydrological Process, 2007, 21: 2 560–2 571

[5] Morris C, Mooney SJ. A high-resolution system for the

quantification of preferential flow in undisturbed soil using observations of tracers[J]. Geoderma, 2004, 118: 133–143

[6] Hincapié I, Germann PF. Impact of initial and boundary conditions on preferential flow[J]. Journal of Contaminant Hydrology, 2009, 104: 67–73

[7] Allaire-Leung SE, Gupta SC, Moncrief JF. Water and solute movement in soil as influenced by macropore characteristics: 1. Macropore continuity[J]. Journal of Contaminant Hydrology, 2000, 41: 283–301

[8] Akay O, Fox GA. Experimental investigation of direct connectivity between macropores and subsurface drains during infiltration[J]. Soil Science Society of American Journal, 2007, 71: 1 600–1 606

[9] Wang K, Zhang R, Yasuda H. Characterizing heterogeneity of soil water movement by dye infiltration experiments[J]. Journal of Hydrology, 2006, 328: 559–571

[10] Weihermüller L, Huisman JA, Lambot S, Herbst M, Vereecken H. Mapping the spatial variation of soil water content at the field scale with different ground penetrating radar techniques[J]. Journal of Hydrology, 2007, 340: 205–216

[11] Moradi AB, Oswald SE, Massner JA, Pruessmann KP, Robinson BH, Schulin R. Magnetic resonance imaging methods to reveal the real-time distribution of nickel in porous media[J]. European Journal of Soil Science, 2008, 59: 476–485

[12] Mooney SJ, Morris C. A morphological approach to understanding preferential flow using image analysis with dye tracers and X-ray Computed Tomography[J]. Catena, 2008, 73: 204–211

[13] Allaire SE, Roulier S, Cessna A. Quantifying preferential flow in soils: A review of different techniques[J]. Journal of Hydrology, 2009, 378: 179–204

[14] Steenhuis TS, Staubitz W, Andreini MS, Surface J, Richard TL, Paulsen R, Pickering NB, Hagerman JR, Geohring LD. Preferential movement of pesticides and tracers in agricultural soil[J]. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 1990, 116: 50–66

[15] Bogner C, Wolf B, Schlather M, Huwe B. Analyzing flow patterns from dye tracer experiments in a forest soil using extreme value statistics[J]. European Journal of Soil Science, 2007, 59: 103–113

[16] 盛丰, 王康, 张仁铎, 李萼. 用分形特征参数定量描述土壤水流运动的非均匀程度[J]. 水利学报, 2009, 40(12): 1 432–1 439

[17] 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[J]. 水利学报, 2009, 40(1): 101–108

[18] Forrer I, Parrita A, Kasteel R, Flühler H, Luca D. Quantifying dye tracers in soil profiles by image processing[J]. European Journal of Soil Science, 2000, 51: 313–322

Study on Developmental Characteristics of Macropores and Their Effects on Soil Water Flow and Solute Transport with Tracer Infiltration Experiments

SHENG Feng[1, 2], ZHANG Li-yong[1, 2], WANG Kang[3]

(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 *State Key Laboratory of Water Resources and Hydropower Engineering Science*, *Wuhan University*, *Wuhan* 430072, *China*)

Abstract: Two solo-tracer infiltration experiments and two multiple-tracer infiltration experiments were conducted in natural undisturbed soil in order to investigate the existence and penetrating depths of macropores and the effects of macropores on the infiltration of applied tracer solutions. The results revealed that full-penetrated macropores (i.e. macropores penetrated the whole infiltrated soil layer) were occurred in Plot 1 (solo-tracer infiltration experiment) and partial-penetrated macropores (i.e. macropores penetrated only part of the infiltrated soil layer) occurred in Plot 2 (multiple-tracer infiltration experiment), while no macopores occurred in Plot 2 (solo-tracer infiltration experiment) and 4 (multiple-tracer infiltration experiment). The tracer solution transported much more rapidly in the full-penetrated macropores to the deeper soil layer in Plot 1, and the transportability of full-penetrated macropores on applied tracer solutions did not change much with the applying sequence of tracer solutions. On the contrary, the partial-penetrated macropores in Plot 3 were much more powerful in transporting the tracer solution applied in the second step while were less powerful in transporting the tracer solutions applied in the first and third steps.

Key words: Preferential flow; Soil macropores; Macropore flow; Fingering flow; Solo-tracer infiltration experiment; Multiple-tracer infiltration experiment