

# 柑橘地土壤大孔隙与优先流的关系研究

孙 龙, 张洪江, 程金花, 王彬俨, 陆晓宇, 王 贤

(北京林业大学 水土保持学院, 北京 100083)

摘 要: 以重庆市江津区 10 和 20 a 林龄的柑橘地为研究对象, 应用优先流染色法和室内图像提取技术, 土壤水分穿透曲线及 Poiseuille 方程综合分析土壤大孔隙与优先流的关系。结果表明, 大孔隙使染色区的水分渗透速率较非染色区提高了 1.48 倍以上。柑橘地大孔隙孔径范围在 0.3~1.7 mm, 半径大于 0.7 mm 的土壤大孔隙是形成优先流路径的主要孔径范围。

关键词: 柑橘地; 大孔隙; 优先流

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2012)06-0075-05

中图分类号: S157, S152.5

## Relationship Between Soil Macropore and Preferential Flow in Citrus Graden

SUN Long, ZHANG Hong-jiang, CHENG Jin-hua, WANG Bin-yan, LU Xiao-yu, WANG Xian

(College of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China)

**Abstract:** The relationship between soil macropore and preferential flow was analyzed in different citrus land in Jiangjin District of Chongqing City using brilliant blue dye method with image processing techniques, water breakthrough curve, and the Poiseuille equation. The results showed that the steady effluent rate of the dye-stained area was 1.48 times higher than that of the dye-unstained area. The radii of soil macropores ranged from 0.3 mm to 1.7 mm. The path of preferential flows were mainly found in the macropores with radii larger than 0.7 mm.

**Keywords:** citrus land; macropore; preferential flow

优先流是发生在多孔介质中的快速非平衡流, 土壤大孔隙又是发生优先流的主要原因, 研究土壤大孔隙与优先流之间的关系是认识柑橘地溶质优先运移过程的重要环节。三峡库区尾端的重庆市有大面积的柑橘地, 由于大量施用肥料已经造成了该地区愈来愈严重的地下水环境污染问题, 如何有效控制污染物(溶质)在土壤水中的运移和扩散, 已成为重要议题。分析土壤大孔隙的方法有染色法, 张力渗透法等<sup>[1]</sup>。诸多学者研究了耕作方式<sup>[2]</sup>、土壤动物、土壤内根系等<sup>[3]</sup>因素对大孔隙的影响, Radulovich 等<sup>[4]</sup>在 Nielsen<sup>[5]</sup>溶质穿透曲线法的基础上应用 Poiseuille 方程和稳态水流方程分析计算了土壤大孔隙半径范围和数量, 这种方法也被国内学者石辉等<sup>[6]</sup>应用于不同研究区的土壤大孔隙特征的研究中。Flury<sup>[7]</sup>和 Morris<sup>[8]</sup>都使用亮蓝染色法对土壤剖面进行染色并通过图像处理技术提取染色图片从而直观观测优先路径。

国内外学者针对同一林地不同林龄的优先流发

生区域和大孔隙特征, 以及两者间的关系研究相对较少。本研究以优先流染色法为基础, 确定染色区与非染色区, 通过图像处理技术提取成像图片分析优先流路径特征, 并应用 Radulovich 土壤水分穿透曲线及 Poiseuille 方程对土壤大孔隙的半径和数量进行量化分析, 进而探究优先流与大孔隙间的关系, 以期为进一步的柑橘地溶质运移研究提供一定参考。

## 1 研究区概况

研究区位于三峡库区尾端的重庆市江津区李市镇, 东经 105°49′—106°38′, 北纬 28°28′—29°28′, 海拔 188~1 034 m, 属紫色砂岩地区。研究区年平均气温 13.6~18.4 °C, 多年平均降雨量 1 030.7 mm, 属于中亚热带湿润性季风气候。研究区主要土壤类型为紫色土、黄壤。以研究区内 2 个柑橘地为样地, 实地实验和采样时间始于 2011 年 5 月 5 日, 为期 1 个月; 室内实验时间为 2011 年 6—9 月。样地基本情况详见表 1。

收稿日期: 2012-04-10

修回日期: 2012-07-05

资助项目: 国家“十二五”科技支撑计划“三峡库区典型区段长防林建设及质量调控技术”(2011BAD38B0403); 国家自然科学基金项目(30900866); 中央高校基本科研业务费专项(TD2011-2)

作者简介: 孙龙(1988—), 男(汉族), 山东省临沂市人, 硕士研究生, 主要从事水土保持研究。E-mail: paper\_sunlong@126.com。

通信作者: 张洪江(1955—), 男(汉族), 河北省易县人, 教授, 博士生导师, 主要从事土壤侵蚀与流域管理研究。E-mail: zhanghj@bjfu.edu.cn。

表 1 标准地基本状况

样地	海拔/ m	坡向	坡度/ (°)	起源	林龄/ a	胸径/ cm	容重/ (g·cm <sup>-3</sup> )	颗粒组成/%		
								沙粒	粉粒	黏粒
柑橘地 1	300	北	5	人工	10	25~50	1.27	43.57	34.31	22.12
柑橘地 2	304	北	9	人工	20	>50	1.34	49.84	34.37	15.79

## 2 材料与方法

### 2.1 优先流路径的染色及提取

将 2 块柑橘地土壤表层的枯枝落叶层去除,平整表面,将一长宽均为 70 cm,高 50 cm,厚 0.5 cm 的铁框垂直砸入土中 30 cm,并将距铁框壁内 5 cm 以内土壤捣实,防止染料沿铁框内壁下渗。用亮蓝粉末以 4 g/L 为标准配制示踪染料溶液,在铁框内的土壤表面均匀喷洒 10 L。待渗透 24 h 后,以每 10 cm 为一层挖掘土壤剖面,0—10 cm 为第 1 层,10—20 cm 为第 2 层,20—30 cm 为第 3 层。染色剖面采用 2 560 × 1 920 (500 万像素)相机拍摄,并在拍照时用卷尺标定染色区域的面积(50 cm × 50 cm)。根据染色情况将染色的区域定义为优先流发生区,未被染色或染色极少的区域作为非染色区(对比区)。利用 Photoshop CS3 (Adobe)对拍摄的照片进行镜头校正、裁剪,经过自动对比度、颜色替换和灰度使染色区为黑色或灰色、非染色区为白色。调整阈值使处理结果与实际染色结果相同。从而获取水平剖面染色图像。

### 2.2 大孔隙的分析计算

在每层土壤中的染色区和非染色区(对比实验)分别用高 4 cm,直径 9 cm 的取土环刀各取两个原状土样。将采到的原状土样浸泡在清水中使之饱和,放置 12 h 使其含水量达到田间持水量。随后将土样放置于 ST-70A 型土壤水分渗透仪,控制 8 cm 的压力水头,当土柱下部有水流出时间隔 5 s 收集出流量,并记录流量值,直至流量达到稳定。

把大孔隙界定为田间持水量到饱和含水量之间的土壤孔隙<sup>[3]</sup>。土壤达到田间持水量后,其基质势近乎为 0,水分入渗速率主要受供水强度控制。实验中土壤水分运动速率较慢,处于层流范围,假设土壤孔隙为圆形的情况下,可根据水分穿透曲线理论<sup>[7]</sup>,将流量方程  $Q = Av = \pi r^2 \tau L / t$  与 Poiseuille 方程  $Q = \pi r^4 \Delta P / (8 \eta \tau L)$  联合求解,得出大孔隙的当量孔径( $r$ )计算公式:

$$r = \tau L [8 \eta / (t \Delta P)]^{1/2}$$

式中:  $Q$ ——单位流量( $\text{cm}^3/\text{s}$ );  $A$ ——孔隙面积( $\text{cm}^2$ );  $v$ ——流速( $\text{cm}/\text{s}$ );  $r$ ——孔隙半径( $\text{cm}$ );  $\tau$ ——水流实际路径的弯曲系数,本研究取值为 1.2;  $L$ ——土柱长度( $\text{cm}$ );  $\eta$ ——水的黏滞系数 [ $\text{g}/(\text{cm} \cdot \text{s})$ ];

$\Delta P$ ——压力水头( $\text{cm}$ );  $t$ ——从初次加水开始记时的时间( $\text{s}$ )。

根据大孔隙首先排水原理,得出大孔隙半径范围,并按照 0.1~0.5 mm 半径间隔划分级。通过对任意 2 个时间段内水分出流流量进行观测( $Q_c$ ),可利用当量孔径公式计算出相应的孔隙半径。将两孔隙半径之间按照一定间隔划分出孔隙范围分级,以其平均值作为计算值,当间隔排水量为  $Q_c$  时,根据公式  $Q_c = nAv = n\pi r^2 \tau L / t$  计算出相应大孔隙数量( $n$ )。

## 3 结果与分析

### 3.1 柑橘地土壤优先路径特征

两样地第一层染色面积(图 1—2)均在 80% 以上,第二层染色面积分别为 7.25% 和 15.39%,降幅明显,这种染色面积急剧下降现象与之前的研究结果一致<sup>[9]</sup>。对比两个柑橘地 10—20 cm 层的优先路径水平剖面染色图像可以看出,柑橘地 1 着色较深的范围小并且集中,柑橘地 2 着色较深的范围多且分散,说明随着林龄增加,该层优先路径的数量增多、分布范围扩大。柑橘地 2 第 3 层几乎未被染色,染色面积仅有 0.32%,表明染色溶液几乎未通过优先路径入渗到达该层,而 10 L 染色溶液完全下渗,原因是染色溶液通过前两层的优先路径在土壤深层侧向运移到观测剖面范围(50 cm × 50 cm)以外的土体,柑橘地 2 的优先路径垂直剖面染色较大证明了侧向运移的存在。

由图 3 可以看出,染色溶液的湿润锋的不同,说明多孔介质的土壤内形成的优先路径能使优先流绕过土壤基质,并迅速大量地运移到深层土壤。10 a 林龄柑橘地与 20 a 林龄柑橘地优先路径垂直剖面差异较大,10 a 林龄柑橘地与 20 a 林龄柑橘地的垂直剖面染色面积与观测面积比分别为 5.24% 和 6.41%。20 a 林龄的垂直剖面染色面积比 10 a 林龄垂直剖面染色面积大 22.33%。从图 3 直观上看,10 a 林龄柑橘地的垂直剖面染色集中在表层,深层几乎未被染色,说明 10 a 林龄柑橘地深层土壤中优先路径较少或者连通性较差,导致其垂直剖面染色集中于表层。与之相比较,20 a 林龄的柑橘地的垂直剖面染色区域分散且染色面积大,说明数量众多的优先路径穿过该剖面,通过亮蓝染色直观地反映了出来。柑橘地 1 在 20—30 cm 层染色面积只占整个剖面的 4.10%,说明

在垂直方向优先路径连通性良好的前提下,其优先运移的作用十分明显(图 1—2)。均匀的基质流会使土壤垂直剖面由表层向深层连续染色,而优先路径改变了染色溶液的入渗过程(图 3),使土壤垂直剖面的染色面积仅为 5.24%和 6.41%,如果仅仅存在基质流,

其垂直方向剖面的染色面积应接近 100%,因此说明在柑橘地土壤中,优先路径是水分及溶质快速运移的重要通道<sup>[10]</sup>。而过多的优先运移作用可能使土体吸附的溶质减少,不仅不利于柑橘根系的吸收利用,还会增加地下水污染程度。

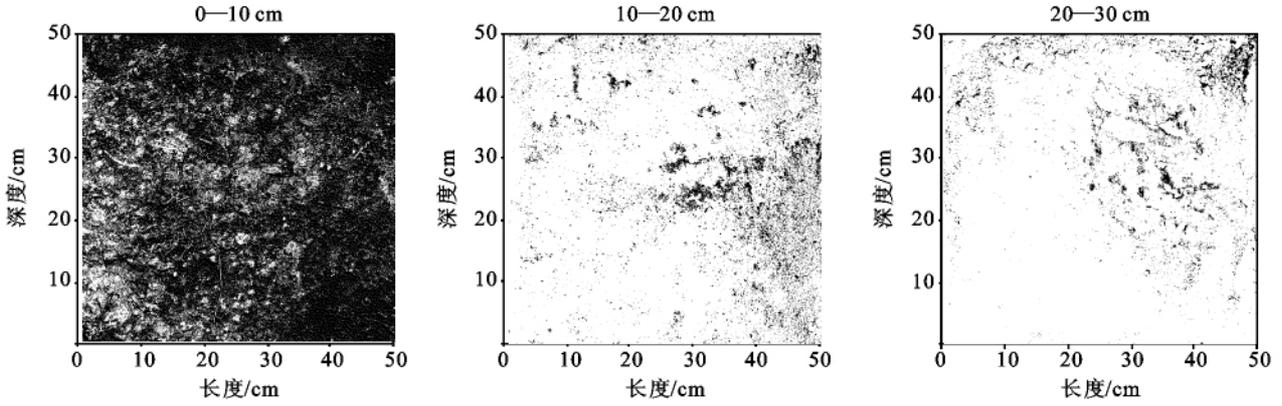


图 1 柑橘地 1 优先路径水平剖面染色图像

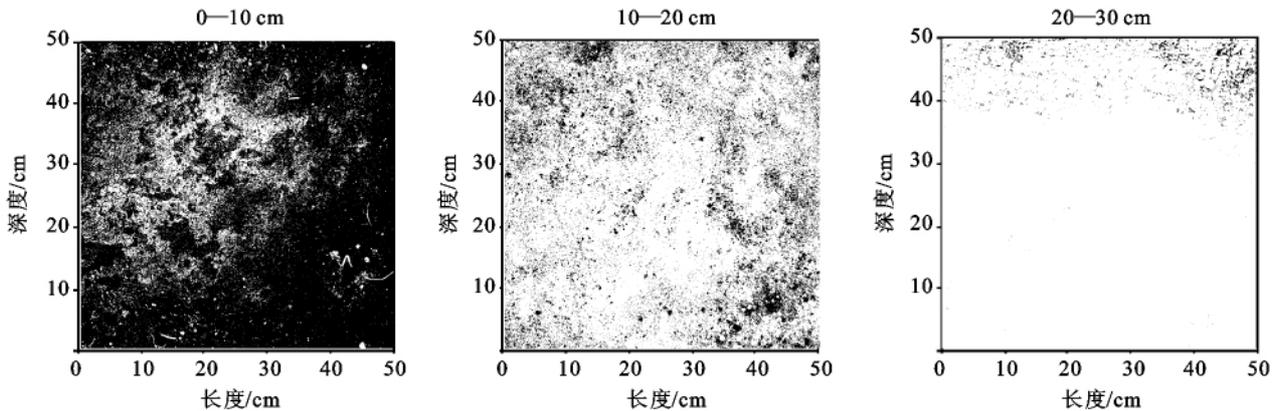


图 2 柑橘地 2 优先路径水平剖面染色图像

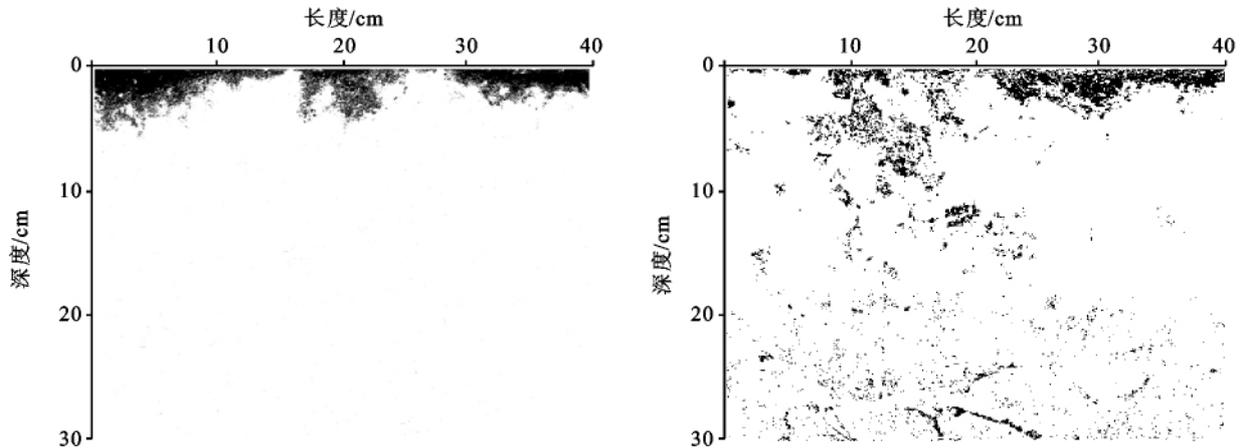


图 3 柑橘地优先路径垂直剖面染色图像

### 3.2 柑橘地土壤大孔隙特征

通过对柑橘地土壤大孔隙特征<sup>[11]</sup>的分析,2 个样地 3 层土壤两区(染色区和非染色区)的土壤水分穿

透曲线如图 4 所示。由图 4 可知,2 个样地染色区稳定出流速率均大于非染色区稳定出流速率,柑橘地 2 第 3 层几乎未染色。柑橘地 1 的染色区稳定出流速率

率从第 1 层到第 3 层依次为 0.53, 0.48, 0.27 ml/s; 非染色区稳定出流速率从第 1 层到第 3 层依次为 0.30, 0.21 和 0.10 ml/s, 柑橘地 2 染色区稳定出流

速率从第 1 层到第 2 层依次为 0.33 和 0.55 ml/s (第 3 层全部为非染色区); 非染色区稳定出流速率分别为 0.22, 0.25, 0.10 ml/s。

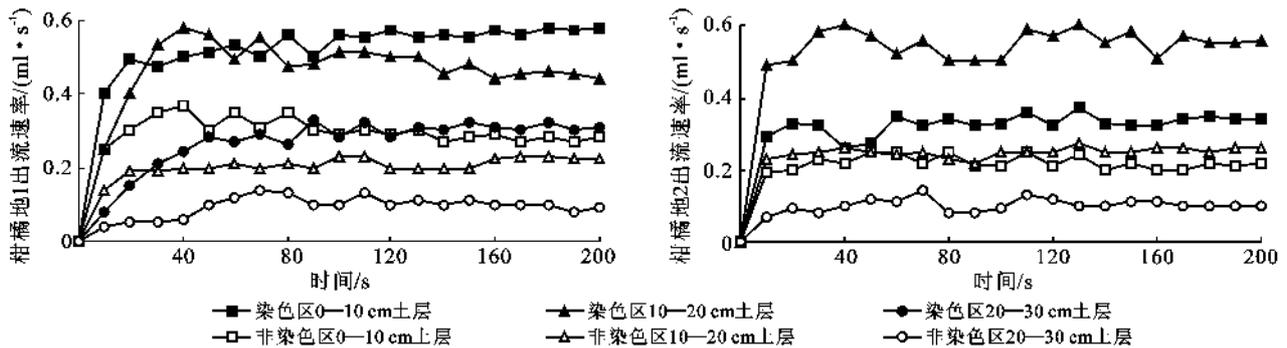


图 4 柑橘地 0—30 cm 土壤层水分穿透曲线

柑橘地 2 的第 2 层的稳定出流速率大于第 1 层, 说明 10—20 cm 土层中的大孔隙数量大于 0—10 cm 土层中的大孔隙数量。随着时间的推移, 柑橘地大孔隙空间分布会发生变化, 这主要与土壤中根系、生物活动空间变化以及土壤结构有关<sup>[12]</sup>。柑橘地 1 的 3 层染色区与非染色区稳定出流速率比依次为 1.78, 2.31, 2.70; 柑橘地 2 两层染色区与非染色区的稳定出流速率比分别为 1.48 和 2.20, 该比值反映染色区有效大孔隙对出流速率的贡献程度, 染色区水分渗透速率较非染色区提高了 1.48 倍以上, 并有随着深度增加, 提高程度增大的趋势, 说明大孔隙对深层土壤的影响较表层土壤有更重要的意义, 在水分或者溶质的传导中起到重要的作用。

大孔隙普遍存在于林地土壤中, 根据水分穿透曲

线和 Poiseuille 方程计算出 2 个样地土壤大孔隙半径范围和数量(表 2)及分布特征(图 1—2)。2 个样地土壤大孔隙半径范围均在 0.3~1.7 mm 之间, 各层大孔隙平均半径差异很小, 在 0.50~0.55 mm 之间, 其原因是由于半径在 0.3~0.7 mm 范围内大孔隙数量远多于其他孔径大孔隙数量。不同土层半径范围分级差异较大, 客观表现为水分穿透实验初次加水到初始出流的时间差异。在各半径范围内, 非染色区大孔隙数量均少于染色区, 甚至缺少 1 个半径范围分级。柑橘地 1 的 3 层染色区与非染色区大孔隙数量比依次为 2.29, 3.63 和 1.71, 柑橘地 2 的两层染色区与非染色区大孔隙数量比分别为 2.74 和 9.10。土壤大孔隙数量随土壤深度的增加表现出较明显下降趋势, 图 3 的垂直变化也能充分说明这种下降趋势。

表 2 染色区与非染色区土壤大孔隙数量及其他参数

样地	土层深度/cm	区域	不同半径范围的大孔隙数量/(个·m <sup>-2</sup> )					大孔隙率/%
			1.4~1.7 mm	1.2~1.4 mm	1.0~1.2 mm	0.7~1.0 mm	0.3~0.7 mm	
柑橘地 1	0—10	DA	0	23	1.80×10 <sup>2</sup>	1.52×10 <sup>3</sup>	5.16×10 <sup>4</sup>	13.1
		BA	0	0	0.05×10 <sup>2</sup>	1.20×10 <sup>3</sup>	2.21×10 <sup>4</sup>	5.7
	10—20	DA	1	14	0.63×10 <sup>2</sup>	2.06×10 <sup>3</sup>	7.59×10 <sup>4</sup>	19.2
		BA	0	0	0	0.36×10 <sup>3</sup>	2.12×10 <sup>4</sup>	5.3
	20—30	DA	0	0	0	0.37×10 <sup>3</sup>	2.01×10 <sup>4</sup>	5.0
		BA	0	0	0	0	1.19×10 <sup>4</sup>	2.9
柑橘地 2	0—10	DA	0	0	0.56×10 <sup>2</sup>	1.35×10 <sup>3</sup>	1.49×10 <sup>4</sup>	4.0
		BA	0	0	0	0.58×10 <sup>3</sup>	0.54×10 <sup>4</sup>	1.5
	10—20	DA	7	28	1.07×10 <sup>2</sup>	2.36×10 <sup>3</sup>	7.65×10 <sup>4</sup>	19.5
		BA	0	0	0	0.70×10 <sup>3</sup>	0.80×10 <sup>4</sup>	2.1
	20—30	BA	0	0	0	0	2.00×10 <sup>4</sup>	4.9

注: DA 为染色区; BA 为非染色区。

非染色区存在一定数量大孔隙,说明在更大半径大孔隙存在条件下,较小孔径大孔隙的优先运移作用十分不明显。柑橘地2的20—30 cm土层的所有大孔隙半径范围在0.3~0.7 mm之间,整个土层染色不明显,对染色溶液的优先运移作用较小。在柑橘地1的20—30 cm土层染色区,半径0.3~0.7 mm范围内大孔隙数量( $2.01 \times 10^4$ )几乎与柑橘地2同土层非染色区大孔隙数量( $2.00 \times 10^4$ )相同,却因实际染色效果差异被划分为染色区与非染色区(图3),说明半径0.7 mm以上范围内大孔隙数量可能是实际影响染色溶液运移的孔隙半径。

### 3.3 柑橘地土壤大孔隙与优先流关系

2个样地不同区域的土壤水分穿透曲线前端的上升趋势不同,原因是首先大孔隙排水,随后排水孔隙孔径逐渐减小<sup>[6]</sup>。结合图4和表2数据可以得出,存在半径大于1 mm大孔隙的区域,其水分穿透曲线前端曲线上扬程度较高,说明半径大于1 mm的大孔隙在水分输入初期(20 s内)就起到了快速疏导作用,即大于1 mm的土壤大孔隙是能导致优先流发生的优先路径,它能在降雨或者灌溉初期即迅速运移水分或溶液。

分析结果表明,半径大于0.7 mm的大孔隙可能是主要影响染色溶液运移的大孔隙,为了分析大孔隙率和半径大于0.7 mm大孔隙数量与稳定出流速率之间的关系,运用双变量 Pearson 相关分析,结果表明在  $p < 0.01$  的条件下,半径大于0.7 mm的大孔隙数量均与稳定出流速率存在极显著相关关系,相关系数为0.879。相关分析说明孔径大于0.7 mm的大孔隙是构成优先路径的主要孔隙,其数量的多少间接反映优先路径数量的多少,并直接影响着优先流在土壤中的运移速率。

## 4 结论

大孔隙使染色区的水分渗透速率较非染色区提高了1.48倍以上。柑橘地染大孔隙孔径范围在0.3~1.7 mm之间。半径大于1.0 mm的大孔隙在水分输入初期起到迅速排导水分的作用。半径大于0.7 mm的

土壤大孔隙是主要影响染色溶液迁移大孔隙,其与稳定出流速率呈极显著正相关关系,半径大于0.7 mm的土壤大孔隙是形成优先流路径的主要孔径范围。

### [参 考 文 献]

- [1] 周虎,吕贻忠,李保国. 土壤结构定量化研究进展[J]. 土壤学报, 2009, 46(3): 501-506.
- [2] Edwards W M, Norton L D, Redmond C E. Characteristic macropores that affect infiltration into nontilled soil [J]. Soil Science Society of America Journal, 1988, 52(2): 483-487.
- [3] Cheng Jinhua, Zhang Hongjiang, Wang Wei, et al. Changes in preferential flow path distribution and its affecting factors in southwest China [J]. Soil Science, 2011, 176(12): 652-660.
- [4] Radulovich R, Solorzano E, Sollins P. Soil macropore size distribution from water breakthrough curves[J]. Soil Science Society of America Journal, 1989, 53(2): 556-559.
- [5] Nielsen D R, Biggar J W. Miscible displacement in soils I: Experimental information [J]. Soil Science Society of America Process, 1961, 25(1): 1-5.
- [6] 石辉,陈风琴,刘世荣. 岷江上游森林土壤大孔隙特征及其对水分出流速率的影响[J]. 生态学报, 2005, 25(3): 507-512.
- [7] Flury M, Flühler H, Jury W A, et al. Susceptibility of soils to preferential flow of water: A field study [J]. Water Resources Research, 1994, 30(7): 1945-1950.
- [8] Morris C, Mooney S J, Young S D. Sorption and desorption characteristics of the dye tracer, Brilliant Blue FCF, in sandy and clay soils[J]. Geoderma, 2008, 146(3/4): 434-438.
- [9] 王伟,张洪江,程金花,等. 四面山阔叶林土壤大孔隙特征与优先流的关系[J]. 应用生态学报, 2010, 21(5): 1217-1223.
- [10] Beven K, Germann P. Macropores and water flow in soils[J]. Water Resources Research, 1982, 18(5): 1311-1325.
- [11] 孙龙,张洪江,程金花,等. 重庆江津区柑橘地土壤大孔隙特征[J]. 水土保持学报. 2012, 26(3): 194-198.
- [12] 陈风琴,石辉. 岷江上游三种典型植被下土壤优势流现象的染色法研究[J]. 生态科学, 2006, 25(1): 69-73.