

三峡地区阔叶林地植物根系分布特征与 优先路径关系分析

常丹东

(水利部水土保持监测中心, 北京 100055)

摘 要: 优先路径研究是研究地下水分运动的重要环节。本文通过亮蓝染色示踪试验法直接观测并区分林地土壤基质和土壤优先路径, 分别对染色区和未染色区观测到的土壤优先路径、植物根系根长密度和根重密度进行分析, 研究发生土壤优先流过程中植物根系的作用及由植物根系形成的优先路径的联通情况。研究发现, 降雨强度越大, 优先路径染色区的表层呈现越加明显的宽区域聚集分布。雨强为 25 mm/d 时, 样地土壤染色区域表层大区域优先路径聚集分布厚度平均为 50 cm。根径 > 5 mm 的根系根长密度的大小对土壤孔隙的大小影响显著, 根径 < 5 mm 的根系根长密度的大小对于土壤孔隙的联通有明显作用。此外, 土壤中植物根重密度的大小与优先路径数量和联通程度正相关, 根重密度越大越有利于构成优先路径, 有利于形成优先流。不同样地两区域植物根重密度在土壤 10—20 cm 和 30—40 cm 深度范围内具有极显著差异 ($P < 0.05$), 而优先路径在 30 cm 深骤然减少。此方法在一定程度上可为优先路径的研究提供新的借鉴和参考。

关键词: 优先路径; 根长密度; 根重密度; 染色示踪法

中图分类号: S714

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2014)06-0041-06

The Relationship between the Plant Root Distribution and Priority Flow Paths of the Broad-Leaved Forest in Three-Gorges Area

CHANG Dan-dong

(Soil and Water Conservational Monitor Center, Ministry of Water Resources, Beijing 100053, China)

Abstract: The study on priority flow paths is an important topic on the underground water movement research. In this paper, the bright blue dyeing tracer test method was used to directly observe and distinguish woodland soil substrate and soil priority path, respectively, and analyze the soil priority flow paths, the root length density and root weight density of the plant in the roots, the formation of the priority flow paths and the referential flow in soil process. The results showed that the more rainfall intensity was, the surface of the priority flow paths dyeing presented the bigger obvious wide area gathered distribution. When the rainfall was 25 mm/d, the average gathered distribution thickness of large area in sample soil dyeing area was 50 cm. It also showed that the root long density of roots > 5 mm affected the soil pore size significantly, and the root long density of roots < 5 mm affected the soil pore linkage obviously. In addition, the value of root weight density of plant in soil was closely related to the quantity and the linkage degree of priority flow paths. The more value of root weight density is, the more preferred priority flow paths formatted, and more preferred priority flow formatted. The root weight density of plant presented very significant difference in 10—20 cm and 30—40 cm soil depth in the different two regions ($P < 0.05$), the priority flow paths suddenly decreased in the depth of 30 cm. It is a new method for study of the priority flow paths.

Key words: priority flow paths; root length density; root weight density; dyeing tracer method

收稿日期: 2014-08-23

修回日期: 2014-09-23

资助项目: 国家自然科学基金项目 (41271300; 30900866)

作者简介: 常丹东 (1977—), 男, 宁夏平罗县人, 博士, 高级工程师, 研究方向: 水土保持规划设计、技术标准及规程规范编制、重点工程技術管理、政策研究与制度建设、国际合作与科技成果转化推广。E-mail: dandongchang@mwr.gov.cn

水环境和水资源的日益紧缺和恶化,使越来越多的土壤学家、水文地质学家和森林水文学家开始关注土壤和蓄水层中的土壤水分问题及溶质的再分配过程^[1]。研究地下水分运动过程,特别是土壤中水分和溶质通过优先路径快速渗入地下的优先流运动过程,对于分析农业生产中地表水下渗、调查非饱和土壤层的有害废物处理泄露以及系统研究林地土壤水分运动规律等问题非常重要^[2]。Peters 等人通过采用水文测验、同位素和地球化学元素示踪等方法,对加拿大 Shield 森林流域坡面壤中流水文过程及其对源头流域暴雨径流研究表明,森林土壤中大部分水分通量是不遵从达西定律的快速下渗的优先流^[3-5]。水和溶质的快速下渗主要是因为优先路径使水和溶质的下渗过程绕过了许多土壤母质,进入了更深的土壤层^[6]。因此,优先路径研究是研究地下水分运动的重要环节。

优先路径是指土壤中植物根系穿插而产生的根孔,动物的运动通道和居穴,由于土壤膨胀收缩形成的裂隙,以及因湿润锋不稳定所形成的指状渗透通道等^[7-8]。其中,植物根系作为土壤生态系统中一个重要组成部分,不仅能够为植被提供有效的水分及养分,更重要的是它在陆地生态系统中土壤优先流水分运动、溶质传输以及环境污染物的迁移和转化等过程中起重要作用。生长中的植物根系通过分泌有机质能够提供土壤团粒胶结物质^[9-10],通过穿插等生长过程使土粒团聚^[11],增加土壤团聚体数量和大小,改变土壤物理结构,使土壤更为松散,为土壤裂隙的发育提供了基本条件。植物根系死亡后形成管状或环状的植物根孔^[12]和土壤中的裂隙是土壤大孔隙的主要

组成部分,也是土壤水分运移的重要通道,对土壤优先流形成具有积极的影响^[13-16]。程金花等人认为土壤性质、水分条件和植物根系对林地土壤优先流的形成与发展的影响显著^[17]。

本文拟通过近年来流行使用的亮蓝染色示踪试验法直接观测并区分林地土壤基质和土壤优先路径,并分别对染色区和未染色区观测到的土壤优先路径上植物根系的根长密度和根重密度进行分析,探讨发生土壤优先流过程中植物根系的作用及由植物根系形成的优先路径的联通情况。这在一定程度上可为优先路径的研究提供新的借鉴和参考。

1 试验方法

研究区位于重庆四面山中部,地处三峡库区尾部,重庆市西南江津区南部(106°17′—106°30′E,28°31′—28°43′N),海拔 1 100~1 280 m,保存有长势良好的天然次生森林植被,覆盖率为 95.41%。亚热带季风性湿润气候,多年平均气温 13.7℃,无霜期为 285 d,年均降雨量 1 522.3 mm,最大降雨量 160.5 mm,雨季集中在 5—9 月,占年平均降雨重量的 62.17%。

1.1 样地布设调查

综合考虑植被类型、地形状况、坡向海拔等因素,在张家山林区双桥溪地区的阔叶林区,设置面积为 400 m² 的观测样地 4 块。试验地土壤为紫色土,母岩为紫色砂岩。土壤呈微酸性,盐基交换量低,供肥能力较差,土壤黏粒含量较少,土质轻且土壤透水性好。土层厚度 70 cm 左右。观测样地主要自然因子如表 1 所示。

表 1 观测样地主要自然因子

样地号	主要植物种	郁闭度	海拔/m	坡度/(°)	坡向	坡位
F1	栲(<i>Castanopsis fargesii</i>)、白毛新木姜子(<i>Neolitsea aurata</i>)、四川山矾(<i>Symplocos setchuensis</i> Brand)	0.65	1184	26	NE	下坡
F2	栲(<i>Castanopsis fargesii</i>)、银木荷(<i>Schima argentea</i> Pritz)、腺萼马银花(<i>Rhododendron bachii</i>)	0.55	1192	37	NW	中上坡
F3	栲(<i>Castanopsis fargesii</i>)、白毛新木姜子(<i>Neolitsea aurata</i>)、江南越桔(<i>Vaccinium mandarinorum</i>)	0.60	1197	35	SE	中上坡
F4	栲(<i>Castanopsis fargesii</i>)、石栎(<i>Lithocarpus glaber</i> (Thunb.) Nakai)、多脉鼠李(<i>Rhamnus sargentiana</i> Schneid)	0.70	1194	40	SW	中上坡

1.2 观测剖面布设

在 4 块样地内分别布设染色示踪观测剖面,为减少乔木主根对观测结果的影响,土壤剖面位置选择主要考虑与周围乔木的距离关系,一般选择在使染色剖面距各乔木基本等距的地方。经选择,试验观测剖面布设在 3~4 株相邻乔木中心且地表较为平坦处。

1.3 试验准备

平整地表,除去开挖剖面处地表上部的枯落物及大块砾石,尽量不扰动枯落物层下的土壤腐殖质层。埋入试验铁框,将规格为 70 cm×70 cm×50 cm 的铁框埋入地面,嵌入地表深度 30 cm,露出地表高度 20 cm,并将距铁框内壁 5 cm 以内土壤用木锤夯实,防

止染色溶液沿铁框内壁缝隙下漏影响观测结果。将亮蓝粉末配置浓度为 4 g/L 的溶液待用。

1.4 染色示踪

根据长江三峡花岗岩地区林地土壤优先流研究结果,优先流在强降雨过程中表现的更为显著^[18]。为分析降雨特征对林地土壤优先流过程的影响,研究依据所收集到的当地降水资料(2002—2007 年),采用 25 mm(大雨, $P=0.05$)。根据染色剖面表面积和实际损耗,确定在样地 F1—F4 施用亮蓝溶液量为 13 L(相当于 25 mm 降雨)。采用积水渗透(Ponding In-filtration)方式将预制的亮蓝溶液均匀倾洒在铁框中央面积 50 cm×50 cm 的区域,保证最大限度观测到各样地剖面土壤优先流的发生。倾洒亮蓝溶液时保持较稳定的水头和均匀的速度。溶液倾洒完毕后,将预先准备的帆布覆盖在铁框上,并用尼龙绳将四周绑紧,确保染色试验后无其它降雨输入。

1.5 剖面挖掘和样品采集

染色示踪试验完成 24 h 后除去覆盖的帆布和埋置的铁框,挖掘土壤剖面。首先在铁框中心 50 cm×50 cm 区域外围开挖垂直剖面,挖掘深度需达到紫色砂岩基岩层顶层,一般为 70 cm。用土壤刀和小号土铲平整表面,并用刷子除去附着的土粒。将标准灰阶比色卡(Kodak 产)放置在剖面旁,使用标尺标注剖面的长度与宽度,并用遮阳伞控制拍摄光线。采用 500 万像素(2 592×1 544 pixel)的佳能(Canon)数码相机采集垂直染色剖面图像,各垂直剖面拍摄照片 3~5 张。此后以 10 cm 土壤深度为标准,分层挖掘水平土壤剖面,采用与垂直染色剖面同样的方法采集水平染色图像。水平染色剖面的挖掘深度由紫色砂岩基岩深度以及染色状况决定,一般需挖掘至 50—60 cm。挖掘水平染色剖面时,根据染色剂分布状况将剖面分为染色区(Dye Stained Area)和未染色区(Blank Area)。

分别在染色剖面各深度染色区和未染色区中,使用高 4 cm、直径 9 cm 的渗透仪专用环刀采集原状土样(3 个重复),用于进行水分穿透曲线试验;使用 100 cm³ 标准取土环刀采集原状土样(3 个重复),用于进行土壤密度和孔隙度分析;再采集各区土壤混合样品 250 g 和植物根系样品(包括全部的生长根和死亡腐烂根),以备分析土壤理化性质和植物根系状况。

1.6 数据分析方法

(1) 根长密度是反映植物根系生长状况的重要参数,是指单位体积土壤空间中分布的不同径级的根系长度状况。以根系径级为标准,将根长密度分为

≤1 mm, 1~3 mm, 3~5 mm, 5~10 mm 和 >10 mm 等 5 个级别^[19]。计算公式一般为:

$$q_{rl} = \frac{\sum L_r}{V_{soil}}$$

式中: q_{rl} ——根长密度(m/m³); L_r ——某径级根系长度(m); V_{soil} ——土壤体积(m³)。

(2) 植物的根重密度是指一定体积土壤空间中植物根系生长干质量的状况。根重密度越大,植物根系越粗壮,其与土壤的接触面积就越大、形成的间隙就越大,则可能形成孔径较大的优先路径。从理论上来说,根重密度大的区域,优先路径大小和数量均应超过根重密度小的区域。根重密度可按下式分层计算:

$$q_{rm} = \frac{\sum M_r}{V_{soil}}$$

式中: q_{rm} ——根重密度(kg/m³); M_r ——某径级根系重量(kg); V_{soil} ——土壤体积(m³)。

2 结果与分析

2.1 样地土壤染色示踪剖面分析

亮蓝染色溶液淋洒 24 h 后,溶液通过土壤中的联通孔隙运移进入深层土壤内部。开挖土壤剖面发现,随着染色溶液运动路径的延伸,土壤剖面上不均匀分布着一定数量的染色区域和未染色区域。其中,染色区为染色示踪溶液运动路径。由于试验时间较短,认为染色区是土壤水分运动的优先路径(含基流),而未染色区则不是发生土壤水分运动的优先路径。土壤染色示踪剖面观测结果如表 2 所示。

试验结果表明,染色区域分布为表层聚集型,未染色区域与之相反。F1, F2, F3 和 F4 样地表层染色面积达 80% 以上的土层厚度分别为 0—4 cm, 0—6 cm, 0—8 cm 和 0—4 cm。各样地随着土层的加深染色面积迅速减小,土层厚度 20—25 cm 处染色面积基本稳定到的 5% 左右,其变化梯度最小为-0.5,最大为-1.9。这说明土壤表层疏松,密度小,孔隙度大,优先路径密集而连续,优先路径网状结构明显。而随着土层递深,由管网丰富密集的立体网状结构优先路径转为集中的纵向细网状结构优先路径。

2.2 生长根根长密度

通过分析优先流染色区和未染色区内植物根长密度的差异,可以说明植物根系对土壤优先路径和优先流形成的影响。试验对 4 块样地土壤染色区和未染色区内的植物生长根根长密度状况进行了对比研究,如表 3 所示。

表 2 土壤染色示踪剖面观测结果

样地号	土层 深度/cm	染色区			未染色区		
		<0.002 mm	0.02~0.002 mm	0.02~2 mm	<0.002 mm	0.02~0.002 mm	0.02~2 mm
F1	10	13.67	17.35	68.98	13.47	20.61	65.93
	20	12.02	19.96	68.02	11.02	17.95	71.03
	30	17.96	14.29	67.76	11.24	12.63	76.14
	40	14.08	24.07	61.85	13.65	25.47	60.87
F2	10	17.14	20.81	62.06	17.94	26.51	55.55
	20	17.17	17.99	64.84	17.16	26.97	55.86
	30	17.95	24.07	57.98	22.04	22.45	55.51
	40	24.07	26.52	49.41	22.03	35.09	42.88
F3	10	24.9	26.14	48.96	24.47	42.82	32.71
	20	15.92	12.66	71.42	25.71	33.47	40.82
	30	30.6	28.56	40.84	28.57	28.57	42.86
	40	30.59	20.39	49.02	30.6	28.56	40.84
F4	10	12.47	18.71	68.81	14.89	18.97	66.14
	20	11.25	19.42	69.33	13.86	18.76	67.38
	30	10.63	19.01	70.37	12.29	18.44	69.27
	40	14.69	22.23	63.08	14.38	19.51	66.11

表 3 染色及未染色区植物根长密度比较

样点号	土层 深度/cm	层次	m/m ³									
			<1 mm		1~3 mm		3~5 mm		5~10 mm		>10 mm	
			染色	未染色	染色	未染色	染色	未染色	染色	未染色	染色	未染色
F1	10	1	857.60	1408.00	192.80	193.60	172.80	153.60	73.60	52.00	0.00	0.00
	20	2	2064.40	1567.60	622.24	628.40	267.60	175.20	128.80	50.80	30.00	0.00
	30	3	892.00	392.80	191.60	90.40	80.00	32.40	56.80	22.40	23.20	0.00
	40	4	303.20	555.20	115.25	115.20	54.40	27.20	15.20	0.00	0.00	0.00
F2	10	1	1671.67	1173.33	572.80	571.20	264.80	91.20	52.80	96.00	13.60	0.00
	20	2	1641.67	908.33	380.00	377.60	106.40	47.20	28.00	17.60	9.60	0.00
	30	3	905.00	763.33	339.20	416.00	69.60	79.20	24.00	22.40	4.80	0.00
	40	4	546.67	425.00	249.60	312.40	52.80	105.60	67.20	54.40	0.00	0.00
F3	10	1	2163.75	1893.33	1106.40	506.40	356.00	96.80	180.00	24.00	33.60	0.00
	20	2	885.00	726.67	492.80	193.60	75.20	19.20	30.40	16.00	10.40	0.00
	30	3	517.50	473.33	365.60	166.40	34.40	78.40	30.40	41.60	6.40	0.00
	40	4	260.00	235.00	96.00	96.00	16.80	33.60	6.40	12.80	3.20	0.00
F4	10	1	2880.00	1988.33	670.40	685.60	104.80	127.20	77.60	9.60	0.00	0.00
	20	2	2285.00	1761.67	621.60	597.60	84.80	156.80	32.00	11.20	0.00	0.00
	30	3	1671.25	1558.75	634.40	602.40	166.40	93.60	36.00	12.00	0.00	0.00
	40	4	1324.80	1083.20	293.60	204.00	97.60	92.80	23.20	6.40	0.00	0.00

据表 3 可知,不同土层染色区的不同径级植物根系根长密度大都大于未染色区相同径级植物根系的根长密度。如在 F1 样地不同土层,染色区根径为 5~10 mm 的根长密度分别为 73.60,128.80,56.80,15.20 m/m³,未染色区根径为 5~10 mm 的根长密度分别为 52.00,50.80,22.40,0.00 m/m³。未染色区均比染色区根长密度小,说明根长密度越大越容易形成优先路径。这是因为土壤与根系为两种不同介质,

其间必定存在一定的孔隙,而土壤中根长密度越大,联通的根系越多、越长,联通的土壤孔隙就越多、越密集,则越容易形成密集的立体网状结构优先路径。

F1 和 F3 样地表层土壤中根径>5 mm 的根长密度较其他样地大,而 F1 和 F3 样地表层土壤染色面积比最大值和平均值均接近 1。说明表层土壤根径>5 mm 的根长密度越大,土壤与根系间孔隙越大,联通孔隙越密集,网状结构优先路径越密集,土壤水分入

渗能力越强。随着土层深度加大,根径 $>5\text{ mm}$ 的根系的根长密度逐渐变小,土壤根系形成的大孔隙大幅减少,土壤优先路径染色剖面染色区域也急剧变小,优先路径减少。这表明根径 $>5\text{ mm}$ 的根系长度对优先路径的大小和数量起决定性作用。

根径 $<5\text{ mm}$ 的根系根长密度虽然也随深度的增加而递减,但减幅较小,根径 $<5\text{ mm}$ 的根系在一定范围内保持一定的根长密度,这使得由根系形成的小孔隙依然存在并保持一定的连通性。因此,根径 $<5\text{ mm}$ 的根系根长密度的大小对于土壤孔隙的联通有明显作用,根径 $>5\text{ mm}$ 的根系根长密度的大小对土壤孔隙的大小影响显著。

2.3 生长根根重密度

试验对 4 块样地土壤染色区和未染色区内的植物生长根根重密度状况进行了对比研究,如表 4 所示。

表 4 染色区与未染色区的植物根重密度比较

土层 深度/cm	染色分区	根重密度/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)			
		F1	F2	F3	F4
10	染色区	2.843	3.124	5.051	1.215
	未染色区	2.620	1.873	2.625	1.106
20	染色区	4.422	1.141	1.178	0.897
	未染色区	2.303	0.578	0.575	1.130
30	染色区	2.338	0.901	0.648	1.522
	未染色区	0.635	0.600	0.624	1.266
40	染色区	0.396	0.949	0.253	0.872
	未染色区	0.238	0.806	0.236	0.625
总体	染色区	2.500	1.529	1.782	1.126
	未染色区	1.449	0.964	1.015	1.032

据表 4,就同一样地而言,染色区植物根重密度平均大于相同土层的未染色区,这说明染色区植物根系更粗壮、发达,而优先路径存在于根系粗壮发达的区域。土层越深根重密度越小,这与植物根系生长特点一致,是由根系生长特点决定。就不同样地而言,由于样地植物种及其生长环境不同,植物根系数量和质量存在明显差异的可能性极大。

经初步观察发现,阔叶林样地 F3 浅层植物根重密度较其他样地偏大,这可能与此三样地乔木郁闭度低而灌草盖度大有关。灌草类植物根系多生长于浅层土中,根系须根发育,根系横向生长,根径 $<1\text{ mm}$ 的根系发育程度远大于乔木表层土壤处根径 $<1\text{ mm}$ 的根系的发育程度。同时,样地中还有大量的乔木植被,这使得该样地表层土壤中根重密度大于其他样地。根重密度较大的样地 F3 表层染色面积比平均值均接近 1,明显区别于样地 F1,F2 和 F4,可以看出根

重密度的大小对土壤中孔隙的多少和联通程度有一定关系。

通过进一步对研究区不同样地优先流染色区与未染色区的植物根重密度差异显著性方差分析计算,其结果显示:在土壤 10—20 cm 和 30—40 cm 深度范围内,不同样地两区域植物根重密度具有极显著差异($P<0.05$),统计量 F 分别为 18.90 和 39.88;其他范围内,二者差异不显著。土壤深度 10—20 cm 的土层根重密度大,30—40 cm 深的土层根重密度小。试验观测剖面染色面积比在 30 cm 深骤然缩小,在土壤深度 10—20 cm 和 30—40 cm 范围染色面积比平均相差 32%,优先路径数量迅速减少、联通程度大幅降低,优先路径的染色示踪形态形成较大差异。因此,土壤中植物根重密度的大小与优先路径数量和联通程度正相关,根重密度越大越有利于构成优先路径,有利于形成优先流。

3 结论与讨论

(1) 相同降雨强度条件下,各样地染色示踪剖面染色面积比显示阔叶林地 0—6 cm 左右的表层土壤疏松,优先路径密集而连续,优先路径网状结构明显。随着土层深度增加至 20—25 cm 处,染色面积基本稳定到的 5%左右,优先路径由密集的立体网状结构转为集中的纵向细网状结构。

(2) 根径 $>5\text{ mm}$ 的根系根长密度的大小对土壤孔隙的大小影响显著。土壤根径 $>5\text{ mm}$ 的根长密度越大,土壤与根系间孔隙越大,联通孔隙越密集,网状结构优先路径越密集,土壤水分入渗能力越强。随着土层深度加大,根径 $>5\text{ mm}$ 的根系的根长密度逐渐变小,土壤根系形成的大孔隙大幅减少,土壤优先路径染色剖面染色区域也急剧变小,优先路径减少。

(3) 根径 $<5\text{ mm}$ 的根系根长密度的大小对于土壤孔隙的联通有明显作用。根径 $<5\text{ mm}$ 的根系根长密度随深度的增加而递减,但减幅较小,并在一定范围内保持一定的根长密度,这使得由根系形成的小孔隙依然存在并保持一定的连通性。

(4) 土壤中植物根重密度的大小与优先路径数量和联通程度正相关,根重密度越大越有利于构成优先路径,有利于形成优先流。各阔叶林地在土壤 10—20 cm 和 30—40 cm 深度范围内,不同样地两区域植物根重密度具有极显著差异($P<0.05$),与体现优先路径的染色面积形态表现一致,染色面积比在 30 cm 深骤然缩小、优先路径迅速减少。

研究在四面山选择几种常见阔叶林开展试验,以期为优先路径的研究提供新的借鉴和参考。试验过

程在一定程度上受土壤密度、土壤含水量、试验样地乔木生长状况等的影响,虽在方法采用上尽管尽量考虑了避免其他因子的干扰,但试验结果和客观情况并不完全一致。提高试验精度,使试验结果从理论上更贴近实际情况,是今后研究的重点内容。

参考文献:

- [1] Mallants D, Mohanty B P, Vervoort A, et al. Spatial analysis of saturated hydraulic conductivity in a soil with macropores[J]. *Soil Technology*, 1997, 10(2): 115-131.
- [2] 雷志栋, 胡和平, 杨诗秀. 土壤水研究进展与评述[J]. *水科学进展*, 1999, 10(3): 311-318.
- [3] Peters D L, Buttle J M, Taylor C H, et al. Runoff production in a forested, shallow soil, Canadian Shield basin[J]. *Water Resources Research*, 1995, 31(5): 1291-1304.
- [4] Farenhors A, Topp E, Bowman B T, et al. Earthworm burrowing and feeding activity and the potential for atrazine transport by preferential flow[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2000(32): 479-488.
- [5] Hu G X, Xu W, Liu Y Q. Heat transfer and gas flow through feed stream within horizontal pipe[J]. *Transport in Porous Media*, 2003(52): 371-387.
- [6] 程云, 张洪江, 史玉虎, 等. 长江三峡花岗岩坡面土管空间分布特征[J]. *北京林业大学学报*, 2001, 23(5): 19-22.
- [7] Helling C S, Gish T J. Physical and chemical processes affecting preferential flow[J]. *American Society of Agricultural Engineering*, 1991(77): 50-63.
- [8] Li Jing, Chang Dandong, Zhang Hongjiang, et al. Evaluation of soil and water conservation capacities for plantations on the Simian Mountains of China[J]. *The Forestry Chronicle*, 2013, 89(2): 178-183.
- [9] 董慧霞, 李贤伟, 张健, 等. 退耕地三倍体毛白杨林地细根生物量及其与土壤水稳性团聚体的关系[J]. *林业科学*, 2007, 43(5): 24-29.
- [10] 丁文峰, 丁登山. 黄土高原植被破坏前后土壤团粒结构分形特征[J]. *地理研究*, 2002, 28(6): 700-706.
- [11] 秦嘉海, 赵芸晨. 苜蓿草对河西走廊荒漠化土壤改土培肥效应的研究[J]. *土壤通报*, 2004, (6): 804-808.
- [12] 王大力, 尹澄清. 植物根孔在土壤生态系统中的功能[J]. *生态学报*, 2000, 20(5): 869-874.
- [13] 张洪江, 程云, 史玉虎, 等. 长江三峡花岗岩坡面管流产流特性研究[J]. *水土保持学报*, 2001, 15(1): 5-8.
- [14] Zhang Hongjiang, Shi Yuhu, Cheng Yun, et al. Movement properties of the pipe flow along granite slope of the Three Gorges Area on Yangtze River in China[J]. *Forestry Studies in China*, 2002, 4(1): 35-43.
- [15] Lesturgez G, Poss R, Hartmann C, et al. Roots of *Stylosanthes hamata* create macropores in the compact layer of a sandy soil[J]. *Plant and Soil*. 2004, 260(1): 101-109.
- [16] 张洪江, 程云, 史玉虎, 等. 长江三峡花岗岩坡面林地土管特性及其对管流的影响[J]. *长江流域资源与环境*, 2003, 12(1): 55-60.
- [17] 程金花, 张洪江, 史玉虎. 三峡库区花岗岩林地土壤特性与“优先路径”的关系[J]. *中国水土保持科学*, 2005, 9(1): 97-101.
- [18] 张洪江, 王玉杰, 北原曜, 等. 长江三峡花岗岩坡面管流试验研究[J]. *北京林业大学学报*, 2000, 22(5): 53-57.
- [19] 梅莉, 王政权, 韩有志, 等. 水曲柳根系生物量、比根长和根长密度的分布格局[J]. *应用生态学报*, 2006, 17(1): 1-4.