

山地土壤优先流路径的染色示踪研究*

刘目兴 杜文正

(华中师范大学城市与环境科学学院, 武汉 430079)

摘要 在山地林区开展土壤大孔隙及优先流的实验研究,可深化对森林土壤涵养水源机理的认识,为山区的水土流失防治和植被恢复提供依据。利用剖面染色与图像分析相结合的方法,沿长江三峡大老岭-邓村一线,对山地不同垂直带内土壤优先流特征进行了调查,分析了优先流路径对剖面水分入渗过程的影响。结果显示,中山常绿落叶阔混交林-山地黄棕壤、低山暖性针叶林-山地黄壤中大孔隙孔径大、分布广,有利于优先流的形成和入渗。受耕作扰动的弃耕土壤中大孔隙结构遭到破坏,优先流路径与森林土壤不同,且渗流强度较弱,染色区域较浅。森林土壤各发生层内优先流特征差异显著,腐殖质层内以洞穴流为主,水分与土壤基质域交换较少,多通过大孔隙快速下渗。淋溶淀积层内洞穴流消失或减弱,侧向渗透增强。低山暖性针叶林-山地黄壤质地较粗,出现以裂隙为主的大孔隙,优先流表现为裂隙流。弃耕土壤各发生层均表现为指流,染色面积随深度减小,侧向渗透基本稳定。植被-土壤垂直地带性分布是山地土壤优先流存在差异的主要原因,山区生态环境建设中应促进土壤优先流路径的发育。

关键词 森林土壤;大孔隙;优先流;染色示踪;长江三峡

中图分类号 S152.5 **文献标识码** A

优先流是土壤水和溶质沿着根孔、洞穴或裂隙等路径快速运移,绕过土壤基质,迅速而集中地到达土壤深层或地下水的非均匀流动现象^[1]。优先流的发生是土壤结构的异质性造成的,在自然界土壤水分入渗过程中普遍存在。虽然优先流路径占土壤体积的比例不足5%,但在地表水分传导和入渗中起到不可忽视的作用^[2]。土壤优先流路径的研究可揭示降雨或灌溉水入渗的非均匀特征,丰富水文土壤学内容,为流域水循环的调控提供依据^[3]。早在一个多世纪前,Lawes等^[4]就发现了土壤入渗中水分沿大孔隙快速迁移的现象,优先流的产生促进了土壤入渗。目前,对优先流的研究集中于优先流路径观测技术、非均匀环流特征、发生影响因素、优先流理论与模拟等方面^[5-6]。

染色示踪法是野外观测土壤优先流的常用方法。利用染色示踪与剖面图像解译相结合的方法,王康等^[7]和程竹华等^[8]研究了田间土壤水非均匀运动规律和优先流的发生程度,盛丰等^[9]分析了土壤质地对水分非均匀流动的影响,牛健植等^[10]研究了贡嘎山暗针叶林土壤的优先流环绕特征,标记了

水分出流路径。李文凤等^[11]和蒋小金等^[12]将双环入渗与染色示踪结合,研究了典型黑土区剖面染色路径和优先流环绕特征。Kulli等^[13]利用染色图像观测了压实与非压实土壤的优先流特征,定量呈现了土壤压实的程度。Weiler和Flühler^[14]利用染色法分析了不同灌溉强度和初始含水率下土壤优先流模式及侧向渗透特征。这些研究在从剖面图像提取优先流路径时,先将彩色图像转换灰阶图,再根据灰度值大小转换黑白二元图像,区分优先流流经和未流经的区域,而临界灰度阈值的确定往往是图像解译的关键和难点^[5]。Alaoui和Goetz^[15]在研究耕地和草地大孔隙流及其向土壤基质的侧向交换时,提出一种基于图像分析显示大孔隙流路径的新方法,即将真彩色图像的亮度最大化,然后将图像中土壤本身的褐色去除,再根据剩余的蓝、绿、黄3种色彩与染色剂浓度的关联,分析土壤优先流路径及其与土壤基质间交换的特征。与二元图像相比较,亮度最大化的假彩色图像更能反映不同土层水分运动的不均衡特征、优先流路径及其与土壤基质交换状况。本研究借鉴该图像处理方法,对长江

* 国家自然科学基金项目(41001125)、湖北省自然科学基金项目(2010CDB01205)和武汉市晨光计划(201150431112)资助

作者简介:刘目兴(1979—),男,山东巨野人,博士,副教授,主要从事土壤水文学研究。E-mail: liumuxing@yahoo.cn

收稿日期:2013-03-12;收到修改稿日期:2013-05-13

三峡山地土壤的染色图像进行处理,分析不同类型的林地下土壤水非均匀流动特征,探讨优先流发生的原因,为库区水土保持与植被恢复提供依据。

1 研究区概况

研究区位于湖北省宜昌市大老岭林区和夷陵区境内(30°00'13" N ~ 31°28'30" N, 100°51'8" E ~ 111°39'30" E),地处鄂西山地向江汉平原的过渡地带,下游紧邻三峡大坝,海拔 400 ~ 1 800 m,地质基础以中上元古界的酸性结晶岩为主。气候具有亚热带季风气候特征,据夷陵区近 20 a 气象观测资料,年平均气温 16.7℃,平均降水量 1 101.1 mm,平均蒸发量 950 mm,≥10℃的积温 5 403.7℃,无霜期 283 d。山地气候垂直变化明显,海拔每升高 100 m,气温降低 0.4 ~ 0.6℃,降水量增加 10 ~ 15 mm。中山以上气候冷湿,多云雾,空气相对湿度较大^[16]。随海拔升高和人类干扰强度的变化,研究区植被-土壤垂直地带性分异明显,地带性土壤为红壤,分布至海拔 800 ~ 1 200 m 左右,并变为山地黄壤;受人类活动干扰,该地段内原生常绿阔叶林仅残存陡峭偏远的沟谷生境,地表多为马尾松(*Pinus massoniana*)、杉木(*Cunninghamia lanceolata*)、铁坚油杉(*Keteleeria davidiana*)、栓皮栎(*Quercus variabilis*)、板栗(*Castanea mollissima*)等暖性针叶林或落叶阔叶林覆盖。海拔 960 ~ 1 600 m 地段为山地黄棕壤,植被为常绿落叶阔叶混交林,优势种有短柄栎(*Quercus glandulifera* var. *brevipetiolata*)、板栗、千筋树(*Carpinus fargesiana*)、杜鹃(*Rhododendron*)、冬青(*Ilex*)等落叶或常绿树种。海拔 1 600 m 以上为山地棕壤,植被为温性落叶阔叶林,主要群落类型为米心水青冈林(*Fagus engleriana*)、鹅掌楸(*Liriodendron* L.)、板栗林、锥栗林(*Castanea henryi*)和华山松林(*Pinus armandii*)等^[16]。

2 研究方法


2.1 染色示踪实验

野外实验于 2012 年 7 月—9 月进行,沿大老岭林区-夷陵区邓村乡一线选取了海拔高度依次降低的四个典型植被-土壤样带设置实验小区,即大老岭温性阔叶林-山地棕壤(1 700 m)、白水头常绿落叶针阔混交林-山地黄棕壤(1 173 m)、罗家岩弃耕坡地(942 m)以及竹林湾暖性针叶林-山地黄壤(740

m),各样地土壤性质见文献[17]。采用染色示踪法调查 4 种植被-土壤类型的土壤大孔隙结构,每种类型下选取 2 ~ 3 个样地进行亮蓝溶液(Brilliant blue)染色实验。首先,配兑 120 L 亮蓝溶液,将 480 g 食用亮蓝粉末用自来水冲淡至浓度 4 g L⁻¹。使用模拟降雨器将准备好的溶液在降水强度 47.5 mm h⁻¹ 下喷灌在内径 80 cm 的铝质圆环围绕的样地表面^[17]。亮蓝溶液无毒,溶解度高,且不易被土壤物质所吸附。亮蓝溶液在四种植被-土壤类型样地入渗 24 h 后,以 5 cm 或 10 cm 深度为间隔依次挖掘并修整土壤水平剖面,以钢卷尺为标尺,用分辨率为 4 288 × 2 848 的 Pentax KR 数码相机对各个水平染色剖面拍照,带回室内分析。

2.2 图像处理与分析

为减少圆环边缘对颜料入渗的影响,利用 Photoshop 7.0 软件裁剪染色圆环中心 60 cm × 60 cm 的图像,进行编辑分析,获取染色深度、染色面积及不同发生层的颜料浓度,分析优先流路径及其与土壤基质间的交换,具体操作步骤如下(图 1)。

(1)校正染色图像。用相机垂直拍摄土壤剖面时照片边缘会产生变形,因此,首先在 Photoshop 软件内根据照片内垂直与水平的标尺(图 1a),使用剪切工具在透视状态下矫正剖面染色图像,得到校准图像图 1b。

(2)分离染色区域。将校准后图像的饱和度调到最大(+100),真彩色图像图 1b 变为蓝、绿、黄、褐色等 4 种色彩鲜明的假彩色图像图 1c,且蓝色深浅差异较大。图像图 1c 中褐色为土壤剖面内未染色区域,蓝、绿、黄为染色区域,且染色颜料的浓度自深蓝向浅蓝、绿色、黄色依次减小^[18]。用 Photoshop 软件的魔术棒选择并去除未染色土壤呈现的褐色,得到染色图像图 1d。然后,用魔术棒依次选择并剪切图像图 1d 内深蓝、浅蓝、绿色、黄色等 4 个颜色,分别黏贴在新建空白图层内,保存为单独的 JPG 文件(图 1e)。

(3)分析染色路径分布特征。将单色图像图 1e 由 RGB 格式转换灰度图,再增强对比度变化为黑白二元图像,并根据图 1b 中的标尺,以 10 cm 为间隔标注土层深度,得到图像图 1f。根据图像图 1f 直方图显示的总像素数和被染色的像素数,计算土壤剖面染色比例。同时,以 10 cm 为间隔,分层剪切图像图 1f 内的染色区域,黏贴至新图层内,分析土壤剖面染色比例。

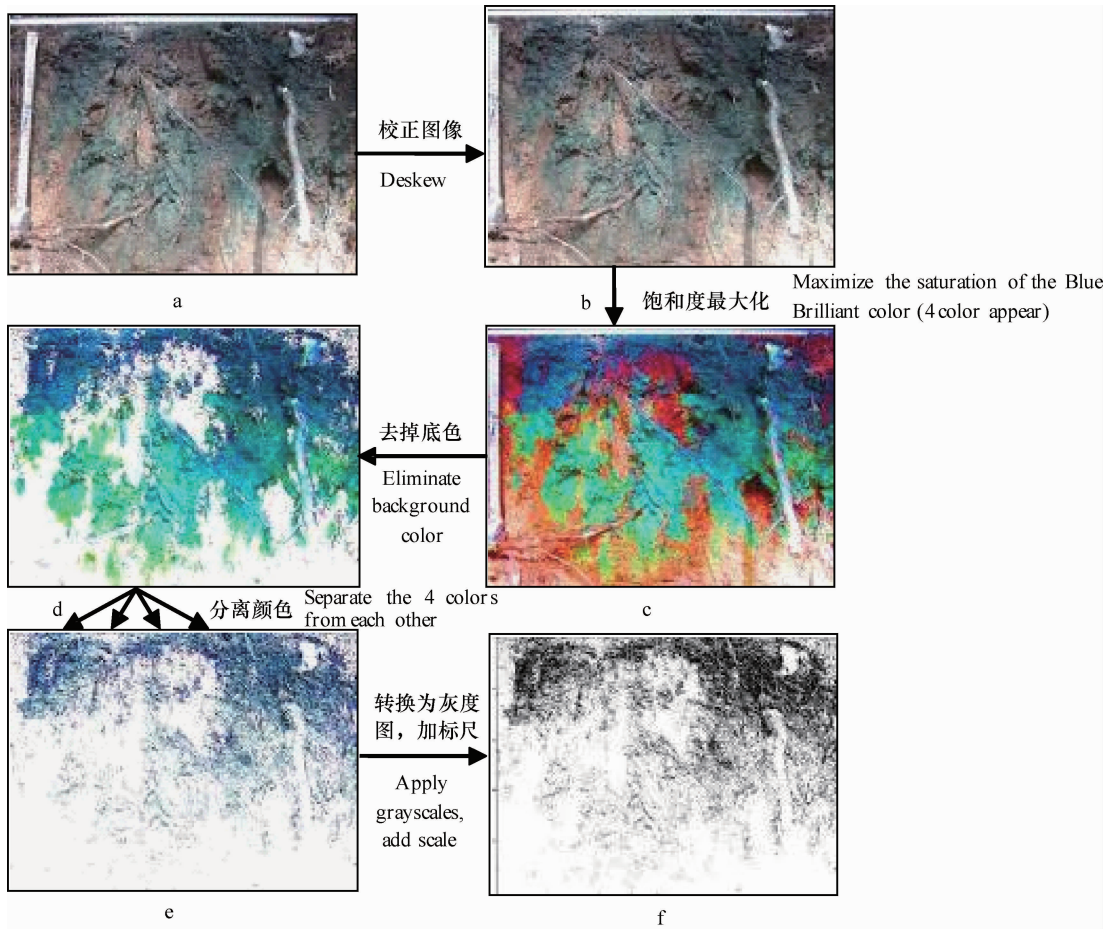


图 1 用 Photoshop 处理染色图像的流程

Fig. 1 Flowchart of Photoshop processing staining image

3 结果与讨论

3.1 山地土壤水平剖面染色特征

不同植被-土壤样带 0~60 cm 土层深度内, 白水头样地各水平剖面的平均染色面积比例最大, 为 80%, 染色比例最小的是大老岭样地, 仅为 30%, 罗家岩弃耕地、竹林湾样地为 48% 和 68% (表 1)。根系伸展、土壤质地以及土壤大孔隙结构的差异是造成各样地染色面积差异的主要原因^[6]。针阔混交林覆盖的白水头样地土壤颗粒较粗, 土壤质地为砂质壤土, 土质疏松, 根系多且分布密集, 下层多裂隙, 形成的优先流路径多, 土壤水平剖面染色面积最大^[19]。大老岭样地海拔较高, 受气候、植被和地形等因素的综合作用, 土壤质地为黏质壤土, 平均染色面积最小, 且集中在 0~20 cm 深度土层, 20 cm 以下剖面染色比例均低

于 5%。阔叶林植物根系的伸展和土壤动物活动导致大老岭样地土壤总孔隙度较大, 但土壤质地黏重, 上层土壤对颜料吸附强, 染色深度小于砂质或砾质土壤^[20]。暖性针叶林覆盖下竹林湾样地的土壤为多砾砂质壤土, 土壤颗粒较粗, 裂隙等优先路径内亮蓝溶液渗透快, 土壤总染色面积较大。Luxmoore^[19]和 Wilson 等^[21]在观测森林土壤孔隙导水率和壤中流发生过程时, 发现土壤导水率主要受几条直径较大的根孔控制。牛健植等^[10]对贡嘎山暗针叶林土壤的研究, 也发现土壤水分沿着一条或几条优先路径快速向下运移。不同类型的森林土壤优先流路径存在差异, 这在 Jost 等^[22]对欧洲山毛榉和挪威云杉林地的优先流对较研究中也得到证实。受农业耕作的影响, 罗家岩弃耕地土壤孔隙结构遭到破坏, 土体内较大的根孔和裂隙远远少于森林土壤, 优先流也明显区别于森林土壤样地, 耕作层以下优先流路径较少, 水平剖面的平均染色面积小, 染色比例较白水头样地和竹

林湾样地分别低 34% 和 28%。Cheng 等^[6]对重庆四面山不同土地利用类型下土壤优先流的染色试

验也显示,农田优先流路径较林地和灌丛少,地表 20 cm 深度以下的土层更为明显。

表 1 各植被带不同深度水平剖面 (60 cm × 60 cm) 染色面积比例

Table 1 Proportion of stained area to horizontal soil section (60 cm × 60 cm) as affected by soil depth and vegetation zone (%)

土层深度 Soil depth (cm)	大老岭温性落叶阔叶林 山地棕壤 Mountain brown earth with temperate deciduous broad- leaved forest in Dalaoling site	白水头常绿落叶阔叶混 交林山地黄棕壤 Mountain yellow brown soil with evergreen-deciduous broad-leaf mixed forest in Baishuitou site	罗家岩蒿草弃耕地 Deserted farmland dominated with Artemisia in Luojiayan site	竹林湾暖性针叶林 山地黄壤 Mountain yellow earth with warm coniferous forest in Zhulinwan site
	5	60	95	73
10	38	89	60	65
15	35	90	54	64
20	38	83	43	77
30	5	73	32	-
40	2	52	24	62
60	-	-	-	50
平均染色比例 Average dyed area proportion	30	80	48	68
标准差 Standard deviation	22	16	18	14

注: - 表示该深度未观测。染色面积比例为水平剖面内染色区域面积与剖面总面积的百分比 Notes: - stands for no observation at this depth. Proportion of stained area refers to the proportion of stained area to the total area of a soil horizon profile

3.2 山地土壤染色面积的垂直分异

由表 1, 各样带土壤表层 5 cm 深度剖面染色面积比例均超过 60%。40 cm 深度剖面染色面积缩小至最小值, 但是各样地间差异很大。大老岭样地为 2%, 与 5 cm 剖面相比染色面积缩小超过 30 倍; 而竹林湾样地 60 cm 剖面染色面积仍有 50%, 较 5 cm 剖面缩小不足一倍。大老岭地区温性落叶阔叶林土壤表层根系发达, 根系形成的孔隙为亮蓝溶液入渗提供了优先流路径, 地下 5、10、15、20 cm 深度水平剖面染色面积稳定在 35% 以上。石辉等^[23]在岷江上游森林土壤大孔隙特征的研究中, 发现大孔隙垂直分布表现出土壤上层多、下层少的特点。李伟莉等^[24]对长白山山地土壤大孔隙研究中, 也发现阔叶林覆盖的暗棕色森林土内半径大于 0.1 mm 的大孔隙均随深度迅速减少, 在 40 cm 以下大孔隙数量很少。

白水头样地、竹林湾样地的土壤水平剖面染色面积随深度增加而波动变化, 至观测剖面最深处染色比例均在 50% 以上(表 1)。土壤淋溶淀积层和母质中的倾斜和竖直裂隙形成大量优先流路径, 使亮蓝溶液能够入渗到较深的土层中并将流经区域

染色, 增大了深层土壤的染色面积, 从而导致这两处样地土壤染色面积垂直变化呈波动降低趋势, 下降幅度较小。李伟莉等^[24]发现与暗棕色森林土大孔隙的垂直分布相反, 云杉、落叶松覆盖的棕色针叶林内土壤大孔隙随深度而增多。竹林湾样地成土母岩为酸性结晶的花岗岩, 土壤发育程度更低, 颗粒更粗, 土壤母质层的孔隙度大于白水头样地, 亮蓝溶液沿母质层的裂隙大量入渗, 水平剖面染色深度最大。白水头样地染色区域集中在地下 40 cm 范围内, 而竹林湾样地稳定入渗深度达到 60 cm。陈风琴等^[25]研究发现次生针叶林下优先流路径集中在土壤表层, 下层染色面积锐减, 呈“T”字形分布。罗家岩弃耕地土壤水平剖面染色面积比例呈随深度增加均匀递减的趋势。该样地为弃耕 3~4 a 的红薯地, 地表植被为蒿草, 草本植物根系细小, 伸长范围有限, 土壤中较大的根孔极少。此外, 弃耕地土壤结构破碎, 大孔隙结构少, 根孔和虫穴数量远小于森林土壤类型, 土壤中亮蓝入渗以指流为主。

3.3 森林土壤不同发生层染色浓度的分析

土壤水分入渗除垂直下渗外, 还存在侧向渗

透。土壤染色除了与颜料溶液的垂直渗透有关,也和优先流向土壤基质的侧渗有密切关系^[14]。这种侧向入渗与优先流的差异,可以通过剖面染色浓度的差异分析进行鉴别^[18]。Alaoui 和 Goetz^[15]将亮蓝染色图像分割为深蓝、浅蓝、绿、黄 4 种色彩,蓝色区域显示土壤剖面中优先流的主要路径,颜料浓度越高,处理后蓝色越深,孔隙直径越大。绿色和黄色

区域则显示优先流的侧向扩散和土壤基质域的水分渗透^[18]。土壤剖面染色特征在林地腐殖质层、淋溶淀积层,弃耕地耕作层、犁底层呈现不同的染色模式。根据野外调查中不同垂直带土壤发生层的划分,对各样地土壤腐殖质层和淋溶淀积层的染色特征进行分析,探讨土壤优先流路径成因及其向基质域的侧向渗透(表 2)。

表 2 不同垂直带调查样地的土壤发生层厚度

Table 2 Thickness of the soil genetic horizon in different altitudinal sample sites

实验样地 Experimental sites	土壤发生层 Soilgenetic horizon	土层深度 Thickness of the soil layer (cm)	实验样地 Experimental sites	土壤发生层 Soilgenetic horizon	土层厚度 Thickness of the soil layer (cm)
亚高山大老岭样地 subalpine Dalaoling site	A	0 ~ 15	中山白水头样地 Baishuitou site at mid-mountain zone	A	0 ~ 10
低山罗家岩弃耕地 Zhulinwan site at low-mountain zone	BE	15 ~ 40	低山竹林湾样地 Luojiayan site at low-mountain zone	BE	10 ~ 40
	P	0 ~ 15		A	0 ~ 5
	B	15 ~ 40		BE	5 ~ 40

注:“A”表示腐殖质层,“BE”表示淋溶淀积层,“P”表示耕作层,“B”表示犁底层 Note: A layer refers to humus horizon, BE layer refers to leaching illuvial horizon, P layer refers to plowing layer, B layer refers to hardpan below plowing layer

3.3.1 腐殖质层染色浓度分析 染色图像分析显示,大老岭样地土壤剖面腐殖质层的蓝色面积为 18%。其中深蓝和浅蓝的比例有所变化,深蓝面积随深度扩大,由 13% 提高到 18%;浅蓝面积缩小,由 8% 下降到 1% (图 2a)。腐殖质层内大孔隙的孔径随土层深度而增大,这是由于大老岭地区温性落叶阔叶林覆盖度高,植物根系发达,分布密集。剖面挖掘时发现直径 1 ~ 2.5 cm 的根系多达 13 根,根系的水平与垂直延伸使土壤孔隙形成交错网络,成为亮蓝溶液入渗的主要通道。地表腐殖质层内优先流以垂直下渗的洞穴流为主,导致与侧向渗透相关的绿色和黄色面积随深度缩小,由 40% 下降到 16%。这在地下 5 cm 深度水平剖面染色分析结果得以体现,蓝色区域集中在根系周围,绿色和黄色自根系向周围扩散(图 3)。剖面中生物活动形成的相互连通的根孔、虫洞等土壤大孔隙是染色颜料快速下渗的主要路径。这与 Bramley 和 Tyerman^[26]和 Aubertin 和 Bussiere^[27]的研究结果一致。前者发现洪泛平原桉树根系周围土壤层的渗透率较草地高 2 倍 ~ 17 倍,后者测得森林土壤中水分可通过大孔隙迁移至 10 m 或 10 m 以下的深度。腐殖质层内亮蓝溶液形成的洞穴流在“优先”向下运动的过程

中,最初并未使大孔隙周围土壤染色,而是在几小时后才发生侧向渗透,时间越久,染色图像内绿色和黄色的面积越大。

白水头样地腐殖质层染色图像内蓝色面积比例近 80%,5 cm 深水平剖面内浅蓝比例 54%,深蓝面积 23%。与大老岭样地不同的是,此处植被以灌木和松树幼林为主,根系较发达,但以直径 5 ~ 10 mm 的细根为主,根系直径小于大老岭样地,导致染色图像内浅蓝较深蓝面积大。绿色和黄色面积呈随深度增加呈扩大趋势,这与孔隙直径小,水分向下运移的通道减少,亮蓝溶液不能快速下渗到更深的土层中,滞留水分侧向渗入土壤基质。竹林湾地处低山暖性针叶林带,土壤发育程度低,腐殖质层厚度仅 5 cm,蓝色面积比例达到 55%,染色区分布较均匀,优先流特征与白水头样地的洞穴流相似(图 3)。腐殖质层内绿色和黄色面积较白水头样地显著增大,达到 37%,侧向渗透是水分迁移的重要形式。这是由于该样地土层薄,花岗岩风化物质地粗,马尾松为主的暖性针叶林根系较杉木根系更浅,优先流路径少,水分向基质域的侧向渗透加剧,形成了较大面积的绿色和黄色区域。

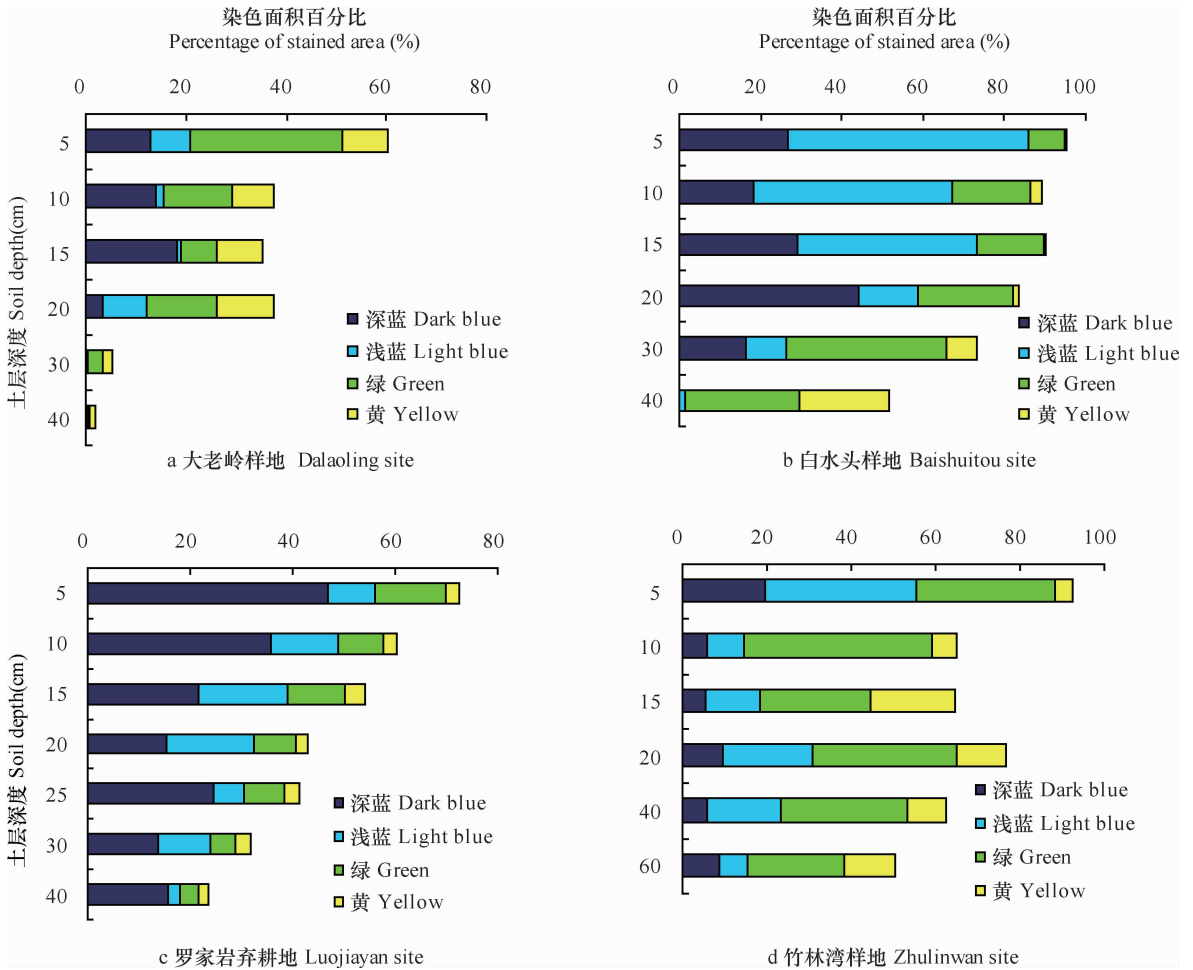


图 2 各样地水平剖面染色浓度的垂直变化

Fig. 2 Vertical change in staining concentration in horizontal soil sections at four hillslope sites

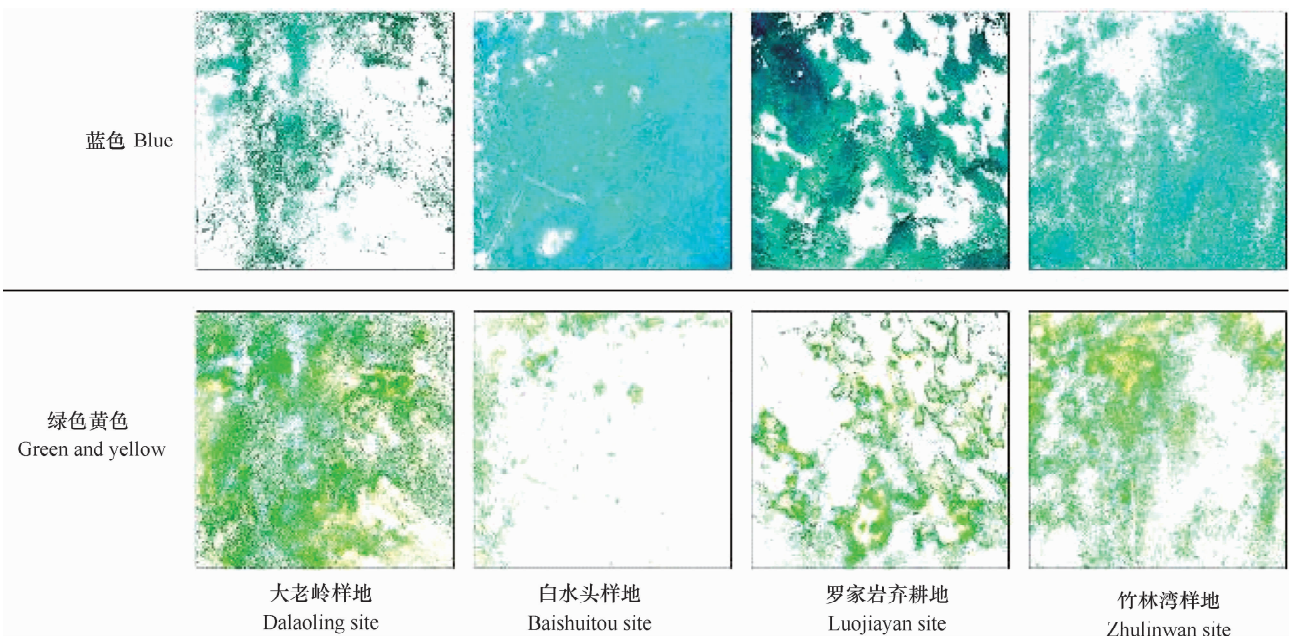


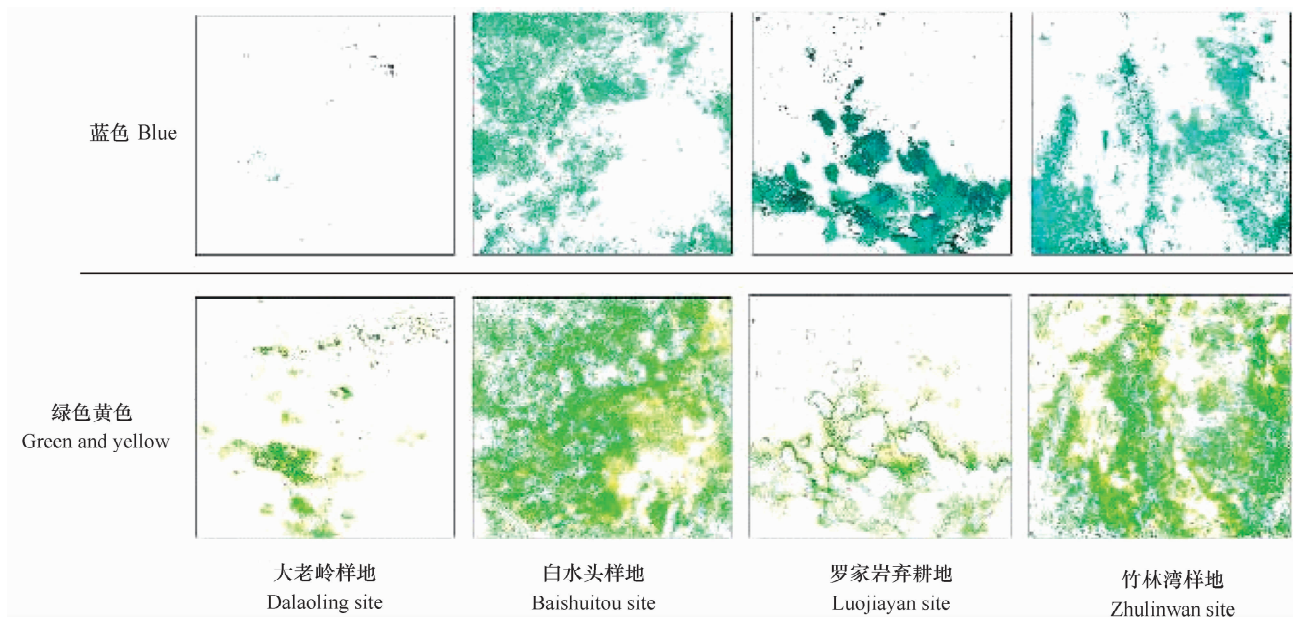
图 3 各样地 5 cm 深度水平剖面染色浓度对比

Fig. 3 Comparison between the four hillslope sites in staining concentration of the horizontal soil sections (5 cm in depth)

罗家岩弃耕地耕作层厚 15 cm, 随深度的增加, 水平剖面的深蓝面积减小, 浅蓝面积略微扩大, 绿色和黄色面积基本不变。不同深度的染色图像图 3 与图 4 比较可见, 亮蓝溶液在耕作层土壤中并非均匀下渗, 而是绕过大部分土壤基质呈“指状”或“舌状”快速入渗。人为耕作疏松了表层土壤, 同时破坏了原有孔隙结构, 水分入渗过程中上、下土层交界面处的土壤含水量不等, 下层土壤含水量小于上层土壤含水量, 在水势梯度力的作用下, 入渗水流优先在部分孔隙中流动, 出现湿润峰的不均匀或不稳定, 形成指流。张建丰和王文焰^[28]在对沙粒上覆黄土的土样进行渗透实验时, 发现上下层土壤颗粒分布不均匀是指流产生的主要原因, 当进入沙层的水分稳渗率小于沙层饱和导水率的 2% 时, 即可发生明显的指流现象。

3.3.2 淋溶淀积层染色浓度分析 图 4 可见, 不同垂直地带土壤淋溶淀积层内水平剖面染色特征与腐殖质层差异明显。大老岭样地淋溶淀积层的

染色面积较腐殖质层锐减, 蓝色面积在 30 cm 深度水平剖面已降至 0.3%, 腐殖质层内的洞穴流到达淋溶淀积层后基本消失。绿色和黄色面积在 20 cm 深度扩大, 到 30 cm 深度也降至 5%, 水分的侧向渗透在淋溶淀积层上部有所加强, 下渗速度进一步减缓。优先流发生在与腐殖质层交界的上部土层, 30 cm 以下未见蓝色区域。少量下渗到淋溶淀积层底部的亮蓝溶液以侧向渗透的方式迁移, 并且扩散缓慢。可见, 温性阔叶林山地棕壤下优先流主要发生在动植物活动剧烈的腐殖质层内。白水头样地淋溶淀积层(10~40 cm)深蓝面积在 15 cm 深度剖面开始增加, 到 20 cm 深度达到最大值 44%。该层内浅蓝面积较小, 黄色和绿色面积较大。土壤 20 cm 深度处次生杉木根系分布集中, 优先流路径多, 20 cm 以下侧向渗透增大, 30 cm 深度处染色剖面中绿色和黄色面积显著扩大, 优先流被侧渗所取代, 水分向土壤基质域的侧向渗透成为水及溶质迁移的主要形式。



注: 竹林湾样地无 30 cm 深度图像, 此处为 40 cm 染色图 No image of the section (30 cm in depth) of Zhulinwan site, and the image here is the one of the section 40 cm in depth

图 4 各样地 30 cm 深度水平剖面染色浓度对比

Fig. 4 Comparison between the four hillslope sites in staining concentration of the horizontal soil sections (30cm in depth)

竹林湾样地淋溶淀积层(5~40 cm)蓝色面积较腐殖质层(0~5 cm)显著缩小, 绿色和黄色面积在各剖面内基本稳定。土层内直径大于 2 mm 的砾石含量达到 40.6%~62.3%, 裂隙和裂缝较多。大量砾石和裂隙的存在加剧了优先流路径在水平剖

面上分布的不均匀, 地表 40 cm 深度水平剖面染色后蓝色区域具有裂隙流的痕迹(图 4)^[29]。裂隙流和管流是花岗岩分布的山区土壤常见的优先流模式, 能促进地表水的快速入渗^[20,30]。罗家岩弃耕地犁底层内深蓝面积呈波动变化, 绿色和黄色面积随

深度增加均匀递减。该弃耕地地表植被为密度 76 株 m^{-2} 的蒿草,草本植物根系较浅,植物根孔和虫洞对优先流的影响弱,优先流表现为指流。犁底层土壤容重大、孔隙度小,水分侧向渗透加剧,30 cm 深度水平剖面染色后的蓝色面积明显小于 5 cm 深度的蓝色区域(图 4)。

4 结 论

山地各植被-土壤样带中,植物根孔、虫洞和土壤质地决定了优先流路径的发育和空间分布,是土壤剖面染色特征存在差异的主要因素。森林覆盖的土壤剖面内植物根孔、虫洞等大孔隙数量多、孔径大,有利于优先流的形成,染色面积明显大于土壤结构性差、根孔裂隙少的弃耕地。分析土壤各发生层内水平剖面染色浓度的差异,可揭示优先流发生类型及其向基质的侧向渗透强度。温性阔叶林覆盖的大老岭样地大孔隙集中分布在腐殖质层内,染色图像呈洞穴流的形式分布,水分运移以下渗为主,与基质域的侧向交换较少。针阔混交林覆盖的白水头样地淋溶淀积层内杉木的根系多,大孔隙网络复杂,洞穴流的强度增大。暖性针叶林覆盖的竹林湾样地受土壤母质及风化程度的影响,淋溶淀积层内大孔隙以裂隙为主,优先流表现为裂隙流,土体中的裂隙延伸到母质层中,亮蓝溶液入渗的深度最大。土地耕作对罗家岩弃耕地土壤中大孔隙结构破坏严重,优先流类型不同于森林土壤,以指流为主且随深度增加而减弱,水分的侧向渗透基本恒定。

垂直地带性显著的山地土壤受气候和植被类型的影响,土壤发育程度以及土壤大孔隙的数量和结构不同,导致土壤水文特征差异明显。在垂直分异显著的山地林区研究土壤优先流,可深化对森林土壤涵养水源机理的认识,为退耕还林、天然林保护工程的植被恢复重建以及山区的水土保持提供理论与决策依据。

参 考 文 献

- [1] Beven K, Germann P. Macropores and water flow in soils. *Water Resource Research*, 1982, 18(5): 1311—1325
- [2] 徐宗恒, 徐则民, 曹军尉, 等. 土壤优先流研究现状与发展趋势. *土壤*, 2012, 44(6): 905—916. Xu Z H, Xu Z M, Cao J W, et al. Present and future research of preferential flow in soil (In Chinese). *Soils*, 2012, 44(6): 905—916
- [3] 李小雁. 水文土壤学面临的机遇与挑战. *地球科学进展*, 2012, 27(5): 557—562. Li X Y. Opportunity and challenges for hydrogeology (In Chinese). *Advances in Earth Science*, 2012, 27(5): 557—562
- [4] Lawes J B, Gilbert J H, Warington R. On the amount and composition of the rain and drainage waters collected at Rothamsted. *Journal of the Royal Agricultural Society of England Series 2*, 1882, 17: 241—279
- [5] Allaire S E, Roulier S, Cessna A J. Quantifying preferential flow in soils: A review of different techniques. *Journal of Hydrology*, 2009, 378(2): 179—204
- [6] Cheng J H, Zhang H J, Wang W, et al. Changes in preferential flow path distribution and its affecting factors in southwest China. *Soil Science*, 2011, 176(12): 652—660
- [7] 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. *水科学进展*, 2007, 18(5): 662—667. Wang K, Zhang R D, Jiao X Y. Characterizing heterogeneity of water flow and solute transport in the porous media using dye tracer (In Chinese). *Advances in Water Science*, 2007, 18(5): 662—667
- [8] 程竹华, 张佳宝, 徐绍辉. 黄淮海平原三种土壤中优势流现象的试验研究. *土壤学报*, 1999, 36(2): 154—161. Cheng Z H, Zhang J B, Xu S H. Experimental studies on preferential flow in three soils in Hunag-Huai-Hai Plain (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 1999, 36(2): 154—161
- [9] 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. *水利学报*, 2009, 40(1): 101—108. Sheng F, Wang K, Zhang R D, et al. Study on heterogeneous characteristics of soil water flow in field by dye tracing method (In Chinese). *Journal of Hydraulic*, 2009, 40(1): 101—108
- [10] 牛健植, 余新晓, 张志强. 贡嘎山暗针叶林森林生态系统土壤水分运移特征分析. *北京林业大学学报*, 2008, 30(S2): 240—245. Niu J Z, Yu X X, Zhang Z Q. Movement characteristics analysis of soil water flow in the dark coniferous forest ecosystem of Gongga Mountain, Sichuan Province of southwestern China (In Chinese). *Journal of Beijing Forestry University*, 2008, 30(S2): 240—245
- [11] 李文凤, 张晓平, 梁爱珍, 等. 不同耕作方式下黑土的渗透特性和优先流特征. *应用生态学报*, 2008, 19(7): 1506—1510. Li W F, Zhang X P, Liang A Z, et al. Characters of infiltration and preferential flow of black soil in Northeast China under different tillage patterns (In Chinese). *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2008, 19(7): 1506—1510
- [12] 蒋小金, 王恩姮, 陈祥伟, 等. 典型黑土耕地土壤优先流环绕特征. *应用生态学报*, 2010, 21(12): 3127—3132. Jiang X J, Wang E H, Chen X W, et al. Surrounding characteristics of preferential flow in cultivated typical black soils of Northeast China (In Chinese). *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2010, 21(12): 3127—3132
- [13] Kulli B, Berli M, Attinger M, et al. Compaction of agricultural and forest soils by tracked heavy construction machinery. *Soil & Tillage Research*, 2003, 75: 37—52
- [14] Weiler M, Flüßler H. Inferring flow types from dye patterns in macroporous soils. *Geoderma*, 2004, 120(2): 137—153

- [15] Alaoui A, Goetz B. Dye tracer and infiltration experiments to investigate macropore flow. *Geoderma*, 2008, 144(2): 279—286
- [16] 沈泽昊, 张新时, 金义兴. 三峡大老岭植物区系的垂直梯度分析. *植物分类学报*, 2001, 39(3): 260—268. Shen Z H, Zhang X S, Jin Y X. A vertical gradient analysis of the flora of Dalaoling Mountain in the Three Gorges region, China (In Chinese). *Acta Phytotaxonomica Sinica*, 2001, 39(3): 260—268
- [17] 刘目兴, 王文德, 张海林, 等. 三峡库区不同垂直带森林土壤大孔隙染色实验. *山地学报*, 2012, 30(2): 147—155. Liu M X, Wang W D, Zhang H L, et al. Forest soil macropore of different altitudinal zones with dye tracing method in three gorges reservoir area (In Chinese). *Journal of Mountain Science*, 2012, 30(2): 147—155
- [18] Forrer I, Papritz A, Kasteel R, et al. Quantifying dye tracers in soil profiles by image processing. *European Journal of Soil Science*, 2000, 51: 313—322
- [19] Luxmoore R J. Micro-, meso-, and macroporosity of soil. *Soil Science Society of America Journal*, 1981, 45: 671—672
- [20] 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. *应用生态学报*, 2010, 21(5): 1217—1223. Wang W, Zhang H J, Cheng J H, et al. Macropore characteristics and its relationships with the preferential flow in broad-leaved forest soils of Simian Mountains (In Chinese). *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2010, 21(5): 1217—1223
- [21] Wilson G V, Jardine P M, Luxmoore R J, et al. Hydrology of a forested hillslope during storm events. *Geoderma*, 1990, 46(2): 119—138
- [22] Jost G, Schume H, Hager H, et al. A hillslope scale comparison of tree species influence on soil moisture dynamics and runoff processes during intense rainfall. *Journal of Hydrology*, 2012, 420: 112—124
- [23] 石辉, 陈凤琴, 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. *生态学报*, 2005, 25(3): 507—512. Shi H, Chen F Q, Liu S R. Macropores properties of forest soil and its influence on water effluent in the upper reaches of Minjiang River (In Chinese). *Acta Ecologica Sinica*, 2005, 25(3): 507—512
- [24] 李伟莉, 金昌杰, 王安志, 等. 长白山主要类型森林土壤大孔隙数量与垂直分布规律. *应用生态学报*, 2007, 18(10): 2179—2184. Li W L, Jin C J, Wang A Z, et al. Amount and vertical distribution of macropores in forest soils in Changbai Mountains (In Chinese). *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2007, 18(10): 2179—2184
- [25] 陈凤琴, 李玉国, 史秀娟. 林地土壤优势流的染色方法研究. *土壤通报*, 2011, 42(2): 285—289. Chen F Q, Li Y G, Shi X J. A study on the preferential flow in the forest land by using methylene blue tracer (In Chinese). *Chinese Journal of Soil Science*, 2011, 42(2): 285—289
- [26] Bramley J, Tyerman S D H. Floodwater infiltration through root channels on a sodic clay floodplain and the influence on a local tree species *Eucalyptus largiflorens*. *Plant and Soil*, 2003, 253: 275—286
- [27] Aubertin M, Bussiere B. Water flow through cover soils using modeling and experimental methods. *Journal of Geotechnical Engineering-American Society of Civil Engineers*, 2001, 127(9): 810—813
- [28] 张建丰, 王文焰. 砂层在黄土中发生指流条件的试验研究. *农业工程学报*, 2008, 24(3): 82—86. Zhang J F, Wang W Y. Experimental study of finger flow occurrence in loess soil (In Chinese). *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2008, 24(3): 82—86
- [29] 李燕, 刘吉振, 魏朝富, 等. 砾石对土壤水分入渗(扩散)的影响研究. *土壤学报*, 2011, 48(2): 435—439. Li Y, Liu J Z, Wei C F, et al. Effect of rock fragment content on water infiltration (diffusion) in purple soils (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2011, 48(2): 435—439
- [30] 马佳. 裂土优势流与边坡稳定性分析方法. 武汉: 中国科学院武汉岩土力学研究所, 2007. Ma J. Fissure of advantages flow and slope stability analysis methods (In Chinese). Wuhan: Institute of Rock & Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, 2007

TO INVESTIGATE SOIL PREFERENTIAL FLOW PATHS IN MOUNTAIN AREA USING DYE TRACER

Liu Muxing Du Wenzheng

(College of Urban and Environment Science, Huazhong Normal University, Wuhan 430079, China)

Abstract Preferential flow plays an important role in water and contaminants transporting in the soil. The aim of this study is to investigate characteristics of soil preferential flows in different vertical traps in mountains along the Dalaoling-Dengcun section of the Three Gorges of the Yangtze River, using the section staining method coupled with image analysis, and hence to analyze impact of preferential flows on water infiltration in the profile. Results show that the mountain yellow brown earth under evergreen-deciduous broadleaf mixed forest in the mid-mountain belt and the mountain yellow earth under low-mountain warm coniferous forests have soil pores large in aperture and extensive in distribution, which is

conducive to formation of preferential flows, and water infiltration. In deserted farmland, the large-pored soil structure is damaged by tillage in the past, the paths of preferential flows differ from those in the forest soils, and consequently its water infiltration intensity is low and the color of the stained area is light. Characteristics of preferential flows differ significantly between soil layers. Burrow flows occur frequently in the humus horizon, and soil water percolate down rapidly through macropores, exchanging little with surrounding soil matrix. In the leaching illuvial horizon, burrow flows disappear or weaken, while lateral percolation intensifies. The low-mountain yellow earth under warm coniferous forests is rather coarse in texture, and macropores mainly in the form of crack or fissure appear, making crack flows the preferential flows. In deserted farmland, finger flows dominate in all the genetic horizons with the area of stained section diminishing with soil depth, however, lateral percolation remains basically constant in these horizons. In conclusion, vegetation-soil vertical zonal distribution is the major cause of the difference existing in preferential flow between mountain soils. In eco-environment construction in the maintain regions, it is essential to promote development of preferential flows in the soil.

Key words Forest soil; Macropore; Preferential flow; Dye tracing; Three Gorges of the Yangtze River

(责任编辑:汪枳生)