

三峡库区高砾石含量紫色土优先流形态特征

戴翠婷¹, 刘窑军², 王天巍¹, 李朝霞¹, 谭学艺³

(1. 华中农业大学水土保持研究中心, 武汉 430070; 2. 江西省水土保持科学研究院, 南昌 330029; 3. 秭归县水土保持试验站, 湖北 秭归 443600)

摘要: 以三峡库区王家桥小流域林地、耕地和园地为研究对象, 结合染色示踪技术, 利用图像处理软件技术, 通过计算优先流形态特征参数, 分析3种土地利用类型下高砾石含量紫色土的优先流形态发育特征。结果表明: 砾石平均含量表现为园地>林地>耕地, 土壤大孔隙平均半径随着深度的增加而减小。林地优先流运动深度可达60 cm, 剖面染色区域呈现明显的不规则性, 耕地染色深度集中在0—15 cm土层, 染色区域分布均匀, 但染色面积小, 且存在大量的侧向流, 园地染色范围广, 优先路径连通性好。染色路径数表现为园地>林地>耕地, 说明园地优先流发育较活跃, 优先路径分化程度较高, 染色路径宽度<20 mm的染色路径数量分布特征与染色路径总数分布特征相近, 是紫色土壤中流染色路径的主要组成部分, 壤中流类型主要为低相互作用大孔隙流。砾石和大孔隙特征共同影响土壤水分运动过程。

关键词: 砾石; 土壤大孔隙; 土地利用类型; 优先流; 优先路径

中图分类号: S157.1

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2017)01-0103-06

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcbx.2017.01.018

Characteristics of Preferential Flow Under High-content Rock Fragment Purple Soil in the Three Gorges Reservoir Area

DAI Cuiting¹, LIU Yaojun², WANG Tianwei¹, LI Zhaoxia¹, TAN Xueyi³

(1. Research Center of Water and Soil Conservation, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070;

2. Jiangxi Institute of Soil and Water Conservation, Nanchang 330029;

3. The Experiment Station of Soil and Water Conservation of Zigui County, Zigui, Hubei 443600)

Abstract: Dye tracing method was used to observe the occurrence of preferential flow under three kinds of land use patterns in Wangjiaqiao watershed in the Three Gorges Reservoir Area. Characteristics of preferential flow were obtained by figuring out the feature parameters of preferential flow. The results showed that the average volume content of rock fragment in different land use patterns was determined as follow: Garden land>forest land>farmland. The mean radius of soil macropores decreased with increase of soil depth. The maximum preferential flow depth of forest land was up to 60 cm and the dying zone was distinctly irregular. In the farmland, the dying zone mainly distributed in 0—15 cm soil depth and the dying area was smaller than forest land. There existed a large portion of bypassing flow in the farmland. The dying area of garden land occupied a large part of soil profile and the connectivity of preferential pathway was good. The number of staining pathway was determined as follow: Garden land>forest land>farmland. It demonstrated the higher preferential flow dyed pattern differentiation degree was observed in the garden land. The staining pathway of subsurface flow in purple soil was largely consisted of <20 mm staining pathway width. The type of subsurface flow was mainly low interaction macropore flow. The process of soil water movement was influenced by both rock fragment and soil macropores.

Keywords: rock fragment; soil macropore; land use pattern; preferential flow; preferential pathway

优先流是指多孔介质中水分和溶质非均匀快速运动的一种形式^[1], 其特征在于大部分水流经由大孔隙、植物根系、虫孔以及土壤裂隙等优先流通道运移, 缩短

溶质和污染物在土壤非饱和带中的滞留时间^[2], 增加地下水污染的风险^[3], 威胁人类健康安全, 因此深入展开优先流的研究是近年来研究土壤水分运动的热点。

收稿日期: 2016-09-29

资助项目: 国家自然科学基金项目(41571266); 江西省水利厅科技项目(KT201311)

第一作者: 戴翠婷(1994—), 女, 湖南湘潭人, 硕士研究生, 主要从事水土保持与环境生态研究。E-mail: ctdail10@gmail.com

通信作者: 李朝霞(1976—), 女, 湖北丹江口人, 教授, 博士, 主要从事土壤侵蚀机理研究。E-mail: zxli@mail.hzau.edu.cn

有关优先流影响因子的研究主要集中在植物根系^[4]、土壤结构^[5]、质地^[6]、土壤水分状况^[7]等方面,对于砾石和土壤大孔隙等如何影响优先流发育特征的研究相对较少。土壤中的砾石对水分运动的影响主要是通过改变土壤物理性质如土壤容重、总孔隙度、田间持水量、饱和导水率等,主要表现为减少有效过水断面以及增加孔隙弯曲度^[8]。由于土壤的空间异质性以及砾石分布的不均一性,使得含砾石土壤的水分运动过程较均质土壤更为复杂,目前研究存在相互矛盾的结果:一方面认为砾石增加水流弯曲度而阻滞水分入渗;另一方面认为砾石的存在会产生更多的大孔隙而促进水分入渗^[9-11]。

大孔隙是优先流发生发展的基本通道,对土壤水分运动、养分运移以及溶质迁移等有重要的影响^[12],大孔隙优先流比基质势水流运动速度更快,入渗更深。Wilson 等^[13]认为直径大于 1 mm 的孔隙数量虽少,但对水分运输的影响不可忽视;Alaoui 等^[14]发现大孔隙体积虽然只占土壤总体积的 0.23%~2%,但可以运输大约 74%~100%的土壤水分;大中孔隙的组合不同导致导水速率也不同,10%的大孔隙(>0.5 mm)和中孔隙(0.06~0.5 mm)对总入渗量贡献率可达 89%^[15];魏虎伟等^[16]研究发现半径>1.5 mm 的大孔隙是林地优先流的主要通道。时忠杰等^[17]、骆紫藤等^[18]研究结果表明砾石对土壤大孔隙的形成有重要影响,大孔隙密度和半径都与砾石含量存在一定的相关性。高砾石含量是三峡库区紫色土的重要特征,因此,要深入研究紫色土水分运动过程,必须加强对砾石影响土壤大孔隙以及水分运移的研究和理解。

本研究在三峡库区的王家桥小流域进行,选取当

地 3 种典型的土地利用类型,运用原位染色示踪技术,旨在研究高砾石含量紫色土优先流的形态发育特征及内在规律,为紫色土水分运动机制提供一定的理论基础以及为三峡库区土壤侵蚀预防和治理提供指导依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

试验区位于三峡库区王家桥小流域(湖北省秭归县),王家桥小流域位于东经 110°40′—110°47′,北纬 31°05′—31°15′,流域总面积 16.7 km²,自北向南呈窄条状,南北长 7 km,东西宽 3.5 km。属亚热带湿润季风气候,多年平均气温 20 ℃,无霜期 310 d,经济作物主要为柑橘和茶叶,林地乔木树种主要为松树、柏树等。小流域由于地壳上升和侵蚀作用,地形切割强烈,形成山高、坡陡、土薄等地貌特征,属典型山区小流域。小流域海拔最高 1 180 m,最低 184 m,流域坡度多数分布在 15°~35°之间,占流域面积的 72.5%,而<5°的仅占流域面积的 1.7%。流域内出露的地层为侏罗系的蓬莱镇组,土壤类型主要为中性紫色土和石灰性紫色土,紫色土分布范围广,矿质养分含量多,土层浅薄,砾石含量高^[19]。

1.2 研究方法

1.2.1 样地调查 2013 年 9 月在研究区内选择林地、耕地、园地 3 种典型紫色土利用类型开展试验,3 个试验点坡度、坡向、海拔、土壤母质及成土条件等因子相近,表 1 为试验样地土壤基本性质。林地树种为 13 a 树龄马尾松,郁闭度约为 45%,地表覆盖枯枝落叶层和少量杂草。园地树种为 6 a 树龄脐橙,无间作套种,大部分地表为杂草覆盖,覆盖度约 30%。耕地耕作方式为玉米连作,试验时处于耕作间歇期,地表有少量残茬。

表 1 试验样地土壤基本性质

样地 类型	坡度/ (°)	坡向	坡位	海拔 /m	土壤 层次/cm	土壤质地			容重/ (g·cm ⁻³)	饱和导水率/ (mm·min ⁻¹)	有机质/ (g·kg ⁻¹)
						砂粒/%	粉粒/%	粘粒/%			
林地	17	SW	中坡	596	0—15	58.7	30.0	11.3	1.37	1.45	11.4
					15—30	50.2	32.5	17.3	1.58	1.11	2.7
					>30	54.6	32.3	13.1	1.77	0.36	2.0
耕地	10	SW	中坡	605	0—15	59.9	27.2	12.9	1.42	1.52	5.4
					15—30	57.7	29.0	13.3	1.45	1.39	3.8
					>30	61.7	26.8	11.5	1.58	0.89	2.3
园地	13	SW	中坡	594	0—15	53.0	32.9	14.1	1.57	0.89	5.5
					15—30	56.4	30.2	13.4	1.67	0.25	3.6
					>30	50.2	32.9	16.9	1.75	0.13	3.6

1.2.2 染色示踪试验 选取相对平坦的林地、耕地和园地为试验样地,清理试验区内表层枯枝落叶、杂草和砾石等,对研究区域进行平整,然后用 4 块规格为 1.0 m×0.5 m×0.01 m 的 PVC 板将试验区合围,PVC 板埋入土中 0.3 m,地表出露 0.2 m,PVC 板两侧土壤用木槌夯实避免染色剂随 PVC 板内壁下

渗,然后将 30 L 浓度为 4 g/L 的亮蓝染色剂均匀喷洒在试验区内。染色 24 h 后,每隔 20 cm 对土壤剖面进行垂直开挖,共得到 5 个垂直剖面,3 个样地挖掘深度均到达基岩层,其中林地和园地挖掘深度为 60 cm,耕地挖掘深度为 45 cm,最后用数码相机进行垂直拍摄。根据各层染色结果,垂直剖面中被亮蓝染

色的区域为优先流发生区,未染色区域为对比区。

1.2.3 染色图像处理 染色图像处理分为几何校正、光照校正、色彩校正和降噪处理 4 个步骤。首先使用 ERDAS IMAGINE 9.2 软件对拍摄的原始染色照片进行几何校正。

采用 Adobe Photoshop CS3 软件对拍摄的染色照片进行图像调整,通过调整大小、色阶、亮度、曝光度及颜色替换,将未染色区域颜色调整为黑色,染色区域调为白色或灰色,调整阈值色阶的大小后将处理后的灰阶模式图像以扩散仿色的方法转化为位图模式的 TIFF 格式图像,然后用 Image-Pro Plus 6.0 软件对图像进行降噪处理,降噪后图像中染色区域为白色,未染色区域为黑色。

1.2.4 特征参数解析 处理后的位图图像是由 0 与 255 两个数值组成的数值矩阵,采用 Image-Pro Plus 6.0 软件中的 Bitmap 分析功能,将降噪后的图像转化为位图数值矩阵,并以 Excel 格式输出用于优先流形态特征参数的解析。

依据体视学原理,解析垂直染色图像的体积密度、表面积密度、染色路径数和染色路径宽度参数,用于不同土地利用方式土壤优先流形态和类型分析。

体积密度指一定深度土层中染色像素占图像宽度的比例,即染色面积比:

$$V_{v(j)}=DC_j=\frac{a_j}{A_j}$$

(1)

式中: V_v 为体积密度; j 为土壤深度(cm); DC 为染色面积比; a 为染色像素数; A 为图像宽度(pixel)。

染色路径数与其对应的表面积密度,二者存在一定的数值关系,表面积密度可通过一定深度土层中染色与未染色像素的节点数占图像宽度实际长度的比例计算得到:

$$n_p=(S_v+1)L$$

(2)

表 2 不同土地利用类型砾石体积含量的空间分布特征

项 目	林地			耕地			园地		
	0—15 cm	15—30 cm	>30 cm	0—15 cm	15—30 cm	>30 cm	0—15 cm	15—30 cm	>30 cm
均值/%	15.50	18.13	19.07	10.24	11.48	14.54	14.59	19.50	23.36
标准差/%	6.86	8.12	8.31	2.33	4.67	11.25	1.26	7.08	8.32
变异系数/%	31.83	42.17	52.65	30.23	53.54	79.40	22.65	34.32	48.85

2.1.2 土壤大孔隙特征 不同土地利用类型土壤大孔隙特征如表 3 所示,土壤大孔隙平均半径在不同深度的分布特征表明,林地、耕地、园地土壤都表现为大孔隙平均半径随着土壤深度的增加而减小。这可能是由于植物根系在土壤表层分布较密集,动物活动更为活跃,上层土壤砾石含量较低也可能是造成大孔隙上层大、下层小的原因。林地土壤大孔隙半径范围在 0.29~1.77 mm 之间,耕地在 0.30~1.88 mm 之间,园地在 0.13~1.84 mm 之间,该结果相对

$$S_{v(j)}=\frac{I_j}{L_j}$$

(3)

式中: n_p 为染色路径数; S_v 为表面积密度(c/m); I 为染色和未染色像素节点数; L 为土壤剖面总宽度(cm)。

染色路径宽^[20] (Stained Path Width,即 SPW)根据路径宽度和图像分辨率计算得到:

$$SPW=\frac{l}{r}$$

(4)

式中:SPW 为染色路径宽(mm); l 为独立染色路径像素数(pixel); r 为图像分辨率(pixel/mm)。

1.2.5 土壤样品分析 分别在 0—15,15—30,30 cm 至基岩 3 层采样,测定质地、容重、土壤大孔隙、饱和导水率、砾石含量、有机质等理化性质。质地采用沉降法测定^[21];容重和饱和导水率采用环刀法测定;土壤大孔隙特征采用穿透曲线法测定;砾石含量采用水洗法和排水法测定;有机质含量采用重铬酸钾外加热法测定。

2 结果与分析

2.1 砾石与土壤大孔隙特征

2.1.1 土壤砾石体积含量特征 试验区土壤砾石含量范围在 10%~30%之间,根据砾质土划分标准属多砾质土,样地土壤砾石含量高且砾石分布存在明显的空间异质性。表 2 为 3 种土地利用类型砾石含量在不同土壤深度的空间分布规律。从表 2 可知,对于 3 种土地利用类型,砾石含量都随着土壤深度的增加而增加,其标准差和变异系数也表现为增大的趋势,说明砾石分布的空间异质程度加大。3 种土地利用类型砾石含量表现为园地最高,林地次之,耕地最低,经实地调查,所取园地为裸露荒地改造而成,因此砾石含量较高,林地样地为耕地退耕还林而成,受早期耕作影响砾石含量相对较低,而耕地在长期耕作影响下砾石含量最低。

于石辉等^[22]和时忠杰等^[23]的研究结果略小,说明不同地区土壤大孔隙半径范围存在差异。大孔隙平均密度在 0—15 cm 土层大小顺序为耕地>园地>林地,在 15 cm 以下土层都表现为园地>耕地>林地。大孔隙度与大孔隙平均半径变化规律相同,在不同土地利用类型下都随着土壤深度的增加而减小,但减小的幅度并不大,变化不明显,大孔隙度和大孔隙平均半径在不同土壤层次中都表现为耕地>林地>园地。

表 3 不同土地利用类型土壤大孔隙特征

土层深度/cm	参数	林地	耕地	园地
0—15	半径范围/mm	0.34~1.66	0.36~1.64	0.31~1.25
	平均半径/mm	0.80	0.88	0.65
	大孔隙密度/(个·dm ⁻²)	288	428	304
	大孔隙度/%	7.08±1.95	8.22±3.85	6.20±1.95
	半径范围/mm	0.31~1.77	0.34~1.88	0.13~1.25
15—30	平均半径/mm	0.73	0.81	0.50
	大孔隙密度/(个·dm ⁻²)	430	493	547
	大孔隙度/%	6.93±2.28	7.72±3.01	5.01±2.44
	半径范围/mm	0.29~1.25	0.30±1.66	0.15±1.84
>30	平均半径/mm	0.52	0.69	0.45
	大孔隙密度/(个·dm ⁻²)	146	344	576
	大孔隙度/%	5.27±1.95	6.38±2.01	4.33±1.38

2.2 不同土地利用类型优先流形态特征

3 种土地利用类型下,土壤优先流垂直分布形态特征见图 1。3 种土地利用类型土壤中均发生了比较明显的优先流,部分优先流路径与土壤表层直接连通,抑制了基质流的发展,不同的土地利用类型样地内土壤结构的差异使不同土壤剖面的优先流过程表现出一定程度的形态变化。3 种土地利用类型土壤表层 0—5 cm 范围内均被大面积染色,且水平方向上

染色分布均匀,土壤水分主要以基质流形式运移,优先流发育不明显。随着土壤深度的增加,林地土壤剖面 5 cm 以下染色区域呈不规则状,土壤水分运移发生明显分化,优先路径形状狭窄且垂直连通性较好,水分集中在数条优先路径中垂直下渗,部分经由优先流路径的水分可以下渗到 50—60 cm 处。耕地土壤剖面 5 cm 以下优先流路径多由短小的分支而成,分布相对均匀,水分下渗迅速减少,产生明显的侧向流,可能是由于耕地长期受到农业机械作用的压实,土壤结构非常紧实,大孔隙的垂直连通性遭到破坏,水分的垂直下渗能力下降,在染色剖面图像中表现为染色范围呈错综分布且范围较小,染色区域连通性差。园地 5 cm 以下染色范围较林地和耕地大,染色区域集中,主要分布在 45 cm 以内,上下层土壤染色区域连通性好,无单个狭长的优先流路径,水分横向侧流不活跃,造成这种染色特征的原因可能是由于园地土壤中砾石含量较多,观测到 10—40 cm 深度范围内存在直径 10 cm 左右的块石,土壤孔隙分布范围大,透水性强。

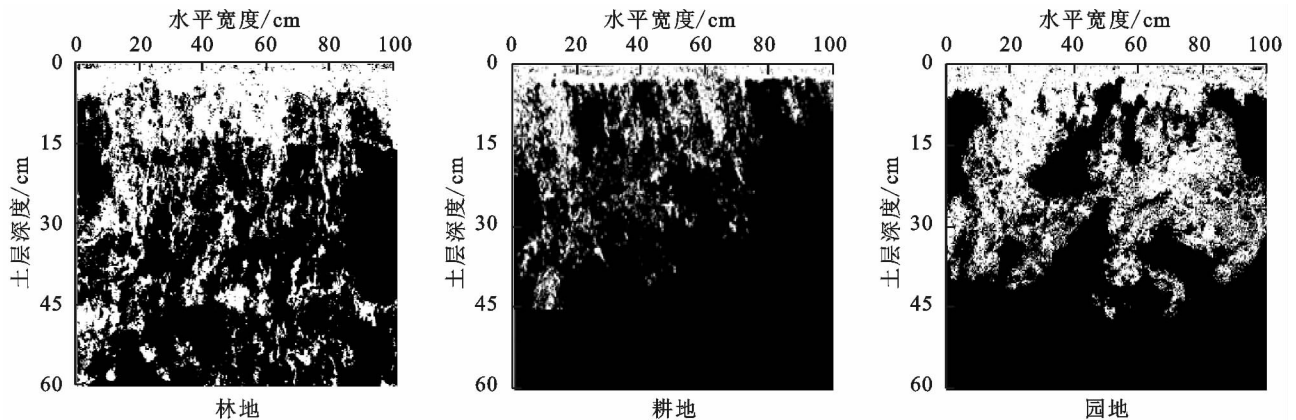


图 1 优先流垂直分布

2.3 不同土地利用类型染色面积比

3 种土地利用类型土壤剖面染色面积比变化规律见图 2。林地土壤剖面在表层 0—5 cm 范围内染色面积比达 85%以上,随着深度的增加,染色面积比整体呈减小趋势,但并非单调递减,在 5—18 cm 范围内减小幅度较大,18 cm 以下呈“S”型趋势逐渐减小,变化较为波动。在 20,30,45 cm 处染色面积比随深度增加突然增大,但增大幅度很小,这可能是由于水分的侧向入渗所致。耕地剖面染色面积比随土壤深度的增加均匀减小,在表层 0—5 cm 范围内染色范围较大,达 90%以上,在 5 cm 深度处迅速下降,下降幅度较大,15 cm 深度的染色面积比仅为 10%,说明发生了明显的横向侧流。15 cm 以下染色较为均匀,染色面积比范围在 5%~10%之间,说明在该深度内水分沿着较小且稳定的快速渗流路径垂直下渗,优先流分化严重。园地剖面染色面积比整体呈“S”型趋势

减小,在 0—10 cm 范围内迅速减小,减小幅度达 60%,在 10 cm 深度染色面积突然增大,10—30 cm 范围内染色较为均匀,染色面积比范围为 30%~40%。30 cm 以下又呈逐渐减小趋势,水分运动最大深度为 45 cm。从园地剖面染色面积变化规律可以看出剖面在 10—30 cm 范围内孔隙连通性突然增大,导致染色面积不随土壤深度均匀减小,部分位置染色面积突然增大。

比较 3 种土地利用类型的土壤剖面染色面积比可以看出,在 0—5 cm 范围内染色面积均达 80%以上,表层土壤基本被染色,0—15 cm 范围内林地染色面积较大,园地次之,耕地最小,且耕地染色面积减小幅度最大,说明耕地剖面水分横向运动最为活跃。林地土壤染色最大深度达 60 cm,耕地和园地土壤均为 45 cm 左右,说明林地土壤剖面中优先流现象比耕地和园地更严重,孔隙连通性较好。

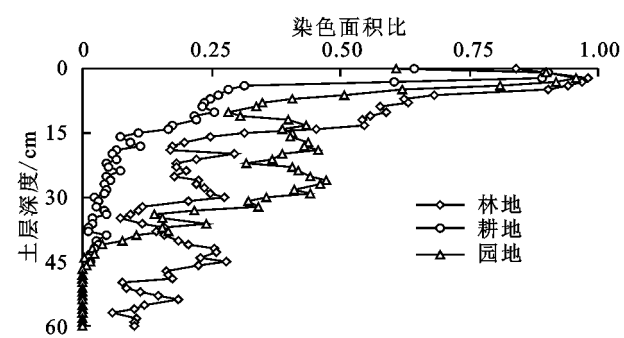


图 2 土壤剖面染色面积比

2.4 不同土地利用类型染色路径分布特征

染色路径数量的空间变化可揭示优先流路径的复杂性和连通性,图 3 为垂直剖面染色路径数量分布的变化规律,从图 3 可以看出,林地土壤垂直剖面染色路径总数范围在 0~65 个之间,在 3 cm 处染色路径总数出现最小值,水分运动在此深度以基质流为主,无明显

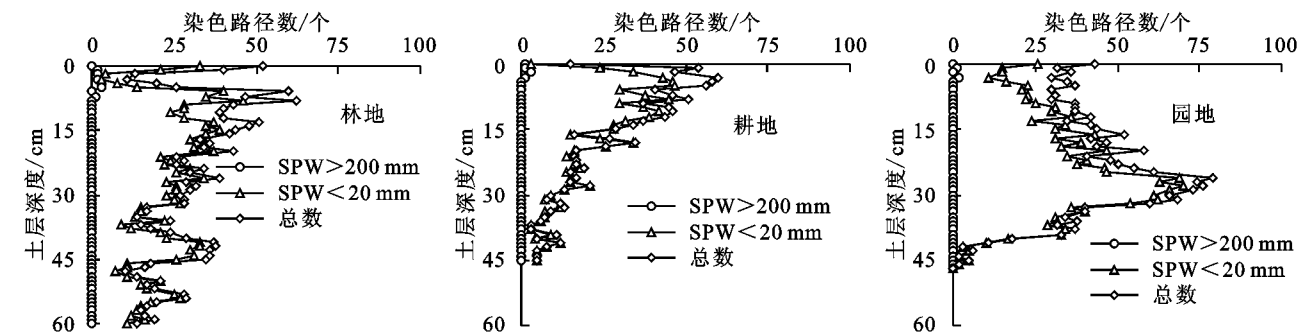


图 3 染色路径数分布特征

2.5 不同土地利用垂直剖面壤中流类型

Weiler 等^[20]根据 $SPW < 20\text{ mm}$ 和 $SPW > 200\text{ mm}$ 的数量占染色路径总数的比值将壤中流分成低相互作用大孔隙流、混合作用大孔隙流、高相互作用大孔隙流、非均质指流和基质流 5 种类型, $SPW < 20\text{ mm}$ 染色路径数量越多,说明土壤水分主要通过大孔隙流运移, $SPW > 200\text{ mm}$ 数量越多,意味着水分流动与土壤基质的相互作用越强烈,土壤水分运动形式以基质流为主。图 3 为 $SPW < 20\text{ mm}$ 和 $SPW > 200\text{ mm}$ 的染色路径数量垂直分布规律,3 种土地利用类型土壤垂直剖面染色路径分布主要为 $SPW < 20\text{ mm}$, $SPW > 200\text{ mm}$ 的数量在 3 cm 以下土壤深度几乎都为 0, $SPW < 20\text{ mm}$ 染色路径数量与染色路径总数的变化规律一致。根据 Weiler 等^[20]的划分标准,试验剖面壤中流类型主要为低相互作用大孔隙流(图 4)。不同土地利用类型剖面壤中流类型仅在土壤表层存在略微差异,林地土壤垂直剖面 0—5 cm 内壤中流类型由混合作用大孔隙流过渡到高相互作用大孔隙流,耕地土壤表层为高相互作用大孔隙流,而园地土壤表层以混合作用大孔隙流为主,壤中流类型的变化可以反映出水分下渗能力随着土壤深度的增加而减小。

优先流。随着水分下渗,染色路径总数整体呈先增加后减小的趋势,在 10 cm 处达到第一个峰值,说明水分运移在该位置处严重分化。随着土壤深度的增加,染色路径总数不断波动,反弹上升的现象比较频繁,但总体上逐渐减小,分化程度降低,水分沿着优先路径下渗的能力减弱。染色路径总数的波动变化说明优先路径在不同深度分布不稳定。相比林地,耕地土壤垂直剖面染色路径总数变化规律较单一,随着土壤深度的增加呈单调递减,减小趋势较为稳定,无明显波动现象,最大染色路径总数达 70 个。园地土壤垂直剖面染色路径总数随土壤深度变化呈先减小后增大最后逐渐减小的趋势,转折点分别在 10 cm 和 30 cm 处,10—30 cm 范围内不断增大并在 30 cm 处达到峰值为 95 个,30 cm 以下染色路径总数迅速减小,说明水分运动在 30 cm 处分化最为严重。

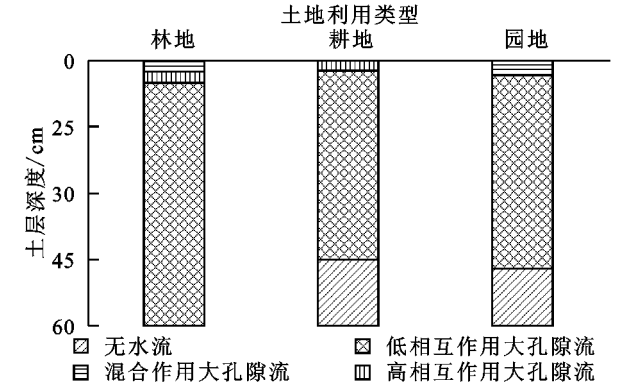


图 4 垂直剖面壤中流类型划分

3 讨论

3.1 砾石对土壤大孔隙的影响

砾石是影响大孔隙结构的重要因素之一,本研究对砾石与土壤大孔隙半径和密度做相关性分析(表 4),结果显示砾石与大孔隙半径和密度之间呈正相关关系,这与时忠杰等^[11]的研究结果一致。在 0—15 cm 土层,3 种土地利用类型下砾石与大孔隙半径和密度的相关性都不显著,随着土壤深度的增加,砾石对大孔隙半径和密度的影响增大,在 15—30 cm 土层达到显著正相关($p < 0.05$),在 30 cm 土壤深度以下呈现出极显著正相关($p < 0.01$)。砾石含量在不同土壤深度空间变异性较大,土壤表层砾石含量较低,植物

根系分布相对较旺盛,动物活动频繁,因此大孔隙主要受到动植物活动的影响,砾石的作用相对较小;下层土壤砾石含量增加,植物根系含量和动物活动痕迹相对减少,砾石对大孔隙的影响作用逐渐增强。

表 4 砾石与大孔隙半径和大孔隙密度的相关分析

项 目	林地			耕地			园地		
	0—15 cm	15—30 cm	>30 cm	0—15 cm	15—30 cm	>30 cm	0—15 cm	15—30 cm	>30 cm
大孔隙半径	0.012	0.666	0.739*	0.138	0.727*	0.858**	0.121	0.705*	0.868**
大孔隙密度	0.624	0.596	0.842*	0.255	0.490	0.940**	0.074	0.424	0.950**

注: * 表示在 0.05 水平上差异显著; ** 表示在 0.01 水平上差异显著。

3.2 砾石和土壤大孔隙对优先流的影响

为了进一步深入分析土壤大孔隙对水分运动的影响,对大孔隙平均半径与饱和导水率进行回归分析(图 5),发现大孔隙平均半径与饱和导水率呈线性关系,且相关性较高(林地: $R^2=0.728\ 4$;耕地: $R^2=0.761\ 4$;园地: $R^2=0.688\ 5$),说明大孔隙在土壤水分传导过程中起着重要的作用,大孔隙半径越大,水分入渗能力越强。由于受到植物根系、动物活动以及砾石的影响,大孔隙在不同土壤层次上存在较大的空间变异性,在大孔隙分布较多的土壤上层,促进水分入渗作用较强,染色面积比相对较大,优先流现象不明显,水分运动以基质流为主;随着土壤深度的增加,大孔隙逐渐减少,优先流发生的染色区域主要分布在大孔隙密集的地方,林地和耕地剖面染色形态呈不规则状,上、下层染色区域连通性较明显,园地下层由于砾石粒径较大,大孔隙数量和半径突然增大,出现大面积的染色范围,此时砾石和大孔隙的共同作用影响着优先流的分布。除了砾石含量和土壤大孔隙特征,砾石形状、粒径大小、排列方式以及土壤孔隙通透度等都能影响优先流的形态发育,由于技术原因没有将其考虑进来,还缺乏对染色区及未染色区大孔隙特征的比较,在以后的研究中仍需加强与完善。

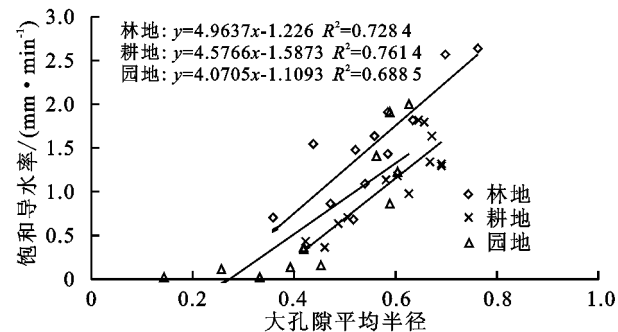


图 5 大孔隙半径对饱和导水率的影响

4 结 论

(1)研究区不同土地利用类型下,砾石含量随着土壤深度的增加而增加,砾石分布的空间变异性较大,砾石体积含量园地>林地>耕地;大孔隙半径范围在 0.29~1.88 mm 之间,平均半径随土壤深度的增加而减小。

(2)分析土壤垂直剖面染色图像可得出,林地的染

色面积大且不均匀,存在许多短小不规则的分支;耕地土壤受到农业机械措施的压实作用不利于形成大孔隙,横向侧流明显,染色区域集中在数条优先流路径中;园地土壤孔隙通透性较好,染色面积分布范围广。

(3)林地染色面积比波动程度大,反弹现象频繁,耕地剖面染色面积比变化较为稳定,呈单调递减趋势,园地染色面积比在 15—30 cm 土层内大幅度回升,平均达 40%,染色路径数变化规律与染色面积比相似。

(4)SPW<20 mm 和 SPW>200 mm 的数量可用来表征土壤剖面的壤中流类型,3 种土地利用类型土壤表层性质存在差异,因此壤中流类型在表土层表现不同,但在土体内壤中流均以低相互作用大孔隙流形式运移,说明水分在垂直剖面上沿着优先路径向下流动。

参考文献:

[1] Allaire S E, Roulier S, Cessna A J. Quantifying preferential flow in soils: A review of different techniques[J]. Journal of Hydrology, 2009, 378(1/2): 179-204.

[2] Larsbo M, Koestel J, Jarvis N. Relations between macropore network characteristics and the degree of preferential solute transport[J]. Hydrology & Earth System Sciences, 2014, 18(18): 5255-5269.

[3] Lipsius K, Mooney S J. Using image analysis of tracer staining to examine the infiltration patterns in a water repellent contaminated sandy soil[J]. Geoderma, 2006, 136(3): 865-875.

[4] Germann P F, Lange B, Lüscher P. Chapter 4: Preferential flow dynamics and plant rooting systems[J]. Hydrogeology, 2012: 121-141.

[5] Bachmair S, Weiler M, Nützmann G. Controls of land use and soil structure on water movement: Lessons for pollutant transfer through the unsaturated zone[J]. Journal of Hydrology, 2009, 369(3/4): 241-252.

[6] Dan K, Moldrup P, Paradelo M, et al. Water and solute transport in agricultural soils predicted by volumetric clay and silt contents[J]. Journal of Contaminant Hydrology, 2016, 192(9): 194-202.

[7] Sanders E C, Najm M R A, Mohtar R H, et al. Field method for separating the contribution of surface-connected preferential flow pathways from flow through the soil matrix[J]. Water Resources Research, 2012, 48(4): 1427-1434.