

# 红河干热河谷林草地红壤中优先流的形态分布特征

朱梦雪<sup>1</sup>, 赵洋毅<sup>1,2</sup>, 段旭<sup>1,2</sup>, 王克勤<sup>1,2</sup>, 万艳萍<sup>1</sup>, 卢华兴<sup>1</sup>, 邱砚海<sup>3</sup>, 杜云祥<sup>3</sup>

(1.西南林业大学 生态与环境学院, 云南 昆明 650224; 2.国家林业和草原局 云南玉溪森林生态系统国家定位观测研究站, 云南 昆明 650224; 3.新平彝族自治县水利局, 云南 玉溪 653400)

**摘要:** [目的] 在红河干热河谷地区开展优先流形态分布特征及与红壤特性关系的研究, 为区域水资源管理和防治水土流失等工作提供理论依据。[方法] 以干热河谷地区典型植被林地和荒草地为研究对象, 采用野外染色示踪法并结合图像处理技术研究优先流的形态分布特征及对红壤特性响应。[结果] ①林草地上层剖面平均染色面积分别为 87.20% 和 91.97%, 染色面积随土层的增加而减小, 局部深度内染色面积出现反弹现象; 林草地优先流长度指数分别为 766.8% 和 730.0%, 林地土壤优先流较荒草地发达; 林草地的最大染色深度分别为 40 cm 和 35 cm; ②染色路径宽度随土层的增加而减小, 0—20 cm 土层内以大于 250 mm 的路径为主, 20—40 cm 内的染色路径在 20—250 mm, 而在 40 cm 以下的土层染色路径集中在 20 mm 以内; ③优先流染色面积比、长度指数、染色路径宽度与土壤因子存在显著相关性, 总孔隙度、有机质、含水率等对染色面积比( $D_A$ )、长度指数(LI)、染色路径宽度(SPW)累积贡献率分别为 97.80%, 86.95%, 87.45%; 含水率、有机质、容重、总孔隙度和  $Al^{3+}$  等因子与染色面积比、染色路径宽度呈最优线性关系。[结论] 土壤的孔隙特性、盐基离子和土壤质地等的共同作用最终导致红河干热河谷林草地优先流的差异。

**关键词:** 红河干热河谷; 土壤优先流; 染色示踪法; 染色面积; 土壤因子

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2021)04-0009-08

中图分类号: S714.2

**文献参数:** 朱梦雪, 赵洋毅, 段旭, 等. 红河干热河谷林草地红壤中优先流的形态分布特征[J]. 水土保持通报, 2021, 41(4): 9-16. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2021.04.002; Zhu Mengxue, Zhao Yangyi, Duan Xu, et al. Morphological distribution characteristics of preferential flow in red soil of forest and grassland in arid and hot valley of Honghe River [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2021, 41(4): 9-16.

## Morphological Distribution Characteristics of Preferential Flow in Red Soil of Forest and Grassland in Arid and Hot Valley of Honghe River

Zhu Mengxue<sup>1</sup>, Zhao Yangyi<sup>1,2</sup>, Duan Xu<sup>1,2</sup>,

Wang Keqin<sup>1,2</sup>, Wan Yanping<sup>1</sup>, Lu Huaxing<sup>1</sup>, Qiu Yanhai<sup>3</sup>, Du Yunxiang<sup>3</sup>

(1.College of Ecology and Environment, Southwest Forestry University, Kunming, Yunnan 650224,

Chain; 2.Yuxi Forestry Ecosystem Research Station of National Forestry and Grassland Administration, Kunming, Yunnan 650224, China; 3.Xinping Yi and Dai Autonomous County Water Resources Bureau, Yuxi, Yunnan 653400, Chain)

**Abstract:** [Objective] The preferential flow morphology and characteristics of red soil in the arid and hot valley of the Honghe River was studied, in order to provide theoretical basis for regional water resources management and soil erosion prevention. [Methods] Taking typical vegetation—woodlands and wild grasslands in arid and hot valley regions as the research objects, the morphological distribution characteristics of preferential flow and its response to the characteristics of red soil were studied by using field dye tracing method and image processing technology. [Results] ① The average stained area of forest and grassland was 87.2% and 91.97% respectively. The stained area decreased with the increase of soil layer, and rebounded in local depths. The preferential flow length index of forest and grassland was 766.8% and 730.0% respectively. And the priority flow of the forest was more developed than wasteland. The maximum staining depth of forest and grassland

收稿日期: 2021-02-11

修回日期: 2021-04-23

**资助项目:** 国家自然科学基金项目(42067005; 31860235); 云南省基础研究计划项目(202001AT070136); 云南省万人计划青年拔尖人才专项(YNWR-QNBJ-2019-215; YNWR-QNBJ-2019-226); 国家林草局林业科技创新平台运行项目: 云南玉溪森林生态系统国家定位观测研究站(2020132078); 云南玉溪森林生态系统国家长期科研基地(2020132550); 云南省自然生态监测网络项目(2020-YN-13)

**第一作者:** 朱梦雪(1994—), 女(汉族), 云南省宣威市人, 硕士研究生, 研究方向为土壤侵蚀。Email: 2598978473@qq.com。

**通讯作者:** 赵洋毅(1980—), 男(汉族), 吉林省农安县人, 博士, 教授, 主要从事水土保持与小流域环境综合治理方面的研究。Email: yyz301@foxmail.com。

was 40 cm and 35 cm respectively. ② The width of the dyeing path decreases with the increase of the soil layer. In the 0—20 cm soil layer, the main dyeing path was greater than 250 mm. The dyeing path within 20—40 cm was mainly in the layer between 20—250 mm, and the dyeing path was less than 20 mm in the soil layer below 40 cm. ③ There were significant correlations between the priority flow dyeing area, length index, dyeing path width and soil factors. The cumulative contribution rate of total porosity, organic matter, and moisture content to dyeing area ratio ( $D_A$ ), length index (LI) and dyeing path width (SPW) was 97.8%, 86.95%, 87.45%, respectively. The factors such as moisture content, organic matter, bulk density, total porosity and  $Al^{3+}$  had the best linear relationship with dyeing area and dyeing path. [Conclusion] The combined effects of soil pore characteristics, base ions, and soil texture ultimately led to the difference in preferential flow between forest and grassland in the arid and hot valley of the Honghe River.

**Keywords:** the arid and hot valley of the Red River; preferential flow of soil; dye tracer method; dyeing area; soil factors

红河干热河谷是中国西南山区独特的地理区域,气候干燥炎热,土壤燥化严重,降雨少蒸发大,降雨分布不均,植被覆盖率低,特殊的地理条件使区域内生态环境恶化,水土流失严重,水资源利用率较低<sup>[1-3]</sup>。当前,研究土壤优先流运动特征及形成机理已成为生态脆弱区防治水土流失、强化水土资源管理等方面广泛关注的热点问题<sup>[4-6]</sup>。

优先流是土壤水分运动的特殊形式,土壤水和溶质沿优先路径以优先流形式运动,其过程具有不平衡性、空间异质性、快速性和滞后性<sup>[7-8]</sup>。优先路径占土壤孔隙比例虽小,但沿优先路径下渗的水流速度较均质土壤快<sup>[9]</sup>,研究<sup>[10]</sup>证实大部分土壤的饱和水分入渗量均以优先流的形式传导。国内外学者针对优先流的影响因素及研究方法开展研究,研究表明其与土壤结构特性<sup>[11]</sup>、植物根系<sup>[12]</sup>、土壤持水能力<sup>[13-15]</sup>、砾石含量<sup>[16]</sup>、降雨强度等<sup>[17]</sup>关系密切;研究优先流的方法主要有染色示踪法、CT扫描法、微张力测量法等。吕刚<sup>[14]</sup>、张海林<sup>[18]</sup>、邵一敏等<sup>[19]</sup>基于染色示踪法,研究不同林分水分运动特征和干热河谷地区林草地优先路径数量和形态分布,揭示土壤理化性质对优先流水流运动机理,为森林水文功能的调控和植被恢复提供指导和理论依据。CT扫描法用于染色剖面中优先路径的获取,在不破坏土体的前提下,对土壤结构和孔隙进行研究分析<sup>[20-23]</sup>。微张力测量法采用时域反射仪(TDR)测定土壤含水率、体积传导率和土壤水分入渗等参数<sup>[24]</sup>,染色示踪法是目前常用且最适合野外试验的方法。

开展优先流特征及运动机理研究,为土壤水运动和水资源管理提供理论依据,土壤优先流水分运动对深层的水分补给有重要作用,可提高水资源的管理效率<sup>[25]</sup>。程金花等<sup>[26]</sup>以三峡库区的花岗岩林地紫色土为对象,探讨土壤特性与“优先路径”的关系,结果表明紫色土的容重、孔隙度和质地对优先流路径的形成和发展有较大影响,优先路径使土壤孔隙和理化性

质发生改变,两者相互影响。Akhtar等<sup>[27]</sup>对不同土壤质地大孔隙的特征开展研究,探讨大孔隙特征结构在不同质地下的变化。Shaw等<sup>[28]</sup>研究土壤黏粒、粉粒、砂粒含量与土壤优先流的关系,表明土壤黏粒含量对优先流有显著负相关关系。目前关于土壤优先流研究多集中在不同区域、不同土壤类型<sup>[29-30]</sup>及农田引起水污染等<sup>[31-33]</sup>方面。

红河干热河谷地区土壤为典型的红壤,土壤构型复杂和土壤燥化严重等特性可能会导致优先流的特征不同于其他区域,其相关影响亟待研究。因此,本研究在红河一级支流峨德河龙潭箐小流域以典型林草地为研究对象,采用亮蓝染色示踪法,结合图像处理技术,分析优先流的形态特征,并探讨其对土壤特性的响应,以解决区域水分交换不充足和储水蓄水能力差的问题,为缓解生态环境恶化,加强水资源的管理和应用等提供科学依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

研究区位于云南省玉溪市新平彝族傣族自治县龙潭箐小流域(24°01′—24°03′N,101°50′—101°51′E),属于红河干热河谷地区,区域内干湿季分明,多年平均降水达 900 mm,气候干燥炎热,年平均气温 23.5 °C,会出现 45 °C 的高温极端天气,60%的降雨集中在 7—10 月;土壤类型主要是红壤,土色偏红,呈弱碱性,pH 值在 7.66~8.31;易遭受侵蚀破坏,成土母岩以砂岩为主,以亚黏土类碎石、碎石土为主,碎石为风化砂质泥岩。小流域内林分有高大的乔木林和低矮的灌木层、草本植物。乔木建群种以银合欢(*Leucaena leucocephala*)、华山松(*Pinus armandii*)、云南松(*Pinus yunnanensis*)等高大乔木为主;草本植物主要是扭黄茅(*Heteropogon contortus*)、龙须草(*Eulaliopsis binata*)、紫茎泽兰(*Ageratina adenophorum*)等。研究区林草地土壤物理性质详见表 1。

表 1 典型林草地样地土壤物理性质

植被类型	土壤类型	建群种	土层深度/cm	容重/ ( $g \cdot cm^{-3}$ )	土壤机械组成/%			有机质/ ( $g \cdot kg^{-1}$ )
					黏粒	粉粒	砂粒	
林地	红壤	银合欢、华山松等	0—10	0.83±0.02	48.53±0.62	63.71±1.30	10.51±2.13	24.70±0.73
			10—20	1.11±0.03	46.76±2.01	67.69±0.21	6.49±0.80	25.82±1.98
			20—30	1.46±0.03	42.56±0.92	70.89±0.03	5.49±0.89	24.60±0.96
			30—40	1.50±0.01	44.62±2.93	70.88±2.71	4.45±0.22	20.41±2.69
			40—50	1.50±0.02	44.05±0.36	71.46±0.49	4.43±0.85	20.42±1.53
荒草地	红壤	扭黄茅、龙须草等	0—10	0.89±0.01	39.23±0.35	71.86±0.97	7.35±0.86	33.86±4.34
			10—20	1.06±0.05	36.16±2.73	73.54±3.06	7.90±0.25	29.47±0.31
			20—30	1.13±0.03	40.37±1.24	72.35±0.55	7.87±1.60	23.49±0.52
			30—40	1.30±0.02	36.92±4.20	68.72±2.43	6.96±0.26	12.79±1.87
			40—50	1.48±0.04	43.13±4.39	70.36±3.13	7.78±1.46	18.30±0.82

注:表中数值为各指标均值±标准差。

## 1.2 研究方法

1.2.1 样地设置 因课题组前期已针对区域典型植被类型开展了关于林草地根系对土壤大孔隙的相关影响研究<sup>[34]</sup>,为进一步探讨样地土壤优先流的分布及形态特征和红壤特性关系,2019年4月继续选择已设置的地形、坡向、坡度以及植被覆盖度相近的林地和荒草地固定样地开展试验。2种植被下分别设置4块10 m×10 m的样方,总共设置8块试验样地。

1.2.2 染色示踪试验 试验在样地内尽可能在平缓的地方,染色试验开始前,对所选样地进行提前整地,在保证不破坏土壤腐殖质层的前提下,除去近地表的杂草、砾石、枯枝落叶等杂物。然后将70 cm×70 cm×70 cm的铁框埋入深60 cm的土中,并将铁框内壁5 cm的土夯实,避免染色溶液沿内壁快速下渗对结果造成误差。由研究区多年降雨特征可知,用当地24 h内降雨量作为标准,根据布设的样方表面积和实际消耗量计算浓度为4 g/L的亮蓝溶液20 L,将配制好的染色溶液均匀喷洒在铁框内<sup>[35-36]</sup>,然后用防雨布将铁框覆盖,避免降雨过程对试验的影响,染色24 h后,除去覆盖的塑料薄膜和铁框,考虑铁框内壁周围土壤水分侧向流的不稳定情况,因此保留完整的中心50 cm×50 cm×50 cm的剖面进行挖掘。并用高清相机拍摄染色剖面,拍照时用遮阳伞遮光,染色剖面择优进行处理。

1.2.3 土壤基本性质测定 分层采集染色和未染色土样带回室内测定土壤理化性质,具体方法依据土壤分析<sup>[37]</sup>。用100 cm<sup>3</sup>环刀分层采集原状土以测定土壤容重和孔隙度;烘干法测定土壤含水率;用激光粒度仪MS3 000测定土壤机械组成,并计算土壤不同粒径含量;用王水—高氯酸消解土样,采用ICP-OES流动分析仪测定土壤Al<sup>3+</sup>、Fe<sup>3+</sup>、Na<sup>+</sup>等盐基离子含量;土壤有机质采用重铬酸钾—外原加热、硫酸亚铁滴定

法;土壤氮磷钾等营养成分用H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>-H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>消解法;有效钾用火焰光度法测定,有效氮用扩散吸收法测定;用分光光度计法测定土壤有效磷含量。

1.2.4 图像处理 首先利用Photoshop-CS6将相继获取的染色照片根据图片大小截取染色剖面中心区域,调整因拍摄产生的变形及受光不均匀产生的缺陷。将修正后的图片进行色阶、曝光度、颜色替换及阈值等处理,图片的染色情况通过颜色来表示,黑色代表染色,白色代表未染色。然后用Image pro Plus图像分析软件对图片进行数值化处理,对图片进行侵蚀、降噪等处理,提取剖面染色信息。

### 1.2.5 染色特征指标分析

(1) 染色面积比( $D_A$ )。垂直染色剖面上一定深度土层中染色数量占图像宽度的比例。通常用来评价土壤优先流的发育程度,染色面积比越大,优先流现象越不明显。

$$D_A = \frac{T_D}{(T_D - N_D)} \times 100\% \quad (1)$$

式中: $D_A$ 为染色面积比; $T_D$ 为一定土层内染色面积; $N_D$ 代表该土层范围内未染色面积。

(2) 长度指数(LI)。是垂直剖面每层与上一层剖面染色面积比的差的绝对值之和。长度指数可反映基质流和优先流的差异性,其数值越大,优先流发育的程度越大。

$$LI = \sum_{i=1}^n |D_{A(i+1)} - D_{Ai}| \quad (2)$$

式中:LI为长度指数; $D_{A(i+1)}$ 为第*(i+1)*层的土壤染色面积比(%); $D_{Ai}$ 为垂直剖面上第*i*层的土壤染色面积比(%); $n$ 染色剖面层数。

(3) 最大染色深度。指染色示踪溶液在土壤剖面下渗的最大深度,可用来表征土壤水分垂直迁移性能。

(4) 染色路径宽度。是指每条染色路径所对应的实际土壤宽度(mm)。

### 1.3 数据处理

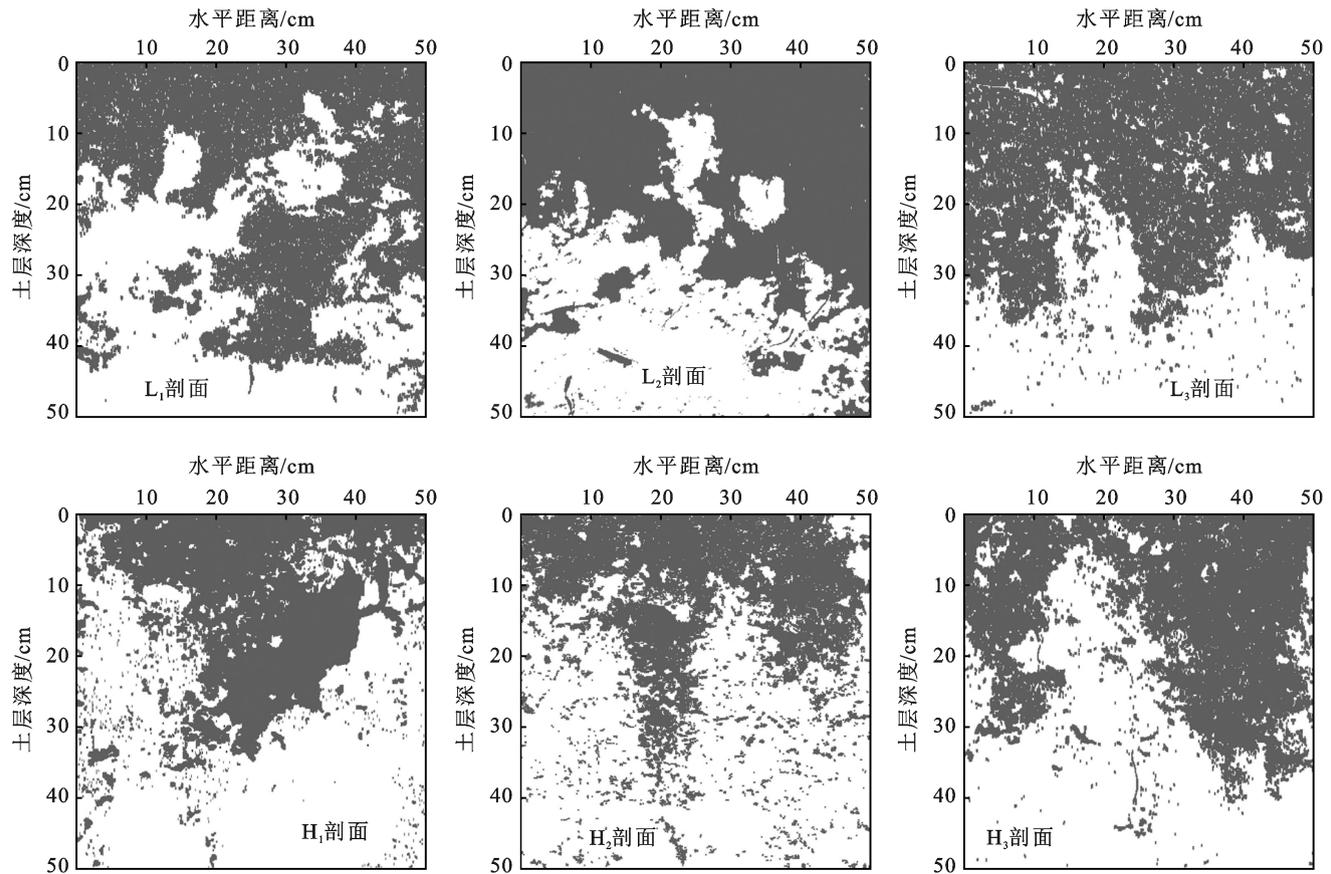
用 Photoshop CS6 对染色剖面进行校正处理,用 Image pro Plus 获取校正图片的数值信息,采用 Excel 和 SPSS 进行数据处理和统计分析,用 Origin 2021 软件绘图。

## 2 结果与分析

### 2.1 典型林草地优先流形态特征分析

对研究区内林草地土壤垂直剖面的染色图像进行分析(图 1),不同植被类型下,土壤优先流的形态特

征和最大染色深度有明显变化,区域内林草地的染色集中在 30 cm。林地染色溶液入渗深度较荒草地深,林地在 0—20 cm 土层大面积被染色,20 cm 以下染色溶液沿着优先路径向土壤深层运动并且开始出现不同程度的分支,荒草地染色主要集中在 0—10 cm 内,10 cm 以下染色溶液开始沿着特定路径以优先流形式运动,并且优先流在形态上出现不同程度的分化。随土层深度的增加,剖面被染色的部分逐渐减少。由图 1 中剖面  $L_1$  知,在 22—40 cm 处,染色面积出现剧增的现象,其原因主要是乔木树种形成的根系网络增加孔隙数量的同时也增强了土粒结构间的通透性,为优先流的发生提供有利条件<sup>[34]</sup>。



注:  $L_1, L_2, L_3$  分别为林地内不同染色剖面;  $H_1, H_2, H_3$  分别为荒草地不同试验染色剖面。

图 1 典型林地、荒草地垂直剖面优先流形态特征

### 2.2 典型林草地染色面积特征

图 2 表示两种植被类型土壤染色面积的变化特征。由图 2 可以看出,林草地染色面积随土层深度的变化存在差异。林草地 0—20 cm, 0—10 cm 内平均染色面积比分别为 87.2% 和 91.79%。染色面积比均随深度的增加而减小。局部深度内,染色面积突然增加。荒草地内染色面积呈波动式减小。上层剖面在基质流和优先流的作用下,大于 95% 的范围均被染色。0—20 cm 内,林地平均染色面积从 87.2% 减小

至 45.66%, 20—40 cm 深度,优先路径明显,染色面积减至 12.68%; 荒草地 20 cm 处染色面积减小为 46.88%, 在 10—35 cm 内优先路径发育程度较高且染色面积从 46.88% 减小至 5.42%。林地优先流集中在 20—40 cm 土层,荒草地内优先流主要发生在 10—35 cm 内。结合图 1 知,林地内 40 cm 以下土壤染色以斑点形式出现,未按照一定的路径向下运移,染色面积急剧减小接近于 0,表明在该深度内,根系网络并未延伸到更深土层,优先流现象停止,染色溶液没

有沿优先路径向下运动;荒草地染色面积在35 cm深度趋于0,该土层深度优先流现象不明显。林地内优先流长度指数为766.8%,最大染色深度为40 cm;荒

草地优先流的长度指数为730.0%,最大染色深度为35 cm。根据优先流染色面积比和长度指数知,林地更易发生优先流现象,但形态特征分化不明显。

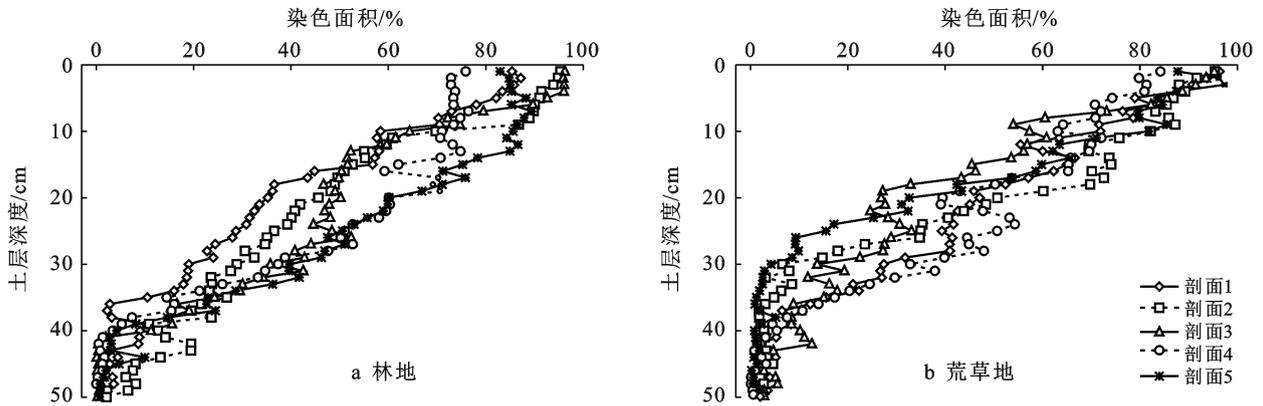


图2 研究区不同剖面的土壤染色面积

### 2.3 优先流染色路径宽度

图3为林草地染色路径宽度的变化规律。由图3可知,林草地染色路径宽度存在较大差异,其随土层深度的变化规律与前述染色面积比的规律相似,即随着土层深度的增加,染色路径宽度变窄。绝大多数染色路径在>250 mm和20—250 mm范围,林地0—23 cm,草地0—20 cm深度内染色路径宽度以>250 mm为主;林地23—40 cm、荒草地20—40 cm染色路径集中在20—250 mm;大于40 cm土层中,以20 mm以下的路径为主。林地在25—35 cm内,因土壤孔隙的通透性,致使染色溶液易发生侧渗,染色路径宽度呈起伏式变化;荒草地染色路径宽度随土层增加而变窄。研究区内上层土壤孔隙大,容重小,土质疏松,染色路径以>250 mm的路径为主;但随土层深度增加,容重增大,土体趋紧实,孔隙数量少,染色溶液下渗慢,染色范围减少,染色路径以<20 mm为主。

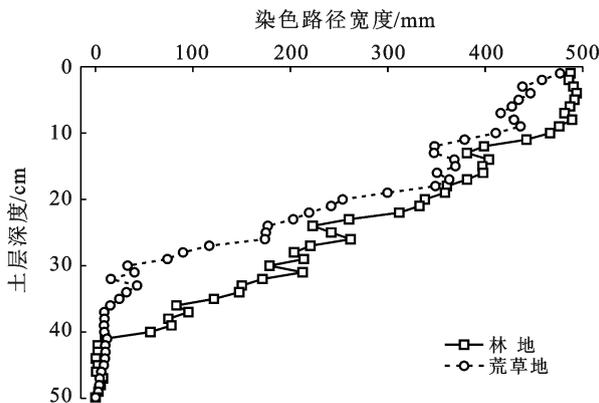


图3 林草地染色路径宽度变化

### 2.4 优先流与土壤因子的响应分析

探讨土壤优先流的变化与红壤特性的关系,对优

先流评价指标染色面积比、长度指数、染色路径宽度与土壤含水率( $X_1$ )、有机质( $X_2$ )、容重( $X_3$ )、黏粒( $X_4$ )、粉粒( $X_5$ )、砂粒( $X_6$ )、总孔隙度( $X_7$ )、田间持水量( $X_8$ )、 $K^+$ 离子( $X_9$ )、 $Na^+$ 离子( $X_{10}$ )、 $Zn^{2+}$ 离子( $X_{11}$ )、 $Al^{3+}$ 离子( $X_{12}$ )、 $Mg^{2+}$ 离子( $X_{13}$ )、 $Fe^{3+}$ 离子( $X_{14}$ )、土壤全氮( $X_{15}$ )、有效氮( $X_{16}$ )、全磷( $X_{17}$ )、有效磷( $X_{18}$ )、全钾( $X_{19}$ )、速效钾( $X_{20}$ )等红壤因子进行主成分分析(表2),筛选出对优先流影响较大的主成分因子。主成分对染色面积比、长度指数、染色路径宽度的累积贡献率分别为97.8%,86.95%和87.45%,且每个主成分的特征根均大于1,因此对红河干热河谷地区染色面积比、染色路径宽度与红壤理化因子进行主成分分析。

表2 典型样地土壤优先流的总方差分析

因子	主成分	特征值	贡献率/%	累积贡献率/%
染色面积( $D_A$ )	$F_1$	18.20	82.21	82.21
	$F_2$	1.24	5.66	87.87
	$F_3$	1.18	9.93	97.80
长度指数(LI)	$F_4$	17.72	75.82	76.82
	$F_5$	1.61	6.01	81.83
	$F_6$	1.08	5.12	86.95
染色路径宽度(SPW)	$F_7$	15.63	74.39	74.39
	$F_8$	1.67	7.96	82.35
	$F_9$	1.07	5.10	87.45

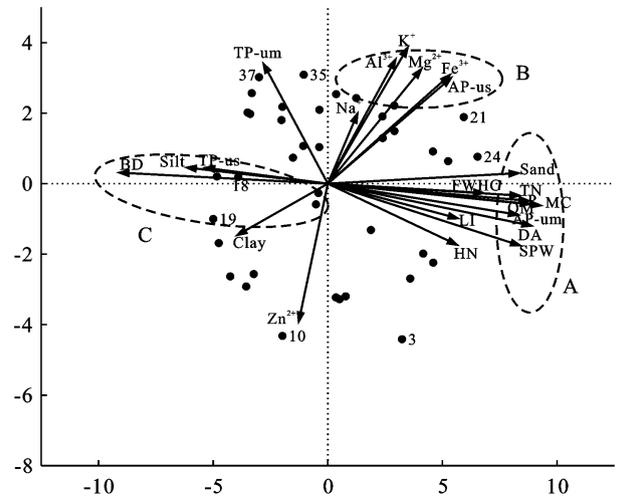
注: $F_1, F_2, F_3$ 为土壤理化指标对染色面积的3个主成分; $F_4, F_5, F_6$ 为土壤理化指标对长度指数的3个主成分; $F_7, F_8, F_9$ 为土壤理化指标对染色路径宽度的3个主成分;

图4反映染色面积比、长度指数、染色路径宽度与土壤理化性质的联系,各土壤因子与 $D_A, LI, SPW$ 所形成的夹角的余弦值代表两者之间的相关性,与

$D_A$ , LI, SPW 等形成的夹角越小,其相关性越高,反之越低。第一二主成分与染色面积比、长度指数、染色路径宽度等方向一致,呈正相关关系;第三主成分与染色面积比、长度指数等方向相反,表现出负相关关系。含水率、有机质、砂粒、总孔隙度、田间持水量、全氮、速效钾等为第一主成分与  $D_A$ , LI, SPW 构成的夹角最小,说明优先流对土壤理化因子的变化较敏感;  $K^+$ ,  $Al^{3+}$ ,  $Mg^{2+}$ ,  $Fe^{3+}$  等盐基离子与  $D_A$ , LI, SPW 方向一致但夹角稍大,表明盐基离子对优先流有正向作用但没有显著相关性;土壤容重、粉粒、黏粒及全磷与  $D_A$ , LI, SPW 等方向相反,且夹角较大,说明土壤容重、黏粒、粉粒、全磷等在优先流发育过程中表现为负效应,随土层中黏粒、粉粒、全磷等含量增加,抑制优先流发生。研究区土壤优先流主要受土壤物理特性、盐基离子和土壤肥力等共同影响,土壤因子可解释优先流染色面积比、长度指数和染色路径宽度 97.80%, 86.95%, 87.45% 的变异,鉴于此,可得土壤因子是引起红河干热河谷红壤优先流变化的主要原因之一。

为探讨优先流与各土壤因子的相关性,获取它们的最优线性关系,将优先流染色面积比( $Y_1$ )、长度指数( $Y_2$ )和染色路径宽度( $Y_3$ )作为因变量,对土壤含水率、有机质、容重、黏粒、粉粒、砂粒、总孔隙度、田间持水量、全氮、速效钾等因子进行回归分析。基于表 3 知,林草地土壤因子与染色面积比的  $R^2$  分别是 0.982, 0.964 ( $p < 0.01$ ), 与长度指数的  $R^2$  为 0.956, 0.699 ( $p < 0.01$ ), 与染色路径宽度  $R^2$  为 0.971, 0.951 ( $p < 0.01$ )。林草地染色面积比与总孔隙度( $X_7$ )、土壤容重( $X_3$ )、有机质( $X_2$ )、含水率( $X_1$ )等因子的线性关系较好,此外,林地染色面积比还受土壤全氮含量( $X_{15}$ )、田间持水量( $X_8$ )的影响,而荒草地染色面

积比则受土壤速效钾( $X_{20}$ )的影响;林地长度指数与总孔隙度( $X_7$ )、土壤容重( $X_3$ )、田间持水量( $X_8$ )、 $K^+$ ( $X_9$ )等的拟合度较高,而荒草地内长度指数与总孔隙度( $X_7$ )、有机质( $X_2$ )、 $Al^{3+}$ ( $X_{12}$ )、有效磷( $X_{18}$ )、 $Fe^{3+}$ ( $X_7$ )、粉粒( $X_5$ )的拟合效果度较好。林地染色路径宽度受土壤的总孔隙度、 $Al^{3+}$ 、含水率、容重和粉粒的影响较显著,而荒草地染色路径宽度受含水率、容重、总孔隙度及  $Al^{3+}$  含量的影响较大。因土壤孔隙度、机械组成与盐基离子等共同影响,随土层加深,染色路径宽度变窄,优先流的发生受抑制。



注:  $D_A$  为染色面积比(%); LI 为长度指数; SPW 为染色路径宽度; MC 为含水率; OM 为有机质 Organic matter; BD 为容重; Clay 为黏粒; Silt 为粉粒; Sand 为砂粒; P 为总孔隙度; FWHC 为田间持水量;  $K^+$  为土壤中钾离子含量;  $Na^+$  为土壤中钠离子含量;  $Zn^{2+}$  为土壤中锌离子含量;  $Al^{3+}$  为土壤中铝离子含量;  $Mg^{2+}$  为土壤中镁离子含量;  $Fe^{3+}$  为土壤中铁离子含量;  $Mn^{2+}$  为土壤中锰离子含量; TN 为全氮; HN 为速效氮; TP-us 为全磷; AP-us 为速效磷; TP-um 为全钾; AP-um 为速效 K; A 为第一主成分; B 为第二主成分; C 为第三主成分。

图 4 土壤优先流评价指标与土壤因子的主成分分析

表 3 不同样地土壤因子逐步回归方程

因子	样地类型	回归方程	$R^2$
染色面积比( $D_A$ )	林地	$Y_1 = 6.413 + 0.531X_7 + 1.213X_2 + 233.877X_{12} - 0.908X_8 - 27.406X_3 + 1.129X_1$	0.982
	荒草地	$Y_1 = -56.180 + 1.108X_7 + 2.599X_1 - 0.529X_{20} + 1.089X_2 - 13.22X_3$	0.964
长度指数(LI)	林地	$Y_2 = 29.61 + 0.58X_7 - 0.323X_9 - 17.62X_3 - 0.438X_8 - 38.845X_{16}$	0.956
	荒草地	$Y_2 = 94.013 + 0.897X_7 + 0.693X_2 + 2.934X_{12} - 3.092X_{18} - 1.18X_{14} - 0.33X_5$	0.699
染色路径宽度(SPW)	林地	$Y_3 = 44.402 + 0.454X_7 + 67.640X_{12} - 0.555X_5 - 26.626X_3 + 0.742X_1$	0.971
	荒草地	$Y_3 = -4.059 + 0.389X_7 + 103.655X_{15} - 21.210X_3 + 1.236X_1$	0.951

### 3 讨论

本研究结果表明,红河干热河谷地区林草地优先流在形态特征和最大染色深度存在差异,林地优先流发育程度较荒草地大,且林地染色深度更深,这与邵一敏等<sup>[19]</sup>对金沙江干热河谷林草地优先流特征的研

究结果基本一致。染色面积随土层增加而减小,与 Weller<sup>[38]</sup>的研究结果大致相同;林地染色面积随土层变化局部范围内有反弹现象,其原因是土壤孔隙大量存在,土壤通透性较好,使染色溶液发生侧渗,导致剖面染色面积反弹,与魏虎伟等<sup>[39]</sup>的结论相近。林草地的平均染色面积在 0—20, 0—10 cm 最大,平均染

色面积分别为 87.20% 和 91.79%, 林草地最大染色深度分别为 40 和 35 cm, 土层越深染色面积越小, 最终染色面积趋于 0, 其变化规律与刘目兴等<sup>[40]</sup> 研究结果一致; 染色路径宽度随土层的增加而变窄, 0—20 cm 土层以 >250 mm 的路径为主, 20—40 cm 内的染色路径在 20—250 mm, 40 cm 以下土层以 <20 mm 的路径起主导作用, 结果与 Alaoui 等<sup>[41-42]</sup> 的研究相同; 但林草地最大染色深度及染色路径宽度在垂直深度内与朱钊岑等<sup>[41]</sup> 在荒漠绿洲湿地的研究差异较大, 其原因是荒漠绿洲研究区土壤上层以粉质壤土为主, 下层以砂土为主, 而本研究以粉质红壤为主, 荒漠绿洲砂土的孔隙度为水分提供了运移路径, 致使水分入渗较深, 最大染色深度更大。

根据主成分分析结果可知, 优先流对土壤因子的变化较敏感, 含水率、有机质、容重以及  $Al^{3+}$ ,  $Mg^{2+}$ ,  $Fe^{3+}$  等金属离子对染色面积比、长度指数、染色路径宽度的贡献率分别为 97.80%, 86.95% 和 87.45%, 土壤有机质和氮磷钾等营养元素等成分可改善土壤孔隙度, 且孔隙度越大, 优先路径连通性越好, 染色面积越大; 容重、黏粒等与  $D_A$ , LI, SPW 呈负相关关系, 与张东旭等<sup>[43]</sup> 对优先流和基质流区土壤特性的研究一致; 优先流的发生与红壤中的砂粒呈显著正相关, 与黏粒和粉粒呈负相关<sup>[44]</sup>。随着土层深度的增加, 黏粒、粉粒含量增加, 土壤孔隙减小, 土壤结构紧实, 优先流发育受阻, 与陈晓冰等<sup>[45-47]</sup> 研究不同植被类型土壤优先流影响因素相近; 本试验结果中土壤  $K^+$ ,  $Al^{3+}$ ,  $Fe^{3+}$  等盐基离子的变化规律与 Bogner 等<sup>[46]</sup> 的研究一致, 且盐基离子与优先流染色面积有正相关关系。本研究通过回归分析获取的最优线性关系知, 红壤特性是引起干热河谷区林草地优先流发生的关键因素之一。土壤优先流的发生与土壤自身的空间异质性、物理性质及盐基离子等有关, 在多因素作用下, 优先流的发生具有随机性, 优先流的发生与土壤因子间存在显著的影响。

## 4 结论

林地优先流的发育程度比荒草地大, 染色深度更深。林地优先流区主要集中于 20—40 cm 处, 而荒草地集中在 10—30 cm。根据优先流染色面积比和长度指数知, 林地更易发生优先流现象, 但形态特征分化不明显。

随着林草地土层加深, 染色面积逐渐减小, 染色路径宽度变窄。两种植被类型的最大染色深度为 40 cm, 35 cm, 且在不同土层的剖面染色面积差异明显, 土层越深, 染色面积越小; 0—10 cm 土层中, 因基质

流和优先流的共同作用, 使剖面面积几乎被染色; 0—20 cm, 林地染色面积比减小幅度为 87.20%~45.66%, 荒草地减小了 91.79%~46.88%。两种植被类型染色路径在 0—20 cm 以 >250 mm 为主, 20—40 cm 大多数集中在 20—250 mm, 而 <20 mm 的染色路径出现在 40 cm 以下。

土壤的含水率、孔隙度、 $Al^{3+}$  含量等是引起优先流形态变化的主要因子。本研究经回归分析知, 这些因子均与优先流染色面积比、长度指数、染色路径宽度有较好的线性关系且正相关关系明显 ( $p < 0.05$ ), 而容重与染色面积比则呈现出显著的负相关 ( $p < 0.05$ )。

## [ 参 考 文 献 ]

- [1] 金振洲. 滇川干热河谷种子植物区系成分研究[J]. 广西植物, 1999, 19(1): 1-14.
- [2] 刘方炎, 李昆, 孙永玉, 等. 横断山区干热河谷气候及其对植被恢复的影响[J]. 长江流域资源与环境, 2010, 19(12): 1386-1391.
- [3] 孔继君, 谷丽萍, 郭永清, 等. 元谋干热河谷生态恢复示范区土壤养分状况调查[J]. 西部林业科学, 2017, 46(6): 108-112.
- [4] 岳学文. 金沙江干热河谷不同土地利用方式的土壤水分特征[J]. 安徽农业科学, 2012, 38(27): 14963-14965.
- [5] 赵元蛟, 苏文华, 张光飞, 等. 云南元谋干热河谷土壤水分季节动态[J]. 安徽农业科学, 2013, 41(8): 3593-3594.
- [6] 段爱国, 张建国, 张俊佩, 等. 干热河谷主要植被恢复树种水分利用效率动态分析[J]. 北京林业大学学报, 2010, 32(6): 13-19.
- [7] Dekker L W, Ritsema C J, Wendroth O, et al. Moisture distributions and wetting rates of soils at experimental fields in the Netherlands, France, Sweden and Germany [J]. Journal of Hydrology, 1999, 215(1): 4-22.
- [8] Jarvis N. Modeling the Impact of Preferential Flow on Nonpoint Source Pollution [C] // Physical Nonequilibrium in Soils. Ann Arbor Press, 1988.
- [9] 程金花, 张洪江, 史玉虎, 等. 长江三峡花岗岩地区优先流对渗流和地表径流的作用[J]. 水土保持通报, 2007, 27(2): 18-23.
- [10] 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[J]. 应用生态学报, 2007, 18(10): 2179-2184.
- [11] Karup D, 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(5): 194-202.
- [12] 张英虎, 牛健植, 朱蔚利, 等. 森林生态系统林木根系对优先流的影响[J]. 生态学报, 2015, 35(6): 1788-1797.
- [13] 王岩, 陈友媛, 彭昌盛, 等. 初始含水量对黄河口潮滩溶质优先运移的影响研究[J]. 海洋环境科学, 2011, 30(3): 310-315.

- [14] 吕刚,金兆梁,凌帅,等.浑河源头水源涵养林土壤优先流特征[J].水土保持学报,2019,33(4):287-292.
- [15] Judit G H, Flury M. Sorption of brilliant blue FCF in soils as affected by pH and ionic strength [J]. Geoderma, 2000,97(1):87-101.
- [16] 骆紫藤,牛健植,孟晨,等.华北土石山区森林土壤中石砾分布特征对土壤大孔隙及导水性质的影响[J].水土保持学报,2016,30(3):305-308,316.
- [17] 刘目兴,聂艳,于婧,等.不同初始含水率下粘质土壤的入渗过程[J].生态学报,2012,32(3):871-878.
- [18] 张海林,杨秀锋,易军,等.亚热带红壤区不同土地利用方式下的土壤剖面水流特征[J].水土保持学报,2019,165(6):235-243.
- [19] 邵一敏,赵洋毅,段旭,等.基于分形分析的干热河谷区典型地类土壤优先路径分布特征[J].西北农林科技大学学报(自然科学版),2020,48(7):102-112.
- [20] Nathan W H, Bhabani S, Das P, et al. Dual-domain solute transfer and transport processes: Evaluation in batch and transport experiments [J]. Journal of Contaminant Hydrology, 2004,75(3):257-280.
- [21] Pietro L D, Stephane Ruy, Capowiez Y. Predicting preferential water flow in soils by traveling-dispersive waves [J]. Journal of Hydrology, 2003,278(1):64-75.
- [22] Anderson S H, Peyton R I, Gantzer C J. Evaluation of constructed and natural soil macropores using X-ray computed tomography [J]. Geoderma, 1990,19(18):97-100.
- [23] Feng Jie, Hao Zhenchun. Distribution of soil macropores characterized by CT [J]. Advances in Water Science, 2002,13(5):611-617.
- [24] Vanclooster M, Mallants D, Diels J, et al. Determining local-scale solute transport parameters using time domain reflectometry (TDR) [J]. Journal of Hydrology, 1993,148(1/4):93-107.
- [25] 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.
- [26] 马思文,张洪江,程金花,等.三峡库区典型城郊防护林土壤饱和导水率特征研究[J].南京林业大学学报(自然科学版),2018,42(5):99-106.
- [27] Akhtar M S, Richards B K, Medrano P A, et al. Dissolved phosphorus from undisturbed soil cores: Related to adsorption strength, flow rate, or soil structure [J]. Soil Science Society of America Journal, 2003,67(2):458-470.
- [28] Shaw J N, West L T, Radcliffe D E, et al. Preferential flow and pedotransfer functions for transport properties in sandy Kandiuudults [J]. Soil Science Society of America Journal, 2000,64(2):670-678.
- [29] 李振东,朱彦光,陈晓冰,等.桂北岩溶区典型农地土壤优先流特征[J].水土保持研究,2019,26(5):68-74,80.
- [30] 刘伟,杨涛,艾志强,等.2种土地利用方式下红壤优先流特征及其对氮运移的影响[J].安徽农业科学,2019,47(24):100-102,169.
- [31] 胡琦,李仙岳,史海滨,等.基于染色示踪的农膜残留农田土壤优先流特征[J].水土保持学报,2020,34(3):142-149.
- [32] Lv Gang, Li Jun, Li Yexin, et al. Preferential flow characteristics of reclaimed mine soils in a surface coal mine dump [J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2017,189(6):266.
- [33] Morales V L, Parlange J Y, Steenhuis T S. Are preferential flow paths perpetuated by microbial activity in the soil matrix: A review [J]. Journal of Hydrology, 2009,393(1):29-36.
- [34] 陈婷婷,段旭,赵洋毅,等.红河干热河谷区典型地类植物根系特征对土壤大孔隙的影响[J].水土保持研究,2020,27(6):107-115.
- [35] 王伟.三峡库区紫色砂岩林地土壤优先流特征及其形成机理[D].北京:北京林业大学,2011.
- [36] 陈晓冰.重庆四面山4种土地利用类型土壤优先流特征研究[D].北京:北京林业大学,2016.
- [37] 聂立水,王登芝.土壤分析[M].北京:中国林业出版社,2019.
- [38] Weiler M, Naef F. An experimental tracer study of the role of macropores in infiltration in grassland soils [J]. Hydrological Processes, 2003,17(2):477-493.
- [39] 魏虎伟,程金花,杜士才,等.利用染色示踪法研究四面山两种林地优先路径分布特征[J].水土保持通报,2015,35(2):193-197,204.
- [40] 刘目兴,杜文正.山地土壤优先流路径的染色示踪研究[J].土壤学报,2013,50(5):871-880.
- [41] 朱钊岑,刘冰,刘婵,等.荒漠绿洲湿地土壤优先流与水分入渗特征[J].生态学报,2020,40(12):3979-3990.
- [42] Alaoui A, Lipiec J, Gerke H. A review of the changes in the soil pore system due to soil deformation: A hydrodynamic perspective [J]. Soil & Tillage Research, 2011,115(6):1-15.
- [43] 张东旭,程金花,王伟,鹤大高速(G11)低路基边坡土壤优先流特征[J].水土保持学报,2016,30(5):76-81.
- [44] 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,2005,3(1):97-101.
- [45] 陈晓冰,张洪江,李世友,等.紫色砂岩区不同植被类型土壤优先流特征及其影响因素[J].中国水土保持科学,2014,12(6):42-49.
- [46] Bogner C, Borken W, Huwe B. Impact of preferential flow on soil chemistry of a podzol [J]. Geoderma, 2012,175/176(5):37-46.
- [47] Stewart B W. Comparison of preferential flow paths to bulk soil in a weakly aggregated silt loam soil [J]. Vadose Zone Journal, 2009,8(3):623-627.