Chinese Journal of Applied Ecology, Mar. 2020, 31(3): 725-734 DOI: 10.13287/j.1001-9332.202003.013

金沙江干热河谷典型林草地植物根系对土壤优先流的影响

邵一敏[1] 赵洋毅[1,2*] 段 旭[3] 王克勤[1,2] 陈婷婷[1] 万艳萍[1]
([1]西南林业大学生态与环境学院, 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, 昆明 650224; [3]西南林业大学林学院, 昆明 650224)

摘 要 为了明确土壤优先流形态特征以及植物根系对其形成的影响,以金沙江干热河谷元谋县苴那小流域典型植被类型银合欢人工林地和扭黄茅荒草地为研究对象,基于染色示踪法并结合 Photoshop CS5 和 Image-Pro Plus 6.0 图像处理技术,分析了 2 种植被下的土壤优先流形态特征和分布特征,并探究了植物根系对其的影响。结果表明:林地和荒草地的土壤优先流染色面积具有明显差异,林地染色面积比总体随土壤深度的增加而减小,但部分地方表现出增大现象;荒草地染色面积比随土壤深度增加呈单调递减,林地优先流发生程度高于荒草地。根系对优先流的形成具有重要影响,根径 $0 \leqslant d \leqslant 5$ mm 和 $d > 10$ mm 范围内,林地根长密度随着土层深度的增加呈单调递减趋势,5 mm$< d \leqslant$10 mm 根系根长密度在 30~40 cm 土层出现较大波动;荒草地各级根系根长密度均与土壤深度呈负相关关系。林地染色面积比与 3 mm$< d \leqslant$5 mm 根径范围内的根长密度呈极显著相关,荒草地染色面积比与 $d \leqslant 3$ mm 范围的根长密度呈极显著相关;2 种地类染色面积比均与 1 mm$< d \leqslant$3 mm 范围的根重密度及 $d \leqslant 1$ mm 的根表面积呈极显著相关,与 $d > 5$ mm 根径的根长密度、根重密度、根表面积的相关性不显著。研究区 2 种地类的土壤优先流染色面积总体变化趋势为随土壤深度的增加而减小,植物根系与土壤优先流的形成关系密切,其中,细根能显著促进土壤优先流的形成,粗根对优先流的形成具有局限性。

关键词 优先流; 根长密度; 根重密度; 根表面积; 染色示踪法; 干热河谷

Effects of plant roots on soil preferential flow in typical forest and grassland in the dry-hot valley of Jinsha River, China.

SHAO Yi-min[1], ZHAO Yang-yi[1,2*], DUAN Xu[3], WANG Ke-qin[1,2], CHEN Ting-ting[1], WAN Yan-ping[1] ([1]*College of Ecology and Environment, Southwest Forestry University, Kunming* 650224, *China*; [2]*Yuxi Forestry Ecosystem Research Station, National Forestry and Grassland Administration, Kunming* 650224, *China*; [3]*College of Forestry, Southwest Forestry University, Kunming* 650224, *China*).

Abstract: To clarify the morphological characteristics of soil preferential flow and the effect of plant roots on its formation, plants from the typical vegetation types of an artificial woodland (*Leucaena acacia*) and a dry watershed grassland (*Heteropogon contortus*) of Yuanmou County, Jinsha River were selected as the experimental objects. Based on the staining and tracing method combined with Photoshop CS5 and the Image-Pro Plus 6.0 image processing technology, we analyzed the morphological and distribution characteristics of soil preferential flow under the two planting types and examined the effects of plant roots. We found significant difference in soil preferential flow dyeing area between the woodland and grassland species, and the overall variation trend of the forestland

本文由国家自然科学基金项目(31860235,31560233)、云南省教育厅研究生基金项目(2019Y0139)、云南省重点研发计划项目(2018BB018)、国家林草局林业科技创新平台运行补助项目(2019132161)和云南省自然生态监测网络监测项目(2019-YN-13)资助 This was supported by the National Natural Science Foundation of China (31860235, 31560233), the Yunnan Province Education Department Graduate Fund Project (2019Y0139), the Yunnan Provincial Key R&D Plan Project (2018BB018), the National Forestry and Grass Bureau Forestry Science and Technology Innovation Platform Operation Grant Project (2019132161) and the Yunnan Provincial Natural Ecological Monitoring Network Monitoring Project (2019-YN-13).
2019-10-19 Received, 2019-12-25 Accepted.
* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: zhaoyangyi@swfu.edu.cn

dyeing area ratio decreased with increasing soil depth. The dyeing area of the grassland decreased monotonously with the increases of soil depth. The occurrence degree of soil preferential flow in forest was higher than that of grassland. Root systemaffected the formation of soil preferential flow. At the root diameter ranges of $0 \leqslant d \leqslant 5$ mm and $d > 10$ mm, root length density of the woodland showed a monotonous decreasing trend with increasing soil depth, while in the root diameter range of 5 mm$< d \leqslant 10$ mm, it fluctuated in the 30-40 cm soil layer. Root length densities at all the root diameter levels of desert grassland were negatively correlated with soil depth. The dyeing area ratio of the woodland was significantly correlated to root length density in the 3 mm$< d \leqslant 5$ mm root diameter range, while that of the grassland was significantly correlated to root length density in the $d \leqslant 3$ mm range. The dyeing area ratio of both land types showed significant correlation with root weight density in the range of 1 mm$< d \leqslant 3$ mm and with root surface area of $d \leqslant 1$ mm, but did not correlated with root length density, root weight density, and root surface area in the root diameter range of $d > 5$ mm. The overall change trend of soil preferential flow dyeing area of two vegetation types in the study area decreased with increasing soil depth. Plant root system was closely related to the formation of soil preferential flow. Fine roots could promote while coarse roots may retard the formation of preferential flows.

Key words: preferential flow; root length density; root weight density; root surface area; dyeing tracer method; dry-hot valley.

土壤水是植物赖以生存的基础,是水文循环中不可或缺的重要组成部分。土壤水的动态变化会影响土壤的理化性质,制约土壤中养分的溶解和传输[1]。干热河谷是一种位于高温、低湿河谷地带的特殊局部生境,在我国主要分布于金沙江、红河、怒江、南盘江等沿江河谷地带[2],区域内气候炎热少雨,土壤干化严重、植被稀疏,森林覆盖率不足 5%。有研究证明,水资源严重缺乏、水分供给不足是导致干热河谷区生态脆弱且植物恢复困难的主要限制因素之一[3]。不同学者的研究结果都表明,有效管理土壤水分是干热河谷区域生态恢复的关键所在[4-5]。因此,着重研究该区域水分运输特征非常有必要性。

土壤优先流作为土壤中水分和溶质运动的一种特殊形式,能为土壤中水分快速迁移提供有效通道[6],从而提高土壤水分的入渗率,减少地表径流,对森林水文和区域水资源控制具有重要影响,有利于合理控制和解决水资源问题,具有十分重要的生态水文效应。影响土壤优先流形成的因素较多,国内外已有大量关于此方面的研究报道。土壤质地[7]、土壤容重[8]、初始含水量[9]、石砾含量[10]以及植物根系[11]等因子都影响优先流的形成。定量研究土壤优先流特征及环境因子对其的影响是生态水文学科共同的研究热点与难点。Akhtar 等[12]研究了不同土壤质地条件下大孔隙的特征,探讨了土壤质地对大孔隙结构特征的影响;Shaw 等[13]通过研究土壤颗粒含量与土壤优先流的关系,得出黏粒含量对优先流具有显著影响;王岩等[14]的研究证明了土壤初始含水量对土壤优先流的形成具有显著影响;张建丰等[15]研究得出,植物根系对优先流的形成有重要影响,根系通道促进了水分和溶质在土壤中的快速迁移;张英虎等[16]就鹫峰山森林系统根系与优先流的关系开展研究,指出优先流发生区的根系大于基质流区,证明植被根系与优先流的形成关系密切。

干热河谷地区水热平衡失调,环境炎热干燥,植被和土壤退化严重,其土壤条件与以往优先流集中研究区域三峡库区、重庆山区等地区的土壤存在显著差异。目前对于干热河谷地区土壤优先流的研究还鲜见报道。因此,本研究针对金沙江元谋干热河谷典型植被银合欢(*Leucaena glauca*)人工林地和荒草地展开研究,分析 2 种植被类型下土壤的优先流特征,并探究植被根系特征对优先流形成及分布的影响,为揭示干热河谷地区土壤水分运移规律,解决水资源短缺问题以及植被恢复提供一定的科学依据。

1 研究地区与研究方法

1.1 研究区概况

研究区位于金沙江干热河谷的典型代表地段(25°38′—25°34′ N,101°54′—101°52′ E)。研究区域属典型的南亚热带季风河谷干热气候,四季不明显,干湿季分明,多年平均降雨量仅为 634 mm,年平均气温 21.9 ℃,≥10 ℃的积温为 7791.6 ℃;多年平

表 1　样地基本情况
Table 1　Basic situation of the plot

样地类型 Plot type	坡度 Slope (°)	坡向 Aspect	海拔 Elevation (m)	主要植物 Main plants	土壤容重 Bulk density ($g \cdot cm^{-3}$)	土壤质地 Soil texture (%) 砂粒 Sand	粉粒 Powder	黏粒 Clay	有机质 Organic matter ($g \cdot kg^{-1}$)	孔隙度 Porosity (%)
林地 Woodland	8	东南 Southeast	1214.2	银合欢、车桑子等 *L. glauca*, *D. angustifolia*, *etc.*	1.01	56.5	28.8	14.5	15.98	68.4
荒草地 Grassland	7	东南 Southeast	1214.6	扭黄茅、龙须草等 *H. cantortus*, *E. binata*, *etc.*	1.15	59.1	25.9	14.9	14.73	68.2

均蒸发量高达 3847.8 mm；全年平均气候干燥度≥1.5；全年 80%～90%的降雨量集中在 6—10 月；气温绝对最高值>40 ℃。草本种类较多，以扭黄茅（*Heteropogon cantortus*）、龙须草（*Juncus effusus*）、红秆草（*Cymbopogon matinii*）、孔颖草（*Bothriochloa pertusa*）等为主；灌木多为车桑子（*Dodonaea viscosa*）、余甘子（*Phyllanthus emblica*）、滇刺枣（*Ziziphus mauritiana*）等；乔木以银合欢、桉树（*Eucalyptus robusta*）林、相思（*Acacia confusa*）林等为主。

1.2　研究方法

1.2.1 样地布设　以研究区内典型地类林地、荒草地为研究对象，选择坡度、坡向、坡位等因子相近的区域，在 2 种植被类型区域内依据地形分别设置 4 块 15 m×15 m 或 10 m×15 m 的样方，总计 8 块样地（表 1）。

1.2.2 染色示踪试验　染色示踪剖面主要布设在地形平坦处，试验前先平整样地，在不扰动土壤腐殖质层的前提下，除去样地表面的枯枝落叶和大块砾石。然后将 70 cm×70 cm×50 cm 的铁框埋入土中 30 cm，并用木锤夯实铁框内壁 5 cm 以内的土壤，以避免染色溶液沿铁框内壁下漏对观测结果造成影响。将调配好的 4 $g \cdot L^{-1}$ 的亮蓝溶液 19 L（模拟当地暴雨强度 60 $mm \cdot h^{-1}$）均匀喷洒在矩形框内，供水装置采用马氏瓶在积水渗透方式下进行，再用保温塑料薄膜覆盖在喷洒区域上，以避免静置过程中降雨等外因的影响。24 h 后，除去覆盖的塑料薄膜和铁框。由于铁框周围区域内土壤水分运移情况较不稳定，可能出现水分侧向渗流而影响试验结果，因此，在铁框中心 50 cm×50 cm 区域挖掘剖面。将 2 个米尺垂直交叉放置，用来标注剖面尺寸，以标准灰阶比色卡为参照，以水平宽度 10 cm 为一层由上至下缓慢地分层挖掘垂直剖面，并采用索尼数码相机（300 万像素）拍摄剖面染色图像，择优处理，拍照光线用遮阳伞控制。

1.2.3 土壤基本性质测定　用标准环刀（100 cm^3）分层采集原状土，测定土壤容重和孔隙度；每层采集土壤样品 1000 g 用于测定土壤理化性质，其中，土壤颗粒组成采用激光粒度仪（MS2000）测定，土壤有机质采用重铬酸钾加热法[17]测定。

1.2.4 植物根系特征测定　染色试验完成后，采集土壤样品的同时收集根系，用双层纱布包裹，洗净根上附着的泥土并晾干，以根系径级为标准，将根径分为 $d \leqslant 1$ mm、1 mm$<d \leqslant 3$ mm、3 mm$<d \leqslant 5$ mm、5 mm$<d \leqslant 10$ mm、$d>10$ mm 等 5 个级别，统计不同土壤层中各个径级根系的总根长。测定各土层中不同径级根系的总生物量，据此计算根长密度和根重密度。

根长密度指单位体积土壤中分布的不同径级的根系长度状况[18]。计算公式如下：

$$q_{rl} = \sum L_r / V_{soil} \quad (1)$$

式中：q_{rl} 为根长密度（$m \cdot m^{-3}$）；L_r 为某径级根系长度（m）；V_{soil} 为土壤体积（m^3）。

根重密度指单位体积土壤中植物根系生物量的状况[19]。根重密度越大，说明植物根系越发达，相应的根表面积就越大、与土壤形成的间隙越大，更容易形成较大孔径的优先路径[20]。计算公式如下：

$$q_{rm} = \sum M_r / V_{soil} \quad (2)$$

式中：q_{rm} 为根重密度（$kg \cdot m^{-3}$）；M_r 为某径级根系重量（kg）；V_{soil} 为土壤体积（m^3）。

根系表面积采用直接测量法测定，直接测定同一根径内每个根系样品的总根长，根据根径和根长估算根系表面积[21]。计算公式如下：

$$S = \pi RL \quad (3)$$

式中：S 为根表面积（m^3）；R 为根系直径（m）；L 为根系总长（m）。

1.3　数据处理

通过野外染色示踪试验得到典型植被类型银合欢人工林地和扭黄茅荒草地的染色土壤剖面图像，利用 Photoshop CS5 和 Image-Pro Plus 6.0 图像分析软件对染色图像进行解析，得到各染色剖面的垂直与水平分布图像。用 Excel 2016 和 SPSS 22.0 对数据进行统计分析。采用单因素（one-way ANOVA）进

行方差分析,用 Pearson 法对根系基本指标和染色面积比进行相关分析。利用 Excel 2016 软件作图。图表中数据为平均值±标准差。

2 结果与分析

2.1 典型林草地优先流形态特征

2.1.1 纵向变化特征 由图 1 可以看出染色溶液在土壤中的运移情况,大致沿着土壤中一条或多条路径下移,说明典型植被类型银合欢人工林地和扭黄茅荒草地均产生了优先流现象。由于不同植被类型的土壤结构等存在差异,导致不同类型土壤剖面的优先流形态发生变化。在 0~20 cm 土壤中,2 种地类均表现出大面积染色现象,说明在此深度上,土壤水分往下运移的主要形式以基质流为主,优先流现象不明显。随土层深度的加深,2 种地类中水分运移均表现出不同程度的分化现象。其中,林地剖面土壤水分运移路径从 20 cm 以下呈现不规则分化现象,优先流路径明显且连通性较好,染色溶液多垂直向下运移,土壤水分下渗深度达 50 cm,主要原因是林地土壤中有大量根系且大多分布在深层次土壤中,促进了优先流路径的形成。荒草地主要植被是扭黄毛,植被覆盖情况良好,染色溶液从土壤表层均匀地往下迁移,0~10 cm 的土壤中,染色面积大且分布均匀,土壤水分运移形式主要是基质流;10 cm 以下,水平宽度为 25~45 cm 处染色溶液顺着土壤孔隙绕过大部分土壤呈漏斗状向下迁移,出现明显的优先流现象,土壤剖面内优先流发生区范围集中在 10~45 cm 深度。此深度以下区域土壤紧实、黏粒含量较高,透水性较差,限制了水分向下运移。

2.1.2 水平分布特征 通过对垂直剖面上染色溶液的形态特征分析,可以看出优先流在土壤中的垂直分布情况,为进一步明确优先流的空间形态特征,还需要对水平的染色剖面进行分析。

试验过程中发现 2 种地类土壤表层(0~10 cm)剖面大部分都被染色,染色面积均达 80%以上,故本研究就 10~50 cm 土壤深度内的优先流水平分布展开研究。从染色图像整体来看,10 cm 以下土层,染色面积随土壤深度的增加而下降,这与 Yasuda 等[22]的结论一致。由图 2 可以看出,在 10~20 cm 土层,林地优先流主要分布在右下侧区域,占整个染色剖面的三分之二,并且在横向 30~50 cm、纵向 30~50 cm 处的染色明显深于其他区域并比较集中,说明优先流主要聚集分布在此范围内;荒草地染色区域着色深的区域分布较多且分散,说明该层优先流分布范围较大。在 20~30 cm 土壤深度范围内,林地、荒草地染色面积分别减小 11.5%、34.1%,林地染色区域分布较分散,而荒草地染色区域主要集中在剖面左边下部区域。到 30~40 cm 土层,染色面积继续减少,林地呈长条状分布于剖面中下位置处,零星分布于剖面上部;荒草地土壤剖面左上侧水平 0~10 cm 处着色较深,另在中间位置有一处近似于“三角形”的染色区,说明优先流集中分布于此。在 40~50 cm 土层,2 种地类的染色面积均大幅降低,林地染色区域主要集中在水平 0~10 cm、纵向 30~40 cm 处,其他区域均无染色,说明此处优先流相对集中,优先流发育较好。荒草地在 40~50 cm 土壤层次中的染色区域与上层 30~40 cm 处左上侧形状相同,说明优先流在此范围内延伸较多,优先路径连通性较好。

2.1.3 染色面积比特征 染色面积比反映了染色溶液在土壤剖面中的分布状况,染色面积比越大,表明基质流分布越大,优先流现象越不明显[23]。由图3

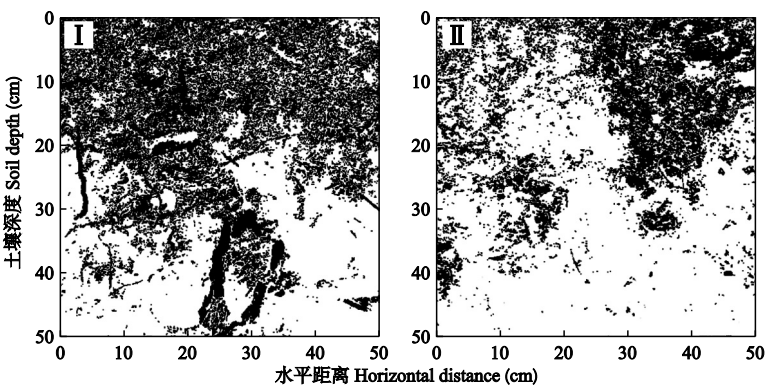


图 1 典型林、草地的垂直剖面染色图

Fig.1 Vertical section coloring diagram of typical forest and grassland.

Ⅰ: 林地 Woodland; Ⅱ: 荒草地 Grassland. 下同 The same below.

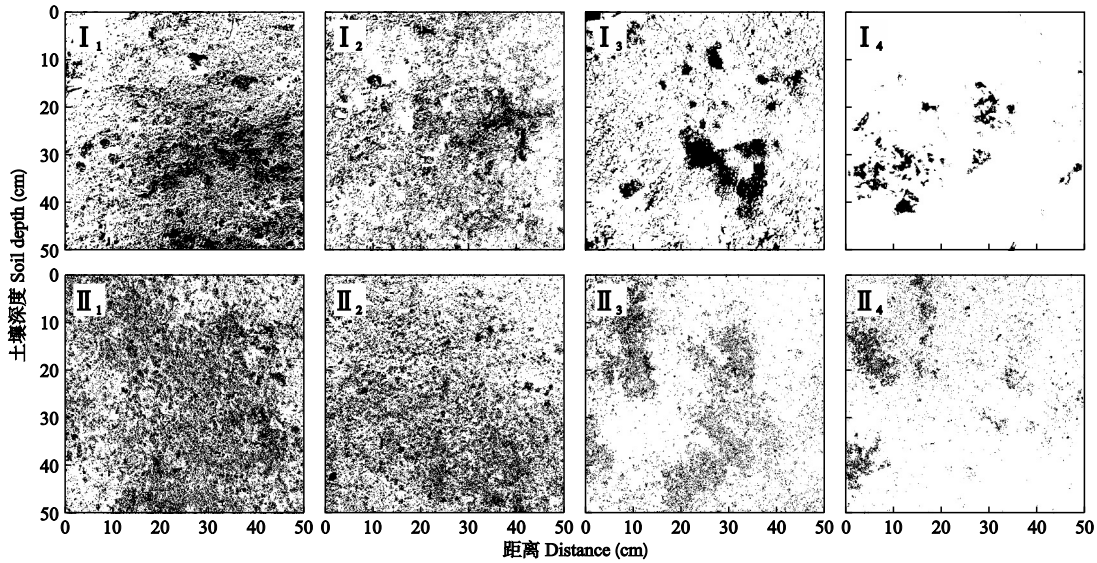


图 2　典型林、草地的水平剖面染色图

Fig.2　Horizontal section coloring diagram of typical forest and grassland.

1、2、3、4 分别代表土壤深度 10~20、20~30、30~40 和 40~50 cm 1, 2, 3, and 4 represented soil depth respectively 10-20, 20-30, 30-40, 40-50 cm, respectively.

可以看出,不同剖面的染色面积比在同一深度具有一定差异,但总体趋势是随着土壤深度的增加而减小,且 2 种地类减小幅度不同。林地 5 个染色剖面中,0~5 cm 土壤深度有 4 个剖面染色面积比在 80% 以上,然后逐渐减少,在 12 cm 处出现增幅变化;20 cm 以下,土壤剖面 1~4 均表现出下降趋势,剖面 5 在 25~40 cm 深度范围内面积比呈“S”型趋势波动变化,原因可能是水分出现侧向入渗。荒草地 5 个剖面染色面积比在表层土壤均在80%以上,随着土壤深度的增加,面积比逐渐下降,20 cm 以下迅速下降,染色面积比仅为 20%。

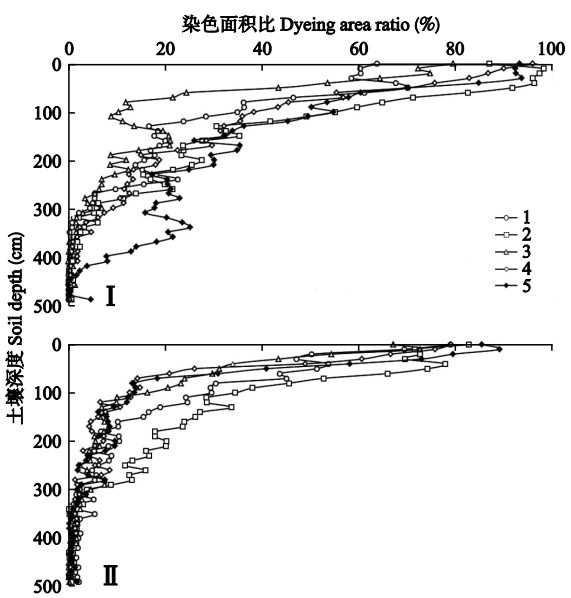


图 3　典型林、草地不同染色剖面染色面积比

Fig.3　Dyeing area ratio of different dyeing profiles in typical forest and grassland.

比较 2 种地类的剖面染色面积比变化,林地优先流发生区集中在 20 cm 以下土层,在试验过程中发现,林地根系较多,土壤中营养物质较丰富且生物活动等较荒草地多,因此,随着土层深度的增加,林地染色面积比并没有表现出单纯的递减趋势,部分区域染色面积比呈现增大迹象。荒草地根系主要集中分布于 0~20 cm 土层,此深度以下,染色面积比整体降幅较大,基本呈单调递减趋势,说明荒草地中水分横向运动相对林地较活跃。整体上看,林地染色最大深度达 50 cm,荒草地为 45 cm 左右,表明林地的优先流现象比荒草地更严重,连通性也较好。

2.2　环境因子与土壤优先流的关系

土壤优先流通常由众多因素共同作用而形成[23]。对土壤容重、土壤质地、土壤孔隙度、土壤有机质含量、根长密度、根重密度与染色面积比进行偏相关分析,结果表明,两种地类染色面积比均与土壤容重呈极显著相关,与土壤孔隙度、有机质含量和根长密度表现为极显著正相关关系,但与根重密度的相关性不显著(表 2)。林地染色面积比与土壤黏粒含量的相关性不显著,与土壤中砂粒含量和粉粒含量均呈显著相关;荒草地染色面积比与砂粒含量呈显著相关。土壤中砂粒含量越高,说明土壤透水性较好,土壤孔隙度较高,越有利于土壤优先流的形成[24]。本研究区土壤中砂粒含量较高,黏粒含量较

表 2 环境因子与染色面积比的相关系数

Table 2 Correlation coefficients between environmental factors and dyeing area ratio

样地类型 Plot type	指标 Index	容重 Bulk density	孔隙度 Porosity	有机质 Organic matter	黏粒含量 Clay content	粉粒含量 Powder content	砂粒含量 Sand content	根长密度 Root length density	根重密度 Root weight density
林地 Woodland	染色面积 Dyeing area	−0.959**	0.989**	0.947**	−0.332	0.737*	0.841*	0.987**	0.877*
	容重 Bulk density		−0.973	−0.993**	0.917*	−0.855*	−0.07	−0.122	−0.321
	孔隙度 Porosity			0.969	−0.859	0.613	0.943*	0.752*	0.633
	有机质 Organic matter				−0.867	−0.866	0.452	0.477	0.375
	黏粒含量 Clay content					0.409	0.397	0.281	0.137
	粉粒含量 Powder content						0.675	0.283	0.177
	砂粒含量 Sand content							0.385	0.422
	根长密度 Root length density								0.291
荒草地 Grassland	染色面积 Dyeing area	−0.973**	0.906**	0.952**	0.594	−0.566	0.898*	0.992**	0.932*
	容重 Bulk density		−0.993**	−0.971**	−0.413	0.464	−0.477	−0.172	−0.134
	孔隙度 Porosity			0.960	0.496	0.520	0.748*	0.851*	0.769
	有机质 Organic matter				0.253	−0.289	0.287	0.652	0.554
	黏粒含量 Clay content					−0.970*	0.701	0.288	0.317
	粉粒含量 Powder content						−0.853*	0.411	0.201
	砂粒含量 Sand content							0.297	0.372
	根长密度 Root length density								0.353

* $P<0.05$; ** $P<0.01$. 下同 The same below.

少,属于壤土类,具有较好的渗透性,容易形成优先流。

2.3 植物根系与土壤优先流的关系

2.3.1 根长密度对优先流的影响 由表 3 可以看出,在 $0<d\leqslant5$ mm 和 $d>10$ mm 根径范围内,林地根长密度随着土壤深度的增加呈单调递减趋势,在 5 mm$<d\leqslant10$ mm 根系范围,根长密度在 30~40 cm 土层出现较大波动。这与林地有一个土壤剖面染色面积在 30~40 cm 处波动相对应,也与陈晓冰等[25]、陈风琴等[26]的研究结果一致。荒草地各级根系根长密度均随土层加深而减小,5 mm$<d\leqslant10$ mm 根系仅在 0~20 cm 土层中出现,且 10~20 cm 土层的数量多于 0~10 cm 土层,$d>10$ mm 根系在各土层均未见。从各级根径数量上看,林地 3 mm$<d\leqslant5$ mm 的根长密度最大,其次是:$d\leqslant1$ mm、1 mm$<d\leqslant3$ mm,$d>10$ mm 最小;荒草地根长密度从大到小依次是 $d\leqslant1$ mm、1 mm$<d\leqslant3$ mm、3 mm$<d\leqslant5$ mm、5 mm$<d\leqslant10$ mm。

将不同径级的根长密度和根重密度与对应土壤深度内染色剖面的染色面积比进行 Pearson 相关分析。由表 4 可以看出,$d\leqslant5$ mm 径级的根长密度和根重密度均与染色面积比呈显著相关,其中,林地染色面积比与 3 mm$<d\leqslant5$ mm 径级根长密度的相关性最强,说明根径 $3<d\leqslant5$ mm 的根长密度对林地染色面积的影响最大;荒草地染色面积比与 $d\leqslant3$ mm 范围的根长密度呈极显著相关。林地和荒草地在 $d>5$ mm范围的根径与染色面积比的相关性不显著。说明粗根系并不能显著影响土壤中优先流的产生,

表 3 典型地类不同土壤深度的根长密度

Table 3 Root length density at different soil depths in typical land types ($m \cdot m^{-3}$)

样地类型 Plot type	土壤深度 Soil depth (cm)	根径 Root diameter (mm)				
		$d\leqslant1$	$1<d\leqslant3$	$3<d\leqslant5$	$5<d\leqslant10$	$d>10$
林地 Woodland	0~10	71.73±2.72	69.93±1.70	73.30±4.63	43.03±2.24	38.30±1.35
	10~20	31.96±1.33	36.77±1.60	47.08±3.23	34.71±3.44	17.78±15.47
	20~30	23.43±1.79	34.67±2.01	35.40±3.11	19.00±7.04	7.77±7.12
	30~40	16.43±1.14	31.9±0.36	23.40±2.20	28.33±17.94	5.83±5.20
	40~50	7.07±6.33	20.50±0.79	12.80±3.27	16.87±14.65	0
荒草地 Grassland	0~10	313.70±8.64	45.05±2.42	8.27±0.27	1.31±0.19	0
	10~20	228.01±17.66	31.53±1.26	7.11±0.75	3.90±0.54	0
	20~30	129.08±3.95	25.16±1.07	3.17±1.06	0	0
	30~40	90.42±0.92	17.61±2.62	1.81±0.26	0	0
	40~50	42.34±3.23	10.46±0.78	0.65±0.42	0	0

表 4　染色面积比与根长密度、根重密度的相关系数

Table 4　Correlation coefficients between dyeing area ratio with root length density and root density

样地类型 Plot type	根系指标 Root index	根径 Root diameter (mm)				
		$d \leqslant 1$	$1 < d \leqslant 3$	$3 < d \leqslant 5$	$5 < d \leqslant 10$	$d > 10$
林地	根长密度 Root length density	0.870*	0.820*	0.999**	0.479	0.584
Woodland	根重密度 Root weight density	0.781*	0.977**	0.966*	0.487	0.472
荒草地	根长密度 Root length density	0.902**	0.925**	0.825*	0.689	–
Grassland	根重密度 Root length density	0.940**	0.971**	0.85*	0.575	–

主要是因为粗根在一定程度上会破坏土壤稳定的团聚体结构,影响土壤孔隙度,进而影响优先路径的发育。

2.3.2 根重密度对优先流的影响　植物的根重密度也对优先流的发生具有一定影响。由表 4 可以看出,林地和荒草地染色面积比均与 1 mm$<d\leqslant$3 mm 根径的根重密度呈极显著相关。通过对此径级的根重密度与染色面积比进行回归拟合可知,根重密度越大,染色面积比越大(图 4)。根系主要分布于土壤表层,根重密度较高[27-29],而表层土壤染色面积比也较深层土壤高,说明根重密度与染色面积比之间关系密切。土壤中的根系增大了土壤孔隙度,从而促进了土壤中优先路径的形成,并提高了土壤中孔隙的连通性[25],使根系与土壤中优先路径形成一个连通的网络结构,从而增加了水分和溶质在土壤中的含量。研究区林地和荒草地染色面积比随根重密度的变化趋势总体一致,均呈正相关。但林地根重密度与染色面积比的相关系数高于荒草地(林地 $R^2=0.977$>荒草地 $R^2=0.971$),且林地的拟合度较高,主要是因为林地根系结构复杂,土壤有机质含量较荒草地高,根系生物量高,使土壤孔隙度大于荒草地,从而扩大了水分和溶质在土壤中的运移范围,表现出林地的根重密度比荒草地高,与染色面积比的相关性更高。

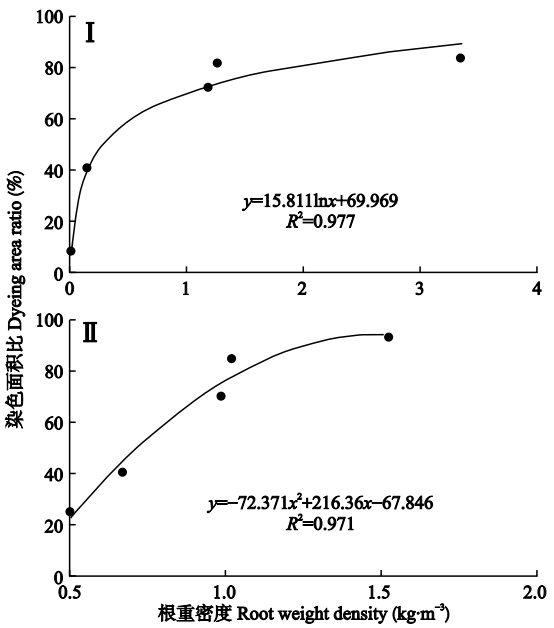


图 4　典型林、草地染色面积比与根重密度的关系(根径 1$<d\leqslant$3 mm)

Fig.4　Relationship between dyeing area ratio and root weight density in typical forest and grassland (1$<d\leqslant$3 mm).

2.3.3 根表面积对优先流的影响　植物根系在土壤水分传输过程中充当着重要角色,根系之间盘互交织分布,形成复杂的连通网络[30],从而改善了土壤的松紧度,使孔隙度增大,根系形成的通道促进了优先流的形成[31]。将每层土壤中不同根径级别的根系表面积总和与染色面积比进行回归分析(表 5),结果表明,林地和荒草地 $d\leqslant$1 mm 的根系表面积与染色面积比呈极显著相关关系,说明细根根系表面积对优先流的形成具有重要影响。林地 1 mm$<d\leqslant$5 mm 根系根表面积与染色面积比的相关性不显著,说明林地中该径级的根系表面积对染色面积比的影响不明显。荒草地除 $d\leqslant$1 mm 的根系表面积与染色面积比呈显著相关外,3 mm$<d\leqslant$5 mm 根系表面积与染色面积比也呈极显著相关,1 mm$<d\leqslant$3 mm 的根系表面积与染色面积比呈显著相关关系。两种地类的相同之处在于>5 mm 的根系根表面积均与染色面积比的相关性不显著,与前文粗根根长密度、

表 5　土壤剖面染色面积比与根表面积的关系

Table 5　Relationships between dyeing area ratio of soil profile and root surface area

样地类型 Plot type	根径 Root diameter (mm)	R^2	P	回归拟合方程 Regression fitting equation
林地	$d\leqslant1$	0.998**	0.002	$y=-37.26x^2+13.2x-0.2$
Woodland	$1<d\leqslant3$	0.809*	0.038	$y=0.512\ln x+0.562$
	$3<d\leqslant5$	0.886*	0.017	$y=0.750\ln x+0.250$
	$5<d\leqslant10$	0.361	0.639	–
	$d>10$	0.811	0.189	–
荒草地	$d\leqslant1$	0.962**	0.003	$y=0.363\ln x+0.941$
Grassland	$1<d\leqslant3$	0.898*	0.014	$y=0.504\ln x+0.818$
	$3<d\leqslant5$	0.992**	0.000	$y=0.328\ln x+1.045$
	$5<d\leqslant10$	0.506	0.229	–

根重密度与染色面积比无显著相关的结果一致,再次说明土壤中的粗根对优先流的影响具有局限性。

3 讨 论

土壤优先流染色剖面的纵向和横向形态特征能够反映优先流在空间上的变化规律和分布特征。本研究以干热河谷区 2 种典型植被人工银合欢林地和扭黄毛荒草地为研究对象,利用染色示踪法分析 2 种植被类型下土壤优先流的形态特征以及根系对其的影响。结果表明,林地染色溶液运移路径从 20 cm 以下土壤剖面开始分化,出现优先流现象;荒草地优先流发生区位于土壤剖面 10 cm 以下。水平染色剖面图像显示,样地表层土壤染色面积比均高达 80%以上,后随着土壤深度的增加,染色面积比逐渐减少。此结果与前人研究结果一致[32-33]。林地染色面积比与土壤深度不是单调递减关系,局部染色面积出现反弹,而荒草地染色面积比基本随土壤深度的增加而单调递减。田香姣等[34]研究表明,荒草地染色面积比随着土壤深度增加,不同染色剖面的面积比均表现出明显的异质性,整体变化幅度呈"S"型趋势,与本研究结论有所出入。分析其原因,可能是由于本研究地位于金沙江干热河谷区,样地土壤性质等因素与重庆四面山有所差异,形成的优先流形态特征也不尽相同。

植物根系是影响优先流形成的重要因素之一,本研究将根长密度、根重密度及根表面积与染色面积比进行拟合,得到不同径级的根系根长密度、根重密度和根表面积与染色面积比的关系。结果表明,林地除 5 mm<d≤10 mm 根径范围内的根长密度以外,其他径级的根长密度和根重密度基本随着土壤深度的增加而逐渐减少,荒草地根长密度和根重密度总体表现为随土壤深度增加呈单调递减趋势,主要是因为根系主要分布在浅层土壤中,深层土壤中根系较少。这与 Schenk[35]和 Bonger 等[36]的研究结果相符。很多学者通过研究证明了植物根系是产生优先流的主要因素之一[37-38]。本研究通过拟合分析也表明,根长密度、根重密度和根表面积均与优先流的形成具有显著的相关性。其中,d≤5 mm 根径范围内的根长密度和根重密度均与染色面积比具有显著相关。林地染色面积与 3 mm<d≤5 mm 根径范围内的根长密度呈极显著相关,与陈晓冰等[25]的研究结果一致。荒草地与 1 mm<d≤5 mm 根径范围内的根长密度和根重密度极显著相关。但孙龙等[39]通过研究柑橘地优先流特征表明,只有 1 mm<d≤3 mm 根径范围内的根长密度与染色面积呈显著相关,其他径级的根系根长密度与染色面积没有相关性。其原因除了植物根系不同外,地域不同也是造成这种差异的原因,干热河谷区土壤干化严重,土壤中石砾含量等也会对优先流的形成产生影响。另外,本研究发现,大于 5 mm 根系的根系特征指标间与染色面积比均无显著相关性。此结果与孙龙等[39]、张英虎等[16]的研究成果一致,充分说明了细根是影响优先流形成的主要因素,粗根系并不能显著影响土壤中优先流的形成。

优先流的研究随着现代技术的发展已日益趋向科学化,CT 扫描等技术的运用,让优先流研究变得更加精确。本研究对根系与优先流形成的关系进行了定性分析,但影响优先流形成的因子众多,试验结果一定程度上受到其他因素的影响。未来对优先流的研究重点应该从理论走向实践,着重于量化分析优先流特征与环境因子之间的关系,建立优先流与环境因子之间的数值拟合模型,进一步明确优先流的形成机理。

参考文献

[1] 韩姣姣, 段旭, 赵洋毅, 等. 元谋干热河谷不同土地利用类型下土壤水分特征及其主控因子. 干旱区资源与环境, 2018, **32**(1): 168-173 [Han J-J, Duan X, Zhao Y-Y, *et al*. Soil water characteristics and main controlling factors under different land use types in Yuanmou dry-hot valley. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2018, **32**(1): 168-173]

[2] 余娇娥, 司宏敏, 吴雪涛, 等. 海拔梯度下元谋干热河谷植物群落特征. 生态环境学报, 2018, **27**(11): 2017-2022 [Yu J-E, Si H-M, Wu X-T, *et al*. Characteristics of plant communities in Yuanmou dry-hot valley under elevation gradient. *Ecology and Environmental Sciences*, 2018, **27**(11): 2017-2022]

[3] 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. 北京林业大学学报, 2010, **32**(6): 13-19 [Duan A-G, Zhang J-G, Zhang J-P, *et al*. Dynamic analysis of water use efficiency of main vegetation restoration tree species in dry-hot valley. *Journal of Beijing Forestry University*, 2010, **32**(6): 13-19]

[4] 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. 安徽农业科学, 2013, **41**(8): 3593-3594 [Zhao Y-J, Su W-H, Zhang G-F, *et al*. Seasonal dynamics of soil moisture in the dry-hot valley of Yuanmou, Yunnan Province. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2013, **41**(8): 3593-3594]

[5] 岳学文, 方海东, 钱坤建, 等. 金沙江干热河谷不同土地利用方式的土壤水分特征. 安徽农业科学, 2010, **38**(27): 14963-14965 [Yue X-W, Fang H-D, Qian K-J, *et al*. Soil water characteristics of different

land use patterns in the dry-hot valley of Jinsha River. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2010, **38**(27): 14963-14965]

[6] 盛丰, 张利勇, 吴丹, 等. 土壤优先流模型理论与观测技术的研究进展. 农业工程学报, 2016, **32**(6): 1-10 [Sheng F, Zhang L-Y, Wu D, *et al*. Research progress on soil priority flow model theory and observation technology. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2016, **32**(6): 1-10]

[7] Karup D, Moldrup P, Paradelo M, *et al*. Water and solute transport in agricultural soils predicted by volumetric clay and silt contents. *Journal of Contaminant Hydrology*, 2016, **192**: 194-202

[8] Reading LP, Baumgartl T, Bristow KL, *et al*. Hydraulic conductivity increases in a sodic clay soil in response to gypsum applications: Impacts of bulk density and cation exchange. *Soil Science*, 2012, **177**: 165-171

[9] Sanders EC, Abou Najm MR, Mohtar RH, *et al*. Field method for separating the contribution of surface-connected preferential flow pathways from flow through the soil matrix. *Water Resources Research*, 2012, **48**: 1427-1434

[10] Jomaa S, Barry DA, Brovelli A, *et al*. Rain splash soil erosion estimation in the presence of rock fragments. *Catena*, 2012, **92**: 38-48

[11] Germann PF, Benjamin L, Luscher P, *et al*. Preferential flow dynamics and plant rooting systems// Lin H, eds. Hydropedology: Synergistic Integration of Soil Science and Hydrology. Waltham, MA, USA: Academic Press, 2012: 121-142

[12] Akhtar MS, Richards BK, Medrano PA, *et al*. Dissolved phosphorus from undisturbed soil cores. *Soil Science Society of America Journal*, 2003, **67**: 458-470

[13] Shaw JN, West LT, Radcliffe DE, *et al*. Preferential flow and pedotransfer functions for transport properties in sandy Kandiudults. *Soil Science Society of America Journal*, 2000, **64**: 670-678

[14] 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. 海洋环境科学, 2011, **30**(3): 310-315 [Wang Y, Chen Y-Y, Peng C-S, *et al*. Study on the influence of initial water content on the priority migration of solute in the Yellow River Estuary. *Marine Environmental Science*, 2011, **30**(3): 310-315]

[15] 张建丰, 林性粹, 王文焰. 黄土的大孔隙特征和大孔隙流研究. 水土保持学报, 2003, **17**(4): 168-171 [Zhang J-F, Lin X-C, Wang W-Y. Study on the characteristics of large porosity and large pore flow in loess. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2003, **17**(4): 168-171]

[16] 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. 生态学报, 2015, **35**(6): 1788-1797 [Zhang Y-H, Niu J-Z, Zhu W-L, *et al*. Effects of forest roots on preferential flow in forest ecosystems. *Acta Ecologica Sinica*, 2015, **35**(6): 1788-1797]

[17] Shi ZJ, Xu LH, Wang YH, *et al*. Effect of rock fragments on macropores and water effluent in a forest soil in the stony mountains of the Loess Plateau, China. *African Journal of Biotechnology*, 2012, **11**: 9350-9361

[18] Volkmar KM. A comparison of minirhizotron techniques for estimating root length density in soils of different bulk densities. *Plant and Soil*, 1993, **157**: 239-245

[19] 阮芯竹, 程金花, 张洪江, 等. 重庆四面山不同林地土壤大孔隙特征及其影响因素. 水土保持学报, 2015, **29**(3): 68-74 [Ruan X-Z, Cheng J-H, Zhang H-J, *et al*. Characteristics of soil macropore and its influencing factors in different forests in Simian mountain, Chongqing. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2015, **29**(3): 68-74]

[20] 常丹东. 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. 水土保持研究, 2014, **21**(6): 41-46 [Chang D-D. Analysis of root distribution characteristics and priority path of broad-leaved forest land in Three Gorges Region. *Research of Soil and Water Conservation*, 2014, **21**(6): 41-46]

[21] 张宪政. 作物生理研究法. 北京: 农业出版社, 1992 [Zhang X-Z. Crop Physiology Research. Beijing: China Agriculture Press, 1992]

[22] Yasuda H, Berndtsson R, Persson H, *et al*. Characterizing preferential transport during flood irrigation of a heavy clay soil using the dye Vitasyn Blau. *Geoderma*, 2001, **100**: 49-66

[23] Flury M, Flühler H, Jury WA, *et al*. Susceptibility of soils to preferential flow of water: A field study. *Water Resources Research*, 1994, **30**: 1945-1954

[24] 程竞萱, 程金花, 郑欣, 等. 不同植被覆盖下土壤优先流特征及影响因素. 河南农业大学学报, 2018, **52**(6): 122-131 [Cheng J-H, Cheng J-H, Zheng X, *et al*. Characteristics of soil preferential flow and its influencing factors under different vegetation cover. *Journal of Henan Agricultural University*, 2018, **52**(6): 122-131]

[25] 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. 中国水土保持科学, 2014, **12**(6): 42-49 [Chen X-B, Zhang H-J, Li S-Y, *et al*. Characteristics of soil preferential flow and its influencing factors in different vegetation types in purple sandstone area. *Science of Soil and Water Conservation*, 2014, **12**(6): 42-49]

[26] 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. 生态科学, 2006, **25**(1): 69-73 [Chen F-Q, Shi H. Dyeing method for soil dominant flow phenomena under three typical vegetations in the upper reaches of Minjiang River. *Ecological Science*, 2006, **25**(1): 69-73]

[27] Cannavo P, Michel JC. Peat particle size effects on spatial root distribution, and changes on hydraulic and aeration properties *Scientia Horticulturae*, 2013, **151**: 11-21

[28] Meine VN, Schoonderbeek D, Kooistra MJ. Root-soil contact of field-grown winter wheat. *Geoderma*, 1993, **56**: 277-286

[29] Beven K, Germann P. Macropores and water flow in soils. *Water Resources Research*, 1982, **18**: 1311-1325

[30] Tracy SR, Black CR, Roberts JA, *et al*. Soil compaction: A review of past and present techniques for investigating effects on root growth. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2011, **91**: 1528-1537

[31] Jørgensen PR, Hoffmann M, Kistrup JP, *et al*. Preferential flow and pesticide transport in a clay-rich till: Field, laboratory, and modeling analysis. *Water Resources Research*, 2002, **38**: 28-1-28-15

[32] Weiler M, Naef F. An experimental tracer study of the role of macropores in infiltration in grassland soils. *Hydrological Processes*, 2003, **17**: 477-493

[33] Weiler M, Flühler H. Inferring flow types from dye patterns in macroporous soils. *Geoderma*, 2004, **120**: 137-153

[34] 田香姣, 程金花, 杜士才, 等. 2 种土地利用方式下的优先流特征. 水土保持学报, 2014, **28**(3): 37-41 [Tian X-J, Cheng J-H, Du S-C, *et al*. Preferential flow characteristics under two land use patterns. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2014, **28**(3): 37-41]

[35] Schenk HJ. The shallowest possible water extraction profile: A null model for global root distributions. *Vadose Zone Journal*, 2008, **7**: 1119-1124

[36] Bogner C, Widemann BT, Lange H. Characterising flow patterns in soils by feature extraction and multiple consensus clustering. *Ecological Informatics*, 2013, **15**: 44-52

[37] Perillo CA, Gupta SC, Nater EA, *et al*. Prevalence and initiation of preferential flow paths in a sandy loam with argillic horizon. *Geoderma*, 1999, **89**: 307-331

[38] Devitt DA, Smith SD. Root channel macropores enhance downward movement of water in a Mojave Desert ecosystem. *Journal of Arid Environments*, 2002, **50**: 99-108

[39] 孙龙, 张洪江, 程金花, 等. 柑橘林地优先路径分布及其影响因素. 东北林业大学学报, 2013, **41**(2): 65-69 [Sun L, Zhang H-J, Cheng J-H, *et al*. Priority path distribution of citrus woodland and its influencing factors. *Journal of Northeast Forestry University*, 2013, **41**(2): 65-69]

作者简介 邵一敏, 女, 1995 年生, 硕士研究生。主要从事水土保持研究。E-mail: 2993609034@qq.com

责任编辑 杨 弘

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



邵一敏, 赵洋毅, 段旭, 等. 金沙江干热河谷典型林草地植物根系对土壤优先流的影响. 应用生态学报, 2020, **31**(3): 725-734

Shao Y-M, Zhao Y-Y, Duan X, *et al*. Effects of plant roots on soil preferential flow in typical forest and grassland in the dry-hot valley of Jinsha River, China. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2020, **31**(3): 725-734