

喀斯特地区林草地植被根系分布对优先流特征的影响

张涵¹, 程金花¹, 王姣², 师雪淇¹

(1.北京林业大学水土保持学院,北京 100083;2.北京水木芳泽生态科技有限公司,北京 100036)

摘要: [目的] 为揭示喀斯特地区不同植被类型根系分布对优先流的影响。[方法] 以云南建水典型林地和草地作为研究对象,通过染色示踪试验与根系参数量化分析,比较林地与草地的优先流特征及根系特征差异,结合 Pearson 相关性分析与多元逐步回归分析方法,探讨根系特征参数与不同径级的根系对染色面积比的影响。[结果] 1) 林地与草地 2 种立地条件下根系分布特征差异显著,草地中根系直径以 0~3 mm 为主,且显著多于林地($p < 0.05$),林地中根径 > 4.5 mm 占比 24% 以上;2) 优先流特征呈现显著分异,草地中的基质流深度是林地的 1.37 倍($p < 0.05$),但林地中优先流发育程度更高,优先流变异系数、长度指数、优先流比分别是草地的 1.26、1.48、1.54 倍;3) 根系特征对染色面积比变化贡献显著,但因植被类型而异,草地 $1.5 \text{ mm} < d \leq 3 \text{ mm}$ 径级根系($R^2 = 0.853$)与林地 $0 < d \leq 1.5 \text{ mm}$ 径级根系($R^2 = 0.758$)分别主导染色面积比变化,林地和草地中直径 $> 4.5 \text{ mm}$ 根系的影响均未达显著水平。[结论] 在水源涵养林的营建和生态护坡设计中,可优先考虑以细根比例较高的草本或灌木植被作为先锋物种,以提升土壤入渗性能与水分保持能力,从而提升整体生态系统的水文调节功能。

关键词: 优先流; 根系生物量; 根长密度; 逐步回归法; 喀斯特

中图分类号: S152.7

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2026)02-0186-09

Effects of Vegetation Root Distribution on Preferential Flow Characteristics in Woodland and Grassland of Karst Areas

ZHANG Han¹, CHENG Jinhua¹, WANG Jiao², SHI Xueqi¹

(1. School of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China;

2. Beijing Shumu Fangze Ecological Technology Co. Ltd., Beijing 100036, China)

Abstract: [Objective] To reveal the influence of root distribution of different vegetation types on preferential flow in karst areas. [Methods] This study selected typical woodland and grassland in Jianshui, Yunnan as the research objects. The preferential flow and root characteristics in woodland and grassland were compared using dye tracer experiments and quantitative analysis of root parameters. Combined with Pearson correlation analysis and stepwise multiple regression analysis, the effects of root characteristic parameters and root length densities (RLD) of various diameter classes on stained area ratio were explored. [Results] 1) The root distribution characteristics differed significantly between the two vegetation types of woodland and grassland. Roots with diameters of 0—3 mm were dominant in grassland, significantly more abundant than in woodland ($p < 0.05$), while roots with diameters $> 4.5 \text{ mm}$ accounted for over 24% in woodland. 2) Preferential flow characteristics showed significant differentiation. The matrix flow depth in grassland was 1.37 times that of woodland ($p < 0.05$), yet woodland exhibited stronger preferential flow development. The coefficient of variation, length index, and preferential flow ratio in woodland were 1.26, 1.48, and 1.54 times higher than those in grassland, respectively. 3) Root characteristics made significant contributions to variations in stained area ratio, but this varied with vegetation type. In grassland, roots with $1.5 \text{ mm} < d \leq 3 \text{ mm}$

收稿日期: 2025-08-05

修回日期: 2025-09-26

录用日期: 2025-09-30

网络首发日期(www.cnki.net): 2025-12-24

资助项目: 国家自然科学基金项目(32071839)

第一作者: 张涵(2000—), 女, 硕士研究生, 主要从事土壤水文研究。E-mail: zhanghan_27@bjfu.edu.cn

通信作者: 程金花(1979—), 女, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事森林水文研究。E-mail: Jinhua_cheng@126.com

http://stbxb.alljournal.com.cn

dominated the variation ($R^2=0.853$), while in woodland, the $0<d\leq 1.5$ mm diameter class was the primary driver ($R^2=0.758$). In contrast, roots with diameters >4.5 mm had no significant effect in either vegetation type. [Conclusion] In the construction of water conservation forests and the design of ecological slope protection, herbaceous or shrub vegetation with a high proportion of fine roots can be prioritized as pioneer species to enhance soil infiltration and water retention capacity, thereby improving the hydrological regulation function of the overall ecosystem. **Keywords:** preferential flow; root biomass; root length density; stepwise regression; karst

Received: 2025-08-05

Revised: 2025-09-26

Accepted: 2025-09-30

Online(www.cnki.net): 2025-12-24

西南喀斯特地区面积占国土总面积的5%以上,其土被浅薄、岩石裸露、水土资源异质性高,受可溶性碳酸盐岩特殊地质条件制约,成土极为缓慢,土层薄且不连续,水文过程响应迅速^[1]。具体表现为浅薄且破碎的土层覆盖在高度风化的表层岩溶带上,形成具有高入渗、低地表径流特征的独特土壤-表层岩溶系统,使得该地区的植被恢复与生态系统服务功能受到严重制约。在此背景下,水分在非饱和土壤中通过大孔隙或裂隙快速运移的现象,即优先流^[2],成为影响喀斯特地区水文过程与生态功能的中心环节。优先流不仅影响降水入参与地下水补给效率,还通过加速溶质迁移加剧地下水污染,造成水肥流失的双重后果^[3]。因此,探究喀斯特地区的优先流特征,揭示其形成机制,是实现喀斯特地区水土资源可持续管理的关键。喀斯特地区优先流的形成主要受裂隙地貌、土壤砾石分布及植被根系等因素的综合影响。国内外已有大量学者针对喀斯特地区优先流开展研究,如刘伟等^[4]通过对比喀斯特与非喀斯特地区的土壤水分运移特征发现,喀斯特地区土壤介质中发生水分优先运移且存在较大的空间异质性;SOHRT等^[5]研究发现,喀斯特地区降雨发生后优先流沿土-石界面入渗;而WEI等^[6]和师雪淇等^[7]在对中国西南喀斯特地区优先流的研究中进一步揭示,植被根系的分布、根系特征参数(如根径分布、根长密度等)显著影响优先流发育过程。植被根系生命活动构建的土壤孔隙网络,不仅是水溶质快速迁移的核心路径,更是主导优先流发育的结构基础^[8]。林地与草地根系在形态结构与水文功能上存在显著差

异,典型常绿/针阔叶混交林或人工林具有更大的根径跨度,粗根(>5 mm)及死根形成孔洞与裂隙,易与土-石界面形成复合孔隙结构,草地则表现为高密度细根(<3 mm)交织,这种构型差异是驱动土壤优先流类型与强度分化的重要生物因子^[9]。张洪江等^[10]对重庆四面山地区农田土壤根系与水分入渗之间关系的研究中发现,根系显著影响外部供水在土壤中的运动,细根对水分入渗的影响大于粗根。然而,现有研究多聚焦于单一植被类型或温带土壤环境,对喀斯特地区“林地-草地”植被根系功能构型差异的系统对比不足,同时缺少将根系参数与优先流量化指标(染色面积比例、最大染色深度、空间异质指数、变异系数等)进行耦合分析的定量框架。因此,本研究以滇西南建水喀斯特地区为对象,通过染色示踪试验与根系参数量化,结合相关性分析与多元逐步回归分析模型,量化根径对优先流特征参数的解释力,分析林地和草地植被根系特征对优先流特征的影响,为喀斯特地区植被恢复与水文管理提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

本研究区位于云南建水荒漠生态系统国家定位观测研究站($23^{\circ}37'13''N, 102^{\circ}54'12''E$),海拔1 400 m,亚热带季风气候,四季分明,雨热同期,降雨较为充沛,年降雨量约为830 mm^[11],属于喀斯特红壤区。草地主要植被为鬼针草(*Bidens pilosa*);林地主要植被为马尾松(*Pinus massoniana*),林下几乎无草本及灌木覆盖。本研究的试验进行时间为2023年7—8月。样地植被土壤情况见表1。

表 1 样地基本情况
Table 1 Basic information of sample plots

样地类型	土壤类型	海拔/m	坡度/(°)	植被类型	郁闭度/%	盖度/%
林地	红壤	1 385.96	7	马尾松(<i>Pinus massoniana</i>)	76	—
草地	红壤	1 383.54	6	鬼针草(<i>Bidens pilosa</i>)、小蓬草(<i>Erigeron canadensis</i>)、马缨丹(<i>Lantana camara</i>)等	—	80

1.2 研究方法

样地布设:在研究区内选择地形、坡度、坡向、海拔高度相似的林地和草地样地10 m×20 m,为确保

样本选择的随机性,在样地内分别随机选择1 m×2 m的3个重复样本,同时间隔至少5 m。
为直观体现土壤优先流特征,参考经典研究体

系采用染色示踪法^[12-13]。1)样地预处理:保护土壤表层,去除表面植株及枯落物后设置 2 个 60 cm×60 cm 观测单元并打入金属框防止染料溢出侧渗;2)染色:选择 4 g/L 的亮蓝染料作为示踪剂,根据研究区气候特征,24 h 大雨降雨量 35 mm 作为模拟试验标准,利用自制喷洒装置,以 150 mL/min 的流速均匀喷洒示踪剂,随后覆膜防止蒸发;3)剖面采集:渗透 24 h 后获取 50 cm×50 cm 有效观测面,按 10 cm 间距分层采取竖直与水平剖面,并拍摄图像。为避免出现降雨干扰,试验应在染色前后 24 h 无降雨的情况下进行。

拍摄染色剖面图像后导入 Adobe Photoshop 2022 软件进行几何校正,随后对图像进行二值化处理,设置染色区域为黑色,未染色区域为白色,将图像转化为像素值为 0 与 255 的黑白图像后在 Image Pro Plus 进行像素点提取及分水岭算法,最终得到水平与竖直剖面的染色特征及优先路径特征。

根系样本获取及量化:在获取水平剖面染色图像之后,在每层剖面选取 10 cm×10 cm×10 cm 的土体,获取根系样本,水洗法将根系从土壤中取出而后自然晾干。利用 Win RHIZO 植物根系分析系统对扫描后的根系进行分析,得到根长、根表面积等指标参数,随即将扫描完成后根系样品放入烘箱 105℃烘干至恒重。最终通过电子天平进行称量,获取根系干物质积累量数据,随后进行计算得到量化后的根系特征指标。

根长密度(root length density, RLD)^[14]为单位体积土壤内的根系长度,计算公式为:

$$RLD = \frac{\sum L_r}{V_{soil}} \quad (1)$$

式中:RLD 为根长密度,cm/cm³;L_r 为根长,cm;V_{soil} 为土壤体积,cm³。

根重密度(root weight density, RWD)^[15]为单位体积土壤内的根系生物量,计算公式为:

$$RWD = \frac{\sum M_r}{V_{soil}} \quad (2)$$

式中:RWD 为根重密度,g/cm³;M_r 为根系根重,g;V_{soil} 为土壤体积,cm³。

根表面积(root surface area, RSA)采用直接测定法得到,由 Win RHIZO 植物根系分析系统对扫描后的根系进行分析得到根系的表面积。

图像处理:将拍摄的竖直/水平剖面导入 Photoshop CC 2022 软件,经过几何校正、颜色替换等处理,得到染色区为黑色,非染色区为白色的黑白图像,导入 Image-Pro Plus 数值化处理,随后将数字矩阵导入 Excel 软件中,对染色后的图像进行特征值的运算^[16]。

染色参数计算:染色面积比是指某一土层深度处(或土壤整个剖面中)染色面积占土壤剖面总宽度(或剖面中总染色面积)的比例,染色面积用像素面积来表示,计算公式为:

$$DC = \left(\frac{D}{D + ND} \right) \times 100\% \quad (3)$$

式中:DC 为土壤剖面染色面积比,%;D 为土壤剖面总染色面积,cm²;ND 为土壤剖面未染色区域总面积,cm²。

基质流深度:是指在染色过程中,从基质流过渡到优先流的最小土层深度,cm。当染色面积比达到 80% 以上时对应的土层深度即为基质流深度,通常用基质流深度的大小可以反映出优先流发生的时间,优先流发生时间的先后与基质流深度表现为正相关^[12]。

优先流比:优先流比(PF-fr)是指土壤剖面染色面积中优先流区所占的比例。计算公式为:

$$PF - fr = \left(1 - \frac{Unifr \times W}{TotStAr} \right) \times 100\% \quad (4)$$

式中:PF-fr 为优先流比,%;Unifr 为土壤剖面基质流深度,cm;W 为土壤剖面水平染色宽度,cm;TotStAr 为土壤剖面染色区总面积,cm²。

长度指数(L_i):是将竖直染色剖面等分成 n 份后,在相邻的深度上的染色面积之比差值的绝对值和^[17],计算公式为:

$$L_i = \sum_{i=1}^n |DC_{i+1} - DC_i| \quad (5)$$

式中:L_i 为长度指数;DC_i、DC_{i+1} 分别为第 i 层和第 i+1 层的染色面积比,%;n 为土壤竖直染色剖面的总层数。

染色变异系数(CV):是剔除土壤竖直染色剖面后,将不同深度的染色面积比进行统计,从染色形态变异度的角度,揭示不同土层中优先流的变化规律。计算公式为:

$$CV = \frac{\sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}}{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^n x_i} \quad (6)$$

式中:CV 为染色变异系数;N 为竖直染色剖面的土层数;x_i 为第 i 层的染色面积比; $\bar{x}$ 为整个竖直剖面的平均染色面积比。

1.3 数据处理

本研究通过 Adobe Photoshop 2022 软件对图像进行几何校正与黑白二值化处理,利用 Image Pro Plus 软件提取染色图像及优先路径特征,借助 Microsoft Excel 软件进行数据统计,利用 Origin 2022 软件进行绘图,通过 SPSS 软件对参数进行相关性分析及多元逐步回归分析。

2 结果与分析

2.1 根系特征

植被的根系是土壤层中重要的组成部分,植被通过其根系组成复杂的网络,在土壤三维空间内形成通道,影响土壤优先流的形成,因此本研究将植被根系在不同土层深度的生物量进行量化分析(表 2)。

表 2 根系基本特征

Table 2 Basic characteristics of roots				
样地类型	土层深度/cm	根长密度/($\text{cm}\cdot\text{cm}^{-3}$)	根重密度/($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	根表面积/ cm^2
草地	0~10	$342.38\pm 20.50\text{a}$	$0.27\pm 0.11\text{a}$	$20.15\pm 5.86\text{a}$
	10~20	$208.64\pm 43.51\text{b}$	$0.06\pm 0.01\text{b}$	$10.65\pm 4.19\text{b}$
	20~30	$179.37\pm 24.20\text{bc}$	$0.05\pm 0.03\text{b}$	$8.06\pm 0.86\text{b}$
	30~40	$126.51\pm 29.86\text{cd}$	$0.04\pm 0.02\text{b}$	$7.53\pm 0.30\text{b}$
	40~50	$93.29\pm 20.96\text{d}$	$0.03\pm 0.02\text{b}$	$7.22\pm 0.28\text{b}$
林地	0~10	$214.27\pm 8.85\text{a}$	$1.44\pm 0.2\text{ab}$	$26.69\pm 11.69\text{ab}$
	10~20	$149.78\pm 43.71\text{b}$	$1.67\pm 0.27\text{a}$	$39.75\pm 10.30\text{a}$
	20~30	$83.40\pm 26.87\text{c}$	$1.30\pm 0.14\text{ab}$	$29.29\pm 10.09\text{ab}$
	30~40	$67.71\pm 27.96\text{c}$	$0.97\pm 0.47\text{b}$	$24.59\pm 7.74\text{ab}$
	40~50	$47.67\pm 34.63\text{c}$	$0.30\pm 0.07\text{c}$	$15.00\pm 7.69\text{b}$

注:表中数据为平均值±标准差;同列不同字母表示不同土层间差异显著($p<0.05$)。

从表 2 可以看出,林地与草地在根系特征参数上表现出显著差异并具有一定的空间变异性,即随土层深度的增加呈递减趋势。草地样地的根长密度在整体上明显高于林地($p<0.05$),2 个样地根长密度的最大值均出现在 0~10 cm 深度,分别达到(342.38 ± 20.50)、(214.27 ± 8.85) cm/cm^3 。相比之下,草地样地在根重密度与根表面积上显著低于林地($p<0.05$),林地的根重密度在土层深度为 20~30 cm 时仍表现出较高的水平[(1.30 ± 0.14) g/cm^3],而在根表面积方面,草地在 0~10 cm 时根表面积为(20.15 ± 5.86) cm^2 ,在土层深度达到 10 cm 以后迅速降低,而林地的根表面积在 0~40 cm 内根表面积均保持在 20 cm^2 以上。表明林地根系在土层深度 20 cm 以上仍保持较大的生物量,而草地根系主要分布于土层深度 20 cm 以内的浅层土壤。

将林地与草地的根长密度按根系直径划分为 $0<d\leq 1.5\text{ mm}$ 、 $1.5\text{ mm}<d\leq 3\text{ mm}$ 、 $3\text{ mm}<d\leq 4.5\text{ mm}$ 、 $d>4.5\text{ mm}$ 4 个级别进行量化分析(图 1),描述各径级根系在不同土层深度内根长的变化情况,反映不同土层深度内不同径级根系的生物量。分析发现,在林地和草地中,不同根径的根长密度整体上呈现出随土层深度递减的趋势,且林地中粗根的含量显著多于草地。

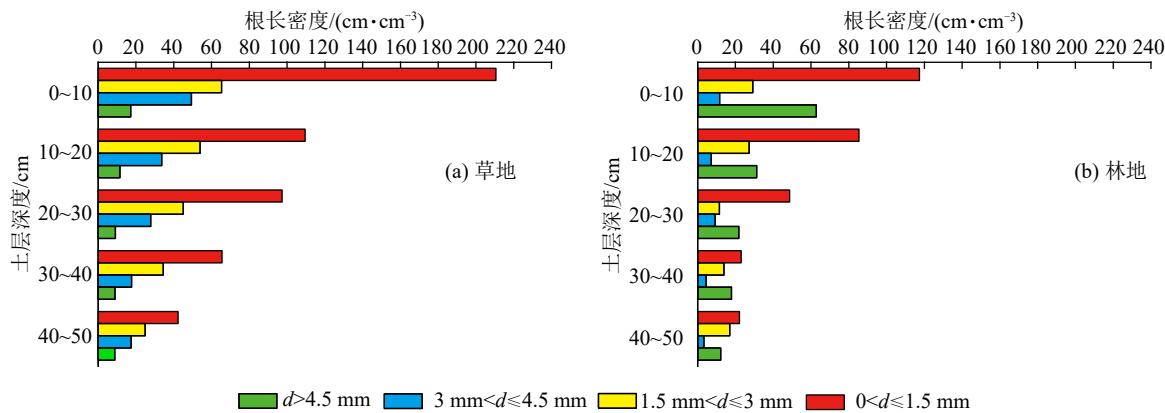


图 1 不同土层深度内各根系径级根长密度

Fig.1 Root length density of different root diameter classes at different soil depths

在草本样地中,各根径区间的根系生物量均表现出随土层深度的增加而减少。在土壤表层(0~10 cm),根径 $0<d\leq 1.5\text{ mm}$ 的根系最为丰富,整个样地内 0~3 mm 细根占全部根系根长密度的 77.8%,而根径 $>4.5\text{ mm}$ 的根系则相对较少。相比之下,林地样地的根系分布特征则有所不同。在 0~10 cm 土壤表层,根径 $0<d\leq 1.5\text{ mm}$ 和 $1.5\text{ mm}<d\leq 3\text{ mm}$ 的根系占据主导地位,但随着土层深度的增加,各区间的根系生物量下降幅度较大,0~3 mm 细根系占总根系根长密度的 67.7%,根径较大的区间($3<d\leq 4.5\text{ mm}$ 和

$d>4.5\text{ mm}$)表现出相对稳定的生物量分布,在所有径级根系中所占的比例达 32.3%,表明木本植物在深层土壤中仍存在一定数量的粗大根系。

不论在草地还是林地样地中,随着土层深度的增加,总体上根系生物量均呈减少趋势,表现出细根密度明显高于其他根系径级的密度,草地中各径级根系根长密度的大小依次为 $0<d\leq 1.5\text{ mm}$ 、 $1.5\text{ mm}<d\leq 3\text{ mm}$ 、 $3\text{ mm}<d\leq 4.5\text{ mm}$ 、 $d>4.5\text{ mm}$,而林地中各径级根系根长密度大小依次为 $0<d\leq 1.5\text{ mm}$ 、 $d>4.5\text{ mm}$ 、 $1.5\text{ mm}<d\leq 3\text{ mm}$ 、 $3\text{ mm}<d\leq 4.5\text{ mm}$ 。

2.2 优先流特征

通过对喀斯特地区林地与草样地分别进行染色示踪试验,获得6个样方竖直与水平剖面各30张染色图像,对优先流形态特征进行分析(图2)。竖直剖面染色图像最直观地展现不同立地条件下优先流的形态特征。从竖直剖面的染色状态可以看出,2种样地的壤中流形态表现出从均质基质到非均质指状流再到高度相关的大孔隙流的变化过程。2种样地在土壤表层均出现大面积染色现象,基质流发生在土层深度为0~6 cm内,随着土层深度的增加,染色面积逐渐减小,开始出现沿特定狭窄区域的染色现象,即发生土壤优先流现象,但在优先流发育程度及发

生时间上,仍存在一定的差异。

在林地中,土壤基质流过程并不明显,表层土壤水分以非均质指流的形态快速运移,说明水分进入土壤后很快发生优先流现象,同时随着土层深度的加深,壤中流的类型由非均质指流逐渐变为混合作用大孔隙流,其中最大水分运移深度可达到43 cm;而草地中的水分基本未运移至25 cm以下的土壤中,该深度没有染色现象发生,且0~10 cm深度内染色均匀,为基质流,10~25 cm发生土壤优先流现象,其形态基本判定为非均质指流,同时优先流发生较林地相对滞后。随着土层深度的增加,土壤结构中发育形成的大孔隙数量减少,优先路径的数量也在减少。

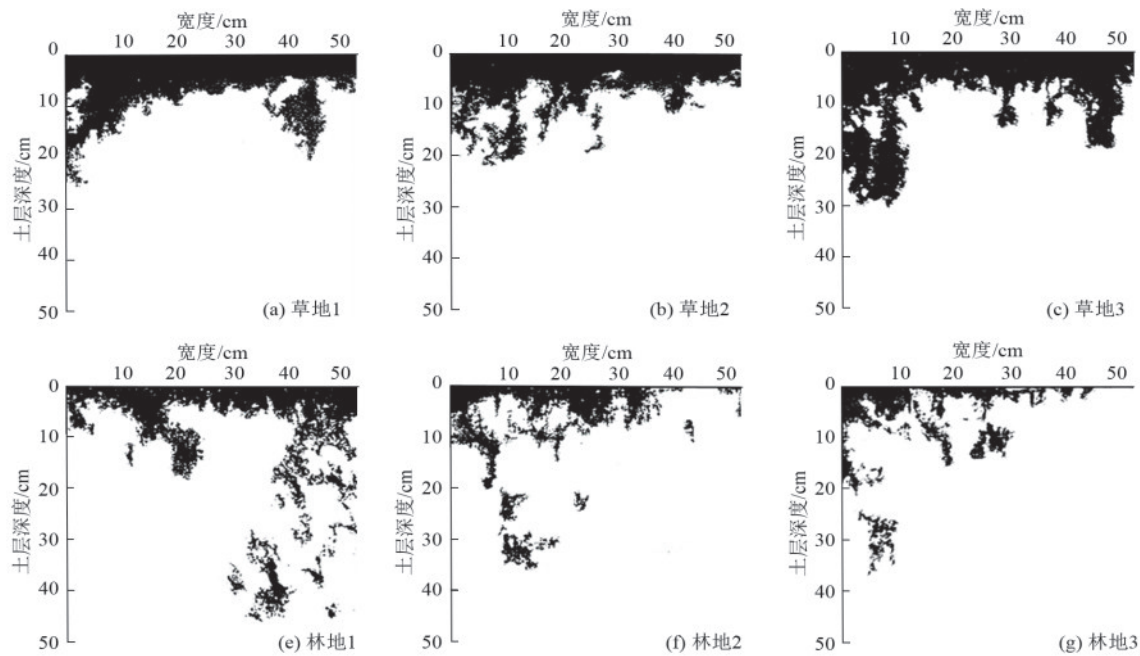


图2 竖直剖面染色特征
Fig.2 Staining characteristics of vertical soil profile

对林地与草地的染色图像进一步分析计算得到优先流特征参数见表3。

表3 优先流特征参数				
Table 3 Characteristic parameters of preferential flow				
样地类型	基质流深度/cm	优先流比/%	长度指数/%	染色变异系数
林地	3.26±0.99a	55.25±10.49a	442.60±100.06a	2.37±0.56a
草地	4.45±1.12b	35.74±14.33b	298.68±76.59b	1.87±0.31b

注:表中数据为平均值±标准差;同列不同字母表示不同样地类型间差异显著($p<0.05$)。

由表3可知,林地与草地中的基质流深度差异显著,草地中基质流深度为(4.45±1.12)cm,林地中的基质流深度为(3.26±0.99)cm,草地的基质流深度为林地的1.36倍,说明林地与草地在基质流发育时间上存在较大差异。林地的优先流比显著大于草地,为草地的1.54倍。说明林地中优先流区面积占染色区面积的比例较大,染色变异系数从染色形态变化程度

的角度上揭示不同土层深度的优先流变化规律^[12]。长度指数反映土壤优先流的空间变异性^[18]。染色变异系数和长度指数是衡量优先流非均匀性与空间变异性的重要参数。林地中土壤优先流长度指数与变异指数分别是草地的1.48、1.26倍,说明与草地相比,林地土壤优先流表现出较高的非均匀性与空间变异性,同时结合优先流的发生时间,得出林地中土壤优先流的发育时间更早,优先流空间变异程度更高。

由图3可知,在任何土层深度范围内,草地的优先路径数量均多于林地,随着土层深度的增加,优先路径数逐渐减少。2种样地中,半径为5~10 mm的优先路径占据主导地位,草地中优先路径半径>10 mm的通道数量显著大于林地,在土层深度达到20 cm以后,林地中优先路径半径为1~2.5 mm的通道数量占比提升,而草地则在多个优先路径的径级中保持活跃,说明草地在优先路径上分布得更均匀。

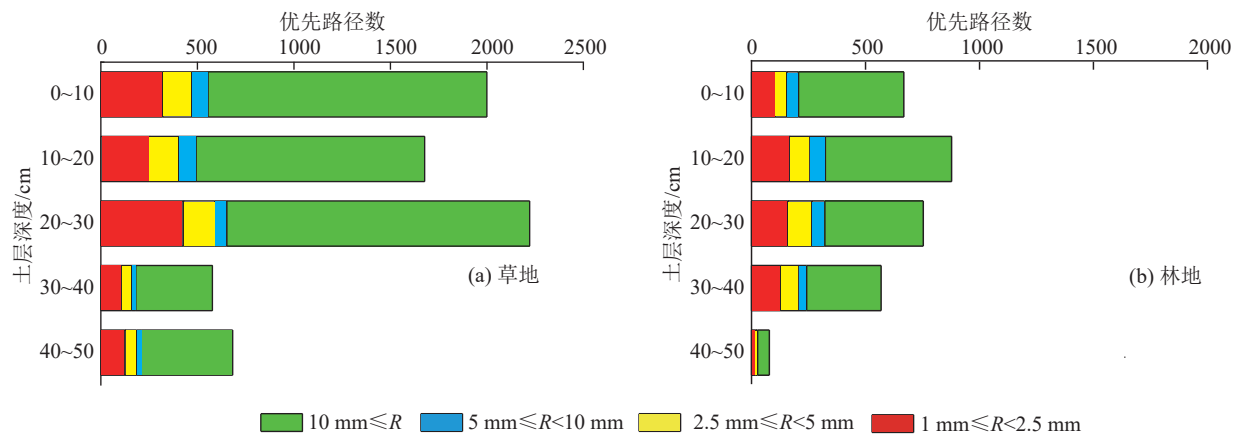


图 3 土壤中不同孔径半径优先流路径数分布

Fig.3 Distribution of number of preferential flow pathways with different pore radii in soil

2.3 优先流染色特征对根系特征参数的响应关系

根系参数与染色面积比均随土层深度的增加而降低,染色面积比为反映优先流发育程度的重要指标之一,分析染色面积比对根系参数的相关性,可以进一步得出优先流特征对根系特征的响应关系,因此对林地与草地中的根系特征参数与染色面积比进行相关性分析(表 4)。

表 4 染色面积比与根系特征的相关性分析

Table 4 Correlation analysis between stained area ratio and root characteristics

样地	项目	根长密度	根重密度	根表面积	染色面积比
草地	根长密度	1.000			
	根重密度	0.889**	1.000		
	根表面积	0.905**	0.848**	1.000	
	染色面积比	0.891**	0.776**	0.811**	1.000
林地	根长密度	1.000			
	根重密度	0.764*	1.000		
	根表面积	0.178	0.439	1.000	
	染色面积比	0.972**	0.742*	0.035	1.000

注:*表示 $p<0.05$; **表示 $p<0.01$ 。

由表 4 可知,在草地样地中,染色面积比与根长密度呈显著正相关($r=0.891, p<0.01$),与根重密度也呈显著正相关($r=0.776, p<0.01$),与根表面积同样表现出显著正相关($r=0.811, p<0.01$)。而林地样地中,染色面积比与根长密度呈显著正相关($r=0.972, p<0.01$),与根重密度呈显著正相关($r=0.742, p<0.05$),但与根表面积的相关性不显著($r=0.035$)。植被根重密度对优先流的发育具有一定的影响,林地和草地中的根重密度均与染色面积比呈显著相关关系,对林草地根重密度与染色面积比之间的变化关系进行拟合(图 4)发现,二者均表现出线性正相关关系,即染色面积比随着根重密度的增加而增大。土壤中植被根系改变土壤的物理性质,增大土壤孔隙度,提高土壤孔隙之间的连通性,为土壤水分运移形成通道,从而增加水分与溶质在土壤中的含量。而草地根重密度与染色面积比的相关性明显大于林地(草地 $r=0.804>$ 林地 $r=0.742$),主要是因为草地与林地的根系组成不同,林地中多为木质化粗根,而草地样地中大多根系为网状须根,根系结构更为复杂。

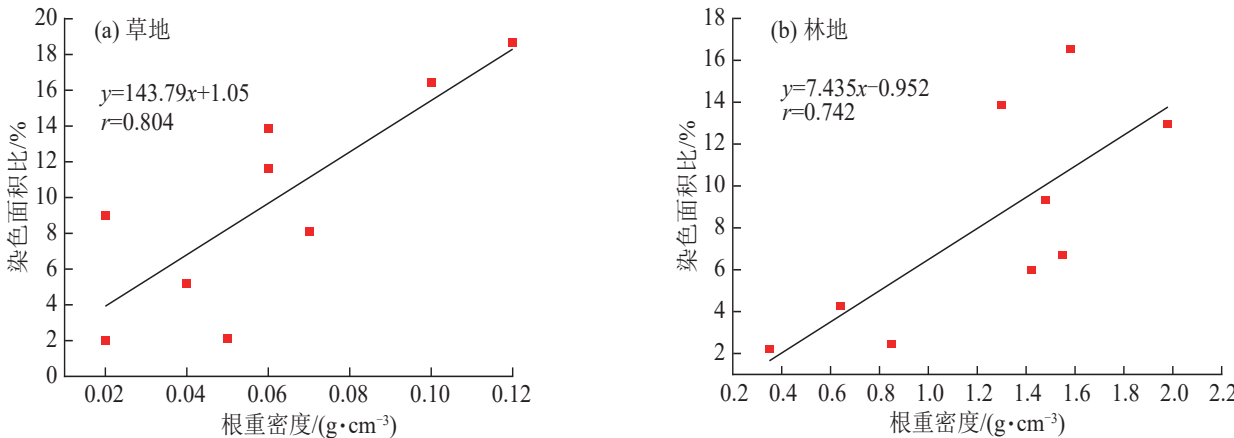


图 4 不同样地染色面积比与根重密度的关系

Fig.4 Correlation between stained area ratio and root weight density in different plots

植物的根系在土壤水分传输中发挥相当重要的作用,根系之间形成的复杂网络增加土壤的大孔隙数量,使得水分与溶质在土壤中运移时产生更多的优先路径,根系形成的孔隙与通路极大地促进优先流的形成。将 2 种样地内每层土壤内不同根径的根长密度(RLD)与染色面积比(DC)进行逐步回归分析(表 5),选取 $0 < d \leq 1.5 \text{ mm}$ 、 $1.5 \text{ mm} < d \leq 3 \text{ mm}$ 、 $3 \text{ mm} < d \leq 4.5 \text{ mm}$ 、 $d > 4.5 \text{ mm}$ 4 种根径作为变量进入模型,并逐步剔除不显著的解释变量,最终建立回归分析模型。在草地中,将 $0 < d \leq 1.5 \text{ mm}$ 、

$1.5 \text{ mm} < d \leq 3 \text{ mm}$ 根径的根长密度纳入模型($R^2=0.853$)的拟合程度最高,模型中 $0 < d \leq 1.5 \text{ mm}$ 、 $1.5 \text{ mm} < d \leq 3 \text{ mm}$ 2 种根径根长密度的系数分别为 0.039 和 0.168,说明草地中根径范围为 $1.5 \text{ mm} < d \leq 3 \text{ mm}$ 的根系对优先流形成的影响较大。

林地中产生的回归分析模型($R^2=0.758$)将 $1.5 \text{ mm} < d \leq 3 \text{ mm}$ 、 $3 \text{ mm} < d \leq 4.5 \text{ mm}$ 、 $d > 4.5 \text{ mm}$ 3 个径级剔除,说明在林地中 $0 < d \leq 1.5 \text{ mm}$ 显著影响土壤中水分运移通路的产生,进而影响土壤优先流的发育过程。

表 5 不同根径根长密度与染色面积比的多元逐步回归分析

Table 5 Stepwise multiple regression analysis of stained area ratio against root length densities across root diameter classes

样地类型	模型(标准化系数)	R^2	F	p
草地	$DC=0.039RLD_1+0.168RLD_2-2.92$	0.853	$F(2,27)=78.130$	<0.001
林地	$DC=0.946RLD_1$	0.758	$F(1,7)=21.974$	<0.005

注:RLD₁、RLD₂、RLD₃、RLD₄分别表示 $0 < d \leq 1.5 \text{ mm}$ 、 $1.5 \text{ mm} < d \leq 3 \text{ mm}$ 、 $3 \text{ mm} < d \leq 4.5 \text{ mm}$ 、 $d > 4.5 \text{ mm}$ 4 种根径的根长密度。

3 讨论

本研究以喀斯特红壤区林地与草地作为研究对象,基于野外染色示踪试验及根系参数测定,系统分析 2 种典型立地条件下土壤优先流特征与植被根系之间响应关系,重点分析不同径级根系对优先流特征的影响机制。整体来看,随着土层深度的增加,优先流形态发生由均质流到非均质流再到大孔隙流的转变,草地与林地优先流发育时间、空间变异性及路径数量上存在显著差异。

从优先流发育时间来看,草地中基质流深度显著大于林地。说明林地中含有较多的天然裂隙,而草地中的根系系统使土壤结构趋于均匀化,林地中的粗大根系与天然裂隙相互作用,使水分沿着裂隙快速渗漏,优先流提早发生,表现出更小的基质流深度,与 GUAN 等^[19]研究结果一致。在空间上,2 种样地的染色面积比均表现出随土层深度的增加而减小趋势,与相关研究^[20-21]结论一致。林地的优先流比、长度指数及染色变异系数均大于草地,说明林地中优先流路径发育更为复杂,连通程度更高,同时表现出更强的空间异质性,与陈晓冰^[22]在四面山对不同土地利用类型对土壤优先流特征的研究结论一致。说明草地细中径根高表现出更高的密集网状孔隙,从而形成更连续渗流面,显著提高草地中的基质流深度;由于林地根系结构更为复杂,同时较为粗大的死根的存在使土壤中的裂隙较多,水分与溶质发生侧向流动,该现象提高优先流比而非加深基质流深度。徐宗恒等^[23]在对不同植被发育斜坡土体优先流特征的研究中发现,云南松发育斜坡土体中染色路

径数量比狗牙根的多,而本研究中林地土体中的优先路径数量显著少于草地,造成差异的原因主要是研究区位于喀斯特地区,土层浅薄,石砾含量高,其次草本研究对象不同,鬼针草中、小径级根系密集且分布均匀,形成多个细小通道,而狗牙根为匍匐型草本,根系偏向构成连续的致密根毯,二者根系构型不尽相同。

本研究通过相关性分析及多元逐步回归分析,进一步探讨植被根系特征与染色面积比之间的响应关系,发现根长密度、根重密度与染色面积比间呈现极显著相关关系,但是根表面积与染色面积比之间的相关性不高,但师雪淇等^[7]在对喀斯特地区典型林分对优先流的影响研究中发现根表面积密度与染色面积比为显著性相关,主要是由于二者研究区不同,本研究区石砾含量与天然裂隙含量较高,水分更易沿石-土界面及既有裂隙快速下渗,削弱根表面积对染色面积比变化的独立贡献。回归模型对不同径级根系对优先流特征的影响差异分析发现,林地中 $0 < d \leq 1.5 \text{ mm}$ 的根系对染色面积比变化的贡献更显著,而草地中 $0 < d \leq 1.5 \text{ mm}$ 、 $1.5 \text{ mm} < d \leq 3 \text{ mm}$ 的根系均可显著影响染色面积比的变化,与之前的研究^[24]结论一致。而林地在根系生物量不占优势的情况下表现出更加复杂的优先流形态,此现象在表面上与传统的“细根促进优先流发育”观点相悖,张英虎等^[25]在对鹭峰森林生态系统中林木根系对优先流的影响的研究中发现, $d < 1 \text{ mm}$ 的根系对土壤优先流的影响最为显著,根系生物量显著驱动优先流的发育。然而本研究中林地的 1.5 mm 以下的细根含量虽有限,但由于林下土壤中土壤结构不仅由细根主导,更受到死根、

腐根形成的巨大孔隙及滇西南喀斯特石漠化特征影响下的岩石及土壤裂隙,从而增强土壤的非均质渗流特征。提示未来研究应更加系统地整合生物与非生物孔隙在优先流形成过程中的协同作用机制。

随着优先流的研究日渐深入,CT扫描、探地雷达等技术的应用使得优先流的研究越来越立体直观。本研究通过控制其他变量定性分析植被根系对优先流的影响,但试验过程中很难将其他因素完全摒弃,因此在未来对优先流的研究中应从根-土界面、土-石界面多维度分析,将根系构型、石砾、土壤大孔隙纳入观测范围,构建三维模型,更加深入地探讨优先流的形成与发育机理。

4 结论

1)喀斯特地区林地与草地2种植被的根系生物量特征总体随土层深度的增加而减少,林地中根系直径在1.5~4.5 mm的根系较少,草地根系中 $0 < d \leq 3$ mm的较细小根系比例较大。

2)草地的基质流深度(4.45 cm)大于林地的基质流深度(3.26 cm),同时林地优先流比、长度指数、染色变异系数均显著大于草地,说明林地立地条件下优先流发生时间更早,表现出更强的空间异质性。

3)逐步回归分析模型显示,草地中根系范围为 $0 < d \leq 1.5$ mm、 $1.5 \text{ mm} < d \leq 3$ mm共同解释染色面积比的变化($R^2=0.853$),而林地中 $0 < d \leq 1.5$ mm范围内的根系为驱动优先路径形成的主导因子($R^2=0.758$)。2种样地中粗根($d > 4.5$ mm)对优先流发育的直接贡献均未达显著水平。因此,在后期水文管理与植被恢复过程中,可优先考虑选择细根比例较高的植被作为先锋物种,以提升土壤入渗性能,从而提升整体生态系统的水文调节功能。

参考文献:

- [1] 种国双,海月,郑华,等.中国西南喀斯特石漠化治理现状及对策[J].长江科学院院报,2021,38(11):38-43.
CHONG G S, HAI Y, ZHENG H, et al. Current situation and measures of karst rocky desertification control in southwest China[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2021, 38(11): 38-43.
- [2] 张英虎,牛健植,韩旖旎,等.鹭峰地区林木根系和石砾对土壤水分运移速率的影响[J].干旱区资源与环境,2014,28(5):121-126.
ZHANG Y H, NIU J Z, HAN Y N, et al. Effects of plant roots and rock fragments on rate of water movement in Jiufeng area[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2014, 28(5): 121-126.

- [3] 侯芳,程金花,王通博.基于探地雷达的滨河带藤本和次生乔木林土壤优先流特征[J].生态学报,2022,42(5):1766-1776.
HOU F, CHENG J H, WANG T B. Characteristics of preferential flow of liana and secondary arbor forests along riverside based on ground penetrating radar [J]. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(5): 1766-1776.
- [4] 刘伟,王世杰,罗维均,等.贵州荔波喀斯特与非喀斯特地区土壤水运移的对比研究[J].地球与环境,2011,39(2):137-149.
LIU W, WANG S J, LUO W J, et al. Comparative research on soil water movement between karst and non-karst plots in Libo County of Guizhou Province, China [J]. Earth and Environment, 2011, 39(2): 137-149.
- [5] SOHRT J, RIES F, SAUTER M, et al. Significance of preferential flow at the rock soil interface in a semi-arid karst environment[J]. Catena, 2014, 123: 1-10.
- [6] WEI H, YANG Y F, WANG J Y, et al. A comparison of preferential flow characteristics and influencing factors between two soils developed in the karst region of Southwest China [J]. Soil and Tillage Research, 2024, 241: e106132.
- [7] 师雪淇,程金花,管凝,等.喀斯特地区典型植被根系对优先流的影响[J].水土保持研究,2024,31(5):73-83.
SHI X Q, CHENG J H, GUAN N, et al. Influence of root system on preferential flow in a typical forest stand in karst region [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2024, 31(5): 73-83.
- [8] 韩若琳,侍世玲,蒙仲举.半干旱区放牧管理草地土壤优先流特征及其影响因素研究[J].节水灌溉,2023(8):110-120.
HAN R L, SHI S L, MENG Z J. Characteristics of soil preferential flow and its influencing factors in grazing grassland in semi-arid area [J]. Water Saving Irrigation, 2023(8): 110-120.
- [9] 祁子寒,王云琦,王玉杰,等.根系对浅表层土大孔隙分布特征及饱和渗透性的影响[J].水土保持学报,2021,35(5):94-100.
QI Z H, WANG Y Q, WANG Y J, et al. Effect of root system on macropores distribution and saturated permeability of surface soil [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2021, 35(5): 94-100.
- [10] 张洪江,付晓,马思文,等.重庆四面山不同作物农田土壤根系分布与水分入渗特征[J].中国水土保持科学(中英文),2023,21(3):137-144.
ZHANG H J, FU X, MA S W, et al. Root distribution and water infiltration characteristics of agricultural soils with different crops in the Simian Mountain of Chongqing

- [J]. *Science of Soil and Water Conservation*, 2023, 21(3):137-144.
- [11] 李桂静. 不同程度石漠化岩溶系统碳迁移机制研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2020.
- LI G J. Carbon transfer mechanism of karst system in different degrees of rocky desertification[D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2020.
- [12] 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.
- WANG W. Characteristics and formation mechanism of soil preferential flow in purple sandstone woodland in Three Gorges Reservoir area[D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2011.
- [13] FLURY M, FLÜHLER H, JURY W A, et al. Susceptibility of soils to preferential flow of water: A field study[J]. *Water Resources Research*, 1994, 30(7):1945-1954.
- [14] 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[J]. *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[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2020, 31(3):725-734.
- [15] 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[J]. *水土保持学报*, 2015, 29(3):68-74.
- RUAN X Z, CHENG J H, ZHANG H J, et al. Soil macropore characteristics of different woodland and their influencing factors on simianshan mountain in Chongqing[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2015, 29(3):68-74.
- [16] 陈雨薇. 植物根系对剖面水文连通性的影响: 以三峡库区紫色土为例[D]. 武汉: 华中农业大学, 2022.
- CHEN Y W. Influence of root on hydrological connectivity of profiles[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2022.
- [17] 孙程鹏, 赵文智. 土地利用对河西走廊荒漠绿洲区土壤入渗的影响[J]. *中国沙漠*, 2021, 41(6):148-156.
- SUN C P, ZHAO W Z. Effect of land use on soil infiltration in the desert-oasis of Hexi Corridor[J]. *Journal of Desert Research*, 2021, 41(6):148-156.
- [18] 管凝, 程金花, 侯芳, 等. 不同入渗水量下的西南喀斯特地区人工林土壤优先流特征[J]. *土壤通报*, 2023, 54(3):587-595.
- GUAN N, CHENG J H, HOU F, et al. Characteristics of preferential flow of artificial forest in karst areas of southwest China under different infiltration amounts[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2023, 54(3):587-595.
- [19] GUAN N, CHENG J H, BI H X, et al. Laboratory and field characterization of preferential flow under consideration of geometric fracture features in a karst region in southwest China[J]. *Journal of Hydrology*, 2024, 631:e130851.
- [20] WEILER M, FLÜHLER H. Inferring flow types from dye patterns in macroporous soils[J]. *Geoderma*, 2004, 120(1/2):137-153.
- [21] VOGEL H J, COUSIN I, IPPISCH O, et al. The dominant role of structure for solute transport in soil: Experimental evidence and modelling of structure and transport in a field experiment[J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2006, 10(4):495-506.
- [22] 陈晓冰. 重庆四面山四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.
- CHEN X B. Study on characteristics of preferential flow on four land use types in Simian Mountain of Chongqing[D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2016.
- [23] 徐宗恒, 徐则民, 官琦, 等. 不同植被发育斜坡土体优先流特征[J]. *山地学报*, 2012, 30(5):521-527.
- XU Z H, XU Z M, GUAN Q, et al. The characteristic of preferential flow in different vegetated slope soils[J]. *Journal of Mountain Science*, 2012, 30(5):521-527.
- [24] 骆紫藤. 华北土石山区典型林地根土层优先流特征及其影响因素研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2020.
- LUO Z T. Features of preferential flow and its influence factors in typical forests root zone in rocky mountain area of northern China[D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2020.
- [25] 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.
- ZHANG Y H, NIU J Z, ZHU W L, et al. Effects of plant root systems on preferential flow in forest ecosystems[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2015, 35(6):1788-1797.