

网络出版时间:2022-01-10 14:35 DOI:10.13207/j.cnki.jnwafu.2022.07.007
网络出版地址:https://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1390.S.20220107.2108.008.html

滇中磨盘山典型林分土壤优先流特征及其归因分析

卢华兴¹,段旭^{1,2},赵洋毅^{1,2},朱梦雪¹,涂晓云¹

(1 西南林业大学 林学院,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)

【摘 要】【目的】探究土壤优先流的形成机理,揭示林地土壤水分运移规律,加深对森林调节水文、涵养水源机理的认识,为滇中林区水源涵养、植被生态建设提供理论依据。【方法】以滇中磨盘山云南松林、华山松林、滇油杉林、高山栎林 4 种林分类型为研究对象,利用染色示踪法和 Photoshop CS 5、Image Pro Plus 6.0 图像处理软件获取优先流染色区域总面积和染色面积比,分析不同林分类型的土壤优先流特征及优先流染色面积比随土层深度的变化;同时测定各林分类型土壤的理化性质,采用相关分析、主成分分析和通径分析方法,研究影响 4 种林分土壤优先流特征的土壤因子。【结果】4 种林分表层土壤水分运动以基质流为主,染色面积比随土层深度的增加逐渐减小,优先流现象明显,优先流发育程度表现为华山松林>云南松林>滇油杉林>高山栎林。4 种林分不同土层深度的土壤理化性质存在显著差异($P<0.05$),华山松林地的土壤疏松程度、持水特性、土壤肥力特性均表现最优。4 种林分土壤容重均与染色面积比呈极显著负相关($P<0.01$),pH、全钾含量与染色面积比呈负相关;除土壤容重、pH、全钾含量外,饱和持水量、毛管持水量、毛管孔隙度、有机质含量等土壤因子均与染色面积比呈正相关关系。主成分分析和通径分析结果表明,优先流的形成是不同土壤因子直接作用和间接作用的结果,其中土壤容重是引起染色面积比变化的决定性因子,全氮含量对优先流的形成具有限制性作用。【结论】土壤疏松程度、持水特性、土壤肥力特性等共同作用影响优先流的形成与发生,土壤理化性质是土壤优先流形成的重要驱动因素。

【关键词】土壤优先流特征;土壤因子;染色示踪法;森林水文;滇中磨盘山
[中图分类号] S715.3 [文献标志码] A [文章编号] 1671-9387(2022)07-0048-15

Characteristics and attribution analysis of soil preferential flow in typical stand of Mopan Mountain in central Yunnan

LU Huaxing¹,DUAN Xu^{1,2},ZHAO Yangyi^{1,2},ZHU Mengxue¹,TU Xiaoyun¹
(1 College of Forestry, Southwest Forestry University, Kunming, Yunnan 650224, China;
2 National Positioning Observation and Research Station of Yuxi Forest Ecosystem, National Forestry and Grassland Administration, Kunming, Yunnan 650224, China)

Abstract: 【Objective】 This study explored the formation mechanism of soil preferential flow, revealed the law of soil water movement in forest land and deepened the understanding of forest regulating hydrology and water conservation mechanism to provide theoretical basis for water conservation and vegetation ecological construction in forest regions of Central Yunnan. 【Method】 *Pinus yunnanensis* forest, *Pinus armandii* forest, *Quercus semecarpifolia* forest, and *Keteleeria evelyniana* forest in Mopan Mountain in cen-

[收稿日期] 2021-09-13
[基金项目] 国家自然科学基金项目(42067005,31860235);云南省基础研究计划项目(202001AT070136);云南省教育厅研究生基金项目(2021Y243);云南省万人计划青年拔尖人才专项(YNWR-QNBJ-2019-226, YNWR-QNBJ-2019-215);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长期科研基地项目(2020132550),云南玉溪森林生态系统国家定位观测研究站项目(2020132078),云南省自然生态监测网络项目(2020-YN-13)
[作者简介] 卢华兴(1996—),男,云南大姚人,在读硕士,主要从事森林土壤学研究。E-mail:405169351@qq.com
[通信作者] 段旭(1983—),女,山西沁源人,副教授,博士,硕士生导师,主要从事森林培育和生态水文研究。E-mail:feixue20012360@163.com

tral Yunnan were selected and the total of dyeing area and dyeing area ratio of preferential flow were obtained by dyeing tracer method,Photoshop CS 5 and Image Pro Plus 6.0 image processing software. The characteristics of soil preferential flow and the changes of preferential flow staining area ratio with soil depth were analyzed. At the same time,the physical and chemical properties of soil in each stand type were measured,and the factors affecting the characteristics of soil preferential flow in four stands were studied by correlation analysis,principal component analysis and path analysis.【Result】The main surface soil water movement of the four stands was mainly matrix flow,and the dyeing area ratio gradually decreased with the increase of soil depth. The phenomenon of preferential flow was obvious with development degree in the decreasing order of *P. armandii* forest>*P. yunnanensis* fores>*Q. semecarpifolia* forest>*K. evelyniana* forest. There were significant differences in soil physical and chemical properties at different soil depths among the four stands ($P<0.05$). *P. armandii* forest had the best degree of soil porosity,water holding characteristics and soil fertility characteristics. Soil bulk density of the four stands showed a very significant negative correlation with the dyeing area ratio ($P<0.01$),while pH,total potassium content and the dyeing area ratio showed negative correlations. Except for soil bulk density,pH and total potassium content, soil factors such as saturation moisture capacity, capillary moisture capacity, capillary porosity and organic matter content correlated positively with dyeing area ratio. The results of principal component analysis and path analysis showed that the formation of preferential flow was the result of direct and indirect effects of different soil factors. Among them,soil bulk density was the decisive factor causing the change of dyeing area ratio and total nitrogen content had a restrictive effect on formation of preferential flow.【Conclusion】Soil porosity,water holding capacity and soil fertility affected the formation and occurrence of preferential flow. Soil physical and chemical properties were important driving factors for the formation of preferential flow.

Key words: characteristics of soil preferential flow; soil factors; dye tracing method; forest hydrology; Mopan Mountain in central Yunnan

优先流是土壤中较为常见的土壤水分运动和溶质运移形式^[1],是水和溶质绕过部分多孔介质而沿着特定路径非均匀快速运动的现象^[2],研究表明70%~85%的土壤水分运动都与优先流有关。优先流在地表水、地下水和土壤水的运动转化过程中起着关键作用,其发生可以减少地表径流^[3],提高土壤含水率、碳储量和养分含量,对地下水补给至关重要^[4]。森林是陆地生态系统的主体,具有涵养水源和保持水土的功能^[5],而森林植被和森林土壤是森林生态系统的重要组成部分。优先流作为土壤和水分连接的纽带,对森林土壤水分运动和溶质迁移产生一定影响^[6],开展森林土壤优先流研究,加深对森林调节水文的认识,在森林涵养水源和调节径流方面具有重要意义^[7-8]。

优先流具有快速穿透、侧向入渗、非稳定性等特点^[2],其形成因素和运动规律极其复杂,这使得优先流成为土壤水文学研究的难点问题^[9]。土壤理化性质是优先流形成的重要因素,阮芯竹^[10]研究发现,土壤容重、总孔隙度、有机质含量等均影响优先流的

形成,其中以有机质含量的影响最大。程金花等^[11]发现,优先流区的饱和导水率、有机质含量显著高于非优先流区;官琦等^[12]进一步研究发现,有机质对优先流的发育有约束作用。程竞萱等^[13]认为,土壤质地也会影响优先流的产生,土壤结构和质地的差异导致土壤含水量不同,因此优先流的表现形式也不同^[14]。初始含水量影响土壤水分的入渗深度和优先流的非均匀程度^[15],初始含水量较低导致优先流现象更明显^[16],而提升土壤初始含水率可以抑制优先流的发展^[17]。时忠杰等^[18]发现,土体中的石砾通过影响土壤大孔隙数量、有效孔隙的密度和体积来影响优先流的发生,而土壤大孔隙的分布受土壤容重和有机质含量的影响较大^[19]。连经纬等^[20]认为,优先流发育程度的增强可以提高土壤有机碳、土壤养分的运移能力。综上所述,土壤容重^[10,19]、有机质含量^[10-12,19]、初始含水率^[14-17]、土壤孔隙度^[10,18-19]、土壤质地^[13-14]、土壤养分^[20]等土壤因子,均会对土壤优先流的形成产生影响。目前,有大量研究方法相继投入到优先流的定性和定量化分析之

中,而染色示踪法操作简单,能够直观显示整个土壤剖面中优先流的空间分布^[21],是开展土壤优先流研究较为普遍的野外试验方法^[22]。

滇中磨盘山位于滇中亚高山区域,是我国云贵高原、横断山地和青藏高原三大自然地理区域相结合的特殊部位,是一个复合型生态过渡带,森林资源丰富,植被类型多样^[23]。磨盘山森林生态系统是重要的水源涵养区,在我国滇中地区发挥着涵养水源、保持水土等重要的生态功能,目前尚没有关于该地区土壤优先流的研究报道。本试验以磨盘山森林生态系统国家定位观测站为研究点,以滇中地区水源涵养林为研究对象,采用染色示踪法,分析土壤理化性质是否是优先流发生的驱动影响因子及它们之间的量化关系,阐释研究区土壤水分运移规律,以期为滇中林区水源涵养、植被生态建设提供理论依据。

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县磨盘山国家林草局森林生态系统国家长期科研基地(23°46′18″~23°54′34″N,101°12′06″~101°12′12″E),是云南亚热带北部气候与亚热带南部气候的过渡地区,属中亚热带高原性气候,又因地形地貌复杂,兼具低纬气候、季风气候和山地气候的特点^[24]。该区海拔

1 260.0~2 614.4 m,相对高差大;最高气温 33 ℃,最低气温-2.2 ℃,年平均气温 15 ℃,年日照时数 2 380 h;降雨主要集中在 6—8 月份,年均降雨量 1 050 mm,干湿分明、雨热同季。土壤以第三纪古红土发育的山地红壤和玄武岩红壤为主,局部地区有黄壤和棕黄壤分布,土壤整体偏酸性,土层厚度 1 m 左右,以中厚土壤层为主。磨盘山地区是以云南特有中山半湿性常绿阔叶林为主的重要原始森林区,森林植被类型随海拔升高呈现出明显的垂直分布特征,主要分布有亚热带常绿阔叶林、云南松针阔混交林、针叶林(主要为华山松林、滇油杉林、云南松林)和高山矮林(主要为高山栎林)等森林类型,是云南森林群落的重要组成部分,具有重要的生态价值。

1.2 研究方法

1.2.1 样地布设 在研究区云南松林、华山松林、滇油杉林和高山栎林 4 种林分内设置面积为 100 m×100 m 的固定样地各 1 块,然后分别在各固定样地内选择植被均匀、林分结构一致、地形相似的地段设置 4 块 20 m×20 m 的样方,在每个样方内选择 3 个试验点开展染色示踪试验。同时,在各个样方内用环刀、铝盒采集原状土样测定土壤物理性质,利用 5 点取样法采集混合土样,风干后带回实验室测定土壤化学性质,采样深度为 0~50 cm,以土层深度 10 cm 为间隔分层采样,样地基本状况见表 1。

表 1 滇中磨盘山不同林分类型样地的基本状况

Table 1 Basic conditions of plots in different stand types of Mopan Mountain in Central Yunnan

林分类型 Stand type	海拔/m Altitude	坡向 Aspect	坡度/(°) Slope	土壤类型 Soil type	郁闭度 canopy density	林内主要乔、灌木树种 Main trees and shrubs in the forest
云南松林 <i>P. yunnanensis</i> forest	2 158	NW	15	棕黄壤 Brown yellow soil	0.73	云南松、棠梨、野坝子、榲桲、川滇栎木 <i>P. yunnanensis</i> , <i>Pyrus pashia</i> , <i>Elsholtzia rugulosa</i> , <i>Quercus aliena</i> var. <i>aliena</i> , <i>Alnus ferdinandii-coburgii</i>
华山松林 <i>P. armandii</i> forest	2 346	SW	18	棕黄壤 Brown yellow soil	0.75	华山松、青冈 <i>P. armandii</i> , <i>Cyclobalanopsis glauca</i>
高山栎林 <i>Q. semecarpifolia</i> forest	2 904	NW	16	棕黄壤 Brown yellow soil	0.92	高山栎、光叶柯、麻栎 <i>Q. semecarpifolia</i> , <i>Lithocarpus mairei</i> , <i>Quercus acutissima</i>
滇油杉林 <i>K. evelyniana</i> forest	2 292	NW	20	棕黄壤 Brown yellow soil	0.70	滇油杉、马缨杜鹃、小铁仔 <i>K. evelyniana</i> , <i>Rhododendron delavayi</i> , <i>Myrsine africana</i>

注: NW 为西北方向, SW 为西南方向。

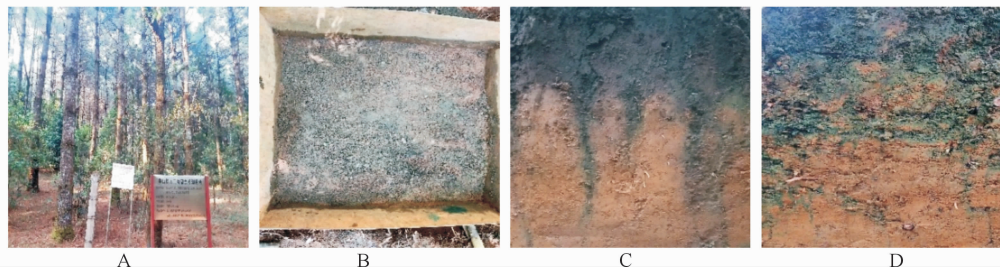
Note: NW is northwest; SW is southwest.

1.2.2 染色示踪试验 染色示踪试验于 2020 年 7 月 1 日至 9 月 10 日进行,在每块样地内随机选取 3 个 1 m×1 m 的区域进行染色示踪试验,作为 3 个重复,研究区内共设置 48 个染色示踪试验点。染色前先平整地块,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碎石,然后将长、宽、高均为 70 cm 的矩形铁框埋入土中 30 cm,并用木锤夯

实铁框内壁 5 cm 以内的松动土壤,以避免染色溶液沿铁框内壁下漏对观测结果造成影响。选用亮蓝作为染色剂,供水装置采用马氏瓶,在积水渗透方式下将质量浓度为 4 g/L 的亮蓝溶液 20 L(模拟当地 24 h 大雨累计降雨量 25 mm)均匀喷洒在铁框内部中央区域,覆盖帆布并用尼龙绳将四周绑紧,以避免静置过程中降雨等其他水分输入。24 h 后,揭去帆布

和埋置的铁框,挖掘垂直染色剖面。由于铁框周围区域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,因此对铁框中心 50 cm×

50 cm 的区域进行观测,以水平宽度 10 cm 为间隔由上至下开挖垂直土壤剖面,并用 1 200 万像素相机拍摄垂直剖面染色图像,试验场地现状见图 1。



A. Fixed observation plot; B. Experimental device; C and D. Vertical section stained image
图 1 试验场地现状

Fig. 1 Current status of the test site

1.2.3 土壤基本理化性质测定 参考中国林业行业标准和《土壤农化分析方法》^[25],采用 105 ℃烘干法(LY/T 1213—1999)测定土壤初始含水率,采用环刀法(LY/T 1215—1999)测定土壤容重、孔隙度(包括非毛管孔隙度、毛管孔隙度和总孔隙度)、饱和持水量、毛管持水量、田间持水量和土壤通气度,采用电位法测定土壤 pH,采用硫酸-重铬酸钾外源加热法(LY/T 1237—1999)测定土壤有机碳和有机质含量,采用半微量凯氏定氮法(LY/T 1269—1999)测定土壤全氮含量,采用 HClO₄-H₂SO₄ 消煮法和电子耦合等离子体发射光谱仪(ICP-OES)测定土壤全磷、全钾含量。

1.3 研究内容

1.3.1 不同林分类型的土壤优先流特征 染色图像解析是获得土壤优先流特征的重要过程,主要是对室外原位土体染色示踪试验过程中拍摄的染色图像进行处理和分析,然后进一步获取土壤优先流特征参数。首先利用 Photoshop CS5 软件将染色图像进行样式编辑和几何校正(裁剪大小为 50 cm×50 cm),通过调整灰度和对比度、颜色替换、降噪处理及图像反相处理,使染色区域变为黑色、未染色区域变为白色,调整图像阈值使染色图像与实际情况一致,即得到土壤优先流的形态特征。然后将处理后的染色图像导入 Image Pro Plus 6.0 软件中进行图像数值化,得到由 0(染色区)和 255(未染色区)组成的数据矩阵,并统计黑白像素数量,根据统计结果计算平均染色区域总面积和某一指定土层深度染色区域(优先流区)面积所占的比例,即染色面积比。本研究以 1 cm 土层深度为间隔计算染色面积比。

1.3.2 不同林分类型土壤优先流染色面积比随土

层的变化 根据 4 种林分类型垂直剖面染色图像每 1 cm 土层深度的染色面积比,用 Excel 2016 统计软件绘制土壤优先流染色面积比随土层深度变化的散点图(带平滑线和数据标记散点图)。

1.3.3 林分类型与土层深度对土壤理化性质的影响 测定 4 种林分类型不同土层深度的土壤基本理化性质,用 Excel 2016 统计软件整理并录入数据,然后将数据导入 SPSS 20.0 进行双因素方差分析(Two-way ANOVA)和 Duncan 多重比较。

1.3.4 不同林分类型土壤优先流与土壤因子的相关性 为探讨研究区 4 种林分类型的土壤优先流染色面积比与土壤因子的相关性,用 SPSS 20.0 软件进行 Pearson 相关分析。

1.3.5 土壤因子对土壤优先流的主成分分析 主成分分析是一种常规的多元统计方法和数据挖掘技术,在不丢失主要变量信息的前提下,选择较少的新变量来代替原来较多的变量,以排除众多信息共存中相互重叠的信息^[26],消除原始变量之间的相关性,通过降维,使复杂问题简化,进而客观地反映各个因子与因变量之间的关系^[27]。通过简单的相关分析虽然能解释土壤理化性质与优先流的相关性,但并不能直观、全面地反映诸多土壤因子中影响优先流形成的主要因素,同时为了消除诸多土壤因子之间的相关性,因此进一步采用主成分分析探讨土壤优先流的形成与土壤因子的响应关系。将初始含水率(X_1)、土壤容重(X_2)、饱和持水量(X_3)、毛管持水量(X_4)、田间持水量(X_5)、非毛管孔隙度(X_6)、毛管孔隙度(X_7)、总孔隙度(X_8)、土壤通气度(X_9)、土壤 pH(X_{10})、有机碳含量(X_{11})、有机质含量(X_{12})、全氮含量(X_{13})、全磷含量(X_{14})、全钾含量(X_{15})、碳

氮比(X_{16})等 16 个土壤因子与染色面积比(Y)用 Origin 2019 软件进行主成分分析。

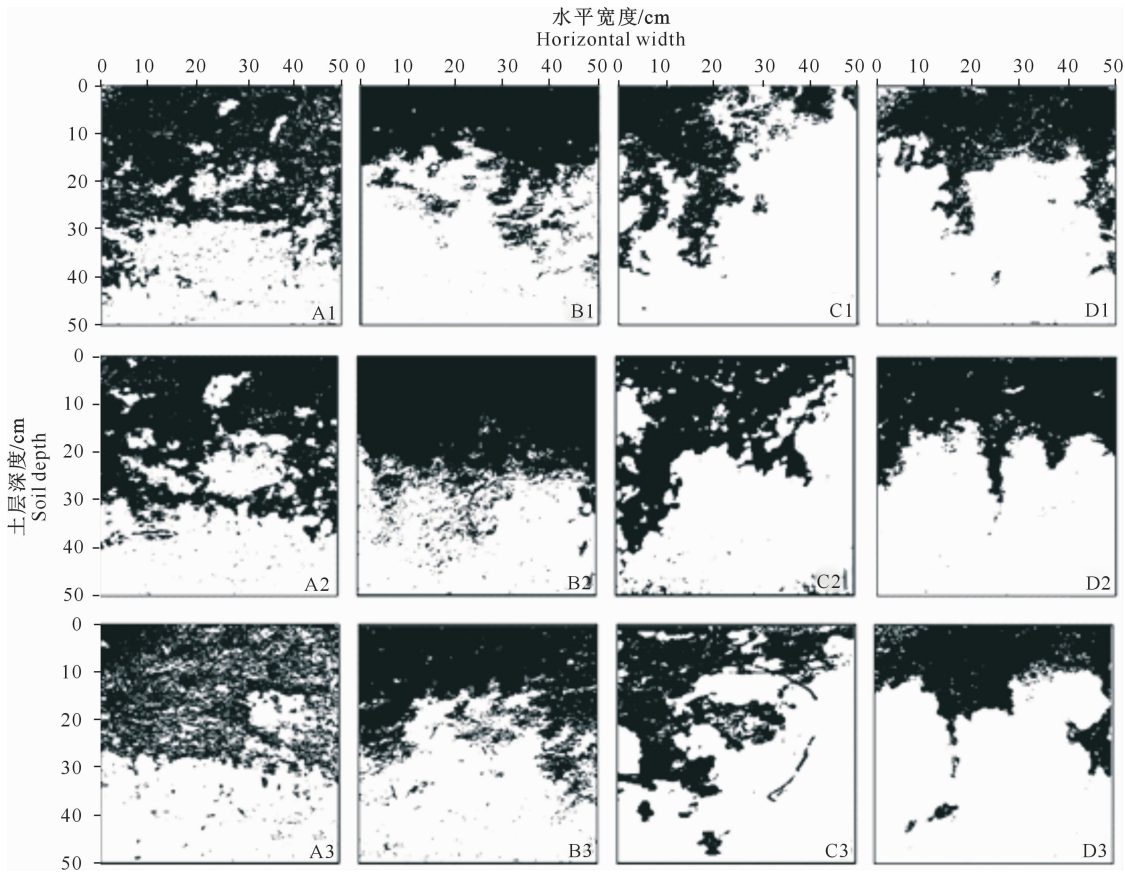
1.3.6 土壤因子对土壤优先流的通径分析 由于研究区 4 种林分的土壤因子属性范围不一,借助传统的相关分析、主成分分析方法虽然能比较出对土壤优先流形成产生影响的土壤因子,但不能反映哪些因子起直接作用,哪些因子通过其他因子起间接作用,以及各土壤因子的综合作用,为进一步明确土壤理化性质与优先流之间的关系,将所有可供选择的土壤因子与土壤优先流染色面积比进行通径分析。首先,对因变量染色面积比(Y)进行正态性检验,由于样本容量 $n=20$,属于小样本,因此用 SPSS 20.0 软件进行正态性检验后选择 Shapiro-Wilk Test 得出结果,统计量为 0.889,显著性 $0.066 > 0.05$,说明因变量染色面积比(Y)是正态变量,可以采用 SPSS 20.0 软件进行逐步回归分析。将所有可供选择的土壤因子通过逐步选择加入或删除部分自

变量,建立最优的回归方程: $Y = 1.825X_1 - 358.760X_2 - 2.604X_3 + 2.106X_5 + 0.977X_9 - 67.121X_{10} + 1.623X_{12} - 41.016X_{13} + 8.597X_{14} - 3.284X_{15} - 12.147X_{16} + 921.376$,该方程的决定系数 $R^2=0.710$,显著性检验值 $P=0.000 < 0.01$,说明各个土壤因子与土壤优先流染色面积比之间有良好的线性关系,耦合程度较高。最终,根据正态性检验和逐步回归分析结果,用 Excel 2016 统计软件计算各个土壤因子的通径系数和决策系数,进一步明确影响土壤优先流形成的决定性因子和限制性因子。

2 结果与分析

2.1 不同林分类型土壤的优先流特征

2.1.1 形态特征变化 图 2 为研究区 4 种林分类型土壤的优先流染色图像。



A. 云南松林;B. 华山松林;C. 滇油杉林;D. 高山栎林;数字 1~3 表示同一林分的 3 个典型垂直染色剖面。下同
A. *P. yunnanensis* forest;B. *P. armandii* forest;C. *K. evelyniana* forest;D. *Q. semecarpifolia* forest;
The numbers 1~3 represent three typical vertical dyeing profiles of the same stand. The same below

图 2 滇中磨盘山不同林分类型土壤优先流染色图像

Fig. 2 Staining images of soil preferential flow in different stand types of Mopan Mountain in Central Yunnan

由图 2 可知,4 种林分均出现亮蓝染色溶液垂 直向下运移的现象,由于土壤的异质性,同一林分土

壤优先流染色深度、分布情况、形态特征均存在差异。整体来看,染色区域不均匀地分布在 0~40 cm 土层,多集中于 0~30 cm 土层,4 种林分垂直剖面平均染色区域总面积分别为 1 238.73 cm²(云南松林)、1 147.65 cm²(华山松林)、871.48 cm²(滇油杉林)和 847.38 cm²(高山栎林),分别占整个土壤剖面的 49.55%,45.91%,34.80%和 33.90%。比较 4 种林分垂直剖面染色图像可以发现,0~10 cm 表层土壤质地疏松,增大了土壤水分横向侧流的几率,使得表层土壤被亮蓝溶液大面积均匀染色,染色率超过 80.00%,说明在表层土壤中优先流现象不明显,土壤水分运动主要由基质流主导,其中华山松林的基质流深度达到 23.30 cm(见图 2-B2)。随着土

层深度增加,垂直剖面染色面积逐渐减小,土壤水分运移现象分化明显,染色溶液垂直下移呈现不规则分布,形成连通性较好的优先路径。其中,滇油杉林和高山栎林亮蓝溶液沿着土壤大孔隙绕过部分土壤基质呈漏斗状向下运移,使得垂直染色剖面上出现狭长区域,形成很多优先流路径分支(图 2-C1、图 2-D1~3);但云南松林染色区域呈破碎化分布,优先路径不明显(图 2-A1、图 2-A3)。40 cm 以下深土层区域土壤质地紧实,透水性较差,限制了水分向下运动,使得 40 cm 以下土层几乎没有优先流的存在。

2.1.2 染色面积比变化 图 3 为研究区 4 种林分类型土壤优先流染色面积比随土层深度的变化。

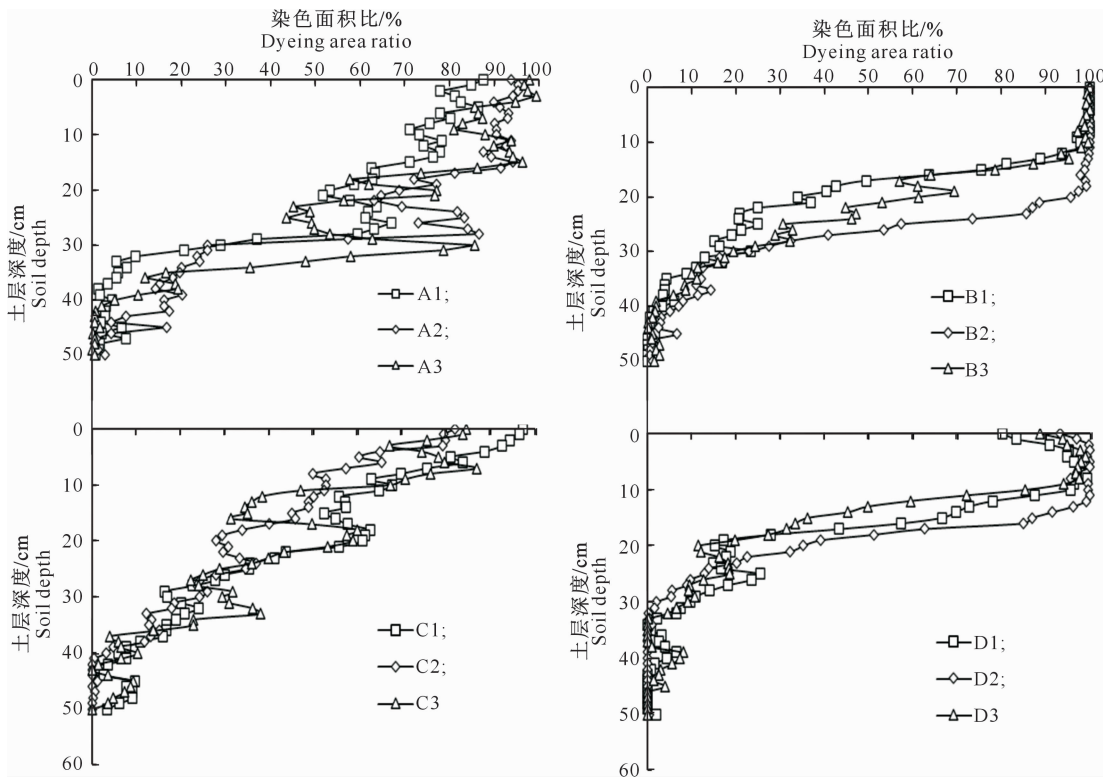


图 3 滇中磨盘山不同林分类型土壤优先流染色面积比随土层深度的变化

Fig. 3 Variation of dyeing area ratio of soil preferential flow with soil depth in different stand types of Mopan Mountain in Central Yunnan

由图 3 可知,不同林分的染色面积比随土层深度的增加而减小,各林分之间存在一定差异,但总体均呈现下降趋势。4 种林分的垂直剖面染色面积比均在 0~10 cm 表层土壤出现最大值,由于华山松林地表层土壤枯落物和腐殖层较厚,土质疏松,3 个剖面表层土壤的染色面积比均达到 100.00%。土层深度 10 cm 以下,4 种林分各个剖面的染色面积比波动程度存在较大差异,说明土层 10 cm 以下优先

流发育程度良好,土壤中优先路径的连贯性和优势性增强,水和溶质快速向下运移。华山松林地土壤理化性质稳定,垂直染色剖面(B1、B2、B3)染色面积比随土层深度的波动程度不大,曲线整体呈现反“S”形。高山栎林地染色剖面(D1、D2、D3)染色面积比在 0~10 cm 土层呈逐渐增大的趋势,以 10 cm 处为转折点,土层 10 cm 以下染色面积比的波动程度不大,变化趋势与华山松林基本一致,但土层深度 30

cm 左右染色面积比趋近于 0。相比华山松林和高山栎林地,由于土壤空间异质性明显,云南松林和滇油杉林垂直剖面染色面积比变化波动较大,染色面积比曲线出现多个波峰,呈现“先减小、再增加、又减小”的趋势,变化曲线整体上呈多个曲折的“Z”形。研究区 4 种林分土壤垂直剖面的平均染色面积比随土层深度的变化规律如图 4 所示。

由图 4 可知,随着土层深度的增加,染色面积比总体呈减小的趋势。土层 0~10 cm 平均染色面积比最大,各林分依次为华山松林(100.00%)、高山栎林(97.33%)、云南松林(93.07%)、滇油杉林(87.87%),这在一定程度上说明表层土壤水分运动是以基质流为主。土层深度达到 40 cm 以后,4 种林分染色面积比趋近于 0,说明此时水分入渗能力较差,基本不再发生优先流现象。染色面积比是最直观反映土壤优先流发育程度的指标,染色面积比越大,土壤优先流发育程度越好^[28]。因此,比较 4 种林分垂直剖面的平均染色面积比,认为土壤优先流发育程度为华山松林>云南松林>滇油杉林>高山栎林,优先流现象在针叶林地中更突出。

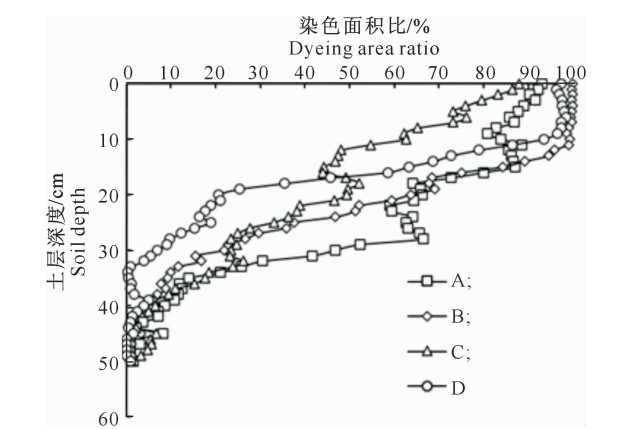


图 4 滇中磨盘山不同林分类型土壤优先流平均染色面积比随土层深度的变化

Fig. 4 Variation of average dyeing area ratio of soil preferential flow with soil depth in different stand types of Mopan Mountain in Central Yunnan

2.2 不同林分类型土壤的基本理化性质

双因素方差分析结果(表 2)表明,林分类型、土层深度以及两者的交互效应对土壤理化性质均有极显著影响($P<0.001$)。

表 2 滇中磨盘山林分类型与土层深度对土壤理化性质的影响								
Table 2 Effect of stand type and soil depth on soil physical and chemical properties of Mopan Mountain in Central Yunnan								
因素 Factor	初始含水率 Initial moisture content	土壤容重 Soil bulk density	饱和持水量 Saturation moisture capacity	毛管持水量 Capillary moisture capacity	田间持水量 Field moisture capacity	非毛管孔隙度 Non-capillary porosity	毛管孔隙度 Capillary porosity	总孔隙度 Total porosity
林分类型 Stand type	20 654 174.0**	482.2**	17 736 068.2**	14 143 984.6**	6 720 210.6**	1 599 279.0**	14 143 984.6**	24 768 197.2**
土层深度 Soil depth	3 658 880.9**	468.5**	936 576.4**	1 902 664.9**	1 079 447.3**	136 964.6**	1 902 664.9**	3 002 368.7**
林分类型× 土层深度 Stand type× Soil depth	1 478 340.6**	110.8**	319 417.6**	456 980.2**	373 292.6**	179 665.3**	456 980.2**	899 741.5**
因素 Factor	土壤通气度 Soil aeration	pH	有机碳 Organic carbon	有机质 Organic matter	全氮 Total nitrogen	全磷 Total phosphorus	全钾 Total potassium	碳氮比 C/N ratio
林分类型 Stand type	6 395 736.6**	13 259.4**	134 668 414.6**	400 244 192.8**	866 381.0**	3 546.6**	1 374 783.0**	1 667 843.6**
土层深度 Soil depth	548 544.5**	3 790.7**	75 038 879.4**	223 040 957.4**	402 272.6**	4 273.0**	38 522.4**	203 043.9**
林分类型× 土层深度 Stand type× Soil depth	718 858.4**	887.7**	30 577 225.1**	90 870 920.3**	205 023.8**	2 451.2**	15 101.7**	201 187.1**

注:表中数据为 F 值; ** 表示 $P<0.01$ 。
Note: The data in the table is F value; ** means $P<0.01$.

研究区 4 种林分土壤理化性质如表 3 和表 4 所示,不同林分、不同土层深度的土壤理化性质存在差异。由表 3 可知,研究区 4 种林分类型土壤的物理性质差异明显,土壤初始含水率、饱和持水量、毛管持水量、田间持水量、毛管孔隙度和总孔隙度等的最大值均出现在华山松林,而云南松林的土壤容重及

滇油杉林的非毛管孔隙度、土壤通气度也出现最大值,且最大值出现的土层深度不一致,以 0~10 和 20~30 cm 土层为主。不同土层深度的土壤物理性质显著不同($P<0.05$),除土壤容重外,土壤初始含水率、土壤孔隙度等其他土壤物理性质指标随土层深度增加基本呈减少的趋势。

表 3 滇中磨盘山不同林分类型土壤的物理性质

Table 3 Soil physical properties in different stand types of Mopan Mountain in Central Yunnan

土层深度/cm Soil depth	林分类型 Stand type	初始 含水率/% Initial moisture content	容重/ (g·cm ³) Bulk density	饱和 持水量/mm Saturation moisture capacity	毛管 持水量/mm Capillary moisture capacity	田间 持水量/mm Field moisture capacity	非毛管 孔隙度/% Non-capillary porosity	毛管 孔隙度/% Capillary porosity	总孔 隙度/% Total porosity	土壤 通气度/% Soil aeration
0~10	A	26.29 d	1.26 a	48.01 d	46.34 d	39.24 c	7.10 d	46.34 d	53.44 d	14.20 d
	B	<u>63.36 a</u>	1.08 b	<u>78.33 a</u>	<u>75.71 a</u>	57.44 a	18.28 a	<u>75.71 a</u>	<u>93.99 a</u>	36.55 a
	C	53.95 b	1.27 a	66.11 b	57.95 b	46.49 b	11.46 b	57.95 b	69.41 b	22.92 b
	D	35.89 c	1.27 a	49.30 c	48.16 c	39.20 d	8.97 c	48.16 c	57.13 c	17.93 c
10~20	A	30.28 c	1.29 a	49.21 c	46.72 c	39.12 c	7.60 d	46.72 c	54.32 c	15.20 d
	B	62.21 a	1.17 d	66.76 a	60.02 a	45.21 a	14.81 a	60.02 a	74.82 a	29.61 a
	C	42.68 b	1.26 b	64.73 b	51.29 b	42.02 b	9.28 b	51.29 b	60.57 b	18.55 b
	D	27.72 d	1.24 c	47.59 d	41.20 d	32.01 d	9.19 c	41.20 d	50.38 d	18.37 c
20~30	A	28.25 c	1.17 c	47.11 d	42.54 d	34.78 d	7.76 c	42.54 d	50.30 d	15.52 c
	B	47.50 a	1.26 b	61.97 b	69.97 a	<u>58.38 a</u>	11.59 b	69.97 a	81.55 a	23.17 b
	C	41.68 b	1.36 a	65.06 a	59.65 b	41.16 b	<u>18.49 a</u>	59.65 b	78.14 b	<u>36.98 a</u>
	D	24.37 d	1.26 b	49.36 c	42.99 c	35.34 c	7.65 d	42.99 c	50.64 c	15.30 d
30~40	A	20.57 d	1.41 a	43.11 d	42.20 d	36.12 c	6.08 d	42.20 d	48.27 d	12.15 d
	B	37.99 b	1.21 d	64.74 a	56.30 a	43.46 a	12.84 a	56.30 a	69.14 a	25.68 a
	C	45.71 a	1.28 c	62.78 b	46.00 b	36.64 b	9.37 b	46.00 b	55.37 b	18.73 b
	D	23.40 c	1.38 b	45.15 c	43.95 c	35.48 d	8.47 c	43.95 c	52.41 c	16.93 c
40~50	A	31.05 c	<u>1.42 a</u>	46.18 c	44.04 c	38.21 c	5.83 d	44.04 c	49.86 d	11.65 d
	B	31.89 b	1.27 c	66.75 a	60.78 a	47.92 a	12.86 a	60.78 a	73.64 a	25.72 a
	C	45.64 a	1.38 b	57.21 b	49.31 b	38.44 b	10.88 b	49.31 b	60.19 b	21.75 b
	D	22.45 d	1.42 a	43.84 d	42.53 d	34.59 d	7.94 c	42.53 d	50.47 c	15.88 c

注:A. 云南松林,B. 华山松林,C. 滇油杉林,D. 高山栎林;表中下划线数据为土壤因子的最大值;同列数据后标不同小写字母表示同一土层深度不同林分的土壤因子差异显著($P<0.05$)。表 4 同。

Note:A. *P. yunnanensis* forest,B. *P. armandii* forest,C. *K. evelyniana* forest;D. *Q. semecarpifolia* forest;The underlined data in the table is the maximum soil factor.Different lowercase letters indicate significant differences among stands ($P<0.05$). The same in Table 4.

表 4 滇中磨盘山不同林分类型土壤的化学性质

Table 4 Soil chemical properties in different stand types of Mopan Mountain in Central Yunnan

土层深度/cm Soil depth	林分类型 Stand type	pH	有机碳/ (g·kg ⁻¹) Organic carbon	有机质/ (g·kg ⁻¹) Organic matter	全氮/ (g·kg ⁻¹) Total nitrogen	全磷/ (g·kg ⁻¹) Total phosphorus	全钾/ (g·kg ⁻¹) Total potassium	碳氮比 C/N ratio
0~10	A	4.48 a	6.55 d	11.30 d	0.74 d	2.18 c	10.84 a	9.18 d
	B	3.74 d	<u>200.56 a</u>	<u>345.76 a</u>	<u>16.32 a</u>	<u>2.84 a</u>	4.11 c	12.57 c
	C	3.88 c	66.91 b	115.36 b	5.19 b	2.18 c	4.11 c	13.31 a
	D	4.17 b	36.82 c	63.48 c	2.98 c	2.37 b	4.94 b	12.94 b
10~20	A	4.60 a	5.91 d	10.19 d	1.40 d	1.92 c	10.74 a	4.23 d
	B	4.12 b	59.43 a	102.45 a	3.45 b	1.46 d	3.87 d	<u>18.99 a</u>
	C	3.93 c	37.53 b	64.69 b	3.98 a	2.04 b	4.71 c	10.17 c
	D	3.89 d	29.41 c	50.70 c	2.54 c	2.24 a	5.15 b	11.71 b
20~30	A	4.63 a	5.73 d	9.88 d	1.02 d	1.85 d	<u>11.69 a</u>	5.92 d
	B	4.42 b	52.39 a	90.31 a	4.73 a	2.35 a	5.87 c	11.20 c
	C	3.93 d	39.24 b	67.65 b	3.46 b	2.07 c	4.62 d	12.20 b
	D	3.97c	20.16 c	34.75 c	1.57 c	2.17 b	6.12 b	13.80 a
30~40	A	4.76 a	3.36 d	5.79 d	0.86 d	1.83 c	10.33 a	4.03 d
	B	4.60 b	33.67 a	58.05 a	4.63 a	1.74 d	4.63 d	7.33 c
	C	4.32 c	26.77 b	46.15 b	2.01 b	2.32 a	4.73 c	13.39 a
	D	4.07 d	12.18 c	21.00 c	1.16 c	2.06 b	7.25 b	11.27 b
40~50	A	<u>4.96 a</u>	3.87 d	6.67 d	0.99 c	1.96 c	11.51 a	3.93 d
	B	4.50 b	28.01 a	48.30 a	3.03 a	1.93 d	4.83 c	10.73 b
	C	4.30 c	23.64 b	40.76 b	2.09 b	2.26 b	4.70 d	11.97 a
	D	4.10 d	5.92 c	10.20 c	0.60 d	2.70 a	8.06 b	10.29 c

由表 4 可知,相比其他 3 种林分,除土壤 pH 和全钾含量外,华山松林地的土壤有机碳含量、有机质含量、全氮含量、全磷含量、碳氮比等土壤化学性质均出现最大值。土层深度的差异导致土壤化学性质显著不同($P<0.05$),随着土层深度的增加,多数土壤化学性质指标(pH、全钾含量除外)逐渐减小。综合比较滇中磨盘山 4 种林分的土壤理化性质,华山松林地的土壤疏松程度、持水特性、土壤肥力特征等

理化性质明显表现出一定的优势,综合华山松林地优先流发育程度较好的结果可知,优先流的发生与土壤理化性质有关。

2.3 土壤理化性质对优先流的影响

2.3.1 不同林分类型土壤优先流与土壤因子的相关性 表 5 为研究区 4 种林分类型土壤优先流染色面积比与土壤因子的相关系数。

表 5 滇中磨盘山不同林分类型土壤优先流染色面积比与土壤因子的相关性
Table 5 Correlation between dyeing area ratio of soil preferential flow and soil factors in different stand types of Mopan Mountain in Central Yunnan

土壤因子 Soil factor		云南松林 <i>P. yunnanensis</i> forest	华山松林 <i>P. armandii</i> forest	滇油杉林 <i>K. evelyniana</i> forest	高山栎林 <i>Q. semecarpifolia</i> forest
土壤物理性质 Soil physical properties	初始含水率 Initial moisture content	0.148	0.962**	0.546*	0.963**
	容重 Bulk density	-0.763**	-0.834**	-0.634*	-0.658**
	饱和持水量 Saturation moisture capacity	0.750**	0.660**	0.802**	0.657**
	毛管持水量 Capillary moisture capacity	0.648**	0.612*	0.609*	0.604*
	田间持水量 Field moisture capacity	0.313	0.405	0.922**	0.437
	非毛管孔隙度 Non-capillary porosity	0.844**	0.796**	0.013	0.728**
	毛管孔隙度 Capillary porosity	0.648**	0.612*	0.609*	0.604*
	总孔隙度 Total porosity	0.826**	0.722**	0.395	0.722**
	土壤通气度 Soil aeration	0.845**	0.796**	0.013	0.729**
	pH	-0.936**	-0.923**	-0.845**	0.176
土壤化学性质 Soil chemical properties	有机碳 Organic carbon	0.934**	0.787**	0.925**	0.934**
	有机质 Organic matter	0.934**	0.787**	0.925**	0.934**
	全氮 Total nitrogen	0.180	0.665**	0.960**	0.936**
	全磷 Total phosphorus	0.473	0.378	-0.497	-0.003
	全钾 Total potassium	-0.104	-0.527*	-0.789**	-0.863**
	碳氮比 C/N ratio	0.667**	0.669**	-0.002	0.419

注:表中数据为相关系数; ** 在 $P<0.01$ 显著性水平(双侧)上显著相关; * 在 $P<0.05$ 显著性水平(双侧)上显著相关。
Note:The data in the table are correlation coefficients; ** significant correlation at $P<0.01$ significance level (bilateral); * significant correlation at $P<0.05$ significance level (bilateral).

由表 5 可知,染色面积比与土壤理化性质具有一定的相关性。云南松林的染色面积比与土壤容重、pH 均呈极显著负相关($P<0.01$),与饱和持水量、毛管持水量、非毛管孔隙度、毛管孔隙度、总孔隙度、土壤通气度、有机碳含量、有机质含量以及土壤碳氮比呈极显著正相关关系($P<0.01$)。华山松林的染色面积比与毛管持水量、毛管孔隙度显著正相关($P<0.05$),与土壤容重、pH 极显著负相关($P<0.01$),与全钾含量显著负相关($P<0.05$),与田间

持水量、全磷含量相关性不显著($P>0.05$),与其他土壤因子均达到极显著正相关($P<0.01$)。滇油杉林的染色面积比与初始含水率、毛管持水量、毛管孔隙度均呈显著正相关($P<0.05$),与饱和持水量、田间持水量、有机碳含量、有机质含量、全氮含量呈极显著正相关($P<0.01$),与容重、pH、全钾含量表现为负相关关系,且与 pH 和全钾含量的负相关关系极显著($P<0.01$)。高山栎林的染色面积比与土壤容重和全钾含量呈极显著负相关($P<0.01$),与土

壤田间持水量、pH、全磷含量、土壤碳氮比的相关性不强,与其他土壤因子显著 ($P<0.05$) 或极显著 ($P<0.01$) 正相关。由于林分的差异,染色面积比与土壤理化性质表现的相关性不同,整体来看,除土壤容重、pH、全钾含量外,染色面积比与其他土壤因子均呈正相关关系,说明土壤理化性质与优先流的形成密切相关。

2.3.2 土壤因子对土壤优先流的主成分分析 表 6 为土壤因子对土壤优先流的主成分分析中各主成分的特征及载荷值。由表 6 可知,主成分 1、主成分 2、主成分 3、主成分 4 的特征值均大于 1,4 个主成分的累积方差贡献率为 90.208%,说明 4 个主成分影响土壤优先流形成的有效信息占 90.208%,有 9.792%的信息损失。其中,主成分 1 的方差贡献率最大,为 63.459%,故主成分 1 最能反映诸多土壤

因子中影响优先流形成的驱动因素。将主成分 1 中载荷值大于 0.8 的土壤因子按载荷绝对值大小排序依次为: X_8 (0.950)、 X_7 (0.929)、 X_4 (0.929)、 X_{11} (0.915)、 X_{12} (0.915)、 X_3 (0.914)、 X_{13} (0.896)、 X_6 (0.891)、 X_9 (0.891)、 X_1 (0.868)、 X_5 (0.833),且均为正载荷,这 11 个土壤因子是对主成分 1 影响较大的特征向量,说明主成分 1 是由这 11 个土壤因子共同组成的一个综合指标。主成分 2 的方差贡献率为 10.604%,在 pH (X_{10}) 上有较高的正载荷值 (0.759),说明 pH 是决定主成分 2 的主要因子。主成分 3、主成分 4 的方差贡献率均表现在全磷含量 (X_{14}) 上,但载荷值不足 0.7。综合以上 4 个主成分的特点,可以认为以上 13 个土壤因子能较好地反映土壤理化性质对土壤优先流的影响,阐释了该研究区范围内土壤优先流形成的驱动因素。

表 6 滇中磨盘山不同林分类型土壤因子对土壤优先流影响的主成分分析中各主成分的特征及载荷值
Table 6 Characteristics and load values of principal components in principal component analysis on impacts of soil factors on soil preferential flow of Mopan Mountain in Central Yunnan

主成分 Principal component	特征值 Characteristic value	方差贡献率/% Variance contribution rate	方差累积贡献率/% Cumulative contribution rate of variance	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	X_6
1	10.788	63.459	63.459	0.868	-0.644	0.914	0.929	0.833	0.891
2	1.803	10.604	74.063	0.014	-0.099	0.087	0.288	0.409	-0.021
3	1.564	9.199	83.261	-0.082	-0.366	-0.235	-0.114	-0.011	-0.289
4	1.181	6.946	90.208	-0.188	0.505	-0.060	0.106	0.151	-0.008

主成分 Principal component	X_7	X_8	X_9	X_{10}	X_{11}	X_{12}	X_{13}	X_{14}	X_{15}	X_{16}
1	0.929	0.950	0.891	-0.557	0.915	0.915	0.896	0.284	-0.715	0.572
2	0.288	0.212	-0.021	0.759	-0.014	-0.014	0.082	-0.396	0.488	-0.653
3	-0.114	-0.167	-0.289	-0.118	0.318	0.318	0.316	0.487	0.367	-0.215
4	0.106	0.078	-0.008	0.003	0.114	0.114	0.172	0.666	0.044	-0.257

注: X_1 . 初始含水率; X_2 . 土壤容重; X_3 . 饱和持水量; X_4 . 毛管持水量; X_5 . 田间持水量; X_6 . 非毛管孔隙度; X_7 . 毛管孔隙度; X_8 . 总孔隙度; X_9 . 土壤通气度; X_{10} . pH; X_{11} . 有机碳含量; X_{12} . 有机质含量; X_{13} . 全氮含量; X_{14} . 全磷含量; X_{15} . 全钾含量; X_{16} . 碳氮比。
Note: X_1 . Initial moisture content; X_2 . Soil bulk density; X_3 . Saturation moisture capacity; X_4 . Capillary moisture capacity; X_5 . Field moisture capacity; X_6 . Non-capillary porosity; X_7 . Capillary porosity; X_8 . Total porosity; X_9 . Soil aeration; X_{10} . pH; X_{11} . Organic carbon content; X_{12} . Organic matter content; X_{13} . Total nitrogen content; X_{14} . Total phosphorus content; X_{15} . Total potassium content; X_{16} . C/N ratio.

16 个土壤因子与染色面积比的主成分分析结果如图 5 所示,田间持水量(X_5)、毛管孔隙度(X_7)、毛管持水量(X_4)、总孔隙度(X_8)、饱和持水量(X_3)、全氮含量 (X_{13})、初始含水率 (X_1)、土壤通气度 (X_9)、非毛管孔隙度 (X_6)、有机碳含量 (X_{11}) 位于第一象限,这 10 个土壤因子与染色面积比(Y)方向基本一致,说明此类土壤因子与染色面积比的变化趋势呈正相关。其中,田间持水量与染色面积比特征向量所构成的夹角最小,毛管孔隙度次之,说明染色

面积比对田间持水量的变化最为敏感,而毛管孔隙度与染色面积比的关系密切,表明田间持水量、毛管孔隙度随土层深度的变化对染色面积比变化存在显著的正效应关系,是直接影响优先流形成的土壤因子。pH(X_{10})、全钾含量(X_{15})位于第二象限,有机质含量(X_{12})、全磷含量(X_{14})、碳氮比(X_{16})位于第四象限,这 5 个土壤因子与染色面积比特征向量的夹角稍大,对优先流的作用虽趋于正效应但敏感性不强,此类土壤因子主要是通过改变其他土壤因子

(处于第一象限的因子)而对优先流的发生产生间接影响。此外,土壤容重(X_2)位于第三象限,与染色面积比特征向量的方向相反,且夹角接近 180° ,表明土壤容重随土层深度的变化与染色面积比呈反向变化,土壤容重对优先流的形成具有抑制作用。鉴于此,进一步说明土壤理化性质是影响土壤优先流形成的重要因素之一,与上文染色面积比和土壤理化性质的相关性分析结果一致。

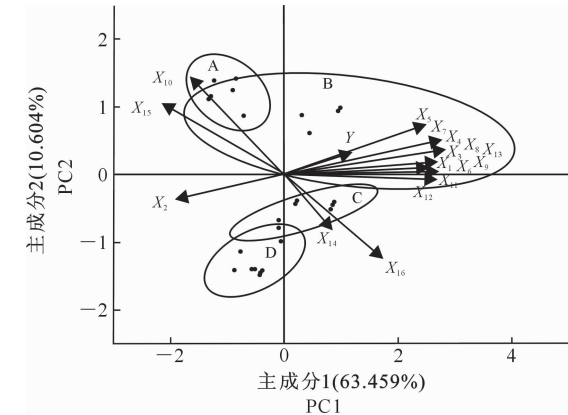


图 5 滇中磨盘山不同林分类型土壤因子与土壤优先流染色面积比的主成分分析

Fig. 5 Principal component analysis on soil factors and soil preferential flow dyeing area ratio of different stand types of Mopan Mountain in Central Yunnan

2.3.3 土壤因子对土壤优先流的通径分析 表 7 为土壤优先流染色面积比与土壤因子的通径系数。

表 7 滇中磨盘山不同林分类型土壤优先流染色面积比与土壤因子的通径系数

Table 7 Path coefficients of dyeing area ratio of soil preferential flow and soil factors of different stand types of Mopan Mountain in Central Yunnan

土壤因子 Soil factor	相关系数 Correlation coefficient	直接通径系数 Direct path coefficient	间接通径系数(间接作用) Indirect path coefficient (indirect action)										
			X_1	X_2	X_3	X_5	X_9	X_{10}	X_{12}	X_{13}	X_{14}	X_{15}	X_{16}
X_1	0.413	0.653	—	0.488	-0.646	0.297	0.145	0.256	2.557	-2.763	0.008	0.167	-0.750
X_2	-0.635	-0.902	-0.353	—	0.429	-0.203	-0.091	-0.194	-2.176	2.494	0.000	-0.086	0.446
X_3	0.222	-0.748	0.564	0.517	—	0.323	0.167	0.256	2.547	-2.966	0.006	0.188	-0.632
X_5	0.299	0.418	0.464	0.438	-0.578	—	0.127	0.099	2.466	-2.931	0.015	0.107	-0.325
X_9	0.213	0.197	0.479	0.415	-0.635	0.270	—	0.317	2.452	-2.787	0.008	0.178	-0.682
X_{10}	-0.292	-0.633	-0.264	-0.277	0.303	-0.066	-0.099	—	-1.855	1.862	-0.036	-0.177	0.951
X_{12}	0.471	3.373	0.495	0.582	-0.565	0.306	0.143	0.348	—	-3.841	0.034	0.137	-0.542
X_{13}	0.424	-3.903	0.462	0.576	-0.568	0.314	0.141	0.302	3.319	—	0.033	0.128	-0.379
X_{14}	0.102	0.076	0.065	0.005	-0.061	0.082	0.021	0.297	1.511	-1.710	—	0.049	-0.236
X_{15}	-0.044	-0.256	-0.427	-0.301	0.548	-0.175	-0.137	-0.439	-1.811	1.955	-0.015	—	1.013
X_{16}	0.210	-1.284	0.381	0.313	-0.368	0.106	0.105	0.469	1.423	-1.151	0.014	0.202	—

袁志发等^[29]指出在通径分析中,决策系数(R^2)便于确定各个变量中的决定性因子和限制性因子,当 $R^2 > 0$,表明自变量 X_i 对 Y 起决定性作用;反之当 $R^2 < 0$,表明自变量 X_i 对 Y 起限制性作用。根据表 7 中的通径系数计算 11 个土壤因子的决策系数。

由表 7 可知,土壤理化性质对土壤优先流的形成既有直接作用又有间接作用,对染色面积比有直接影响的土壤因子主要是:全氮含量(X_{13})、有机质含量(X_{12})、碳氮比(X_{16})、土壤容重(X_2)、饱和持水量(X_3)、初始含水率(X_1)、pH(X_{10}),直接通径系数绝对值达到 0.63 以上,其余自变量的直接通径系数绝对值不足 0.42。其中,全氮含量(X_{13})对染色面积比的直接负效应最大,为 -3.903;有机质含量(X_{12})的直接正效应最大,为 3.373。田间持水量(X_5)、全钾含量(X_{15})、土壤通气度(X_9)、全磷含量(X_{14})对染色面积比的直接作用相对较小,对土壤优先流的影响更多地取决于通过其他土壤因子形成的间接作用。比较田间持水量(X_5)、全钾含量(X_{15})、土壤通气度(X_9)、全磷含量(X_{14})的间接作用可以看出,这 4 个土壤因子主要是通过控制全氮含量(X_{13})对土壤优先流的形成间接造成最大的负效应或正效应,其间接通径系数分别是田间持水量(-2.931)、全钾含量(1.955)、土壤通气度(-2.787)、全磷含量(-1.710),间接通径系数的绝对值均大于 1.70。综合以上分析可知,土壤理化性质的差异是影响土壤优先流形成与发生的重要因素,直接影响因子主要有全氮含量、有机质含量、碳氮比、土壤容重、饱和持水量、初始含水率、pH 等,而间接影响因子主要通过作用于全氮含量、有机质含量等土壤因子而起作用。

按决策系数大小排序为: $X_2(0.332) > X_1(0.113) > X_5(0.075) > X_9(0.045) > X_{14}(0.010) > X_{10}(-0.031) > X_{15}(-0.043) > X_3(-0.892) > X_{16}(-2.188) > X_{12}(-8.200) > X_{13}(-18.543)$,故通径分析筛选的 11 个土壤因子中,土壤容重(X_2)是

影响土壤优先流形成的决定性因子,全氮含量(X_{13})是限制性因子,全氮含量通过改变其他因子的间接作用来限制土壤优先流的形成。

3 讨论

通过染色示踪试验,拍照并解析研究区4种林分土壤垂直剖面染色图像,可获取土壤优先流形态特征和数量特征,研究表明4种林分土壤优先流现象比较明显,林地土壤质地属壤土类,具有较好的渗透性,容易形成优先流^[30]。不同林分土壤优先流形态特征和数量特征存在差异,针叶林地优先流的发育程度大于阔叶林地,具体表现为华山松林>云南松林>滇油杉林>高山栎林,这与阮芯竹等^[19]得出重庆四面山林地土壤优先流染色面积比、染色深度变化规律表现为阔叶林>针叶林的研究结论相反,分析其原因,可能是由于本研究区位于滇中地区,植被类型、土壤性质等因素与重庆四面山有差异,因此优先流的形态特征与发育程度也不尽相同,侯芳等^[31]也认为群落空间结构复杂的林分优先流发育较明显。4种林分垂直剖面的染色面积比随土壤深度增加呈逐渐减小的趋势,与阮芯竹等^[10]、侯芳等^[31]在重庆四面山及笔者等^[32]在滇南地区的研究结论一致。表层土壤被亮蓝溶液大面积染色,说明表层土壤水分运动是基质流引起的,而优先流主要发生在浅层基质流以下的土层中,这与王赵男等^[1]、程竞萱等^[13]的研究结果一致。本研究中华山松林地的染色面积比随土层深度的波动程度不大,整体呈现反“S”形,而云南松林和滇油杉林的染色面积比曲线多次出现波峰,整体呈现出“先减小、再增加、又减小”的“Z”字形变化趋势,这主要是由土壤的异质性引起的,随着土层深度的增加,优先流也表现出一定的空间异质性^[13]。优先流现象主要发生在40 cm以上土层中,深层土壤紧实、渗透性差,水分向下运动困难,优先流现象也难以发生,此解释在刘目兴等^[22]的研究结果中得到进一步证实。

森林土壤作为森林生态系统的重要组成部分,为林木的存活和繁育提供了场所^[33]。本研究结果表明,研究区内4种林分土壤理化性质存在显著差异($P<0.05$),这是因为不同林分类型的树种特性各异,因此对其生长环境产生的影响作用也不同。张发会等^[34]研究也发现,不同林分类型对土壤理化性质有不同的影响作用。林分土壤理化性质影响林木对土壤养分的保持和吸收^[35],进而影响林木的生长状况;反过来,林木利用林地空间结构和维持地

力,也会因此改善林分土壤理化性质^[36]。除土壤容重外,初始含水率、土壤孔隙度等其他土壤物理性质指标随土层深度的增加基本逐渐减小,这与孙龙等^[37]研究证明不同土层深度的土壤特性有较大差异的结论一致。土壤初始含水率表层高于深层,这是因为天然林地表凋落物层较厚,土壤蒸发量少,表层土壤贮存水分较多,这与张发会等^[34]的研究结果一致。此外,余蔚青等^[38]研究发现,土壤孔隙度、饱和持水量主要受土壤容重和土壤质地的影响,深层土壤比表层土壤更紧实,土壤孔隙度(包括毛管孔隙度、非毛管孔隙度以及总孔隙度)均表现为表层高于深层,土壤毛管持水量、饱和持水量随土层加深不断减小,即土壤由表及里持水能力不断下降,本研究结果也证实了这一观点。本研究中除pH、全钾含量外,有机质和全氮含量等其他土壤化学性质随土层深度的增加也呈下降趋势,说明土壤养分含量具有“表聚性”特征^[34],这与刘振华等^[36]的研究结果一致。

优先流的形成受土壤理化性质的影响,这与程金花等^[11]和陈晓冰^[28]的研究结论一致。本研究将土壤理化性质与染色面积比进行相关分析,发现初始含水率、土壤容重等土壤因子与染色面积比有显著相关性($P<0.05$),除土壤容重、pH、全钾含量与染色面积比表现为负相关关系外,其他土壤因子均表现为正相关。4种林分染色面积比均与土壤容重呈极显著负相关($P<0.01$),这与邵一敏等^[30]的研究结论一致。李卓等^[39]研究表明,土壤容重越大,大孔隙数量越少,土壤入渗能力越差,越不利于优先流的形成。程竞萱等^[13]发现,优先流的形成受土壤化学性质影响较大,随着土层深度的增加,全氮和有机质含量变化总体呈减少趋势,土壤优先流染色面积比也逐渐减小。通过主成分分析发现,田间持水量、毛管孔隙度与染色面积比位于同一方向且夹角最小,说明其对优先流的形成产生直接影响。Radulovich等^[40]将土壤达到田间持水量时排水的孔隙定义为大孔隙,程竞萱等^[13]认为土壤大孔隙具有促进优先流产生的作用,而土壤大孔隙独有的持水特性恰恰是诱导土壤优先流路径形成的原因之一。主成分分析结果表明,土壤容重与染色面积比方向相反且呈最大夹角,表明土壤容重对优先流的形成具有抑制作用。笔者前期的研究也发现,土壤容重小,透水性好,孔隙数量多,有利于优先流路径形成^[32]。土壤优先流的形成是一个复杂的过程,初始含水率、土壤容重等土壤理化性质与染色面积比

耦合程度较高,说明各个土壤因子共同作用影响优先流的发生。其中,有机质含量、土壤容重、初始含水率、pH 等土壤因子有较大的直接通径系数,对优先流的形成起直接作用,同时也通过其他土壤因子的间接作用对优先流的形成产生间接影响。林地土壤表层枯落物和腐殖质可增加土壤有机质含量,使得土壤形成更多的团粒结构,提高孔隙通透性^[12],间接增加土壤优先流形成的概率^[13]。通径分析表明,土壤容重是优先流形成的决定性因子,土壤容重在一定程度上影响其他土壤性质,土壤容重小,则土质疏松、孔隙数量多,可提高水分入渗和土壤持水能力,增加土壤含水率^[32]。全氮含量是重要的土壤肥力特征指标,而氮素是植物或林木生长所需的必要营养元素,全氮含量较高的土壤有利于林木生长,同时可促进根系在土壤中的分布和生长。程昊天等^[41]发现,不同林龄樟子松生长均受到氮素限制,且根际土壤氮素含量高于非根际土壤,但是根系生长会在一定程度上破坏土壤优先流路径,不利于优先流的形成^[11,13],因此全氮含量主要通过控制林木或植物根系生长间接抑制土壤优先流的形成,成为影响优先流形成的限制性因子。

土壤优先流研究是土壤水分运动中的热点和难点,影响土壤优先流形成的因素较多,除土壤理化性质外,植物根系也是影响优先流形成的重要因素^[11,13,30]。笔者认为,径级 ≤ 1 mm 的细根系对优先流路径的形成起着关键作用^[32]。牛健植等^[14]提出优先流的产生是静态和动态因素作用的结果,静态因素(土壤性质、生物因素、土壤含水率)通过土壤基本性质反映出来,而动态因素表现在降雨强度、灌溉方式、冻融和干湿交替等方面。本研究只针对土壤理化性质对优先流形成的影响进行了定性描述和定量分析,从静态因素的角度系统阐释了优先流的形成机理,试验结果一定程度上受动态因素的干扰。如何量化动态因素与优先流的关系以及静态、动态因素对优先流的共同作用是亟待解决的问题,尚需花费大量时间进一步探索,明确优先流的形成机理,为森林涵养水源以及植被生态建设提供一定的理论基础和科学依据。

4 结 论

(1)滇中磨盘山 4 种林分优先流现象明显,比较其形态特征和数量特征,优先流现象在针叶林地更突出,优先流发育程度为华山松林>云南松林>滇油杉林>高山栎林。表层土壤水分运动是基质流主

导,随着土层深度的增加,染色面积比呈减小的趋势。

(2)不同林分、不同土层的土壤理化性质存在显著差异($P<0.05$)。相较云南松、滇油杉和高山栎林地,华山松林地的土壤疏松程度、持水特性、土壤肥力特征等理化性质明显表现出一定的优势。

(3)土壤因子与染色面积比存在一定的相关性,土壤容重、pH、全钾含量表现为负相关关系,其中土壤容重与染色面积比呈极显著负相关($P<0.01$)。

(4)土壤理化性质是影响土壤优先流形成的重要因素,是土壤容重、初始含水率、田间持水量、全氮含量等土壤因子共同作用的结果,其中土壤容重是引起优先流染色面积比变化的决定性因子,全氮含量对优先流的形成起着限制性作用。

[参考文献]

- [1] 王赵男,辛颖,赵雨森. 黑龙江省水源区优先流区与基质流区土壤特性分析 [J]. 水土保持学报, 2017, 31(1): 49-54.
Wang Z N, Xin Y, Zhao Y S. Analysis on soil characters of preferential pathways and soil matrix in water-source area of Heilongjiang province [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2017, 31(1): 49-54.
- [2] 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): 179-204.
- [3] 石辉,刘世荣. 森林土壤大孔隙特征及其生态水文学意义 [J]. 山地学报, 2005, 23(5): 23-29.
Shi H, Liu S R. The macroporosity properties of forest soil and its eco-hydrological significance [J]. Mountain Research, 2005, 23(5): 23-29.
- [4] Sukhija B S, Reddy D V, Nagabhushanam P, et al. Recharge processes: piston flow vs preferential flow in semi-arid aquifers of India [J]. Hydrogeology Journal, 2003, 11(3): 387-395.
- [5] 刘世荣,孙鹏森,温远光. 中国主要森林生态系统水文功能的比较研究 [J]. 植物生态学报, 2003(1): 16-22.
Liu S R, Sun P S, Wen Y G. Comparative analysis of hydrological functions of major forest ecosystems in China [J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2003(1): 16-22.
- [6] 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.
Lü G, Jin Z L, Ling S, et al. Characteristics of soil preferential flow in water conservation forest at Hunhe River source [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2019, 33(4): 287-292.
- [7] 牛健植,余新晓,邵文伟,等. 森林生态系统优先流研究 [M]. 北京: 科学出版社, 2013.
Niu J Z, Yu X X, Shao W W, et al. Research on preferential flow in forest ecosystems [M]. Beijing: Science Press, 2013.
- [8] 张财宝,刘目兴,王文德,等. 三峡库区森林土壤优先流染色特征 [J]. 水土保持学报, 2012, 26(2): 80-84.

- Zhang C B, Liu M X, Wang W D, et al. Dyeing characteristic of preferential flow under forestland in the Three Gorges Reservoir area [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2012, 26 (2): 80-84.
- [9] Bundt M, Widmer F, Pesaro M, et al. Preferential flow paths: biological 'hot spots' in soils [J]. Soil Biology and Biochemistry, 2001, 33(6): 729-738.
- [10] 阮芯竹. 重庆四面山不同土地利用类型优先路径特征 [D]. 北京: 北京林业大学, 2016.
- Ruan X Z. The characteristics of priority path in different land use types at Simian Mountain in Chongqing [D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2016.
- [11] 程金花, 张洪江, 张晓晖, 等. 重庆四面山根系及土壤特性对优先路径分布的影响 [J]. 世界科技研究与发展, 2011, 33(4): 519-523.
- Cheng J H, Zhang H J, Zhang X H, et al. Effect of roots and soil properties on preferential flow paths distribution in Simian Mountains, Chongqing [J]. World Sci-Tech Research & Development, 2011, 33(4): 519-523.
- [12] 官琦, 徐则民, 田林. 植被发育玄武岩斜坡土体大孔隙尺寸及其主要影响因素 [J]. 应用生态学报, 2013, 24(10): 2888-2896.
- Guan Q, Xu Z M, Tian L. Sizes of soil macropores and related main affecting factors on a vegetated basalt slope [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2013, 24(10): 2888-2896.
- [13] 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 [J]. 河南农业大学学报, 2018, 52(6): 973-982.
- Cheng J X, Cheng J H, Zheng X, et al. Characteristics of soil preferential flow and its influencing factors under different vegetation cover [J]. Journal of Henan Agricultural University, 2018, 52(6): 973-982.
- [14] 牛健植, 余新晓, 张志强. 优先流研究现状及发展趋势 [J]. 生态学报, 2006, 2(1): 231-243.
- Niu J Z, Yu X X, Zhang Z Q. The present and future research on preferential flow [J]. Acta Ecologica Sinica, 2006, 2(1): 231-243.
- [15] 盛丰, 张利勇, 吴丹. 土壤优先流模型理论与观测技术的研究进展 [J]. 农业工程学报, 2016, 32(6): 1-10.
- Sheng F, Zhang L Y, Wu D. Review on research theories and observation techniques for preferential flow in unsaturated soil [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2016, 32(6): 1-10.
- [16] 张欣, 张洪江, 张福明, 等. 西南山区农地土壤前期含水量对优先流的影响 [J]. 水土保持学报, 2014, 28(2): 1-7.
- Zhang X, Zhang H J, Zhang F M, et al. Effect of antecedent soil moisture on preferential flow in agricultural land of south-west mountainous [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2014, 28(2): 1-7.
- [17] 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 [J]. 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 [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2009, 40(1): 101-108.
- [18] 时忠杰, 王彦辉, 徐丽宏, 等. 六盘山森林土壤的石砾对土壤大孔隙特征及出流速率的影响 [J]. 生态学报, 2008, 28(10): 4929-4939.
- Shi Z J, Wang Y H, Xu L H, et al. The influence of rock fragments on the characteristics of macropore and water effluent of forest soils in the Liupan Mountains, Northwest China [J]. Acta Ecologica Sinica, 2008, 28(10): 4929-4939.
- [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 [J]. 水土保持学报, 2015, 29(3): 68-74, 80.
- Ruan X Z, Cheng J H, Zhang H J, et al. Soil macropore characteristics of different woodland and their influencing factors on Simian Mountain in Chongqing [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2015, 29(3): 68-74, 80.
- [20] 连经纬, 胡海波, 王灿, 等. 枫香麻栎混交林土壤优先流特征及其对碳运移的影响 [J]. 中国农业科技导报, 2019, 21(8): 122-131.
- Lian J W, Hu H B, Wang C, et al. Influences of soil preferential flow on carbon transport in *Liquidambar formosana* and *Quercus acutissima* mixed forest [J]. Journal of Agricultural Science and Technology, 2019, 21(8): 122-131.
- [21] 牛健植, 余新晓, 张志强. 贡嘎山暗针叶林生态系统基于 KDW 运动-弥散波模型的优先流研究 [J]. 生态学报, 2007, 5(9): 3541-3555.
- Niu J Z, Yu X X, Zhang Z Q. Study on soil preferential flow in the dark coniferous forest of Gongga Mountain based on the kinetic wave model with dispersion wave (KDW preferential flow model) [J]. Acta Ecologica Sinica, 2007, 5(9): 3541-3555.
- [22] 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.
- Liu M X, Du W Z. To investigate soil preferential flow paths in mountain areas using dye tracer [J]. Acta Pedologica Sinica, 2013, 50(5): 871-880.
- [23] 张雨鉴, 王克勤, 宋娅丽, 等. 滇中亚高山森林植物叶-凋落叶-土壤生态化学计量特征 [J]. 生态学报, 2020, 40(21): 7648-7658.
- Zhang Y J, Wang K Q, Song Y L, et al. C, N and P stoichiometric characteristics of leaf, litter and soil for subalpine forests in central Yunnan, China [J]. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(21): 7648-7658.
- [24] 张亚庆, 胡慧蓉. 滇中磨盘山几种典型林分枯落物及土壤的持水特性 [J]. 江苏农业科学, 2019, 47(15): 296-301.
- Zhang Y Q, Hu H R. Water-holding capacity of several typical forest litters and soil in Mopan Mountain of Yunnan province [J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2019, 47(15): 296-301.
- [25] 李科, 李志军. 土壤农化分析方法 [M]. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- Li K, Li Z J. Soil agrochemical analysis method [M]. Beijing: China Agricultural Press, 2000.
- [26] 王亚萍, 费学谦, 姚小华, 等. 不同产地油茶籽脂肪酸及甘油三

酯的主成分分析和聚类分析 [J/OL]. 中国油脂, 2021; 1-13. (2021-01-06) [2021-08-20]. <https://doi.org/10.19902/j.cnki.zgyz.1003-7969.2021.01.100>.

Wang Y P, Fei X Q, Yao X H, et al. Principal component analysis and cluster analysis of fatty acids and triglycerides in camellia seeds from different origins [J/OL]. China Oils and Fats, 2021; 1-13. (2021-01-06) [2021-08-20]. <https://doi.org/10.19902/j.cnki.zgyz.1003-7969.2021.01.100>.

[27] 李艳双, 曾珍香, 张 阒, 等. 主成分分析法在多指标综合评价方法中的应用 [J]. 河北工业大学学报, 1999, 28(1): 94-97.

Li Y S, Zeng Z X, Zhang M, et al. Application of principal component analysis in multi index comprehensive evaluation method [J]. Journal of Hebei University of Technology, 1999, 28(1): 94-97.

[28] 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.

[29] 袁志发, 周静芊, 郭满才, 等. 决策系数: 通径分析中的决策指标 [J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2001, 29(5): 131-133.

Yuan Z F, Zhou J Y, Guo M C, et al. Decision coefficient; the decision index of path analysis [J]. Journal of Northwest A&F University (Nat Sci Ed), 2001, 29(5): 131-133.

[30] 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.

[31] 侯 芳, 程金花, 祁生林, 等. 重庆四面山不同林地类型优先流特征及染色形态定量评价 [J]. 西南林业大学学报(自然科学), 2021, 41(2): 107-117.

Hou F, Cheng J H, Qi S L, et al. Characteristics of preferential flow and quantitative evaluation of dyeing morphology in different forest types on Simian Mountain in Chongqing [J]. Journal of Southwest Forestry University (Natural Science), 2021, 41(2): 107-117.

[32] 卢华兴, 段 旭, 赵洋毅, 等. 滇南地区普洱茶树根系对土壤优先路径形成的影响 [J]. 水土保持学报, 2021, 35(4): 80-87.

Lu H X, Duan X, Zhao Y Y, et al. Effect of root of Pu'er tea on the formation of soil priority path in southern Yunnan [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2021, 35(4): 80-87.

[33] 葛晓改, 黄志霖, 程瑞梅, 等. 三峡库区马尾松人工林凋落物和根系输入对土壤理化性质的影响 [J]. 应用生态学报, 2012, 23(12): 3301-3308.

Ge X G, Huang Z L, Cheng R M, et al. Effects of litterfall and root input on soil physical and chemical properties in *Pinus massoniana* plantations in Three Gorges Reservoir area, China [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2012, 23(12): 3301-3308.

[34] 张发会, 吴雪仙, 蔡小虎, 等. 川西亚高山 3 种不同林分类型对土壤理化性质的影响 [J]. 四川林业科技, 2015, 36(3): 8-12.

Zhang F H, Wu X X, Cai X H, et al. The influence of three different forest types on soil physical and chemical properties in subalpine areas of Western Sichuan [J]. Journal of Sichuan Forestry Science and Technology, 2015, 36(3): 8-12.

[35] 陈 雪, 马履一, 贾忠奎, 等. 影响油松人工林土壤质量的关键指标 [J]. 中南林业科技大学学报, 2012, 32(8): 46-51.

Chen X, Ma L Y, Jia Z K, et al. Key indexes affecting soil quality of *Pinus tabulaeformis* plantation [J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology, 2012, 32(8): 46-51.

[36] 刘振华, 李 贵, 陈 瑞, 等. 湖南不同混交模式林分土壤化学性质的差异 [J]. 中南林业科技大学学报, 2018, 38(9): 14-19, 25.

Liu Z H, Li G, Chen R, et al. Soil chemical properties of different mixed forests in Hunan province [J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology, 2018, 38(9): 14-19, 25.

[37] 孙 龙, 张洪江, 程金花, 等. 重庆江津区柑橘地土壤大孔隙特征 [J]. 水土保持学报, 2012, 26(3): 194-198.

Sun L, Zhang H J, Cheng J H, et al. Soil macropore characteristics under Citrus land in Jiangjin City, Chongqing [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2012, 26(3): 194-198.

[38] 余蔚青, 王玉杰, 胡海波, 等. 长三角丘陵地不同植被林下土壤入渗特征分析 [J]. 土壤通报, 2014, 45(2): 345-351.

Yu W Q, Wang Y J, Hu H B, et al. Soil water infiltration characteristics analysis under different vegetation on the Hilly Ground of Yangtze River Delta [J]. Chinese Journal of Soil Science, 2014, 45(2): 345-351.

[39] 李 卓, 吴普特, 冯 浩, 等. 容重对土壤水分入渗能力影响模拟试验 [J]. 农业工程学报, 2009, 25(6): 40-45.

Li Z, Wu P T, Feng H, et al. Simulated experiment on effect of soil bulk density on soil infiltration capacity [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2009, 25(6): 40-45.

[40] Radulovich R, Solorzano E, Sollins P. Soil macropore size distribution from water breakthrough curves [J]. Soil Science Society of America Journal, 1989, 53(2): 556-559.

[41] 程昊天, 孔 涛, 吕 刚, 等. 不同林龄樟子松人工林根际与非根际土壤生态化学计量特征 [J]. 浙江农林大学学报, 2021, 38(5): 1058-1065.

Cheng H T, Kong T, Lü G, et al. Ecological stoichiometric characteristics of rhizosphere and non-rhizosphere soil of *Pinus sylvestris* var. *mongolica* plantations at different ages [J]. Journal of Zhejiang Agriculture & Forestry University, 2021, 38(5): 1058-1065.