

DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2024.05.037.

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 Xueqi, Cheng Jinhua, Guan Ning, 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.

喀斯特地区典型植被根系对优先流的影响

师雪淇, 程金花, 管凝, 侯芳, 沈子雅

(北京林业大学 水土保持学院, 北京 100083)

摘要: [目的]揭示西南喀斯特地区优先流特征及根系对其影响,明确不同植被类型根系对优先流程度的影响,为当地植被恢复和水源涵养提供依据。[方法]以云南喀斯特地区 3 种典型林分为研究对象,采用野外染色示踪和统计分析相结合的方法,获得优先流形态特征与染色面积比,结合植物根长密度等 4 个根系特征参数,运用单因素方差法分析不同林分类型下的优先流程度。[结果](1) 3 种典型林分根系特征总体呈现天然次生林>天然混交林>人工纯林。(2) 不同林分最大染色深度为 20—30 cm,随深度增加呈现减少的趋势,垂直剖面 and 水平剖面均反映出土壤水分发生侧渗。(3) 0—2 cm 土层出现基质流,随着土层加深其余染色剖面呈指状或漏斗状流动,并显示出明显的根系路径。混交林中优先流主要的运移方式是垂直下渗,而纯林横向流发育程度较高,天然次生林的优先流比最大且长度指数最小,表明复杂的根系结构能有效加强水分在土壤中的运移深度。[结论]3 种典型林分根系特征参数与优先流发育密切相关且均有促进作用,但不同林分类型根系指标与优先流发育程度相关性不同。天然次生林的根系指标均呈现负相关关系;人工纯林的根长密度和根表面积密度呈现正相关关系,根体积密度和根生物量密度呈现负相关关系;天然混交林的根系指标均呈现正相关关系。

关键词: 水土保持与荒漠化防治; 根系; 林地; 优先流; 喀斯特地区

中图分类号: S157.1

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2024)05-0073-11

Influence of Root System on Preferential Flow in a Typical Forest Stand in Karst Region

Shi Xueqi, Cheng Jinhua, Guan Ning, Hou Fang, Shen Ziya

(School of Soil and Water Conservation, Beijing Forest University, Beijing 100083, China)

Abstract: [Objective] The aims of this study are to reveal the characteristics of preferential flow and the influence of root system on it in southwest karst region, to clarify the influence of root system on the degree of preferential flow of different vegetation types, and to provide a basis for local vegetation restoration and water conservation. [Methods] Three typical forest types in Yunnan karst region were selected as the research objects. Field dye tracing and statistical analysis were combined to obtain the vertical and horizontal profile morphological characteristics of preferential flow and the dye area ratio. Combined with four root system parameters including root length density, root surface area density, root volume density, and root biomass density, the degree of preferential flow caused by root systems in different forest types was calculated using one-way analysis of variance, in order to determine the influence of root systems on preferential flow. [Results] (1) The overall characteristics of the root systems in the three typical forest types were natural secondary forest>natural mixed forest>artificial pure forest. (2) The maximum dye depth in different forest types was 20—30 cm, showing a decreasing trend with increasing depth. Both the

收稿日期: 2023-09-25

修回日期: 2023-11-14

资助项目: 国家自然科学基金“喀斯特地区土石二元结构下优先流对坡面水文过程影响机理”(32071839)

第一作者: 师雪淇(1999—), 女, 山西省临汾市尧都区人, 硕士研究生, 主要从事流域治理研究。E-mail: 912752457@qq.com

通信作者: 程金花(1979—), 女, 山东聊城市人, 教授, 博士生导师, 主要从事水土保持研究。E-mail: jinhua_cheng@126.com

<http://stbcyj.paperonce.org>

vertical and horizontal profiles reflected the lateral seepage of soil moisture. (3) The matrix flow appeared in the surface layer of soil, and the remaining dye profiles showed a downward flow pattern resembling fingers or funnels as the soil layer deepened, indicating obvious root paths. The preferential flow in the mixed forest mainly occurred through vertical infiltration, while the horizontal flow development degree was higher in pure forests. Among them, the pure natural forest had the highest preferential flow ratio and the smallest length index, indicating that a complex root structure could effectively enhance the depth of water movement in the soil. (4) The results of one-way analysis of variance between the root system parameters of the three typical forest types and the corresponding dye area all showed $R^2 > 0.8$ at the level of $p < 0.05$, indicating that the root system parameters were closely related to the development of preferential flow and had a promoting effect. [Conclusion] Root characteristics of the three typical forest stands are closely related to the development of the preferential flow and all of them promote the development of the preferential flow, but the correlation between the root indexes and the development of the preferential flow vary among different forest types. Root system indicators of natural secondary forests show negative correlations; root length density and root surface area density of planted pure forests show positive correlations, and root volume density and root biomass density show correlations; root system indicators of natural mixed forests show positive correlations.

Keywords: soil and water conservation and desertification combating; root systems; woodlands; priority streams; karst

土壤优先流指水和溶质沿着优先路径、绕过土壤基质从而快速到达深层或地下水层的现象^[1]。优先流普遍存在于地下土壤中,与水养运移、植被生长发育和自然灾害的发生预防有着密不可分的关系。喀斯特地区独特的地表/地下双层空间结构为土壤裂隙的发育和水土流失提供了重要的通道,将流失的地表土壤填充进碳酸盐裂隙中,为地表浅层植被发育提供了纵向空间^[2]。其中土壤水成为限制植物生长发育的主要因子之一,优先流的存在一定程度上对生境的恢复产生了积极的作用^[3]。

影响优先流的因素有很多,其影响因素依据地区呈现显著差异性^[4],其中根系作为土壤中不可或缺的一部分,却常是最容易被忽略的一环。由于喀斯特地区生境的高异质性,植被根系在不同的演替阶段,根长、根系直径和根系生物量等均发生不同的变化^[5]。植被对土壤有固定作用,对土壤结构改善、肥力发展和土壤生产力发挥积极作用;同时,土壤为植被提供生长要素和生存空间,二者的相互作用使他们紧密联系,植被直接参与土壤中物质循环和能量流动两大生态过程。在土壤水方面,根系可以加快水分及溶质的运移^[6],土壤则是植被吸收利用水分的“库”,因此植被的存在大大加深了地表与地下的交互作用,因此,着重研究根系本身对土壤水分的运移产生的影响显得尤为重要。

中国西南喀斯特地区面积约为 54 万 km^2 ,是世界上最大的喀斯特地貌连续区^[7],且土壤孔隙和裂隙

高度发育,优先流现象十分普遍^[8]。地处亚热带湿润区,热量充足,降水充沛,林地植被茂盛,根系发达,孔隙众多。植物根系作为连接地表与地下唯一的纽带^[9],在浅层土壤中形成一个庞大的交换网,其活根附着的微生物在根附近的生命活动形成一个连贯空隙与死根被分解后形成的通道共同成为优先流的主要通道之一^[10]。研究表明,其中根长密度、根表面积密度^[11]、根体积密度和根系生物量作为林木根系结构的重要指标,影响着优先流过程。为此,本研究以西南喀斯特地区天然次生林、人工纯林和天然混交林 3 种典型林分为研究对象,基于野外染色示踪试验和挖掘法,观察土壤染色剖面,获取植物根系。同时,借助 Image Pro Plus 6.0 对染色图像进行处理、WinRHIZO-pro 根系扫描分析系统对根系特征进行分析并数理统计分析方法进行数据处理,用染色面积比等指标反映优先流特征,用根长密度、根表面积密度、根体积密度及根生物量密度等指标表征根系特征,以期当地生境恢复和植被种植提供一定的理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于云南建水荒漠生态系统国家定位观测研究站内($23^{\circ}37'13''\text{N}$, $102^{\circ}54'12''\text{E}$),海拔 230~2 515 m,光照时间和无霜期较长,属亚热带季风气候,具有夏季炎热多雨,冬季温和少雨的立体气候特

征。研究区土壤主要以石灰岩红壤为主,土壤呈微酸性,pH 为 5.32~6.92。

1.2 研究方法

1.2.1 样地设置 根据研究区的典型林分分布情

况,选取 6 个地势平坦的样地进行染色示踪试验和土壤性质分析,在样地周围采取分层挖剖面的方式采集根系。3 种林分各选取 2 块 10 m×10 m 的样地作为重复,间隔不超过 5 m。样地基本情况如表 1 所示。

表 1 样地基本情况
Table1 Sample plot basics

样地 编号	地理 位置	海拔/ m	坡度/ (°)	所属林分	林下灌木 植被类型	盖度/ %	林木密度/ (株·hm ⁻²)	郁闭度
天然次生林 1	23°38′02″N, 102°54′19″E	1345.95	6	柏树(<i>Cupressus funebris</i>)	车桑子、假虎刺、了哥王、鬼针草(<i>Dodonaea viscosa</i> , <i>Carissa spinarum</i> , <i>Wikstroemia indica</i> , <i>Bidens pilosa</i>)	30	1500	0.6
天然次生林 2	23°38′02″N, 102°54′20″E	1376.89	5			1500	55	
人工纯林 1	23°38′33″N, 102°54′04″E	1383.95	6	马尾松(<i>Pinus massoniana</i>)	车桑子、假虎刺、白茅、鬼针草(<i>Dodonaea viscosa</i> , <i>Carissa spinarum</i> , <i>Bidens pilosa</i>)	35	1400	0.8
人工纯林 2	23°38′33″N, 102°54′03″E	1390.77	7			1400	75	
天然混交林 1	23°38′33″N, 102°54′02″E	1319.29	6	马尾松, 柏树, 桉树(<i>Pinus massoniana</i> , <i>Cupressus funebris</i> , <i>Eucalyptus robusta</i>)	车桑子、假虎刺、了哥王、白茅、鬼针草、滇苦荚菜(<i>Dodonaea viscosa</i> , <i>Carissa spinarum</i> , <i>Wikstroemia indica</i> , <i>Bidens pilosa</i> , <i>Sonchus oleraceus</i>)	40	1600	0.6
天然混交林 2	23°38′32″N, 102°54′03″E	1324.49	5			1600	65	

1.2.2 染色示踪试验 试验于 2022 年 5 月 7 日至 7 月 12 日在建水县荒漠生态系统国家定位观测研究站展开。在不破坏土壤腐殖质层的前提下,对地表枯落物、大石砾和地表裸露植物进行清理,使地表裸露。将涂抹凡士林的 130 cm×60 cm×30 cm 的矩形金属框垂直砸入土壤 5 cm 深处,防止染色溶液溢流,随后用塑料薄膜进行覆盖。参考当地最大累积降雨量,选取 60 mm 作为试验标准,使用浓度 4 g/L 的亮蓝染料作为示踪剂进行染色示踪,耗损为 5%,1 个染色样方配置 45.4 L 染色溶液。

试验在确保染色前后 24 h 及当天无降雨的情况下进行。移开覆盖在金属框上的塑料薄膜,用自制稳定恒流喷洒装置,以 150 ml/min 的流速将配好的亮蓝染色溶

液均匀地喷洒在金属框内,后使用塑料薄膜覆盖 24 h。

24 h 后,在不破坏土体的情况下缓慢取出金属框,将每个样方划分为 60 cm×60 cm 的两部分,分别进行垂直剖面 and 水平剖面的挖掘,考虑到开挖时边缘的扰动,剔除边界 5 cm,实际开挖平面面积为 50 cm×50 cm。垂直剖面以水平宽度 10 cm 为一层;水平剖面每 5 cm 一层,直至染色结束。每个剖面挖掘后对其进行修整,并用卷尺框出剖面长度和宽度,在黑伞遮蔽下拍摄染色图像,避免阳光直射。

1.2.3 土壤基本性质测定 在染色样地附近取一定土样进行测定,取样时每隔 5 cm 为一层,取到 25 cm 处。采用环刀法测定土壤密度和孔隙度。各样地土壤理化性质指标见表 2。

表 2 样地土壤理化性质
Table 2 Basic properties of sample soil

样地编号	密度/ (g·cm ⁻³)	总孔隙度/%	有机质/%	全氮/ (g·kg ⁻¹)	全磷/ (g·kg ⁻¹)	全钾/ (mg·kg ⁻¹)
天然次生林 1	1.14±0.06	47.07±3.11	2.16±0.51	15.67±13.66	0.88±0.09	0.11±0.01
天然次生林 2	1.13±0.07	47.35±2.97	2.35±0.44	14.78±2.70	0.90±0.42	0.10±0.01
人工纯林 1	1.12±0.03	48.67±2.81	1.21±0.58	5.30±2.66	0.45±0.01	0.11±0.00
人工纯林 2	1.10±0.07	48.02±1.78	1.32±0.61	5.56±3.68	0.39±0.08	0.09±0.00
天然混交林 1	1.17±0.03	47.59±1.82	1.71±1.09	2.55±0.30	0.34±0.06	0.11±0.01
天然混交林 2	1.16±0.07	48.03±5.49	1.72±0.89	2.71±0.73	0.39±0.03	0.10±0.01

1.2.4 优先流特征指标测定

(1) 染色面积比总染色面积比指土壤剖面的染色区域面积占总面积的百分比,可以反映溶液在土壤中的运动情况^[12]。计算公式如下^[13]:

$$D_c = \frac{D}{D + N_D} \times 100\%$$

式中: D_c 为染色面积比(%); D 为剖面染色区域面积(cm^2); N_D 为剖面未染色区域面积(cm^2)。

(2) 基质流深度染色面积比在 80% 之前的人渗过程主要为基质入渗, 基质深度即为土壤垂直剖面中染色面积比 $\geq 80\%$ 时的土层深度。该值越大, 说明优先流的发生越滞后。

(3) 优先流比指土壤垂直染色剖面中, 优先流区域的染色面积占整个垂直剖面染色总面积的百分比。该值越大, 说明优先流发育程度越高。计算公式如下:

$$P_F = \left(1 - U_F \times \frac{W}{D_r} \right) \times 100\%$$

式中: P_F 为优先流比(%); U_F 为基质流深度(cm); W 为土壤剖面水平宽度, 本研究中为 50 cm; D_r 为土壤垂直剖面总染色面积(cm^2)。

(4) 长度指数。指土壤垂直剖面等分后, 相邻土层深度处的染色面积比差值的绝对值之和^[14]。该值越大, 说明优先流空间变化越剧烈。计算公式如下:

$$L_i = \sum_{i=1}^n |D_{C(i+1)} - D_{C_i}|$$

式中: L_i 为土壤长度指数(%); $D_{C(i+1)}$ 和 D_{C_i} 分别为土壤垂直剖面第 $i+1$ 层和第 i 层的染色面积比(%); n 为土壤剖面总层数。

1.2.5 根系结构指标测定 将剖面取回根系自然风干, 将表面土体和石块进行分离后, 放置于 2 mm 筛内清洗, 放入 WinRHIZO-pro 根系扫描分析系统对根形态指标进行扫描和测量, 得出植物根长密度(RLD)、根表面积密度(RSD)、根体积密度(RVD)及根生物量密度(RBD)。

1.3 数据处理

通过 Photoshop 2021 对初始染色照片进行矫正及预处理; 通过软件 Image Pro Plus 6.0 对预处理的图像进行解析量化, 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, 得出染色面积。通过 Excel 和 SPSS 22.0 对数据进行整合与计算, 通过 Origin 2022 软件绘制图标。

2 结果与分析

2.1 典型林分根系特征

由图 1 可以看出, 3 种典型林分根长密度、根表面积密度、根体积密度及根生物量密度总体都呈现天然次生林 > 天然混交林 > 人工纯林。其中, 根长密度和根表面积密度趋势相同, 天然次生林基本服从正态分布, 在 10—15 cm 土层之间达到峰值, 而人工纯林在 15—20 cm 土层之间最小, 天然混交林总体随深度增加呈现递减趋势; 根体积密度和根生物量密度趋势

相同, 天然次生林依然服从正态分布, 人工纯林呈现随深度增加而递增, 在 20—25 cm 土层深度间达到峰值, 天然混交林在 5—10 cm 土层间远高于其他土层深度。有研究表明, 根长密度与土壤密度呈显著负相关关系($p < 0.05$)^[15], 也就是单位体积内根长密度越大, 根系及土壤孔隙越多, 且根表面积密度与根长密度为同样的趋势恰恰证明在研究点根系对优先流的贡献大于土壤孔隙; 根体积密度和根生物量密度是反映植物根系的分布密度和土壤中根系的填充程度的重要参数, 这说明天然次生林的粗根在 10 cm 土层以下较多, 人工纯林则是随着土层深度的增加, 粗根数量增多, 天然混交林则是在 20 cm 土层以下较多。同时可以看出, 在 25 mm 降雨强度下, 6 个研究点均显示天然次生林及人工纯林的染色未能达到 20 cm 土层以下, 这说明纯林的根系路径明显小于混交林。

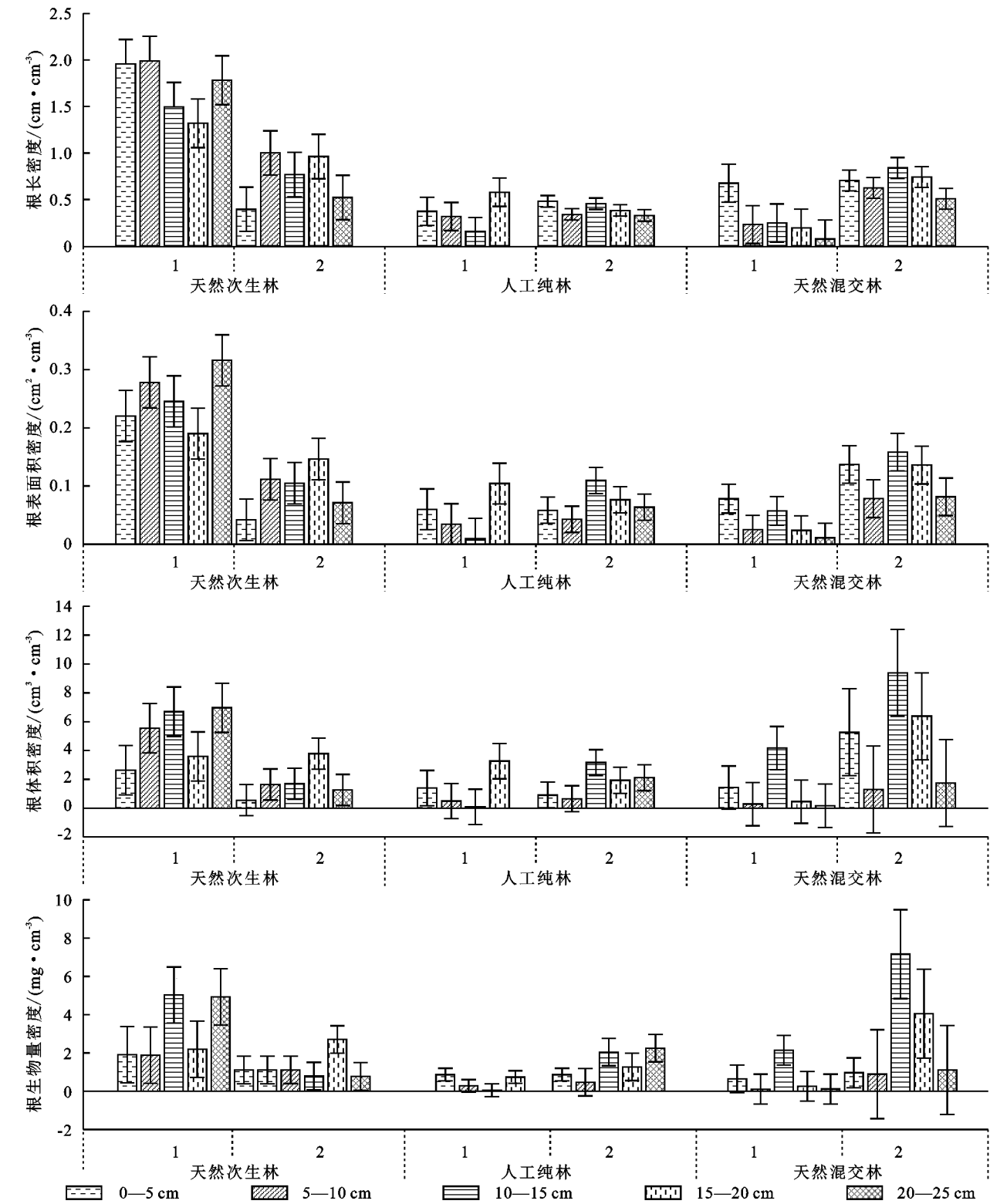
2.2 土壤优先流特征

从图 2 可以看出, 不同样地染色面积比在同一深度处有差异, 但总体趋势表现为随土层深度增加而减小, 染色溶液的最大入渗深度在 20—30 cm, 染色面积比在 0—5 cm 土层超过 60%, 随后逐渐减少, 且变化幅度也较为剧烈, 说明入渗过程具有非均匀性, 优先流分化明显; 在 5 cm 土层以下染色面积比曲线有回弹趋势, 呈“S”形波动, 土壤水分发生侧渗。

由图 3 可以看出, 6 个样地的水平染色分布并不均匀, 染色面积比标准差较大, 即同一个水平宽度处的染色面积比在不同土层深度处具有明显差异, 说明样地内存在明显的优先流路径, 其形成原因可能是土壤运移过程中造成的物理裂隙、植物(尤指根系)生长发育造成的植物大孔隙和土壤内动物活动造成的动物大孔隙, (试验结束后, 在 0—50 cm 土层范围内均未见明显石砾, 偶有细小碎石但未见染色, 故文中不将石砾作为产生优先流的原因) 部分土层的含水量达到基质流流量后, 其余染色水流沿着优先流路径向土壤深处继续运动; 而 50 cm 水平范围内染色面积比也存在变化, 说明染色水流在水平方向上同样存在迁移, 即有侧向流发生。学者们将高于剖面最低染色面积比的水平范围划分成优先流集中发生区域, 根据喀斯特地区林下土壤染色面积比的水平分布, 50 cm 土层深度范围内大多有 1~2 个峰值, 说明该范围内往往存在 1~2 个优先流路径分布区。

由图 4 可以看出, 土壤表层出现大面积染色现象, 说明染色溶液在表层均匀入渗, 学者们称之为基质流; 总体染色面积呈天然混交林 > 天然次生林 > 人工纯林, 其余染色剖面随着土层加深, 染色溶液运移表现出不同程度的分化现象, 染色部分出现差异, 呈

指状或漏斗状向下流动,优先流现象明显;部分剖面如天然次生林 0—5 cm 土层剖面、人工纯林 15—25 cm 土层剖面及天然混交林 10—15 cm 土层剖面的染色形态呈现明显树枝状,说明土壤内部存在根系。



注:图中横坐标中阿拉伯数字为同一降雨强度下的重复组。

图 1 3 种典型林分根系指标在不同土层深度的分布

Fig. 1 Distribution of root system indexes in different soil depths in 3 typical forest stands

由表 3 可知,不同典型林分下的优先流参数特征差异显著($p<0.05$)。天然次生林和人工纯林的最大入渗深度、基质流深度和优先流比基本一致,这说明天然次生林与人工纯林优先流发育程度基本一致,即土壤内部孔隙基本一致;人工纯林的长度指数和变异系数分别是天然次生林的 1.14,1.24 倍,由于本文计算染色变异系数

时剔除了基质流部分,所以说明人工纯林的优先流空间变异性高于天然次生林。天然混交林最大入渗深度是天然次生林和人工纯林的 1.78,1.85 倍、基质流深度是天然次生林和人工纯林的 1.28,1.45 倍,这说明复杂的根系结构能有效加强水分在土壤中均匀入渗深度和优先流运移深度;优先流比是天然次生林和人工纯林的 0.86,0.81 倍、长度指数是天然次生林和人工纯林的 1.91,1.69 倍、变异系数是天然次生林和人工纯林的 0.67,0.54 倍,

即混交林的优先流随着深度加深,变异程度远高于纯林,但在同一土层中的染色面积低于纯林,这说明混交林中优先流主要的运移方式是垂直下渗,而纯林横向流发育程度较高。其中天然次生林的优先流比最大达到 72.33%,且长度指数最小为 1.84%,即优先流发育程度最高且垂直方向最发达,由前文可知,天然次生林的根长密度是人工纯林的 5.84 倍,是混交林的 6.24 倍,这些研究结果共同说明根系对研究区优先流的贡献。

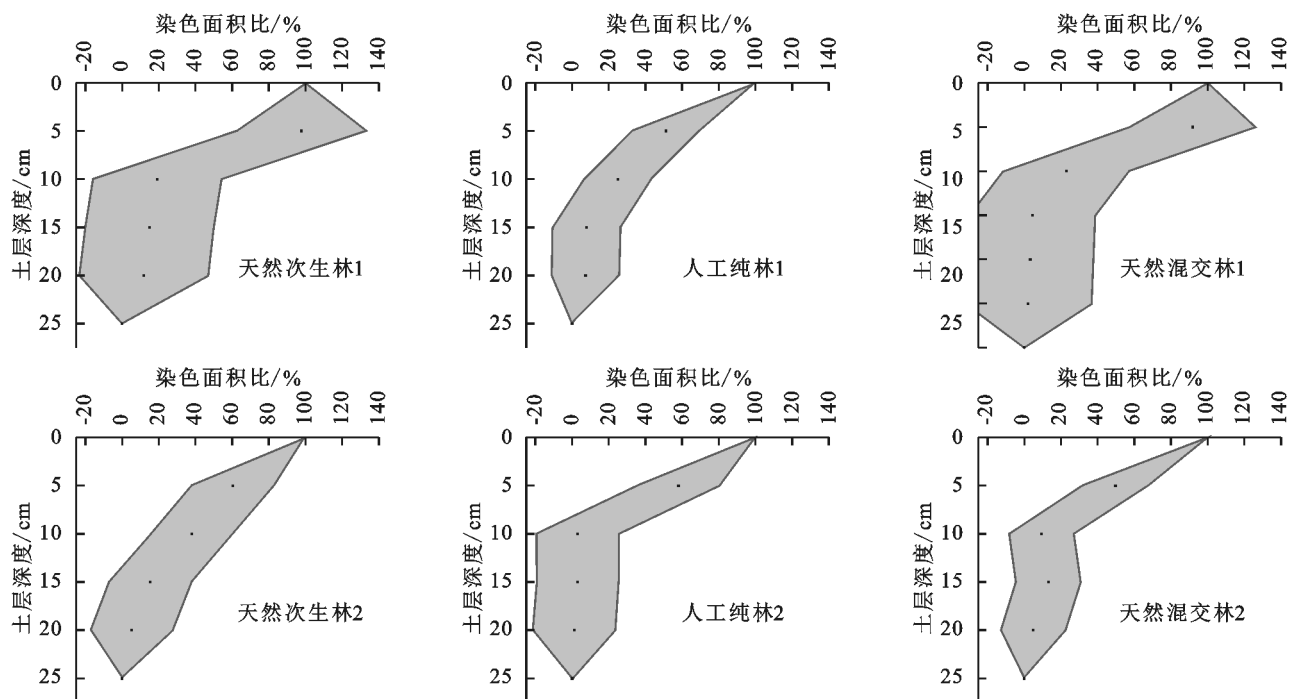


图 2 土壤垂直剖面的染色面积比

Fig. 2 Dyeing area ratio of soil vertical profile

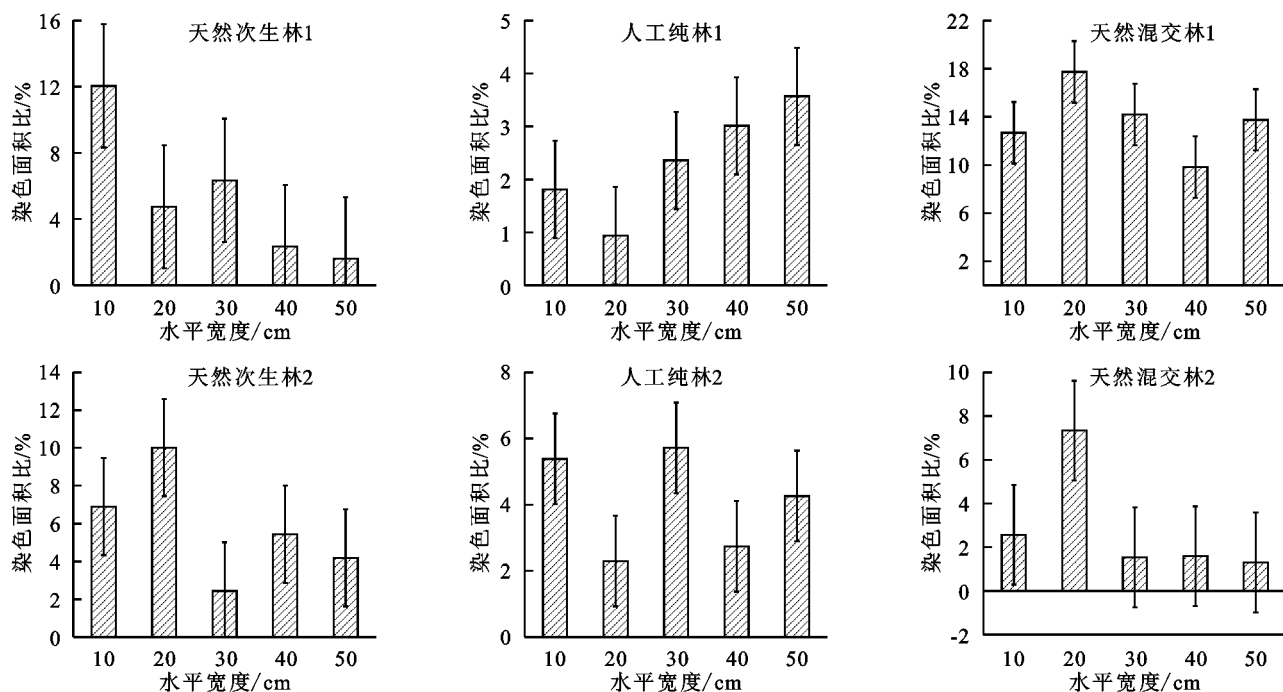
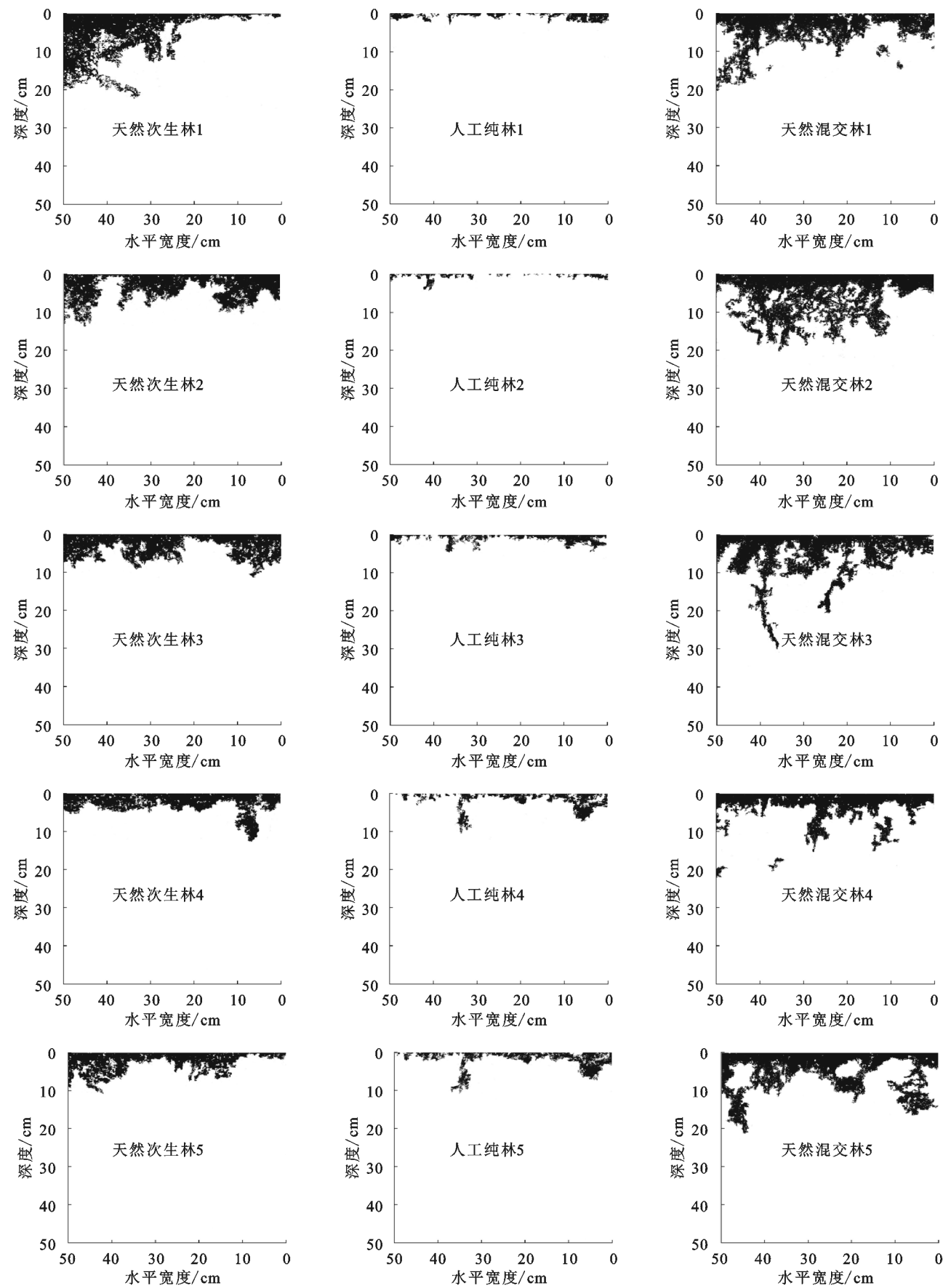


图 3 土壤水平剖面的染色面积比

Fig. 3 Dyeing area ratio of soil horizontal profile



注:图中阿拉伯数字为重复组。

图 4 土壤垂直剖面的染色图像

Fig. 4 Dyeing images of soil vertical profile

表 3 优先流特征参数
Table 3 Characteristic parameters of preferential flow

林地 类型	最大入渗 深度/cm	基质 流深度/cm	优先 流比/%	长度 指数/%	变异 系数
天然次生林	12.50±3.57a	1.29±0.69a	72.33±11.35a	1.84±0.60a	2.64±0.65ab
人工纯林	12.00±2.95a	1.15±0.45a	71.67±9.52a	2.09±0.28a	3.27±0.53a
天然混交林	22.21±13.92b	1.66±0.54a	62.39±8.53b	3.53±0.60b	1.76±0.23b

注：表中数据为平均值±标准差；同列不同小写字母表示不同林分间差异性显著。

2.3 土壤环境因子对优先流的影响

由表 4 可知,土壤水分入渗是由多种因素共同影响的。天然次生林中染色面积比与总孔隙度及全氮呈极显著相关;人工纯林中染色面积比与全磷含量呈极显著相关,与全钾含量显著相关($p<0.05$)。总体上天然混交林中染色面积比与总孔隙度呈极显著相关总体上染色

面积比与土壤密度呈显著负相关关系,与土壤总孔隙度、有机质、全氮和全磷均呈正相关关系,孔隙度与全氮在 3 种典型植被类型中均呈显著相关,全钾含量的相关性在 3 种植被类型的样地表现出较大差异。这可能是由于土壤连通性对优先流的形成有直接影响以及全氮会促进根系的生长发育,从而促进优先流的形成。

表 4 土壤环境因子与染色面积比的相关性
Table4 Correlation of soil environmental factor to dyeing area ratio

植被类型	指标	密度	总孔隙度	有机质	全氮	全磷	全钾
天然次生林	染色面积比	-0.985 *	0.996 **	0.958 *	0.973 **	0.998 *	0.738 *
人工纯林	染色面积比	-0.943 *	0.991 *	0.936 *	0.921 *	0.976 **	0.465 *
天然混交林	染色面积比	-0.935 *	0.998 **	0.998 *	0.976 *	0.941 *	0.913

注：**表示 $p<0.01$; * 表示 $p<0.05$ 。

2.4 典型林分根系对优先流的影响

将 3 种典型林分根系的根长密度、根表面积密度、根体积密度和根生物量密度分别与相应染色面积进行单因素方差分析,得到的结果由图 5 可知,3 种典型林分根系特征参数在 $p<0.05$ 水平下均呈现 $R^2>0.8$,说明根系特征参数与优先流发育密切相关,其中各林分根系指标与染色面积比的分布见图 6,天然次生林的根系指标均呈现负相关关系;人工纯林的根长密度和根表面积密度呈现正相关关系,根体积密度和根生物量密度呈现负相关关系;天然混交林的根系指标均呈现正相关关系。

林分土壤优先流的特征,首先,通过分析 3 种典型林分根长密度、根表面积密度、根体积密度及根生物量密度,发现总体都呈现天然次生林>天然混交林>人工纯林,而且本文研究发现,在研究区根长密度和根表面积密度趋势相同,根体积密度和根生物量密度趋势相同。有研究表明,根长密度与土壤密度呈显著负相关关系^[15],也就是单位体积内根长密度越大,根系及土壤孔隙越多,且 3 种典型林分的根表面积密度与根长密度均表现为同样趋势恰恰证明在研究点根系的作用大于土壤孔隙。同时可以看出,在 25 mm 降雨强度下,6 个研究点均显示天然次生林及人工纯林的染色未能达到 20 cm 以下,这说明纯林的根系路径明显小于混交林,这与田乐宇等^[16]的研究结果一致。

同时,本文对 3 种典型林分染色特征进行分析得出,染色面积比总体呈现天然混交林>天然次生林>人工纯林,通过分析染色垂直剖面,不同样地染色面积比在同一深度处有差异,但总体趋势均随深度增加而减小,染色入渗过程具有非均匀性,且横向流明显。其中前文中土壤垂直染色剖面更直观地体现了沿根系发生的优先流现象,水平剖面染色面积比的变化也说明存在的根系形成的优先流路径。不同典型林分下的优先流参数特征差异显著($p<0.05$),天然次生林与人工纯林优先流发育程度基本一致,即土壤内部孔隙基本一致;复杂的根系结构能有效加强水分在土

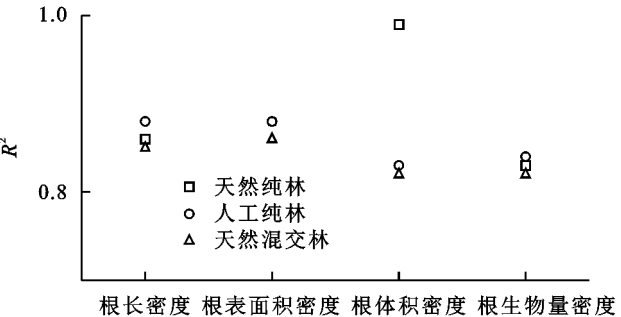


图 5 典型林分根系特征与染色面积比单因素方差分析

Fig. 5 One-way ANOVA for root characteristics and dyeing area ratio in typical stands

3 讨论

本研究从根系角度出发研究喀斯特地区 3 种典型

壤中均匀入渗深度和优先流运移深度,混交林中优先流主要的运移方式是垂直下渗,而纯林横向流发育程度较高,这与王小芳^[6]的研究结果一致。其中天然次生林的优先流比最大且长度指数最小,即优先流发育

程度最高且垂直方向最发达,值得注意的是天然混交林的染色面积比明显高于天然次生林但是优先流比却低于天然次生林,这与前文中天然次生林的根系特征参数最大共同说明了根系对研究区优先流的贡献。

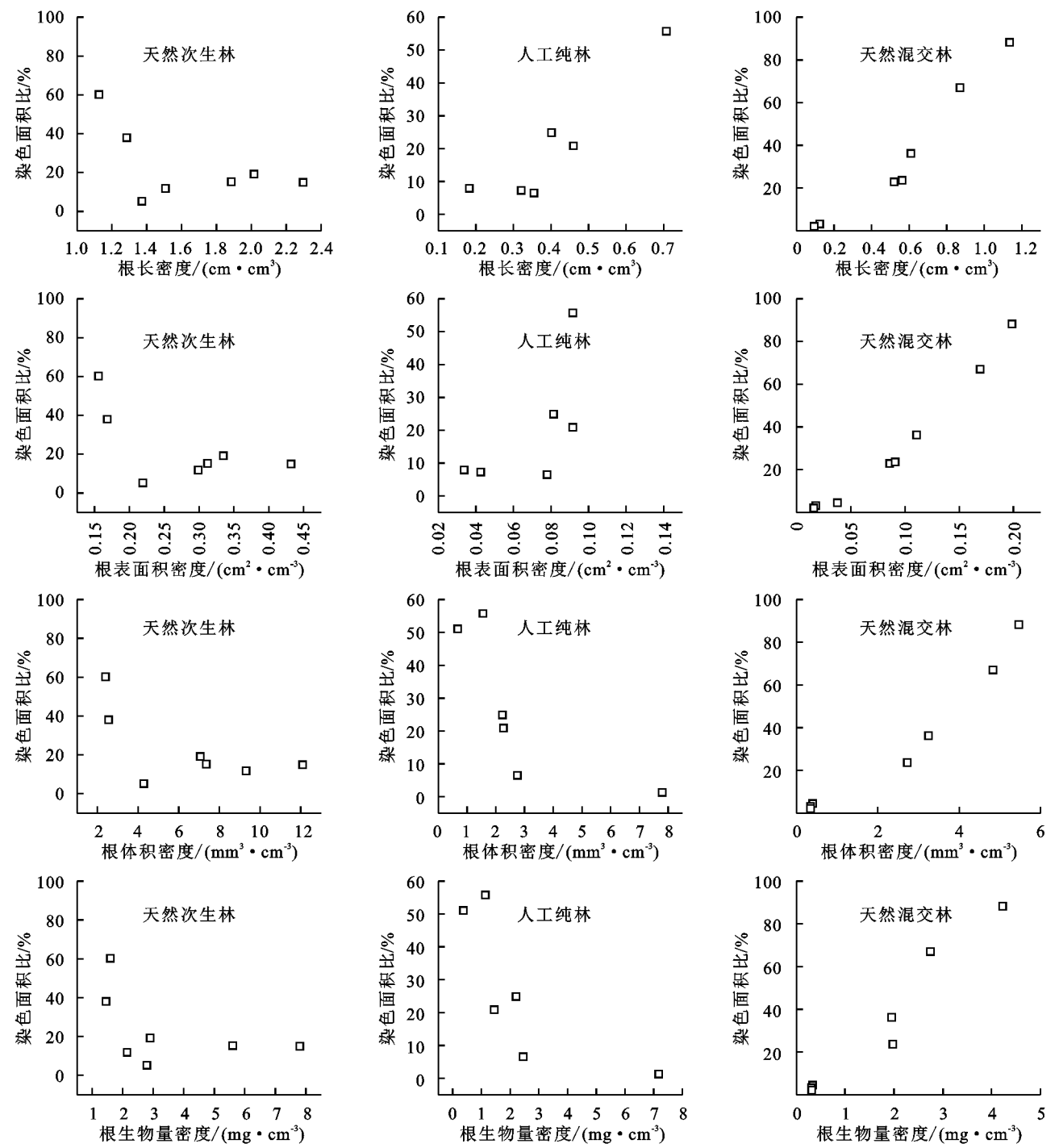


图 6 不同典型林分土壤优先流分布与根系指标的关系

Fig. 6 Relationships between soil preferential flow distribution and rooting indicators in different typical forest stands

优先流的形成受土壤理化性质的影响,土壤基本性质在 3 种植被类型中表现出显著差异,表明不同植被土壤对优先流的发育程度有直接影响。总体上除染色面积比与土壤密度呈显著负相关关系外,染色面积比与土壤总孔隙度、有机质、全氮和全磷均呈正相关关系,孔隙度与全氮在 3 种典型植被类型中均呈显著相关,土壤有机质和氮磷钾等营养元素等成分可改善土壤孔隙度,且孔隙度越大,优先路径连通性越好,优先流发育程度更高,这与卢华兴等^[17]的研究结果一致,全钾含量的相关性在 3 种植被类型的样地表现出较大差异。其中

孔隙度与有机质相关性均呈天然混交林>天然次生林>人工纯林,结合垂直剖面染色情况可以得出在试验地根系对优先流的影响较为明显。

邵一敏等^[18]研究表明植物根系与土壤优先流的形成关系密切,于元芬也表明根系对优先流的影响显著,后者与前者存在显著的正相关关系^[19]。故本文最后将3种典型林分根系的根长密度、根表面积密度、根体积密度和根生物量密度分别与相应染色面积进行单因素方差分析,根系特征参数与优先流发育密切相关,均有促进作用。这反映了研究区根系发育与优先流的发生呈现密切相关,其中,天然次生林的相关程度最高。李焱秋^[2]研究也表明植物因子中的根长密度与染色面积比呈极显著($p<0.01$)性相关,根表面积密度与染色面积比为显著性($p<0.05$)相关,表明根系可以显著影响优先流的发育,但是与陈雨薇^[20]研究结果不同的是,并不是所有根系指标都对优先流起促进作用,本文研究结果为天然次生林的根系指标均呈现负相关关系;人工纯林的根长密度和根表面积密度呈现正相关关系,根体积密度和根生物量密度呈现负相关关系;天然混交林的根系指标均呈现正相关关系,这可能与根系构型有关。

优先流可以快速吸纳降雨,减少地表径流的产生、增加地下水储存。本文研究表明天然次生林优先流程度最发达而混交林染色面积最大,在雨强 ≥ 60 mm/h地区天然次生林(柏树林)可以帮助减少地表径流,防治洪涝灾害,但是从综合治理的角度来说混交林的水文特征优于次生林^[13],各地区应划区治理,适当提高柏树林的种植比例,因地制宜制定更为合适的种植模式。且本文研究区为喀斯特地区,地下结构复杂,云南植被茂密,根系众多,所以根系作为本研究优先流的主要影响因素,但是根系的生长发育也受气候因素、岩石结构等因素的影响^[17],今后的研究应该综合考虑其中的交互作用。

4 结论

(1) 3种典型林分根长密度、根表面积密度、根体积密度及根系生物量总体都呈现天然次生林>天然混交林>人工纯林,天然次生林的根系特征基本服从正态分布,其在5—20 cm土层之间根系特征参数达到峰值,而人工纯林在15—20 cm土层之间根系特征参数最小,天然混交林随深度增加呈现递减趋势。

(2) 不同林分优先流现象明显,总体染色面积呈天然混交林>天然次生林>人工纯林,土壤表层出现

基质流,其余染色剖面随着土层加深,呈指状或漏斗状向下流动,最大染色深度为20—30 cm。垂直剖面总体随土层深度增加呈逐渐减少,且变化幅度也较为剧烈,优先流分化明显;垂直剖面和水平剖面均反映土壤水分发生侧渗。

(5) 将3种典型林分根系的根长密度、根表面积密度、根体积密度和根生物量密度分别与相应染色面积进行单因素方差分析,得出3种典型林分根系特征参数在 $p<0.05$ 水平下均呈现 $R^2>0.8$,但不同林分呈现不同趋势,复杂的根系结构能有效加强水分在土壤中均匀入渗深度和优先流运移深度。

参考文献(References):

- [1] 管凝,程金花,侯芳,等.西南喀斯特地区典型林分土壤优先流特征及影响因素[J].应用生态学报,2023,34(1):31-38.
Guan N, Cheng J H, Hou F, et al. Characteristics and influencing factors of soil preferential flow in typical stands of Karst Area in southwest China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2023,34(1):31-38.
- [2] 李焱秋.喀斯特地下浅层孔(裂)隙土壤水文特征研究[D].贵阳:贵州大学,2020.
Li Y Q. Hydrological characteristics of shallow pore (fracture) soil in Karst area [D]. Guiyang: Guizhou University, 2020.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] 吴静,盛茂银.我国喀斯特植被根系生态学研究进展[J].植物科学学报,2020,38(4):565-573.
Wu J, Sheng M Y. Research progress in root ecology of Karst vegetation in China [J]. Plant Science Journal, 2020,38(4):565-573.
- [6] 王小芳.红壤丘陵区林地植物根系对土壤优先流的影响研究[D].长沙:湖南师范大学,2018.
Wang X F. Effect of plant roots on soil preferential flow

- in the hilly region of red soil[D]. Changsha: Hunan Normal University, 2018.
- [7] Peter R J, Martin H, Jens P K, et al. Preferential flow and pesticide transport in a clay-rich till: Field, laboratory, and modeling analysis[J]. *Water Resources Research*, 2002, 38(11): 28.
- [8] Cai Y L. Ecological and socio-economic rehabilitation in the karst of southwest China[J]. *The Journal of Chinese Geography*, 1997(2): 24-32.
- [9] 蔡路路. 喀斯特典型裂隙土壤水分运移与养分迁移研究[D]. 贵阳: 贵州师范大学, 2021.
- Cai L L. Study on soil moisture and nutrient transport in typical Karst fissure[D]. Guiyang: Guizhou Normal University, 2021.
- [10] 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.
- [11] Carminati A, Vetterlein D, Koebnick N, et al. Do roots mind the gap[J]. *Plant and Soil*, 2013, 367(1/2): 651-661.
- [12] 张文豪. 草类根系对不同土体渗透性能影响的试验研究[D]. 长沙: 长沙理工大学, 2019.
- Zhang W H. Experimental study on the effect of grass roots on permeability of different soils[D]. Changsha: Changsha University of Science & Technology, 2019.
- [13] 陈晓冰, 严磊, 李振东, 等. 耕作方式对岩溶区甘蔗地土壤优先流特征的影响[J]. *土壤*, 2019, 51(4): 786-794.
- Chen X B, Yan L, Li Z D, et al. Tillage pattern effects on characteristics of soil preferential flow in sugarcane fields in the Karst region[J]. *Soils*, 2019, 51(4): 786-794.
- [14] 陈晓冰, 韦灵, 吴晗, 等. 秸秆覆盖下桂北岩溶区水稻田土壤优先流特征[J]. *水土保持学报*, 2020, 34(5): 124-130.
- Chen X B, Wei L, Wu H, et al. The characteristics of preferential flow on straw mulching of paddy field in the Karst Region of North Guangxi[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2020, 34(5): 124-130.
- [15] 黄林, 王峰, 周立江, 等. 不同森林类型根系分布与土壤性质的关系[J]. *生态学报*, 2012, 32(19): 6110-6119.
- Huang L, Wang F, Zhou L J, et al. Root distribution in the different forest types and their relationship to soil properties[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2012, 32(19): 6110-6119.
- [16] 田乐宇, 王鑫, 孙衍汤, 等. 海南中部丘陵区3种林分根系分布特征[J]. *应用与环境生物学报*, 2021, 27(6): 1530-1537.
- Tian L Y, Wang X, Sun Y T, et al. Root distribution characteristics of three forest stands: A hilly area in central Hainan Island, China[J]. *Chinese Journal of Applied and Environmental Biology*, 2021, 27(6): 1530-1537.
- [17] 卢华兴, 段旭, 赵洋毅, 等. 滇中磨盘山典型林分土壤优先流特征及其归因分析[J]. *西北农林科技大学学报: 自然科学版*, 2022, 50(7): 48-62.
- Lu H X, Duan X, Zhao Y Y, et al. Characteristics and attribution analysis of soil preferential flow in typical stand of Mopan Mountain in central Yunnan[J]. *Journal of Northwest A&F University: Natural Science Edition*, 2022, 50(7): 48-62.
- [18] 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.
- [19] 于元芬. 不同植被覆盖下红壤优先流特征与影响因素研究[D]. 武汉: 华中农业大学, 2020.
- Yu Y F. Study on the preferential flow characteristics and influencing factors of red soil under different vegetation covers[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2020.
- [20] 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: A study of purple soils in the Three Gorges Reservoir Region[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2022.