

江苏省空青山林地土壤物理性质对优先流的影响

闫存杰^{1,2,3}, 张文奇^{1,2,3}, 唐志颖^{1,2,3}, 陈燕鸿^{1,2,3},

司净池^{1,2,3}, 程立辰^{1,2,3}, 张英虎^{1,2,3}

(1. 南京林业大学林草学院, 水土保持学院, 南京 210037; 2. 南京林业大学南方现代林业协同创新中心, 南京 210037;
3. 江苏省水土保持与生态修复重点实验室, 南京 210037)

摘要: [目的] 土壤物理性质对优先流影响效应因研究区域不同, 存在较大差异。为理清其影响机制, 合理评估森林水文效应及森林资源可持续管理提供实践意义。[方法] 在江苏省空青山选择 3 种典型林分(麻栎林、松树林、毛竹林), 以降雨强度 50 mm/h 进行染色示踪试验, 基于土壤物理性质测定、图像处理技术分析 3 种林分下土壤优先流发育规律。[结果] 1) 麻栎林、松树林和毛竹林土壤均存在明显的优先流现象, 3 种林分下不同土层染色面积比分别为 41.54%~90.00%、9.27%~90.11%、18.19%~93.93%; 土壤染色斑块分形维数分别为 1.23~1.59、1.62~1.96、1.68~1.97; 染色斑块数量分别为 2~12、13~160、22~360, 均存在显著差异($p < 0.05$); 土壤染色斑块宽度分别为 2.50~3.27、0.47~3.24、0.37~2.59 cm, 均存在显著差异($p < 0.05$)。麻栎林、松树林和毛竹林土壤的优先流百分比分别为 91%±3%、27%±7%、51%±7%, 均存在显著差异($p < 0.05$); 基质流深度分别为 (14.5±7.3)、(17.9±3.9)、(16.8±3.8) cm。2) 3 个林分下土壤染色面积比与土壤体积质量呈负相关, 与土壤总孔隙度呈显著正相关; 染色斑块分形维数与土壤水分质量分数呈正相关; 染色斑块数量与黏粒呈正相关($p < 0.05$); 染色斑块宽度与土壤水分质量分数呈负相关。3) 优先流特征参数中的染色面积比和土壤染色斑块分形维数与土壤物理性质建立的多元线性方程拟合度较高, 具有较高的参考性, 与土壤体积质量和孔隙度的相对重要性较高。[结论] 麻栎林、松树林和毛竹林在不同土层深度的土壤入渗性质有明显差异, 土壤体积质量和土壤总孔隙度是驱动优先流发育的重要因素。

关键词: 优先流; 土壤物理性质; 染色面积比; 分形维数; 染色斑块

中图分类号: S714.7

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2025)03-0116-11

Influence of Soil Physical Properties on Preferential Flow in Kongqingshan Forested Lands, Jiangsu Province

YAN Cunjie^{1,2,3}, ZHANG Wenqi^{1,2,3}, TANG Zhiying^{1,2,3}, CHEN Yanhong^{1,2,3},

SI Jingchi^{1,2,3}, CHENG Lichen^{1,2,3}, ZHANG Yinghu^{1,2,3}

(1. College of Forestry and Grassland, College of Soil and Water Conservation, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, China; 2. Co-Innovation Center for Sustainable Forestry in Southern China, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, China; 3. Jiangsu Provincial Key Laboratory of Soil Erosion and Ecological Restoration, Nanjing 210037, China)

Abstract: [Objective] The effects of soil physical properties on preferential flow vary significantly across regions. This study aimed to clarify the mechanisms to provide practical implications for assessing forest hydrological effects and guiding sustainable forest resource management. [Methods] Three forest stands (oak forest, pine forest, and bamboo forest) in Kongqingshan, Jiangsu Province, were selected. Dye-tracing experiments under simulated rainfall (50 mm/h) were conducted, and soil preferential flow patterns were analyzed using soil physical property measurements and image processing techniques. [Results] 1) Significant preferential flow phenomena

收稿日期: 2024-11-21

修回日期: 2025-02-23

录用日期: 2025-03-01

网络首发日期(www.cnki.net): 2025-04-17

资助项目: 国家自然科学基金项目(41907007); 江苏省自然科学基金青年项目(BK20190747); 江苏省研究生科研与实践创新计划项目(SJCX23_0344)

第一作者: 闫存杰(1999—), 男, 硕士研究生, 主要从事土壤优先流研究。E-mail: yancunjie2021@163.com

通信作者: 张英虎(1987—), 男, 副教授, 博士, 硕士研究生导师, 主要从事土壤优先流及溶质运移研究。E-mail: zhang9c415@njfu.edu.cn

http://stbxb.alljournal.com.cn

were observed in the soils of all forest stands ($p < 0.05$). The dyeing area ratios in different soil layers were 41.54%–90.00%, 9.27%–90.11% and 18.19%–93.93% for oak forest, pine forest, and bamboo forest, respectively. The fractal dimensions of dye-stained patches were 1.23–1.59, 1.62–1.96 and 1.68–1.97, respectively. The number of dye-stained patches were 2–12, 13–160 and 22–360, respectively, with significant differences ($p < 0.05$). The widths of dye-stained patches were 2.50–3.27, 0.47–3.24 and 0.37–2.59 cm, respectively, with significant differences ($p < 0.05$). The preferential flow ratios were $91\% \pm 3\%$, $27\% \pm 7\%$ and $51\% \pm 7\%$, respectively, with significant differences ($p < 0.05$). The matrix flow depths were (14.5 ± 7.3) , (17.9 ± 3.9) and (16.8 ± 3.8) cm, respectively. 2) In all three forest stands, the dyeing area ratio was negatively correlated with soil bulk density ($p < 0.001$) and positively correlated with total porosity ($p < 0.05$). The fractal dimension of dye-stained patches was positively correlated with soil moisture content ($p < 0.001$). The number of dye-stained patches was positively correlated with clay content ($p < 0.05$), while the width of dye-stained patches was negatively correlated with soil moisture content. 3) The dyeing area ratio and the fractal dimension of dye-stained patches, as key parameters of preferential flow, showed high goodness-of-fit when modeled with soil physical properties using multiple linear regression equations. These two parameters were relatively more important in their correlations with soil bulk density and porosity. [Conclusion] The soil infiltration properties at different depths of oak forest, pine forest, and bamboo forest exhibited significant differences. Soil bulk density and total porosity are key drivers of preferential flow development.

Keywords: preferential flow; soil physical properties; dyeing area ratio; fractal dimension; dye-stained patches

Received: 2024-11-21

Revised: 2025-02-23

Accepted: 2025-03-01

Online(www.cnki.net): 2025-04-17

森林作为陆地生态系统的重要组成部分,有助于碳转化、气候调节、水源涵养、水土保持碳汇和生物多样性保护等^[1-2]。作为森林水源涵养不可或缺的组成部分,土壤水分是连接能量和生物地球化学循环的关键变量,对溶质迁移转化过程起着重要作用。优先流是土壤中普遍存在的溶质迁移形式,指水分在土壤或其他介质中流动时,沿着特定的通道或路径以比周围土壤更快的速度运动的现象^[3]。已有研究^[4]表明,土壤里约70%~85%的水流沿优先流路径进行运动。优先流路径将水分入渗速率提升3~8倍,在干旱季节将降水快速输送至深层土壤,提高植被可利用水量^[5],该路径还可使硝态氮的淋溶通量增加2~5倍,导致地下水污染^[6],进而改变水文和养分循环过程。

土地利用类型、土壤理化性质、降雨特征等因素均影响优先流动路径的形成。例如,WEI等^[7]在西南喀斯特地区的研究发现,优先流发育程度表现为林地>灌木>草地;同样地,ZHANG等^[8]在黄河三角洲的研究结果也证实,林地相较于灌木和草本具有最高的优先流发育程度。然而,相同的土地利用类型,如林地,也因为其林分组成结构不同,进而影响土壤层的发育。土壤层是维持各种水文过程的第一介质,极大地影响优先流动路径的形成^[9]。高度异质的土壤性质使优先流发育更为复杂^[10],如土壤初始

含水量^[11]、土壤质地^[12]、土壤体积质量^[13]和土壤孔隙度^[14]等,在对优先流路径的形成影响机制上存在较大差异。不同的外部环境条件导致土壤性质存在较大的异质性和复杂性,在影响优先流路径的形成机制上存在矛盾^[15]。对于土壤颗粒组成,程金花等^[16]研究证明,土壤深层质地较粗时,优先流发育程度越明显;而牛健植等^[17]研究发现,粉沙和黏质土壤优先流现象易发生。有研究^[8]证明,与土壤表面连通及土壤内部连通大孔隙,能够快速优先导水,促进水分和溶质优先运移。但并非所有大孔隙都可以优先导水,当大孔隙网之间连通性降低或不连通时,优先流现象似乎也发生。同样,土壤体积质量对优先流发育程度影响同样存在矛盾,例如,KANG等^[13]研究证明,土壤体积质量较高的研究区,优先流的发育程度与土壤体积质量呈正比,在土壤体积质量较低的研究区,优先流的发育程度与土壤体积质量呈反比;ZHANG等^[8]研究证明,不同土壤深度下的土壤性质对优先流路径的形成影响存在矛盾,即土壤表层土壤体积质量与优先流发育程度存在负相关,在土壤深层,土壤体积质量与优先流发育程度存在正相关。因此,复杂的外部条件导致土壤的异质性较强,土壤物理性质诱导优先流路径的形成尚不明确,对优先流发育程度的影响存在较大的不确定性,进一步限制研究者对优先流路径的形成过程中土壤

物理性质贡献机制的理解。

亮蓝染色示踪法是优先流野外观测常用的方法,该方法操作简便,成本较低。然而,以往研究将利用该方法得到的全部染色范围判定为优先流路径,高估实际优先流的发育程度。本研究以 3 种江苏省空青山典型林分为研究对象,采用图像分类技术,避免高估优先流路径的不足,分析不同林分土壤水流模式特征,揭示土壤物理性质对优先流发育程度的影响机理,对于评估森林水文效应、森林资源可持续管理和水土保持效益具有重要实践意义。

1 研究区概况

本研究区位于江苏省镇江市句容宁镇山脉东

段的武岐山和空青山南侧(32°07′39″N, 119°12′25″E),地处北亚热带季风气候区。年平均气温为 15.5℃,最热月平均气温超过 22℃,最冷月平均气温为 0~15℃。降水主要集中在夏季,占全年降水量的 70%,多年平均降水量为 1 099.1 mm。研究区土壤类型以黄棕壤为主,作为黄壤、红壤与棕壤的过渡性土类,土层厚度通常超过 50 cm。天然林树种主要为栎类,如白栎(*Quercus fabri* Hance)、麻栎(*Quercus acutissima* Carruth.)和栓皮栎(*Quercus variabilis* Blume)等,而人工林则以马尾松(*Pinus massoniana* Lamb)、火炬松(*Pinus taeda* L.)和竹林为主,以上植被类型构成研究区主要优势树种(表 1)。样地基本信息见表 2。

表 1 样地植被调查

Table 1 Vegetation survey of the experimental plots

林分类型	主要树种	主要灌木	主要地被
麻栎林	麻栎 (<i>Quercus acutissima</i> Carruth)	山胡椒[<i>Lindera glauca</i> (Siebold & Zucc.) Blume]青灰叶下珠(<i>Phyllanthus glaucus</i> Wall. ex Müll. Arg.) 野鸭椿[<i>Euscaphis japonica</i> (Thunb.) Dippel.] 山莓(<i>Rubus corchorifolius</i> L. f.)	地锦[<i>Parthenocissus tricuspidata</i> (Siebold & Zucc.) Planch.] 菖蒲(<i>Acorus calamus</i> L.) 络石[<i>Trachelospermum jasminoides</i> (Lindl.) Lem.] 蛇葡萄[<i>Ampelopsis glandulosa</i> (Wall.) Momiy]
	火炬松 (<i>Pinus taeda</i> L.)	茶[<i>Camellia sinensis</i> (L.) O. Kuntze] 苎麻[<i>Boehmeria nivea</i> (L.) Gaudich.] 高粱蔗(<i>Rubus lambertianus</i> Ser.)	海金沙[<i>Lygodium japonicum</i> (Thunb.) Sw.] 求米草[<i>Oplismenus undulatifolius</i> (Arduino) Roem. & Schult]
毛竹林	毛竹 [<i>Phyllostachys edulis</i> (Carriere) J. Houzeau]	山莓(<i>Rubus corchorifolius</i> L. f.) 青灰叶下珠(<i>Phyllanthus glaucus</i> Wall. ex Müll. Arg.)	络石[<i>Trachelospermum jasminoides</i> (Lindl.) Lem.] 海金沙[<i>Lygodium japonicum</i> (Thunb.) Sw.] 拔莼(<i>Smilax china</i> L.)

表 2 样地基本信息

Table 2 Basic information of the experimental plots

林分类型	经度	纬度	海拔/m	平均树高/ m	平均胸径/ cm	林冠层 郁闭度/%	灌草 覆盖度/%	林分密度/ (株·hm ⁻²)	林龄/a
麻栎林	32°07′40″N	119°12′12″E	124.74	21.40	38.85	0.84	0.23	350	50
松树林	32°07′15″N	119°13′19″E	119.20	18.37	29.47	0.78	0.46	625	45
毛竹林	32°07′08″N	119°13′09″E	113.06	11.57	7.11	0.92	0.12	158 000	40

2 材料与方法

2.1 染色示踪试验

2021 年 9 月,以麻栎(*Quercus acutissima* Carruth.)、松树(*Pinus*)和毛竹(*Phyllostachys edulis* (Carriere) J. Houzeau) 3 种林分为研究对象,每个林分设置 20 m×20 m 的样方。在该样方内,选择 3 个染色示踪试验地作为重复,试验地避开树木主根系范围

且地表相对平坦。为避免试验地彼此干扰,3 个试验地的间隔距离至少为 2 m,以便研究土壤物理性质。在每个试验地放置长宽高均为 70 cm、厚度为 0.3 cm 的金属铁框,将铁框底部削成刀状,垂直插入土壤层 10 cm,同时将铁框内外底部靠近地面空间进行夯实处理。在不破坏土壤腐殖质层的情况下,清除地表凋落物以及杂草。染色示踪试验以食用染料亮蓝为示踪剂,示踪土壤剖面水流路径

分布。设置为恒定降雨强度 50 mm/h(该地区暴雨强度),将浓度为 4 g/L、50 L 亮蓝溶液,使用电动喷雾器均匀施加至土壤表面。亮蓝溶液喷洒完成后,使用塑料薄膜覆盖染色区域,以避免外界降水和蒸发的影响。待亮蓝溶液施加 24 h 后,以 0.1 m 间隔从染色边界到中心挖掘土壤垂直剖面(0.7 m×0.7 m),使用数码相机对每个垂直剖面进行拍照。

2.2 优先流特征参数计算

为消除边缘效应的影响,将 0.5 m×0.5 m 的剖面范围作为感兴趣区域,用于量化分析优先流特征参数。利用 Photoshop 2021 软件对感兴趣区域进行图像处理,提取染色区域,将染色区域利用 ENVI 5.6 软件非监督分类方法提取优先流,将提取优先流图像转换成二值化图像,优先流区域替换为黑色,非优先流区域替换为白色,将图像均匀分割成 5 层,利用 Image-Pro Plus 和 Image J 软件确定优先流特征参数。本研究以染色面积比、染色斑块分形维数、染色斑块数量、染色斑块宽度、基质流深度及优先流百分比为优先流特征参数,量化优先流发生程度。

1)染色面积比是指土壤垂直剖面染色斑块面积与总面积的比值,染色面积比反映土壤水分的入渗情况,该值越大,水分入渗越多,揭示湿润锋的快速迁移^[18]。计算方法为:

$$DC = \frac{D}{D + ND} \times 100\% \quad (1)$$

式中:DC 为染色面积比,%;D 为土壤垂直剖面中的染色面积,cm²;ND 为土壤垂直剖面中未染色面积,cm²。

2)分形维数是描述复杂形体不规则性的数学指标,利用 Image J 中的 Fractal 模块计算染色斑块的染色维数,反映优先流路径的复杂程度。计算方法为:

$$FD = \lim_{\epsilon \rightarrow \infty} [\log N(\epsilon) / \log(1/\epsilon)] \quad (2)$$

式中:FD 为分形维数(无量纲); ϵ 为每个染色斑块的平均宽度,cm; $N(\epsilon)$ 为该染色区域覆盖的染色斑块的数量。

3)染色斑块数量是指土壤垂直剖面染色斑块的数量,利用 Image-Pro Plus 统计剖面中染色斑块独立的数量,即点击工具栏中的 Measure 按钮,选中 Count/Size 子菜单,进行统计与计算。

4)染色斑块宽度是指土壤垂直剖面染色斑块的等效宽度,反映染色斑块的大小。根据剖面中染色面积和数量计算染色斑块的等效宽度,一定程度上

分析优先流的复杂程度。计算方法为:

$$SPW = \sqrt{\frac{DC/N}{\pi}} \quad (3)$$

式中:SPW 为染色斑块宽度,cm;DC 为染色面积比,%;N 为染色斑块数量。

5)基质流深度是指土壤垂直染色剖面中基质流区域到优先流区域之间的临界土壤深度,mm 或 cm。本研究定义当土壤染色面积比首次降为 80% 时所对应的土壤深度为基质流深度。

6)优先流百分比

优先流百分比是指土壤剖面中优先流区域染色面积占总染色面积的比例。

$$P_F = (1 - \frac{U_F \times W}{D_s}) \times 100\% \quad (4)$$

式中: P_F 为优先流百分比,%; U_F 为基质流深度,cm; W 为染色剖面的宽度,cm; D_s 为剖面染色区域的面积,cm²。

2.3 土壤物理性质测定

在每个染色示踪试验点附近,以土层深度 10 cm 间隔挖掘 5 层,共 50 cm 深度,每层 3 次重复取样,用于分析土壤物理性质,同时每层收集 3 次土样,放入塑封袋中并编号,将土样放至实验室,室温条件下风干 1 个月,分析土壤机械组成。

土壤物理性质采用环刀法^[19]测定。将采集的每层土壤环刀样品置于蒸馏水中,将环刀泡水时保证水面略低于环刀上沿,防止水从土壤环刀顶部进入样品,并使其充分饱和。充分饱和 24 h,记录饱和后的土壤环刀样品质量;之后将土壤环刀放置在底部有干砂层的托盘上,将样品内的饱和重力水排干 2 h 和 48 h,再次测定样品质量;最后将样品放置 105 °C 烘箱中干燥 48 h,测定土壤环刀内干土的质量。进而计算土壤体积质量、土壤总孔隙度、土壤质量含水量、土壤田间持水量。使用激光粒度分析仪分析土壤机械组成。称取约 0.5 g 土壤样品(过 2 mm 尼龙筛网),用 10% 的过氧化氢去除有机质,用 10% 的盐酸去除碳酸盐成分,随后用蒸馏水清洗至中性。之后加入六偏磷酸钠并使用超声波振荡进行分散。利用英国 Malvern 公司生产的 Mastersize 2000 型激光粒度仪,测定土壤样品,测量范围为 0.02~2 000 μ m,重复测量误差<1%。根据美国土壤质地分类标准^[20],土壤颗粒按粒径划分为 3 类:砂粒(0.05~2 mm)、粉粒(0.002~0.05 mm)和黏粒(<0.002 mm)。3 种林分土壤体积质量、总孔隙度、水分质量分数、田间持水量及机械组成存在差异(表 3)。

表 3 不同林分下各土层土壤物理性质
Table 3 Physical properties of different soil layers under different forest stands

林分类型	土层深度/cm	土壤体积质量/(g·m ⁻³)	土壤总孔隙度/%	土壤水分质量分数/(g·kg ⁻¹)	土壤田间持水量/(g·kg ⁻¹)	机械组成/%		
						黏粒	粉粒	砂粒
麻栎林	0~10	1.04±0.02Aa	48.15±0.75Aa	133.70±13.86Aa	354.10±7.78Aa	1.60±0.56Aab	88.14±9.11Aa	10.26±9.58Aa
	10~20	1.26±0.11Ab	42.71±1.53Aab	105.75±9.83Aa	279.20±12.16Aab	0.89±0.80ABa	83.53±10.94Aa	15.58±11.40Aa
	20~30	1.41±0.03Ac	39.40±1.07Abc	109.45±5.59Aa	249.65±9.40Aab	1.46±0.32Ab	81.35±7.67Aa	17.19±7.99Aa
	30~40	1.49±0.01Acd	37.78±0.78Acd	110.55±7.42Aa	235.70±0.57Aab	1.00±0.45Aab	87.46±7.73ABa	11.54±8.10Aa
	40~50	1.46±0.01Ad	37.43±0.74Ad	117.85±22.13Aa	244.40±2.83Ab	0.85±0.45Aab	83.16±4.77Aa	15.99±4.46Aa
松树林	0~10	0.99±0.17Aa	55.08±1.59Ba	300.39±20.88Ba	449.92±29.69Aa	0.58±0.26Bab	89.43±5.47Aa	9.99±5.26Aa
	10~20	1.24±0.04Ab	50.09±2.21Aab	250.55±7.09Ba	343.24±18.85Aab	0.74±0.64Aa	84.45±3.06Aa	14.81±2.49Aa
	20~30	1.31±0.10Bc	47.64±3.59Bbc	245.63±15.92Ba	306.34±33.82Bab	1.79±1.74Bb	91.43±2.59Aa	6.78±3.87Aa
	30~40	1.43±0.10Acd	42.40±2.66Bcd	230.84±10.40Ba	262.68±23.59Aab	0.47±0.07Bab	81.53±5.40Aa	18.00±5.42Aa
	40~50	1.47±0.07Ad	40.84±2.82Bd	226.41±8.23Ba	247.65±19.23Ab	1.89±0.55Bab	87.42±4.87Aa	10.69±5.30Aa
毛竹林	0~10	1.13±0.14Aa	53.86±5.77Ba	270.72±36.91Ba	384.39±77.34Aab	1.59±0.05Aab	76.92±5.87Aa	21.48±5.89Aa
	10~20	1.18±0.09Ab	51.15±4.98Bab	246.35±18.95Ba	335.60±57.05Aab	0.56±0.88Ba	81.95±2.15Aa	17.50±1.60Aa
	20~30	1.23±0.09Ac	49.97±5.36Cbc	252.01±9.28Ba	301.37±27.70ABab	1.85±0.87Ab	78.86±7.47Aa	19.29±6.87Aa
	30~40	1.30±0.12Acd	47.84±5.43Bcd	253.37±12.87Ba	289.33±27.61Aab	2.53±1.41Aab	85.70±4.45Ba	11.77±5.84Aa
	40~50	1.48±0.02Ad	41.67±0.97Bd	244.71±15.48Ba	256.03±12.42Ab	2.24±1.30Aab	74.29±10.88Aa	23.47±10.27Aa

注:表中数据为平均值±标准差;同列不同大写字母表示相同林分不同土层深度间在 0.05 水平上差异显著;不同小写字母表示相同土层深度不同林分间在 0.05 水平上差异显著。

2.4 反向传播神经网络模型

通过反向传播神经网络模型评估各土壤物理性质对优先流特征参数影响的相对重要性。为提高模型模拟质量,需要将输入和输出数据进行归一化处理^[21-22]。归一化公式为:

Scale $x_i = \frac{X_i - X_{\min}}{X_{\max} - X_{\min}}$ (5)

式中: $X_{\min}$ 、 $X_{\max}$ 分别为输入的各土壤物理性质的最小值和最大值; X_i 为各土壤物理性质的实测值。

模型中,各土壤物理性质的输入值表示为 $X=(X_1, X_2, X_3, \cdots, X_n)$, 本研究中选择隐式层激活函数 f 为:

$f(U_j) = \frac{1}{1 + e^{-U_j}}$ (6)

H_j 隐层的输出结果为:

$H_j = f(U_j) \quad j = 1, 2, \cdots, j$ (7)

$U_j = \sum_{i=1}^n w_{ij} x_i + \theta_j$ (8)

式中: w_{ij} 为输入层与输出层的连接权值; θ_j 为隐藏层阈值; f 为隐藏层的激活函数; U_j 为隐藏层节点的输入; i 为隐藏层的节点数。

模型预测输出结果 O_k 为:

$O_k = \sum_{j=1}^n H_j w_{jk} + \theta_k$ (9)

式中: w_{jk} 为连接的权重; θ_k 为输出层的阈值。

拟合优度 (R^2) 及模型的均方根误差 (RMSE), 反映预测输出与预期输出之间的差值, 计算方法为:

$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Y_k - O_k)^2}{\sum_{i=1}^n (Y_k - \bar{Y}_k)^2}$ (10)

$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Y_k - O_k)^2}$ (11)

本文利用相对重要性评估不同土壤物理性质对优先流特征参数影响, 根据回归预测误差, 确定人工神经网络排序的各土壤物理性质因子的相对重要性。相对重要性计算公式为:

$MSE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Y_k - O_k)^2$ (12)

式中: n 为样本数; Y_k 为实际值; O_k 为预测值。

2.5 数据分析

本研究应用 Photoshop 2021 软件对初始染色图像进行矫正及预处理, 利用 ENVI 5.6 软件非监督分类方法提取优先流图像, 使用 Image J 和 Image-Pro Plus 6.0 软件对优先流图像进行解析量化及图像数值化处理, 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, 得出染色面积比、染色斑块分形维数及染色斑块数量。通过 Excel 2021 和 SPSS 26.0 软件对数据进行整合与计算, 得出染色斑块宽度、基质流深度和优先流百分比。采用 Shapiro-Wilktest 检验数据的正态性并用 ANOVA 单因素方差分析比较同一林分不同土层及不同林分之间土壤物理性质的差异性。采用 Pearson 相关系数分析土壤物理性质与优先流特征参数之间的关系。使

用R中的Neuralnet软件包(反向传播神经网络模型)计算各土壤物理性质对优先流特征参数的相对重要性。图片绘制使用Origin 2021软件。

3 结果与分析

3.1 染色示踪优先流特征

3.1.1 优先流路径形态特征定性分析 由图1可知,3种林分染色模式分为3种类型:麻栎林染色模式特征主要表现为亮蓝溶液从土壤表面不均匀渗透至土壤底层。整个土壤剖面存在较多不规则的染色斑块,亮蓝溶液穿透整个土壤剖面,意味着麻栎林整体土壤结构异质性不强。松树林染色模式特征主要表

现为亮蓝溶液从土壤表层均匀入渗至土层深度20 cm处,该土层深度以下,亮蓝溶液入渗表现出明显的优先流现象,同时染色斑块数量呈递增趋势,染色斑块呈“长窄”状分布,40~50 cm土层处,无染色斑块,相比麻栎林,松树林呈现分散性、孤立性极强的染色斑块。毛竹林染色模式特征主要表现为亮蓝溶液从土壤表层均匀入渗至土层深度10 cm处,该土层深度以下染色斑块不规则。松树林和毛竹林与麻栎林的染色模式完全不同,松树林和毛竹林可能表层土壤团粒结构较多,导致水分能够快速下渗,形成广泛的优先流路径。

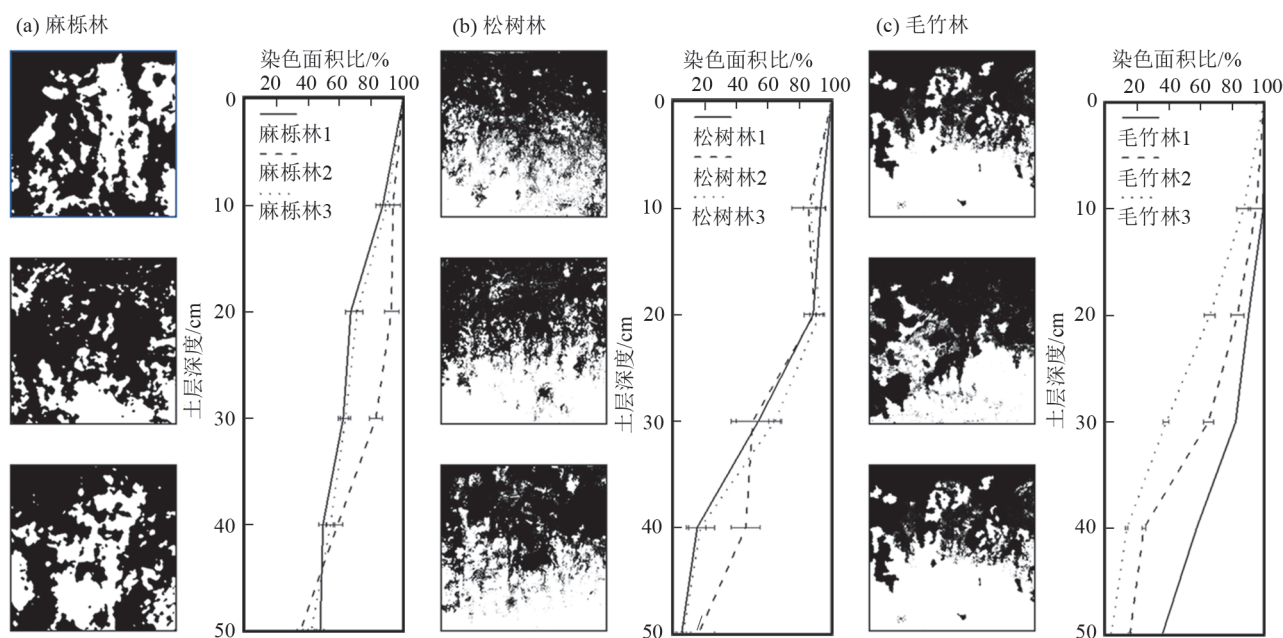


图1 3种林分的土壤垂直剖面的染色模式

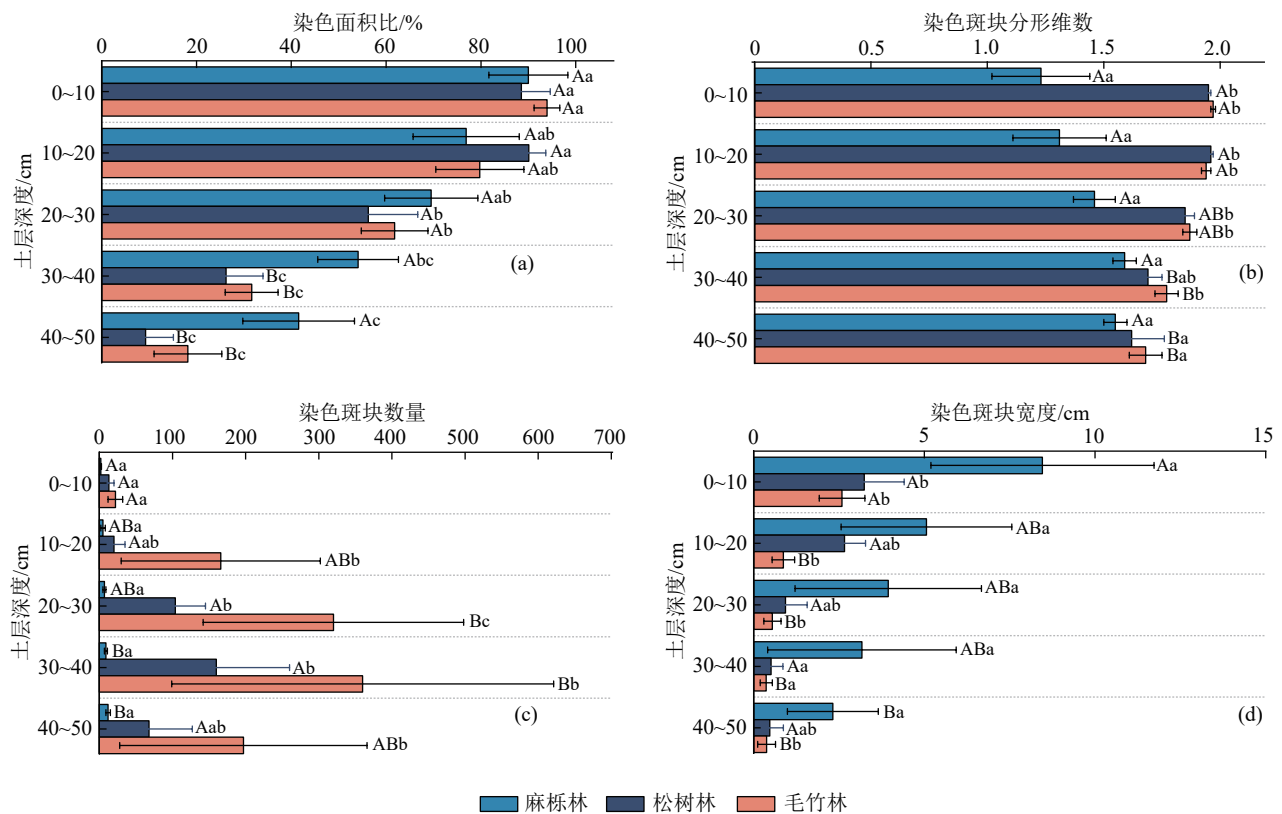
Fig. 1 Staining patterns of the vertical profiles of soils in three forest stands

3.1.2 优先流路径形态特征定量分析 由图2可知,3种林分0~10 cm土层处的染色面积比>80%,且随着土层深度的增加,染色面积比呈递减趋势。0~30 cm土层,3种林分染色面积比不存在显著性差异($p>0.05$),然而30~50 cm土层,麻栎林染色面积比显著高于松树林和毛竹林($p<0.05$),松树林和毛竹林之间不存在显著性差异($p>0.05$)。结合染色图像可以发现,麻栎林下覆盖的土壤孔隙横向连通性较好,导致土壤水分在经过基质流区域后,开始向侧向发展,导致深层有较多的染色。

麻栎林染色斑块分形维数随土层深度的增加呈递增趋势,松树林和毛竹林表现为相反趋势。整个土壤剖面,松树林和毛竹林染色斑块分形维数不存在显著性差异($p>0.05$);0~30 cm土层,麻栎林染色斑块分形维数与其他林分存在显著性差异($p<0.05$),30~50 cm土层,3种林分染色斑块分

形维数不存在显著性差异($p>0.05$)。麻栎林土壤剖面其染色区域分布集中,孤立染色斑块较少,染色图像复杂性程度较低,说明麻栎林土壤剖面染色斑块之间的联系和相互作用比毛竹林和松树林较高。

3种林分染色斑块数量随着土层深度的增加呈递增趋势,表现为染色斑块在土壤深层越分散,点状分布特征越明显。3种林分染色斑块数量存在显著性差异($p<0.05$)。染色斑块数量在3种林分表现为毛竹林>松树林>麻栎林。3种林分染色斑块宽度随着土层深度的增加呈递减趋势,表现为染色斑块在土壤深层“长窄”形态分布。麻栎林染色斑块宽度与其他林分存在显著性差异($p<0.05$),松树林和毛竹林染色斑块宽度不存在显著性差异($p>0.05$)。染色斑块宽度在3种林分表现为麻栎林>松树林>毛竹林。



注:图柱右侧不同大写字母表示不同土层间差异显著($p < 0.05$);不同小写字母表示不同林分间差异显著($p < 0.05$)。下同。

图 2 3种林分不同土层深度下的优先流指标变化

Fig. 2 Changes of preferential flow indicators at different soil depths in three forest stands

由图 3 可知,麻栎林、松树林和毛竹林的优先流百分比分别为 $91\% \pm 3\%$ 、 $27\% \pm 7\%$ 、 $51\% \pm 7\%$,具有显著差异($p < 0.05$)。表明 3 种林分均呈入渗不均匀和优先流分化程度不均现象。麻栎林、松树林和毛竹林染色面积比 $> 80\%$ 的土层深度分别为 (14.5 ± 7.3) 、 (17.9 ± 3.9) 、 (16.8 ± 3.8) cm,说明麻栎

林的土壤水分由基质流转变为优先流的深度位置变化较早,松树林优先流发生最晚。松树林优先流启动最深的现象反映针叶林生态系统通过延缓深层入渗增强干早期水分保持能力。相较麻栎、松树和毛竹基质流深度的标准差更小,可能是土壤结构表现出更强的均质化特征。

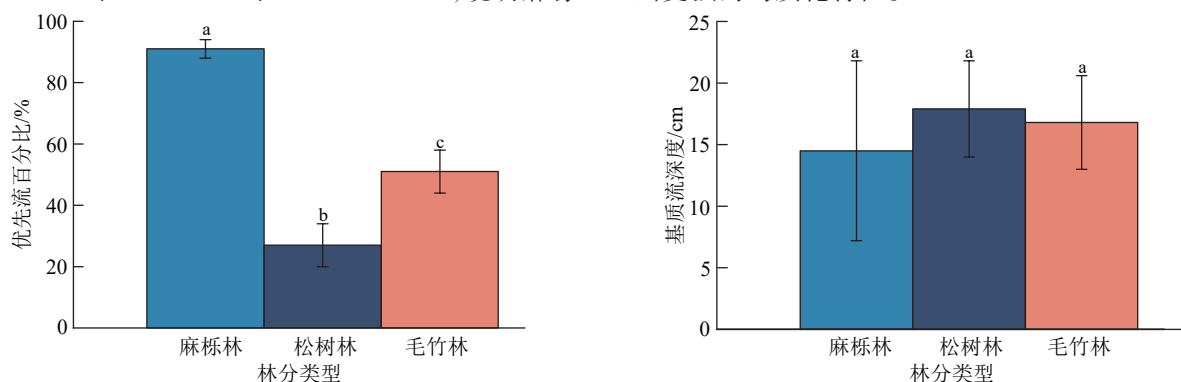


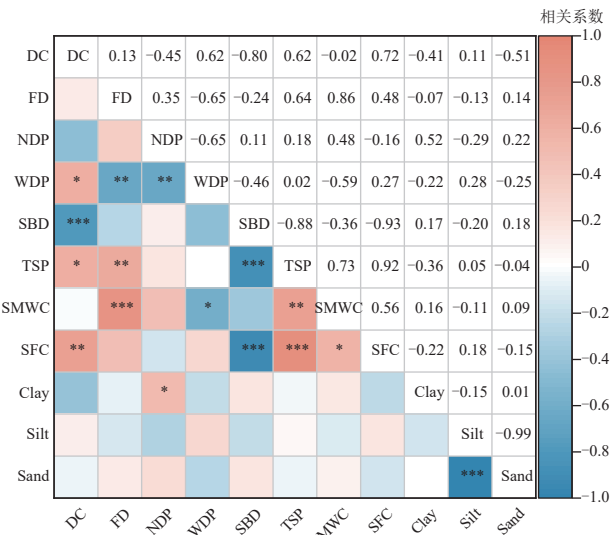
图 3 3种林分的土壤优先流百分比和基质流深度

Fig. 3 Soil preferential flow ratios and matrix flow depths of three forest stands

3.2 土壤物理性质对优先流特征参数影响分析

由图 4 可知,土壤孔隙直接促进优先流的发育程度,而土壤体积质量在一定程度上降低优先流发育程度。染色面积比土壤总孔隙度呈正相关($p < 0.05$);染色面积比与土壤体积质量呈极显著负相关关系($p < 0.001$),说明优先流路径的形成在一定程度

上被紧实的土壤阻断;染色斑块分形维数与土壤水分质量分数呈极显著正相关($p < 0.001$),与土壤总孔隙度呈显著正相关($p < 0.001$);染色斑块数量与土壤水分质量分数和黏粒呈正相关($p < 0.05$),染色斑块宽度与土壤水分质量分数呈负相关($p < 0.05$),染色斑块数量和宽度受土壤水分影响互相矛盾。



注: * $p < 0.05$; ** $p < 0.01$; *** $p < 0.001$; DC 为染色面积比; FD 为染色斑块分形维数; NDP 为染色斑块数量; WDP 为染色斑块宽度; SBD 为土壤体积质量; TSP 为土壤总孔隙度; SMWC 为土壤水分质量分数; SFC 为土壤田间持水量; Clay 为土壤黏粒; Silt 为土壤粉粒; Sand 为土壤砂粒。下同。

图 4 土壤物理性质与优先流特征参数相关性关系

Fig. 4 Correlations between soil physical properties and preferential flow characteristic parameters

由图 5 可知,在所有土壤物理性质中,土壤体积质量对染色面积比的相对重要性较大,土壤总孔隙度对染色斑块分形维数的相对重要性较大,土壤质量水分质量分数对染色斑块数量的相对重要性较大,而土壤体积质量染色斑块宽度的相对重要性较大。总之,在所有土壤物理性质中,土壤体积质量和土壤孔隙度对优先流特征参数的变化影响较强。

在分析土壤物理性质与优先流参数之间的相对重要性基础上,为量化土壤物理性质因子对优先流特征参数的影响,挑选 2 个相对重要性最强的土壤物理性质因子与优先流特征参数之间建立多元线性回归方程(表 4)。由表 4 可知,在多个因子共同影响优先流特征参数变化时,需要考虑因子之间耦合作用下的影响机制,土壤体积质量对染色面积比变化产生“消极”影响,土壤水分质量分数对染色面积比变化产生“积极”影响;土壤总孔隙度与土壤水分质量分数均对染色斑块分形维数产生“积极”影响;土壤总孔隙度对染色斑块数量呈“消极”影响,土壤田间持水量对染色斑块数量呈“积极”影响;土壤体积质量和土壤田间持水量对染色斑块宽度均呈“消极”影响。

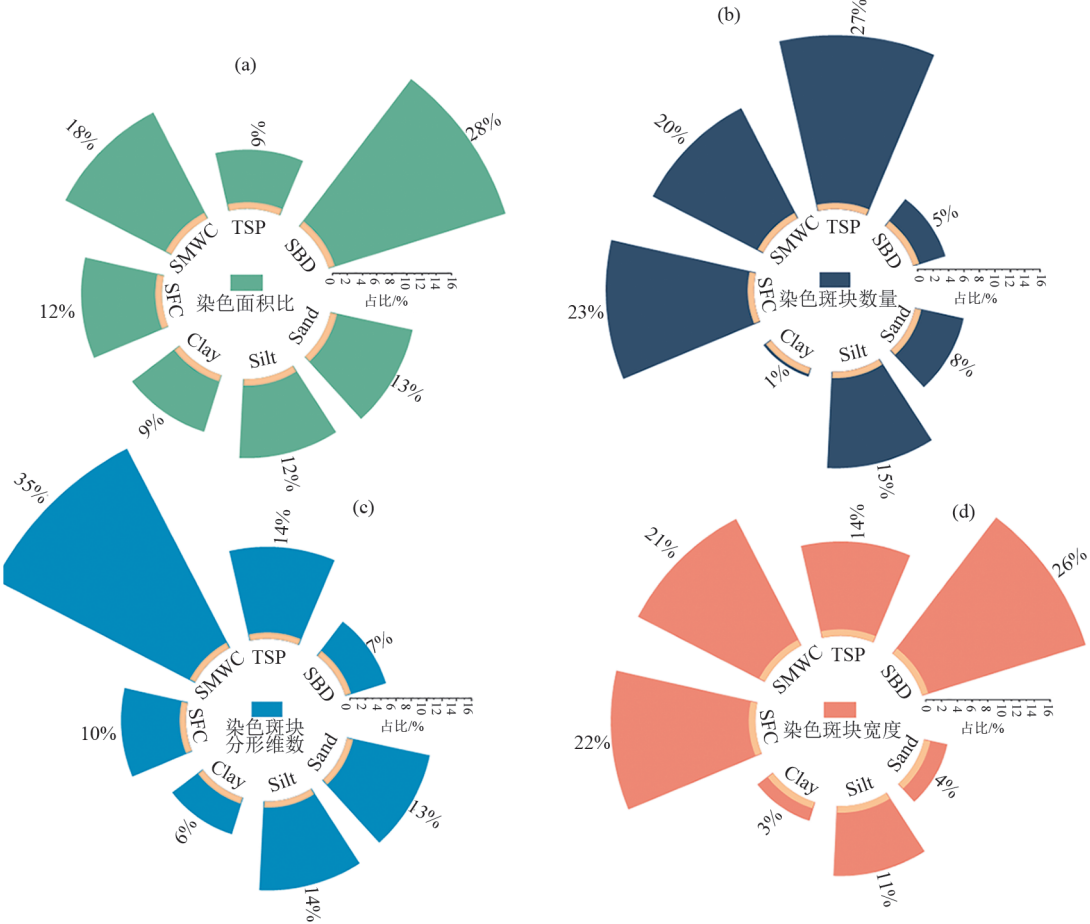


图 5 土壤物理性质对优先流特征参数的相对重要性

Fig. 5 Relative importance of soil physical properties on preferential flow characteristic parameters
<http://stbcbx.alljournal.com.cn>

土壤物理性质因子与染色面积比和染色斑块分形维数拟合度较高, R^2 分别为 0.727 和 0.739, 可以更好地反映优先流发育程度。

表 4 土壤物理性质因子与优先流特征参数之间关系回归方程

Table 4 Regression equations for the relationships between soil physical property factors and preferential flow characteristic parameters

拟合回归方程	R^2	p
$Z_1 = -0.92X_1 + 0.35Y_1$	0.727	<0.001
$Z_2 = 0.83X_2 + 0.028Y_2$	0.739	<0.001
$Z_3 = -0.374X_3 + 0.753Y_3$	0.295	<0.05
$Z_4 = -1.843X_4 - 0.1475Y_4$	0.504	<0.001

注: Z_1 为标准化后染色面积比; X_1 、 X_4 为土壤体积质量; Y_1 、 Y_2 为土壤水分质量分数; Z_2 为标准化后染色斑块分形维数; X_2 、 X_3 为土壤总孔隙度; Z_3 为标准化后染色斑块数量; Y_3 、 Y_4 为土壤田间持水量; Z_4 为标准化后染色斑块宽度。

4 讨论

优先流现象普遍存在于森林土壤中, 并显著影响森林生态系统水分和养分循环过程。通过定性和定量的角度, 本研究选取 6 个优先流特征参数(染色面积比、染色斑块分形维数、染色斑块数量、染色斑块宽度、优先流百分比、基质流深度), 探究 3 种不同植被类型下土壤物理性质对优先流发育程度的影响。本研究发现, 在 3 种林分类型中, 随着土层深度的增加, 土壤体积质量逐渐增大, 总孔隙度、土壤水分质量分数和田间持水量逐渐减小, 松树林土层深度对土壤物理性质差异较为显著, 虽然麻栎林和毛竹林呈相似规律, 但松树林的物理性质随土层深度变化幅度大于麻栎林和毛竹林, 主要归因于其较高的植被物种丰富度, 促进表层形成高孔隙结构, 与左晓东^[23]的研究结果一致。本文中, 麻栎林剖面平均体积质量显著高于毛竹林和松树林, 并且土壤体积质量随着土层深度的增加而减小, 趋于某一稳定数值, 其染色面积比也随着土层深度的增加而下降; 张英虎等^[24]研究发现, 土壤体积质量的升高导致土壤孔隙度的降低, 影响优先流的发育程度; ZHANG 等^[8]研究表明, 较大的土壤体积质量减少孔隙空间, 使得孔隙分布破碎化程度增加, 降低孔隙连通性和孔隙体积, 进而降低亮蓝溶液的染色范围; 还有研究^[25]发现, 土壤大孔隙的密度和数量随土层深度逐渐减少, 造成土壤水分的输送便利程度下降, 水分运动受阻, 限制深层土壤的染色面积比, 与本研究结果一致。

优先流湿润锋迹线具有明显、复杂、破碎和不规

则的分形特征, 通过分形维数刻画染色形状的不规则程度也成为描述优先流的定量化指标^[26]。麻栎林染色斑块分形维数低于松树林和毛竹林, 土壤剖面染色斑块之间的联系和相互作用较高, 且土壤表层有显著差异, 深层无显著差异, 是因为深层土壤受重力压实和有机质输入减少的影响^[27], 孔隙结构趋于简单化, 限制深层的染色斑块分形维数, 与染色面积比指标评价优先流发育程度呈现一致性, 表明染色斑块分形维数在评价优先流发育程度上具有较强的参考性。毛竹林的染色斑块数量最高, 染色斑块宽度均随着土层深度的增加而下降, 下降趋势较急, 优先流在剖面发育良好, 随着土层深度增加, 优先流快速渗入地下, 表现出优先流路径的连贯性和优势性。

麻栎林较高的土壤体积质量与较低的孔隙度组合理论上抑制优先流的发育程度, 然而, 深层土壤孔隙连通性的改善可能促使有限的优先流路径的进一步发育; 另一方面, 麻栎林的土壤水分质量分数远低于松树林和毛竹林, 低水分质量分数导致土壤中的孔隙水压力较低, 进而促进土壤水分的快速下渗^[28], 使得优先流百分比大于松树林和毛竹林。不同林分优先流启动深度的差异本质上是土壤孔隙结构调控水分运移路径的直观体现。松树林表层土壤凭借较高的总孔隙度, 形成更优的初始入渗条件, 使得大量水分在浅层即通过基质流均匀下渗, 导致基质流深度延伸至 17.9 cm, 高于其他林型, 与张静举^[29]的研究结果一致。

在分析土壤物理性质因子对优先流发育程度时发现, 土壤体积质量和土壤总孔隙度对优先流的指标特征影响最多, 且与染色面积比和染色斑块分形维数的拟合度更高。通过进一步分析各个优先流指标特征受物理性质因子的影响发现, 土壤体积质量对优先流染色面积比产生“消极”的影响。ZAHNG 等^[30]研究发现, 较高的土壤非毛管孔隙揭示大孔隙的存在, 这类非毛管孔隙的存在, 增加大孔隙与周围土壤基质区之间的接触面积, 进而提高亮蓝溶液在大孔隙与基质区之间的扩散性能, 促使染色面积比的增加。土壤总孔隙度对染色斑块分形维数的影响为“积极”效应, 增加水流路径的复杂性和不规则性。有研究^[31]发现, 较大的土壤毛管孔隙度增加孔隙分布的复杂性。毛管孔隙度的增加揭示土壤中存在较多的微小孔隙, 使得土壤中的孔隙分布更加复杂, 改变孔隙的整体分布和不同类型孔隙比例,

加剧水流路径分布的复杂程度^[32],进而增加染色斑块分形维数。总而言之,土壤总孔隙度的增加改变毛管孔隙度和非毛管孔隙度的数量,进而影响孔隙的分布与相互连接的状态,最终影响优先流的发育程度。

毛竹林与松树林、麻栎林相比,毛竹林有丰富的根系含量可以改变土壤物理性质,增加土壤团聚体之间的孔隙空间,有效促进水分快速运动。同时毛竹林具有丰富的细根系,细根系生长周期较短,物理分解作用较强,形成更多的根孔隙通道,促进优先流发育程度^[33]。在森林生态系统中,林木根系既可以通过影响土壤的物理性质间接影响优先流的形成,也可以通过其本身所具有的疏水性直接影响优先流的发育,因此,未来有必要进一步研究林木根系对优先流的影响。

本研究试验在植被地下生物量最高季节(秋季)实施,从定性和定量角度,探讨3种植被类型下的优先流强度指标特征,未来研究应进一步加强对不同季节尺度下的典型林分优先流强度分析,进而明确优先流在森林生态系统中的形成机制。

5 结论

1)江苏空青山3种林分下(麻栎林、松树林、毛竹林)土壤随土层深度的增加土壤物理性质差异性减少,表明表层地被覆盖度对土壤表层物理性质影响较大,随土层深度增加其影响程度逐渐减弱。

2)3种林分下土壤均存在明显的优先流现象。随着土层深度的增加,3种林分的染色面积比和染色斑块宽度呈递减趋势,表明优先流的发育程度随土层深度的增加不断下降;麻栎林染色斑块分形维数随土层深度的增加呈递增趋势,表明优先流路径随土层深度增加变得更加复杂,而松树林和毛竹林表现为递减趋势,路径愈发单一;3种林分染色斑块数量随着土层深度的增加呈递增趋势,表明深层土壤的优先流路径更为狭窄。麻栎林与松树林、毛竹林相比在不同土层深度的土壤入渗性质有明显差异。

3)染色面积比与土壤体积质量呈极显著负相关($p < 0.001$),与总孔隙度呈正相关($p < 0.05$);染色斑块分形维数与总孔隙度呈显著正相关($p < 0.01$),与土壤水分质量分数呈极显著正相关($p < 0.001$)。土壤体积质量通过压缩孔隙空间抑制优先流发育,而总孔隙度和水分质量分数则通过增加孔隙连通性与路径复杂性促进优先流的形成,土壤物理性质对优先流发育程度的影响存在较大

差异。

4)在所有土壤物理性质因子中,土壤体积质量和土壤孔隙度对优先流特征参数的变化影响较强,相对重要性较高。因此,在后续进行森林经营管理时,可以更多地考虑通过调节土壤体积质量和土壤孔隙度来改善森林土壤的水文功能。

参考文献:

- [1] 王霖娇,李瑞,盛茂银.典型喀斯特石漠化生态系统土壤有机碳时空分布格局及其与环境的相关性[J].生态学报,2017,37(5):1367-1378.
WANG L J, LI R, SHENG M Y. Distribution of soil organic carbon related to environmental factors in typical rocky desertification ecosystems [J]. Acta Ecologica Sinica, 2017, 37(5):1367-1378.
- [2] 王振鹏,陈金磊,李尚益,等.湘中丘陵区不同恢复阶段森林生态系统的碳储量特征[J].林业科学,2020,56(5):19-28.
WANG Z P, CHEN J L, LI S Y, et al. Characteristics of forest ecosystem carbon stocks at different vegetation restoration stages in hilly area of central Hunan Province, China[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2020, 56(5):19-28.
- [3] BEVEN K, GERMANN P. Macropores and water flow in soils [J]. Water Resources Research, 1982, 18(5): 1311-1325.
- [4] BOGNER C, GAUL D, KOLB A, et al. Investigating flow mechanisms in a forest soil by mixed-effects modelling [J]. European Journal of Soil Science, 2010, 61(6): 1079-1090.
- [5] FLURY M. Experimental evidence of transport of pesticides through field soils: A review [J]. Journal of Environmental Quality, 1996, 25(1):25-45.
- [6] 曾辉,温娜,张建丰,等.华北平原大孔隙优先流对农田氮素淋溶的影响[J].中国生态农业学报(中英文), 2021, 29(1):66-75.
ZENG H, WEN N, ZHANG J F, et al. Effect of macropore preferential flow on nitrogen leaching in a north China Plain farmland [J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2021, 29(1):66-75.
- [7] 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 south-west China [J]. Soil and Tillage Research, 2024, 241: e106132.
- [8] ZHANG Y H, TANG Z Y, ZHANG J C, et al. Visualizing preferential flow paths using dye tracer and species diversity theory methods to explore their correlation to

- soil properties with random forest algorithm[J].*Journal of Hydrology*, 2024, 638: e131570.
- [9] FILIPOVIĆ V, DEFTERDAROVIC J, JIRI Š, et al. Estimation of vineyard soil structure and preferential flow using dye tracer, X-ray tomography, and numerical simulations[J].*Geoderma*, 2020, 380: e114699.
- [10] ZHANG J, SUN Q, WEN N, et al. Quantifying preferential flows on two farmlands in the north China plain using dual infiltration and dye tracer methods[J].*Geoderma*, 2022, 428: e116205.
- [11] WILLIAMS M R, CORONEL O, MCAFEE S J, et al. Preferential flow of surface-applied solutes: Effect of lysimeter design and initial soil water content[J].*Vadose Zone Journal*, 2020, 19(1): e20052.
- [12] GRANT K N, MACRAE M L, ALI G A. Differences in preferential flow with antecedent moisture conditions and soil texture: Implications for subsurface P transport[J].*Hydrological Processes*, 2019, 33(15): 2068-2079.
- [13] KANG W M, TIAN J, LAI Y, et al. Occurrence and controls of preferential flow in the upper stream of the Heihe River basin, northwest China[J].*Journal of Hydrology*, 2022, 607: e127528.
- [14] CHEN C F, ZOU X, SINGH A K, et al. Effects of hill-slope position on soil water infiltration and preferential flow in tropical forest in southwest China[J].*Journal of Environmental Management*, 2021, 299: e113672.
- [15] GUO L, LIN H. Addressing two bottlenecks to advance the understanding of preferential flow in soils[M]//*Advances in Agronomy*. Amsterdam: Elsevier, 2018: 61-117.
- [16] 程金花, 张洪江, 史玉虎, 等. 长江三峡花岗岩区林地优先流影响因子分析[J]. *水土保持学报*, 2006, 20(5): 28-33.
- CHENG J H, ZHANG H J, SHI Y H, et al. Affecting factors of preferential flow in forest of Three Gorges area, Yangtze River[J].*Journal of Soil and Water Conservation*, 2006, 20(5): 28-33.
- [17] 牛健植, 余新晓, 赵玉涛, 等. 贡嘎山暗针叶林土壤优先流形成因素的初步研究[J]. *植物生态学报*, 2006, 30(5): 732-742.
- NIU J Z, YU X X, ZHAO Y T, et al. Study of soil preferential flow in the dark coniferous forest of Gongga mountain, China[J].*Journal of Plant Ecology*, 2006, 30(5): 732-742.
- [18] AEBY P, FORRER J, FLÜHLER H, et al. Image analysis for determination of dye tracer concentrations in sand columns[J].*Soil Science Society of America Journal*, 1997, 61(1): 33-35.
- [19] JIANG X J, CHEN C F, ZHU X A, et al. Use of dye infiltration experiments and HYDRUS-3D to interpret preferential flow in soil in a rubber-based agroforestry systems in Xishuangbanna, China[J].*Catena*, 2019, 178: 120-131.
- [20] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科学技术出版社, 2000.
- LU R K. Methods of soil agrochemical analysis[M]. China Agricultural Science and Technology Press, 2000.
- [21] LI X N, CHENG X, WU W J, et al. Forecasting of bio-aerosol concentration by a back propagation neural network model[J].*Science of the Total Environment*, 2020, 698: e134315.
- [22] SUN W, HUANG C C. A carbon price prediction model based on secondary decomposition algorithm and optimized back propagation neural network[J].*Journal of Cleaner Production*, 2020, 243: e118671.
- [23] 左晓东. 不同保留密度及修枝强度对杉木人林土壤特性的影响[D]. 福州: 福建农林大学, 2024.
- ZUO X D. Effects of different retention density and pruning intensity on soil characteristics of Chinese fir plantation[D]. Fuzhou: Fujian Agriculture and Forestry University, 2024.
- [24] 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.
- [25] ZHANG Y H, CHEN J H, ZHANG J C, et al. Novel indicator for assessing wetland degradation based on the index of hydrological connectivity and its correlation with the root-soil interface[J].*Ecological Indicators*, 2021, 133: e108392.
- [26] 朱美菲, 程金花. 永定河典型护岸植被土壤水分入渗特征及影响因素[J]. *土壤*, 2023, 55(5): 1129-1137.
- ZHU M F, CHENG J H. Soil water infiltration and influencing factors of typical revetment vegetation in Yongding River[J].*Soils*, 2023, 55(5): 1129-1137.
- [27] JIANG X J, LIU W J, WU J N, et al. Land degradation controlled and mitigated by rubber-based agroforestry systems through optimizing soil physical conditions and water supply mechanisms: A case study in Xishuangbanna, China[J].*Land Degradation and Development*, 2017, 28(7): 2277-2289.

(下转第 134 页)

- vation, 2008, 22(5): 221-224.
- [22] 朱云江, 姜彤, 霍继伟, 等. 三门峡原状黄土的大型直剪试验及其尺寸效应[J]. 华北水利水电大学学报(自然科学版), 2020, 41(4): 84-89.
- ZHU Y J, JIANG T, HUO J W, et al. Large scale direct shear test of undisturbed loess in Sanmenxia and its size effect[J]. Journal of North China University of Water Resources and Electric Power (Natural Science Edition), 2020, 41(4): 84-89.
- [23] 吴秋红, 赵伏军, 李夕兵, 等. 不同截面形状砂岩试样的力学特性试验研究[J]. 地下空间与工程学报, 2019, 15(2): 428-434.
- WU Q H, ZHAO F J, LI X B, et al. Experimental study on mechanical properties of sandstone with different cross-sectional shapes[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2019, 15(2): 428-434.
- [24] HOSSAIN M A, YIN J H. Behavior of a compacted completely decomposed granite soil from suction controlled direct shear tests[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2010, 136(1): 189-198.
- [25] 温勇, 杨光华, 汤连生, 等. 广州地区花岗岩残积土力学特性试验及参数研究[J]. 岩土力学, 2016, 37(增刊 2): 209-215.
- WEN Y, YANG G H, TANG L S, et al. Tests and parameters study of mechanical properties of granite residual soil in Guangzhou area [J]. Rock and Soil Mechanics, 2016, 37(S2): 209-215.
- [26] 王港, 张先伟, 刘新宇, 等. 厦门花岗岩残积土的压缩变形特性及其微观机制[J]. 岩土力学, 2021, 42(12): 3291-3300.
- WANG G, ZHANG X W, LIU X Y, et al. Compression characteristics and microscopic mechanism of Xiamen granite residual soil [J]. Rock and Soil Mechanics, 2021, 42(12): 3291-3300.
- [27] 崔喜友, 宋常军, 邵嘉波, 等. 粤西北地区花岗岩残积土的抗剪强度特性[J]. 公路工程, 2024, 49(1): 131-138.
- CUI X Y, SONG C J, SHAO J B, et al. Shear strength characteristics of granite residual soil in northwest Guangdong [J]. Highway Engineering, 2024, 49(1): 131-138.
- [28] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 土工试验方法标准: GB/T 50123—2019 [S]. 北京: 中国计划出版社, 2019.
- Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Standard for Geotechnical testing method: GB/T 50123—2019 [S]. Beijing: China Planning Press, 2019.
- (上接第 126 页)
- [28] 马仁明, 付娟, 贾燕锋, 等. 不同机械压实条件下黑土性质及入渗特征变化研究[J]. 沈阳农业大学学报, 2024, 55(1): 54-65.
- MA R M, FU J, JIA Y F, et al. Characterization of black soil infiltration under different mechanical compaction conditions [J]. Journal of Shenyang Agricultural University, 2024, 55(1): 54-65.
- [29] 张静举. 广西喀斯特区甘蔗地土壤大孔隙流特征研究[D]. 桂林: 桂林理工大学, 2018.
- ZHANG J J. Study on characteristics of soil macropore flow in sugarcane field in karst area of Guangxi [D]. Guilin: Guilin University of Technology, 2018.
- [30] ZHANG W J, ZHU X A, XIONG X, et al. Changes in soil infiltration and water flow paths: Insights from subtropical forest succession sequence [J]. Catena, 2023, 221: e106748.
- [31] 安迪, 彭旭东, 戴全厚, 等. 石漠化区岩-土与非岩-土界面土壤孔隙变异及入渗对干湿变化的响应[J]. 农业工程学报, 2024, 40(11): 139-149.
- AN D, PENG X D, DAI Q H, et al. Response of soil pore variation and infiltration to dry-wet changes at rock-soil and non-rock-soil interface in rocky desertification areas [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2024, 40(11): 139-149.
- [32] LIU Y, GAO M S, WU W, et al. The effects of conservation tillage practices on the soil water-holding capacity of a non-irrigated apple orchard in the Loess Plateau, China [J]. Soil and Tillage Research, 2013, 130: 7-12.
- [33] SONG Q N, LU H, LIU J, et al. Assessing the impacts of bamboo expansion on NPP and N cycling in evergreen broadleaved forest in subtropical China [J]. Scientific Reports, 2017, 7(1): e40383.