

# 杉木近成熟林林分密度对林下套种闽楠根系生长的影响

田云龙<sup>1,2</sup>, 李林鑫<sup>1,2</sup>, 杨贵云<sup>1,2</sup>, 钟兆全<sup>3</sup>, 马祥庆<sup>1,2</sup>, 吴鹏飞<sup>4,2\*</sup>

(1. 福建农林大学林学院, 福州 350002; 2. 国家林业和草原局杉木工程技术研究中心, 福州 350002; 3. 顺昌县国有林场, 福建顺昌 353200)

**摘要:** 【目的】为研究杉楠复层林林分密度对林下套种闽楠根系生长的影响。【方法】通过测定不同杉木林分密度下不同土层闽楠根系生物量、细根形态特征及土壤物理性质, 分析比较不同杉木密度的杉楠复层林中闽楠的根系分布情况、根系平均直径以及土壤持水性能的变化规律。【结果】在同一杉木林分密度下闽楠根系生物量随着根系在垂直土层分布的深入而增加; 在适当的杉木林分密度内, 随着杉木林分密度的增加闽楠生物量呈现先下降后上升的趋势; 在适当的杉木林分密度内, 不同杉木密度对土壤容重、土壤最大持水量、土壤毛管孔隙与土壤非毛管孔隙等林地土壤物理性质的影响不大, 但总的来说对土壤的持水供给养分能力有一定程度的提高, 对土壤有一定的改善作用。【结论】在合理控制林分密度的前提下, 营造杉楠复层林可以增加林地根系的分布, 有效提升林地的持水能力, 从而为杉楠复层林生态系统的健康发展提供了科学依据。

**关键词:** 闽楠; 林分密度; 根系分布; 物理性质; 土层深度

## Effects of stand density on root growth of intercropping *Phoebe bournei* in near-mature Chinese fir forest

TIAN Yunlong<sup>1,2</sup>, LI Linxin<sup>1,2</sup>, YANG Guiyun<sup>1,2</sup>, ZHONG Zhaoquan<sup>3</sup>, MA Xiangqing<sup>1,2</sup>, WU Pengfei<sup>1,2\*</sup>

(1. Forestry College of Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou, Fujian 350002, China; 2. Chinese Fir Engineering Technology Research Center of State Forestry Administration, Fuzhou, Fujian 350002, China; 3. Shunchang County State-owned Forest Farm, Shunchang, Fujian 353200, China)

**Abstract:** 【Objective】In order to study the effect of stand density on the root growth of interplanting *Phoebe bournei* in the multi-layer forest of *Phoebe bournei*. 【Method】by measuring the root biomass, fine root morphological characteristics and soil physical properties of *Phoebe bournei* in different soil layers under different Chinese fir stand densities, the root distribution, average root diameter and soil water holding capacity of *Phoebe bournei* in different Chinese fir stand densities were analyzed and compared.

【Result】Under the same stand density of Chinese fir, the root biomass of *Phoebe bournei* increased with the deepening of root distribution in vertical soil layer. In the appropriate Chinese fir stand density, with the increase of Chinese fir stand density, the biomass of *Phoebe bournei* decreased first and then increased. Within the appropriate Chinese fir stand density, different Chinese fir densities have little effect on soil physical properties such as soil bulk density, soil maximum water holding capacity, soil capillary porosity and soil non-capillary porosity, but in general, the soil water holding capacity and nutrient supply capacity are improved to a certain extent, and the soil is improved to a certain extent.

【Conclusion】under the premise of reasonable control of stand density, the construction of Chinese fir and *Phoebe bournei* multi-layer forest can increase the distribution of forest roots and effectively improve the water holding capacity of forest land, thus providing a scientific basis for the healthy development of Chinese fir and *Phoebe bournei* multi-layer forest ecosystem.

**Key words:** *Phoebe bournei*; stand density; root distribution; physical properties; soil depth

**基金项目:** 国家重点研发计划项目(2021YFD2201304-05)

\*吴鹏飞为通讯作者。

根系作为植物直接与土壤接触的重要功能器官,它不但为植物吸收养分和水分、固定地上部分,还通过呼吸和周转消耗光合产物并向土壤输入有机质,直接参与土壤中物质循环和能量流动两大生态过程,对土壤的结构改善、肥力的发展和土壤生产力的发挥起着重要的作用(杨喜田等,2009)。植物对土壤养分和水分的吸收能力很大程度上取决于根系的形态。根系的分布特征及其与土壤环境之间的复杂关系对植被地上部分的生长有着重要的影响(宋维峰等,2007;李鹏等,2002)。其中,根系的分布特征、生物量、表面积和不同径级根系的比例最为重要。在人工营造的复层混交林内,不同树种地下根系的分布格局往往反映树种间的竞争效应及生态位利用度,对地上部分生长乃至林地生产力具有重要影响。

在森林培育的整个过程中,林分密度是林业工作者所能控制的主要因子,也是形成一定林分水平结构的基础,密度是否合适直接影响到人工林生产力的提高和功能的最大发挥(段爱国等,2004)。造林密度对林木根系生长的影响的研究材料较少。一般认为,过密会损害林木根系发育。在密林中,不但林木根系的水平分布范围小,垂直分布也较浅(杨喜田等,2009)。有研究指出,在过密林分中不但林木个体小,就是全林的总根量也很少(吕士行等,1990)。罗伟祥等(1981)研究表明,林分的生物量在一定的密度范围内随密度的增加而增加。当林分密度增大到一定的值时,由于单位面积林木过多,营养面积减小,根系生长发育受到很大限制。致使生长衰弱,不利于物质积累。适宜的树种混交能够增加林木的细根量,使得林木根系在水平方向和垂直方向上发生良性变化,从而改善林分的微环境。提高林分对水分和养分的利用状况,有利于林木生长(徐振邦等,1987)。对于改善林分结构,维护生物多样性,保护生态环境具有重要意义。

杉木是我国南方地区应用极为广泛的重要造林树种,人工林种植面积占我国人工林面积的18%,以及世界人工林面积的5%(Huang *et al.*, 2013)。经营实践证明,随着杉木林连栽代数和连栽面积逐渐增加,林地生产力下降、林分生态功能低下等问题日渐趋显(夏丽丹等,2018;赵紫檀等,2018)。将杉木纯林改造为混交林,尤其是构建异龄复层林,被认为是解决当前杉木人工纯林面临的主要问题,以及实现可持续发展的有效途径(盛炜彤等,2018;洪宜聪等,2017)。近年来在杉木林下引入耐荫珍贵树种构建复层异龄林,逐渐成为改善杉木纯林单一结构和林分质量的重要措施(查美琴等,2020)。闽楠(*Phoebe bournei*)为亚热带常绿阔叶树种,是中国特有的名贵建筑用材,国家二级保护植物。也是福建省优良的乡土阔叶树种。该树耐阴忌强光,根系发达,属深根性树种(刘宝等,2005;王振兴等,2012)。研究表明,闽楠与杉木混交能显著促进闽楠生长。杉木林下套种闽楠能够形成针阔复层混交林,形成浅根性树种和深根性树种造林模式组合,可充分发挥林种多样性,提高林地土壤肥力,减少病虫害的发生,提高林木生长量,产生较好的生态、经济和社会效益(吴载璋等,2005)。近年来,对于杉木闽楠套种混交的研究也大多集中于对林分生长及冠层结构的影响,但在适宜的杉木林分密度下研究套种闽楠密度对复层林的生长影响的研究较少,对于套种不同密度闽楠对地下根系生长的影响更是鲜有报道。

鉴于此,本文选择不同杉木密度的杉楠复层林中的闽楠树种作为研究对象,通过对不同密度杉木的复层林中,杉木闽楠共存空间内闽楠根系的分布格局、细根形态特征、土壤物理性质的研究,探讨不同杉木密度林下套种闽楠对闽楠地下根系分布格局、细根形态响应以及土壤物理性质的变化特征,筛选出杉木林下套种闽楠的最优密度,从地下根系空间格局角度为林业合理的混交造林提供参考,旨在充分发挥杉阔异龄复层林经济价值,进一步发挥人工林的生态价值提供理论依据。

## 1 研究地概况

本次试验样地位于福建省南平市顺昌县，顺昌县的地理位置处于福建省西北部( $E117^{\circ}29' \sim 118^{\circ}14'$ 、 $N26^{\circ}38' \sim 27^{\circ}12'$ )，县域总面积大概为  $1992 \text{ km}^2$ ，是福建省的重要林区之一，有“中国杉木之乡”之称。本次研究区为亚热带海洋性季风气候，气候较温和，全年雨量分配适中，四季比较分明。县林区内以杉木、毛竹、马尾松、等人工林与天然林植被类型分布为主(宋维峰等, 2007)。境内山脉起伏连绵，错综复杂，许多河流穿插其中，形成复杂的地形地貌。县内多年平均降水量可达  $1760 \text{ mm}$ ，年均气温为  $18.5 \text{ }^{\circ}\text{C}$  左右，无霜期有 305 天。

## 2 研究方法

### 2.1 试验设计

本次试验以福建省顺昌县国有林场杉木近成熟林林下套种闽楠形成的异龄复层林为研究对象，设置杉木固定林分密度套种不同密度闽楠的处理。具体为选择福建顺昌县岚下国有林场 075 林班，其中 2000 年营造杉木纯林，初植密度 4500 株/公顷；2006 年 10 月进行一次抚育间伐，保留 1500 株/公顷。2018 年，对杉木近成熟林来进行不同强度的间伐试验，杉木密度分别保留为 375 株/公顷、570 株/公顷、630 株/公顷、810 株/公顷；2018 年在不同密度杉木林下套种 2 年生闽楠幼苗，闽楠密度为 1200 株/公顷。在上述 4 个处理的林分中设置标准地，每个林分设置三个  $20 \text{ m} \times 20 \text{ m}$  标准样地，共 12 个标准地。对标准地内三个垂直土层距离 (0-20 cm、20-40 cm、40-60 cm) 进行对闽楠根系的挖掘采样。取出的闽楠根系用写好编号的标签袋装取密封。

### 2.2 根系生物量测定

将在试验地采集到的闽楠根系洗净擦干，称重，置  $105 \text{ }^{\circ}\text{C}$  烘箱内杀青 30 min，调至  $80 \text{ }^{\circ}\text{C}$  烘干至恒重 (精确到  $0.001 \text{ g}$ )，分别测定不同土层分布的闽楠根系生物量及闽楠细根各个根级的生物量。

### 2.3 细根根系形态测定

参照 Pregitzer 等(2002)提出的方法对采集到的闽楠细根根系进行分级处理，将最前端具有根尖的根定义为 1 级根，1 级根之母根定义为 2 级根，2 级根之母根定义为 3 级根。利用 WinRHizo (version4.0B) 根系分析系统软件对不同根级根系的总根长、总根表面积、总根体积和根平均直径进行定量计算分析

### 2.4 土壤物理性质测定

土壤物理性质按照中华人民共和国林业行业标准：《森林土壤分析法》，采用环刀法对土壤的容重、质量含水量、土壤通气度、最大持水量、最小持水量、毛管持水量、毛管孔隙度、非毛管孔隙度、总孔隙度进行测定。

### 2.5 数据处理与分析

利用 SPSS 25.0 对实验数据进行单因素方差分析，并利用 Duncan 多重比较方法进行显著性比较 ( $p=0.05$ )，所有数据用平均值 $\pm$ 标准误表示，用 Origin 2021 绘制相关图表。

## 3 结果与分析

### 3.1 上层林分密度及土层深度对闽楠根系生物量及土壤物理性质的影响

由双因素方差分析结果 (表 1) 可得，上层林分密度及土层深度两个因素，对闽楠根系生物量的影响表现出显著的交互作用 ( $p<0.05$ )；上层林分密度对土壤毛管孔隙度及非毛管孔隙度有显著影响，土层深

度则只对根系生物量有显著影响 ( $p<0.05$ )。但上层林分密度及土层深度两个因素对土壤容重、土壤最大持水量、毛管孔隙度及非毛管孔隙度的影响均未表现出显著的交互作用 ( $p>0.05$ )。

表 1 上层林分密度及土层深度对闽楠根系及土壤物理性质影响的双因素方差分析

Table 1 Two-way ANOVA of the effects of upper stand density and soil depth on root and soil physical properties of *Phoebe bournei*.

因素 Factor	自由度 df	F				
		土壤容重	最大持水量	非毛管孔隙度	毛管孔隙度	根系生物量
上层林分密度(a) Upper stand density	3	1.118	0.913	3.396*	5.064**	1.418
土层深度(b) soil depth	2	0.716	1.209	1.222	0.044	13.525**
a×b	6	1.129	1.168	1.666	0.703	3.319*

注: \*代表因素对指标的影响达到显著差异水平 ( $p<0.05$ ); \*\*代表因素对指标的影响达到极显著差异水平 ( $p<0.01$ )。

Note: In the table, \* represents the influence of factors on the indicators reached a significant difference level ( $p<0.05$ ); \*\* represents the influence of factors on the indicators reached a very significant difference level ( $p<0.01$ ).

### 3.2 上层林分密度及土层深度对闽楠根系分布格局的影响研究

如图所示,上层林分密度为 810 株/公顷时,随着土层深度的增加,闽楠根系生物量有先上升后下降的趋势。当上层林分密度为 375、570、630 株/公顷时,随着土层深度的增加,闽楠根系生物量均表现为逐渐下降的趋势。当上层林分密度为 630 株/公顷时,0-20 cm 土层的闽楠根系生物量显著高于 20-40 cm 和 40-60 cm 土层 ( $p<0.05$ )。其中,0-20 cm 土层的闽楠根系生物量最高,为 963.49 g/m<sup>3</sup>,40-60 cm 土层闽楠根系生物量最低,为 37.84 g/m<sup>3</sup>;当上层林分密度为 810 株/公顷时,0-20 cm 和 20-40 cm 土层的闽楠根系生物量均显著高于 40-60 cm 土层 ( $p<0.05$ )。其中 20-40 cm 土层的闽楠根系生物量最高,为 743.49 g/m<sup>3</sup>;40-60 cm 土层闽楠根系生物量最低,为 67.42 g/m<sup>3</sup>。

根据上层林分密度及土层深度对闽楠根系分布格局的影响(图 1)可知,随着上层林分密度的增加,在 0-20 cm 土层深度内闽楠根系生物量呈现出现减少后增加的趋势。其中,在上层林分密度为 630 株/公顷时,闽楠根系生物量最高,为 963.49 g/m<sup>3</sup>;上层林分密度为 570 株/公顷时,闽楠根系生物量最低,为 362.65 g/m<sup>3</sup>。但上层林分密度对 0-20 cm 土层深度的闽楠根系生物量的影响未达到显著差异水平 ( $p>0.05$ )。随着上层林分密度的增加,闽楠生物量在 20-40 cm 土层深度内呈现先下降后上升的趋势。闽楠根系生物量在上层林分密度为 810 株/公顷时,显著高于上层林分密度为 570 株/公顷和 630 株/公顷 ( $p<0.05$ )。其中,在杉木林分密度为 810 株/公顷时,闽楠根系生物量最高,为 743.49 g/m<sup>3</sup>;上层林分密度为 630 株/公顷时,闽楠根系生物量最低,为 165.62 g/m<sup>3</sup>。当土层深度为 40-60 cm 时,随着杉木林分密度的增加,闽楠生物量呈现先下降后上升的趋势。其中,在杉木林分密度为 375 株/公顷时,闽楠根系生物量最高,为 205.83 g/m<sup>3</sup>,显著高于其他林分密度 ( $p<0.05$ )。杉木林分密度为 630 株/公顷时,闽楠根系生物量最低,为 37.84 g/m<sup>3</sup>。

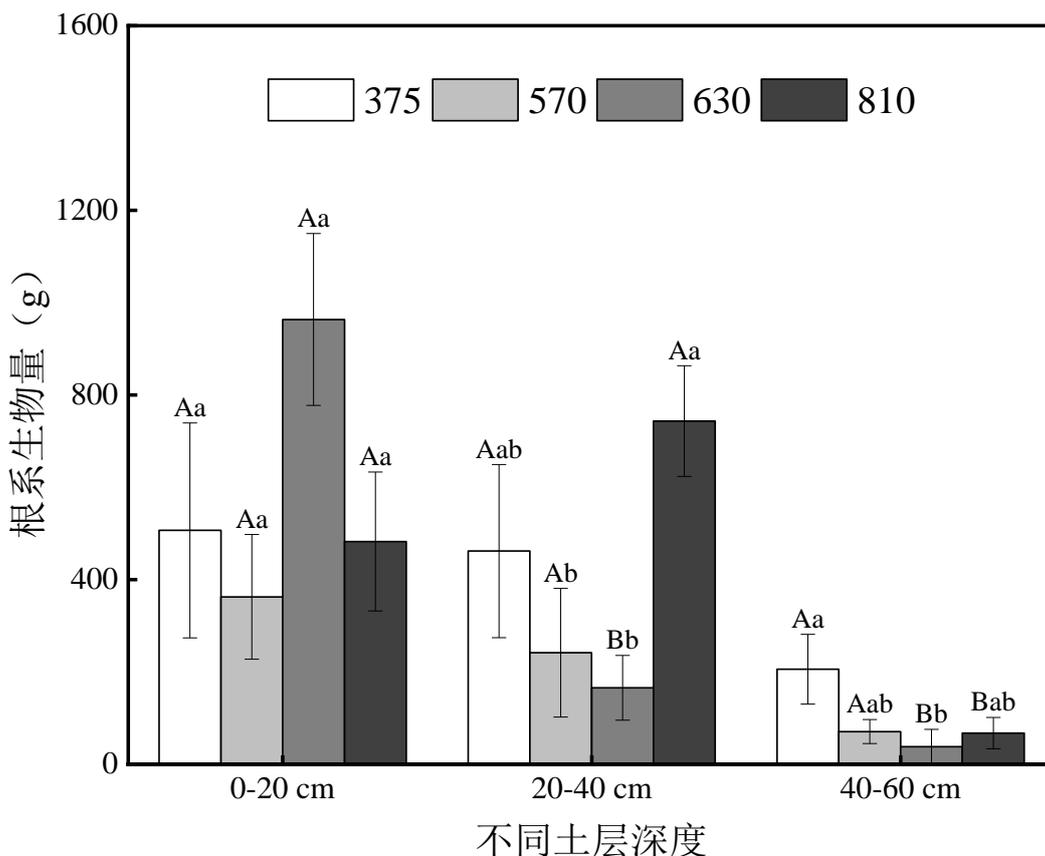


图 1 上层林分密度及土层深度对闽楠根系分布格局的影响

Figure 1 Effects of upper stand density and soil depth on root distribution pattern of *Phoebe bournei*

注：图中 375、570、630、810 分别代表上层林分密度为 375 株/公顷、570 株/公顷、630 株/公顷、810 株/公顷；不同小写字母代表闽楠根系生物量在相同土层深度时，不同林分密度间具有显著差异，不同大写字母代表闽楠根系生物量在相同林分密度时，不同土层深度间具有显著差异 ( $p < 0.05$ )。

Note: In the figure, 375, 570, 630, and 810 represent the upper stand density of 375 plants / hectare, 570 plants / hectare, 630 plants / hectare, and 810 plants / hectare, respectively. When different lowercase letters represent the root biomass of *Phoebe bournei* at the same soil depth, there are significant differences between different stand densities. When different uppercase letters represent the root biomass of *Phoebe bournei* at the same stand density, there are significant differences between different soil depths ( $p < 0.05$ ).

### 3.3 上层林分密度及根序级别对闽楠细根形态特征的影响研究

由双因素方差分析结果 (表 2) 可得，上层林分密度及根序级别两个因素，对闽楠根系平均直径的影响未表现出显著的交互作用 ( $p > 0.05$ )。其中，根序级别对闽楠根系平均直径也有显著影响 ( $p < 0.05$ )。

表 2 上层林分密度及根序级别对闽楠细根形态特征的双因素方差分析

Table 2 Two-way ANOVA of the effects of upper stand density and root order levels on fine root morphological characteristics of *Phoebe bournei*.

因素 Factor	自由度 df	F
		根系平均直径
上层林分密度(a) Upper stand density	3	1.218
根序级别(b) Root order level	2	40.799**
a×b	6	0.385

注：\*代表因素对指标的影响达到显著差异水平 ( $p < 0.05$ )；\*\*代表因素对指标的影响达到极显著差异水平 ( $p < 0.01$ )。

Note: In the table, \* represents the influence of factors on the indicators reached a significant difference level ( $p < 0.05$ ); \*\* represents the influence of factors on the indicators reached a very significant difference level ( $p < 0.01$ ).

根据上层林分密度及根序级别对闽楠细根形态特征的影响可得（图 2），对于不同根序级别，随上层林分密度增加，闽楠根系平均直径均呈减小的趋势。对于 1 级根，上层林分密度为 375 株/公顷时，闽楠根系平均直径显著高于林分密度为 570 株/公顷 ( $p < 0.05$ )。但对于 2 级根以及 3 级根，不同林分密度间闽楠根系平均直径均无显著差异 ( $p > 0.05$ )。当上层林分密度为 570、630、810 株/公顷时，闽楠 3 级根根系平均直径均显著高于 1 级根和 2 级根，当上层林分密度为 375 株/公顷时，闽楠 2 级根和 3 级根根系平均直径均显著高于 1 级根 ( $p < 0.05$ )。

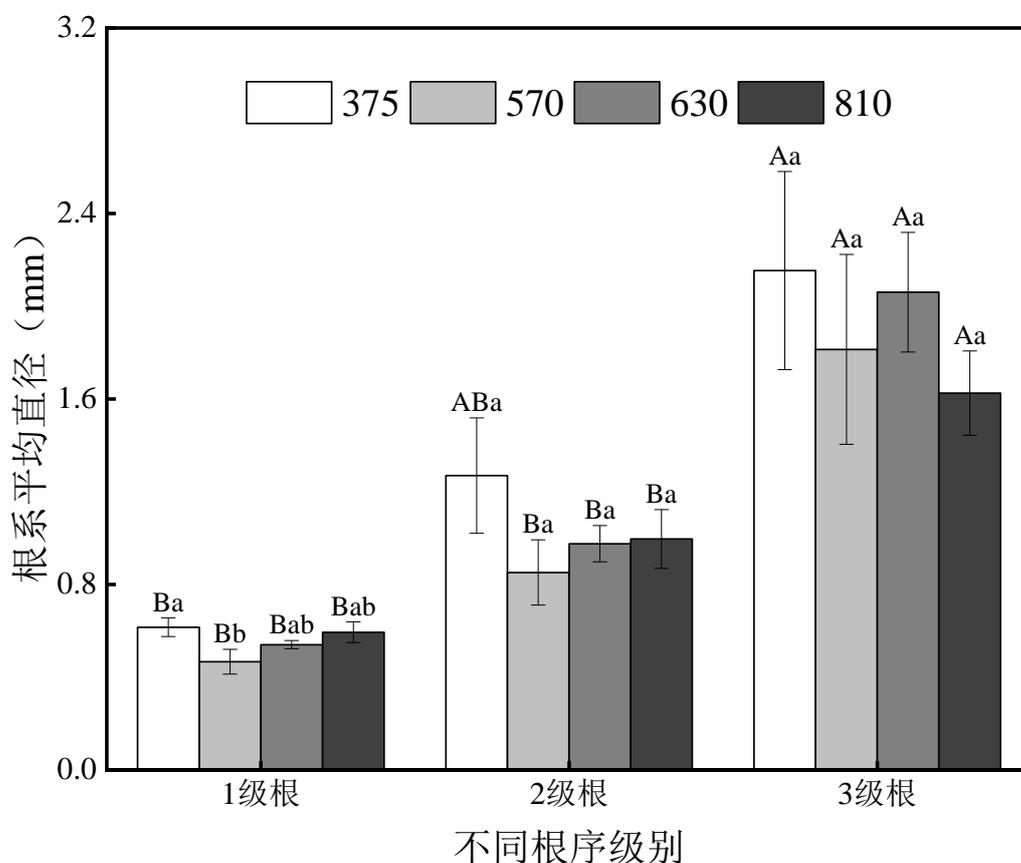


图 2 上层林分密度及根序级别对闽楠细根形态特征的影响

Figure 2 Effects of upper stand density and root order on morphological characteristics of fine roots of *Phoebe bournei*

注：图中 375、570、630、810 分别代表上层林分密度为 375 株/公顷、570 株/公顷、630 株/公顷、810 株/公顷；不同小写字母代表闽楠根系平均直径在相同根序级别时，不同林分密度间具有显著差异，不同大写字母代表闽楠根系平均直径在相同林分密度时，不同根序级别间具有显著差异 ( $p < 0.05$ )。

Note: In the figure, 375, 570, 630, and 810 represent the upper stand density of 375 plants / hectare, 570 plants / hectare, 630 plants / hectare, and 810 plants / hectare, respectively. Different lowercase letters represent that the average root diameter of *Phoebe bournei* has significant differences between different stand densities at the same root order level. Different uppercase letters represent that the average root diameter of *Phoebe bournei* has significant differences between different root order levels at the same stand density ( $p < 0.05$ ).

### 3.4 上层林分密度及土层深度对林地土壤物理性质的影响研究

根据上层林分密度及土层深度对林地土壤物理性质的影响可知(图3、图4),上层林分密度为630株/公顷时,林地土壤容重及毛管孔隙度均高于其他林分密度,分别为 $1.26\text{ g/cm}^3$ 和 $45.44\%$ 。林地土壤最大持水量及非毛管孔隙度则均小于其他林分密度处理,分别为 $395.16\text{ g/kg}$ 和 $4.13\%$ 。当上层林分密度为630株/公顷时,林地土壤毛管孔隙度显著高于375和570株/公顷的林分密度( $p<0.05$ ),而林地土壤非毛管孔隙度则显著低于375和570株/公顷的林分密度( $p<0.05$ )。此外,不同林分密度对林地土壤容重及最大持水量未达到显著差异水平( $p>0.05$ )。当土层深度为0-20 cm时,土壤最大持水量及非毛管孔隙度均高于其他土层深度,分别为 $442.10\text{ g/kg}$ 和 $8.28\%$ 。但不同土层深度间土壤容重、最大持水量、毛管孔隙度及非毛管孔隙度均未达到显著差异水平( $p>0.05$ )。

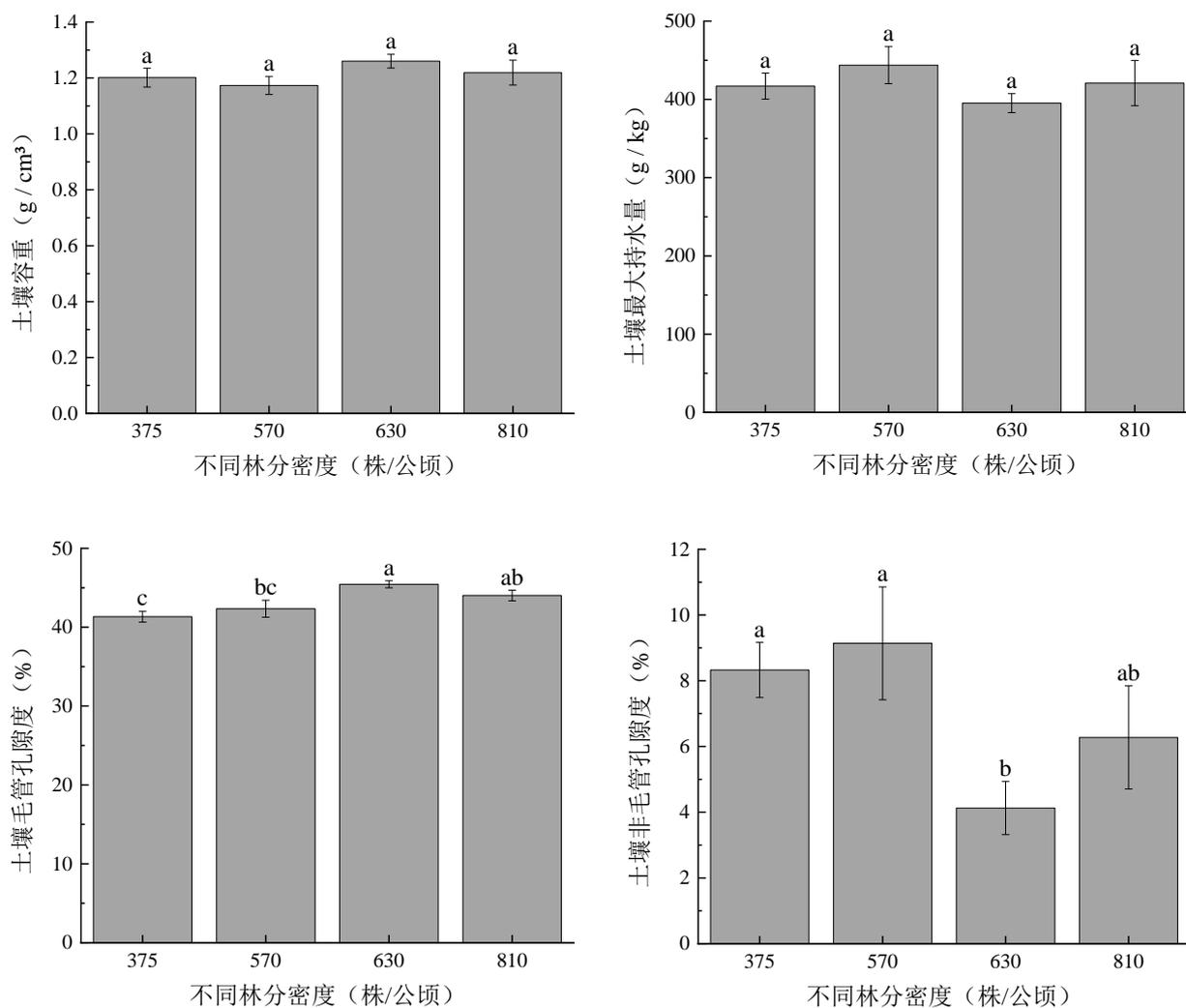


图3 上层林分密度对林地土壤物理性质的影响

Figure 3 Effect of upper stand density on soil physical properties of forest land

注: 图中不同小写字母代表指标在不同林分密度间具有显著差异 ( $p<0.05$ )。

Note: In the figure, different lowercase letters indicate significant differences between different treatments.

( $p<0.05$ ).

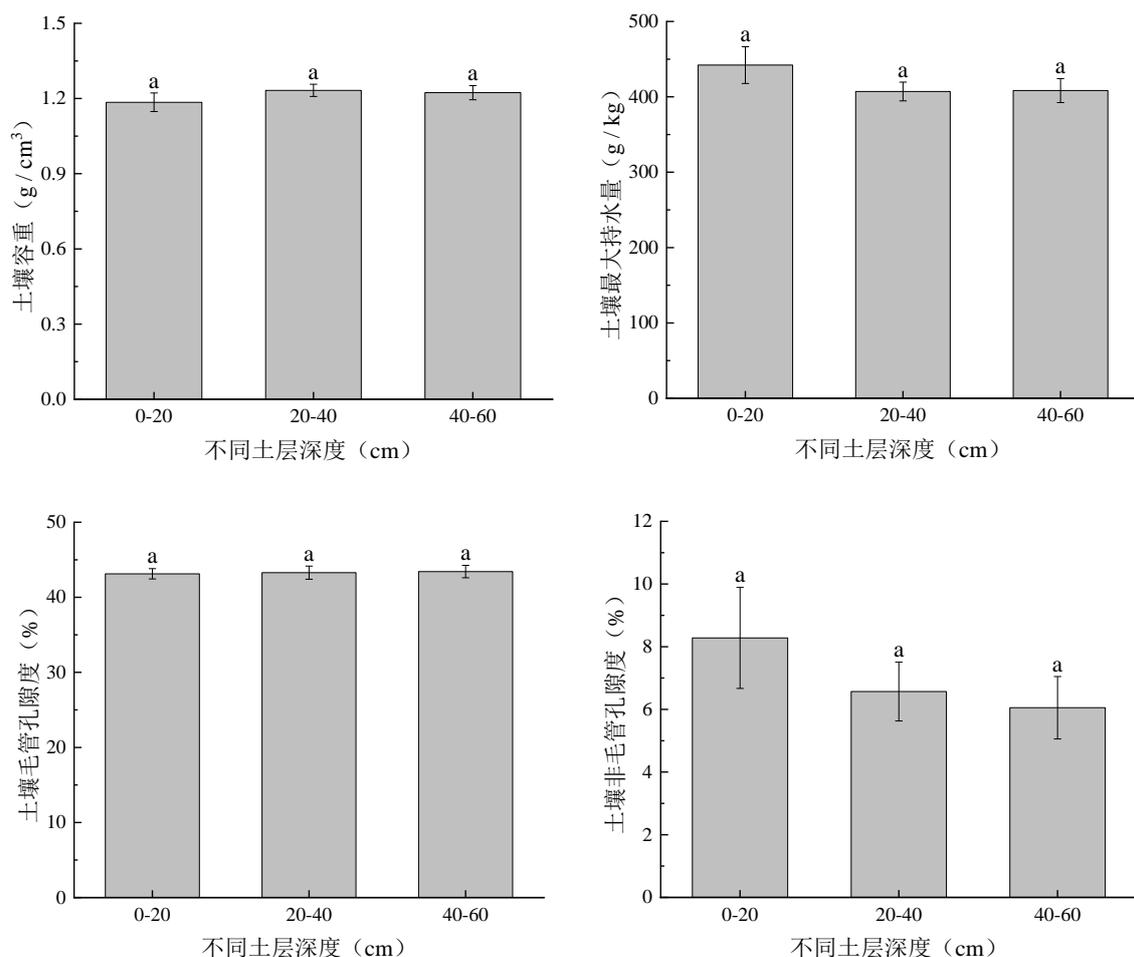


图 4 土层深度对林地土壤物理性质的影响

Figure 4 Effects of soil depth on soil physical properties of forest land

注：图中不同小写字母代表指标在不同土层深度间具有显著差异 ( $p < 0.05$ )。

Note: In the figure, different lowercase letters indicate significant differences between different treatments.

( $p < 0.05$ ).

## 4 讨论

### 4.1 上层林分密度对闽楠根系分布格局的影响规律

众所周知，植物根系主要起着固定植物，吸收水分与养分的作用。随着植物的成长，越发需要更多的养分与水分来维持植株生长，根系需要向更深的土层生长来获取营养物质。根系便会不断萌发主要用来吸收养分的细根，萌发出细根的根系则逐渐成长为粗壮的成熟根，用以支撑植株，扩展生存空间(董秀秀等, 2022; Wu *et al.*, 2023; Díaz-Barradas *et al.*, 2023)。因此，随着土层深度的增加，根系分布会减少，相应的根系生物量也会减少。

在杉木林分密度为 630 株/公顷、810 株/公顷的样地内，不同土层深度对闽楠根系生物量的影响是显著的，可能是因为杉木林分密度较大，杉木与闽楠根系竞争较为激烈，同时闽楠较为幼嫩，杉木根系在 20cm 土层以下的竞争优势会比较显著，从而抑制了闽楠根系向下延伸生长，迫使闽楠的根系暂时集中在 0-20cm 土层内，因此影响是显著的。而在杉木林分密度为 810 株/公顷的样地内 20-40cm 土层的闽楠根系生物量要高于 0-20cm 土层，可能是因为杉木林分密度过高，该样地内 0-20cm 土层内闽楠根系与杉木竞争激烈，压

力较大,从而导致根系生物量不高,根系多向下伸展以获取足够多的养分与水分以维持植株生长。

从相同土层深度下不同杉木林分密度对闽楠根系生物量的影响规律来看,试验数据表明在 20-40cm、40-60cm 垂直土层距离下,杉木林分密度对闽楠根系生物量的影响较为显著,随着杉木林分密度的增加,闽楠根系生物量呈现先下降后上升的趋势。在密度较低的杉木林分中,闽楠根系生物量要比密度较高的杉木林分要高。这可能是因为在较低密度的杉木林分中,树木之间的空间更大,根系可以更好地发展和扩展(洪宜聪等, 2017; Gong *et al.*, 2023)。而在杉木密度为 810 株/公顷的样地内,闽楠根系生物量又会有增加的趋势,可能是因为杉木林分密度过大,竞争比较激烈,导致闽楠根系向下延伸壮大以获取足够多的水分与养分。

而在 0-20cm 土层内,杉木林分密度对闽楠根系生物量的影响是不显著的,闽楠根系生物量呈现先下降后上升再下降的趋势。这可能是因为在 0-20cm 土层中土壤的养分和水分资源是有限的,树木之间利用水分与养分资源的能力相近。杉木林分密度不同,不同土层深度的闽楠根系生物量也是不同的,竞争激烈程度的不同对闽楠根系生物量的主要影响会在 20cm 土层以下的深度体现。

#### 4.2 上层林分密度对土壤物理性质的影响规律

一般情况下,杉木的根系能够在土壤中形成根道、根团等空隙结构,加大了土层的疏松程度,降低了土壤容重。但是,如果杉木林分过密,树木的生长空间受到限制,导致根系分布范围变小,对土壤松散程度的改善也会相应减少。同时过高的林分密度会导致土壤松散度降低,土壤孔隙度变小,根系生长受到限制,不易透水和蓄水,从而导致土壤最大持水量降低(李伟博等, 2023)。高密度的林分也会加剧土壤的蒸发,进一步减少土壤的蓄水能力。

试验数据表明不同杉木林分密度对于土壤容重以及土壤最大持水量这一指标是没有显著影响的,对于土壤毛管孔隙度与土壤非毛管孔隙度的影响也不大。可能的原因是杉木林分密度还处于合理范围内,各样地杉木生长状况比较相近,根系底部有足够的空间为植被根系提供良好的扩张条件,同时杉木生长过程中部分的碳水化合物会转化为植物根系分泌物和有机质,对于土壤容重,土壤最大持水量的影响具有稳定平衡作用。而土壤持水量又是影响土壤毛管孔隙度与土壤非毛管孔隙度的重要因素之一,过高或过低的含水率都会影响土壤孔隙的发育和形成。因此在合理的杉木林分密度范围内,不同杉木林分密度在 0-20cm 土层内对林地土壤物理性质的影响是不显著的。

但从总的趋势来看,较高密度的杉木林分内的土壤容重、土壤最大持水量、土壤毛管孔隙度与非毛管孔隙度要略大于低密度的杉木林分。由此表明在合理的杉木林分密度内,杉木林分密度的适当增加可以改善林地土壤物理性质。从土壤容重方面来看,较高密度的杉木林分会导致土壤板结加剧,从而加剧了土壤团聚和致密化,提高了土壤的容重;从土壤持水量来看,杉木根系能够分泌有机物质,促进土壤有机质的积累,增加土壤的肥力和存水能力。同时植物的根系有助于微生物生长和繁殖,提供生物多样性和生态系统健康,同样也有利于土壤水分的保持和释放<sup>[43]</sup>;从土壤孔隙度来看,杉木根系能够在土层中形成复杂的分支和网状结构,利用毛管孔隙向根系供水、供养分,进而促进根系的生长和发育,影响着毛管孔隙的分布和形成。同时杉木的根系能够将土壤中的粘土颗粒粘结在一起,使颗粒之间形成更大的胶结结构,提高非毛管孔隙度。

## 5 结论

在同一杉木林分密度下闽楠根系生物量随着根系在垂直土层分布的深入而增加。在适当的杉木林分密

度内，随着杉木林分密度的增加闽楠生物量呈现先下降后上升的趋势。在适当的杉木林分密度内，不同杉木密度对土壤容重、土壤最大持水量、土壤毛管孔隙与土壤非毛管孔隙等林地土壤物理性质的影响不大，但总的来说对土壤的作用是积极的，能够提高土壤质量促进土壤的良性发展。在合理的杉木林分密度内，较高的杉木林分密度可以增加杉楠复层林中植被覆盖率，提高土地保持水土能力，减少水土流失和洪涝灾害的风险，还可以促进森林生态系统的恢复和更新，改善大气环境质量，调节气温湿度等气候条件，提高生物多样性等。同时闽楠是喜阴树种，上层杉木林分密度在合理范围内不会过于遮蔽闽楠，则对闽楠根系分布以及生长影响不大。同时在合理的杉木林分密度内适当的增加杉木林分密度能够促进林地土壤物理性质的改善。因此，在林业和土地管理中，应该注意加强植物根系生长管理，维护和促进植物根系的健康发育，以达到保障根系分布和林地土壤物理性质稳定的目的。