丁业新,李家彧,厉月桥,等.不同林窗大小对杉木林下闽楠个体生长和植株构型的影响[J].江西农业大学学报,2025,47(6):1549-1558.
DING Y X,LI J Y,LI Y Q,et al.Effects of different gap sizes on individual growth and plant configuration of *Phoebe bournei* under Chinese fir forest[J].Acta agriculturae universitatis Jiangxiensis,2025,47(6):1549-1558.

不同林窗大小对杉木林下闽楠个体生长和植株构型的影响

丁业新[1,2],李家彧[1,2],厉月桥[1,2*],王丽云[1,2],喻龙华[1,2],
陈家堂[1,2],宋连生[1,2],邓煌蔚[1,2]

(1.中国林业科学研究院 亚热带林业实验中心,江西 新余 336600;2.生物多样性保护与资源利用江西省重点实验室,江西 新余 336600)

摘要:【目的】林窗会调控林分环境中光、温度、水分等资源的再分配,从而影响林下幼苗的生长。为揭示林窗面积调控对杉木(*Cunninghamia lanceolata*)林下套种闽楠(*Phoebe bournei*)生长发育的影响。【方法】以2年生闽楠幼苗为研究对象,设置4 m×4 m(T1)、8 m×8 m(T2)、12 m×12 m(T3)杉木皆伐样地,另以8 m×8 m(CK)不处理林分作为对照,进行林下闽楠补植试验,4年后测量并分析闽楠生长、枝叶根生物量、分枝构型和根系构型指标。【结果】(1)不同大小林窗处理下闽楠在树高和胸径方面表现出极显著差异(P<0.01),在枝下高方面表现出显著差异(P<0.05),其中树高、胸径、冠幅均在T2处理下达到最高,分别比对照组提升了44.9%、51.3%和15.2%;(2)T2处理下,林冠上层和中层枝叶生物量、土层0~20 cm和20~40 cm深度根生物量达到峰值,分别较对照提升了109.3%、67.4%、30.0%、56.7%、206.9%和331.3%,且在土层0~20 cm和20~40 cm深度根系生物量分别表现出显著(P<0.05)和极显著差异(P<0.01);(3)T2处理下,林冠上层的基径,中层和下层的二级枝分枝数达到峰值,分别比对照提升了9.1%、30.5%和55.3%,其中上层二级枝基径和中层二级枝分枝数表现出显著差异(P<0.05);T3处理下,林冠上层分枝数、一级枝基径、中层分枝数、下层分枝数和枝长分别比对照组提升了79.7%、10.6%、68.2%、58.3%、12.0%和28.7%;(4)T2处理下,0~20 cm土层深度内根表面积,20~40 cm土层深度内根长、根尖数,40~60 cm土层深度内根长、根尖数分别较对照提升了92.7%、136.0%、79.2%、61.0%和44.6%。T3处理下,0~20 cm土层深度内根长、根尖数,20~40 cm土层深度内根体积,分别较对照提升了80.5%、127.4%和231.8%。【结论】T2处理下,杉木林下闽楠的树高、胸径、冠幅、枝下高、一二级分枝数、分枝角、基径、枝长、叶生物量、枝生物量以及根系各指标综合表现最佳。林窗处理可有效提升闽楠幼苗期的生长发育,能够显著促进闽楠的生长和构型建成。

关键词:闽楠;杉木;林窗;构型
中图分类号:S792.24　　**文献标志码:**A　　**开放科学(资源服务)标识码(OSID):**
文章编号:1000-2286(2025)06-1549-10
CSTR:32399.14.aauj.2025134

收稿日期:2024-11-08　　**修回日期:**2025-06-08
基金项目:中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金(CAFYBB2020MB004)和"十四五"国家重点研发计划项目(2022YFF1303003-02)
Project supported by the Basic Scientific Research Business Expenses of Central Public Welfare Scientific Research Institutes(CAFYBB2020MB004)and the Special Topic of the National Key R&D Program during the 14th Five-Year Plan Period(2022YFF1303003-02)
作者简介:丁业新,工程师,硕士,orcid.org/0009-0004-7595-9475,1664665025@qq.com;*通信作者:厉月桥,正高级工程师,博士,主要从事森林培育研究,orcid.org/0000-0002-8575-3153,jgyx11@163.com。
©《江西农业大学学报》编辑部,开放获取CC BY-NC-ND协议

Effects of different gap sizes on individual growth and plant configuration of *Phoebe bournei* under Chinese fir forest

DING Yexin[1,2], LI Jiayu[1,2], LI Yueqiao[1,2*], WANG Liyun[1,2], YU Longhua[1,2], CHEN Jiatang[1,2], SONG Liansheng[1,2], DENG Huangwei[1,2]

(1.Experimental Center of Subtropical Forestry, Chinese Academy of Forestry, Xinyu, Jiangxi 336600, China; 2. Key Laboratory of Biodiversity Conservation and Resource Utilization in Jiangxi Province, Xinyu, Jiangxi 336600, China)

Abstract: [**Objective**] Gap will regulate the redistribution of light, temperature, water and other resources in the forest environment, thus affecting the growth of seedlings under the forest. This study aims to reveal the influence of gap area regulation on the growth and development of *Phoebe bournei* interplanting under Chinese fir. [**Method**] Taking 2-year-old *Phoebe bournei* seedlings as the research object, three clear-cut Chinese fir sample plots with spacing configurations of 4 m×4 m (T1), 8 m×8 m (T2), and 12 m×12 m (T3) were established. Additionally, an untreated 8 m×8 m stand (CK) was set as the control group to conduct an understory *Phoebe bournei* supplementary planting experiment. After 4 years, the growth, branch and root biomass, branching configuration, root configuration of *Phoebe bournei* were measured and analyzed. [**Result**] (1) There were extremely significant differences in tree height and breast diameter of *Phoebe bournei* under different gap sizes (P<0.01), and significant differences in branch height (P<0.05), among which the tree height, breast diameter and crown width reached the highest under T2 treatment, which were 44.9%, 51.3%, and 15.2% higher than those of the control group, respectively; (2) Under T2 treatment, the biomass of branches and leaves in the upper and middle layers of the canopy, and the biomass of roots in the depth of 0-20 cm and 20-40 cm reached the peak, which were 109.3%, 67.4%, 30.0%, 56.7%, 206.9% and 331.3% higher than those of the control, and the root biomass showed significant (P<0.05) and extremely significant difference (P<0.01) at the depth of 0-20 cm and 20-40 cm, respectively; (3) Under T2 treatment, the basal diameter of the upper layer, the number of secondary branches in the middle layer and the lower layer of the canopy reached the peak, which were 9.1%, 30.5% and 55.3% higher than those of the control, and the basal diameter of the secondary branches in the upper layer and the number of secondary branches in the middle layer showed significant differences (P<0.05); Under T3 treatment, the number of upper branches, primary branch base diameter, middle branch number, lower branch number, primary branch base diameter and branch length of the canopy were 79.7%, 10.6%, 68.2%, 58.3%, 12.0% and 28.7% higher than those of the control group; (4) Under T2 treatment, the root surface area in 0-20 cm soil depth, root length and root tip number in 20-40 cm soil depth, root length and root tip number in 40-60 cm soil depth were 92.7%, 136.0%, 79.2%, 61.0% and 44.6% higher than those of the control; Under T3 treatment, the root length, root tip number in 0-20 cm soil depth and root volume in 20-40 cm soil depth increased by 80.5%, 127.4% and 231.8% respectively compared with the control. [**Conclusion**] Under T2 treatment, the comprehensive performance of tree height, breast diameter, crown width, height under branches, number of primary and secondary branches, branch angle, basal diameter, branch length, leaf biomass, branch biomass and root system was the optimal. Gap treatment can effectively promote the growth and development of *Phoebe bournei* in seedling stage, and can significantly promote the growth and configuration of *Phoebe bournei*.

Keywords: *Phoebe bournei*; Chinese fir; forest gap; structural shape

【研究意义】闽楠(*Phoebe bournei*(Hemsl.)Yang)为樟科楠属乔木,广泛分布于我国南方各省,属国家

二级保护树种[1-3]。闽楠树干通直且高大,其木材具有质地坚硬、耐腐蚀、抗逆性强等优良特性,纹理结构美观,是制造高级家具、雕刻工艺品等的优质用材,为我国珍贵的用材树种[4]。然而,由于天然闽楠对立地条件要求较高、生长缓慢且遭受严重人为破坏,野生楠木资源濒临枯竭[5]。同时,由于人们在环境异质对闽楠生长影响的研究方面水平还有限,闽楠人工林栽培技术相对滞后,且目前多采用单一树种栽植的人工纯林,形成的人工纯林林分层次简单,生物多样性较低[6],严重影响我国社会及经济效益。因此,为缓解相应用材林市场供需矛盾,提升闽楠人工林质量,开展闽楠人工林培育模式及相关技术研究的创新工作具有重大意义。【前人研究进展】在树木的生活史中,幼树的生长态势决定着其种群的延续与发展[7]。分析幼树在空间分布格局与环境因子之间的关系有助于揭示其在生活史中对环境的适应机制,对制定相应的种质保育措施有着积极的意义[8]。相关学者对人工林套种植物的研究主要集中在不同间伐强度下人工林生长发育的变化规律[9-10]、林下植被生长状况[11-12]、林分生产力[13]以及土壤理化性质[14-15]等方面。研究发现,闽楠濒危的原因之一在于其缺乏竞争力[16],而提高其竞争力的关键在于强化苗木自身的质量优势[17]。高质量的幼苗应具备优良的形态指标和丰富的养分储备[18]。通过优化基质配比等方式人工培育种苗可以促进幼苗早期的生长。如王艺等[19]研究发现,高配比的营养土可显著提升闽楠幼苗对养分的吸收效率,促进其生长发育。而在当前天然环境中,森林经营主要通过抚育间伐形成的林窗来调节林分内水分和光热资源的分配,从而直接影响到林下植被的生长发育和冠层结构,对林下幼树的更新具有深远意义[20-22]。研究[23-25]表明,林窗的形成能够促进林分及林下植被的生长,而且其影响效果与林窗大小呈显著正相关关系,是人工干预森林生长的有效措施。如魏阿荣[26]研究发现,在林窗环境下,杉木人工林套种的楠木其生长量、地径和树高均要显著高于对照,曾思奇等[27]研究发现,种植于木荷次生林中的闽楠幼苗,在面积为 1.60~2.70 m^2的林窗下长势最佳,李肇锋等[28]在杉木林中开展不同透光度下闽楠造林试验后发现,2 年后闽楠幼林的生长表现呈现出林窗环境优于林中旷地、林中旷地优于林冠下的趋势,郭滨[29]指出,在干材生长阶段的杉木林中,林窗环境下闽楠生长状况要优于速生生长阶段,显著提高了造林成活率。

【本研究切入点】林下植被的生长变化与林木间伐后不同林窗的大小具有较大相关性,探究不同林窗面积调控处理后林下套种植物生长发育动态规律,有利于深入了解营林措施对人工林植被生长的影响。目前,已有大量关于树木林冠层特性的研究报道,但林窗环境的异质性对林下闽楠生长和构型的研究还不够充分,而此方面研究对于揭示杉木林下闽楠的生长规律及更新具有重要意义。【拟解决的关键问题】研究选择在 40 年生杉木人工林内,开展不同林窗面积条件下的杉木林下闽楠种植试验,通过分析闽楠生长状况和构型等指标,揭示林窗面积调控对杉木林下套种闽楠生长发育和构型的影响机制,为今后调控人工林林分结构、提高生态功能以及科学经营提供理论依据。

1　材料与方法

1.1　试验地概况

试验地位于江西省新余市分宜县中国林业科学研究院亚热带林业实验中心上村实验林场,地属亚热带湿润性气候,雨量充沛,阳光充足,气候温和,年平均气温 18.0 ℃,极端最低温-7.2 ℃,极端最高温 40.0 ℃,全年降水量 1 434.7 mm,全年无霜期 274 d。试验地地理位置为 27°37′31.53″~27°37′12.65″N,114°32′33.65″~114°32′41.53″E,海拔 590~630 m。试验林为 1984 年营造的杉木普通用材林,当前林分密度为 387 株/hm^2,平均胸径为 20.8 cm,平均高 19.3 m,林分郁闭度为 0.9。林地土壤类型为黄红壤,土层深厚肥沃,适宜闽楠的生长。

1.2　试验设计

于 2019 年 3 月,选取长势一致的 2 年生当地种源闽楠优良家系容器苗,采用随机区组试验设计,共设置 4 m×4 m(T1)、8 m×8 m(T2)和 12 m×12 m(T3)3 个方形林窗试验样地进行杉木林下闽楠补植试验,另外以不处理林分内 8 m×8 m(CK)样地作为对照,每个林窗处理各设置 3 个重复,共 12 块样地,处理样地间隔 10 m。处理组样地内杉木皆伐,对照组不处理,闽楠幼苗按株间距 1 m×1 m 补植。试验样地如图 1 所示。

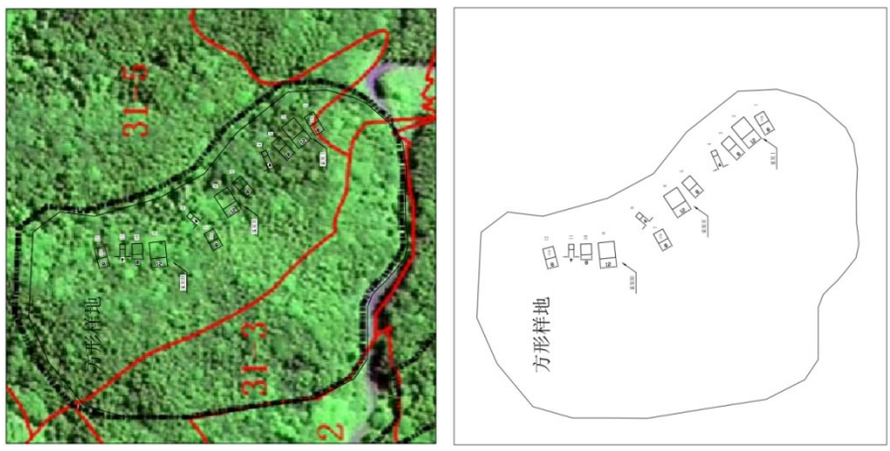


图 1 试验方形样地地理示意

Fig.1 Geographical sketch map of experimental square plot

1.3 样地调查和取样

于 2023 年 6 月针对试验样地中的闽楠进行调查和取样，每个样地随机选取 10 株闽楠，测量其胸径、树高、冠幅以及枝下高基本性状指标，同时，依据树冠的上、中、下 3 层结构，分别测量各层的一级和二级分枝的角度、分枝数量、分枝基径以及分枝枝长，并对闽楠分别进行地上和地下部取样。将样品带回实验室，洗净，悬挂对应标签，打包好用于后续生物量及根系形态指标的测定。

1.4 样品检测与分析

1.4.1 生物量的测定

将采集的闽楠植株置于 105 ℃杀青 30 min 后，放置烘箱内 80 ℃烘干至恒重，分别测定植株根、茎和叶生物量。

1.4.2 根系形态测定

在不损坏植株根部的情况下，用水将采集的闽楠植株根部冲洗干净，沥干，放置根系扫描仪上进行扫描，保存扫描图像，用 WinRHIZO 软件进行分析，获得根系总长度、平均直径、根尖数、根表面积和根体积形态指标值。

1.4.3 数据分析

利用 Excel 12.0 对原始数据进行统计整理，利用 SPSS 25 软件对数据进行单因素分析、方差分析和多重比较。

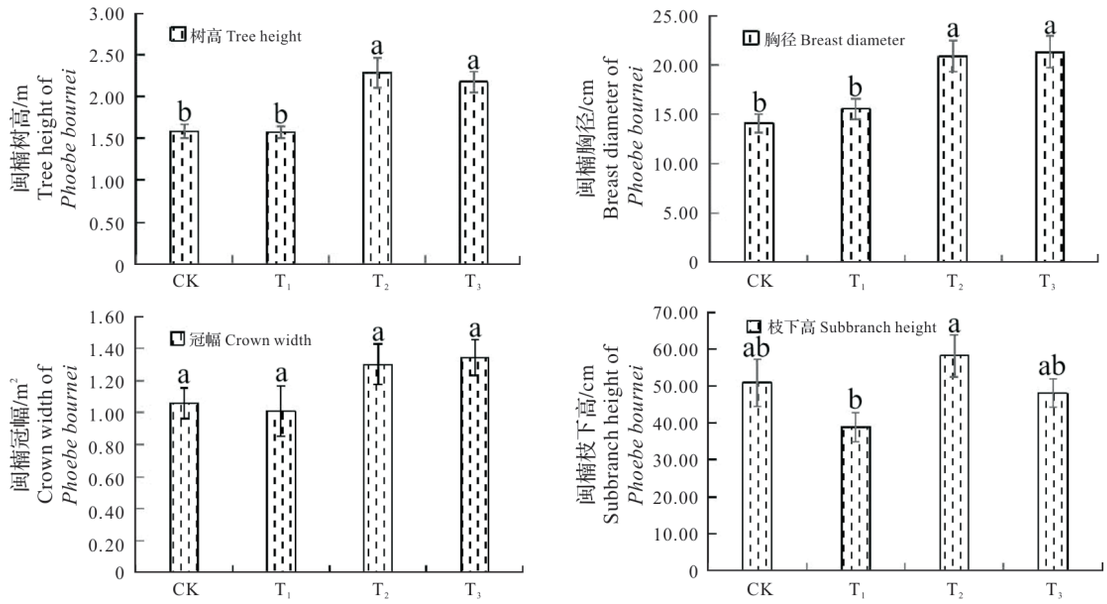
2 结果与分析

2.1 不同大小林窗处理对闽楠生长性状的影响

由图 2 可知，闽楠树高、胸径、冠幅和枝下高随着林窗面积的增大呈现先升后降或趋于平缓的趋势，均在 T2 处理时达到最大值。各处理在树高和胸径方面表现出极显著差异（P<0.01），在枝下高方面表现出显著差异（P<0.05），而在冠幅方面未表现出显著差异。T2 林窗处理下以上指标分别比对照组提升了 44.9%、51.3%、15.2% 和 14.2%。

2.2 不同大小林窗处理对闽楠生物量的影响

由表 1 可知，各处理下，叶和枝的平均生物量随着林冠层的下降而增加，根系平均生物量随着土层深度的增加而逐渐减少。不同林窗处理下林冠上层叶生物量表现出显著差异（P<0.05），根系生物量在土层 0~20 cm 和 20~40 cm 分别较对照表现出显著（P<0.05）和极显著差异（P<0.01）。闽楠林冠上层和中层枝、叶和根生物量均在 T2 处理达到峰值，其上层叶和枝生物量、中层叶和枝生物量、土层 0~20 cm 和 20~40 cm 深度根生物量分别较对照提升了 109.3%、67.4%、30.0%、56.7%、206.9% 和 331.3%。林冠下层叶和枝生物量在 T3 处理达到峰值，分别较对照提升了 41.7% 和 77.5%。除下层枝生物量外，其余各枝叶生物量均在 T1 处理达到谷值，0~20 cm 和 20~40 cm 土壤层根生物量在 CK 达到谷值。



不同字母表示同系列数据间存在显著性差异(P<0.05)。

The different letters indicate that there are significant differences between the same series of data (P<0.05).

图2　不同大小杉木林窗处理下闽楠生长状况

Fig.2　Growth status of *Phoebe bournei* under different sizes of Chinese fir gaps

表1　不同大小杉木林窗处理下闽楠生物量

Tab.1　Biomass of *Phoebe bournei* under different sizes of Chinese fir gaps

冠层/深度/cm Canopy/depth	林窗处理 Treat	叶生物量/g Leaf biomass	枝生物量/g Branch biomass	根生物量/g Root biomass
上/0~20	T1	1.24±0.81^{b}	0.61±0.48^{a}	3.14±1.85^{ab}
Upper/0−20	T2	3.83±3.58^{a}	2.36±2.94^{a}	4.02±3.36^{a}
	T3	3.16±2.23^{ab}	1.83±1.59^{a}	2.32±1.66^{ab}
	对照CK	1.83±0.77^{ab}	1.41±0.91^{a}	1.31±0.62^{b}
	均值Mean value	2.52*	1.56	2.70*
中/20~40	T1	3.93±2.94^{a}	2.31±1.87^{a}	1.71±1.15^{ab}
Middle/20−40	T2	6.55±5.09^{a}	4.12±3.50^{a}	3.18±3.75^{a}
	T3	5.91±5.86^{a}	3.81±4.44^{a}	1.59±1.06^{ab}
	对照CK	5.04±2.37^{a}	2.63±1.31^{a}	0.96±0.47^{b}
	均值Mean value	5.36	3.22	1.86**
下/40~60	T1	6.35±4.70^{a}	3.77±2.82^{a}	1.84±1.03^{a}
Lower/40−60	T2	8.91±6.66^{a}	5.63±4.06^{a}	1.33±0.56^{a}
	T3	9.17±6.68^{a}	5.91±5.07^{a}	1.25±1.16^{a}
	对照CK	6.47±1.92^{a}	3.33±1.26^{a}	1.57±0.44^{a}
	均值Mean value	7.73	4.66	1.50

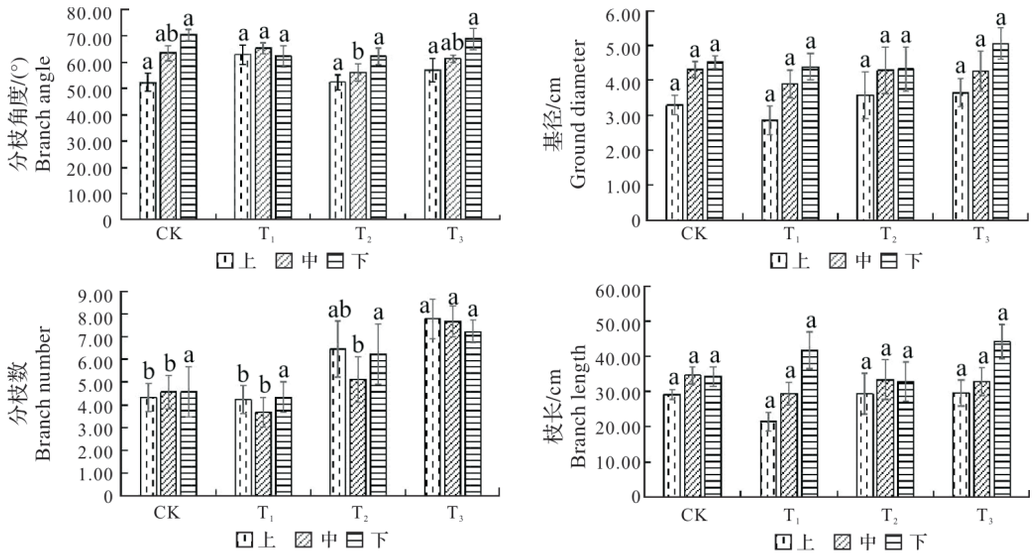
*表示同系列间存在显著性差异(P<0.05),不同字母表示同列数据间存在显著性差异(P<0.05)。

* indicates significant differences between the same series(P<0.05), and different lowercase letters within a column indicate significant differences(P<0.05).

2.3　不同大小林窗处理对闽楠分枝构型的影响

2.3.1　不同大小林窗处理对闽楠一级枝构型的影响

由图3可知,闽楠一级枝的平均分枝角、基径和枝长随着林冠层的降低而升高。上中下分枝数随着林窗面积的增加而升高,在T3处理达到峰值。各处理在上层分枝数、中层分枝数和中层分枝角方面表现出极显著差异(P<0.01)和显著差异(P<0.05)。T3处理闽楠上层分枝数、中层分枝数、下层分枝数、一级枝基径和枝长分别比对照组提升了79.7%、68.2%、58.3%、12.0%和28.7%。



不同字母表示同系列数据间存在显著性差异(P<0.05)。

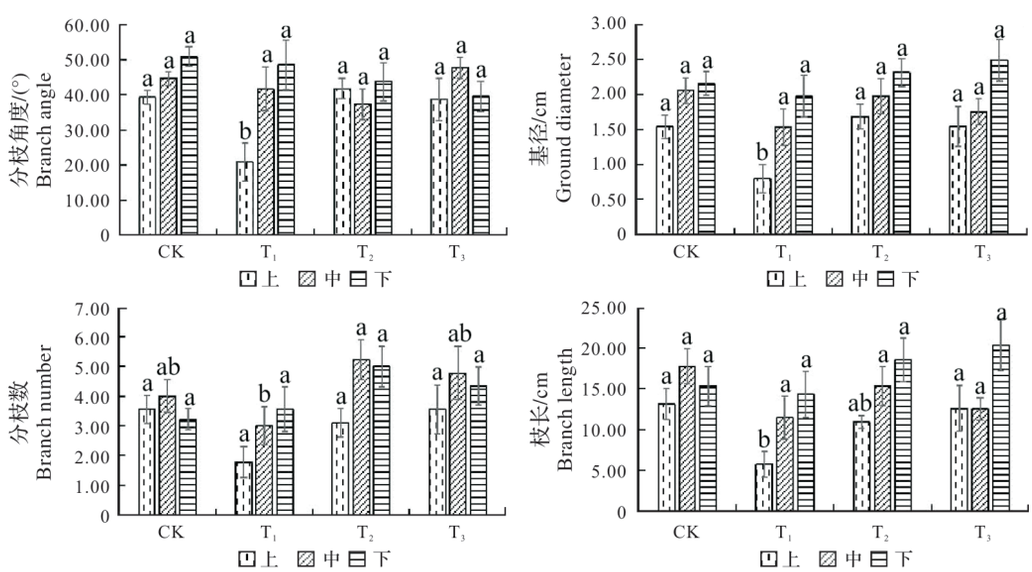
The different letters indicate that there are significant differences between the same series of data(P<0.05).

图3 不同大小杉木林窗处理下闽楠一级枝生长状况

Fig.3 Growth status of the first branch of *Phoebe bournei* under the treatment of different sizes of Chinese fir gaps

2.3.2 不同大小林窗处理对闽楠二级枝构型的影响

由图4可知,各处理下,闽楠二级枝的基径均随着冠层的降低而升高,其他构型指标未表现出显著特征。进一步分析发现,林冠上层的二级枝分枝角和基径,中层和下层的二级枝分枝数在T2处理下达到峰值,分别比对照提升了6.2%、9.1%、30.5%和55.3%。林冠中层的二级枝分枝角、下层的二级枝基径和枝长在T3处理下达到峰值,分别比对照提升了7.0%、15.3%和33.1%。林冠上层的二级枝分枝角、上层和中层的二级枝分枝数、基径、枝长均在T1处理下为谷值。各处理下,林冠上层的二级枝分枝角、二级枝基径和中层二级枝分枝数表现出极显著差异(P<0.01)或显著差异(P<0.05)。



不同字母表示同系列数据间存在显著性差异(P<0.05)。

The different letters indicate that there are significant differences between the same series of data(P<0.05).

图4 不同大小杉木林窗处理下闽楠二级枝生长状况

Fig.4 Growth status of secondary branches of *Phoebe bournei* under different sizes of Chinese fir gaps

2.4 不同大小林窗处理对闽楠根系的影响

由表2可知,不同大小林窗处理下闽楠平均根长、根表面积、根体积、根尖数随着土层深度的增加而减少,根平均直径则随着土层深度的增加而增加。各大小林窗处理下,0~20 cm土层深度闽楠根长、

根表面积、根体积、根平均直径、根尖数,20~40 cm 土层深度闽楠根长、根体积、根平均直径表现出显著差异(P<0.05)或极显著差异(P<0.01),根系各指标在 40~60 cm 土层深度未表现出显著差异(P>0.05)。T2 处理下,0~20 cm 土层深度内根表面积,20~40 cm 土层深度内根长、根尖数,40~60 cm 土层深度内根长、根尖数分别较对照提升了 92.7%、136.0%、79.2%、61.0% 和 44.6%。T3 处理下,0~20 cm 土层深度内根长、根尖数,20~40 cm 土层深度内根体积分别较对照提升了 80.5%、127.4% 和 231.8%。

表 2　不同大小杉木林窗处理下闽楠根系生长状况

Tab.2　Root growth of *Phoebe bournei* under different sizes of Chinese fir gaps

深度/cm Depth	林窗处理 Treat	根长/cm Root length	根表面积/cm^2 Surface area	根体积/cm^3 Root volume	根平均直径/mm Average diameter	根尖数/个 Root tips
0~20	T1	638.34±285.03^{bc}	248.77±126.23^{ab}	17.04±12.94^{a}	1.04±0.24^{a}	1 509.89±777.24^{b}
	T2	918.77±334.90^{ab}	304.16±108.50^{a}	12.77±8.45^{ab}	0.81±0.13^{b}	1 997.67±889.12^{ab}
	T3	998.30±417.28^{a}	275.05±80.46^{a}	12.58±5.01^{ab}	0.77±0.15^{b}	2 814.11±1 308.07^{a}
	对照 CK	552.97±195.39^{c}	157.87±70.22^{b}	7.32±4.13^{b}	0.79±0.12^{b}	1 237.56±491.77^{b}
	均值 Mean value	777.10*	33.00*	12.43*	0.85**	1 889.81**
20~40	T1	283.56±193.12^{ab}	113.54±37.81^{a}	10.13±6.52^{ab}	1.41±0.45^{a}	702.63±536.51^{a}
	T2	394.80±274.94^{a}	81.58±40.39^{a}	8.35±5.83^{ab}	0.88±0.40^{b}	845.29±582.03^{a}
	T3	243.46±101.31^{ab}	92.09±51.25^{a}	14.00±7.00^{a}	1.02±0.33^{b}	552.38±169.49^{a}
	对照 CK	167.27±68.45^{b}	69.63±32.26^{a}	4.22±2.87^{b}	0.94±0.35^{b}	471.75±351.11^{a}
	均值 Mean value	268.77*	89.26	8.81**	1.07*	636.48
40~60	T1	168.62±99.38^{a}	103.07±107.78^{a}	5.33±4.11^{a}	1.54±0.62^{a}	355.22±223.64^{a}
	T2	242.05±127.94^{a}	97.90±51.71^{a}	7.71±3.47^{a}	1.20±0.34^{a}	466.00±286.28^{a}
	T3	148.87±100.90^{a}	75.56±70.82^{a}	9.70±12.41^{a}	1.12±0.59^{a}	331.88±201.03^{a}
	对照 CK	150.36±73.79^{a}	82.35±44.43^{a}	9.00±5.41^{a}	1.34±0.56^{a}	322.29±146.51^{a}
	均值 Mean value	172.27	89.87	7.76	1.31	363.47

*表示同系列间存在显著性差异(P<0.05),不同字母表示同列数据间存在显著性差异(P<0.05)。

* indicates significant differences between the same series(P<0.05), and different lowercase letters within a column indicate significant differences(P<0.05).

3　讨　论

森林环境中林窗异质性通过影响林冠层透光率,进而调控林下光、温、水和养分等资源的空间分布格局[30~31]。这种光资源在冠层中的三维分布特征直接或间接影响林下闽楠的生长发育过程[32]。相关领域的研究人员已经开始关注杉木等速生树种下套种闽楠的营林方式,旨在依靠前者所制造的弱光环境来促进闽楠的生长[33~34],然而以往研究方式过于片面,未能够系统表明其影响因素。本研究在方法上系统整合闽楠的上分枝构型与地下根系形态的协同响应,创新性地分冠层和土层测定生物量,为杉木-闽楠混交模式提供精准的林窗调控参数。研究结果表明,林窗尺度显著影响杉木林下闽楠的生长特性、分枝构型、生物量分配格局及根系形态特征。具体而言,闽楠的树高和枝下高在 8 m×8 m(T2)处理达到最大值,而胸径则在 12 m×12 m(T3)处理表现最优。这可能是因为林下的光环境并不是同质的,大林窗下由于光照更加强烈,闽楠无法及时且充分地利用有效光辐射,反而对其树冠与树高的生长产生了抑制作用[35]。间伐后,同一生态位其营养空间更大,闽楠所能获取的资源更丰富,从而有利于其生长,这也与林素娇等[36]在研究中发现闽楠的树高、地径、冠幅等相关指标在林窗下的生长状况要好于林冠下的结果相吻合。

从冠层结构来看,闽楠一级枝的分枝角度、基径、枝长以及枝叶生物量均随着林冠层的下降而升高,其中 T2 和 T3 处理分别显著促进了林冠上、中、下层生物量的积累。这可能是由于间伐形成的林窗降低了林分郁闭度,减少了林冠层对天空的遮挡比例,使得透过林冠层辐射到林下闽楠的光辐射量增加。闽

楠为了提高对光的截获能力，将更多碳分配于树高和冠幅的生长，同时增加下层分枝角度、基径以及枝长，采取一定的“树冠狭长化”策略，以促进对散射光的吸收，这与刘昌等[35]在研究林窗对黄檗（*Phellodendron amurense*）幼树生长发育影响时所得结果相似，即适度遮荫环境更有利于幼树生长发育。

根系作为植物吸收地下养分的关键器官，其在土壤中的空间分布格局不仅体现了植物的生态位特征，还反映了植株整体的协调生长状况[37]。研究结果表明，林窗处理显著影响了闽楠在0~40 cm土层的根系分布特征（$P<0.05$）。具体而言，在不同大小的林窗处理下，闽楠的平均根长、根体积及根尖数均随土层深度的增加而递减，而平均根表面积和根平均直径则随土层深度的增加而递增。值得注意的是，在0~20 cm浅土层，各根系参数多在T2或T3处理达到峰值，这种响应模式可能与地上部光竞争诱导的资源分配策略有关。在杉木-闽楠复合系统中，闽楠根系通过增加其根表面积、根体积及根尖数等适应性策略，有效提升了土壤资源获取能力。这与陈杰[38]对杉木林下套种闽楠的研究结果一致，进一步验证了该营林模式的有效性和科学性。

然而，本研究仍存在以下局限性：首先在林窗梯度设计方面，仅设置4 m×4 m（T1）、8 m×8 m（T2）、12 m×12 m（T3）3个固定尺度，缺乏连续梯度设计（如6 m×6 m或10 m×10 m），可能遗漏更精细的最优林窗阈值；其次，时间尺度上，仅开展4年观测，而闽楠作为慢生树种，其长期（>10年）响应机制仍需持续监测；最后，在生物互作方面，未系统考虑杉木伐桩萌蘖、林下植被竞争及微生物群落对闽楠生长的潜在影响[38]。基于当前研究不足，未来工作可从以下方面拓展：增加林窗形状（圆形/带状）、朝向（南北/东西）及边缘木高度等多维参数研究；建立长期定位观测体系，揭示闽楠速生期的林窗适应机制；应用无人机遥感与三维建模技术，实现林窗微环境及植株构型的无损监测。这些研究方向的深入将为珍贵树种复合经营提供更完善的理论依据和技术支撑。

4 结 论

本研究以杉木林下套种2年生闽楠为对象，调查分析不同大小杉木林窗处理对闽楠生长和分枝构型的影响，发现与对照相比，林窗的形成显著促进了闽楠幼苗期的生长发育。鉴于林下闽楠在不同生长阶段对光照需求的差异，林木冠层结构也应做相应的调整，根据营林生产实际情况和研究结果综合考量，T2处理下，杉木林下闽楠的树高、胸径、冠幅、枝下高、一二级分枝数、分枝角、基径、枝长、枝叶生物量以及根系各参数综合表现最佳。

参考文献 References：

[1] 林建勇，李娟，李俊福，等.采集干扰对闽楠种群结构和数量的动态影响[J].森林与环境学报，2020，40(4)：377-385.
LIN J Y，LI J，LI J F，et al.Dynamic effects of collection disturbance on the population structure and quantity of *Phoebe bournei*[J].Journal of forest and environment，2020，40(4)：377-385.

[2] 姜冬冬，林建勇，李娟，等.濒危植物闽楠幼苗更新及环境解释[J].西北植物学报，2023，43(11)：1969-1974.
JIANG D D，LIN J Y，LI J，et al.Characteristics and environmental interpretation of seedling regeneration in the endangered species *Phoebe bournei*[J].Acta botanica boreali-occidentalia Sinica，2023，43(11)：1969-1974.

[3] 全小强，李悦，汤行溪，等.不同家系闽楠幼苗光合特性研究[J].四川农业大学学报，2023，41(5)：893-900.
QUAN X Q，LI Y，TANG X H，et al.A study on the photosynthetic characteristics of *Phoebe bournei* seedlings in different lineages[J].Journal of Sichuan agricultural university，2023，41(5)：893-900.

[4] 葛永金.闽楠栽培生理生态基础研究[D].北京：北京林业大学，2014.
GE Y J.Study on cultivation physiology and ecology of *Phoebe bournei*[D].Beijing：Beijing Forestry University，2014.

[5] 陈桂丹，黄腾华，雷福娟，等.闽楠木材解剖构造特征研究[J].广西林业科学，2017，46(4)：375-379.
CHEN G D，HUANG T H，LEI F J，et al.The wood anatomical structural characteristics for *Phoebe bournei*[J].Guangxi forestry science，2017，46(4)：375-379.

[6] 王金盾.不同林下生境闽楠生长影响及表型可塑性[J].农学学报，2015，5(2)：57-60.
WANG J D.Growth influence and the phenotypic plasticity of 10-years-old *Phoebe bournei* in different understory habitats[J].Journal of agriculture，2015，5(2)：57-60.

[7] 肖书富.杉木间伐强度对林下套种闽楠幼林生长效果研究[J].福建林业，2014(2)：43-45.

XIAO S F.Study on the effect of intensity of intermediate cuttings of *Cunninghamia lanceolata* on the young growth of *Phoebe bournei* by intercropping forest[J].Fujian forestry,2014(2):43-45.

[8] 欧建德.杉木人工林林窗特征因子与闽楠幼林生长关系的研究[J].西南林业大学学报,2014,34(6):60-64.
OU J D.Research on the relationship between gap characteristics of cunninghamia lanceolata plantations and the growth of gap regeneration *Phoebe bournei* seedlings[J].Journal of southwest forestry university,2014,34(6):60-64.

[9] RUNKLE J R.Patterns of disturbance in some old-growth mesic forests of eastern North America[J].Ecology,1982,63(5):1533-1546.

[10] ZHANG,C Y,ZHAO Y Z,ZHAO X H,et al.Species-habitat associations in anorthern temperate forest in China[J].Silva fennica,2012,46(4):501-519.

[11] LIN N,DENG N L,LU D H,et al.Short-term effects of thinning on tree growth and soil nutrients in the middleaged Chinese fir[*Cunninghamia lanceolata*(lamb.)hook.]plantations[J].Forests,2022,14(1):74.

[12] 赵铭臻,刘静,邹显花,等.间伐施肥对杉木中龄林生长和材种结构的影响[J].南京林业大学学报(自然科学版),2023,47(2):70-78.
ZHAO M Z,LIU J,ZOU X H,et al.Effects of thinning and fertilization on the growth and timber assortment structure of middle-aged Chinese fir forest[J].Journal of Nanjing forestry university(natural sciences edition),2023,47(2):70-78.

[13] 盛炜彤.杉木林的密度管理与长期生产力研究[J].林业科学,2001,37(5):2-9.
SHENG W T.A study on stand density management and long-term productive of Chinese fir(*Cunninghamia lanceolata*)plantation[J].Scientia silvae Sinicae,2001,37(5):2-9.

[14] 徐雪蕾,孙玉军,周华,等.间伐强度对杉木人工林林下植被和土壤性质的影响[J].林业科学,2019,55(3):1-12.
XU X L,SUN Y J,ZHOU H,et al.Effects of thinning intensity on understory growth and soil properties in Chinese fir plantation[J].Scientia silvae Sinicae,2019,55(3):1-12.

[15] CHEN X L,CHEN H Y H,CHEN X,et al.Soil labile organic carbon and carbon-cycle enzyme activities under different thinning intensities in Chinese fir plantations[J].Applied soil ecology,2016,107:162-169.

[16] 茹文明,张金屯,张峰,等.濒危植物南方红豆杉濒危原因分析[J].植物研究,2006,26(5):624-628.
RU W M,ZHANG J T,ZHANG F,et al.Eco-environmental characteristics and endangered causes of *Taxus mairei*,an endemic to China[J].Bulletin of botanical research,2006,26(5):624-628.

[17] 鲁敏,姜凤岐,宋轩.容器苗质量评定指标的研究[J].应用生态学报,2002,13(6):763-763.
LU M,JIANG F Q,SONG X.Assessing indices of container seedling quality[J]. Chinese journal of applied ecology,2002,13(6):763-763.

[18] 李田,孙景宽,刘京涛,等.贝壳沙埋深度对杠柳幼苗生长及光合特性的影响[J].江西农业大学学报,2020,42(2):338-348.
LI T,SUN J K,LIU J T,et al.Effects of shell sand burial on seedling growth and photosynthetic characteristics of *Periploca sepium* bunge[J].Acta agriculturae universitatis Jiangxiensis,2020,42(2):338-348.

[19] 王艺,王秀花,张丽珍,等.不同栽培基质对浙江楠和闽楠容器苗生长和根系发育的影响[J].植物资源与环境学报,2013,22(3):81-87.
WANG Y,WANG X H,ZHANG L Z,et al.Effects of different cultivation substrates on growth and root system development of container seedlings of *Phoebe chekiangensis* and *P. bournei*[J].Journal of plant resources and environment,2013,22(3):81-87.

[20] 唐小燕,袁位高,沈爱华,等.闽楠容器苗各器官生物量的分配格局及水分特征研究[J].植物研究,2012,32(1):99-104.
TANG X Y,YUAN W G,SHEN A H,et al.Biomass allocation pattern and water characteristics of each component of *Phoebe bournei* container seedling[J].Bulletin of botanical research,2012,32(1):99-104.

[21] 金锁,毕浩杰,刘佳,等.林分密度对云顶山柏木人工林群落结构和物种多样性的影响[J].北京林业大学学报,2020,42(1):10-17.
JIN S,BI H J,LIU J,et al.Effects of stand density on community structure and species diversity of *Cupressus funebris* plantation in Yunding Mountain,sounthwestern China[J].Journal of Beijing forestry university,2020,42(1):10-17.

[22] OLIVAR J,BOGINO S,RATHGEBER C,et al.Thinning has a positive effect on growth dynamics and growthclimate relationships in Aleppo pine(*Pinus halepensis*)trees of different crown classes[J].Annals of forest science,2014,71(3):395-404.

[23] 舒韦维,卢立华,李华,等.林分密度对杉木人工林林下植被和土壤性质的影响[J].生态学报,2021,41(11):4521-4530.
SHU W W,LU L H,LI H,et al.Effects of stand density on understory vegetation and soil properties of *Cunninghamia lanceolata* plantation[J].Acta ecologica Sinica,2021,41(11):4521-4530.

[24] 胡延辰,张晓林,韩晓义,等.蒙古栎次生林的生长更新与林下植被多样性对林分密度的响应[J].应用生态学报,2022,33(3):727-732.
HU Y C,ZHANG X L,HAN X Y,et al.Responses of stand growth,regeneration,and under-story species diversity in *Quercus mongolica* secondary forest to stand density[J].Chinese journal of applied ecology,2022,33(3):727-732.

[25] 孙笑飞.森林培育过程中的森林抚育间伐措施探究[J].农村经济与科技,2017,28(6):35,39.
SUN X F.Probe into the measures of forest tending and thinning in the process of forest cultivation[J].Rural economy and science-technology,2017,28(6):35-39.

[26] 魏阿荣.抚育间伐对杉木人工林及套种楠木生长的影响[J].绿色科技,2021,23(23):117-119.
WEI A R.Effects of tending and thinning on the growth of Chinese fir plantation and interplanting *Phoebe bournei*[J].Journal of green science and technology,2021,23(23):117-119.

[27] 曾思齐,黄炎俊,肖化顺,等.木荷次生林闽楠导入初期生长影响因素研究[J].中南林业科技大学学报,2013,33(8):1-5.
ZENG S Q,HUANG Y J,XIAO H S,et al.Effects of Schima superba secondary forest's gap area and strong tree's pressure on ground diameter of *Phoebe bournei* introduced at early growth[J].Journal of central south university of forestry & technology,2013,33(8):1-5.

[28] 李肇锋,潘军,王金盾,等.光环境对闽楠幼树生长及其表型可塑性的影响[J].西南林业大学学报,2014,34(6):65-69.
LI Z F,PAN J,WANG J D,et al.The effects of light environment on the growth and the phonotypic plasticity of the seedlings of *Phoebe bournei*[J].Journal of southwest forestry university,2014,34(6):65-69.

[29] 郭滨.不同林龄杉木林间伐后套种闽楠对杉木生长的影响[J].安徽农学通报,2020,26(22):60-61.
GUO B.Effects of interplanting *Phoebe bournei* on the growth of *Cunninghamia lanceolata* after intercutting in different age forests[J].Anhui agricultural science bulletin,2020,26(22):60-61.

[30] 李强,王彬,邓云.西双版纳热带雨林林窗空间分布格局及其特征指数与林窗下植物多样性的相关性[J].生物多样性,2019,27(3):273-285.
LI Q,WANG B,DENG Y.Correlation between spatial distribution of forest canopy gaps and plant diversity indices in Xishuangbanna tropical forests[J].Biodiversity science,2019,27(3):273-285.

[31] 罗丝琼,张广奇,郭其强,等.茂兰喀斯特常绿落叶阔叶混交林林窗下木本植物更新组成[J].生态学杂志,2020,39(7):2131-2139.
LUO S Q,ZHANG G Q,GUO Q Q,et al.Regeneration composition of woody plant species under forest gap in Maolan Karst evergreen deciduous broad-leaved mixed forest[J].Chinese journal of ecology,2020,39(7):2131-2139.

[32] 王俊男,于洋洋,林柳兴,等. 杉木林林内光环境对楠木生长的影响[J].森林与环境学报,2018,38(4):425-430.
WANG J N,YU Y Y,LIN L X,et al.Effect of light environment in Chinese fir plantation on the growth of *Phoebe bournei*[J].Journal of forest and environment,2018,38(4):425-430.

[33] CHIN K L,H'NG P S,PARIDAH M T,et al.Reducing ash related operation problems of fast growing timber species and oil palm biomass for combustion applications using leaching techniques[J].Energy,2015,90(1):622-630.

[34] RANCE S J,MENDHAM D S,CAMERON D M.Assessment of crown woody biomass in *Eucalyptus grandis* and *E. globulus* plantations[J].New forests,2017,12(6):32-43.

[35] 刘昌,路琦,汪生财,等.林窗对黄檗幼树空间分布及生长发育的影响[J].北京林业大学学报,2024,46(2):9-17.
LIU C,LU Q,WANG S C,et al.Effects of forest gaps on spatial distribution and growth of *Phellodendron amurense* saplings[J].Journal of Beijing forestry university,2024,46(2):9-17.

[36] 林素娇.生境与容器苗选择对杉木林下闽楠生长和树冠形态特征的影响[J].林业勘察设计,2018,38(3):34-37.
LIN S J.Influence of habitat and container seedling selection for growth process and crown shape of *Phoebe bournei* under *Cunninghamia lanceolata* forests[J].Forestry prospect and design,2018,38(3):34-37.

[37] 祝维,周欧,孙一鸣,等.混交林内毛白杨和刺槐根系吸水的动态生态位划分[J].植物生态学报,2023,47(3):389-403.
ZHU W,ZHOU O,SUN Y M,et al.Dynamic niche partitioning in root water uptake of *Populus tomentosa* and *Robinia pseudoacacia* in mixed forest[J].Chinese journal of plant ecology,2023,47(3):389-403.

[38] 陈杰.套种对杉木人工林土壤物理性质及生长的影响[J].林业科技,2021,46(3):18-20.
CHEN J.Effects of interplanting on soil physical properties and growth of Chinese fir plantation[J].Forestry science & technology,2021,46(3):18-20.

(责任编辑:刘玉香)