

DOI: 10.20103/j.stxb.202503170597

秦明辉, 钟子龙, 俞文仙, 段宜炀, 李全, 张乐, 谭斐, 凡莉莉, 郭子武. 实心竹构件生物量积累分配及其异速生长的林窗效应. 生态学报, 2025, 45 (22): - .

Qin M H, Zhong Z L, Yu W X, Duan Y Y, Li Q, Zahng L, Tan F, Fan L L, Guo Z W. Impact of forest gap within *Cunninghamia lanceolata* stands on biomass accumulation, allocation and allometric growth of *Phyllostachys heteroclada* f. *solida*. Acta Ecologica Sinica, 2025, 45(22): - .

实心竹构件生物量积累分配及其异速生长的林窗效应

秦明辉^{1,2}, 钟子龙³, 俞文仙⁴, 段宜炀², 李全¹, 张乐², 谭斐², 凡莉莉², 郭子武^{2,*}

1 浙江农林大学竹子研究院, 杭州 311300

2 中国林业科学研究院亚热带林业研究所, 杭州 311400

3 浙江省遂昌县生态林业发展中心, 遂昌 323300

4 浙江省杭州市富阳区农业农村局, 杭州 311400

摘要: 实心竹是优良的笋用、观赏竹种, 资源丰富, 且广泛分布于多种林下。研究林窗面积对实心竹生物量积累与分配的影响, 为优化林下实心竹林定向培育和林窗干扰提供理论参考。以杉木次生林下自然实心竹林为研究对象, 分析 3 种林窗 (大林窗 14.74—16.50 m²、中林窗 8.18—9.35 m²、小林窗 4.14—4.77 m²) 对 1—3a 实心竹生物量积累与分配规律及其异速生长关系的影响。结果表明: 立竹年龄和林窗面积对实心竹构件生物量积累、分配和异速生长关系均有显著影响。随着林窗面积增加, 实心竹各构件及总生物量均呈升高变化趋势, 且中、小林窗立竹生物量显著低于大林窗 ($P < 0.05$); 秆生物量分配比例及秆-总生物量异速生长指数呈先下降后升高变化趋势, 且 2a、3a 立竹枝、叶生物量分配比例及叶、枝-总生物量异速生长指数则总体相反。1a 立竹枝生物量分配比例及枝-总生物量异速生长指数下降, 而叶生物量分配比例及叶-总生物量异速生长指数则相反。实心竹通过改变生物量积累与分配格局及相对生长关系来适应林窗异质生境, 中、大林窗实心竹具有较高的生物量积累效率, 叶生物量分配比例显著增加, 呈现较高的生产潜力, 是实心竹良好生长和生产力发挥的适宜林窗。

关键词: 林窗; 实心竹; 生物量积累分配; 异速生长关系

Impact of forest gap within *Cunninghamia lanceolata* stands on biomass accumulation, allocation and allometric growth of *Phyllostachys heteroclada* f. *solida*

QIN Minghui^{1,2}, ZHONG Zilong³, YU Wenxian⁴, DUAN Yiyang², LI Quan¹, ZAHNG Le², TAN Fei², FAN Lili², GUO Ziwu^{2,*}

1 Bamboo Research Institute, Zhejiang Agriculture and Forestry University, Hangzhou 311300, China

2 Research Institute of Subtropical Forestry, Chinese Academy of Forestry, Hangzhou 311400, China

3 Suichang County Ecological Forestry Development Center, Suichang 323300, China

4 Agriculture and Rural Affairs Bureau of Fuyang District in Hangzhou, Hangzhou 311400, China

Abstract: *Phyllostachys heteroclada* f. *solida* is a high-quality ornamental and shoot-used bamboo species with abundant wild resources, widely distributed under the forest. Forest gap is a crucial ecological process in which canopy openings created by disturbances influence growth, development, regeneration pattern of bamboos under secondary forest. This study examined the accumulation of aboveground module (culm, branch and leaf) biomass and its allometric growth in response to forest gaps, aiming to provide scientific recommendations for bamboo cultivation and gap management. The impact of

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项目 (CAFYBB2022SY013); 国家自然科学基金 (31770447)

收稿日期: 2025-03-17; **网络出版日期:** 2025-00-00

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: hunt-panther@163.com

different forest gap sizes—large gaps ($14.74\text{--}16.50\text{ m}^2$), medium gaps ($8.18\text{--}9.35\text{ m}^2$), and small gaps ($4.14\text{--}4.77\text{ m}^2$)—on biomass accumulation, allocation patterns, and allometric growth relationships of 1—3-year-old *Phyllostachys heteroclada* f. *solida* bamboo in secondary *Cunninghamia lanceolata* forests was analyzed. Both bamboo age and forest gap size significantly affected biomass accumulation, allocation, and the allometric growth relationship. Total biomass and component biomass increased with larger forest gaps, with medium and small gaps showing significantly lower values than large gaps ($P<0.05$). The proportion of culm biomass and the allometric exponent for culm-total biomass decreased initially and then increased as gap size increased. For 2- and 3-year-old bamboos, the allocation proportion of branch and leaf biomass and their allometric exponents (leaf/branch-total biomass) generally exhibited opposite trends. In contrast, for 1-year-old bamboo, both the allocation proportion of branch biomass and the allometric exponent for branch-total biomass decreased, while the allocation proportion of leaf biomass and the allometric exponent for leaf-total biomass increased significantly. *Ph. heteroclada* f. *solida* adapted to heterogeneous habitats under the secondary *Cunninghamia lanceolata* forests created by different forest gaps by modifying its biomass accumulation and allocation patterns, along with its allometric growth relationships. Biomass accumulation efficiency improved significantly in medium and large gaps, with a notable increase in leaf biomass allocation, indicating high productive potential. These gaps were ideal for the optimal growth and high yield of *Ph. heteroclada* f. *solida* under *C. lanceolata* forest conditions. These findings highlight the response of biomass accumulation, allocation pattern of bamboos to forest gap under *C. lanceolata* stand, and provide valuable information for bamboo forest cultivation under secondary stand, gap management and establishment of bamboo mixed forest.

Key Words: forest gap; *Phyllostachys heteroclada* f. *solida*; biomass accumulation and allocation; allometric growth relationship

林窗 (Forest gap) 是森林群落中由于自然干扰或森林经营管理活动而在林冠层中形成的空隙区域^[1-2], 林窗大小、位置、成因等特性既是植被生长过程的自然体现, 也是森林生态系统动态变化综合结果^[1,3]。林窗会明显改变林下光照强度、温度、湿度以及林木间的相互作用等^[4], 使林下环境因子呈现明显的梯度变化以及斑块化特征, 这种复杂的异质性格局对林下植被多样性、分布和生长发育产生明显的影响^[5-6]。因此, 林窗性状, 特别是面积的改变会导致环境异质性, 通过作用于林下植被生长、发育进程, 从而影响其生物量积累、分配与相对增长模式^[7]。竹子是典型的克隆植物, 其会通过地下茎延伸生长而不断向邻域森林群落扩张, 从而占据林隙生境而形成林下优势群落^[8-10], 然而其对林窗性状的响应机制尚未解析, 而林窗大小对竹类植物生物量积累过程的影响亦待深入研究。目前, 林窗对林下植被生物量积累过程的研究多集中于生物量小、木质化程度低的草本植物或林木幼苗^[1,10-13], 而多年生、木质化程度高、生长快的竹类植物生物量增长模式及分配格局的林窗效应研究尚不深入。

竹子是禾本科 (Poaceae) 竹亚科 (Bambusoideae) 植物的总称, 目前全球竹类植物达 120 余属 1600 余种, 竹林面积达 4350 万 hm^2 ^[14-15]。竹子因其生长快、生物量大、可持续经营等特点, 在区域社会经济发展、生态环境保护、固碳增汇和水土保持中起到了重要作用^[16-17]。竹子生物量积累与分配的研究多集中在毛竹 (*Phyllostachys edulis*)、雷竹 (*Ph. violaacens*)、麻竹 (*Dendrocalamus latiflorus*)、绿竹 (*Bambusa oldhamii*)、四季竹 (*Oligostachyum lubricum*)、美丽箬竹 (*Indocalamus decorus*) 等重要经济、生态或观赏竹种^[18-22], 研究内容也多为生物量积累与分配对环境因子 (温度、水分、养分等)、经营措施 (施肥、钩梢、垦复)、立地条件 (地形、海拔、坡位等) 和气候变化 (CO_2 、 O_3 、温度升高等) 等的响应^[14,18,20-21], 而林窗性状 (面积) 对竹子生物量积累与分配过程影响的研究相对较少, 这极大限制了竹类植物对林下异质生境生态适应性机制的阐释。实心竹 (*Phyllostachys heteroclada* f. *solida*) 为禾本科竹亚科刚竹属 (*Phyllostachys*) 中小径竹种, 生态适应性强, 广泛分布于山地、林下、河岸等对比度大的异质生境中, 是多种针/阔林下常见竹种^[23]。实心竹笋产量高、营养丰富、适口性好, 深受当地群众青睐; 加之, 其秆实心或近实心, 基部数节隆起, 秆形奇异, 观赏性佳。目前实心竹多

为自然林,多数处于野生或半野生区域性散生状态,分布于林下,然而,其生长特征、生物量积累与分配及其对林下环境的响应规律尚不清楚。为此,本研究以亚热带地区杉木(*Cunninghamia lanceolata*)次生林林窗下实心竹林为研究对象,通过林窗面积对其生物量积累与分配格局及其异速生长关系的研究,分析林窗面积是否会影响实心竹的生长过程,从而导致其生物量积累与分配格局的明显改变,进而影响构件生物量相对增长关系,以期确立实心竹立竹形态良好建成和生物量高效积累的适宜林窗,为林下实心竹良好生长、林窗干扰及定向培育提供科学依据。

1 研究地区与研究方法

1.1 研究区概况

试验地位于浙江省遂昌县新路湾镇萝卜坑村(28°43'39" N,119°16'42" E),属中亚热带季风气候,年平均气温 16.8 ℃,极端最高气温 40.6 ℃,极端最低气温-9.9 ℃,降水量 1613 mm,年平均蒸发量 1385 mm,年均相对湿度 79%;年均日照时数 1755 h,年均无霜期 251 d。土壤类型以黄红壤为主,pH 为 5.6—7.3。试验区森林群落以杉木(*Cunninghamia lanceolata*)次生林为主,为 20 世纪 80 年代用 1—2 生种子苗造林,至 2000 年前后皆伐后形成杉木次生萌条林,面积约 10.6 hm²。林内混生有少量毛竹、马尾松(*Pinus massoniana*)、木荷(*Schima superba*)、青冈(*Quercus glauca*)、苦槠(*Castanopsis sclerophylla*)等,林下存在大面积连片的自然实心竹林。

1.2 试验方法

2023 年 9 月,采用双半球面法计算林窗面积^[24—25]。依照林窗长轴(L)与边缘木高度(H)比值划分出大林窗(L:H≥1.5)、中林窗(0.5<L:H<1)及小林窗(L:H≤0.5)^[26],三种林窗海拔、坡度、坡向基本一致。根据林窗大小和位置,每种林窗选择典型林窗至少 3 个,设置 2 m×2 m 样方,调查林分结构(表 1,图 1)。在各林窗内,依据实心竹平均胸径,随机选择健康、生长良好的 1a、2 a、3 a 样竹各 15 株,齐地伐倒后分离秆、枝、叶,分别称鲜重(g)。然后分别取秆、枝、叶样品 200—300 g 装于样品袋中带回试验室,置于烘箱中 105 ℃杀青 30 min,后 85 ℃烘至恒重,称干重(g),计算各构件生物量(g)、总生物量(g)以及生物量分配比例(%)。

表 1 试验地林窗基本信息
Table 1 Basic information of the sampling plots

林窗类型 Forest gap types	林窗特征 Forest gap characteristics				林分结构 Stand structure		
	林窗面积/m ²	海拔/m	坡度/(°)	坡向/(°)	密度/(株/hm ²)	胸径/mm	胸高断面面积比
小林窗 Small gap	4.45±0.32 c	435	31	东南	16700±138 c	13.05±0.57 b	0.07±0.03 b
中林窗 Medium gap	8.91±0.59 b	440	30	东南	20500±274 b	13.85±0.10 b	0.09±0.03 b
大林窗 Large gap	15.78±0.91 a	445	29	东南	27900±276 a	15.99±1.36 a	0.13±0.03 a

小写字母不同表示林窗类型间差异显著(P<0.05)

1.3 数据处理

试验数据在 Excel 2010 进行整理和作图,采用 SPSS 22.0 统计软件进行单因素方差分析(One-way ANOVA)和重复测量方差分析(One-way repeated measures ANOVA)(α=0.05)。所有试验数据均为平均值±标准误差(mean±SD)。使用 R 语言的 Smatr 程序包的标准化主轴法(Standardized major axis regression, SMA)分析各构件异速生长关系。异速生长公式如下:

$$Y=a\times x^b$$

式中,x 与 Y 分别代表不同林窗实心竹各构件(秆、枝、叶)生物量和构件总生物量,方程中 a 为常数,斜率 b 为异速生长指数。当|b|=1 时为等速生长,|b|≠1 时则表现为异速生长^[27—28]。

2 结果与分析

2.1 林窗对实心竹构件生物量积累特征的影响

重复测量方差分析表明,立竹年龄、林窗面积及林窗面积和立竹年龄的交互作用对实心竹秆、枝、叶及地



图1 试验地杉木林窗特征

Fig.1 Characteristics of the Chinese fir forest gap in the experimental area

上总生物量积累有显著影响 ($P < 0.05$) (图2)。随着立竹年龄的增加,实心竹秆、枝、叶及总生物量总体均呈增加变化趋势,1—3a 立竹秆、枝、叶生物量及总生物量差异显著 ($P < 0.05$)。随着林窗面积的增大,1—3a 立竹秆、枝、叶生物量和总生物量均总体呈升高变化趋势,且 1—3a 立竹叶生物量和总生物量各林窗间差异显著 ($P < 0.05$);中、小林窗秆及 1a 立竹枝生物量并无显著差异 ($P > 0.05$),但均显著低于大林窗 ($P < 0.05$),且 2a、3a 立竹枝生物量各林窗间差异显著 ($P < 0.05$)。

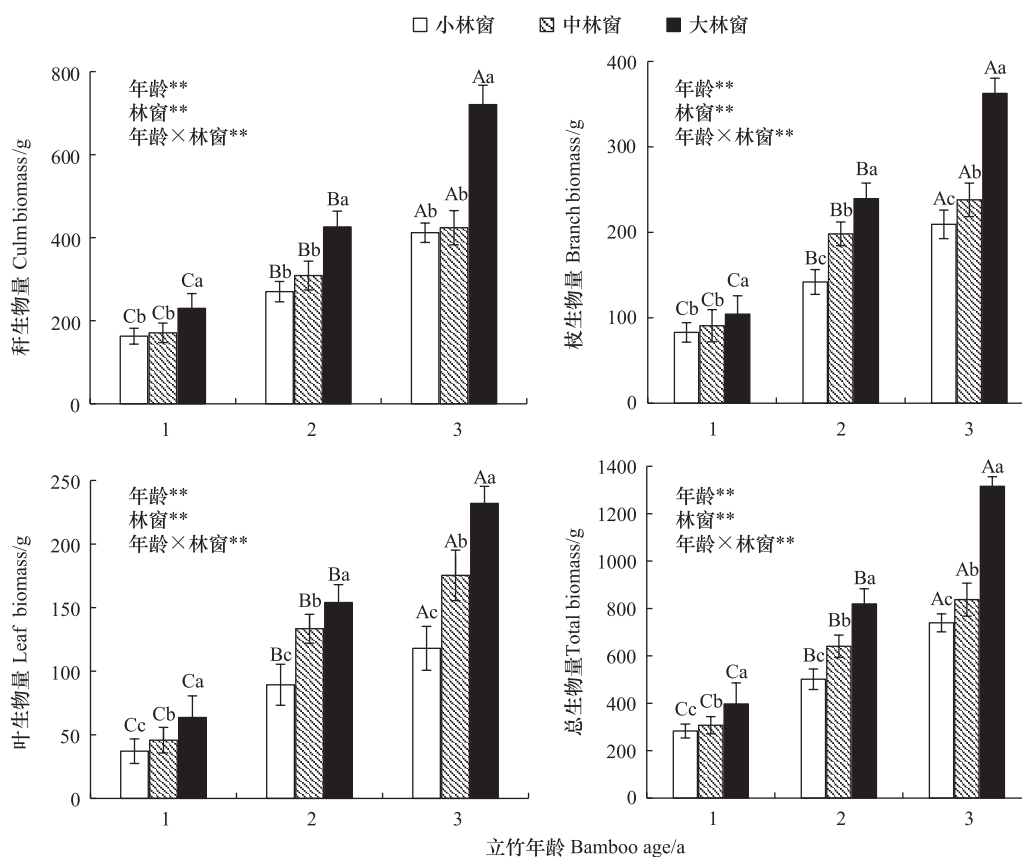


图2 杉木林窗下实心竹构件生物量积累特征

Fig.2 Biomass accumulation of *Phyllostachys heteroclada* f. *solida* components under different gaps of Chinese fir forest

不同大写字母表示同一林窗内不同立竹年龄间差异显著,不同小写字母表示同一立竹年龄不同林窗类型间差异显著 ($P < 0.05$)

2.2 林窗对实心竹构件生物量分配模式的影响

重复测量方差分析表明,立竹年龄、林窗及林窗和立竹年龄交互作用对实心竹构件生物量分配有显著影响(图3)($P<0.05$)。随着立竹年龄的增加,实心竹秆生物量分配比例呈先下降后升高变化趋势,且不同年龄立竹间秆生物量分配比例差异显著($P<0.05$);枝生物量比例总体呈下降变化趋势,1a、2a 立竹枝生物量分配比例总体上显著高于 3a 立竹($P<0.05$);叶生物量比例总体呈升高变化趋势,且小林窗 1a 立竹叶生物量比例显著低于 2a、3a 立竹($P<0.05$)。随着林窗面积增加,秆生物量分配比例呈先下降后升高变化趋势,小、大林窗立竹秆生物量分配比例均显著高于中林窗($P<0.05$),但前二者间并无显著差异($P>0.05$);1a 立竹枝生物量分配比例呈显著下降趋势,而叶生物量分配比例则呈显著升高变化趋势;2a、3a 立竹枝、叶生物量分配比例均呈先显著升高后显著下降趋势。

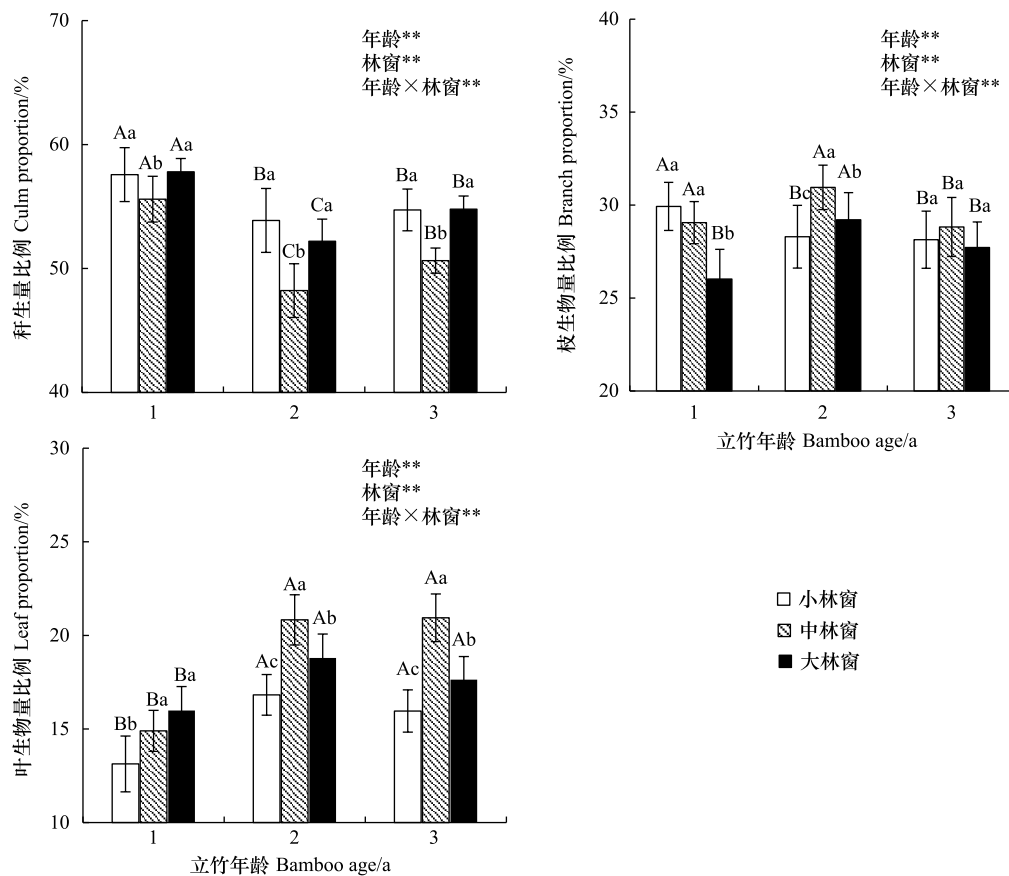


图3 杉木林窗下实心竹构件生物量分配模式

Fig.3 Modular biomass allocation pattern of *Phyllostachys heteroclada f. solida* under different gaps of Chinese fir forest

2.3 林窗对实心竹构件生物量异速生长关系的影响

实心竹 1—3a 立竹秆、叶、枝-总生物量均呈异速增长关系($b \neq 1.0$)(图4)。随林窗面积增大,1a 立竹秆-总生物量异速增长指数呈先显著下降后显著升高变化趋势;枝-总生物量异速增长指数显著下降,而叶-总生物量异速增长指数显著升高。随林窗面积增大,2a 立竹秆-总生物量异速增长指数呈先显著下降后升高变化趋势;而叶、枝-总生物量异速增长指数总体呈先升高而后显著下降趋势。随着林窗面积的增大,3a 立竹秆-总生物量异速增长速指数呈先下降而后升高变化趋势,且小、大林窗秆-总生物量具有共同斜率(1.053);枝、叶-总生物量异速增长指数均呈先显著升高而后显著下降变化趋势,且小、中林窗枝-总生物量存在共同斜率(0.884),但中林窗则发生了明显的正向位移。

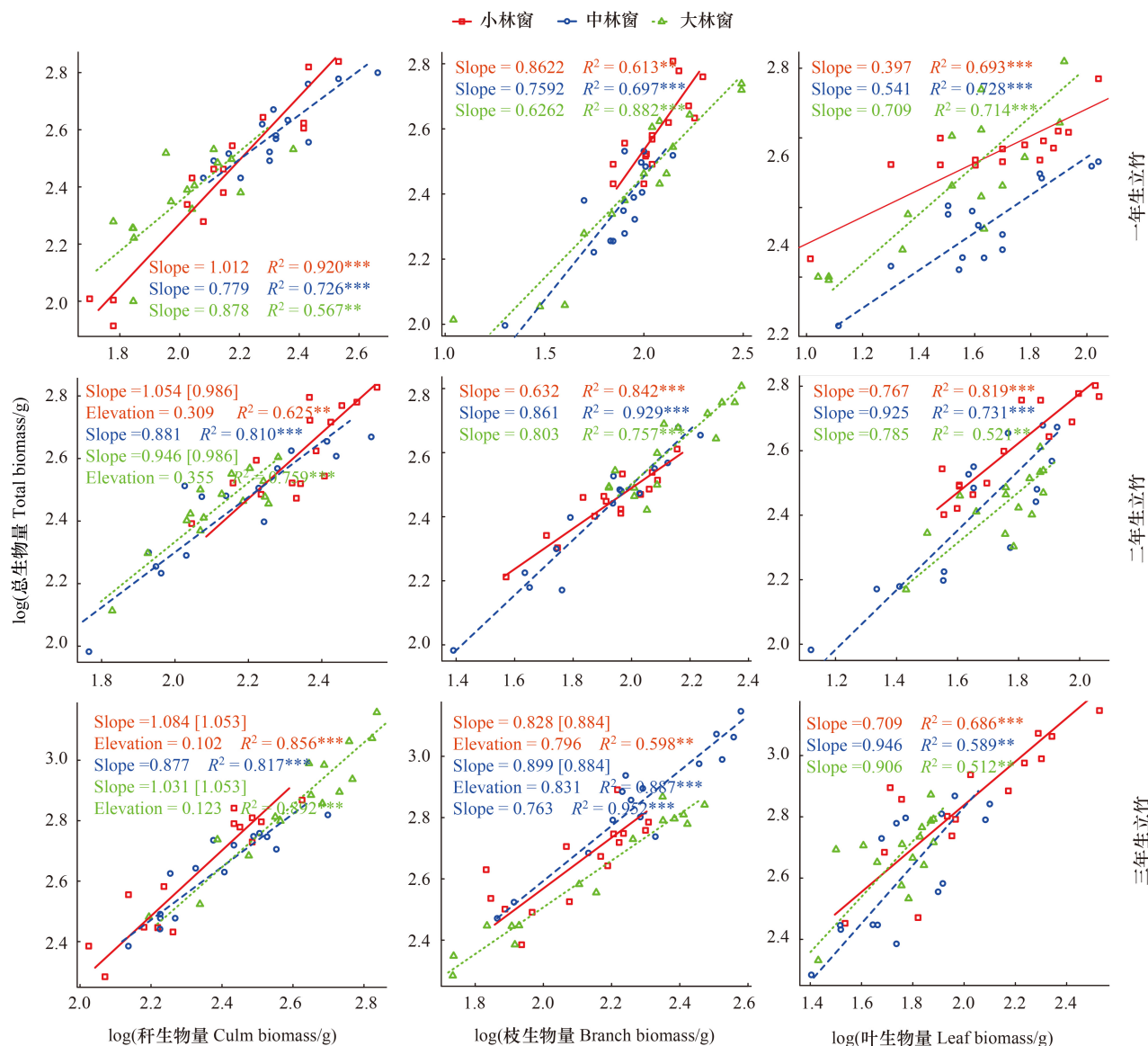


图4 林窗对实心竹构件生物量异速增长模式的影响

Fig.4 Allometric growth pattern of modular biomass for *Phyllostachys heteroclada* f. *solida* under different gaps of Chinese fir forest

[]表示存在共同斜率; Elevation表示沿共同主轴的位移

3 讨论

森林生态系统内林冠层乔木的死亡、砍伐或移除会形成面积不等、形状各异、分布随机、不连续的林窗^[26],改变了林内资源的获取水平和分布格局,增加了林内环境异质性,从而对林下植被多样性、生长发育和功能性状产生明显作用^[29-30]。面积作为林窗最重要的特征之一,其改变则会直接影响林内植被所能利用的资源、空间的质和量,改变林下植被对于温、光、水等资源的获取与分配过程,从而引起林下植被生长发育水平和生物量积累模式的明显改变^[31-32]。本研究表明,林窗面积和立竹年龄对实心竹生物量的积累影响显著,随着立竹年龄增加,实心竹秆、枝、叶及总生物量均显著增加,这主要与随着年龄增长竹子构件含水率下降和干物质不断积累等有关。随着林窗面积的增加,实心竹构件及总生物量均呈增长变化趋势,且总生物量及叶生物量林窗间差异显著,这说明林窗面积增加,显著加速了实心竹生物量的积累,促进了林下实心竹生产力水平

的明显提升,这与林窗面积增大,光资源的量明显增加,质明显提升,立竹光合能力明显提升有关^[33],同时也说明了开敞环境利于竹子生长和生物量的积累^[38]。秆和枝是竹子的支撑和输导器官,异质生境下立竹秆、枝生物量的塑性变化既反映了竹子枝、叶的空间分布,也体现了竹子的觅养行为^[20]。本研究结果表明,中、小林窗实心竹秆生物量并无显著差异,但却显著低于大林窗,且壮龄竹(2a、3a 立竹)枝生物量三林窗间差异显著,新竹(1a 立竹)枝生物量并未呈现出明显的林窗效应,这说明林窗面积已经成为限制实心竹秆、枝形态建成和生物量积累的重要生态因子,中、小林窗的光资源匮乏,对实心竹秆、枝形态建成和生物量的积累产生了明显的不良影响,而秆和枝生物量,特别是枝生物量的显著降低,则直接减少了对光合器官叶的支撑作用,从而引起光合器官数量和质量的下降,进而导致立竹生物量积累的下降。

植株生物量的大小通常能反映林地的生产力水平和种群的更新能力,而植株各器官生物量占总生物量的比例,即生物量分配比例,通常反映了植物对于所在生境的生态适应策略,是植物长期环境适应的结果^[10]。异质生境下植物通过权衡不同器官之间或器官水平内的投资成本来适应环境的改变,以合理分配有限的资源,实现预期的小投资高回报^[34—35]。本研究中,立竹年龄和林窗大小对实心竹生物分配模式产生了明显的影响,立竹年龄增大,实心竹秆生物量分配比例呈先下降后升高变化趋势,枝生物量分配比例总体呈下降变化趋势,叶生物量分配比例总体呈升高变化趋势,这说明随立竹年龄增加,实心竹光合器官叶生物量比例增加,立竹光合能力增强,从而加速了生物量的积累,这与 2a、3a 立竹生物量较 1a 立竹显著增加的结果一致。秆是竹子重要的支撑和输导器官,其生物量比例远超过其他构件,甚至达地上总生物量的 50% 以上^[36—37]。本研究发现,实心竹秆生物量占地上总生物量的 48.21%—57.80%,且随林窗面积增大,实心竹秆生物量分配比例呈先下降后增加变化趋势,壮龄竹($\geq 2a$)枝、叶生物量分配比例则呈先显著升高后显著下降变化趋势,且新竹(1a)枝生物量下降,而叶生物量比例增加。这与陶建平等对不同林冠环境下华西箭竹(*Fargesia nitida*)的克隆可塑性研究的结果类似,即林冠郁闭度增加,华西箭竹秆生物量分配比例显著减小^[38],但本研究中林窗与小林窗心竹秆生物量分配比例与其相反,这可能与本研究林窗的尺度较小,杉木又是常绿的乔木树种,小林窗林下环境接近于郁闭状态,而较低的红光与远红光比率促进了秆的伸长,增加了秆的生物量分配比例,这与陈劲松等对克隆植物聚花过路黄(*Lysimachia congestiflora*)对光环境响应的研究结果基本一致^[39]。林窗面积变化引起的资源的异质性致使实心竹产生明显的觅食(光资源)行为^[35],小林窗下实心竹会将更多的资源分配给秆,通过增加生长空间来获取更多的光资源,从而促进林下实心竹生长发育、良好形态建成和种群更新;随着林窗面积增加,实心竹枝、叶生物量分配比例增加,立竹通过增加光合器官及其直接支撑器官生物量比例来获取更多的光资源,提高立竹光合能力,以保障立竹良好生长和种群扩展,这符合植物资源最优分配理论^[40]。综合分析表明,实心竹具有较强的生态适应性,在杉木林下能自然生长,且中、大林窗实心竹具较高的生物量及叶生物量比例,是实心立竹良好生长发育和种群更新、拓展较适宜的林窗。

生物体构件生长速度不成比例或不均衡的现象即为异速生长^[41—42],构件间的异速生长关系虽主要由其自身遗传特性所决定,但生物年龄、生长发育阶段、资源可用性及外界环境异质性等均会对其产生重要影响,这在一定程度上也体现了生物生长过程对异质生境的生态适应策略^[43—44]。林窗性状,特别是面积的变化,对林内资源水平和丰富度,尤其是光资源的质和量,产生明显的影响,势必引起林下植物个体器官相对生长速率的改变,影响其生物量增长的不均衡性。本研究结果表明,林窗面积对实心竹秆、枝、叶生物量-总生物量异速生长关系有显著影响,且呈现明显的立竹年龄效应。随着林窗面积的增加,实心竹秆-总生物量异速生长指数均呈先下降后增加趋势,这说明相较于中林窗,小、大林窗秆生物量积累快于总生物量的积累,这与中林窗秆生物量分配比例较低的研究结果一致,其原因可能是小林窗下光资源水平明显下降,实心竹通过增加秆生物量比例,促进高生长,来获取更多的光资源^[45],而大林窗下较充足的光资源则直接促进了立竹生长和生物量积累,进而增加了秆生物量的分配比例;新竹叶-总生物量异速生长指数则总体升高,枝-总生物量异速生长指数总体下降,这说明林窗面积增加后,新竹叶生物量积累快于总生物量积累,而枝则相反,这与 1a 立竹枝、叶生物量分配比例变化趋势一致,同时,也与新竹抽枝展叶尚不完全有关;2a、3a 立竹叶、枝-总生物量异速增长

指数则呈先升高而后下降趋势,这说明相对于大、小林窗而言,中林窗叶、枝生物量增长速度快于总生物量,这说明林窗大小改变不仅引起实心竹生物量积累与分配模式的明显变化,也影响了实心竹构件的觅食行为,小林窗下光资源匮乏导致立竹增加秆生物量投资,从而拓展生长空间,而随着林窗面的积增加,立竹不断增加用于枝、叶生长物质和能量的投入,从而导致中林窗下叶、枝生物量比例的显著增加,以占据更多的生长空间,从而促进立竹良好生长和种群更新^[46]。这也与中、大林窗立竹生物量较高,且叶生物量分配比例显著提高的研究结果一致,进而更引证了中、大林窗促进了实心竹良好形态建成和种群更新。

4 结论

林窗是森林生态系统的重要特征之一,其位置、分布及面积等的变化均会明显改变林内资源水平,进而作用于林下植被生长和生产力的形成,从而影响生态系统结构和功能^[29-30]。本研究结果表明,林窗面积对实心竹生物量积累与分配特征及其相对增长关系有显著影响,且呈现明显的立竹年龄和林窗效应。随着林窗面积和立竹年龄的增大,实心竹构件生物量及总生物量显著提高,中林窗立竹枝、叶生物量分配比例显著升高;不同林窗下实心竹生物量积累、分配及其异速生长关系发生明显的变化,既反映了实心竹具有较强的器官形态塑性,也说明林窗变化导致实心竹产生了明显的觅食效应。试验区中、大林窗实心竹具有较高的生物量积累效率,构件生物量高且叶生物量分配比例显著增加,呈现出较高的生产潜力,是实心竹产量良好发挥的适宜林窗类型。本试验仅研究了林窗面积对实心竹生物量积累及分配规律的影响,而土壤性状也是影响实心竹生物量的重要因素,因此需继续开展不同面积林窗的土壤性状对实心竹生长影响的研究。

参考文献 (References):

- [1] Muscolo A, Bagnato S, Sidari M, Mercurio R. A review of the roles of forest canopy gaps. *Journal of Forestry Research*, 2014, 25(4): 725-736.
- [2] Mao X G, Zhu L, Fan W Y. Object-oriented automatic identification of forest gaps using digital orthophoto maps and LiDAR data. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 2020, 46(2): 177-192.
- [3] Kane V R, Gersonde R F, Lutz J A, McGaughey R J, Bakker J D, Franklin J F. Patch dynamics and the development of structural and spatial heterogeneity in Pacific Northwest forests. *Canadian Journal of Forest Research*, 2011, 41(12): 2276-2291.
- [4] 刘海英, 蒋仲龙, 姚任图, 孙碧霞, 王刚, 葛晓改, 李正才, 王增, 周本智. 木荷林窗微环境特征及幼苗更新研究. *西南林业大学学报: 自然科学*, 2022, 42(5): 56-63.
- [5] Dobrowolska D, Piasecka Z, Kuberski Ł, Stereficzak K. Canopy gap characteristics and regeneration patterns in the Białowieża forest based on remote sensing data and field measurements. *Forest Ecology and Management*, 2022, 511: 120123.
- [6] Han W Y, Chen L, Liu J Y, Wang G G, Liu D, Liu G H. Effect of gap size and elevation on the regeneration and coexistence of *Abies*, *betula*, and *Acer* tree species in a subalpine coniferous forest. *Forests*, 2023, 14(10): 2099.
- [7] 陶琼, 缪宁, 岳喜明, 罗建琼, 薛盼盼, 王晖. 川西亚高山岷江冷杉幼苗生物量积累与分配的影响因子. *植物生态学报*, 2024, 48(11): 1459-1470.
- [8] Xu Q F, Liang C F, Chen J H, Li Y C, Qin H, Fuhrmann J J. Rapid bamboo invasion (expansion) and its effects on biodiversity and soil processes. *Global Ecology and Conservation*, 2020, 21: e00787.
- [9] Zuo K Y, Fan L L, Guo Z W, Zhang L, Duan Y Y, Zhang J R, Chen S L, Lin H, Hu R C. High nutrient utilization and resorption efficiency promote bamboo expansion and invasion. *Journal of Environmental Management*, 2024, 362: 121370.
- [10] 闫帮国, 樊博, 何光熊, 史亮涛, 潘志贤, 李建查, 岳学文, 刘刚才. 干热河谷草本植物生物量分配及其对环境因子的响应. *应用生态学报*, 2016, 27(10): 3173-3181.
- [11] 沙欢, 梁咏亮, 彭姐, 高峰, 李静尧, 魏文轩, 庞丹波, 陈林. 林窗大小对青海云杉林灌草层维管植物物种多样性的影响. *生态学杂志*, 2024, 43(8): 2382-2394.
- [12] 李兵兵, 秦琰, 刘亚茜, 刘相兵, 黄选瑞. 燕山山地油松人工林林隙大小对更新的影响. *林业科学*, 2012, 48(6): 147-151.
- [13] 刘昌, 路琦, 汪生财, 陈梦缘, 邢韶华, 王青春, 杨军. 林窗对黄槿幼树空间分布及生长发育的影响. *北京林业大学学报*, 2024, 46(2): 9-17.
- [14] Vorontsova M S, Clark L G, Dransfield J, Govaerts R, Baker W J. *World Checklist of Bamboos and Rattans*. Beijing: Science Press. 2016.
- [15] 尹江苹, 唐召群, 祝荣先, 于文吉. 全球竹资源现状及变化趋势研究. *中国野生植物资源*, 2024, 43(S): 72-78.
- [16] Yuen J Q, Fung T, Ziegler A D. Carbon stocks in bamboo ecosystems worldwide: Estimates and uncertainties. *Forest Ecology and Management*, 2017, 393: 113-138.
- [17] de Campos Gorgulho Padgurschi M, Soares Reis T, Ferreira Alves L, Aparecida Vieira S, Alfredo Joly C. Outcomes of a native bamboo on biomass

- and carbon stocks of a neotropical biodiversity hotspot. *Acta Oecologica*, 2021, 111: 103734.
- [18] Fang Q Y, Zhou S, Hu S, Ye C Y, Fang D M, Mei T T, Zhou G M. Above-ground biomass of Moso bamboo forests in China influenced by climate, soil and topography: a meta-analysis. *Advances in Bamboo Science*, 2024, 8: 100091.
- [19] Ouyang M, Yang C, Tian D, Pan J M, Chen G P, Su H J, Yan Z B, Ji C J, Tang Z Y, Fang J Y. A field-based estimation of moso bamboo forest biomass in China. *Forest Ecology and Management*, 2022, 505: 119885.
- [20] 郭子武, 杨清平, 李迎春, 陈双林. 密度对四季竹地上生物量分配格局及异速增长模式的制约性调节. *生态学杂志*, 2013, 32(3): 515-521.
- [21] 郭子武, 章超, 杨丽婷, 谷瑞, 陈双林, 余兆根. 提前钩梢对雷竹地上构件生物量分配及其异速生长的影响. *生态学报*, 2020, 40(2): 711-718.
- [22] Getahun A, Kebede Y, Tadesse Z, Mulatu Y, Adamu F. Growth and biomass production of five exotic bamboo species in North-western Ethiopia. *Advances in Bamboo Science*, 2023, 4: 100030.
- [23] 马乃训, 赖广辉, 张培新, 张宏亮. 中国刚竹属. 杭州: 浙江科学技术出版社, 2014.
- [24] Beckschäfer P, Seidel D, Kleinn C, Xu J C. On the exposure of hemispherical photographs in forests. *IForest-Biogeosciences and Forestry*, 2013, 6(4): 228-237.
- [25] Bianchi S, Cahalan C, Hale S, Gibbons J M. Rapid assessment of forest canopy and light regime using smartphone hemispherical photography. *Ecology and Evolution*, 2017, 7(24): 10556-10566.
- [26] Zhu J J, Zhang G Q, Wang G G, Yan Q L, Lu D L, Li X F, Zheng X. On the size of forest gaps; can their lower and upper limits be objectively defined. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2015, 213: 64-76.
- [27] Warton D I, Wright I J, Falster D S, Westoby M. Bivariate line-fitting methods for allometry. *Biological Reviews*, 2006, 81(2): 259-291.
- [28] Guo Z W, Lin H, Chen S L, Yang Q P. Altitudinal patterns of leaf traits and leaf allometry in bamboo *Pleioblastus amarus*. *Frontiers in Plant Science*, 2018, 9: 1110.
- [29] Lu D L, Zhu J J, Wang X Y, Hao G Y, Wang G G. A systematic evaluation of gap size and within-gap position effects on seedling regeneration in a temperate secondary forest, Northeast China. *Forest Ecology and Management*, 2021, 490: 119140.
- [30] Liu F, Tan C, Yang Z G, Li J J, Xiao H S, Tong Y. Regeneration and growth of tree seedlings and saplings in created gaps of different sizes in a subtropical secondary forest in Southern China. *Forest Ecology and Management*, 2022, 511: 120143.
- [31] 崔宁洁, 刘洋, 张健, 杨万勤, 欧江, 张捷, 邓长春, 李建平. 林窗对马尾松人工林植物多样性的影响. *应用与环境生物学报*, 2014, 20(1): 8-14.
- [32] 肖洒, 吴福忠, 杨万勤, 常晨辉, 李俊, 王滨, 曹艺. 川西高山森林生态系统林下生物量及其随林窗的变化特征. *生态环境学报*, 2014, 23(9): 1515-1519.
- [33] 周俊宏, 成向荣, 虞木奎, 诸葛建军. 紫楠幼苗生长、叶性状和生物量分配对林窗不同生境的响应. *东北林业大学学报*, 2015, 43(12): 21-24, 50.
- [34] Liang Z C, Liu T T, Chen X Y, Xu W J, Dong T F, Liu Q S, Xu X. Twigs of dove tree in high-latitude region tend to increase biomass accumulation in vegetative organs but decrease it in reproductive organs. *Frontiers in Plant Science*, 2023, 13: 1088955.
- [35] Golan G, Weiner J, Zhao Y S, Schnurbusch T. Agroecological genetics of biomass allocation in wheat uncovers genotype interactions with canopy shade and plant size. *New Phytologist*, 2024, 242(1): 107-120.
- [36] 苏文会, 曾宪礼, 范少辉, 倪慧菁. 带状采伐对毛竹非结构性碳与生物量分配的影响. *生态学杂志*, 2019, 38(10): 2934-2940.
- [37] 陈新, 董文渊, 钟欢, 袁翎凌, 夏莉, 黄小东, 浦婵, 吴义远. 筇竹与黄皮树人工混交林中筇竹地上部分生物量模型构建. *世界竹藤通讯*, 2022, 20(2): 23-28.
- [38] 陶建平, 宋利霞. 亚高山暗针叶林不同林冠环境下华西箭竹的克隆可塑性. *生态学报*, 2006, 26(12): 4019-4026.
- [39] 陈劲松, 董鸣, 于丹, 刘庆. 不同光照条件下聚花过路黄的克隆构型和分株种群特征. *应用生态学报*, 2004, 15(8): 1383-1388.
- [40] Wertz B, Bembek M, Karaszewski Z, Ochał W, Skorupski M, Strzeliński P, Węgiel A, Mederski P S. Impact of stand density and tree social status on aboveground biomass allocation of Scots pine *Pinus sylvestris* L. *Forests*, 2020, 11(7): 765.
- [41] Dong L H, Zhang L J, Li F R. Allometry and partitioning of individual tree biomass and carbon of *Abies nephrolepis* Maxim in Northeast China. *Scandinavian Journal of Forest Research*, 2016, 31(4): 399-411.
- [42] Deng C, Zhang S G, Lu Y C, Froese R E, Ming A G, Li Q F. Thinning effects on the tree height-diameter allometry of Masson pine (*Pinus massoniana* Lamb.). *Forests*, 2019, 10(12): 1129.
- [43] Jorquera-Fontena E, Génard M, Ribera-Fonseca A, Franck N. A simple allometric model for estimating blueberry fruit weight from diameter measurements. *Scientia Horticulturae*, 2017, 219: 131-134.
- [44] Lv Z Q, Duan A G, Zhang J G. Influence of forest age, tree size, and climate factors on biomass and carbon storage allocation in Chinese fir forests. *Ecological Indicators*, 2024, 163: 112096.
- [45] 李羽翎, 张广奇, 臧丽鹏, 刘庆福, 隋明谟, 陈丹梅, 谢加琪, 李雍. 茂兰喀斯特森林不同林窗中灌木对幼苗层光资源分配的影响. *山地农业生物学报*, 2024, 43(6): 8-14.
- [46] 王坤, 赵维俊. 祁连山青海云杉林动态监测大样地幼苗幼树更新特征及其对地形因子的响应. *山地学报*, 2024, 42(5): 623-639.