

降香黄檀中幼林树冠生物量研究

余慧霖¹, 刘慧兰¹, 张学丰¹, 张建龙¹, 陈佳欣¹, 陈毅青^{2*}, 杨 怀^{3*}

1. 海南大学热带农林学院, 海南海口 570228; 2. 海南省林业科学研究院(海南红树林研究院), 海南海口 571199; 3. 国际竹藤中心三亚研究基地, 海南三亚 572000

摘 要: 研究降香黄檀 (*Dalbergia odorifera* T. Chen) 人工林树冠生物量的分布特征, 可以为合理的评估林分生物量和调整树冠结构提供理论依据。本研究以海南东方市林龄为 10~12 a 的降香黄檀人工林为研究对象, 设置 2 种不同立地条件样地 (S_1 和 S_2), 对 4.5 m 以上样木截冠处理, 采用分层切割法和全量称重法获取树冠层各器官生物量, 建立各器官最优生物量拟合方程。结果表明: (1) 冠层各器官中生物量大小顺序为裸枝 > 枝皮 > 叶片; 裸枝、枝皮和冠层总生物量为 $S_1 > S_2$, 叶片生物量则为 $S_1 < S_2$ 。(2) 随着冠层层次的增高, S_1 和 S_2 裸枝和枝皮生物量均呈波浪形变化, 其中 S_1 表现为先增加再下降, 而 S_2 则与之相反; 叶片生物量整体呈先上升再下降的趋势, 其中 S_1 集中分布在树冠中上层, S_2 主要分布在下层。 S_1 较 S_2 树冠上层生长竞争更激烈, 已出现冠层严重的自然稀疏, 叶生物量逐渐由下层转移至中上层。(3) 生物量最优拟合模型为幂函数形式, 分别为树冠总生物量 [$y=3.904(D^2H)^{1.247}$]、冠裸枝 [$y=1.901(D^2H)^{1.28}$]、冠枝皮 [$y=0.734(D^2H)^{1.276}$]、叶片 ($y=3.86D^{2.791}$)。

关键词: 降香黄檀; 树冠; 生物量; 分布特征; 拟合方程

中图分类号: S792.28 文献标志码: A

Canopy Biomass of Young and Middle-age *Dalbergia odorifera* Forest

YU Huilin¹, LIU Huilan¹, ZHANG Xuefeng¹, ZHANG Jianlong¹, CHEN Jiaxin¹, CHEN Yiqing^{2*}, YANG Huai^{3*}

1. School of Tropical Agriculture and Forestry, Hainan University, Haikou, Hainan 570228, China; 2. Hainan Academy of Forestry (Hainan Academy of Mangrove), Haikou, Hainan 571199, China; 3. Research Base of Sanya, International Bamboo and Rattan Center, Sanya, Hainan 572000, China

Abstract: The study of the distribution characteristics of crown biomass of *Dalbergia odorifera* plantation can provide theoretical basis for reasonable evaluation of stand biomass and adjustment of crown structure. In this paper, *D. odorifera* plantation aged 10–12 a in Dongfang, Hainan, China was taken as the research object. Two sample plots (S_1 and S_2) with different site conditions were set up, and the crown of the sample trees over 4.5 m was cut off. The biomass of each organ in the canopy was obtained by layered cutting method and total weighing method, and the optimal biomass fitting equation of each organ was established. (1) The order of biomass in each organ was bare branch > branch bark > leaf. The total biomass of bare branches, branch bark and canopy was $S_1 > S_2$, while the leaf biomass was $S_1 < S_2$. (2) With the increase of canopy class, the biomass of bare branches and branch bark of S_1 and S_2 showed a wave-like change, in which S_1 increased first and then decreased, while S_2 was the opposite. As a whole, the leaf biomass increased first and then decreased, in which S_1 was mainly distributed in the middle and upper layers of the crown, while S_2 was mainly distributed in the lower layers. The upper layer of the canopy of S_1 was more competitive than that of S_2 , there has been serious natural thinning of canopy, the leaf biomass gradually shifted from the lower layer to the middle and upper layers. (3) The optimal fitting model of biomass was power function, which was the total biomass of crown [$y=3.904(D^2H)^{1.247}$], canopy bare branches [$y=1.901(D^2H)^{1.28}$], canopy branch bark [$y=0.734(D^2H)^{1.276}$], and canopy leaves ($y=3.86D^{2.791}$).

收稿日期 2024-07-27; 修回日期 2024-08-22

基金项目 海南省重点研发专项“揭榜挂帅”项目 (No. ZDYF2023SHFZ174); 海南省重大科技计划项目 (No. ZDKJ2021031)。

作者简介 余慧霖 (1992—), 女, 硕士研究生, 研究方向: 林业生态。*通信作者 (Corresponding author): 陈毅青 (CHEN Yiqing), E-mail: 13876350188@126.com; 杨 怀 (YANG Huai), E-mail: yanghuai2008@163.com。

Keywords: *Dalbergia odorifera*; canopy; biomass; distributional characteristics; fitting equation
DOI: 10.3969/j.issn.1000-2561.2025.01.017

降香黄檀 (*Dalbergia odorifera* T. Chen) 系海南特有的珍贵乡土树种之一, 属豆科 (Fabaceae) 黄檀属 (*Dalbergia*) 乔木^[1], 现存野生资源极度稀缺, 是国家二级保护植物^[2], 其心材广泛应用于上等工艺品和入药, 对心脑血管的疾病治疗有一定的功效^[3]。因其生态和经济价值较高, 20 世纪 60 年代开始, 在广西、广东、云南和福建等亚热带地区均有引种栽植^[4]。目前, 降香黄檀人工林在海南省种植面积达到 6331 hm², 总蓄积量将近 123 599 m³, 其中东方市人工林资源占据榜首^[3]。

目前很多学者对降香黄檀的研究大多集中在种质资源收集、改良^[5]和栽培技术、生理生化^[6]以及生长规律^[7]等方面。此外, 降香黄檀在中幼龄林开始形成心材, 且活立木价值珍贵, 难以获取各器官生物量数据, 导致对其生物量的研究较为少见。

树冠与树木的生长生理活动和干粗之间存在关联^[8-9], 随着林龄的增加, 林木间的竞争愈发激烈, 尤其是当树冠层逐渐郁闭, 林木步入自然稀疏阶段时, 对树干木材形成会产生影响。通过合理调整树冠结构, 可提升降香黄檀的心材形成率^[10]及单位面积成龄株数。对树冠生物量进行分层研究, 有助于深入理解树冠结构及其冠层各器官生物量的具体分配状况^[11], 为进一步实施树冠结构的科学调整 and 有效评估降香黄檀人工林生态系统碳计量提供理论支持。本研究选取海南东方市中幼龄林降香黄檀人工林作为实验对象, 拟通过理解降香黄檀人工林树冠生物量分配特征, 为有效评估降香黄檀人工林生物量及优化树冠结构提供

理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于海南省东方市的花梨谷文化旅游区 (108°73'42"~108°74'53"E, 18°73'39"~18°72'76"N) 和汇利花梨共享山庄 (109°02'19"~109°02'74"E, 19°01'42"~19°01'10"N), 地处海南岛西北部, 东方市年平均气温为 25 ℃, 极端气温多出现于 1—2 月和 5—7 月, 年降雨量为 940~1900 mm, 全年日照时数约为 2543 h, 为海南省最干旱地区。所选研究区降香黄檀人工林为 10~12 年生中幼龄林, 花梨谷、汇利种植面积分别为 600、200.04 hm², 造林初值密度为 1250 株/hm², 现存密度为 1219 株/hm²。

1.2 方法

1.2.1 样地设置及调查 2023 年 7 月于东方市永涛花梨谷 (S₁) 和汇利花梨山庄 (S₂) 设置 2 个林龄和密度相似的样地 (表 1), 样地内树木长势良好, 在每块样地内设置 3 个 3 m×20 m 的样方, 对样方内的样木进行每木检尺, 测量其树高、胸径、郁闭度等信息, 每一个样方为 1 个重复, 并在样方内选择冠形生长正常, 无病虫害的个体, 作为树冠生物量测定样木, S₁ 和 S₂ 样木数分别为 24 株 (每重复 8 株) 和 18 株 (每重复 6 株)。将样木按胸径级划分为 3 级: 4.5~7 cm、7~9.5 cm、9.6~13.3 cm, 分别为 4、18、20 株, 共 42 株样木, 各级胸径在各重复中均匀分布, 样木冠长为 1.5~5 m, 冠幅为 2.25~5.35 m。

表 1 样地概况
Tab. 1 General situations of sample plots

样地 Sample plot	土壤类型 Soil type	郁闭度 Canopy density	平均胸径 Average diameter at breast height/cm	平均树高 Average height/m	坡向 Slope aspect/(°)	坡度 Slope degree/(°)	海拔 Altitude/m
S ₁	红壤土	0.72	9.96	8.56	西 280	2	46
S ₂	沙壤土	0.68	9.07	6.93	西南 230	10	163

1.2.2 生物量测定 枝、叶生物量的测定采用分层切割法和全量称重法。因降香黄檀培育的目标为 4~5 m 以下的主干心材, 多数枝条无心材, 所以本实验对选取的样木 4.5 m 以上树冠进行截冠处理, 截冠后按 50 cm 为一个层次从下至上分层

切割并进行编号 (C₁、C₂...C_n), 并立即将枝叶分离, 分别称量每层的枝条、叶片鲜重并取样 (样品质量约为 50~100 g)。按层次从各枝条上截取 3 cm 的圆盘称其鲜重并编号, 枝皮率通过截取各层次圆盘测定。将样品带回实验室在 85 ℃恒温

下烘干至恒重, 测算树冠各层枝、叶含水率。根据含水率计算各层次枝、叶生物量, 通过累加全部层次的枝、叶片生物量获得每层枝条的枝生物量 (W_B) 和叶生物量 (W_L) 以及枝叶总生物量 (W_{BL}), 然后依据单木树冠总生物量和降香黄檀人工林现存密度进行单位面积树冠生物量推算。公式如下:

干重比: $P_W = P_{\text{干}} / W_{\text{鲜}}$ (1)

枝条生物量: $W_B = \sum_{i=1}^n W_{bi} \cdot P_W$ (2)

叶生物量: $W_L = \sum_{i=1}^n W_{li} \cdot P_W$ (3)

枝叶总生物量: $W_{BL} = W_B + W_L$ (4)

式中, i 代表层次编号, n 代表树冠的冠层数, W_{bi} 代表各层枝总鲜重, W_{li} 代表各层次叶片总鲜重; W_B 为枝条生物量, W_L 为叶生物量, W_{BL} 为枝叶总生物量。

1.3 数据处理

采用 Excel 2023 与 SPSS 22.0 软件, 以树冠层各器官生物量为因变量, 以胸径 (DBH)、树高 (H)、胸径平方乘树高 (D^2H) 作为自变量, 采用线性、幂函数、指数等模型进行回归拟合, 以 F 、 P 值和 R^2 评定模型的拟合程度, 筛选最优模型。

2 结果与分析

2.1 不同立地条件下降香黄檀人工林树冠生物量分配特征

冠层各器官生物量在不同立地条件下呈现不同水平 (表 2), S_1 的树冠总生物量为 22.03 t/hm^2 , 比 S_2 高 0.19 倍, 可见 S_1 立地条件优于 S_2 。 S_1 和 S_2 于各器官生物量的分配均表现为裸枝占比最大 (63.93% 和 57.49%), 其次为枝皮 (23.58% 和 21.73%), 叶占比最低 (12.49% 和 20.8%)。裸枝和枝皮的生物量均表现为 S_1 显著高于 S_2 ($P<0.05$), S_1 分别为 S_2 的 0.32 和 0.29 倍, 叶生物量差异不显著, S_2 较 S_1 高 0.4 倍 (图 1)。

2.1.1 降香黄檀人工林枝条生物量特征 生物量分布特征分析结果显示 (表 3): S_1 裸枝生物量集中分布在 1~8 层, 具体分布表现为 $C_1 > C_3 > C_2 > C_4 > C_6 > C_7 > C_5 > C_8 > C_9 > C_{10}$, $C_1 \sim C_8$ 层生物量占裸枝总生物量的比例均超过 9.2%, 其中 C_1 层生物量最高, 为 1.93 t/hm^2 , 占裸枝总生物量的 13.72%, C_{10} 最低, 为 0.13 t/hm^2 , 比 C_1 低 93.26%。在 S_2 中, 裸枝生物量集中分布在 1~5 层, 具体分布表现为 $C_2 > C_1 > C_3 > C_4 > C_5 > C_6 > C_9 > C_{10} > C_8 > C_7$, 其中 C_7 生物量最低, 为 0.15 t/hm^2 , 仅为 C_2 最大生物量 (2.56 t/hm^2) 的 0.06 倍。对比 S_1 和 S_2 , S_2 中 C_2 生物量最大值, 比 S_1 的最大值 (C_1) 高 32.64%。

表 2 各器官平均生物量
Tab. 2 Average biomass of each organ

样地 Sample plot	裸枝 Bare branch biomass/(t·hm ⁻²)	占比 Ratio/%	枝皮 Branch bark biomass/(t·hm ⁻²)	占比 Ratio/%	叶片 Leaf biomass/(t·hm ⁻²)	占比 Ratio/%	树冠 Crown biomass/(t·hm ⁻²)
S_1	14.08 ± 0.25^a	63.91	5.20 ± 0.02^a	23.61	2.75 ± 0.10^a	12.48	22.03
S_2	10.66 ± 1.51^b	57.47	4.03 ± 0.51^b	21.73	3.86 ± 1.25^a	20.80	18.55

注: 不同小写字母表示处理间差异显著 ($P<0.05$)。
Note: Different lowercase letters indicate significant difference among treatments ($P<0.05$).

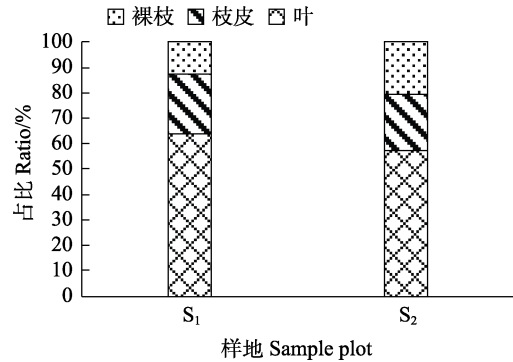


图 1 树冠层各器官平均生物量

Fig. 1 Average biomass content of each organ in canopy

2 种立地条件下裸枝和枝皮生物量均随冠层层次的增高呈“波浪”型变化, 但其分布特征存在差异 (图 2)。随着层次的增高, 枝皮生物量于 S_1 的变化呈先下降后上升的趋势, 最大值出现在 C_7 , 达到 0.89 t/hm^2 , 相较于 C_{10} 高 8.9 倍。 S_2 中枝皮生物量变化趋势与 S_1 相反, 表现为先上升后下降, 其最大值为 C_4 (0.83 t/hm^2), 最小值出现在 $C_7 \sim C_8$ 。比较两地最大值, S_1 (C_7) 高 S_2 (C_4) 7.2%。

不同立地降香黄檀人工林分冠层裸枝与枝皮

表 3 不同立地树冠层各器官平均生物量
Tab. 3 Average biomass of canopy each organs in different sites t/hm²

冠层等级 Canopy layer level	裸枝生物量 Bare branch biomass		枝皮生物量 Branch bark biomass		叶片生物量 Leaf biomass	
	S ₁	S ₂	S ₁	S ₂	S ₁	S ₂
第一层 (C ₁)	1.93±0.04	2.18±0.34	0.38±0.01	0.42±0.07	0.01±0.002	0.23±0.06
第二层 (C ₂)	1.82±0.10	2.56±0.48	0.35±0.02	0.68±0.13	0.02±0.005	0.41±0.09
第三层 (C ₃)	1.84±0.19	2.05±0.58	0.46±0.05	0.78±0.22	0.04±0.02	0.58±0.21
第四层 (C ₄)	1.71±0.09	1.64±0.33	0.54±0.02	0.83±0.19	0.08±0.02	0.66±0.24
第五层 (C ₅)	1.58±0.16	1.07±0.43	0.60±0.07	0.63±0.28	0.15±0.02	0.92±0.41
第六层 (C ₆)	1.63±0.07	0.33±0.17	0.78±0.003	0.17±0.11	0.38±0.10	0.32±0.24
第七层 (C ₇)	1.60±0.02	0.15±0.14	0.89±0.004	0.09±0.08	0.60±0.07	0.09±0.08
第八层 (C ₈)	1.29±0.12	0.16±0.28	0.75±0.07	0.09±0.15	0.78±0.17	0.05±0.09
第九层 (C ₉)	0.54±0.03	0.29±0.50	0.35±0.02	0.19±0.32	0.56±0.04	0.21±0.36
第十层 (C ₁₀)	0.13±0.01	0.23±0.41	0.09±0.01	0.15±0.26	0.13±0.03	0.38±0.66

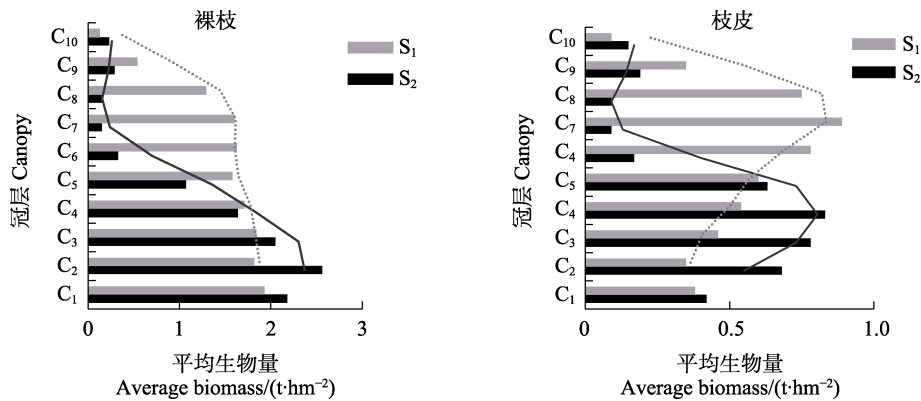


图 2 不同立地降香黄檀人工林树冠层裸枝、枝皮平均生物量
Fig. 2 Average biomass of canopy bare branches and branch barks of *D. odorifera* plantations in different sites

生物量在冠层间分布差异较大，但在 C₁~C₅ 层分布相对稳定，树冠中下层相对大于上层，表明随着层次增高，裸枝与枝皮生物量分布逐渐减少。

2.1.2 降香黄檀人工林叶生物量特征 叶片生物量在不同立地条件下的分布层次存在差异。随着层次增高，S₁ 的叶生物量总体呈现上升趋势，中下层显著低于上层（图 3）。S₂ 的叶生物量主要集中于中下层，整体趋势为先上升后下降。在 S₁ 中，叶生物量集中分布于 C₆~C₉，最大值和最小值分布在 C₈（0.78 t/hm²）和 C₁（0.01 t/hm²）；在 S₂ 叶生物量集中分布于 C₁~C₅，C₅ 最大（0.92 t/hm²），C₈ 最小（0.05 t/hm²）。观察总冠层叶片生物量，S₂ 较 S₁ 高约 0.4 倍，尽管 S₁ 的平均胸径和树高均大于 S₂，但其叶生物量相对较低，表明 S₁ 已进入较为严重的自然稀疏阶段。

2.2 树冠生物量估算

根据生物量回归模型^[12-14]，将林木易测因子

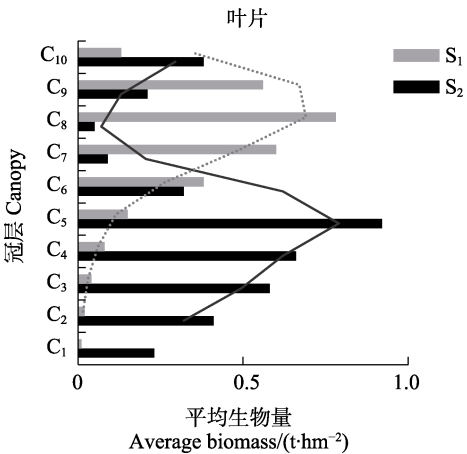


图 3 不同立地降香黄檀人工林树冠层叶片平均生物量
Fig. 3 Average biomass of canopy leaf of *D. odorifera* plantations in different sites

与冠层各器官生物量进行相关性分析（表 4），发现胸径、D²H 与冠层各器官生物量间存在极显著正相关关系。此外，树高仅与裸枝和枝皮生物量

表 4 胸径、树高、 D^2H 与各变量间相关矩阵
Tab. 4 Correlation matrix between D , H , D^2H and variables

指标 Index	DBH	H	D^2H	裸枝 Bare branch	枝皮 Branch bark	叶片 Leaf	总生物量 Total biomass
胸径	1						
树高	0.525**	1					
D^2H	0.945**	0.699**	1				
裸枝	0.830**	0.556**	0.854**	1			
枝皮	0.822**	0.549**	0.849**	0.997**	1		
叶片	0.636**	0.269	0.630**	0.800**	0.811**	1	
总生物量	0.816**	0.513**	0.835**	0.991**	0.991**	0.872**	1

注: **为 0.01 水平 (双侧) 上显著相关。
Note: ** means significant correlation at the level of 0.01 (bilateral).

表现出显著相关性,而与叶片生物量无显著关联。进一步分析显示,胸径、 D^2H 以及树高均与单株树冠总生物量呈极显著正相关。结果表明,以林木易测因子为自变量,降香黄檀冠层各器官生物量为因变量,可建立相关模型并实现回归拟合。
2.2.1 树冠生物量模型 在对树冠总生物量的方程拟合过程中,筛选结果表明(表 5),以 D 和 D^2H

作为自变量所拟合的方程具有较高的 R^2 值(图 4),显示出与树冠生物量之间的极显著相关性。具体而言,以 D^2H 为自变量的幂函数方程,其 R^2 值达到最大值 0.771,且 P 值趋近于 0,差异达到极显著水平。据此,幂函数模型 $y=3.904(D^2H)^{1.247}$ 被认为是最优模型,适用于估算中幼龄林降香黄檀的树冠生物量。

表 5 树冠生物量模型参数估计与检验结果
Tab. 5 Parameter estimation and test results of crown biomass model

函数类型 Function	自变量 Independent variable	模型 Model	R^2	F	P
指数函数	D	$y=559.179e^{0.332x}$	0.723	118.337	0
	H	$y=507.845e^{0.416x}$	0.348	22.622	0
	D^2H	$y=3849.533e^{0.002x}$	0.659	134.516	0
线性	D	$y=-25815.054x+4453.067$	0.666	79.919	0
	H	$y=-22907.622x+5056.941$	0.263	14.259	0.001
	D^2H	$y=-2505.762x+25.157$	0.697	91.838	0
幂函数	D	$y=18.233x^{2.950}$	0.747	118.337	0
	H	$y=17.084x^{3.247}$	0.361	22.622	0
	D^2H	$y=3.904x^{1.247}$	0.771	134.516	0

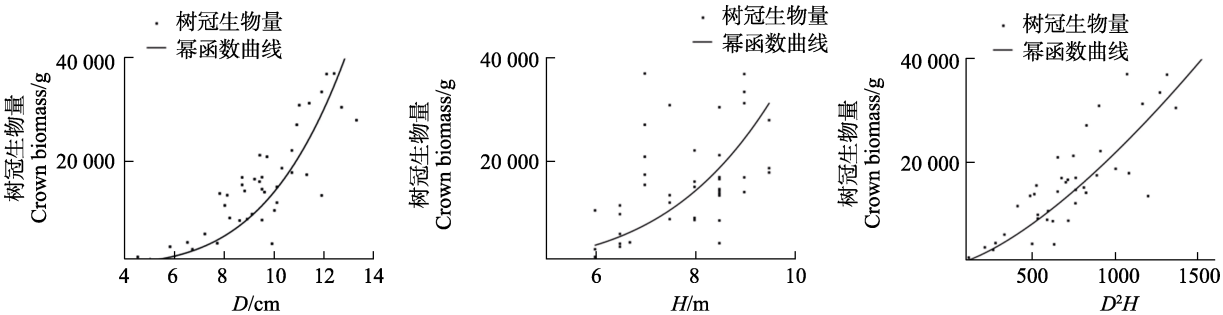


图 4 树冠生物量与胸径、树高、 D^2H 的回归线图
Fig. 4 Regression correlation between crown biomass and DBH, H and D^2H

2.2.2 裸枝和枝皮生物量模型 由表 6 和图 5 分析得出,裸枝生物量与 H 变量间关联性不显著,

然而,与 D 和 D^2H 的关联性显著。在拟合过程中,以 D^2H 为自变量所得的幂函数方程判定系数 R^2

显著高于以 D 或 H 为自变量的方程。此外, P 值接近 0, 表明差异极显著。因此, D^2H 作为自变量构建的幂函数方程为描述裸枝生物量的最佳模型: $y=1.901(D^2H)^{1.282}$ 。

表 6 裸枝生物量模型参数估计与检验结果
Tab. 6 Parameter estimation and test results of bare branch biomass model

函数类型 Function	自变量 Independent variable	模型 Model	R^2	F	P
指数函数	D	$y=329.349e^{0.336x}$	0.695	90.979	0
	H	$y=231.227e^{0.454x}$	0.389	25.434	0
	D^2H	$y=2068.423e^{0.002x}$	0.648	73.480	0
线性	D	$y=-15281.598x+2675.089$	0.691	89.600	0
	H	$y=-15177.878x+3246.9$	0.311	18.093	0
	D^2H	$y=-1329.858x+15.179$	0.729	107.641	0
幂函数	D	$y=10.137x^{2.992}$	0.722	104.048	0
	H	$y=5.727x^{3.54}$	0.400	27.030	0
	D^2H	$y=1.901x^{1.282}$	0.765	130.227	0

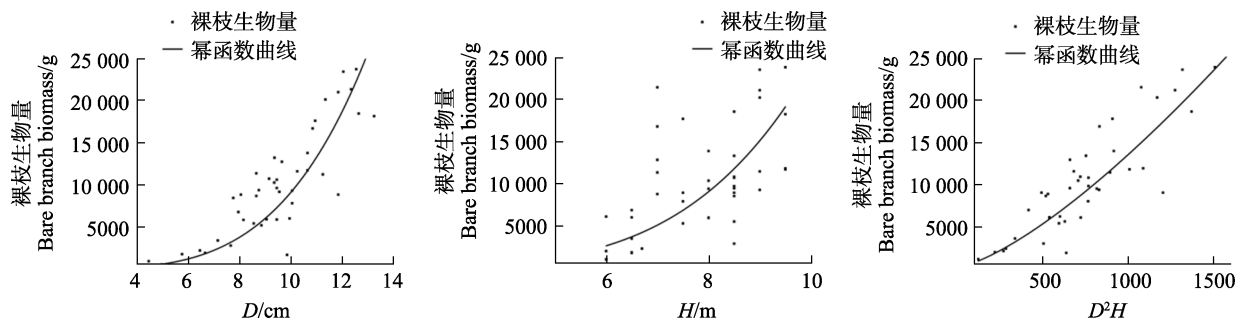


图 5 裸枝生物量与胸径、树高、 D^2H 的回归线图
Fig. 5 Regression correlation between bare branch biomass and DBH, H and D^2H

枝皮生物量方程的拟合结果与裸枝生物量方程相似(表 7、图 6)。最终确定的回归方程是以 D^2H 作为自变量, 呈现幂函数形式, R^2 为 0.750, P 值接近 0, 该方程表达式为: $y=0.734(D^2H)^{1.276}$ 。

2.2.3 叶片生物量模型 从表 8 和图 7 数据显示,

叶片生物量与变量 D 和 D^2H 的相关系数均高于 H , 表现出显著相关(P 值均为 0)。在三者中, 以 D 为自变量所拟合的方程的判定系数 R^2 值最高, 达到 0.612。基于此, 选取以 D 为自变量建立的幂函数方程 $y=3.86D^{2.791}$ 作为描述降香黄檀叶片生物量的最佳模型。

表 7 枝皮生物量模型参数估计与检验结果
Tab. 7 Parameter estimation and test results of branch bark biomass model

函数类型 Function	自变量 Independent variable	模型 Model	R^2	F	P
指数函数	D	$y=121.244e^{0.336x}$	0.690	89.083	0
	H	$y=88.53e^{0.45x}$	0.378	24.268	0
	D^2H	$y=759.162e^{0.002x}$	0.649	73.904	0
线性	D	$y=-5880.038x+1016.001$	0.675	83.041	0
	H	$y=-5791.302x+1226.868$	0.301	17.219	0
	D^2H	$y=-610.078x+5.802$	0.721	103.338	0
幂函数	D	$y=3.837x^{2.982}$	0.710	98.159	0
	H	$y=2.319x^{3.496}$	0.389	25.520	0
	D^2H	$y=0.734x^{1.276}$	0.750	120.002	0

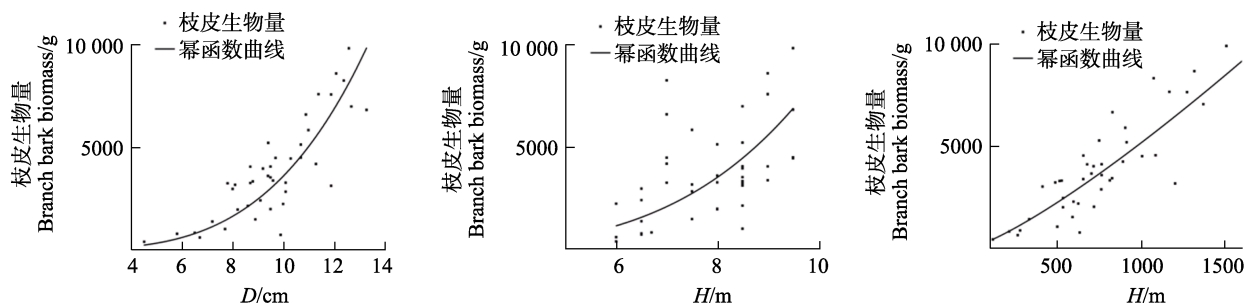


图 6 枝皮生物量与胸径、树高、 D^2H 的回归线图
Fig. 6 Regression correlation between branch bark biomass and DBH , H and D^2H

表 8 叶片生物量模型参数估计与检验结果
Tab. 8 Parameter estimation and test results of leaf biomass model

函数类型 Function	自变量 Independent variable	模型 Model	R^2	F	P
指数函数	D	$y=95.879e^{0.316x}$	0.602	60.383	0
	H	$y=282.342e^{0.248x}$	0.113	5.107	0.029
	D^2H	$y=594.492e^{0.002x}$	0.485	37.600	0
线性	D	$y=-4656.468x+762.228$	0.405	27.177	0
	H	$y=-1938.442x+583.173$	0.072	3.123	0.085
	D^2H	$y=-565.826x+4.175$	0.398	26.392	0
幂函数	D	$y=3.86x^{2.791}$	0.612	62.965	0
	H	$y=36.201x^{1.952}$	0.119	5.418	0.025
	D^2H	$y=1.489x^{1.102}$	0.551	49.002	0

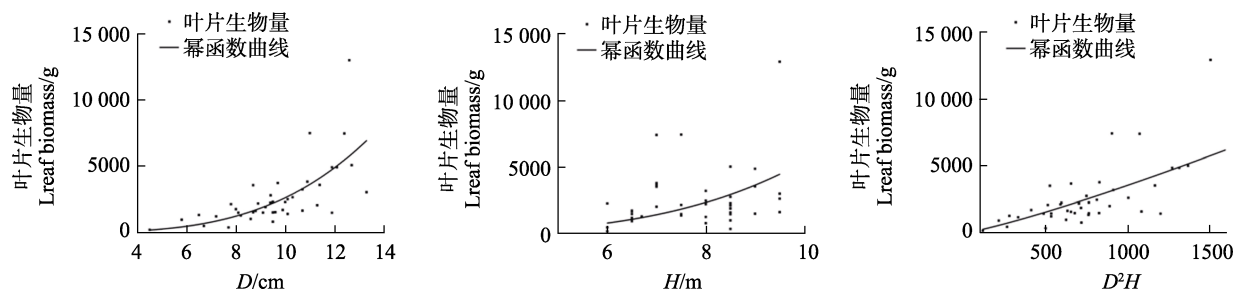


图 7 叶片生物量与胸径、树高、 D^2H 的回归线图
Fig. 7 Regression correlation between leaf biomass and DBH , H and D^2H

3 讨论

3.1 生物量分配

冠层各器官生物量在一定程度上能够反映树冠的结构特征。其中，叶片作为林木进行光合作用的关键器官，其分布层次间的差异可能与光照、郁闭度等环境因子密切相关。降香黄檀树冠不同器官的生物量在不同立地条件下分布层次存在显著差异。具体来看，枝条和叶片生物量在 S_2 中均集中于 $C_1\sim C_6$ ，即树冠垂直剖面的下层，其中 C_2 和 $C_4\sim C_5$ 的生物量达到最大值，呈现正态分布，这与杨东等^[15]的研究结论相一致；在 S_1 样地，生物量则集中分布于 $C_1\sim C_8$ 和 $C_7\sim C_9$ ，即树冠垂直

剖面的中下层和上层。这表明叶片在中下层的分布极少，这是由于林分郁闭后，林木树冠生长空间减小，枝条开始交错，下层叶片的生物量积累效率降低^[16]。随着林木间竞争的加剧， S_1 的树冠各器官生物量的分布层次已经发生转移，叶片分布层次不再符合树冠叶量最大特性。通过改变树冠结构，可以对其生长模式产生影响。有研究表明，对林木进行修枝有助于改善光照环境，通过合理的光合作用分配，维持其下部主干生长^[17-18]。此外，定期截冠可以疏开树冠，增加单株叶面积，在保持林木生长的同时，有利于保持降香黄檀人工林单位面积的成龄株数。

在林龄、现存密度和营林措施相似的情况下， S_1 的平均胸径、树高和单木树冠生物量均大于 S_2 ，表明 S_1 的立地质量可能更好。但从树冠结构来看， S_1 样地的降香黄檀人工林已进入自然稀疏阶段，树冠进入郁闭状态，叶片集中在树冠上表层，这不利于下层器官的生物量累积和降香黄檀干材的形成，在人工林经营中建议采取树冠调控措施以改善林内生长环境。

3.2 生物量模型

本研究通过构建降香黄檀树冠层各器官生物量方程，发现 3 种自变量因子与大部分器官生物量之间存在显著相关性，且模型预估精度较高。其中，最优自变量为 D 和 D^2H ，其中 D^2H 对树冠生物量的影响最为显著，这与胡炎红等^[19]研究结论相吻合。此外，胸径与叶片生物量的模型拟合度较高，这与前人的生物量模型研究论相符^[20]。然而，树高与各器官生物量之间的相关性相对较差，这可能会对冠层器官生物量的预估精度产生影响^[14]，尤其是与叶片生物量之间的相关性不显著，这可能是由于树高数据的获取准确性较低所导致。因此，在缺少树高数据或测量不准确的情况下，可以考虑使以胸径作为自变量构建生物量方程。

4 结论

本研究分析了海南中龄林降香黄檀人工林树冠生物量的分配特征，树冠层各器官生物量占比裸枝最高，枝皮次之，叶片最低。从生物量的贡献量看，树枝（裸枝和枝皮）生物量占绝对优势，占比达 79% 以上。生物量幂函数方程优于线性和指数函数方程。最优自变量则根据各器官有所差异，最优拟合方程分别为：树冠 $[y=3.904(D^2H)^{1.247}]$ 、裸枝 $[y=1.901(D^2H)^{1.282}]$ 、枝皮 $[y=0.734(D^2H)^{1.276}]$ 、叶片 $(y=3.86D^{2.791})$ 。在模型的利用上，本研究仅对降香黄檀 10~12 年生的人工林树冠生物量进行了建模，今后尚需补充完善更多年龄组数据，对所建模型进行优化和校正。

参考文献

- [1] 中国科学院中国植物志编辑委员会. 中国植物志[M]. 北京: 科学出版社, 1996.
Editorial Committee of Chinese Flora of China Academy of Sciences. Flora of China[M]. Beijing: Science Press, 1996. (in Chinese)
- [2] ZHAO X S, WANG C H, MENG H, YU Z X, YANG M H, WEI J H. *Dalbergia odorifera*: a review of its traditional uses, phytochemistry, pharmacology, and quality control[J]. Journal of Ethnopharmacology, 2020, 248: 112328.
- [3] 张孟文, 陈飞飞, 黄川腾, 林玲. 海南省降香黄檀人工林资源特征与产业现状[J]. 林业科技通讯, 2024(6): 46-51.
ZHANG M W, CHEN F F, HUANG C T, LING L. Resource characteristics and industrial status of *Dalbergia odorifera* plantation in Hainan province[J]. Forest Science and Technology, 2024(6): 46-51. (in Chinese)
- [4] 黄浩伦, 麦雄俊, 黄慧德. 我国海南黄花梨资源与开发研究[J]. 中国农业资源与区划, 2018, 39(9): 123-129.
HUANG H L, MAI X J, HUANG H D. Resources and development research of hainan yellow pear in China[J]. Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning, 2018, 39(9): 123-129. (in Chinese)
- [5] LIU F M, ZHANG N N, LIU X J, YANG Z J, JIA H Y, XU D P. Genetic diversity and population structure analysis of *Dalbergia odorifera* germplasm and development of a core collection using microsatellite markers[J]. Genes, 2019, 10(4): 281.
- [6] 尹丽英. 降香黄檀人工幼林碳储量和植物营养储量研究[D]. 南宁: 广西大学, 2015.
YIN L Y. Research on the carbon and plant nutrients storages of young *Dalbergia odorifera* plantation[D]. Nanning: Guangxi University, 2015. (in Chinese)
- [7] 刘慧兰, 余慧霖, 陈毅青, 黄海, 吴向荣, 陈海辉, 张学丰, 余雪标. 不同林分密度降香人工林生长量与树冠层因子的关系[J]. 广西林业科学, 2024, 53(2): 219-224.
LIU H L, YU H L, CHEN Y Q, HUANG H, WU X R, CHEN H H, ZHANG X F, YU X B. Relationships among growths and canopy factors of *Dalbergia odorifera* plantations with different stand densities[J]. Guangxi Forestry Science, 2024, 53(2): 219-224. (in Chinese)
- [8] 李晓晶. 人工长白落叶松树冠生物量预测模型[J]. 林业科技情报, 2020, 52(4): 53-55.
LI X J. Predicting model of crown biomass for planted *Larix olgensis* Henry[J]. Forestry Science and Technology information, 2020, 52(4): 53-55. (in Chinese)
- [9] 苏乙奇. 人工落叶松枝下高动态研究[J]. 林业调查规划, 2008(1): 21-24.
SU Y Q. Dynamic study on under branch of artificial *Larix gmelinii*[J]. Forestry Investigation and Planning, 2008(1): 21-24. (in Chinese)
- [10] 王玥琳. 不同培育措施对降香黄檀生长和生理代谢影响的研究[D]. 北京: 中国林业科学研究院, 2019.
WANG Y L. Effects of different cultivation measures on the growth and physiological metabolism of *Dalbergia odorifera*[D]. Beijing: Chinese Academy of Forestry, 2019. (in Chinese)

- Chinese)
- [11] 王科. 马尾松人工林树冠结构及地上生物量研究[D]. 贵阳: 贵州大学, 2020.
- WANG K, Study on the crown structure and aboveground biomass of *Pinus massoniana* plantation[D]. Guiyang: Guizhou University, 2020.
- [12] FOURNIER R A, LUTHER J E, GUINDON L, LAMBERT M-C, PIERCEY D, HALL R J, WULDER M A. Mapping aboveground tree biomass at the stand level from inventory information: test cases in Newfoundland and Quebec[J]. Canadian Journal of Forest Research, 2003(10): 33.
- [13] 陈宗铸, 陈毅青, 陈小花, 雷金睿, 李苑菱, 吴庭天. 基于不同预测变量的橡胶树地上生物量模型[J]. 西北林学院学报, 2020, 35(4): 45-50.
- CHEN Z Z, CHEN Y Q, CHEN X H, LEI J R, LI Y L, WU T T. Establishment of aboveground biomass models based on different predictors for *Hevea brasiliensis*[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2020, 35(4): 45-50. (in Chinese)
- [14] 杨众养, 陈宗铸, 陈小花, 杨琦, 雷金睿. 海南岛北部 3 种经济林树种的生物量、碳储量及其分配特征[J]. 经济林研究, 2018, 36(3): 62-68.
- YANG Z Y, CHEN Z Z, CHEN X H, YANG Q, LEI J R. Biomass, carbon storage and distribution characteristics of three economic forests in north of Hainan island[J]. Non-wood Forest Research, 2018, 36(3): 62-68. (in Chinese)
- [15] 杨东, 杨秀琴. 甘肃武都五凤山林区油松人工林的生物量和生产力研究[J]. 西北师范大学学报(自然科学版), 2004(1): 70-75.
- YANG D, YANG X Q. Studies on biomass and productivity of *Pinus tabulaeformis* plantation in the Wufengshang of Wudu, Gansu province[J]. Journal of Northwest Normal University (Natural Science), 2004(1): 70-75. (in Chinese)
- [16] 马长明, 张艳华, 赵国华, 王广海, 刘广营. 燕山山地华北落叶松人工林乔木生物量空间分布格局[J]. 河北农业大学学报, 2010, 33(2): 37-41, 51.
- MA C M, ZHANG Y H, ZHAO G H, WANG G H, LIU G Y. Spatial distribution pattern of the arbor layer biomass of *Larix principis-rupprechtii* Mayr plantations in Yanshan mountainous regions[J]. Journal of Agricultural University of Hebei, 2010, 33(2): 37-41, 51. (in Chinese)
- [17] 陈森锟, 尹伟伦, 刘晓东, 夏新莉, 孙尚伟. 修枝对欧美 107 杨木材生长量的短期影响[J]. 林业科学, 2008(7): 130-135.
- CHEN S K, YIN W L, LIU X D, XIA X L, SUN S W. Short effects of pruning on growth of poplar (*Populus × euramericana* cv. '74/76') [J]. Scientia Silvae Sinicae, 2008(7): 130-135. (in Chinese)
- [18] 王保平, 李吉跃, 乔杰, 文瑞均, 周海江, 胡昊. 修枝促接干对泡桐光合特性影响的研究[J]. 林业科学研究, 2007(1): 119-124.
- WANG B P, LI J Y, QIAO J, WEN R J, ZHOU H J, HU H. Study on effects of pruning to promote trunk extension on photosynthetic characteristics of *paulownia*[J]. Forest Research, 2007(1): 119-124. (in Chinese)
- [19] 胡炎红, 庞启亮. 鄂西地区杉木林生物量模拟及其分配格局[J]. 湖北林业科技, 2012(3): 6-9.
- HU Y H, PANG Q L. Study on the biomass and distribution pattern of *Cunninghamia lanceolata* (Lamb.) Hook. in western of Hubei[J]. Hubei Forestry Science and Technology, 2012(3): 6-9. (in Chinese)
- [20] 郑小曼, 翁闲, 欧玲珑, 任引. 福建桉树异速生长方程与生物量估算[J]. 中国科学院大学学报(中英文), 2024, 41(3): 321-333.
- ZHENG X M, WENG X, OU L L, REN Y. Allometric equation and biomass estimation of *Eucalyptus* in Fujian[J]. Journal of University of Chinese Academy of Sciences, 2024, 41(3): 321-333. (in Chinese)