

亚热带同质园不同人工林的生物量和林下植被多样性差异

刘 宣¹, 肖 洒², 朱 鹏¹, 杜 婷¹, 李济宏¹, 洪宗文¹, 袁春阳¹,
兰 婷¹, 李 晗¹, 谭 波¹, 徐振锋¹, 张 健¹, 游成铭¹

(1. 四川农业大学 长江上游林业生态工程四川省重点实验室/长江上游森林资源保育与生态安全国家林业和草原局重点实验室/华西雨屏区人工林生态系统研究长期科研基地/生态林业研究所, 四川 成都 611130; 2. 遂宁市船山区自然资源和规划局, 四川 遂宁 629000)

摘要: 【目的】探究不同林分的生物量及林下植被多样性差异, 为营建亚热带人工林筛选适生的珍贵乡土阔叶树种。

【方法】以四川农业大学崇州基地同质园试验中大叶樟 *Cinnamomum platyphyllum*、油樟 *C. longepaniculatum*、天竺桂 *C. japonicum*、樟树 *C. camphora*、桉木 *Alnus cremastogyne*、香椿 *Toona sinensis*、红椿 *T. ciliata* 等 7 个阔叶树种林分为研究对象, 通过测定各树种平均树高、平均胸径、林下植被多样性等指标, 量化树种对生物量及林下植被多样性的影响。

【结果】不同树种全株生物量存在显著差异 ($P < 0.05$), 大叶樟的生物量最高, 其次是桉木和红椿, 天竺桂最低。树种各器官生物量存在显著差异 ($P < 0.05$), 整体表现为干 > 根、枝 > 叶, 并且大叶樟各器官生物量均最高, 天竺桂各器官生物量均最低。各器官生物量占全株生物量比例在树种间存在显著差异 ($P < 0.05$), 但树种大小排序无一致性规律。不同功能群之间的全株、叶、枝及干生物量无显著差异, 但常绿树种的根生物量、根生物量占比和根冠比显著高于落叶树种 ($P < 0.05$), 枝和干生物量占比则相反。落叶树种林分林下草本多样性显著高于常绿树种林分 ($P < 0.05$), 并且红椿、桉木和香椿林分林下草本的 Simpson 指数显著高于天竺桂、樟树、大叶樟和油樟林分, 红椿林分的林下草本 Shannon-Wiener 指数显著高于其他 6 个林分 ($P < 0.05$)。【结论】研究区培育落叶树种有利于人工林的物质循环和生物多样性保育, 并且相较于其他乡土树种, 选择桉木和红椿作为培育树种更有利于亚热带人工林的可持续经营与管理。图 6 表 2 参 37

关键词: 亚热带人工林; 同质园; 阔叶树种; 生物量; 林下植被多样性

中图分类号: S718 文献标志码: A 文章编号: 2095-0756(2022)04-0717-10

Difference of biomass and understory vegetation diversity among different subtropical plantations in common gardens

LIU Xuan¹, XIAO Sa², ZHU Peng¹, DU Ting¹, LI Jihong¹, HONG Zongwen¹, YUAN Chunyang¹,
LAN Ting¹, LI Han¹, TAN Bo¹, XU Zhenfeng¹, ZHANG Jian¹, YOU Chengming¹

(1. Sichuan Provincial Key Laboratory of Forestry Ecological Engineering in the Upper Reaches of the Yangtze River / Key Laboratory of National Forestry and Grassland Administration on Forest Resources Conservation and Ecological Safety in the Upper Reaches of the Yangtze River / Permanent Scientific Research Base for Plantation Ecosystem in Rainy Area of West China / Institute of Ecology & Forestry, Sichuan Agricultural University, Chengdu 611130, Sichuan, China; 2. Suining Natural Resources and Planning Bureau of Chuanshan District, Suining 629000, Sichuan, China)

收稿日期: 2021-08-13; 修回日期: 2021-12-10

基金项目: 森林和湿地生态恢复与保育四川重点实验室开放课题 (2020KFKT01); 国家自然科学基金资助项目 (31870602, 31901295, 32071745); 四川省优秀青年科技基金资助项目 (20JCQN0145); 中国博士后科学基金 (2020M673278)

作者简介: 刘宣 (ORCID: 0000-0001-6475-1864), 从事森林生态学研究。E-mail: 569974565@qq.com。通信作者: 游成铭 (ORCID: 0000-0002-7033-4773), 博士, 讲师, 从事森林生态学研究。E-mail: ycmsichuan2009@163.com

Abstract: [Objective] The objective is to explore the differences of biomass and understory vegetation diversity in different stands, and to screen suitable and precious native broad-leaved tree species for subtropical plantations. [Method] Seven broad-leaved tree species (*Cinnamomum platyphyllum*, *C. longepaniculatum*, *C. japonicum*, *C. camphora*, *Alnus cremastogyne*, *Toona sinensis* and *T. ciliata*) were selected as the research objects in the common garden experiment in Chongzhou Base of Sichuan Agricultural University. The impact of tree species on biomass and understory vegetation diversity was quantified by measuring the average tree height, average diameter at breast height, and understory vegetation species of each tree species. [Result] There were significant differences in total plant biomass among different tree species ($P < 0.05$). *C. platyphyllum* had the highest biomass, followed by *A. cremastogyne* and *T. ciliata*, and the lowest was *C. japonicum*. There were significant differences in the biomass of various organs of tree species ($P < 0.05$), and the order from large to small was trunk, root, branch, and leaf. In general, the biomass of each organ of *C. platyphyllum* was the highest and the biomass of each organ of *C. japonicum* was the lowest. There were significant differences in the proportion of organ biomass to whole plant biomass among tree species ($P < 0.05$), but there was no consistent rule in the size ranking among tree species. There was no significant difference in whole plant, leaf, branch and trunk biomass among different functional groups. However, the root biomass, proportion of root biomass and root shoot ratio of evergreen tree species were significantly higher than those of deciduous tree species ($P < 0.05$), while the proportion of branch and trunk biomass was the opposite. The diversity of understory vegetation in deciduous tree stand was significantly higher than that in evergreen tree stand ($P < 0.05$), and the Simpson index of understory herbaceous in *T. ciliata*, *A. cremastogyne* and *T. sinensis* stands were significantly higher than that of *C. japonicum*, *C. camphora*, *C. platyphyllum* and *C. longepaniculatum* stands ($P < 0.05$). The Shannon-Wiener index of understory herbaceous in *T. ciliata* was significantly higher than that of the other six stands ($P < 0.05$). [Conclusion] The cultivation of deciduous tree species in this area may be beneficial to the material circulation and understory vegetation diversity conservation of the plantation. Compared with other native tree species, the selection of *A. cremastogyne* and *T. ciliata* as breeding species may be more conducive to sustainable management of subtropical plantations. [Ch, 6 fig. 2 tab. 37 ref.]

Key words: subtropical plantation; common garden; broad-leaved tree species; biomass; understory vegetation diversity

森林生物量是量化森林生态系统结构和功能的重要指标之一,对揭示森林生态系统的固碳潜力、生产力及物质循环等关键过程具有重要的指示作用^[1-3]。林下植被作为森林的重要组成部分,是研究森林生态系统的功能及稳定性的基础之一^[4]。以往研究表明:林下植被多样性越高越有利于促进森林凋落物分解、养分循环以及改善土壤等^[5-8]。中国是全球拥有最大面积人工林的国家,人工林面积增长速率快,约占全球人工林面积三分之一,对减缓全球气候变化和支撑国家生态文明建设具有重要作用^[9]。然而,目前人工林的树种结构单一、地力衰退、稳定性和抗逆性较差、生产力和生物多样性逐渐降低等生态问题日益凸显^[10]。因此,研究森林生物量及其林下植被多样性,有助于认识森林生态系统的结构功能和稳定性机制,可为人工林的可持续经营与管理提供科学依据。

目前国内外学者主要探讨了不同林龄、间伐强度、海拔等对森林生物量与林下植被多样性的影响。如:赵金龙等^[11]研究发现:河北省平泉市辽河源自然保护区不同林龄油松 *Pinus tabulaeformis* 各器官生物量分配存在显著差异,幼龄林和近熟林各器官生物量从大到小依次为干、根、枝、叶、干皮、球果,而中龄林和成熟林则是干、根、枝、干皮、叶、球果;刘思泽等^[12]通过对川东低山区 29 年生马尾松 *P. massoniana* 人工林研究发现:随着间伐强度增加,林下植物多样性指数先增后降。近年来,不同树种对生物量及林下植被多样性的影响也逐渐受到关注,如葛露露等^[13]研究发现:福州市滨海沙地不同树种人工林生物量存在差异,从大到小依次为木麻黄 *Casuarina equisetifolia*、尾巨桉 *Eucalyptus urophylla*、纹荚相思 *Acacia aulacocarpa*。另外,树种可以通过改变林下微环境(如光照、水分、温度等),从而影响林下

植被多样性^[14]。如 MESTRE 等^[15]研究发现：落叶林比常绿林有着更高的林下植被多样性。然而，此类研究均在不同区域或不同林型等开展，其结果可能会受到土壤、地形、海拔、降水、土地利用方式等立地条件的影响，难以量化树种对生物量及林下植被多样性的影响效应。

同质园 (common garden) 研究具有立地条件基本一致的特点，能最大程度地降低由气候、土壤、地形等环境因素导致的差异^[16]。目前国内同质园研究主要在植物叶片功能和遗传变异^[17-19]、土壤养分^[20-21]等方面，而关于亚热带树种对林分生物量及林下植被多样性的影响研究还鲜有报道。据四川省第 9 次森林资源清查结果显示：四川省森林覆盖率为 38.03%，森林面积为 1 840 万 hm^2 ，人工林主要以马尾松^[22]、云杉 *Picea asperata*^[23] 等针叶纯林以及速生外来树种桉树 *Eucalyptus* 林为主，其面积和蓄积量分别为 502 万 hm^2 、25 546 万 m^3 。人工纯林极易引发各种生态问题，如松材线虫 *Bursaphelenchus xylophilus* 病、火灾等^[10]。营造乡土阔叶树种林分既能兼顾珍贵用材生产，又能增加林下植被多样性和生态服务功能，已逐渐成为替代亚热带地区大型针叶林的主要森林经营模式^[24]。然而，如何科学选择适生乡土阔叶树种是培育人工林和提升森林生产力及生态服务功能亟须解决的关键问题。大叶樟 *Cinnamomum platyphyllum*、油樟 *C. longepaniculatum*、天竺桂 *C. japonicum*、樟树 *C. camphora*、桤木 *Alnus cremastogyne*、香椿 *Toona sinensis*、红椿 *T. ciliata* 是四川常见的珍贵乡土阔叶树种，具有较高的经济与生态价值，但至今缺乏必要关注，因此，本研究以亚热带同质园这 7 个树种林分作为研究对象，探讨树种对生物量分配特征及对林下植被多样性的影响，为营造亚热带人工林筛选适生的珍贵乡土阔叶树种及其管理提供科学依据。

1 研究地区与方法

1.1 研究区概况

同质园位于四川省崇州市桤泉镇四川农业大学现代农业研发基地 (30°55'N, 103°49'E)，海拔为 516 m，属四川盆地亚热带湿润季风气候，该地区年平均气温为 16.0 °C，年平均降水量约 1 015.2 mm，年平均日照时数为 1 161.5 h，平均无霜期约 285 d。

1.2 试验设计

2015 年春季，采用随机区组设计建立了同质园试验区。样地前期为农耕地，经营历史相同，土壤均一，地势平坦。种植前，对同质园进行了翻耕，使样地土壤更加均一，本底土壤理化性质基本一致。统一选用 2 年生树苗，按 2 m×2 m 的株行距挖穴造林，初植林分密度为 1 600 株· hm^{-2} 。每个样地面积为 25 m×25 m，每个树种设置 3 个重复样地，在各样地边缘设置宽度为 1 m 的排水沟和缓冲带。造林后进行统一管理，使其自然生长，并且围建栅栏以防止人为活动的干扰 (图 1)。

1.3 样品采集与处理

2020 年 7 月底，选择长势良好，现存林分密度基本一致，当年种植存活率为 90% 以上的大叶樟、油樟、天竺桂、樟树、桤木、香椿、红椿等 7 个单一树种林分作为研究对象，每个林分 3 个重复，共 21 个样地。存活率低且生长较差的树种 (德昌杉 *Cunninghamia unca*、桢楠 *Phoebe zhennan*、岩桂 *Cinnamomum pauciflorum*、檫木 *Sassafras tsumu* 等) 未纳入本研究。对每个样地的乔木进行每木检尺，用 LI-RD 1000 激光测树仪 (美国) 测量树高，用胸径尺测量每株乔木在树高 1.3 m 处的胸径，计算平均树高和平均胸径。

在每个样地分别随机布置 2 个 5 m×5 m 的灌木样方和 1 m×1 m 的草本样方，调查灌木和草本样方

缓冲带 排水沟 栅栏

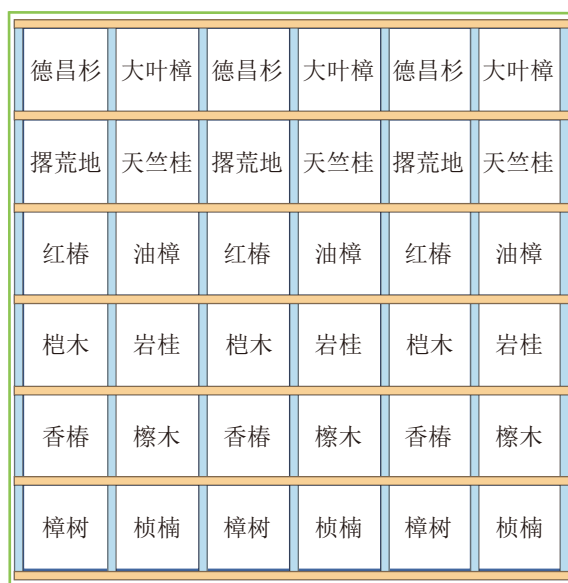


图 1 同质园布局图

Figure 1 Common garden layout diagram

内的所有植物种类、数量和高度等。同时,用手捡法采集草本样方中现存凋落物,装入信封保存,带回实验室,放入 65 ℃ 恒温烘箱中烘干至恒量,用电子天平称量,计算单位面积现存凋落物量。同时,为比较功能群植物对生物量及林下植被多样性的影响,按照叶寿命分为常绿树种(大叶樟、油樟、樟树和天竺桂)和落叶树种(桉木、红椿和香椿)。

1.4 生物量及林下植被生物多样性的计算

采用实际伐木计算并验证相近林龄同种同属或其他多种树种通用的生物量模型^[25-27]。如表 1 所示:通过平均树高(H)和平均胸径(D_{BH}),采用二元回归方程计算单株林木各器官生物量(W),方程为 $W=a(D_{BH}^2H)^b$ 。其中, a 和 b 为方程参数。

由于各群落林下灌木只有构树 *Broussonetia papyrifera* 或无灌木,灌木层多样性差异较小,因此,本研究着重分析草本层的多样性,通过公式计算不同群落草本层的 Simpson 多样性指数(λ)和 Shannon-Wiener 多样性指数(H')^[28]。

$$\lambda=1-\sum_{i=1}^n P_i^2;$$

$$H'=-\sum_{i=1}^n P_i \times \ln P_i。$$

其中: P_i 为第 i 种的个体数占调查物种个体总数的比例, $i=1, 2, 3, \dots, n$ 。

1.5 数据分析

采用 Excel 2016 对数据进行整理,单因素方差(one-way ANOVA)分析不同树种群落对乔木层各器官生物量、占比、根冠比及林下草本层生物多样性的影响;利用独立样本 t 检验分析常绿树种和落叶树种对乔木层各器官生物量、生物量占比、根冠比及林下草本层生物多样性的影响。采用 Duncan 多重比较法检验显著性($P<0.05$)。采用 SPSS 22.0 软件进行数据分析,用 Origin 9.5 进行绘图,文中数据均为平均值±标准误。

2 结果与分析

2.1 人工林基本情况

由表 2 所示:不同树种的平均树高、平均胸径、现存凋落物量和郁闭度均具有显著差异($P<0.05$)。树高从大到小依次为桉木、大叶樟、红椿、樟树、香椿、油樟、天竺桂;胸径为红椿、桉木和大叶樟最大,其次是油樟、香椿和樟树,最小的是天竺桂;郁闭度从大到小依次为大叶樟、油樟、天竺桂、樟树、桉木、红椿、香椿。现存林分密度最大的是红椿,最小是大叶樟。另外,7个树种林分的林下灌木植物主要是构树 *Broussonetia papyrifera*,林下草本植物主要是空心莲子草 *Alternanthera philoxeroides*、茜草 *Rubia cordifolia*、竹叶草 *Oplismenus compositus*、蛇莓 *Duchesnea indica*、华西凤尾蕨 *Pteris occidentalisinica* 等。

2.2 不同树种生物量分配特征

图 2 所示:不同树种的全株生物量及各器官生物量存在显著差异($P<0.05$)。大叶樟的全株生物量最高,其次是桉木、红椿和樟树,而油樟、香椿和天竺桂较低。大叶樟和桉木的叶生物量较高,油樟和樟树次之,而红椿、天竺桂和香椿最低。大叶樟的枝生物量显著高于其他树种($P<0.05$),油樟和天竺桂最低。干生物量从大到小依次为大叶樟、红椿、桉木、樟树、香椿、天竺桂、油樟。大叶樟的根生物量显

表 1 不同树种各器官生物量的回归方程

Table 1 Regression equation of biomass of different organs of different tree species

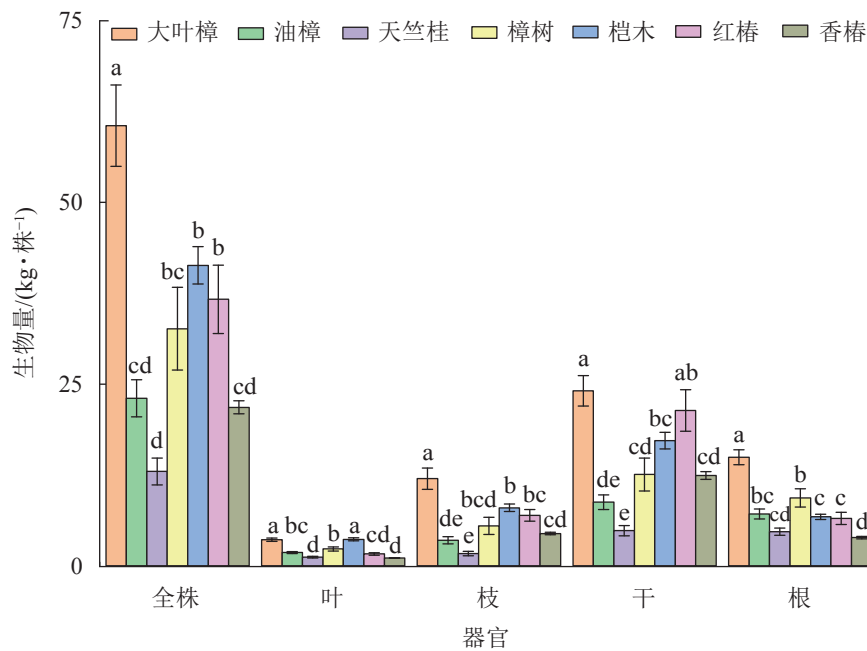
树种	器官	a	b	相关系数
大叶樟、油樟、天竺桂、樟树	叶	0.059 871	0.574 327	0.989 1
	枝	0.006 652	1.051 841	0.986 8
	干	0.055 603	0.850 193	0.962 7
	根	0.184 736	0.616 421	0.968 6
桉木	叶	0.010 593	0.813 953	0.860 0
	枝	0.014 972	0.875 639	0.920 0
	干	0.027 388	0.898 869	0.900 0
	根	0.036 227	0.728 875	0.900 0
红椿、香椿	叶	0.013 347	0.689 300	0.968 1
	枝	0.025 860	0.807 600	0.975 0
	干	0.038 352	0.907 600	0.984 7
	根	0.014 732	0.874 600	0.975 3

表 2 同质园人工林基本概况

Table 2 General situation of plantation in common garden

树种	平均树高/m	平均胸径/cm	现存凋落物量/(kg·hm ⁻²)	郁闭度	现存密度/(株·hm ⁻²)	林下灌木	林下草本
大叶樟	10.8±0.3 a	10.6±0.3 a	700.9±106.4 b	0.85±0.03 a	1 184	构树	空心莲子草、茜草等
油樟	7.0±0.3 d	7.7±0.1 b	388.9±92.5 c	0.90±0.25 a	1 274		空心莲子草、蛇莓等
天竺桂	6.1±0.2 e	5.1±0.3 c	160.2±45.9 cd	0.73±0.26 a	1 248	构树	空心莲子草、华西凤尾蕨等
樟树	9.0±0.5 bc	7.1±0.3 b	986.8±197.0 a	0.89±0.04 a	1 248		空心莲子草、竹叶草等
桤木	11.0±0.3 a	10.7±0.0 a	136.9±40.4 cd	0.66±0.53 b	1 251	构树	空心莲子草、茜草等
红椿	9.7±0.3 b	11.2±0.4 a	17.1±3.9 d	0.67±0.58 b	1 290	构树	空心莲子草、茜草等
香椿	8.7±0.1 c	7.7±0.3 b	15.6±2.1 d	0.67±0.05 b	1 274	构树	空心莲子草、竹叶草等

说明：同列不同小写字母表示树种间差异显著($P<0.05$)



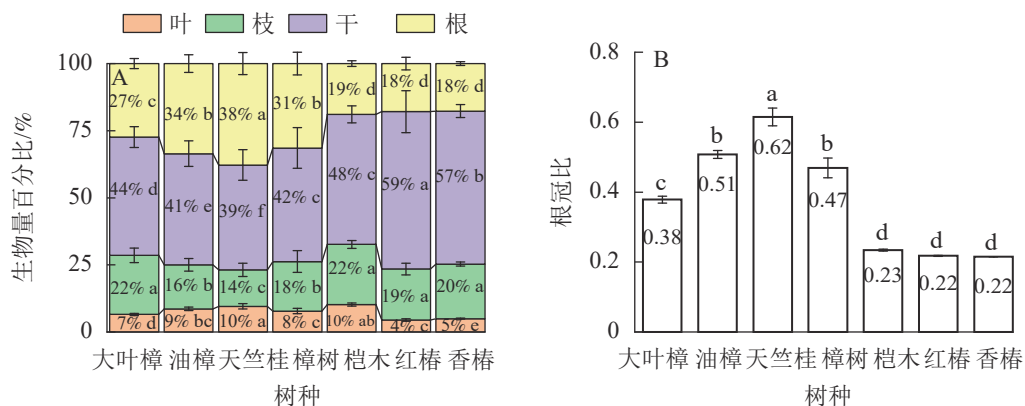
不同字母表示全株或器官水平上不同树种生物量差异显著 ($P<0.05$)

图 2 不同树种的生物量

Figure 2 Biomass of different tree species

著高于其他树种 ($P<0.05$)，最低的是香椿。

如图 3 所示：不同树种叶、枝、干、根生物量占全株生物量占比分别为 4%~10%、14%~22%、39%~59%、18%~38%。叶生物量占比从大到小依次为天竺桂、桤木、油樟、樟树、大叶樟、香椿、红椿；大



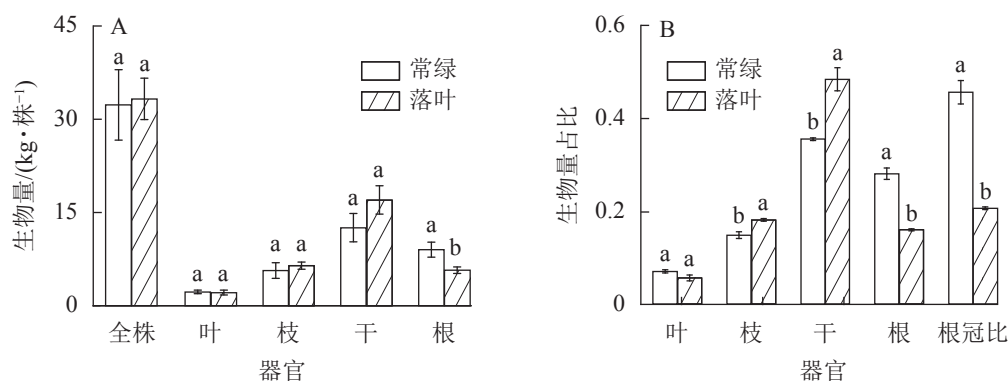
不同字母表示各器官生物量占比及根冠比在器官或全株水平上差异显著 ($P<0.05$)

图 3 不同树种的各器官生物量占比及根冠比

Figure 3 Biomass ratios of organs and root-shoot ratio in different tree species

叶樟、桤木、香椿和红椿的枝生物量占比显著高于其他树种 ($P < 0.05$), 天竺桂最小; 树干生物量占比从大到小依次为红椿、香椿、桤木、大叶樟、樟树、油樟、天竺桂; 根生物量占比表现为天竺桂最高, 其次是油樟和樟树, 桤木、香椿和红椿最低。不同树种根冠比为 0.22~0.62, 从大到小依次为天竺桂、油樟、樟树、大叶樟、桤木、红椿、香椿。

由图 4 所示: 常绿和落叶树种的全株、叶、枝及干生物量无显著差异 ($P > 0.05$), 但常绿树种的根生物量显著高于落叶树种。除叶生物量占比外, 常绿和落叶树种各器官生物量占总生物量比例存在显著差异 ($P < 0.05$), 例如常绿树种的根生物量占比和根冠比显著高于落叶树种 ($P < 0.05$), 而枝和树干生物量占比显著低于落叶树种 ($P < 0.05$)。



不同字母表示生物量在不同功能群间差异显著 ($P < 0.05$)

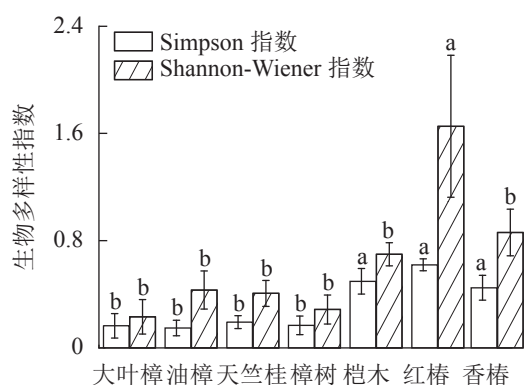
图 4 不同功能群的各器官生物量、生物量占比及根冠比

Figure 4 Biomass, biomass proportion and root-shoot ratio of each organs in different functional groups

2.3 不同树种林分林下植被多样性

如图 5 所示: 不同树种林分的林下草本多样性存在显著差异, 红椿、桤木和香椿林分的林下草本的 Simpson 多样性指数显著高于天竺桂、大叶樟、樟树和油樟林分 ($P < 0.05$)。红椿林分的林下草本的 Shannon-Wiener 多样性指数显著高于其他树种林分 ($P < 0.05$), 并且香椿、桤木、油樟、天竺桂、樟树和大叶樟林分之间无显著差异。

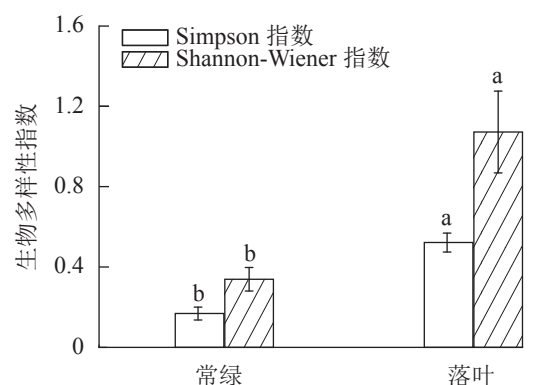
不同功能群树种林分的林下植被多样性存在显著差异, 落叶树种林分的林下草本层 Simpson 多样性指数和 Shannon-Wiener 多样性指数均显著高于常绿树种林分 (图 6)。



不同字母表示生物多样性指数在不同树种间差异显著 ($P < 0.05$)

图 5 不同树种林分的林下草本多样性

Figure 5 Diversity of understory herbaceous plants in different tree species stands



不同字母表示生物多样性指数在不同功能群树种间差异显著 ($P < 0.05$)

图 6 不同功能群的林下草本多样性

Figure 6 Diversity of understory herbaceous plants in different functional groups

3 讨论

3.1 不同树种的生物量分配特征

生物量是研究物质循环、能量流动、全球气候变化以及碳平衡的基础, 乔木生物量的空间分配状况

也反映了植物对光、水和养分的利用效率^[11]。本研究表明: 樟属 *Cinnamomum* 植物 (大叶樟、樟树、油樟和天竺桂) 的平均林分总生物量为 $80.76 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$, 低于姚迎九等^[25] 研究的樟树林总生物量 ($111.08 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$), 而桉木林总生物量为 $103.37 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$, 高于李贵祥等^[26] 研究的高原桉木人工林总生物量 ($23.22 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$), 并且香椿属 *Toona* 植物 (香椿和红椿) 的平均林分总生物量为 $146.2 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$, 高于王延茹等^[29] 研究的香椿生物量结果。这可能是由于试验地区降水、海拔、土壤、造林密度以及林龄等的差异引起的, 本研究位于成都平原, 降水充沛、光照充足, 土壤在造林前为农耕地, 养分含量丰富, 利于林木的生长。本研究发现: 不同树种之间的生物量存在显著差异, 从大到小依次为大叶樟、桉木、红椿、樟树、油樟、香椿、天竺桂, 与葛露露等^[13] 研究结果一致。这可能是遗传特性差异不同树种对环境的选择和适应不同, 进而导致其生长发育能力也不同。且不同树种因其生态习性、生长特性和林分自疏强度不同导致乔木层生物量差异, 并且随着生长时间的延长, 这种差异越明显^[13]。树种各器官生物量分配存在显著差异, 从大到小依次为干、根和枝、叶, 这与部分学者^[30-32] 的研究结果相似。这可能是因为干是树木的主体部分, 具有运输养分和支撑的重要作用, 植物光合作用固定的碳主要储存在干中, 形成木质部, 并且随林龄增长, 干生物量占比会不断增加, 而枝、叶生物量比例下降。

本研究发现落叶与常绿树种的全株生物量无显著差异, 与 FAYOLLE 等^[33] 的研究结果不同, 可能是由于调查的树种、数量和试验方式 (同质园试验) 不同导致的。然而, 本研究发现: 常绿树种的根生物量占比和根冠比显著高于落叶树种, 枝和干生物量占比显著低于落叶树种。这可能是因为本研究的常绿树种凋落物质量 (如叶片厚度、质地、化学性质等) 相较于落叶树种较差, 分解缓慢^[34], 导致土壤肥力低于落叶树种, 因此, 需要加大对根生物量的投入, 增强对土壤养分的吸收能力。也可能与植物功能群落养分利用策略不同有关, 常绿树种属于保守型养分利用策略, 其根系发达, 能在贫瘠土壤环境下生长发育, 而落叶树种属于获取型养分利用策略, 其根吸收的养分更多地投入地上部分的生长^[35]。

3.2 不同树种林分的林下植被多样性差异

高艳鹏等^[14] 研究发现: 刺槐 *Robinia pseudoacacia*、油松纯林的多样性指数高于榆树 *Ulmus pumila* 和侧柏 *Platycladus orientalis* 纯林, 说明不同树种林分的林下植被多样性差异显著, 这一结果与本研究结果一致。本研究结果表明: 红椿、桉木和香椿林分的林下草本 Simpson 多样性指数显著高于天竺桂、樟树、大叶樟和油樟林分, 而红椿林分林下草本的 Shannon-Wiener 多样性指数显著高于其他 6 个树种林分。这可能是因为不同树种可以通过冠幅和郁闭度调控林地的微环境 (如光照、水分等), 进而有利于其他植物的入侵和生长^[23, 36]。如本研究发现: 郁闭度较小的树种林下植被群落逐渐出现构树、茜草和空心莲子草等繁殖能力强, 喜光耐寒的植物。以往研究表明: 林下植被多样性较高有利于促进森林凋落物分解^[6-7]。因此, 本研究结果说明红椿相较于其他树种可能更有利于促进养分循环, 进而改善土壤肥力。

本研究结果表明: 落叶树种林分的林下草本 Simpson 多样性指数和 Shannon-Wiener 多样性指数均显著高于常绿树种林分, 与 MESTRE 等^[15] 的研究结果相同。可能存在以下原因: ①郁闭度不同导致林下微环境存在差异。本研究中常绿树种林分郁闭度 (0.73~0.90) 显著高于落叶树种林分 (0.66~0.67), 常绿树种林分由于郁闭度较高, 林下光照不足, 水分被截留等原因, 林下植被可能难以生长。②土壤肥力影响林下植被生长。常绿树种的凋落物质量相较于落叶树种较差, 凋落物分解和养分归还较慢, 从而导致土壤肥力较差。不利于林下植被的生长发育。③常绿树种释放化感物质抑制林下植被的生长及养分的循环。如陈洪等^[37] 研究发现: 樟树的凋落叶分解对林下植被生长发育有抑制作用。

4 结论

本研究通过调查亚热带同质园中不同树种林分的生物量和林下植被多样性, 发现不同树种全株生物量差异显著, 大叶樟的生物量最高, 其次是桉木和红椿, 天竺桂最低; 不同树种各器官生物量差异显著, 整体从大到小依次为干、根、枝、叶; 除根生物量外, 不同功能群各器官生物量均无显著差异; 然而, 常绿和落叶树种各器官生物量占总生物量比例差异显著, 常绿树种的根生物量占比和根冠比显著高于落叶树种, 枝和干生物量占比则相反; 落叶树种林分的林下植被多样性显著高于常绿树种林分, 红椿、桉木和香椿林分的林下草本 Simpson 指数显著高于天竺桂、樟树、大叶樟和油樟林分, 红椿林分的林下草本 Shannon-Wiener 指数显著高于其他 6 个树种林分。因此, 该地区培育落叶树种更有利于人工林

的物质循环和生物多样性保育,并且选择桉木和红椿作为培育树种,更有利于亚热带人工林的可持续经营与管理。

5 参考文献

- [1] KÖHL M, LASCO R, CIFUENTES M, *et al.* Changes in forest production, biomass and carbon: results from the 2015 UN FAO Global Forest Resource Assessment [J]. *For Ecol Manage*, 2015, **352**: 21 – 34.
- [2] JAGODZIŃSKI A M, DYDERSKI M K, GĘSIKIEWICZ K, *et al.* How do tree stand parameters affect young Scots pine biomass? Allometric equations and biomass conversion and expansion factors [J]. *For Ecol Manage*, 2018, **409**: 74 – 83.
- [3] ZHOU Lingyan, HONG Yu, LI Chenghao, *et al.* Responses of biomass allocation to multi-factor global change: a global synthesis[J/OL]. *Agric Ecosyst Environ*, 2020, **304**: 107115[2021-08-16]. doi: 10.1016/j.agee.2020.107115.
- [4] GUPTA S D, PINNO B D. Drivers of understory species richness in reconstructed boreal ecosystems: a structural equation modeling analysis[J/OL]. *Sci Rep*, 2020, **10**(1): 11555[2021-08-16]. doi: 10.1038/s41598-020-68353-z.
- [5] 张荣, 李婷婷, 金锁, 等. 人为干扰对蒙顶山木荷次生林物种多样性及土壤理化性质的影响[J]. *浙江农林大学学报*, 2020, **37**(5): 867 – 875.
- ZHANG Rong, LI Tingting, JIN Suo, *et al.* Effects of human disturbance on species diversity and soil physiochemical properties of *Schima superba* community in Mengding Mountain [J]. *J Zhejiang A&F Univ*, 2020, **37**(5): 867 – 875.
- [6] XIONG Yanmei, XIA Hanping, LI Zhi'an, *et al.* Impacts of litter and understory removal on soil properties in a subtropical *Acacia mangium* plantation in China [J]. *Plant Soil*, 2008, **304**(1/2): 179 – 188.
- [7] QIAO Yunfa, MIAO Shujie, SILVA L C R, *et al.* Understory species regulate litter decomposition and accumulation of C and N in forest soils: a long-term dual-isotope experiment [J]. *For Ecol Manage*, 2014, **329**: 318 – 327.
- [8] CHASTAIN R A, CURRIE W S, TOWNSEND P A. Carbon sequestration and nutrient cycling implications of the evergreen understory layer in Appalachian forests [J]. *For Ecol Manage*, 2006, **231**(1): 63 – 77.
- [9] 陈幸良, 巨茜, 林昆仑. 中国人工林发展现状、问题与对策[J]. *世界林业研究*, 2014, **27**(6): 54 – 59.
- CHEN Xingliang, JU Qian, LIN Kunlun. Development status, issues and countermeasures of China's plantation [J]. *World For Res*, 2014, **27**(6): 54 – 59.
- [10] 郭佳欢, 孙杰杰, 冯会丽, 等. 杉木人工林土壤肥力质量的演变趋势及维持措施的研究进展[J]. *浙江农林大学学报*, 2020, **37**(4): 801 – 809.
- GUO Jiahuan, SUN Jiejie, FENG Huili, *et al.* Research progress on evolution trends and maintenance measures of soil fertility quality in *Cunninghamia lanceolata* plantations [J]. *J Zhejiang A&F Univ*, 2020, **37**(4): 801 – 809.
- [11] 赵金龙, 王烁鑫, 韩海荣, 等. 辽河源不同龄组油松天然次生林生物量及空间分配特征[J]. *生态学报*, 2014, **34**(23): 7026 – 7037.
- ZHAO Jinlong, WANG Luoxin, HAN Hairong, *et al.* Biomass and spatial distribution characteristics of *Pinus tabulaeformis* natural secondary forest at different age groups in the Liaoheyuan Nature Reserve, Hebei Province [J]. *Acta Ecol Sin*, 2014, **34**(23): 7026 – 7037.
- [12] 刘思泽, 尹海锋, 沈逸, 等. 间伐强度对马尾松人工林间伐初期林下植被群落物种组成和多样性的影响[J]. *应用生态学报*, 2020, **31**(9): 2866 – 2874.
- LIU Size, YIN Haifeng, SHEN Yi, *et al.* Effects of thinning intensity on species composition and diversity of undergrowth vegetation community in *Pinus massoniana* plantation at initial stage of thinning [J]. *Chin J Appl Ecol*, 2020, **31**(9): 2866 – 2874.
- [13] 葛露露, 何宗明, 林宇, 等. 滨海沙地不同树种人工林生物量及凋落物碳氮养分归还[J]. *西北林学院学报*, 2019, **34**(1): 39 – 46.
- GE Lulu, HE Zongming, LIN Yu, *et al.* Biomass and litter carbon and nitrogen return of different plantations in the Sandy Coastal Plain area [J]. *J Northwest For Univ*, 2019, **34**(1): 39 – 46.
- [14] 高艳鹏, 赵廷宁, 骆汉. 晋西黄土丘陵沟壑区人工林下草本植物生物多样性研究[J]. *水土保持通报*, 2011, **31**(1): 103 – 108.
- GAO Yanpeng, ZHAO Tingning, LUO Han. Biodiversity of herbaceous species under artificial forests in hill and gully region of western Shanxi Province [J]. *Bull Soil Water Conserv*, 2011, **31**(1): 103 – 108.

- [15] MESTRE L, TORO-MANRIQUEZ M, SOLER R, *et al.* The influence of canopy-layer composition on understory plant diversity in southern temperate forests [J]. *For Ecosyst*, 2017, **4**(2): 154 – 166.
- [16] VESTERDAL L, CLARKE N, SIGURDSSON B D, *et al.* Do tree species influence soil carbon stocks in temperate and boreal forests? [J]. *For Ecol Manage*, 2013, **309**: 4 – 18.
- [17] 陈嘉静, 余华, 徐朝斌, 等. 种源与同质园环境对刨花楠幼苗叶功能性状的影响[J]. *应用与环境生物学报*, 2019, **25**(3): 648 – 654.
CHEN Jiajing, YU Hua, XU Chaobin, *et al.* Effects of provenance and common garden environment on leaf functional traits of *Machilus pauhoi* seedlings [J]. *Chin Appl Environ Biol*, 2019, **25**(3): 648 – 654.
- [18] 万丽娜, 王传宽, 全先奎. 纬度梯度移栽对兴安落叶松针叶暗呼吸温度敏感性的影响[J]. *应用生态学报*, 2019, **30**(5): 1659 – 1666.
WAN Li'na, WANG Chuankuan, QUAN Xiankui. Effects of latitudinal transplanting on temperature sensitivity of leaf dark respiration for *Larix gmelinii* [J]. *Chin J Appl Ecol*, 2019, **30**(5): 1659 – 1666.
- [19] 王楚楚, 钟全林, 程栋梁, 等. 引种期同质园翅荚木主要叶功能性状与种源地环境关系[J]. *生态学报*, 2019, **39**(13): 4892 – 4899.
WANG Chuchu, ZHONG Quanlin, CHENG Dongliang, *et al.* Relationship between the leaf functional traits of *Zenia insignis* and the provenance environments in common gardens during the introduction period [J]. *Acta Ecol Sin*, 2019, **39**(13): 4892 – 4899.
- [20] 王薪琪, 王传宽, 韩轶. 树种对土壤有机碳密度的影响: 5 种温带树种同质园试验[J]. *植物生态学报*, 2015, **39**(11): 1033 – 1043.
WANG Xinqi, WANG Chuankuan, HAN Yi. Effects of tree species on soil organic carbon density: a common garden experiment of five temperate tree species [J]. *Chin Plant Ecol*, 2015, **39**(11): 1033 – 1043.
- [21] 王薪琪, 王传宽. 东北 5 种温带人工林表层土壤碳氮含量的分异[J]. *应用生态学报*, 2019, **30**(6): 1911 – 1918.
WANG Xinqi, WANG Chuankuan. Variations in topsoil carbon and nitrogen contents of five temperate plantations in Northeast China [J]. *Chin J Appl Ecol*, 2019, **30**(6): 1911 – 1918.
- [22] LI Xiangjun, SU Yu, YIN Haifeng, *et al.* The effects of crop tree management on the fine root traits of *Pinus massoniana* in Sichuan Province, China [J]. *Forests*, 2020, **11**(3): 351 – 351.
- [23] TAN Siyi, ZHAO Hairong, YANG Wanqin, *et al.* The effect of canopy exchange on input of base cations in a subalpine spruce plantation during the growth season[J/OL]. *Sci Rep*, 2018, **8**(1): 9373[2021-08-16]. doi: [10.1038/s41598-018-27675-9](https://doi.org/10.1038/s41598-018-27675-9).
- [24] WANG Hui, LIU Shirong, MO Jiangming, *et al.* Soil organic carbon stock and chemical composition in four plantations of indigenous tree species in subtropical China [J]. *Ecol Res*, 2010, **25**(6): 1071 – 1079.
- [25] 姚迎九, 康文星, 田大伦. 18 年生樟树人工林生物量的结构与分布[J]. *中南林学院学报*, 2003, **23**(1): 1 – 5.
YAO Yingjiu, KANG Wenxing, TIAN Dalun. Study of the biomass and productivity of *Cinnamomum camphora* plantation [J]. *J Cent South Univ For Technol*, 2003, **23**(1): 1 – 5.
- [26] 李贵祥, 孟广涛, 方向京, 等. 滇中高原栎木人工林群落特征及生物量分析[J]. *浙江林学院学报*, 2006, **23**(4): 362 – 366.
LI Guixiang, MENG Guangtao, FANG Xiangjing, *et al.* Characteristics of *Alnus cremastogyne* plantation community and its biomass in central Yunnan Plateau [J]. *J Zhejiang For Coll*, 2006, **23**(4): 362 – 366.
- [27] 冯志立, 唐建维, 郑征, 等. 西双版纳热带森林次生演替初期山黄麻先锋群落生物量动态[J]. *生态学报*, 1999, **18**(5): 1 – 6.
FENG Zhili, TANG Jianwei, ZHENG Zheng, *et al.* Biomass dynamics of the pioneer *Trema orientalis* community in the early stages of secondary succession of tropical forest in Xishuangbanna [J]. *Chin J Ecol*, 1999, **18**(5): 1 – 6.
- [28] 曾洪, 陈聪琳, 喻静, 等. 人为干扰对雅安苍坪山公园桉树人工林物种多样性和生物量的影响[J]. *浙江农林大学学报*, 2021, **38**(2): 253 – 261.
ZENG Hong, CHEN Conglin, YU Jing, *et al.* Effects of human interference on species diversity and biomass of *Eucalyptus grandis* plantation in Cangping Mountain Park in Ya'an [J]. *J Zhejiang A&F Univ*, 2021, **38**(2): 253 – 261.
- [29] 王延茹, 侯广维, 彭培好, 等. 四川香椿人工林生物量与碳储量研究[J]. *四川林业科技*, 2016, **37**(4): 24 – 27.

- WANG Yanru, HOU Guangwei, PENG Peihao, *et al.* Research on the carbon storage and biomass of *Toona sinensis* plantations in Sichuan [J]. *J Sichuan For Sci Technol*, 2016, **37**(4): 24 – 27.
- [30] 汪珍川, 杜虎, 宋同清, 等. 广西主要树种(组)异速生长模型及森林生物量特征[J]. *生态学报*, 2015, **35**(13): 4462 – 4472.
- WANG Zhenchuan, DU Hu, SONG Tongqing, *et al.* Allometric models of major tree species and forest biomass in Guangxi [J]. *Acta Ecol Sin*, 2015, **35**(13): 4462 – 4472.
- [31] 兰洁, 肖中琪, 李吉玫, 等. 天山雪岭云杉生物量分配格局及异速生长模型[J]. *浙江农林大学学报*, 2020, **37**(3): 416 – 423.
- LAN Jie, XIAO Zhongqi, LI Jimei, *et al.* Biomass allocation and allometric growth of *Picea schrenkiana* in Tianshan Mountains [J]. *J Zhejiang A&F Univ*, 2020, **37**(3): 416 – 423.
- [32] 张梦弢, 亢新刚, 蔡烁. 长白山云冷杉林下主要树种幼树生物量[J]. *浙江农林大学学报*, 2012, **29**(5): 655 – 660.
- ZHANG Mengtao, KANG Xingang, CAI Shuo. Biomass for saplings of primary species in a spruce-fir understory of the Changbai Mountains [J]. *J Zhejiang A&F Univ*, 2012, **29**(5): 655 – 660.
- [33] FAYOLLE A, PANZOU G J L, DROUET T, *et al.* Taller trees, denser stands and greater biomass in semi-deciduous than in evergreen lowland central African forests [J]. *For Ecol Manage*, 2016, **374**: 42 – 50.
- [34] 张艳, 张丹桔, 张健, 等. 马尾松人工林林窗大小对 2 种凋落叶难降解物质含量的影响[J]. *植物生态学报*, 2015, **39**(8): 785 – 796.
- ZHANG Yan, ZHANG Danju, ZHANG Jian, *et al.* Effects of forest gap size on litter recalcitrant components of two tree species in *Pinus massoniana* plantations [J]. *Chin J Plant Ecol*, 2015, **39**(8): 785 – 796.
- [35] CHEN Lili, DENG Qiang, YUAN Zhiyou, *et al.* Age-related C:N:P stoichiometry in two plantation forests in the Loess Plateau of China [J]. *Ecol Eng*, 2018, **120**: 14 – 22.
- [36] SELZER L J, BUSO C A. Different canopy openings affect underground traits in herbaceous plants of a southern forest in Patagonia [J]. *J Plant Ecol*, 2016, **9**(5): 542 – 552.
- [37] 陈洪, 胡庭兴, 王茜, 等. 香樟凋落叶分解对辣椒生长的抑制作用及施氮的缓解效应[J]. *应用生态学报*, 2015, **26**(2): 457 – 465.
- CHEN Hong, HU Tingxing, WANG Qian, *et al.* Inhibition of decomposing leaf litter of *Cinnamomum camphora* on growth of *Capsicum annuum* and the alleviation effect of nitrogen application [J]. *Chin J Appl Ecol*, 2015, **26**(2): 457 – 465.