

橡胶－罗芙木－肉桂复合林的植物生长及其生物量动态

王 文^{1, 2}, 黄国良³, 任 燕^{1, 2}, 刘成刚¹, 金艳强¹, 刘长安¹, 唐建维¹

(1. 中国科学院 西双版纳热带植物园 热带植物资源可持续利用重点实验室, 云南 勐腊 666303;

2. 中国科学院大学, 北京 100049; 3. 西双版纳国家级自然保护区管理局 勐仑管护所, 云南 勐腊 666303)

摘 要: 【目的】探明橡胶-罗芙木-肉桂复合林与同龄橡胶纯林的植物生长与生物量动态及其差异, 为橡胶复合林合理的结构组建以及环境友好型橡胶园的建设与热带退化山地的恢复与可持续利用提供依据。【方法】在 16 年生橡胶林按行距 2 m×2 m 的规格种植 2 行罗芙木和 1 行肉桂构建了橡胶-罗芙木-肉桂复合林, 在同一坡面的橡胶复合林和橡胶纯林的上、中、下三个地段分别建立 3 块长期定位观测样地, 自 2010—2018 年每隔 2 年对橡胶-罗芙木-肉桂复合林与橡胶纯林样地中植物的基径、胸径、高度等因子进行了定期观测。根据野外观测数据计算了两种不同林分中橡胶、罗芙木和肉桂的高度、胸径和基径年均生长量。同时采用已建立的橡胶、罗芙木、肉桂的生物量回归方程估算了两种林分的生物量, 并对其组成、生物量动态与分配特征及林分的年净生产量进行了分析。【结果】复合林中橡胶的年均胸径生长量和年均高度生长量均稍大于橡胶纯林, 其生物量 (113.20 t·hm⁻²) 为橡胶纯林的 1.06 倍 ($P > 0.05$); 罗芙木的年均胸径生长量和年均高度生长量随种植时间而逐渐减少, 其生物量则随种植时间而增加, 从 0.21 t·hm⁻² 增长到 2.91 t·hm⁻²; 肉桂的年均胸径生长自种植 6 年后呈现下降趋势, 年均高度生长和生物量则随种植时间而增长, 其生物量从 0.27 t·hm⁻² 增长到 0.47 t·hm⁻²。橡胶复合林的总生物量 (116.58 t·hm⁻²) 也稍大于橡胶纯林, 是橡胶纯林的 1.1 倍 ($P > 0.05$), 但两个不同林分生物量的器官分配比例均为: 茎>根>枝>叶。随着林龄的增加, 复合林及橡胶纯林的总生物量均呈增长趋势, 但复合林的年均净生产量是橡胶纯林的 1.26 倍 ($P < 0.05$)。【结论】橡胶林的复合种植有利于橡胶树的生长, 橡胶复合林比橡胶纯林具有更大的生物量积累、更高的年均净生产量及更快的生物量积累速率。

关键词: 橡胶; 肉桂; 罗芙木; 生长量; 生物量; 净生产量; 复合林

中图分类号: S794.1

文献标志码: A

文章编号: 1673-923X(2023)03-0116-11

Dynamics of growth and biomass of the rubber - *Rauvolfia vomitoria* - *Cinnamomum cassia* mixed stand

WANG Wen^{1,2}, HUANG Guoliang³, REN Yan^{1,2}, LIU Chenggang¹, JIN Yanqiang¹, LIU Chang'an¹, TANG Jianwei¹

(1. Key Lab. of Tropical Plant Resources and Sustainable Use and Xishuangbanna Tropical Botanical Garden, Chinese Academy of Sciences, Mengla 666303, Yunnan, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

3. Menglun Nature Reserve Service, Xishuangbanna Bureau of National Nature Reserve, Menglun 666303, Yunnan, China)

Abstract: 【Objective】This study aimed to determine the dynamics and differences of the plant growth and biomass between the rubber (*Hevea brasiliensis*)-*Rauvolfia vomitoria*-*Cinnamomum cassia* mixed stand and rubber pure plantation of the same age, so as to provide a scientific basis for the reasonable structure construction of rubber mixed stands and the development of environment-friendly rubber plantation as well as the restoration and sustainable utilization of tropical degraded mountains. 【Method】Two rows of *R. vomitoria* and one row of *C. cassia* were planted at 2.0 m × 2.0 m in the 16-year-old rubber plantation to construct the rubber mixed stand. Three replicated long-term monitoring plots were established in the upper, middle, and low sections on the same slope in the rubber mixed stand (RM) and the rubber pure plantation (CK). The height (*H*), diameter at breast height (*D*), and basal diameter

收稿日期: 2022-04-08

基金项目: 中国科学院重点部署项目 (KFZD-SW-312); 云南省应用基础研究计划重点项目 (2016FA047); 西双版纳州科学技术局项目 (200915; YX201102)。

第一作者: 王文 (wangwen@xtbg.ac.cn), 硕士。 通信作者: 唐建维 (tangjw@xtbg.org.cn), 研究员, 博士, 博士生导师。

引文格式: 王文, 黄国良, 任燕, 等. 橡胶-罗芙木-肉桂复合林的植物生长及其生物量动态 [J]. 中南林业科技大学学报, 2023, 43(3): 116-126.

WANG W, HUANG G L, REN Y, et al. Dynamics of growth and biomass of the rubber-*Rauvolfia vomitoria*-*Cinnamomum cassia* mixed stand[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology, 2023, 43(3): 116-126.

(BD) of plants in each plot of the two different stands were regularly observed every two years from 2010 to 2018. The average annual growth of *H*, *D* and BD of rubber, *R. vomitoria* and *C. cassia* was calculated based on the field data. The biomass of the two stands was calculated by using the established biomass models of the three plants. Furthermore, the composition, biomass dynamics and distribution characteristics, and the annual net production of the two stands were analyzed. 【Result】 The growth of *D* and *H* of the rubber plants in the rubber mixed stand was slightly higher than that in the rubber pure plantation, and its biomass ($113.20 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$) was 1.06 times that of the rubber pure plantation ($P > 0.05$). The average annual growth of BD and *H* of *R. vomitoria* declined with planting time, while the biomass of *R. vomitoria* increased from 0.21 to $2.91 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ from 2012 to 2018. However, the average annual growth of BD of *C. cassia* decreased after 6 years of planting, and its average annual growth of *H* and biomass increased with planting time, while the biomass increased from 0.27 to $0.47 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ from 2012 to 2018. In terms of the biomass of the two stands, the biomass ($116.58 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$) of RM was slightly higher than that of CK ($P > 0.05$), while its organ distribution ratios in the two stands were ranked as stem > root > branch > leaf. Although the total biomass of RM and CK increased with stand age, the average annual net production of RM was 1.26 times that of CK ($P < 0.05$). 【Conclusion】 The construction of rubber mixed plantations is beneficial to the growth of rubber trees. The rubber mixed forest has greater biomass accumulation, higher annual net production and a higher biomass accumulation rate than the rubber pure plantation.

Keywords: rubber; *Cinnamomum cassia*; *Rauvolfia vomitoria*, growth dynamics; biomass; net production; rubber mixed stands

森林生态系统是陆地生态系统重要的碳库^[1], 对其生物量的测定能够反映其对自然资源的利用能力和生产力的高低, 为评价森林生态系统能量利用率、养分循环以及森林的多途径利用提供基础数据^[2]; 而树种的生物量对于评价该树种的生产力以及提高森林管理水平和其产品的综合利用都有重要意义。橡胶树 *Hevea brasiliensis* 为大戟科橡胶树属的高大乔木, 原产自巴西亚马逊流域, 目前主要种植于北纬 25° 至南纬 24° 之间的热带及亚热带地区, 其主要产物天然橡胶是轮胎以及近 5 万多种具有弹性的产品的主要原材料, 每年都有约 12.3 万 t 的消耗量^[3]。因其良好的经济效益, 橡胶树在 2010 年种植总面积就已达 $1\,006 \text{ 万 hm}^2$, 仅中国就有约有 100 万 hm^2 , 占中国人工林的 1.5% ^[4], 从生态系统水平上研究橡胶林的生物量及其动态变化具有重要意义。

发展天然橡胶产业不仅有利于促进地方经济的发展, 而且能够缓解国家对橡胶的战略需求和天然林的保护压力。但大面积开垦天然林和次生林进行的单一橡胶种植带来了如生物多样性散失、水土流失、土壤退化、环境污染等诸多的生态环境问题^[5-10]。在西双版纳地区, 自 20 世纪 60 年代开始随着原始雨林面积的逐年减少, 极端天气事件(低温、干旱与大风)呈现出逐年增多的趋势^[11], 这使橡胶树也面临着巨大威胁。众多研究人员通过对多种橡胶林复合生态系统如橡胶-茶叶^[12]、橡胶-咖啡和可可^[13]、橡胶-大叶千斤拔^[14]的研究发现, 在橡胶林下种植适宜的植物, 不仅能够维持或提高天然橡胶的产量, 同时显著降低了对环境的不良影响, 有效地解决了上述问题。构建橡胶林复合系统的关键在于遴选出经济效益、生态效益较为突出的复合系统, 对不合理的复合系

统进行合理的改造^[5,15]。而对具有较高经济价值的植物在橡胶林下进行间作试验, 综合并长远地考虑复合系统内植物的种间搭配和组合模式是构建合理的复合系统的有效途径^[12]。

萝芙木 *Rauvolfia vomitoria* 是夹竹桃科 Apocynaceae 萝芙木属常绿乔木植物, 原产于非洲, 目前我国云南、海南、广东、广西等地均已有栽培^[16]。萝芙木具有繁殖方法简单、生长迅速的特点^[17], 并且其根中具有含量较高的利血平(Reserpine)、萝芙木碱等 15 种生物碱^[18], 可用于制作降压药物应用于临床^[19]。目前国内对降压药的需求不断增大, 使野生萝芙木资源逐渐枯竭。萝芙木属植物的人工种植对满足国内需求及其野生种质资源的保护具有重要意义。

肉桂 *Cinnamomum cassia*, 又名玉桂, 为樟科常绿乔木, 高 $12 \sim 17 \text{ m}$, 属耐阴性树种, 其桂皮、桂枝、桂叶、桂子等均有极高的经济和药用价值^[20], 是中国特有的著名经济树种之一^[21], 亦可作为园林绿化树种。肉桂的栽培技术相对简单, 采伐周期较短, 具有良好的经济效益^[22], 因此在橡胶林下种植肉桂对发挥两者最大的经济效益和生态效益, 提高林地的综合利用效率具有重要意义。

为提高单一橡胶林的土地利用率, 探索橡胶林下空间资源的合理利用途径与方式, 本研究根据橡胶、萝芙木和肉桂的生物生态学特性, 于 2010 年在西双版纳构建了橡胶-萝芙木-肉桂复合林, 并以橡胶纯林作对照, 对两种不同林分的植物生长动态进行了长期定位观测。本文仅对所组建的橡胶-萝芙木-肉桂复合林和橡胶纯林的植物生长量和生物量的动态变化及其生物量的器官分配进行初步分析, 以期对橡胶林下经济、药用等植物的种植, 合理复合林结构的组建, 以及环

境友好型橡胶园的建设 和热带退化山地的恢复与 可持续利用提供科学依据。

1 研究地概况

试验样地位于云南省西双版纳傣族自治州勐 腊县内，该地区属于西南热带季风气候，一年可 分为干热、湿热和雾凉 3 季，3—5 月为干热季， 气温较高，雨量较少；6—10 月为雨季（湿热季）， 气候湿热，此时期集中了全年降水的 85%；11 月 至次年 2 月为雾凉季，降水较少，但早晚有浓雾， 空气湿度较大，可以弥补此时期降水量的不足。 年平均气温 21.5℃，≥ 10℃积温 7 860℃，平均最 低气温 7.5℃，年日照时数 1 828 h，年均降水量达 1 539 mm。土壤为由白垩纪砂岩发育而成的砖红 壤，pH 值在 5.0 左右。

在试验区域内的同一坡面上分别选取橡胶 - 萝 芙木 - 肉桂复合林和单一种植的橡胶林作为本研 究的试验样地。其地理位置为：21°33'26.48"N， 101°28'40.32"E；坡向为 SW50°，坡度 20° ~ 25°， 海拔 880 ~ 890 m。

2 研究方法

2.1 林分的组建与设计

在试验区域，橡胶于 1994 年 6 月按 8 m×2.5 m 的规格种植，每公顷约 500 株；肉桂和罗芙木于 2010 年 6 月种植在橡胶林的行距间，2 行罗芙木之 间种植 1 行肉桂，罗芙木离橡胶树 1 m，种植规格

均为 2 m×2 m，罗芙木和肉桂的种植密度分别为 1 260 株·hm⁻² 和 630 株·hm⁻²。在已组建的橡胶 - 萝 芙木 - 肉桂复合林的同一坡面的上、中、下三个地 段分别建立 3 块 25 m×20 m 的样地作为长期定位 监测样地；并在未种植肉桂和罗芙木的同一橡胶 纯林的上、中、下三个地段分别建立 3 块 25 m× 20 m 的样地作为对照。

2.2 植物生长调查及生物量的测定

在每块样地的上、中、下三个坡位中，随机 选取 10 株橡胶树（共计 30 株）在胸径处进行标 记并编号，分别于 2010—2018 年的 12 月每隔 2 年测量记录其胸径、高度、冠幅等。依据同样方 法分别选取罗芙木、肉桂各 30 株在基径和胸径处 进行标记并编号，对其基径、胸径、高度、冠幅 等进行测量并记录。

橡胶和罗芙木的生物量分别采用唐建维等^[23] 建立的橡胶生物量回归模型和王飞军等^[24] 建立的 罗芙木生物量回归模型（表 1）进行计算。

为建立肉桂的生物量模型，自 2012 年年底开 始每隔 2 年在样地外分别选取 6 ~ 7 株不同大小 的肉桂个体（共 26 株），采用收获法对其生物量 进行测定。利用样木各器官（茎、枝、叶、根） 样品的干质量计算得到各器官的含水率，再计算 肉桂植株个体各器官的生物量和总生物量（*W*）。 然后将其与样木基径（BD）和高度（*H*）进行回 归分析，建立肉桂的生物量回归方程。

表 1 橡胶与罗芙木的生物量回归模型[†]
Table 1 Regression models for the biomass of rubber and *R. vomitoria*

树种 Tree	器官 Organ	回归模型 Regression model	相关系数 Coefficient
橡胶 Rubber	茎 Stem	$W=0.050D^{2.596}$	0.987*
	枝 Branch	$W=0.015D^{2.536}$	0.911*
	叶 Leaf	$W=0.007D^{2.215}$	0.955*
	根 Root	$W=0.108D^{1.948}$	0.971*
	总 Total	$W=0.136D^{2.4}$	0.989*
罗芙木 <i>R. vomitoria</i>	茎 Stem	$W=0.021\ 6(BD^2H)^{0.995\ 5}$	0.988 0*
	枝 Branch	$W=0.002\ 0(BD^2H)^{1.242\ 5}$	0.980 1*
	叶 Leaf	$W=0.005\ 5(BD^2H)^{1.00\ 6}$	0.949 6*
	根 Root	$W=0.018\ 6(BD^2H)^{0.897\ 8}$	0.966 7*
	总 Total	$W=0.005\ 12(BD^2H)^{0.988\ 6}$	0.986 7*

[†] *W*. 生物量 (kg); *D*. 胸径 (cm); BD. 基径 (cm); *H*. 高度 (m); *. *P* < 0.001. 下同。
W. Biomass (kg); *D*. Diameter at breast height (cm); BD. Basal diameter (cm); *H*. Height(m); *. *P* < 0.001. The same below.

根据样地中 3 种植物的每木调查结果，采用 已建立的生物量回归方程，分别计算样地内 3 种 植物各器官的生物量。3 种植物各植株个体不同器

官的生物量之和即为各个体的生物量。两种林分 的总生物量为各样地 3 种植物个体生物量的平均 值乘以单位面积上的株数所得。在本实验中，在

每年的 6 月、12 月分别砍除林下的杂草，故未对林分草本层的生物量等进行估算。

2.3 数据处理及统计分析方法

将数据录入 Excel 2010 软件进行基本统计，然后采用 SPSS 17.0 软件进行统计分析，采用单因素方差分析（ANOVA），LSD 法进行不同处理间各参数在置信区间（ $P < 0.05$ ）水平上的差异显著性检验。

3 结果与分析

3.1 不同林分中植物的生长动态

根据 2010—2018 年每隔 2 年 1 次的样地植物

生长调查数据，得到 2 种不同林分中植物的年均生长量（表 2）。其中复合林中橡胶的胸径年均生长量（0.37 ~ 0.42 cm）和高度年均生长量（0.16 ~ 0.18 m）均稍高于单一橡胶林（分别为 0.35 ~ 0.38 cm 和 0.14 ~ 0.16 m）（ $P > 0.05$ ）。这表明构建复合生态系统有利于橡胶树的生长。种植在复合林中罗芙木的基径年均生长量（0.39 ~ 0.51 cm）和高度年均生长量（0.22 ~ 0.38 m）随种植时间呈现出逐渐减缓的趋势。肉桂的基径年均生长量为 0.17 ~ 0.30 cm，随种植时间增长至 6 年后生长量有所下降；而高度年均生长量（0.17 ~ 0.50 m）则随种植时间以成倍的速度增长（表 2）。体现出种植在林下的两种植物在不同生长发育阶段的特点。

表 2 橡胶复合林和单一橡胶林中植物的生长动态[†]
Table 2 Dynamics of plant growth in the rubber-*R.vomitoria*- *C. cassia* mixed stand and rubber pure plantation

林分类型 Stand type	植物名称 Plant	调查时间 Time	平均基径 Mean BD /cm	平均胸径 Mean D /cm	年均基径 / 胸径生长量 Annual mean BD growth/ Annual mean D growth /cm	平均高度 Mean height /m	年均高度生长量 Annual mean height growth /m
复合林 Mixed- species stand	橡胶 Rubber	2010.12	—	18.11(1.92)	—	13.79(0.26)	—
		2012.12	—	18.85(1.93)	0.37	14.11(0.28)	0.16
		2014.12	—	19.63(1.96)	0.41	14.45(0.25)	0.17
		2016.12	—	20.47(2.17)	0.42	14.80(0.35)	0.18
		2018.12	—	21.28(2.28)	0.40	15.12(0.30)	0.16
	罗芙木 <i>R. vomitoria</i>	2010.12	0.45(0.15)	—	—	0.88(0.22)	—
		2012.12	1.47(0.42)	—	0.51	1.64(0.38)	0.38
		2014.12	2.53(0.57)	—	0.53	2.01(0.30)	0.29
		2016.12	3.43(0.60)	—	0.45	2.48(0.37)	0.24
		2018.11	4.21(0.55)	—	0.39	2.92(0.39)	0.22
	肉桂 <i>C. cassia</i>	2010.12	0.42(0.16)	—	—	0.38(0.12)	—
		2012.12	0.76(0.32)	—	0.17	0.72(0.24)	0.17
		2014.12	1.32(0.38)	—	0.28	1.14(0.37)	0.21
		2016.12	1.92(0.35)	—	0.30	1.82(0.36)	0.34
		2018.12	2.46(0.39)	—	0.27	2.41(0.42)	0.50
对照 Control	橡胶 Rubber	2010.12	—	17.82(2.32)	—	13.52(0.75)	—
		2012.12	—	18.58(2.22)	0.38	13.84(0.78)	0.16
		2014.12	—	19.32(2.24)	0.37	14.16(0.83)	0.15
		2016.12	—	20.06(2.31)	0.37	14.48(0.88)	0.16
		2018.12	—	20.76(2.34)	0.35	14.76(0.94)	0.14

[†] 括号内为标准差；BD: 基径；D: 胸径。Standard deviations are given in parentheses; BD: Basal diameter; D: Diameter at breast height.

3.2 肉桂生物量回归模型的建立

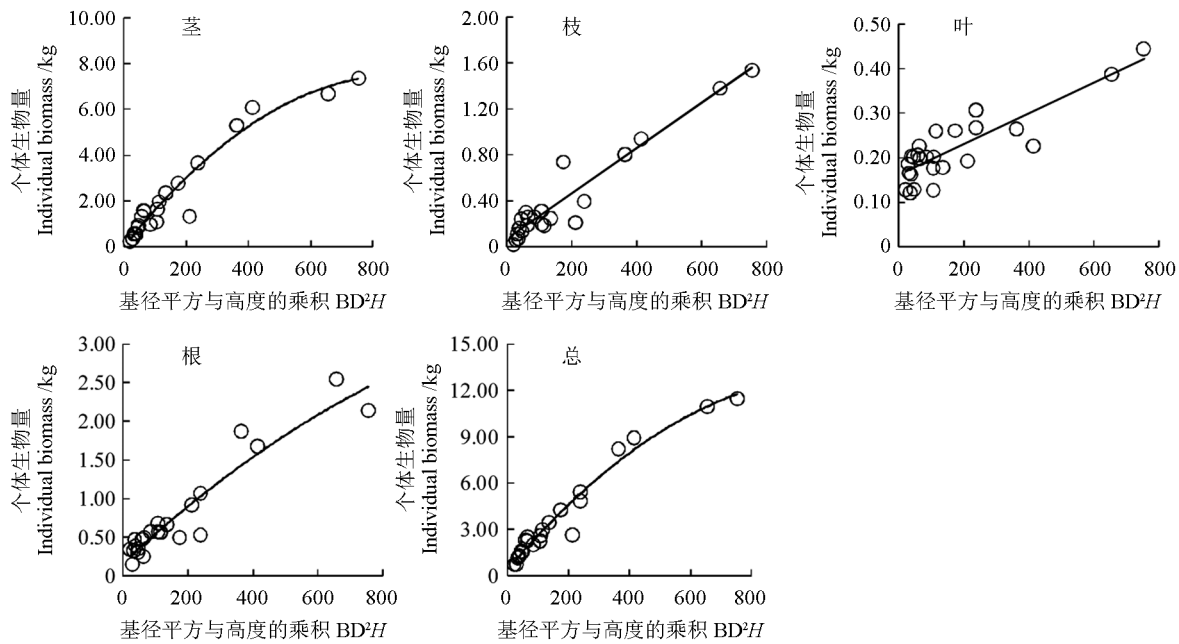
根据野外对肉桂不同大小个体各器官生物量的调查数据，以基径的平方（BD²）和高度（H）的乘积为横轴，个体的生物量为纵轴，得到肉桂植株各器官及个体生物量随基径和高度变化的散点图（图 1），并采用多种线性和非线性的回归方程对其进行回归分析，选用相关系数最高者为其个体生物量的回归模型。

经检验，肉桂各器官生物量和总生物量的回

归模型（表 3）都达到极显著水平，表明拟合的生物量模型较好地反映了肉桂植株个体各器官及个体生物量随其基径和高度生长的动态变化。

3.3 不同林分的生物量动态及其组成

根据样地的调查数据和已建立的生物量回归模型，对样地中橡胶树、罗芙木和肉桂的生物量进行估算，得到两种林分中橡胶树、罗芙木和肉桂不同时间的生物量及林分的总生物量（表 4）。



o. 实测值; —. 模拟曲线; BD. 基径; H. 高度。o. Observed values; —. Simulated curves; BD. Basal diameter; H. Height.

图 1 肉桂个体生物量随基径和高度变化的动态曲线

Fig. 1 Dynamics curves of *C. cassia* biomass with the growth of individual basal diameter and height

表 3 肉桂的生物量回归模型
Table 3 Regression models for the biomass of *C. cassia*

树种 Tree	器官 Organ	回归模型 Regression model	相关系数 Coefficient
肉桂 <i>C. cassia</i>	茎 Stem	$W=-1\text{E}-05(\text{BD}^2H)^2+0.016\ 9(\text{BD}^2H)+0.004\ 8$	$R^2=0.942\ 9^{**}$
	枝 Branch	$W=0.002(\text{BD}^2H)+0.072\ 9$	$R^2=0.894\ 1^{**}$
	叶 Leaf	$W=0.000\ 3(\text{BD}^2H)+0.162\ 1$	$R^2=0.737\ 2^*$
	根 Root	$W=-1\text{E}-06(\text{BD}^2H)^2+0.003\ 9(\text{BD}^2H)+0.175\ 3$	$R^2=0.896\ 8^{**}$
	总 Total	$W=-1\text{E}-06(\text{BD}^2H)^2+0.023\ 1(\text{BD}^2H)+0.416\ 6$	$R^2=0.964\ 9^{**}$

复合林中橡胶树的生物量从 2012 年的 84.03 t·hm⁻²、2014 年的 92.83 t·hm⁻² 增长到 2018 年的 113.20 t·hm⁻² (表 4); 其年均净生产量从 2014 年的 4.40 t·hm⁻²、2016 年的 5.03 t·hm⁻² 增长到 2018 年的 5.15 t·hm⁻² (图 2) (平均年净生产量为 4.86 t·hm⁻²)。生物量和年均净生产量均随时间而增长。但其年均增长率从 2014 年的 4.74% 增长至 2016 年的 4.89% 后有所下降, 2018 年为 4.55% (平均增长率为 4.73%)

种植于复合林中罗芙木的生物量 (表 4) 从 2012 年的 0.21 t·hm⁻²、2014 年的 0.74 t·hm⁻² 增长至 2018 年的 2.91 t·hm⁻², 其年均净生产量从 0.26 t·hm⁻²·a⁻¹ 增长到 0.63 t·hm⁻²·a⁻¹ (平均年净生产量为 0.45 t·hm⁻²·a⁻¹), 其生物量和年净生产量均随种植时间而迅速增长。但其年均增长率从 2014 年的 35.82%、2016 年的 27.68% 下降到 2018 年的 21.67%, 呈现出随种植时间而减缓的趋势。

肉桂的生物量和年均净生产量 (表 4) 与罗芙木一样, 均随种植时间而迅速增长, 但其生物量和年均净生产量均很少。肉桂的生物量从 2012 年的 0.27 t·hm⁻²、2014 年的 0.29 t·hm⁻² 增长到 2018 年的 0.47 t·hm⁻², 其年均净生产量从 2014 年的 0.01 t·hm⁻²·a⁻¹ 增长到 2018 年的 0.06 t·hm⁻²·a⁻¹。但其年均增长率则与罗芙木相反, 呈现出随种植时间而增长的趋势, 从 2014 年的 3.71%、2016 年的 9.74% 增长到 2018 年的 12.21%。

橡胶复合林的总生物量从 2012 年的 84.51 t·hm⁻²、2014 年的 93.86 t·hm⁻² 增长到 2018 年的 116.58 t·hm⁻²; 其年均净生产量从 4.67 t·hm⁻²·a⁻¹ 增长到 5.84 t·hm⁻²·a⁻¹ (平均年净生产量为 5.34 t·hm⁻²·a⁻¹) (图 2)。不论是总生物量还是年均净生产量均随种植时间而增长。其生物量的增长率从 2014 年的 4.98% 上升到 2016 年的 5.27% 后有所下降, 至 2018 年为 5.01% (表 4)。

表 4 不同林分中各植物的生物量及其器官分配
Table 4 Biomass ($t \cdot hm^{-2}$) and its distribution among various plant organs in the rubber-*R. vomitoria*-*C. cassia* mixed stand and rubber pure plantation

林分 Stand	植物名称 Plant	调查时间 Time/a	茎 Stem			枝 Branch			叶 leaf			根 Root			总 Total		
			生物量 Biomass ($t \cdot hm^{-2}$)	比例 Percentage /%	生物量 Biomass ($t \cdot hm^{-2}$)	生物量 Biomass ($t \cdot hm^{-2}$)	比例 Percentage /%	生物量 Biomass ($t \cdot hm^{-2}$)	生物量 Biomass ($t \cdot hm^{-2}$)	比例 Percentage /%	生物量 Biomass ($t \cdot hm^{-2}$)	生物量 Biomass ($t \cdot hm^{-2}$)	比例 Percentage /%	生物量 Biomass ($t \cdot hm^{-2}$)	生物量 Biomass ($t \cdot hm^{-2}$)	比例 Percentage /%	生物量 Biomass ($t \cdot hm^{-2}$)
复合林 Mixed- species stand	橡胶 Rubber	2012	51.27±2.65	61.01±1.72	13.93±1.51	16.57±0.45	2.35±0.11	2.79±0.13	16.48±1.69	19.62±1.95	84.03±4.05	100.00					
		2014	56.97±3.09	61.36±1.81	15.45±1.43	16.65±0.37	2.57±0.12	2.77±0.14	17.84±1.73	19.22±1.93	92.83±4.76	100.00					
		2016	63.52±3.38	61.72±1.75	17.21±1.38	16.72±0.36	2.82±0.13	2.74±0.13	19.36±1.77	18.82±1.87	102.90±5.19	100.00					
		2018	70.25±3.43	62.05±1.58	19.01±1.29	16.79±0.32	3.07±0.12	2.71±0.12	20.88±1.72	18.45±1.78	113.20±5.23	100.00					
	罗芙木 <i>R. vomitoria</i>	2012	0.10±0.03	46.60±2.41	0.01±0.00	5.89±0.45	0.03±0.01	12.00±0.13	0.07±0.02	35.51±0.82	0.21±0.06	100.00					
		2014	0.35±0.08	47.49±1.17	0.06±0.01	8.26±0.48	0.09±0.02	12.37±0.13	0.23±0.05	31.89±0.67	0.74±0.17	100.00					
		2016	0.79±0.14	47.74±1.14	0.17±0.04	10.16±0.43	0.21±0.04	12.52±0.14	0.49±0.08	29.58±0.53	1.65±0.29	100.00					
		2018	1.39±0.18	47.74±0.86	0.34±0.05	11.71±0.35	0.37±0.05	12.58±0.16	0.81±0.09	27.96±0.42	2.91±0.38	100.00					
对照 Control	肉桂 <i>C. cassia</i>	2012	0.01±0.01	2.70±0.20	0.05±0.01	17.37±0.03	0.10±0.01	38.24±1.04	0.11±0.01	41.68±0.11	0.27±0.01	100.00					
		2014	0.02±0.01	7.93±0.38	0.05±0.01	16.72±0.05	0.10±0.01	35.50±0.20	0.12±0.01	39.85±0.13	0.29±0.01	100.00					
		2016	0.07±0.01	20.62±0.52	0.055±0.01	15.16±0.06	0.10±0.01	28.84±0.27	0.13±0.01	35.38±0.18	0.36±0.01	100.00					
		2018	0.16±0.03	33.26±2.99	0.06±0.01	13.61±0.36	0.11±0.01	22.19±1.57	0.15±0.01	30.93±1.05	0.47±0.04	100.00					
	合计 Total	2012	51.38±2.64	60.80±0.17	13.99±0.71	16.55±0.03	2.47±0.11	2.93±0.01	16.67±0.65	19.73±0.19	84.51±4.10	100.00					
		2014	57.34±3.17	61.10±0.17	15.56±0.84	16.58±0.03	2.76±0.14	2.94±0.01	18.19±0.77	19.38±0.19	93.86±4.93	100.00					
		2016	64.38±3.52	61.37±0.15	17.43±0.94	16.61±0.03	3.13±0.17	2.98±0.01	19.97±0.85	19.04±0.18	104.90±5.48	100.00					
		2018	71.79±3.63	61.58±0.13	19.41±0.97	16.65±0.03	3.54±0.18	3.04±0.01	21.83±0.86	18.73±0.17	116.58±5.65	100.00					
对照 Control	橡胶 Rubber	2012	49.39±2.62	60.88±1.79	13.42±1.42	16.54±0.37	2.27±0.12	2.80±0.14	16.03±1.64	19.76±2.04	81.11±4.07	100.00					
		2014	54.66±2.72	61.23±1.66	14.84±1.28	16.62±0.34	2.48±0.11	2.77±0.11	17.29±1.71	19.40±1.88	89.27±4.19	100.00					
		2016	60.26±2.88	61.55±1.58	16.34±1.17	16.69±0.32	2.69±0.13	2.75±0.12	18.61±1.67	19.01±1.78	97.90±4.44	100.00					
		2018	65.87±3.02	61.84±1.43	17.84±1.23	16.75±0.29	2.91±0.29	2.73±0.11	19.89±1.65	18.68±1.61	106.5±4.42	100.00					

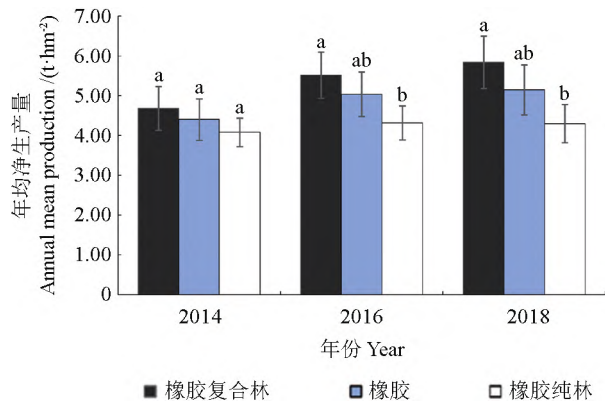


图 2 橡胶复合林及其橡胶与橡胶纯林的年均净生产量
Fig. 2 The average annual production of the rubber mixed stand and the rubber pure plantation

在橡胶复合林生物量的物种组成中（表 5），主要是以橡胶树的生物量所占比例最大，但随着林龄的增长所占比例而逐渐减少；林下种植的 2 种植物所占的生物量比例虽然都很少，但随种植时间两种植物所占的比例在逐渐增大。体现了橡

胶复合林生物量的物种组成随种植时间而呈现的动态变化特点。

橡胶纯林的生物量从 2012 年的 81.11 t·hm⁻²、2014 年的 89.27 t·hm⁻² 增长到 2018 年的 106.50 t·hm⁻²（表 4）；其年均净生产量从 2014 年的 4.07 t·hm⁻²·a⁻¹ 增长到 2018 年的 4.30 t·hm⁻²·a⁻¹（平均年净生产量为 4.23 t·hm⁻²·a⁻¹）（图 2）。虽然其生物量和年均净生产量均随林龄呈现逐渐增长的趋势，但与橡胶复合林相比，橡胶纯林的生物量分别低于同期橡胶复合林的 3.39、4.59、7.01 和 10.07 t·hm⁻²，甚至低于同期复合林中橡胶树生物量的 2.92、3.57、5.00 和 6.69 t·hm⁻²；年均净生产量也分别低于同期橡胶复合林的 0.60、1.21 和 1.53 t·hm⁻²·a⁻¹，同样低于复合林中橡胶树年均净生产量的 0.32、0.72 和 0.85 t·hm⁻²·a⁻¹（图 2）。这表明橡胶林的复合种植可促进橡胶的生长，同时橡胶复合林比橡胶纯林具有更大的生物量积累、更高的年均净生产量及更快的生物量积累速率。

表 5 橡胶复合林总生物量的物种组成及其分配
Table 5 Total biomass and its distribution among different plants in the rubber-*R. vomitoria*-*C. cassia* mixed stand

植物名称 Plant	2012		2014		2016		2018	
	生物量 Biomass / (t·hm ⁻²)	比例 Percentage /%	生物量 Biomass / (t·hm ⁻²)	比例 Percentage / %	生物量 Biomass / (t·hm ⁻²)	比例 Percentage / %	生物量 Biomass / (t·hm ⁻²)	比例 Percentage / %
橡胶 Rubber	84.03±4.05	99.43	92.83±4.76	98.90	102.90±5.19	98.09	113.20±5.23	97.10
萝芙木 <i>R. vomitoria</i>	0.21±0.06	0.25	0.74±0.17	0.79	1.65±0.29	1.57	2.91±0.38	2.50
肉桂 <i>C. cassia</i>	0.27±0.01	0.32	0.29±0.01	0.31	0.36±0.01	0.34	0.47±0.04	0.40
合计 Total	84.51±4.10	100.00	93.86±4.93	100.00	104.90±5.48	100.00	116.58±5.65	100.0

3.4 林分生物量的器官分配

在复合林中，橡胶树生物量的器官分配均以茎所占比例最大（表 4），占总生物量的 3/5 以上，并随林龄而缓慢地增加；根次之，所占比例不足 1/5，并随林龄而逐渐减少；枝约占 1/6，随林龄而逐渐增加；叶所占的比例最少，仅占 1/36 左右，随林龄而减少；各器官的分配比例呈现出茎>根>枝>叶的规律。

种植于复合林中萝芙木的生物量（表 4）器官分配同样以茎所占的比例最大，稍低于 1/5；随种植时间缓慢增长；根次之，占 1/3 左右，随种植时间而逐渐下降；叶约占 1/8；枝所占的比例最少，但随种植时间而增长，从仅占 1/17 增长到 1/9。其器官分配的比例大小顺序为：茎>根>叶>枝。

肉桂生物量（表 4）的器官分配随种植时间呈现出一定的动态变化。其根部所占的比例最大，但随种植时间而逐渐减小；叶与枝所占比例表现出了与根相同的趋势。而茎所占的比例则随种植

时间逐年增加。这表明随着种植时间肉桂的生物量积累从根、叶、枝转移到茎，体现出肉桂在其生长过程中各器官生物量积累的特点与动态变化。

从林分总生物量的器官分配来看（表 4），橡胶复合林的器官分配主要以茎所占的比例最大，随林龄缓慢增长；根次之，所占比例随林龄而减少；而枝和叶所占的比例虽随林龄逐渐增大，但所占比例很少，枝约占 1/6，而叶仅占 1/33 左右。

橡胶纯林的生物量器官分配同样以茎所占的比例最大，且随林龄缓慢增长；根次之，所占比例不足 1/5，随林龄而减少；而枝和叶所占比例较少，枝约占 1/6，随林龄逐渐增大；而叶仅占 1/36 左右，随林龄而有所减少。

4 结论与讨论

4.1 讨 论

复合生态系统中植物对资源的竞争既会改变

原植物的对资源的获取策略^[25],也会对间作植物的生长产生影响,如上层树种不同的遮阴度所造成的光照强弱直接影响着植物的光合作用、生长速率及其产量^[26]。在本研究中,虽然没有测定复合林下不同年度的光照强度,但随着种植年限的增加,橡胶树的郁闭度从 0.56 增加到 0.78,遮阴度逐渐增大,从而导致了罗芙木的基径和高度生长量逐渐降低。已有研究证实罗芙木的生长随着光强的降低会逐渐减弱^[27]。但对某些耐阴植物或作物的生长而言,遮阴度的增加则具有促进作用。在本研究中,肉桂的年生长量与生物量随种植时间而逐渐增加。这与陶大燕等^[28]研究发现的肉桂在马尾松林郁闭度处于中上水平时具有更高生物量的结果相一致。肉桂在适当的遮阴条件下具有较大的生物量,这可能是因为在其幼、中龄的生长阶段需要一定荫蔽的环境。这说明了复合生态系统中光照对林下植物的生长具有重要作用,在组建上层以乔木树种为主的复合生态系统时,林下种植的植物应优先选择较耐阴的植物或作物。

许多研究表明,植物在较强的光照下往往向地下部分分配较多生物量,以增大对水分及养分的吸收,在弱光环境下则为地上部分分配较多的生物量,以增强光捕获的能力,从而改变生物量的分配策略^[29-31]。在本研究中也证实了这一点。从 2012 年至 2018 年,罗芙木的生物量在根上的分配逐渐减少,茎和枝的占比随种植时间而增加;肉桂生物量在根、枝及叶片上的分配逐渐减少,而在茎上的分配比例逐年增加。表明两种植物随着种植时间的增加,上层橡胶林的郁闭度逐渐增加,林下光照逐渐减弱,为获取较多的光照资源,将更多的生物量分配从地下根系生物量转移到地上部分生物量。本研究试验结果表明,橡胶树在复合林中的胸径和高度年均生长量均略高于橡胶纯林,比橡胶纯林具有更高的生物量和年净生产量。这与萧自位等^[32]、王飞军等^[24]以及张森等^[33]对不同植物种类组成的橡胶林复合生态系统的研究结果相吻合。橡胶与其他植物的复合种植如橡胶树与草本植物如唐鬼桑、黑籽雀稗和柱花草等的间作增加了地表覆盖,从而调节空气及土壤在高温干旱季节的温湿度,减少了高温和干旱对橡胶树的伤害,从而促进橡胶树的生长^[34]。橡胶与木本植物如大叶千斤拔^[14,25]、咖啡^[32]、茶叶^[35]、玉桂^[36]的间作,既增加了凋落物的数量和类型,也增加了林分密度和根系的覆盖面积,并调整其根系分布及对土壤水分和养分的利用策略^[25,37],从而改善系统的养分循环和水土保持能力;同时减

小了风害,进一步提高了结构的稳定性和资源的利用效率,提升了整个系统的生物量和生产力^[38]。这表明在橡胶林下种植其他植物不仅有利于橡胶树的生长,而且促进了橡胶树的生物量积累。此外,多种植物的复合种植也是一种环境友好,既增加了土地利用、产出率,也是保障人工经济林高产、优质、高效与安全,提升经济效益的策略^[39-42]。

在本研究中,不论是橡胶复合林还是橡胶纯林,其生物量都随林龄而增长。与其他橡胶复合林相比,本研究中 2018 年复合林(橡胶林龄为 24 年)的生物量($116.58 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$)分别是同一地点 4 年生和 7 年生橡胶-催吐罗芙木-降香黄檀复合林生物量(分别为 67.49 、 $63.86 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$)的 1.74 倍和 1.93 倍^[24]。但远低于同一地区 50 年生橡胶-茶叶、橡胶-咖啡、橡胶-多种植物复合林活体植物的生物量($521 \sim 564 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$)^[32],这主要是橡胶树不同的林龄所致。与张森等^[33]研究中的橡胶-罗芙木-大叶千斤拔复合林相比,仅稍高于其 8 年生和 11 年生复合林的生物量(分别为 111.16 、 $112.53 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$),并略低于 20 年生复合林的生物量($119.53 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$)。这主要是大叶千斤拔的种植密度较大($10\ 830 \text{ 株} \cdot \text{hm}^{-2}$)及其所具有的固氮功能所致。因密度是制约种群生物量动态的主要因素^[43],同时大叶千斤拔又是一种豆科固氮植物,不仅能通过生物固氮作用除满足植物自身的氮素需求外,而且其富含氮的凋落物在分解后能向土壤归还更多的氮素,从而提高土壤的氮素水平和有效性,有效地改善了土壤养分状况^[44-45];此外,每年将大叶千斤拔的地上部分刈割覆盖于林下的管理措施不仅归还了养分,也能更好地调节土壤的温湿度,从而促进橡胶的生长^[14,46]。这表明橡胶林下不同的植物种类和种植密度对林分的生物量会产生极大的影响。

从目前该复合林中所种植的 2 种植物的生长动态方面来看,虽然在其生长方面有所差异,但均能正常健康地生长。随着种植年限和橡胶年龄的继续增长,上层遮阴度进一步增加,其生长动态如何?对群落结构、功能等方面又会产生怎样的影响?仍有待于进一步的观测和研究。此外,本研究并未进行其经济效益、生态效益等方面的分析。这也是本研究的局限所在。下一步的工作除继续进行其植物生长动态的观测外,还应进行该复合林的经济效益等方面的分析以及肉桂、罗芙木不同种植密度和不同组合方式的试验工作,同时还应尝试在不同林龄橡胶林及更多植物种类的组合试验工作,并开展橡胶复合林系统多功能

性观测研究, 以期为单一橡胶林的结构优化和营建物种、结构更为合理, 经济效益和生态效益俱佳的橡胶复合林及环境友好型橡胶林提供理论依据。

4.2 结 论

橡胶林下萝芙木、肉桂的复合种植促进了橡胶树生长, 其年均胸径生长量和年均高度生长量均稍大于橡胶纯林。比橡胶纯林具有更大的生物量积累、更高的年均净生产量及更快的生物量积累速率的优势, 可在相似的橡胶种植区域推广种植。

参考文献:

- [1] SABINE C L, FEELY R A, GRUBER N, et al. The oceanic sink for anthropogenic CO₂[J]. Science, 2004,305(5682):367-371.
- [2] 杜虎, 曾馥平, 王克林, 等. 中国南方 3 种主要人工林生物量和生产力的动态变化 [J]. 生态学报, 2014,34(10):2712-2724.
DU H, ZENG F P, WANG K L, et al. Dynamics of biomass and productivity of three major plantation types in southern China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2014,34(10):2712-2724.
- [3] PRIYADARSHAN P M. Biology of *Hevea rubber*[M]. Cham, Switzerland: Springer, 2017.
- [4] FAO (Food and Agriculture Organization Of The United Nations). State of the World's Forests[R]. 2011.
- [5] 李维锐, 赵国祥, 张洪波. 应用生物多样性理论构建新型胶园复合生态系统的思考 [J]. 热带农业科学, 2009,29(5):57-61.
LI W R, ZHAO G X, ZHANG H B. Building of a new complex ecosystem for rubber plantation by application of biodiversity theory[J]. Chinese Journal of Tropical Agriculture, 2009,29(5): 57-61.
- [6] 刘文杰, 张一平, 刘玉洪, 等. 热带季节雨林和人工橡胶林林冠截留水的比较研究 [J]. 生态学报, 2003,23(11):2379-2386.
LIU W J, ZHANG Y P, LIU Y H, et al. Comparison of fog interception at a tropical seasonal rain forest and a rubber plantation in Xishuangbanna, southwest China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2003,23(11):2379-2386.
- [7] 余永忠. 西双版纳高海拔山地大量开垦植胶情况和思考 [J]. 热带农业科技, 2006,29(3):42-43.
YU Y Z. Situation and thinking of large amount of reclaimed rubber planting in Xishuangbanna high altitude mountain area[J]. Tropical Agricultural Science & Technology, 2006,29(3):42-43.
- [8] 周宗, 胡绍云. 橡胶产业对西双版纳生态环境影响初探 [J]. 环境科学导刊, 2008,27(3):73-75.
ZHOU Z, HU S Y. Study on impacts of rubber industry on ecological environment of Xishuangbanna[J]. Environmental Science Survey, 2008,27(3):73-75.
- [9] AHREND S A, HOLLINGSWORTH P M, ZIEGLER A D, et al. Current trends of rubber plantation expansion may threaten biodiversity and livelihoods[J]. Global Environmental Change-Human and Policy Dimensions, 2015,34(6):48-58.
- [10] WANGPIMOOL W, PONGPUT K, TANGTHAM N, et al. The Impact of para rubber expansion on streamflow and other water balance components of the Nam Loei river basin, Thailand[J]. Water, 2017,9(1):w9010001.
- [11] KEYING Z. The influence of deforestation of tropical rainforest on local climate and disaster in Xishuangbanna region of China[J]. Climatological Notes, 1986,35(1):223-236.
- [12] 冯耀宗. 人工群落 [M]. 昆明: 云南科技出版社, 2007.
FENG Y Z. Artificial communities [M]. Kunming: Yunnan Science and Technology Press, 2007.
- [13] SNOECK D, LACOTE R, KELI J, et al. Association of *Hevea* with other tree crops can be more profitable than *Hevea* monocrop during first 12 years[J]. Industrial Crops and Products, 2013,43(1):578-586.
- [14] 庞家平, 陈明勇, 唐建维, 等. 橡胶 - 大叶千斤拔复合生态系统中的植物生长与土壤水分养分动态 [J]. 山地学报, 2009,27(4): 433-441.
PANG J P, CHEN M Y, TANG J W, et al. The dynamics of plant growth and soil moisture and nutrient in the rubber plantation and rubber-*Flemingia macrophylla* agroforestry system in Xishuangbanna, Southwest China[J]. Journal of Mountain Science, 2009,27(4):433-441.
- [15] 田耀华, 李国华, 倪书邦, 等. 橡胶树生理生态学研究进展 [C]// 云南省热带作物学会第七次代表大会暨 2009 年学术年会, 2009:32-43.
TIAN Y H, LI G H, NI S B, et al. Research progress in the physiology and ecology of rubber tree[C]// The 7th Representative Congress of Yunnan Tropical Crops Society and 2009 Academic Annual Meeting, 2009:32-43.
- [16] 张丽霞, 郭绍荣, 李学兰, 等. 催吐萝芙木的主要虫害及其防治 [J]. 中药材, 2006,29(12):1276-1278.
ZHANG L X, GUO S R, LI X L, et al. Main insect pest and its control of *Rauwolfia vomitoria*[J]. Chinese Herbal Medicines, 2006,29(12):1276-1278.
- [17] 黎蕾, 蔡传涛, 刘贵周. 光强和施氮量对催吐萝芙木生长及生物量的影响 [J]. 中国生态农业学报, 2010,18(1):57-61.
LI L, CAI C T, LIU G Z. Effect of light intensity and nitrogen level on growth and biomass of *Rauwolfia vomitoria*[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2010,18(1):57-61.
- [18] 李琳, 何红平, 周华, 等. 催吐萝芙木中生物碱的研究 [J]. 天然产物研究与开发, 2007,19(2):235-239.

- LI L, HE H P, ZHOU H, et al. Indole alkaloids from *Rauwolfia vomitoria*[J]. Natural Products Research and Development, 2007,19(2):235-239.
- [19] 赵永生, 周亚兴, 查云盛. 云南萝芙木引种驯化栽培及发展前景 [J]. 中国民族民间医药杂志, 2006,80(3):179-180.
- ZHAO Y S, ZHOU Y X, ZHA Y S. Introduction, domestication, cultivation and development prospect of *Rauwolfia yunnanensis*[J]. Chinese Journal of Ethnomedicine and Ethnopharmacy, 2006,80(3):179-180.
- [20] 陈旭, 雍克岚. 肉桂研究进展 [J]. 食品研究与开发, 2003,24(5):21-23.
- CHEN X, YONG K L. Research progress of *Cinnamomum cassia*[J]. Food Research and Development, 2003,24(5):21-23.
- [21] 吴志庄, 梁一池. 肉桂各器官生物量的通径分析与回归模型 [J]. 福建林学院学报, 2004,24(4):327-330.
- WU Z Z, LIANG Y C. Path analysis and optimum regression equation of biomass of *Cinnamomum cassia* Presl seedling[J]. Journal of Fujian College of Forestry, 2004,24(4):327-330.
- [22] 杨梅, 李丽娟, 蓝金宣, 等. 马尾松 - 肉桂人工复层林生物量及生产力研究 [J]. 西北植物学报, 2013,33(3):585-591.
- YANG M, LI L J, LAN J X, et al. Biomass and productivity of stratified mixed stands of *Pinus massoniana* and *Cinnamomum cassia*[J]. Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica, 2013,33(3):585-591.
- [23] 唐建维, 庞家平, 陈明勇, 等. 西双版纳橡胶林的生物量及其模型 [J]. 生态学杂志, 2009,28(10):1942-1948.
- TANG J W, PANG J P, CHEN M Y, et al. Biomass and its estimation model of rubber plantations in Xishuangbanna, southwest China[J]. Chinese Journal of Ecology, 2009,28(10):1942-1948.
- [24] 王飞军, 陈蕾西, 刘成刚, 等. 不同年龄橡胶 - 催吐萝芙木 - 降香黄檀复合生态系统中植物的生长动态及其生物量 [J]. 中南林业科技大学学报, 2016,36(1):86-93.
- WANG F J, CHEN L X, LIU C G, et al. Dynamics of growth and biomass of two mixed rubber-*Rauwolfia vomitoria*-*Dalbergia odorifera* systems with different stand ages[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology, 2016,36(1):86-93.
- [25] 吴骏恩. 西双版纳地区橡胶农林复合系统内植物的水分利用策略 [D]. 北京: 中国科学院大学, 2017.
- WU J E. Plant water use strategies in rubber based agroforestry systems in Xishuangbanna, southwest China[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2017.
- [26] 高国治, 王明珠, 张斌. 低丘红壤南酸枣 - 花生复合系统物种间水肥光竞争的研究 - II. 南酸枣与花生利用光能分析 [J]. 中国生态农业学报, 2004,12(2):97-99.
- GAO G Z, WANG M Z, ZHANG B. Competition of the light, fertilizer and water between *Choerospondias axillaris* trees and peanut in the red soil of low hilly land: II. Analysis of using light energy of *Choerospondias axillaris* trees and peanut[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2004,12(2):97-99.
- [27] 黎蕾. 光照和施肥对催吐萝芙木生长、光合特性及主要药用成分的影响 [D]. 北京: 中国科学院大学, 2009.
- LI L. Effects of light intensity and fertilization on the growth, photosynthetic characteristics, main medicinal components of *Rauwolfia vomitoria*[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2009.
- [28] 陶大燕, 罗叶红, 姚贤宇, 等. 上层冠层因子对马尾松肉桂复层林下层林分生物量的影响 [J]. 广西林业科学, 2015,44(1):12-17.
- TAO D Y, LUO Y H, YAO X Y, et al. Effect of upper canopy factor on biomass of the lower layer in multi-layer forests with *Pinus massoniana* and *Cinnamomum cassia*[J]. Guangxi Forestry Science, 2015,44(1):12-17.
- [29] GUO K, WERGER M J A. Responses of *Fagus engleriana* seedlings to light and nutrient availability[J]. Acta Botanica Sinica, 2004,46(5):533-541.
- [30] POORTER H, NAGEL O. The role of biomass allocation in the growth response of plants to different levels of light, CO₂, nutrients and water: a quantitative review [J]. Australian Journal of Plant Physiology, 2000,27(12):1191-1191.
- [31] WANG G G, BAUERLE W L, MUDDER B T. Effects of light acclimation on the photosynthesis, growth, and biomass allocation in American chestnut (*Castanea dentata*) seedlings[J]. Forest Ecology and Management, 2006,26(1-3):173-180.
- [32] 萧自位, 王秀华, 郑丽, 等. 西双版纳不同胶林复合生态系统的生物量及其分配特征 [J]. 中南林业科技大学学报, 2014,34(2):108-116.
- XIAO Z W, WANG X H, ZHENG L, et al. Biomass and its allocation pattern of monoculture and mixed rubber-tree plantations in Xishuangbanna[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology, 2014,34(2):108-116.
- [33] 张森, 谢志英, 陈蕾西, 等. 西双版纳橡胶 - 萝芙木 - 大叶千斤拔复合生态系统的生物量及年生长量 [J]. 生态学杂志, 2016,35(7):1704-1712.
- ZHANG S, XIE Z Y, CHEN L X, et al. Biomass and annual growth of different aged rubber plantations mixed with *Rauwolfia vomitoria* and *Flemingia macrophylla* in Xishuangbanna[J]. Chinese Journal of Ecology, 2016,35(7):1704-1712.
- [34] 曹建华, 梁玉斯, 蒋菊生. 胶 - 农复合生态系统对橡胶园小环境的影响 [J]. 热带农业科学, 2008,28(1):1-8,14.
- CAO J H, LIANG Y S, JIANG J S. Study on effect of agrorubber ecosystem to microenvironment of rubber plantation[J]. Chinese

- Journal of Tropical Agriculture, 2008,28(1):1-8,14.
- [35] 汪汇海, 李德厚. 胶茶人工群落在改善山地土壤生态环境上的作用 [J]. 山地学报, 2003,21(3):318-323.
- WANG H H, LI D H. Effect of man-made rubber-tea community improving ecological condition of soil[J]. Journal of Mountain Science, 2003,21(3):318-323.
- [36] 杨桂明. 推行胶桂间作提高橡胶树防灾减灾能力 [J]. 中国热带农业, 2009,76(5):41-42.
- YANG G M. Improving disaster prevention and reduction ability of rubber trees by intercropping with cinnamon[J]. Chinese Tropical Agriculture, 2009,76(5):41-42.
- [37] 曾欢欢, 刘文杰, 吴骏恩, 等. 西双版纳地区丛林式橡胶林内植物的水分利用策略 [J]. 生态学杂志, 2019,38(2):394-403.
- ZENG H H, LIU W J, WU J E, et al. Plant water use strategies in jungle rubber in Xishuangbanna, southwest China[J]. Chinese Journal of Ecology, 2019,38(2):394-403.
- [38] QI D L, WU Z X, YANG C A, et al. Can intercropping with native trees enhance structural stability in young rubber (*Hevea brasiliensis*) agroforestry system?[J]. European Journal of Agronomy, 2021,130(8):126353.
- [39] 周晓光. 国外经济林产业技术发展经验及启示 [J]. 经济林研究, 2020,38(4):246-252.
- ZHOU X G. Foreign experience and enlightenment of economic forest industry and technology development[J]. Non-wood Forest Research, 2020,38(4):246-252.
- [40] ERSKINE P D, LAMB D, BRISTOW M. Tree species diversity and ecosystem function: can tropical multi-species plantations generate greater productivity?[J]. Forest Ecology and Management, 2006,233(2-3):205-210.
- [41] FORRESTER D I. The spatial and temporal dynamics of species interactions in mixed-species forests: from pattern to process[J]. Forest Ecology and Management, 2014,312(1):282-292.
- [42] ISAAC M E, BORDEN K A. Nutrient acquisition strategies in agroforestry systems[J]. Plant and Soil, 2019,444(1-2):1-19.
- [43] FORRESTER D I, KOHNLE U, ALBRECHT A T, et al. Complementarity in mixed-species stands of *Abies alba* and *Picea abies* varies with climate, site quality and stand density[J]. Forest Ecology and Management, 2013,304(6):233-242.
- [44] PEOPLES M B, GAULT R R, LEAN B, et al. Nitrogen fixation by soybean in commercial irrigated crops of central and southern new south Wales[J]. Soil Biology & Biochemistry, 1995,27(4-5):553-561.
- [45] 任静, 刘小勇, 刘芬, 等. 核桃 / 大豆间作对氮素吸收利用及转移的影响 [J]. 经济林研究, 2022,40(1):1-10.
- REN J, LIU X Y, LIU F, et al. Absorption, utilization and transfer efficiency of nitrogen in walnutsoybean intercropping pattern[J]. Non-wood Forest Research, 2022,40(1):1-10.
- [46] 王秀华, 谢志英, 赵永祥, 等. 西双版纳不同年龄橡胶林下大叶千斤拔的生物量动态及其模型 [J]. 中国农学通报, 2014,30(19):30-35.
- WANG X H, XIE Z Y, ZHAO Y X, et al. Biomass and its estimation model of *Flamingia macrophylla* intercropped with rubber plantations with different ages in Xishuangbanna[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2014,30(19):30-35.

[本文编校: 吴 毅]