

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

张 森^{1,2} 谢志英³ 陈蕾西⁴ 刘成刚² 赵永祥³ 王秀华³ 刘长安² 唐建维^{2*}

(¹中国科学院大学, 北京 100049; ²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; ³西双版纳州土壤肥料工作站, 云南景洪 666100; ⁴中国药科大学生命科学与技术学院, 南京 211198)

摘要 为探明 3 个不同年龄橡胶 (*Hevea brasiliensis*) 林下萝芙木 (*Rauvolfia vomitoria*)、大叶千斤拔 (*Flemingia macrophylla*) 及复合系统与橡胶纯林的年生长量及生物量, 根据 3 个林龄 (8、11 和 20 a) 两种不同种植模式各样地的调查数据, 计算了不同种植模式中橡胶、大叶千斤拔及萝芙木的年生长量。同时利用 49 和 29 株不同大小的大叶千斤拔和萝芙木样木个体建立了以基径平方乘以高度 (BD^2H) 为自变量的生物量回归模型, 根据所建立的生物量回归模型估算了不同种植模式各林分的生物量及生物量增量, 并对其组成和分配特征进行了分析。结果表明: 8、11 和 20 a 生复合模式中的橡胶、大叶千斤拔和萝芙木的胸径或基径的年生长量和生物量增量均随着橡胶年龄的增大而减少, 其橡胶的年胸径生长量分别是同龄橡胶纯林的 1.16、1.01 和 1.17 倍, 年生物量增量分别是同龄橡胶纯林的 1.13、1.08 和 1.49 倍; 3 个林龄复合模式和橡胶纯林的总生物量均随林龄的增大而增长, 而生物量增量随林龄而下降; 复合模式的总生物量分别是其同龄橡胶纯林的 2.35、1.60 和 1.17 倍, 生物量增量 (53.20、33.64 和 11.18 $t \cdot hm^{-2}$) 分别是同龄橡胶纯林的 5.13、4.48 和 2.63 倍; 不论是复合模式还是橡胶纯林, 其生物量器官分配均呈现出茎和枝所占的比例随林龄而增长, 叶和根所占的比例随林龄而下降的规律。在橡胶林下种植其他植物种类, 能显著提高生物量积累。

关键词 橡胶; 复合生态系统; 生长量; 生物量

Biomass and annual growth of different aged rubber plantations mixed with *Rauvolfia vomitoria* and *Flemingia macrophylla* in Xishuangbanna. ZHANG Sen^{1,2}, XIE Zhi-yin³, CHEN Lei-xi⁴, LIU Cheng-gang², ZHAO Yong-xiang³, WANG Xiu-hua³, LIU Chang-an², TANG Jian-wei^{2*} (¹University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; ²Key Laboratory of Tropical Plant Resources and Sustainable Use, Xishuangbanna Tropical Botanical Garden, Chinese Academy of Sciences, Mengla 666303, Yunnan, China; ³Xishuangbanna Station of Soil Fertilizer, Jinghong 666100, Yunnan, China; ⁴College of Life Science and Technology, China Pharmaceutical University, Nanjing 211198, China).

Abstract: Mixed-species forest plantations have been established in a large area in the tropics of China, playing an important role in carbon sequestration. To understand the changes in annual growth and biomass allocation, we investigated height (H), diameter at breast height (D) and basal diameter (BD) from different aged rubber plantations (8-, 11- and 20-year-old) mixed with *Rauvolfia vomitoria* and *Flemingia macrophylla* (RM) and adjacent pure rubber plantations (CK) in Xishuangbanna, in December 2013 and 2014. Also, the biomass regression models were established. The annual growth in D or BD and biomass increment of different trees in RM decreased with increasing stand age. The D 's annual growth of rubber trees in 8-, 11- and 20-year-old RM was 1.16, 1.01 and 1.17 times of that in CK, with annual biomass increment being

中国科学院农业项目办公室资助项目 (KSCX2-EW-B-12 和 KSCX2-YW-N-44-09)、西双版纳州科技局资助项目 (200915 和 YX201102)、中国科学院“一三五”专项 (XTBG-T03) 和中国科学院 STS 项目 (KFJ-EW-STS-084) 资助。

收稿日期: 2015-10-13 接受日期: 2016-04-16

* 通讯作者 E-mail: tangjw@xtbg.org.cn

1.13, 1.08 and 1.49 times, respectively. The total biomass was 111.16, 112.53 and 119.53 $t \cdot hm^{-2}$ in the 8-, 11- and 20-year-old RM, respectively, being 1.35, 0.60 and 0.17 times higher than that in CK. However, the total biomass increment decreased with stand age, ranging from 53.20 $t \cdot hm^{-2}$ in 8-year-old RM, 33.64 $t \cdot hm^{-2}$ in 11-year-old RM to 11.18 $t \cdot hm^{-2}$ in 20-year-old RM, which were 5.13, 4.48 and 2.63 times of that in CK respectively. The relative contributions of stems and branches to total biomass increased with stand age in both RM and CK, while the contributions of leaves and roots decreased. The results suggest that biomass accumulation will be greatly enhanced by constructing mixed-species rubber plantation.

Key words: rubber; complex ecosystem; growth increment; biomass.

森林生态系统所固定的碳量约占陆地植被总固碳量的 82.5% (Sabine *et al.* 2004), 其净生长量和生物量的测算是研究全球气候变化和碳循环的重要基础(汤萃文等, 2010), 是衡量国家或地区在某时段内林业发展和生态建设的重要指标, 森林生态系统能量和营养循环的研究首先依赖于生物量和生产力的数据(杜虎等, 2014)。根据第八次全国森林资源清查结果, 中国人工林面积约为 6.9×10^7 hm^2 , 居世界首位(刘世荣等, 2015)。橡胶林由于其良好的经济效益, 在中国种植面积已达近 100×10^4 hm^2 , 约占中国人工林的 1.5% (FAO *et al.* 2011)。西双版纳作为云南省橡胶种植的主要区域, 在 1976—2003 年, 当地橡胶林增加了 90%, 森林总面积损失约 28%, 其中热带季节雨林减少了 67% (Li *et al.*, 2008)。从生态系统水平上对橡胶林生物量、年生产量及其分布格局进行研究具有极其重要的意义。

橡胶林大面积的单一种植已对种植区域的气候变迁、生物多样性、水分涵养、景观格局、土壤养分、病虫害等方面带来了显著的负面效应(张佳琦等, 2013), 在不影响橡胶产量的前提下, 减缓橡胶林负面的生态影响以及寻求合理的解决措施, 已成为当前橡胶种植业急需解决的重大问题。橡胶林复合生态系统是在替代原有刀耕火种耕作措施的基础上, 将乔木和灌木有机结合的一种复合生态系统, 利用其自然再生和演替能力, 能为社会提供饲料和其他林副产品并兼具一定生态效益的一种新型的土地利用方式(Noble *et al.*, 1997)。由于其良好的经济效益和生态效应, 已经受到了许多学者的广泛研究和关注(潘超美等, 2000; 庞家平等, 2009; 梁艳丽等, 2010)。为阐明橡胶林复合生态系统中林下植物对系统生物量和年生长量的影响, 本研究以同龄的橡胶纯林为对照, 对 3 个不同林龄橡胶林下仅种植 4 年的林下植物对橡胶年生物量及生长量的影响进行分析, 并探索随着橡胶林龄的增加林下植物的生长

量和生物量及复合生态系统总生物量的动态变化规律, 以期今后合理估算橡胶人工林生物量和年生长量提供科学依据, 同时为加强橡胶人工林的经营管理和促进森林的固碳测算提供技术支撑。

1 研究地区与研究方法

1.1 研究区概况

研究地点位于西双版纳傣族自治州勐腊县勐腊镇龙林村委会曼降囡村 ($21^{\circ} 19' N - 21^{\circ} 40' N$, $101^{\circ} 2' E - 101^{\circ} 46' E$), 年均日照时数在 1850 h 左右, 年平均气温 $21.5^{\circ} C$, 年平均降雨量 1500 mm 左右。该地区属于西南热带季风气候, 干湿季变化明显, 一年可分为干热、雨季和雾凉季, 3—5 月为干热季, 气温较高, 雨量较少; 6—10 月为雨季, 气候湿热, 且集中了全年 85% 的降水; 11 月至次年 2 月为雾凉季, 降雨较少, 但早晚有浓雾, 空气湿度较大, 可以弥补此时期降雨量的不足。土壤类型以砖红壤为主, pH 5.0 左右, 土层较厚。

1.2 研究方法

1.2.1 样地的选择与建立 试验分别选取种植于 2006、2003 和 1994 年 3 个不同年龄的橡胶林(至 2014 年 12 月观测时林龄分别为 8、11 和 20 a) 作为研究对象, 橡胶的种植规格为 $2.5 m \times 8 m$ 。2010 年 6 月将大叶千斤拔和萝芙木分别种植在橡胶的行距间, 其中大叶千斤拔的种植规格为 $1 m \times 0.8 m$, 在橡胶的行距间种植 7 行 (10830 株 $\cdot hm^{-2}$); 萝芙木的种植规格为 $2 m \times 3 m$, 在橡胶的行距间种植 2 行 (1200 株 $\cdot hm^{-2}$)。同时选取林龄、海拔、坡度、坡向均相同的单一橡胶纯林作为对照。每个林龄的复合模式样地和对照样地均设置 3 块 $20 m \times 25 m$ 的重复, 各样地的基本特征见表 1。每年年底各样地均施放等量的橡胶专用复合肥(每株约 0.3 kg), 同时将大叶千斤拔的地上部分(离地面 30 cm) 砍除, 并覆盖在林地上。而橡胶纯林(对照) 则在 5 月底和

表1 各样地基本特征

Table 1 Basic characteristics of plots

林龄 (a)	地理位置	海拔 (m)	坡度 (°)	坡向 (°)	坡位	橡胶密度 (株·hm ⁻²)	胸径 (cm)	高度 (m)	郁闭度 (%)
8	21°33'36.62"N 101°28'58.84" E	870~880	25~30	SW60	中下	495.0	13.3±1.5	7.4±0.3	40.0±5.0
11	21°33'35.39"N 101°28'59.74"E	870~880	25~30	SW10	中下	495.0	16.5±1.5	10.0±0.4	50.0±8.0
20	21°33'26.48"N 101°28'40.32" E	880~890	20~25	SW50	中下	450.0	20.5±1.6	15.0±0.5	85.0±10.0

11 月底砍除林地上的杂草。

1.2.2 大叶千斤拔和萝芙木年生长量的调查及生物量测定 2013 年和 2014 年 12 月在每块样地 (25 m×20 m) 的上、中、下对已挂牌编号的 1 行大叶千斤拔和萝芙木 (各 15 株), 分别进行基径、高度和萌枝数量的测定, 根据 2 次的调查数据, 计算其基径、高度的年生长量。为建立更为优化的大叶千斤拔生物量回归模型, 在原有的大叶千斤拔样木 28 株的基础上(王秀华等 2014) 在 2014 年 12 月又选取了 21 株不同大小的大叶千斤拔植株个体, 采用收获法分别测定了各个体茎、枝、叶和根的生物量。同时对 29 株不同大小的萝芙木植株个体进行了茎、枝、叶、根的生物量调查。测定鲜重后的茎、枝、根样品在 105 °C、叶在 75 °C 烘干至恒重称重, 以计算 2 种植物单株及各器官的干重, 并利用样品各器官(茎、枝、叶、根)的干重和总干重建立相应的生物量回归模型, 由此推算出不同林龄橡胶林下大叶千斤拔和萝芙木个体各器官的生物量和单位面积上的总生物量。

1.2.3 橡胶年生长量的调查和生物量的测定 2013 年和 2014 年的 12 月对各样地内所有的橡胶树在其胸径标志处进行观测, 根据 2 次的调查数据, 计算其胸径的年生长量。橡胶的生物量采用唐建维等(2009) 建立的生物量回归模型(表 2) 进行估算。

1.2.4 生物量增量的计算 根据已建立的橡胶、大叶千斤拔和萝芙木的生物量模型及 2 次的观测调查数据, 对 3 种植物各器官的生物量进行估算。橡胶和萝芙木各器官的生物量增量即为 2014 年各器官

的生物量减去 2013 年各器官的生物量之差值。大叶千斤拔因每年年底进行砍伐, 其茎、叶的生物量增量即为 2014 年生长出的茎、叶生物量的估算值, 根系的生物量增量则为 2 次估算的生物量之差值。3 个林龄复合模式林分的生物量增量即为各样地 3 种植物个体生物量增量的平均值乘以单位面积上的株数。本试验中, 因对林下进行人为的抚育管理, 故未对草本层生物量和林分凋落物量等进行调查和估算。

1.3 数据处理

数据整理和统计分析采用 Microsoft Office Excel 2013。并利用 SPSS 18.0 软件进行单因素方差分析 (ANOVA), Duncan 法检验相应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。

2 结果与分析

2.1 大叶千斤拔和萝芙木生物量模型的建立

鉴于乔木树种生物量的预测经验, 可选择线性、对数、指数、幂函数以及多项式等回归模型建立灌木生物量预测模型(刘凤娇等 2011)。对大量植物群落生物量的研究表明, 回归分析是比较理想且简单适用的模型(张峰等, 1991; 朱志诚, 1993)。为建立大叶千斤拔和萝芙木的生物量模型, 根据 49 株和 29 株不同大小的大叶千斤拔和萝芙木个体各器官的生物量, 以不同个体基径的平方和高度的乘积 (BD^2H) 及生物量作为模型参数, 采用多种线性和非线性的回归方程对其进行回归分析, 发现以幂函数拟合的生物量模型的相关系数最高, 且均达到极显著水平 ($P < 0.01$)。能够很好地对大叶千斤拔和萝芙木个体的各器官生物量进行预测。

2.2 不同种植模式中橡胶的胸径年生长量和生物量增量及其器官分配

对不同种植模式中 3 个年龄橡胶的生长状况进行比较分析, 不仅可以反映出橡胶生长随其林龄增大的变化趋势, 同时也能发现林下植物的种植对橡胶胸径生长量的影响。结果表明, 随着橡胶林龄的

表2 橡胶生物量回归模型

Table 2 Biomass models of *Hevea brasiliensis*

器官	生物量优化回归模型	相关系数
茎	$W_S = 0.0504D^{2.5968}$	$R^2 = 0.987^{**}$
枝	$W_B = 0.0154D^{2.5630}$	$R^2 = 0.911^{**}$
叶	$W_L = 0.0071D^{2.2159}$	$R^2 = 0.955^{**}$
根	$W_R = 0.1084D^{1.9482}$	$R^2 = 0.971^{**}$
总	$W_T = 0.1364D^{2.4374}$	$R^2 = 0.989^{**}$

** $P < 0.01$ 。样本数量 $n = 30$ 。胸径大小 $3.1 \text{ cm} \leq D \leq 38.1 \text{ cm}$ 。

表 3 大叶千斤拔和萝芙木生物量回归模型

Table 3 Biomass models of *Flemingia macrophylla* and *Rauvolfia vomitoria*

林下植物	样本数量及植株大小	器官	优化回归模型	相关系数
萝芙木	$n = 29$ $0.79 \text{ cm} \leq BD \leq 14.50 \text{ cm}$ $0.84 \text{ m} \leq H \leq 5.39 \text{ m}$	茎	$W_{S_1} = 0.0216(BD^2 H)^{0.9955}$	$R^2 = 0.9880^{**}$
		枝	$W_B = 0.0026(BD^2 H)^{1.2425}$	$R^2 = 0.9801^{**}$
		叶	$W_L = 0.0055(BD^2 H)^{1.0006}$	$R^2 = 0.9496^{**}$
		根	$W_R = 0.0186(BD^2 H)^{0.8978}$	$R^2 = 0.9667^{**}$
		总	$W_T = 0.0512(BD^2 H)^{0.9886}$	$R^2 = 0.9867^{**}$
大叶千斤拔	$n = 49$ $0.72 \text{ cm} \leq BD \leq 9.28 \text{ cm}$ $82 \text{ cm} \leq H \leq 380 \text{ cm}$	茎	$W_{S_2} = 0.8438(BD^2 H)^{0.7450}$	$R^2 = 0.7550^{**}$
		叶	$W_L = 2.4415(BD^2 H)^{0.4827}$	$R^2 = 0.7091^{**}$
		根	$W_R = 0.7636(BD^2 H)^{0.6627}$	$R^2 = 0.7996^{**}$
		总	$W_T = 3.2992(BD^2 H)^{0.6593}$	$R^2 = 0.7512^{**}$

H 为株高, BD 为基径, ** $P < 0.01$ 。

增加,两种不同种植模式中的橡胶胸径年生长量都有减缓的趋势(表 4)。在复合模式中 8 a 生橡胶的胸径年生长量分别是 11 和 20 a 生橡胶纯林的 1.81 和 3.31 倍,11 a 生橡胶是 20 a 生橡胶纯林的 1.83 倍;而在橡胶纯林中 8 a 生橡胶的胸径年生长量分别是 11 和 20 a 生橡胶的 1.57 和 3.34 倍,11 a 生橡胶是 20 a 生橡胶的 2.12 倍。本研究中,复合模式中 3 个不同林龄的橡胶胸径年生长量均大于橡胶纯林 8、11 和 20 a 生复合模式中橡胶的胸径年生长量分别是纯林的 1.16、1.01 和 1.17 倍。但 11 a 生的橡胶在两种不同模式中的年生长量差异不显著 ($P > 0.05$),而 8 和 20 a 生橡胶在两种模式中的胸径生长量均存在显著差异 ($P < 0.05$)。

根据橡胶生物量回归模型及 2 次不同的样地调查数据,推算出 3 个不同林龄 2 种植模式下橡胶的生物量,由此计算出橡胶的年生物量增量(表 4)。复合系统中不同林龄的橡胶各器官及总生物量的年增量均大于橡胶纯林。8、11 和 20 a 生橡胶在复合系统中的年生物量增量分别是其纯林的 1.13、1.08 和 1.49 倍。这说明在橡胶林下种植大叶千斤拔和萝芙木促进了橡胶的生长,提高了其生物量的积累。

从 2 种不同种植模式中橡胶生物量增量的器官

分配来看(表 4),不论是复合模式还是橡胶纯林,主要以茎所占的比例最大,且随林龄而增长,分别从 8 a 生的 62.27%、62.49% 增长到 20 a 生的 64.88%、64.24%;其次为枝和根,约占 1/4,但其分配比例随林龄的增长则体现出不同的规律性,枝所占的比例随林龄而缓慢增长,分别从 8 a 生的 17.21%、17.16% 增长到 20 a 生的 17.64%、17.65%;而根所占的比例则随林龄而下降,分别从 8 a 生的 17.80%、17.65% 下降到 20 a 生的 14.96%、15.53%;叶所占的比例最小,不足 1/40,且随林龄而逐渐下降,分别从 8 a 生的 2.72%、2.70% 下降到 20 a 生的 2.52%、2.58%。3 个不同林龄的橡胶在不同的种植模式下各器官生物量增量的器官分配规律基本一致,8 a 生为茎>根>枝>叶;而 11 和 20 a 生为茎>枝>根>叶,这也表明随着林龄的增长不同种植模式下的橡胶各器官生物量积累的动态变化。

2.3 不同林龄复合模式中大叶千斤拔和萝芙木的年生长量

对 3 个不同林龄复合模式中林下植物生长动态的调查结果分析表明,随着橡胶林龄的增加,大叶千斤拔和萝芙木的基径、高度年生长量以及大叶千斤拔的萌枝数呈逐渐减小的趋势(表 5)。8 a 生复合

表 4 不同林龄两种植模式中橡胶的年生长量和生物量增量及其器官分配

Table 4 Annual growth and biomass accumulation and its organ allocation of mixed rubber-*Rauvolfia vomitoria*-*Flemingia macrophylla* systems and rubber plantations in three different stand ages

林龄 (a)	种植模式	年生长量 (cm)	年生物量增量 ($t \cdot \text{hm}^{-2}$)				
		胸径	茎	枝	叶	根	总计
8	复合	1.59±0.10 a	7.31±0.62	2.02±0.17	0.32±0.03	2.09±0.16	11.74±0.98 a
	对照	1.37 ±0.01 b	6.48±0.36	1.78±0.10	0.28±0.12	1.83±0.76	10.37±0.58 a
11	复合	0.88±0.04 a	5.16±0.33	1.42±0.09	0.21±0.01	1.34±0.59	8.13±0.28 a
	对照	0.85±0.05 a	4.75±2.19	1.30±0.60	0.20±0.09	1.26±0.60	7.51±3.60 a
20	复合	0.48±0.08 a	4.12±1.54	1.12±0.42	0.16±0.06	0.95±0.32	6.35±0.38 a
	对照	0.41±0.04 b	2.73±0.38	0.75±0.10	0.11±0.01	0.66±0.08	4.25±0.58 a

表中数据为平均值±标准差,不同字母表示差异达到显著水平 ($P < 0.05$)。

表 5 不同林龄复合模式中大叶千斤拔和萝芙木的年生长量
Table 5 Annual basal diameter and height growth of *Flemingia macrophylla* and *Rauvolfia vomitoria* planted in mixed rubber ecosystems with three different ages

林下植被	橡胶林龄 (a)	基径 (cm)	高度 (cm)	萌枝数
萝芙木	8	2.17±0.20 a	0.95±0.19 a	-
	11	1.35±0.54 b	0.54±0.24 b	-
	20	0.77±0.20 b	0.26±0.17 b	-
大叶千斤拔	8	2.49±0.14 a	3.89±0.21 a	5.67±0.04 a
	11	2.37±0.15 a	3.56±0.06 b	5.01±0.16 a
	20	0.68±0.05 b	0.92±0.10 c	3.71±0.52 b

表中数据为平均值±标准差,不同字母表示差异达到显著水平 ($P<0.05$)。

模式中大叶千斤拔的基径、高度年生长量及萌枝数分别是 11 a 生的 1.05 ($P>0.05$)、1.09 ($P<0.05$) 和 1.13 倍 ($P>0.05$) ,是 20 a 生的 3.66、4.23 和 1.53 倍 ($P<0.05$) ; 11 a 生复合模式中大叶千斤拔的基径、高度年生长量及萌枝数分别是 20 a 生复合模式中的 3.49、1.35 和 1.35 倍 ($P<0.05$) 。

就不同年龄橡胶林下萝芙木的生长而言 8 a 生橡胶林下萝芙木的基径和高度年生长量分别是 11 a 生橡胶林下的 1.61 和 1.76 倍 ($P<0.05$) ,是 20 a 生橡胶林下的 2.82 和 3.65 倍 ($P<0.05$) ; 11 a 生橡胶林下萝芙木的年基径和高度生长量分别是 20 a 生橡胶林下的 1.75 和 2.08 倍 ($P>0.05$) 。

2.4 不同林龄橡胶林下大叶千斤拔和萝芙木的年生物量增量及器官分配

采用已建立的大叶千斤拔和萝芙木的生物量回归模型,对 3 个不同年龄橡胶林下的两种植物的生物量进行估算。结果表明,随着橡胶林龄的增加,大叶千斤拔和萝芙木的生物量增量均呈逐渐减小的趋势(表 6)。8 a 生橡胶林下萝芙木和大叶千斤拔的生物量增量分别是 11 a 生橡胶林下萝芙木和大叶千斤拔的 2.76 和 1.44 倍 ($P<0.05$) ,是 20 a 生橡胶林下萝

芙木和大叶千斤拔的 9.63 和 8.30 倍 ($P<0.01$) 。 11 a 生橡胶林下萝芙木和大叶千斤拔的生物量增量分别是 20 a 生橡胶林下萝芙木和大叶千斤拔的 3.50 和 5.77 倍 ($P<0.01$) 。

就 3 个不同林龄复合模式中两种植物的各器官生物量增量而言,大叶千斤拔以茎的增量最大,叶次之,根最小,呈现出茎的生物量增量随林龄而下降,叶和根则随林龄呈上升的趋势。而萝芙木在 3 个不同林龄复合模式中各器官的生物量增量与大叶千斤拔有所不同,在 8、11 a 生复合模式中,萝芙木的各器官生物量增量的大小顺序为:茎>枝>根>叶,而在 20 a 生橡胶林中,则是:茎>根>枝>叶。呈现出茎和根的生物量增量随林龄而增长,枝随林龄而下降,叶随林龄增长非常缓慢的趋势。

2.5 不同林龄复合模式林分的生物量增量及其组成

在 3 个不同林龄复合模式中,林分的生物量增量随林龄的增长而下降(图 1) 8 a 生复合模式林分的生物量增量达 53.20 t·hm⁻² ,分别是 11 a 和 20 a 生复合模式的 1.58 和 4.76 倍。这主要是萌生能力

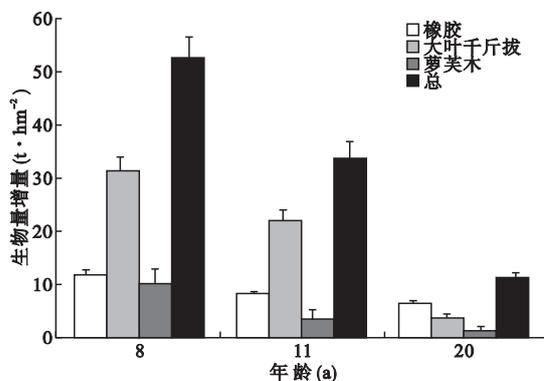


图 1 不同林龄复合模式中林分的年生物量增量及其组成
Fig.1 Annual biomass increment and its allocation of mixed rubber - *Rauvolfia vomitoria* - *Flemingia macrophylla* systems in three different stand ages

表 6 不同林龄橡胶林下大叶千斤拔和萝芙木的生物量增量及器官分配

Table 6 Annual biomass accumulation and its allocation of *Flemingia macrophylla* and *Rauvolfia vomitoria* planted in rubber plantation with three different ages

植物名称	橡胶林龄 (a)	年生物量增量 (t·hm ⁻²)				
		茎	枝	叶	根	总计
萝芙木	8	4.28±4.45 a	2.60±2.71 a	1.12±1.17 a	1.92±1.99 a	9.92±2.93 a
	11	1.63±1.21 b	0.79±0.66 b	0.41±0.31 b	0.77±0.53 b	3.60±2.64 b
	20	0.47±0.14 c	0.18±0.06 c	0.12±0.04 c	0.26±0.07 c	1.03±0.65 c
大叶千斤拔	8	18.03±0.10 a	-	11.79±0.04 a	1.72±0.17 a	31.54±2.25 a
	11	12.28±0.11 a	-	8.57±0.05 a	1.06±0.08 a	21.91±2.07 a
	20	1.84±0.02 b	-	1.51±0.01 b	0.45±0.10 b	3.80±0.53 b

表中数据为平均值±标准差,不同字母表示差异达到显著水平 ($P<0.05$) 。

表 7 不同种植模式林分的总生物量及其分配

Table 7 Total biomass and its allocation of mixed rubber-Rauvolfia vomitoria-Flemingia macrophylla systems and rubber plantations in three different stand ages

林龄 (a)	模式	树种	茎		枝		叶		根		总		
			生物量 (t·hm ⁻²)	比例 (%)	生物量 (t·hm ⁻²)	比例 (%)	生物量 (t·hm ⁻²)	比例 (%)	生物量 (t·hm ⁻²)	比例 (%)	生物量 (t·hm ⁻²)	比例 (%)	
8	复合	橡胶	28.76±14.22	25.87	8.01±0.48	7.21	1.44±0.57	1.30	10.58±5.09	9.52	48.79±23.9	43.89	
		萝芙木	9.35±0.71	8.41	4.99±0.43	4.49	2.46±0.19	2.21	5.60±8.87	5.04	22.4±1.66	20.15	
		大叶千斤拔	18.03±1.10	16.22	-	-	11.79±2.04	10.61	10.15±2.05	9.13	39.97±4.22	35.96	
		合计	56.14±2.38	50.50	13±0.89	11.69	15.69±0.26	14.11	26.33±0.87	23.69	111.16±4.36	100.00	
11	对照	橡胶	27.93±2.87	59.05	7.78±0.79	16.45	1.39±0.13	2.94	10.20±0.83	21.56	47.30±4.62	100.00	
		复合	橡胶	41.28±3.01	36.68	11.45±0.82	10.18	1.95±0.12	1.73	20.64±1.5	18.34	75.32±5.45	66.93
			萝芙木	4.16±1.25	3.70	1.83±0.58	1.63	1.06±1.10	0.94	2.10±1.04	1.87	9.15±4.97	8.13
			大叶千斤拔	12.28±2.11	10.91	-	-	8.57±1.05	7.62	7.21±2.06	6.41	28.06±3.23	24.94
20	对照	橡胶	42.44±8.53	60.32	11.76±2.33	16.71	2.01±0.34	2.86	14.15±2.14	20.11	70.36±13.35	100.00	
		复合	橡胶	70.01±3.11	58.57	19.30±0.85	16.15	3.08±0.12	2.57	20.51±2.12	17.16	112.90±13.72	94.45
			萝芙木	0.98±0.26	0.82	0.31±0.09	0.26	0.26±0.07	0.22	0.59±0.14	0.49	2.14±0.56	1.79
			大叶千斤拔	1.84±0.12	1.54	-	-	1.51±0.01	1.26	1.14±0.10	0.95	4.49±0.54	3.75
20	对照	合计	72.83±3.96	60.93	19.61±2.42	16.41	4.85±0.31	4.06	22.24±2.03	18.61	119.53±4.76	100.00	
		橡胶	62.39±1.19	61.30	17.23±0.46	16.93	2.82±0.06	2.77	19.34±0.38	19.00	101.78±2.52	100.00	

表中数据为平均值±标准差,不同字母表示差异达到显著水平($P<0.05$)。

强、生长迅速的大叶千斤拔所致,其生物量达 $31.54 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$, 分别是 11 和 20 a 生复合模式中大叶千斤拔的 1.44 和 8.30 倍。与同龄的橡胶纯林相比, 8、11 和 20 a 生复合模式林分的生物量增量分别是同龄橡胶纯林(表 4) 的 5.13、4.48 和 2.63 倍。

在 3 个不同林龄复合模式的生物量增量的树种分配中, 其树种分配比例随着橡胶林龄的增长呈现不同的变化: 在 8 a 和 11 a 生复合模式中以大叶千斤拔的生物量增量最大, 分别高达 59.28% 和 65.13%; 其次是橡胶, 分别为 22.07% 和 24.16%; 萝芙木分别占 18.65% 和 10.70%。而在 20 a 的复合模式中, 则以橡胶的生物量增量最大, 为 56.80%, 其次为大叶千斤拔, 占 33.99%, 萝芙木仅占 9.21%。这表明在 3 个不同林龄的复合模式中, 橡胶和萝芙木的年生物量增量随林龄的增长而下降, 大叶千斤拔则随林龄先上升再下降。

2.6 不同种植模式林分的总生物量及其器官分配

3 个年龄不同种植模式的总生物量动态变化表明(表 7) 不论是橡胶纯林还是复合模式的总生物量均随着林龄的增大而增长。20 a 生橡胶纯林和复合模式的总生物量分别是 11 a 年生橡胶纯林及复合模式的 1.45 和 1.06 倍, 是 8 a 生橡胶纯林及复合模式的 2.15 和 1.07 倍; 而 11 a 生复合模式和橡胶纯林的总生物量分别是 8 a 生复合模式和橡胶纯林的 1.49 和 1.01 倍。从两种不同种植模式的总生物量来看, 8 a、11 a 和 20 a 生复合模式的总生物量分

别是其同龄橡胶纯林的 2.35、1.60 和 1.17 倍, 这说明林下植物的种植对橡胶林复合生态系统的生物量积累具有明显地促进作用。

在复合模式的生物量树种组成中, 橡胶树是其生物量的主要组成部分, 并随林龄而迅速增长, 所占比例从 8 a 生的 43.89%、11 a 生的 66.93% 增长到 20 a 生的 99.95%; 而大叶千斤拔和萝芙木所占比例则随林龄而下降, 分别从 8 a 生的 35.96% 和 20.15%, 11 a 生的 24.94% 和 8.13% 下降到 20 a 生的 3.39% 和 1.62%。在两种不同种植模式的生物量器官分配中, 不论是复合模式还是橡胶纯林, 主要以茎所占的比例最大, 占 50.5%~61.3%; 其次是根, 占 18.34%~26.62%; 枝所占比例为 11.69%~16.93%; 而叶所占的生物量比例最小, 仅为 2.77%~14.11%。其生物量器官分配随林龄呈现出的变化规律是: 茎和枝所占的比例随林龄而增长, 而叶和根所占的比例则随林龄而下降。

3 讨论

复合生态系统中林下植物可以通过“优化作用”来改善上层乔木树种的生长状况(Chaturvedi et al. 2015), 当在林地中种植牧草(特别是豆科牧草)或者实施林草间作, 能够有效地改良土壤性质并提高土壤肥力, 进而提高上层乔木单位面积的生物量(Bambo et al. 2009)。胡举伟等(2013)研究发现, 桑树(*Morus alba*)-苜蓿(*Medicago sativa*)间作后,

间作桑树的株高、叶生物量、茎生物量和叶片粗蛋白含量分别比单作桑树增加了9.2%、36.4%、61.1%和12.7%。本研究中,8、11和20 a生橡胶在复合系统中的各器官及总生物量的年增量均大于橡胶纯林,其中总生物量年增量是其橡胶纯林的1.13、1.08和1.16倍,这与周再知等(1997)发现橡胶和砂仁(*Amomum villosum*)间作后各器官的生物量都高于橡胶纯林,年均净生产量是橡胶纯林的1.88倍的结果相似。大叶千斤拔为豆科千斤拔属耐荫植物,是云南热区值得开发利用的灌木类优良牧草种质和绿肥资源(赵茜,2002)。在橡胶林中种植大叶千斤拔,不仅能通过生物固氮作用满足植物自身的氮素需求,而且能通过富含氮凋落物的分解向土壤归还更多的氮素,提高土壤的氮素水平和有效性,有效提高土壤肥力,从而促进橡胶的生长(Peoples *et al.*, 1995; 庞家平等,2009; 王秀华等,2014)。萝芙木是夹竹桃科萝芙木属常绿灌木,具有繁衍方法简单、生长迅速、根中利血平含量较高等优点,可用来制取降压药,值得规模化人工栽培(管志斌等,2004; 张慧颖等,2007)。在橡胶林里种植萝芙木可使橡胶林形成多层植物,显著改善林内小气候和土壤养分状况,增加土壤有机质的积累,促进橡胶林自身的生物养分循环和林地的生态平衡(罗大敏,1983)。

林下植物的生长发育与森林冠层结构紧密相关(Strong, 2011),已有大量的实验研究表明,在复合生态系统中上层乔木树种的组成、结构和立木度都能够显著影响林下植物的生长状况(Forrester *et al.*, 2013)。通过灰色关联分析,林分平均高度、平均胸径和林龄是与林下生物量联系最为密切的因子(González-Hernández, 1998; 张彦雷等, 2015),而林分郁闭度对林下生物量的影响最大(方海波等, 1998)。在本研究中,大叶千斤拔和萝芙木的年生长和生物量积累都随着橡胶林龄的增加而减少,限制其生长的基本因素为林分郁闭度的增大。森林在幼龄阶段,林下植物的生物量随林分林龄的增大而增加。随着林分的进一步郁闭,限制了林下植被的光照条件,林下植被生物量开始下降;当林分逐渐成熟后,由于林分自疏和老化现象,林冠郁闭度下降,导致林下植物生物量又快速增加(杨昆等, 2006)。方海波等(1998)对杉木人工林林下植物生物量的研究发现,在幼林阶段,林下植物生物量较大(3089.62 kg · hm⁻²);当杉木林林冠逐渐郁闭时,林下植物生物量在生长的第7年达到低谷(1499.00

kg · hm⁻²);当14年林分完全郁闭时,林下植物生物量出现最低值(1269.79 kg · hm⁻²),这与我们的研究结果相似(表7)。研究还表明,尽管两种植被各器官生物量的分配规律基本一致,但随着橡胶林龄的增加,大叶千斤拔的叶在生物量分配中所占的比例越来越高,而茎在生物量分配中所占的比例越来越低,这可能是由于大叶千斤拔是豆科阳性喜光植物,在低光强下可以通过提高叶生物量和SLA(比叶面积)和减少萌枝数来更好地捕获光能和增强植物生长。而萝芙木的生物量分配随着橡胶林龄的增加,根、茎所占的比例越来越高,枝所占的比例越来越低,这可能是由于当光照和土壤可利用氮较少时,植物会有更高的RMR(根生物量比)(黎蕾等, 2010),通过根茎的发展来获得更多的营养,其他的林下植物的生长动态研究也证明了这一点(Poorter *et al.*, 2000)。

本研究中8 a生橡胶纯林及复合模式的生物量分别为47.30和111.16 t · hm⁻²,与气候条件相似的热带、南亚热带地区的人工林相比,8 a生橡胶纯林的生物量仅是海南岛6 a生桉树(*Eucalyptus robusta*)人工林平均生物量(95.58 t · hm⁻²)的一半左右(向仰州, 2012);而复合模式的生物量则大于其平均生物量。同样11 a生橡胶纯林的生物量(70.36 t · hm⁻²)远低于广西南部13 a生杉木(*Cunninghamia lanceolata*)人工林生物量(约98 t · hm⁻²)(康冰等, 2009)及11 a生香樟楠(*Michelia hedyosperma*)人工林的生物量(85.58 t · hm⁻²)(吴敏等, 2013);但11 a生复合模式的生物量(112.53 t · hm⁻²)则远大于两者的生物量,并与桂东南16 a生的马尾松(*Pinus massoniana*)人工林的生物量(110.499 t · hm⁻²)水平相近(谢伟东等, 2009),稍低于西双版纳普文13 a生的西南桦(*Betula alnoides*) + 肉桂(*Cinnamomum cassia*)混交林的活体植物生物量(119.33 t · hm⁻²)(杨德军等, 2009)。20 a生橡胶纯林的生物量(101.78 t · hm⁻²)与海南25 a生更新橡胶林的生物量(103.6 t · hm⁻²)基本相近(周再知等, 1995),但略低于广西17 a生桉树人工林的生物量(112.89 t · hm⁻²)(温远光等, 2008);20 a生复合模式的生物量(132.39 t · hm⁻²)稍低于海南岛30年生海南木莲(*Manglietia fordiana*)人工林的生物量(144.066 t · hm⁻²)(周光益等, 1997)。本研究中3个林龄不同种植模式的生物量大都低于其他的人工林,这主要是不同人工林的种植密度所致,其他人工

林的种植密度是本研究中橡胶种植密度(500株·hm⁻²)的3~4倍,因密度是制约和决定种群生物量动态的主要因素(Forrester *et al.* 2013)。此外,本研究中不同种植模式各林分的生物量因人为的抚育管理,并未包括凋落物量及草本层的生物量,因而其生物量的估算有所偏低。根据萧自位等(2014)的研究,50年生橡胶林复合生态系统最大生物量可达564.104 t·hm⁻²(萧自位等,2014),是本研究中20年生复合模式的4.72倍。这说明橡胶是一种良好的速生树种,具有较高的生物量积累速率;而橡胶林复合生态系统则表现出更大的生物量积累优势,具有更大的碳贮存潜力,是一种较好的人工林组合模式。因在3个不同年龄的橡胶林下所种植的大叶千斤拔和萝芙木只有4年时间,随着林下植物种植时间的增长,两种植物的生长量和干物质积累的变化如何,以及对橡胶生长及其复合生态系统的结构、功能产生怎样的影响仍有待于进一步的观测和研究。

4 结 论

3个不同林龄(8、11和20 a生)橡胶林下大叶千斤拔和萝芙木的种植促进了橡胶的生长,8、11和20 a生复合模式中橡胶的年胸径生长量(1.59、0.88和0.48 cm)分别是同龄橡胶纯林的1.16、1.01和1.17倍,年生物量增量(11.74、8.13和6.35 t·hm⁻²)分别是同龄橡胶纯林的1.13、1.08和1.49倍。但3个不同林龄复合模式中的橡胶、大叶千斤拔和萝芙木的胸径或基径的年生长量和生物量增量因林分郁闭度的增大,均随着橡胶年龄的增大而减少。

3个不同林龄复合模式和橡胶纯林的总生物量均随林龄的增大而增长,而生物量增量随林龄而下降。3个不同林龄复合模式的总生物量(111.16、112.53和119.53 t·hm⁻²)分别是其同龄橡胶纯林的2.35、1.60和1.17倍;生物量增量(53.20、33.64和11.18 t·hm⁻²)分别是同龄橡胶纯林的5.13、4.48和2.63倍。表明在单一的橡胶林下进行其他植物种类的种植,能显著提高生物量积累。

不论是复合模式还是橡胶纯林,其生物量器官分配均呈现出茎和枝所占的比例随林龄而增长,叶和根所占的比例随林龄而下降的规律。

本研究所建立的大叶千斤拔和萝芙木的生物量优化回归模型,其相关性均达到极显著水平,并具有较高的可信度和可操作性,可应用于相似立地条件下大叶千斤拔和萝芙木生物量的估测。

参考文献

- 杜 虎,曾馥平,王克林,等. 2014. 中国南方3种主要人工林生物量和生产力的动态变化. 生态学报, 34(10): 2712-2724.
- 方海波,田大伦,康文星. 1998. 杉木人工林间伐后林下植被生物量的研究. 中南林学院学报, 18(1): 5-9.
- 管志斌. 2004. 南药萝芙木的栽培与开发. 中国野生植物资源, 23(5): 54-56.
- 胡举伟,朱文旭,张会慧,等. 2013. 桑树/苜蓿间作对其生长及土地和光资源利用能力的影响. 草地学报, 21(3): 494-500.
- 康 冰,刘世荣,蔡道雄,等. 2009. 南亚热带杉木生态系统生物量和碳素积累及其空间分布特征. 林业科学, 45(8): 147-153.
- 黎 蕾,蔡传涛,刘贵周. 2010. 光强和施氮量对催吐萝芙木生长及生物量的影响. 中国生态农业学报, 18(1): 57-61.
- 梁艳丽,李 建,岩 对,等. 2010. 橡胶树与魔芋间作对魔芋净光合速率及产量的影响. 长江农业, (24): 35-38.
- 刘凤娇,孙玉军. 2011. 林下植被生物量研究进展. 世界林业研究, 24(2): 53-58.
- 刘世荣,代力民,温远光,等. 2015. 面向生态系统服务的森林生态系统经营: 现状、挑战与展望. 生态学报, 35(1): 1-9.
- 罗大敏. 1983. 胶园间作与土壤肥力. 热带作物研究, (4): 2.
- 潘超美,杨 风,郑海水. 2000. 橡胶林在间种砂仁与咖啡的模式下土壤微生物生物量. 土壤与环境, 9(2): 114-116.
- 庞家平,陈明勇,唐建维,等. 2009. 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. 山地学报, (4): 433-442.
- 汤萃文,陈银萍,陶 玲,等. 2010. 森林生物量和净生长量测算方法综述. 干旱区研究, 27(6): 939-946.
- 唐建维,庞家平,陈明勇,等. 2009. 西双版纳橡胶林的生物量及其模型. 生态学杂志, 28(10): 1942-1948.
- 王秀华,谢志英,赵永祥,等. 2014. 西双版纳不同林龄橡胶林下大叶千斤拔的生物量动态及其模型. 中国农学通报, 30(19): 30-35.
- 温远光,陈 放,刘世荣,等. 2008. 广西按树人工林物种多样性与生物量关系. 林业科学, 44(4): 14-19.
- 吴 敏,李松海,秦武明,等. 2013. 11年生香樟楠人工林的生物量及生产力研究. 西部林业科学, 42(4): 46-51.
- 向仰州. 2012. 海南桉树人工林生态系统生物量和碳储量时空格局(博士学位论文). 北京: 中国林业科学研究院.
- 萧自位,王秀华,郑 丽,等. 2014. 西双版纳不同胶林复合生态系统的生物量及其分配特征. 中南林业科技大学学报, 34(2): 108-116.
- 谢伟东,叶绍明,杨 梅,等. 2009. 桂东南丘陵地马尾松人工林群落生物量及分布格局. 北华大学学报, 10(1): 68-71.
- 杨 昆,管东生. 2006. 林下植被的生物量分布特征及其作

- 用. 生态学杂志, **25**(10): 1252-1256.
- 杨德军, 张劲峰, 邱琼, 等. 2009. 2种西南桦人工林与同地2种天然次生林的林分生物量对比研究. 西部林业科学, **38**(1): 77-81.
- 张峰, 上官铁梁, 李素珍. 1993. 关于灌木生物量建模方法的改进. 生态学杂志, **12**(6): 67-69.
- 张慧颖, 龚云麟, 蔡传涛. 2007. 高效液相色谱法测定萝芙木中利血平的含量. 云南中医药学院学报, **30**(2): 7-9.
- 张佳琦, 薛达元. 2013. 西双版纳橡胶林种植的生态环境影响研究. 中国人口·资源与环境, **23**(11): 304-307.
- 张彦雷, 康峰峰, 韩海荣, 等. 2015. 太岳山油松人工林林下植被生物量影响因子分析. 中南林业科技大学学报, **35**(1): 104-108.
- 赵茜. 2002. 大叶千斤拔——云南热区优良牧草种质资源. 四川草原, (4): 31-32.
- 周光益, 曾庆波, 林明献, 等. 1997. 海南木莲人工林生物量及养分分配. 林业科学研究, **10**(5): 453-457.
- 周再知, 郑海水, 杨曾奖, 等. 1997. 橡胶-砂仁复合系统生物产量营养元素空间格局的研究. 生态学报, **17**(3): 225-233.
- 周再知, 郑海水, 尹光天, 等. 1995. 橡胶树生物量估测的数学模型. 林业科学研究, **8**(6): 624-629.
- 朱志诚, 贾东林. 1991. 陕北黄土高原铁秆篙群落生物量初步研究. 生态学报, **13**(3): 243-251.
- Bambo SK, Nowak J, Blount AR, et al. 2009. Soil nitrate leaching in silvopastures compared with open pasture and pine plantation. *Journal of Environmental Quality*, **38**: 1870-1877.
- Chaturvedi RK, Raghubanshi AS. 2015. Assessment of carbon density and accumulation in mono- and multi-specific stands in Teak and Sal forests of a tropical dry region in India. *Forest Ecology and Management*, **339**: 11-21.
- FAO, IFAD, IMF, et al. 2011. Price Volatility in Food and Agricultural Markets: Policy Responses. Rome, FAO, 2011.
- Forrester DI, Kohnle U, Albrecht AT, et al. 2013. Complementarity in mixed-species stands of *Abies alba* and *Picea abies* varies with climate, site quality and stand density. *Forest Ecology and Management*, **304**: 233-242.
- González-Hernández MP, Silva-Pando FJ, Jiménez MC. 1998. Production patterns of understory layers in several Galician (NW Spain) woodlands: Seasonality, net productivity and renewal rates. *Forest Ecology and Management*, **109**: 251-259.
- Li H, Ma Y, Aide TM, et al. 2008. Past, present, and future land-use in Xishuangbanna China and the implications for carbon dynamics. *Forest Ecology and Management*, **225**: 16-24.
- Noble IR, Dirzo R. 1997. Forests as human-dominated ecosystems. *Science*, **277**: 522-525.
- Peoples M, Gault R, Lean B, et al. 1995. Nitrogen fixation by soybean in commercial irrigated crops of central and southern New South Wales. *Soil Biology & Biochemistry*, **27**: 553-561.
- Poorter H, Nagel O. 2000. The role of biomass allocation in the growth response of plants to different levels of light, CO₂, nutrients and water: A quantitative review. *Australian Journal of Plant Physiology*, **27**: 595-607.
- Sabine CL, Feely RA, Gruber N, et al. 2004. The oceanic sink for anthropogenic CO₂. *Science*, **305**: 367-371.
- Strong WL. 2011. Tree canopy effects on understory species abundance in high-latitude *Populus tremuloides* stands, Yukon, Canada. *Community Ecology*, **12**: 89-98.

作者简介 张森,男,1990年生,汉族,硕士,主要从事农林复合生态系统研究。E-mail: zhangsen@xtbg.ac.cn
责任编辑 张敏
