

DOI: 10.5846/stxb201405090930

付威波, 彭晚霞, 宋同清, 曾馥平, 杜虎, 温远光, 徐慧芳. 不同林龄尾巨桉人工林的生物量及其分配特征. 生态学报, 2014, 34(18): 5234-5241.
Fu W B, Peng W X, Song T Q, Zeng F P, Du H, Wen Y G, Xu H F. Biomass and its allocation characteristics of *Eucalyptus urophylla* × *E. grandis* plantations at different stand ages. Acta Ecologica Sinica, 2014, 34(18): 5234-5241.

不同林龄尾巨桉人工林的生物量及其分配特征

付威波^{1,2,3}, 彭晚霞^{1,2,*}, 宋同清^{1,2}, 曾馥平^{1,2}, 杜虎^{1,2}, 温远光³, 徐慧芳^{1,2,4}

(1. 中国科学院亚热带农业生态研究所亚热带农业生态过程重点实验室, 长沙 410125;

2. 中国科学院环江喀斯特生态系统观测研究站 环江 547100;

3. 广西大学林学院, 南宁 530004; 4. 江西农业大学, 南昌 330045)

摘要:根据 1, 2, 3, 5, 8a 共 5 个不同年龄的 15 块 1000 m²尾巨桉样地(3 次重复)调查资料, 利用 18 株不同年龄和径阶的样木数据, 建立以胸径(*D*)为单变量的生物量回归方程。采用样木回归分析法(乔木层)和样方收获法(灌木层、草本层、地上凋落物)获取不同林龄尾巨桉人工林的生物量, 分析了其组成、分配及不同林龄生物量的变化趋势。结果表明: 林分总生物量随林龄而增加, 1, 2, 3, 5 年生和 8 年生尾巨桉人工林生物量分别为 12.49, 47.75, 64.51, 105.77 和 137.51 t/hm², 其中活体植物占 85.60%—97.61%, 地上凋落物占 2.39%—14.40%; 层次分配方面乔木层占绝对优势, 占 54.80%—91.56%, 且随林龄的增加而增大, 其次为凋落物, 灌木层和草本层生物量较小, 分别占 1.02%—6.47%和 0.28%—24.33%, 均随林龄的增加呈递减趋势; 乔木层以干所占比例最高, 占 51.07%—98.48%, 且随林龄而增加, 枝、叶、根分别占 5.76%—11.80%, 2.17%—21.01%和 6.72%—14.87%, 均随林龄而下降; 灌木层以枝所占比例最高, 为 37.89%—56.79%, 叶和根分别占 16.35%—34.24%和 19.52%—39.52%, 随林龄的变化均不大; 草本层分配 1—5 年生以地上所占比例较大, 8 年生地下所占比例高达 63.87%; 尾巨桉人工林乔木层各器官、地上凋落物及总生物量具有良好的优化增长模型, 其总生物量的增长模型为 $Y = -1.693 \times 10^4 + 3.337 \times 10^4 X - 1.761 X^2$; 8 年生尾巨桉人工林总生物量与 30 年生的木莲人工林持平, 低于热带雨林, 但其年均净生产量高达 17.19 t/hm², 是一个光合效率高、固碳潜力大的速生丰产优良造林树种。

关键词:尾巨桉; 生物量; 林龄; 回归模型; 广西

Biomass and its allocation characteristics of *Eucalyptus urophylla* × *E. grandis* plantations at different stand ages

FU Weibo^{1,2,3}, PENG Wanxia^{1,2,*}, SONG Tongqing^{1,2}, ZENG Fuping^{1,2}, DU Hu^{1,2}, WEN Yuanguang³, XU Huifang^{1,2,4}

1 Key Laboratory of Agro-ecological Processes in Subtropical Region, Institute of Subtropical Agriculture, CAS Changsha 410125, China

2 Huanjiang Observation and Research Station of Karst Ecosystem, Chinese Academy of Sciences Huanjiang, 547100, China

3 Forestry College of Guangxi University Nanning 530004, China

4 Jiangxi Agricultural University, Nanchang 330045, China

Abstract: To explore biomass dynamics and its allocation in *Eucalyptus urophylla* × *E. grandis* plantations at different stand ages (1, 2, 3, 5, 8a), fifteen plots with an area of 20 m × 50 m each, were constructed in Guangxi, southwest China. The biomass of single variable regression equation for *DBH* (diameter at breast height) was established based the data of 18 sample trees of *E. urophylla* × *E. grandis* with different ages and *DBH*. Regression analysis of sample trees in arbor layer and harvest method in quadrats for shrubs, herbs and litterfall layers, were applied to calculate the biomass of *Eucalyptus*

基金项目:中国科学院战略性先导科技专项(XDA05050205); 国家自然科学基金项目(31370485, U1033004)共同资助

收稿日期:2014-05-09; **修订日期:**2014-08-11

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: wxpeng@isa.ac.cn

urophylla × *E. grandis* plantations at different ages, and to analyze its composition, distribution patterns, and variation trend. The results showed that the total biomass of the plantations increased with stand age, being 12.94 t/hm² in 1a stand, 47.75 t/hm² in 2a stand, 64.51 t/hm² in 3a stand, 105.77 t/hm² in 5a stand, 137.51 t/hm² in 8a stand, with the living biomass and litter accounted for 85.60% to 97.61%, and 2.39% to 14.40%, respectively, for the five stages. Arbor layer dominated the *E. urophylla* × *E. grandis* plantation responsible for from 54.80% to 91.56% of the total biomass and the dominance increased with stand age. The litter layer was ranked the second in plantation biomass. The biomass of shrub and herb layers was very low, responsible for 1.02% to 6.47% and 0.28% to 24.33%, respectively, and the ratios decreased with stand age. In the arbor layer, trunk accounted for 51.07% to 98.48% of the biomass, and the ratios increased along with stand age, while branches, leaves, and roots were responsible for 5.76% to 11.80%, 2.17% to 21.01%, 6.72% to 14.87%, respectively, and the ratios of all the compartments decreased with stand age. In the shrub layer, branch accounted for the highest proportion (37.89% to 56.79%) of the total biomass while leaves and roots accounted for 16.35% to 34.24% and 19.52% to 39.52%, respectively, with little variations among stand ages. In the grass layer, the aboveground biomass was larger than the underground biomass from 1a stand to 5a stand, while the underground biomass accounted for 63.87% of the total biomass for the 8a stage. The total biomass and biomass of different compartments for *E. urophylla* × *E. grandis* plantations had good growth models with the total biomass increase represented by $Y = -1.693 \times 10^4 + 3.337 \times 10^4 X - 1.761 X^2$. Compared with other forests, the total biomass of 8a *E. urophylla* × *E. grandis* plantation was equal to the 32 a *Phoebe bourmei* plantation, while lower than the tropical rain forests. However, the net annual biomass increment of *E. urophylla* × *E. grandis* plantation was 17.19 t hm⁻² a⁻¹, which indicated that *E. urophylla* × *E. grandis* was a fast-growing forest tree species with high photosynthesis efficiency and carbon sequestration capacity.

Key Words: *Eucalyptus urophylla* × *E. grandis*; biomass; stand ages; regression models; Guangxi Province

受人类活动的影响,全球碳循环发生了显著改变,大气 CO₂ 等温室气体浓度持续大幅度的增加导致温室效应增强、气候变暖、大气环流发生变化、区域性气候变化加剧等一系列的生态环境问题,减排 CO₂ 的呼声日益高涨^[1]。森林生态系统是世界上除海洋之外最大的碳库,其碳储量约为 1 146 PgC,占全球陆地总碳储量的 46%^[2],维持着全球植被碳库的 86% 和土壤碳库的 73%^[3],对全球碳平衡起着十分重要的作用。但森林生态系统向大气中的碳排放仍然是个很不确定的数字^[4],而造成此不确定的最主要原因就在于对森林生物量的估算^[5],获得更为准确的森林生物量的数据是进一步了解森林在全球碳循环中作用的关键^[6]。生物量是指一个有机体或群落一定时间内积累的有机质总量。作为森林生态系统的特征数据,生物量是研究森林生态系统结构与功能的基础,对深入研究森林生态系统生物地球化学循环、碳汇功能、评价人工林生态系统生产力与环境因子之间的关系具有重要的科学价值^[7]。自 20 世纪 60 年代以来,国际上许多学者陆续对森林的生物量进行了广泛而深入的研究^[8-10],我国自 20 世纪 70 年代末开始展开森林生物量的研究。

桉树约有 900 多种,绝大部分产于澳大利亚及邻近岛屿,因干形好、生长快、产量高、用途广,全球已有上百个国家和地区引种和广泛栽培^[11]。我国南方桉树人工林发展速度快、规模大,其面积已突破 200×10⁴ hm²^[12],但同时也出现了桉树人工林地力衰退、林分产量下降的现象,维持桉树人工林长期稳定的可持续发展已成为国内外关注的焦点。有关学者对桉树人工林的生物量进行了研究^[11,13],但这些研究都局限于某一年龄桉树生物量,难以对不同林龄桉树人工林生物量进行准确的估测,也缺乏不同生长发育阶段生物量的组成及分布规律研究。本文基于 2011 年底广西东南部 5 个不同年龄阶段的尾巨桉人工林生物量的实测调查,探讨了尾巨桉人工林生物量组成、分配以及各器官生物量随年龄的变化规律,为进一步开展桉树人工林科学发展及碳循环研究提供科学依据。

1 自然概况

研究区位于广西东南部桉树主产区(22°38′—24°24′ N, 107°48′—111°33′ E)。据 2009 年第八次森林资源清查结果统计(广西林业勘测设计院提

供),广西桉树面积达 1712968 hm^2 ,蓄积 67626071 m^3 ,主要分布在广西东南部,该区域属亚热带季风气候区,具有热带向亚热带过度的特点,年平均气温 21.5—22 $^{\circ}\text{C}$,1 月平均气温 12.8—13.5 $^{\circ}\text{C}$,7 月平均气温 27.9—28.3 $^{\circ}\text{C}$,年积温 7190—8030 $^{\circ}\text{C}$ 。年降雨量 1300—1800 mm,主要集中在 4—9 月,占全年降雨量的 80%,年总日照 1600—1800 h,年蒸发量 1600 mm,相对湿度 74.8%。试验地土壤为砂页岩发育的赤红壤。

2 研究方法

2.1 样方选择与建立

参照《IPCC 优良做法指南》对系统随机抽样的

建议和广西桉树人工林的分布特征,基于第八次森林资源清查数据,计算桉树人工林幼龄林(1a)、中龄林(2a)、近熟林(3a)、成熟林(5a)、过熟林(8a)5 个不同林龄在广西各县(市)的面积、蓄积综合权重,选择权重最大的县(市),在广西东南桉树主产区建立 5 个不同林龄尾巨桉人工林样地,样地大小为 1000 m^2 (50 m $\times$ 20 m),每个林龄设置 3 个重复,共计 15 个样地。将每块样地进一步划分为 10 个 10 m $\times$ 10 m 的样方,对样方内测量胸径(D) ≥ 2 cm 尾巨桉的胸径、树高、冠幅和坐标进行每木调查,并挂牌标号,便于后期复查。各样地的基本信息见表 1。

表 1 不同林龄尾巨桉人工林样地基本特征

Table 1 Sites description of *Eucalyptus urophylla* $\times$ *E. grandis* plantation at different stand ages

林龄/a Stand ages	密度 Density/ (株/ hm^2)	土壤类型 Soil types	有机质 SOM (g/kg)	坡度/ $(^{\circ})$ Slope	坡向 Slope aspect	坡位 Slope position	海拔 Altitude	经度 Latitude	纬度 Longitude
1	111000	红壤	11.00	5—10	东北	中	145m	107°55′	22°25′
2	153000	红壤	18.89	25—30	西北	中	150m	108°10′	22°52′
3	123000	红壤	15.89	25—30	北	中	35m	109°3′	21°47′
5	128000	红壤	20.81	5—8	西北	下	30m	109°17′	21°58′
8	106000	红壤	10.85	5—10	西北	中	130m	107°52′	22°21′

2.2 生物量获取

2.2.1 乔木层

在每木调查的基础上,以 2 cm 为径阶,根据中央径阶多、两端逐次少的原则,在样地外选择不同林龄和径阶的尾巨桉共 18 株作为样木,进行生物量的测定。测定其基径、胸径、树高和冠幅并按 2 m 区分段锯断称量,在树干基部、胸径、中部及顶端分别锯取一个圆盘测定含水量;并分别称取枝条和叶片的鲜质量;根的生物量采用全挖法,并分小根(< 2 cm)、中根(2—5 cm)、大根(> 5 cm)3 组分别称重;然后对各部分器官分别取样 300 g 带回实验室,将样品在 105 $^{\circ}\text{C}$ 烘箱内杀青 2 h,调至 75 $^{\circ}\text{C}$ 下烘干至恒重,求出各器官干鲜质量之比,由此换算出样木各器官的干质量及总干质量。利用样木各器官(干、枝、叶、根)的干重和总干重建立各器官及总生物量与样木胸径(D)的幂回归方程($W = aD^b$)或指数方程($W = ae^{bD}$)。根据样地每木调查的结果及相应的回归方程计算乔木层各个体的生物量,并由此获得乔木层的总生物量。

2.2.2 灌木层、草本层和地上凋落物

按“品”字型在样地 1、5、8 号小样方各设置 1 个 2 m $\times$ 2 m 的样方,调查所有灌木种类、株丛数、高度、地径、覆盖度,在每个 2 m $\times$ 2 m 的样方内取 1 各 1 m $\times$ 1 m 的小样框,调查草本种类、株丛数、平均高度、覆盖度。为了不破坏复查样地,在相距各样框 5 m 的范围内选择 1 个与灌木调查样框植被类型、立地条件等基本一致的样框按全收获法收获样框内所有灌木的枝、叶、花果、根,测定各器官生物量,并以 3 个样框的平均值来推算样地中灌木层的总生物量。按同样方法在 1 m $\times$ 1 m 小样框内获取草本层植物各器官、凋落物生物量及总生物量。

2.2.3 数据处理

所有数据及多重比较分析、回归方程模型建立均在 Excel-2003 和 SPSS 16.0 中进行处理。

3 结果与分析

3.1 乔木层生物量回归模型的建立

大量的森林群落生物量研究表明乔木各器官及

总生物量与测树因子间普遍存在着相关关系,这种相关关系可以用数学模型进行拟合,其表达式为: $W=ax^b$,式中, W 为各器官的生物量。自变量 x 可选用胸径(D)、树高(H)或胸径平方乘以树高(D^2H)等测树因子, a 、 b 为方程中的待估参数。该方程能较真实地反应树木生物量随胸径(D)和树高(H)的变化趋势^[14-16]。因树高估测误差较大,本研究生物量预测方程采用以树木胸径(D)为单变量的非线性幂函

数或指数函数方程,根据相关系数和显著性检验,尾巨桉叶生物量的回归模型为 $W=ae^{bD^2}$,其余器官的回归模型均为 $W=aD^b$ (表2),经统计学检验各器官干、枝、叶、根和总生物量数学模型的相关系数在0.873—0.989之间, t 检验均达到极显著水平($P<0.01$),表明模型可以对尾巨桉林的生物量进行估测。

表2 尾巨桉人工林生物量估算模型
Table 2 Regression models of biomass for *Eucalyptus urophylla*×*E.grandis*

器官 Organs	拟合方程 Fitting equation	相关系数 Correlation coefficients r	残差平方和 Sum of squared residuals	样本数量 Samples (n)
叶 Leaf	$W_L = 1.182e^{0.003D^2}$	0.873 **	0.690	18
枝 Branch	$W_B = 0.042D^{1.835}$	0.946 **	1.530	18
干 Stem	$W_B = 0.028D^{2.996}$	0.989 **	0.811	18
根 Root	$W_R = 0.06D^{1.771}$	0.922 **	1.831	18
全株 Total single-tree	$W_T = 0.138D^{2.436}$	0.988 **	0.556	18

* * $P<0.01$

3.2 不同林龄尾巨桉人工林乔木层生物量及其分配
尾巨桉人工林生物量与其林龄密切相关,总生物量随着林龄的增加迅速增加(表3),1,2,3,5年生和8年生尾巨桉人工林生物量分别为6.84,42.11,54.12,94.15和130.86 t/hm²,除2、3年生达到显著水平外,其它均达到极显著水平。但不同年龄阶段生物量的增加幅度不同,其中以1—2年生林分生物量增加最为迅速,1年间生物量增加了35.26 t/hm²,3—5年间林分生物量增加也较快,平均年增长量为

20.01 t/hm²,2—3年生和5—8年生林分平均年增长率分别为12.01和12.23 t/hm²,相对较慢。这种现象说明尾巨桉生物量效应在不同的林分发育阶段有不同的表现,即存在着“年龄效应”或发育阶段效应,具有两个生长高峰,即呈升—降—升—降的发展趋势,这主要是受尾巨桉林分保存率的影响。2—3a间林分保存率下降后逐渐趋于稳定状态,从而产生了第2个生长高峰。

表3 不同林龄尾巨桉人工林乔木层生物量器官分配
Table 3 Biomass allocation in arbor layer at different stand ages for *E. urophylla* × *E. grandis* plantations

林龄/a Stand ages	叶 Leaf		枝 Branch		干 Stem		根 Root		总计 Total	
	生物量/ (t/hm ²)	占总生物 量比例/%	生物量/ (t/hm ²)	占总生物 量比例/%	生物量/ (t/hm ²)	占总生物 量比例/%	生物量/ (t/hm ²)	占总生物 量比例/%	生物量/ (t/hm ²)	占总生物 量比例/%
1	1.44Cd	21.01	0.81Dd	11.80	3.50De	51.07	1.02Dd	14.87	6.84De	100
2	2.29ABbc	5.43	3.49Cc	8.28	29.70Cd	70.52	4.23Cc	10.04	42.11Cd	100
3	2.12Bc	3.92	4.07Cc	7.52	41.53Cc	76.74	4.88Cc	9.02	54.12Cc	100
5	2.54ABab	2.69	5.91Bb	6.28	86.31Bb	91.68	6.96Bb	7.39	94.15Bb	100
8	2.83Aa	2.17	7.53Aa	5.76	128.87Aa	98.48	8.79Aa	6.72	130.86Aa	100

同列不同大写字母表示差异极显著($P<0.01$),不同小写字母表示差异显著($P<0.05$);生物量 Biomass; 占总生物量比例 Percentage of the total biomass

通过分析不同林龄尾巨桉各器官生物量数据可知(表3),各器官生物量除3年生叶生物量略有下降外,其余各器官生物量均随着林龄的增大而增大。

但各器官生物量的增加幅度不同,其占总生物量的比例也有所变化,不同林龄尾巨桉生物量在各器官中的分配比例大小略有不同,1年生林分为:干>叶>

根>枝,2—8年生为:干>根>枝>叶,叶、根和枝在不同生长阶段分配比率大小不同,表明了尾巨桉叶、根和枝在不同发育阶段其生长上的差异,1年生尾巨桉叶的生长大于根和枝,2年生后根的生长则大于枝和叶。

随着林龄的增加各器官生物量的分配体现一定的规律性,在各个年龄阶段均以树干的生物量最大,占整个生物量的51.07%—98.48%,并随着年龄的增加,树干生物量所占比例逐渐增大,根、枝、叶占总生物量的比例与其他树种不同,均表现出了随年龄增加而下降的趋势。表明随着尾巨桉年龄的生长越来越多的干物质储存在树干中,干材随着年龄的增长是一个净积累的过程,根、枝、叶在积累的同时却有

部分的衰老组织在脱落,具有比较强烈的更新换代过程。

3.3 不同林龄尾巨桉人工林灌木层生物量及其分配

尾巨桉人工林由1年生发展至2年生林分郁闭度增加,灌木层生物量急剧减少(表4),至3年生时由于林分保存率下降,灌木层生物量急剧增加达到最大值,伴随林分保存率的相对稳定和林分不断生长,灌木层生物量又呈下降趋势。灌木层各器官的分配比例在不同的发育阶段有所不同,但规律性不强,与乔木层相比相对稳定,除2年生为枝>叶>根外,其余为枝>根>叶,均以枝的比例最大,达37.89%—56.79%。

表4 不同林龄尾巨桉人工林灌木层生物量器官分配
Table 4 Biomass allocation in shrub layer at different stand ages for *E. urophylla*×*E. grandis* plantations

林龄/a Stand ages	叶 Leaf		枝 Branch		根 Root		总计 Total	
	生物量/ (t/hm ²)	占总生物 量比例/%	生物量/ (t/hm ²)	占总生物 量比例/%	生物量/ (t/hm ²)	占总生物 量比例/%	生物量/ (t/hm ²)	占总生物 量比例/%
1	0.20ABab	24.30	0.33BCbc	41.11	0.28ABab	34.58	0.81ABbc	100
2	0.07Bb	34.24	0.09Cc	46.24	0.04Bb	19.52	0.19Bc	100
3	0.27ABab	16.35	0.93Aa	56.79	0.44ABa	26.86	1.64Aa	100
5	0.45Aa	28.36	0.61ABb	37.89	0.54Aa	33.74	1.60Aa	100
8	0.29ABab	20.42	0.56ABb	40.06	0.55Aa	39.52	1.40Aab	100

3.4 不同林龄尾巨桉人工林草本层及凋落物生物量

不同林龄尾巨桉草本层生物量不同(表5),大小顺序为:5a>1a>3a>8a>2a。1年生尾巨桉人工林林分较小、空间大、阳光充分,草本层生物量大,2年生尾巨桉林逐渐密闭,草本层生物量最小,随着尾巨桉林的增长及林间空隙的增大草本层生物量逐渐增大,8年生尾巨桉林过度密闭草本层生物量又急剧下

降,除8年生地下生物量>地上外,其余的均是地上>地下。随着尾巨桉林龄的增加凋落物逐渐增加(表5),至5年生尾巨桉人工林凋落物的生物量最高,达6.51 t/hm²,至8年生尾巨桉林因枝、叶的过分脱落和更新换代能力的急剧下降,凋落物生物量反而减小。

表5 不同林龄尾巨桉人工林草本层、凋落物层生物量分配
Table 5 Biomass allocation in herb and litter at different stand ages for *E. urophylla*×*E. grandis* plantations

林龄/a Stand ages	草本地表		草本地下		总计		凋落物 生物量/ (t/hm ²)
	生物量/ (t/hm ²)	占总生物 量比例/%	生物量/ (t/hm ²)	占总生物 量比例/%	生物量/ (t/hm ²)	占总生物 量比例/%	
1	1.74Aa	57.10	1.30Aa	42.90	3.04Aa	100	1.80Bc
2	0.10Bc	73.33	0.04Ab	26.67	0.13Bb	100	5.31Aab
3	1.51Aab	57.43	1.12Aa	42.57	2.63Aa	100	6.11Aa
5	2.06Aa	58.59	1.45Aa	41.41	3.51Aa	100	6.51Aa
8	0.71ABbc	36.13	1.26Aa	63.87	1.97ABa	100	3.29ABbc

3.5 不同林龄尾巨桉人工林总生物量组成及其分配

由表 6 可知,尾巨桉人工林总生物变化规律与乔木层一致,随着林龄的增加而增加,除 2 年生和 3 年生差异显著外,其它均达到极显著水平。其中活体植物的贡献达 85.60%—97.61%,地上凋落物的总量占 2.39%—14.40%。各层生物量所占比例总体趋势为乔木层>凋落物层>草本层>灌木层,以乔木层

占绝对优势,所占比例为 54.80%—91.56%,除 3 年生外随着林龄的增加逐渐增加,其次为地上凋落物所占比例为 2.39%—14.40%,且随林龄的增加逐渐下降,草本层生物量所占比例除 1 年生大于凋落物外其余均很小,且除 2 年生外均呈下降趋势,灌木层生物量所占比例最小,为 1.02%—6.47%,且除 2 年生外随林龄的增加也逐渐减小。

表 6 不同林龄尾巨桉人工林各层次生物量分配
Table 6 Biomass allocation in different layers at different stand ages for *E. urophylla*×*E. grandis* plantations

林龄/a Stand ages	乔木层 Arbor layer		灌木层 Shrub layer		草本层 Herb layer		凋落物 Litter		总计 Total	
	生物量/ (t/hm ²)	占总生物 量比例/%	生物量/ (t/hm ²)	占总生物 量比例/%	生物量/ (t/hm ²)	占总生物 量比例/%	生物量/ (t/hm ²)	占总生物 量比例/%	生物量/ (t/hm ²)	占总生物 量比例/%
1	6.84Dd	54.80	0.81Cc	6.47	3.04Aab	24.33	1.80Dd	14.40	12.49De	100
2	42.11Cc	88.19	0.19Dd	0.41	0.13Dd	0.28	5.31Bb	11.12	47.75Cd	100
3	54.12Cbc	83.90	1.64Aa	2.54	2.63Bb	4.08	6.11Aa	9.48	64.51Cc	100
5	94.15Bb	89.01	1.60Aa	1.52	3.51Aa	3.32	6.51Aa	6.15	105.77Bb	100
8	130.86Aa	95.16	1.40Bb	1.02	1.97Cc	1.43	3.29Cc	2.39	137.51Aa	100

2.6 尾巨桉人工林生物量优化增长模型

为了了解尾巨桉人工林各器官、各层次及总生物量随林龄增长的动态变化,以林龄(a)为自变量(X),以乔木层不同器官生物量、乔木层、灌木层、草本层、凋落物各层及总生物量(t/hm²)为因变量(Y),采用多种线性与非线性模型进行模拟,并选用相关系数最高者作为优化回归模型,得出如表 7 所

示的尾巨桉人工林乔木层各器官、各层次及总生物量的增长模型。*t* 检验表明,灌木层和草本层因人为抚育措施的破坏,其生物量的动态模型达不到显著水平,其余各器官、各层次和总生物量均达到了显著或极显著水平,能很好地反映各器官和整个系统的生物量随时间变化的动态过程。

表 7 尾巨桉人工林乔木层不同器官、各层及总生物量的增长模型
Table 7 Growth models of different organs in arbor layer, shrub, herb, litter, and total biomass

生物量 Biomass	模型 Models	<i>R</i> ²	<i>P</i>	<i>n</i>
乔木叶 Tree leaves	$Y = \exp(7.998 - 0.713/X)$	0.921	0.010	18
乔木枝 Tree branch	$Y = 913.349 + 3.146 \times 10^3 \ln X$	0.99	<0.001	18
乔木干 Tree stem	$Y = -1.938 \times 10^3 + 2.408 \times 10^3 X - 686.345 X^2$	0.995	0.005	18
乔木根 Tree root	$Y = 1.201 \times 10^3 + 3.626 \times 10^3 \ln X$	0.988	0.001	18
乔木 Tree	$Y = \exp(12.139 - 3.281/X)$	0.991	<0.001	18
灌木 Shrub	$Y = 672.039 - 202.574 X - 162.864 X^2 - 15.807 X^3$	0.541	0.791	18
草本 Herb	$Y = 6.129 \times 10^3 - 4.783 \times 10^3 X - 1.418 \times 10^3 X^2 - 110.622 X^3$	0.581	0.762	18
凋落物 Litter	$Y = -560.992 + 3.238 \times 10^3 X - 346.602 X^2$	0.930	0.07	18
总生物量 Total biomass	$Y = -1.693 \times 10^3 + 3.337 \times 10^3 X - 1.761 X^2$	0.996	0.004	18

4 讨论和结论

4.1 讨论

4.1.1 生物量模型的选择

森林生物量的获得可以通过直接或间接两种途径:前者是将一定面积内的树木皆伐以获取其生物量,准确度高,因其对环境的破坏性大,对森林的主

要产品干材的损耗太多,很少使用;后者是确定生物量的主要方法,也叫生物量模型法,根据尺度不同可以分为单木生物量模型和大尺度森林生物量模型,单木生物量模型是通过样木观测建立树木的相对生长方程进行生物量的估测^[16-17],大尺度森林生物量模型利用多种遥感信息参数进行模拟,许多学者利用多种生物量模型来估计林木的生物量^[18-19]。目前

相对生长方程的拟合多采用对数形式,常用的模型变量有胸径(D)、树高(H)、密度(S)。常见的预测模型包括以胸径为单变量的模型、以胸径和树高为变量的模型以及以胸径、高度、密度为变量的模型。但在森林群落调查中,各种参数获得的准确性并不一致。胸径在绝大多数的调查中可以较准确的获得,而高度通常会被测量,但其测量均存在着较大的误差^[6,20]。且生物量与胸径之间存在着很好的相关关系,因此在森林的生物量预测中以胸径为单变量的模型被广泛运用^[5,21-22]。本研究证明以胸径为单变量的尾巨桉人工林生物量数学模型具有较高的精度,各器官及总生物量数学模型的相关系数均达到极显著水平,能够对不同林龄尾巨桉人工林各组分、各层次及总生物量进行有效预测。

4.1.2 尾巨桉人工林与其他森林类型生物量的比较

森林生物量与许多生物学因素和非生物学因素密切相关,如区域的水热条件、土壤条件以及森林的类型、年龄、优势种的组成,活立木密度等^[6,23],本研究表明,8年生尾巨桉生物量为 137.51 t/hm^2 ,与其林龄密切相关,乔木层各器官凋落物和总生物量拟合的模型均能很好的反映随林龄变化的动态过程。与其他森林相比,8年生尾巨桉人工林生物量高于广东雷州半岛地区 25 年生更新橡胶林生物量^[24]、与海南 30 年生的木莲人工林生物量持平^[25],低于热带雨林及其他森林类型生物量^[5,14-15,26-29],但尾巨桉人工林平均生产力达 $17.19 \text{ t hm}^{-2} \text{ a}^{-1}$,高于 10 年生尾叶桉林 ($15.98 \text{ t hm}^{-2} \text{ a}^{-1}$)^[11]、32 年生楠木人工林 ($8.57 \text{ t hm}^{-2} \text{ a}^{-1}$)^[29] 等一般的森林类型的年平均生产力,接近海南尾细桉人工林年净生产力 ($17.56 \text{ t hm}^{-2} \text{ a}^{-1}$)^[30],表明巨尾桉具有很高的光合作用效益,固碳潜力大,是一个速生丰产的优良造林树种。

4.2 结论

我国南方桉树人工林发展迅速,但也存在林地力衰退、林分产量下降等问题,如何实现桉树人工林可持续发展已成为国内外关注的焦点。本研究发现尾巨桉人工林乔木层各器官、地上凋落物及总生物量具有良好的优化增长模型,其总生物量的增长模型为 $Y = -1.693 \times 10^3 + 3.337 \times 10^3 X - 1.761 X^2$; 林分总生物量随林龄而增加,1,2,3,5 年生和 8 年生尾巨桉人工林生物量分别为 12.49, 47.75, 64.51, 105.77 和

137.51 t/hm^2 ; 层次分配方面,乔木层占绝对优势,占 54.80%—91.56%,且随林龄的增加而增大,其次为凋落物,灌木层和草本层生物量较小,分别占 1.02%—6.47% 和 0.28%—24.33%,均随林龄的增加呈递减趋势;乔木层以干所占比例最高,占 51.07%—98.48%,且随林龄而增加,枝、叶、根分别占 5.76%—11.80%, 2.17%—21.01% 和 6.72%—14.87%,均随林龄而下降;灌木层以枝所占比例最高,为 37.89%—56.79%,叶和根分别占 16.35%—34.24% 和 19.52%—39.52%,随林龄的变化均不大;草本层分配 1—5 年生以地上所占比例较大,8 年生地下所占比例高达 63.87%;8 年生尾巨桉人工林总生物量与 30 年生的木莲人工林持平,低于热带雨林,但其年均净生产量高达 17.19 t/hm^2 ,是一个光合效率高、固碳潜力大的速生丰产优良造林树种。

致谢: 本研究样点的布置得到了广西壮族自治区林业勘测设计院李春干老师的帮助;样地调查得到了中国科学院亚热带农业生态研究所植物生态学科组及广西大学林学院林学专业、生态专业等老师和学生的大力支持,特此致谢。

References:

- [1] Ding Z L, Fu B J, Han X G, Ge Q S, Guo Z T, Wang Y, Fan J, Huang Y, Yu G R, Cai Z C, Shi X Z, Gu X F. Brief introduction to a cluster of Projects of "Research in Key Issues of International Negotiation with Regard to Coping with Climate Change" by CAS. Bulletin of the Chinese Academy of Sciences, 2009, 24(1): 8-17.
- [2] Watson R T. Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) Special Report: Land Use, Land-use Change and Forestry. Cambridge: Cambridge University Press, 2000.
- [3] Woodwell G M, Whittaker R H, Reiners W A, Likens G E, Delwiche C C, Botkin D B. The biota and the world carbon budget. Science, 1978, 199(4325): 141-146.
- [4] Schimel D S. Terrestrial ecosystems and the carbon cycle. Global Change Biology, 1995, 1(1): 77-91.
- [5] Keller M, Palace M, Hurr G. Biomass estimation in the Tapajos National Forest, Brazil: Examination of sampling and allometric uncertainties. Forest Ecology and Management, 2001, 154(3): 371-382.
- [6] Brown S, Gillespie A J R, Lugo A E. Biomass estimation methods for tropical forests with applications to forest inventory data. Forest Science, 1989, 35(4): 881-902.
- [7] Garkoti S C. Estimates of biomass and primary productivity in a high-altitude maple forest of the west central Himalayas. Ecological Research, 2008, 23(1): 41-49.
- [8] Brown S, Lugo A E. Biomass of tropical forests: A new estimate based on forest volumes. Science, 1984, 223(4642): 1290-1293.

- [9] Houghton R A. Aboveground forest biomass and the global carbon balance. *Global Change Biology*, 2005, 11(6): 945-958.
- [10] Zakrzewski W T, Duchesne I. Stem biomass model for jack pine (*Pinus banksiana* Lamb.) in Ontario. *Forest Ecology and Management*, 2012, 279: 112-120.
- [11] Wen Y G, Liang H W, Zhan L J, Zhou M Y, He B, Wang L H, Wei S H, Zheng B, Liu D J, Tang Z S. Biomass production and productivity of *Eucalyptus urophylla*. *Journal of Tropical and Subtropical Botany*, 2000, 8(2): 123-127.
- [12] Wen Y G, Chen F, Liu S R, Liang H W, Yuan C A, Zhu H G. Relationship between species diversity and biomass of *Eucalyptus* plantation in Guangxi. *Scientia Silvae Sinicae*, 2008, 44(4): 14-19.
- [13] Wen Y G. Ecological and Economic Problems of *Eucalyptus* and Scientific Development. Beijing: China Forestry Publishing House, 2008.
- [14] Lü X T, Tang J W, He Y C, Duan W G, Song J P, Xu H L, Zhu S Z. Biomass and its allocation in tropical seasonal rain forest in Xishuangbanna, Southwest China. *Acta Phytocologica Sinica*, 2007, 31(1): 11-22.
- [15] Ren H, Peng S L, Xiang Y C. Biomass and net primary productivity in an *Acacia mangium* plantation in Heshan, Guangdong, China. *Acta Phytocologica Sinica*, 2000, 24(1): 18-21.
- [16] Wang W F, Lei Y C, Wang X F, Zhao H C. A review of forest biomass models. *Journal of Northwest Forestry University*, 2008, 23(2): 58-63.
- [17] Foody G M, Boyd D S, Cutler M E J. Predictive relations of tropical forest biomass from Landsat TM data and their transferability between regions. *Remote Sensing of Environment*, 2003, 85(4): 463-474.
- [18] Ketterings Q M, Coe R, van Noordwijk M, Ambagau Y, Palm C A. Reducing uncertainty in the use of allometric biomass equations for predicting above-ground tree biomass in mixed secondary forests. *Forest Ecology and Management*, 2001, 146(1/3): 199-209.
- [19] Nelson B W, Mesquita R, Pereira J L G, de Souza S G A, Batista G T, Couto L B. Allometric regressions for improved estimate of secondary forest biomass in the central Amazon. *Forest Ecology and Management*, 1999, 117(1/3): 149-167.
- [20] Chave J, Riéra B, Dubois M A. Estimation of biomass in a neotropical forest of French Guiana: spatial and temporal variability. *Journal of Tropical Ecology*, 2001, 17(1): 79-96.
- [21] Peichl M, Leava N A, Kiely G. Above- and belowground ecosystem biomass, carbon and nitrogen allocation in recently afforested grassland and adjacent intensively managed grassland. *Plant and Soil*, 2012, 350(1/2): 281-296.
- [22] Preece N D, Crowley G. M., Lawes M J, van Oosterzee P. Comparing above-ground biomass among forest types in the Wet Tropics: Small stems and plantation types matter in carbon accounting. *Forest Ecology and Management*, 2012, 264: 228-237.
- [23] Li G F, Ren H. Biomass and net primary productivity of the forests in different climatic zones of China. *Tropical Geography*, 2004, 24(4): 306-310.
- [24] Zhou Z Z, Zheng H S, Yin G T, Yang Z J, Chen K T. Biomass equations for rubber tree in Southern China. *Forest Research*, 1995, 8(6): 624-629.
- [25] Zhou G Y, Zeng Q B, Lin M X, Chen B F, Li Y D, Wu Z M. Biomass and nutrient allocation in *Manglietia hainanensis* plantation ecosystem at Jianfengling. *Forest Research*, 1997, 10(5): 453-457.
- [26] Huang Q, Li Y D, Lai J Z, Peng G J. Study on biomass of tropical mountain rain forest in Limushan, Hainan Island. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 1991, 15(3): 197-206.
- [27] Dang C L, Wu Z L, Zhang Q. A study on biomass of the ravine tropical rain forest in Xishuangbanna. *Acta Botanica Yunnanica*, 1997, 19(S9): 123-128.
- [28] Feng Z L, Zheng Z, Zhang J H, Cao M, Sha L Q, Deng J W. Biomass and its allocation of a tropical wet seasonal rain forest in Xishuangbanna. *Acta Phytocologica Sinica*, 1998, 22(6): 481-488.
- [29] Ma M D, Jiang H, Liu Y J. Biomass, carbon content, carbon storage and their vertical distribution of *Phoebe bourmei* artificial stand. *Scientia Silvae Sinicae*, 2008, 44(3): 34-39.
- [30] Shi Z J, Xu T P, Gao J X, Song A Y, Yu C T, Zhang N N, Hu Z S. Carbon storage and its distribution of *Eucalyptus urophylla* × *E. tereticornis* plantations in Hainan Island, Southern China. *Scientia Silvae Sinicae*, 2011, 47(10): 21-28.

参考文献:

- [1] 丁仲礼, 傅伯杰, 韩兴国, 葛全胜, 郭正堂, 王毅, 樊杰, 黄耀, 于贵瑞, 蔡祖聪, 史学正, 顾行发. 中国科学院“应对气候变化国际谈判的关键科学问题”项目群简介. *中国科学院院刊*, 2009, 24(1): 8-17.
- [11] 温远光, 梁宏温, 招礼军, 周敏毅, 何斌, 王凌晖, 韦善华, 郑白, 刘德杰, 唐再生. 尾叶桉人工林生物量和生产力的研究. *热带亚热带植物学报*, 2000, 8(2): 123-127.
- [12] 温远光, 陈放, 刘世荣, 梁宏温, 元昌安, 朱宏光. 广西桉树人工林物种多样性与生物量关系. *林业科学*, 2008, 44(4): 14-19.
- [13] 温远光. 桉树生态、社会问题与科学发展. 北京: 中国林业出版社, 2008.
- [14] 吕晓涛, 唐建维, 何有才, 段文贵, 宋军平, 许海龙, 朱胜忠. 西双版纳热带季节雨林的生物量及其分配特征. *植物生态学报*, 2007, 31(1): 11-22.
- [15] 任海, 彭少麟, 向言词. 鹤山马占相思人工林的生物量和净初级生产力. *植物生态学报*, 2000, 24(1): 18-21.
- [16] 王维枫, 雷渊才, 王雪峰, 赵浩彦. 森林生物量模型综述. *西北林学院学报*, 2008, 23(2): 58-63.
- [23] 李高飞, 任海. 中国不同气候带各类型森林的生物量和净第一性生产力. *热带地理*, 2004, 24(4): 306-310.
- [24] 周再知, 郑海水, 尹光天, 杨曾奖, 陈康泰. 橡胶树生物量估测的数学模型. *林业科学研究*, 1995, 8(6): 624-629.
- [25] 周光益, 曾庆波, 林明献, 陈步峰, 李意德, 吴仲民. 海南木莲人工林生物量及养分分配. *林业科学研究*, 1997, 10(5): 453-457.
- [26] 黄全, 李意德, 赖巨章, 彭国金. 黎母山热带山地雨林生物量研究. *植物生态学与地植物学学报*, 1991, 15(3): 197-206.
- [27] 党承林, 吴兆录, 张强. 西双版纳沟谷热带雨林的生物量研究. *云南植物研究*, 1997, 19(S9): 123-128.
- [28] 冯志立, 郑征, 张建侯, 曹敏, 沙丽清, 邓继武. 西双版纳热带湿性季节雨林生物量及其分配规律研究. *植物生态学报*, 1998, 22(6): 481-488.
- [29] 马明东, 江洪, 刘跃建. 楠木人工林生态系统生物量、碳含量、碳贮量及其分布. *林业科学*, 2008, 44(3): 34-39.
- [30] 时忠杰, 徐大平, 高吉喜, 宋爱云, 于春堂, 张宁南, 胡哲森. 海南岛尾细桉人工林碳贮量及其分布. *林业科学*, 2011, 47(10): 21-28.