

华南地区主要造林树种林分碳储量估算*

林 玮¹ 梁东成² 唐昌亮³ 薛克娜¹
汪迎利² 陈 勇³ 陈雪梅¹ 连辉明²

(1. 佛山市林业科学研究所, 广东 佛山 528222; 2. 广东省森林培育与保护利用重点实验室/广东省林业科学研究院, 广东 广州 510520; 3. 广州林业和园林科学研究院, 广东 广州 510405)

摘要 研究 52 个乔木树种纯林的碳储量, 分析其固碳能力差异, 为碳汇造林选用乔木树种提供参考依据。以广东省东江林场 11 年生的乔木树种试验林为研究对象, 测定 52 个树种生长量和树干、树枝和树叶的含碳率。按照平均木法, 算出平均木生物量, 结合平均含碳率、林分密度与保存率, 估算碳储量。结果表明, 不同树种林分碳储量差异极大, 最高碳储量(厚荚相思 *Acacia farnesiana*) 比最低碳储量(紫玉兰 *Magnolia liliiflora*) 相差约 20 倍, 年均碳储量在 10 t/hm² 以上的树种有含羞草科的厚荚相思、大叶相思 *A. auriculiformis* 等 5 个树种, 年均碳储量在 5~10 t/hm² 的有灰木莲 *Manglietia glanca*、红荷 *Schima wallichii* 等 18 个树种。以保存率和单位面积碳储量 2 个主要性状作聚类分析, 可将 52 个树种按固碳能力划分成 4 种类型的碳汇树种。

关键词 造林树种; 碳储量; 估算; 华南地区

中图分类号: S79 文献标志码: A 文章编号: 2096-2053 (2019) 02-0020-10

Estimation of Stand Carbon Storage of Main Afforestation Tree Species in South China

LIN Wei¹ LIANG Dongcheng² TANG Changliang³ XUE Kena¹
WANG Yingli² CHEN Yong³ CHEN Xuemei¹ LIAN Huiming²

(1. Foshan Institute of Forestry Science, Foshan, Guangdong 528222, China; 2. Guangdong Provincial Key Laboratory of Silviculture, Protection and Utilization/Guangdong Academy of Forestry, Guangzhou, Guangdong 510520, China; 3. Guangzhou Institute of Forestry and Landscape Architecture, Guangzhou, Guangdong 510405 China)

Abstract Pure forest carbon storage of 52 tree species were studied and their carbon sink capacity differences were analyzed to provide a reference for the selection of tree species for carbon sink afforestation. Taking 11-year-old tree species experimental forest in Dongjiang Forest Farm of Guangdong province as the research object, the growth, the carbon content of trunk, branches and leaves, water content, wood basic density of 52 tree species were measured. According to mean sample-tree method, the mean sample-tree of each tree species was obtained first, and then the mean sample-tree biomass was estimated by the general biomass model of the whole tree. The average carbon content of tree species was calculated by the weighted method. Finally, the carbon storage of 52 tree species pure forest were estimated by combining afforestation density with survival rate. The results showed that there were great differences in carbon storage among tree species. The highest carbon storage tree species (*Acacia farnesiana*)

* 基金项目: 广东省林业科技计划项目(2018-03); 广州市科技计划项目(20180302010)。

第一作者: 林玮(1989—), 男, 工程师, 主要从林木遗传改良研究工作, E-mail: 35417328@qq.com。

通信作者: 连辉明(1973—), 男, 教授级高级工程师, 主要从事森林培育研究工作, E-mail: 284177320@qq.com。

was about 20 times higher than the lowest carbon storage tree species (*Magnolia liliiflora*). Average annual carbon storage of pure forest more than 10 t/ha was *Acacia farnesiana* and *Acacia auriculiformis* etc. There were 18 species including such as *Manglietia glanca*, *Schima wallichii*, etc. with an average annual carbon storage of 5-10 t/hm². 52 tree species could be classified into 4 types of carbon tree species according to their carbon sequestration capacity and preservation rate.

Key words afforestation tree species; carbon storage; estimation; south China

森林是地球陆地生态系统的重要组成部分，在全球碳平衡中发挥着不可替代的巨大作用^[1]。随着全球 CO₂ 浓度的增加，全球气候变暖，已成为当今世界关注的重大环境问题^[2]。研究区域不同树种各林龄碳储量有助于提高造林树种碳汇能力的认识，为碳汇林的建设以及区域森林生态系统的恢复提供重要的决策信息^[3]，对广东现代林业建设与林业可持续发展提供支撑。近年来，国内学者针对国家、区域及不同生态系统、不同树种的碳储量、碳密度和碳汇功能开展了大量的研究^[4-13]。本文利用平均木法，通过生物量模型求出平均木生物量，结合含碳率、林分密度与保存率估算了 52 个乔木造林树种 11 年生纯林的碳储量。

1 材料与方法

1.1 林地概况

试验林位于广东省东江林场，地处广东省河源市紫金县古竹镇，属亚热带季风气候，终年气候温和湿润，日照充足，热量丰富，年均气温 20.9~21.5℃，极端高温为 38℃，极端低温 -2℃。1 月均温 11.5~12.5℃，7 月均温 27.5~28.5℃，年日照时间 1 800~2 100 h，年均积温 6 997.6℃，年均相对湿度 81%，年均降雨量 1 600 mm，丰水期在 6—8 月；森林类型属南亚热带常绿阔叶林，林下灌木以芒萁 (*Dicranopteris dichotoma*)、桃金娘 (*Rhodomyrtus tomentosa*)、杂竹为主，草本植物以蕨类、大芒、攀缠植物为主^[14-16]。试验林位于东江林场桂林工区简东坑林班 27 小班 (22° 25' 02" E, 114° 40' 03" N)，地籍编码为 441604025002000202700，面积 14.3 hm²，林地海拔为 100~250 m，坡度 15°~35°；土壤主要为由花岗岩及部分砂岩发育而成的赤红壤，呈酸性，土壤有机质含量 2.0%~2.5%，土层厚度 45~70 cm。试验林营建于 2007 年 4 月，参试树种为 52 个乔

木树种，苗木由广东省林业科学研究院提供，树种苗高在 30~80 cm 之间。试验采用随机区组设计，营建块状混交林，3 次重复，每个树种 (小区) 6 列，从山脊到山脚每列约 20 株，每个树种 (小区) 面积约 0.13 hm²，株行距为 3.0 m × 2.5 m，穴规格 50 cm × 50 cm × 40 cm，每穴施基肥 1 kg (过磷酸钙和复合肥各 0.5 kg)^[17]。

1.2 保存率与生长量调查

2009 年 10 月进行保存率调查。2018 年 9 月进行生长量调查，每个树种随机抽样调查 15~30 个单株，调查树高和胸径。

1.3 生物量估算

根据孙玉军等^[18]介绍的生物量估测的平均木法，以调查的树高和胸径数据，确定出各树种的平均木。再按罗云建等^[19]介绍的基于胸径的通用中国林木器官与胸径的生物量模型，分别计算出树干、树枝、树叶和地下部分的生物量，见公式 (1)~(4)，以 4 部分相加得到整株生物量。胸径可以分别解释树干生物量模型、树枝生物量模型、树叶生物量模型、地下生物量模型和整株生物量模型之间总变异的 84.3%、61.7%、37.4 和 88.9%。

$$W_s = 0.0781 \times D^{2.3770} \dots\dots\dots (1)$$

$$W_b = 0.3021 \times D^{1.7061} \dots\dots\dots (2)$$

$$W_l = 0.1220 \times D^{1.4585} \dots\dots\dots (3)$$

$$W_r = 0.0002 \times D^{3.4175} \dots\dots\dots (4)$$

$$W_a = W_s + W_b + W_l + W_r \dots\dots\dots (5)$$

式中： W_a 、 W_s 、 W_b 、 W_l 、 W_r 分别为平均木的整株、树干、树枝、树叶和地下生物量 (kg)， D 为胸径 (cm)。

1.4 含碳率测定样品采集与处理

含碳率测试样品选择试验林中的 27 科 52 个乔木树种 (表 1)，其中常绿针叶树 4 种、常绿阔叶树 38 种、落叶阔叶树 10 种。每个树种选择 3

表1 参试52个乔木树种名录
Table 1 List of 52 tree species

科名 Family	编号 No.	树种 Species	植被类型 Vegetation	科名 Family	编号 No.	树种 Species	植被类型 Vegetation
松科	1	马尾松 <i>Pinus massoniana</i>	常绿针叶	苏木科	28	格木 <i>Erythrophloeum fordii</i>	常绿阔叶
罗汉松科	2	台湾罗汉松 <i>Podocarpus nakaii</i>	常绿针叶	杜英科	29	尖叶杜英 <i>Elaeocarpus apiculatus</i>	常绿阔叶
	3	小叶竹柏 <i>Podocarpus nagi</i>	常绿针叶		30	中华杜英 <i>Elaeocarpus chinensis</i>	常绿阔叶
	4	长叶竹柏 <i>Nageia fleuryi</i>	常绿针叶		31	山杜英 <i>Elaeocarpus sylvestris</i>	常绿阔叶
木兰科	5	乐昌含笑 <i>Michelia chapensis</i>	常绿阔叶		32	锡兰橄榄 <i>Elaeocarpus serratus</i>	常绿阔叶
	6	火力楠 <i>Michelia macclurei</i>	常绿阔叶		33	绢毛杜英 <i>Elaeocarpus nitentifolius</i>	常绿阔叶
	7	山桂花 <i>Paramichelia baillonii</i>	常绿阔叶	漆树科	34	南酸枣 <i>Choerospondias axillaris</i>	落叶阔叶
	8	灰木莲 <i>Manglietia glanca</i>	常绿阔叶		35	楝叶吴茱萸 <i>Evodia glabrifolia</i>	常绿阔叶
	9	紫玉兰 <i>Magnolia liliiflora</i>	落叶阔叶	使君子科	36	小叶榄仁 <i>Terminalia neotaliala</i>	落叶阔叶
樟科	10	阴香 <i>Cinnamomum burmanni</i>	常绿阔叶		37	莫氏榄仁 <i>Terminalia muelleri</i>	落叶阔叶
	11	黄樟 <i>Cinnamomum porrectum</i>	常绿阔叶		38	油榄仁 <i>Terminalia bellirica</i>	落叶阔叶
壳斗科	12	红锥 <i>Castanopsis hystrix</i>	常绿阔叶	桃金娘科	39	水蒲桃 <i>Syzygium jambos</i>	常绿阔叶
	13	黎蒴 <i>Castanopsis fissa</i>	常绿阔叶		40	海南蒲桃 <i>Syzygium hainanense</i>	常绿阔叶
	14	白栎 <i>Quercus fabri</i>	落叶阔叶	桦木科	41	西南桦 <i>Betula alnoides</i>	常绿阔叶
金缕梅科	15	枫香 <i>Liquidambar formosana</i>	落叶阔叶	夹竹桃科	42	海杠果 <i>Cerbera manghas</i>	常绿阔叶
	16	米老排 <i>Mytilaria laosensis</i>	常绿阔叶	龙脑香科	43	青皮 <i>Vatica mangachapoi</i>	常绿阔叶
	17	红花荷 <i>Rhodoleia championii</i>	常绿阔叶	马鞭草科	44	石梓 <i>Gmelina chinensis</i>	落叶阔叶
山茶科	18	木荷 <i>Schima superba</i>	常绿阔叶	山龙眼科	45	银桦 <i>Grevillea robusta</i>	常绿阔叶
	19	红荷 <i>Schima wallichii</i>	常绿阔叶	梧桐科	46	翻白叶树 <i>Pterospermum heterophyllum</i>	常绿阔叶
大戟科	20	五月茶 <i>Antidesma bunius</i>	常绿阔叶	五加科	47	鸭脚木 <i>Sehefflera octophylla</i>	常绿阔叶
	21	山乌柏 <i>Sapium discolor</i>	落叶阔叶	五桠果科	48	大花五桠果 <i>Dillenia turbinata</i>	常绿阔叶
	22	秋枫 <i>Bischofia javanica</i>	常绿阔叶	杨梅科	49	杨梅 <i>Myrica rubra</i>	常绿阔叶
蝶形花科	23	降香黄檀 <i>Dalbergia odorifera</i>	常绿阔叶	玉蕊科	50	红花玉蕊 <i>Barringtonia racemosa</i>	常绿阔叶
	24	海南红豆 <i>Ormosia pinnata</i>	常绿阔叶	千屈菜科	51	大叶紫薇 <i>Lagetstroemia speciosa</i>	常绿阔叶
含羞草科	25	大叶相思 <i>Acacia auriculiformis</i>	常绿阔叶	紫葳科	52	海南菜豆树 <i>Radermachera hainanensis</i>	常绿阔叶
	26	厚荚相思 <i>Acacia farnesiana</i>	常绿阔叶				
	27	海红豆 <i>Adenanthera pavonina</i>	落叶阔叶				

株平均木，采集其主干、侧枝和树叶 3 种器官样品各约 20 g，其中主干是利用电动钻，在胸高处去皮后钻入木质部约 5~8 cm 深处取得约 20 g 木粉；侧枝则是截取一段侧枝，去皮，然后用电动钻打 1~3 孔钻取木粉约 20 g；树叶则是在 1 个侧枝中摘取全部叶片，质量不等，混匀，从中抽取 20 g 作样品。回到实验室内取 3 g 样品削成碎片，烘干后用粉碎机打成粉末状后备用。每个树种每个器官 3 次重复，取平均值为各部位含碳率。

1.4 含碳率检测

植物全碳的测定参照李西开^[20]介绍的重铬酸钾容量法，取磨碎烘干植物样品 0.030 0~0.037 5 g 于消化杯中，加入 20 mL 的 0.4 mol/L 的重铬酸钾-硫酸溶液，轻轻摇匀，再加上冷凝器。把消化杯放在预热到 230~240 °C 的电热板上加热消化，从沸腾开始计时，保持平缓沸腾 (5.0 ± 0.5) min。消煮完毕后，取下，冷却片刻，用水冲洗冷凝器内壁，洗涤液收集于原消化杯中，瓶内体积控制在 60~80 mL，加林菲洛琳指示剂 3~4 滴，用硫酸亚铁滴定至溶液变棕红色时，记录硫酸亚铁标准液用量体积 b 。然后按照公式 (6) 计算出含碳率。每个树种每个器官 3 次重复检测，取平均值为各部位含碳率。

$$C = \frac{(a-b)N_{Fe} \times 0.003}{W} \times 100\% \dots \dots \dots (6)$$

式中： C ——含碳率 (%)

a ——空白标定时用去的硫酸亚铁标准液体积 (mL)；

b ——滴定待测液用去的硫酸亚铁标准液体积 (mL)；

N_{Fe} ——硫酸亚铁标准液的当量浓度；

0.003——当量碳 C 的克数 (g)；

W ——样品重量 (g)。

1.5 树种加权平均含碳率估算

由于本次研究没有测定各树种地下部分的含碳量，因此以地上部分各器官求取整株的加权平均含碳率。方法是按罗云建等^[19]给出的基于胸径的通用林木生物量模型中的树干、树枝和树叶的模型公式 (1~3)，计算出各个器官的生物量，再按公式 (7) 求出各个器官生物量权重 a ，再按公式 (8) 求出各个树种的加权平均含碳率 \bar{C} 。

$$a = W_{\text{器官}} / W_{\text{地上}} \dots \dots \dots (7)$$

$$\bar{C} = a_{\text{树干}} C_{\text{树干}} + a_{\text{侧枝}} C_{\text{侧枝}} + a_{\text{树叶}} C_{\text{树叶}} \dots \dots \dots (8)$$

式中： a 为某器官的权重， $W_{\text{器官}}$ 为某器官生物量， $W_{\text{地上}}$ 为某树种地上部分生物量， C 为某器官的含碳率， \bar{C} 为加权平均含碳率。

1.6 林分碳储量估算

林分碳储量按照公式 (9) 计算：

$$CS = W_l \times \text{Den} \times P \times \bar{C} \dots \dots \dots (9)$$

式中： CS 为单位面积碳储量 (t/hm²)； P 为保存率 (%)； Den 为林分密度 (株/hm²)； W_l 为平均木生物量 (t/株)； \bar{C} 为加权平均含碳率 (%)。

1.7 数据整理与分析

采用 Microsoft 的 Excel 进行数据整理，用 SAS9.4 软件的 GLM、CORR 和 FASTCLUS 模块进行统计分析^[21]。

2 结果与分析

2.1 各树种生物量估算

按公式 (1~5) 计算出各树种平均木生物量如下表 2，可以看出，生物量在 100 kg 以上的树种有 23 个，由高至低依次是厚荚相思、南酸枣、大叶相思、黎蒴、灰木莲、马尾松、石梓等。生物量低于 20 kg 的有台湾罗汉松。不同树种间生物量值差异悬殊，最高生物量是最低生物量近 15 倍，这与树种特性和适应性有关。

2.2 各树种加权平均含碳率估算

各树种的加权平均含碳率如表 3。由表 3 可知，不同树种间含碳率差异不大，各树种加权平均含碳率处于 45.47%~51.10% 之间，平均含碳率为 47.72%。常绿针叶树平均含碳率相对较高，为 49.91%；其次是常绿阔叶树，为 47.69%；最低是落叶阔叶树，为 46.94%。

2.3 各树种纯林单位面积碳储量估算

林分碳储量受诸多因素控制，分别与保存率、含碳率、造林密度、生物量等因素密切相关。根据公式 (9) 计算出各树种单位面积碳储量如表 4。每公顷年均碳储量在 10 t 的有 5 个树种，分别是厚荚相思、大叶相思、南酸枣、黎蒴和马尾松；单位面积年均碳储量在 5~10 t 的有 18 个树种，分别是灰木莲、红荷、红锥、石梓、山桂花、乐昌含笑、山杜英、绢毛杜英、翻白叶树、阴香、白栎、锡兰橄榄、西南桦、山乌柏、大叶紫薇、楝叶吴茱萸、米老排和尖叶杜英；每公顷年均碳储

表2 52个树种平均木生物量估算结果
Table 2 Estimation of biomass of average tree of 52 tree species

编号 No.	树种 Species	平均木 Average tree			编号 No.	树种 Species	平均木 Average tree		
		树高 /m Height	胸径 /cm DBH	生物量 /kg Biomass			树高 /m Height	胸径 /cm DBH	生物量 /kg Biomass
1	马尾松	9.52	19.86	174.87	27	海红豆	6.63	8.49	66.34
2	台湾罗汉松	3.85	4.53	17.20	28	格木	4.19	7.02	55.63
3	小叶竹柏	4.14	7.45	33.13	29	尖叶杜英	10.12	11.67	97.60
4	长叶竹柏	4.26	7.43	34.14	30	中华杜英	3.76	7.07	57.47
5	乐昌含笑	13.45	18.73	164.72	31	山杜英	7.30	15.40	137.70
6	火力楠	7.11	10.26	59.16	32	锡兰橄榄	7.33	13.60	117.52
7	山桂花	11.41	18.72	164.43	33	绢毛杜英	10.36	13.80	123.77
8	灰木莲	11.44	19.55	178.74	34	南酸枣	10.97	19.64	205.80
9	紫玉兰	3.73	3.63	20.75	35	棘叶吴茱萸	9.03	13.61	122.38
10	阴香	9.42	15.75	123.31	36	小叶榄仁	4.19	5.70	56.67
11	黄樟	6.85	13.80	98.26	37	莫氏榄仁	4.70	6.10	60.17
12	红锥	6.74	7.30	167.06	38	油榄仁	3.73	5.66	58.03
13	黎蒴	8.47	20.05	189.01	39	水蒲桃	5.06	11.35	99.58
14	白栎	11.20	15.06	120.34	40	海南蒲桃	5.78	7.20	70.27
15	枫香	8.10	9.53	63.37	41	西南桦	9.68	15.63	153.04
16	米老排	9.46	14.31	111.71	42	海芒果	4.48	9.70	88.09
17	红花荷	6.54	10.28	69.74	43	青皮	4.96	5.23	62.24
18	木荷	10.63	11.77	88.06	44	石梓	9.88	16.73	170.71
19	红荷	12.63	18.20	169.72	45	银桦	4.39	7.07	73.10
20	五月茶	4.09	6.24	43.28	46	翻白叶树	8.65	12.01	116.38
21	山乌柏	4.56	14.09	109.29	47	鸭脚木	3.59	8.44	82.96
22	秋枫	4.72	6.44	46.92	48	大花五桠果	5.47	7.10	77.37
23	降香黄檀	4.22	5.40	42.28	49	杨梅	7.27	6.71	77.95
24	海南红豆	8.80	14.09	116.48	50	红花玉蕊	4.04	6.46	74.36
25	大叶相思	13.3	19.34	194.19	51	大叶紫薇	7.45	10.72	108.42
26	厚荚相思	9.79	26.90	241.27	52	海南菜豆树	6.05	7.43	83.92

表3 不同树种加权平均含碳率估值
Table 3 Weighted average carbon content estimation of different tree species

编号 No.	树种 Species	含碳率 /%Carbon content rate			权重 Weight			加权平均 含碳率 /% Weighted average carbon content
		主干 Trunk	侧枝 Branch	树叶 Leaf	主干 Trunk	侧枝 Branch	树叶 Leaf	
1	马尾松	49.67	49.93	50.30	0.62	0.32	0.06	49.79
2	台湾罗汉松	52.63	46.05	48.63	0.36	0.50	0.14	48.77
3	小叶竹柏	51.73	51.15	48.37	0.44	0.45	0.11	51.10
4	长叶竹柏	50.47	49.77	49.00	0.44	0.45	0.11	50.00
5	乐昌含笑	48.43	48.13	46.10	0.61	0.33	0.06	48.18
6	火力楠	50.77	48.57	48.03	0.50	0.41	0.09	49.62
7	山桂花	48.83	48.10	44.43	0.61	0.33	0.06	48.31
8	灰木莲	50.37	49.00	47.70	0.61	0.32	0.06	49.76
9	紫玉兰	52.63	48.53	42.25	0.32	0.52	0.15	48.88
10	阴香	49.50	46.20	46.50	0.58	0.35	0.07	48.13

编号 No.	树种 Species	含碳率 /%Carbon content rate			权重 Weight			加权平均 含碳率 /% Weighted average carbon content
		主干 Trunk	侧枝 Branch	树叶 Leaf	主干 Trunk	侧枝 Branch	树叶 Leaf	
11	黄樟	49.30	47.63	48.13	0.55	0.37	0.08	48.59
12	红锥	47.87	45.13	46.03	0.60	0.33	0.06	46.85
13	黎蒴	47.20	48.40	48.57	0.62	0.32	0.06	47.67
14	白栎	46.03	46.87	46.07	0.57	0.36	0.07	46.33
15	枫香	48.27	47.20	42.70	0.49	0.42	0.10	47.29
16	米老排	49.77	47.60	47.57	0.56	0.36	0.08	48.81
17	红花荷	48.50	47.37	51.90	0.50	0.41	0.09	48.35
18	木荷	47.50	46.83	47.90	0.53	0.39	0.09	47.27
19	红荷	47.53	47.07	48.43	0.60	0.33	0.07	47.44
20	五月茶	47.97	47.40	41.55	0.41	0.47	0.12	46.93
21	山乌柏	46.33	45.13	44.20	0.56	0.37	0.08	45.73
22	秋枫	49.60	45.20	41.40	0.42	0.46	0.12	46.59
23	降香黄檀	48.70	49.23	45.85	0.39	0.48	0.13	48.59
24	海南红豆	48.87	47.13	49.90	0.56	0.37	0.08	48.31
25	大叶相思	49.57	46.37	48.20	0.61	0.32	0.06	48.44
26	厚荚相思	48.50	46.97	53.65	0.63	0.31	0.06	48.33
27	海红豆	47.97	47.47	45.17	0.47	0.43	0.10	47.47
28	格木	48.27	46.13	48.80	0.43	0.45	0.11	47.36
29	尖叶杜英	48.77	45.15	44.23	0.52	0.39	0.09	46.97
30	中华杜英	48.27	47.23	45.13	0.43	0.45	0.11	47.45
31	山杜英	48.03	46.80	42.87	0.57	0.35	0.07	47.22
32	锡兰橄榄	47.93	45.50	44.27	0.55	0.37	0.08	46.74
33	绢毛杜英	47.90	46.70	41.37	0.55	0.37	0.08	46.95
34	南酸枣	47.10	46.30	44.17	0.61	0.32	0.06	46.66
35	楝叶吴茱萸	49.00	46.87	47.85	0.55	0.37	0.08	48.12
36	小叶榄仁	49.23	45.97	43.97	0.40	0.48	0.13	47.01
37	莫氏榄仁	48.20	45.57	42.30	0.41	0.47	0.12	46.25
38	油榄仁	47.00	45.30	41.30	0.40	0.48	0.13	45.47
39	水蒲桃	46.73	46.87	45.03	0.52	0.39	0.09	46.64
40	海南蒲桃	48.07	47.53	46.77	0.44	0.45	0.11	47.68
41	西南桦	46.33	45.83	45.67	0.58	0.35	0.07	46.11
42	海芒果	48.83	46.73	44.73	0.49	0.41	0.10	47.57
43	青皮	47.93	46.53	50.63	0.38	0.49	0.13	47.60
44	石梓	48.73	48.07	46.57	0.59	0.34	0.07	48.35
45	银桦	46.50	46.97	47.07	0.43	0.45	0.11	46.78
46	翻白叶树	47.77	47.33	46.73	0.53	0.39	0.08	47.51
47	鸭脚木	47.23	45.17	46.33	0.47	0.43	0.10	46.25
48	大花五桠果	49.10	48.53	42.63	0.44	0.45	0.11	48.12
49	杨梅	47.90	49.30	46.57	0.43	0.46	0.12	48.39
50	红花玉蕊	47.45	46.27	43.57	0.42	0.46	0.12	46.45
51	大叶紫薇	49.00	48.50	41.15	0.51	0.40	0.09	48.09
52	海南菜豆树	48.90	48.07	45.20	0.44	0.45	0.11	48.12
	平均							47.72

表 4 52 个树种纯林单位面积碳储量估算值
Table 4 Estimated carbon storage per unit area of 52 tree species

树种 Species	平均木 生物量 / (kg/株) Biomass of average tree	加权平均含 碳率 /% Weighted average carbon content	保存率 /% Preservation rate	单位面积 碳储量 (t·hm ⁻²) Carbon storage per unit area	单位面积年均 碳储量 (t·hm ⁻² ·a ⁻¹) Carbon storage per unit area · year	树种 Species	平均木 生物量 / (kg/株) Biomass of average tree	加权平均含 碳率 /% Weighted average carbon c ontent	保存率 /% Preservation rate	单位面积 碳储量 (t·hm ⁻²) Carbon storage per unit area	单位面积年均 碳储量 (t·hm ⁻² ·a ⁻¹) Carbon storage per unit area · year
马尾松	174.9	49.79	95	110.34	10.03	海红豆	66.3	47.47	90	37.81	3.44
台湾罗汉松	17.2	48.77	65	7.27	0.66	格木	55.6	47.36	98	34.45	3.13
小叶竹柏	33.1	51.10	90	20.32	1.85	尖叶杜英	97.6	46.97	92	56.26	5.11
长叶竹柏	34.1	50.00	90	20.50	1.86	中华杜英	57.5	47.45	60	21.83	1.98
乐昌含笑	164.7	48.18	80	84.69	7.70	山杜英	137.7	47.22	90	78.07	7.10
火力楠	59.2	49.62	80	31.33	2.85	锡兰橄榄	117.5	46.74	92	67.41	6.13
山桂花	164.4	48.31	80	84.77	7.71	绢毛杜英	123.8	46.95	95	73.64	6.69
灰木莲	178.7	49.76	90	106.78	9.71	南酸枣	205.8	46.66	95	121.69	11.06
紫玉兰	20.8	48.88	55	7.44	0.68	棘叶吴茱萸	122.4	48.12	80	62.85	5.71
阴香	123.3	48.13	90	71.25	6.48	小叶榄仁	56.7	47.01	95	33.76	3.07
黄樟	98.3	48.59	85	54.14	4.92	莫氏榄仁	60.2	46.25	85	31.55	2.87
红锥	167.1	46.85	90	93.97	8.54	油榄仁	58.0	45.47	85	29.92	2.72
黎蒴	189.0	47.67	98	117.79	10.71	水蒲桃	99.6	46.64	80	49.56	4.51
白栎	120.3	46.33	96	71.40	6.49	海南蒲桃	70.3	47.68	98	43.80	3.98
枫香	63.4	47.29	95	37.98	3.45	西南桦	153.0	46.11	70	65.90	5.99
米老排	111.7	48.81	80	58.19	5.29	海芒果	88.1	47.57	75	41.93	3.81
红花荷	69.7	48.35	65	29.24	2.66	青皮	62.2	47.60	85	33.60	3.05
木荷	88.1	47.27	95	52.75	4.80	石梓	170.7	48.35	80	88.08	8.01
红荷	169.7	47.44	95	102.04	9.28	银梓	73.1	46.78	85	38.77	3.52
五月茶	43.3	46.93	95	25.74	2.34	翻白叶树	116.4	47.51	98	72.29	6.57
山乌柏	109.3	45.73	97	64.67	5.88	鸭脚木	83.0	46.25	35	17.91	1.63
秋枫	46.9	46.59	30	8.75	0.80	大花五桠果	77.4	48.12	60	29.80	2.71
降香黄檀	42.3	48.59	95	26.04	2.37	杨梅	77.9	48.39	80	40.25	3.66
海南红豆	116.5	48.31	70	52.55	4.78	红花玉蕊	74.4	46.45	90	41.47	3.77
大叶相思	194.2	48.44	98	122.98	11.18	大叶紫薇	108.4	48.09	92	63.99	5.82
厚荚相思	238.0	48.33	95	145.75	13.25	海南菜豆树	83.9	48.12	75	40.40	3.67

注：林分密度均为 1 334 株。 Note: The stand densities is 1 334.

量在 1~5 t 的有黄樟、海南红豆等 26 个树种，每公顷年均碳储量在 1 t 以下的有秋枫、台湾罗汉松和紫玉兰 3 个树种。

2.4 林分碳储量与树种其他性状间的相关关系

分析树种林分碳储量与生长性状（平均木生物量）、适应性状（保存率）和木材碳汇性状（含碳率）3 个因子的相关关系，结果见表 5。由表 5 可知，林分碳储量与生长性状（平均木生物量均密切相关），相关系数 0.971 9，且达极显著水平（ $P < 0.01$ ）；与保存率亦呈极显著相关（ $r = 0.496 6$ ， $P < 0.01$ ），但与平均含碳率相关不密切。

2.5 聚类分析

以保存率和单位面积碳储量 2 个主要性状，利用 SAS9.4 软件的 FASTCLUS 模块进行动态聚类分析，聚类结果如图 1。52 个树种划分为 4 种类型。

4 种类型各个性状均值如表 6。第 I 类型包括厚荚相思、大叶相思、灰木莲、红荷、南酸枣、马尾松、黎蒴 7 个树种，属于适应性强高碳储量类型；这种类型树种可以在南亚热带地区碳汇林造林中广泛使用；第 II 类包括紫玉兰、大花五桠果、中华杜英、鸭脚木、秋枫、台湾罗汉松和红花荷 7 个树种，属于低适应性低固碳能力类型，

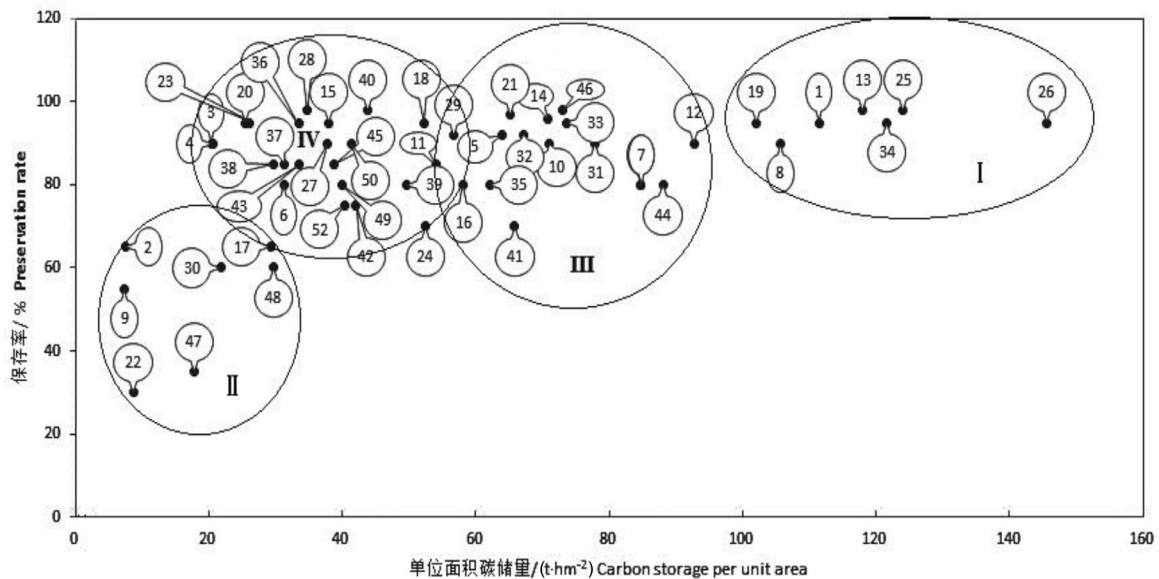
表 5 林分碳储量与 3 个性状因子间相关系数

Table 5 Correlation coefficient between stand carbon reserve and 3 trait factors

因子 Factor	生物量 Biomass	保存率 Preservation rate	含碳率 Carbon content rate
碳储量 Carbon storage	0.971 9	0.496 6	0.066 6
	<.000 1	0.000 2	0.639 1
生物量 Biomass		0.318 3	0.003 6
		0.021 5	0.979 8
保存率 Preservation rate			0.067 6
			0.633 9

注：上行数据为相关系数，下行为显著性检验值

Note: The uplink data is the correlation coefficient, and the downlink data is the significance test value



注：图中数字为树种编号

Note: Number of tree species is shown in the figure

图 1 52 个树种 2 个主要性状动态聚类图

Fig. 1 Dynamic cluster maps of 2 main characters of 52 tree species

表6 动态聚类划分的4种类型的性状均值
Table 6 Mean value of 4 types tree species by dynamic clustering

类型编号 Type number	种数 Species number	保存率 / % Preservation rate	单位面积碳储量 / (t · hm ⁻²) Carbon storage per unit area	类型名称 Type
I	7	95.14	118.32	高适应性高固碳能力型树种
II	7	52.86	17.41	低适应性低固碳能力型树种
III	16	87.63	72.18	高适应性中等固碳能力型树种
IV	22	87.09	37.10	高适应性中低固碳能力型树种

这种类型树种在南亚热带地区碳汇林造林中不建议使用；第Ⅲ类包括绢毛杜英、白栎、石梓、米老排等16个树种，属于高适应性中等固碳能力类型树种，这种类型树种在南亚热带地区碳汇林造林，从增加树种多样性角度上，建议选择使用；第Ⅳ类包括格木、黄樟、木荷、火力楠等22个树种，属于高适应性中低固碳能力类型树种，同样这种类型树种在南亚热带地区碳汇林造林建议选择使用。

3 结论与讨论

本研究按照平均木法，根据实测数据求得各个树种的平均木，再用整株通用生物量模型，估算出平均木生物量，结合树种平均含碳率与造林保存率，估算出52个造林树种纯林的单位面积碳储量。研究发现不同树种纯林单位面积碳储量差异极大，最高碳储量（厚荚相思）比最低碳储量（紫玉兰）相差约20倍。每公顷年均碳储量在10 t以上的有5个树种，分别是厚荚相思、大叶相思、南酸枣、黎蒴和马尾松；单位面积年均碳储量在5~10 t的有18个树种，分别是灰木莲、红荷、红锥、石梓、山桂花、乐昌含笑、山杜英、绢毛杜英、翻白叶树、阴香、白栎、锡兰橄榄、西南桦、山乌柏、大叶紫薇、楝叶吴茱萸、米老排和尖叶杜英；每公顷年均碳储量在1~5 t的有黄樟、海南红豆等26个树种，每公顷年均碳储量在1 t以下的有秋枫、台湾罗汉松和紫玉兰3个树种。

各树种加权平均含碳率分析发现树种间含碳率差异不大，各树种含碳率处于45.47%~51.10%之间，平均含碳率为47.61%。这个含碳率数据与众多学者^[22-26]碳储量的估算采用的45%或50%都极为接近。本次研究的含碳率与张红爱^[27]和徐期瑚等^[9]研究的马尾松（54.43%）、黎蒴（51.92%）、

速生相思（53.31%）和木荷（55.69%）略低一些，这可能与样本取样地点与林龄有一定关系。从树种生活型分析发现，针叶树平均含碳率相对较高，为50.37%，其次是常绿阔叶树，为47.57%，最低是落叶阔叶树，为46.73%，此结论与白保勋等^[28]、马俊青等^[29]的研究结果一致。

本次研究外业调查时，没有采取地下部分的样品测定含碳率，因而可能在加权平均含碳率计算中会有一些的偏差，但偏差非常小，如本次估算的马尾松加权平均含碳率为49.17%，与郭文清等^[30]在湖南利用包括地下部分的28株马尾松解析木估算整株加权平均含碳率50.52%，仅相差1.35个百分点，差异2.75%。尽管与包括地下部分的含碳率有一定偏差，但本次估算仍有一定的参考意义，与一些文献笼统采用45%或50%作为含碳率进行估算^[3,25]比较仍相对较为准确。

52个树种采用动态聚类可划分为4种类型。第Ⅰ类型属于适应性强高碳储量类型（7种），这种类型树种可以在南亚热带地区碳汇林造林中广泛使用；第Ⅱ类属于低适应性低固碳能力类型（7种），这种类型树种在南亚热带地区碳汇林造林中不建议使用；第Ⅲ类高适应性中等固碳能力类型树种（16种）和第Ⅳ类高适应性中低固碳能力类型树种（22种），从增加树种多样性角度考虑，建议在南亚热带地区碳汇林造林时选择使用。

参考文献

- [1] 王立. 重庆主城区常见园林树种及群落的碳汇能力研究[D].重庆: 西南大学, 2013.
- [2] REAY D S. Climate change for the masses[J]. Nature, 2008, 452(7183): 3.
- [3] 谭文雄, 梁素莲. 广东省韶关市森林植被碳储量及其分

- 布[C]/[编者不详].2010中国科协年会第五分会场全球气候变化与碳汇林业学术研讨会优秀论文集.[出版单位不详], 2010.
- [4] 李意德, 曾庆波, 吴仲民, 等.我国热带天然林植被C贮存量的估算[J].林业科学研究, 1998, 12(2):156-162.
- [5] 路秋玲, 李愿会.三江源自然保护区森林植被层碳储量及碳密度研究[J].林业资源管理, 2018(4): 146-153.
- [6] 方精云, 陈安平.中国森林植被碳库的动态变化及其意义[J].植物学报, 2001, 43(9): 967-973.
- [7] 李海奎, 雷渊才, 曾伟生.基于森林清查资料的中国森林植被碳储量[J].林业科学, 2011, 47(7): 7-12.
- [8] 徐期朔, 林丽平, 薛春泉, 等.广东不同起源枫香各器官的含碳系数及碳储量[J].森林与环境学报, 2018, 38(3): 318-325.
- [9] 徐期朔, 林丽平, 薛春泉, 等.广东木荷各器官含碳率及碳储量研究[J].中南林业科技大学学报, 2018, 38(10): 71-78.
- [10] 卢伟志, 林广旋, 王参谋, 等.广东湛江次生与原生红树林群落碳储量与掉落物动态研究[J].海洋环境科学, 2014, 33(6): 913-919.
- [11] 王璟睿, 佘宏基, 孙昕, 等.广东省森林碳储量与动态变化[J].东北林业大学学报, 2016, 44(1): 18-22.
- [12] 高天伦, 管伟, 毛静, 等.广东省雷州附城主要红树林群落碳储量及其影响因子[J].生态环境学报, 2017, 26(6): 985-990.
- [13] 李晓曼, 康文星.广州市城市森林生态系统碳汇功能研究[J].中南林业科技大学学报: 自然科学版, 2008, 28(1): 8-13.
- [14] 蔡燕灵, 连辉明, 曾令海, 等.广东省黎蒴局部种源早期选择[J].广东林业科技, 2010, 26(5): 6-11.
- [15] 张谦, 曾令海, 何波祥, 等.速生乡土树种黎蒴优树半同胞家系子代测定[J].广东林业科技, 2010, 26(3): 1-7.
- [16] 吴清, 黄艺平, 瞿超, 等.东江林场桉树无性系生长初步对比试验[J].广东林业科技, 2009, 25(3): 46-50.
- [17] 陈耀辉, 赵志刚, 许伟兵, 等.东江林场20个乡土阔叶树种拟木蠹蛾为害调查[J].环境昆虫学报, 2016, 38(6): 1269-1274.
- [18] 孙玉军, 王新杰, 马炜, 等.林改区域典型树种森林碳储量监测技术研究[M].北京: 中国林业出版社, 2014: 6-19.
- [19] 罗云建, 王效科, 逯非.中国主要林木生物量模型手册[M].北京: 中国林业出版社, 2015: 238-249.
- [20] 李西开.土壤农业化学常规分析方法[M].北京: 科学出版社, 1983: 272-273.
- [21] 黄少伟, 谢维辉.实用SAS编程与林业试验数据分析[M].广州: 华南理工大学出版社, 2001.
- [22] 王效科, 冯宗炜, 欧阳志云.中国森林生态系统的植物碳储量和碳密度研究[J].应用生态学报, 2001, 12(1): 13-16.
- [23] 黄从德, 张健, 杨万勤, 等.四川省及重庆地区森林植被碳储量动态[J].生态学报, 2008, 28(3): 966-975.
- [24] 李明军, 杜明凤, 喻理飞.贵州省森林植被碳储量、碳密度及其分布[J].西北林学院学报, 2016, 31(1): 48-54.
- [25] 张颖, 周雪, 覃庆锋, 等.中国森林碳汇价值核算研究[J].北京林业大学学报, 2013, 35(6): 124-131.
- [26] 赵林, 殷鸣放, 陈晓非, 等.森林碳汇研究的计量方法及研究现状综述[J].西北林学院学报, 2008, 23(1): 59-63.
- [27] 张红爱.广东8种主要乔木树种碳含量测定分析[J].林业资源管理, 2018(1): 148-154.
- [28] 白保勋, 焦书道, 陈东海.河南中北部38个常见树种的生物量与固碳特征分析[J].西部林业科学, 2017, 46(1): 79-84.
- [29] 马俊青, 李高阳, 田丽.河南省主要造林树种含碳率比较研究[J].河南农业科学, 2012, 41(9): 131-132.
- [30] 郭文清, 徐清乾, 许忠坤, 等.马尾松人工纯林不同器官含碳系数分析[J].湖南林业科技, 2014, 41(4): 40-44.