

广东樟树各器官含碳率及碳储量

徐期瑚¹, 林丽平¹, 薛春泉¹, 罗 勇¹, 雷渊才²

(1. 广东省林业调查规划院, 广东 广州 510520; 2. 中国林业科学研究院 资源信息研究所, 北京 100091)

摘要: 以 2012 年广东省森林资源连续清查资源数据中樟树 *Cinnamomum camphora* 的分布为基础, 按 2, 4, 6, 8, 12, 16, 20, 26, 32 和 38 cm 共 10 个径阶伐倒 90 株樟树样木, 获取树干、树皮、树叶、树枝、树根各器官生物量及含碳率数据, 采用加权平均和总碳储量计算方法, 计算了 90 株单木的碳储量。结果表明: 广东樟树平均含碳率为 0.509 6; 树皮含碳率显著低于其他各器官 ($P < 0.05$), 树干、树叶、树枝、树根差异不显著; 含碳率随年龄增加而增加, 到近熟林和成熟林达到最高, 到过熟林再下降; 人工林的含碳率高于天然林; 含碳率随着纬度增加而增加, 随着海拔增加而降低; 各器官碳储量在全树中的比例从大到小排列顺序为树干, 树枝, 树根, 树皮, 树叶; 随着胸径增加树干碳储量比例变化的趋势先增加后下降, 树皮碳储量比例前期稳定、后期下降, 树叶、树根碳储量比例变化不大, 树枝碳储量比例初期稳定、后期增加。拟合出樟树年龄 (A), 胸径 (D) 和 D^2H (H 为树高) 的最优碳储量 (C_i) 模型依次为 $C_i = 0.019 4A^{2.652 0}$, $C_i = 0.011 8D^{2.937 6}$, $C_i = 0.001 6(D^2H)^{1.268 6}$, R^2 值依次为 0.602 9, 0.943 2, 0.910 5; 经交叉检验, 模型拟合效果显著 ($P < 0.01$)。以胸径和 D^2H 为变量的樟树碳储量模型拟合效果优于以年龄为变量的模型, 模型应用中应优先选择胸径和 D^2H 为变量的模型进行碳储量估算, 当胸径和 D^2H 不易测量且年龄易知时, 方可使用年龄为变量的碳储量模型进行估算。表 12 参 35

关键词: 森林生态学; 含碳率; 碳储量; 樟树; 广东省

中图分类号: S718.5

文献标志码: A

文章编号: 2095-0756(2019)01-0070-10

Component specific carbon content and storage of *Cinnamomum camphora* in Guangdong Province

XU Qihu¹, LIN Liping¹, XUE Chunquan¹, LUO Yong¹, LEI Yuancai²

(1. Guangdong Institute of Forestry Inventory and Planning, Guangzhou 510520, Guangdong; China; 2. Research Institute of Forest Resource Information Techniques, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China)

Abstract: To quickly and accurately measure the carbon sink in forest carbon sequestration projects and to monitor carbon storage changes in forest vegetation of Guangdong Province, *Cinnamomum camphora* trees were selected as the object to establish a carbon storage model. Based on the 8th continuous forest inventory data for *C. camphora* distribution in Guangdong Province in 2012, all 90 sample trees were classified in 10 diameter classes according to 2, 4, 6, 8, 12, 16, 20, 26, 32, and 38 cm. The weighted mean and total carbon storage were calculated for individual trees of *C. camphora* including components of stem wood, bark, leaves, branches, and roots among different diameter levels by using the analysis of variance (ANOVA) method. Results showed that: (1) The average carbon rate of *C. camphora* in Guangdong was 0.509 6. There were no significant differences among stems, leaves, branches, and roots ($P > 0.05$) for the average carbon content in DBH levels, but the carbon content of bark was significantly lower than other components ($P < 0.05$). (2) Carbon content increased with age in period of mature and near-mature forests, but declined in period of over-mature forests.

收稿日期: 2018-01-10; 修回日期: 2018-03-21

基金项目: 广东省林业科技创新平台建设项目(2016CXPT03); 广东省林业科技专项(2015-02)

作者简介: 徐期瑚, 高级工程师, 从事森林生态监测、林业碳汇计量监测及林业生态规划研究。E-mail: cs-fuxqh@163.com。通信作者: 薛春泉, 教授级高级工程师, 从事森林生态监测、林业调查规划设计及林业碳汇计量监测研究。E-mail: 2226043870@qq.com

(3) The carbon content of the artificial forest was higher than the natural forest and increased with increasing latitude, but decreased with the increasing of altitude. (4) The proportion of carbon storage in each component was stem > branch > root > bark > leaf. (5) With an increase in DBH, the ratio of stem carbon storage increased first and then decreased, the proportion of bark carbon reserves was stable at an early age but decreased in later stages, the proportion of leaves and roots changed little, and the carbon storage of branches was stable first and increased in a later period at a significant level of 0.05. (6) The optimal carbon storage (C_t) model of *C. camphora* and R^2 for age (A) was $C_t = 0.019 4A^{2.652 0}$, $R^2 = 0.602 9$; for DBH was $C_t = 0.011 8D^{2.937 6}$, $R^2 = 0.943 2$; and for D^2H was $C_t = 0.001 6(D^2H)^{1.268 6}$, $R^2 = 0.910 5$. Through cross validation, the model fitting effect was significant ($P < 0.01$). The fitting carbon storage model of *C. camphora* with D and D^2H was better than the age variable. In the model application, the model with D and D^2H should be selected to estimate the carbon storage. When the diameter (D) and D^2H were not easy to be measured but the age was easy to know, the age could be used to estimate the carbon storage. [Ch, 12 tab. 35 ref.]

Key words: forest ecology; carbon content; carbon storage; *Cinnamomum camphora*; Guangdong

森林生态系统是地球上仅次于海洋生态系统的第二大碳库，约占全球陆地总碳库的 46%^[1]，森林植被碳库占全球植被碳库的 77.1%^[2]，森林土壤碳库储存了全球土壤碳储量的 40% 左右^[3]。森林生态系统不仅在维护区域生态环境上起重要作用，而且在维持全球碳平衡中有巨大贡献^[4]。森林具有“碳源”和“碳汇”的双重功能，森林在增加碳汇、减缓大气“温室气体”浓度增加中发挥的作用越来越突出^[5-7]，准确估算森林生态系统的碳储量是全球气候变化研究的关键^[8-9]。近年来，中国有关不同森林类型的碳储量、碳密度等研究取得了重大进展^[10-13]，但不同学者采用的估算方法不同、数据的时间及空间不同以及森林生态系统在时间和空间上的复杂性，导致森林生态系统碳储量的估算在学术界仍存在很大的不确定性^[14-17]。目前，无论是在国家或是区域尺度上，还是在森林群落或生态系统的尺度上，对森林碳储量的估算普遍通过直接或间接测定森林植被的生物量再乘以含碳率推算而来。因此，森林群落中各组成树种的含碳率是研究森林碳储量的关键参数之一，对含碳率的测定是估算森林生态系统碳储量的基础^[18]。在过去几十年中，有关森林碳储量的研究大多采用固定的数值 0.500 0 或 0.450 0 作为森林的平均含碳率^[6,19-23]。然而，许多研究表明：不同的森林类型，其植被及同一种植物不同器官的含碳率也明显不同^[24-25]，如果在估算森林植被碳储量时不考虑树种间及各器官含碳率的差异，将会引起约 10% 的偏差^[26-27]。因此，为减少森林植被碳储量估算的不确定性，基于调查样本的试验材料准确测定、估计不同区域或同一区域不同环境和不同年龄的树种以及不同器官的含碳率是非常必要的。樟树 *Cinnamomum camphora* 是广东典型地带性树种，在广东省植被中大量分布，主要集中分布于粤北的韶关、清远、梅州、河源、惠州、肇庆等地区，粤东及粤西沿海分布较少，雷州半岛分布极少。樟树是优良的珍贵用材树种，是新一轮绿化广东大行动开展碳汇造林工程的主要树种之一。2012 年以来，广东营造了大量的樟树人工林，但目前针对樟树含碳率及单株碳储量的研究报道较少，研究探索不同龄组、不同起源、不同纬度、不同海拔等条件下樟树含碳率及碳储量变化规律更是少见。本研究以伐倒的 90 株樟树单木为研究对象，对其树干、树皮、树叶、树枝、树根各器官含碳率以及碳储量进行测定和分析，建立适合广东的樟树碳储量模型，旨在为广东省森林植被碳储量动态的估算提供基础数据，为精准计量森林碳汇工程的碳汇量提供基础参数。

1 研究地区概况

研究区位于广东全省境内，地理坐标为 20°09′~25°31′N，109°45′~117°20′E，面积 17.97 万 km²，北回归线横贯而过，东南濒临南海，西北有南岭，地势北高南低，水热条件优越。广东从北向南形成 3 个不同的纬度带，分别为中亚热带、南亚热带和热带北缘。广东气候特征为热量丰富，夏长冬暖，降雨量充沛，干湿季分明，夏秋多台风，热带气旋频繁。年平均日照时数为 1 745.8 h，年平均气温为 22.3 ℃，最冷 1 月平均气温为 13.3 ℃，最热 7 月平均气温为 28.5 ℃，年太阳总辐射量为 4 200~5 400 MJ·m⁻²，年平均降水量为 1 300~2 500 mm。广东省地带性森林植被的主要类型中亚热带常绿阔叶林、南亚热带

常绿阔叶林和少量热带季雨林。地带性土壤类型有赤红壤、红壤等。

2 样品采集和测定

2.1 试验材料

试验材料取样方法依据 LY/T 2259-2014《立木生物量建模样本采集技术规程》，以 2012 年广东省森林资源连续清查样地中樟树分布情况为基础，采用单株伐倒法按 10 个径阶区间选取 90 株样木进行伐倒木测定，10 个径阶区间的胸径分别为 2 径阶(1.5~2.5 cm)，4 径阶(3.5~4.5 cm)，6 径阶(5.5~6.5 cm)，8 径阶(7.5~8.5 cm)，12 径阶(11~13 cm)，16 径阶(15~17 cm)，20 径阶(19~21 cm)，26 径阶(25~27 cm)，32 径阶(31~33 cm)，38 径阶(38 cm 及以上)，其中 40 株进行树根采集。测定因子包括所处的立地条件(海拔、坡位、坡向、坡度)以及树种的起源、胸径、树高、枝下高、冠幅和坐标等。样木年龄的调查主要包括 2 个方面：40 株进行树干解析的样木，以树干年轮分析 0 号盘(0.3 m)处的年轮数为该样木的年龄；未进行树干解析的 50 株样木，观测伐桩(0.1 m)上的年轮数，并结合调查种植年限推测样木年龄。各样木调查情况见表 1，各采集样木径阶分布情况如表 2 所示。

表 1 研究区 90 株樟树采样统计表

Table 1 90 sampling camphor trees data statistics

变量	年龄/a	胸径/cm	树高/m
平均值	16.4	14.5	9.2
最小值	2.0	1.9	1.7
最大值	60.0	41.0	17.6
标准差	11.6	10.5	3.9

表 2 研究区樟树样木分径阶统计表

Table 2 Sampling camphor trees in different diameter classes data statistics

统计类别	合计/ 株	樟树数量/株									
		2 径阶	4 径阶	6 径阶	8 径阶	12 径阶	16 径阶	20 径阶	26 径阶	32 径阶	38 径阶
伐倒木	90	6	6	12	16	14	10	8	6	6	6
树干解析木	40					4	10	8	6	6	6
树根采集	40	3	3	5	7	6	4	4	3	3	2

2.2 含碳率测定

采用重铬酸钾-硫酸氧化法(湿烧法)对样品含碳率进行测定。对已经进行烘干后的木材上部、木材中部、木材下部、树皮中部、树枝中部、树叶、根茎、粗根、细根等 9 类样品，选取有代表性的样品约 1/5(不少于 20.0 g)，粗粉碎后按四分法取约 1/4 样品研磨并均匀混合，称取约 30.0 mg 试样(精确到 0.01 mg)，进行有机碳含量测定。重复 3 次，取其平均值作为样品的含碳率；若平均相对误差超出了±2%，则加做 1 次重复，取相差最小的 3 次测定结果的平均值作为样品的含碳率。

2.3 数据处理

2.3.1 含碳率计算与分析 由于不同器官的含碳率存在着一定的差异，单木各器官的生物量在总生物量中所占的权重又不尽相同，因此，以各器官含碳率的算术平均值作为该树种的平均含碳率并不能真实地反映实际情况。只有根据各器官的生物量权重计算的加权平均含碳率，才能真实地反映其实际平均水平及每一器官在平均值中的贡献^[28]。因此，本研究在估算全树含碳率时，按照下列公式计算：

$$\bar{P} = \frac{\sum_{i=1}^5 W_i P_i}{\sum_{i=1}^5 W_i} \quad (1)$$

式(1)中： \bar{P} 为全树加权平均含碳率； P_i 为某树种*i*器官的含碳率， W_i 为某树种*i*器官的生物量($i = 1, 2, 3, 4, 5$ ，分别代表树干、树皮、树叶、树枝、树根)。植物含碳率是植物碳储量的一种度量，反映绿色植物在光合作用中固定贮存碳的能力，李江等^[29]研究表明：不同树木年龄、胸径和器官等因素都对树木含碳率有影响，在分析某一因素是否对含碳率有影响之前，首先应该考虑各个因素之间是否有交互作用。鉴于此，本研究主要针对年龄、起源、纬度带、海拔等因子对樟树不同器官含碳率的影响进行分析。

2.3.2 碳储量计算 碳储量计算公式如下：

$$C_t = \sum_{i=1}^5 W_i P_i \quad (2)$$

式(2)中： C_t 为全树碳储量； P_i 为某树种器官的含碳率， W_i 为某树种*i*器官的生物量($i=1, 2, 3, 4, 5$ ，分别代表树干、树皮、树叶、树枝、树根)。

3 结果与分析

3.1 含碳率

3.1.1 樟树不同器官含碳率及与不同省区的比较分析 从表 3 可以看出：广东樟树全树加权平均含碳率为 0.509 6；不同器官的含碳率不同，为 0.483 8~0.516 6；树干的含碳率最高，其次是树叶、树枝、树根，最低的是树皮。树皮与其他各器官之间差异显著($P<0.05$)，但树干、树叶、树枝、树根之间差异不显著($P>0.05$)。全树含碳率算术平均值与加权平均值相比较，2 种方法得出的全树含碳率差异很小，差异值仅为-0.004 3。

表 3 樟树各器官含碳率

Table 3 Carbon content in different organs of *Cinnamomum camphora*

统计项目	含碳率						变异系数/%
	树干	树皮	树叶	树枝	树根	全树	
加权平均	0.516 6	0.483 8	0.510 8	0.510 7	0.502 3	0.509 6	5.98
含碳率	(±0.033 8)	(±0.042 7)	(±0.046 1)	(±0.039 1)	(±0.049 6)	(±0.030 5)	
算术平均	0.516 8	0.483 8	0.510 8	0.510 7	0.504 2	0.505 3	6.26
含碳率	(±0.033 2)	(±0.042 7)	(±0.046 1)	(±0.039 1)	(±0.042 3)	(±0.031 9)	
差异值	0.000 2	0.000 0	0.000 0	0.000 0	0.001 9	-0.004 3	

说明：括号中数值为标准差

从表 4 可知：全树含碳率广东最高，其次为湖南，最低为贵州，广东和湖南樟树含碳率比较接近，贵州樟树含碳率与其他两省存在明显差异。从各器官的含碳率来看，各省区树皮含碳率比其他器官均低，除树干、树叶含碳率湖南比广东高以外，树皮、树枝、树根均比湖南高，全树各个器官含碳率广东、湖南均高于贵州。

表 4 不同省区樟树各器官含碳率

Table 4 Carbon content in organs of *Cinnamomum camphora* from different provinces

省区	含碳率						参考文献
	树干	树皮	树叶	树枝	树根	全树	
广东	0.516 6	0.483 8	0.510 8	0.510 7	0.502 3	0.509 6	本研究
湖南	0.539 0	0.442 0	0.535 0	0.501 0	0.496 0	0.502 0	[24]
贵州	0.469 8		0.442 5	0.456 8	0.440 5	0.453 5	[30]

3.1.2 樟树不同部位器官含碳率的空间分布 ①树干(去皮)平均含碳率空间分布。从树干上部、中部、下部圆盘含碳率测定结果(表 5)可知：树干含碳率为 0.304 6~0.656 7，变异系数为 7%~8%，含碳率各层次变动较小，平均值差异显著性分析表明，差异未达到显著水平($P>0.05$)。②树根加权平均含碳率空间分布。从树根的根茎、粗根、细根各部位含碳率测定结果(表 6)可知：树根含碳率为 0.294 0~0.639 5，

表 5 樟树不同层次树干含碳率

Table 5 Carbon content of stem in different layers of *Cinnamomum camphora*

统计项目	含碳率		
	上层干	中层干	下层干
加权平均含碳率	0.516 6	0.515 6	0.518 3
标准差	0.037 4	0.038 1	0.038 1
变化范围	0.400 6~0.656 7	0.304 6~0.620 6	0.319 1~0.632 3
变异系数/%	7.23	7.39	7.35

表6 樟树不同层次树根含碳率

Table 6 Carbon content of roots in different layers of *Cinnamomum camphora*

统计项目	含碳率		
	根茎	粗根	细根
加权平均含碳率	0.496 3	0.511 2	0.504 9
标准差	0.058 7	0.054 0	0.057 1
变化范围	0.307 5~0.583 6	0.323 4~0.639 5	0.294 0~0.603 6
变异系数/%	11.83	10.55	11.30

变动范围较大, 变异系数为 10%~12%, 含碳率各层次变动较小, 平均值差异显著性分析表明, 差异未达到显著水平($P>0.05$)。粗根含碳率大于细根, 但根茎含碳率和细根比较接近。

3.1.3 不同龄组(年龄)与含碳率的关系 以实际测定的样木年龄为基础, 按年龄的大小以用材林进行龄组分配, 樟树 90 株样木按年龄分为 5 个龄组: 幼龄林(10 年生以下)、中龄林(11~20 年生)、近熟林(21~25 年生)、成熟林(26~35 年生)、过熟林(36 年生以上)。从表 7 可知: 各龄组(年龄)各器官的含碳率变化范围都不大, 变异系数都在 4% 以下, 全树不同龄组的含碳率之间差异不显著($P>0.05$)。全树各龄组的含碳率从大到小依次为近熟林、成熟林、过熟林、中龄林、幼龄林, 含碳率随年龄增加有增加趋势, 到近熟林达到最高, 到过熟林再下降。

表7 樟树不同龄组各器官含碳率

Table 7 Carbon content of organs in different age groups of *Cinnamomum camphora*

龄组	样木数/株	含碳率						变异系数/%
		树干	树皮	树叶	树枝	树根	全树	
幼龄林	35	0.519 1	0.482 7	0.510 4	0.503 5	0.499 1	0.508 1	2.45
中龄林	24	0.511 1	0.483 5	0.515 4	0.522 1	0.503 7	0.508 6	2.62
近熟林	11	0.525 9	0.476 9	0.504 2	0.521 4	0.525 5	0.520 2	3.72
成熟林	11	0.522 2	0.492 5	0.509 0	0.497 9	0.498 3	0.510 4	2.15
过熟林	9	0.503 4	0.486 4	0.510 2	0.510 4	0.501 8	0.509 6	1.83
变异系数/%		1.75	1.18	0.79	2.09	2.23	0.98	

3.1.4 不同起源与含碳率的关系 不同起源的含碳率分析表明(表 8): 樟树人工林和天然林的含碳率差距不大, 人工林与天然林的差值仅为 0.018 0, 全树人工林含碳率要高于天然林。从各器官来看, 不同起源各器官的含碳率变化范围都不大, 变异系数都在 3% 以下, 人工林的树干、树皮、树根含碳率比天然林要高, 但树叶、树枝比天然林的要低。

表8 樟树不同起源各器官含碳率

Table 8 Carbon content of organs in different origins of *Cinnamomum camphora*

起源	样木数/株	含碳率						变异系数/%
		树干	树皮	树叶	树枝	树根	全树	
人工	35	0.526 9	0.489 4	0.510 2	0.505 1	0.513 9	0.521 3	2.58
		(±0.032 4)	(±0.044 4)	(±0.043 1)	(±0.037 9)	(±0.022 8)	(±0.024 8)	
天然	55	0.511 2	0.480 8	0.511 1	0.513 6	0.497 3	0.503 3	2.47
		(±0.033 6)	(±0.041 9)	(±0.047 9)	(±0.039 7)	(±0.057 1)	(±0.036 5)	
差异值		-0.015 7	-0.008 6	0.000 9	0.008 5	-0.016 6	-0.018 0	

说明: 括号中数值为标准差

3.1.5 纬度带分布对含碳率的影响 从表 9 可以看出: 不同纬度带的樟树含碳率差距较小, 差异不显著($P>0.05$), 全树含碳率中亚热带最高, 其次是南亚热带, 最后是热带。各器官不同纬度带的含碳率变化差异均不大, 变异系数均在 5% 以内。

3.1.6 海拔分布对含碳率的影响 以样木所处地点的海拔高度为基础, 并结合采样点地形, 按平原、丘陵、低山进行分组, 分为平原(海拔 0~100 m), 丘陵(海拔 101~500 m), 低山(海拔 501~1 000 m)。从

表 9 不同纬度带樟树各器官含碳率

Table 9 Carbon content of organs in different latitudes of *Cinnamomum camphora*

纬度带	样木数/株	含碳率						变异系数/%
		树干	树皮	树叶	树枝	树根	全树	
中亚热带	35	0.521 5	0.491 8	0.517 2	0.506 8	0.503 6	0.512 3	2.09
南亚热带	52	0.516 0	0.487 7	0.530 5	0.506 1	0.502 2	0.508 6	2.81
热带	3	0.505 1	0.498 4	0.513 1	0.471 0	0.485 6	0.494 5	3.01
变异系数/%		1.62	1.10	1.75	4.15	2.02	1.86	

表 10 不同海拔樟树各器官含碳率

Table 10 Carbon content of organs in different altitudes of *Cinnamomum camphora*

海拔	样木数/株	含碳率						变异系数/%
		树干	树皮	树叶	树枝	树根	全树	
平原	16	0.513 3	0.472 9	0.525 9	0.500 3	0.501 1	0.506 4	3.51
丘陵	58	0.518 8	0.484 2	0.508 1	0.513 6	0.499 1	0.509 6	2.44
低山	16	0.511 6	0.493 0	0.505 6	0.510 6	0.521 3	0.515 4	1.90
变异系数/%		0.73	2.09	2.16	1.37	2.43	0.69	

表 10 可以看出：不同海拔高度樟树含碳率差距较小，差异不显著 ($P>0.05$)，全树含碳率低山最高，其次丘陵，最后是平原。各器官不同海拔高度的含碳率变化差异均不大，变异系数均在 3% 以内。

3.2 碳储量

3.2.1 樟树碳储量各器官分布格局 根据 40 株有树根采集的单株碳储量，计算出各径阶及平均单株碳储量。如表 11 所示：对各器官平均碳储量分布进行分析，碳储量最高的是树干，占全树的 33.78%，其次是树枝和树根，最后是树皮和树叶。树干、树枝、树根所占比例达到 90.29%，表明碳储量主要集中在树干、树枝和树根上。从全树及各器官的碳储量来看，基本上是随着胸径增长，全树及各器官碳储量均有不同程度的增加，但增加幅度并不一样，在胸径 2~8 cm 时碳储量增加幅度较小，从胸径 12 cm 开始，碳储量增加幅度变大，表明碳储量增加主要在生长的中后期。各器官占全树碳储量的比例变化趋势也不相同，随着胸径增加，树干碳储量的比例变化呈先增加后下降趋势，到胸径 20 cm 时达到最大；树皮碳储量比例在胸径 20 cm 以前较稳定，20 cm 以后下降；树叶、树根碳储量比例随胸径增加变化不大；树枝碳储量比例变化趋势是初期稳定、后期增加，在 32 cm 及以前，树枝碳储量比例变化较小，32 cm 以后大幅增加。

表 11 樟树不同径阶各器官碳储量及其分配

Table 11 Carbon storage and allocation of organs in different diameters of *Cinnamomum camphora*

径阶	树干		树皮		树叶		树枝		树根		全树碳储量/(kg·株 ⁻¹)
	碳储量/(kg·株 ⁻¹)	比例/%	碳储量/(kg·株 ⁻¹)	比例/%	碳储量/(kg·株 ⁻¹)	比例/%	碳储量/(kg·株 ⁻¹)	比例/%	碳储量/(kg·株 ⁻¹)	比例/%	
平均	41.92	33.78	7.41	5.97	4.64	3.74	36.57	29.47	33.56	27.04	124.10
2 径阶	0.18	36.73	0.04	8.16	0.03	6.12	0.07	14.29	0.17	34.69	0.49
4 径阶	1.02	46.15	0.24	10.86	0.11	4.98	0.28	12.67	0.56	25.34	2.21
6 径阶	2.31	43.50	0.48	9.04	0.36	6.78	1.04	19.59	1.12	21.09	5.31
8 径阶	5.12	44.91	0.90	7.89	0.86	7.54	1.78	15.61	2.74	24.04	11.40
12 径阶	8.29	40.22	1.29	6.26	1.39	6.74	3.80	18.44	5.84	28.34	20.61
16 径阶	23.86	37.71	5.59	8.83	1.41	2.23	11.58	18.30	20.84	32.93	63.28
20 径阶	43.45	52.67	8.29	10.05	2.20	2.67	11.47	13.90	17.09	20.72	82.50
26 径阶	67.06	50.38	12.01	9.02	2.72	2.04	21.87	16.43	29.46	22.13	133.12
32 径阶	116.44	37.63	14.84	4.80	8.72	2.82	60.25	19.47	109.20	35.29	309.45
38 径阶	151.45	24.72	30.39	4.96	28.63	4.67	253.53	41.39	148.58	24.25	612.58

3.2.2 各生长因子与不同器官碳储量关系 分别用 $y = ax^b$, $y = ae^{bx}$, $y = ax + b$, $y = a \ln x + b$ 和 $y =$

表 12 樟树单株碳储量回归方程

Table 12 Carbon storage regression equation of *Cinnamomum camphora*

回归因子	器官	样木数/株	回归方程	R^2	F	P
年龄	全树	40	$C_t = 0.019 4A^{2.652 0}$	0.602 9	57.693 6	0.000 2
年龄	树干	90	$C_s = 0.064 2A^{2.034 7}$	0.640 3	156.649 2	0.000 0
年龄	树皮	90	$C_{ls} = 0.027 9A^{1.749 3}$	0.648 8	162.575 9	0.000 0
年龄	树枝	90	$C_{lr} = 0.025 4A^{2.225 1}$	0.408 8	60.850 4	0.000 2
年龄	树叶	90	$C_l = 0.000 5A^{2.755 5}$	0.511 4	92.107 2	0.000 0
年龄	树根	40	$C_r = 0.002 9A^{2.818 4}$	0.591 6	55.052 1	0.000 0
胸径	全树	40	$C_t = 0.011 8D^{2.937 6}$	0.943 2	631.255 7	0.000 0
胸径	树干	90	$C_s = 0.053 8D^{2.193 2}$	0.844 5	477.973 1	0.000 0
胸径	树皮	90	$C_{ls} = 0.010 6D^{2.119 5}$	0.834 2	442.779 6	0.000 0
胸径	树枝	90	$C_{lr} = 1.17 \times 10^{-5} D^{4.528 1}$	0.868 4	580.613 9	0.000 0
胸径	树叶	90	$C_l = 4.73 \times 10^{-5} D^{3.522 7}$	0.636 5	157.096 3	0.000 0
胸径	树根	40	$C_r = 0.011 0D^{2.588 5}$	0.844 9	206.952 5	0.000 0
D^2H	全树	40	$C_t = 0.001 6(D^2H)^{1.268 6}$	0.910 5	386.460 4	0.000 0
D^2H	树干	90	$C_s = 0.005 8(D^2H)^{1.030 1}$	0.911 3	904.239 3	0.000 0
D^2H	树皮	90	$C_{ls} = 0.002 1(D^2H)^{0.939 0}$	0.871 5	596.904 5	0.000 0
D^2H	树枝	90	$C_{lr} = 5.93 \times 10^{-5} (D^2H)^{1.485 9}$	0.769 2	293.301 4	0.000 0
D^2H	树叶	90	$C_l = 0.000 4(D^2H)^{1.063 3}$	0.519 7	95.235 3	0.000 0
D^2H	树根	40	$C_r = 0.001 2(D^2H)^{1.161 7}$	0.819 9	173.028 7	0.000 0

$a_1x^b + a_2x^b + a_3x^b + \dots + c$ 等 5 种模型建立樟树各器官碳储量与年龄、胸径及 D^2H 之间的回归方程, 比较并选出拟合效果最好的模型作为预测樟树各器官及全树的碳储量方程(表 12)。结果表明: 模型拟合效果较好的均为 $y = ax^b$ 方程, 年龄、胸径、 D^2H 与碳储量均有显著相关性, 各器官碳储量方程 R^2 除树枝碳储量与年龄方程在 0.5 以下外, 其他 R^2 均在 0.5 以上, F 均在 50 以上, P 均小于 0.01, 经交叉检验, 各模型拟合效果显著。

4 结论与讨论

广东樟树全树加权平均含碳率为 0.509 6, 各器官含碳率除树皮外, 树干、树叶、树枝、树根差异不显著, 树干含碳率高于其他各器官, 而树皮含碳率要显著低于其他器官。由于树干木材有较多的木质素, 木质素碳含量高, 所以干、枝含碳率较高, 而树皮作为植物营养运输器官, 纤维素多, 木质素少, 因此含碳率低, 显然这是由植物本身的构造特点所决定的, 这与大多数研究结论一致^[31-32]。由于树皮的单株碳储量占全树碳储量比例很少, 平均不到 6%, 多数径阶不到 10%, 所以, 从实用角度, 可以忽略, 可采用其他器官含碳率进行估算。算术平均计算与加权平均计算 2 种方法计算的含碳率差异不大, 结论与部分研究学者相同^[33]。树干上部、中部、下部含碳率无明显变化, 粗根含碳率大于细根, 这与李春平等^[34]研究结果相一致。

樟树不同龄组含碳率从大到小顺序为近熟林(0.520 2), 成熟林(0.510 4), 过熟林(0.509 6), 中龄林(0.508 6), 幼龄林(0.508 1)。含碳率的变化过程与林木成熟过程基本一致, 含碳率随年龄增加而增加, 到近熟林、成熟林达到最高, 过熟林后再微小下降, 主要是由于随着年龄增加, 林木的木质化程度越来越高, 到近熟林、成熟林木质化达到最大, 过熟林后木质素分解所引起的。人工林的含碳率要高于天然林, 可能是施肥、抚育等人工经营措施提高了植物光合作用的效率, 从而导致人工林木质素多于天然林, 提高了植物含碳率。

各纬度带樟树含碳率从大到小顺序为中亚热带(0.512 3), 南亚热带(0.508 6), 热带(0.494 5), 含碳率随着纬度降低而减少, 主要是由于纬度降低, 温度升高、降水增加, 植物生长速度快, 导致其木质化程度低, 因此低纬度带含碳率总体要低于高纬度带的。广东纬度总体上要低于湖南和贵州, 但本研究所述含碳率却高于湖南、贵州, 可能是植物的生长环境如土壤、坡位、坡向、郁闭度等对含碳率影响更大, 需要对此作更进一步的研究, 才能得出更精确的结论。不同海拔高度樟树含碳率从大到小顺序为低

山(0.515 4), 丘陵(0.509 6), 平原(0.506 4), 随着海拔增加, 植物含碳率降低, 主要原因是海拔增加, 温度降低, 植物生长速度变慢, 从而使木质化程度增加, 提高其含碳率。这与罗艳等^[35]研究结果相一致。

含碳率是森林碳储量估算中的重要参数。大多数研究者估算不同区域尺度的森林碳储量时, 多采用 0.500 0 或 0.450 0 作为通用平均含碳率, 但不同气候带、不同海拔、不同年龄、不同起源的树种含碳率是不同的, 在全国或大区域范围内采用 0.500 0 或 0.450 0 作为含碳率的固定参数进行森林植被碳储量的估测是可行的, 但对省级区域以及地方区域森林植被碳储量的估算会有一些的误差。本研究中, 广东樟树平均含碳率为 0.509 6, 略高于 0.500 0, 明显高于 0.450 0 的通用平均含碳率, 当采用通用平均含碳率 0.450 0 计算广东森林植被碳储量时, 可能会导致森林植被碳储量 10% 以上的误差, 采用 0.500 0 估算会较接近真实结果。因此, 为准确估算省级区域以及地方区域的森林植被碳储量, 应根据不同气候带、不同海拔、不同年龄、不同起源的含碳率作为转换参数, 以减少碳储量估算中的不确定性。

樟树各器官碳储量在全树中的比例排列从大到小顺序为树干(33.78%), 树枝(29.47%), 树根(27.04%), 树皮(7.41%), 树叶(3.74%), 表明樟树碳主要储存分布在树干、树枝和树根上。随着胸径增大, 全树及各器官碳储量增加幅度并不一样, 在胸径 2~8 cm 时碳储量增加幅度较小, 从胸径 12 cm 开始, 碳储量增加幅度较大, 樟树碳储量增加主要在生长的中后期。随着胸径增加各器官碳储量占全树比例变化趋势并不相同, 树干碳储量的比例先增加后下降, 胸径 20 cm 时达到最大; 树皮碳储量比例在胸径 20 cm 以前较稳定, 20 cm 以后下降; 树叶、树根碳储量比例较稳定; 树枝碳储量比例是初期稳定, 后期增加。

通过对样本年龄、胸径、 D^2H 与碳储量进行回归分析, 获得樟树全树碳储量最优回归方程, 年龄回归方程为 $C_t = 0.019 4A^{2.652 0}$, 胸径回归方程为 $C_t = 0.011 8D^{2.937 6}$, D^2H 回归方程为 $C_t = 0.001 6(D^2H)^{1.268 6}$, 全树最优碳储量方程的 R^2 均达到了 0.6 以上。以胸径和 D^2H 为自变量的全树及各器官碳储量方程 R^2 为 0.51~0.95, 而以年龄为自变量的全树及各器官碳储量方程 R^2 仅为 0.40~0.65, 相较于以常用的胸径和树高等易测因子建立的碳储量模型, 以年龄为自变量的碳储量模型的拟合效果相对差一些, 这可能与植物本身生长特性有关。各器官碳储量方程的 R^2 绝大多数都在 0.5 以上, 模型总体上相关性显著。相对而言, 年龄、胸径、 D^2H 与树枝、树叶碳储量相关性相对差一些, 可能是树枝、树叶受生长环境影响较大, 碳储量变动较大, 影响了模型效果。此外, 由于大径级样本少等建模局限性, 本研究建立的樟树碳储量模型用于估算实验样本年龄、胸径、树高范围外的单木碳储量可能会存在误差, 在使用过程中要注意模型的外延问题。

5 参考文献

- [1] WATSON R T, NOBLE I R, BOLIN B, et al. *Land Use, Land-Use Change and Forestry: A Special Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC)* [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2000.
- [2] 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.
LI Haikui, LEI Yuancai, ZENG Weisheng. Forest carbon storage in China estimated using forestry inventory data [J]. *Sci Silv Sin*, 2011, 47(7): 7 - 12.
- [3] MARLAND E, MARLAND G. The treatment of long-lived, carbon-containing products in inventories of carbon dioxide emissions to the atmosphere [J]. *Environ Sci Policy*, 2003, 6(2): 139 - 152.
- [4] LAL R. Forest soils and carbon sequestration [J]. *For Ecol Manage*, 2005, 220(1/3): 242 - 258.
- [5] PAN Y, BIRDSEY R A, FANG J, et al. A large and persistent carbon sink in the world's forests [J]. *Science*, 2011, 333(6045): 988 - 993.
- [6] 刘国华, 傅伯杰, 方精云. 中国森林碳动态及其对全球碳平衡的贡献[J]. 生态学报, 1999, 20(5): 732 - 740.
LIU Guohua, FU Bojie, FANG Jingyun. Carbon dynamics of Chinese forests and its contribution to global carbon balance [J]. *Acta Ecol Sin*, 1999, 20(5): 732 - 740.
- [7] HOUGHTON R A, HALL F, GOETZ S J. Importance of biomass in the global carbon cycle [J]. *J Geophys Res Biogeosci*, 2009, 114(G2): G00E03. doi: 10.1029/2009JG000935.
- [8] SCHIMMEL D S, HOUSE J I, HIBBARD K A, et al. Recent patterns and mechanisms of carbon exchange by terrestrial ecosystems [J]. *Nature*, 2001, 414(6860): 169 - 172.

- [9] DIXON R K, SOLOMON A M, BROWN S, *et al.* Carbon pools and flux of global forest ecosystem [J]. *Science*, 1994, **263**(5144): 185 – 190.
- [10] 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.
FANG Jingyun, CHEN Anping. Dynamic forest biomass carbon pools in China and their significance [J]. *Acta Bot Sin*, 2001, **43**(9): 967 – 973.
- [11] 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.
WANG Xiaoke, FENG Zongwei, OUYANG Zhiyun. Vegetation carbon storage and density of forest ecosystems in China [J]. *Chin J Appl Ecol*, 2001, **12**(1): 13 – 16.
- [12] 徐新良, 曹明奎, 李克让. 中国森林生态系统植被碳储量时空动态变化研究[J]. 地理科学进展, 2007, **26**(6): 1 – 10.
XU Xinliang, CAO Mingkui, LI Kerang. Temporal-spatial dynamics of carbon storage of forest vegetation in China [J]. *Prog Geogr*, 2007, **26**(6): 1 – 10.
- [13] 吴庆标, 王效科, 段晓男, 等. 中国森林生态系统植被固碳现状和潜力[J]. 生态学报, 2008, **28**(2): 517 – 524.
WU Qingbiao, WANG Xiaoke, DUAN Xiaonan, *et al.* Carbon sequestration and its potential by forest ecosystems in China [J]. *Acta Ecol Sin*, 2008, **28**(2): 517 – 524.
- [14] 刘兆丹, 李斌, 方晰, 等. 湖南省森林植被碳储量、碳密度动态特征[J]. 生态学报, 2016, **36**(21): 6897 – 6908.
LIU Zhaodan, LI Bin, FANG Xi, *et al.* Dynamic characteristics of forest carbon storage and carbon density in the Hunan Province [J]. *Acta Ecol Sin*, 2016, **36**(21): 6897 – 6908.
- [15] 焦秀梅, 项文化, 田大伦. 湖南省森林植被的碳储量及其地理分布规律[J]. 中南林业学院学报, 2005, **25**(1): 4 – 8.
JIAO Xiumei, XIANG Wenhua, TIAN Dalun. Carbon storage of forest vegetation and its geographical distribution in Hunan Province [J]. *J Cent South For Univ*, 2005, **25**(1): 4 – 8.
- [16] 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.
LI Mingjun, DU Mingfeng, YU Lifei. Carbon storage and density of forest vegetation and its spatial distribution pattern in Guizhou Province [J]. *J Northwest For Univ*, 2016, **31**(1): 48 – 54.
- [17] 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.
HUANG Conde, ZHANG Jian, YANG Wanqin, *et al.* Dynamics on forest carbon stock in Sichuan Province and Chongqing City [J]. *Acta Ecol Sin*, 2008, **28**(3): 966 – 975.
- [18] 马钦彦, 陈遐林, 王娟, 等. 华北主要森林类型建群种的含碳率分析[J]. 北京林业大学学报, 2002, **24**(5/6): 96 – 100.
MA Qinyan, CHEN Xialin, WANG Juan, *et al.* Carbon content rate in constructive species of main forest types in northern China [J]. *J Beijing For Univ*, 2002, **24**(5/6): 96 – 100.
- [19] 周玉荣, 于振良, 赵士洞. 我国主要森林生态系统碳储量和碳平衡[J]. 植物生态学报, 2000, **24**(5): 518 – 522.
ZHOU Yurong, YU Zhenliang, ZHAO Shidong. Carbon storage and budget of major Chinese forest types [J]. *Acta Phytoecol Sin*, 2000, **24**(5): 518 – 522.
- [20] ZHANG Xiaoquan, XU Deying. Potential carbon sequestration in China's forest [J]. *Environ Sci Policy*, 2003, **6**(5): 421 – 432.
- [21] CAO M, WOODWARD F I. Net primary and ecosystem production and carbon stocks of terrestrial ecosystems and their response to climate change [J]. *Global Change Biol*, 1998, **4**(2): 185 – 198.
- [22] KOLCHUGINA T P, VINSON T S. Comparison of two methods to assess the carbon budget of forest biomass in the former Soviet Union [J]. *Water Air Soil Pollut*, 1993, **70**(1/4): 207 – 221.
- [23] DJOMO A N, KNOHL A, GRAVENHORST G. Estimations of total ecosystem carbon pools distribution and carbon

- biomass current annual increment of a moist tropical forest [J]. *For Ecol Manage*, 2011, **26**(1): 1448 – 1459.
- [24] 李斌, 方晰, 田大伦, 等. 湖南省现有森林植被主要树种的碳含量[J]. 中南林业科技大学学报, 2015, **35**(1): 71 – 78.
- LI Bin, FANG Xi, TIAN Dalun, *et al.* Studies on carbon concentration of main forest vegetation tree species in Hunan Province [J]. *J Cent South Univ For Technol*, 2015, **35**(1): 71 – 78.
- [25] 于颖, 范文义, 李明泽. 东北林区不同尺度森林的含碳率[J]. 应用生态学报, 2012, **23**(2): 341 – 346.
- YU Ying, FAN Wenyi, LI Mingze. Forest carbon rates at different scales in Northeast China forest area [J]. *Chin J Appl Ecol*, 2012, **23**(2): 341 – 346.
- [26] ZHANG Quanzhi, WANG Cuankuan, WANG Xingchang, *et al.* Carbon concentration variability of 10 Chinese temperate tree species [J]. *For Ecol Manage*, 2009, **258**(5): 722 – 727.
- [27] BERT D, DANJON F. Carbon concentration variations in the roots, stems and crown of mature *Pinus pinaster* (Aait.) [J]. *For Ecol Manage*, 2006, **222**(1): 279 – 295.
- [28] 程堂仁, 冯菁, 马钦彦, 等. 甘肃小陇山森林植被碳库及其分配特征[J]. 生态学报, 2008, **28**(1): 33 – 44.
- CHENG Tangren, FENG Jing, MA Qinyan, *et al.* Carbon pool and allocation of forest vegetations in Xiaolong Mountains, Gansu Province [J]. *Acta Ecol Sin*, 2008, **28**(1): 33 – 44.
- [29] 李江, 翟明普, 朱宏涛, 等. 思茅松人工中幼林的含碳率研究[J]. 福建林业科技, 2009, **36**(4): 13 – 15.
- LI Jiang, ZHAI Mingpu, ZHU Hongtao, *et al.* Carbon contents of *Pinus kesiya* Royle ex Gord. var. *langbianensis* young and middle aged plantations [J]. *J Fujian For Sci Technol*, 2009, **36**(4): 13 – 15.
- [30] 贺红早, 贺瑞坤, 段旭, 等. 贵阳二环林带主要造林树种碳汇研究[J]. 安徽农业科学, 2007, **35**(32): 10270 – 10271, 10293.
- HE Hongzao, HE Ruikun, DUAN Xu, *et al.* Study on carbon storage in main afforestation tree species of the second forest zone around Guiyang City[J]. *J Anhui Agric Sci*, 2007, **35**(32): 10270 – 10271, 10293.
- [31] 田大伦, 王新凯, 方晰, 等. 喀斯特地区不同植被恢复模式幼林生态系统碳储量及其空间分布[J]. 林业科学, 2011, **47**(9): 7 – 14.
- TIAN Dalun, WANG Xinkai, FANG Xi, *et al.* Carbon storage and spatial distribution in different vegetation restoration patterns in Karsts area, Guizhou Province [J]. *Sci Silv Sin*, 2011, **47**(9): 7 – 14.
- [32] 王春梅, 邵彬, 王汝南. 东北地区两种主要造林树种生态系统固碳潜力[J]. 生态学报, 2010, **30**(7): 1764 – 1772.
- WANG Chunmei, SHAO Bin, WANG Runan. Carbon sequestration potential of ecosystem of two main tree species in Northeast China [J]. *Acta Ecol Sin*, 2010, **30**(7): 1764 – 1772.
- [33] 田大伦, 方晰, 项文化. 湖南会同杉木人工林生态系统碳素密度[J]. 生态学报, 2004, **24**(11): 2382 – 2386.
- TIAN Dalun, FANG Xi, XIANG Wenhua. Carbon density of the Chinese fir plantation ecosystem at Huitong, Hunan Province [J]. *Acta Ecol Sin*, 2004, **24**(11): 2382 – 2386.
- [34] 李春平, 吴斌, 张宇清, 等. 山东郓城农田防护林杨树器官含碳率分析[J]. 北京林业大学学报, 2010, **32**(2): 74 – 78.
- LI Chunping, WU Bin, ZHANG Yuqing, *et al.* Carbon content of poplar in shelterbelt at Yuncheng County, Shandong Province [J]. *J Beijing For Univ*, 2010, **32**(2): 74 – 78.
- [35] 罗艳, 唐才富, 辛文荣, 等. 青海省云杉属(*Picea*)和圆柏属(*Sabina*)乔木含碳率分析[J]. 生态环境学报, 2014, **23**(11): 1764 – 1768.
- LUO Yan, TANG Caifu, XIN Wenrong, *et al.* Carbon content rate of *Picea* and *Sabina* trees in Qinghai Province [J]. *Ecol Environ Sci*, 2014, **23**(11): 1764 – 1768.