

## 广东森林松类下木碳含量和热值特征<sup>\*</sup>

张红爱 杨加志 丁胜 汪求来 黄宁辉  
苏晨辉 陈盼 杨志刚

(广东省林业调查规划院, 广东 广州 510520)

**摘要** 为准确估测森林碳储量和碳汇能力、以及下木的生物质利用提供基本信息, 研究采用湿烧法对湛江市廉江市和河源市龙川县松林样地的松类下木(简称松类下木)进行碳含量测定, 同时采用氧弹燃烧法对其相应的热值进行了分析。结果显示, 龙川县松类下木的碳含量(514.62 g·kg<sup>-1</sup>)显著高于廉江市(497.69 g·kg<sup>-1</sup>)( $P<0.05$ ), 树干、树根和整株碳含量在不同地域间存在显著差异( $P<0.05$ ), 树枝、树叶的碳含量差异不显著; 不同地域、径阶的松类下木的热值特征差异不显著, 树叶的热值最高, 树根最低; 松类下木的碳含量和热值之间相关性不显著。径阶对热值没有显著影响, 可能处于幼龄期的树木尚未完成生理成熟过程, 其径向生长与热量转化效率尚未形成显著梯度; 是否亚热带比热带更利于松类下木将太阳能转化成化学能, 有待于进一步研究。

**关键词** 下木; 松类; 碳含量; 热值

中图分类号: S718 文献标志码: A 文章编号: 2096-2053 (2025) 02-0072-05

DOI: 10.20221/j.cnki.2096-2053.202502010

## Carbon Content and Calorific Value in Pine Understory Vegetation in Guangdong Forests

ZHANG Hong'ai YANG Jiazhi DING Sheng WANG Qiulai  
HUANG Ninghui SU Chenhui CHEN Pan YANG Zhigang

(Guangdong Forestry Survey and Planning Institute, Guangzhou, Guangdong 510520, China)

**Abstract** To fundamental information for accurately estimating forest carbon storage and carbon sink capacity and evaluating the biomass utilization potential of understory vegetation, this study utilized the wet combustion method to determine the carbon content of Pine understory vegetation in Lianjiang city (Zhanjiang) and Longchuan county (Heyuan), while simultaneously analyzing their corresponding calorific values using oxygen bomb calorimetry. The results showed that the carbon content rate of the Pine understory in Longchuan county (514.62 g·kg<sup>-1</sup>) was significantly higher than that in Lianjiang city (497.69 g·kg<sup>-1</sup>) ( $P<0.05$ ). There were significant differences in the carbon content of trunk, root, and the whole plant among different regions ( $P<0.05$ ), but there was no significant difference in the carbon content of branches and leaves. There was no significant difference in the calorific value characteristics of Pine understory in different regions and diameter clas-

<sup>\*</sup> 基金项目: 广东省林业科技创新平台建设项目(2016CXPT03), 广东省低碳发展专项资金支持项目(办资字[2012]14号), 广东省林业科技创新专项基金科研项目(2012KFCX019-01)。

第一作者: 张红爱(1977—), 女, 教授级高级工程师, 从事森林资源调查规划设计、林业碳汇计量监测等工作。E-mail: 154963211@qq.com

ses. The calorific value of leaves was the highest and the that of roots was the lowest. The correlation between carbon content and calorific value of Pine understory was not significant. The lack of significant effect of diameter class on calorific value, is likely attributable to the juvenile period stage of these trees, where incomplete physiological development results in limited variation in carbon storage capacity. Whether the subtropical climates enhance the photosynthetic energy conversion efficiency of Pine understory vegetation compared to tropical climates requires further investigation.

**Key words** underwood; pine tree; carbon content rate; calorific value

随着经济的快速发展以及社会的不断进步，人类对能源的需求日益增加，因能源危机导致的社会问题也越来越突出<sup>[1-3]</sup>。生物质具有来源广、产量大、可再生等优点，被视为取代传统石化资源的理想原料<sup>[3-5]</sup>。因此，对生物质能源的有效开发利用可有效降低人类对不可再生资源的过度依赖，促进经济和环境的可持续发展<sup>[6-8]</sup>。目前，关于能源植物的特性及其高效转化利用是 21 世纪以来国际能源战略的焦点问题之一<sup>[9-11]</sup>。在判断某种植物是否适合作为生物质能源开发时，碳含率和热值是两项关键性指标。植物的热值反映了绿色植物对太阳能的转化能力<sup>[12-13]</sup>，对了解生态系统中不同植物的能量转化效率具有重要意义。

对全球第二大碳储量系统——森林生态系统的碳储量和碳汇能力进行精确估算是研究全球生态变化的关键<sup>[14-15]</sup>。植物碳含率是估算其碳储量的基本参数。由于森林生态系统存在着区域多样性和特征多样性，目前对其碳储量和碳汇能力的估算无论在区域尺度还是国家尺度都存在许多不确定性，从而导致估算结果的精确度降低，影响对全球森林生态系统碳储量和碳汇能力预测的科学性和可靠性<sup>[16]</sup>。在对森林生态系统碳储量调查和评估过程中，大多数研究关注的是上层乔木，对胸径 < 5 cm 的下木部分的研究较少。

广东省位于中国大陆南部，陆地总面积 17.98 × 10<sup>4</sup> km<sup>2</sup>，纵跨亚热带和热带区域，是全国光、热和水资源最丰富的地区，也是森林资源最为丰富

的地区之一。下木是指林分中处于上层林冠下的林木层，一般指胸径 5 cm 以下的小乔木，在广东省森林中，下木层是森林生态系统的重要组成部分，在系统功能发挥中有重要作用。近年来，广东省森林植被的碳储量逐年增加，而松类（马尾松 *Pinus massoniana*、湿地松 *P. elliottii* 等）植物作为重要的森林组成部分，其碳储量和热值特征对区域森林碳汇能力及能源潜力评估具有重要意义，然而，目前关于松类植物下木的碳含量和热值特征的研究相对较少，这限制了对其生态功能和能源潜力的全面认识。基于此，本论文对广东省松类下木的碳含率和热值进行系统分析，以期为该地区森林的有效管理、森林碳储量和碳汇能力的准确估测、以及下木的生物质利用提供基本信息。

## 1 材料与方法

### 1.1 样品采集与处理

本研究结合广东省松林分布和广东气候带取样，在典型森林清查样地中选取了位于河源市龙川县（亚热带气候）和湛江市廉江市（热带气候）的松林进行松类下木取样。样地设置为边长 25.82 m 的正方形，在样地内按照不同的径阶分别选取标准样木 3 株，采用整株收获法获取不同径阶的松类下木样品。松类下木的取样径阶分别为 0.5~1.5 cm、1.5~2.5 cm、2.5~3.5 cm 和 3.5~4.5 cm。每棵树按树干、树枝、树叶、树根分部位收集样品，烘干粉碎，用四分法取样测定。

表 1 取样样地信息

Table 1 Sampling sites information

地点	经纬度	平均胸径/cm	平均树高/m
龙川县	N24.49098609°, E115.28167063°	8.6	6.7
廉江市	N21.83532790°, E110.17842374°	10.5	7.5

## 1.2 分析测定方法

1.2.1 碳含量测定 所有样品于 85 °C 下烘至恒重, 然后粉碎, 过 60 目筛 (0.25 mm) 后储存待测。为了保证取样均匀性, 本实验采用四分法进行取样。样品碳含量采用重铬酸钾—硫酸氧化法 (湿烧法) 进行测定<sup>[17]</sup>, 通过样品与重铬酸钾反应, 生成的二氧化碳通过酸碱滴定法或红外检测法测量。每个样品平行检测两次, 取平均值。

1.2.2 热值测定 植物热值测定采用氧弹燃烧法进行<sup>[18]</sup>, 所用仪器为 IKAC200 氧弹量热仪, 微机控制。每个样品需烘干、压片、称样和仪器充氧、启动、测定。每个样品平行检测两次, 取平均值。

## 1.3 数据处理与分析

松类下木整株碳含量和热值采用算术平均法计算; 利用 WPS EXCEL 对实验数据进行整理, 利用 SPSS 18.0 软件进行不同区域、不同径阶单因素

方差分析, 利用 Sigmatplot 12 作图。各项数据通过平均值±标准误差呈现。

## 2 结果与分析

### 2.1 松类下木的碳含量特征

由表 2 数据可以看出, 松类下木整株碳含量平均值为 (505.59±2.84) g·kg<sup>-1</sup>, 廉江市松类下木整株碳含量为 (497.69±3.45) g·kg<sup>-1</sup>, 龙川县松类下木整株碳含量为 (514.62±3.32) g·kg<sup>-1</sup>, 廉江市松类下木碳含量显著低于龙川县 ( $P<0.05$ )。松类下木不同器官碳含量在不同地区均是树枝最高, 其次为树干, 但廉江市的树叶大于树根, 龙川县树根大于树叶。廉江市松类下木的碳含量变异系数为 2.49%~8.99%, 龙川县松类下木的碳含量变异系数为 3.12%~4.16%。方差分析表明, 廉江市与龙川县松类下木的树干、树根和整株的碳含量存在显著差异 ( $P<0.05$ ), 但树枝和树叶的碳含量差异不显著。

表 2 廉江市和龙川县的松类下木碳含量 g·kg<sup>-1</sup>

Table 2 Carbon content value of Pine understory vegetation in Lianjiang city and Longchuan county

地区	整株	树干	树枝	树叶	树根
廉江市	497.69±3.45b	499.05±5.96b	509.93±3.17a	494.50±10.84a	487.26±5.84b
龙川县	514.62±3.32a	519.71±4.41a	520.86±5.63a	505.13±5.57a	512.77±4.75a
平均	505.59±2.84	508.69±4.19	515.03±3.23	499.46±6.32	499.17±4.44

注: 同列不同字母表示差异显著,  $P<0.05$ 。

不同径阶的松类下木碳含量见表 3。整株、树干和树叶的碳含量在 2.5~3.5 cm 径阶最高, 树枝碳含量最高的为 1.5~2.5 cm 径阶, 树根碳含量最高的则为 0.5~1.5 cm 径阶。不同径阶的碳含量变异系数为 3.43%~6.93%。方差分析表明, 不同径阶

的松类下木的整株碳含量差异不显著。0.5~1.5 cm、1.5~2.5 cm、3.5~4.5 cm 这 3 个径阶的碳含量最高的器官都是树枝, 2.5~3.5 cm 径阶碳含量最高的器官是树干。方差分析表明, 松类下木各器官不同径阶的碳含量差异不显著。

表 3 不同径阶松类下木的碳含量 g·kg<sup>-1</sup>

Table 3 Carbon content value of Pine understory vegetation with different diameter classes

径阶/cm	整株	树干	树枝	树叶	树根
0.5~1.5	506.44±3.45a	505.07±7.43a	512.01±2.57a	507.17±4.50a	501.53±6.20a
1.5~2.5	502.89±8.99a	503.00±10.84a	518.52±10.00a	501.29±15.07a	488.75±11.06a
2.5~3.5	506.94±6.97a	522.34±6.41a	514.36±11.54a	487.44±8.50a	503.60±9.02a
3.5~4.5	505.22±7.04a	507.98±7.62a	518.27±5.64a	494.20±26.63a	500.43±13.09a
总体	505.59±2.84	508.69±4.19	515.03±3.23	499.46±6.32	499.17±4.44

注: 同列不同字母表示差异显著,  $P<0.05$ 。

## 2.2 松类下木的热值特征

本实验通过对不同地区的松类下木的热值进行分析, 结果如表 4 所示。由表中数据可以看出, 不同地区松类下木之间热值变化幅度不大, 变异系数为 1.51%~5.45%, 热值平均值为 (20.13±

0.10) ~ (21.14±0.29) MJ·kg<sup>-1</sup>, 其中廉江市的松类下木热值平均值为 (20.48±0.10) MJ·kg<sup>-1</sup>, 龙川县的松类下木热值平均值为 (20.49±0.08) MJ·kg<sup>-1</sup>。方差分析表明, 不同地域松类下木整株的热值特征差异不显著。不同器官中, 树叶的

热值最大。方差分析表明，各器官在不同地区的热值差异不显著。

不同径阶松类下木的热值变异系数为 1.02%~2.75%，变异范围较小。0.5~1.5 cm 径阶的松类下木热值最高（表 5），其次为 2.5~3.5 cm 径阶、1.5~2.5 cm 径阶，3.5~4.5 cm 径阶的松类下木热

值最低。方差分析表明，不同径阶的松类下木整株热值差异不显著，径阶对热值没有显著的影响。大部分径阶的松类下木都表现为树叶热值最高。方差分析表明，各器官不同径阶的松类下木热值差异不显著。

表 4 廉江市和龙川县的松类下木热值  $\text{MJ} \cdot \text{kg}^{-1}$

Table 4 Calorific value of Pine understory vegetation in Lianjiang city and Longchuan county

地区	整株	树干	树枝	树叶	树根
廉江市	20.48±0.10a	20.39±0.10a	20.22±0.11a	21.14±0.29a	20.19±0.16a
龙川县	20.49±0.08a	20.39±0.15a	20.52±0.10a	20.99±0.10a	20.07±0.12a
平均	20.49±0.07	20.39±0.09	20.36±0.08	21.07±0.16	20.13±0.10

注：同列不同字母表示差异显著， $P < 0.05$ 。

表 5 不同径阶松类下木的松类下木热值  $\text{MJ} \cdot \text{kg}^{-1}$

Table 5 Calorific value of Pine understory vegetation with different diameter classes

径阶/cm	整株	树干	树枝	树叶	树根
0.5~1.5	20.64±0.06a	20.59±0.1a	20.36±0.11a	21.34±0.12a	20.28±0.12a
1.5~2.5	20.35±0.10a	20.02±0.18a	20.43±0.24a	21.06±0.21a	19.89±0.11a
2.5~3.5	20.62±0.12a	20.61±0.19a	20.63±0.13a	21.36±0.19a	19.87±0.19a
3.5~4.5	20.19±0.23a	20.15±0.24a	20.01±0.12a	20.26±0.64a	20.36±0.39a
总体	20.49±0.07	20.39±0.09	20.36±0.08	21.07±0.16	20.13±0.10

注：同列不同字母表示差异显著， $P < 0.05$ 。

### 2.3 碳含量与热值的关系

由图 1~2 可以看出，不同地域的松类下木碳含量和热值之间的相关性不显著。

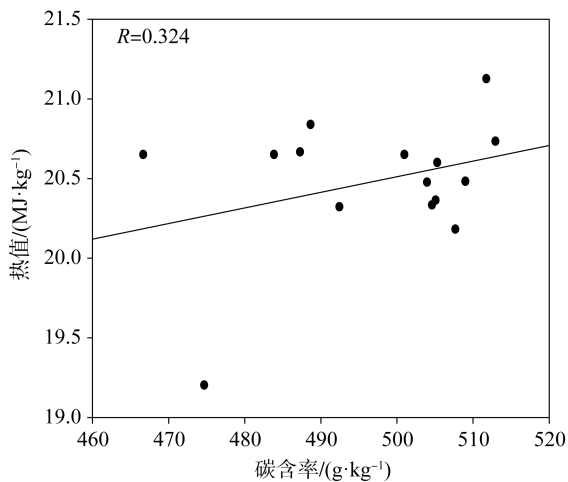


图 1 廉江市松类下木碳含量与热值关系  
Figure 1 Relationship between carbon content and calorific value of Pine understory vegetation in Lianjiang city

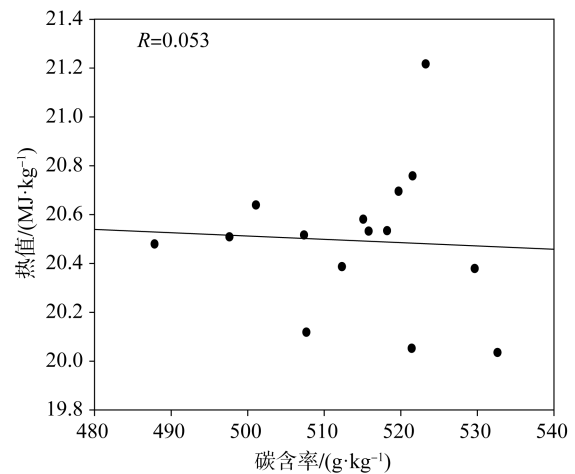


图 2 龙川县松类下木碳含量与热值关系  
Figure 2 Relationship between carbon content and calorific value of Pine understory vegetation in Longchuan county

## 3 结论与讨论

对树木碳含量的精确测定是估算森林碳储量和碳汇能力的基础，而树木热值是衡量其作为能

源植物的基本标准。我国森林面积广，树种丰富，不同地域、不同品种以及不同树种之间其碳含量和热值存在着差异性。本研究对广东省廉江市和龙川县的径阶 0.5~4.5 cm 的松类下木的碳含量和热值进行了系统分析，为松类下木作为能源植物提供相应的实验数据，为研究相应区域森林碳储量和碳汇能力提供可靠的地面验证数据，可提高



估算相应地域森林碳储量和碳汇能力的精确度。

龙川县松类下木整株的碳含率显著高于廉江市,该现象说明与廉江市(热带气候区)相比,龙川县(亚热带气候区)更利于松类下木将太阳能转化成化学能。是否亚热带比热带更利于松类下木将太阳能转化成化学能,有待于进一步研究。树干、树根和整株碳含率存在显著差异,树枝、树叶差异不显著。在树干、树根、树枝和树叶中,松类下木树枝碳含率最高,树根碳含率最低。该现象与文献报导提出的树叶碳含率最高的结论不一致<sup>[19]</sup>,这可能是由于下木生长在成熟乔木林下,接收到的光照强度弱,导致树叶固碳能力相应减弱。2.5~3.5 cm 径阶的松类下木碳含率最高,1.5~2.5 cm 径阶的最低,不同径阶、相同径阶不同器官的差异均不显著。

龙川县和廉江市的松类下木热值特征差异不显著,不同器官、不同径阶的热值差异均不显著。径阶对热值没有显著的影响,可能因为处于幼龄期的树木尚未完成生理成熟过程,不同径阶个体的光合作用效率相似,未成熟树木对生态位的分化响应较弱,其径向生长与热量转化效率尚未形成显著梯度。树叶样品的热值最高,树根最低。松类下木碳含率和热值之间相关性不明显,相关系数不大,说明植物热值除了与有机碳含量相关外,还受其他因素的影响。

### 参考文献

- [1] LI H L, WANG S Y, WANG W J, et al. One-step heterogeneous catalytic process for the dehydration of Xylan into furfural[J]. *BioResources*, 2013, 8(3): 3200-3211.
- [2] 郑朝晖, 马春霞, 马江林, 等. 6种乔木树种固碳能力和能量转化效率分析[J]. *西南林业大学学报*, 2011, 31(4): 7-11.
- [3] LI H L, REN J L, ZHONG L J, et al. Production of furfural from xylose, water-insoluble hemicelluloses and water-soluble fraction of corncob via a tin-loaded montmorillonite solid acid catalyst[J]. *Bioresource Technology*, 2015, 176: 242-248.
- [4] LI H L, CHEN X F, REN J L, et al. Functional relationship of furfural yields and the hemicellulose-derived sugars in the hydrolysates from corncob by microwave-assisted hydrothermal pretreatment[J]. *Biotechnology for Biofuels*, 2015, 8(1): 127.
- [5] HUBER G W, IBORRA S, CORMA A. Synthesis of transportation fuels from biomass: chemistry, catalysts, and engineering. [J]. *Chemical Reviews*, 2006, 106(9): 4044-4098.
- [6] MOHAN D, PITTMAN C U, STEELE P H. Pyrolysis of wood/biomass for Bio-Oil: a critical review[J]. *Energy Fuels*, 2006, 20(3): 848-889.
- [7] D S JENKINSON, D S POWLSON. The effects of biocidal treatments on metabolism in soil—V: A method for measuring soil biomass[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 1976, 8(3): 209-213.
- [8] 李慧玲, 任俊莉, 王帅阳, 等. 农业废弃物转化成能源及高附加值化学品的研究进展[J]. *生物质化学工程*, 2012, 46(6): 55-60.
- [9] 王涛. 中国主要生物质燃料油木本能源植物资源概况与展望[J]. *科技导报*, 2005, 23(5): 12-14.
- [10] 丁传雨, 郑远, 任学敏, 等. 能源植物修复土壤镉污染过程中细菌群落分析[J]. *环境科学学报*, 2016, 36(8): 3009-3016.
- [11] 李晓娜, 范希峰, 武菊英, 等. 纤维素类芒属草本能源植物品质近红外光谱快速检测技术研究[J]. *光谱学与光谱分析*, 2016, 36(1): 64-69.
- [12] 郑朝晖, 马春霞, 马江林, 等. 俄罗斯杨热值与碳含率特征分析[J]. *河南农业科学*, 2011, 40(6): 128-131.
- [13] LI H, DENG A, REN J, et al. Catalytic hydrothermal pretreatment of corncob into xylose and furfural via solid acid catalyst[J]. *Bioresource Technology*, 2014, 158(4): 313-320.
- [14] 于颖, 范文义, 李明泽. 东北林区不同尺度森林的碳含率[J]. *应用生态学报*, 2012, 23(2): 341-346.
- [15] DJOMO N A, KNOHL A, GRAVENHORST G. Estimations of total ecosystem carbon pools distribution and carbon biomass current annual increment of a moist tropical forest[J]. *Forest Ecology and Management*, 2011, 261(8): 1448-1459.
- [16] 马钦彦, 陈遐林, 王娟, 等. 华北主要森林类型建群种的碳含率分析[J]. *北京林业大学学报*, 2002, 24(Z1): 96-100.
- [17] 丁琦珂, 豆浩, 张二山, 等. 郑州市园林绿化树种的含碳率分析[J]. *林草资源研究* 2024, (1): 95-101.
- [18] 向平, 林益明, 彭在清, 等. 厦门园林植物园 10 种榕属植物叶热值与灰分含量的研究[J]. *林业科学*, 2003, (S1): 68-73.
- [19] 王春燕, 陈秋波, 彭懿, 等. 老龄橡胶树不同器官碳含率分析[J]. *热带作物学报*, 2011, 32(4): 587-591.