

广东省林下植物碳含量和热值特征分析*

张红爱¹ 蔡安斌²

(1. 广东省林业调查规划院, 广东 广州 510520; 2. 广东省岭南综合勘察设计院, 广东 广州 510520)

摘要 为准确估算广东地区林下植被碳储量和能量, 应用湿烧法和氧弹式热量仪法对该地区共计 11 类林下植物的碳含量和热值进行了测定和分析, 结果表明, 碳含量大小顺序为杉木 (*Cunninghamia lanceolata*) (下木, 505.47 g/kg) > 其它灌木 (496.36 g/kg) > 阔叶类 (下木, 491.24 g/kg) > 岗松 (*Baeckea frutescens*) (491.06 g/kg) > 桃金娘 (*Rhodomyrtus tomentosa*) (476.62 g/kg) > 竹灌 (474.19 g/kg) > 大芒 (*Miscanthus floridulus*) (473.60 g/kg) > 芒萁 (*Dicranopteris dichotoma*) (469.09 g/kg) > 小芒 (*M.sp.*) (452.73 g/kg) > 其它草类 (411.28 g/kg) > 蕨类 (387.30 g/kg), 总体上遵循下木>灌木>草本的规律; 热值大小顺序为下木杉木 (19.83 MJ/kg) = 下木阔叶类 (19.83 MJ/kg) > 其它灌木 (19.50 MJ/kg) > 岗松 (19.47 MJ/kg) > 桃金娘 (19.13 MJ/kg) > 芒萁 (18.54 MJ/kg) > 竹灌 (18.11 MJ/kg) > 大芒 (17.86 MJ/kg) > 小芒 (17.77 MJ/kg) > 蕨类 (16.65 MJ/kg) > 其它草类 (16.35 MJ/kg), 同样遵循下木>灌木>草本的规律; 植物碳含量与热值之间符合曲线相关, 其实验数值大致遵循模型 $y=0.000\ 3x^2-0.192\ 1x+53.383\ 6$, 其中 x 为碳含量 (g/kg), y 为热值 (MJ/kg), $R^2=0.907\ 7$, 该模型可用于筛选具有应用潜力的能源植物。

关键词 广东; 林下植物; 碳含量; 热值

中图分类号: S718 文献标识码: A 文章编号: 2096-2053 (2017) 02-0042-06

Characteristic Analysis of Carbon Content and Calorific Value of Undergrowth Plant in Guangdong Province

ZHANG Hong'ai¹ CAI Anbin²

(1. Guangdong Forestry Survey and Planning Institute, Guangzhou, Guangdong 510520, China; 2. Lingnan Integrated Exploration and Design Institute of Guangdong, Guangzhou, Guangdong 510520, China)

Abstract In order to accurately estimate the carbon storage and energy of undergrowth plant in Guangdong province, the carbon content and caloric value of 11 species of underground plants in the area were measured and analyzed by wet burning method and oxygen bomb calorimeter method. The results showed that, (1) The carbon content rates in descending order are: *Cunninghamia lanceolata* (underwood, 505.47 g/kg) > other shrubs(496.36 g/kg)>broadleaf (underwood, 491.24 g/kg) > *Baeckea frutescens*(491.06 g/kg) > *Rhodomyrtus tomentosa*(476.62 g/kg) >underwood bamboo(474.19 g/kg) > *Miscanthus floridulus*(473.60 g/kg) > *Dicranopteris dichotoma* (469.09 g/kg) > *M.sp.* (452.73 g/kg) > other grasses(411.28 g/kg) > fern(387.30 g/kg). In general, the carbon content rates decreased from underplant, shrub, to grass. (2) The calorific value in descending order are:

* 基金项目: 广东省林业科技创新平台建设项目“广东省碳汇计量监测创新平台建设”(2016CXPT03)、广东省低碳发展专项资金支持项目“广东省森林碳汇现状与潜力研究”(办资字[2012]14号)、广东省林业科技创新专项基金科研项目“广东省林业碳汇计量监测方法研究”(2012KFCX019-01)。

第一作者: 张红爱(1977—), 女, 高级工程师, 主要从事森林生态监测以及林业碳汇计量监测研究, E-mail:154963211@qq.com。

通信作者: 蔡安斌(1974—), 男, 助理工程师, 主要从事林业信息化以及林业调查规划设计工作, E-mail: 40312076@qq.com。

underwood chinese fir (19.83 MJ/kg) = underwood broadleaf (19.83 MJ/kg) > other shrubs (19.50 MJ/kg) > *B. frutescens* (19.47 MJ/kg) > *R. tomentosa* (19.13 MJ/kg) > *D. dichotoma* (18.54 MJ/kg) > underwood bamboo (18.11 MJ/kg) > *M. floridulus* (17.86 MJ/kg) > *M. sp.* (17.77 MJ/kg) > fern (16.65 MJ/kg) > other grasses (16.35 MJ/kg). Similarly, the calorific value decreased from underwood, shrub, to grass. (3) Curve correlation was perceived between the carbon content rate and the calorific value, and observation values followed generally the model $y=0.000\ 3x^2-0.192\ 1x+53.383\ 6$, where x (g/kg) denotes the carbon content rate, y (MJ/kg) denotes the calorific value, and $R^2=0.907\ 7$. This model could be further applied to provide a theoretical reference on screening of potential energy plants.

Key words Guangdong; typical plant species under forestry; carbon content rate; calorific value

由于人类对化石能源的过度使用,在造成全球能源枯竭的同时还带来一系列环境问题^[1-3]。生物质能源因其来源广、产量大、再生周期短等优点受到越来越多科研工作者的关注^[4-7]。关于生物质能源的研究在全球可再生能源研究领域备受瞩目,而植物热值的研究将会为生物质能源的开发利用提供基础数据支持。

植物热值反映了绿色植物将太阳能转化为化学能的能力,是植物能量代谢水平的一种度量,涉及植物群落能源利用、转化和流动,是评价和反映生态系统中物质循环和能量转化规律的重要指标之一^[8-11]。植物热值的高低是衡量其是否适合作为能源植物应用于生物质能源领域的参考标准^[12]。我国对植物热值的研究始于20世纪80年代,主要侧重于不同季节的植物热值变化、不同植物器官的热值差异性以及灰分含量对热值的影响等,相关的研究已有大量的文献报道,但关于碳含量与热值之间关系的研究较少^[13-16]。

植物碳含量是指植物中有机物碳元素在其组分中的百分比。植物通过光合作用吸收大气中的CO₂,并将其转化为有机物储存于体内,通过呼吸、凋落物分解等途径释放出CO₂,从而实现碳循环,在维持全球生态系统平衡中起着至关重要的作用^[17-20]。植物碳含量与热值均与其光合作用有关,对植物碳含量和热值之间关系进行系统研究可为能源植物的合理开发利用提供重要的理论依据。植物碳含量是估算其碳储量的基本参数,在传统对森林生态系统碳储量调查和评估过程中,重点关注的是上层乔木树种的碳含量、生物量和碳储量,对林下植被的重视度不够。由于获取各种植被类型的碳含量数据比较困难,在已有的区域和国家尺度的森林碳储量估算中,国内外

研究者大多采用45%^[21-22]或50%^[23-24]作为所有森林植被类型的平均碳含量。实际上不同种类的植物及同一种植物的不同组织器官中碳含量是有差别的。

在广东省的森林资源二类调查和森林清查中,一个完整的森林结构包含乔木层(胸径≥5 cm)、下木层(胸径≤5 cm的乔木)、灌木层和草本层。下木层的植物分为松类、杉木(*Cunninghamia lanceolata*)和阔叶类;灌木层的植物分为桃金娘(*Rhodomyrtus tomentosa*)、岗松(*Baeckea frutescens*)、竹灌和其它灌木;草本层的植物分为芒萁(*Dicranopteris dichotoma*)、大芒(*Miscanthus floridulus*)、小芒(*M. sp.*)、蕨类和其它草类,广东省林业调查规划院均对其建立了相应的生物量模型。基于此,为了更准确估算全省下木杉木、下木阔叶类、灌木、草本的碳储量,笔者结合宏观调查监测分别进行了碳含量实测,以期广东省现代林业建设和林业生态建设提供基础数据。

1 材料与方法

1.1 采样地概况

广东省位于中国大陆南部,陆地总面积17.98万km²,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。粤西地区是广东省西部地区的简称,一般包括湛江市、茂名市、阳江市和云浮市4个地级市,地形以山地丘陵为主,湛江、茂名市属台地,属亚热带季风气候、热带季风气候,森林资源较丰富;粤东地区是广东省东部地区的简称,包括汕头市、潮州市、揭阳市和汕尾市4个地级市,森林资源次于粤西地区,属亚热带季风气候;粤北地区指广东北部地区,属山区,包括清

远市、韶关市、河源市和梅州市 4 个地级市，是广东省森林资源最丰富的地区，属中亚热带季风气候。

1.2 样品采集

2014 年 7—8 月，在全省 3 685 个森林清查标准样地中（面积为 0.067 hm²，长 × 宽为 25.82 m × 25.82 m 的方形样地）选取 52 个样地，分别位于粤西的信宜市、遂溪县、廉江市、阳春市；粤东的东源县、龙川县、龙门县；粤北的阳山县、

英德市、始兴县、南雄市和乳源县，每个县 / 市选择 3~6 个森林清查标准样地，采样分布点如图 1 所示，每个样地取样种类见表 1，每个样地每类植物取 3~5 株，每类植物共计 30 株。采取整株收获法取样，整株烘干粉碎，用四分法取样测定。

1.3 样品处理与测定

1.3.1 样品处理 所有采集样品 100 ℃ 杀青后，于 85 ℃ 下烘至恒重，然后粉碎，过 60 目筛（0.25 mm）后装在密封袋内，放于干燥器里储存待

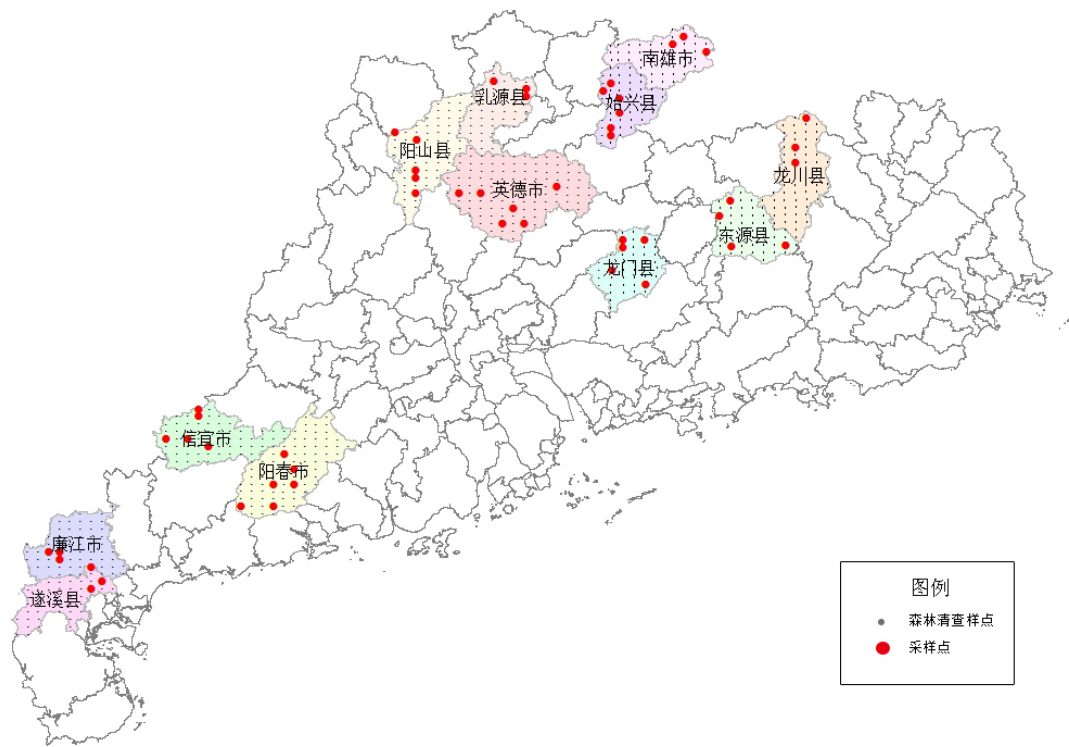


图 1 广东省林下植物采样布点图

表 1 广东省林下植物采样分布点

市	县	下木	灌木	草本
茂名市	信宜市	杉木		芒萁
湛江市	遂溪县			其它草类
	廉江市			大芒
阳江市	阳春市		岗松	小芒
清远市	阳山县		竹灌	芒萁
	英德市	杉木	其它灌木	大芒
韶关市	始兴县	阔叶类	桃金娘	小芒
	南雄市		岗松	
	乳源县		其它灌木	蕨类
河源市	东源县	阔叶类		蕨类
	龙川县		竹灌	
惠州市	龙门县		桃金娘	其它草类

注：在一个采样区内各类植物取样数量均为 15 株（丛）。

测。

1.3.2 碳含量测定 本实验采用重铬酸钾—硫酸氧化法（湿烧法）^[25]对样品碳含量进行测定，具体原理为：加热条件下使用一定量的重铬酸钾—硫酸混合液氧化样品中的有机碳，然后采用硫酸亚铁滴定法对体系中剩余的重铬酸钾进行滴定，根据反应前后氧化剂的消耗量计算有机碳含量。每个样品平行检测两次，取平均值。因植物有机碳含量远高于土壤有机碳，因此测定时每个植物样约取 0.050 0 g。

1.3.3 热值测定 植物热值测定采用微电脑氧弹式热量计进行，所用仪器为德国仪科生产的 IKAC200 型氧弹量热仪。样品热值是干质量热值（每克干物质在完全燃烧条件下所释放的总热量，简称 GCV）。测定环境是空调控温 20 ℃左右，每份样品重复 2 次，重复间误差控制在 ± 200 J/g，每次实验前用苯甲酸标定。

1.4 数据分析

根据野外调查采样资料和实验室内的分析结果，用 Microsoft excel 2007 进行数据处理分析。对林下植物碳含量和热值的关系进行相关分析，对两者的关系进行了拟合。

2 结果与分析

2.1 林下植物碳含量

对林下 11 类植物的碳含量进行地面实测，结果如表 2 所示。从表中数据可以看出，研究区 11 类植物的平均碳含量相差较大，在 387~506 g/kg 之间。其中，杉木（下木）的碳含量最高，为 505.47 g/kg，随后依次为其它灌木（496.36 g/kg）、阔叶类（下木，491.24 g/kg）、岗松（491.06 g/kg）、桃金娘（476.62 g/kg）、竹灌（474.19 g/kg）、大芒（473.60 g/kg）、芒萁（469.09 g/kg）、小芒（452.73 g/kg）、其它草类（411.28 g/kg），蕨类碳含量最低，为 387.30 g/kg。所测定的 11 类植物的碳含量变化幅度大小不一，极差范围为 34.49~232.4 g/kg。其中，阔叶类（下木）和其它草类的碳含量变化幅度最大，分别在 310.39~542.79 g/kg 和 314.76~463.31 g/kg 之间，极差分别为 232.40 和 148.55 g/kg。杉木（下木）碳含量变化幅度最小，在 519.59~554.08 g/kg 之间，极差为 34.49 g/kg。这可能是由于下木杉木处于幼龄阶段，各器官发育未完整，碳汇功能基本相同。

表 2 广东省林下植物碳含量 g · kg⁻¹

植物	平均碳含量	变化范围	极差
杉木	505.47	519.59~554.08	34.49
阔叶类	491.24	310.39~542.79	232.4
岗松	491.06	428.20~516.11	87.91
桃金娘	476.62	413.96~553.41	139.45
竹灌	474.19	425.21~513.56	88.35
其它灌木	496.36	455.48~532.96	77.48
芒萁	469.09	435.00~491.68	56.68
大芒	473.60	436.69~504.53	67.84
小芒	452.73	385.89~494.92	109.03
蕨类	387.30	334.26~430.30	96.04
其它草类	411.28	314.76~463.31	148.55

注：杉木和阔叶类均为下木。

2.2 林下植物热值分析

林下不同植物热值有差异，测定结果如表 3 所示。

表 3 广东省林下植物热值 MJ · kg⁻¹

植物	热值	变化范围	极差
杉木	19.83	18.83~21.51	2.68
阔叶类	19.83	16.33~22.65	6.32
岗松	19.47	18.27~19.97	1.70
桃金娘	19.13	17.00~21.25	4.25
竹灌	18.11	17.33~18.76	1.43
其它灌木	19.50	17.26~21.26	4.00
芒萁	18.54	18.00~18.87	0.87
大芒	17.86	16.81~18.42	1.61
小芒	17.77	15.42~18.76	3.34
蕨类	16.65	14.49~18.42	3.93
其它草类	16.35	12.15~18.06	5.91

注：杉木和阔叶类均为下木。

研究结果表明：广东省林下 11 类植物热值高低为杉木（19.83 MJ / kg）= 阔叶类（19.83 MJ / kg）> 其它灌木（19.50 MJ / kg）> 岗松（19.47 MJ / kg）> 桃金娘（19.13 MJ / kg）> 芒萁（18.54 MJ / kg）> 竹灌（18.11 MJ / kg）> 大芒（17.86 MJ / kg）> 小芒（17.77 MJ / kg）> 蕨类（16.65 MJ / kg）> 其它草类（16.35 MJ / kg）。不同植物热值变化幅度不同，其中阔叶类（下木）热值变化幅度最大，在 16.33~22.65 MJ / kg 之间，极差为 6.32 MJ/kg；其它草类热值变化幅度为 12.15~18.06 MJ / kg，极差为 5.91 MJ/kg。下木阔叶类和其它草类热值变化幅度大。总体上看，热值高低排序为下木乔木 > 灌木 > 草

本,该趋势与碳含量相一致,说明植物热值与碳含量之间存在着相关关系。

2.3 碳含量与热值相关关系

为了进一步研究植物碳含量与热值之间的关系,本文对碳含量和热值数据进行了非线性模拟,结果如图2所示。由图中可以看出,所研究的11类植物的碳含量与热值之间存在着非线性相关,其实验数值大致遵循模型 $y=0.000\ 3x^2-0.192\ 1x+53.383\ 6$, 其中 x 为碳含量 (g/kg), y 为热值 (MJ/kg), $R^2=0.907\ 7$ 。

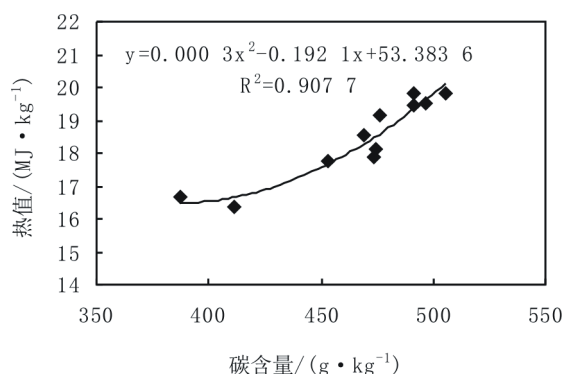


图2 广东省林下植物碳含量与热值相关关系

3 结论与讨论

3.1 广东省林下植物碳含量总体表现为下木杉木>其它灌木>下木阔叶类>岗松>桃金娘>竹灌>大芒>芒萁>小芒>其它草类>蕨类。按植物习性归类,为下木(幼小乔木)>灌木>草本。这在一定程度上可以看出,乔木是森林碳汇的主体,因此应当加强植树造林工作。同一研究区内林下不同植物之间其平均碳含量具有差异性,下木杉木碳含量大于下木阔叶类,这与程堂仁等^[26]研究结果一致:针叶树碳含量普遍高于阔叶树种,针叶树种的平均碳含量均高于阔叶树、灌木和草本。亦与本文得出的结果一致:碳含量依次为下木>灌木>草本。

本研究中,下木阔叶树的平均碳含量约为491 g/kg,下木针叶树种的平均碳含量约为505 g/kg,4类灌木的平均碳含量约为485 g/kg,5类草本的平均碳含量约为439 g/kg,比程堂仁等^[26]的甘肃小陇山灌木平均碳含量445 g/kg、草本平均碳含量327 g/kg略高。植物的碳含量可能与影响植物生长的纬度、海拔、降水等气候条件相关。在区域和国家尺度的森林生态系统碳储量的估算中,国内

外研究者大多采用500 g/kg^[23-24]来作为所有森林类型的平均碳含量,也有采用450 g/kg^[21-22]作为平均碳含量,极少数根据不同森林类型采用不同碳含量,如Birdsey在估算美国森林生态系统的碳储量时针叶林按521 g/kg的碳含量计算,阔叶林按498 g/kg计算,Shvidenko等人在估算俄罗斯北方森林的碳储量时对于木质植物生物量按500 g/kg的碳含量计算,其余植被成份则按450 g/kg计算^[27]。

3.2 研究区11类植物的热值高低为下木杉木=下木阔叶类>其它灌木>岗松>桃金娘>芒萁>竹灌>大芒>小芒>蕨类>其它草类,下木>灌木>草本,这与任海等^[14]的研究结果相符,这种格局可能与群落内光照强度的递减有关。该趋势与碳含量趋势相一致,说明植被碳含量高,其热值也相应高。目前植物热值的研究还不是生态学或生理学中的热点,一般把热值作为能量当量用来计算群落、种群或器官的总能量现存量或能量转化率。实际上植物热值不仅是衡量植物生产力大小的指标,也是衡量植物体各种生理活动的指标。热值高低能体现植物生长状况的差异以及各种环境因子对植物生长的影响。因此,今后应对热值开展更广泛更深入的研究,可按器官研究其热值,或者按季节研究其热值等。

不同种类植物热值的差异受多重因素影响,一是不同植物具有不同的遗传特性、生长发育节律,其能量固定和储运过程均有差异^[28];在11类林下植物中杉木和阔叶类为乔木,较灌木高大,而灌木类,较草本植物高大,对环境同化能力乔木强于灌木,灌木强于草本植物,热值亦较高;二是植物的化学组成决定热值的水平,化合物中含有较高键能的化学键所占的比例越大,还原程度越高,其热值越高;三是受气候因素和生境条件的影响^[28]。

植物的热值随着纬度的增加而上升,随着纬度的降低而下降^[29]。世界陆生植物平均热值为17.78 MJ/kg,东北羊草草原植物的平均热值为17.95 MJ/kg^[28],与世界陆生植物平均热值相近,而广东省林下植物平均热值为18.46 MJ/kg,比东北羊草草原上植物的热值高,与世界陆生植物的热值相比居中上水平。

3.3 所研究的11类植物的碳含量与热值之间为曲线相关,其实验数值大致遵循模型 $y=0.000\ 3x^2-0.192\ 1x+53.383\ 6$, 其中 x 为碳含量 (g/kg), y 为

热值 (MJ/kg), $R^2=0.9077$ 。该模型为进一步估算我国南方植物的碳含量和热值、筛选具有较大潜力的能源植物具有重要的指导作用。

参考文献

- [1] 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.
- [2] 杜宁. 国内外能源植物的利用与开发[J]. *世界农业*, 2006(4): 57-60.
- [3] LI H, 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): 1-12.
- [4] HUBER G W, IBORRA S A, CORMA A. Synthesis of transportation fuels from biomass: chemistry, catalysts, and engineering[J]. *Chemical Reviews*, 2006, 106(9): 4044-4098.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] 江丽媛, 彭祚登, 何宝华, 等. 6个树龄栓皮栎热值与碳含量的分析[J]. *黑龙江农业科学*, 2010(11): 85-89.
- [9] 田帅, 刘振坤, 唐明. 不同水分条件下丛枝菌根真菌对刺槐生长和光合特性的影响[J]. *西北林学院学报*, 2013, 28(4): 111-115.
- [10] 王立海, 孙墨珑. 东北12种灌木热值与碳含量分析[J]. *东北林业大学学报*, 2008, 36(5): 42-42.
- [11] 郑朝晖, 马江林, 孙守文, 等. 新疆8年生银新杨热值与碳含量特征分析研究[J]. *福建林业科技*, 2011, 38(4): 21-25.
- [12] 郑朝晖, 马春霞, 马江林, 等. 俄罗斯杨热值与含碳率特征分析[J]. *河南农业科学*, 2011, 40(6): 128-131.
- [13] 杨福国, 王启基, 史顺海. 青藏高原矮嵩草草甸常见植物的热值及灰分含量[J]. *中国草地学报*, 1983(2): 25-29.
- [14] 任海, 彭少麟, 刘鸿先, 等. 鼎湖山植物群落及其主要植物的热值研究[J]. *植物生态学报*, 1999, 23(2): 148-154.
- [15] 林益明, 林鹏, 王通. 几种红树植物木材热值和灰分含量的研究[J]. *应用生态学报*, 2000, 11(2): 181-184.
- [16] 王立海, 孙墨珑. 小兴安岭主要树种热值与碳含量[J]. *生态学报*, 2009, 29(2): 953-959.
- [17] 陶玉华, 冯金朝, 马麟英, 等. 广西罗城马尾松、杉木、桉树人工林碳储量及其动态变化[J]. *生态环境学报*, 2011, 20(11): 1608-1613.
- [18] 牛攀新, 宋于洋, 周朝彬. 准噶尔盆地梭梭群落生物量和碳储量[J]. *生态学报*, 2014, 34(14): 3962-3968.
- [19] 刘灵, 张含国, 徐悦丽, 等. 樟子松种源碳含量遗传变异分析与高碳汇种源选择[J]. *东北林业大学学报*, 2012, 40(5): 5-8.
- [20] 马钦彦, 陈遐林, 王娟, 等. 华北主要森林类型建群种的碳含量分析[J]. *北京林业大学学报*, 2002, 24(Z1): 96-100.
- [21] 王效科, 冯宗炜, 欧阳志云. 中国森林生态系统植物碳储量和碳密度研究[J]. *应用生态学报*, 2001, 12(1): 13-16.
- [22] 赵士洞, 汪业勋, 于振良, 等. 中国森林生态系统碳循环研究[J]. *中国生态学会, 中国生态学会通讯*, 2000(特刊): 50-52.
- [23] 方精云. 中国森林生产力及其对全球气候变化的响应[J]. *植物生态学*, 2000, 24(5): 513-517.
- [24] FANG Jinyun, CHEN Anping, PENG Changhui, et al. Changes in forest biomass carbon storage in China between 1949 and 1998[J]. *Science*, 2001, 292: 2320-2322.
- [25] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 2000: 229-237.
- [26] 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.
- [27] Shvidenko A Z, Rojikov V A, et al. Carbon budget of the Russian boreal forests: a systems analysis approach to uncertainty[C]// APPS M J, PRICE D T, eds. *Forest Ecosystems, Forest Management and the Global Carbon Cycle*. Berlin: Spfinger-Vedag, 1996: 145-162.
- [28] 郭继勋, 王若丹. 东北羊草草原主要植物热值[J]. *植物生态学报*, 2001, 25(6): 746-750.
- [29] GOLLEY F B. Energy values of ecological materials[J]. *Ecology*, 1962, 42: 581-584.