

文章编号:1001-1498(2016)01-0133-07

中国不同地带性森林乔木叶片热值特征及其影响因素

宋广艳^{1,2}, 何念鹏², 侯继华^{1*}

(1. 北京林业大学,北京林业大学森林资源与生态系统过程北京市重点实验室,北京 100083;

2. 中国科学院地理科学与资源研究所,生态系统网络观测与模拟重点实验室,北京 100101)

关键词:森林;乔木;生活型;叶片热值;叶片性状

中图分类号:S718.5

文献标识码:A

Changes in Leaf Calorific Value in Main Chinese Forests and Its Influencing Factors

SONG Guang-yan^{1,2}, HE Nian-peng², HOU Ji-hua¹

(1. Key Laboratory for Forest Resources & Ecosystem Processes of Beijing, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China;

2. Key Laboratory of Ecosystem Network Observation and Modeling, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China)

Abstract: [**Objective**] To study the leaf calorific value of different forest types. [**Method**] This study focused on four common forest types widely distributed across China, including boreal coniferous forest, warm temperate deciduous broad-leaved forest, subtropical evergreen broad-leaved forest, and tropical monsoon forest. The leaf calorific values of 175 dominant (or common) tree species were measured. The leaf calorific value characteristics of the trees found in the different forest types were analyzed, and the primary factors affecting leaf calorific value were investigated, including leaf morphological traits, nutrient elements, climate, and soil traits. [**Result**] The results showed that in these forest types, the leaf calorific values ranged from 14.84 to 21.98 $\text{KJ} \cdot \text{g}^{-1}$, with an overall mean of 19.06 $\text{KJ} \cdot \text{g}^{-1}$. The presence of organisms appeared to affect the leaf calorific value, which differed among forest types as follows: coniferous trees > broadleaf trees or evergreen trees > deciduous trees. [**Conclusion**] The latitudinal pattern of tree leaf calorific value, ordered from north to south, is as follows: warm temperate deciduous broad-leaved forest > subtropical evergreen broad-leaved forest > tropical mountain rainforest. The mean leaf calorific value of boreal coniferous forest was slightly lower than those of warm temperate deciduous broad-leaved forest and subtropical evergreen broad-leaved forest. The leaf calorific values were significantly correlated with leaf carbon content ($R^2 = 0.89$, $P < 0.001$). A multiple regression equation was established to describe the relationships among leaf calorific value, leaf carbon content, leaf nitrogen content, and leaf thickness.

Key words: forest; trees; life form; leaf calorific value; leaf trait

叶片是植物进行光合作用的主要场所,是反映植物生命活动变化规律最敏感的器官,其性状直接影响到植物的基本行为和功能^[1]。热值(CV)是植

物相对稳定的一个性质,即指单位质量干物质完全燃烧所释放的热量值($\text{KJ} \cdot \text{g}^{-1}$),与光合作用、呼吸作用等多种生理活动密切相关,能较好地反映植物

收稿日期:2015-05-12

基金项目:国家自然科学基金资助项目(31270519, 31070431)和中科院地理所可桢杰出青年人才项目(2013RC102)

作者简介:宋广艳(1988—),女,硕士. E-mail:1150183498@qq.com

* 通讯作者: E-mail: houjihua@bjfu.edu.cn.

在光合作用中对太阳能的固定和累积能力^[2-3],因此,叶片热值常被认为是衡量植物生长状况的一个有效指标。近年来,科学家对植物叶片性状与环境因素间关系的研究很多^[4-6],但有关叶片热值区域大尺度的研究相对较少。

早在 20 世纪 30 年代,Long^[7] 率先对向日葵 (*Helianthus annuus* Linn.) 的叶片热值进行了研究,阐明了叶片分布与热值的关系。我国学者关于森林植物热值的研究始于 20 世纪 80 年代,主要集中在某一特定区域、种群^[8-9],对某一物种的研究比较细致和深入^[10-12]。仅林益明等^[11]对红树植物秋茄 (*Kandelia candel* Linn.) 的热值从北纬 19°~27°进行了比较,徐永辉等^[13]对比了天津和武汉的几种园林植物的叶片热值。对热值的影响因素及对环境条件响应的研究有很多^[2,14],但目前大多数研究仅讨论了单一的或某一类因素对叶片热值的影响^[13,15-17]。为了深入地揭示热值空间格局及其主要影响因素,亟须开展大尺度和多因素的综合性研究。本文以中国寒温带针叶林、暖温带落叶阔叶林、亚热带常绿阔叶林和热带山地雨林 4 种主要森林类型为研究对象,共采集并测定了 175 种常见乔木叶片的的热值,通过比较不同生活型植物间、不同森林类型间的叶片热值特征,再结合叶片形态特征、养分元素、气候因素及土壤因素深入探讨植物叶片热值的主要影响因素,以期探讨生活型对叶片热值的影响、叶片热值大尺度下的空间分布特点,并揭示大尺度下叶片热值的主要影响因素。

1 材 料 和 方 法

1.1 样地概况

试验材料来源于中国的寒温带针叶林、暖温带落叶阔叶林、亚热带常绿阔叶林和热带季雨林。

寒温带针叶林的试验样地位于黑龙江省大兴安岭呼中国家自然保护区内(51°46′48″N, 123°01′12″E)。该区属寒温带大陆性季风气候,季节温差大,年平均气温 -3.67℃,年平均降水量 472.96 mm,干燥度指数为 74.74。主要优势树种为兴安落叶松 (*Larix gmelinii* (Rupr.) Rupr.) 和樟子松 (*Pinus sylvestris* Linn.), 土壤为灰色森林土。

暖温带落叶阔叶林样地位于山西省中部太岳山腹部的灵空山国家级自然保护区(36°41′43″N, 112°04′39″E)。该区属暖温带半湿润大陆性季风气候区,年平均气温 5.98℃,年平均降水量 644.38 mm,

干燥度指数为 40.33。主要优势树种为油松 (*Pinus tabulaeformis* Carr.) 和辽东栎 (*Quercus wutaishanica* Mayr.), 土壤为褐土。

亚热带常绿阔叶林样地位于江西省龙南县境内九连山国家级自然保护区(24°35′05″N, 114°26′28″E)。该区属中亚热带湿润季风气候,年平均温度 18.22℃,年平均降水量 1 769.93 mm,干燥度指数为 62.73。主要优势树种为米槠 (*Castanopsis carlesii* (Hemsl.) Hay.) 和甜槠 (*C. eyrei* (Champ.) Tutch.), 土壤为红壤。

热带季雨林位于海南省西南部乐东黎族自治县境内的尖峰岭国家级自然保护区内(18°44′18″N, 108°51′26″E)。该区属热带季风气候区,年平均气温 23.15℃,年平均降水量 2 266 mm,干燥度指数为 68.35。该森林类型的组成树种繁多,优势种不明显,主要有厚壳桂 (*Cryptocarya chinensis* (Hance) Hemsl.)、五桠果 (*Dillenia indica* Linn.)、多种榕树 (*Ficus* spp.) 等,土壤类型是砖黄壤。

1.2 取 样 方 法

在 2013 年 7 月底至 8 月初进行野外采集。首先,在每个森林类型中,在较为平整的山坡上分别设置 4 个具有代表性的 30 m × 40 m 的样地,每个样地相距 200 m 左右。先进行乔木、灌木(5 m × 5 m)和草本(1 m × 1 m)的群落结构调查,随后再收集样地内或样地周围常见树种的成熟叶片。具体取样方法为:每个树种选择健康无病害,生长成熟的树木,根据不同层次和方位,用高枝剪或人工爬树的方法采集树冠中上部东南西北 4 个方向的小枝 4 个,获取叶片的混合样品;树叶样品装入自封袋中,带回实验室处理。本研究以每个样地内的 1 株树作为 1 个重复,4 个样地为 4 个重复。总共收集到 175 种树种,700 份植物叶片样品;其中,针叶树种 6 种,阔叶树种 169 种;常绿树种 131 种,落叶树种 44 种。同时,在每个乔木样地内随机设置 30~40 个土壤样品采集点,去除地表枯落物后,用土钻法在取样点钻取 0~10 cm 的土壤样品,多个采集点的土壤样品形成一个混合土壤样品,每个森林类型分别获得 1 份混合土壤样品。

1.3 样 品 室 内 测 定

1.3.1 植物叶片指标测定 野外采样后带回室内对叶片进行简单筛选,并擦净表面污物。叶面积用叶面积仪(LI-COR 3100C Area Meter, LI-COR, USA)测量;叶片厚度用精度为 0.01 mm 的电子游标

卡尺在叶片沿主脉方向均匀的选3个点测量。将上述植物叶片样品经60℃烘箱烘干至恒质量,称叶干质量。

比叶面积(SLA) = 叶面积/叶干质量。

将烘干的叶片样品磨成粉过筛贮存备用。用Parr6300氧弹量热仪(Parr Instrument Company, Moline, IL, USA)进行热值测定,本文所分析测定的热值均为干质量热值($\text{KJ} \cdot \text{g}^{-1}$)。叶片碳和氮含量使用元素分析仪测定(Elementar vario MAX CN, Germany)。叶片磷含量采用美国珀金埃尔默仪器公司生产的Optima 5300 DV电感耦合等离子体光谱仪进行测定。

1.3.2 土壤指标测定 将土壤样品过2 mm孔径筛子,手工去除可见的根系和杂质,取约100 g土壤样品风干处理,其余样品4℃冷藏。经过预处理的土壤样品采用元素分析仪(Elementar vario MAX CN, Germany)测定土壤全碳和全氮含量;利用pH计(Meter Toledo, Greifensee, Switzerland)测定土壤pH值。

1.4 数据获取与分析

根据全国50年的气象数据插值得到年平均气温(MAT)和多年平均降水量(MAP)^[18]。

de Martonne 干燥度(I_{dM})计算公式^[19]:

$$I_{dM} = \text{MAP} / (\text{MAT} + 10)$$

根据叶片的形态特征将叶片分为针叶和阔叶树种,根据叶片脱落特征分为常绿和落叶树种。不同生态型植物叶片热值采用单因素方差分析(one-way ANOVA),并用多重比较(LSD)检验显著性;植物叶片热值与各种影响因子之间的关系先采用相关关系分析,再采用多元逐步回归的方法拟合出较优的回归模型。所有数据分析均利用SPSS 13.0统计软件包完成,数据整理、计算与作图均利用Microsoft Excel 2010软件完成。

2 结果与分析

2.1 不同森林类型的植物叶片热值特征

4种森林类型175种常见乔木叶片热值整体而言,不同物种的叶片热值具有一定的差异;所测175种叶片热值大致呈正态分布,叶片热值的变幅为14.84~21.98 $\text{KJ} \cdot \text{g}^{-1}$,均值为19.06 $\text{KJ} \cdot \text{g}^{-1}$,方差为1.3,变异系数为14.66%(图1)。不同森林类型植物叶片热值也存在差异,但差异不显著(图2);暖温带落叶阔叶林叶片热值($19.59 \pm 0.36 \text{ KJ} \cdot \text{g}^{-1}$) > 亚热带常绿阔叶林叶片热值(19.35 ± 0.14

$\text{KJ} \cdot \text{g}^{-1}$) > 寒温带针叶林叶片热值($19.10 \pm 0.24 \text{ KJ} \cdot \text{g}^{-1}$) > 热带季雨林叶片热值($18.74 \pm 0.16 \text{ KJ} \cdot \text{g}^{-1}$),其中,寒温带针叶林植物种类较少,热值为17.64~20.22 $\text{KJ} \cdot \text{g}^{-1}$,变异系数最大(24.70%);热带季雨林共采集86种乔木,变异系数最小(12.43%)。

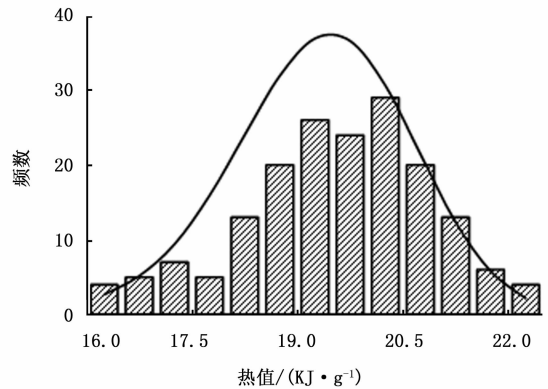
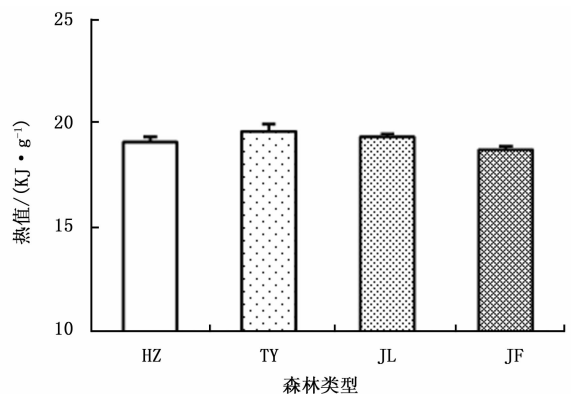


图1 乔木叶片热值频数分布图



HZ - 呼中寒温带针叶林;TY - 太岳山暖温带落叶阔叶林; JL - 九连山亚热带常绿阔叶林;JF - 尖峰岭热带季雨林;下同。

图2 不同森林类型乔木叶片热值(均值±标准误)比较

2.2 不同生活型植物的叶片热值特点

由图3可看出:植物叶片热值在不同生活型间存在差异,但不同森林类型的叶片热值均表现出一致的规律性,即针叶乔木的叶片热值 > 阔叶乔木的,常绿乔木的叶片热值 > 落叶乔木的。在寒温带针叶林中,针叶乔木1种($19.95 \text{ KJ} \cdot \text{g}^{-1}$),阔叶乔木9种($19.01 \text{ KJ} \cdot \text{g}^{-1}$),落叶乔木10种($19.10 \text{ KJ} \cdot \text{g}^{-1}$)。在暖温带落叶阔叶林中,针叶乔木2种($21.19 \text{ KJ} \cdot \text{g}^{-1}$),阔叶乔木13种($19.35 \text{ KJ} \cdot \text{g}^{-1}$),常绿乔木1种($21.52 \text{ KJ} \cdot \text{g}^{-1}$),落叶乔木14种($19.46 \text{ KJ} \cdot \text{g}^{-1}$)。在亚热带常绿阔叶林中,针叶

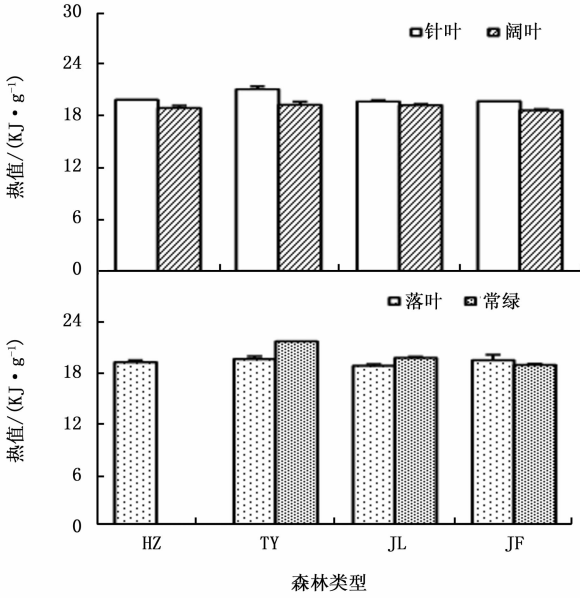


图3 不同生活型乔木叶片热值比较(均值±标准误)

乔木 1 种 (19.76 KJ · g⁻¹), 阔叶乔木 64 种 (19.34 KJ · g⁻¹), 常绿乔木 48 种 (19.59 KJ · g⁻¹), 落叶乔

木 17 种 (18.66 KJ · g⁻¹)。在热带季雨林中, 针叶乔木 1 种 (19.78 KJ · g⁻¹), 阔叶乔木 84 种 (18.72 KJ · g⁻¹), 常绿乔木 85 种 (18.73 KJ · g⁻¹), 落叶乔木 3 种 (19.32 KJ · g⁻¹)。

2.3 植物叶片热值的分布格局

植物叶片热值具有一定的空间分布格局, 在暖温带落叶阔叶林、亚热带常绿阔叶林和热带季雨林 3 个不同森林类型中, 随着纬度的升高表现出叶片热值随之升高的趋势; 而寒温带针叶林的叶片热值略低于暖温带落叶阔叶林、亚热带常绿阔叶林 (图 2), 这与植物本身的生态学属性及环境因素的影响紧密相关。由表 1 可看出: 热值与叶片碳含量极显著正相关 (0.89**), 干燥度指数与热值极显著负相关 (-0.24**)。太岳山的暖温带落叶阔叶林气候干燥度指数最小, 比其它 3 个森林类型气候干燥, 其叶片碳含量也较高, 所以, 暖温带落叶阔叶林的叶片热值最高。

表 1 乔木叶片热值与影响因素的相关分析

项目	热值	叶片属性			叶片元素			气候因素			土壤因素		
		叶面积	叶厚	比叶面积	氮含量	磷含量	碳含量	年均温	年降雨	干燥度	pH 值	土壤氮含量	土壤碳含量
热值	1												
叶面积	-0.17*	1											
叶厚	0.14	-0.10	1										
比叶面积	-0.29**	0.13	-0.52**	1									
叶片氮含量	0.01	0.14	-0.32**	0.54**	1								
叶片磷含量	0.03	0.01	-0.11	0.37**	0.58**	1							
叶片碳含量	0.89**	-0.21*	0.11	-0.38**	-0.15	-0.06	1						
年均温	-0.18*	0.17*	-0.05	-0.22**	-0.28**	-0.72**	-0.11	1					
年降雨	-0.22**	0.17*	-0.09	-0.20*	-0.28**	-0.64**	-0.14	0.98**	1				
干燥度	-0.24**	0.10	-0.14	-0.08	-0.21*	-0.04	-0.17*	0.42**	0.59**	1			
pH 值	-0.06	-0.07	-0.22**	0.24**	0.28**	0.36**	-0.08	-0.38**	-0.30**	-0.11	1		
土壤氮含量	0.20*	-0.15	0.13	0.15	0.18*	0.66**	0.13	-0.94**	-0.92**	-0.33**	0.03	1	
土壤碳含量	0.25**	-0.15	0.17*	0.13	0.19*	0.55**	0.17*	-0.89**	-0.94**	-0.55**	-0.06	0.96**	1

注: * 表示在 0.05 水平 (双侧) 上显著相关, ** 表示在 0.01 水平 (双侧) 上显著相关。

2.4 影响植物叶片热值的因素

由表 1 可看出: 叶片热值和叶面积显著负相关 (-0.17*), 与比叶面积极显著负相关 (-0.29**); 叶片热值与叶片碳含量呈极显著正相关 (0.89**), 与叶片氮和磷含量相关不显著; 气候因素与叶片热值均显著负相关, 年均气温与叶片热值显著负相关 (-0.18*), 年降水和干燥度与叶片热值均极显著负相关 (-0.22**、-0.24**); 土壤碳和氮含量与叶片热值显著正相关 (0.25* 和 0.20*), 土壤 pH 值与叶片热值相关不显著。

由于本研究的影响因子较多, 为进一步明确热

值与各影响因子之间的关系, 把叶片热值作为因变量, 各影响因子作为自变量, 利用多元逐步回归方法把显著性 $P > 0.05$ 的因子剔除, 最终得出叶片热值 (LCV) 与叶片碳含量 (LCC)、叶片氮含量 (LNC) 和叶厚 (LT) 的多元回归方程:

$$LCV = -9.717E - 15 + 0.904 LCC + 0.176 LNC + 0.098 LT (R^2 = 0.817, P < 0.01)$$

方差分析 ($F = 216.266, P < 0.0001$) 表明: 在显著性 0.01 水平下, 叶片热值与叶片碳含量、叶片氮含量和叶厚之间存在线性关系。

多元逐步回归分析结果发现: 叶片碳含量对叶片

热值的直接贡献率最大,它解释了叶片热值 90.4% 的变异,是叶片热值的主要影响因子(表 2);而叶厚的直接贡献率最小,约为 9.8%。叶氮含量通过叶碳含量对叶片热值有间接的负作用($r = -0.135$),所以,

叶氮含量与叶片热值的相关系数较小。叶厚通过叶碳含量对叶片热值的间接作用($r = 0.099$)近似于直接对叶片热值的作用($r = 0.098$),并通过叶氮含量对叶片热值有负作用。

表 2 叶片热值主要影响因素的回归系数

自变量	与热值的简单相关系数	回归系数(直接作用)	间接回归系数(间接作用)			
			叶片碳含量	叶片氮含量	叶厚	合计
叶片碳含量	0.890	0.904	—	-0.026	0.011	-0.015
叶片氮含量	0.010	0.176	-0.135	—	-0.032	-0.168
叶厚	0.140	0.098	0.099	-0.058	—	0.041

注:表中“+、-”号表示对因变量的正负作用。

3 结论与讨论

3.1 植物生活型对叶片热值的影响

生活型对乔木叶片热值具有显著影响,具体表现为,针叶乔木的叶片热值 > 阔叶乔木的、常绿乔木的叶片热值 > 落叶乔木的。有学者研究小兴安岭主要树种叶片热值时得出,针叶树种的叶片热值普遍高于阔叶树种的^[20]。田苗等^[21]在比较亚热带和暖温带森林叶片热值时也得出,针叶乔木的叶片热值高于阔叶乔木的、常绿乔木的叶片热值高于落叶乔木的结论。高凯等^[22]通过文献数据对植物热值进行大尺度整合分析,得出与本文基本一致的结论。针叶树种含有较高的脂肪类物质和木质素等高能物质,可能是其具有更高热值的重要原因^[23];另一方面,落叶树种为了减少热量的损耗在冬季叶片掉落,而常绿树种在冬季不落叶,所以后者必须有较高热值才能维持其生理活性^[24];然而,在热带季雨林中,常绿乔木的叶片热值小于落叶乔木的,可能是因为热带季雨林年均温为 20 ~ 25℃,故叶片不必存储较多的热值来抵抗寒冷,具体的控制机制还有待进一步的研究。

3.2 植物叶片热值空间分布特点

植物叶片热值随纬度变化的研究已很多,Golley 等^[2]在研究高山苔原植物、温带和热带植物时,得出世界范围内植被的热值由低纬度向高纬度升高的规律。Wielgolaski 等^[24]在研究极地冻原植物热值时也得出热值随纬度升高而升高的规律。国内相关研究较少,林鹏等^[25]从 19°54' ~ 27°51'N 共选择 8 个样点对秋茄的热值进行测定,得出热值在冬季随纬度升高而升高,其他季节则随纬度上升而下降的结论。官丽莉等^[26]在对中国植物热值整合分析中发现,植物的热值从南到北逐渐升高,与国外的多数研

究结果吻合。林华等^[27]对中国西南地区热带季雨林及山地常绿阔叶林热值及能量分配格局进行研究,进一步验证了 Golley 等^[2]的结论。

对这 4 个典型森林生态系统都有人进行过独立研究,李意德等^[28]测定了尖峰岭热带山地雨林的 67 种乔木,其树叶的平均热值为 20.47 KJ · g⁻¹,仁海等^[12]研究了鼎湖山 37 种主要植物的热值,其叶片热值为 17.24 ~ 24.53 KJ · g⁻¹,均比本文的平均值高一些。可能是因为本文将一些小乔木也算入到乔木中,小乔木处于群落的中上层,受到高大乔木的遮挡,光合作用强度减弱,叶片热值也比高大乔木的低,导致最终的均值偏低。取样地点和取样时间的不同也可能导致结果的不同。

叶片热值在暖温带落叶阔叶林、亚热带常绿阔叶林和热带季雨林表现出随着纬度的升高而上升的趋势,这与 Golley 等^[2]的结论吻合;而寒温带针叶林的叶片热值略低于暖温带落叶阔叶林、亚热带常绿阔叶林的热值,可能是因为呼中气候较湿润,且温度较低,影响了叶片碳元素的含量,因叶片碳含量与干燥度有显著的负相关关系(-0.17*)(表 1),故寒温带针叶林叶片碳含量较低。此外,叶片碳含量与叶片热值极显著正相关(表 1),故寒温带针叶林的叶片热值在气候因素的间接影响下和叶片碳含量的直接影响下略低于暖温带落叶阔叶林、亚热带常绿阔叶林。暖温带落叶阔叶林气候干燥度指数最小,比其它 3 个森林类型气候干燥,其叶片碳含量也较高,所以,暖温带落叶阔叶林的叶片热值最大。故本文得出在暖温带落叶阔叶林、亚热带常绿阔叶林和热带季雨林三个不同森林类型中表现出随着纬度的升高叶片热值随之升高的趋势,而寒温带针叶林叶片热值略低于暖温带落叶阔叶林、亚热带常绿阔叶林;本文仅通过比较 4 个森林生态系统的乔木叶片

热值的大小来探讨其纬度格局,还存在采样点过少所产生的不确定性;在今后的研究中,还需要增加更多研究点,更均匀地分布研究地点,来深入探讨叶片热值的空间分布规律。

3.3 影响植物叶片热值的主要因素

植物叶片受多种因素的共同影响,本研究表明,叶片碳含量是其变异的主要影响因素。碳元素是构成有机物骨架的主要元素,碳元素含量决定着有机物含量^[29],因此,由有机物构成的植物体中碳含量与热值存在相关关系。Telmo 等^[17]使用向后逐步回归法分析热值与化学元素时得出,热值与碳含量极显著正相关。国内学者对植物热值与碳含量的相关性也进行了大量研究,如江丽媛等^[30]对 5 个树龄栓皮栎研究时发现,植物热值与碳含量显著正相关;杨国平等^[16]在研究哀牢山常绿阔叶林优势树种热值时也得出类似的结论;叶片氮含量对叶片热值也有影响,其对叶片热值的直接影响和通过叶碳含量对热值的间接影响差不多大(表 2)。在以往研究中,叶片形态特征与热值关系的研究较少,本文研究得出叶面积与热值显著负相关(-0.17^*),与比叶面积极显著负相关(-0.29^{**})。在多元逐步回归方程中,叶厚度对叶片热值的间接作用近似于直接作用(表 2)。

植物叶片热值也受物候节律的影响,James 等^[31]研究发现,美洲山杨的叶片热值在春季最高。我国对热值的季节动态研究也很多^[32-35],但没有统一的规律性。本研究由北向南依次采样,采样时间在 7—8 月,季节一致,为植物的生长旺季,使其在大尺度上具有较强的可比性(在开展大尺度研究时,开展动态调查的难度非常大),故未探讨季节变化对叶片热值的影响。环境因素对植物生长的影响也可以在一定程度上通过热值表现出来,在冷胁迫条件下,白骨壤(*Avicennia marina* (Forssk.) Vierh.)和桐花树(*Aegiceras corniculatum* (Linn.) Blanco)叶片的热值逐渐降低^[36]。温度和降雨对水稻叶片的热值有一定的影响^[37]。本研究得出,年均气温与叶片热值显著负相关,叶片热值与年降水、干燥度均极显著负相关。在干旱生境下,为了减少水分蒸发,叶片一般较厚且面积较小,较多生物量和氮被植物分配于细胞壁上以增强叶片韧性,从而使单位面积的干物质含量有所增加^[38];因此,气候最干燥的暖温带落叶阔叶林叶片热值也相应的最高。目前,大尺度叶片热值研究及从叶片形态特征、养分元素、气候因素以

及土壤因素等多角度探讨叶片热值的主要影响因素的研究都还非常缺乏,亟须进一步加强。

参考文献:

- [1] 旷远文,温达志,周国逸,等. 大气污染胁迫下 9 种植物幼苗叶片热值、C/N 和灰分含量比较[J]. 热带亚热带植物学报,2005,13(2): 117-122.
- [2] Golley F B. Caloric value of wet tropical forest vegetation[J]. Ecology,1969,50(3): 517-519.
- [3] Bliss L. Caloric and lipid content in alpine tundra plants[J]. Ecology,1962,43(4): 753-757.
- [4] 卜文圣,臧润国,丁 易,等. 海南岛热带低地雨林群落水平植物功能性状与环境因子相关性随演替阶段的变化[J]. 生物多样性,2013,21(3): 278-287.
- [5] 杨冬梅,章佳佳,周 丹,等. 木本植物茎叶功能性状及其关系随环境变化的研究进展[J]. 生态学杂志,2012,31(3): 702-713.
- [6] 孟婷婷,倪 健,王国宏. 植物功能性状与环境 and 生态系统功能[J]. 植物生态学报,2007,31(1): 150-165.
- [7] Long F L. Application of calorimetric methods to ecological research[J]. Plant Physiology,1934,9(2): 323.
- [8] Singh T, Kostecky M M. Calorific value variations in components of 10 Canadian tree species[J]. Canadian Journal of Forest,1986,16(6): 1378-1381.
- [9] Gorham E, Sanger J. Caloric values of organic matter in woodland, swamp, and lake soils[J]. Ecology,1967,48(3): 492-494.
- [10] 谭 勇,李晓景,何东进,等. 中国红树林天然分布北缘区不同起源秋茄热值特征研究[J]. 北京林业大学学报,2013,35(6): 55-60.
- [11] 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.
- [12] 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): 53-59.
- [13] 徐永荣,张万均,冯宗伟,等. 天津滨海盐渍土上几种植物的热值和元素含量及其相关性[J]. 生态学报,2003,23(3): 450-455.
- [14] 林 鹏,邵 成,郑文教. 福建和溪亚热带雨林优势植物叶的热值研究[J]. 植物生态学报,1996,20(4): 303-309.
- [15] 李 宏,程 平,郑朝晖,等. 克拉玛依地区主要树种干部热值与碳含量特征分析[J]. 林业科学,2013,49(9): 29-37.
- [16] 杨国平,巩合德,郑 征,等. 哀牢山常绿阔叶林优势树种热值与养分特征[J]. 浙江林学院学报,2010,27(2): 251-258.
- [17] Telmo C, Lousada J, Moreira N. Proximate analysis, backwards stepwise regression between gross calorific value, ultimate and chemical analysis of wood[J]. Bioresource Technology,2010,101(11): 3808-3815.
- [18] 高扬子,何洪林,张 黎,等. 近 50 年中国地表净辐射的时空变化特征分析[J]. 地球信息科学学报,2013,15(1): 1-10.
- [19] 孟 猛,倪 健,张治国. 地理生态学的干燥度指数及其应用于评述[J]. 植物生态学报,2004,28(6): 853-861.
- [20] 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.
- [21] 田 苗,宋广艳,何念鹏,等. 亚热带常绿阔叶林和暖温带落叶阔叶林叶片热值比较研究[J]. 生态学报,2015,35(23):1-9.
- [22] 高 凯,宋 赋,朱铁霞. 基于大尺度条件探讨若干因素对植物热值的影响[J]. 草业科学,2012,29(3): 453-458.
- [23] 张 伟,蔡会德,农胜奇. 广西主要树种热值研究[J]. 中南林业调查规划,2011,30(1): 50-53.
- [24] Wielgolaski F E,Kjelvik S. Energy content and use of solar radiation of Fennoscandian tundra plants[M]. Wielgolaski F. E. Fennoscandian tundra ecosystems. Part 1: Plants and microorganisms, Berlin:Springer-Verlag,1975,201-207.
- [25] 林 鹏,林光辉. 几种红树植物的热值和灰分含量研究[J]. 植物生态学与地植物学学报,1991,15(2): 114-120.
- [26] 官丽莉,周小勇,罗 艳. 我国植物热值研究综述[J]. 生态学杂志,2005,24(4): 452-457.
- [27] 林 华,曹 敏,张建侯. 中国西南地区热带季节雨林及山地常绿阔叶林热值及能量分配格局(英文)[J]. 植物生态学报,2007,31(6): 1103-1110.
- [28] 李意德,吴仲民,曾庆波,等. 尖峰岭热带山地雨林主要种类能量背景值测定分析[J]. 植物生态学报,1996,20(1): 1-10.
- [29] 鲍雅静,李政海,韩兴国,等. 植物热值及其生物生态学属性[J]. 生态学杂志,2006,25(9): 1095-1103.
- [30] 江丽媛,彭祚登,何宝华,等. 5个年龄栓皮栎热值与灰分含量的分析[J]. 南京林业大学学报:自然科学版,2011,35(5): 40-44.
- [31] James T,Smith D. Seasonal changes in the caloric value of the leaves and twigs of *Populus tremuloides*[J]. Canadian Journal of Botany,1978,56(15): 1804-1805.
- [32] 高 凯,朱铁霞. 三种城市绿化树种针叶热值和灰分含量动态变化研究[J]. 北方园艺,2014(21): 83-86.
- [33] 牛 聪,杨伟波,唐龙祥. 4个主栽椰子品种叶片热值季节性变化研究[J]. 热带农业科学,2012,32(6): 11-14.
- [34] 黄建容. 湿地松针叶热值的季节动态研究[J]. 现代农业科技,2010(17): 204-205.
- [35] 于应文,胡自治,张德罡. 天祝金强河高寒地区金露梅的热值及其季节动态[J]. 草业科学,2000,17(2): 1-4.
- [36] 杨盛昌,李云波,林 鹏. 冷胁迫下红树植物白骨壤和桐花树叶热值的变化[J]. 台湾海峡,2003,22(1): 46-52.
- [37] 杨京平,Wekesa BONIFACE,姜 宁,等. 不同氮素水平下气象因子对两种水稻热值影响的分析[J]. 中国水稻科学,2001,15(3): 74-77.
- [38] 朱军涛,李向义,张希明,等. 昆仑山北坡前山带塔里木沙拐枣对不同海拔生境的生理生态响应[J]. 生态学报,2010,30(3): 602-609.

(责任编辑:徐玉秀)