

DOI: 10.5846/stxb201304010581

何介南, 康文星, 王东. 不同年龄阶段杉木人工林植物热值分析. 生态学报, 2015, 35(2): 449-459.

He J N, Kang W X, Wang D. The plant calorific values in the Chinese fir (*Cunninghamia lanceolata*) plantations at different ages. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(2): 449-459.

## 不同年龄阶段杉木人工林植物热值分析

何介南<sup>1</sup>, 康文星<sup>1,2,3,\*</sup>, 王 东<sup>1</sup>

1 中南林业科技大学, 长沙 410004

2 南方林业生态应用技术国家工程实验室, 长沙 410004

3 国家野外科学观测研究站, 会同 418307

**摘要:**应用会同国家野外科学观测研究站的连续定位测定资料,研究了杉木林不同林龄阶段乔木、灌木、草本和枯死物热值动态变化。结果表明:同一林龄阶段,杉木叶的热值>皮>枝>干>根,杉木各器官热值随林龄增加而增大;相同林龄的灌木叶热值>枝>根,草本地面上部分热值>根,灌木和草本的热值随林龄增大而减少;同一林龄的凋落叶的热值>凋落枝>碎屑>死根,枯死物热值随林龄增加而增大;整个杉木林系统,乔木层热值>灌木>草本>枯死物;灰分含量与会同杉木器官热值的大小与变化关联性不密切,与灌木、草本呈显著负相关( $P < 0.05$ );会同杉木热值随林龄变化与器官随林龄增大木质化程度提高,以及不同年份的降水量、太阳辐射、温度有关;林分不同层次植物热值的变化与某个层次的植物接受的光能资源量关系密切。

**关键词:**杉木人工林;热值;灰分;林龄;会同

## The plant calorific values in the Chinese fir (*Cunninghamia lanceolata*) plantations at different ages

HE Jienan<sup>1</sup>, KANG Wenxing<sup>1,2,3,\*</sup>, WANG Dong<sup>1</sup>

1 Central South University of Forestry and Technology, Changsha 410004, China

2 National Engineering Laboratory for Applied Technology of Forestry & Ecology in South China, Changsha 410004, China

3 National Field Station for Scientific Observation & Experiment in Huitong Hunan, Huitong 418307, China

**Abstract:** As a principal timber species, Chinese fir (*Cunninghamia lanceolata* (Lamb.) Hook) is widely planted throughout southern China and it covers approximately 9.21 million hectares, almost one third of total plantation in China and it contributes greatly to meeting the expanding timber demand. The heat value of the tree represents, to some degree, the capacity of the physiological function and productivity of the plant. In this study, the calorific values of plants in Chinese fir (*Cunninghamia lanceolata*) plantation at different ages were studied, based on located observations from a national key field scientific experimental station in Huitong, Hunan Province, China. The biomass, carbon concentration of different component of the tree, understory vegetation and dead litter layer were investigated at 11-year, 14-year, 18-year, 20-year old Chinese fir plantation. By using the six standard tree method, the allometric equations for biomass were established for the Chinese fir plantations at different stand ages, including the trunk, leaves, barks, twigs and roots. The dry matters were ground and the calorific value of different component of the plant and ecosystem were measured with automatic calorimeter (WZR-1TC II). We analyzed the data with one-way ANOVA, two-way ANOVA and Duncan by using SPSS 13.0 and the results showed that at the same age, the different organs of Chinese fir had different calorific values, they shared a similar

**基金项目:**科技部公益性研究项目(2007-4-15);国家林业公益性行业科研专项(200704015, 200804030);国家野外科学观测研究站项目(20080615)

**收稿日期:**2013-04-01; **网络出版日期:**2014-03-25

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: kwx1218@126.com

pattern and in a small range, between 17.3 to 20.6 J/g and ranked as needle > bark > twig > trunk > root. As to the different organs of Chinese fir, the calorific values increased with the age. At the same age, The calorific values of shrubs was in the order needle > twig > root. For The calorific values in aboveground organs of herb was higher than that of root. Over time, calorific values in shrubs and herb decreased with the age. At the same age, the calorific values of litter was in the order needle > litter twig > detritus > dead roots. The calorific values of the litter components increased with the age. As to Chinese fir plantation ecosystem, the calorific values of the components was in the order of tree layer > shrub layer > herb layer > litter layer. There was no robust relationship between ash content and calorific values in the different organs of *Cunninghamia lanceolata*, but that of the Shrubs and herb organs has a significantly negative correlation with its ash content ( $P < 0.05$ ). The Calorific value of organs of *Cunninghamia lanceolata* changed with the age, which might affect the organs of Chinese fir with stand age, the increased lignifications for instance. Furthermore, the environmental factors could also contribute to the calorific values over time, such as the rainfall, solar radiation, temperature, and so on, in that the calorific values of plants in Chinese fir plantations, the components beneath the system will be affected by the receiving resources for solar energy for different plants located in the different layer, which could also be true even in the different layers of leaves for Chinese fir itself.

**Key Words:** Chinese fir plantation; calorific values; ash; stand age; Huitong

植物热值高低能反映植物周围环境对植物生长的影响,热值大小能体现植物生理功能的强弱,是衡量植物生产力大小的指标<sup>[1]</sup>,也是生物生态系统建立的基础,直接决定系统的效益<sup>[2-3]</sup>。自 Long<sup>[4]</sup>于 20 世纪 30 年代比较系统地开展植物热值研究以来,不少学者对此展开了大量研究<sup>[5]</sup>。

对植物热值的研究我国起步较晚,20 世纪 80 年代初,杨福囤<sup>[6]</sup>介绍了植物热值及其测定方法,之后相继开展了针叶林<sup>[7-9]</sup>、热带及亚热带天然林<sup>[10-11]</sup>、常绿阔叶林<sup>[12-13]</sup>、红树林<sup>[14]</sup>、草原地带植物<sup>[15]</sup>、水生植物<sup>[16]</sup>、灌木<sup>[17]</sup>等的热值研究。上述研究都对植物之间热值差异进行了深入探讨,但对不同器官热值差异产生的机理以及不同器官热值随林龄变化的内在根源缺乏深入讨论。

杉木(*Cunninghamia lanceolata*)是我国南方亚热带特有优良速生乡土用材树种。已有学者采用“空间换时间”的方法研究过不同年龄阶段杉木各器官的热值<sup>[8]</sup>。本研究在定位连续采集不同年龄阶段植物样品基础上,通过热值测定,分析杉木器官热值的变化动态,为森林生态系统能流研究提供基础资料。

## 1 研究地概况

会同县位于湖南省西南部,地理位置 109°45′—110°07′E, 22°41′—22°53′N,是我国杉木中心产区。会同县属于中亚热带季风湿润气候区,降水较充沛,光能较充足,无霜期长,严寒较短,年均气温为 16.8 °C,年降雨量 1 100—1 400 mm,年均相对湿度 80%以上。

本研究在湖南会同杉木林生态系统国家野外科学观测研究站进行。研究的林分位于第 3 小集水试验区。土壤为中有机质厚层黄壤,土层厚度 80 cm 以上,林地土层平均养分含量有机质 3.27%—4.859%, N 0.136%—0.203%, P 0.048%—0.065%, K 1.365%—2.127%<sup>[18]</sup>。该集水试验区原为阔叶次生残林,1966 年全垦挖穴营造杉木人工林。1987 年冬,集水区杉木全部皆伐。1988 年春,在采伐迹地,按照国家林业局提出的丰产林造林高标准,随即营造第 2 代杉木林(造林密度 2400 株/hm<sup>2</sup>。杉木栽上后前 3a 春秋两季抚育两次,以后没有进行抚育和间伐管理,任其自然生长)。到 2007 年底,第 2 代杉木林林龄为 20a,林分密度 2310 株/hm<sup>2</sup>,林分平均高度 13.8 m,平均胸径 14.1 cm,叶面积指数 7.63,郁闭度 0.9 左右<sup>[18]</sup>。

## 2 研究方法

### 2.1 测定样品的取样

第 2 代杉木人工林营造后,分别在第 7、11、14、18 年生和 20 年生时进行了林分生物量测定。每次测定生

物量的方法,生物量测定时的林分结构、特征及生长状况见以往研究的有关文章<sup>[19-21]</sup>。为了保证样品具有代表性,在伐倒标准木上分树干基部、中下、中、中上和上部 5 个区段,每一区段采集相同重量的树干,再把采集的树干混合一起组合成树干样品;树皮取样采用树干相同的方法。杉木枝和叶分成当年生枝、叶,1 年生枝、叶,2 年生枝、叶,多年生枝、叶等各 4 个样品分别取样;杉木根分成根头、大根(1 cm ≤ 根径)、粗根(0.2 cm ≤ 根径 < 1 cm)、细根(根径 < 0.2 cm)分别取样。

灌木、草本和枯死物取样。在样地内按 x 型设 5 个 2 m × 2 m 的小样方,先调查小样方内灌木和草本的高度、种类等,再把小样方内所有植物(连根系)全部挖出,分别测定每种灌木和草本生物量鲜重<sup>[19-21]</sup>。然后按各种灌木生物量中在灌木生物量总量中所占权重,分别按重量比例抽取各种灌木组合成灌木样品,草本取样方法与灌木相同。枯死物分成叶凋落物、枝凋落物、碎屑和枯死根分别取样(林分 14 年生前凋落果很少,所以没有收保集凋落果样品)。

## 2.2 热值测定

将待测样品烘干至恒重,然后把干质量样品粉碎成粉末并过筛,称取 1.0 g 过筛粉末压成片状,采用 WZR-1TC II 型电脑自动热量计(长沙奔特仪器有限公司)测定样品的热值含量(每样品重复测定 5 次,取平均值)。这样测得的样品热值是样品干质量热值。在对植物进行准确的能量值比较时,应采用去灰分热值以消除灰分含量对热值造成的影响<sup>[22-26]</sup>。采用干灰化法测定样品灰分质量分数(每样品重复测定 5 次,取平均值)。然后根据样品干质量热值和样品灰分含量求出样品去灰分热值。本文分析的热值数据都是去灰分热值。

## 2.3 数据处理

所有数据经 Excel 软件处理后,用 SPSS 13.0 软件进行统计分析,采用单因素方差分析(one-way ANOVA)、双因素方差分析(two-way ANOVA)和 Duncan 检验比较参数间差异。

## 3 结果与分析

### 3.1 杉木各器官热值

#### 3.1.1 相同林龄级各器官热值

将某一林龄(如林分 7 年生)测定的当年生叶、1 年生叶、2 年生叶、多年生叶的热值,按它们在叶生物量中所占权重统计计算成某一林龄时的生长在杉木上叶的平均热值,同样,当年生枝、1 年生枝、2 年生枝、多年生枝和根头、大根、粗根、细根的热值,分别按它们在枝、根生物量中所占权重统计计算成某一林龄枝、根的平均热值(表 1)。从表 1 中看出,同一林龄级内,杉木器官热值大小顺序是:树叶 > 树皮 > 树枝 > 树干 > 树根。

表 1 不同年龄阶段杉木器官的热值(J/g)

Table 1 Calorie value in organs of Chinese fir plantation in different ages

树龄 Stand age/a	树干 Stem Wood	树皮 Stem bark	枝 Twig	叶 Needle	根 Root
7	18 056	18 517	18 151	18 643	17 329
11	18 320	18 905	18 480	19 074	17 530
14	18 539	19 166	18 633	19 533	17 675
18	18 824	19 358	19 123	20 172	17 902
20	19 018	19 629	19 299	20 602	18 042

同一林龄级内树干与树皮、树干与树枝、树皮与树枝之间热值差异不显著( $P > 0.05$ );树干、树皮、树枝和树叶分别与树根热值差异极显著( $P < 0.01$ );树干与树叶热值差异显著( $P < 0.05$ )。14、18 和 20 年生杉木的树枝,以及 18 和 20 年生杉木的树皮分别与相同林龄杉木的树叶之间热值差异显著,其余差异不显著( $P > 0.05$ )(表 2)。

尽管同一林龄级杉木的当年生、1 年生、2 年生和多年生的枝或叶相互之间的热值差异不显著( $P > 0.05$ ),

但其热值仍有差别。一般表现为同一林龄级中多年生枝或叶的热值>2年生>1年生>当年生(表3,表4)。同一林龄的大根与根头之间热值差异不显著( $P>0.05$ ),但粗根与根头、细根与根头、粗根与大根,细根与大根之间热值差异极显著( $P<0.01$ )。除7年和14年生杉木粗根与同林龄时杉木的细根之间值热差异不显著外( $P>0.05$ ),其余11、18、20年生杉木粗根均与同林龄时杉木的细根之间值热差异显著( $P<0.05$ )(表5)。从表1还看出,同一林龄级根的热值随根径的减少而降低。

表2 同一林龄不同器官的热值差异分析

Table 2 The poor calorific values of the different organs at the same age

项目 Term	7年生					11年生					14年生				
	干 Wood	皮 Bark	枝 Twig	叶 Needle	根 Root	干	皮	枝	叶	根	干	皮	枝	叶	根
干 Wood		0	0	*	**		0	0	*	**	0	0	*	**	
皮 Bark	0		0	0	**	0		0	0	**	0		0	0	**
枝 Twig	0	0		0	**	0	0		0	**	0	0		*	**
叶 Leaf	*	0	0		**	*	0	0		**	*	0	*		**
根 Root	*	**	**	**		**	**	**	**		**	**	**	**	

  

项目 Term	18年生					20年生				
	干	皮	枝	叶	根	干	皮	枝	叶	根
干 Wood		0	0	*	**		0	0	*	**
皮 Bark	0		0	*	**	0		0	*	**
枝 Twig	0	0		*	**	0	0		*	**
叶 Leaf	*	*	*		**	*	*	*		**
根 Root	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**

0表示不显著( $P>0.05$ ), \*表示显著( $P<0.05$ ), \*\*表示极显著( $P<0.01$ )

表3 不同林龄阶段杉树叶组织的热值

Table 3 Calorie value of needle of Chinese fir plantation in different ages

林龄 Stand age/a	当年叶 Current needle			1年生叶 1-year needle			2年生叶 2-year needle			多年生叶 Perennial needle		
	干质量 热值 Gross caloric value/ (J/g)	灰分 含量 Ash- content/ %	去灰分 热值 Ash-free caloric value/ (J/g)									
7	17 560±860 (4.90)	3.83	18 259a	17 894±762 (4.26)	3.76	18 593a	18 025±796 (4.42)	3.64	18 706a	18 158±819 (4.51)	3.58	18 832a
11	18 264±914 (5.00)	3.44	18 915b	18 497±793 (4.28)	3.29	19 126b	19 194±823 (4.28)	3.16	19 407b	18 881±796 (4.22)	3.09	19 483b
14	18 957±895 (4.72)	3.68	19 683c	19 199±849 (4.42)	3.53	19 902c	20 320±855 (4.21)	3.46	20 147c	20 160±853 (4.23)	3.35	20 859c
18	20 070±923 (4.60)	3.94	20 893d	20 477±817 (3.99)	3.79	21 284d	21 103±819 (3.88)	3.66	21 859d	21 369±827 (3.87)	3.52	22 149d
20	21 023±936 (4.45)	4.32	21 973e	21 560±853 (3.96)	4.16	22 496e	22 060±842 (3.72)	3.82	22 972e	22 422±895 (2.99)	3.65	23 271e

平均值±标准差, 括号内数字为变异系数(%);同一行相同小写字母表示差异不显著( $P>0.05$ ),不同小写字母表示差异显著( $P<0.05$ )

杉木各器官热值含量与器官的有机物质组成和功能密切相关。树枝和干是植物体的支持体,这些器官组成以结构形拉力较强粗纤维等低能有机化合物为主。树叶是树木光合作用的主要器官,含有较多非结构形的粗脂肪和蛋白质等高能有机化合物<sup>[27-28]</sup>。而且,树叶光合作用生产的有机物在输送到树枝、树干过程中,高能化合物的积累浓度按树叶、树皮、树枝、树干逐渐降低,其器官热值也按此规律相应逐渐减小<sup>[29]</sup>。同一林龄级中根的热值随根径的减少而降低,因为就木质化程度而言,根头>大根>粗根>细根,木质素也属高热值化合物<sup>[23]</sup>,因此,其热值随根径的减少而降低。

表 4 不同林龄阶段杉木枝组织的热值

Table 4 Calorie value of twig of Chinese fir plantation in different ages/

林龄 Stand age/a	当年叶 Current needle			1 年生叶 1-year needle			2 年生叶 2-year needle			多年生叶 Perennial needle		
	干质量 热值/ (J/g)	灰分 含量/%	去灰分 热值	干质量 热值/ (J/g)	灰分 含量/%	去灰分 热值	干质量 热值/ (J/g)	灰分 含量/%	去灰分 热值	干质量 热值/ (J/g)	灰分 含量/%	去灰分 热值
7	17 507±793 (4.53)	2.36	17 931a	17 716±807 (4.50)	2.25	18 124a	17 829±811 (4.55)	2.14	18 219a	18 062±784 (4.34)	2.03	18 437a
11	17 934±752 (4.19)	2.67	18 426b	18 247±831 (4.55)	2.54	18 723b	18 438±785 (4.26)	2.48	18 907b	18 713±759 (4.06)	2.41	19 175b
14	18 253±814 (4.46)	2.41	18 704c	18 431±860 (4.67)	2.35	18 875c	18 625±796 (4.27)	2.26	19 056c	19 037±811 (4.26)	2.21	19 468c
18	18 408±829 (4.50)	2.56	18 892d	18 571±829 (4.46)	2.49	19 045d	18 662±854 (4.58)	2.43	19 127d	19 215±853 (4.44)	2.39	19 685d
20	18 684±855 (4.58)	2.62	19 187e	18 777±838 (4.46)	2.55	19 269e	18 916±826 (4.37)	2.47	19 395e	19 369±807 (4.17)	2.41	19 848e

平均值±标准差, 括号内数字为变异系数(%); 同一行相同小写字母表示差异不显著( $P>0.05$ ), 不同小写字母表示差异显著( $P<0.05$ )

表 5 同一林龄不同根径的热值差异分析

Table 5 The poor calorific values of roots of the different root diameter at the same age

项目 Term	7 年生 7-year-old				11 年生 11-year-old				14 年生 14-year-old			
	根头 Root tip	大根 Large root	粗根 Coarse root	细根 Small root	根头	大根	粗根	细根	根头	大根	粗根	细根
根头 Root tip		0	**	**		0	**	**		0	**	**
大根 Large root	0		**	**	0		**	**	0		**	**
粗根 Coarse root	**	**		0	**	**		*	**	**		0
细根 Small root	**	**	0		**	**	*		**	**	0	

  

项目 Term	18 年生 18-year-old				20 年生 20-year-old			
	根头	大根	粗根	细根	根头	大根	粗根	细根
根头 Root tip		0	**	**	0	**	**	
大根 Large root	0		**	**	0		**	**
粗根 Coarse root	**	**		*	**	**		*
细根 Small root	**	**	*	**	**	*		

0 表示不显著( $P>0.05$ ), \* 表示显著( $P<0.05$ ), \*\* 表示极显著( $P<0.01$ )

### 3.1.2 不同林龄杉木器官的热值

杉木器官热值随林龄增加而增大(表 3, 表 4, 表 6, 表 7)。从表 8 看出, 同一器官不同林龄时的热值存在差异。7 年生杉木树叶、树枝、树皮、树干分别与 18 和 20 年生杉木树叶、树枝、树皮、树干, 11 年生杉木树叶分别与 18 年生和 20 年生杉木树叶, 14 年生杉木树叶、树枝分别与 20 年生杉木树叶、树枝之间热值差异极显著( $P<0.01$ )。11 年生与 20 年生杉木树干, 14 年生与 18 年生杉木树叶, 7 年生与 20 年生杉木树根之间热值差异显著( $P<0.05$ )。不同林龄的当年生、1 年生、2 年生和多年生的枝或叶之间的热值也有差别。如 7 年生杉木当年生、1 年生、2 年生和多年生枝分别与 18 和 20 年生杉木当年生、1 年生、2 年生和多年生枝之间热值差异极显著( $P<0.01$ ) (表 9)。7 年生杉木的 2 年生枝、多年生枝与 14 年生杉木 2 年生枝、多年生枝之间热值差异显著( $P<0.05$ ) (表 9)。又如 7 年生杉木根头、大根分别与 20 年生杉木根头、大根, 7 年生杉木粗根、细根分别与 18 和 20 年生杉木粗根、细根之间热值差异极显著( $P<0.01$ )。11 年生杉木根头、大根、粗根、细根各自与 20 年生杉木根头、大根、粗根、细根之间热值差异显著( $P<0.05$ ) (表 10)。不同林龄的当年生、1 年生、2 年生和多年生叶之间热值差异见表 11。

表 6 不同年龄阶段杉木根组织的热值

Table 6 Calorie value of needle of Chinese fir plantation in different ages

林龄/a Stand age	根头 Root tip			大根 1 cm ≤ root diameter			粗根 0.2 cm ≤ root diameter < 1 cm			细根 0.2 cm ≥ root diameter		
	干质量 热值/ (J/g)	灰分 含量/%	去灰分 热值	干质量 热值/ (J/g)	灰分 含量/%	去灰分 热值	干质量 热值/ (J/g)	灰分 含量/%	去灰分 热值	干质量 热值/ (J/g)	灰分 含量/%	去灰分 热值
7	17 584±751 (4.27)	2.08	17 958	17 030±729 (4.28)	2.31	17 433	16 036±714 (4.45)	2.59	16 462	15 618±684 (4.38)	2.72	16 055
11	17 640±723 (4.10)	2.21	18 039	17 331±708 (4.09)	2.36	17 729	16 619±709 (4.27)	2.57	17 057	15 927±706 (4.43)	2.63	16 351
14	17 812±785 (4.41)	1.93	18 163	17 465±759 (4.34)	2.14	17 847	16 769±683 (4.07)	2.25	17 155	16 234±711 (4.38)	2.39	16 632
18	18 119±708 (3.91)	2.20	18 527	17 613±693 (3.93)	2.33	18 033	16 795±735 (4.37)	2.46	17 219	16 350±677 (4.14)	2.54	16 776
20	18 261±755 (4.13)	2.31	18 693	17 873±705 (3.94)	2.40	18 312	17 224±721 (4.19)	2.44	17 655	16 764±721 (4.08)	2.58	17 028

平均值±标准差, 括号内数字为变异系数(%)

表 7 不同年龄阶段杉木树干和树皮组织的热值

Table 7 Calorie value of Stem wood and bark of Chinese fir plantation in different ages

林龄/a Stand age	树干 Stem wood			树皮 Stem bark		
	干质量 热值/(J/g)	灰分含量/%	去灰分 热值/(J/g)	干质量 热值/(J/g)	灰分含量/%	去灰分 热值/(J/g)
7	17 824±608 (3.41)	1.28	18 056AMCKG	18 113±701 (3.87)	2.18	18 517CMNKG
11	18 093±703 (3.89)	1.24	18 320AMCOB	18 470±769 (4.16)	2.30	18 905CMNHT
14	18 308±711 (3.88)	1.25	18 539AMCOF	18 715±747 (3.99)	2.52	19 166CMNHT
18	18 583±684 (3.68)	1.28	18 824BMCOF	18 860±792 (4.20)	2.57	19 358EMNHT
20	18 774±699 (3.72)	1.28	19 018BHCOF	19 009±785 (4.13)	2.65	19 529DMNHT

平均值±标准差, 括号内数字为变异系数(%) ; 同一列第 1 个大写字母表示 7 年生与其它林龄比较, 同一大写字母表示差异不显著 ( $P > 0.05$ ), 不同大写字母表示差异显著 ( $P < 0.05$ ), 同一列第 2 个大写字母表示 11 年生与其它林龄比较, 同一大写字母表示差异不显著 ( $P > 0.05$ ), 不同大写字母表示差异显著 ( $P < 0.05$ ), 依此类推

表 8 不同林龄的同一器官热值差异分析

Table 8 The poor calorific values of the same organ at the different age

林龄/a Stand age	树干 Stem wood					树皮 Stem bark					树枝 Twig				
	7	11	14	18	20	7	11	14	18	20	7	11	14	18	20
7		0	0	**	**		0	0	**	**		0	0	**	**
11	0		0	0	*	0		0	0	0	0		0	0	**
14	0	0		0	0	0	0		0	0	0	0		0	*
18	**	0	0		0	**	0	0		0	**	0	0		0
20	**	*	0	0		**	0	0	0		**	**	*	0	

  

林龄/a Stand age	树叶 Needle					树根 Root				
	7	11	14	18	20	7	11	14	18	20
7		0	0	**	**		0	0	0	*
11	0		0	**	**	0		0	0	0
14	0	0		*	**	0	0		0	0
18	**	**	*		0	0	0	0		0
20	**	**	**		0	*	0	0	0	

0 表示不显著 ( $P > 0.05$ ), \* 表示显著 ( $P < 0.05$ ), \*\* 表示极显著 ( $P < 0.01$ )

表 9 不同林龄的不同生长发育的枝热值差异分析

Table 9 the poor calorific values of twig of the different phase of growth and development at the different age

林龄 Stand age/a	当年枝 Current twig					1 年枝 1-year twig				
	7	11	14	18	20	7	11	14	18	20
7		0	0	**	**		0	0	**	**
11	0		0	0	0	0		0	0	0
14	0	0		0	0	0	0		0	0
18	**	0	0		0	**	0	0		0
20	**	0	0	0		**	0	0	0	

  

林龄 Stand age/a	2 年枝 2-year twig					多年生枝 Perennial twig				
	7	11	14	18	20	7	11	14	18	20
7		0	*	**	**		0	*	**	**
11	0		0	0	0	0		0	0	0
14	*	0		0	0	*	0		0	0
18	**	0	0		0	**	0	0		0
20	**	0	0	0		**	0	0	0	

0 表示不显著( $P>0.05$ ), \* 表示显著( $P<0.05$ ), \*\* 表示极显著( $P<0.01$ )

表 10 不同林龄的不同根径的根热值差异分析

Table 10 the poor calorific values of roots of the different root diameter at the different age

林龄 Stand age/a	根头 Root tip					大根 $1\text{ cm} \leq \text{root diameter}$				
	7	11	14	18	20	7	11	14	18	20
7		0	0	0	**		0	0	0	**
11	0		0	0	*	0		0	0	*
14	0	0		0	0	0	0		0	0
18	0	0	0		0	0	0	0		0
20	**	*	0	0		**	*	0	0	

  

林龄 Stand age/a	粗根 $0.2\text{ cm} \leq \text{根径} < 1\text{ cm}$					细根 $0.2\text{ cm} \geq \text{根径}$				
	7	11	14	18	20	7	11	14	18	20
7		0	*	**	**		0	0	**	**
11	0		0	0	*	0		0	0	*
14	*	0		0	0	0	0		0	0
18	**	0	0		0	**	0	0		0
20	**	*	0	0		**	*	0	0	

0 表示不显著( $P>0.05$ ), \* 表示显著( $P<0.05$ ), \*\* 表示极显著( $P<0.01$ )

表 11 不同林龄的不同生长发育的叶热值差异分析

Table 11 the poor calorific values of needle of the different phase of growth and development at the different age

林龄 Stand age/a	当年叶 Current needle					1 年生叶 1-year needle				
	7	11	14	18	20	7	11	14	18	20
7		0	0	**	**		0	*	**	**
11	0		0	*	**	0		0	*	**
14	0	0		*	**	*	0		**	**
18	**	*	*		*	**	*	**		**
20	**	**	**	*		**	**	**	**	

  

林龄 Stand age/a	2 年生叶 2-year needle					多年生叶 Perennial needle				
	7	11	14	18	20	7	11	14	18	20
7		0	*	**	**		0	*	**	**
11	0		0	**	**	0		0	*	**
14	*	0		*	**	*	0		0	*
18	**	**	*		**	**	*	0		*
20	**	**	**	**		**	**	*	*	

0 表示不显著( $P>0.05$ ), \* 表示显著( $P<0.05$ ), \*\* 表示极显著( $P<0.01$ )

引起植物组织热值随林龄变化的原因是多种的。不同林龄同一器官的灰分含量多少有可能导致其热值变化<sup>[22-26]</sup>。但从本研究的结果看出,不同林龄杉木同一器官的灰分含量虽有不同,但无明显变化趋势,各器官的灰分含量与林龄的相关性不明显,即灰分含量的变化不是导致会同杉木器官热值随树木年龄增大而增大的主要原因。

本研究是定位连续测定的结果,不存在立地条件的差异对不同林龄杉木器官热值的影响。因此,杉木器官热值随着树木年龄变化,有可能是该林分在其生长过程中,不同年份的降水量、紫外线辐射、温度可能不同。而降水量的多少、温度的高低,紫外线辐射的强弱,也能引起植物热值的变化<sup>[30]</sup>。另外,树木随树龄增大,器官组织内有机物成分和含量也可能发生了一定的变化,至少随林龄增大,植物器官组织木质化程度提高了。木质素也属高热值化合物<sup>[23]</sup>,这可能是杉木器官热值随林龄增大而增大的一个重要原因。

### 3.2 灌木的热值

从表 12 看出,同一林龄林下灌木各组分的热值存在差异,都是灌木叶热值>灌木枝>灌木根。同一林龄林下灌木枝与叶之间的热值差异不显著( $P>0.05$ ),灌木枝和叶与灌木根之间差异极显著( $P<0.01$ )。

与杉木器官热值随林分年龄变化规律不同,灌木各组分热值随林分年龄增大逐渐递减。从表 13 看出,不同林龄的林下灌木同一组分热值不同,但是除了 20 年生与 7 年生林分的灌木叶之间、枝之间,根之间的热值差异极显著( $P<0.01$ ),20 年与 11 年生时林分的灌木叶之间、枝之间,以及 18 年与 7 年生时林分的灌木叶之间热值差异显著( $P<0.05$ )外,其余差异不显著( $P>0.05$ )。

表 12 不同年龄阶段杉木林下灌木的热值

Table 12 Calorie value of Shrubs of Chinese Fir Plantation in different ages

林龄/a Stand age	叶 needle			枝 twig			根 Root		
	干质量 热值/(J/g)	灰分 含量/%	去灰分 热值/ (J/g)	干质量 热值/(J/g)	灰分 含量/%	去灰分 热值/ (J/g)	干质量 热值/(J/g)	灰分 含量/%	去灰分 热值/ (J/g)
7	17 077±598 (3.50)	5.30	18 128a	17 457±611 (3.50)	3.24	18 098a	15 861±479 (3.02)	4.16	16 619 * * 12
11	17 138±613 (3.58)	5.78	18 094c	17 199±549 (3.19)	3.51	17 825c	15 643±432 (2.76)	4.39	16 327 * * 12
14	16 744±556 (3.32)	6.11	17 834e	16 833±587 (3.49)	4.32	17 593e	15 503±457 (2.95)	4.84	16 189 * * 12
18	16 916±573 (3.39)	6.73	17 572k	16 415±519 (3.16)	4.59	17 205k	15 070±463 (3.07)	5.10	15 880 * * 12
20	16 025±547 (3.41)	6.88	17 209m	16 182±586 (3.62)	4.72	16 984m	14 886±440 (2.96)	5.16	15 693 * * 12

平均值±标准差,括号内数字为变异系数(%);同一行相同小写字母表示差异不显著( $P>0.05$ ),根去灰分热值中 \* \* 12 表示分别与同林龄的枝及同龄的叶差异极显著( $P<0.01$ )

不同林龄阶段林下灌木各组分热值随着林龄的增长而下降。究其原因,杉木林幼林阶段,幼树冠幅小,林冠稀疏,杉木空间光线较充足。林下灌木大都是阳性植物,随着杉木的生长,林冠层逐渐郁闭,林下空间光环境条件受到限制,林下灌木种类组成发生变化由原来阳性植物逐渐被阴性植物替代(从 1998 年至 2007 年,阳性植物由原来的 18 种减少到 6 种,阴性由原来的 4 种增加到 9 种<sup>[18]</sup>)。植物种类不同,植物组织中含的有机物质成分和能质不一样,使得植物组织的热值也不一样,而且阳性灌木比阴性灌木热值高<sup>[17]</sup>。此外,灌木各组分灰分含量随林龄的增大而增加,将灌木各组分去灰分热值和灰分含量进行 Pearson 相关分析,结果表明,灰分含量与去灰分热值呈显著负相关。随林龄的增大,灰分含量也影响着灌木热值的变化。

### 3.3 草本的热值

从表 14 中看出,同一林龄,草本地地上部分的热值大于草本根,且差异显著( $P<0.05$ )。表 13 给出了草本地地上部分、草本根热值在不同林龄时的差异分析,从中看出,除 20 年生林分分别与 7 年、11 年生林分的草本地地上部分之间及草本根之间的热值差异极显著( $P<0.01$ );18 年生林分分别与 7 年、11 年生林分草本地地上部

分之间,草本根之间,14年生与20年生林分的草本根之间的热值差异显著( $P < 0.05$ )外,其余差异不显著( $P > 0.05$ )。

表 13 同一林龄林下植物的热值差异分析

Table 13 The poor calorific values of the different organs at the same age

林龄/a Stand age	灌木 Shrubs														
	叶 Needle					枝 Twig					根 Root				
	7	11	14	18	20	7	11	14	18	20	7	11	14	18	20
7		0	0	*	**		0	0	0	**		0	0	0	**
11	0		0	0	*	0		0	0	*	0		0	0	0
14	0	0		0	0	0	0		0	0	0	0		0	0
18	*	0	0		0	0	0	0		0	0	0	0		0
20	**	*	0	0		**	*	0	0		**	0	0	0	

  

林龄/a Stand age	草本 Herb									
	枝叶 Twig and needle					根 Root				
	7	11	14	18	20	7	11	14	18	20
7		0	0	*	**		0	0	*	**
11	0		0	*	**	0		0	*	**
14	0	0		0	0	0	0		0	*
18	*	*	0		0	*	*	0		0
20	**	**	0	0		**	**	*	0	

0 表示不显著, \* 表示显著( $P < 0.05$ ), \*\* 表示极显著( $P < 0.01$ )

表 14 不同年龄阶段杉木林下草本的热值

Table 14 Calorie value of herb Chinese Fir Plantation in different ages

林龄/a Stand age	地上生长部分 Undergrowth				根 Root		
	干质量		灰分含量/%	去灰分		灰分含量/%	去灰分
	热值/(J/g)	热值/(J/g)		热值/(J/g)	热值/(J/g)		
7	15 893±489(3.08)	7.58	17169a	15 766±493(3.13)	4.76	16 554b	
11	15 685±436(2.79)	7.63	16981a	15 573±481(3.09)	4.99	16 391b	
14	15 380±411(2.67)	8.19	16752a	15 271±457(2.99)	5.31	16 127b	
18	15 174±463(3.05)	8.28	16544a	14 964±465(3.11)	5.86	15 896b	
20	14 892±432(2.90)	8.55	16285a	14 703±429(2.92)	5.94	15 631b	

“平均值±标准差,括号内数字为变异系数(%) ;同一行相同小写字母表示差异显著( $P < 0.05$ ) ;不同小写字母表示差异显著( $P < 0.05$ )

草本的热值随林龄变化的趋势与灌木一样,林分林龄越大,草本热值越小。因为它们都是林下植被,生长的环境条件基本一样,导致草本的热值随林龄变化的因素也与灌木趋同。

### 3.4 枯死物的热值

同一林龄级中,枯死物不同组分的热值存在差异,具体表现为凋落叶的热值>凋落枝>碎屑凋落物>死根。因为产生它们的无论是乔木、灌木或草本的热值都是叶>枝>根缘故。同一林龄级杉木林凋落叶与凋落枝及碎屑相互之间的热值差异不显著( $P > 0.05$ ) ;枯死根与凋落叶、凋落枝、碎屑之间的热值差异显著( $P < 0.05$ ) (表 15)。

同一种枯死物组分的热值随林龄增大而增加。因为林内枯死物主要是植物枝、叶、皮的凋落或根系的死亡产生的。在产生的枯死物中,相对于乔木层来说,灌木和草本的枯死物要少些。前已分析杉木各器官组织热值随林龄增加而增大,因此,枯死物热值也随呈现这种变化规律。

## 4 结论与讨论

会同 18—20 年生杉木各组分热值测定的结果,与江西大岗山 19 年生杉木不同器官热值测定结果相近<sup>[8]</sup>,与广东鹤山近熟杉木相比,枝、叶、干热值略高,根、皮热值略低,平均热值稍高于广东鹤山<sup>[26]</sup>。会同杉

木林下灌木热值低于东北林业大学哈尔滨实验林场灌木热值<sup>[17]</sup>。会同与江西大岗山同处于中亚热带,广东鹤山处于南亚热带,哈尔滨处于温带。可见,纬度的高低能影响植物热值的大小,植物热值随纬度的增加而升高<sup>[30]</sup>。

表 15 不同年龄阶段杉木林凋落物和枯死根的热值

Table 15 Calorie value of litter of Chinese Fir Plantation in different ages

林龄 Stand age/a	当年叶 Current needle			1年生叶 1-year needle			2年生叶 2-year needle			多年生叶 Perennial needle		
	干质量 热值/(J/g)	灰分 含量/%	去灰分 热值/ (J/g)	干质量 热值/(J/g)	灰分 含量/%	去灰分 热值/ (J/g)	干质量 热值/(J/g)	灰分 含量/%	去灰分 热值/ (J/g)	干质量 热值/(J/g)	灰分 含量/%	去灰分 热值/ (J/g)
7	14 587±469 (3.22)	4.18	15 222a	14 462±457 (3.16)	3.68	15015a	13789±491 (3.56)	6.09	14693a	13 878±446 (3.21)	2.59	14 247 * 123
11	14 830±487 (3.28)	4.27	15 492c	14 572±490 (3.36)	3.73	15137c	13924±507 (3.64)	6.12	14832c	13 991±459 (3.28)	3.12	14 442 * 123
14	14 983±495 (3.30)	4.38	15 702d	14 624±494 (3.38)	4.01	15246d	14038±529 (3.77)	6.58	15027d	14 070±497 (3.53)	3.55	14 588 * 123
18	15 131±512 (3.38)	4.53	15 816m	14 741±501 (3.40)	4.19	15386m	14500±545 (3.76)	6.41	15493m	14 313±483 (3.37)	3.61	14 849 * 123
20	15 179±542 (3.57)	4.69	15 893p	14 990±523 (3.49)	4.25	15655p	14811±576 (3.89)	6.90	15574P	14 438±474 (3.28)	3.50	14 962 * 123

\*平均±标准差,括号内数字为变异系数(%);同一行相同小写字母表示差异不显著,枯死根 \* 123 分别与该表同行中凋落叶、枝、碎屑差异显著( $P < 0.05$ )

本研究中枯死物各组分热值均低于相应的活的(无论是乔木、灌木和草本)各器官有机体的热值。究其原因,有可能是植物组织在凋落以前,其组织内的高能物质已向其它的生长部位转移,凋落物的高能物质含量比活的器官组织内少<sup>[22]</sup>,使得枯死物的热值比活的器官低。

本文杉木器官热值,树叶>树皮>树枝>树干>树根,与大多数研究结果相同<sup>[22,31-32]</sup>。与云南银柴(*Aporosa yunnanensis*)、山黄麻(*Trema orientalis*)枝的热值大于叶的热值<sup>[33,29]</sup>,甜槠(*Castanopsis eyrei*)<sup>[34]</sup>和白桦(*Betula platyphlla* Suk)<sup>[35]</sup>皮的热值高于叶的热值稍有不同。云南银柴、山黄麻属于短命植物,这些植物把自己大部分的能量投资到繁殖上,而不是个体生长上,导致它们的叶片具有低热值<sup>[33]</sup>。白桦皮的热值高于叶,其原因可能是白桦皮内含有较多的木质素、表儿茶素、阿魏酸、儿茶素等高能的多酚类化合物<sup>[35]</sup>。

林鹏等<sup>[9]</sup>、任海<sup>[22]</sup>等研究结果一样,本研究乔木层热值大于灌木层和草本层。这是森林不同层次植物对光能资源利用和对环境的同化能力不同的结果。会同杉木林的林冠空间接收了高达 79.8%—85.2% 的太阳辐射,林冠下空间约 6.2%—10.5%<sup>[36]</sup>。光能资源充足有利于光合作用积累含能量较高的物质<sup>[24]</sup>,所以,杉木林乔木层植物体内积累含高能物质比林下灌木层和草本层多,因此,其热值也就比它们大。乔木层植物高大,枝繁叶茂,根系发达,对环境的同化能力比灌木、草本植物强,它们的热值比灌木、草本植物高。所以森林中的热值格局一般遵循从森林上层到下层逐级递减的规律。

灰分含量对会同杉木各器官热值的大小与变化关联性不密切,因此,灰分含量不一定是影响会同杉木各器官热值差异的主要原因。灰分含量影响着会同杉木林下灌木、草本热值的大小与变化,与灌木、草本热值呈显著负相关( $P < 0.05$ )。

立地条件不同的不同生长阶段同一器官的热值不一样,这说明了若以林分生物量和热值推算一个林分积累的能量时,应用该林分当时的干重热值测定数据,如果借用其它的资料,可能会产生偏差。

同一植物各器官热值的差异,同一器官在不同生长阶段热值的变化,其原因本文进行了一些分析。由于缺乏对器官有机物质的生物化学定量测定,要做一个合理精确的解释是很难的。因此,今后必需加强对植物各组分化合物含量的测定和分析,只有这样才能揭示植物各器官热值的差异、器官在不同生长阶段热值的变化机理。

本研究以定位连续测定的不同生长阶段杉木、灌木、草本、枯死物的热值来分析它的动态变化规律。研究

结果克服了“空间换时间”研究方法的不同空间立地条件异质性的缺陷,保证了空间尺度上的一致性和时间尺度的连续性,因而结果更加逼近实际。

目前植物热值的研究还不是生态学或生理学中的研究热点,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。拓宽热值理论和应用研究的领域,把植物生理指标与热值指标相结合,探索热值指标在植物生态学、作物栽培技术及生产实践上的应用。

#### 参考文献 (References):

- [ 1 ] Kutbay H G, Kilinc M. Seasonal changes in energy values of *Phillyrea latifolia* L. Turkish Journal of Botany, 1994, 18(6): 489-491.
- [ 2 ] Singh A K, Misra K N, Ambasht R S. Energy dynamics in a savanna ecosystem in India. Japan Journal Ecology, 1980, 3(4): 295-305.
- [ 3 ] Sims P L, Singh J S. The structure and function of ten western north American grasslands: IV. Compartmental transfers and energy flow within the ecosystem. Journal Ecology, 1989, 66(3): 573-597.
- [ 4 ] Long F L. Application of calorimetric methods to ecological research. Plant Physiology, 1934, 9(2): 323-327.
- [ 5 ] Bobkova K S, Tuzhilkina V V. Carbon concentrations and caloric value of organic matter in northern forest ecosystems. Russian Journal of Ecology, 2001, 32(1): 63-65.
- [ 6 ] 杨福圃. 植物热值及其测定方法. 中国草地学报, 1982, 12(2): 63-65.
- [ 7 ] Huang Y H, Guan L L, Zhou G Y. Gross caloric values of dominant species and litter layer in mid-montane moist evergreen broad-leaved forest in Ailao Mountain and in tropical season rain forest in Xishuangbanna, Yunnan, China. Chinese Journal of Plant Ecology, 2007, 31(3): 457-463.
- [ 8 ] 肖文发, 聂道平, 张家诚. 我国杉木林生物量与能量利用率的研究. 林业科学研究, 1999, 12(3): 137-243.
- [ 9 ] 林鹏, 林益明, 李振基, 杨志伟, 刘初翎, 何建源. 武夷山黄山松群落能量的研究. 生态学报, 1999, 19(4): 504-508.
- [ 10 ] Chen B, Yang Y C, Zhou Y. Caloric values of seven dominant species in Tiantong National Forest Park, Zhejiang Province, China. Journal of East China Normal University: Natural Science, 2006, (2): 105-111.
- [ 11 ] Kuang Y W, Wen D Z, Zhou G Y, Liu S Z, Zhang D Q. Caloric values of dominant species in the different layers of lower subtropical monsoon ever-green broad-leaved forest at Dinghushan Mountain. Journal of Beijing Forestry University, 2005, 27(2): 6-12.
- [ 12 ] Zhou Q Y, Chen S X, Wu Z H. Ash contents and caloric values office eucalypt species. Chinese Journal of Tropical Crops, 2009, 30(2): 161-166.
- [ 13 ] 林承超. 福州鼓山季风常绿阔叶林及其林缘几种植物叶热值和营养成分. 生态学报, 1999, 19(6): 832-836.
- [ 14 ] 林益明, 林鹏, 王通, 等. 几种红树植物热值和灰分含量的研究. 应用生态学报, 2000, 11(2): 181-184.
- [ 15 ] 陈佐忠, 张鸿芳. 内蒙古典型草原地带 18 种植物的热值. 草原生态系统研究, 1992(4): 41-48.
- [ 16 ] 由文辉, 宋永昌. 淀山水生维管束植物群落能量的研究. 植物生态学报, 1995, 19(3): 208-216.
- [ 17 ] 王立海, 孙墨珑. 东北 12 种灌木热值与碳含量分析. 东北林业大学学报, 2008, 36(5): 42-42, 46-46.
- [ 18 ] 杨超, 田大伦, 胡曰利, 闫文德, 方晰, 梁小翠. 连栽杉木林林下植被生物量动态格局. 生态学报, 2011, 31(10): 2737-2747.
- [ 19 ] 刘焯章, 田大伦, 康文星, 方海波. 第二代杉木幼林生物量的定位研究. 林业科学, 1997, 33(S2): 61-66.
- [ 20 ] 田大伦, 项文化, 闫文德, 康文星. 速生阶段杉木人工林产量结构及生产力的代际效应. 林业科学, 2002, 37(4): 14-18.
- [ 21 ] 闫文德, 田大伦, 何功秀. 湖南会同第 2 代杉木人工林乔木层生物量的分布格局. 林业资源管理, 2003, (2): 5-7.
- [ 22 ] 任海, 彭少麟, 刘鸿先, 曹洪麟, 黄忠良. 鼎湖山植物群落及其主要植物的热值研究. 植物生态学报, 1999, 23(2): 148-154.
- [ 23 ] Bliss L C. Caloric and lipid content in alpine tundra plants. Ecology, 1962, 43(4): 753-757.
- [ 24 ] Zhou Q Y, Chen S X, Han F Y, Chen W P, Wu Z H. Biomass-and energy allocation in *Eucalyptus urophylla* × *Eucalyptus tereticornis* plantations at different stand ages. Chinese Journal of Applied Ecology, 2010, 21(1): 16-22.
- [ 25 ] Zhang Y N, Zhang Q C, Qi Q G, Li J H. Caloric values and total standing crop of energy of five dominant species in broad-leaved Korean Pine Forest in Changbai Mountains. Journal of Northeast Forestry University, 2010, 38(4): 3-5.
- [ 26 ] 曾小平, 蔡锡安, 赵平, 饶兴权. 广东鹤山人工林群落主要优势植物的热值和灰分含量. 应用生态学报, 2009, 20(3): 485-492.
- [ 27 ] Sinclair T R. Nitrogen influence on the physiology of crop yield // Rabbinge R, Goudriaan J, van Keulen H, Penning de Vries F W T, van Laar H H, eds. Theoretical Production Ecology: Reflections and Prospects. Wageningen; Pudoc, 1990: 41-55.
- [ 28 ] Qu G H, Wen M Z, Guo J X. Energy accumulation and allocation of main plant populations in *Aneurolepidium chinense* grassland in Songnen Plain. Chinese Journal of Applied Ecology, 2003, 14(5): 685-689.
- [ 29 ] 乔秀娟, 曹敏, 林华. 西双版纳不同林龄次生植物群落优势树种的热值. 植物生态学报, 2007, 31(2): 326-332.
- [ 30 ] Jordan C F. Productivity of a tropical forest and its relation to a world pattern of energy storage. The Journal of Ecology, 1971, 59(1): 127-142.
- [ 31 ] Golley F B. Caloric value of wet tropical forest vegetation. Ecology, 1969, 50(3): 517-519.
- [ 32 ] 陈美玲, 上官周平. 黄土高原子午岭林区 6 个典型群落优势种的热值和养分特征. 林业科学, 2009, 45(3): 140-144.
- [ 33 ] 官丽莉, 周小勇, 罗艳. 我国植物热值研究综述. 生态学杂志, 2005, 24(4): 452-457.
- [ 34 ] 林益明, 林鹏. 福建武夷山 2 个典型植物群落建群种的热值研究. 武夷科学, 1999, 15: 118-123.
- [ 35 ] 刘志芹, 张庆云, 宋丽杨, 胡迎庆, 李俊清. 白桦皮和白桦叶体外抗真菌作用研究. 天津药学, 2004, 16(3): 25-29.
- [ 36 ] 康文星, 邓湘雯, 赵仲辉. 林冠截留在杉木生态系统能量转换过程中的作用. 林业科学, 2007, 43(2): 15-22.