

小兴安岭主要树种热值与碳含量

王立海^{1,*}, 孙墨珑²

(1. 东北林业大学森林作业与环境研究中心, 哈尔滨 150040; 2. 东北林业大学理学院, 哈尔滨 150040)

摘要:对小兴安岭林区 15 种主要树种(红松、落叶松、鱼鳞云杉、臭冷杉、紫杉、蒙古栎、白桦、枫桦、紫椴、黄檗、水曲柳、胡桃楸、山杨、五角枫和春榆)不同器官的灰分含量、去灰分热值和碳含量进行了研究。采用快速灰化法测定灰分含量,量热法测定热值含量,吸收质量法测定碳含量。15 种主要树种不同器官的灰分含量(质量分数)为:树叶 0.60% ~ 1.28%;树枝 1.00% ~ 2.98%;树干 0.16% ~ 1.22%;树皮 2.15% ~ 6.36%。15 种主要树种不同器官的灰分含量(质量分数)从高到低依次为树皮、树枝、树叶、树干;不同器官的灰分含量(质量分数)具有显著差异(t 检验, $p < 0.01$)。15 种主要树种平均灰分含量(质量分数)从高到低依次为春榆、山杨、蒙古栎、紫椴、黄檗、枫桦、水曲柳、鱼鳞云杉、五角枫、胡桃楸、红松、臭冷杉、紫杉、落叶松、白桦。15 种主要树种不同器官的去灰分热值为:树叶 20.85 ~ 22.85 kJ/g;树枝 19.92 ~ 21.95 kJ/g;树干 19.66 ~ 21.98 kJ/g;树皮 18.58 ~ 21.74 kJ/g。15 种主要树种不同器官的去灰分热值基本从高到低依次为树叶、树枝、树干、树皮;不同器官的去灰分热值具有显著差异(t 检验, $p < 0.01$)。15 种主要树种平均去灰分热值从高到低依次为落叶松、红松、紫杉、鱼鳞云杉、胡桃楸、臭冷杉、山杨、五角枫、白桦、黄檗、水曲柳、紫椴、蒙古栎、枫桦、春榆。15 种主要树种不同器官的碳含量(质量分数)为:树叶 43.11% ~ 45.08%;树枝 44.31% ~ 46.06%;树干 46.30% ~ 47.46%;树皮 44.31% ~ 45.46%。15 种主要树种不同器官的去灰分热值基本从高到低依次为树干、树枝、树皮、树叶;不同器官的碳含量(质量分数)具有显著差异(t 检验, $p < 0.01$)。15 种主要树种平均碳含量(质量分数)从高到低依次为落叶松、臭冷杉、鱼鳞云杉、红松、黄檗、紫杉、紫椴、山杨、白桦、枫桦、水曲柳、胡桃楸、五角枫、蒙古栎、春榆。针叶树种平均灰分含量普遍低于阔叶树种,平均去灰分热值和平均碳含量普遍高于阔叶树种。

关键词:小兴安岭;主要树种;灰分含量;去灰分热值;碳含量

文章编号:1000-0933(2009)02-0953-07 中图分类号:Q945, Q948, S718.5 文献标识码:A

Caloric values and carbon contents of dominant trees in Xiaoxing'anling forest region

WANG Li-Hai^{1,*}, SUN Mo-Long²

1 Center for Forest Operations and Environment, Northeast Forestry University, Harbin 150040, China

2 College of Science, Northeast Forestry University, Harbin 150040, China

Acta Ecologica Sinica, 2009, 29(2): 0953 ~ 0959.

Abstract: Ash contents, ash free caloric values and carbon contents of different organs from fifteen species of dominant trees in Xiaoxing'anling forest region were studied by burned quickly to ashes method, measured caloric values method and absorbed CO₂ method respectively. The sampling site was located in the south of Xiaoxing'anling Forest Region (128°47'32" E, 47°13'10" N). These fifteen species of dominant trees were *Pinus koraiensis*, *Larix gmelinii*, *Picea jezoensis*, *Abies nephrolepis*, *Taxus cuspidate*, *Quercus mongolica*, *Betula platyphylla*, *Betula costata*, *Tilia amurensis*, *Phellodendron amurense*, *Fraxinus mandshurica*, *Juglans mandshurica*, *Populus davidiana*, *Acer mono* and *Ulmus propinqua*. Results showed that ash contents were in the range of 0.60%—1.28% for leaves, 1.00%—2.98% for branch, 0.16%—1.22% for trunk, and 2.15%—6.36% for bark. They decreased in the order of bark, branch, leaves and trunk for all fifteen species of trees, and differences of ash contents were significant among different organs of fifteen species of trees by t test

基金项目:国家科技支撑资助项目(2006BAD03A08-05)

收稿日期:2007-08-26; 修订日期:2007-09-29

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: lihaiwang@yahoo.com

($p < 0.01$). Average ash contents of fifteen species of trees decreased in the order of *U. propinqua*, *P. davidiana*, *Q. mongolica*, *T. amurensis*, *P. amurensis*, *B. costata*, *F. mandshurica*, *P. jezoensis*, *A. mono*, *J. mandshurica*, *P. koraiensis*, *A. nephrolepis*, *T. cuspidate*, *L. gmelinii* and *B. platyphylla*. Ash free caloric values were in the range of 20.85 – 22.85 kJ/g for leaves, 19.92 – 21.95 kJ/g for branch, 19.66 – 21.98 kJ/g for trunk, 18.58 – 21.74 kJ/g for bark, and decreased in the order of leaves, branch, trunk and bark for fifteen species of trees, and differences of ash free caloric values were significant among different organs of fifteen species of trees by *t* test ($p < 0.01$). Average ash free caloric values of fifteen species of trees decreased in the order of *L. gmelinii*, *P. koraiensis*, *T. cuspidate*, *P. jezoensis*, *J. mandshurica*, *A. nephrolepis*, *P. davidiana*, *A. mono*, *B. platyphylla*, *P. amurensis*, *F. mandshurica*, *T. amurensis*, *Q. mongolica*, *B. costata* and *U. propinqua*. Carbon contents were in the range of 43.11% – 45.08% for leaves, 44.31% – 46.06% for branch, 46.30% – 47.46% for trunk, 44.31% – 45.46% for bark, and decreased in the order of trunk, branch, bark and leaves for fifteen species of trees, and differences of carbon contents were significant among different organs of fifteen species of trees by *t* test ($p < 0.01$). Average carbon contents of fifteen species of trees decreased in the order of *L. gmelinii*, *A. nephrolepis*, *P. jezoensis*, *P. koraiensis*, *P. amurensis*, *T. cuspidate*, *T. amurensis*, *P. davidiana*, *B. platyphylla*, *B. costata*, *F. mandshurica*, *J. mandshurica*, *A. mono*, *Q. mongolica* and *U. propinqua*. Average ash contents of the conifer trees were lower than the broadleaf trees, and average ash free caloric values and average carbon contents of conifer trees were higher than those of broadleaf trees.

Key Words: Xiaoxing'anling; dominant trees; ash contents; ash free caloric values; carbon contents

植物热值是植物能量代谢水平的一种度量,反映了绿色植物在光合作用中转化日光能的能力,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^[1]。国外学者对森林植物热值的研究集中在 20 世纪 60 ~ 80 年代,之后只有少量相关文献发表,主要涉及热带雨林及暖温带森林植物^[2~5]。我国学者关于森林植物热值的研究始于 20 世纪 80 年代,主要涉及亚热带及暖温带森林植物^[6~9]。植物碳含量是植物碳贮量的一种度量,反映了绿色植物在光合作用中固定贮存碳元素的能力,是评价和反映生态系统中碳循环和增碳减排效应的重要指标之一^[10]。国外学者对森林植物碳贮量的研究大多涉及热带雨林及暖温带森林植物^[11~14]。我国学者关于森林植物碳贮量的研究大多涉及亚热带及暖温带森林植物,主要采取宏观计算和模拟模型等研究方法^[15~18]。

本文以小兴安岭林区 15 种主要树种(5 种针叶树,10 种阔叶树)为研究对象,研究各树种不同器官的灰分含量、去灰分热值和碳含量。系统研究森林植物热值及碳含量,为生物质能源和资源的选择、开发、利用和保护,了解碳贮量在不同植物中的分布、提高森林生态系统中物质循环和能量转化效率,科学估算森林植物碳贮量提供理论依据。

1 研究方法

1.1 研究地区概况

黑龙江省带岭林业实验局东方红林场位于小兴安岭南坡,128°47'32" E,47°13'10" N。林相为针阔叶混交林,土壤为森林暗棕壤。海拔 500 ~ 700 m,年平均气温 1.4℃,年平均降水量 661 mm。采集林分为针阔混交林(针阔蓄积比 6:4),乔木有红松、落叶松、云杉、冷杉、白桦、枫桦、紫椴、水曲柳、胡桃楸、山杨、五角枫、春榆等,平均树龄 61 年,下木以灌材为主。林木分布均匀,天然更新。1978 年进行过择伐。

1.2 样品采集

5 种针叶树种:红松(*Pinus koraiensis*),落叶松(*Larix gmelinii*),鱼鳞云杉(鱼鳞松,*Picea jezoensis*),臭冷杉(臭松,*Abies nephrolepis*),紫杉(*Taxus cuspidata*),10 种阔叶树种:蒙古栎(柞树,*Quercus mongolica*),白桦(*Betula platyphylla*),枫桦(硕桦,*Betula costata*),紫椴(*Tilia amurensis*),黄檗(*Phellodendron amurense*),水曲柳(*Fraxinus mandshurica*),胡桃楸(核桃楸,*Juglans mandshurica*),山杨(*Populus davidiana*),五角枫(色木槭,*Acer*

mono), 春榆 (*Ulmus propinqua*)。

测试样品采于不同树种的不同器官(树叶、树枝、树干和树皮),其中树叶和树枝取自树冠中上层,树干和树皮取自树干距地面 1.3 m 处,按东西南北方向混合采样。每树种每器官 10 个样本,随机取自生长状况较为一致的 10 棵树木,树龄在 30 ~ 50a 之间。样品经风干粉碎后过筛备用。

1.3 研究方法

采用空气干燥法测定含水率,计算机程序控制,试样 105 ~ 110℃ 干燥 1 h,冷却至室温后称重,计算试样含水率(每样品重复测定 5 次,取平均值)。

快速灰化法测定灰分含量,计算机程序控制,试样(815 ± 10)℃ 灼烧 2 h,冷却至室温后称重,计算试样灰分含量(每样品重复测定 5 次,取平均值)^[8]。

量热法测定热值,计算机程序控制,苯甲酸标定量热系统,系统自动充氧、放气,测定系统热值,计算试样热值(每样品重复测定 5 次,取平均值)^[9]。

根据试样含水率和灰分含量,计算试样去灰分热值:

$$\text{去灰分热值} = \frac{\text{干重热值}}{(1 - \text{灰分含量})} = \frac{\text{热值}}{(1 - \text{含水率})(1 - \text{灰分含量})}$$

采用吸收质量法测定碳含量。计算机程序控制,试样(800 ± 10)℃ 高温分解,使碳转化为二氧化碳,二氧化碳随载气流进入碱石棉吸收管,根据吸收剂的增重,计算试样碳含量(每样品重复测定 3 次,取平均值)。

仪器:金鹰 YX-ZR/Q 全自动量热仪;YX-SF/I 自动水分测定仪;YX-HF 自动灰分测定仪;YX-TQ 自动碳测定仪。

2 结果与分析

2.1 15 种主要树种不同器官的灰分含量

15 种主要树种不同器官的灰分含量(质量分数)如表 1 所示。

表 1 15 种主要树种不同器官的灰分含量

Table 1 Ash contents of 15 species of trees

编号 No.	树种 Species of trees	灰分含量 Ash contents (%)				平均 Average
		叶 Leaves	枝 Branch	干 Trunk	皮 Bark	
1	红松 <i>P. koraiensis</i>	0.65 ± 0.01 c	2.27 ± 0.05 b	0.32 ± 0.004 d	3.22 ± 0.10 a	1.61
2	落叶松 <i>L. gmelinii</i>	0.72 ± 0.01 c	1.52 ± 0.02 b	0.36 ± 0.008 d	2.42 ± 0.05 a	1.25
3	鱼鳞云杉 <i>P. jezoensis</i>	0.78 ± 0.02 c	2.37 ± 0.03 b	0.45 ± 0.009 d	2.93 ± 0.07 a	1.63
4	臭冷杉 <i>A. nephrolepis</i>	0.64 ± 0.01 c	2.01 ± 0.02 b	0.23 ± 0.003 d	2.57 ± 0.06 a	1.36
5	紫杉 <i>T. cuspidata</i>	0.76 ± 0.01 c	1.81 ± 0.03 b	0.35 ± 0.008 d	2.15 ± 0.05 a	1.27
6	蒙古栎 <i>Q. mongolica</i>	0.65 ± 0.02 c	2.41 ± 0.05 b	0.20 ± 0.003 d	4.80 ± 0.11 a	2.01
7	白桦 <i>B. platyphylla</i>	0.60 ± 0.01 c	1.00 ± 0.01 b	0.16 ± 0.004 d	2.33 ± 0.05 a	1.02
8	枫桦 <i>B. costata</i>	0.69 ± 0.01 c	1.78 ± 0.01 b	0.26 ± 0.006 d	4.04 ± 0.08 a	1.69
9	紫椴 <i>T. amurensis</i>	0.76 ± 0.02 c	2.98 ± 0.04 b	0.48 ± 0.010 d	3.22 ± 0.07 a	1.86
10	黄檗 <i>P. amurense</i>	0.68 ± 0.01 c	2.37 ± 0.03 b	0.24 ± 0.004 d	4.04 ± 0.09 a	1.83
11	水曲柳 <i>F. mandshurica</i>	0.79 ± 0.02 c	2.14 ± 0.04 b	0.33 ± 0.007 d	3.32 ± 0.06 a	1.64
12	胡桃楸 <i>J. mandshurica</i>	0.80 ± 0.01 c	2.32 ± 0.02 b	0.45 ± 0.008 d	2.88 ± 0.08 a	1.61
13	山杨 <i>P. ussuriensis</i>	0.70 ± 0.01 c	2.48 ± 0.05 b	0.31 ± 0.006 d	6.33 ± 0.15 a	2.45
14	五角枫 <i>A. mono</i>	0.83 ± 0.02 c	1.44 ± 0.02 b	0.35 ± 0.004 d	3.85 ± 0.11 a	1.62
15	春榆 <i>U. propinqua</i>	1.28 ± 0.03 c	2.14 ± 0.03 b	1.22 ± 0.02 d	6.36 ± 0.17 a	2.75

表中数据为 10 个样本的均值 ± 标准差 The values in the table were given as Mean ± SD ($n = 10$); 字母 a, b, c, d 表示差异显著性(t 检验, $p < 0.01$) Different letters (a, b, c, d) showed the significant difference levels by t test ($p < 0.01$)

由表 1 可以看出,15 种主要树种不同器官的灰分含量(质量分数)为:树叶 0.60% ~ 1.28%,树枝 1.00% ~ 2.98%,树干 0.16% ~ 1.22%,树皮 2.15% ~ 6.36%;不同器官的灰分含量(质量分数)从高到低依次为树皮、树枝、树叶、树干,不同器官的灰分含量(质量分数)具有显著差异($n = 10$, t 检验, $p < 0.01$)。

15 种主要树种树叶的灰分含量(质量分数)从高到低依次为春榆、五角枫、胡桃楸、水曲柳、鱼鳞云杉、紫椴、紫杉、落叶松、山杨、枫桦、黄檗、蒙古栎、红松、臭冷杉、白桦。树枝的灰分含量(质量分数)从高到低依次

为紫椴、山杨、蒙古栎、黄檗、鱼鳞云杉、胡桃楸、红松、水曲柳、春榆、臭冷杉、紫杉、枫桦、落叶松、五角枫、白桦。树干的灰分含量(质量分数)从高到低依次为春榆、紫椴、胡桃楸、鱼鳞云杉、落叶松、五角枫、紫杉、水曲柳、红松、山杨、枫桦、黄檗、臭冷杉、蒙古栎、白桦。树皮的灰分含量(质量分数)从高到低依次为春榆、山杨、蒙古栎、枫桦、黄檗、五角枫、水曲柳、紫椴、红松、鱼鳞云杉、胡桃楸、臭冷杉、落叶松、白桦、紫杉。

15 种主要树种不同器官的平均灰分含量(质量分数)从高到低依次为春榆、山杨、蒙古栎、紫椴、黄檗、枫桦、水曲柳、鱼鳞云杉、五角枫、胡桃楸、红松、臭冷杉、紫杉、落叶松、白桦;除白桦外,针叶树种平均灰分含量普遍低于阔叶树种。

树木主要由树根、树皮、树枝、树干和树叶等器官组成。树皮对矿质元素吸收与积累的能力比树干和树叶强,矿质元素含量高。另外,在测试时树枝样本含有一定数量的树皮。因此,树皮和树枝比树干和树叶灰分含量高^[1]。由于针叶树种各器官对矿质元素吸收与积累的能力比阔叶树种弱,因此,针叶树种各器官的灰分含量普遍低于阔叶树种^[20]。

2.2 15 种主要树种不同器官的去灰分热值

15 种主要树种不同器官的去灰分热值如表 2 所示。

表 2 15 种主要树种不同器官的去灰分热值
Table 2 Ash free caloric value of 15 species of trees

编号 No.	树种 Species of trees	去灰分热值 Ash free caloric value(kJ·g ⁻¹)				平均 Average
		叶 Leaves	枝 Branch	干 Trunk	皮 Bark	
1	红松 <i>P. koraiensis</i>	22.50 ± 0.38 a	21.93 ± 0.36 b	21.61 ± 0.20 c	21.47 ± 0.45 d	21.88
2	落叶松 <i>L. gmelinii</i>	22.85 ± 0.35 a	21.95 ± 0.32 b	21.88 ± 0.22 b	21.74 ± 0.40 b	22.10
3	鱼鳞云杉 <i>P. jezoensis</i>	22.35 ± 0.37 a	21.94 ± 0.33 b	21.37 ± 0.18 c	20.90 ± 0.42 d	21.64
4	臭冷杉 <i>A. nephrolepis</i>	21.97 ± 0.37 a	21.66 ± 0.35 b	20.99 ± 0.20 c	20.40 ± 0.38 d	21.25
5	紫杉 <i>T. cuspidata</i>	22.62 ± 0.35 a	21.94 ± 0.37 b	21.71 ± 0.21 c	21.26 ± 0.41 d	21.88
6	蒙古栎 <i>Q. mongolica</i>	21.38 ± 0.32 a	20.73 ± 0.36 b	19.81 ± 0.18 c	19.59 ± 0.39 d	20.37
7	白桦 <i>B. platyphylla</i>	21.59 ± 0.35 a	20.94 ± 0.38 b	20.49 ± 0.22 c	20.88 ± 0.38 b	20.97
8	枫桦 <i>B. costata</i>	20.89 ± 0.36 a	19.92 ± 0.35 b	19.66 ± 0.19 c	19.59 ± 0.40 c	20.01
9	紫椴 <i>T. amurensis</i>	21.51 ± 0.35 a	20.71 ± 0.33 b	20.19 ± 0.18 c	19.32 ± 0.41 d	20.43
10	黄檗 <i>P. amurense</i>	21.69 ± 0.36 a	20.77 ± 0.35 b	20.53 ± 0.24 c	20.49 ± 0.40 c	20.87
11	水曲柳 <i>F. mandshurica</i>	21.68 ± 0.30 a	20.94 ± 0.36 b	20.79 ± 0.22 b	19.60 ± 0.42 c	20.75
12	胡桃楸 <i>J. mandshurica</i>	21.98 ± 0.33 a	21.52 ± 0.34 b	20.95 ± 0.20 c	20.88 ± 0.43 c	21.33
13	山杨 <i>P. ussuriensis</i>	21.85 ± 0.34 a	21.38 ± 0.35 b	20.71 ± 0.16 c	20.54 ± 0.46 d	21.12
14	五角枫 <i>A. mono</i>	21.62 ± 0.33 a	20.96 ± 0.35 b	20.58 ± 0.19 c	20.94 ± 0.40 b	21.02
15	春榆 <i>U. propinqua</i>	20.85 ± 0.43 a	20.48 ± 0.45 b	19.90 ± 0.41 c	18.58 ± 0.48 d	19.95

表中数据为 10 个样本的均值 ± 标准差 The values in the table were given as Mean ± SD ($n = 10$); 字母 a, b, c, d 表示差异显著性(t 检验, $p < 0.01$) Different letters(a,b,c,d) showed the significant difference levels by t test ($p < 0.01$)

由表 2 可以看出,15 种主要树种不同器官的去灰分热值为:树叶 20.85 ~ 22.85 kJ·g⁻¹,树枝 19.92 ~ 21.95 kJ·g⁻¹,树干 19.66 ~ 21.98 kJ·g⁻¹,树皮 18.58 ~ 21.74 kJ·g⁻¹;不同器官的去灰分热值基本从高到低依次为树叶、树枝、树干、树皮(白桦和五角枫的树皮去灰分热值高于树干),不同器官的去灰分热值基本具有显著差异($n = 10$, t 检验, $p < 0.01$)(落叶松的树枝、树干和树皮去灰分热值无显著差异)。

15 种主要树种树叶的去灰分热值从高到低依次为落叶松、紫杉、红松、鱼鳞云杉、胡桃楸、臭冷杉、山杨、黄檗、水曲柳、五角枫、白桦、紫椴、蒙古栎、枫桦、春榆。树枝的去灰分热值从高到低依次为落叶松、紫杉、鱼鳞云杉、红松、臭冷杉、胡桃楸、山杨、五角枫、水曲柳、白桦、黄檗、蒙古栎、紫椴、春榆、枫桦。树干的去灰分热值从高到低依次为落叶松、紫杉、红松、鱼鳞云杉、臭冷杉、胡桃楸、水曲柳、山杨、五角枫、黄檗、白桦、紫椴、春榆、蒙古栎、枫桦。树皮的去灰分热值从高到低依次为落叶松、红松、紫杉、五角枫、鱼鳞云杉、胡桃楸、白桦、山杨、黄檗、臭冷杉、水曲柳、蒙古栎、枫桦、紫椴、春榆。

15 种主要树种不同器官的平均去灰分热值从高到低依次为落叶松、红松、紫杉、鱼鳞云杉、胡桃楸、臭冷杉、山杨、五角枫、白桦、黄檗、水曲柳、紫椴、蒙古栎、枫桦、春榆, 针叶树种平均去灰分热值普遍高于阔叶树种。

树木主要由木质素、纤维素、蛋白质、脂肪、水及灰分等物质构成。树叶是树木生理活动最活跃和实现光合作用的主要器官, 含有较多的高能化合物如蛋白质和脂肪等, 同时它自身还能合成高能有机物, 因此, 树叶的热值较高; 树枝、树干和树皮含有较多的纤维素成分, 在树叶光合作用合成有机物时沿树枝送入树干中, 在营养物质的输送过程中, 高能化合物的积累速率高于低能化合物, 因此, 高能化合物在输送过程中的积累浓度按树叶、树枝、树干、树皮逐渐降低, 热值也相应逐渐减小^[19]。由于针叶树种脂肪类物质和木质素含量比阔叶树种高, 因此, 针叶树种热值普遍高于阔叶树种^[20]。

2.3 15 种主要树种不同器官的碳含量

15 种主要树种不同器官的碳含量(质量分数)如表 3 所示。

表 3 15 种主要树种不同器官的碳含量
Table 3 Carbon contents of 15 species of trees

编号 No.	树 种 Species of trees	碳含量 Carbon contents(%)				平均 Average
		叶 Leaves	枝 Branch	干 Trunk	皮 Bark	
1	红松 <i>P. koraiensis</i>	44.51 ± 0.40 d	45.99 ± 0.45 b	47.16 ± 0.40 a	45.01 ± 0.53 c	45.66
2	落叶松 <i>L. gmelinii</i>	45.08 ± 0.38 c	45.73 ± 0.39 b	47.22 ± 0.39 a	45.17 ± 0.55 c	45.80
3	鱼鳞云杉 <i>P. jezoensis</i>	44.40 ± 0.36 d	46.05 ± 0.44 b	47.19 ± 0.37 a	45.05 ± 0.58 c	45.67
4	臭冷杉 <i>A. nephrolepis</i>	44.23 ± 0.35 d	46.06 ± 0.41 b	47.08 ± 0.36 a	45.49 ± 0.52 c	45.71
5	紫杉 <i>T. cuspidata</i>	44.08 ± 0.37 d	46.06 ± 0.42 b	46.82 ± 0.35 a	45.05 ± 0.50 c	45.50
6	蒙古栎 <i>Q. mongolica</i>	43.11 ± 0.33 d	44.90 ± 0.40 b	47.06 ± 0.35 a	44.31 ± 0.57 c	44.84
7	白桦 <i>B. platyphylla</i>	43.81 ± 0.35 d	45.54 ± 0.41 b	47.46 ± 0.34 a	44.72 ± 0.50 c	45.38
8	枫桦 <i>B. costata</i>	44.10 ± 0.33 d	45.52 ± 0.42 b	47.08 ± 0.38 a	44.58 ± 0.51 c	45.32
9	紫椴 <i>T. amurensis</i>	44.24 ± 0.34 d	45.34 ± 0.41 b	47.30 ± 0.33 a	44.85 ± 0.54 c	45.43
10	黄檗 <i>P. amurense</i>	44.50 ± 0.35 c	46.03 ± 0.41 b	47.22 ± 0.34 a	44.55 ± 0.55 c	45.57
11	水曲柳 <i>F. mandshurica</i>	44.47 ± 0.32 c	45.57 ± 0.39 b	45.92 ± 0.35 a	45.46 ± 0.56 b	45.35
12	胡桃楸 <i>J. mandshurica</i>	44.55 ± 0.36 c	45.21 ± 0.37 b	46.78 ± 0.33 a	44.69 ± 0.57 c	45.30
13	山杨 <i>P. ussuriensis</i>	44.69 ± 0.32 d	45.53 ± 0.35 b	46.56 ± 0.32 a	44.95 ± 0.50 c	45.43
14	五角枫 <i>A. mono</i>	44.56 ± 0.34 c	44.90 ± 0.40 b	46.44 ± 0.34 a	44.81 ± 0.48 b	45.17
15	春榆 <i>U. propinqua</i>	44.10 ± 0.40 c	44.31 ± 0.45 c	46.30 ± 0.38 a	44.58 ± 0.60 b	44.82

表中数据为 10 个样本的均值 ± 标准差 The values in the table were given as Mean ± SD ($n = 10$); 字母 a, b, c, d 表示差异显著性(t 检验, $p < 0.01$) Different letters (a, b, c, d) showed the significant difference levels by t test ($p < 0.01$)

由表 3 可以看出, 15 种主要树种不同器官的碳含量(质量分数)为: 树叶 43.11% ~ 45.08%, 树枝 44.31% ~ 46.06%, 树干 46.30% ~ 47.46%, 树皮 44.31% ~ 45.46%; 不同器官的碳含量(质量分数)基本从高到低依次为树干、树枝、树皮、树叶(春榆的树皮碳含量(质量分数)高于树枝), 不同器官的碳含量(质量分数)基本具有显著差异($n = 10$, t 检验, $p < 0.01$)。另外, 目前国际上将森林生物量转换成碳含量的一般算法为将生物量乘以一个转换系数(0.45 ~ 0.55)^[18], 该研究表明, 吉林省汪清林区森林生物量转换碳含量的系数为 0.47。由表 3 可知, 小兴安岭 15 种树种的平均碳含量为 44.8% ~ 45.8%, 其森林生物量转换碳含量的转换系数处于 45% ~ 55% 的下限, 比汪清林区的略低, 这主要是由于两林区的树种构成、光照等方面的差异造成的^[18]。

15 种主要树种树叶的碳含量(质量分数)从高到低依次为落叶松、山杨、五角枫、胡桃楸、红松、黄檗、水曲柳、鱼鳞云杉、紫椴、臭冷杉、枫桦、春榆、紫杉、白桦、蒙古栎。树枝的碳含量(质量分数)从高到低依次为臭冷杉、紫杉、鱼鳞云杉、黄檗、红松、落叶松、水曲柳、白桦、山杨、枫桦、紫椴、胡桃楸、蒙古栎、五角枫、春榆。树干的碳含量(质量分数)从高到低依次为白桦、紫椴、落叶松、黄檗、鱼鳞云杉、红松、臭冷杉、枫桦、蒙古栎、紫杉、胡桃楸、山杨、五角枫、春榆、水曲柳。树皮的碳含量(质量分数)从高到低依次为臭冷杉、水曲柳、落叶松、鱼

鳞云杉、紫杉、红松、山杨、紫椴、五角枫、白桦、胡桃楸、枫桦、春榆、黄檗、蒙古栎。

15 种主要树种不同器官的平均碳含量(质量分数)从高到低依次为落叶松、臭冷杉、鱼鳞云杉、红松、黄檗、紫杉、紫椴、山杨、白桦、枫桦、水曲柳、胡桃楸、五角枫、蒙古栎、春榆, 针叶树种平均碳含量普遍高于阔叶树种。

树干含有较多的木质素, 因此碳含量较高; 树枝和树皮含有的木质素低于树干, 故碳含量低于树干; 而树叶含有的木质素低于树枝和树皮, 故碳含量相应减小^[15]。由于针叶树种脂肪类物质和木质素含量比阔叶树种高, 因此, 针叶树种碳含量普遍高于阔叶树种^[20]。

对比表 2 和表 3, 15 种主要树种不同器官的平均去灰分热值与平均碳含量(质量分数)线性相关($r = 0.741$)。针叶树种碳含量普遍高于阔叶树种, 因此, 针叶树种的热值也普遍高于阔叶树种。

根据 15 种主要树种平均去灰分热值的高低顺序, 以及针叶树种平均去灰分热值普遍高于阔叶树种的趋势, 可以部分针叶树种为生物质能源的优选树种。如落叶松的平均去灰分热值较高, 灰分含量较低, 是小兴安岭林区的速生针叶树种之一, 尤其是前 30a 的生长速度较快, 种植技术比较成熟, 经营成本较低, 所以, 可考虑以落叶松为生物质能源的优选树种。

根据 15 种主要树种平均碳含量(质量分数)的数值, 可以更深入地了解碳贮量在小兴安岭林区主要不同树种中的分布, 更科学地估算该地区不同森林植物群落碳的贮量。根据该林区林分组成、各林分总生物量和树木器官各分生物量分配比例, 即可以估测出该林区森林群落碳贮量。

3 结论

通过对小兴安岭林区 15 种主要树种(5 种针叶树, 10 种阔叶树)不同器官的灰分含量、去灰分热值和碳含量所进行的研究, 得出以下主要结论:

对于灰分含量, 从树种大类看, 针叶树种的平均灰分含量普遍低于阔叶树种的灰分含量, 平均相差 23%; 从树不同器官看, 树皮的灰分含量最高, 以下依次为树枝、树干和树叶。

对于去灰分热值, 从树种大类看, 针叶树种的平均去灰分热值普遍高于阔叶树种的去灰分热值, 平均相差 5%; 从树不同器官看, 树叶的去灰分热值最高, 以下依次为树干、树枝和树皮。

对于碳含量, 从树种大类看, 针叶树种的平均碳含量普遍高于阔叶树种的碳含量, 平均相差 1%; 从树不同器官看, 树干的碳含量最高, 以下依次为树枝、树皮和树叶。

References:

- [1] Guan L L, Zhou X Y, Luo Y. A review on the study of plant caloric value in China. *Chinese Journal of Ecology*, 2005, 24 (4): 452—457.
- [2] Golley F G. Caloric value of wet tropical forest vegetation. *Ecology*, 1968, 50 (3): 517—519.
- [3] Bobkova K S, Tuzhilikina V V. Carbon concentrations and caloric value of organic matter in northern forest ecosystems. *Russian Journal of Ecology*, 2001, 32 (1): 63—65.
- [4] Ivask M. Caloric value of Norway spruce organs and its seasonal dynamics. *Baltic Forestry*, 1999, 5 (1): 44—49.
- [5] Smith D W, Tumej P R. Specific density and caloric value of the trunk wood of white birch, black cherry and sugar maple, and their relation to forest succession. *Canadian Journal of Forest Research*, 1982, 12 (2): 186—190.
- [6] Kuang Y W, Wen D Z, Zhou G Y, *et al.* Caloric values of dominant species in the different layers of lower subtropical monsoon evergreen broad-leaved forest at Dixhishan Mountain. *Journal of Beijing Forestry University*, 2005, 27 (2): 6—12.
- [7] Lin Y M, Wang Z C, Ke L N, *et al.* Monthly changes in the caloric values of the leaves of four shrubby and four tree-dwelling palmae species. *Acta Ecologica Sinica*, 2003, 23 (6): 1117—1124.
- [8] Xiang P, Lin Y M, Peng Z Q, *et al.* Study on caoric values and ash contents in the leaves of ten ficus species at mamen botanical garden. *Scientia Silvae Sinicae*, 2003, 39 (sp.1): 68—73.
- [9] Lin Y M, Guo Q R, Ye Gongfu, *et al.* Characteristics of matter and energy of some Casuarinaceae species in Dongshan County, Fujian Province. *Acta Ecologica Sinica*, 2004, 24 (10): 2217—2224.
- [10] Zheng W J, Bao W K, Gu B, *et al.* Carbon concentration and its characteristics in terrestrial higher plants. *Chinese Journal of Ecology*, 2007, 26 (3): 307—313.

- [11] Detwiler R P, Hall C A. Tropical forests and the global carbon cycle. *Science*, 1988, 239 (4835): 42—47.
- [12] Dore M H, Johnston M. The carbon cycle and the value of Canadian forests. *Journal of Sustainable Forestry*, 2001, 12 (1/2): 123—151.
- [13] Lamtom S H, Savidge R A. A reassessment of carbon content in wood: variation within and between 41 North American species. *Biomass and Bioenergy*, 2003, 25 (4): 381—388.
- [14] Ritson P, Sochacki S. Measurement and prediction of biomass and carbon content of *Pinus pinaster* trees in farm forestry plantations, south-western Australia. *Forest Ecology and Management*, 2003, 175 (1/3): 103—117.
- [15] Zhao M, Zhou G S. Carbon storage of forest vegetation and its relationship with climatic factors. *Scientia Geographica Sinica*, 24 (1): 50—54.
- [16] Fang X, Tian D L, Xiang W H. Density, storage and distribution of carbon in Chinese fir plantation at fast growing stage. *Scientia Silvae Sinicae*, 38 (3): 14—19.
- [17] Yang L Y, Luo T X, Wu S T. Root biomass and underground C and N storage of primitive Korean pine and broadleaved climax forest in Changbai Mountains at its different succession stages. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2005, 16 (7): 1195—1199.
- [18] Xing Y Q, Wang L H. Compatible biomass estimation models of natural forests in Changbai Mountains based on forest inventory. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2007, 18 (1): 1—8.
- [19] Bao Y J, Li Z H, Han X G, *et al.* Plant caloric value and its bio ecological attributes. *Chinese Journal of Ecology*, 2006, 25 (9): 1095—1103.
- [20] Li H S. *Modern plant physiology*. Beijing: Higher Education Press, 2002.

参考文献:

- [1] 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.
- [6] 旷远文,温达志,周国逸,等. 鼎湖山季风常绿阔叶林各层次优势种热值研究. *北京林业大学学报*, 2005, 27(2): 6~12.
- [7] 林益明,王湛昌,柯莉娜,等. 四种灌木状与四种乔木状棕榈植物热值的月变化. *生态学报*, 2003, 23(6): 1117~1124.
- [8] 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. *林业科学*, 2003, 39(专刊): 68~73.
- [9] 林益明,郭启荣,叶功富,等. 福建东山几种木麻黄的物质与能量特征. *生态学报*, 2004, 24(10): 2217~2224.
- [10] 郑帷婕,包维楷,辜彬,等. 陆生高等植物碳含量及其特点. *生态学杂志*, 2007, 26(3): 307~313.
- [15] 赵敏,周广胜. 中国森林生态系统的植物碳贮量及其影响因子分析. *地理科学*, 2004, 24(1): 50~54.
- [16] 方晰,田大伦,项文化. 速生阶段杉木人工林碳素密度、贮量和分布. *林业科学*. 2002, 38(3): 14~19.
- [17] 杨丽韞,罗天祥,吴松涛. 长白山原始阔叶红松林不同演替阶段地下生物量与碳、氮贮量的比较. *应用生态学报*, 2005, 16(7): 1195~1199.
- [18] 邢艳秋,王立海. 基于森林调查数据的长白山天然林森林生物量相容性模型. *应用生态学报*, 2007, 18(1): 1~8.
- [19] 鲍雅静,李政海,韩兴国,等. 植物热值及其生物生态学属性. *生态学杂志*, 2006, 25(9): 1095~1103.
- [20] 李合生. *现代植物生理学*. 北京:高等教育出版社, 2002.