

欧洲山杨热值及灰分含量研究*

朱雅丽¹ 周 钢² 张绘芳¹ 张景路¹ 地力夏提·包尔汉¹

(1. 新疆林业科学院 现代林业研究所, 新疆 乌鲁木齐 830092; 2. 新疆林业规划院, 新疆 乌鲁木齐 830049)

摘要 以天然欧洲山杨 *Populus tremula* 为试材, 采用相关分析及多重比较方法, 研究各个器官干物质热值、灰分含量、灰分热值的相关性及差异性。结果表明: 树干热值及灰分含量由上至下逐渐下降, 树根的热值及灰分含量表现为细根 > 根茎 > 粗根。各器官干物质热值、灰分含量、去灰分热值大小顺序分别为: 叶 > 根 > 干 > 枝 > 皮, 干 > 根 > 枝 > 皮 > 叶, 叶 > 根 > 枝 > 皮 > 干, 叶与枝、叶与皮之间干物质热值存在显著差异, 叶与皮、叶与干、枝与皮、枝与干、皮与干之间的灰分含量存在显著性差异, 叶与枝、叶与皮、叶与干、枝与干、皮与干的去灰分热值存在显著性差异。全株平均干物质热值、灰分含量、去灰分热值分别为 $18.316\ 4\ \text{kJ} \cdot \text{g}^{-1}$ 、 $4.399\ 6\%$ 、 $19.171\ 5\ \text{kJ} \cdot \text{g}^{-1}$, 树干、树根的干物质热值与灰分含量呈现不显著的负相关关系, 全株干物质热值与去灰分热值存在极显著相关, 与灰分含量呈现显著性负相关。欧洲山杨的干物质热值高于世界陆地植物平均热值, 可作为新疆区域备选能源植物。

关键词 欧洲山杨; 干物质热值; 灰分含量; 去灰分热值

中图分类号: S792.11 S718.5 文献标志码: A 文章编号: 2096-2053 (2022) 02-0079-09

Study on Calorific Value and Ash Content of *Populus tremula*

ZHU Yali¹ ZHOU Gang² ZHANG Huifang¹ ZHANG Jinglu¹
DILIXIATI · baoerhan¹

(1. Modern Forestry Research Institute of Xinjiang Academy of Forestry, Urumqi, Xinjiang 830092, China; 2. Xinjiang Forestry Planning Institute, Urumqi, Xinjiang 830049, China)

Abstract Using the *Populus tremula* as the test material, the correlation and difference of the gross calorific values, ash content and ash calorific value of each organ were studied by correlation and multiple comparison analysis of variance. The results showed that the calorific value and ash content of the trunk decreased gradually from top to bottom, and the calorific value and ash content of roots were in the sequence of fine roots > rhizomes > coarse roots. The order of gross calorific value, ash content and ash free calorific value of each organ was as follows: leaf > root > trunk > branch > bark, trunk > root > branch > bark > leaf, leaf > root > branch > bark > trunk. There were significant differences in the calorific values of dry matter between leaf and branch, leaf and bark. There were significant differences in the ash content between leaf and bark, leaf and trunk, branch and bark, branch and trunk, bark and trunk. There were significant differences in the ash free calorific value between leaf and branch, leaf and bark, leaf and trunk, branch and trunk, bark and trunk. There were average gross calorific value, ash content and ash free calorific value of the whole plant were $18.316\ 4\ \text{kJ} \cdot \text{g}^{-1}$, $4.399\ 6\%$, $19.171\ 5\ \text{kJ} \cdot \text{g}^{-1}$. There was no significant negative correlation between gross calorific value and ash content of trunk and roots. The gross calorific value of whole plant was significantly correlated with the ash free calorific value, and had a significant

* 基金项目: 新疆维吾尔自治区公益性科研院所基本科研业务费专项资金 (KY2021038, KY2021037, KY2020019)。

第一作者: 朱雅丽 (1984—), 女, 副研究员, 主要从事森林资源监测及遥感技术应用方面的研究工作, E-mail: juyali2002@aliyun.com。

negative correlation with ash content. It was higher than the average calorific value of terrestrial plants in the world, which can be used as an alternative energy plant in Xinjiang region.

Key words *Populus tremula*; gross caloric value; ash content; ash free caloric value

林木生物质能源是生物质能源的重要组成部分^[1],能够替代部分高污染的化石性能源,提高森林生态系统的碳汇作用,对于二氧化碳减排、减缓温室效应具有很大潜力。植物热值是研究林木生物质能源的重要技术指标^[2],其反映了植物在光合作用中对太阳能的转化效率,是研究森林生态系统中能量转化规律的重要指标之一,也是衡量第一性生产力水平的重要指标^[3-4]。

热值是单位质量物质在一定温度下完全燃烧时所释放的能量,可分为干物质热值和去灰分热值。我国对植物热值的研究起始于20世纪80年代初,先后有学者对针叶林^[5]、阔叶林^[6-7]、热带雨林^[8]、红树林^[9]等植物种类进行了热值研究。还有学者对一些典型的地带的植被进行了针对性的研究,董周焱等^[10]以海岸防护林带的主要树种为对象进行了研究,从热值、元素含量和生物量建成成本方面对其能量利用、生长和适应能力进行了分析;王丽等^[11]基于湿草甸优势植物热值及灰分含量研究了草皮挖取对湿地的影响;高凯等^[12]测定了浑善达克沙地14种主要野生植物根、茎、叶、果实的热值、灰分、矿质元素,并对各个指标进行了相关性分析;张清海等^[13]对福建惠安滨海沙地木麻黄凋落物分解过程中的热值动态变化进行了研究。对植物热值的研究,不仅可以评价生态系统生产力状况,还可以充分反映生态系统的能流过程和能量分布特征^[14-15]。

刘灿等^[16]曾对新疆克拉玛依地区的4种杨属植物进行了热值及灰分含量的比较分析,郑朝晖等^[17-18]对新疆银新杨及白榆的热值及含碳率进行了分析研究,但大都是人工林,对广泛分布于新疆山区的天然欧洲山杨 *Populus tremula* 热值的研究尚鲜见。欧洲山杨有着生长速度快、成材早、适应性强的特性,是云杉林生态系统的主要先锋树种和伴生树种之一,能促进云杉更新,在用材和山区水土保持方面也发挥着重要作用^[19]。本文以天然欧洲山杨为试材,对其干物质热值、灰分含量和去灰分热值进行研究分析,以期对评价和筛选能源树种提供理论基础,为探索欧洲山杨的

生态效率、能量流动特征提供基础资料。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

欧洲山杨分布于欧洲大陆、西伯利亚、高加索和中国新疆(阿尔泰、伊犁、天山东部北坡和塔城山区),主要生长海拔范围为700~2300 m,是新疆地区重要的先锋树种和伴生树种。研究区为阿尔泰山及天山部分天然林区。阿尔泰山位于新疆最北部阿勒泰地区,地理坐标为东经85°50′~95°25′,北纬44°50′~49°10′,平均海拔1000~3000 m,属温带大陆性气候,年均降水量183 mm,集中于6—12月,年平均气温4.5℃;天山山脉横贯新疆中部,地理坐标为东经73°30′~96°45′,北纬40°10′~44°30′,平均海拔1000~3000 m,天山山脉地形复杂,气候差异很大,西部伊犁林区温暖湿润,降雨丰沛,中部林区气候温暖,雨量适中。

1.2 试验材料

试验材料于2010年8—9月在阿尔泰山及天山天然林区采集,共32株。样木均匀分布于径阶2、4、6、8、12、16、20、26、32及38 cm以上,并根据《森林资源规划设计调查技术规程》^[20]中天然杨龄组划分标准,将样木划分为幼龄林、中龄林、近熟林和成过熟林4个龄组,每组各8株样木。所采集样木为林分中没有病虫害、断梢等状况的具有一定代表性的林木。

1.3 试验方法

调查样木的胸径、树高、地径、冠幅(东西、南北2个方向的冠幅)、枝下高等林分因子,伐倒后采用破坏性取样方法于树干1/10、3.5/10和7/10处各取1个3~5 cm厚的圆盘,将树干的干、皮剥离开后对地上各部位鲜质量进行测定。因获取根部样本需要耗费大量人力和时间,仅选其中10株样木采用全挖法对根系进行取样,将根系以根茎、粗根(≥10 mm)、细根(2~10 mm)划分^[21]共取30个样本。根据实测各部位鲜质量和干质量计算含水率,估算样木地上部分和总干质量。

1.4 项目测定

运用氧弹式热量计测定干物质热值，使用马弗炉测定灰分含量，具体测定方法及步骤见文献^[22]。根据干物质热值和灰分含量推算去灰分热值，计算公式为：去灰分热值 = 干物质热值 / (1- 灰分含量)^[15]。

1.5 数据分析

采用 Excel 整理、分析数据及辅助作图，利用 SPSS 20.0 软件进行统计分析。运用 Pearson 相关分析方法分析干物质热值、灰分含量、去灰分热值之间的相关性，采用多重比较分析检验欧洲山杨同一器官不同部分及不同器官各项指标的显著性差异。

2 结果与分析

2.1 相关性分析

将样木的树干、树根及全株欧洲山杨的干物质热值、灰分含量和去灰分热值分别进行 Pearson 相关性分析。由表 1 可知，树干的干物质热值与去灰分热值在 0.01 水平上呈显著相关，相关系数 0.993，与灰分含量相关性不强；根部干物质热值与去灰分热值相关系数为 0.895，在 0.01 水平上显著相关，干物质热值与灰分含量存在负相关关系，但不显著；整株的干物质热值与灰分含量在 0.05 水平上呈显著性负相关，与去灰分热值在 0.01 水平上呈现出极显著相关性， $P=0.00<0.01$ ，相关系数 0.958。

2.2 同一器官不同部分热值及灰分含量分析

分别对欧洲山杨干材上、中、下 96 个样本，根部的根茎、粗根和细根 30 个样本的干物质热值、灰分含量、去灰分热值进行组间的差异显著性检验，以判断同一器官不同部分之间的差异，并通过各部分干质量加权求得干材及根部各特征值。

2.2.1 干物质热值分析 由表 2 可知，干部的干物质热值由上部至下部逐渐减小，大小顺序为上 部 ($18.626\ 2\ \text{kJ} \cdot \text{g}^{-1}$) > 中 部 ($18.320\ 7\ \text{kJ} \cdot \text{g}^{-1}$) > 下 部 ($18.235\ 9\ \text{kJ} \cdot \text{g}^{-1}$)。干 材 上 部 极差大于中部和下部，变异系数也大于中部和下部，干材下部的极差和变异系数最小，说明干材下部干物质热值比较稳定。对所有干材样本进行方差齐性检验，结果表明方差非齐性 ($P=0.049<0.05$)。同一器官的不同部分进行比较检验得到，干材上部与中部干物质热值无显著性差异 ($P=0.115>0.05$)，干材上部与下部之间存在显著性差异 ($P=0.024<0.05$)，干材中部与下部之间无显著性差异 ($P=0.751>0.05$)。根据干材上、中、下 3 部分干质量加权得出干材干物质热值 $18.308\ 9\ \text{kJ} \cdot \text{g}^{-1}$ 。

根部干物质热值以细根值最高，大小顺序为细根 ($18.789\ 0\ \text{kJ} \cdot \text{g}^{-1}$) > 根 茎 ($18.371\ 2\ \text{kJ} \cdot \text{g}^{-1}$) > 粗 根 ($18.121\ 8\ \text{kJ} \cdot \text{g}^{-1}$)。地下的细根极差和变异系数明显高于根茎和粗根。根部干物质热值方差齐性，经两两比较，根部不同部分之间的干物质热值未呈现出显著性差异，所得 P 值均大于 0.05。

表 1 各项指标相关性分析
Table 1 Correlation analysis of various indicators

指标 Index	项目 Item	干物质热值 / ($\text{kJ} \cdot \text{g}^{-1}$) Gross caloric value	灰分含量 / % Ash content	去灰分热值 / ($\text{kJ} \cdot \text{g}^{-1}$) Ash free calorific value
树干干物质热值 Gross caloric value of trunk	Pearson 相关性	1	-0.188	0.993**
	显著性 (双侧)		0.067	0.000
	N	96	96	96
树根干物质热值 Gross caloric value of root	Pearson 相关性	1	-0.234	0.895**
	显著性 (双侧)		0.212	0.000
	N	30	30	30
全株干物质热值 Gross caloric value of whole plant	Pearson 相关性	1	-0.713*	0.958**
	显著性 (双侧)		0.021	0.000
	N	10	10	10

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。
Note: * at 0.05 significant level (bilateral); ** at 0.01 significant level (bilateral).

根据根部各部分干质量加权得出根部干物质热值为 18.355 8 kJ · g⁻¹。

2.2.2 灰分含量分析 如表 3 所示,干材的灰分含量大小顺序为上部 (1.08%) > 中部 (0.96%) > 下部 (0.94%),各部分灰分含量的极差位于 1.14~1.51 之间,干材上部极差最大为 1.51,但变异系数波动较大,最小值为干材中部 31.03%,干材下部变异系数为 40.69%,说明干材灰分含量值稳定性差。经检验干材灰分含量方差呈齐性 ($P=0.072>0.05$),将干材不同部分进行多重比较,干材上部、中部和下部之间未呈现显著差异。根据各部分干质量加权得出干材灰分含量为 0.951 1%。

根部各部分灰分含量多少顺序为细根 (7.28%) > 根 茎 (5.58%) > 粗 根 (5.03%),各部分极差在 4.79~7.22 之间,变异系数的范围为 26.65%~39.99%,各样本值之间离散稍大,灰分含量值稳定性较差。将树根样本数据进行方差齐性检验 ($P=0.154>0.05$)。通过两两比较显示根茎与粗根、根茎与细根之间差异不显著,粗根与细根之间呈显著性差异 ($P=0.018<0.05$)。根据各部分干质量加权得出根部灰分含量为 5.400 1%。

2.2.3 去灰分热值分析 由表 4 可知,欧洲山杨干材的去灰分热值大小顺序为上部 (18.829 0 kJ · g⁻¹) > 中部 (18.497 3 kJ · g⁻¹) > 下部 (18.409 4 kJ · g⁻¹),极差最大为 2.28,变异系数也在 4% 以内,表明干材的去灰分热值比较稳定。经方差检验显示齐性

表 2 树干和根部不同部分干物质热值
Table 2 Gross caloric value in different parts of trunk and root

类型 Type	样本数 Number	均值 ± 标准差 / (kJ · g ⁻¹) Mean ± SD	极差 / (kJ · g ⁻¹) Range	变异系数 / % CV
干材上 Upper trunk	32	18.626 2 ± 0.690 0	2.38	3.70
干材中 Middle trunk	32	18.320 7 ± 0.501 6	1.94	2.74
干材下 Lower trunk	32	18.235 9 ± 0.435 1	1.74	2.39
根茎 Root	10	18.371 2 ± 0.439 9	1.55	2.39
粗根 Thick root	10	18.121 8 ± 0.831 7	2.87	4.59
细根 Fine root	10	18.789 0 ± 1.269 1	4.71	6.76

表 3 同一器官不同部分灰分含量
Table 3 Ash content in different parts of the same organ

类型 Type	样本数 Number	均值 ± 标准差 Mean ± SD	极差 Range	变异系数 CV
干材上 Upper trunk	32	1.080 1 ± 0.419 1	1.51	38.80
干材中 Middle trunk	32	0.956 3 ± 0.296 7	1.14	31.03
干材下 Lower trunk	32	0.942 0 ± 0.383 3	1.49	40.69
根茎 Root	10	5.578 1 ± 2.230 6	6.01	39.99
粗根 Thick root	10	5.028 2 ± 1.340 0	4.79	26.65
细根 Fine root	10	7.281 3 ± 2.274 3	7.22	31.24

($P=0.096>0.05$)，运用方差分析进行多重比较，得到干材的上部与中部 ($P=0.017<0.05$)、上部与下部 ($P=0.003<0.05$) 之间的去灰分热值存在显著性差异，中部与下部 ($P=0.520>0.05$) 之间未呈现差异显著性。

根茎去灰分热值的大小为细根 ($20.264\ 0\ \text{kJ}\cdot\text{g}^{-1}$) > 根茎 ($19.461\ 4\ \text{kJ}\cdot\text{g}^{-1}$) > 粗根 ($19.076\ 4\ \text{kJ}\cdot\text{g}^{-1}$)。极差细根最大为 4.26，变异系数在 2.46%~5.54% 之间，各部分去灰分热值波动不大。树根处去灰分热值方差齐性，粗根与细根之间呈显著性差异 ($P=0.005<0.05$)，其余部分之间未呈现出显著性差异。根据各部分干质量加权得出干材去灰分热值 $19.405\ 4\ \text{kJ}\cdot\text{g}^{-1}$ 。

2.3 地上部分热值及灰分含量分析

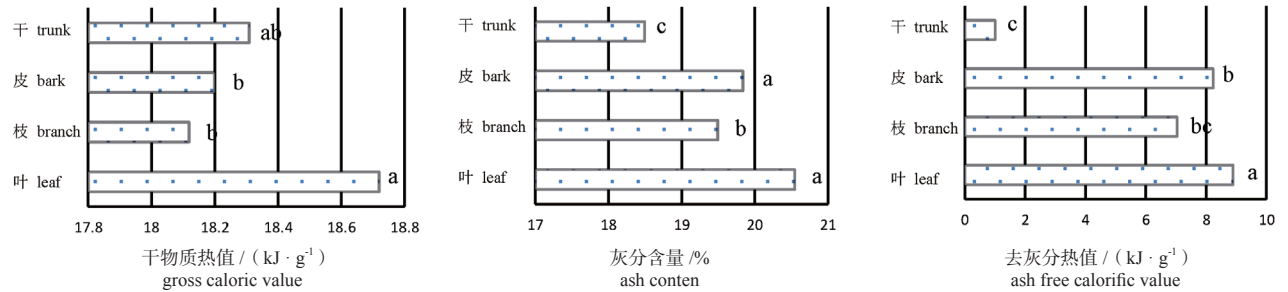
2.3.1 不同器官热值及灰分含量分析 将欧洲山杨地上部分的干、皮、枝和叶按各组分干质量分别加权求得均值。由图 1 可知，欧洲山杨叶部

的干物质热值、灰分含量、去灰分热值均明显高于枝、皮和干部。干物质热值的大小顺序为：叶 ($18.719\ 6\ \text{kJ}\cdot\text{g}^{-1}$) > 干 ($18.308\ 9\ \text{kJ}\cdot\text{g}^{-1}$) > 皮 ($18.198\ 8\ \text{kJ}\cdot\text{g}^{-1}$) > 枝 ($18.118\ 9\ \text{kJ}\cdot\text{g}^{-1}$)，叶部干物质热值明显高于其它器官。各个器官的干物质热值除叶与枝、叶与皮之间存在显著差异 (图 1)，其余均不存在显著差异；灰分含量大小顺序为：叶 ($8.887\ 1\%$) > 皮 ($8.223\ 1\%$) > 枝 ($7.030\ 0\%$) > 干 ($0.995\ 8\%$)，叶与皮、叶与干、枝与皮、枝与干、皮与干之间的灰分含量存在显著性差异；去灰分热值与灰分含量顺序一致：叶 ($20.264\ 0\ \text{kJ}\cdot\text{g}^{-1}$) > 皮 ($20.264\ 0\ \text{kJ}\cdot\text{g}^{-1}$) > 枝 ($20.264\ 0\ \text{kJ}\cdot\text{g}^{-1}$) > 干 ($20.264\ 0\ \text{kJ}\cdot\text{g}^{-1}$)，叶与枝、叶与皮、叶与干、枝与干、皮与干的去灰分热值存在显著性差异。

如图 2 所示，各器官的干物质热值、去灰分热值和灰分含量随着胸径的增加未呈现出明显规

表 4 同一器官不同部分去灰分热值
Table 4 Ash free calorific value in different parts of the same organ

类型 Type	样本数 Number	均值 ± 标准差 / ($\text{kJ}\cdot\text{g}^{-1}$) Mean ± SD	极差 / ($\text{kJ}\cdot\text{g}^{-1}$) Range	变异系数 / % CV
干材上 Upper trunk	32	$18.829\ 0 \pm 0.675\ 4$	2.28	3.59
干材中 Middle trunk	32	$18.497\ 3 \pm 0.492\ 2$	1.95	2.66
干材下 Lower trunk	32	$18.409\ 4 \pm 0.438\ 5$	1.64	2.38
根茎 Root	10	$19.461\ 4 \pm 0.469\ 3$	1.74	5.54
粗根 Thick root	10	$19.076\ 4 \pm 0.702\ 5$	2.29	2.46
细根 Fine root	10	$20.264\ 0 \pm 1.266\ 8$	4.26	3.53



注：小写字母表示不同器官在 0.05 水平下的差异显著。
Note: lowercase letters indicate significant differences at 0.05 levels between organs.

图 1 地上不同器官热值及灰分含量

Fig.1 Caloric value and ash content of different organs above ground

律。从干物质热值来看,随着胸径的增加,干、皮的趋势干物质热值未出现较大波动,走势基本一致,枝和叶的干物质热值最大值均出现于胸径43 cm处,枝的干物质热值最小值在32 cm;皮的灰分含量在胸径12~16 cm及32~40 cm处呈平稳状态,枝与叶的灰分含量在胸径26 cm出现最低值,而干的灰分含量值在此胸径处达到最高;干的去灰分热值在所有器官中明显较低,枝的去灰分热值在胸径26~42 cm之间波动较大,皮的去灰分热值相对平稳,叶的去灰分热值明显高于其它器官。

2.3.2 不同龄组各器官热值及灰分含量分析 不同龄组不同器官的干物质热值、灰分含量和去灰分热值如图表所示。以标准误差为基础生成误差线,可得干物质热值数值的精度稍高,灰分含量数据误差稍大。

由图3可知,干和枝的干物质热值在不同龄组之间不存在显著性差异,皮的干物质热值在中龄林和幼龄林、成熟林之间存在显著性差异,叶的干物质热值在成熟林和幼龄林、中龄林、近熟林之间存在显著性差异;枝的灰分含量在不同龄

组之间不存在显著差异,干的灰分含量在近熟林和中龄林、成熟林之间呈现显著性差异,成熟林和幼龄林、中龄林的皮的灰分含量存在显著性差异,叶部的灰分含量在幼龄林和近熟林、成熟林及中龄林和成熟林之间呈现显著差异;去灰分热值各龄组之间的差异显著性与干物质热值表现完全一致。

2.4 全株热值及灰分含量分析

欧洲山杨的干物质热值、灰分含量、去灰分热值的大小顺序分别为:叶>根>干>枝>皮,干>根>枝>皮>叶,叶>根>枝>皮>干。将各器官的特征值与干质量加权得到全株的平均干物质热值、灰分含量和去灰分热值分别为:18.316 4 $\text{kJ} \cdot \text{g}^{-1}$ 、4.399 6%、19.171 5 $\text{kJ} \cdot \text{g}^{-1}$ 。由表5可知,干物质热值在不同器官之间没有显著性;不同器官的灰分含量差异显著,主要为干与皮、枝、叶、根之间的差异;干与皮、枝、叶、根以及枝与叶、叶与根之间的去灰分热值存在显著性差异。从极差和变异系数来看,干物质热值及去灰分热值的极差范围在1~4之间,变异系数在5.10%以内,数值比较稳定;灰分含量的极差范围在

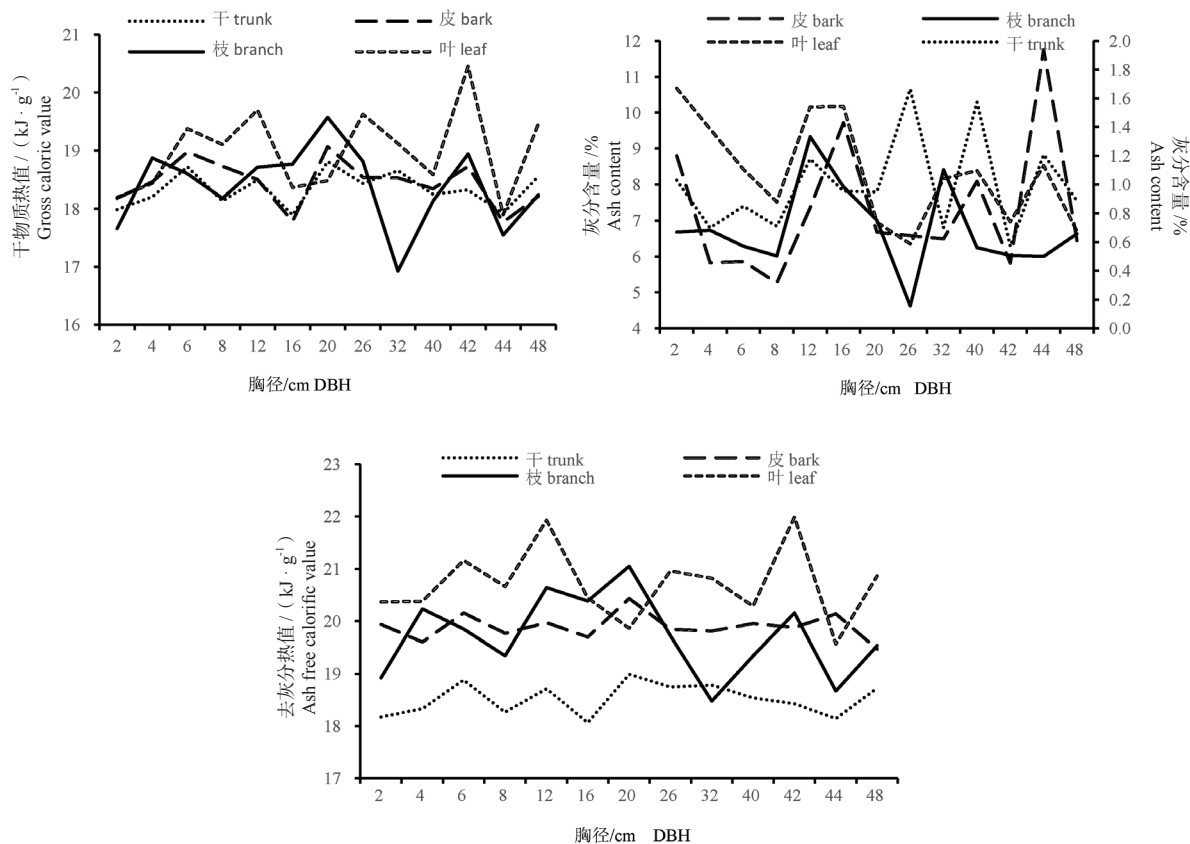
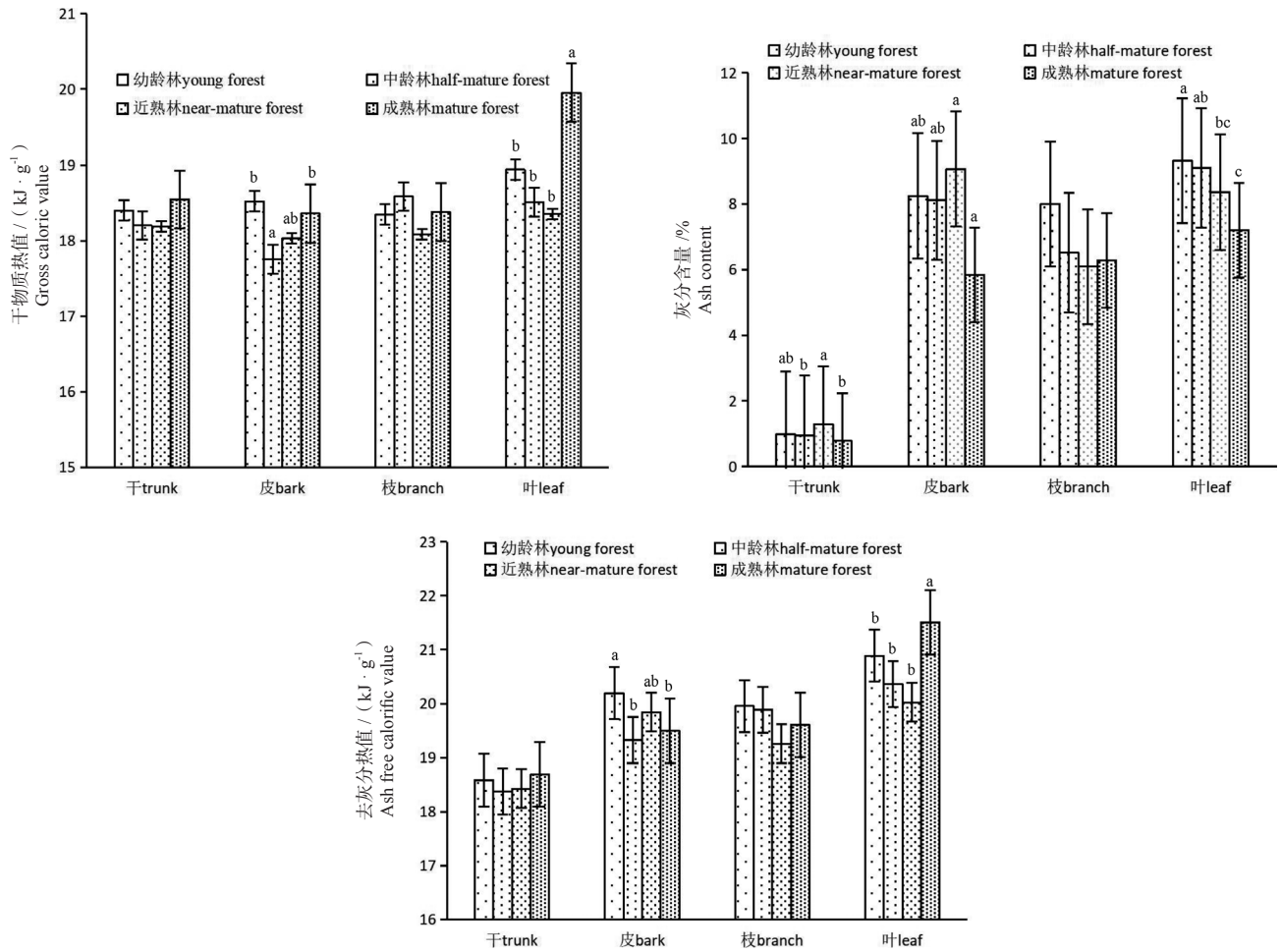


图2 热值及灰分含量变化趋势

Fig.2 Change trend of caloric value and ash content



注：小写字母表示各器官不同龄组之间在 0.05 水平下的差异显著性。

Note: the lowercase letters in different significance at 0.05 levels between organ in different age groups.

图 3 不同龄组热值及灰分含量

Fig.3 Histogram of caloric value and ash content in different age groups

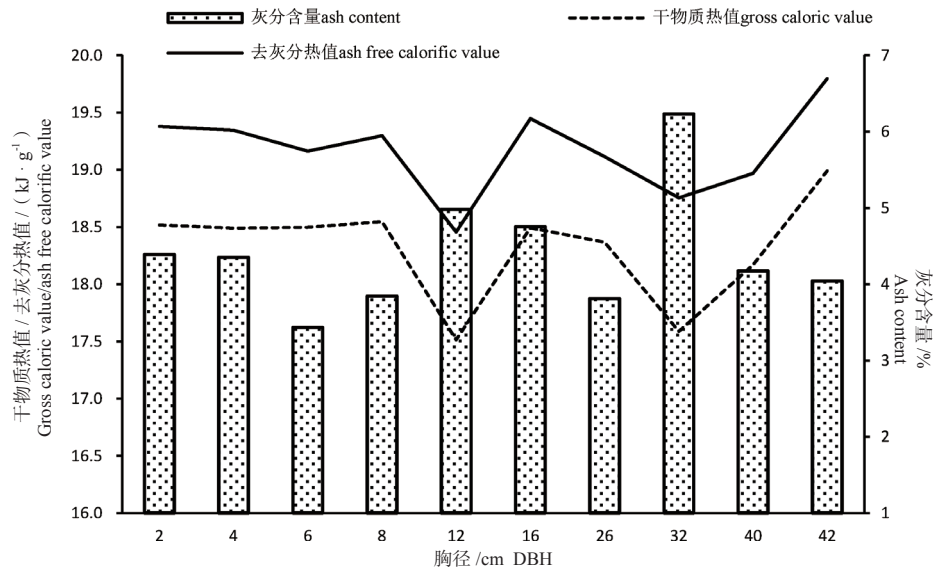


图 4 全株热值及灰分含量变化

Fig.4 Change of caloric value and ash content of whole plant

表 5 欧洲山杨热值及灰分含量
Tab.5 Caloric value and ash content of *Populus tremula*

指标 Index	器官 Organ	均值 ± 标准差 Mean ± SD	极小值 Min	极大值 Max	极差 Range	变异系数 /% CV
干物质 热值 / (kJ · g ⁻¹) Gross caloric values	干	18.412 1 ± 0.431 7a	17.739 8	18.809 9	1.07	2.34
	皮	18.181 9 ± 0.537 0a	17.155 2	18.972 2	1.81	2.95
	枝	17.973 1 ± 0.974 1a	16.032 2	18.933 2	2.90	5.42
	叶	18.943 9 ± 0.966 1a	17.920 2	21.431 2	3.51	5.10
	根	18.355 7 ± 0.596 3a	17.298 6	19.362 4	2.06	3.25
灰分含量 /% Ash content	干	0.979 7 ± 0.266 2c	0.700 00	1.574 6	0.87	27.17
	皮	8.340 7 ± 2.611 8ab	4.659	13.947 1	9.28	31.31
	枝	7.312 7 ± 1.482 3ab	5.260 1	9.770 1	4.51	20.27
	叶	9.058 9 ± 1.125 6a	7.155	10.467 3	3.31	12.43
	根	5.400 0 ± 1.468 5b	3.813 4	8.671 9	4.85	27.19
去灰分 热值 / (kJ · g ⁻¹) Ash free caloric value	干	18.594 2 ± 0.438 3d	17.868	19.054 7	1.18	2.36
	皮	19.848 3 ± 0.739 9ab	18.469 9	21.183 7	2.71	3.73
	枝	19.383 2 ± 0.831 0bcd	17.768 2	20.381 9	2.61	4.29
	叶	20.824 5 ± 0.861 4a	19.978 2	23.082 8	3.10	4.14
	根	19.405 4 ± 0.441 1bc	18.943 3	20.130 1	1.18	2.27

注：小写字母表示不同器官在 0.05 水平下的差异显著。
Note: lowercase letters indicate significant differences at 0.05 levels between organs.

0.87~9.28 之间，变异系数在 12%~32% 之间，数值波动稍大。

根据欧洲山杨各器官干、皮、枝、叶、根的干质量加权获得样木整株的干物质热值、灰分含量和去灰分热值，并以样木胸径为横坐标，去灰分热值为主纵坐标，灰分含量为次纵坐标绘制组合图。如图 4 所示，径阶 2~8 cm 间干物质热值比较稳定，去灰分热值呈现轻微下降趋势，灰分含量；径阶 8~40 cm 间干物质热值与去灰分热值同表现为下降—升高—下降—升高状态，灰分含量的趋势在此区间与其它二值呈相反状态，在干物质热值和去灰分热值较低点，而灰分含量值则较高；径阶 40 cm 以后，干物质热值及去灰分热值呈上升趋势，去灰分含量未现明显变化。

3 讨论与结论

植物热值作为能源植物筛选和评价的标准之一，不仅反映了其受环境制约的生态学属性，也反映了自身遗传学的生物学特性^[23]。灰分含量反映了植物在与环境共同作用的过程中对矿物质元素（钙、镁等）吸收和积累的总和^[24]。本文通过研究欧洲山杨同一器官不同部分、地上不同器官及不同龄组的干物质热值、灰分含量和去灰分热

值，结论如下。

（1）树干干物质热值及灰分含量由上至中、下逐渐降低及干材不同高度之间大都存在的显著差异与柳雪梅等^[7]的研究结果一致。树根的热值及灰分含量表现为细根>根茎>粗根，只有粗根与细根的灰分含量之间呈显著性差异。树干、树根的干物质热值与灰分含量呈现不显著的负相关关系，与李宏等^[25]对克拉玛依 50 个树种干部的热值及灰分含量之间的相关性一致。

（2）地上部分及全株欧洲山杨各器官的干物质热值和去灰分热值都是叶部最高，全株欧洲山杨的干部灰分含量最高，叶部最低，大部分器官之间存在显著性差异。全株欧洲山杨的干物质热值与去灰分热值存在极显著相关，与灰分含量呈现显著性负相关，同多位学者对植物热值及灰分含量相关性分析结论一致^[9,11]。

欧洲山杨叶部的热值及灰分含量均高于其它器官，与罗艳等^[26]的研究结果一致，可能欧洲山杨生长快，叶片进行光合作用比较活跃。相关研究表明，植物体内蛋白质含量与热值呈正相关关系^[27]，估计与叶片含有较高的蛋白质和脂肪^[28]，能合成一些高能物质^[29]产生高的热值也存在很大相关性。其平均干物质热值

为 $18.3164 \text{ kJ} \cdot \text{g}^{-1}$ ，低于内蒙古浑善达克沙地^[30]及羊草草原^[11]的平均热值，高于青藏高原地区水生植物叶片^[31]的平均热值及世界陆地植物平均热值 $17.78 \text{ kJ} \cdot \text{g}^{-1}$ ^[32]，但低于全国的平均热值 $19.122 \text{ kJ} \cdot \text{g}^{-1}$ ^[13]；平均灰分含量为 4.399 6%，高于小兴安岭主要树种的平均灰分含量^[5]；平均去灰分热值为 $19.1715 \text{ kJ} \cdot \text{g}^{-1}$ ，小于小兴安岭主要树种的平均去灰分热值 $21.03 \text{ kJ} \cdot \text{g}^{-1}$ ^[5]。

欧洲山杨的平均热值高于世界陆地植物平均热值，接近于新疆地区的人工阔叶林木热值，再加上其较快的生长速度，是很有潜力的林木生物质能源树种，可作为新疆区域的备选能源植物。

参考文献

- [1] 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.
- [2] 李顺龙, 王耀华, 宋维明. 发展林木生物质能源对二氧化碳减排的作用[J]. 东北林业大学学报, 2009, 37(4): 83-85.
- [3] 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.
- [4] 张红爱, 蔡安斌. 广东省林下植物碳含量和热值特征分析[J]. 林业与环境科学, 2017, 33(2): 42-47.
- [5] 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.
- [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[J]. 北京林业大学学报(自然科学版), 2005, 27(2): 6-12.
- [7] 柳雪梅. 我国4种主要针阔叶树种的热值和单木储能量研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2020.
- [8] 唐炎林, 曹敏, 唐建维, 等. 西双版纳热带季节雨林优势植物热值[J]. 生态学杂志, 2010, 29(3): 427-433.
- [9] 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(1): 114-120.
- [10] 董周焱, 柏新富, 侯玉平, 等. 胶东滨海8种树木叶片热值、建成成本及其适应能力[J]. 林业科学, 2015, 51(3): 8-15.
- [11] 王丽, 张军, 杨涛, 等. 不同草皮挖取迹地湿草甸植物热值及灰分含量分析[J]. 草地学报, 2017(3): 373-378.
- [12] 高凯, 谢中兵, 徐苏铁, 等. 内蒙古锡林河流域羊草草原15种植物热值特征[J]. 生态学报, 2012, 32(2): 588-594.
- [13] 张清海, 叶功富, 林益明. 滨海沙地木麻黄凋落物分解过程中热值的动态变化[J]. 林业科学研究, 2005(4): 455-459.
- [14] 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.
- [15] 何晓, 包维楷, 辜彬, 等. 中国高等植物干质量热值特点[J]. 生态环境, 2007(3): 973-981.
- [16] 刘灿, 李宏. 四种杨属植物的热值及灰分含量的比较[J]. 中南林业科技大学学报(自然科学版), 2010, 30(10): 24-28.
- [17] 郑朝晖, 马江林, 孙守文, 等. 新疆8年生银新杨热值与含碳率特征分析研究[J]. 福建林业科技, 2011, 38(4): 21-25.
- [18] 郑朝晖, 马春霞, 李基勇, 等. 新疆6年生白榆热值与含碳率特征分析研究[J]. 西部林业科学, 2011, 40(3): 30-34.
- [19] 李新平. 欧洲山杨适应性研究[J]. 山西林业科技, 1992, 12(4): 18-21.
- [20] 国家林业局. 森林资源规划设计调查技术规程: GB/T26424-2010[S]. 北京: 中国标准出版社, 2010.
- [21] 曾伟生, 张会儒, 唐守正. 立木生物量建模方法[M]. 北京: 中国林业出版社, 2011.
- [22] 苏晓颖, 徐霞, 姜久菊, 等. 乔木树种含碳系数和储能系数的测定方法及步骤[J]. 内蒙古林业调查设计, 2011, 34(6): 103-105.
- [23] 林恬. 森林生态系统植物热值的研究综述[J]. 台湾农业探索, 2012(5): 69-72.
- [24] 郭水良, 黄华, 晁柯, 等. 金华市郊10种杂草的热值和灰分含量及其适应意义[J]. 植物研究, 2005, 25(4): 460-464.
- [25] 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): 29-36.
- [26] 罗艳, 唐才富, 董旭, 等. 青海省主要造林树种的热值和灰分含量特征[J]. 中南林业调查规划, 2015, 34(1): 42-47.
- [27] 杨贵福, 邢坤, 李耕, 等. 大叶藻(*Zostera marina*)的热值和元素含量(碳、氮、磷)及其相关性[J]. 海洋与湖沼, 2015, 46(1): 212-220.
- [28] GOLLEY F B. Caloric value of wet tropical forest vegetation[J]. Ecology, 1969, 50(3): 517-519.
- [29] OVINGTON J D, HEITKAM P D. The accumulation of energy in forest plantations in Britain[J]. Journal of Ecology, 1960, 48(3): 639-646.
- [30] 高凯, 韩国栋, 于永奇, 等. 浑善达克沙地14种植物热值特征[J]. 生态学杂志, 2015, 34(2): 341-346.
- [31] 汪洋, 苗琳琳, 于丹, 等. 青藏高原3种生活型水生植物的热值及环境的影响[J]. 植物生态学报, 2017, 41(2): 209-218.
- [32] GUO J X, WANG R D, BAO G Z. Caloric value of north-east *Aneurolepidium chinense* grassland species[J]. Acta Phytocologica Sinica, 2001, 25(6): 746-750.