

柳恒饶,刘光斌,彭山青,等. 晚松不同树龄不同部位的化学成分和热值研究[J]. 江苏农业科学,2016,44(9):213-217.

doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2016.09.061

# 晚松不同树龄不同部位的化学成分和热值研究

柳恒饶<sup>1</sup>, 刘光斌<sup>1</sup>, 彭山青<sup>1</sup>, 李林检<sup>1</sup>, 刘苑秋<sup>2</sup>, 陈丹凤<sup>2</sup>, 黄国贤<sup>2</sup>

(1. 江西农业大学应用化学研究所, 江西南昌 330045; 2. 江西农业大学林学院, 江西南昌 330045)

**摘要:**研究了晚松不同树龄的叶、枝、干各部位的化学成分和热值,结果表明:晚松在不同树龄间各种化学成分均不存在显著性差异。不同部位间各化学成分关系如下:水分平均含量在 46% 左右,不同部位间水分含量不存在显著性差异;灰分平均含量为叶 2.5%、枝 1.3%、干 0.6%,不同部位间的灰分存在极显著差异,表现出叶 > 枝 > 干的规律;纤维素平均含量为叶 19.2%、枝 26.9%、干 33.3%,木质素平均含量为叶 12.2%、枝 30.5%、干 31.1%,不同部位间纤维素、木质素含量存在极显著差异,都表现出干 > 枝 > 叶的规律;半纤维素平均含量为叶 11.2%、枝 13.5%、干 12.8%,不同部位间半纤维素含量不存在显著性差异;粗脂肪平均含量为叶 15.3%、枝 12.1%、干 12.9%,不同部位间粗脂肪含量存在显著性差异,叶中粗脂肪含量最高;可溶性糖平均含量为叶 7.4%、枝 2.6%、干 2.1%,不同部位间可溶性糖含量存在极显著差异,表现出干 > 枝 > 叶的规律;淀粉平均含量为叶 2.6%、枝 6.4%、干 2.8%,不同部位间淀粉含量存在极显著差异,枝的含量最高;单宁平均含量为叶 2.3%、枝 2.9%、干 3.5%,不同部位间单宁含量不存在显著性差异;蛋白质平均含量为叶 6.6%、枝 2.2%、干 1.5%,不同部位间蛋白质含量存在极显著差异,叶的含量最高。晚松热值较高,平均为 20 645 kJ/kg 左右,热值在不同年龄间存在显著性差异,树龄 6 年时热值最高;在不同部位间不存在显著性差异。而且晚松还具有较高的生物质产量和较强的生态适应性,因此,晚松是一种优良的生物质能源树种。

**关键词:**生物质能源;晚松;化学成分;热值

**中图分类号:** S781.41;TK6 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-1302(2016)09-0213-05

当今世界主要以煤炭、石油、天然气等化石燃料作为主要的能源物质,这些化石燃料不仅具有不可再生性,而且化石燃

料的大量利用还造成大气污染等一系列环境问题。开发探索可再生的绿色替代能源是未来能源产业发展的重要方向<sup>[1]</sup>。生物质能源就是一种高效清洁的可再生能源,具有可再生、来源广、污染小、不加剧温室效应等优点<sup>[2]</sup>,可替代化石燃料缓解人类面临的能源危机和环境困境,寻找品质优良的能源植物是发展生物质能源产业的关键。

晚松(*Pinus serotina*)原产美国东南部,我国自 20 世纪 60 年代开始引种并开展相关研究。目前,对晚松的研究主要集中在生理和种植方面。而对晚松生物质能源利用方面的研究还较少,因此对晚松作为生物质能源树种的各方面性能进行系统的研究就显得尤为重要。

李高阳等提出生物质产量、生态适应性、化学成分、热值

的特征及其分类学意义[J]. 生命科学研究,2006,10(4):328-332.

[10] Prychid C J, Furness C A, Rudall P J. Systematic significance of cell inclusions in Haemodoraceae and allied families: silica bodies and tapetal raphides[J]. Annals of Botany, 2003, 92(4): 571-580.

[11] Prychid C J, Rudall P J. Calcium oxalate crystals in monocotyledons: a review of their structure and systematics[J]. Annals of Botany, 1999, 84: 725-739.

[12] 陈 薇. 十五种凤仙花属(*Impatiens* L.)植物的解剖学及种子的微形态学研究[D]. 长沙:湖南师范大学,2007:25-29.

[13] 丛义艳,刘克明,陈 薇,等. 6 种凤仙花属植物叶表皮特征的微形态学研究[J]. 湖南师范大学:自然科学学报,2007,30(1):68-71.

[14] 高 萌,许为斌,杨海灵,等. 中国石灰岩专性凤仙花叶表皮特征及其分类学意义[J]. 广西植物,2011,31(6):730-734,843.

[15] 余明艳. 野生观赏植物天全凤仙生物学特性初步研究[D]. 雅安:四川农业大学,2010:23-29.

收稿日期:2016-02-10

基金项目:江西省科技成果重点转移转化计划(编号:20143BB190009);江西省南昌市科技支撑计划(编号:2014HHC006);江西农业大学研究生创新专项资金(编号:NDYC 2014-08);江西省重点研发计划(编号:20161BBF60083)。

作者简介:柳恒饶(1989—),男,山东滕州人,硕士研究生,主要从事生物质能源研究。Tel: (0791) 83813574; E-mail: liuhengrao@163.com。

通信作者:刘光斌,副研究员,主要从事植物生物化学和生物质能源研究。Tel: (0791) 83813574; E-mail: lgb267@126.com。

[2] 宋 伟. 北方地区非洲凤仙栽培生产技术[J]. 园艺与种苗, 2014(9):41-42.

[3] 顾亚东,张华丽,张西西. 非洲凤仙花粉萌发条件及花粉活力研究[J]. 北方园艺,2011(6):65-67.

[4] 刘泽静,张 玲. 盐胁迫对非洲凤仙花实生苗细胞膜透性和丙二醛含量的影响[J]. 现代农业科技,2012(21):186,192.

[5] 王晶晶,蔡 赫,李然红,等. 非洲凤仙花细胞悬浮培养条件的优化[J]. 牡丹江师范学院学报:自然科学版,2009(3):13-14.

[6] 陈健辉,缪绅裕,黄丽宜,等. 海桑和无瓣海桑叶片结构的比较研究[J]. 植物科学学报,2015,33(1):1-8.

[7] 毛晓霞. 石蜡切片制作方法的改良[J]. 安徽农学通报,2013,19(8):15-16.

[8] 马 红,陶 波. 不同叶龄鸭跖草叶片显微结构观察[J]. 作物杂志,2008(4):39-42.

[9] 陈 薇,刘克明,丛义艳,等. 草酸钙结晶在几种凤仙花属植物中

等4个方面是衡量能源植物的最重要指标<sup>[3]</sup>。在生物质产量方面,陈丹凤等研究了不同种植密度下晚松的生物量,发现种植密度为2 m×2 m时,树龄9年晚松生物量可达到226.82 t/hm<sup>2</sup><sup>[4]</sup>,以晚松平均水分含量46%计算,可推算出晚松干质量生物质的生产力为13.6 t/(hm<sup>2</sup>·年)。在生态适应性方面,卜尚平等<sup>[5]</sup>、孟令国等<sup>[6]</sup>、程磊等<sup>[7]</sup>的研究表明晚松具有分布范围广、抗寒、耐盐碱、耐污染等特性。但晚松在化学成分和热值2个方面的研究还基本处于空白。

鉴于此,本研究对晚松在不同树龄的叶、枝、干各部位的主要化学成分(水分、灰分、纤维素、半纤维素、木质素、粗脂肪、可溶性糖、淀粉、单宁、粗蛋白质等)和热值进行测定,摸清晚松各化学成分的含量以及各化学成分在不同树龄阶段和不同部位的关系,为合理利用晚松生物质能源提供理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验材料

1.1.1 材料与试剂 所使用晚松样品取自江西南昌江西农业大学晚松林苗圃,苗圃地属亚热带季风气候,年平均气温在17.1~17.8℃之间,年平均降水量1 567.7~1 654.7 mm,年平均日照时数1 772~1 845 h。

1.1.2 仪器与设备 新苗 DHG-914383-Ⅲ型烘干箱:上海新苗医疗器械制造有限公司;KWS 电阻马弗炉:沈阳市节能电炉厂;HC-200 型华晨高速多功能粉碎机:浙江省永康市金穗机械制造有限公司;集热氏磁力搅拌器:江苏省金坛市金城国胜实验仪器厂;昌吉 XPY-1A 型氧弹量热计:上海昌吉地质仪器有限公司;WFJ72 型可见分光光度计:上海光谱仪器有限公司;KDN-08A 凯氏定氮仪:浙江托普仪器有限公司。

### 1.2 试验方法

1.2.1 水分测定和样品预处理 将采集的晚松样品放入烘干箱内,在60℃条件下烘干至恒质量,称量烘干前后晚松样品的质量,并计算水分含量。将烘干后的样品粉碎并过40目筛,保存在干燥器中备用。

1.2.2 灰分测定方法 灰分是生物质中不能燃烧的部分,其化学成分主要是无机盐和矿物质氧化物。按照 NY/T 1881.5—2010 标准,在(500±10)℃条件下充分燃烧测定晚松各部位生物质中所含的灰分,通过计算样品在空气中燃烧后剩余物的质量占样品总质量的百分比来测定灰分。

1.2.3 纤维素、半纤维素、木质素测定方法 纤维素是由葡萄糖组成的大分子多糖,是细胞壁的主要成分,半纤维素是由几种不同类型的单糖构成的异质多聚体,木质素是复杂无定形结构的三维网状酚类高分子聚合物,这3种成分是木材的最主要成分。测定时按照范氏法测定纤维素、半纤维素、木质素的标准方法<sup>[8]</sup>进行测定,得到中性洗涤纤维(NDF)、酸性洗涤纤维(ADF)、硫酸洗涤残渣的质量分数,按照以下关系进行计算:

$$\text{半纤维素} = \text{NDF} - \text{ADF};$$

$$\text{纤维素} = \text{ADF} - \text{硫酸洗涤残渣};$$

$$\text{木质素} = \text{硫酸洗涤残渣} - \text{灰分}。$$

1.2.4 粗脂肪测定方法 松类与其他树种相比具有较高的脂肪含量,因此能在燃烧时释放较多的能量,本研究采用改进后的索氏提取法<sup>[9]</sup>测定晚松的粗脂肪含量。

1.2.5 晚松可溶性糖、淀粉测定方法 使用苯酚-硫酸法<sup>[10]</sup>测定可溶性糖和淀粉含量。(1)标准曲线绘制:按照文献<sup>[10]</sup>中的方法绘制标准曲线。(2)可溶性糖含量的测定:称取约0.1 g晚松木屑置于10 mL离心管中加入5 mL蒸馏水,在80℃水浴条件下提取30 min,冷却至室温后以3 500 r/min的转速离心10 min,将上清液移出,再加蒸馏水重复提取1次,将2次提取的上清液混合。用移液枪移取0.25 mL可溶性糖溶液稀释至5 mL(相当于稀释20倍),吸取2.0 mL稀释后的溶液加入6%苯酚溶液1.0 mL及浓硫酸5.0 mL摇匀,室温放置20 min于490 nm测吸光度,根据标准曲线计算多糖含量。(3)淀粉含量的测定:称取约0.2 g晚松木屑倒入50 mL离心管中按上述方法提取可溶性糖,离心后将上清液倒掉,重复提取1次弃上清。向离心管中加入18 mL蒸馏水放入沸水浴中加热15 min,再加入2 mL 9.2 mol/L高氯酸,提取15 min,使淀粉分解,以3 500 r/min的转速离心后吸取1 mL上清液,定容至10 mL(相当于稀释10倍),吸取2 mL稀释液置于比色管中,加入1 mL 6%苯酚溶液,然后沿管壁加5.0 mL浓硫酸,在490 nm下测吸光度,在标准工作曲线上计算相应的淀粉含量。

可溶性糖和淀粉的质量分数表示如下:

$$w = \frac{C \times 10^{-3} \times a \times V}{m} \times 100\%。$$

式中: $C$ 为分光光度法测得的可溶性糖或淀粉的浓度,mg/mL; $a$ 为稀释倍数; $V$ 为提取液的体积,mL; $m$ 为晚松的质量,g。

1.2.6 单宁含量测定方法 根据F-D法<sup>[11-12]</sup>测定晚松中单宁的含量。(1)F-D试剂的配制:称取50 g钨酸钠和10 g磷钼酸溶于100 mL蒸馏水中,并加入25 mL磷酸,加热回流2 h,冷却至室温后定容至500 mL。(2)标准曲线的绘制:配制不同浓度的单宁酸溶液,分别加入2 mL F-D试剂,5 mL 15%的碳酸钠溶液,在760 nm波长处测定吸光度,记录数据并绘制标准曲线。(3)晚松单宁提取与含量测定:称取1 g左右的晚松木屑,置于圆底烧瓶中,加入足量的苯,在85℃条件下冷水回流,加热5 h,趁热抽滤。取残渣,烘干后称取0.5 g残渣,置于圆底烧瓶中,加乙醇在75℃条件下提取1 h,抽滤后取滤液,按照(2)中的方法测定滤液中单宁的浓度。晚松中单宁质量浓度可表示为:

$$w = \frac{C \times V}{m_2} \times \frac{m_1}{m_2} \times 100\%。$$

式中: $C$ 为滤液中单宁浓度,g/mL; $V$ 为滤液的体积,mL; $m_1$ 为苯提取前称取的样品质量,g; $m_2$ 为乙醇提取前称取的样品质量,g。

1.2.7 蛋白质含量测定方法 根据凯氏定氮法<sup>[13]</sup>测定晚松中的蛋白质含量,称取1 g晚松样品,加入0.2 g硫酸铜、6 g硫酸钾、20 mL浓硫酸消解,将消解液定容至100 mL,取20 mL加入足量的碱液,至凯氏定氮仪中进行自动蒸馏,用2%的硼酸溶液收集生成的氨气,用配制好的已知浓度的盐酸溶液进行滴定,记录下消耗的盐酸体积。蛋白质的含量按如下公式计算:

$$w = \frac{C \times V \times M_N}{m} \times 5 \times 6.25 \times 100\%。$$

式中: $C$  为配制好的盐酸浓度,  $\text{mol/mL}$ ;  $V$  为滴定消耗的盐酸体积,  $\text{mL}$ ;  $m$  为称取的样品质量,  $\text{g}$ ;  $M_{\text{N}}$  为氮的摩尔质量,  $\text{g/mol}$ 。

1.2.8 热值测定方法 使用氧弹量热计<sup>[14]</sup>测定晚松的热值,先用苯甲酸测得氧弹量热计的热容,再称事先干燥粉碎好的晚松生物质燃料,压片、称质量、燃烧并记录温度变化作出雷诺图,求出燃烧前后系统的温度差  $\Delta T$ 。热值的计算公式如下:

$$Q_{\text{v}} = (C_{\text{R}} \Delta T - 12.1l) / m。$$

式中: $Q_{\text{v}}$  为晚松生物质的热值,  $\text{kJ/kg}$ ;  $C_{\text{R}}$  为氧弹量热计的热容,  $\text{kJ/}^{\circ}\text{C}$ ;  $\Delta T$  为燃烧前后系统的温度差,  $^{\circ}\text{C}$ ;  $l$  为引燃烧掉的  $\text{Cu-Ni}$  合金丝的长度,  $\text{cm}$ ;  $m$  为待测晚松生物质燃料的质量,  $\text{kg}$ 。

2 结果与分析

水分测定结果为占鲜质量的含量,其他各种成分都指占干质量的含量。每个样品重复测量 3 次,应用 SPSS 17.0 软件对数据进行分析,试验结果如下。

2.1 水分的测定结果

按照“1.2.1”节中水分测定方法,测定不同树龄晚松叶、枝、干各部位的水分,结果见表 1。对不同树龄晚松叶、枝、干各部位的水分含量进行方差分析,结果表明不同树龄不同部位间水分的含量均不存在显著性差异( $P > 0.05$ ),各部位平均含水率在 46% 左右。

表 1 不同树龄晚松不同部位水分含量测定结果

树龄 (年)	水分含量(%)		
	叶	枝	干
1	48.4±1.7	43.8±1.9	
4	50.2±2.3	43.9±1.2	49.0±2.1
6	43.5±2.2	42.3±2.5	43.3±1.4
10	49.1±1.5	46.6±2.6	49.6±1.1
23	42.6±2.0	48.1±1.4	45.0±1.7
34	41.3±2.1	48.0±1.9	45.7±1.8

2.2 灰分的测定结果

按照“1.2.2”节灰分的测定方法,测定不同树龄晚松各部位的灰分,结果见表 2。对晚松的灰分进行方差分析,结果表明不同树龄之间的晚松灰分含量不存在显著性差异( $P >$

表 4 不同树龄晚松不同部位纤维素、半纤维素、木质素含量测定结果

树龄 (年)	叶(%)			枝(%)			干(%)		
	纤维素含量	半纤维素含量	木质素含量	纤维素含量	半纤维素含量	木质素含量	纤维素含量	半纤维素含量	木质素含量
1	18.4±0.2	11.0±0.1	7.2±0.7	23.4±1.0	12.8±0.1	38.8±1.2			
4	19.1±0.5	8.9±0.9	15.8±0.7	27.1±0.9	15.9±0.4	28.7±1.1	33.2±1.8	7.0±0.2	33.8±1.9
6	17.5±0.4	9.5±0.2	13.2±0.4	26.5±0.6	10.9±0.4	27.5±1.3	32.3±1.0	11.2±0.6	31.2±1.1
10	20.1±0.3	12.5±0.3	11.9±0.0	29.0±0.5	11.5±0.2	31.0±1.3	26.9±0.8	7.6±1.0	38.9±1.4
23	19.5±0.5	12.0±0.3	13.4±0.2	27.3±0.3	14.2±0.1	28.3±0.7	37.5±0.7	14.6±0.3	26.6±1.0
34	20.4±0.2	13.4±0.2	11.9±0.1	28.1±0.4	16.3±0.3	28.8±0.9	36.8±0.2	23.5±0.5	25.2±0.5

可转化为糖类的纤维素和半纤维素被不可利用的木质素包裹,难以与纤维素酶或者微生物接触而降解为低聚糖类<sup>[3]</sup>,因此木质素含量越低越好,经计算晚松木质素的加权平均值为 29.1%。不同种类生物质的木质素含量如表 5 所示,与其他植物相比晚松的木质素含量处在中等水平,因此木质素含量对纤维素、半纤维素的降解影响不大。

2.4 粗脂肪含量的测定结果

按照“1.2.4”节的测定方法测得不同树龄晚松各部位的

0.05);晚松不同部位之间的灰分含量存在极显著差异( $P < 0.01$ ),表现出叶 > 枝 > 干的规律,其中叶的平均灰分为 2.5%,枝 1.3%,干 0.6%。按照树干占总生物量的 70.51%,树枝占 19.58%,树叶占 9.91% 来计算<sup>[15]</sup>,晚松的加权平均灰分含量为 0.9%,晚松与其他种类生物质的灰分含量对比如表 3 所示,从表 3 可以看出晚松和其他松类的灰分含量均在 1% 以下,远低于农作物秸秆。灰分越低可燃烧利用成分含量越高,单从灰分角度来看,晚松非常适合作为生物质能源植物开发利用。

表 2 不同树龄晚松不同部位灰分含量测定结果

树龄 (年)	灰分含量(%)		
	叶	枝	干
1	2.9±0.0	1.1±0.3	
4	1.9±0.1	1.1±0.3	0.3±0.0
6	2.2±0.2	1.3±0.1	0.4±0.0
10	2.3±0.1	1.4±0.1	0.7±0.1
23	2.6±0.1	1.5±0.2	0.8±0.0
34	2.8±0.2	1.3±0.1	0.8±0.1

表 3 不同生物质的灰分含量比较

生物质种类	灰分(%)	生物质种类	灰分(%)
晚松	0.9	速生柳	2.2
湿地松	0.4	棉秆	6.0
马尾松	0.4	玉米秸秆	6.5
杉木	0.3	小麦秸秆	7.6
杂交杨	2.1	水稻秸秆	11.8

2.3 纤维素、半纤维素、木质素的测定结果

按照“1.2.3”节的测定方法,测定不同树龄晚松各部位的纤维素、半纤维素、木质素含量,结果见表 4。对晚松纤维素、半纤维素、木质素的含量进行方差分析,结果表明不同年龄之间的晚松其纤维素、半纤维素、木质素的含量均不存在显著性差异( $P > 0.05$ );不同部位之间的纤维素、木质素含量存在极显著差异( $P < 0.01$ ),纤维素、木质素作为支撑树木质量的化学成分,在主干处的含量最高,在枝的含量次之,在叶的含量最少,表现出干 > 枝 > 叶的规律。不同部位间半纤维素含量不存在显著性差异( $P > 0.05$ )。

表 5 不同生物质的木质素含量比较

生物质种类	木质素含量(%)	生物质种类	木质素含量(%)
晚松	29.1	棉秆	30.1
火炬松	29.4	玉米秸秆	21.2
杂交杨	23.0	小麦秸秆	21.6
速生柳	22.7	水稻秸秆	10.2

粗脂肪含量,结果如表 6 所示。对不同树龄晚松各部位的粗

脂肪含量进行方差分析,结果表明不同树龄之间的晚松粗脂肪含量不存在显著性差异( $P>0.05$ );不同部位之间的粗脂肪含量存在显著差异( $P<0.05$ ),叶中的粗脂肪含量大于枝和干,枝和干的含量比较接近。

2.5 可溶性糖、淀粉含量的测定结果

按照“1.2.5”节的测定方法测得不同树龄晚松各部位的可溶性糖和淀粉含量(表7)。方差分析结果显示,不同树龄之间的晚松可溶性糖和淀粉含量均不存在显著性差异( $P>0.05$ ),不同部位之间的可溶性糖和淀粉含量均存在极显著差异( $P<0.01$ )。叶作为光合作用的器官,其可溶性糖含量

最大,表现出叶>枝>干的规律。枝的淀粉含量大于叶和干,叶和干之间的淀粉含量相差不大,不存在显著性差异。

表 6 不同树龄晚松不同部位粗脂肪含量测定结果

树龄 (年)	粗脂肪含量(%)		
	叶	枝	干
1	14.1±1.1	11.1±0.1	
4	16.1±0.7	13.5±0.5	15.1±0.3
6	16.1±0.6	14.1±0.2	14.9±0.5
10	17.9±0.9	10.5±0.9	13.3±0.5
23	14.6±1.0	12.1±0.1	11.5±0.1
34	13.1±0.6	11.1±0.5	9.7±0.8

表 7 不同树龄晚松不同部位可溶性糖、淀粉含量测定结果

树龄(年)	叶(%)		枝(%)		干(%)	
	可溶性糖含量	淀粉含量	可溶性糖含量	淀粉含量	可溶性糖含量	淀粉含量
1	5.8±0.2	2.8±0.2	2.0±0.2	4.7±0.4		
4	5.1±0.1	2.6±0.2	2.5±0.1	5.6±0.3	2.4±0.3	1.8±0.1
6	9.4±0.5	2.0±0.1	3.1±0.3	6.3±0.2	2.8±0.1	2.1±0.3
10	9.7±0.4	4.4±0.4	4.3±0.3	8.0±0.0	2.1±0.1	5.3±0.3
23	11.3±0.4	2.2±0.3	4.3±0.3	7.8±0.1	2.1±0.2	3.8±0.2
34	3.2±0.3	1.6±0.1	3.9±0.2	6.1±0.3	0.9±0.2	0.9±0.5

2.6 单宁含量的测定结果

按照“1.2.6”节的测定方法测得不同树龄晚松各部位的单宁含量,结果如表8所示。对不同树龄晚松各部位的单宁含量进行方差分析,结果表明不同树龄晚松不同部位间单宁含量均不存在显著性差异( $P>0.05$ ),含量分布在1.4%~4.7%之间。

表 8 不同树龄晚松不同部位单宁含量测定结果

树龄 (年)	单宁含量(%)		
	叶	枝	干
1	2.3±0.1	2.3±0.2	
4	1.9±0.2	2.8±0.3	4.7±0.1
6	2.8±0.2	3.3±0.1	3.4±0.1
10	1.1±0.1	3.3±0.3	3.5±0.2
23	2.7±0.1	3.0±0.3	4.3±0.1
34	3.1±0.3	2.8±0.1	1.4±0.1

2.7 蛋白质的测定结果

按照“1.2.7”节的测定方法测得不同树龄晚松各部位的蛋白质含量,结果如表9所示。对晚松的蛋白质含量进行方差分析,结果表明不同树龄之间的晚松其蛋白质含量不存在显著性差异( $P>0.05$ ),不同部位之间的蛋白质含量存在极显著差异( $P<0.01$ )。叶中的蛋白质含量明显大于枝和干;枝中的含量大于干,但差异性不显著。

2.8 热值测定结果

按照“1.2.8”节的测定方法测得不同树龄晚松各部位的燃烧热值,结果见表10。经计算晚松燃烧热值的加权平均值为20 645 kJ/kg,对晚松的热值进行方差分析,结果表明不同树龄之间的晚松热值存在显著性差异( $P<0.05$ ),树龄6年时的晚松热值达到最高,热值随树龄呈现出先增大后减小的趋势;不同部位间的热值不存在显著性差异( $P>0.05$ )。

热值是反映能源植物性能的一项重要指标,热值越高燃烧时放能越多,能源植物各成分的热值一般为纤维素14 099 kJ/kg、木质素26 292 kJ/kg、脂肪38 013 kJ/kg。与其

表 9 不同树龄晚松不同部位蛋白质含量测定结果

树龄 (年)	蛋白质含量(%)		
	叶	枝	干
1	8.3±0.5	2.6±0.1	
4	6.4±0.4	2.7±0.2	1.7±0.0
6	5.4±0.2	1.8±0.3	1.6±0.1
10	6.9±0.2	1.9±0.2	1.7±0.1
23	6.0±0.3	1.6±0.3	1.6±0.1
34	6.8±0.3	2.5±0.0	1.0±0.2

表 10 不同树龄晚松不同部位热值测定结果

树龄 (年)	热值(kJ/kg)		
	叶	枝	干
1	19 809±359	20 252±297	
4	20 148±389	20 327±368	20 933±105
6	21 953±230	21 059±376	21 226±368
10	20 737±205	20 478±263	20 812±146
23	21 038±401	20 382±364	20 641±184
34	20 093±213	20 520±355	19 859±305

他植物相比松类具有较高的脂肪含量,因此热值相对较高,得益于此晚松的热值高于其他种类生物质,不同种类生物质热值如表11所示。

表 11 不同生物物质的热值比较

生物质种类	热值(kJ/kg)
晚松	20 645
湿地松	19 914
马尾松	20 252
杉木	20 001
杂交杨	17 406
速生柳	17 385
棉秆	18 074
玉米秸秆	17 226
小麦秸秆	18 634
水稻秸秆	17 167

### 3 结论与讨论

(1)通过对晚松不同树龄不同部位间的主要化学成分进行研究,结果如下:

水分关系:叶的水分含量在 41.3% ~ 50.2% 之间,平均 45.9%;枝的水分含量在 42.3% ~ 48.1%,平均含量 45.5%;干的水分在 43.3% ~ 49.0%,平均含量 46.5%。不同树龄不同部位间水分含量均不存在显著性差异( $P > 0.05$ )。

灰分关系:叶的灰分在 1.9% ~ 2.9% 之间,平均含量 2.5%;枝的灰分在 1.1% ~ 1.5%,平均含量 1.3%;干的灰分 0.3 ~ 0.8,平均含量 0.6%,灰分含量处于较低水平。不同树龄之间的晚松灰分含量不存在显著性差异( $P > 0.05$ );晚松不同部位之间的灰分含量存在极显著差异( $P < 0.01$ ),表现出叶 > 枝 > 干的规律。

纤维素关系:叶的纤维素含量在 17.5% ~ 20.4% 之间,平均含量 19.2%;枝的纤维素含量在 23.4% ~ 29.0,平均含量 26.9%;干的纤维素含量在 26.9% ~ 37.5%,平均含量 33.3%。不同树龄之间的晚松纤维素含量不存在显著性差异( $P > 0.05$ );不同部位之间的纤维素含量存在极显著差异( $P < 0.01$ ),表现出干 > 枝 > 叶的规律。

半纤维素关系:叶的半纤维素含量在 8.9% ~ 13.4% 之间,平均含量 11.2%;枝的半纤维素含量在 10.9% ~ 16.3%,平均含量 13.5%;干的半纤维素含量在 7.0% ~ 23.5%,平均含量 12.8%。纤维素含量在不同树龄不同部位间均不存在显著性差异。

木质素含量关系:叶的木质素含量在 7.2% ~ 15.8%,平均含量 12.2%;枝的木质素含量在 27.5% ~ 38.8%,平均含量 30.5%;干的木质素含量在 25.2% ~ 38.9%,平均含量 31.1%。不同树龄之间的晚松木质素含量不存在显著性差异( $P > 0.05$ ),不同部位间的晚松木质素含量存在极显著差异( $P < 0.01$ ),表现出干 > 枝 > 叶的规律。

粗脂肪含量关系:叶的粗脂肪含量在 13.1% ~ 17.9%,平均含量 15.3%;枝的粗脂肪含量在 10.5% ~ 14.1%,平均含量 12.1%;干的粗脂肪含量在 9.7% ~ 15.1%,平均含量 12.9%。不同树龄之间的晚松粗脂肪含量不存在显著性差异( $P > 0.05$ );不同部位之间的粗脂肪含量存在显著差异( $P < 0.05$ ),叶中的粗脂肪含量大于枝和干。

可溶性糖含量关系:叶的可溶性糖含量在 3.2% ~ 11.3%,平均含量 7.4%;枝的可溶性糖含量在 2.0% ~ 4.3%,平均含量 2.6%;干的可溶性糖含量在 0.9% ~ 2.8%,平均含量 2.1%。不同树龄之间的晚松可溶性糖含量不存在显著性差异( $P > 0.05$ ),不同部位之间的可溶性糖含量存在极显著差异( $P < 0.01$ ),表现出叶 > 枝 > 干的规律。

淀粉含量关系:叶的淀粉含量在 1.6% ~ 4.4%,平均含量 2.6%;枝的淀粉含量在 4.7% ~ 8.0%,平均含量 6.4%;干的淀粉含量在 0.9% ~ 5.3%,平均含量 2.8%。不同树龄之间的晚松可溶性糖含量不存在显著性差异( $P > 0.05$ ),不同部位之间的淀粉含量存在极显著差异( $P < 0.01$ ),枝的淀粉含量大于叶和干。

单宁含量关系:叶的单宁含量在 1.1% ~ 3.1%,平均含

量 2.3%;枝的单宁含量在 2.3% ~ 3.3%,平均含量 2.9%;干的单宁含量在 1.4% ~ 4.7%,平均含量 3.5%。不同树龄不同部位间单宁含量均不存在显著性差异( $P > 0.05$ )。

蛋白质含量关系:叶的蛋白质含量在 5.4% ~ 8.3%,平均含量 6.6%;枝的蛋白质含量在 1.8% ~ 2.7%,平均含量 2.2%;干的蛋白质含量在 1.0% ~ 1.7%,平均含量 1.5%。不同树龄之间的晚松其蛋白质含量不存在显著性差异( $P > 0.05$ ),不同部位之间的蛋白质含量存在极显著差异( $P < 0.01$ ),叶中的蛋白质含量明显大于枝和干。

(2)通过对不同树龄晚松不同部位间的热值进行研究,结果表明晚松的平均热值在 20 645 kJ/kg 左右,与其他生物质相比处于较高水平。不同树龄之间的晚松热值存在显著性差异( $P < 0.05$ ),树龄 6 年时热值最高;不同部位间的热值不存在显著性差异( $P > 0.05$ )。若按照标准煤的热值为 29 260 kJ/kg 来计算,则 1 kg 晚松生物质燃料相当于 0.7 kg 标准煤的发热量。

总之,晚松不同树龄不同部位灰分含量低,可利用化学成分含量高,热值较高,而且晚松具有较高的生物质产量和较强的生态适应性,因此,晚松是一种优良的生物质能源树种。

### 参考文献:

- [1]周志强. 中国能源现状、发展趋势及对策[J]. 能源与环境,2008(6):9-10.
- [2]王 欧. 中国生物质能源开发利用现状及发展政策与未来趋势[J]. 中国农村经济,2007(7):10-15.
- [3]李高扬,李建龙,王 艳,等. 优良能源植物筛选及评价指标探讨[J]. 可再生能源,2007,25(6):84-89.
- [4]陈丹凤,刘苑秋,黄国贤,等. 能源树种晚松生物量及其能源利用研究[J]. 林业实用技术,2014(9):21-24.
- [5]卜尚平,李慕韩,黄能超,等. 短叶松晚松引种栽培调查[J]. 湖南林业科技,1983(4):23-25.
- [6]孟令国,郑连义,满昌华,等. 枣庄市晚松引种试验报告[J]. 山东林业科技,2000(3):14-15.
- [7]程 磊,刘苑秋,文 娟. 盐胁迫对晚松生理特性的影响[J]. 江西农业大学学报,2006,28(3):382-385.
- [8]李 华,孔新刚,王 俊. 秸秆饲料中纤维素、半纤维素和木质素的定量分析研究[J]. 新疆农业大学学报,2007,30(3):65-68.
- [9]姚 红. 索氏提取法测定脂肪含量方法改进[J]. 中州大学学报,1996(4):64-65.
- [10]张惟杰. 复合多糖生化研究技术[M]. 上海:上海科学技术出版社,1987:6-7.
- [11]田 敏,汪 傲. 饲料中单宁测定方法的改进[J]. 饲料研究,1987(11):35-36.
- [12]赵晓虹,刘广平,马泽芳. 竹子中单宁含量的测定及其对大熊猫采食量的影响[J]. 东北林业大学学报,2001,29(2):67-71.
- [13]马 丹. 凯氏定氮法测量食品中蛋白质含量[J]. 计量与测试技术,2008,35(6):57-58.
- [14]复旦大学. 物理化学实验[M]. 北京:高等教育出版社,1980:43-48.
- [15]张 伟,蔡会德,农胜奇,等. 广西生态公益林主要树种植物热值与能量积累[J]. 林业科技开发,2014,28(1):30-33.