

5 种桉树木材物理力学性质的差异比较

张沛健,尚秀华,吴志华*

(国家林业和草原局 桉树研究开发中心,广东 湛江 524022)

摘要:分析 5 种桉树幼龄材的物理力学性质的差异,为研究不同桉树材性变异规律及提高桉树木材利用效率提供参考。以采自广东湛江南方国家级林木种苗示范基地大田区的 2.5 年生和 4 年生赤桉、2.5 年生尾巨桉及 6 年生尾细桉无性系 L-9、M-11 等 5 种不同林龄的桉木为研究对象,按照国家标准测量木材物理性质指标木材密度(基本密度、气干密度、全干密度)、气干(径向、弦向、体积)干缩率、全干(径向、弦向、体积)干缩率,以及力学性质指标抗弯强度、抗弯弹性模量、顺纹抗剪强度、顺纹抗压强度、硬度(弦面硬度、径面硬度、端面硬度),以 SPSS、Excel 等数据分析软件对其进行数理统计和分析,分析其差异和变异规律。5 种桉树基本密度差异不显著,其余物理力学指标差异极显著。5 种桉树的基本密度 $0.428\sim 0.460\text{ g/cm}^3$,气干密度 $0.494\sim 0.543\text{ g/cm}^3$,全干密度 $0.482\sim 0.525\text{ g/cm}^3$,各品系间变异较小。气干干缩率在不同品系间存在着较大的变异,2.5 年生赤桉 >4 年生赤桉 $>L-9 > M-11 >$ 尾巨桉,径向干缩率变异最大。桉树随着林龄的增长干缩率值增大,说明林龄大的桉木更容易开裂。不同品种间力学性质差异显著。5 种桉树木材密度与径面硬度和端面硬度呈正相关关系,说明桉树木材密度越大,其木材硬度越高。由木材密度指标看,桉树可作为纸浆材和纤维板材的原材料,随着林龄的增加,桉树木材物理力学性质指标值增加。按照木材物理力学指标分级标准可知,5 种桉树木材密度属于小级;赤桉干缩率属于 II 级,尾巨桉干缩率属于 II-III 级,L-9 干缩率属 IV 级,M-11 干缩率属于 IV 级;5 种桉树木材抗弯强度和抗弯弹性模量均属于 II 级,剪切强度属于 V 级,端面硬度均属 III 级。

关键词:桉树;幼龄材;木材物理性质;木材力学性质

中图分类号:S792.39

文献标志码:A

文章编号:1001-7461(2020)04-0184-07

Difference in Wood Physical and Mechanical Properties of Five Kinds of *Eucalyptus*

ZHANG Pei-jian, SHANG Xiu-hua, WU Zhi-hua*

(China Eucalypt Research Centre, Zhanjiang 524022, Guangdong, China)

Abstract: In order to provide references for understanding the wood variation rules of different *Eucalyptus* species and improving the utilization efficiency, differences in wood physical and mechanical properties of five kinds of juvenile woods were analyzed. Samples of 5 *Eucalyptus* timbers were collected from South China Experimental Nursery in Zhanjiang, Guangdong, including *E. camaldulensis* (2.5, and 4-year-old), *E. urophylla* × *E. grandis* (2.5-year-old), clone L-9 and M-11 of *E. urophylla* × *E. tereticornis* (6-year-old). The wood density (basic density, air-dry density, absolute-dry density), air-dry (radial, tangential, volume) shrinkage rate and absolute-dry (radial, tangential, volume) shrinkage rate, and mechanical properties including bending strength, modulus of elasticity of bending, shear strength, compressive strength, hardness (tangential, radial, end) were measured according to the national standards. The differences and variations

收稿日期:2019-10-14 修回日期:2019-11-26

基金项目:国家自然科学基金面上项目“桉树抗风特性及其主要影响因子研究”(31570615);“十三五”国家重点研发计划“桉树、云南松(思茅松)、华山松丰产增效技术集成与示范”(2017YFD0601202)。

作者简介:张沛健。研究方向:林木培育。E-mail:zhangpeijian5445@163.com

*通信作者:吴志华,硕士,副研究员。研究方向:林木逆境生理。E-mail:wzhua2889@163.com

were analyzed by SPSS, Excel, DPS and other data analysis software. There was no significant difference in the wood basic density among 5 timbers, but significant differences in other physical and mechanical indexes were observed. The basic density, the air-dry density, and the total dry density ranged from 0.344 to 0.558, 0.373 to 0.665, and 0.380 to 0.664 g/cm³, respectively, with little variations. The air-drying shrinkage rate varied greatly with an order of 2.5-year-old *E. camaldulensis* > 4-year-old *E. camaldulensis* > L-9 > M-11 > *E. urophylla* × *E. grandis*, and the radial shrinkage rate varied most significantly. The shrinkage increased with stand age, which indicated that the older *Eucalyptus* timber was easy to crack. There were also significant differences in mechanical properties. Wood density of all five timbers was positively correlated with diameter hardness and end hardness, which indicated that the higher the wood density, the higher the wood hardness. From the view of wood density, *Eucalyptus* woods could be used as materials to make paper pulp and fiber board. The values of *Eucalyptus* wood physical and mechanical properties increased with age. According to the classification standard of wood physical and mechanical indexes, the wood density of five *Eucalyptus* timbers was in low grade; the dry shrinkage rates of *E. camaldulensis*, *E. urophylla* × *E. grandis*, L-9 and M-11 were in grade II, II-III, IV, and IV, respectively. The bending strength and modulus of bending elasticity of five timbers were fitted into grade II; the shear strength belonged to grade V; and the hardness of end surface belonged to grade III.

Key words: *Eucalyptus*; juvenile wood; wood physical properties; wood mechanical properties

桉树(*Eucalyptus*)为桃金娘科、桉树属植物的总称,乔木植物,原产澳大利亚,桉树因其速生高产、适应性广、抗性强、轮伐期短等优点,成为我国经济效益较高的重要人工林树种之一^[1-3],主要用途为木材加工、造纸原料、提炼精油等。桉树在中国已有100多年的种植历史,截至2017年底,我国桉树种植面积已达450万hm²,年产3000多万m³^[4],为我国木材生产作出了重要贡献^[1]。木材是能够进行次生生长的木本植物,如乔木、灌木以及木质藤本所形成的木质化组织,是根茎中的维管形成层向内发展出的所有的植物组织^[5-7]。木材的物理力学性质是主要材性性状,其制约了植物生长发育的重要过程,如机械支持、水分疏导等,也是决定木材用途的主要依据^[8-10],在木材应用中具有重要的实际参考价值^[6]。多年以前,国内外林木木材性状的遗传改良工作在主要树种上已广泛开展^[8-10]。近年来,随着桉树板材(密度纤维板,胶合板等)行业的高速发展,研究桉树木材的物理力学属性及其影响因素,可为合理应用桉树木材、科学开展桉树定向培育、改进桉树种植管理技术等工作提供必要参考。已有学者对尾赤桉(*E. urophylla* × *E. camaldulensis*)^[11]、赤桉(*E. camaldulensis*)^[12-13]、蓝桉(*E. globulus*)^[14]、巨桉(*E. grandis*)^[15]、尾巨桉(*E. urophylla* × *E. grandis*)^[16]等桉树进行了物理力学性质的研究,这些学者都是针对同一种桉树同一林龄不同无性系/家系间木材物理力学性质的研究。目前为止,针对桉树不同林龄、不同品种间的木材物理力学的研究未见报道。针对这种情况,本研究以2.5年生和4年

生赤桉(*E. camaldulensis*)、2.5年生尾巨桉(*E. urophylla* × *E. grandis*)、6年生尾细桉(*E. urophylla* × *E. tereticornis*)的L-9和M-11无性系等3个品种、3个林龄的5种幼龄材桉树立木为材料,对其木材的主要密度(基本密度、气干密度和全干密度)、干缩率(气干干缩率、全干干缩率)、力学性质(抗弯强度、抗弯弹性模量、剪切强度、顺纹抗压强度、硬度)等指标进行测定和分析,研究同一品种不同林龄间、同一林龄不同品种间、不同林龄不同品系间桉树物理力学性质的变异规律。本研究可为桉树材性定向培育及其高效加工利用提供一定的理论指导。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验地设在位于广东省湛江市遂溪县岭北镇附近的南方国家级林木种苗示范基地内,地理位置为111°38'E, 21°30'N,年均温23.6℃,绝对最低气温2.8℃,绝对最高气温37.0℃,月平均气温18.0℃,属于热带北缘季风气候,夏季年均降水量1567mm,5—9月降水占全年的85%;土壤为砖红壤。

1.2 试验材料

其中赤桉林龄为2.5年生和4年生,尾巨桉林龄为2.5年生,尾细桉无性系L-9和M-11林龄为6年生,取样时每种桉树选择4株具有代表性的标准木,取干型饱满、无变形弯曲的原木段,采用干燥法调整木材含水率至12%左右,然后参照国家标准GB1929-2009《木材物理力学试件锯解及试样截取

方法》制取试件,各品种信息和生长情况见表 1。

1.3 木材物理力学性质测定

1.3.1 木材密度和干缩率 木材基本密度(wood basic density, WBD)、气干密度(air-dry density, ARD)和全干密度(absolute-dry density, ABD)参照 GB/T 1933-2009《木材密度测定方法》进行测定;径向气干干缩率(air-dry shrinkage of radial, ASR)、弦向气干干缩率(air-dry shrinkage of tangential, AST)、体积气干干缩率(air-dry shrinkage of vol-

ume, ASV)和径向全干干缩率(absolute-dry shrinkage of radial, ABSR)、弦向全干干缩率(absolute-dry shrinkage of tangential, ABST)、体积全干干缩率(absolute-dry shrinkage of volume, ABSV)参照 GB/T 1932-2009《木材干缩性测定方法》进行测定。气干差异干缩(air-dry shrinkage of tangential to radial, ASTA)和全干差异干缩(absolute-dry shrinkage of tangential to radial, ABSTA)值通过公式(差异干缩值=弦向干缩率/径向干缩率)计算。

表 1 不同桉树品种的基本信息

Table 1 Basic information of different kinds *Eucalyptus* stands

树种	立木编号	树高/m	胸径/cm	树种	立木编号	树高/m	胸径/cm
2.5 年生赤桉	C033	10.1	8.4	6 年生尾细桉 L-9	L-4	19.1	13.5
	C062	9.3	8.6		L-3	18	13.8
	C012	9.7	9.5		L-17	18.2	13.7
	CA22	9.4	8.1		L-19	18.2	14
	均值	9.62	8.65		均值	10.55	8.25
2.5 年生尾巨桉	DH21	9.2	8	6 年生尾细桉 M-11	M-4	18.3	12.2
	DH1	10.8	8.9		M-5	18.8	13.7
	DH10	11.3	8.9		M-2	19.3	14.4
	DH15	10.9	7.2		M-15	18.5	14.5
	均值	18.375	13.75		均值	18.72	13.70
4 年生赤桉	C033	12.87	11.23				
	C062	10.27	9.40				
	C012	10.73	10.50				
	CA22	10.30	9.03				
	均值	11.04	10.04				

1.3.2 木材力学性质 木材抗弯强度(bending strength, BS)、木材抗弯弹性模量(modulus of elasticity of bending, MEB)、木材顺纹抗剪强度(shear strength parallel to grain, SPG)、木材顺纹抗压强度(compression strength parallel to grain, CSP)、木材硬度[弦面硬度(hardness of tangential, HT)、径面硬度(hardness of radial section, HR)和端面硬度(hardness of end surface, HE)]指标分别参照 GB/T 1936.1-2009《木材抗弯强度试验方法》、GB/T 1937-2009《木材顺纹抗剪强度测定方法》、GB/T 1936.2-2009《木材抗弯弹性模量测定方法》、GB/T 1935-2009《木材顺纹抗压强度试验方法》进行测定和 GB/T 1941-2009《木材硬度试验方法》进行。各试件在欧姆斯诺(Amsler)4 t 万能力学试验机上测定,各个指标测定的有效样本数>30 个。

1.4 数据统计与分析

运用 Excel 进行数据统计,采用 SPSS 24.0 软件进行方差分析、相关性分析等数据处理。

2 结果与分析

2.1 不同桉树的物理学性质的差异

2.1.1 木材密度 密度分为基本密度、气干密度和全干密度。木材基本密度是衡量木材密度程度的重

要指标,在木材干燥和防腐工业中具有重要意义,气干密度是影响木材最终产品质量的重要指标^[17]。由图 1 可知,5 种桉树的基本密度 0.428~0.460 g/cm³,变异系数为 7.12%,气干密度 0.494~0.543 g/cm³,变异系数为 7.14%,全干密度 0.482~0.525 g/cm³,变异系数为 8.34%。木材密度中各密度指标大小均表现为气干密度>全干密度>基本密度,其中以气干密度的变异系数最大。从不同树种同龄龄比较,2.5 年生赤桉基本密度、气干密度和全干密度稍大于 2.5 年生尾巨桉,6 年生 L-9 除气干密度稍大于 M-11 外,基本密度和全干密度均小于 M-11;从同一品种不同林龄比较,4 年生赤桉密度值均大于 2.5 年生赤桉。综合来看,M-11 密度大于其他 3 种桉树,尾巨桉是 4 个品种中木材密度最小的。也可看出,桉树随着林龄增长,基本密度、气干密度和全干密度值均增大,但增大幅度较小。按照我国木材性分级标准 4 种桉树木材密度为小级,按照物理力学指标分级标准为 II 级^[6,17-18]。

2.1.2 干缩率 木材在干燥过程中,其尺寸和体积随着水分的散失而减小,称干缩,由于木材各向的不均匀性,其干缩值有所不同,由于木材干缩不均匀所产生的内应力会使木材发生干裂、变形,严重影响木

材的使用^[19]。由表2可知,不同树种的桉树气干干缩率的分布范围分别为:径向1.92%~3.76%、弦向4.00%~6.11%、体积6.26%~9.80%,气干差异干缩1.62%~2.44%;全干干缩率的分布范围为:径向3.44%~5.32%、弦向6.39%~8.18%、体积9.83%~13.43%,全干差异干缩1.50%~1.98%,分布范围总体表现为径向<弦向<体积。从不同干缩率指标比较,总体表现为全干干缩率大于气干干缩率,但是气干干缩率变异系数大于全干干缩率变异系数,说明气干干缩率在不同品系间存在着较大的变异。不同干缩率在径向、弦向、体积方向均表现为体积干缩率>弦向干缩率>径向干缩率,其中以径向的干缩率变异最大。不同树种间在不同干缩率指标上表现差异不一。但气干差异干缩和全干差异干缩2个指标之间差异较小,不同树种间差异干缩大小表现为2.5年生赤桉>4年生赤桉>6年生L-9>6年生M-11>2.5年生尾巨桉。

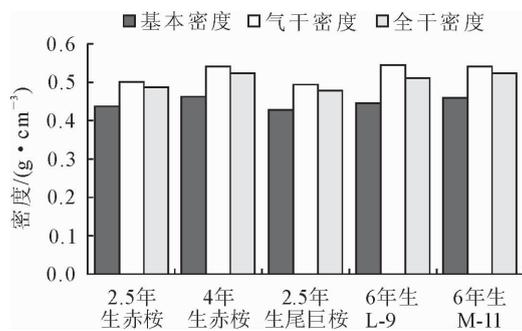


图1 不同桉树的木材密度差异

Fig.1 Statistical analysis of density of different kinds of *Eucalyptus*

从不同林龄看,4年生赤桉干缩率值大于2.5年生赤桉干缩率,6年生尾巨桉L-9和M-11干缩率值均大于2.5年生赤桉和2.5年生尾巨桉,可以得出,无论同一树种还是不同树种的桉树随着林龄的增长干缩率值增大,说明林龄大的桉树更容易开裂。2.5年生的尾巨桉干缩率值大于2.5年生赤桉,6年生尾巨桉干缩率反而小于4年生赤桉,说明不同品系间桉树干缩率差异较大,在以后的生产中可根据不同的用途选择合适的品系。而同林龄的L-9和M-11干缩率差异性不显著,说明相同树种的同林龄间的桉树干缩率差异较小。按照木材物理力学指标分级标准可知^[6,17-18],2.5年生赤桉干缩率属于Ⅱ级,尾巨桉干缩率属于Ⅱ-Ⅲ级,L-9和4年生赤桉干缩率属于Ⅳ级,M-11干缩率属于Ⅳ级。

2.2 不同桉树的力学性质的差异

2.2.1 抗弯强度和抗弯弹性模量 抗弯强度是建筑物的屋架、横条、木桥、承重地板等弯曲的构件选

材时应首先考虑的因素(徐有明,2006)。由表2可得,5种桉木的抗弯强度值由大至小排序为L-9(88.61 MPa)>M-11(83.03 MPa)>4年生赤桉(68.72 MPa)>2.5年生赤桉(67.65 MPa)>尾巨桉(58.98 MPa),说明不同桉树品系间木材抗弯强度存在着显著,并且随着林龄的增长桉树的抗弯强度有所增大。单从赤桉来看,4年生仅比2.5年生增加1.07 MPa,说明木材抗弯强度指标在不同品种间的差异远大于不同林龄之间的差异。而抗弯弹性模量值由大至小排序为M-11(9407.47 MPa)>L-9(9399.60 MPa)>4年生赤桉(6226.93 MPa)>2年生赤桉(6011.11 MPa)>尾巨桉(5740.25 MPa),可以看出木材抗弯弹性模量指标在不同桉树品系间存在差异。4年生赤桉抗弯弹性模量的变异系数(35.46%)远大于2.5年生变异系数(11.12%),说明4年生赤桉不同品系间抗弯弹性模量指标存在着丰富的变异,这也可能是造成4年生赤桉抗弯弹性模量值小于2.5年生的原因。由此可见,赤桉和尾巨桉抗弯弹性模量差异显著,抗弯强度差异性不显著;L-9和M-11抗弯强度和抗弯弹性模量差异性不显著。按照木材物理力学指标分级标准可知^[6,17-18],赤桉、尾巨桉、L-9、M-11抗弯强度和抗弯弹性模量均属于Ⅱ级。

2.2.2 剪切强度和顺纹抗压强度 由表2可得,不同桉树间剪切强度指标值由大至小为M-11(28.09 MPa)>2.5年生赤桉(27.94 MPa)>L-9(27.82 MPa)>尾巨桉(22.40 MPa)>4年生(21.58 MPa),而顺纹抗压强度排序为L-9(58.98 MPa)>M-11(55.30 MPa)>2.5年生赤桉(48.78 MPa)>4年生赤桉(43.00 MPa)>尾巨桉(40.38 MPa)。说明不同桉树品系间剪切强度和顺纹抗压强度指标存在着小差异,同一树种同林龄比较,6年生尾巨桉L-9和M-11剪切强度指标差异不显著,顺纹抗压强度差异显著;不同树种同一林龄间比较,剪切强度和顺纹抗压强度指标间均存在着显著差异。按照木材物理力学指标分级标准可知^[6,17-18],赤桉、尾巨桉、L-9、M-11的剪切强度属于Ⅴ级。

2.2.3 木材硬度 木材的硬度跟木材密度密切相关,密度越大硬度越高,密度越小硬度越低^[20]。由表2可得,不同桉树间弦面硬度、径面硬度和端面硬度差异性显著。其中不同桉树木材弦面硬度变幅范围为2756.84~3393.72 N,径面硬度变幅范围为3150.78~3931.85 N,端面硬度变幅范围为4609.41~6137.91 N,端面硬度>径面硬度>弦面硬度。5种桉树硬度值(弦面、径面和端面)从大到小排列为M-11>L-9>4年生赤桉>2.5年生赤

桉 > 2.5 年生尾巨桉。可以看出,单从不同林龄看,4 年生赤桉硬度值 > 2.5 年生赤桉硬度值,说明桉树随着林龄增加,硬度增大。按照木材物理力学指标分级标准可知^[6,17-18],赤桉、尾巨桉、L-9、M-11 的端面硬度均属Ⅲ级。

2.3 不同桉树基本密度与主要力学性质的相关性

木材密度是判断木材物理力学性质和工艺性质的重要指标,密度与木材的众多性能都有着密切关系,又是影响木材力学性质的重要参数^[21-24]。所以

对密度和主要力学性质进行相关性分析,结果见表 3。由表 3 得知,5 种桉树基本密度、气干密度、全干密度之间相关性很强,相关性显著均达到 0.01 水平。在 7 个木材力学指标中,基本密度、气干密度和全干密度与抗弯弹性模量、顺纹抗压强度和端面硬度相关性均极显著,与径面硬度相关性显著,与弦面硬度相关性不显著,;抗弯强度与气干密度呈极显著相关关系,剪切强度与气干密度呈显著相关关系,与其他密度指标相关性不显著。

表 2 不同品种桉树物理力学性质的统计分析

Table 2 Statistical analysis of physical and mechanical properties of different kinds of *Eucalyptus*

项目	2.5 年生赤桉		4 年生赤桉		2.5 年生尾巨桉		6 年生 L-9		6 年生 M-11	
	均值	变异系数 %	均值	变异系数 %	均值	变异系数 %	均值	变异系数 %	均值	变异系数 %
基本密度/(g·cm ⁻³)	0.440±0.03ab	5.65	0.444±0.02ab	5.73	0.428±0.03b	8.01	0.460±0.02ab	4.41	0.444±0.03a	6.81
气干密度/(g·cm ⁻³)	0.503±0.03b	2.79	0.532±0.03a	6.29	0.494±0.04b	8.97	0.543±0.02a	3.99	0.524±0.04a	6.89
全干密度/(g·cm ⁻³)	0.488±0.03b	3.40	0.513±0.03ab	6.42	0.482±0.04b	9.37	0.525±0.02ab	4.60	0.504±0.04a	7.93
径向气干干缩率/%	1.92±0.47c	24.48	3.76±0.760a	20.22	2.89±0.27b	35.29	3.15±0.38a	12.06	3.45±0.58ab	16.81
弦向气干干缩率/%	4.43±0.56c	12.64	6.11±1.48a	24.17	4.00±0.66c	16.50	5.32±0.66b	12.41	5.53±0.80ab	14.47
体积气干干缩率/%	6.26±0.83c	13.26	9.796±1.05a	10.71	6.89±1.13c	16.40	8.41±0.95b	11.30	8.79±1.30b	14.79
径向全干干缩率/%	3.44±0.76b	22.09	5.32±1.04a	19.56	4.50±1.22a	27.11	5.00±0.64a	12.80	5.04±0.67a	13.29
弦向全干干缩率/%	6.42±0.89b	13.86	8.18±1.41b	17.19	6.39±0.65a	10.17	7.89±0.50a	6.34	7.67±0.49a	6.39
体积全干干缩率/%	9.83±0.71d	7.22	13.43±0.90a	6.73	10.95±1.51c	13.79	12.76±1.03ab	8.07	12.48±1.03b	8.25
气干差异干缩	2.44±0.65a	26.64	1.75±0.73b	41.60	1.55±0.56b	36.13	1.70±0.19b	11.18	1.62±0.21b	12.96
全干差异干缩	1.98±0.60a	30.30	1.63±0.58b	12.79	1.50±0.36b	24.00	1.59±0.14b	8.81	1.54±0.15b	9.74
抗弯强度/MPa	67.65±9.48b	14.01	68.718±8.79b	12.49	58.98±13.74b	23.030	88.61±13.69a	15.45	83.03±11.64a	14.02
抗弯弹性模量/MPa	6011.10±3.64b	11.12	6226.93±750.81b	35.46	5740.25±1377.3c	23.99	9399.6±1282.79a	13.65	9407.47±958.05a	10.18
剪切强度/MPa	27.94±3.64a	13.03	21.58±2.72b	12.61	22.4±14.07b	18.17	27.82±3.89a	13.98	28.09±5.52a	19.65
顺纹抗压强度/MPa	48.78±5.84c	11.97	43.00±1.40d	3.25	40.3±5.03d	12.46	58.98±3.73a	6.32	55.30±3.76b	6.80
弦面硬度	2858.78±189.96b	6.65	3121.69±463.87a	16.63	2756.84±319.71b	11.60	3268.30±515.83a	15.78	3393.72±388.92a	11.46
径面硬度	3275.16±347.95bc	10.62	3538.99±484.29b	14.68	3150.78±309.51c	9.82	3580.81±462.7b	12.92	3931.85±377.85a	9.61
端面硬度	5598.72±530.72a	9.48	5708.27±932.27a	16.33	4609.41±374.94b	8.13	6084.19±1050.86a	17.27	6137.97±667.58a	10.88

注:平均值后不同字母表示不同树种之间同一性状的差异,小写字母表示在 0.05 水平上差异显著。

表 3 5 种不同品种桉树密度与主要力学性质相关性

Table 3 Relationships between density and main mechanical properties of different kinds of *Eucalyptus*

性状	气干密度	全干密度	抗弯强度	抗弯弹性模量	剪切强度	顺纹抗压强度	弦面硬度	径面硬度	端面硬度
基本密度	0.825**	0.983**	0.174	0.375**	0.236	0.446**	0.184	0.297*	0.483**
气干密度		0.870**	0.460**	0.551**	0.275*	0.645**	0.264	0.320*	0.385**
全干密度			0.235	0.421**	0.226	0.498**	0.242	0.332*	0.488**
抗弯强度				0.774**	0.327*	0.591**	0.212	0.241	0.321*
抗弯弹性模量					0.421**	0.744**	0.267	0.338*	0.503**
剪切强度						0.337*	0.018	0.274	0.287*
顺纹抗压强度							0.569**	0.508**	0.660**
弦面硬度								0.737**	0.378**
径面硬度									0.440**

注:*表示相关性显著($P < 0.05$),**表示相关性极显著($P < 0.01$)。

3 结论与讨论

木材密度是木材最重要的材性指标之一,与木材的众多物理力学性能有着密切的关系,直接影响

着木材的抗弯强度、抗压强度、抗剪强度等力学指标^[22],也是判断木材物理力学性质和工艺性质的重要指标。研究木材密度变异性,对研究木材的合理利用和加工都具有重要意义。本研究的 5 种不同桉

树木材基本密度差异性不显著,气干密度和全干密度差异性极显著,5种桉树密度在不同品系间存在着较小的变异。随着林龄增加桉树木材密度会有所增大,这与前期研究结果一致^[12]。按照中国木材分级标准桉木为小级级别。木材密度是桉木作为人造板材料的重要评价指标^[22]。有研究表明,一般用于生产纸浆和纤维板的木材气干密度值处于0.4~0.6 g/cm³比较好^[25],本研究的5种桉树的气干密度变幅范围为0.494~0.543 g/cm³,说明这5种幼龄材桉树均可作为纸浆材和纤维板材的原材料。

干缩性是木材的重要性质,径向和弦向干缩率的不同是木材产生裂缝和翘曲的主要原因。从不同林龄看,同林龄的赤桉和尾巨桉除弦向气干干缩率和体积气干干缩率差异不显著外,其余干缩率指标差异均显著;不同林龄的赤桉干缩率差异显著,同林龄的尾巨桉干缩率差异性不显著,说明不同品种的桉树干缩率存在较大的差异,不同林龄的桉树间干缩率也存在着差异,同林龄同一品系间桉树干缩率差异较小。尚秀华等^[12]研究表明5年生赤桉气干干缩率(径向3.08%,弦向4.93%),全干干缩率(径向4.93%,弦向7.14%),和本研究结果同时说明桉树木材随着林龄的增大干缩率值增加。干缩差异性(木材弦向和径向干缩系数的比值)>2倍以上,说明该种木材的干缩差异性大,反之则小,差异干缩越大,表明木材干缩越不均匀,越易发生翘曲变形和开裂,其中只有2.5年生赤桉气干差异干缩值(2.44)>2,说明赤桉幼龄材木材各个纹理方向收缩不均匀,最容易发生变形和开裂,其余4种桉木干燥过程中产生的内应力较2.5年生赤桉小,干燥时出现的开裂和变形的几率较2.5年生赤桉小。5种桉树的差异干缩值均>1.5,说明幼龄材桉树在干燥过程中较容易发生开裂和变形。

木材力学性质是木材抵抗外力使其改变大小和性状的能力,是木材合理利用的重要依据。不同品种桉树木材力学性质(抗弯强度、抗弯弹性模量、剪切强度、顺纹抗压强度、硬度)均存在显著差异。同林龄赤桉和尾巨桉相比在抗弯弹性模量、剪切强度、顺纹抗压强度、端面硬度存在极显著差异;而L-9和M-11相比只有顺纹抗压强度和径面硬度差异性显著,说明不同品种、不同林龄间桉树力学性质存在差异,同林龄不同品系间差异性较小。本研究2.5年生和4年生赤桉以及尚秀华等研究的5年生赤桉^[12]力学性质抗弯强度、抗弯弹性模量、抗剪强度、顺纹抗压强度和木材硬度低于张松琴^[13]测定的7年生赤桉力学性质,但2.5年生力学性质大于4年生赤桉,说明赤桉随着林龄的增长其力学性质值先

减小后增大,尾巨桉抗弯强度、抗弯弹性模量、顺纹抗压强度平均值均低于13年生尾巨桉家系及无性系测定值^[16]。林龄大的L-9、M-11其木材力学性质大于林龄小的赤桉和尾巨桉,可以判断,随着林龄的增加桉树木材力学性质增高。按照木材物理学指标分级标准可知,赤桉、尾巨桉、L-9、M-11抗弯强度和抗弯弹性模量均属于Ⅱ级,剪切强度均属于Ⅴ级,端面硬度均属Ⅲ级。由于桉树抗弯强度属于低等,所以不能作为建筑物的横条、屋架等弯曲构件用材^[26]。

木材密度和力学性质存在着密切的联系,5种幼龄材桉树基本密度、气干密度和全干密度与抗弯弹性模量、顺纹抗压强度、径面硬度和端面硬度相关性均为正相关,气干密度除了弦面硬度外与其他力学性质相关性均为正相关,基本密度和全干密度除了和抗弯强度、剪切强度、弦面硬度外与其他力学性质指标相关性均为正相关。木材硬度与木材加工、利用有着密切的关系,硬度可作为用材的依据,木材密度越大,其硬度越高。本研究发现,5种幼龄材桉树密度与径面硬度和端面硬度呈正相关关系,间接说明桉树木材密度越大,其木材硬度越高。

研究表明,5种不同桉树物理学指标及力学指标差异显著,桉树木材的物理力学性质在树种间以及不同林龄间都存在着较大的差异。随着林龄的增长,桉树物理学指标值增大。木材性质关系到木材的加工和利用,目前,桉树已成为南方地区主要的用材林,在以后的桉树定向培育中,可根据不同的目标选择不同材性的桉树。也可在以后的桉树定向培育中根据不同木材用途调整营林措施,从而可改善木材品质,为桉树木材科学加工和合理利用提供参考。

参考文献:

- [1] ARNOLD R J, XIE Y J, MIDGLEY S J, *et al.* Emergence and rise of eucalypt veneer production in China [J]. *International Forestry Review*, 2013, 15(1): 33-47.
- [2] GRATTAPAGLIA D. Genomics of eucalyptus, a global tree for energy, paper, and wood [C]//MOORE P H, MING R. *Genomics of Tropical Crop Plants*. New York: Springer, 2008: 259-298.
- [3] 祁述雄. 中国桉树 [M]. 北京: 中国林业出版社, 2002.
- [4] XIE Y J, ARNOLD R J, WU Z H, *et al.* Advances in eucalypt research in China [J]. *Frontiers of Agricultural Science and Engineering*, 2017, 4(3): 1-11.
- [5] HICKEY M, KING C. *The Cambridge illustrated glossary of botanical terms* [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2000.
- [6] 成俊卿, 杨家驹, 刘鹏. 中国木材志 [M]. 北京: 中国林业出版

- 社,1992:86-92.
- [7] WU R. Microstructural study of sanded and polished wood by replication[J]. Wood Sci Technol,1998,32:247-260.
- [8] RODERICK M L,BERRY S L. Linking wood density with tree growth and environment: a theoretical analysis based on the motion of water[J]. New Phytol,2001,149:473-485.
- [9] TER STEEGE H, HAMMOND D S. Character convergence, diversity, and disturbance in tropical rain forest in Guyana[J]. Ecology,2001,82:3197-3212.
- [10] LARJAVAARA M, MULLER-LANDAU H C. Rethinking the value of high wood density[J]. Funct Ecol., 2010, 24(4): 701-705.
- [11] 廖立,涂登云,李重根,等. 热处理对尾赤桉木材物理力学性能的影响 [J]. 中南林业科技大学学报,2015,33(5):128-131.
LIAO L, TU D Y, LI C G, *et al.* Effects of heat treatment on physical-mechanical properties of *E. urophylla* × *E. camaldulensis*[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology, 2015, 33(5): 128-131. (in Chinese)
- [12] 尚秀华,张沛健,罗建中,等. 赤桉幼龄材物理力学性质研究 [J]. 西北农林科技大学学报:自然科学版,2019,47(5):32-41
SHANG X H, ZHANG P J, LUO J Z, *et al.* Physical and mechanical properties of *Eucalyptus camaldulensis* juvenile wood[J]. Journal of Northwest A&F University: Nat. Sci. Ed., 2019, 47(5): 32-41. (in Chinese)
- [13] 张松琴. 四川主要桉树木材物理力学性质及利用的研究[J]. 桉树科技协作动态,1980(3):46-57.
ZHANG S Q. Physical and mechanical properties and utilization of *Eucalyptus* wood in Sichuan[J]. Eucalyptus Science & Technology, 1980(3): 46-57. (in Chinese)
- [14] 罗浩,齐锦秋,谢九龙,等. 四川蓝桉幼龄材物理力学性质研究 [J]. 西北农林科技大学学报:自然科学版,2016,44(2):90-96.
LUO H, QI J Q, XIE J L, *et al.* Physical-mechanical properties of *Eucalyptus globulus* juvenile wood from Sichuan [J]. Journal of Northwest A&F University: Nat. Sci. Ed., 2016, 44(2): 90-96. (in Chinese)
- [15] 王燕高,胡庭兴. 四川引种巨桉人工林木材物理力学性质的研究 [J]. 四川农业大学学报,2006,24(4):405-408.
WANGY G, HU T X. Study on wood physical and mechanical properties of *Eucalyptus grandis* from Sichuan introduction plantation [J]. Journal of Sichuan Agricultural University, 2006, 24(4): 405-408. (in Chinese)
- [16] 裴姗姗,胡俊波,刘元. 尾巨桉木材物理力学性质的主成分分析 [J]. 林业科技开发,2006,20(2):39-41.
CHANG S S, HU J B, LIU Y. The principal component analysis on the physic-mechanical properties of *E. urophylla* × *E. grandis*[J]. China Forestry Science and Technology, 2006, 20(2): 39-41. (in Chinese).
- [17] 中国林业科学研究院木材工业研究所. 中国主要树种的木材物理力学性质[M]. 北京:中国林业出版社,1982.
- [18] 尹思慈. 木材品质和缺陷 [M]. 北京:中国林业出版社,1990.
- [19] 彭万喜,张仲风,陆绍聪. 循环干湿处理对尾巨桉木材含水率影响的研究[J]. 辽宁林业科技,2007,33(5):5-8.
PENG W X, ZHANG Z F, LU S C. Effects of loop drying and absorbing on wood moisture content of *Eucalyptus urograndis*[J]. Journal of Liaoning Forestry Science & Technology, 2007, 33(5): 5-8. (in Chinese)
- [20] 黄腾华,符韵林,李宁. 擎天树木材物理力学性质研究 [J]. 西北林学院学报,2013,28(5):160-163.
HUANG T H, FU Y L, LI M. Physical and mechanical properties of *Shorea chinensis* wood[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2013, 28(5): 160-163. (in Chinese)
- [21] 李清芸,林金国,卞丽萍,等. 马尾松人工林木材主要材性家系间的变异[J]. 西北林学院学报,2015,30(5):209-213.
LI Q Y, LIN J G, BIAN L P, *et al.* Variation of main properties for *Pinus massoniana* plantation wood from different families[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2015, 30(5): 209-213. (in Chinese)
- [22] 刘青华,张蕊,金国庆,等. 马尾松年轮宽度和木材基本密度的种源变异及早期选择[J]. 林业科学,2010,46(5):49-54.
LIU Q H, ZHANG R, JIN G Q, *et al.* Variarion of ring width and basic density and early selection of *Pinus massoniana* provenances[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2010, 46(5): 49-54. (in Chinese)
- [23] 施福军,刘晓玲,韦鹏练,等. 琼楠木材生材性质研究[J]. 森林工程,2019,35(4):39-42.
- [24] 程玉柱,李赵春,孙焯. 基于纹理特征的木材年轮图像检测方法研究[J]. 森林工程,2018,34(3):46-49.
- [25] 梁善庆,罗建举. 人工林米老排木材的物理力学性质[J]. 中南林业科技大学学报,2007,27(5):97-100,116.
LIANG S Q, LUO J J. Study of physical and mechanical properties of wood from *Mytilaria laosensis* plantation[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology, 2007, 27(5): 97-100, 116. (in Chinese)
- [26] 徐有明. 木材学 [M]. 北京:中国林业出版社,2006.