

网络出版时间:2018-11-06 16:58

DOI:10.13207/j.cnki.jnwfufu.2019.05.005

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1390.S.20181106.1657.010.html>

赤桉幼龄材物理力学性质研究

尚秀华, 张沛健, 罗建中, 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】【目的】研究 20 个不同赤桉家系及其不同部位物理力学性质的差异, 为赤桉材性选育及木材的合理利用提供参考。【方法】以采自广东湛江南方国家级林木种苗示范基地大田区的 20 个 45 月生赤桉家系为研究对象, 分别于树干梢部、中部、底部取木材试样, 按照国家标准测量木材基本密度、气干(径向、弦向、体积)干缩率、全干(径向、弦向、体积)干缩率、抗弯强度、抗弯弹性模量、顺纹抗剪强度、顺纹抗压强度等 11 个指标, 并计算气干和全干差异干缩值(弦向干缩率/径向干缩率), 运用 SPSS、Excel、DPS 等软件对数据进行统计和分析, 并采用隶属函数法综合比较 20 个赤桉家系木材的材性优劣状况。【结果】20 个赤桉家系木材的基本密度为 $0.344 \sim 0.558 \text{ g/cm}^3$, 木材基本密度在家系间以及家系与部位交互间差异性极显著, 不同家系立木部位间差异不显著。赤桉气干差异干缩值、全干差异干缩值分别为 1.60 和 1.51; 不同家系间气干干缩率(径向、弦向、体积)及全干干缩率(径向、弦向、体积)差异极显著; 不同部位间气干体积干缩率和全干体积干缩率差异不显著, 而全干(径向、弦向)和气干(径向、弦向)干缩率差异均极显著。赤桉不同家系间抗弯强度(26.79~103.11 MPa)、抗弯弹性模量(3 987~10 498 MPa)、顺纹抗剪强度(11.31~39.32 MPa)、顺纹抗压强度(32.46~59.33 MPa)差异极显著; 不同部位间除抗弯弹性模量差异极显著外, 其余性状差异均不显著; 赤桉不同家系间 4 个力学性质的变异系数范围为 12.05%~20.25%。幼龄期赤桉木材 4 个力学性质间两两相关性极显著。利用隶属函数法对 20 个赤桉家系进行综合材性评价, 隶属值均值排名前 5 位的家系依次为 2007、20016、20021、10014、10079, 其木材材性较优, 其中 10079、20016、2007 生长情况较好, 可作为赤桉用材林定向培育。【结论】45 月生的赤桉木材属轻材, 容易开裂, 树干底部的差异干缩值比中部、梢部大, 即底部木材更容易开裂和变形。

【关键词】 赤桉; 幼龄材; 木材物理性质; 木材力学性质

【中图分类号】 S781.3

【文献标志码】 A

【文章编号】 1671-9387(2019)05-0032-10

Physical and mechanical properties of *Eucalyptus camaldulensis* juvenile wood

SHANG Xiuhua, ZHANG Peijian, LUO Jianzhong, WU Zhihua

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

Abstract: 【Objective】To provide reference for the selection and rational utilization of *Eucalyptus camaldulensis* wood, the physical and mechanical properties of *E. camaldulensis* from 20 families were compared. 【Method】The 45-month-old *E. camaldulensis* from 20 families were collected from the South China Experimental Nursery in Zhanjiang, Guangdong. Wood samples were taken at the top, middle and bottom of trunk. Comparative analyses were carried out with SPSS Statistics, Excel and DPS Statistics on wood basic density, air-dried shrinkage ratio (radial, tangential and volume), over-dried shrinkage ratio (radial, tangential and volume), static bending, modulus of elasticity of bending, shear strength, compression strength,

【收稿日期】 2018-03-29

【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”国家重点研发计划项目“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】 尚秀华(1984—), 女, 山东菏泽人, 博士, 助理研究员, 主要从事林木培育及育种研究。E-mail: shxhzhz@163.com

【通信作者】 吴志华(1974—), 男, 湖南娄底人, 硕士, 副研究员, 主要从事林木逆境生理研究。E-mail: wzhuaz2889@163.com

and calculate dry shrinkage value (dry shrinkage/radial dry shrinkage) of air dried and total dry. The wood properties of the 20 families were then comprehensively evaluated by subordinate function method.【Result】The basic density of 20 *E. camaldulensis* wood was $0.344-0.558\text{ g/cm}^3$. The difference of wood density between families and between family and part was very significant, while the difference between different parts was not significant. The differences between air-dry and absolute-dry shrinkage were 1.60 and 1.51. Volume air dried shrinkage and volume over dried shrinkage ratio of different parts were not significant, but their air dried (tangential and radial) and over dried (radial and tangential) shrinkage were significant. The dry shrinkage value of trunk base was higher than that of the middle and top parts, more prone to cracking and deformation. The differences of mechanical properties of static bending (26.79—103.11 MPa), modulus of elasticity of bending (3 987—10 498 MPa), shear strength (11.31—39.32 MPa) and compression strength parallel to grain (32.46—59.33 MPa) between different families were very significant. Modulus of elasticity of bending between different parts was also very significant, while other indexes were not significant. The coefficient of variation of mechanical properties between different families was 12.05%—20.25%. The correlation between mechanical properties of *Eucalyptus camaldulensis* juvenile wood was very significant. Using subordinate function of 20 families for comprehensive evaluation, the top five families were 2007, 20016, 20021, 10014 and 10079. The 10079, 20016 and 2007 families had better growth than others and can be selected for directional cultivation for timber.【Conclusion】The wood density of 45-month-old *E. camaldulensis* was light, which was easy to crack, and the bottom of trunk was more likely to crack than the middle and top parts.

Keywords: *Eucalyptus camaldulensis*; juvenile wood; physical properties; mechanical properties

赤桉(*Eucalyptus camaldulensis*)是桃金娘科桉属中一个栽培较为广泛的树种,属于常绿乔木,在澳大利亚主要分布在海拔 250 m 左右的地区,在我国主要分布在华南地区以及云南省。赤桉具有耐高温、干旱及稍耐碱等特性,因而成为干热河谷地区山地植被恢复的理想树种^[1]。赤桉具有丰富的遗传多样性及优良的适应性,并在抗风、耐瘠薄、耐旱、耐寒方面具有独特的优势,是我国桉树遗传育种的重要材料^[2-3]。前人已从薪材特性、木材干燥处理、遗传资源分析、特殊基因克隆等方面对赤桉进行了一些研究^[4-8]。对于桉树木材材性,我国相继开展了蓝桉(*E. globulus*)、巨桉(*E. grandis*)、尾巨桉(*E. urophylla*×*E. grandis*)、粗皮桉(*E. pellita*)、尾赤桉(*E. urophylla*×*E. camaldulensis*)以及四川大叶桉(*E. robusta*)、葡萄桉(*E. botryoides*)、赤桉等不同桉树品种木材物理力学性质的研究^[9-15],但针对赤桉早期不同家系间木材物理力学特性差异性的研究尚未见报道。木材材性是其加工利用的基础,木材基本密度、干缩率、强度以及弹性模量等为木材常见的物理力学指标,是木材材性的重要体现。用材部门对木材的选择以及许多木材的加工处理工艺的确定,均取决于木材的物理力学性质。研究人工林木材的物理力学性质,是进行人工林定向培育以及

木材高效利用的重要依据,因此开展赤桉人工林木材物理力学性质的研究,对于丰富桉树木材特性的理论基础、提高木材利用效率、扩展桉树木材利用途径等具有重要意义。本研究以 20 个 45 月生赤桉家系为材料,对其材性进行测定,揭示各家系间木材物理力学特性的差异,同时比较分析赤桉不同部位木材物理力学性质的差异,以期对赤桉材性选育及木材的合理利用提供参考。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验地设在广东省湛江市遂溪县岭北镇附近南方国家级林木种苗示范基地内,地理位置为 $111^{\circ}38'E$, $21^{\circ}30'N$,该地气候属于热带北缘季风气候,年均温 $23.6^{\circ}C$,绝对最低气温 $2.8^{\circ}C$,绝对最高气温 $37.0^{\circ}C$,月平均气温 $18.0^{\circ}C$,夏季年均降水量 $1\,567\text{ mm}$,5—9 月降水占全年的 85%;土壤为砖红壤。

1.2 试验材料

20 个赤桉家系样本于 2016 年 5 月取自赤桉试验林(2012 年 8 月造林,完全随机机组设计,4 机组重复,4 单株小区,株行距 $2\text{ m}\times 3\text{ m}$),各家系信息和生长情况见表 1。

由于该试验林为长期观测的种质资源保存林，故每个家系选择 3 株具有代表性的标准木，并根据实际树高，分梢部(上)、树干中部(中)、树干底部(下)选择干型饱满、无变形弯曲的原木段，调整木材

含水率至 12%左右，然后参照国家标准 GB 1929—2009《木材物理力学试件锯解及试样截取方法》制取试件。

表 1 20 个赤桉家系的基本情况
Table 1 Basic information of the 20 *E. camaldulensis* families

序号 NO.	家系号 Family	树高/m Height	胸径/cm Diameter at breast height	枝下高/m Under branch height	分枝 角度/(°) Branching angle	序号 NO.	家系号 Family	树高/m Height	胸径/cm Diameter at breast height	枝下高/m Under branch height	分枝 角度/(°) Branching angle
1	2008	12.1	13.8	4.1	45	11	20021	10.7	9.6	4.3	45
2	10023	12.3	13.1	4.8	30	12	20026	11.7	11.2	7.6	25
3	10014	11.6	9.3	4.0	36	13	10076	13.2	13.4	4.1	58
4	10046	12.3	9.7	5.5	48	14	10013	13.4	12.6	5.5	47
5	20028	13.5	12.7	3.3	45	15	2009	13.8	14.9	3.9	35
6	20027	12.5	11.6	7.6	42	16	10033	12.3	10.4	5.7	32
7	10079	12.3	13.6	4.4	32	17	20016	12.5	10.2	7.7	38
8	10036	12.8	10.2	6.4	25	18	2007	11.7	11.0	5.4	52
9	2005	10.9	11.0	5.7	40	19	10080	11.7	10.2	5.8	65
10	1004	11.8	11.4	6.8	25	20	20022	11.8	11.8	3.7	48

1.3 木材物理力学性质测定

1.3.1 木材基本密度和干缩率 木材基本密度参照 GB/T 1933—2009《木材密度测定方法》进行测定；气干干缩率(径向、弦向、体积)和全干干缩率(径向、弦向、体积)参照 GB/T 1932—2009《木材干缩性测定方法》进行测定，每个指标测定的有效样本数不少于 30 个。差异干缩值通过下式计算：差异干缩值＝弦向干缩率/径向干缩率。

1.3.2 木材力学性质 木材抗弯强度、抗弯弹性模量、顺纹抗剪强度、顺纹抗压强度等分别参照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》和GB/T 1935—2009《木材顺纹抗压强度试验方法》进行测定。各试件在欧姆斯诺(Amsler)4 t 万能力学试验机上测定，每个指标测定的有效样本数不少于 30 个。

1.4 数据统计与分析

用 Excel xp 进行数据整理和统计，采用 SPSS 17.0 和 DPS 9.05 软件进行方差等分析。依据模糊数学中的隶属函数法，通过计算 20 个不同赤桉家系的各木材指标隶属值及总体平均值，综合比较赤桉木材的材性优劣状况。参照陶向新^[16]和孙晓梅等^[17]的方法计算隶属值，计算公式为：

$$\text{隶属值} = (X - X_{\min}) / (X_{\max} - X_{\min}) \times 100\%。$$

(1)

若某指标与材性性状呈反向关系，则通过反隶属函数计算隶属值：

$$\text{隶属值} = [1 - (X - X_{\min}) / (X_{\max} - X_{\min})] \times 100\%。$$

(2)

式中：X 为某家系某个材性指标的测定值，X_{max}为所有家系该木材指标测定值的最大值，X_{min}为所有家系该木材指标测定值的最小值。

2 结果与分析

2.1 赤桉不同家系木材的基本密度与干缩率分析
2.1.1 木材基本密度 从表 2 可以看出，幼龄期赤桉木材基本密度在家系间以及家系与立木部位交互间的差异性均极显著($P < 0.000\ 1$)，不同树干部位间差异不显著($P = 0.755\ 0$)。表 3 显示，20 个赤桉家系树干底部基本密度为 0.373~0.547 g/cm³，变异系数为 8.819%；树干中部基本密度为 0.382~0.558 g/cm³，变异系数为 8.369%；树梢部基本密度为 0.344~0.535 g/cm³，变异系数为 8.217%；赤桉家系的基本密度为 0.344~0.558 g/cm³，标准差为 0.039，总的变异系数为 8.45%。总体而言，赤桉树干底部、中部、梢部 3 个部位的基本密度差异较小，变异系数不大，基本密度较稳定。根据木材物理学性质分级法(小级基本密度为 0.351~0.550 g/cm³，中级为 0.551~0.750 g/cm³，大级为 0.751~0.950 g/cm³^[18])可知，45 月生赤桉木材基本密度属于小级。

表 2 20 个赤桉家系木材基本密度和干缩率的方差分析

Table 2 Variance analysis of wood density and dry shrinkage of the 20 *E. camaldulensis* families

性状 Trait		均方 MS			F			P		
		家系 Family	部位 Stand part	交互 Interaction	家系 Family	部位 Stand part	交互 Interaction	家系 Family	部位 Stand part	交互 Interaction
基本密度	Basic density	0.018	5.122E-005	1.588E-003	98.85	0.28	8.69	<0.000 1	0.755 0	<0.000 1
气干干缩率 Air-dried shrinkage ratio	径向 Radial	3.28	14.43	2.19	9.42	41.40	6.27	<0.000 1	<0.000 1	<0.000 1
	弦向 Tangential	5.34	15.79	3.47	13.41	39.63	7.70	<0.000 1	<0.000 1	<0.000 1
	体积 Volume	8.14	1.30	7.24	10.40	1.66	9.26	<0.000 1	0.191 9	<0.000 1
全干干缩率 Over-dried shrinkage ratio	径向 Radial	5.83	33.04	2.64	13.68	77.52	6.18	<0.000 1	<0.000 1	<0.000 1
	弦向 Tangential	10.64	20.03	3.84	24.31	45.76	8.76	<0.000 1	<0.000 1	<0.000 1
	体积 Volume	16.21	1.51	5.45	21.34	1.98	7.17	<0.000 1	0.140 0	<0.000 1

2.1.2 木材干缩率 表 2 方差分析结果显示,赤桉各家系间以及家系与立木部位交互作用间木材径向、弦向、体积的气干干缩率及全干干缩率差异均极显著($P<0.000\ 1$);树干底部、中部、梢部不同部位间木材体积气干干缩率($P=0.191\ 9$)和体积全干干缩率($P=0.140\ 0$)差异不显著,其余木材干缩率指标均差异极显著($P<0.000\ 1$)。

20 个赤桉家系木材基本密度和干缩率的平均值与变异系数见表 3。

表 3 20 个赤桉家系木材基本密度和干缩率的平均值与变异系数

Table 3 Genetic and variation parameters of wood density and dry shrinkage of the 20 *E. camaldulensis* families

项目 Item		基本密度/ (g·cm ⁻³) Basic density	气干干缩率/% Air-Dried shrinkage ratio			气干差异 干缩值 Air-dried shrinkage ratio difference	全干干缩率/% Over-Dried shrinkage ratio			全干差异 干缩值 Over-dried shrinkage ratio difference
			径向 Radial	弦向 Tangential	体积 Volume		径向 Radial	弦向 Tangential	体积 Volume	
底部 Bottom	平均值 Mean	0.463	2.65	5.39	8.13	2.03	4.07	7.62	11.81	1.87
	自由度 <i>df</i>	98	98	98	98		98	98	98	
	标准差 <i>SD</i>	0.041	0.86	1.43	1.79		1.01	1.42	1.77	
	最小值 Min.	0.373	0.94	1.62	3.56		0.34	2.85	6.96	
	最大值 Max.	0.547	5.03	11.44	13.56		6.80	11.42	16.38	
	变异系数 <i>CV</i>	8.819	32.22	26.51	22.00		24.73	18.65	14.95	
中部 middle part	平均值 Mean	0.459	3.19	4.73	7.90	1.48	5.00	7.09	12.06	1.42
	自由度 <i>df</i>	98	98	98	98		98	98	98	
	标准差 <i>SD</i>	0.039	0.88	0.86	1.26		1.04	0.99	1.34	
	最小值 Min.	0.382	1.57	2.26	4.98		3.10	4.28	8.48	
	最大值 Max.	0.558	5.95	6.54	11.23		7.74	9.58	14.88	
	变异系数 <i>CV</i>	8.369	27.53	18.11	16.00		20.78	14.01	11.09	
梢部 Tip	平均值 Mean	0.461	3.40	4.65	8.04	1.37	5.15	6.71	11.93	1.30
	自由度 <i>df</i>	97	97	97	97		97	97	97	
	标准差 <i>SD</i>	0.038	0.92	0.77	1.24		1.06	1.28	1.50	
	最小值 Min.	0.344	1.03	2.11	3.41		0.18	2.73	6.74	
	最大值 Max.	0.535	6.26	6.82	11.78		8.23	11.87	16.87	
	变异系数 <i>CV</i>	8.217	26.97	16.49	15.38		20.49	19.13	12.58	
家系 Families	平均值 Mean	0.462	3.08	4.93	8.02	1.60	4.74	7.14	11.93	1.51
	自由度 <i>df</i>	293	293	293	293		293	293	293	
	标准差 <i>SD</i>	0.039	0.94	1.11	1.45		1.14	1.30	1.54	
	最小值 Min.	0.344	0.94	1.62	3.41		0.18	2.73	6.74	
	最大值 Max.	0.558	6.26	11.44	13.56		8.23	11.87	16.87	
	变异系数 <i>CV</i>	8.450	30.36	22.50	18.09		23.96	18.15	12.93	

注:“变异系数”的单位为“%”。表 4 同。

Note:The unit of “coefficient of variation” is “%”. Table 4 is the same.

由表 3 可知,赤桉木材底、中、梢部径向气干干缩率变幅为 0.94%~6.26%,家系平均值为

3.08%，变异系数为 30.36%；弦向气干干缩率变幅为1.62%~11.44%，家系平均值为 4.93%，变异系数为 22.50%；体积气干干缩率平均值(8.02%)较径向、弦向气干干缩率要大，但变异系数(18.09%)较小。径向的全干干缩率平均值和变异系数与弦向相差较大；体积全干干缩率变幅为 6.74%~16.87%，家系平均值为 11.93%，变异系数为 12.93%。根据干缩率分级法^[19]，赤桉木材干缩率为 3.09%~11.93%，属中小级。

树干底部的气干干缩率变异系数为22.00%~32.22%，全干干缩率变异系数为 14.95%~24.73%；树干中部木材气干干缩率变异系数为 16.00%~27.53%，全干干缩率变异系数为 11.09%~20.78%；梢部木材气干干缩率变异系数为 15.38%~26.97%，全干干缩率变异系数为 12.58%~20.49%。总体而言，赤桉树干不同部位之间干缩率存在较大变异，干缩率变异程度表现为底部>中部>梢部。赤桉 2 种干缩率在家系间均存在着丰富的遗传变异，可进行进一步的遗传改良。

木材差异干缩值越大，则木材干燥过程中越容

易发生开裂和翘曲；差异干缩值越小，则木材各个纹理方向收缩相对均匀，在干燥时出现开裂和变形的几率比较小^[20]。表 3 中，赤桉家系气干差异干缩值为 1.60，全干差异干缩值为 1.51；赤桉木材底部气干差异干缩值为 2.03，全干差异干缩值为 1.87，中部气干差异干缩值为 1.48，全干差异干缩值为 1.42，梢部木材气干差异干缩值为 1.37，全干差异干缩值为 1.30。由于赤桉树干底部木材差异干缩性比较大，说明树干底部原木更容易发生开裂和变形。

2.2 赤桉不同家系木材的力学性质分析

赤桉树干底部、中部、梢部木材的抗弯强度、抗弯弹性模量、顺纹抗剪强度、顺纹抗压强度等如表 4 所示。由表 4 可知，赤桉树干底部木材抗弯强度的变幅为 50.63~103.11 MPa，平均为 76.44 MPa；抗弯弹性模量变幅为 3 987.00~10 270.00 MPa，平均值为 6 485.02 MPa；顺纹抗剪强度变幅为 11.31~37.40 MPa，平均值为 25.86 MPa；顺纹抗压强度变幅为 32.46~59.33 MPa，平均值为 45.67 MPa。

表 4 20 个赤桉家系木材的力学性质与变异系数统计

Table 4 Average values and variation sof mechanical properties of 20 *E.camaldulensis* families

	项目 Item	抗弯强度/MPa Static bending	抗弯弹性模量/MPa Modulus of elasticity of bending	顺纹抗剪强度/MPa Shear strength	顺纹抗压强度/MPa Compression strength parallel to grain
底部 Bottom	平均值 Mean	76.44	6 485.02	25.86	45.67
	自由度 <i>df</i>	93.00	93.00	99.00	100.00
	标准差 <i>SD</i>	11.26	1 476.12	4.72	6.13
	最小值 Min.	50.63	3 987.00	11.31	32.46
	最大值 Max.	103.11	10 270.00	37.40	59.33
	变异系数 <i>CV</i>	14.73	22.76	18.26	13.42
中部 Middle part	平均值 Mean	76.62	7 443.48	24.97	47.14
	自由度 <i>df</i>	77.00	77.00	90.00	99.00
	标准差 <i>SD</i>	12.60	1 145.84	5.31	4.83
	最小值 Min.	26.79	5 255.00	11.53	33.38
	最大值 Max.	102.68	10 498.00	39.32	56.64
	变异系数 <i>CV</i>	16.44	15.39	21.25	10.24
梢部 Tip	平均值 Mean	76.01	7 648.94	23.68	46.51
	自由度 <i>df</i>	70.00	70.00	44.00	82.00
	标准差 <i>SD</i>	14.74	1 010.08	5.18	5.73
	最小值 Min.	39.19	5 152.00	12.18	33.39
	最大值 Max.	100.70	9 634.00	38.13	57.21
	变异系数 <i>CV</i>	19.39	13.21	21.89	12.31
家系 Families	平均值 Mean	76.37	7 132.00	25.11	46.43
	自由度 <i>df</i>	240.00	240.00	233.00	281.00
	标准差 <i>SD</i>	12.73	1 350.26	5.08	5.60
	最小值 Min.	26.79	3 987.00	11.31	32.46
	最大值 Max.	103.11	10 498.00	39.32	59.33
	变异系数 <i>CV</i>	16.67	18.93	20.25	12.05

树干中部抗弯强度变幅(26.79~102.68 MPa)和平均值(76.62 MPa)均大于树干底部，抗弯弹性

模量变幅(5 255.00~10 498.00 MPa)比树干底部小,但抗弯弹性模量均值(7 443.48 MPa)和顺纹抗压强度(47.14 MPa)均高于树干底部。顺纹抗剪强度平均值为24.97 Mpa,比树干底部小,比树干梢部大,顺纹抗压强度平均值为47.14 MPa,比树干底部和梢部都大。

树干梢部木材抗弯强度变幅为39.19~100.70 MPa,平均值为76.01 MPa,低于树干底部和中部;抗弯弹性模量变幅为5 152.00~9 634.00 MPa,平均值为7 648.94 MPa,高于树干底部和中部;顺纹抗剪强度变幅为12.18~38.13 MPa,小于树干底部和中部;顺纹抗压强度变幅为33.39~57.21 MPa,平均值为46.51 MPa,介于树干底部和中部之间。

赤桉树干底部木材的抗弯强度、抗弯弹性模量、顺纹抗剪强度、顺纹抗压强度变异系数为13.42%~

22.76%,中部变异系数为10.24%~21.25%,梢部变异系数为12.31%~21.89%,家系变异系数范围为12.05%~20.25%。说明不同家系间以及树干不同部位抗弯强度、抗弯弹性模量、顺纹抗剪强度、顺纹抗压强度存在着差异。

进一步对赤桉家系木材的抗弯强度、抗弯弹性模量、顺纹抗剪强度、顺纹抗压强度等力学性质进行方差分析,结果如表5所示。由表5可知,家系间各性状差异性均极显著($P<0.0001$);不同部位间抗弯弹性模量差异极显著($P<0.0001$),抗弯强度($P=0.8143$)、顺纹抗剪强度($P=0.4381$)、顺纹抗压强度($P=0.1546$)差异不显著;家系和部位交互间抗弯强度差异不显著($P=0.1856$),抗弯弹性模量($P=0.0062$)、顺纹抗剪强度($P=0.0067$)和顺纹抗压强度($P<0.0001$)差异均极显著。

表5 20个赤桉家系木材力学性质的方差分析

Table 5 Variance analysis of wood mechanical properties of 20 *E.camaldulensis* families

指标 Index	均方 MS			F			P		
	家系 Family	部位 Stand part	交互 Interaction	家系 Family	部位 Stand part	交互 Interaction	家系 Family	部位 Stand part	交互 Interaction
抗弯强度 Static bending	5.622E-5	1.985E-6	1.190E-5	5.83	0.21	1.23	<0.000 1	0.814 3	0.185 6
抗弯弹性模量 Modulus of elasticity of bending	7.515E+6	2.439E+7	4.044E+6	3.35	10.86	1.80	<0.000 1	<0.000 1	0.006 2
顺纹抗剪强度 Shear strength	0.071	3.684E-3	8.652E-3	15.88	0.83	1.95	<0.000 1	0.438 1	0.006 7
顺纹抗压强度 Compression strength parallel to grain	250.19	84.16	217.03	5.60	1.88	4.85	< 0.000 1	0.154 6	<0.000 1

2.3 赤桉木材物理力学性质间的相关性分析

析,结果如表6所示。

对赤桉木材不同物理力学性质进行相关性分

表6 赤桉木材物理力学性质的相关性

Table 6 Correlation of physical and mechanical properties of *E.camaldulensis*

性状 Traits	抗弯强度 Static bending	抗弯弹性模量 Modulus of elasticity of bending	气干干缩率 Air-dried shrinkage ratio			全干干缩率 Over-dried shrinkage ratio			顺纹抗 剪强度 Shear strength	顺纹抗 压强度 Compression strength
			径向 Radial	弦向 Tangential	体积 Volume	径向 Radial	弦向 Tangential	体积 Volume		
抗弯弹性模量 Modulus of elasticity of bending	0.598**									
气干干缩率 Air-dried shrinkage ra- tio	径向 Radial	0.107	0.231**							
	弦向 Tangential	0.097	-0.197**	0.023						
	体积 Volume	0.112	-0.042	0.640**	0.771**					
全干干缩率 Over-dried shrinkage ra- tio	径向 Radial	0.172**	0.319**	0.921**	-0.060	0.511**				
	弦向 Tangential	0.174**	-0.123	-0.140*	0.816**	0.508**	-0.114			
	体积 Volume	0.240**	0.098	0.520**	0.622**	0.781**	0.598**	0.695**		
顺纹抗剪强度 Shear strength	0.403**	0.221**	-0.066	-0.012	-0.071	-0.024	0.075	0.015		
顺纹抗压强度 Compression strength	0.454**	0.487**	0.287**	0.127*	0.243**	0.337**	0.178**	0.335**	0.404**	
基本密度 Basic density	0.534**	0.387**	0.160**	0.251**	0.264**	0.296**	0.397**	0.498**	0.468**	0.547**

从表 6 可以看出,木材的抗弯强度与气干(弦向、径向、体积)干缩率相关性不显著($P>0.05$),但与抗弯弹性模量、全干(弦向、径向、体积)干缩率、顺纹抗剪强度、顺纹抗压强度、基本密度均极显著相关($P<0.01$);抗弯弹性模量除了与体积气干干缩率、全干(弦向、体积)干缩率相关性不显著($P>0.05$)外,与其他性状均极显著相关($P<0.01$);除了弦向气干干缩率与径向全干干缩率、径向气干干缩率与弦向全干干缩率、径向全干干缩率与弦向全干干缩率相关性不显著外,其余的干缩率间均显著或极显著相关。

2.4 赤桉不同家系木材的物理力学性质评价

通过对 20 个赤桉家系木材物理力学性质的方差分析与变异统计可知,不同家系间木材基本密度差异不显著,但木材干缩率、力学性状差异均极显著。不同部位间径向、弦向气干干缩率和全干干缩率、抗弯弹性模量差异均极显著。为了综合评价 20 个赤桉家系的材性状况,采取模糊数学中的隶属函

数法对不同家系间的木材材性进行综合比较。分别对赤桉木材基本密度、气干差异干缩值、全干差异干缩值以及 4 个力学指标进行隶属值计算,其中差异干缩与木材性质呈负相关关系,计算时以反隶属函数计算其值,各指标隶属值见表 7。由表 7 可知,隶属值均值排名前 5 的家系有 2007、20016、20021、10014 和 10079。其中家系 2007 的木材抗弯强度、顺纹抗剪强度在 20 个家系中最高,其抗弯弹性模量、顺纹抗压强度、木材基本密度也较高;家系 20016 的木材气干差异干缩值和全干差异干缩值最低,而其抗弯强度、抗弯弹性模量、顺纹抗压强度值较高;家系 20021 顺纹抗剪强度较高、抗弯强度和抗弯弹性模量较低;家系 10014 顺纹抗剪强度、顺纹抗压强度较高,抗弯强度和抗弯弹性模量较低;家系 10079 气干差异干缩值和全干差异干缩值较高,抗弯弹性模量和顺纹抗弯强度较低。综上可知,家系 2007、20016、20021、10014 和 10079 木材材性综合表现优良。

表 7 20 个赤桉家系木材材性的隶属函数值与排名

Table 7 Values and order of subject function of 20 *E. camaldulensis* families

家系	基本密度 Basic density	顺纹抗剪强度 Shear strength	抗弯强度 Static bending	抗弯弹性模量 Modulus of elasticity of bending	顺纹抗压强度 Compression strength	气干差异干缩 Air-Dried shrinkage ratio difference	全干差异干缩 Over-Dried shrinkage ratio difference	均值 Mean	排名 Ranking
2007	0.905	1.000	1.000	0.911	0.959	0.820	0.738	0.905	1
20016	0.843	0.867	0.866	0.845	0.844	1.000	1.000	0.895	2
20021	0.882	0.928	0.662	0.694	0.799	0.843	0.781	0.799	3
10014	0.790	0.903	0.652	0.750	0.805	0.846	0.799	0.792	4
10079	0.805	0.728	0.755	0.671	0.722	0.925	0.855	0.780	5
10033	0.443	0.589	0.501	1.000	1.000	0.820	0.731	0.726	6
1004	0.889	0.919	0.920	0.807	0.585	0.497	0.375	0.713	7
20026	0.672	0.473	0.837	0.637	0.669	0.586	0.481	0.622	8
10023	0.809	0.720	0.604	0.687	0.787	0.177	0.249	0.576	9
2009	0.630	0.783	0.743	0.685	0.693	0.277	0.183	0.571	10
10013	0.682	0.770	0.806	0.638	0.649	0.288	0.092	0.561	11
10076	1.000	0.535	0.863	0.776	0.748	0.000	0.000	0.560	12
10046	0.586	0.457	0.445	0.600	0.273	0.621	0.581	0.509	13
10036	0.317	0.222	0.598	0.637	0.480	0.592	0.602	0.492	14
20027	0.374	0.745	0.511	0.463	0.400	0.316	0.272	0.440	15
10080	0.240	0.667	0.424	0.493	0.465	0.427	0.342	0.437	16
20028	0.422	0.358	0.346	0.280	0.371	0.577	0.497	0.407	17
20022	0.152	0.498	0.182	0.383	0.191	0.750	0.585	0.392	18
2005	0.000	0.244	0.000	0.000	0.315	0.540	0.476	0.225	19
2008	0.154	0.000	0.022	0.248	0.000	0.587	0.542	0.222	20

3 讨 论

基本密度是木材物理力学性质中最重要的指标之一,对木材作为承重结构材料的品质有重要影响^[18],可判定木材的物理学性质和工艺性质^[21],是衡量木材物理力学性质的最佳指标,其大小及变异

程度是木材定向培育和性状改良的主要依据与理论基础。本研究中 20 个赤桉家系的基本密度为 0.344~0.558 g/cm³,均值为 0.462 g/cm³,平均变异系数为 8.45%,与鲍甫成等^[22]测定的尾叶桉木材基本密度相近。张松琴^[15]测定胸径超过 30 cm 赤桉木材的基本密度为 0.490 g/cm³,祁述雄^[23]测得

的13年生赤桉木材的基本密度为 0.64 g/cm^3 ,可以推断赤桉树龄越大则木材基本密度越大。本研究结果表明,45月生赤桉木材基本密度变异较小,按照我国木材材性分级标准^[18]属于小级。幼龄期赤桉木材基本密度在家系间以及家系与立木部位交互间的差异性均极显著,不同树干部位间差异不显著,说明赤桉不同部位木材的基本密度相对较稳定。

木材发生干缩主要是木材内的水分在空气中逐步蒸发所致,由于木材各向干缩不均匀所产生的内应力不同,因此会使木材及其制品出现翘曲变形和干裂等问题,从而影响木材及其制品的使用^[9]。木材干缩率越小则木材越不易变形,利用价值越高。了解木材的干缩性和干缩规律,对木材的加工利用具有重要意义^[19]。赤桉不同家系的木材气干(径向、弦向、体积)干缩率和全干(径向、弦向、体积)干缩率差异极显著,树干底部、中部、梢部不同部位木材的体积气干干缩率和体积全干干缩率差异不显著($P>0.05$),但径向、弦向气干干缩率差异极显著。姜笑梅等^[24]研究发现,尾巨桉树干高度对木材径向、弦向干缩率有显著影响,而尾叶桉、大花序桉、粗皮桉、细叶桉树干高度对干缩率影响不显著,柠檬桉树干高度仅对弦向干缩率有显著影响。赤桉木材干缩在径向与弦向的差异表明,赤桉木材各向具有不均匀性,这可能与组成木材的细胞种类、细胞壁构造和化学成分特性等相关^[25]。

木材因树种不同干缩率也不同,赤桉家系木材径向气干干缩率、全干干缩率均值分别为 3.08% 和 4.93% ,而弦向的气干干缩率、全干干缩率均值分别为 4.93% 和 7.14% ,赤桉干缩率偏中下水平,按照物理力学指标分级标准^[19],赤桉木材干缩率属于中小级,和其他桉树木材干缩率相比,赤桉木材(气干、全干)干缩率比5年生蓝桉干缩率大^[10],比尾叶桉^[25]、尾巨桉及巨桉^[26]小。木材差异干缩值可作为判断木材开裂变形的依据,其值越大,表明木材干燥过程中越容易发生开裂和翘曲^[27]。赤桉木材气干差异干缩值为 1.60 ,全干差异干缩值为 1.51 ,说明赤桉干燥过程中易发生开裂和形变;赤桉树干底部木材差异干缩值较中部、梢部大,表明其在加工过程中易出现端裂、开裂和变形等。

木材抗弯强度、抗弯弹性模量、顺纹抗剪强度、顺纹抗压强度等力学性质可度量木材抵抗外力的能力,是结构用材的主要指标,也是木材合理利用的重要依据^[9]。木材弯曲性能主要指抗弯强度和抗弯弹性模量,木材抗弯强度是指木材承受逐渐施加弯曲

荷载的最大能力,抗弯弹性模量主要用于度量木材在荷载下的变形和最大荷载。木材顺纹抗压强度是指木材沿纹理方向承受压力荷载的最大能力,其大小是选择坑木、支柱、桩木及轮辐等的重要依据。赤桉的抗弯强度、抗弯弹性模量、顺纹抗剪强度、顺纹抗压强度分别为 $76.37, 7132.00, 25.11$ 和 46.43 MPa ,对应的强度等级分别为Ⅱ级($54.1\sim 88.0\text{ MPa}$)、Ⅰ级($\leq 7.4\text{ GPa}$)、5级($>15.1\text{ MPa}$)和Ⅲ级($44.1\sim 59.0\text{ MPa}$)^[19],较张松琴^[15]测定的赤桉木材的相应力学指标值小,这可能与本研究中赤桉处于幼龄期有关。鲍甫成等^[22]研究发现,除顺纹抗拉强度外,17年生柠檬桉木材的抗弯强度、抗弯弹性模量和抗压强度等力学性质指标均高于9年生柠檬桉。根据《木材物理力学性质分级表》,幼龄赤桉木材的物理力学性质属于中低等水平。树种内与树种间、成熟材与幼林材间、人工林与天然林间的木材物理力学特性均存在较大的差异^[28]。李因刚等^[29]研究发现,桤木(*Alnus cremastogyne*)、枫杨(*Pterocarya stenoptera*)等15种五金工具柄用材林,各树种间木材物理力学性质存在极显著差异;童再康等^[30]研究表明,10个黑杨(*Populus nigra*)无性系的木材力学性质存在显著差异,但物理性质无显著差异。本研究发现,赤桉不同家系间木材力学性状差异性极显著,不同部位间木材抗弯弹性模量差异极显著,但抗弯强度、顺纹抗剪强度、顺纹抗压强度差异不显著。随着树干部位的上升,赤桉木材抗弯弹性模量逐渐增大,抗弯强度和顺纹抗压强度先增大后减小,顺纹抗剪强度则逐渐减小。与蓝桉^[10]相比,赤桉木材力学性质指标较高。按照力学指标分级标准^[19],赤桉力学性质属于Ⅰ~Ⅲ级。

赤桉木材物理力学各指标两两间存在着复杂的相关性,应依据材种需求分指标对赤桉进行定向材性评价。本研究利用隶属函数法,选择木材基本密度、差异干缩率(全干、气干)、力学性质(抗弯强度、抗弯弹性模量、抗剪强度、抗压强度)共7个指标对20个赤桉不同家系木材进行综合材性评价,综合排名前5位的2007、20016、20021、10014、10079木材材性较优,可作为家居用材开发利用,而结合生长指标看,家系10079、20016、2007生长更好,因此可以依据不同的利用方向对其进行定向培育。

[参考文献]

- [1] 曾龄英. 赤桉(*Eucalyptus camaldulensis*) [J]. 云南林业科技, 1996, 75(2): 57-61.

Zeng L Y. *Eucalyptus camaldulensis* [J]. Yunnan Forestry Science and Technology, 1996, 75(2): 57-61.

[2] 徐建民, 白嘉雨, 陆钊华. 华南地区桉树可持续遗传改良与育种策略 [J]. 林业科学研究, 2001, 14(6): 587-594.

Xu J M, Bai J Y, Lu Z H. Some sustainable strategies of improvement and breeding for *Eucalyptus* tree species in southern China [J]. Forest Research, 2001, 14(6): 587-594.

[3] 罗建中, 谢耀坚, 曹加光, 等. 2 年生桉树杂交种生长与抗风的遗传变异研究 [J]. 草业学报, 2009, 18(6): 91-97.

Luo J Z, Xie Y J, Cao J G, et al. Genetic variation in 2-year *Eucalypt* hybrids' growth and typhoon resistance [J]. Acta Prataculturae Sinica, 2009, 18(6): 91-97.

[4] 胡天宇. 赤桉的薪材特性及适生环境研究 [J]. 四川林业科技, 1992, 13(1): 38-41.

Hu T Y. A study of euelwood features of longbeak *Eucalyptus* and the environment suitable for its growth [J]. Sichuan Forestry Science and Technology, 1992, 13(1): 38-41.

[5] 陈太安. 赤桉干燥预处理与干燥流变特性的研究 [D]. 南京: 南京林业大学, 2004.

Chen T A. Study on preheating and rheological behavior of *Eucalyptus camaldulensis* lumber drying [D]. Nanjing: Nanjing Forestry University, 2004.

[6] Midgley S J, Eidridge K G, Doran J C. Genetic resources of *Eucalyptus camaldulensis* [J]. The Commonwealth Forestry Review, 1989, 68, 4(217): 295-908.

[7] 陈鸿鹏, 朱凤云, 吴志华, 等. 赤桉 GAPDH 家族基因的克隆及其序列分析 [J]. 林业科学研究, 2014, 27(1): 120-127.

Chen H P, Zhu F Y, Wu Z H, et al. Cloning and sequence analysis of GAPDH family genes from *Eucalyptus camaldulensis* [J]. Forest Research, 2014, 27(1): 120-127.

[8] 谷振军, 章怀云, 张党权, 等. 赤桉 CCoAOMT 亚家族的基因克隆及可变剪接分析 [J]. 林业科学, 2014, 50(5): 62-68.

Gu Z J, Zhang H Y, Zhang D Q, et al. Gene cloning and alternative splicing of CCoAOMT subfamily genes from *Eucalyptus camaldulensis* [J]. Scientia Silvae Sinicae, 2014, 50(5): 62-68.

[9] 成俊卿. 中国木材志 [M]. 北京: 中国林业出版社, 1985: 86-92.

Chen J Q. Chinese wood [M]. Beijing: China Forestry Publishing House, 1985: 86-92.

[10] 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.

[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.

[12] 刘君良, 阳财喜, 王雪花. 增强-热处理桉树木材物理力学性能分析 [J]. 木材加工机械, 2010(3): 1-4.

Liu J L, Yang C X, Wang X H. Physical and mechanical property analysis about *Eucalyptus pellita* after impregnation-strengthen and high-heat treatment [J]. Wood Processing Machinery, 2010(3): 1-4.

[13] 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.

[14] 高 伟, 罗建举, 李曲恩. 速生桉木材高温热处理的物理力学性能研究 [J]. 南方农业学报, 2013, 44(1): 116-120.

Gao W, Luo J J, Li Q E. Physical and mechanical properties of fast-growing eucalypt wood under high temperature heat treatment [J]. Journal of Southern Agriculture, 2013, 44(1): 116-120.

[15] 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(1): 46-57.

Zhang S Q. Physical and mechanical properties and utilization of *Eucalyptus* wood in Sichuan [J]. Eucalyptus Science & Technology, 1980(1): 46-57.

[16] 陶向新. 模糊数学在农业科学中的初步应用 [J]. 沈阳农学院学报, 1982(2): 96-107.

Tao X X. A preliminary application of fuzzy mathematics in agricultural science [J]. Journal of Shenyang Agricultural College, 1982(2): 96-107.

[17] 孙晓梅, 楚秀丽, 张守攻, 等. 落叶松种间及其杂种木材物理力学性质评价 [J]. 林业科学, 2012, 48(12): 153-159.

Sun X M, Chu X L, Zhang S G, et al. Timber evaluation on physcial and mechanical properties of species and hybrid of *Larix* [J]. Scientia Silvae Sinicae, 2012, 48(12): 153-159.

[18] 尹思慈. 木材品质和缺陷 [M]. 北京: 中国林业出版社, 1990.

Yin S C. Wood quality and defects [M]. Beijing: China Forestry Publishing House, 1990.

[19] 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.

Research Institute of Wood Industry, Chinese Academy of Forestry Science. Wood physical and mechanical properties of main tree species in China [M]. Beijing: China Forestry Publishing House, 1982.

[20] 冯 冰, 杨临弟. 文县杨木材物理力学性质实验分析 [J]. 甘肃林业科技, 2006, 31(1): 12-14.

Feng B, Yang L D. Experimental research on the timber phsic mechanics character of wenxian *Poplar* [J]. Journal of Gansu Forestry Science and Technology, 2006, 31(1): 12-14.

[21] 申宗圻. 木材学 [M]. 2 版. 北京: 中国林业出版社, 1993: 143-178.

Shen Z X. Wood Science [M]. 2nd ed. Beijing: China Forestry Publishing House, 1993: 143-178.

[22] 鲍甫成, 江泽慧, 姜笑梅, 等. 中国主要人工林树种幼龄材与成熟材及人工林与天然林木材性质的比较研究 [J]. 林业科学,

1998,34(2):63-76.

Bao F C, Jiang Z H, Jiang X M, et al. Comparative study on wood proprterties of juvenile VS natureal forest of main plant-
ationtree species in China [J]. Scientia Silvae Sinicae, 1998, 34
(2): 63-76.

[23] 祁述雄. 中国桉树 [M]. 北京: 中国林业出版社, 2002.

Qi S X. *Eucalyptus* in China [M]. Beijing: China Forestry
Publishing House, 2002.

[24] 姜笑梅, 叶克林, 吕建雄, 等. 中国桉树和相思人工林木材性质
与加工利用 [M]. 北京: 科学出版社, 2007: 62-98.

Jiang X M, Ye K L, Lü J X, et al. Wood properties and pro-
cessing of eucalyptus and acacia plantation in China [M]. Bei-
jing: China Forestry Publishing House, 2007: 62-98.

[25] 刘一星, 赵广杰. 木材学 [M]. 北京: 中国林业出版社, 2012.

Liu Y X, Zhao G J. Wood science [M]. Beijing: China Forestry
Publishing House, 2012.

[26] 王燕高, 胡庭兴. 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.

Wang Y 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.

[27] 徐有明. 木材学 [M]. 北京: 中国林业出版社, 2006.

Xu Y M. Wood science [M]. Beijing: China Forestry Publish-
ing House, 2006.

[28] 麻文俊, 张守攻, 王军辉, 等. 楸树新无性系木材的物理力学性
质 [J]. 林业科学, 2013, 49(9): 126-134.

Ma W J, Zhang S G, Wang J H, et al. Timber physical and me-
chanical properties of New *Catalpa bungei* clones [J]. Scientia
Silvae Sincae, 2013, 49(9): 126-134.

[29] 李因刚, 柳新红, 应光明, 等. 15 个五金工具柄用材树种幼龄
材物理力学性质的比较与综合评价 [J]. 林业科学, 2010, 46
(12): 182-187.

Li Y G, Liu X H, Ying G M, et al. Comparison and compre-
hensive evaluation of wood physical and mechanical properties
of fifteen young timber tree species for hardware tool handle
[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2010, 46(12): 182-187.

[30] 童再康, 俞友明, 郑勇平. 黑杨派新无性系木材物理力学性质
研究 [J]. 林业科学研究, 2002, 15(4): 450-56.

Tong Z K, Yu Y M, Zhang Y P. A study on timber physical
and mechanical properties of new aigeiros clones [J]. Forest
Research, 2002, 15(4): 450-456.

(上接第 31 页)

[33] Hara M, Fujinaga M, Kuboi T. Metal binding by citrus dehydrin
with histidine-rich domains [J]. Journal of Experimental Bota-
ny, 2005, 56(420): 2695-2703.

[34] Rahman L N, Bamm V V, Voyer J A M, et al. Zinc induces
disorder-to-order transitions in free and membrane-associated
Thellungiella salsuginea dehydrins Ts DHN-1 and Ts DHN-
2; a solution CD and solid-state ATR-FTIR study [J]. Amino
Acids, 2011, 40(5): 1485-1502.

[35] Hughes S, Graether S P. Cryoprotective mechanism of a small
intrinsically disordered dehydrin protein [J]. Protein Science,
2011, 20(1): 42-50.

[36] Zhu W N, Zhang D P, Lu X X, et al. Characterisation of an
SKn-type dehydrin promoter from wheat and its responsive-
ness to various abiotic and biotic stresses [J]. Plant Mol Biol
Rep, 2014, 32: 664-678.

[37] Kosova K, Vitamvas P, Prasil I T. Wheat and barley dehydrins
under cold, drought, and salinity: what can LEA-Ⅱ proteins
tell us about plant stress response [J]. Front Plant Sci, 2014,
5: 343.

[38] Mouillon J M, Gustafsson P, Harryson P. Structural investiga-
tion of disordered stress proteins, comparison of full-length
dehydrins with isolated peptides of their conserved segments
[J]. Plant Physiol, 2006, 142(2): 638-650.