

预热处理对改善尾巨桉木材干缩性和材色的研究

刘宏达,高建民*,陈瑶

(北京林业大学 材料科学与技术学院,北京 100083)

摘要:为探讨预热处理对尾巨桉木材干缩性和材色的影响,分别在 100℃ 饱和蒸汽和 120℃ 过热蒸汽条件下对尾巨桉木材进行预热处理。对预热处理前后的尾巨桉木材进行干缩率及色度指数的测定,应用扫描电镜对预热处理后尾巨桉木材的微观构造进行分析。结果表明:1)100℃ 饱和蒸汽可以使尾巨桉的干缩性降低,材色无明显变化;120℃ 过热蒸汽处理使尾巨桉在干燥过程中出现较多缺陷,如皱缩、内裂等,但可以有效促使桉木颜色向珍贵树种颜色转变。2)经 120℃ 过热蒸汽处理,尾巨桉木材导管中纹孔的内含物被部分排出,细胞被压扁,宏观尺寸发生变形,是导致尾巨桉出现干燥缺陷的主要原因。

关键词:预热处理;桉木;干缩率;颜色;材性改良

中图分类号:S782.31 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-7461(2014)05-0176-05

Effects of Pre-heat Treatment on Improving the Shrinkage and Color of *Eucalyptus grandis* × *E. urophylla* Wood

LIU Hong-da, GAO Jian-min*, CHEN Yao

(College of Materials Science and Technology, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China)

Abstract: To investigate the effects of pre-heat treatment on the shrinkage properties and discoloration of *Eucalyptus grandis* × *E. urophylla* wood, the wood samples were pre-heated at 100 °C saturated steam and 120 °C overheated steam, respectively. The shrinkage ratio and color of the samples after pre-heat treatment were evaluated. The microscopic structure of the samples were analyzed using SEM. The results showed that: 1) the shrinkage ratio of *Eucalyptus* wood samples decreased after 100℃ saturated steam heat treatment, while no obvious discoloration was observed. However, excessive defects appeared during the wood drying process when the samples were subjected to pre-heat treatment under 120℃ overheated steam. Positive color changes could be observed after the wood samples pre-heated under 120℃ overheat steam. 2) Parts of the extractives of *Eucalyptus* were removed by pre-heat treatment, which led to discoloration of the wood samples. The cells were crushed, which resulted in the macroscopic dimension deformation and wood defects during the drying process.

Key words: pre-heat treatment; *Eucalyptus urophydis*; shrinkage; color; wood property improving

桉树是桃金娘科(Mgrrtaceae)桉属(*Eucalyptus*)植物的统称^[1],因其速生丰产而被世界各国广泛引种种植。目前,桉树已成为我国南方人工造林的主要树种之一,其纤维、锯材及单板被广泛应用^[2]。桉木密度分布不均匀,生长应力大,原木锯解

后,板材易出现弯曲和开裂,在干燥过程中可导致较大的干燥应力,易出现表裂、皱缩等缺陷;桉木的干缩率也较高,不同树种及树干高度,其干缩率都有所不同^[3],研究发现,晚材弦向干缩率大于早材的弦向干缩率^[4]。不同种类桉树木材材色参数之间差异显

收稿日期:2014-01-13 修回日期:2014-03-11
基金项目:国家自然科学基金项目“木材热诱发变色过程中发色体系形成的化学机理”(31070490)。
作者简介:刘宏达,女,硕士,研究方向:木材热诱发变色。E-mail:woodfight@sina.cn
*通信作者:高建民,男,博士,教授,研究方向:木材干燥。E-mail:jmgao@bjfu.edu.cn

著,桉木心材部分的色品指数和色饱和度高于边材^[5]。

针对桉木的材性缺陷,众多学者对其进行了改性研究。微波预处理可以提高桉木渗透性^[6],在一定程度上消除桉木的残余生长应力,在薄壁细胞层次上改变木材内部微观构造^[7];在含水率为3.9%时对赤桉皱缩材进行2.5 h的汽蒸处理,可以使赤桉干燥过程中产生的皱缩有效地回复^[8];高温热处理或炭化处理对速生人工林桉树木材的改性效果显著,能够大大提高其尺寸稳定性,并使其材色得到改善^[9];E. Bruno^[10]等对松木和桉木在高温蒸汽处理条件下的材性变化进行了研究,发现经过蒸汽处理的木材,随着处理时间的延长和处理温度的提高,木材尺寸稳定性提高,表面润湿性降低。但是经过热处理,由于木材中半纤维素的降解等原因,导致木材的强度下降,如抗弯强度降低等^[11]。经过热处理后,木材颜色加深,使浅色木转变为深色木,提高其经济价值。J. Ilic对桉木板材进行预冻处理,发现在-20℃处理72 h,桉木的皱缩程度降低了36%,在干燥的早期阶段,干燥速度有少量增加,但木材从生材干燥到含水率为15%的过程中,木材的干燥速度在总体上没有提高^[12]。刁海林等人针对巨尾桉木材的干燥特性,制定了较适宜的干燥基准。巨尾桉试件主要缺陷是内裂和截面变形,在实际生产过程中要尽量使用软基准,干燥中、后期要适时进行调湿处理^[13]。所有针对于速生人工林桉木的改性研究,都使得改性后的桉木在某个性能上有了比较大的改善。但部分改性技术耗能较大,需添加改性剂,污染环境,或改性只提高木材某一方面的性能。探索清洁、低能耗的改性技术,改善桉木的多种材性,对桉木的实木化利用具有重要意义。

木材的颜色是消费者评价木材质量的一个关键指标,木材在干燥过程中颜色会发生变化,大多数树种经过热处理后,颜色变深,并有向红色发展的趋势。因此可以通过热处理技术,使用颜色较浅的木材仿制颜色较深的热带树种,提高浅色材的利用价值。一些木材在环境温度达到65℃以上时即可发生颜色变化,此外,pH值、含水率、加热介质、加热时间和树种也影响木材的颜色变化^[14]。J. Denis^[15]等研究经过热处理的桦木板材,发现其颜色分布是不均匀的,这主要表现为明度分布的不均匀,当处理温度达到200℃时,明度的作用减小,而黄蓝色品指数(b^*)对颜色分布的均匀性起到了关键作用。随着对高温热处理木材技术的不断研究,高温热处理材被广泛应用于生产生活中。经过高温热处理,

木材的干缩湿胀及含水率降低,耐腐、耐候性提高,并且材色变深,可以用于地板、户外木材等的装饰装修中。当前由于桉树的产量巨大,且在实木加工过程中干燥缺陷难以攻克,且材色较浅,大多桉树只用在纸浆材或人造板上。所以通过高温处理桉木,诱发其变色,对提高桉木的材色及品质有重要的意义。

在桉木的加工利用上,其干燥技术是桉树加工利用的关键之一。热处理可以导致木材物理化学性质的变化,提高木材的尺寸稳定性。通过比较100℃饱和蒸汽和120℃过热蒸汽预处理对尾巨桉木材干缩性和材色的影响,从微观构造上解释尾巨桉干缩性大的原因,以期找到适宜的干燥条件,使桉木的干缩率降低,木材颜色向珍贵树种颜色方向发展,提高桉木的利用价值。

1 材料与方法

1.1 材料

尾巨桉产自广西,直径约200 mm,树龄为6~10 a之间,含水率为75%~125%,绝干密度0.57 g/cm³,气干密度0.68 g/cm³,基本密度0.45 g/cm³。弦向全干干缩率16.2%,径向全干干缩率6.3%,体积全干干缩率21.8%,弦向气干干缩率4.2%,径向气干干缩率1.1%,体积气干干缩率5.0%。用于测量干缩率的试验材料规格为20 mm×20 mm×20 mm;用于测量颜色的试验材料规格为100 mm×60 mm×20 mm;扫描电镜试验中试验材料规格在1 cm以下。

1.2 设备

DZFZ 9-3全自动电热蒸汽发生器、DF204电热鼓风干燥箱、DHG-9240A型电热恒温鼓风干燥箱、天平、游标卡尺、ZB-A色度仪(杭州纸邦公司)、JSM-7001F场发射扫描电镜、小型离子溅射仪、UV-4802型紫外可见分光光度计等。

1.3 方法

将桉木原木锯成30 mm厚的板材,将板材刨光,加工成20 mm×20 mm×20 mm及100 mm×60 mm×20 mm的试件,分别进行100℃饱和蒸汽和120℃过热蒸汽处理,处理时间为36 h。每4 h取出1组试件进行干缩率及材色的测量,每组试验重复5次,取平均值。按GB/T 1932-2009木材干缩性测定方法测量试件干缩率,根据1976年国际照明委员会标准色度学CIE(1976) $L^*a^*b^*$ 系统对尾巨桉木材的颜色进行表征。每个试件取3个测点,取平均值作为最终测量值。其中各参数的意义如下:

L^* —明度,完全白的物体视为 100,完全黑的物体视为 0;

a^* —红绿轴色品指数,正值越大表示颜色越偏向红色,负值越大表示颜色越偏向绿色;

b^* —黄蓝轴色品指数,正值越大表示颜色越偏向黄色,负值越大表示颜色越偏向蓝色;

$\Delta L^* = L^* - L_0^*$,明度差,正值表示比对照样明亮,负值表示比对照样暗;

$\Delta a^* = a^* - a_0^*$, a^* 的变化值,正值越大表示颜色越偏向红色,负值越大表示颜色越偏向绿色;

$\Delta E^* = [(\Delta L^*)^2 + (\Delta a^*)^2 + (\Delta b^*)^2]^{1/2}$,色差,又称总体色差,数值越大表示被测物和对照物颜色差别越大。

2 预热处理对尾巨桉木材性质的影响

2.1 预热处理对尾巨桉木材干缩率及微观构造的影响

由于锯材在厚度上水分分布不均、横向上的各向异性以及心边材干燥速度和干缩性的不同,使得在干燥过程中木材的干缩率发生较大变化^[16],导致

各种干燥缺陷的出现,如内裂、皱缩等。中、低密度的人工林桉树在干燥过程中很容易产生皱缩及内裂,皱缩及内裂的数量和大小与木材的密度、含水率、干缩性^[17]及微纤丝角、细胞壁厚度、射线薄壁细胞所占比例、残余皱缩等都有关系^[18]。研究表明,热处理可以降低木材的干缩性,提高木材的尺寸稳定性^[19]。

由表 1 可看出,经 100℃ 预热处理,尾巨桉木材的弦向干缩率平均值为 13.5%,较生材的弦向干缩率有所减少;径向干缩率平均值为 8.5%,较生材的径向干缩率有所增加;体积干缩率的平均值为 20.8%,较生材的体积干缩率有所减少,但减少的程度较小;差异干缩的平均值为 1.59,较生材的差异干缩降低了 0.98。经 120℃ 预热处理,尾巨桉木材的弦向干缩率平均值为 14.1%,较生材的弦向干缩率有所减少;径向干缩率平均值为 9.5%,较生材的径向干缩率有所增加;体积干缩率的平均值为 22.6%,较生材的体积干缩率有所增大,但增大的程度较小;差异干缩的平均值为 1.5,较生材的差异干缩降低了 1.07。经过 100℃ 饱和蒸汽处理和 120℃

表 1 预热处理前后尾巨桉干缩率变化

Table 1 Shrinkage of *Eucalyptus grandis* × *E. urophylla* wood before and after pre-heat treatments

时间/h	100℃				120℃			
	弦向 干缩率/%	径向 干缩率/%	体积 干缩率/%	差异 干缩	弦向 干缩率/%	径向 干缩率/%	体积 干缩率/%	差异 干缩
0	16.2	6.3	21.8	2.57	16.2	6.3	21.8	2.57
4	13.2	8.7	21.5	1.52	14.2	8.4	22.0	1.69
8	13.8	9.4	21.8	1.47	14.9	10.0	23.7	1.49
12	12.8	7.7	19.9	1.66	15.2	9.5	23.5	1.60
16	14.8	8.1	20.0	1.83	13.4	9.7	22.6	1.38
20	13.8	8.3	21.3	1.66	14.7	9.9	23.4	1.48
24	13.4	8.5	21.0	1.58	12.8	10.0	21.7	1.28
28	13.8	8.7	21.4	1.59	13.9	9.2	22.2	1.51
32	12.6	8.3	19.8	1.52	13.1	9.4	21.4	1.39
36	13.0	8.7	20.8	1.49	14.8	9.0	22.6	1.64
平均值	13.5	8.5	20.8	1.59	14.1	9.5	22.6	1.50

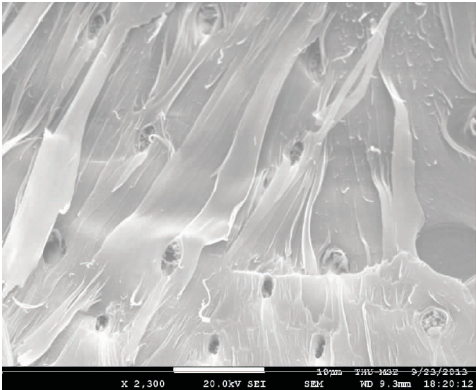


图 1 100℃ 饱和蒸汽处理桉木早材纵切面
Fig.1 The longitudinal section of eucalyptus early wood after 100 °C saturated steaming treatment

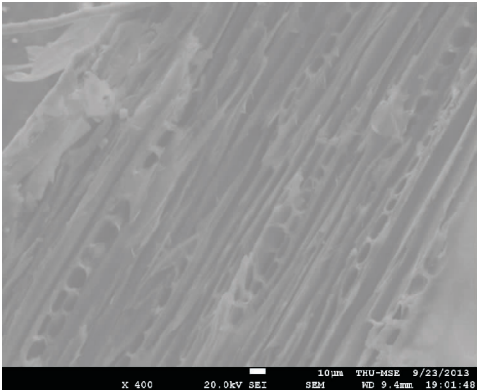


图 2 120℃ 过热蒸汽处理桉木早材纵切面
Fig.2 The longitudinal section of eucalyptus early wood after 120 °C overheated steaming treatment

过热蒸汽处理,尾巨桉木材的弦向干缩率降低,径向干缩率增大,差异干缩减小。干缩率的减小降低了干燥过程中木材开裂的危险,差异干缩的减小,说明木材的尺寸稳定性得到提高。干缩率随处理时间的增加没有明显变化。100℃饱和蒸汽处理较120℃过热蒸汽处理,对降低桉木的干缩率效果更好。

由图1、图2可看出,尾巨桉为散孔材,多为单管孔,导管上纹孔分布较密,纹孔上多有沉积物,附物呈颗粒状沉积在纹孔口^[20]。经过100℃饱和蒸汽处理,尾巨桉木材的内含物被部分的排出,但仍有部分颗粒状附物沉积在纹孔口,细胞整体尺寸未发生较大变化,细胞形状规则,纹孔呈椭圆形。由于内含物的排出,使木材中水分的通道畅通,加快了干燥速度,在蒸汽的作用下,干燥过程比较缓和,降低了木

材的干裂势。在高温的作用下,木材细胞壁内的微胶粒和微细纤维由于水分的排出而互相靠拢,并发生固化,且不易复原,提高了木材的尺寸稳定性^[21]。经120℃过热蒸汽处理,尾巨桉木材导管中纹孔的内含物被大量的排出,导管被压扁,在宏观上表现为桉木的尺寸发生变形。在高温的作用下,木材表面水分迅速蒸发,使心层水分迅速向表层移动,预热温度过高,温度梯度过大,造成木材干裂势过大,使木材发生内裂,故120℃过热蒸汽处理不能使尾巨桉木材的尺寸稳定性得到改善。

2.2 预热处理对尾巨桉木材颜色的影响

尾巨桉生材的材色值范围为明度 $L^* = 70 \sim 76$,红绿色品指数 $a^* = 4 \sim 8$,黄蓝色品指数 $b^* = 13 \sim 21$ (表2)。

表2 预热处理后尾巨桉平均色度指数

时间/h	L^*		a^*		b^*		ΔE^*	
	100℃	120℃	100℃	120℃	100℃	120℃	100℃	120℃
4	74.78	72.29	5.40	7.27	17.03	17.58	2.62	3.49
8	73.76	70.14	6.05	5.97	19.12	13.81	1.73	6.43
12	72.35	71.90	5.98	6.30	17.87	13.78	3.22	4.57
16	71.08	66.54	7.40	7.97	18.88	17.17	2.65	6.71
20	70.45	64.09	9.53	10.45	20.81	16.34	3.91	10.62
24	71.43	59.34	5.95	11.48	16.25	16.29	1.92	17.70
28	69.65	57.90	6.78	11.31	15.31	16.67	3.83	16.54
32	68.18	47.22	6.57	14.10	15.06	15.18	5.52	28.49
36	67.78	51.68	7.20	10.98	15.46	15.84	7.38	24.04

尾巨桉木材经过2种预热处理,随着处理时间的延长,明度值(L^*)逐渐降低,红绿色品指数(a^*)升高,黄蓝色品指数(b^*)波动变化,说明尾巨桉经预热处理后,材色变深变红,黄蓝颜色基本无变化。经预热处理后,尾巨桉木材的色差(ΔE^*)变化较大,说明尾巨桉木材受热易变色,且温度越高,热处理时间越长,变色程度越大。

由图3、图4可看出,随着处理时间的延长,尾巨桉的明度差 ΔL^* 逐渐降低,说明处理后的尾巨桉木材颜色较未处理材的颜色变暗了,且随着处理时间的延长,颜色逐渐加深。100℃饱和蒸汽处理对尾巨桉木材的明度值影响不大,明度差最大在7左右;而120℃过热蒸汽处理对尾巨桉木材的明度值影响极大,最大差值在27左右,但热处理32h后,明度差有增大的趋势。尾巨桉木材的红绿色品指数差(Δa^*)随热处理时间的延长而增加,120℃过热蒸汽处理与100℃饱和蒸汽处理相比,对桉木的 Δa^* 值影响更大,但在32h后, Δa^* 值有减小的趋势。在高温的作用下,木材中的某些组分发生了降解和氧

化,使木材的颜色加深。而热处理一定时间后,可能由于在热处理中形成的一些物质,反过来与木材中的某些化学成分发生化学反应,使木材的颜色发生变化,明度升高,颜色变浅。经过120℃过热蒸汽处理后,尾巨桉的颜色($L^* : 44.96, a^* : 15.73, b^* : 14.87$)较接近香樟($L^* : 43.8, a^* : 15.64, b^* : 10.65$)这种木材的颜色^[22]。

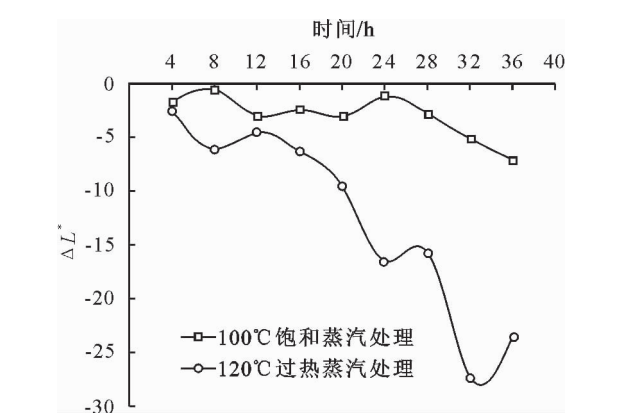


图3 不同温度下 ΔL^* 随着时间的变化

Fig. 3 The changes of ΔL^* with time

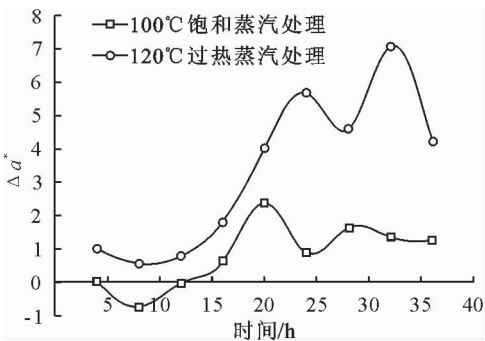


图 4 不同温度下 Δa^* 随着时间的变化

Fig. 4 The changes of Δa^* with time

3 结论

经过预热处理,尾巨桉木材的弦向干缩率减小,径向干缩率增加,差异干缩减小,木材的尺寸稳定性得到一定提高。

经过预热处理,桉木的导管及纹孔中的内含物部分的输出,加快了桉木的干燥速度。但经 120℃ 过热蒸汽处理,尾巨桉内的导管被压扁,在宏观上表现为桉木的尺寸发生变形,故 120℃ 过热蒸汽处理不能使尾巨桉木材的尺寸稳定性得到改善。

100℃ 饱和蒸汽处理对桉木的材色影响较小,120℃ 过热蒸汽处理对桉木诱发变色效果较好。经过 120℃ 过热蒸汽处理后,尾巨桉的颜色较接近香樟的材色。

参考文献:

[1] 杨家驹,段新芳,卢鸿俊,等. 世界商品木材拉丁名称[M]. 北京:中国林业出版社,2000:95-101.

[2] 黄如楚. 桉树木材加工利用研究现状[J]. 桉树科技,2010,27(1):68-74.
HUANG R C. A review on processing and utilization of *Eucalypt* wood[J]. *Eucalypt Science & Technology*, 2010,27(1): 68-74. (in Chinese)

[3] 任世奇,罗建中,谢耀坚,等. 不同桉树无性系及树干高度木材的干缩特性研究[J]. 西北林学院学报,2012,27(1):232-237.
REN S Q, LUO J Z, XIE Y J, *et al.* Dry shrinkage properties of different eucalypt clones and stem heights[J]. *Journal of Northwest Forestry University*, 2012, 27 (1): 232-237. (in Chinese)

[4] 江泽慧,费本华,王喜明,等. 桉树木材干燥特性与工艺及其皱缩研究现状[J]. 木材工业,2002,16(4):3-6.
JIANG Z H, FEI B H, WANG X M, *et al.* Study on reduction of collapse of *Eucalyptus* wood in drying[J]. *China Wood Industry*, 2002,16(4):3-6. (in Chinese)

[5] 赵荣军,费本华,江泽慧. 人工林桉树木材颜色和耐光性[J]. 东北林业大学学报,2005,33:43-44.
ZHAO R J, FEI B H, JIANG Z H. Surface color and lightness of *Eucalypt* wood from plantations[J]. *Journal of North-*

east Forestry University, 2005,33:43-44. (in Chinese)

[6] 江涛,李秀荣,谢延军等. 微波预处理对巨尾桉木材渗透性的影响[J]. 西北林学院学报,2013,28(1):174-177.
JIANG T, LI X R, XIE Y J, *et al.* Effects of microwave pre-treatment on the permeability of *Eucalyptus grandis* × *Eucalyptus urophylla* [J]. *Journal of Northwest Forestry University*, 2013,28(1):174-177. (in Chinese)

[7] 周永东,傅峰,李贤军,等. 微波处理对桉木应力及微观构造的影响[J]. 北京林业大学学报,2009,31(2):146-150.
ZHOU Y D, FU F, LI X J, *et al.* Effects of microwave treatment on residue growth stress and microstructure of *Eucalyptus urophylla* [J]. *Journal of Beijing Forestry University*, 2009,31(2):146-150. (in Chinese)

[8] 陈太安,顾炼百. 汽蒸处理回复赤桉干燥皱缩的研究[J]. 南京林业大学学报:自然科学版,2004,28(3):34-36.
CHEN Tai-an, GU Lian-bai. Effect of the steaming on *Eucalyptus camaldulensis* lumber drying collapse recovery[J]. *Journal of Nanjing Forestry University: Nat. Sci. Edi.*, 2004,28 (3):34-36. (in Chinese)

[9] 巫国富,韦春义,曾俊钦,等. 速生人工林桉树木材高温热处理研究[J]. 中国农学通报,2011,27(19):44-48.
WU G F, WEI C Y, ZENG J Q, *et al.* Study on high temperature heat treatment of plantation Eucalypt wood[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2011,27(19):44-48. (in Chinese)

[10] BRUNO E, ANTOÓNIO V M, IDALINA D, *et al.* Influence of steam heating on the properties of pine (*Pinus pinaster*) and Eucalypt (*Eucalyptus globulus*) wood[J]. *Wood Science and Technology*, 2007,41:193-207.

[11] 陈康乐,冯德君,张英杰,等. 高温热处理对木材力学性能的影响[J]. 西北林学院学报,2013,28(5):164-166.
CHEN K L, FENG D J, ZHANG Y J, *et al.* Effects of high temperature treatment on mechanical properties of wood[J]. *Journal of Northwest Forestry University*, 2013,28(5):164-166. (in Chinese)

[12] ILIC J. Influence of prefreezing on shrinkage-related degrade in *Eucalyptus regnans* F. Muell[J]. *Holz als Roh-und Werkstoff*, 1999,57: 241.

[13] 刁海林,陈健波,罗建举,等. 巨尾桉干燥特性研究[J]. 中国农学通报,2011,27(28):63-68.
DIAO H L, CHEN J B, LUO J J, *et al.* The study of drying characteristics on *Eucalyptus grandis* × *E. urophylla* [J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2011,27(28):63-68. (in Chinese)

[14] SADOOT S T, WAHBI J, FRANCOISE M, *et al.* Causes of color changes in wood during drying[J]. *Forestry Study China*, 2010,12(4):167-175.

[15] DENNIS J, TOM M. The potential of colour measurement for strength prediction of thermally treated wood[J]. *Holz als Roh-und Werkstoff*, 2006,64:104-110.

[16] WOOL K, NAM-HO L. Relationship between radial variations in shrinkage and drying defects of tree disks[J]. *Wood Science and Technology*, 2004,50:209-216.

定[J]. 西北林学院学报,2008,23(1):166-168.

LUO D Y, FENG D J, MU Y P, *et al.* Wood species identification of woody structure in ancient architecture at Jintaiguan Temple in Baoji[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2008,23(1):166-168. (in Chinese)

[8] 李敏华,谭必明,黄志同,等. 古家具木材无损鉴定方法研究[J]. 西北林学院学报,2012,27(6):165-167.

LI M H, TAN B M, HUANG Z T, *et al.* A study on wood non-destructive identification method of ancient furniture[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2012,27(6):165-167. (in Chinese)

[9] 徐峰. 木材鉴定图谱[M]. 北京:化学工业出版社,2008.

[10] 曾月星,许明坤,丁水汀. 鉴定木材显微切片制作技术[J]. 人造板通讯,2002(7):13,20.

[11] 徐斌,陶武先. 徒手切片法在进口材木材识别中的应用[J]. 木材工业,2006,20(1):41-43.

XU B, TAO W X. Application of a hand-held slicing method for wood species identification[J]. China Wood Industry, 2006,20(1):41-43. (in Chinese)

[12] 赵泾峰,段新芳,冯德君,等. 西藏古建筑房椽木构件树种鉴定研究[J]. 西北林学院学报,2007,22(6):138-143.

ZHAO J F, DUAN X F, FENG D J, *et al.* Identification of wood species in Tibet ancient buildings[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2007, 22(6):138-143. (in Chinese)

[13] 林晓木. 如何软化处理木材[J]. 湖南林业,2004(2):23.

[14] 李杰. 木材的识别方法[J]. 安徽林业,2006(4):23.

[15] 陈柏林,洛向玉,王萃. 玻璃刀制备木材超薄切片的研究[J]. 东北林业大学学报,1996,24(3):84-89.

CHEN B L, LUO X Y, WANG C. The technology of making wood ultrathin slices with glass-knife[J]. Journal of Northeast Forestry University, 1996, 24(3):84-89. (in Chinese)

(上接第 87 页)

[14] 石伟,李东栋,邓秀新,等. 根癌农杆菌介导绿色荧光蛋白基因转化印度酸桔的研究[J]. 园艺学报,2002,29(2):109-112.

SHI W,LI D D,DENG X X, *et al.* Transformation of gfp in cleopatra (*Citrus reticulata*) mediated by *Agrobacterium tumefaciens*[J]. Acta Horticulturae Sinica, 2002, 29(2):109-112. (in Chinese)

[15] 王锐,王俊斌,丁博,等. 适于植物转基因体系优化的绿色荧光蛋白表达载体构建及其瞬时表达验证[J]. 中国农学通报,2013,29(15):164-168.

[16] VAIN P, WORLAND B, KOHLI A, *et al.* The green fluorescent protein(GFP) as a vital screen-able marker in rice transformation[J]. Theor. Appl. Genet., 2000(96):164-169.

[17] 黄国存,朱生伟,董越酶,等. 绿色荧光蛋白在植物研究中的应用[J]. 植物学通报,1998,15(5):24-30.

[18] CRAMER C L, LIANG X W, DRON M. Differential regulation of phenylalanine ammonia-lyase genes during plant development and environmental cues[J]. Journal of Biological Chemistry, 1989,264(24):14486-14492.

[19] 程水源,陈昆松,刘卫红,等. 植物苯丙氨酸解氨酶基因的表达调控与研究展望[J]. 果树学报,2003,20(5):351-357.

CHENG S Y,CHENG K S,LIU W H, *et al.* Regulation and expression of the PAL in plant and its outlook[J]. Journal of Fruit Science, 2003,20(5):351-357. (in Chinese)

(上接第 180 页)

[17] ILIC J. Shrinkage-related degrade and its association with some physical properties in *Eucalyptus regnans* F. Muell [J]. Wood Science and Technology,1999,33:425-437.

[18] WU Y Q,HAYASHI KAZUO,LIU Y, *et al.* Collapse-type shrinkage characteristics in plantation-grown Eucalypts: I. correlations of basic density and some structural indices with shrinkage and collapse properties[J]. Journal of Forestry Research,2005,16(2):83-88.

[19] LUIGI T, LUIGI Z, MARIO M, *et al.* Steaming effects on selected wood properties of turkey oak by spectral analysis [J]. Wood Science and Technology, 2012:46:89-100.

[20] 江泽慧,王喜明. 桉树人工林木材干燥与皱缩[M]. 北京:中国林业出版社,2003.

[21] 马世春. 汽蒸处理改善木材尺寸稳定性初探[J]. 木材工业,1998,12(5):36-39.

MA S C. Study on improving dimensional stability of wood after saturated steam treatment[J]. China Wood Industry, 1998,12(5):36-39. (in Chinese)

[22] 段新芳,常德龙,李增超. 木材颜色调控技术[M]. 北京:中国建材工业出版社,2002:55-57.