

热处理条件对杉木颜色变化的影响

唐荣强, 鲍滨福, 李延军

(浙江农林大学 工程学院, 浙江 临安 311300)

摘要: 以杉木 *Cunninghamia lanceolata* 板材为试件, 在 170, 190 和 210 °C 分别处理 2, 3, 和 4 h, 对杉木板材颜色的变化规律进行研究, 比较了杉木心边材颜色差异, 探讨了杉木热变色的原因。结果表明: 杉木心材经热处理后明度 L^* 和黄蓝色品值 b^* 均变小, 随着温度的升高和时间的延长, L^* 和 b^* 下降幅度逐渐增大, 色差 ΔE 增大; 心材明度变化率 α 和 ΔE 随热处理条件变化规律与边材分别相似, 且两者有很强的相关性, 但边材 b^* 随温度升高是先增后减。温度对杉木颜色变化影响大于时间, 在 210 °C 时, 时间的影响显著。在相同处理工艺下, 热处理条件对边材影响大于心材; 杉木心边材存在差异性可能与心边材中木质素含量和抽提物含量有关。表 4 参 18

关键词: 木材学; 杉木; 热处理; 颜色

中图分类号: S781 文献标志码: A 文章编号: 2095-0756(2011)03-0455-05

Heat-treatment influence on *Cunninghamia lanceolata* discoloration

TANG Rong-qiang, BAO Bin-fu, LI Yan-jun

(College of Engineering, Zhejiang A & F University, Lin'an 311300, China)

Abstract: This paper investigates the effect of heat-treatment temperature and processing time on Chinese fir (*Cunninghamia lanceolata*) discoloration. Chinese fir boards were heat treated at 170 °C, 190 °C and 210 °C for 2 h, 3 h and 4 h respectively, and then the color values of Chinese fir before and after heat treatment were determined by a Chroma Meter DC-P3. And the effect on color characteristics of sapwood and heartwood were compared. Results showed that with increases of time and temperature, the brightness of the specimens board brightness (α) decreases and the chroma (ΔE) increased. Similar rules of change for brightness and chromatism of sapwood and heartwood were found with a strong relationship between α and ΔE (number of coefficients $r = -0.9995$ for both sapwood and heartwood). Color indexes b^* of sapwood increased first at 170 °C, 190 °C and then decreased at 210 °C. Overall, temperature had a greater effect on color of Chinese fir boards than time with heat treatment affecting sapwood more than heartwood. [Ch, 4 tab. 18 ref.]

Key words: wood science; Chinese fir (*Cunninghamia lanceolata*); heat-treatment; color

木材颜色不仅是木材表面视觉物理量的一个重要特征, 而且是木材产品加工增值的重要影响因子, 材色既是决定消费者印象最重要的因素, 又是产品生产与设计中最生动、最活跃的因素。随着人民生活水平与生活质量的不断提高, 广大消费者对色彩多样性的木制品的需求与日俱增, 特别体现在家具、木地板、装饰板、工艺品等高档木材产品上。同时, 一些木材由于自然风化、菌类、物理化学改性等作用引起变色, 影响木材的美观性, 为提高木制品的“卖相”, 解决木材色差等问题, 木材领域的专家学者和木材加工企业致力于木材颜色调控技术的研究, 包括木材变色的防治^[1]、木材变色机制^[2]、木材分级^[3]、木材漂白^[4]和木材着色技术^[5-7]等。由于天然林木资源在世界范围内短缺, 造成了主要木材资源转向了人工速生林木材, 高温热处理木材改性方法可以通过调整热处理温度和时间, 能获得不同深度颜色的热

收稿日期: 2010-09-24; 修回日期: 2010-11-29

基金项目: 浙江省科学技术重点项目(2006C12047)

作者简介: 唐荣强, 从事木材加工利用与材性改良研究。E-mail: tang-108@qq.com。通信作者: 鲍滨福, 教授级高级工程师, 从事木竹材加工与改性等研究。E-mail: bfbao@zafu.edu.cn

处理木材,从而实现产品品种的多样化,并可以通过热处理改变普通木材的颜色来模仿珍贵木材,广泛应用于室内外装饰,提高了其附加值,极大地促进人工林木材的使用范围。因此,本研究将利用色度学的知识对杉木 *Cunninghamia lanceolata* 木材在高温热处理前后材色发生的变化进行定量研究,并为生产性试验优化确定试验方案,同时也为木材视觉环境学的研究和后续的涂饰以及装潢设计工作提供参考依据,为加快中国人工速生林的利用具有现实意义。

1 试验材料与方法

1.1 试验材料

试验所用为人工林杉木木材,采自浙江省临安市,根据国家标准 GB 1927 - 1991 截取地面 1.3 m 以上的部分作为试验原料。试验材规格为 22 mm × 80 mm × 350 mm(厚度 × 宽度 × 长度)。

1.2 试验设备

DC-P3 型全自动测色色差计[主要技术参数:照明光源为卤钨灯(6 V, 100 W);测色光源为 D65 标准照明体;照明几何条件为 o/d(垂直入射/漫反射);10°视场的光谱三刺激值;光斑大小为 $\varphi = 20$ mm,表色系统为 CIE (1976) $L^*a^*b^*$ 均匀色空间], ESPEC 型调温调湿箱, 101-1 型电热鼓风干燥箱,自制小型木材热处理装置^[8]等。

1.3 试验方法

1.3.1 试材处理 将待处理的杉木试验板材干燥至含水率 12%,将干燥好的杉木板材表面刨光,测量杉木心材、边材炭化前颜色。按照参考文献[8]的方法进行热处理。处理工艺选用:最高处理温度(简称热处理温度)条件分别为 170 °C, 190 °C, 210 °C,最高温度下保温时间(简称热处理时间)分别为 2 h, 3 h, 4 h,进行二因素三水平 9 组工艺试验。

1.3.2 颜色测定方法 采用国际国际发光明委员会(CIE, 1976) $L^*a^*b^*$ 标准色度系统。利用色差计定量测试木材的颜色,测试木材表面的颜色值,在板的心材和边材部位分别取 3 个点,计算平均值,主要记录明度 L^* ,色品指数 a^* 和 b^* 。热处理结束后,再在相对湿度为 65%、温度 20 °C 的恒温恒湿箱中进行调节,使木材达到平衡含水率后调湿,在原来标记的位置测炭化后颜色参数。为评价热处理条件对板材各颜色参数的影响效果,引入变化率作为评价指标。计算公式为: $\alpha = (L_2^* - L_1^*)/L_1^* \times 100\%$; $\beta = (a_2^* - a_1^*)/a_1^* \times 100\%$; $\gamma = (b_2^* - b_1^*)/b_1^* \times 100\%$; $\Delta E = [(\Delta L^*)^2 + (\Delta a^*)^2 + (\Delta b^*)^2]^{1/2}$ 。式中: α 为明度变化率(%); β 为红绿色品指数变化率(%); γ 为黄蓝色品指数变化率(%); L_1^* 为热处理前明度, L_2^* 为热处理后明度; a_1^* 为热处理前红绿色品指数; a_2^* 为热处理后红绿色品指数; b_1^* 为热处理前黄蓝色的指数; b_2^* 为热处理后黄蓝色品指数; ΔL^* 为热处理前后明度差; Δa^* 为热处理前后红绿色品指数差; Δb^* 为热处理前后黄蓝色品指数差; ΔE 为色差(NBS)。

2 试验结果与分析

2.1 杉木边材热处理前后颜色变化

由表 1 和表 2 杉木边材热处理前后的颜色值可以看出,杉木经热处理后较处理前明度值 L^* 变小,杉木边材颜色变暗。这是由于随着热处理温度的上升,木材的半纤维素发生较剧烈的分解,纤维素和木质素在产生的甲酸、乙酸等酸性物质催化下也发生部分热解,加之有机物质的挥发等原因,导致木材的明度显著下降。在热处理过程中,当发色基团与助色基团在某种化合物中以一定的形式结合,此时,其吸收光谱会从紫外光区延伸到整个可见光区,从而使颜色加深^[9]。在相同热处理时间下,随温度的升高, L^* 下降幅度逐渐增大(即 α 减小), ΔE 增大,工艺间数值差异性较大,规律明显。在相同热处理温度下,随时间的延长 α 也减小,色差 ΔE 也增大,但工艺间数值差异性较小,因此,热处理温度对边材颜色变化影响较热处理时间更为显著。随着热处理温度的升高和热处理时间的延长,杉木发生化学变化表现为反应速度加快,反应类型增多,反应产物数量和种类增多,导致杉木颜色变化越剧烈,可能是 α 减小,而 ΔE 增大的原因。红绿色品指数 a^* 变化规律不明显,段新芳^[10]和李涛等^[11]在研究材色变化时也得出 a^* 变异性很大,规律不明显的结论。杉木边材黄蓝色品指数 b^* 在 170 °C 和 190 °C 处理后与未处理材相比其值增加而向黄轴方向发展,但在 210 °C 处理后其值却减小而向蓝轴方向发展。

表 1 杉木边材热处理前后的颜色值

Table 1 Color values of Chinese fir sapwood before and after heat treatment test

工艺编号	L^*_1	L^*_2	$\alpha/\%$	a^*_1	a^*_2	$\beta/\%$	b^*_1	b^*_2	$\gamma/\%$	$\Delta E/NBS$
170-2	82.28 ± 2.24	69.84 ± 2.35	- 15.12	10.52 ± 0.79	11.53 ± 1.06	9.62	18.71 ± 2.41	19.85 ± 1.54	6.07	12.53 ± 0.95
170-3	84.19 ± 2.32	69.57 ± 2.47	- 17.37	9.01 ± 1.23	10.61 ± 1.06	17.74	19.32 ± 1.06	20.97 ± 1.26	8.55	14.80 ± 0.87
170-4	82.48 ± 2.79	67.44 ± 1.92	- 18.23	8.04 ± 1.35	10.07 ± 0.96	25.30	20.73 ± 1.09	22.80 ± 1.35	9.97	15.32 ± 1.53
190-2	83.02 ± 3.02	59.05 ± 2.86	- 28.87	9.16 ± 0.64	11.19 ± 0.77	22.22	21.22 ± 2.21	21.74 ± 1.89	2.47	24.06 ± 1.27
190-3	81.76 ± 2.55	57.56 ± 2.04	- 29.59	7.80 ± 0.86	9.02 ± 0.73	15.67	18.42 ± 1.31	20.13 ± 1.11	9.26	24.29 ± 0.75
190-4	84.17 ± 1.98	58.92 ± 2.56	- 30.00	9.32 ± 1.07	11.22 ± 0.99	20.41	18.49 ± 1.54	21.49 ± 1.44	16.22	25.50 ± 2.32
210-2	81.65 ± 2.02	42.95 ± 2.16	- 47.40	10.85 ± 0.65	13.43 ± 0.87	23.80	19.68 ± 1.23	15.18 ± 1.17	- 22.87	39.05 ± 1.74
210-3	82.11 ± 1.89	40.98 ± 1.55	- 50.09	11.11 ± 0.62	14.66 ± 0.76	31.94	20.53 ± 1.08	15.15 ± 2.00	- 26.20	41.63 ± 1.45
210-4	83.16 ± 2.01	39.05 ± 2.41	- 53.04	11.48 ± 0.93	14.04 ± 0.62	22.26	21.55 ± 2.01	14.64 ± 2.35	- 32.05	44.72 ± 0.68

说明：工艺编号中前面数字表示温度(℃)，后面数字表示处理时间(h)，表中数值为平均值 ± 标准差。

2.2 杉木心材热处理前后的颜色变化

由表 3 和表 4 可见：随着热处理温度的升高和热处理时间的延长，杉木心材经热处理后明度值 L^* 和黄蓝色品指数 b^* 均变小， L^* 和 b^* 下降幅度逐渐增大，色差 ΔE 增大，从视觉效果上表现出心材颜色逐渐变暗变深。 α ， γ ， ΔE 均随温度的变化而形成非常明显的梯度变化趋势(减小或增大)，而在相同温度(170 ℃和 190 ℃)下，各变化率随时间变化差异不明显，仅相差 2% 左右，在 210 ℃，随热处理时间的变化有较明显差异，相差到 7% 左右。可以认为在 170 ℃和 190 ℃工艺条件下，虽然木材的三大主要成分半纤维素、纤维素、木素的剧烈热降解温度范围分别为 180 ~ 300 ℃，240 ~ 400 ℃，280 ~ 550 ℃，但它们在低于 180 ℃的温度下也会发生一定程度的降解，特别是在加热时间较长时，或有氧气存在的条件下，其中又数半纤维素最不稳定^[12]，此时木材发生化学反应较为缓慢，纤维素、木素不会发生分解或部分分解，只是在局部结构发生了微小的变化，致使在相差 1 ~ 2 h 的时间段内不足以让木材颜色产生较大变化。当到达 210 ℃时，温度的升高加剧了杉木的热分解，反应加快，导致颜色有较大变化。因此，热处理温度对心材颜色变化影响较热处理时间更为显著。红绿色品指数 a^* 变化规律不明显。

由表 1 和表 3 杉木热处理前后颜色值可见：杉木心材、边材经热处理后颜色均发生不同程度变化。造成杉木经高温热处理变色的原因：木材变色是复杂的物理、化学过程，主要表现为木材中基本发色基团和助色基团的增减和改变^[13]，一方面是木材本身具有显色作用的木质素或抽提物发生变化^[12,14]，另一方面是产生的降解产物含有发色基团或助色基团，如醛类物质^[15]。

2.3 杉木心边材热处理前后的颜色变化对比分析

比较表 1 和表 3 的颜色参数可知：未处理杉木的心材明度值和红绿色品指数均高于边材，造成颜色差异的主要原因是边材和心材中木质素组成和抽提物含量不同^[16]。热处理后，随着温度的升高，心边材明度值逐渐接近，未处理时相差约 10 个单位，在 170 ℃时相差约 5 个单位，190 ℃相差约 3 个单位，210 ℃相差约 1 个单位。

杉木心材的明度变化率和色差与边材的变化趋势相同，2 项指标呈现很强的相关性。然而，在相同处理工艺下，热处理前后杉木边材色差和明度变化率绝对值均大于心材，说明热处理条件对边材的影响要大于心材。由于明度的变化是引起材色变化的主要因素，可以通过其变化的大小来表征材色的变化情况，进而判断热处理的程度和效果，因此，也可以通过色差大小来判断热处理程度的效果^[16]。心材和边

表 2 处理温度和处理时间对边材颜色影响显著性
(方差分析中 P 值)

Table 2 Significant of effect of temperature and time on the sapwood
(expressed by P -value)

因素	L^*	a^*	b^*	$\Delta E/NBS$
处理温度	9.9E-06**	0.351 511	0.002 428**	2.11E-05**
处理时间	0.060 496*	0.738 447	0.834 293	0.061 333*

说明：**表示 0.01 水平显著，*表示 0.05 水平显著。

表3 杉木心材热处理前后的颜色值

Table 3 Color values of Chinese fir heartwood before and after heat treatment test

工艺编号	L^*_1	L^*_2	$\alpha/\%$	a^*_1	a^*_2	$\beta/\%$	b^*_1	b^*_2	$\gamma/\%$	$\Delta E/NBS$
170-2	73.80 ± 1.31	65.21 ± 2.03	- 11.64	15.55 ± 3.57	15.87 ± 3.22	2.03	22.73 ± 3.76	22.33 ± 2.99	- 1.74	8.61 ± 2.18
170-3	72.60 ± 2.15	62.75 ± 2.11	- 13.56	13.95 ± 3.82	14.17 ± 4.05	1.56	20.84 ± 3.21	19.79 ± 3.47	- 5.02	9.91 ± 3.42
170-4	74.14 ± 0.97	63.52 ± 1.45	- 14.32	15.52 ± 4.88	15.39 ± 4.17	- 0.86	22.10 ± 1.87	20.50 ± 2.18	- 7.24	10.74 ± 2.05
190-2	75.47 ± 2.44	56.88 ± 1.37	- 24.63	14.80 ± 2.71	14.94 ± 3.52	0.98	22.87 ± 3.27	20.64 ± 2.80	- 9.75	18.72 ± 2.11
190-3	74.71 ± 2.71	55.14 ± 1.36	- 26.20	14.95 ± 1.42	15.36 ± 2.79	2.76	20.65 ± 3.27	18.70 ± 3.30	- 9.43	19.67 ± 2.56
190-4	72.25 ± 2.33	51.88 ± 1.42	- 28.19	13.34 ± 2.03	14.92 ± 2.53	11.84	20.98 ± 2.88	18.84 ± 3.09	- 10.22	20.54 ± 2.09
210-2	72.55 ± 1.84	44.13 ± 0.86	- 39.17	14.55 ± 3.79	16.19 ± 3.76	11.24	19.06 ± 3.19	14.37 ± 3.33	- 24.62	28.85 ± 2.44
210-3	73.46 ± 1.84	39.54 ± 1.35	- 46.17	13.10 ± 2.49	14.92 ± 3.08	13.87	20.16 ± 2.90	14.22 ± 3.75	- 29.47	34.48 ± 1.78
210-4	74.23 ± 2.36	38.29 ± 1.44	- 48.42	14.62 ± 3.42	15.51 ± 3.24	6.09	20.67 ± 3.04	13.51 ± 2.94	- 34.64	36.66 ± 3.00

说明：工艺编号中前面数字表示温度(°C)，后面数字表示处理时间(h)，表中数值为平均值 ± 标准差。

材的2项色品指数变化率随工艺的变化规律不明显，但心边材受热处理条件的影响存在较大的差异性。

在热处理过程中，木材中的抽提物和化学组成(半纤维素和/或木质素)参与了木材颜色变化反应^[17]。同时，许多学者认为木质素是木材产生颜色的主要来源。木质素结构单元中的松柏醛基会促使木材与一些物质反应，从而使木材呈现各种颜色。此外，木质素氧化后的产物也是木质素产生颜色反应的主要基团^[18]。而杉木边材的酸溶木质素含量高于心材^[18]，杉木心边材存在差异性可能跟心边材中木质素含量和抽提物含量有关，即使热处理条件相同，但由于含量不同，化学反应程度不同，也会表现出颜色的差异。关于热处理各化学成分对木材颜色的变化影响需做进一步研究。

3 结论

随着热处理温度的升高和热处理时间的延长，杉木颜色逐渐变暗变深；经热处理后，杉木心材明度 L^* 和黄蓝色品值 b^* 均变小；边材 L^* 变小，但 b^* 随温度变化是先增后减；杉木心材的明度变化率及色差随热处理条件变化趋势与边材分别相同，2项指标具很强的相关性。在相同热处理时间下，随温度的升高， L^* 下降幅度逐渐增大(即 α 减小)， ΔE 增大，工艺间数值差异性较大，规律明显；在相同热处理温度下，随时间的延长 α 也减小， ΔE 也增大，但工艺间数值差异性较小，因此，热处理温度对边材颜色变化影响较热处理时间更为显著；在210 °C时，时间的影响显著。在相同处理工艺下，热处理条件对边材的影响要大于心材；杉木心边材存在差异性可能跟心边材中木质素含量和抽提物含量有关。不同工艺下处理的杉木颜色不同，改变单一树种单一颜色，使产品种类多样化，扩大了消费者颜色选择范围，对提高杉木附加值，合理利用人工速生林具有重要的意义和作用。

参考文献：

- [1] 罗建举. 木材蓝变色的防治处理技术[J]. 木材工业, 1996, 10 (5): 15 - 17.
LUO Jianju. Techniques to protect wood from blue staining and to remove blue stains from fungi attacked timber [J]. *China Wood Ind*, 1996, 10 (5): 15 - 17.
- [2] 杨文斌, 郑德勇, 陈瀚. 铁杉的防变色及干燥[J]. 东北林业大学学报, 2000, 28 (4): 91 - 94.
YANG Wenbin, ZHENG Deyong, CHEN Han. Prevention from discolouring and drying of tsgua [J]. *J Northeast For Univ*, 2000, 28 (4): 91 - 94.

表4 处理温度和处理时间对心材颜色影响显著性(方差分析中P值)

Table 4 Significant of effect of temperature and time on the heartwood(expressed by P-value)

因素	L^*	a^*	b^*	$\Delta E/NBS$
处理温度	9.97E-05**	0.182 844	0.000 479**	0.000 215**
处理时间	0.070 479*	0.947 847	0.124 405	0.117 751

说明：**表示0.01水平显著，*表示0.05水平显著。

- [3] 杨少春, 王克奇, 戴天虹, 等. 基于 $L^*a^*b^*$ 颜色空间对木材分类的研究[J]. 林业机械与木工设备, 2007, **35** (10): 28 - 30.
YANG Shaochun, WANG Keqi, DAI Tianhong, *et al.* Analysis of wood classification using $L^*a^*b^*$ color space [J]. *For Mach & Woodwork Equip*, 2007, **35** (10): 28-30.
- [4] 沈葵忠, 房桂干, 储富祥, 等. 杉木 CTMP 高温过氧化氢漂白[J]. 中国造纸, 2008, **27** (6): 1 - 5.
SHEN Kuizhong, FANG Guigan, CHU Fuxiang, *et al.* High brightness peroxide bleaching of China fir CTMP pulp [J]. *China Pulp Paper*, 2008, **27** (6): 1 - 5.
- [5] 段新芳, 阎昊鹏, 孙芳利, 等. 毛白杨木材主要组分与酸性染料相互作用的研究[J]. 东北林业大学学报, 2000, **28** (4): 50 - 53.
DUAN Xinfang, YAN Haopeng, SUN Fangli, *et al.* The interaction between main constituents of Chinese white poplar wood and acidic dye [J]. *J Northeast For Univ*, 2000, **28** (4): 50 - 53.
- [6] 鲍甫成, 段新芳. 人工林杉木木材解剖构造与染色效果相关性的研究[J]. 林业科学, 2000, **36** (3): 93 - 101.
BAO Fucheng, DUAN Xinfang. Relationship between wood structures and its wood dyeing effects of Chinese fir from plantation [J]. *Sci Silv Sin*, 2000, **36** (3): 93 - 101.
- [7] 陈玉和, 陆仁书, 方桂珍. 木材水溶性染料的染色技术[J]. 木材工业, 1999 (2): 77 - 81.
CHEN Yuhe, LU Renshu, FANG Guizhen. Wood dyeing with water soluble dye stuff [J]. *China Wood Ind*, 1999 (2): 77 - 81.
- [8] 李延军, 唐荣强. 高温热处理木材工艺的初步研究[J]. 林产工业, 2008, **35** (2): 16 - 18.
LI Yanjun, TANG Rongqiang. The preliminary study on high temperature heat treatment technology of wood [J]. *China For Prod Ind*, 2008, **35** (2): 16 - 18.
- [9] 郑志锋. 木材的颜色是如何产生的[J]. 云南林业, 2005, **26** (2): 32.
ZHENG Zhifeng. How wood color generate [J]. *Yunnan For*, 2005, **26** (2): 32.
- [10] 段新芳. 人工林毛白杨木材材色测定及其株间变异[J]. 东北林业大学学报, 1999, **27** (6): 26 - 30.
DUAN Xinfang. Determination of wood color characteristics and its variation among trees of Chinese white poplar plantation [J]. *J Northeast For Univ*, 1999, **27** (6): 26 - 30.
- [11] 李涛, 顾炼百, 江宁. 高温热处理对水曲柳材色的影响[J]. 林业科学, 2009, **45** (12): 149 - 153.
LI Tao, GU Lianbai, JIANG Ning. Effect of high temperature heat treatment on ash wood color [J]. *Sci Silv Sin*, 2009, **45** (12): 149 - 153.
- [12] 南京林产工业学院. 木材热解工艺学[M]. 北京: 中国林业出版社, 1958: 4 - 14.
- [13] 吕文华, 江泽慧, 吴玉章, 等. 木、竹、藤材的变色防治[J]. 世界林业研究, 2006, **19** (4): 38 - 44.
LÜ Wenhua, JIANG Zehui, WU Yuzhang, *et al.* Research on wood, bamboo and rattan cane discoloration [J]. *World For Res*, 2006, **19** (4): 38 - 44.
- [14] 王洁瑛, 赵广杰, 中野隆人. 热处理过程中杉木压缩木材的材色及红外光谱[J]. 北京林业大学学报, 2001, **23** (1): 59 - 64.
WANG Jieying, ZHAO Guangjie, TAKATO Nakano. Change of brightness, chromatism and infra red spectra of compressed China fir wood during heat treatment [J]. *J Beijing For Univ*, 2001, **23** (1): 59 - 64.
- [15] BOURGOIS J, GUYONNET R. Characterization and analysis of torrefied wood [J]. *Wood Sci Technol*, 1988, **22**: 143 - 155.
- [16] GONZÁLEZ-PEÑA M M, HALE M D C. Colour in thermally modified wood of beech, Norway spruce and Scots pine. Part 1: Colour evolution and colour changes [J]. *Holzforschung*, 2009, **63** (4): 385 - 393.
- [17] BOURGOIS J, JANIN G, GUYONNET R. The color measurement: a fast method to study and to optimize the chemical transformations undergone in the thermally treated wood [J]. *Holzforschung*, 1991, **45** (5): 377 - 382.
- [18] 秦特夫, 黄洛华, 周勤. 杉木、I-72 杨主要化学组成的株内纵向变异研究[J]. 林业科学研究, 2004, **17** (1): 47 - 53.
QIN Tefu, HUANG Luohua, ZHOU Qin. Studies on longitudinal variation of main chemical compositions in Chinese fir and *Populus × euramaricana* 'I-72/58' trees [J]. *For Res*, 2004, **17** (1): 47 - 53.