

DOI: 10.12326/j.2096-9694.2022168

高温热处理对三种热带阔叶树材颜色和尺寸稳定性的影响

何露茜¹, 张天放¹, 阮智勇², 赵育铨¹, 何正斌¹, 伊松林¹

(1. 北京林业大学木材科学与工程北京市重点实验室, 北京 100083; 2. 福建省三福古典家具有限公司, 福建莆田 351299)



摘要: 以大果紫檀 (*Pterocarpus macrocarpus*)、奥氏黄檀 (*Dalbergia oliveri*)、光亮杂色豆 (*Baphia nitida*) 三种热带阔叶树材为研究对象, 在160、180、200 °C下对其进行热处理, 探究热处理温度对其心材的颜色、尺寸稳定性的影响。结果表明: 随着热处理温度的升高, 三种木材的质量损失率均逐渐增大, 颜色逐渐加深, 热处理对光亮杂色豆和大果紫檀的颜色影响更大; 三种木材在常温低湿 (25 °C、30% RH) 和高温高湿 (40 °C、90% RH) 条件下的吸湿平衡含水率和湿胀率均持续减小, 阻湿率和体积抗胀率增大, 尺寸稳定性明显提高。在200 °C热处理后, 三种木材均表现出明显增加的质量损失率和颜色变化, 因此该三种木材较优的热处理工艺为180 °C、3 h。

关键词: 高温热处理; 热带阔叶树材; 颜色变化; 尺寸稳定性

中图分类号: S781.71; S781.81 文献标识码: A 文章编号: 2096-9694 (2023) 02-0025-10

Effect of High-Temperature Heat Treatment on Color and Dimensional Stability of Three Tropical Hardwoods

HE Luxi¹, ZHANG Tianfang¹, RUAN Zhiyong², ZHAO Yuxin¹, HE Zhengbin¹, YI Songlin¹

(1. Beijing Key Laboratory of Wood Science and Engineering, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China;

2. Fujian Sanfu Classical Furniture Co., Ltd., Putian 351299, Fujian, China)

Abstract: To investigate the effects of different temperatures on the color and dimensional stability of three tropical hardwoods, the heat treatments were conducted at 160, 180, and 200 °C on *Pterocarpus macrocarpus*, *Dalbergia oliveri*, and *Baphia nitida*, respectively. The results showed that the mass loss of all three hardwoods increased, and the color gradually darkened with increasing heat treatment temperature. Among them, the color of *Pterocarpus macrocarpus* and *Baphia nitida* after heat treatment was affected more substantially than *Dalbergia oliveri*. In addition, as the temperature increased, the moisture adsorption and swelling coefficient of wood samples decreased, the moisture excluding efficiency and anti-swelling efficiency increased, and the dimensional stability significantly improved at both low humidity (25 °C, 30% RH) and high humidity (40 °C, 90% RH) conditions respectively. Additionally, significant mass loss and color changes were observed after the heat treatment at 200 °C. Therefore, the optimum heat treatment process is 180 °C for 3 h.

Key words: high-temperature heat treatment; tropical hardwoods; color change; dimensional stability

收稿日期: 2022-08-18; 修改日期: 2022-10-17

基金项目: 林业公益性行业专项重大项目“低质人工林木材家具制造关键技术研究示范”(201404502)。

作者简介: 何露茜 (1997—), 女, 博士研究生。Email: heluxi@bjfu.edu.cn

通讯作者: 伊松林, 男, 教授。Email: ysonglin@bjfu.edu.cn

雕花工艺精湛、造型经典古韵的硬木家具一直在高端产品市场上占有一席之地^[1-2]。但随着热带阔叶树材资源量的锐减、《濒危野生动植物种国际贸易公约》(Convention on International Trade in Endangered Species of Wild Fauna and Flora, CITES 公约)等国际或地区法案的持续监管,国际社会对红木树种贸易的管制力度增大,政策不断收紧,高档木材市场的供需矛盾不断加剧,热带阔叶树材原料的进口、加工等成本日益增加^[3]。因此,此类木材的合理、高效化利用备受重视。

木材热处理作为一种成熟的物理改性方法,被广泛应用于改善木材的耐腐蚀性、尺寸稳定性等性能。研究发现,大果紫檀(*Pterocarpus macrocarpus*)在 180 ℃热处理 3 h 后,其弦向吸湿膨胀率在低湿度下(40 ℃、35%RH)降低约 37.8%,在高湿度下(40 ℃、90% RH)降低约 21.7%^[4]。东非黑黄檀(*Dalbergia melanoxylon*)的物理力学性能亦可通过热处理显著提高,以甲基硅油为介质,在常压 160 ℃热处理 4 h 后,东非黑黄檀的吸水率降低 82.0%,体积膨胀率降低 92.2%,抗压强度提高 44.2%^[5]。

大果紫檀、奥氏黄檀(*Dalbergia oliveri*)和光亮杂色豆(*Baphia nitida*),是目前实木家具企业广泛使用的材料。其中,大果紫檀、奥氏黄檀(CITES 公约附录 II 管制)分别归属于国标 GB/T 18107—2017《红木》分类中的花梨木类、红酸枝木类,主要产地为泰国、缅甸、老挝等热带地区;光亮杂色豆是一种近年流行的产自非洲的阔叶树材。此三种热带阔叶树材具有密度大、硬度高、纹理美观等特点,但由于木材本身的干缩湿胀特性,在使用过程中也可能发生开裂、变形、翘曲等问题,给客户和企业造成经济损失^[7]。

目前,高温热处理对大果紫檀、奥氏黄檀和光亮杂色豆三种木材的颜色及尺寸稳定性的系统性研究鲜见。鉴于此,本研究以热空气为加热介质,采用水蒸气作为保护气,探究不同热处理温度(160、180、200 ℃)对大果紫檀、奥氏黄檀和光亮杂色豆三种木材颜色、尺寸稳定性的影响,为其热处理改性提供技术依据。

1 材料与方法

1.1 材料

大果紫檀(*Pterocarpus macrocarpus*),绝干密度 $0.78 \pm 0.02 \text{ g/cm}^3$;奥氏黄檀(*Dalbergia oliveri*),绝干密度 $1.05 \pm 0.03 \text{ g/cm}^3$;光亮杂色豆(*Baphia nitida*),绝干密度 $0.99 \pm 0.05 \text{ g/cm}^3$,均为心材,由福建省三福古典家具有限公司提供,初始含水率为 7%~11%。

其中尺寸稳定性试样规格为 20 mm(弦)×20 mm(径)×20 mm(纵),无开裂变形、虫蛀等可见缺陷,共分成 4 组(其中一组为对照组),每组 10 块。颜色测定试件的初始颜色、纹理相似,规格为 100 mm(弦)×20 mm(径)×210 mm(纵)。所有试件在热处理前均先在 60 ℃的烘箱内干燥至质量基本不变,再转移至 $103 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$ 的烘箱中干燥至绝干,记录其绝干质量及尺寸。

1.2 仪器与设备

电子天平、电子数显卡尺、电热鼓风干燥箱、便携式电脑色差仪、Thermo 傅里叶变换红外光谱仪等。

1.3 热处理工艺

热处理工艺分升温、保温、降温 3 个阶段。由于试件在热处理前已干燥至绝干,因此设定的热处理升温时间较短,具体流程见表 1。

表 1 热处理工艺参数
Tab.1 Parameters of heat treatment process

热处理阶段	升温/降温速率/ ($^\circ\text{C}\cdot\text{h}^{-1}$)	目标温度/ $^\circ\text{C}$	升温/降温 时间/h	保温时间/ h
升温阶段 I	30	130	3.5	0.5
升温阶段 II	-	160/180/200	2	-
保温阶段	-	160/180/200	-	3
降温阶段	自然降温	60	-	-

1) 升温阶段:在室温下将待处理试件置于热处理设备内,以空气为加热介质、水蒸气作为保护气,温度从室温升至 130 ℃并保持 0.5 h,使木材充分预热。随后将温度分别升至 160、180、200 ℃。

2) 保温热处理阶段:在温度达到指定目标值后,进行保温热处理并持续 3 h。

3) 降温阶段:停止加热,待温度降至 60 ℃后取出试件,记录其质量及尺寸。

1.4 热处理木材性能检测

1.4.1 质量损失率 根据公式1计算热处理木材的质量损失率 (mass loss, ML)。

$$ML = (m_0 - m_1) / m_0 \times 100\% \quad (1)$$

式中： m_0 为试件的绝干质量，g； m_1 为试件在高温热处理后的质量，g。

1.4.2 颜色参数 随机在每块试件上选取颜色均匀的6个测定点，分别在热处理前后用色差仪测量其 L^* （明度值）、 a^* （红绿轴色品指数）、 b^* （黄蓝轴色品指数），每个点测定5次并取平均值。根据CIE（1976） $L^*a^*b^*$ 表色系统公式，计算其明度差（ ΔL^* ）、色品指数差（ Δa^* ， Δb^* ）、色饱和度差（ ΔC^* ）、总体色差（ ΔE^* ）和色相差（ ΔH^* ）。

$$\Delta L^* = L^* - L_0^* \quad (2)$$

$$\Delta a^* = a^* - a_0^* \quad (3)$$

$$\Delta b^* = b^* - b_0^* \quad (4)$$

$$\Delta C^* = [(a^*)^2 + (b^*)^2]^{1/2} - [(a_0^*)^2 + (b_0^*)^2]^{1/2} \quad (5)$$

$$\Delta E^* = [(\Delta L^*)^2 + (\Delta a^*)^2 + (\Delta b^*)^2]^{1/2} \quad (6)$$

$$\Delta H^* = [(\Delta E^*)^2 + (\Delta L^*)^2 + (\Delta C^*)^2]^{1/2} \quad (7)$$

式中： L_0^* 、 a_0^* 、 b_0^* 值为试件热处理前的颜色参数； L^* 、 a^* 、 b^* 值为试件热处理后的颜色参数。

1.4.3 尺寸稳定性 模拟木材在常温低湿和高温高湿两种环境时的湿胀情况^[8]，分别在25℃、30% RH和40℃、90% RH两组条件下进行平衡处理，将对照组及热处理试件放置在恒温恒湿试验箱内吸湿至尺寸稳定。参照GB/T 1927.4—2021《无疵小试样木材物理力学性质试验方法 第4部分：含水率测定》，根据试件调湿前后的质量变化计算在此条件下的吸湿平衡含水率（moisture adsorption, MA）和阻湿率（moisture excluding efficiency, MEE）^[9]，根据其尺寸变化计算该条件下的线性湿胀率（linear swelling, LS）、体积湿胀率（volume swelling, VS）及体积抗胀率（anti-swelling efficiency, ASE）^[9]。

$$MA = (m_2 - m_1) / m_1 \times 100\% \quad (8)$$

$$MEE = (MA_0 - MA_1) / MA_0 \times 100\% \quad (9)$$

$$LS = (d_1 - d_0) / d_0 \times 100\% \quad (10)$$

$$VS = (V_1 - V_0) / V_0 \times 100\% \quad (11)$$

$$ASE = (VS_0 - VS_1) / VS_0 \times 100\% \quad (12)$$

式中： m_1 和 m_2 分别为试件在热处理后、调湿处理后的质量，g； MA_0 、 MA_1 分别为未处理、热处理试件的吸湿平衡含水率，%； d_0 、 d_1 分别为试件在调湿处理前、后的线性尺寸，mm； V_0 、 V_1 分别为试件在调湿处理前、后的体积，mm³； VS_0 、 VS_1 分别为未处理、热处理试件的体积湿胀率，%。

1.4.4 傅里叶变换红外光谱分析 将过100目的木粉在103±2℃的烘箱内干燥后，在玛瑙研钵内与溴化钾充分混合后压片，测试光谱范围为4 000~500 cm⁻¹，光谱分辨率为4 cm⁻¹，扫描次数为32次。

2 结果与讨论

2.1 热处理对三种木材质量损失率的影响

由木材成分热降解引起的质量损失是评价木材热处理工艺强度的重要指标^[10]，主要取决于木材种类、加热介质、处理温度和处理时间^[11]。大果紫檀、奥氏黄檀和光亮杂色豆三种木材在不同温度热处理后的质量损失率如图1所示。

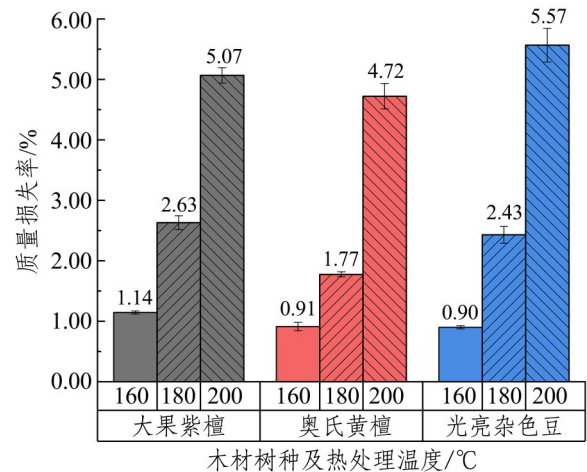


图1 热处理温度对三种木材质量损失率的影响

Fig.1 Effect of heat treatment temperature on the mass loss of three wood species

由图1可以看出，随着热处理温度的升高，三种木材的质量损失率都明显增加，这主要归因于木材中部分抽提物的挥发^[12]及半纤维素等碳水化合物的降解^[13]。但其质量损失率的变化略有不同，这可能与三种木材化学组分的差异有关。200℃热处理试件的质量损失率变化比160℃热处理试件更加明显，这可能是因为木材中的大部分单糖在200℃热处理条件下发生降解和挥发导致质量下降^[14]。杉

木 (*Cunninghamia lanceolata*) 在 180 °C 以下的热处理条件下, 木质素和纤维素相比于半纤维素更稳定^[15]。而在更高的温度下, 在酸催化作用下, 半纤维素和部分纤维素无定形区会发生进一步降解, 部分木质素发生交联反应, 热处理木材的质量损失率明显增大。

2.2 热处理对三种木材心材颜色的影响

图2所示为大果紫檀、奥氏黄檀和光亮杂色豆三种木材心材在不同温度热处理前后未砂光表面的颜色变化。由图2可以看出, 三种木材心材的颜色在热处理后均呈现不同程度的变化。随着热处

理温度的升高, 木材的颜色不断加深, 这可能是因为木质素和其他非纤维素多糖的降解与缩合^[16], 以及树脂、抽提物等迁移和结构变化^[17-18], 其根本原因在于木材中发色基团增多, 共轭体发色基团延长^[19]。其中, 大果紫檀由浅棕色变为深棕色, 奥氏黄檀由浅红褐色变为深红褐色, 光亮杂色豆由浅咖色变为深咖色。此外, 在 200 °C 热处理条件下, 由于心材抽提物含量高, 某些树胶的渗出使未砂光的光亮杂色豆表面形成了许多较暗的斑点, 这与海岸松 (*Pinus pinaster*) 热处理中出现树脂渗出的现象类似^[20]。

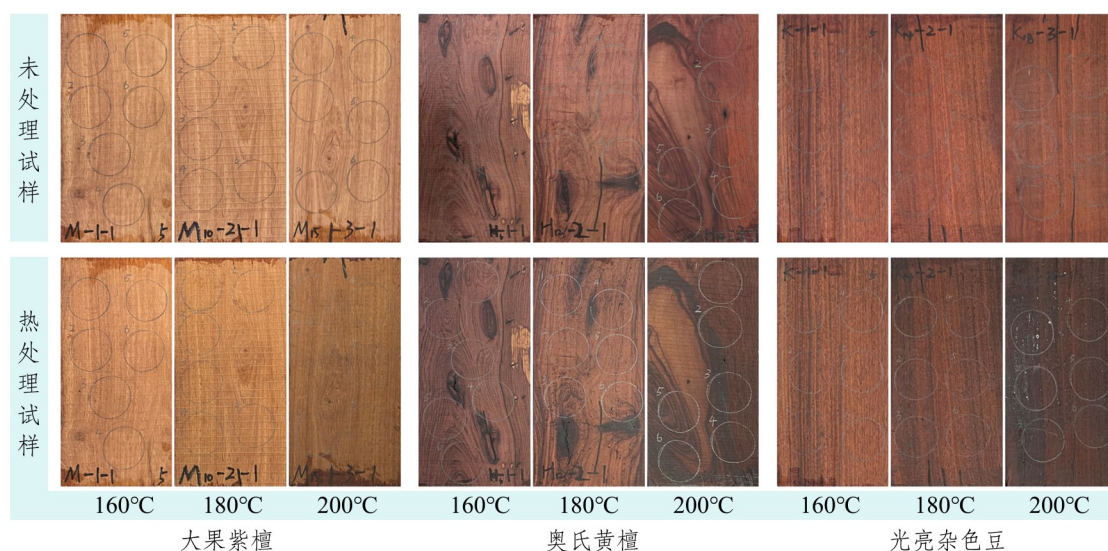


图2 不同热处理温度下三种木材心材颜色变化

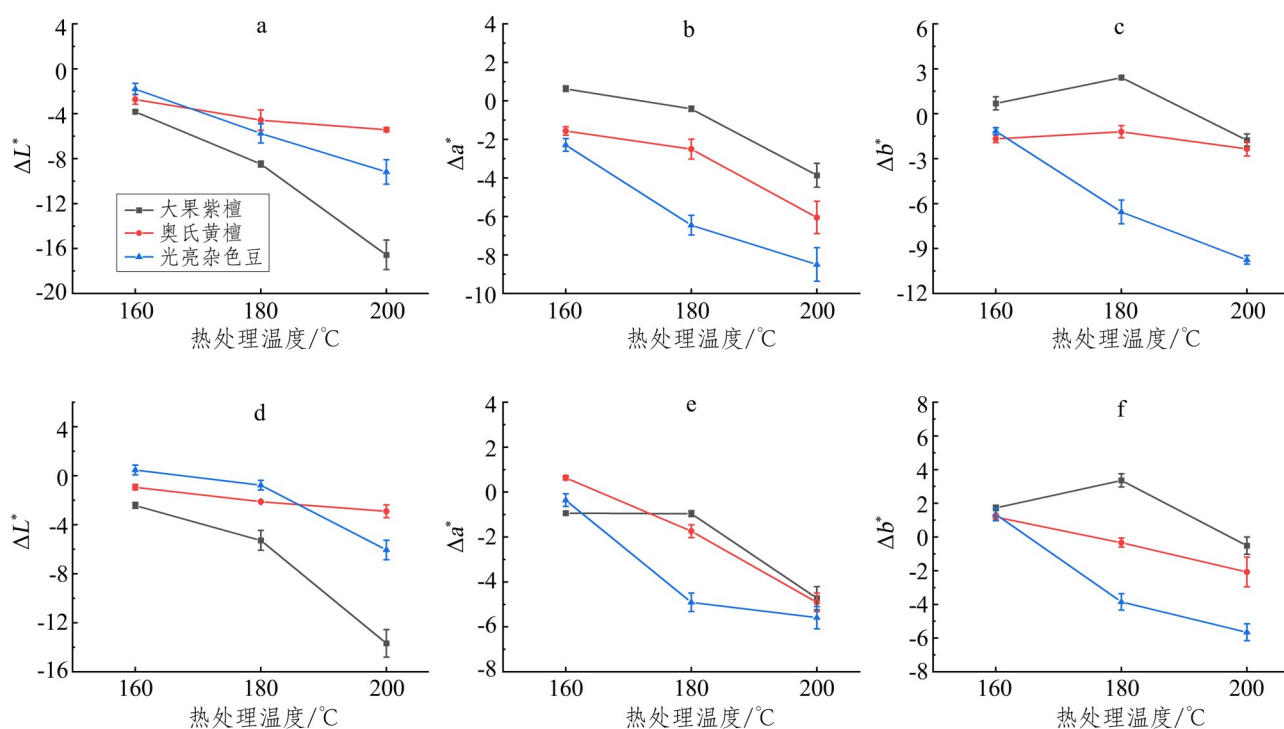
Fig.2 Heartwood color changes at different heat treatment temperatures

三种木材的不同温度热处理试件, 砂光前、后表面的明度差 (ΔL^*)、色品指数差 (Δa^* , Δb^*) 如图3所示。由图3可知, 三种木材试件砂光前、后表面的颜色变化趋势基本一致, 但砂光后表面的颜色参数差值更小, 这可能是由于木材表面在热处理过程中氧化现象较剧烈, 表层颜色较内层颜色更深。此外, 三种木材试件的 ΔL^* 均随着热处理温度的升高而减小, 这意味着热处理木材的颜色变暗。此外, 大果紫檀的明度差变化最大, 其次是光亮杂色豆, 而奥氏黄檀的明度差变化最小。

不同温度热处理试件的红绿色、黄蓝色品指数差 (Δa^* , Δb^*) 变化略有不同, 这可能与木材树种、热处理条件有关^[21]。热处理温度对光亮杂色豆色品指数差的影响最大。随着热处理温度的升高,

奥氏黄檀和光亮杂色豆的 Δa^* 、 Δb^* 值逐渐减小, 表明其热处理后颜色逐渐趋于绿色、蓝色。而大果紫檀的 Δa^* 、 Δb^* 值均随着热处理温度的增加呈现先增大后减小的趋势, 与以往研究发现的变化规律相似^[19, 22], 表明木材首先向红色、黄色发展, 而在更高温度的热处理后趋向于绿色、蓝色。其中, 红绿色品指数 a^* 的增大主要是因为热处理过程中缩合和降解反应生成的氧化产物增多 (如醌类物质), 此类物质能吸收红色光的补色光从而使得木材逐渐变红^[23]; 而黄蓝色品指数 b^* 的增大, 则通常归因于木质素降解形成新的羰基结构^[24]。

图4为三种木材的不同温度热处理试件砂光前、后表面的色饱和度差 (ΔC^*)、总体色差 (ΔE^*) 和色相差 (ΔH^*)。



注:a~c为未砂光木材表面的颜色参数;d~f为砂光后木材表面的颜色参数。(图4同)。

图3 热处理温度对三种木材明度差(ΔL^*)、色品指数差(Δa^* , Δb^*)的影响

Fig.3 Effect of heat treatment temperature on the brightness difference (ΔL^*) and chromaticity index difference (Δa^* , Δb^*) of three wood species

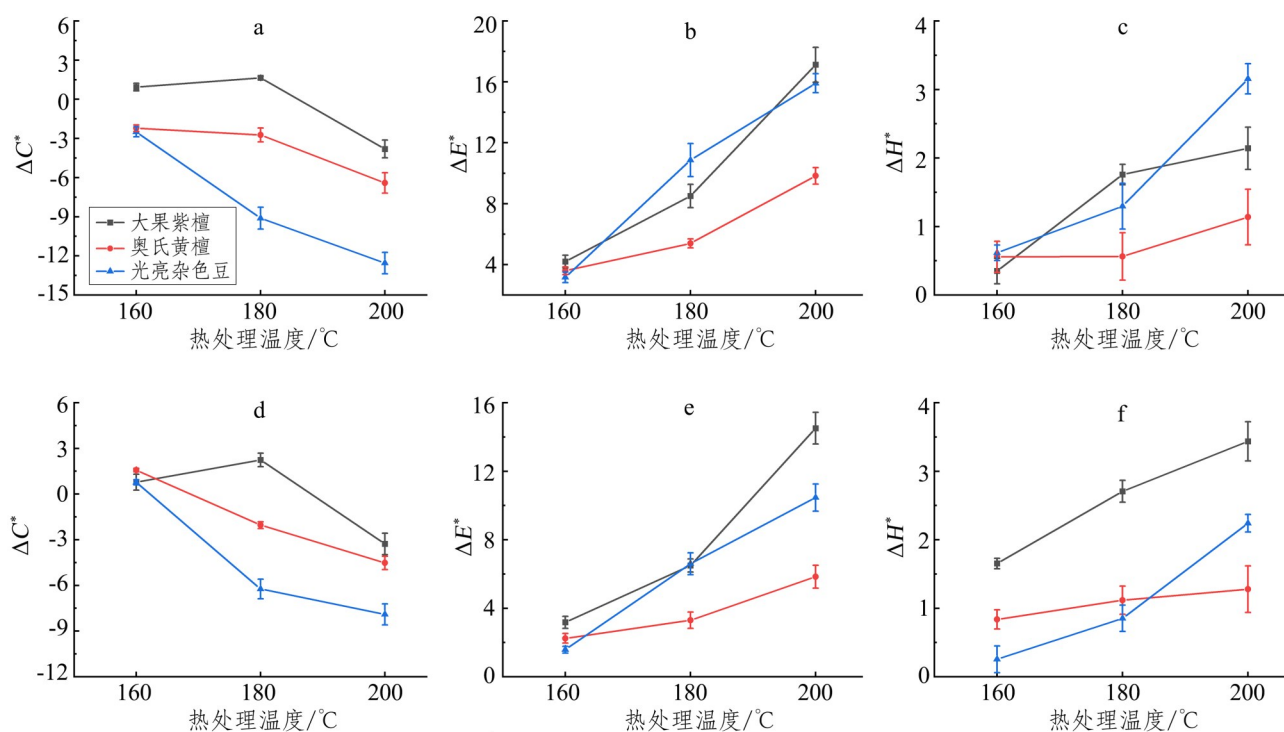


图4 热处理温度对三种木材色饱和度差(ΔC^*)、总体色差(ΔE^*)和色相差(ΔH^*)的影响

Fig.4 Effect of heat treatment temperature on the color saturation difference (ΔC^*), total color difference (ΔE^*), and hue difference (ΔH^*) of three wood species

由图4可知,随着热处理温度的升高,大果紫檀、奥氏黄檀和光亮杂色豆三种木材的总体色差 ΔE^* 和色相差 ΔH^* 均不断增大,意味着经过高温热处理后木材颜色变得更深更暗,且与初始颜色的偏离逐渐增大。

奥氏黄檀和光亮杂色豆的色饱和度差 ΔC^* 也呈现相似的变化趋势,其 ΔC^* 均随着热处理温度的增大而不断减小,表明此两种木材经热处理后色饱和度变得更低,材色变得更暗。而热处理对大果紫檀 ΔC^* 值的影响与其他两种木材略有不同,其 ΔC^* 值随着热处理温度的升高呈现先增大后减小的变化趋势。此外,与奥氏黄檀相比,大果紫檀和光亮杂色豆在热处理后的颜色参数变化范围更大,表明该类木材与颜色相关的化学结构对热处理更敏感。

2.3 热处理对三种木材尺寸稳定性的影响

2.3.1 吸湿平衡含水率和阻湿率 不同热处理温度对三种木材吸湿平衡含水率(MA)和阻湿率(MEE)的影响,如图5、6所示。

由图5、6可以看出,与未处理材相比,三种木材在常温低湿(25 °C, 30% RH)和高温高湿(40 °C, 90% RH)条件下的MA均呈现不同程度的降低。随着热处理温度的升高,大果紫檀在高温高湿条件下的MA由13.40%降至10.76%,对应的MEE由2.30%提高至21.52%。奥氏黄檀在高温高湿条件下的MA由11.85%降至8.40%,MEE由7.65%逐渐增大到34.50%;而光亮杂色豆的MA由9.21%逐渐降低到5.94%,对应的MEE由16.89%增大到46.45%。由此可见,不同种类的木材在相同热处理条件下表现出不同的吸湿率变化,这可能与木材组分的差异有关。

在常温低湿条件下,热处理材的MA与MEE的变化趋势与高温高湿条件下相似。结果表明高温热处理能明显降低木材的吸湿性,这可能是因为木材中的亲水性基团被部分降解或被疏水性基团取代^[25],纤维素无定形区域的结晶化^[26]等使得木材细胞壁中吸湿基团数量减少,吸湿能力减弱。此外,与160 °C的高温热处理相比,木材在200 °C热处理后表现出更高的阻湿率,这可能是由于在较高温度下半纤维素的降解更剧烈^[27]。

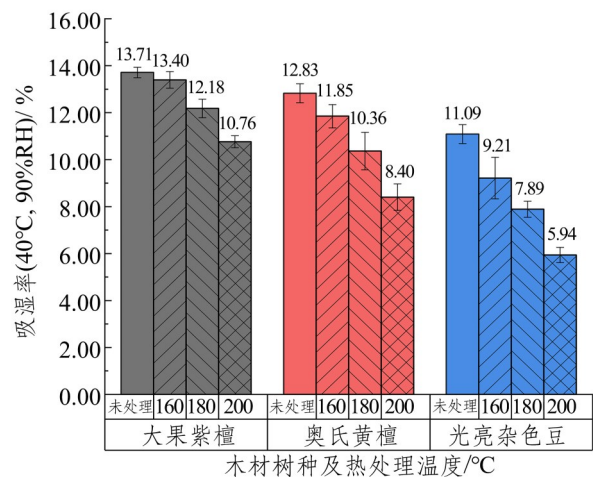
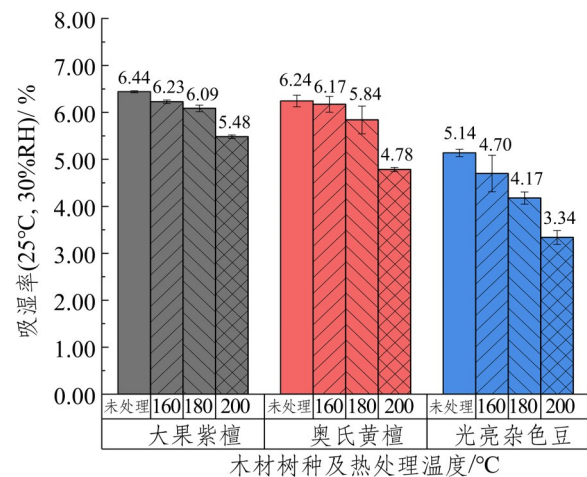


图5 热处理温度对三种木材的吸湿平衡含水率的影响

Fig.5 Effect of heat treatment temperature on the equilibrium moisture content of three wood species

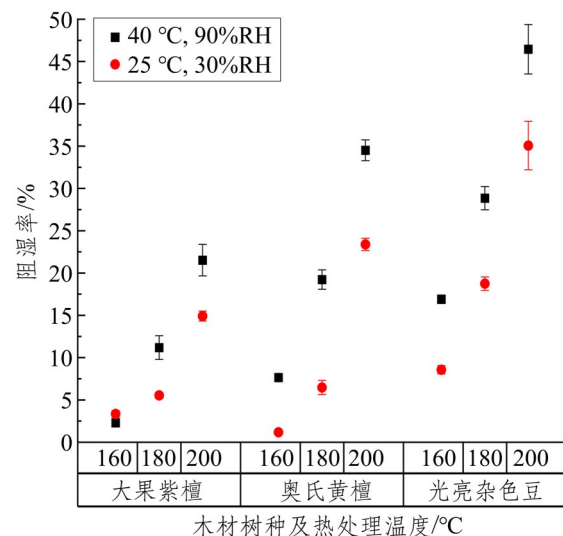


图6 热处理温度对三种木材阻湿率的影响

Fig.6 Effect of heat treatment temperature on the moisture excluding efficiency of three wood species

2.3.2 湿胀率和体积抗胀率 不同热处理温度对三种木材线性湿胀率 (LS)、体积湿胀率 (VS) 及体积抗胀率 (ASE) 的影响, 如图7~9所示。

由图8、9可以看出, 在高温高湿条件下, 随着热处理温度从160 °C升高到200 °C, 大果紫檀的VS由7.71%逐渐减小到4.49%, ASE由8.28%增大

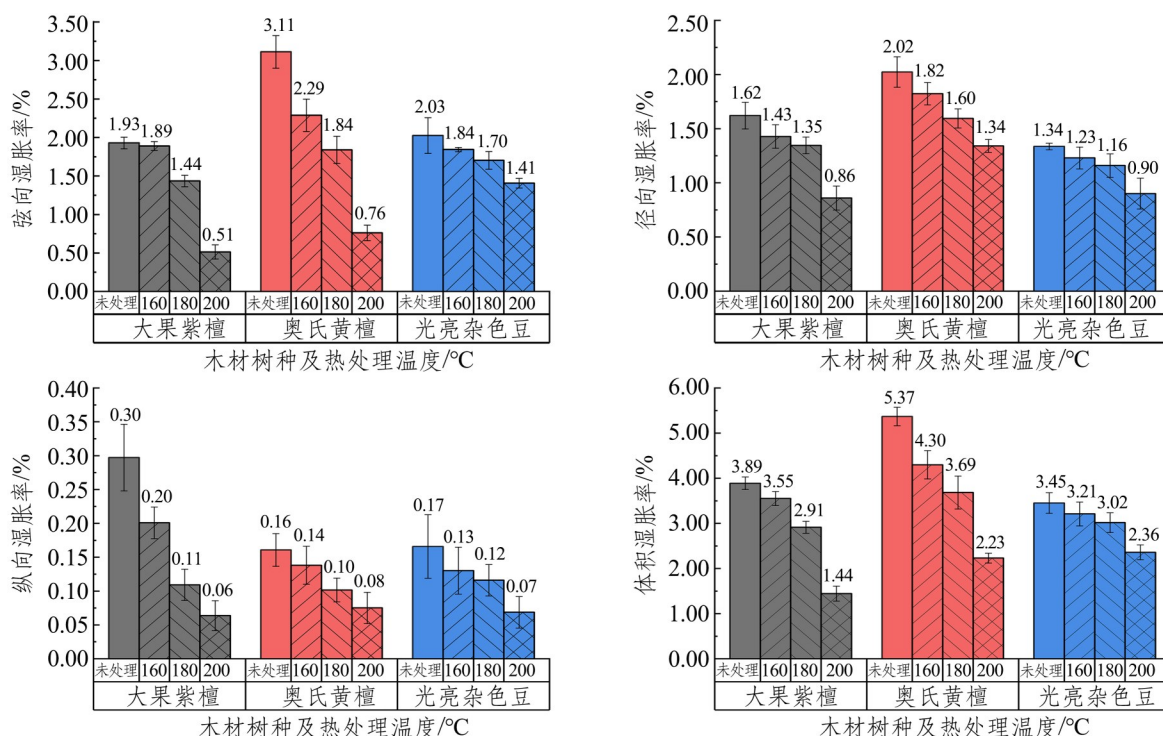


图7 热处理温度对三种木材湿胀率的影响(25 °C, 30% RH)

Fig.7 Effect of heat treatment temperature on the swelling efficiency of three wood species at 25 °C, 30% RH

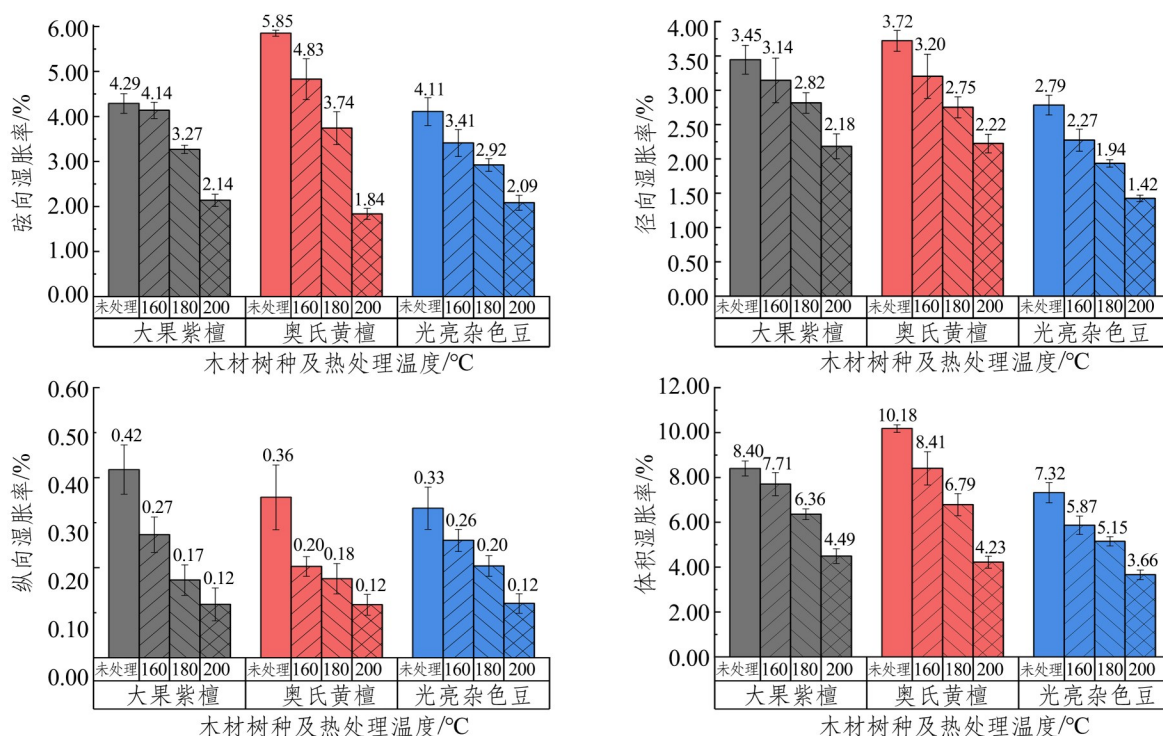


图8 热处理温度对三种木材湿胀率的影响(40 °C, 90% RH)

Fig.8 Effect of heat treatment temperature on the swelling efficiency of three wood species at 40 °C, 90% RH

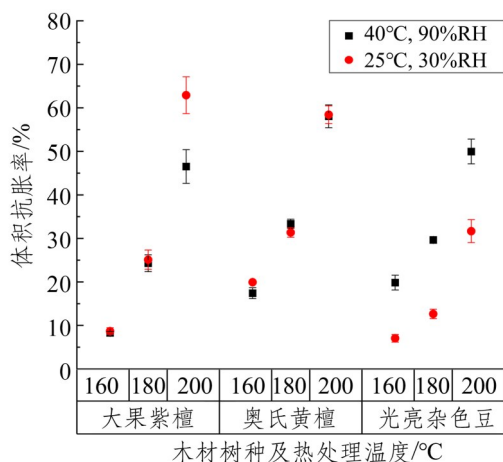


图9 热处理温度对三种木材体积抗胀率的影响

Fig.9 Effect of heat treatment temperature on the anti-swelling efficiency of three wood species

至46.51%；奥氏黄檀的VS由8.41%下降至4.23%，对应的ASE由17.41%提高至58.05%；而光亮杂色豆的VS由5.87%降低到3.66%，ASE由19.84%提高到49.96%。而在常温低湿条件下（图7），热处理木材的线性湿胀率和体积抗胀率随着热处理温度的增大呈现相似的变化趋势。

综上所述，热处理木材的线性湿胀率和体积湿胀率均随着处理温度的升高逐渐减小。在线性湿胀率中，三种木材在热处理前后均呈现出各向异性：弦向湿胀率>径向湿胀率>纵向湿胀率^[28]。光亮杂色豆在两种吸湿条件下均具有最小的线性湿胀率和体积湿胀率，这与其吸湿平衡含水率的变化规律一致。这是因为热处理削弱了木材细胞壁的吸湿能力，在一定程度上阻止了水分进入细胞壁从而提高了木材尺寸稳定性^[29]。

2.4 红外光谱分析

图10显示了三种木材在200 °C热处理前、后的红外光谱图。可以看出，与对照未处理试材相比，热处理试材的化学结构发生了显著改变。三种热处理木材在3 380 cm^{-1} 处对应的羟基（—OH）伸缩振动^[30]吸收峰强度呈现不同程度的下降，这可能是因为纤维素分子链间的游离羟基发生取代反应并脱水形成醚键^[31]。在1 738 cm^{-1} 附近的非共轭乙酰基（C=O）^[32]、1 643 cm^{-1} 处的醌类共轭C—O、C=O伸缩振动和吸着水^[33]的吸收峰强度均发生明显降低，表明半纤维素中的部分乙酰基被脱除，木材吸水性减弱。在1 326 cm^{-1} 处的特征峰归因于

（苯）酚基和纤维素的C—H变形振动^[34]，其强度在热处理后略有降低，表明半纤维素降解产生的可溶性酸性成分（如甲酸、乙酸等）可能进一步导致部分纤维素解聚^[27]。同时，在1 163 cm^{-1} 附近纤维素与半纤维素C—O—C伸缩振动^[32]、895 cm^{-1} 处碳水化合物的 β -糖苷伸缩振动^[33]的吸收峰强度均有所下降，表明木材中部分多糖发生降解。1 058 cm^{-1} 处纤维素与半纤维素C—O伸缩振动的吸收峰强度明显增加，表明木材在热处理过程中生成了脂肪醇^[32]。这些结果表明热处理减少了木材中亲水基团（如羟基、羧基）的相对数量，降低了木材的吸湿性并提高了尺寸稳定性。

对于木质素结构的特征峰而言，热处理后木材在1 596 cm^{-1} 处由木质素中的C=O、芳香族骨架伸缩振动引起的吸收峰强度降低^[35]，表明木质素结构在热处理后发生的交联、降解反应引起了C=O基团的损失^[36]。而1 265 cm^{-1} 和1 235 cm^{-1} 处的吸收峰主要归属于木质素中的紫丁香基丙烷和愈创木基丙烷单元^[37]，该特征峰在热处理前、后形态上的差异进一步证实了木质素结构的变化。此外，1 028 cm^{-1} 和836 cm^{-1} 附近的吸收峰对应GSH木质素芳烃C—H的面内变形振动和面外拉伸^[38]。与其他两种木材相比，光亮杂色豆在1 738 cm^{-1} 和836 cm^{-1} 吸收峰处的强度变化最为显著，而热处理过程中羧基和木质素结构的变化是影响材色指标的重要因素^[37, 19]，这可能也是光亮杂色豆在高温热处理后颜色变化较为明显的原因。

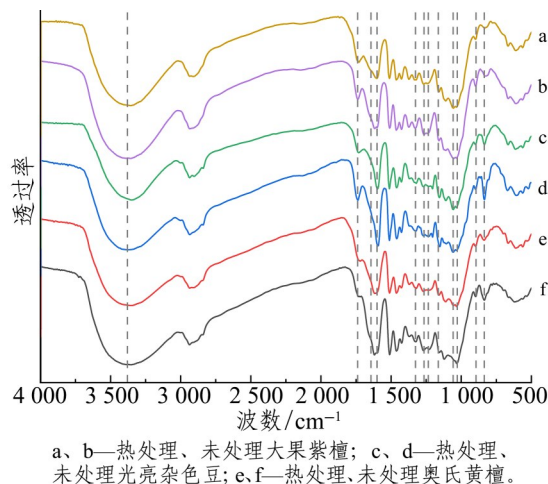


图10 三种木材在热处理前、后的红外光谱图

Fig.10 FT-IR spectra of the three wood species before and after heat treatment

3 结论

1) 随着热处理温度的升高, 三种木材的质量损失率均逐渐增大, 颜色逐渐加深。与奥氏黄檀相比, 热处理对光亮杂色豆和大果紫檀的影响更大。

2) 高温热处理降低了三种木材在常温低湿(25 °C、30% RH)和高温高湿(40 °C、90% RH)条件下的吸湿率和湿胀率, 增大了阻湿率和体积抗胀率, 明显提高了三种热带阔叶树材的尺寸稳定性。

3) 红外光谱分析结果表明三种木材在热处理后化学组分的变化各不相同, 由于木材组分的差异, 三种木材在相同热处理条件下的改性效果差异较大。实际生产中, 可根据对木材颜色、尺寸稳定性的具体需求选择热处理条件。

参考文献:

- [1] 张朋, 白晓强. 名贵硬木的商业价值[J]. 城色(尚家), 2011(10): 123-124.
- [2] 卞秋睿, 周奕宇, 张晖. 红木家具产业现状与对策研究[J]. 中国林业经济, 2020(5): 67-69.
BIAN Q R, ZHOU Y Y, ZHANG H. Research on the status quo and countermeasures of mahogany furniture industry[J]. China Forestry Economy, 2020(5): 67-69.
- [3] 尹江苹, 殷亚方, 唐召群, 等. 近年国际管制红木动态及中国进口贸易分析[J]. 木材科学与技术, 2021, 35(6): 77-82.
YIN J P, YIN Y F, TANG Z Q, et al. Dynamics of international governance of Hongmu species and analysis of Hongmu imports in China in recent years[J]. Chinese Journal of Wood Science and Technology, 2021, 35(6): 77-82.
- [4] 韩天琪, 邓晓瑜, 姜文静, 等. 热处理-注蜡联合处理对大果紫檀材性的影响[J]. 东北林业大学学报, 2020, 48(8): 99-102.
HAN T Q, DENG X Y, JIANG W J, et al. Effect of heat treatment-paraffin wax impregnation on the properties of *Pterocarpus macrocarpus* Kurz[J]. Journal of Northeast Forestry University, 2020, 48(8): 99-102.
- [5] 范敏, 倪欧琪, 俞珍权, 等. 热处理对东非黑黄檀物理力学性能的影响[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2014, 38(2): 31-35.
FAN M, NI O Q, YU Z Q, et al. Effect of thermal treatment on the physical and mechanics properties of *Dalbergia melanoxylon* wood[J]. Journal of Nanjing Forestry University (Natural Science Edition), 2014, 38(2): 31-35.
- [6] 刘婧. 表面涂饰檀香紫檀及易混树种的红外光谱分析[D]. 北京: 北京林业大学.
- [7] 姜文静, 刘伟. 名贵硬木家具设计与尺寸稳定性改善[J]. 艺术科技, 2019, 32(1): 39-39, 89.
- [8] 周凡, 付宗营, 高鑫, 等. 热处理对桃花心木材尺寸稳定性和力学性能的影响[J]. 木材工业, 2019, 33(5): 49-52.
ZHOU F, FU Z Y, GAO X, et al. Dimensional stability and mechanical properties of heat-treated mahogany wood[J]. China Wood Industry, 2019, 33(5): 49-52.
- [9] BAO Y Z, ZHOU Y D. Comparative study of moisture absorption and dimensional stability of Chinese cedar wood with conventional drying and superheated steam drying[J]. Drying Technology, 2017, 35(7): 860-866.
- [10] CANDELIER K, THEVENON M F, PETRISSANS A, et al. Control of wood thermal treatment and its effects on decay resistance: a review[J]. Annals of Forest Science, 2016, 73(3): 571-583.
- [11] ESTEVES B M, PEREIRA H M. Wood modification by heat treatment: a review[J]. BioResources, 2008, 4(1): 370-404.
- [12] SIVRIKAYA H, TESAŘOVÁ D, JEŘÁBKOVÁ E, et al. Color change and emission of volatile organic compounds from Scots pine exposed to heat and vacuum-heat treatment[J]. Journal of Building Engineering, 2019, 26: 100918.
- [13] HAKKOU M, PÉTRISSANS M, ZOULALIAN A, et al. Investigation of wood wettability changes during heat treatment on the basis of chemical analysis[J]. Polymer Degradation and Stability, 2005, 89(1): 1-5.
- [14] MOURA L F, BRITO J O, SILVA JÚNIOR F G. Effect of thermal treatment on the chemical characteristics of wood from *Eucalyptus grandis* W. Hill ex Maiden under different atmospheric conditions[J]. Cerne, 2012, 18(3): 449-455.
- [15] 张静, 漆楚生, 母军. 热处理温度和时间对杉木质量损失和静曲强度的影响[J]. 北京林业大学学报, 2020, 42(10): 137-144.
ZHANG J, QI C S, MU J. Effects of thermal treatment temperature and duration on mass loss and rupture modulus of *Cunninghamia lanceolata*[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2020, 42(10): 137-144.
- [16] AKSOY A, DEVECI M, BAYSAL E, et al. Colour and gloss changes of Scots pine after heat modification[J]. Wood Research, 2011, 56(3): 329-36.
- [17] 曹永建, 李兴伟, 王颂, 等. 高温热处理对尾叶桉木材颜色的影响[J]. 林业与环境科学, 2018, 34(1): 18-20.
CAO Y J, LI X W, WANG S, et al. Effects of thermal treatment on color in *Eucalyptus urophylla* wood[J]. Guangdong Forestry Science and Technology, 2018, 34(1): 18-20.
- [18] 孔繁旭, 王艳伟, 何啸宇, 等. 热处理国产柚木地板用材物理性能及工艺研究[J]. 林产工业, 2021, 58(11): 8-15.
KONG F X, WANG Y W, HE X Y, et al. Research on physical properties and technology of heat treated domestic teak geothermal floor materials[J]. China Forest Products Industry, 2021, 58(11): 8-15.
- [19] 蔡绍祥, 王新洲, 李延军. 高温水热处理对马尾松木材尺寸稳定性和材色的影响[J]. 西南林业大学学报(自然科学), 2019, 39(1): 160-165.
CAI S X, WANG X Z, LI Y J. The size stability and color change of *Pinus massoniana* wood by high temperature hydrothermal treatment [J]. Journal of Southwest Forestry University(Natural Sciences), 2019, 39(1): 160-165.
- [20] ESTEVES B, MARQUES A V, DOMINGOS I, et al. Heat-induced colour changes of pine (*Pinus pinaster*) and eucalypt (*Eucalyptus globulus*) wood[J]. Wood Science and Technology, 2008, 42(5): 369-384.
- [21] ZHOU F, ZHOU Y D, FU Z Y, et al. Effects of density on colour and gloss variability changes of wood induced by heat treatment[J]. Color Research & Application, 2021, 46(5): 1151-1160.
- [22] 陈太安, 王昌命, 曾金水, 等. 高温热处理对西南桦材色的影响[J]. 西南林业大学学报, 2012, 32(1): 79-82, 87.
CHEN T A, WANG C M, ZENG J S, et al. Impact of heat treatment on color of *Betula alnoides* wood[J]. Journal of Southwest Forestry College, 2012, 32(1): 79-82, 87.
- [23] SRINIVAS K, PANDEY K K. Photodegradation of thermally modified wood [J]. Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology, 2012, 117: 140-145.

- [24] 齐文玉, 刘偲, 陈金明, 等. 氮气介质环境中热处理樟子松木材主要性能的变化[J]. 西北林学院学报, 2021, 36(5): 161-167.
- [25] YILDIZ S, GEZER E D, YILDIZ U C. Mechanical and chemical behavior of spruce wood modified by heat [J]. Building and Environment, 2006, 41(12): 1762-1766.
- [26] 赵红霞, 安珍. 高温饱和蒸汽热处理对沙柳材物理力学性能的影响[J]. 林产工业, 2012, 39(3): 57-59.
- [27] CHIEN Y C, YANG T C, HUNG K C, et al. Effects of heat treatment on the chemical compositions and thermal decomposition kinetics of Japanese cedar and beech wood[J]. Polymer Degradation and Stability, 2018, 158: 220-227.
- [28] 刘一星, 赵广杰. 木质资源材料学[M]. 北京: 中国林业出版社, 2004.
- [29] KEKKONEN P M, YLISASSI A, TELKKI V V. Absorption of water in thermally modified pine wood as studied by nuclear magnetic resonance[J]. The Journal of Physical Chemistry C, 2014, 118(4): 2146-2153.
- [30] KUBOVSKÝ I, KAČÍKOVÁ D, KAČÍK F. Structural changes of oak wood main components caused by thermal modification[J]. Polymers, 2020, 12(2): 485.
- [31] 马伟, 强添纲, 郭明辉. 高温热处理对落叶松仿珍贵木材颜色变化的影响[J]. 东北林业大学学报, 2016, 44(12): 37-41.
MA W, QIANG T G, GUO M H. Effect of high temperature heat treatment on color change of imitate precious wood of larch[J]. Journal of Northeast Forestry University, 2016, 44(12): 37-41.
- [32] 王喆, 刘君良, 孙柏玲, 等. 真空热处理人工林落叶松木材吸湿性变化机理研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2017, 37(10): 3160-3164.
WANG Z, LIU J L, SUN B L, et al. Study on mechanism of moisture absorption change of larch plantation under vacuum heat treatment[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2017, 37(10): 3160-3164.
- [33] 王喆, 孙柏玲, 柴宇博, 等. 利用红外成像和纳米压痕测试技术研究热处理落叶松管胞性能[J]. 林业工程学报, 2022, 7(3): 67-72.
WANG Z, SUN B L, CHAI Y B, et al. Study on properties of heat-treated larch tracheid using infrared imaging and nanoindentation test [J]. Journal of Forestry Engineering, 2022, 7(3): 67-72.
- [34] MENG F D, YU Y L, ZHANG Y M, et al. Surface chemical composition analysis of heat-treated bamboo[J]. Applied Surface Science, 2016, 371: 383-390.
- [35] GUO J, SONG K L, Salmén L, et al. Changes of wood cell walls in response to hygro-mechanical steam treatment[J]. Carbohydrate Polymers, 2015, 115: 207-214.
- [36] SUN B L, WANG Z, LIU J L. Changes of chemical properties and the water vapour sorption of *Eucalyptus pellita* wood thermally modified in vacuum[J]. Journal of Wood Science, 2017, 63(2): 133-139.
- [37] 丁涛, 彭文文, 李涛. 基于FT-IR和XPS的热处理白蜡木材色变化机理[J]. 林业工程学报, 2017, 2(5): 25-30.
DING T, PENG W W, LI T. Mechanism of color change of heat-treated white ash wood by means of FT-IR and XPS analyses[J]. China Forestry Science and Technology, 2017, 2(5): 25-30.
- [38] ZHAI Q L, LONG F, JIANG X, et al. Facile and rapid fractionation of bamboo wood with a p-toluenesulfonic acid-based three-constituent deep eutectic solvent[J]. Industrial Crops and Products, 2020, 158. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2020.113018>.

(本文编校 向 琴)