

FeCl₂ 处理麻栎木材化学变色工艺及变色机理研究

曹惠敏, 王文斌, 孙伟圣*, 孙芳利, 贾世芳, 刘静怡

(浙江农林大学工程学院, 杭州 311300)

摘要:通过化学试剂与木材中木质素、抽提物等成分发生反应, 可以改变木材的颜色, 从而达到对木材表面修饰的目的。以氯化亚铁(FeCl₂)为变色剂, 通过浸渍的方式获得了变色麻栎(*Quercus acutissima*)单板。利用正交试验研究了亚铁离子的质量分数、处理温度、处理时间以及干燥温度对麻栎单板变色的影响, 获得了最佳处理工艺; 利用色差仪对麻栎表面的色度系数进行了测试, 并通过紫外漫反射光谱和红外光谱对麻栎变色的原因进行了探究。实验结果表明: 经氯化亚铁溶液处理后, 麻栎单板表面变为蓝黑色, 颜色均匀, 纹理清晰; 影响麻栎单板变色的各因素主次顺序为氯化亚铁质量分数>干燥温度>处理温度>处理时间。氯化亚铁对麻栎进行化学变色处理的优化工艺参数为: 氯化亚铁质量分数为 1.0%、处理时间为 10 min、处理温度为 80 ℃、干燥温度为 40 ℃。碱抽提可以去掉麻栎单板表面大部分可以与铁离子发生变色反应的木质素或酚类物质, 碱抽提后的麻栎不再发生明显的变色反应; 麻栎与铁离子的变色反应, 主要发生在木材的酚羟基和芳香环取代基上, 木材中的酚类物质与铁离子络合反应是其变色的主要原因。

关键词: 化学变色; 麻栎; 木材颜色; 金属离子

中图分类号: TQ351

文献标志码: A

开放科学(资源服务)标识码(OSID):

文章编号: 2096-1359(2020)01-0075-06



Technology and mechanism of chemical discoloration of oak (*Quercus acutissima*) using FeCl₂ solution

CAO Huimin, WANG Wenbin, SUN Weisheng*, SUN Fangli, JIA Shifang, LIU Jingyi

(School of Engineering, Zhejiang A&F University, Hangzhou 311300, China)

Abstract: As an important decoration material, the color of wood is of great significance to the identification and aesthetic effect of wood. To a certain extent, it determines the commercial value of wood, so it is particularly important to modify the color of wood. At the same time, the discoloration of wood widely happens during the service of wood products. The discoloration occurs with the influence of light, heat and microorganisms. It is considered to be one of the defects in the process of wood storage, processing and utilization, but it also provides a method for wood color modification. The color-related chemical components in wood mainly come from lignin and extracts with unsaturated structure, which can easily react with other chemical reagents to change the color of wood surface, so it is feasible to change the color of wood by chemical reaction. In this paper, ferrous chloride (FeCl₂) was used as chromogenic agent to obtain chromogenic oak (*Quercus acutissima*) veneer by impregnation. The effects of FeCl₂ mass ratio, treatment temperature, treatment time and drying temperature on the discoloration of oak veneer were studied by the orthogonal test method, and the optimum treatment process was obtained. The surface chromaticity coefficient of oak was measured by chromatometer, and the discoloration of oak was determined by the ultraviolet diffuse reflectance spectroscopy and infrared spectroscopy. The results showed that the surface of oak veneer was blue-black, uniform in color and clear in texture after the treatment with ferrous chloride solution. The primary and secondary factors affecting the discoloration of oak veneer were: ferrous chloride mass ratio > drying temperature > treatment temperature > treatment time. The optimization of chemical discoloration of oak was with ferrous chloride. The technological parameters were as follows: the mass ratio of ferrous chloride of 1.0%, the treatment time of 10 min, the treatment temperature of 80 ℃, and the drying temperature of 40 ℃. Alkali extraction could remove most of the lignin or phenolic substances on the surface of oak veneer, which can react with iron ions, and no obvious discoloration reaction occurred between oak and oak after the alkali extraction. The discoloration reaction of iron ions mainly occurred on phenolic hydroxyl groups and aromatic ring substituents of wood. The complexation reaction of phenolic substances with iron ions

收稿日期: 2019-04-29

修回日期: 2019-09-09

基金项目: 国家重点研发计划(2017YFD0601105)。

作者简介: 曹惠敏, 男, 研究方向为木材化学变色。通信作者: 孙伟圣, 男, 正高级工程师。E-mail: 18268158266@163.com

in wood was the main cause of the discoloration.

Keywords: chemical discoloration; oak; wood color; metal ion

木材作为一种重要的装饰装修材料,其颜色对木材的鉴定和美学效果具有十分重要的意义,一定程度上决定了木材的商业价值^[1-2]。目前,木材以及木制品的表面颜色修饰大多采用涂覆有色油漆。涂覆油漆后,一方面,染料的遮盖作用降低了木材纹理清晰度,导致装饰效果差;另一方面,染料的颜色效果使木材天然性大大降低。与此同时,木材的变色现象是普遍存在的,随着光、热和微生物等外界环境的影响而产生变色,被认为是木材储存和加工、利用过程中的缺陷之一。木材中与颜色相关的化学成分主要来源于具有不饱和结构的木质素和抽提物^[3],这些结构易与其他化学试剂发生反应。通过化学反应的方式进行木材变色,这为木材的表面修饰处理提供了一个新的思路^[4]。

罗建举等^[5]通过多种化学试剂对桉树单板的颜色变化工艺进行了研究;Calienzo等^[6]研究了光照条件下木材化学成分与颜色的关系,结果表明木质素的降解是木材颜色出现变化的主要原因。陈瑶等^[7]通过多种溶剂的抽提探究了抽提物对刺槐(*Robinia pseudoacacia*)热诱导变色的影响,结果表明抽提物对刺槐的热诱导变色有重要的贡献;王晓峰等^[8]通过对刺槐木素受热变色的光谱分析发现,刺槐木素受热后共轭羰基、酚羟基增多并且有醌型结构产生是刺槐变色的重要原因。陈瑶等^[9]采用紫外光谱、红外光谱分析了二氧六环抽提物加热处理前后的发色体系结构变化,结果表明木粉中多酚类物质鞣质以及黄酮受热后易发生结构改变,这是刺槐受热后颜色变化的重要原因。Chen等^[10]研究了氮气或者氧气条件下热处理后刺槐颜色和化学成分的变化,结果表明,热处理后木质素的 β -O-4键被大量分解,木材中含氧官能团出现了降低,同时醌类结构的增多和广泛共轭结构的生成是木材颜色发生变化的重要原因。

笔者以氯化亚铁为变色金属离子与麻栎中的化学成分进行反应,首先,考察了氯化亚铁质量分数、处理温度、处理时间和干燥温度对变色反应的影响;其次,采用对麻栎进行碱抽提处理,通过对比麻栎变色处理前后色差的变化与光谱的分析对其变色机理进行研究。

1 材料与方 法

1.1 试验材料

麻栎人工林旋切单板,树龄5 a,正交试验试样

尺寸为400 mm×400 mm×1.2 mm,抽提试验试样为300 mm×300 mm×1.2 mm。氯化亚铁和氢氧化钠为分析纯,购于浙江省卡尔生物有限公司。

1.2 试验仪器

便携式色差仪(HP-2136,上海汉普光电科技有限公司生产),仪器符合国际CIE标准,测量孔径为8 mm,用于测试麻栎表面颜色。

紫外漫反射光谱采用UV-3600型紫外可见分光光度计(日本岛津)测定,以BaSO₄作参比,扫描范围200~800 nm,扫描步长0.5 nm。用Kubelka-Munk方程(1),将木材样品的反射光谱转换为K/S光谱。

$$K/S = \frac{(1 - R)^2}{2R} \quad (1)$$

式中: R 是测量的反射比, K 和 S 分别是吸收系数和散射系数,基于Kubelka-Munk理论, K/S 的变化与发色基团的变化在这个吸收范围内是一致的^[11]。红外光谱测定采用KBr压片法,所用仪器为Nicolet 5700型傅里叶变换红外光谱仪(美国Nicolet公司),扫描范围400~4 000 nm,扫描次数32次,分辨率4 cm⁻¹。

1.3 试验方法

以氯化亚铁质量分数、反应时间、反应温度和干燥温度为试验因素,每个因素设置3个水平,选用L₉(3⁴)正交表安排试验(表1)。单板在变色处理前放入40℃的鼓风式烘箱中干燥至含水率8%左右。根据实验要求配制不同质量分数的氯化亚铁溶液,按照正交试验将干燥好的麻栎单板放入氯化亚铁溶液中进行变色处理,取出后干燥至含水率8%左右。

采用色差计(HP-2136)测量每组样品的L*、a*、b*值(每组样品的数据分别测量3次,取平均值)。变色前后的色差 ΔE^* 用公式(2)进行计算。

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

式中:明度(L*)表示从黑色(0%)到白色(100%),a*表示从绿色(-a)到红色(+a),b*表示从蓝色(-b)到黄色(+b)。采用未变色处理的麻栎作为对照(例如 ΔL^* 为变色处理后与未变色处理的L*的差值),计算变色处理后L*、a*、b*值的变化 ΔL^* 、 Δa^* 、 Δb^* 。正交试验设计以麻栎变色处理前后的色差 ΔE^* 为评定指标, ΔE^* 越大,说明麻栎变色程度越大。

表 1 试验因素及水平
Table 1 Test factors and levels

水平	质量分数/ %	处理时间/ min	处理温度/ ℃	干燥温度/ ℃
1	0.5	5	40	40
2	1.0	10	60	60
3	2.0	20	80	80

为了探究麻栎变色的原因,对麻栎进行抽提试验,具体步骤如下:麻栎单板加入装有 300 mL 的质量分数为 1% 的 NaOH 溶液中进行抽提试验,期间不断搅拌,加热温度为 95 ℃,连续抽提 10 h。抽提结束后,用蒸馏水多次清洗,至除去残留碱液。麻栎单板在 40 ℃ 条件下干燥至含水率 8% 左右。干燥后的麻栎进行氯化亚铁变色处理,处理后干燥至绝干,对抽提前后及变色处理前后的麻栎进行漫反射紫外光谱和红外光谱分析。

2 结果与分析

2.1 麻栎金属离子变色工艺研究

2.1.1 正交试验结果

正交试验方案及试验结果见表 2。根据正交试验结果对 4 个因素进行方差分析,结果表明,影响麻栎单板变色的各因素主次顺序为:氯化亚铁质量分数>干燥温度>处理温度>处理时间。最佳的工艺参数为:氯化亚铁质量分数为 1.0%、处理时间为 10 min,处理温度为 80 ℃、干燥温度为 40 ℃。

表 2 正交试验结果

序号	因素				色差值
	质量分数/ %	处理时间/ min	处理温度/ ℃	干燥温度/ ℃	
1	0.5	20	60	40	38.41
2	1.0	10	80	40	41.48
3	2.0	5	40	40	38.77
4	0.5	5	80	60	32.35
5	2.0	10	60	60	42.02
6	1.0	20	40	60	35.18
7	0.5	10	40	80	29.31
8	2.0	20	80	80	40.95
9	1.0	5	60	80	32.54
K1	33.36	34.55	34.42	39.55	
K2	36.40	37.60	37.66	36.52	
K3	40.58	38.18	38.26	34.27	
R	7.22	3.62	3.83	5.29	

2.1.2 氯化亚铁质量分数对木材变色效果的影响

氯化亚铁质量分数对麻栎单板变色处理后的色差影响非常显著,结果如图 1 所示。氯化亚铁质量分数在 0.5%~2.0% 范围内,随着质量分数增大,

木材试件的色差值逐渐增大,即木材颜色显著变深。这是由于随着氯化亚铁质量分数增大,溶液中亚铁离子浓度增大,木材成分与亚铁离子反应的数量也随之增多,亚铁离子浓度增大同时促进了反应的进行,导致了麻栎单板的色差持续增大。

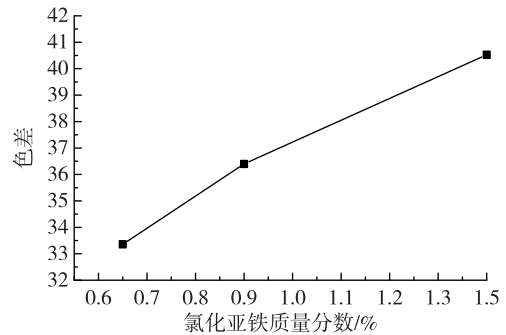


图 1 不同质量分数 FeCl₂ 对麻栎变色的影响
Fig. 1 Effects of FeCl₂ at different mass ratios on the discoloration of oak

2.1.3 处理时间对木材变色效果的影响

处理时间对麻栎单板变色处理影响相对最小。当处理时间为 5~20 min 时,随着处理时间的增加,处理试件的色差值逐渐增大,即麻栎颜色逐渐变深(图 2)。这是由于随着时间的延长,木材成分与亚铁离子反应的数量逐渐增多而使木材颜色加深。在 10~20 min 时,处理试件的色差变化平缓,即麻栎颜色变化趋于稳定,这是因为随着处理时间的增加,反应趋于饱和,再继续延长处理时间,并不能显著增加木材与亚铁离子的反应,因此,木材颜色逐渐稳定。

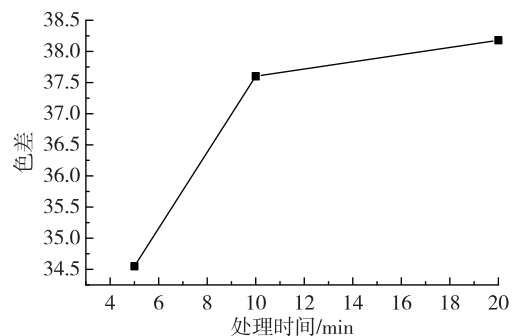


图 2 不同处理时间对麻栎变色的影响
Fig. 2 Effects of different treatment time on the discoloration of oak

2.1.4 处理温度对木材变色效果的影响

处理温度对木材变色效果的影响如图 3 所示,在 40~60 ℃ 时,处理温度对麻栎单板变色影响较大,随着温度的升高,试件的色差逐渐升高,即木材颜色逐渐变深。这是因为温度升高可加快木材与亚铁离子的反应,使木材成分与亚铁离子反应增多,因而颜色变深,色差增大。反应升温至 60 ℃ 以后,随

随着反应温度的增加,色差变化逐渐降低。这说明随着反应温度的升高,反应速度并不能持续增加。

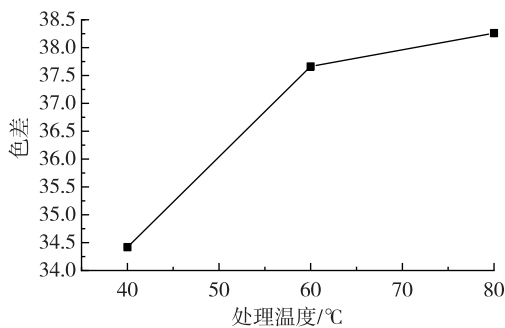


图3 不同处理温度对麻栎变色的影响

Fig. 3 Effects of different treatment temperatures on discoloration of oak

2.1.5 干燥温度对木材变色效果的影响

干燥温度对麻栎单板变色处理后色差也有显著影响,结果如图4所示。本研究发现,随着干燥温度的升高,试件的色差逐渐降低,即颜色越来越浅。这可能是因为干燥温度升高,木材中水分减少变快,水分的减少影响了变色反应的进行,影响木材变色效果。由表2可知,干燥温度对麻栎变色影响较大,仅次于 FeCl_2 质量分数的影响。

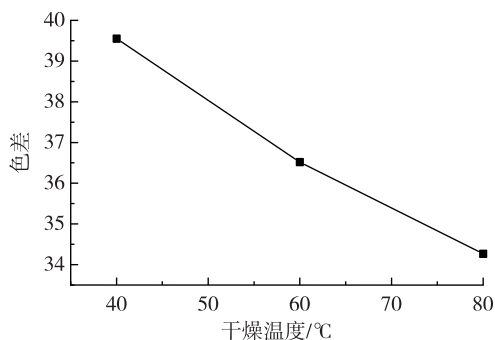


图4 不同干燥温度对麻栎变色的影响

Fig. 4 Effects of different drying temperatures on the discoloration of oak

2.2 麻栎铁离子变色原因分析

2.2.1 碱抽提前后麻栎铁离子变色分析

麻栎含有丰富的单宁类化合物,鞣质大多易溶于水,可水解鞣质可以被碱水解,缩合鞣质与碱共热时可进一步加速其缩合反应^[12]。为探究抽提物对麻栎铁离子变色的影响,采用质量分数为1%的NaOH对麻栎单板进行抽提试验。碱抽提前后及变色处理前后麻栎扫描照片如图5所示。对比图5a和5b发现,经过碱抽提后的麻栎,表面颜色变浅、白度增加,说明碱抽提去除了一部分木材的发色基团;对比图5a和5c发现,氯化亚铁变色处理后的麻栎色差变化很大,木材呈现蓝黑色,这可能是由于木材中的单宁等酚类化合物与铁离子发生

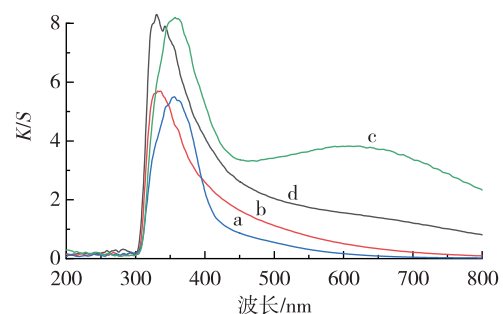
了络合反应,改变了木材的颜色^[13-14];对比图5b和5d发现,碱抽提后的铁离子变色麻栎,表面颜色略有加深,但是没有出现蓝黑色,说明碱抽提去除了大部分可以与铁离子发生变色反应的物质,变色反应不再进行,抽提物是麻栎发生变色的重要原因。



图5 碱抽提前后及铁变色前后麻栎扫描照片
Fig. 5 Scanning photos of oak before and after alkali extraction and iron discoloration

2.2.2 氯化亚铁处理前后的紫外漫反射光谱分析

氯化亚铁处理前后的紫外漫反射图如图6所示。从K/S光谱中可以看出,碱抽提后,光谱在可见光区域的吸光度稍有增加,这可能是碱抽提木材的同时发生了碳水化合物的氧化反应,木材发生了黄变(图6a和6b)。同时近紫外区峰的位置发生了变化,这是由于抽提处理过程中发生了一些其他的反应,具体原因有待进一步研究。对比图6a和



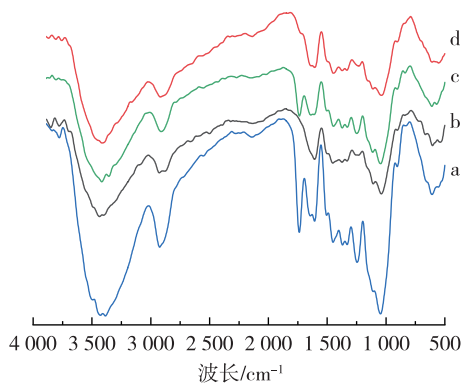
a. 未抽提麻栎; b. 碱抽提麻栎; c. 未抽提铁变色麻栎;
d. 碱抽提铁变色麻栎。

图6 麻栎碱抽提前后及铁变色前后的紫外漫反射光谱
Fig. 6 Ultraviolet diffuse reflectance spectra of non-extracted oak and extracted oak before and after iron discoloration

6c,氯化亚铁变色处理后的光谱在近紫外和可见光区的吸收显著增强,在可见光区域的吸收增加,一般来说,这是由于麻栎中的单宁等酚类化合物与铁离子发生了络合反应,改变了木材的颜色。对比图6b和6d,碱抽提后的变色处理材在可见光区域的吸收峰消失,吸收强度较弱,说明碱抽提去除了大部分可以与铁离子发生络合的化学物质,导致变色处理后不能引发络合反应,麻栎单板颜色不再发生明显的变化。

2.2.3 氯化亚铁处理前后的红外光谱分析

麻栎未抽提及抽提变色处理前后的红外光谱图如图7所示。对比图7a和7b可以发现,碱抽提除去大部分抽提物的同时,也破坏了木质素与半纤维素的结构,导致半纤维素在1740 cm⁻¹处C=O伸缩振动完全消失,1245 cm⁻¹处木质素C—O—C伸缩振动减弱;3400 cm⁻¹左右的羟基中氢键的伸缩振动降低,说明碱处理去除了一部分羟基结构^[15]。对比图7a与7c可以发现,在经过氯化亚铁的变色处理后,3400 cm⁻¹左右的羟基中氢键的伸缩振动出现了减弱,1600 cm⁻¹处芳香骨架振动和表征木质素侧链上的C=O伸缩振动吸收峰出现了变化,出现变化的原因可能是木材表面的羟基、酚羟基、羰基等与铁离子发生了络合反应^[16-18]。对比图7b和7d可以发现,对碱抽提后的麻栎进行变色处理,红外光谱没有明显的变化,说明碱抽提后,麻栎单板表面可以与铁离子发生络合反应的结构基本消失,碱抽提可以去除与铁离子反应的化学物质。



a.未抽提麻栎;b.碱抽提麻栎;c.未抽提铁变色麻栎;
d.碱抽提铁变色麻栎。

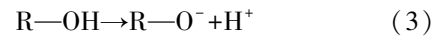
图7 麻栎碱抽提前后及铁变色前后的红外光谱图

Fig. 7 Infrared spectra of oak before and after alkali extraction and iron discoloration

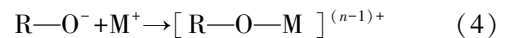
2.2.4 氯化亚铁与麻栎变色反应机理分析

由研究结果可知,麻栎中的抽提物是影响变色的主要原因,木质素也对麻栎化学变色有一定的贡

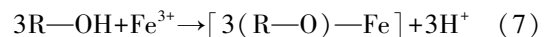
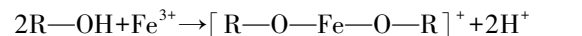
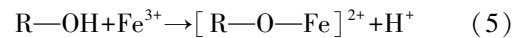
献,由络合反应的原理可以推断出酚类物质是与铁离子反应的主要成分。因此,以酚羟基为例对麻栎变色的机理进行推断。酚羟基一般是以氧负离子的形式与金属离子络合,未电离的酚羟基虽然也可以参与配位反应,但是其络合的稳定性比电离的氧负离子差得多。因此,酚羟基与金属离子的络合可以看成由两步反应组成,首先是酚羟基的离解,如式(3)所示:



然后氧负离子(R—O⁻)作为配体与金属离子进行配合反应,如式(4)所示:



由于氯化亚铁溶液不稳定,容易被氧化成三价铁离子,所以反应过程中主要是三价铁离子与麻栎发生了变色反应,反应机理可能为:



3 结论

1)采用氯化亚铁与麻栎反应制备变色木材的工艺较为简单,反应时间短。处理后的麻栎单板颜色为蓝黑色,颜色自然,纹理清晰。通过正交试验,综合分析获得氯化亚铁对麻栎进行化学变色处理的最佳工艺参数为:氯化亚铁质量分数为1.0%、处理时间为10 min、处理温度为80℃、干燥温度为40℃;影响麻栎单板变色的各因素主次顺序为:氯化亚铁质量分数>干燥温度>处理温度>处理时间。

2)碱抽提材变色处理前后的色差与光谱分析表明,碱抽提可以去除大部分麻栎中与铁反应的化学物质,如酚类抽提物;碱抽提的同时,也破坏了木质素和半纤维素的结构;碱抽提后麻栎不再发生明显的变色反应,说明碱抽提物是麻栎变色的重要原因之一。

3)变色反应主要发生在木材中的酚羟基和芳香环取代基上;麻栎中的酚类化学物质与铁离子的络合反应是麻栎变色的主要原因。

参考文献(References):

- [1] 峰村伸哉. 木材的变色[J]. 木材工业, 2002, 16(2): 5-8. DOI:10.3969/j.issn.1001-8654.2002.02.002. MINEMURANOBUYA. Wood discoloration [J]. Wood Industry, 2002, 16(2): 5-8.
- [2] 唐荣强, 鲍滨福, 李延军. 热处理条件对杉木颜色变化的影响[J]. 浙江农林大学学报, 2011, 28(3): 455-459. DOI:10.

- 3969/j.issn.2095-0756.2011.03.017.
TANG R Q, BAO B F, LI Y J. Heat: treatment influence on *Cunninghamia lanceolata* discoloration [J]. Journal of Zhejiang A&F University, 2011, 28(3): 455-459.
- [3] 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. DOI: 10.3969/j.issn.1006-4427.2018.01.004.
CAO Y Y, LI X W, WANG S, et al. Effects of thermal treatment on color in *Eucalyptus urophylla* wood[J]. Forestry and Environmental Science, 2018, 34(1): 18-20.
- [4] 孙利军, 王宏棣, 高建民. 木材变色的研究状况及展望[J]. 林业科技, 2005, 5(3): 60-62. DOI: 10.3969/j.issn.1001-9499.2005.03.023.
SUN L J, WANG H D, GAO J M. A review of research on wood discoloration[J]. Forestry Science & Technology, 2005, 5(3): 60-62.
- [5] 罗建举, 于颖欣. 桉树单板化学着色研究[J]. 西南林业大学学报, 2012, 32(2): 84-87. DOI: 10.3969/j.issn.2095-1914.2012.02.017.
LUO J J, YU Y X. Study on chemical coloration of *Eucalyptus veneer*[J]. Journal of Southwest Forestry University, 2012, 32(2): 84-87.
- [6] CALIENNO L, PELOSI C, PICCHIO R, et al. Light-induced color changes and chemical modification of treated and untreated chestnut wood surface [J]. Studies in Conservation, 2015, 60(2): 535-543. DOI: 10.1179/2047058413Y.0000000119.
- [7] 陈瑶, 樊永明, 高建民. 溶剂抽提对刺槐热诱导变色的影响[J]. 北京林业大学学报, 2009, 31(A1): 85-89. DOI: 10.13332/j.1000-1522.2009.s1.042.
CHEN Y, FAN Y M, GAO J M. Effects of solvent extraction on the heat-induced discoloration of locust (*Robinia pseudoacacia*) wood [J]. Journal of Beijing Forestry University, 2009, 31(A1): 85-89.
- [8] 王晓峰, 樊永明, 高建民. 刺槐木素受热变色的光谱分析[J]. 林业科技开发, 2008, 22(4): 67-69. DOI: 10.3969/j.issn.1000-8101.2008.04.018.
WANG X F, FAN Y M, GAO J M. Spectrum analysis of black locust lignin after thermal treatments [J]. China Forestry Science and Technology, 2008, 22(4): 67-69.
- [9] 陈瑶, 高建民, 樊永明. 刺槐二氧六环溶剂抽提物热诱导变色光谱分析[J]. 北京林业大学学报, 2009, 31(A1): 90-93. DOI: 10.13332/j.1000-1522.2009.s1.043.
CHEN Y, GAO J M, FAN Y M. Spectrum analysis on heat-induced discoloration of dioxane extractives from locust (*Robinia pseudoacacia*) wood [J]. Journal of Beijing Forestry University, 2009, 31(A1): 90-93.
- [10] CHEN Y, GAO J M, FAN Y M, et al. Heat-induced chemical and color changes of extractive-free black Locust (*Robinia pseudoacacia*) Wood [J]. BioResources, 2012, 7(2): 2236-2248. DOI: 10.15376/biores.7.2.2236-2248.
- [11] CHEN Y, FAN Y M, GAO J M, et al. Spectroscopic analysis of the role of extractives on heat-induced discoloration of black locust (*Robinia pseudoacacia*) [J]. BioResources, 2012, 7(1): 1157-1170. DOI: 10.1080/17480272.2012.669407.
- [12] 罗侠, 刘克忠, 孙艳辉. 麻栎叶黄酮的提取及其抗氧化活性研究[J]. 天然产物研究与开发, 2012, 24(7): 951-954. DOI: 10.3969/j.issn.1001-6880.2012.07.021.
LUO X, LIU K Z, SUN Y H. Extraction and antioxidation activity of total flavonoids from *Quercus acutissima* Carr. leaves [J]. Natural Product Research and Development, 2012, 24(7): 951-954.
- [13] 陈武勇, 刘波, 刘进, 等. 植物单宁与铁盐和氧化剂反应的变色规律[J]. 中国皮革, 2003, 32(7): 11-15. DOI: 10.13536/j.cnki.issn1001-6813.2003.07.003.
CHEN W Y, LIU B, LIU J, et al. Color laws of vegetable tannin reacted with ferric salts and oxidizer [J]. China Leather, 2003, 32(7): 11-15.
- [14] 于喆, 金哲雄. 植物单宁的应用及研究进展[J]. 黑龙江医药, 2015(1): 20-23. DOI: 10.3969/j.issn.1673-5854.2005.05.011.
YU Z, JIN Z X. Research progress and application of vegetable tannins [J]. Heilongjiang Medical Journal, 2015(1): 20-23.
- [15] 王春红, 刘胜凯. 碱处理对竹纤维及竹纤维增强聚丙烯复合材料性能的影响[J]. 复合材料学报, 2015, 32(3): 683-690. DOI: 10.13801/j.cnki.fhclxb.20141105.003.
WANG C H, LIU S K. Effects of alkali treatment on properties of bamboo fiber and bamboo fiber reinforced polypropylene composites [J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2015, 32(3): 683-690.
- [16] 庄琳, 宋小娇, 徐燕红. 水青树木材红外光谱特征研究[J]. 湖北农业科学, 2017, 56(7): 1334-1339. DOI: 10.14088/j.cnki.issn0439-8114.2017.07.035.
ZHUANG L, SONG X J, XU Y H. Study on the infrared spectral characteristic of *Tetracentron sinense* wood [J]. Hubei Agricultural Sciences, 2017, 56(7): 1334-1339.
- [17] 池玉杰. 6种白腐菌腐朽后的山杨木材和木质素官能团变化的红外光谱分析[J]. 林业科学, 2005, 41(2): 136-140. DOI: 10.3321/j.issn:1001-7488.2005.02.023.
CHI Y J. FTIR analysis on function groups of david poplar wood and lignin degraded by 6 species of wood white-rot fungi [J]. Scientia Silvae Sinicae, 2005, 41(2): 136-140.
- [18] 薛晓明, 南程慧. 7种针叶树材红外光谱(FTIR)特征的分析[J]. 安徽农业大学学报, 2016, 43(1): 88-93. DOI: 10.13610/j.cnki.1672-352x.20151224.023.
XUE X M, NAN C H. Comparison of FTIR spectra in seven conifer softwood samples [J]. Journal of Anhui Agricultural University, 2016, 43(1): 88-93.

(责任编辑 李琦)