

## 抽提物对二翅豆木材颜色及尺寸稳定性的影响

马润航, 王耀博, 韩馥蔓, 崔新婕, 张天鹏, 邱哲, 肖泽芳, 谢延军\*

(东北林业大学 材料科学与工程学院, 哈尔滨 150040)

**摘 要:** 聚焦于南美洲二翅豆木材抽提物对其颜色及尺寸稳定性的影响, 为二翅豆木材的高效利用提供理论依据。采用 CIE 1976  $L^*a^*b^*$  色彩空间体系对不同颜色分类二翅豆木材的色度参数进行量化分析, 结合傅里叶变换红外光谱 (Fourier transform infrared spectrometer, FTIR) 和气相色谱-质谱联用 (Gas chromatography-mass spectrometry, GC-MS) 技术, 对抽提物化学成分进行表征, 分析抽提物组成成分对二翅豆颜色的影响。通过微观结构观察抽提物在木材中存在位置, 并通过测试木材湿胀率与木材在不同恒定湿度下的平衡含水率, 分析抽提物对木材尺寸稳定性的影响。结果表明, 二翅豆木材的颜色差异主要受抽提物中显色物质的种类及质量分数影响, 其中以酚类、黄酮类及类似物、杂环化合物及萜类/树脂酸类对木材颜色的影响最为显著, 具体表现为抽提物质量分数越高, 红绿色品指数  $a^*$  越高, 而明度  $L^*$  越低。射线细胞是二翅豆木材抽提物主要存在部位之一, 影响径向水分传输, 因此对木材径向尺寸稳定性影响较大。研究结果为调控二翅豆木材颜色及改善木材综合性能提供技术支持, 同时为二翅豆的高附加值利用奠定理论基础。

**关键词:** 二翅豆; 抽提物; 材性; 显色物质; 尺寸稳定性

**中图分类号:** S781.42

**文献标识码:** A

**DOI:** 10.7525/j.issn.1006-8023.2026.01.006

## Effect of Extractives on Color and Properties of *Dipteryx odorata* Wood

MA Runhang, WANG Yaobo, HAN Fuman, CUI Xinjie,  
ZHANG Tianpeng, QIU Zhe, XIAO Zefang, XIE Yanjun\*

(College of Materials Science and Engineering, Northeast Forestry University, Harbin 150040, China)

**Abstract:** This study focuses on the effects of extractives in *Dipteryx odorata* wood from South America on the color and dimensional stability of wood, offering a theoretical foundation for the efficient utilization of *Dipteryx odorata* wood. Employing the CIE 1976  $L^*a^*b^*$  color space system, colorimetric parameters of diverse wood colors of *Dipteryx odorata* wood were quantitatively analyzed. Fourier transform infrared spectrometer (FTIR) and gas chromatography-mass spectrometry (GC-MS) techniques were used to characterize the chemical composition of extractives, analyzing the influence of the composition of extractives on *Dipteryx odorata* wood color. The existence positions of extractives within wood were observed via microstructure observation. Additionally, the impact of extractives on dimensional stability was analyzed by testing wood's wet swelling rate and equilibrium moisture content under various constant humidities. Results demonstrated that the color differences in *Dipteryx odorata* wood was mainly influenced by the types and content of chromogenic substances in the extractives, especially phenols, flavonoids and analogs, heterocyclic compounds, and terpenes/resin acids, that the higher the content of the extractives, the higher the  $a^*$  value and the lower the  $L^*$  value. Ray cells were one of the main locations of extractives in *Dipteryx odorata* wood, affected radial moisture transport, thus having a significant impact on the radial dimensional stability of wood. The findings provide technical support for regulating *Dipteryx odorata* wood color and enhancing its overall properties, and laying a theoretical foundation for the high-value utilization of *Dipteryx odorata* wood.

**Keywords:** *Dipteryx odorata*; extractives; wood properties; chromogenic substance; dimensional stability

收稿日期: 2025-04-25

基金项目: 国家级大学生创新训练项目 (202310225261)。

第一作者简介: 马润航, 本科生。研究方向为木材科学与工程。E-mail: marunhang@nefu.edu.cn

\* 通信作者: 谢延军, 博士, 教授。研究方向为木材功能化改良。E-mail: yxie@nefu.edu.cn

引文格式: 马润航, 王耀博, 韩馥蔓, 等. 抽提物对二翅豆木材颜色及尺寸稳定性的影响[J]. 森林工程, 2026, 42(1): 55-64.

MA R H, WANG Y B, HAN F M, et al. Effect of extractives on color and properties of *Dipteryx odorata* wood[J]. Forest Engineering, 2026, 42(1): 55-64.

## 0 引言

木材颜色是决定其美学价值和经济价值的重要因素之一,尤其在高端家具、地板和装饰材料领域,色泽均匀且稳定的木材更受市场青睐。南美洲二翅豆(*Dipteryx odorata*)又名龙凤檀,原产于南美洲,隶属豆科,二翅豆属,作为一种重要的热带木材,因其纹理似龙似凤交错优美,色泽沉稳高贵典雅,且力学性能优异,被广泛用于高档地板、家具和室内装饰等领域<sup>[1]</sup>。然而二翅豆木材之间存在显著颜色差异及色彩分布不均匀等现象,未经加工的二翅豆木材之间颜色差距较大,按照颜色可分为3大类,褐色、红色与黄色<sup>[1]</sup>。这种颜色上的差异性主要归因于木材内部抽提物的种类、质量分数及分布不同。目前,现代家具市场倾向于追求明快的颜色<sup>[2]</sup>,因此黄色二翅豆因其色彩优势而具有较高的经济价值。相比之下,红色与褐色二翅豆加工成产品时往往需要经过漂白处理来达到市场需求。抽提物作为木材中的非结构性成分,不仅影响木材的视觉特性,还可能改变其物理性能,并且抽提物中不同成分与漂白剂发生的化学反应也不同<sup>[3]</sup>。因此,深入研究二翅豆木材抽提物对颜色及材性的影响,对于木材颜色调控、漂白剂的选择及提高产品附加值具有重要意义。

木材颜色的多样性除了与抽提物的质量分数和分布不同有关,还受抽提物化学成分差异的影响,尤其是具有显色能力的共轭结构分子。对于二翅豆来说,抽提物的组成直接影响其颜色表现,从浅黄褐色到深红褐色的变化可归因于特定显色基团的种类和质量分数差异。木材抽提物中含有醛类、多酚类、萜类抽提物和一些无机盐等,其中含共轭结构的多酚类、萜类抽提物为主要显色助色成分<sup>[3]</sup>。同时,抽提物化学成分中具有多种高反应活性的官能团,如共轭 $\pi$ 键、羰基、不饱和醚键与羟基等,这些基团对木材颜色变化具有较大影响,且对漂白剂具有不同的敏感性<sup>[4]</sup>。此外,抽提物在细胞壁和细胞腔中的分布可能影响木材的渗透性、吸湿性和尺寸稳定性,进而影响其加工性能和使用寿命<sup>[5]</sup>。因此,探究二翅豆抽提物的化学成分及其在木材中的分布是揭示二翅豆颜色形成与调控机制和材性差异的关键。

针对目前家具行业所使用的二翅豆颜色差异大、不易漂白等问题,挑选企业生产中常见的具有较大色差的3种颜色(褐色、红色、黄色)二翅豆作为研究对象,采用CIE 1976  $L^*a^*b^*$ 色彩空间体系对不同颜色样本的色度参数进行量化分析,结合傅里叶变换红外光谱(fourier transform infrared spectrometer, FTIR)和气相色谱-质谱联用(gas chromatography-mass spectrometry, GC-MS)技术,系统解析抽提物的分子结构及化学组

成,明确影响木材颜色的关键显色物质。通过扫描电子显微镜(scanning electron microscope, SEM)观察抽提物在木材微观结构中的分布,并测定木材的尺寸稳定性,探讨抽提物质量分数与种类对颜色及材质的影响,为二翅豆木材的色差调控和优化利用提供理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验材料

本试验所用二翅豆样本来源于大自然家居有限公司,原产于南美洲秘鲁(香二翅豆, *Dipteryx odorata*),样本根据颜色分为褐色、红色和黄色3类,初含水率为 $13.2\% \pm 1.3\%$ ;氢氧化钠(NaOH,分析纯)、苯(Benzene,分析纯)购自天津市天力化学试剂有限公司;无水乙醇( $\text{CH}_3\text{CH}_2\text{OH}$ ,分析纯)购自天津市富宇精细化工有限公司。

### 1.2 试验仪器

电子天平(SQP、赛多利科学仪器(北京)有限公司);傅里叶变换红外光谱仪(FTIR)(Nicolet 6700, Thermo Fisher Scientific);扫描电子显微镜(SEM)(CXS-5TAH-119402, COXEM);手持式测色仪(TS7600, 深圳三恩时科技有限公司);切片机(SM2010, Leica Microsystems Ltd);气质联用GC-MS仪(7890A-5975C, 美国安捷伦科技有限公司);显微镜(Axioscope 5, Carl Zeiss)。

### 1.3 性能测试与表征

#### 1.3.1 颜色测定

依据CIE 1976  $L^*a^*b^*$ 色彩空间体系,使用手持式测色仪对二翅豆单板表面颜色进行表征。选取黄色、红色及褐色3组样品各10块,每块样品被进一步划分为浅色区域与深色区域,并分别在每块样品的深色区域与浅色区域选取20个测量点进行测量,以便进行颜色对比分析。其中 $L^*$ 表示明度,数值从0(黑色)到100(白色); $a^*$ 表示红绿色品指数( $+a^*$ 表示趋向红色,  $-a^*$ 表示趋向绿色); $b^*$ 表示黄蓝色品指数( $+b^*$ 表示趋向黄色,  $-b^*$ 表示趋向蓝色)。

#### 1.3.2 微观形貌分析

使用切片机对软化后二翅豆样品处理为 $50\ \mu\text{m}$ 厚显微切片,并使用藏红T(Safranin T)将切片进行染色,在显微镜下观察抽提物在木材中的分布;使用切片机对二翅豆样品表面进行平滑,并对样品表面进行喷金处理,使用SEM在12~15 kV加速电压下获得图像,进一步对抽提物存在位置及形态进行观察。

#### 1.3.3 抽提物提取

木材抽提物的提取依据《林业生物质原料分析方法 抽提物含量的测定》(GB/T 35816—2018)的相关规

定进行。主要使用热水、质量分数1%的NaOH与苯-乙醇等溶剂进行抽提。各溶剂体系抽提物质量分数 $X_n$ ,公式为

$$X_n = \frac{m_1 - m_2}{m_1} \times 100\%。 \quad (1)$$

式中: $m_1$ 为抽提前绝干木粉质量,g; $m_2$ 为抽提后绝干木粉质量,g。

### 1.3.4 抽提物化学组分及结构表征

1)傅里叶变换红外光谱分析(FTIR)。将3种木材的苯-醇抽提物在103℃条件下进行干燥处理至质量不变。采用傅里叶变换红外光谱对其进行分析,测定范围为400~4 000  $\text{cm}^{-1}$ ,扫描次数为32次,分辨率为4  $\text{cm}^{-1}$ 。

2)气相色谱-质谱联用分析(GC-MS)。将质量浓度约为1.0 g/L的苯-乙醇抽提物溶液通过0.22  $\mu\text{m}$ 的微孔滤膜过滤采用DB-17MS型色谱柱(30.0  $\mu\text{m}$ ,250  $\mu\text{m}$ ,0.25  $\mu\text{m}$ )。其色谱条件设定为初始柱温设定为60℃,保持2 min,随后以20℃/min的速率升温至220℃,并保持2 min;之后以5℃/min的速率升温至280℃,并保持10 min。气化室温度设定为250℃,传输线温度为300℃,载气选用氦气(He),流量为1.0 mL/min,采用不分流模式,进样量为1  $\mu\text{L}$ 。质谱分析条件包括使用电子轰击(electron impact, EI)源,电子能量设定为70 eV,离子源温度为230℃,四极杆温度为150℃。扫描模式采用全扫描(scan)方式,扫描质量范围设定为35~500 m/z。通过质谱数据库NIST11和保留时间对检测到的化合物进行定性鉴定。采用面积归一化法进行定量,即以各鉴定成分的峰面积占所有鉴定成分峰面积总和的百分比作为定量结果。具体计算公式为

$$C_i = \frac{A_i}{A_1 + A_2 + \dots + A_i + \dots + A_n} \times 100\%。 \quad (2)$$

式中: $C_i$ 为第*i*个鉴定成分的峰面积百分比; $A_i$ 为第*i*个鉴定成分的峰面积; $n$ 为鉴定出成分的总个数; $A_1 + A_2 + \dots + A_i + \dots + A_n$ 为鉴定成分的峰面积之和。

### 1.3.5 尺寸稳定性测试

1)湿胀性测试。测试试样尺寸为20 mm(轴向)×20 mm(径向)×20 mm(弦向),每组平行试样15个,体积湿胀率( $S$ )精确至0.01%,参照《无疵小试样木材物理力学性质试验方法第8部分:湿胀性测定》(GB/T 1927.8—2021)进行测定。

2)含水率测试。测试试样尺寸为20 mm(轴向)×20 mm(径向)×20 mm(弦向),每组平行试样15个,将样品烘干至绝干后分别放入温度为25℃±2℃、恒定湿度为33%、56%、76%、93%的环境下测定试样达到恒重时的质量,参考《木材及木基材料吸湿尺寸稳定性检测规范》(LY/T 3222—2020)进行测定二翅豆各恒定湿

度下的平衡含水率。

## 2 结果与分析

### 2.1 抽提物对二翅豆木材颜色的影响

#### 2.1.1 二翅豆颜色分析

二翅豆的颜色表现有多多样性,图1(a)呈现出3种不同颜色的二翅豆宏观照片,根据宏观颜色将其分为褐色(BT)、红色(RT)及黄色(YT)。为了更直观地表示其颜色的差异性,使用手持式测色仪对3种样品的表现颜色进行参数采集,并采用三维散点图进行直观表现,如图1(b)所示。BT颜色较为分散, $L^*=51.66\pm 5.68$ 、 $a^*=8.95\pm 1.47$ 、 $b^*=15.70\pm 3.35$ ,且 $L^*$ 与 $b^*$ 有正相关趋势。RT的 $L^*$ 与 $b^*$ 同样具有正相关趋势,其 $L^*=51.42\pm 5.58$ 、 $a^*=12.44\pm 2.14$ 、 $b^*=15.12\pm 3.54$ 。YT颜色参数较为集中, $L^*=60.24\pm 5.17$ 、 $a^*=9.64\pm 2.78$ 、 $b^*=24.04\pm 2.27$ 。BT与RT二者的 $L^*$ 与 $b^*$ 显示出一定的正相关性,即明度越高的样品一般黄度越大,而YT的 $L^*$ 与 $a^*$ 呈负相关性。BT与RT的深色与浅色区域 $a^*$ 差距较小,如图1(d)所示,但是二者深浅区域的 $L^*$ 差值(图1(c))与 $b^*$ 差值(图1(e))明显高于YT,导致BT与RT的深浅区域色差较大。YT颜色参数优异,作为室内装饰材料可使人感到明快、整洁、高雅和舒畅<sup>[6]</sup>。因此,对二翅豆木材颜色均匀性有要求时,针对BT应提升 $L^*$ 与 $b^*$ ,并降低二者在深浅区域的差值,针对RT除了关注 $L^*$ 与 $b^*$ 外,还应整体降低其 $a^*$ 使其红度降低。

#### 2.1.2 抽提物质量分数及组分分析

抽提物中含有的非共轭羰基、共轭羰基、苯环类结构以及不饱和醇类等结构,是导致木材颜色差异的主要原因<sup>[7]</sup>。不同溶剂体系抽提得到的二翅豆抽提物质量分数,如图2所示。RT热水、质量分数1%的NaOH及苯-乙醇抽提物质量分数均高于BT和YT。热水抽提可溶出水溶性物质(淀粉、低分子糖类、无机盐);质量分数1%的NaOH除了能够提取热水溶出物外,还能溶解低聚戊糖、树脂酸以及糖醛酸等;苯-乙醇抽提可溶出更多种类的抽提物且不与木材组成成分发生化学反应,因此应对苯醇抽提物进行化学分析。FTIR分析结果显示,3种颜色二翅豆抽提物的化学组成成分具有差异,如图3所示。其中,3 320  $\text{cm}^{-1}$ 处的吸收峰对应于—OH的伸缩振动,1 718  $\text{cm}^{-1}$ 处的吸收峰则归因于非共轭醛和酯C=O的伸缩振动<sup>[8]</sup>。在1 614  $\text{cm}^{-1}$ 和1 594  $\text{cm}^{-1}$ 处的吸收峰分别对应芳香环骨架的振动和共轭C=O基团的振动<sup>[9]</sup>,RT抽提物该部分峰的强度略高于BT与YT抽提物,这表明此类共轭体系的存在与二翅豆颜色的加深有关。1 447  $\text{cm}^{-1}$ 处的吸收峰为

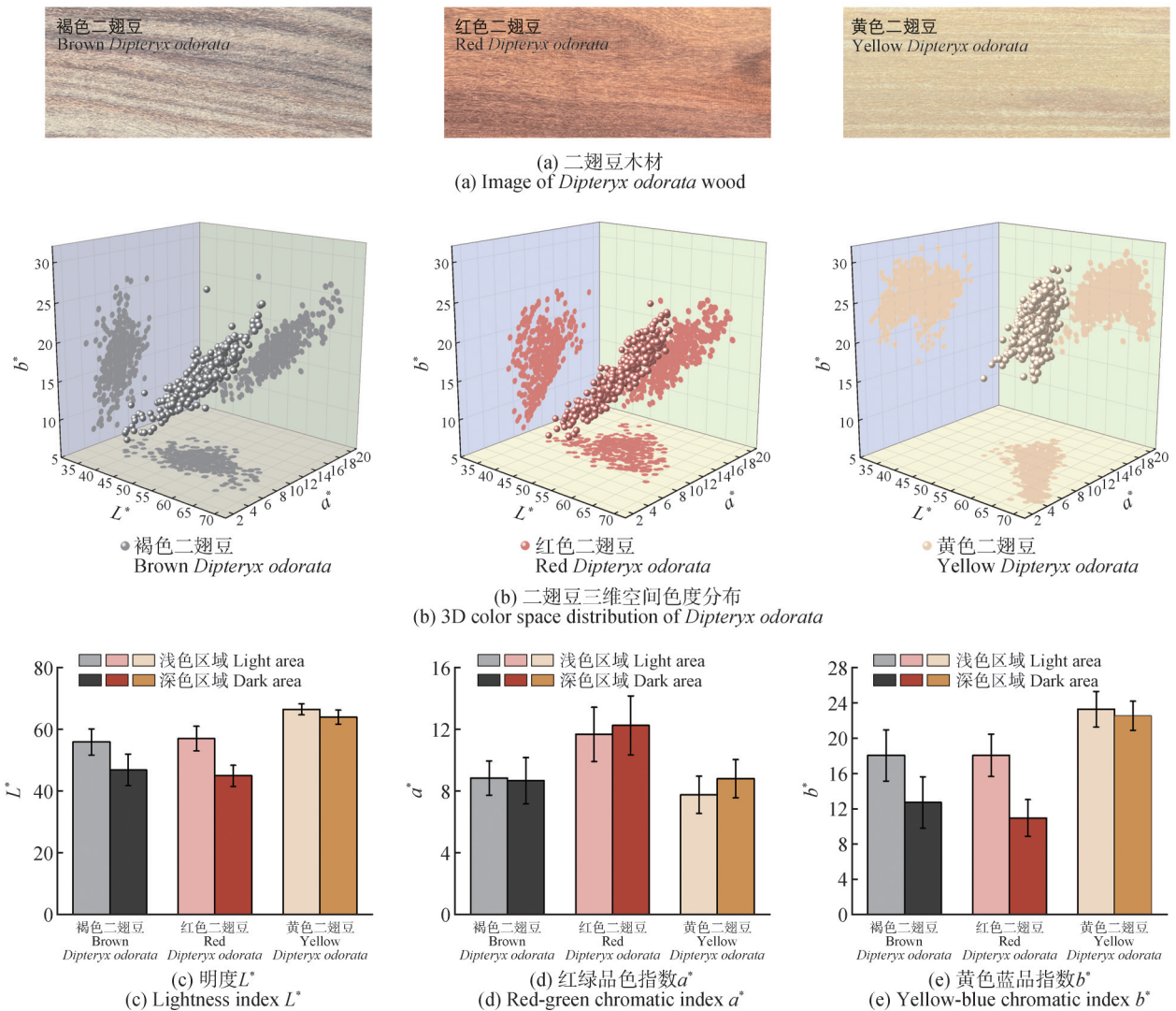


图1 二翅豆表型浅色及深色区域色度分布

Fig. 1 Chromatic distribution of light and dark regions in *Dipteryx odorata* wood

醚类化合物的特征峰; 1 382  $\text{cm}^{-1}$  处的吸收峰为氧化萜类化合物的特征峰; 1 240~970  $\text{cm}^{-1}$  的吸收峰则对应于醇、酚类—OH 的伸缩振动及 C=O 的伸缩振动对应木材抽提物环烯醚萜甙类、酚类物质。已有研究指出, 这些物质是木材变色的内在因素<sup>[10]</sup>。3 356  $\text{cm}^{-1}$  (O—H 伸缩振动)、1 330  $\text{cm}^{-1}$  和 1 420  $\text{cm}^{-1}$  (O—H 弯曲振动) 以及 1 045  $\text{cm}^{-1}$  和 1 084  $\text{cm}^{-1}$  (C—O 伸缩振动) 处的吸收峰, 是不饱和醇的特征吸收峰。在 RT 样本抽提物中不饱和醇的吸收峰强度略高于 YT 和 BT 样本抽提物, 推测不饱和醇可能与抽提物显示红色有关。

2. 1. 3 抽提物化学组分分析

通过气相色谱—质谱联用仪(GC-MS)对苯-乙醇抽提的二翅豆抽提物进行分析。测定二翅豆抽提物中各组分的保留时间及其对应的色谱峰面积(A), 并通过数据库来检索不同峰所对应的化合物。鉴于色谱分

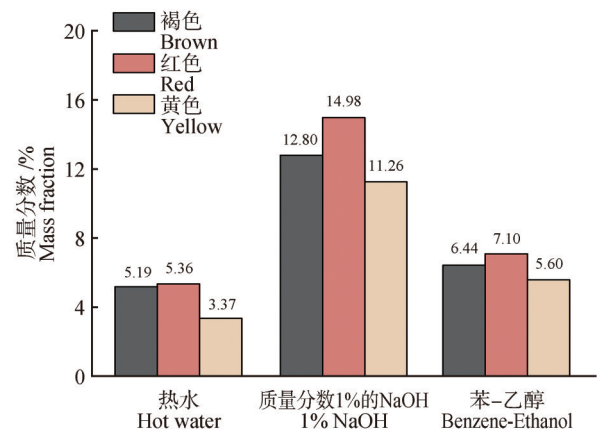


图2 不同溶剂体系二翅豆抽提物质量分数

Fig. 2 Extractives content of *Dipteryx odorata* in different solvent systems

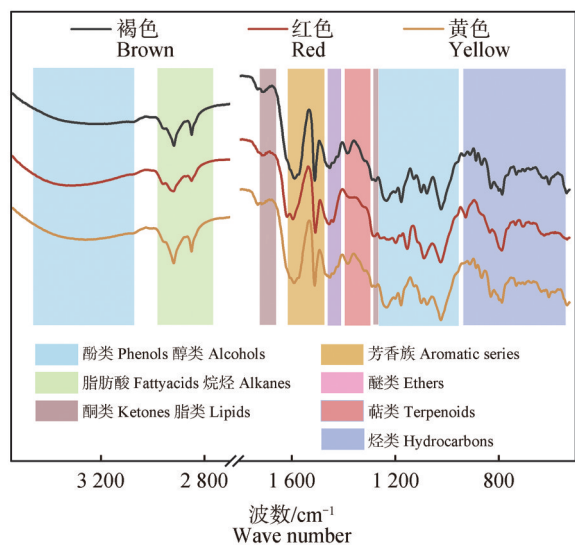


图 3 二翅豆苯-乙醇抽提物红外光谱  
Fig. 3 FTIR spectra of *Dipteryx odorata* benzene-ethanol extractives

析条件的局限性,并非所有二翅豆样本的色谱峰均能实现彻底分离。对于无法实现完全分离的色谱峰,采取保留时间作为判定标准。将相邻保留时间大于0.1 min的色谱峰视为2个独立的化学成分,而小于或等于0.1 min的则视为单一化学成分进行处理<sup>[11]</sup>。随后依据气相色谱和质谱条件对提取液进行分析,获得不同样本的总离子流图,如图4所示。通过NIST11质谱库检索,对每份样本的几个主要成分进行鉴定,以确定样

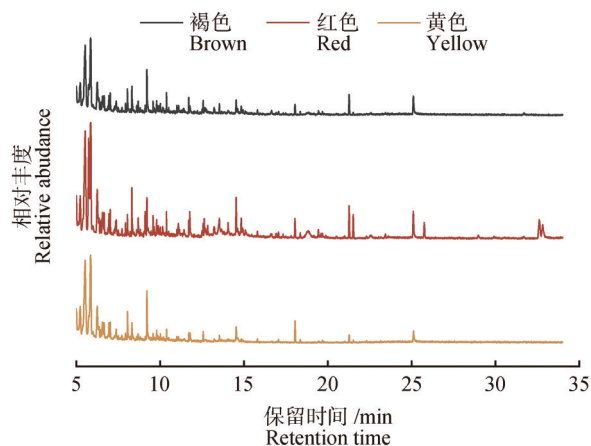


图 4 二翅豆抽提物总离子流  
Fig. 4 Total ion chromatogram (TIC) of *Dipteryx odorata* wood extractives

本苯醇提取液中的主要化学成分,3种颜色二翅豆抽提物成分复杂,经测定共检出59种化合物,其中BT(抽提物中)检出43种,RT检出46种,YT检出35种,见表1。结果显示芳香烃为二翅豆抽提物的主要成分。YT中芳香烃的质量分数最高,占其抽提物总量的65.94%;RT中该类化合物的质量分数为41.50%,而BT中该类化合物的质量分数为39.73%。酚类和酯类分别位居抽提物总量的第二、三位,RT中酚类和酯类质量分数最高,分别为18.66%和8.70%,高于BT的11.94%和6.47%,以及YT的8.42%和4.83%。此外,还有羧酸、酰胺和杂环等化合物共同构成了二翅豆的抽提物。

表 1 二翅豆抽提物化合物组成

Tab. 1 Compound composition of *Dipteryx odorata* wood extractives

编号 No	化合物 Compound	保留时间/min Retention time	质量分数/% Relative content		
			BT	RT	YT
1	1-ethyl-3-methyl-Benzene	5.53	—	16.09	23.89
2	Hexanoic acid	5.75	5.82	7.73	—
3	1,2,3-Trimethylbenzene	5.85	15.99	11.32	20.93
4	1-ethyl-2-methyl-Benzene	6.25	7.48	4.71	6.25
5	o-Cymene	6.36	2.23	2.51	2.49
6	2-Cyanopyrazine	6.46	—	1.29	—
7	1-ethyl-2,3-dimethyl-Benzene	6.57	6.50	2.43	6.24
8	1-ethyl-3,5-dimethyl-Benzene	6.66	2.75	2.84	2.53
9	1-ethyl-2,4-dimethyl-Benzene	7.03	4.78	1.60	2.74
10	1,5-Hexadien-3-yne	7.29	1.66	—	0.67
11	Mequinol	7.37	—	0.82	2.24
12	1-Methyl-2-(2-propenyl)-benzene	7.51	—	—	0.87
13	Barbaralone	7.72	0.70	—	0.68
14	Tetradecane	7.94	1.24	0.77	0.89
15	DMI(1,3-Dimethyl-2-imidazolidinone)	8.05	3.06	1.35	3.23
16	4H-1,3-Benzodioxin	8.22	0.95	—	0.79

续表1

编号 No	化合物 Compound	保留时间/min Retention time	质量分数/% Relative content		
			BT	RT	YT
17	N-Formylmorpholine	8.32	3.18	2.09	1.89
18	Methyl 2-pyridyldithiocarbamate	8.40	—	—	0.67
19	2-(4-Morpholinyl)-1-phenylethanone	8.61	1.05	—	1.05
20	Heptacosane	8.69	2.15	1.25	0.85
21	2-Methoxy-4-vinylphenol	9.12	1.19	1.20	0.76
22	DMPU(N,N'-Dimethylpropyleneurea)	9.21	5.42	1.98	5.42
23	Resorcinol	9.28	—	1.57	—
24	3,4-Dihydropyridin-2-one-5-carboxylic acid	9.58	0.87	0.70	0.70
25	2,6-Dimethoxyphenol	9.67	3.29	0.69	1.35
26	Butylated Hydroxytoluene	9.79	1.42	0.80	1.07
27	2,6-bis(1,1-dimethylethyl)phenol	9.85	0.73	—	—
28	Isononacosane	9.90	0.82	—	—
29	1,4-Cyclohexadiene-1,2-dicarboxylic anhydride	10.02	1.04	—	—
30	Vanillin	10.19	1.88	1.35	1.08
31	Octadecane	10.38	1.39	0.82	0.79
32	Isoniazid	10.51	0.64	—	0.63
33	17-Pentatriacontene	11.10	1.33	1.07	0.61
34	Heneicosane	11.72	1.16	0.67	0.58
35	3,4,5-Trimethoxyphenol	11.78	1.84	1.86	1.24
36	Hexadecanoic acid, ethyl ester	12.57	1.05	—	0.87
37	n-Hexadecanoic acid	12.63	0.84	1.06	—
38	Bicyclo[4.2.0]octa-2,4-diene-7-carbonitrile	12.71	0.70	—	—
39	Benzeneethanamine, 4-methoxy-	13.22	1.52	—	—
40	3-Methyl-4-nitrophenol	13.22	—	1.14	—
41	2-methyltetracosane	13.53	—	2.95	—
42	Propyl 4,4-dimethyl-3-oxopentanoate	13.66	—	1.10	—
43	Methyl acid,3-(4-hydroxy-3-methoxyphenyl) acrylate	14.05	—	1.57	—
44	3-Ethyl-3-octanol	14.25	—	0.67	—
45	Tricyclo[6.4.0.0(3,7)]dodeca-1,9,11-triene	14.43	—	0.70	—
46	1,2-Benzenedicarboxylic acid, butyl 2-methylpropyl ester	14.54	1.39	2.05	1.35
47	2-(2-(2-Butoxyethoxy)ethoxy)ethyl 2-methylbutanoate	14.62	2.20	0.84	0.78
48	tt	14.84	0.99	1.44	—
49	Furfuryl butyrate	14.94	0.74	0.85	—
50	3-Heptyne	15.07	0.64	1.25	—
51	Hexanedioic acid, bis(2-ethylhexyl) este	18.04	1.09	1.12	1.83
52	4H-1-Benzopyran-4-one, 5-hydroxy-7-methoxy-2-(4-methoxyphenyl)-	18.87	0.91	2.25	—
53	12-hydroxyoctadec-9-enamide	19.45	0.65	—	—
54	2,2'-Methylenebis(6-tert-butyl-4-methylphenol)	21.27	0.68	1.67	0.68
55	Bis(2-ethylhexyl) phthalate	21.52	—	1.17	—
56	cis-13-Docosenoamide	25.11	2.61	2.14	1.34
57	6H-Benzofuro[3,2-c][1]benzopyran, 6a, 11a-dihydro-3,9-dimethoxy-, (6aR-cis)-	25.75	—	1.05	—
58	4H-1-Benzopyran-4-one, 2,3-dihydro-5,7-dihydroxy-3-(4-hydroxy-2-methoxyphenyl)-3-methoxy-	32.60	—	2.27	—
59	Isomucronulatol	32.81	—	1.99	—

注：“—”未检出

Note: “—” Not detected

木材抽提物中含有大量的发色基团和助色基团,其中羰基、乙烯基、苯环和羟基占比较高<sup>[12-13]</sup>,表 2 总结了二翅豆抽提物中对颜色影响较大的化合物质量分数,并分析这些化合物显色机制。抽提物中的不饱和键和共轭结构在木材颜色形成中发挥着重要作用,结合 FTIR 结果分析,推断二翅豆木材颜色主要受酚类、黄酮类及类似物、杂环化合物及萜类/树脂酸类质量分数影响,如图 3 所示。RT 抽提物中主要显色化合物的质量分数最高为 20%;BT 的质量分数为 14.22%,YT

的主要显色化合物质量分数最低,仅为 10.8%。这一结果与色度指标中  $a^*$  分布(图 1(d))以及抽提物总质量分数(图 2)的结果一致。因此推断,随着二翅豆抽提物整体质量分数及其中显色物质质量分数的增多,木材颜色会趋于红色( $a^*$ 将不断上升),通过改性降低木材抽提物质量分数的方式可有效降低木材  $a^*$ 。相关研究表明,抽提物(尤其是黄酮类、酚类和醌类化合物)质量分数越低,木材  $L^*$ 和  $b^*$ 越高<sup>[14]</sup>,这与图 1(c)和图 1(e)结果相符。

表 2 主要显色化合物

Tab. 2 Main chromogenic compound

类别 Type	化合物 Compound	质量分数/% Relative content			显色机制 Coloration mechanism
		BT	RT	YT	
酚类化合物 Phenolic compounds	间二苯酚 Resorcinol	—	1.57	—	羟基通过共轭增强苯环吸收
	对甲氧基苯酚 Mequinol	—	0.82	2.24	甲氧基与羟基通过共轭增强苯环吸收
	2,6-二甲氧基苯酚 2,6-Dimethoxyphenol	3.29	0.69	1.35	甲氧基与羟基增强苯环电子跃迁
	3,4,5-三甲氧基苯酚 3,4,5-Trimethoxyphenol	1.84	1.86	1.24	多个甲氧基增强电子效应,加深颜色
	香兰素 Vanillin	1.88	1.35	1.08	典型芳香醛结构,共轭体系与助色基团协同显色
	3-甲基-4-硝基苯酚 3-Methyl-4-nitrophenol	—	1.14	—	硝基强吸电子效应与羟基协同显色
	2,2'-亚甲基双(6-叔丁基-4-甲基苯酚) 2,2'-Methylenebis(6-tert-butyl-4-methylphenol)	0.68	1.67	0.68	羟基增强苯环电子跃迁
	4-乙烯基-2-甲氧基苯酚 2-Methoxy-4-vinylphenol	1.19	1.20	0.76	共轭体系与助色基团协同作用
	7-甲氧基-5-羟基-4'-甲氧基黄酮 4H-1-Benzopyran-4-one, 5-hydroxy-7-methoxy-2-(4-methoxyphenyl)-	0.91	2.25	—	黄酮类结构因高度共轭和助色基团显色
	6a, 11a-二氢-3,9-二甲氧基-6H-苯并呋喃[3,2-c][1]benzopyran, 6a, 11a-dihydro-3,9-dimethoxy-,(6aR-cis)-	—	1.05	—	复杂共轭结构主导发色,甲氧基助色
黄酮类及类似物 Flavonoid compounds and their analogues	2,3-二氢-5,7-二羟基-3-(4-羟基-2-甲氧基苯基)-3-甲氧基苯并吡喃-4-酮 4H-1-Benzopyran-4-one, 2,3-dihydro-5,7-dihydroxy-3-(4-hydroxy-2-methoxyphenyl)-3-methoxy-	—	2.27	—	共轭环环与多取代基协同显色(类似黄酮结构)
	7,2'-二羟基-3',4'-二甲氧基异黄酮 Isomucronulatol	—	1.99	—	异黄酮类结构因共轭体系和助色基团显色
	2'氰基吡嗪 2-Cyanopyrazine	—	1.29	—	吡嗪环与氰基协同增强显色
杂环化合物 Heterocyclic compounds	2'吡啶二硫代氨基甲酸乙酯 Methyl 2-pyridylidithiocarbamate	—	—	0.67	吡啶环发色,硫原子助色
	异烟肼 Isoniazid	0.64	—	0.63	吡啶环主导发色,肼基提供弱助色效应
	4-氢-1,3'苯并二氧杂环 4H-1,3-Benzodioxin	0.95	—	0.79	苯并二氧杂环的共轭体系主导发色
	丁酸糠酯 Furfuryl butyrate	0.74	0.85	—	呋喃环共轭 $\pi$ 体系产生弱发色
	Barbaralone	0.70	—	0.68	共轭双键与酮基协同显色
萜类/树脂酸类 Terpenoid compounds/ Resinic acid compounds	双环[4.2.0]辛-2,4-二烯-7-甲腈 Bicyclo[4.2.0]octa-2,4-diene-7-carbonitrile	0.70	—	—	共轭双键与氰基协同显色
	三环[6.4.0.0(3,7)]十二烷-1,9,11-三烯 Tricyclo[6.4.0.0(3,7)]dodeca-1,9,11-triene	—	0.70	—	共轭双键显色

BT与RT抽提物均检测到较高质量分数的正己酸(BT:5.82%,RT:7.73%)。正己酸有提升植物抗菌性的潜力,有效抑制某些植物病原菌的生长,并增强木材的防腐能力<sup>[15]</sup>。这与二翅豆展现出的防腐、耐磨、耐真菌特性有关,表明红色和褐色二翅豆在耐腐蚀特性方面更有潜力。在这2种颜色二翅豆抽提物中还检测到了类黄酮物质(化合物52、58),有研究表明,类黄酮类化合物具有抗氧化、消炎、抑制肿瘤生长等药理作用<sup>[16-18]</sup>,这为提升二翅豆木材综合利用率提供了一个新的方向。在3种颜色二翅豆木材抽提物中还含有一些其他具有生物活性的化合物,如酰胺碱类化合物N-甲酰基吗啉,此类化合物在植物体内发挥着重要的防御功能,能够抵御病原微生物的侵袭<sup>[19]</sup>。此外,还含有一些具有抗氧化性质的酚类、醚类化合物,如3,4,5-三甲氧基苯酚、间苯二酚和丁基羟基甲苯,这些化合物对木材的耐久性有积极作用<sup>[20]</sup>。

## 2.2 抽提物对二翅豆木材材性的影响

### 2.2.1 抽提物在二翅豆木材中的分布

为充分探究抽提物在二翅豆木材微观结构中的分布特征,采用组织切片染色技术与光学显微镜观察,并结合SEM的方法进行分析,结果如图5所示。二翅豆木材中含有大量抽提物并主要富集于导管腔(图5(a))、射线薄壁细胞(图5(b))与轴向薄壁细胞(图5(c))中。导管内的填充物呈现出明显的块状结构,这种形态特征可能与抽提物的化学组成和沉积方式有关,可能由多个次生代谢产物聚集而成。SEM图像清晰地揭示抽提物与细胞壁间结合紧密,导管作为细胞内物质运输的主要通道,大量抽提物的沉积会影响木材的渗透性与耐久性。除导管外射线薄壁细胞中也存在明显的抽提物沉积,并具有一定的聚集性。相对于导管细胞与射线薄壁细胞中大量的抽提物沉积堵塞,轴向薄壁细胞中抽提物虽有沉积但未见对细胞结构造成明显堵塞的现象。

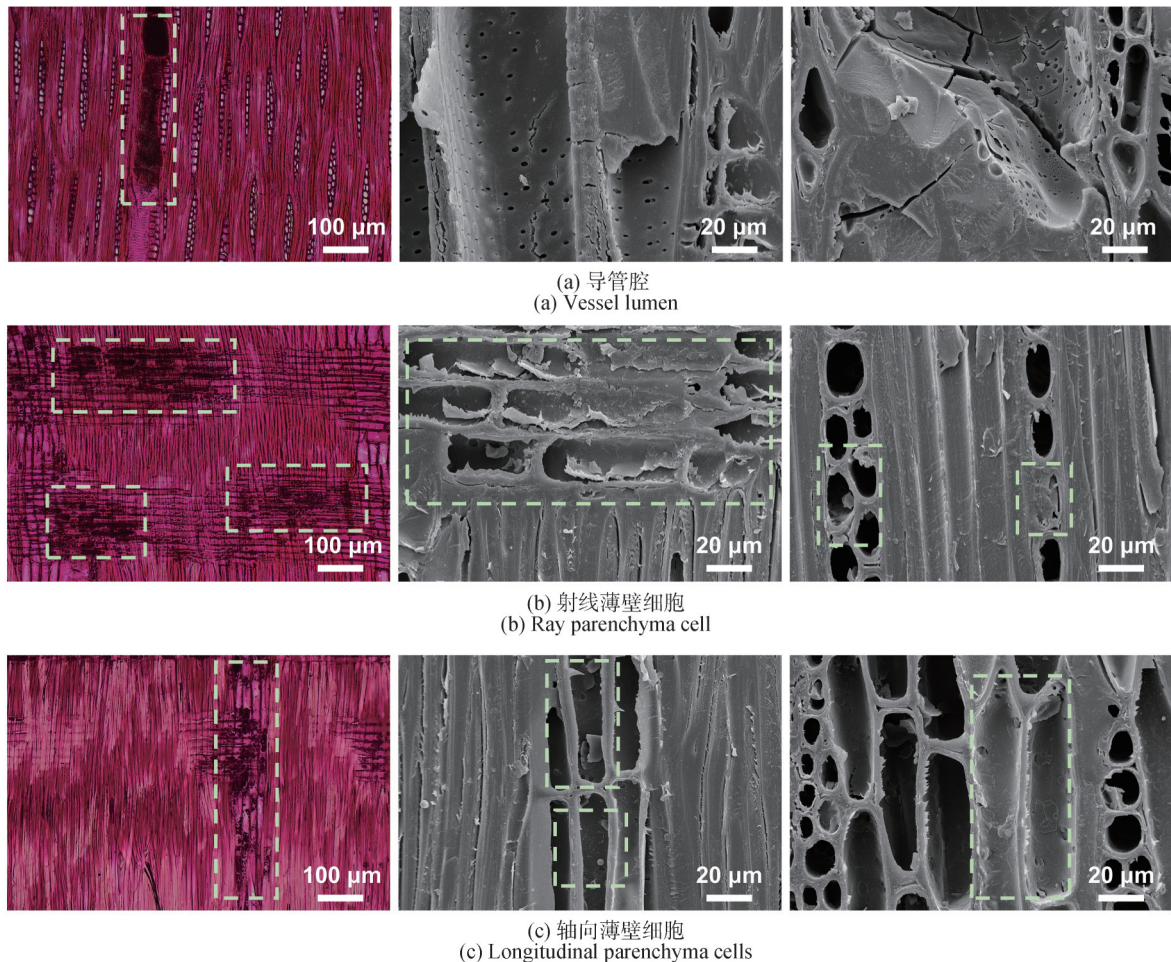


图5 二翅豆木材微观结构特征

Fig. 5 Microscopic structural characteristics of *Dipteryx odorata* wood

### 2.2.2 尺寸稳定性

木材的干缩湿胀是指木材在绝干状态至纤维水分达到饱和点的含水率范围内,木材细胞壁产生干缩或湿胀的现象<sup>[21]</sup>。二翅豆木材的湿胀率如图 6 所示。在径向上,抽提物质量分数越高,尺寸稳定性越好,具体表现为 YT 的湿胀率(8.09%±1.48%)略高于 BT(6.05%±0.23%)和 RT(5.35%±0.34%)的湿胀率。结合图 2 中 RT 有机抽提物较高,高质量分数疏水抽提物通过填充细胞腔和导管孔隙,减少水分渗透路径,降低径向湿胀率<sup>[22]</sup>。在弦向上,尺寸稳定性与抽提物质量分数并无明显关联,BT 的湿胀率为 10.07%±0.20%,高于 RT 的湿胀率 9.18%±0.25%,而 YT 的湿胀率则为 6.64%±1.25%,明显低于其他 2 种颜色的二翅豆。在不同湿度条件下,YT 展现出比其他 2 种二翅豆木材更高的含水率,如图 7 所示。这一现象可能与抽提物质量分数相关。YT 抽提物质量分数最低,因此木材中疏水性物质(芳香烃、脂类等)的质量分数较少,导致吸湿性最高。

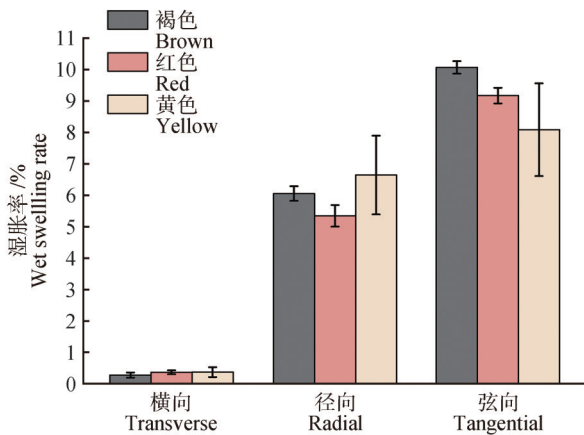


图 6 二翅豆湿胀率

Fig. 6 Wet swelling rate of *Dipterix odorata* wood

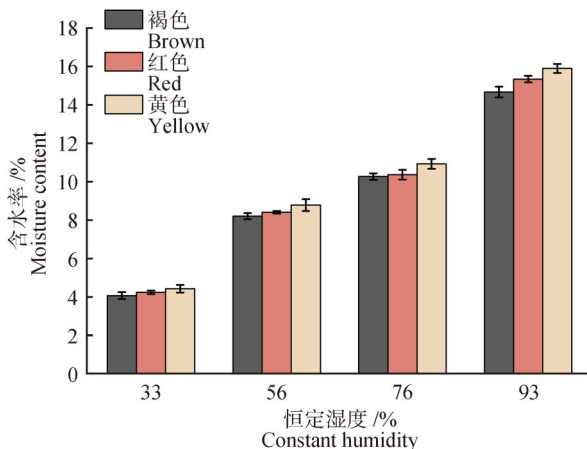


图 7 二翅豆在不同恒定湿度的含水率

Fig. 7 Moisture content of *Dipterix odorata* under different constant humidity conditions

## 3 结论

二翅豆木材的颜色差异主要源于抽提物中显色基团的种类和质量分数不同。YT 因抽提物总量较少且显色物质(如酚类、黄酮类)质量分数低,表现出更高的  $L^*$  和  $b^*$ ,符合市场对明快颜色的需求;而 RT 和 BT 样本则因富含酚类、黄酮类及杂环化合物(如香兰素、异黄酮衍生物等),导致  $a^*$  更高,颜色更深且深浅区色差较大。这些显色物质通过共轭结构和助色基团(如羟基、甲氧基)增强显色效应,是调控木材颜色的关键靶点。

抽提物的分布与二翅豆木材的物理性能密切相关。抽提物主要富集于导管腔、射线薄壁细胞与轴向薄壁细胞中,并形成疏水屏障,影响二翅豆木材的尺寸稳定性。由于抽提物对射线薄壁细胞造成明显堵塞,因此抽提物质量分数对二翅豆尺寸稳定性的影响主要表现在径向上,抽提物质量分数越高径向的湿胀率越低。横向与弦向的湿胀率并未与抽提物质量分数产生明显相关性。

## 参 考 文 献

- [1] 江泽慧,彭镇华. 世界主要树种木材科学特性[M]. 北京:科学出版社,2001.  
JIANG Z H, PENG Z H. Wood properties of the global important tree species[M]. Beijing: Science Press, 2001.
- [2] 王文彬. 103 种家具表面色彩的视觉物理量测定及色彩心理学特性的分析[D]. 哈尔滨:东北林业大学,2001.  
WANG W B. The visual physical individual measurement of 103 furniture surface color and the analysis of color psychological characteristics [D]. Harbin: Northeast Forestry University, 2001.
- [3] FENDEL D, WEGENER G. Wood: chemistry, ultrastructure, reactions[M]. Berlin: Walter de Gruyter, 1984.
- [4] 马姗姗. 巨尾桉预处理抽提物迁移及结构变化对材色的影响[D]. 北京:北京林业大学,2017.  
MA S S. The effect of extractives moving and structure change on color of *Eucalyptus grandis* × *Eucalyptus urophylla* during preheating treatment [D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2017.
- [5] 卢丹,齐锦秋,罗建勋,等. 香椿木材物理力学性质及抽提物含量研究[J]. 湖南林业科技, 2015(2): 58-60, 79.  
LU D, QI J Q, LUO J X, et al. Physical-mechanical properties and extractive contents of *Toona sinensis* wood [J]. Hunan Forestry Science and Technology, 2015 (2): 58-60, 79.
- [6] 李权,肖启航,许华寅,等. 15 种豆科树种的家居用材表面视觉特性差异[J]. 森林与环境学报, 2017, 37(3):

- 288–291.
- LI Q, XIAO Q H, XU H Y, et al. Analysis the surface visual property differences among 15 kinds of Leguminosae home wood [J]. *Journal of Forest and Environment*, 2017, 37(3):288–291.
- [7] 孙多永. 珍贵红木指纹图谱的建立及其分类与识别方法的研究[D]. 上海:同济大学, 2009.
- SUN D Y. Establishment of fingerprint spectra for precious rosewood and its classification and identification methods [D]. Shanghai: Tongji University, 2009
- [8] 李坚. 木材波谱学[M]. 北京:科学出版社, 2003.
- LI J. Wood spectroscopy[M]. Beijing: Science Press, 2003.
- [9] 高姗, 陈瑶, 高建民. 溶剂抽提物对尾巨桉热变色的影响及光谱分析[J]. *东北林业大学学报*, 2015, 43(4): 73–76.
- GAO S, CHEN Y, GAO J M. Effect of extractives on color changes of *Eucalyptus urophylla* × *Eucalyptus grandis* and its spectrum analysis [J]. *Journal of Northeast Forestry University*, 2015, 43(4): 73–76.
- [10] 苗平, 包宏, 李崇富. 泡桐木材变色的物理化学因素[J]. *林业科技开发*, 2003(4): 16–18.
- MIAO P, BAO H, LI C F. Physical and chemical factors of discoloring of *Paulownia* wood [J]. *China Forestry Science and Technology*, 2003(4): 16–18.
- [11] 周佳璐, 丛培盛, 汤桂林, 等. 利用气质联用技术对木材进行分类和鉴别[J]. *建筑材料学报*, 2006, 9(1): 36–40.
- ZHOU J L, CONG P S, TANG G L, et al. Classification and identification of wood by GC-MS [J]. *Journal of Building Materials*, 2006, 9(1): 36–40.
- [12] BI Z J, YUAN J X, MORRELL J J, et al. Effects of extracts on the colour of thermally modified *Populus tomentosa* Carr [J]. *Wood Science and Technology*, 2021, 55(4): 1075–1090.
- [13] 易飞. 金丝楸心材颜色形成的机理研究[D]. 北京: 中国林业科学研究院, 2021.
- YI F. Study on the mechanism of the color formation of the heartwood of *Catalpa bungei* [D]. Beijing: Chinese Academy of Forestry, 2021.
- [14] 陈江. 抽提物对热处理木材颜色及耐腐性的影响[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2024.
- CHEN J. The effect of extractives on the color and decay resistance of heat treated wood [D]. Yangling: Northwest Agriculture & Forestry University, 2024.
- [15] HABU N, NAGASAWA Y, SAMEJIMA M, et al. The effect of substituent distribution on the decay resistance of chemically modified wood [J]. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 2006, 57(1): 57–62.
- [16] 罗佳, 马若克, 符韵林, 等. 观光木果实黄酮类成分的初步鉴定及抗氧化活性分析[J]. *森林工程*, 2021, 37(6): 53–61.
- LUO J, MA R K, FU Y L, et al. Preliminary identification and antioxidant activity analysis of flavonoids in the fruit of *Tsoongiodendron odorum* [J]. *Forest Engineering*, 2021, 37(6): 53–61.
- [17] JANG D S, PARK E J, HAWTHORNE M E, et al. Potential cancer chemopreventive constituents of the seeds of *Dipteryx odorata* (tonka bean) [J]. *Journal of Natural Products*, 2003, 66(5): 583–587.
- [18] HAYASHI T, THOMSON R H. Isoflavones from *Dipteryx odorata* [J]. *Phytochemistry*, 1974, 13(9): 1943–1946.
- [19] VALETTE N, PERROT T, SORMANI R, et al. Antifungal activities of wood extractives [J]. *Fungal Biology Reviews*, 2017, 31(3): 113–123.
- [20] 康宁, 李德海, 王鑫, 等. 红皮云杉球果多酚类含量及抗氧化活性与海拔的相关性研究[J]. *森林工程*, 2019, 35(1): 16–21.
- KANG N, LI D H, WANG L, et al. Study on the correlation between polyphenols contents, antioxidant activity and altitude in *Picea koraiensis* Nakai cones [J]. *Forest Engineering*, 2019, 35(1): 16–21.
- [21] 刘一星, 赵广杰. 木材学[M]. 2版. 北京: 中国林业出版社, 2012.
- LIU Y X, ZHAO G J. Wood science [M]. 2nd ed. Beijing: China Forestry Publishing House, 2012.
- [22] ZHANG R H, CUI D R, ZHANG Z X, et al. Surfactant-mediated enhancement of liquid permeability in Scots pine wood [J]. *Industrial Crops and Products*, 2024, 222: 119741.