

6种阔叶树材红外光谱特征的比较

赵阅书¹, 薛晓明^{1*}, 宋小娇¹, 南程慧¹, 陈润琨², 王艺³

(1. 南京森林警察学院, 野生动植物物证技术国家林业和草原局重点实验室, 南京 210023;
2. 广西壮族自治区森林公安局, 南宁 530022; 3. 惠安县公安局, 福建 惠安 362199)

摘要: 采用红外光谱(FT-IR)法对6种阔叶树材进行研究, 通过对共有吸收峰、特征峰、相对吸收强度和二阶导数谱进行比较分析, 得出了6种阔叶树材的具体差异。试验结果表明: 6种阔叶树材的红外图谱共性特征较为明显, 1 000~4 000 cm^{-1} 范围内的14个吸收峰中有12个吸收峰为共有峰; 其中最强峰分别为1 033~1 052 cm^{-1} 范围内的C—O伸缩振动吸收峰和3 394~3 412 cm^{-1} 范围内的羟基特征峰。6种阔叶树材的FT-IR图谱、相对吸收强度和二阶导数谱均有不同程度的差异: 在1 110~1 122 cm^{-1} 范围内只有楠木出现较小吸收峰; 楠木和杜仲在1 237~1 264 cm^{-1} 范围内形成较宽吸收峰; 1 624~1 657 cm^{-1} 范围内, 杜仲、花榈木、凹叶厚朴这3种木材具有一定的差异; 而枫香和喜树在1 559~1 648 cm^{-1} 范围内明显区别于其他4个树种。相对吸收强度的比较结果为 $A_{3\,402}/A_{1\,510}$ 和 $A_{1\,661}/A_{1\,510}$ 处的2个峰位的差别较大; 在1 000~1 800 cm^{-1} 区域内, 6个树种的红外光谱的二阶导数谱在从峰形、吸收峰的位置、形状以及出峰数量上存在显著差异。通过对6种常见阔叶树材红外光谱特征的比较和分析, 可为木材的快速鉴定和分类提供理论依据。

关键词: 木材快速鉴定; 阔叶树材; 傅里叶红外光谱; 二阶导数光谱; 吸收峰

中图分类号: S781.1; S792

文献标志码: A

开放科学(资源服务)标识码(OSID):

文章编号: 2096-1359(2019)05-0040-06



Comparison and analysis of FT-IR spectra for six broad-leaved wood species

ZHAO Yueshu¹, XUE Xiaoming^{1*}, SONG Xiaojiao¹, NAN Chenghui¹, CHEN Runkun², WANG Yi³

(1. Key Laboratory of National Forestry and Grassland Administration on Wildlife Evidence Technology, Nanjing Forest Police College, Nanjing 210023, China; 2. Guangxi Zhuang Autonomous Region Forest Public Security Bureau, Nanning 530022, China; 3. Public Security Bureau of Huian County, Huian 362199, Fujian, China)

Abstract: Six broad-leaved wood species were analyzed using the Fourier transform infrared spectroscopy (FT-IR). In this research, the comparison and analysis were carried out among common absorption peaks, characteristic peaks, relative absorption intensity and second derivative spectra. All the results showed that the common features of the infrared spectrum of the six broad-leaved wood species were obvious. There were 14 absorption peaks in the range of 1 000–4 000 cm^{-1} , twelve of which served as common peaks. In addition, there were two strongest peaks, including the C—O stretching vibration absorption peak in the range of 1 033–1 052 cm^{-1} and the hydroxyl characteristic peak in the range of 3 394–3 412 cm^{-1} . Moreover, varying degrees of differences were demonstrated in the FT-IR spectra, the relative absorption intensities and the second derivative spectra of those six broad-leaved wood species. For instances, in the range of 1 110–1 122 cm^{-1} , only *Phoebe zhennan* showed a small absorption peak, *Phoebe zhennan* and *Eucommia ulmoides* would form a broad absorption peak in the range of 1 237–1 264 cm^{-1} , certain differences existed in *Eucommia ulmoides*, *Ormosia henryi* and *Magnolia officinalis* in the range of 1 624–1 657 cm^{-1} , and the *Liquidambar* and *Camptotheca* were distinct from the other 4 species in the range of 1 559–1 648 cm^{-1} . In addition, the comparison of relative absorption intensity showed a relatively large difference between the two peak positions at $A_{3\,402}/A_{1\,510}$ and $A_{1\,661}/A_{1\,510}$. Furthermore, the second-order derivative spectrum of the infrared spectrum of the six tree species in the 1 000–1 800 cm^{-1} region was significantly different from the peak shape, the position of the absorption peak, and the number of peaks. The comparison and analysis of six common broad-leaved tree species could provide theoretical basis for rapid identification and classification of wood.

Keywords: rapid identification of wood; broad-leaved wood; Fourier transform infrared spectroscopy; second

收稿日期: 2019-03-02

修回日期: 2019-04-28

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项资金项目(LGYB201716); 江苏省自然科学基金(BK20181338); 江苏省公安厅厅级科技研究计划(2016KX027)。

作者简介: 赵阅书, 女, 讲师, 研究方向为刑事技术。通信作者: 薛晓明, 女, 教授。E-mail: xuexm@nfpce.edu.cn.

derivative spectroscopy; absorption peak

我国木本植物资源丰富,其中不乏珍贵的用材树种,而在木材流通环节中如何高效地鉴别其种类是迄今亟待解决的实践性问题。木材的组成包括纤维素、半纤维素和木质素,这三大素的结构及比例决定了木材的物种特征。红外光谱(FT-IR)具有高灵敏度、高分辨率、快速扫描、结构无损等特点,能够对样品的成分与结构进行定性和定量分析^[1]。因此,近年来 FT-IR 技术已成为木材科学研究领域中的重要手段,其在木材性质、木材种属识别、木材腐朽等方面应用广泛^[2-3]。孙柏玲^[4]采用近红外和中红外光谱技术与化学计量学相结合,实现慈竹材性的快速预测;王学顺等^[5]利用木材红外光谱对木材树种进行有效识别;薛晓明等^[6-7]通过比较主要吸收峰的有无和相对吸收峰强度对解剖构造相近难以区分的近缘物种的珍贵木材进行了有效区分;赵佳等^[8]运用 FT-IR 对受蜜环菌降解不同时间的榛子木材进行了研究,根据谱峰位置和谱峰相对吸收强度的变化分析榛子木材腐蚀前后的变化情况。

在涉林司法鉴定工作中,在枝、叶、树皮等结构较全的情况下,树种较易区分,而针对已经成为木材或经加工后的木制工艺品仅通过其外观或者解剖结构难以鉴定到种属,从而发生误判^[9]。因此,探索快速、精准鉴定新技术和新方法是木材科学领域的一项重要任务,其发展趋势是多种技术手段的

综合运用,与传统的解剖学方法互为补充,从而提高木材鉴定结论的准确性。傅里叶红外光谱(FT-IR)能反映木材结构与成分的差异,是木材鉴定技术研究中的重要辅助技术手段。笔者以涉林司法鉴定工作中常见的6个树种为研究对象,以 FT-IR 作为研究手段,对6种阔叶木材进行比较分析,从而为这些木材的鉴定提供新的依据,增强鉴定意见的公信力。

1 材料与方法

1.1 主要仪器设备

Nicolet 7199 型 FT-IR 傅里叶红外光谱仪,美国 Nicolet 公司;拜杰 BJ-150 粉碎机,浙江德清拜杰电器有限公司;Retsch MM400 型冷冻研磨仪,德国 Retsch 公司。

1.2 样本制备

6个树种的木材样本均采自成年树木的主干,经枝、叶形态确认其种属,具体信息如表1所示。从样木的心材、边材部位分别取样,将木块分解成长4 cm,宽1 cm的木条,将木条放入粉碎机粗磨再放入冷冻研磨仪精磨至粉末状,过孔径0.150 mm筛(100目)提取样本备用;制备KBr片和样品片,获得红外光谱图,测试波数范围400~4 000 cm^{-1} ,仪器分辨率4 cm^{-1} ,扫描次数为32次。

表1 6个木材样本的来源及种属信息

Table 1 Sources and genus information of six wood samples

序号	中文名	学名	科	属	保护级别	采集地
1	凹叶厚朴	<i>Magnolia officinalis</i>	木兰科	木兰属	二级	南京
2	楠木	<i>Phoebe zhennan</i>	樟科	桢楠属	二级	遵义
3	喜树	<i>Camptotheca acuminata</i>	蓝果树科	喜树属	二级	南京
4	杜仲	<i>Eucommia ulmoides</i>	杜仲科	杜仲属		南京
5	枫香	<i>Liquidambar formosana</i>	金缕梅科	枫香属		南京
6	花榈木	<i>Ormosia henryi</i>	蝶形花科	红豆树属	二级	武汉

1.3 样本稳定性测试

将花榈木粉末状样本进行重复性、稳定性测试。分4次采取同一种木材不同部位的粉末样本,压片后采用红外光谱分析。

2 结果与分析

2.1 花榈木边材和心材的红外光谱比较

成年树木的木材多由死细胞组成,其主体是细胞壁,细胞壁的主要化学成分为纤维素、半纤维素和木质素,因此细胞壁的结构直接决定了木材及其

制品的性质和品质。红外光谱作为一种化学分析方法,其图谱特征直接反映了这三大组分的结构和组成。通过样本稳定性的测试,结果显示图谱的数目、位置、形状、相对吸收峰强度一致,说明样本均匀,实验结果稳定(图1)。

在所选的6种阔叶木材中,只有花榈木是心材树种,其余5种均为边材树种。心材树种与边材树种在组织构造、化学组成及含量等方面具有显著差异。王振宇等^[10]对圆柏心、边材进行研究,通过 FT-IR 技术分别得到其心、边材红外光谱谱图,发

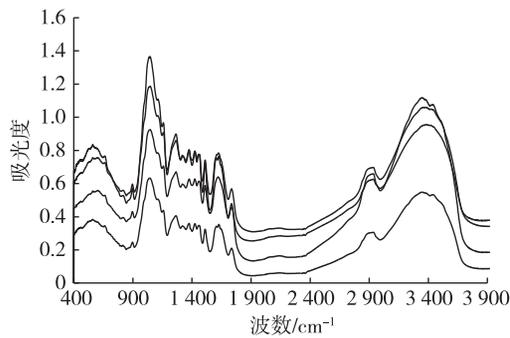


图1 样本稳定性测试的红外光谱图
Fig. 1 FT-IR of sample stability test

现两者差异明显。笔者对花榈木边材和心材进行了红外光谱分析比较,结果如图2所示。结果表明该树种的边材和心材图谱的匹配度为90%,在边材和心材中,绝大多数吸收峰的位置和强度无明显差异。如波数 $3\ 340\text{ cm}^{-1}$ 附近的吸收峰表征羟基—OH伸缩振动,波数 $2\ 920\text{ cm}^{-1}$ 附近的吸收峰表征纤维素甲基和亚甲基C—H的伸缩振动, $1\ 035\text{ cm}^{-1}$ 附近的吸收峰由C—H芳香族面内弯曲引起。在波数 $1\ 590\sim 1\ 750\text{ cm}^{-1}$ 范围内出现的吸收峰归属于木材木质素中的芳香族骨架的动态发育,吸收峰有一定的差异, $1\ 590\text{ cm}^{-1}$ 附近为木素苯环的碳骨架振动,该位置边材为单峰,而心材在此位置为明显的双峰,这说明在边材向心材转化过程中该组分逐渐发育并稳定,此结果与前人研究结果一致^[11]。因此,在开展木材的化学性质和成分比较研究中应以木材的心材为研究对象。

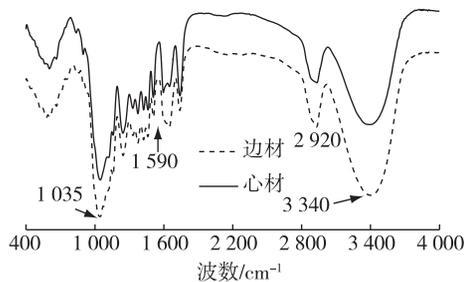


图2 花榈木的心、边材红外光谱比较
Fig. 2 Comparison of infrared spectra of heart and sapwood of *Ormosia henryi*

2.2 木质部和髓的红外光谱比较

在木材宏观观察中,髓和木质部在颜色、质地、组成细胞的种类及排列方式上均有较大的区别。笔者对凹叶厚朴进行髓和木质部的比较分析,结果表明凹叶厚朴的髓有分层现象,色白或褐色。凹叶厚朴的髓和木质部红外光谱的谱图较为接近,图谱的匹配度为98%,结果如图3所示。其主要吸收峰的出峰位置和峰形均较为一致,包括 $1\ 130$ 和 $1\ 165\text{ cm}^{-1}$ 等处有较小的吸收峰波动。但是在特征峰的

相对强度上有一定的差异,一般的吸收峰的透射率约有10%左右的差异,在 $1\ 022\text{ cm}^{-1}$ 处的一OH吸收峰的透射率差异达到20%。这说明,发育较成熟髓的主要成分和木质部是相近的,红外光谱特征较为一致。

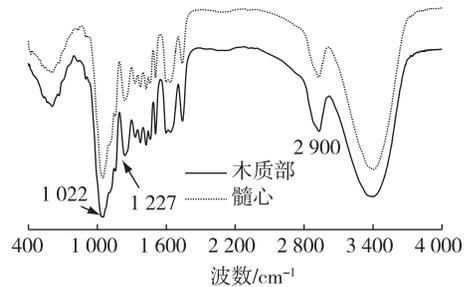
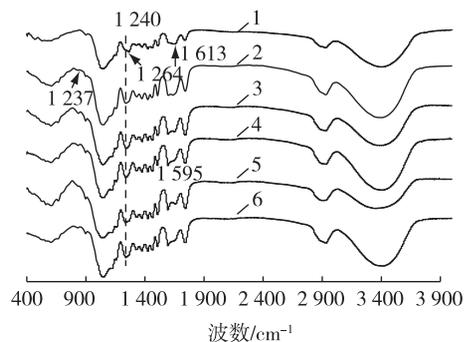


图3 凹叶厚朴的髓、木质部红外光谱比较
Fig. 3 Comparison of infrared spectra of heart and sapwood of *Magnolia officinalis*

2.3 6种木材的红外光谱比较分析

2.3.1 共有特征峰

6种阔叶树材的红外图谱共性特征比较明显,结果如图4所示, $1\ 000\sim 4\ 000\text{ cm}^{-1}$ 范围内的14个吸收峰中有12个吸收峰为共有峰,表明其木材基本组成成分的一致性。2个最强峰分别为 $1\ 033\sim 1\ 052\text{ cm}^{-1}$ 范围内的C—O伸缩振动吸收峰和 $3\ 394\sim 3\ 412\text{ cm}^{-1}$ 范围内的O—H特征峰。 $2\ 902\sim 2\ 934, 1\ 422\sim 1\ 425, 1\ 371\sim 1\ 375\text{ cm}^{-1}$ 等范围内的峰是纤维素的特征峰;半纤维素区别于其他组分的乙酰基和羧基上的C=O伸缩振动吸收峰分别出现在波数 $1\ 737\sim 1\ 740\text{ cm}^{-1}$ 范围内; $1\ 371\sim 1\ 375\text{ cm}^{-1}$ 和 $1\ 155\sim 1\ 160\text{ cm}^{-1}$ 处表征的是纤维素和半纤维素中C—H弯曲振动以及C—O—C伸缩振动吸收峰; 896 cm^{-1} 处的强烈特征吸收峰是由于半纤维素中的异头碳(C_1)的变形伸缩振动产生。



注:1~6依次为凹叶厚朴、楠木、喜树、杜仲、枫香和花榈木。

图4 6种木材的红外光谱比较
Fig. 4 Comparison of infrared spectra of six wood species

6种阔叶树材样品所表征木质素的主要特征峰的峰位较接近,分别位于 $1\ 227\sim 1\ 246, 1\ 504\sim 1\ 509, 1\ 594\sim 1\ 597\text{ cm}^{-1}$ 等处,与胡爱华等^[12]研究

的阔叶材表征木质素的吸收峰低于 $1\ 510\ \text{cm}^{-1}$ 存在差异; $1\ 260\sim 1\ 270\ \text{cm}^{-1}$ 表征针叶材中愈疮木基丙烷,所有样品在此处无明显特征峰。紫丁香丙烷是阔叶树材木质素的主要单元,其红外吸收的几个位置分别为 $1\ 330, 1\ 240, 1\ 110, 835\ \text{cm}^{-1}$ 处。6种阔叶树材在 $1\ 327\sim 1\ 330$ 和 $1\ 237\sim 1\ 245\ \text{cm}^{-1}$ 范围内均有明显吸收峰,大部分树种在 $1\ 110\sim 1\ 122$ 和 $825\sim 836\ \text{cm}^{-1}$ 范围内有吸收峰。6个样品表征木质素苯环碳骨架振动的峰位均低于 $1\ 510\ \text{cm}^{-1}$, 分别为 $1\ 504$ 和 $1\ 509\ \text{cm}^{-1}$, 该峰位可以反映阔叶树材中木质素的愈疮木基和紫丁香基的含量,随着紫丁香基含量的增加芳香环振动位置逐渐降低,说明6个阔叶树材中均为紫丁香基木质素占主导地位,这与前人的研究结论一致^[13-14]。

2.3.2 树种的识别特征峰

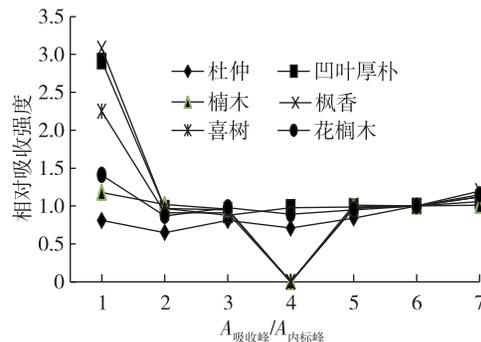
在阔叶树材紫丁香基团的4个区域内, $825\sim 836\ \text{cm}^{-1}$ 范围内6个树种未形成明显的吸收峰,这说明阔叶树材的木质素组成情况更为复杂,紫丁香基丙烷的结构、侧链构成也更多样化;在 $1\ 110\sim 1\ 122\ \text{cm}^{-1}$ 范围内只有楠木有较小吸收峰出现,其余5个树种无明显吸收峰,可作为楠木的识别特征峰。其余5个树种均在 $1\ 049\sim 1\ 056\ \text{cm}^{-1}$ 附近有表征 C—O 伸缩振动的吸收峰,只有杜仲偏移到 $1\ 033\ \text{cm}^{-1}$ 附近;楠木在 $1\ 055\ \text{cm}^{-1}$ 和 $1\ 049\ \text{cm}^{-1}$ 、杜仲在 $1\ 035\ \text{cm}^{-1}$ 和 $1\ 033\ \text{cm}^{-1}$ 处有 C—H 芳香族面内弯曲振动吸收峰,为 W 形双峰,而其他4个树种均为尖锐单峰。此外,楠木和杜仲在 $1\ 237\sim 1\ 264\ \text{cm}^{-1}$ 范围内形成较宽吸收峰,其余4种只在 $1\ 240\ \text{cm}^{-1}$ 处形成锐利单峰,该处表征木质素中紫丁香基成分,说明楠木和杜仲的木质素组成相近。

喜树、枫香、楠木在 $1\ 624\sim 1\ 657\ \text{cm}^{-1}$ 范围内有一定的吸收峰波动,但未形成吸收峰;在 $1\ 559\sim 1\ 648\ \text{cm}^{-1}$ 范围内,喜树和枫香在 $1\ 595\ \text{cm}^{-1}$ 处形成了尖锐的最强吸收峰,说明这两个树种的共轭性较低,可能含有较多的烷基;楠木在此范围内出现较宽吸收峰,这两个峰分别是 $1\ 613$ 和 $1\ 558\ \text{cm}^{-1}$, 其中 $1\ 613\ \text{cm}^{-1}$ 为最强峰,这与喜树、枫香最强吸收峰的位置差异明显;花榈木、凹叶厚朴、杜仲在 $1\ 559\sim 1\ 648\ \text{cm}^{-1}$ 范围内均出现两个单峰,且在 $1\ 644\ \text{cm}^{-1}$ 附近均有明显吸收峰,它是共轭 C=O 伸缩振动的特征吸收。此外,凹叶厚朴在 $1\ 644\ \text{cm}^{-1}$ 处的特征峰的强度和 $1\ 597\ \text{cm}^{-1}$ 处接近,这两个吸收峰的透射率强度明显低于其 $1\ 741\ \text{cm}^{-1}$ 处的非共轭 C=O 伸缩振动;而杜仲和花榈木在 $1\ 644\ \text{cm}^{-1}$ 处的吸收峰透射率强度很高,与 $1\ 595\ \text{cm}^{-1}$ 处吸收峰形成明显不对称

的2个吸收峰。由此可见,在 $1\ 597\sim 1\ 741\ \text{cm}^{-1}$ 处,杜仲、花榈木、凹叶厚朴这3种木材具有显著的差异。

2.3.3 吸收峰强度差异

6个树种的最强吸收峰均是在 $1\ 050\ \text{cm}^{-1}$ 附近形成的 C—O 伸缩振动吸收峰,楠木等5个树种的第2强峰均为 $3\ 396\sim 3\ 416\ \text{cm}^{-1}$ 附近的羟基吸收峰,只有杜仲的羟基吸收峰偏移到 $3\ 353\ \text{cm}^{-1}$ 处,峰强度较低,但是峰面积仍然较大。红外光谱吸收峰的绝对强度会受到实验条件、操作、样品量等因素的影响,通常只具有参考意义,吸收峰相对强度比值则可以更客观地反映出图谱差异性^[15]。从6种木材的红外光谱图中可以看出,在 $1\ 800\sim 1\ 000\ \text{cm}^{-1}$ 范围内各个树种间的吸收峰强度差异较大,而 $1\ 510\ \text{cm}^{-1}$ 附近的振动峰归属于苯环骨架振动,可以表达木质素结构单元特点,且受水影响小,谱带稳定^[16]。因此,以 $1\ 510\ \text{cm}^{-1}$ 处的透过率强度作为内标来比较6种木材吸收峰间的相对强度,结果如图5所示。6种木材在1和4两个峰位的相对吸收强度差异较为明显。 $3\ 402\ \text{cm}^{-1}$ 附近是 O—H 的伸缩振动, $A_{3\ 402}/A_{1\ 510}$ 的强度比值有明显区别,从大到小依次为:枫香(3.08)、凹叶厚朴(2.91)、喜树(2.25)、楠木(1.18)、花榈木(1.14)、杜仲(0.81); $1\ 661\ \text{cm}^{-1}$ 附近是共轭 C=O 伸缩振动,楠木、枫香、喜树在此处没有吸收峰;凹叶厚朴(0.98)、花榈木(0.89)、杜仲(0.71)这3个树种在 $A_{1\ 661}/A_{1\ 510}$ 的强度比值则存在一定差异。其余4个峰位的差异并不显著,如 $1\ 740\ \text{cm}^{-1}$ 是非共轭的 C=O 伸缩振动吸收峰,此处的吸收峰主要是半纤维素,是明显区别于其他组分的特征,这6个树种在 $A_{1\ 740}/A_{1\ 510}$ 的强度比值比较接近,花榈木、楠木、枫香、喜树、凹叶厚朴和杜仲分别为 0.98, 0.96, 0.95, 0.91, 0.88 和 0.81。

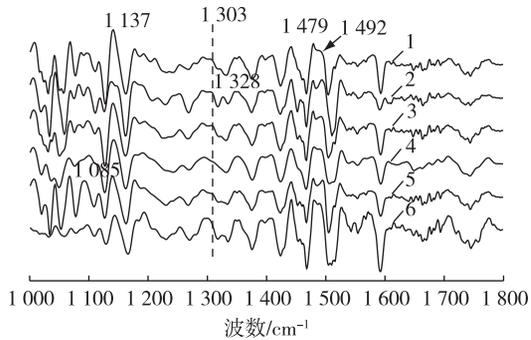


注:1~7 分别代表 $3\ 402, 2\ 932, 1\ 740, 1\ 661, 1\ 595, 1\ 507, 1\ 460\ \text{cm}^{-1}$ 。

图5 6种木材红外光谱主要吸收峰的相对吸收强度
Fig. 5 Relative absorption strength of the main absorption peaks in infrared spectra of six wood species

2.3.4 红外二阶导数光谱分析

为进一步分析6种木材的红外光谱的差异,分别对其红外光谱作二阶导数进行比较。在 $1\ 000\sim 1\ 800\text{ cm}^{-1}$ 区域的红外光谱反映的木材组分信息较为丰富,差异明显,因此作为二阶导数分析的主要区域,结果如图6所示。



1. 枫香; 2. 楠木; 3. 喜树; 4. 花榈木; 5. 凹叶厚朴; 6. 杜仲

图6 6种木材二阶导数光谱图比较

Fig. 6 Comparison of second derivative spectrograms of six wood species

在二阶导数图谱中,波数 $1\ 000\sim 1\ 033\text{ cm}^{-1}$ 附近表征的是木质素芳香族C—H平面变形面内弯曲振动,除杜仲外其他5个树种在此范围内都形成了明显的特征峰;波数 $1\ 328\text{ cm}^{-1}$ 附近出现的吸收峰由紫丁香基和愈创木基引起,楠木在 $1\ 328\text{ cm}^{-1}$ 处出现了较为强烈的单峰,明显区别于其他5个树种,说明楠木紫丁香基和愈创木基含量与其他5个树种存在明显差异;楠木在 $1\ 137\sim 1\ 149\text{ cm}^{-1}$ 范围内出现两个单峰,而其他5个树种仅出现1个单峰, $1\ 137\text{ cm}^{-1}$ 附近是纤维素的结构表征区,由芳香核骨架振动引起,可作为楠木的识别特征,说明楠木的纤维素结构与其他5个树种存在一定差异;花榈木在 $1\ 303\text{ cm}^{-1}$ 处没有吸收峰,异于其他5个树种;波数 $1\ 349\text{ cm}^{-1}$ 附近是纤维素、木质素的甲基和亚甲基对称弯曲振动及 CH_3 剪式振动,花榈木在 $1\ 349\text{ cm}^{-1}$ 处为单峰,而其他5个树种在此处裂解为双峰,以此可以区分花榈木;枫香在 $1\ 075\sim 1\ 090\text{ cm}^{-1}$ 范围内裂解成双峰,其他5个树种在此范围内均为单峰; $1\ 479\sim 1\ 492\text{ cm}^{-1}$ 是半纤维素的结构表征区,枫香在该区域内的吸收峰形状明显异于其他5个树种,由此说明枫香的半纤维素结构与其他5个树种存在一定差异;在波数 $1\ 031\sim 1\ 039\text{ cm}^{-1}$ 范围内, $1\ 031\text{ cm}^{-1}$ 附近为碳水化合物C—O和C—C伸缩振动, $1\ 039\text{ cm}^{-1}$ 附近是糖类物质醇、酯基、醚基或酚类的C—O和C—C吸收,喜树在此区域内出现两个吸收峰,而其他5个树种只有一个吸收峰,可作为喜树的识别特征; $1\ 075\sim 1\ 095\text{ cm}^{-1}$ 是

C—O和C—C伸缩振动的集中分布区域,凹叶厚朴在 $1\ 085\text{ cm}^{-1}$ 处出现了单峰,而枫香在此范围内裂解成为双峰,楠木、喜树在此范围内出现两个吸收峰,花榈木和杜仲在此处没有吸收峰出现。另, $1\ 240\text{ cm}^{-1}$ 附近的吸收峰表征木质素紫丁香基团,杜仲、楠木和凹叶厚朴在 $1\ 240\text{ cm}^{-1}$ 均出现了吸收峰,其他3个树种在此处没有吸收峰的出现,说明6种木材的紫丁香含量有所差异;枫香在 $1\ 201$ 和 $1\ 270\text{ cm}^{-1}$ 处形成明显的吸收峰,喜树在这两处均无吸收峰出现, $1\ 201\text{ cm}^{-1}$ 附近主要是多糖吸收区^[17], $1\ 270\text{ cm}^{-1}$ 吸收峰表征愈创木基木质素^[12],说明枫香木质素中的愈创木基含量远高于喜树。

此外,从出峰数量上,不同树种也存在差异,枫香和楠木在 $1\ 000\sim 1\ 800\text{ cm}^{-1}$ 区域内,枫香的主要吸收峰有23个,楠木有27个。

3 结论

1) 诸如花榈木之类的心材树种的FT-IR研究应以心材为主,图谱的匹配度为90%;心材在波数 $1\ 600\text{ cm}^{-1}$ 附近的“C=O伸缩振动和芳香族骨架振动”吸收峰为明显的双峰,有别于边材的单峰。

2) 凹叶厚朴的髓和木质部红外图谱匹配度为98%,各主要吸收峰的出现位置和峰形均一致,只在峰强度上有一定的差异;因此,对枝条或木材进行FT-IR分析,髓和木质部同样具有鉴定价值。

3) 6种阔叶树材的红外图谱共性特征比较明显, $1\ 000\sim 4\ 000\text{ cm}^{-1}$ 范围内的14个吸收峰有12个吸收峰为共有峰。反映木质素、纤维素和半纤维素的吸收峰峰位接近,木质素均为紫丁香基木质素占主导地位。6种阔叶树材的FT-IR图谱表现出一定的差异,在 $1\ 110\sim 1\ 122\text{ cm}^{-1}$ 范围内只有楠木有较小吸收峰出现,楠木和杜仲在 $1\ 237\sim 1\ 264\text{ cm}^{-1}$ 范围内形成较宽吸收峰, $1\ 624\sim 1\ 657\text{ cm}^{-1}$ 范围内杜仲、花榈木、凹叶厚朴3种木材具有一定的差异,枫香、喜树在 $1\ 559\sim 1\ 648\text{ cm}^{-1}$ 范围内明显区别于其他4个树种。使用 $1\ 510\text{ cm}^{-1}$ 作为内标峰比较6种阔叶树材的主要吸收峰的相对强度,结果表明 $A_{3\ 402}/A_{1\ 510}$ 和 $A_{1\ 661}/A_{1\ 510}$ 处的2个峰位的差别较大。对6个树种 $1\ 000\sim 1\ 800\text{ cm}^{-1}$ 区域的红外光谱的二阶导数谱进行比较,从峰形、吸收峰的位置、形状以及出峰数量上存在显著差异。

参考文献(References):

- [1] 孙海军,徐莉,蒋玲. 红外光谱技术在我国木材科学领域的应用研究进展[J]. 江苏林业科技, 2016, 43(2): 44-47.

- DOI: 10.3969/j.issn.1001-7380.2016.02.013.
- SUN H J, XU L, JIANG L. Application of infrared spectroscopy technique in wood science research: a review[J]. Journal of Jiangsu Forestry Science & Technology, 2016, 43(2): 44-47.
- [2] 朱莉, 石江涛. 红松应力木木材形成组织的化学组成特征分析[J]. 植物研究, 2012, 32(2): 232-236. DOI: 10.1007/As11783-011-0280-z.
- ZHU L, SHI J T. Chemical compound characteristic analysis of wood forming tissue from reaction wood of *Pinus koraiensis*[J]. Plant Research, 2012, 32(2): 232-236.
- [3] 杨忠, 江泽慧, 费本华, 等. 近红外光谱技术及其在木材科学中的应用[J]. 林业科学, 2005, 41(4): 177-183. DOI: 10.11707/J.1001-7488.20050430.
- YANG Z, JIANG Z H, FEI B H, et al. Application of near infrared(NIR) spectroscopy to wood science[J]. Forestry Science, 2005, 41(4): 177-183.
- [4] 孙柏玲. 基于红外光谱的慈竹材性预测及竹原纤维识别研究[D]. 北京: 中国林业科学研究院, 2012.
- SUN B L. Application of near and mid-infrared spectroscopy to predict bamboo properties and identify natural bamboo fiber for *Neosinocalamus affinis* Keng[D]. Beijing: Chinese Academy of Forestry Sciences, 2012.
- [5] 王学顺, 孙一丹, 黄安民. 木材红外光谱的树种识别研究[J]. 森林工程, 2015, 31(6): 65-70. DOI: 10.3969/j.issn.1001-005X.2015.06.014.
- WANG X S, SUN Y D, HUANG A M. Research on infrared spectrum for timber species identification [J]. Forest Engineering, 2015, 31(6): 65-70.
- [6] 薛晓明, 谢春平, 孙小苗, 等. 樟和楠木的木材解剖结构特征和红外光谱比较研究[J]. 四川农业大学学报, 2016, 34(2): 178-184. DOI: 10.16036/j.issn.1000-2650.2016.02.009.
- XUE X M, XIE C P, SUN X M, et al. Comparison on anatomical structure and FTIR spectra between *Cinnamomum camphora* and *Phoebe zhennan* woods[J]. Journal of Sichuan Agricultural University, 2016, 34(2): 178-184.
- [7] 薛晓明, 赵阅书. 基于红外光谱的2种黄檀属木材识别探讨[J]. 浙江林业科技, 2017, 37(6): 63-68. DOI: 10.3969/j.issn.1001-3776.2017.06.011.
- XUE X M, ZHAO Y S. Identification of two species of *Dalbergiaby* fourier transform infrared spectroscopy[J]. Forestry Science and Technology in Zhejiang, 2017, 37(6): 63-68.
- [8] 赵佳, 刘雪峰, 林海波, 等. FTIR法研究蜜环菌降解前后榛子木材木质纤维素结构及成分的变化[J]. 西部林业科学, 2018, 2(1): 97-103. DOI: 10.16473/j.cnki.xblykx1972.2018.01.017.
- ZHAO J, LIU X F, LIN H B, et al. FTIR analysis on the structure and compositions changes of lignocellulose of *Corylus heterophylla* segregated by *Armillaria mellea* [J]. Forestry Science in Western China, 2018, 2(1): 97-103.
- [9] 姜笑梅, 殷亚方, 刘波. 木材树种识别技术现状、发展与展望[J]. 木材工业, 2010, 24(4): 36-39. DOI: 10.3969/j.issn.1001-8654.2010.04.011.
- JIANG X M, YIN Y F, LIU B. Current status, development and prospect of wood identification technology[J]. China Wood Industry, 2010, 24(4): 36-39.
- [10] 王振宇, 邱墅, 何正斌, 等. 基于TG-FTIR技术的圆柏心、边材热解研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2017, 37(4): 1090-1094. DOI: 10.3964/j.issn.1000-0593(2017)04-1090-05.
- WANG Z Y, QIU S, HE Z B, et al. Study of *Sabina chinensis* heartwood and sapwood pyrolysis with TG-FTIR analysis[J]. Pectroscopy and Spectral Analysis, 2017, 37(4): 1090-1094.
- [11] 薛晓明, 南程慧. 7种针叶树材红外光谱(FT-IR)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.
- [12] 胡爱华, 邢世岩, 巩其亮. 基于FT-IR的针阔叶材木质素和纤维素特性[J]. 东北林业大学学报, 2009, 37(9): 79-82. DOI: 10.3969/j.issn.1000-5382.2009.09.028.
- HU A H, XING S Y, GONG Q L. Lignin and cellulose characteristics of different woods based on FTIR[J]. Journal of Northeast Forestry University, 2009, 37(9): 79-82.
- [13] PANDEY K K. A study of chemical structure of soft and hardwood and wood polymers by FTIR spectroscopy[J]. Applied Polymer Science, 1999, 71: 1969-1975. DOI: 10.1002/(SICI)1097-4628(19990321)71:12<1969::AID-APP6>3.0.CO;2-D.
- [14] COLOM X, CARRILLO F. Comparative study of wood samples of the northern area of Catalonia by FTIR [J]. Journal of Wood Chemistry and Technology, 2005, 25(1/2): 1-11. DOI: 10.1081/WCT-200058231.
- [15] 石江涛, 王丰, 骆嘉言. 杂交鹅掌楸应力木解剖特征及光谱分析[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2015, 39(3): 125-129. DOI: 10.3969/j.issn.1000-2006.2015.03.023.
- SHI J T, WANG F, LUO J Y. Anatomical feature and spectroscopy of reaction wood in *Liriodendron chinense* × *L. tulipifera* [J]. Journal of Nanjing Forestry University (Natural Sciences Edition), 2015, 39(3): 125-129.
- [16] 庄琳, 黄群, 徐燕红. 楠属和润楠属4种木材的红外光谱鉴别[J]. 福建林业科技, 2014, 41(4): 21-25. DOI: 10.13428/j.cnki.fjlk.2014.04.005.
- ZHUANG L, HUANG Q, XU Y H. Four kinds of *Phoebe* and *Machilus* wood infrared absorption spectrum identification [J]. Journal of Fujian Forestry Science and Technology, 2014, 41(4): 21-25.
- [17] 李伦, 刘刚, 张川云, 等. FTIR结合统计分析对竹类植物的鉴别分类研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2013, 33(12): 3221-3224. DOI: 10.3964/j.issn.1000-0593(2013)12-3221-05.
- LI L, LIU G, ZHANG C Y, et al. Discrimination of bamboo using FTIR spectroscopy and statistical analysis[J]. Pectroscopy and Spectral Analysis, 2013, 33(12): 3221-3224.

(责任编辑 李琦)