

文章编号: 1672-8785(2020)07-0030-08

## 基于FTIR-ATR法的户县公输堂小木作木材 化学组成和结构变化研究

董少华 王 翀 相建凯 张 刚

(陕西省文物保护研究院, 陕西 西安 710075)

**摘 要:** 以陕西户县祁村明代公输堂的小木作“天官楼阁”斗拱为研究对象, 利用傅里叶变换红外光谱衰减全反射(Fourier Transform Infrared Attenuated Total Reflection, FTIR-ATR)法研究了小木作木材的化学组成和结构变化。根据朗伯-比尔定律, 计算了木材中半纤维素、纤维素和木质素的留存率, 并研究了木构件的腐朽程度。结果表明, 利用 FTIR-ATR 法来定量分析木材中的各主要成分时具有检测准确、快速、无损以及数据重现性好等特点。由于长期暴露在空气中, 木构件受到环境中的湿度变化、微生物、紫外线等因素的影响, 导致木材中起填充和粘结作用的半纤维素已基本完全降解, 木构件的强度、韧性和承载力都有所降低, 因此需要对木构件进行必要的加固处理。本研究成果可以为后期的文物保护及修复工作提供可靠的数据支撑。

**关键词:** 公输堂; 小木作; 傅里叶变换红外光谱; 化学结构

**中图分类号:** K876.41 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1672-8785.2020.07.006

## Research on Changes of Chemical Composition and Structure of the Minor Carpentry Work in Gongshu Hall of Hu County Based on FTIR-ATR

DONG Shao-hua, WANG Chong, XIANG Jian-kai, ZHANG Gang

(Shaanxi Institute for the Preservation of Cultural Heritage, Xi'an 710075, China)

**Abstract:** The Dougong of "Tiangong Pavilion" in Gongshu Hall, Qi Village, Hu County, Shaanxi Province is studied, which was made in the Ming Dynasty. Fourier transform infrared attenuated total reflection (FTIR-ATR) is used to study the changes of chemical composition and structure of the minor carpentry work. The retention rates of hemicellulose, cellulose and lignin in the minor carpentry work are calculated according to Lambert-Beer Law, and the decay degree of wood components is studied. The results show that FTIR-ATR method is accurate, rapid, nondestructive and reproducible in the quantitative analysis of the main components in wood. Due to long-term exposure to air, the wood components are affected by humidity changes, microorganisms, ultraviolet rays and other factors in the environment. The hemicellulose which is filled and bonded in the wood has been basically completely degraded. The strength, toughness and bearing capacity of wood components are reduced, so it is necessary to strengthen the wood components. The results can provide robust da-

**收稿日期:** 2020-06-03

**基金项目:** 中法合作“公输堂彩绘木作保护研究”项目

**作者简介:** 董少华(1987-), 女, 陕西西安人, 硕士, 主要研究方向为文物分析与检测。

E-mail: shdong2010@126.com

ta support for future protection and restoration of cultural relics.

**Key words:** Gongshu Hall; minor carpentry work; FTIR; chemical structure

## 0 引言

公输堂原名源远堂, 又名万佛堂<sup>[1]</sup>, 位于陕西省西安市户县城北 10 km 的渭丰乡祁村。相传其创建于明朝永乐年间, 历时 11 年建成, 距今已有 600 多年历史。公输堂是“白阳三会”教徒为纪念其祖师的功德而建的, 也是“白阳三会”信徒朝拜活动的场所<sup>[2]</sup>。它现为国家重点文物保护单位, 经初步研究确认, 是我国目前仅存的小木作天宫楼阁佛教古建筑<sup>[1]</sup>。虽然现存建筑规模较小, 但制作非常考究, 其造型之“绝”、结构之“巧”、雕刻和彩绘之“精”当世少有, 是我国现存古代小木作建筑艺术的瑰宝<sup>[3]</sup>。

公输堂小木作建筑采用框架结构, 并以箱体结构为搭接穿逗方式, 将雕刻的木构件组合成天宫楼阁。公输堂是国内唯一的体现宋代《营造法式》中天宫楼阁这一形式的孤品实物<sup>[4]</sup>, 填补了建筑史中天宫楼阁的空白, 具有极高的历史、艺术和文化价值, 是极为宝贵的文化遗产。公输堂小木作全部由木材制作而成, 保存了近 600 多年。虽然小木作在室内, 但由于环境温湿度、生物与微生物以及人为等各种因素的影响<sup>[5-8]</sup>, 木构件的稳定性严重降低。为了文物的长久保存, 必须对其实施预防性保护措施, 并进行科学合理的修缮。所以有必要对木构件的基本化学组成和结构变化进行分析, 以便选择适当的加固处理方法并确定各种工艺参数。

国内外对木质文物的材质变化、木材含水率、组成成分等有较多的研究。比如对木材的化学成分进行分析, 但该方法耗费样品量较多, 并且会对木材的化学结构造成损坏。利用 X 射线光电子能谱(X-ray Photoelectron Spectroscopy, XPS)分析技术可研究木材表面的化学成分分布, 但该方法仅能得知木材的元素组

成<sup>[9]</sup>。红外光谱法是研究有机高分子化合物结构和化学组成的重要手段, 常用于表征竹木质文物的化学结构变化。研究人员<sup>[10-11]</sup>常用红外光谱透射法来分析木材的化学成分。该方法要求先将样品锉成细粉末, 再将其与 KBr 粉末混合压片后进行红外光谱检测, 得到红外光谱谱图曲线。该方法制样复杂, 并且会消耗样品。FTIR-ATR 法利用样品表面的反射信号来获取样品的结构信息, 其基本原理如下: 由光源发出的红外光从光密介质(如金刚石、锗等)进入光疏介质(样品), 并穿透样品表面到一定深度。当入射角大于临界角时, 入射光线就会产生全反射<sup>[12]</sup>。在红外光的辐射过程中, 样品有选择地吸收入射光, 同时反射光强度也被削弱, 进而产生类似于透射吸收模式下的谱图, 因此可根据得到的反射光谱图来分析样品表层成分的结构信息。

木材是一种天然的有机高分子复合材料, 主要由纤维素、半纤维素、木质素和木材抽提物等组成。其中, 纤维素主要是由很多吡喃型 D-葡萄糖基在 1→4 位置上通过 β-苷键连接而成的线型高分子化合物; 半纤维素是由两种或者两种以上糖基(常含有乙酰基)组成的具有侧链或支链结构的非均一高聚糖的总称; 木质素是由苯丙烷单元脱氢聚合物通过醚键、碳-碳键连接而成, 且具有一定量甲氧基的三维立体结构的芳香族高分子化合物类物质的总称<sup>[13]</sup>。木材的每种组分都有其特征红外吸收光谱。当木材的各组分及聚集态发生变化时, 谱图中谱带的形状、数目、位置和强度也会发生变化。依据该变化的特点就可以确定各组分或官能团是否存在, 从而确定木材各组分结构及其变化规律。本文将公输堂天宫楼阁所用的木材以及在当地选取的新鲜木材作为分析样品, 探讨 FTIR-ATR 技术在测定旧木化学结构中的应用, 以便对文物实施预防性保护措施, 并为科

学合理的修缮等提供可靠数据。

## 1 实验部分

### 1.1 实验样品

旧木木材选自公输堂明间“天宫楼阁”平座层的西南角斗拱，树种为杨木<sup>[14]</sup>。新鲜杨木取自户县当地，且所有木材均为气干材。图 1 和图 2 所示分别为公输堂明间小木作“天宫楼阁”及其平座层西南角斗拱的采样位置。



图 1 小木作“天宫楼阁”

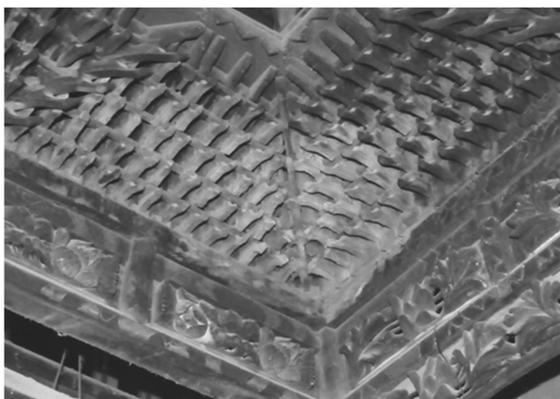


图 2 平座层西南角斗拱的采样位置

### 1.2 仪器及测试条件

测试仪器包括美国 Thermo Fisher 公司生产的 Nicolet iN10 显微红外光谱仪(含 Nicolet iZ10™ FT-IR 辅助光学台)、Smart iTR 多功能型衰减全反射(Attenuated Total Reflectance, ATR)采样附件、内反射元件(金刚石)和 MCT/A 检测器。

ATR 光谱采集参数如下：入射角为  $42^\circ$ ，扫描次数为 32，增益为 1，分辨率为  $4\text{ cm}^{-1}$ ，测试范围为  $4000\sim 650\text{ cm}^{-1}$ 。

将样品放置在 ATR 检测台上，旋紧压力

螺母并使附件压力微调的刻度保持为 100，然后扫描样品的 ATR 图谱。对每个样品均采用多点采集光谱数据的方式，并取其平均值作为该样品的图谱。

### 1.3 样品制备

由于本文所用的 ATR 附件对样品的形状和大小没有特别要求，选用块状和粉末两种形状的样品来进行检测。待测样品均放置于  $25\text{ mm}\times 25\text{ mm}$  的称量瓶中，在  $40\text{ }^\circ\text{C}$  下烘干 12 h，然后被放在干燥器中直至温度达到室温。

### 1.4 实验方法

在红外光谱数据处理方面，通过用 OMN-IC9.0 软件测量红外特征谱的峰高和峰面积来实现半定量分析。基线为峰两侧最低端的两点连线，峰高由从峰顶到基线的垂线给出；基线与峰顶之间的面积代表峰面积。

## 2 结果与分析

### 2.1 杨木木材红外光谱的主要谱带及其归属

在利用 FTIR 技术对木材进行研究时，基于木材中官能团或基团的红外特征谱图的峰位、峰数、峰形和峰强的增加、减少、消失或相对量的改变，对其化学组分的变化进行评估<sup>[15-16]</sup>。我们通过查阅文献及书籍对新鲜杨木木材的红外光谱特征吸收峰及其归属进行了总结，并给出了特征吸收峰与木材的主要组分(纤维素、木质素、半纤维素)之间的对应关系，另外还对主要吸收峰所对应的基团或者化学键给予了最大可能的解释(见表 1)。

### 2.2 用 ATR 技术测定木材的红外光谱图谱

利用红外光谱检测木材样品的方法有传统 KBr 压片法、显微红外光谱透射法以及 ATR 方法等。其中，传统 KBr 压片法是最经典的红外光谱检测方法，但是木材颗粒中的水分含量、室内湿度、样品颗粒的不均匀性、可变颗粒厚度以及木材浓度等各种因素会导致光谱重现性差<sup>[23]</sup>。显微红外光谱透射法需要的样品量极少，是定性分析的一种有力手段，但是难以把握检测点样品量的多少，也就很难实现对样品的定量分析。ATR 方法的原理是，当红

表 1 新鲜杨树木材红外光谱的特征吸收峰及其归属<sup>[17-22]</sup>

波数/cm <sup>-1</sup>	归属	木材组成
1736/1714	非共轭的酮、羰基和酯中的 C=O 伸缩振动	半纤维素(木聚糖)
1650	羰基共轭芳基酮 C=O 伸缩振动(O-H 吸收峰)	纤维素和木质素
1594	苯环的碳骨架 C=C 伸缩振动和 C=O 伸缩振动	木质素
1505	苯环碳骨架 C=C 伸缩振动	木质素
1460	甲基中的 C-H 弯曲振动和-CH <sub>2</sub> -变形振动 苯环碳骨架 C=C 伸缩振动	半纤维素和木质素 木质素
1423	苯环骨架振动和 C-H 平面弯曲振动 -CH <sub>2</sub> -弯曲振动 -CH <sub>2</sub> -剪式振动	木质素 木质素 纤维素
1372	C-H 弯曲振动	纤维素和半纤维素
1327	愈创木基和紫丁香基的缩合, 紫丁香基 C-O 伸缩振动和-CH <sub>2</sub> -弯曲振动 -CH <sub>2</sub> -弯曲振动	木质素 纤维素
1318	C-O 紫丁香基	木质素
1268	愈创木基 C-O 伸缩振动	木质素
1239	酚醚键 C-O-C 伸缩振动 酰氧基 CO-OR 伸缩振动	木质素 半纤维素
1161	C-O-C 伸缩振动	纤维素和半纤维素
1110	O-H 缔合吸收带; 紫丁香醛芳香核骨架振动	纤维素和木质素
1057	C-O 伸缩振动	纤维素和半纤维素
1033	C-O 伸缩振动和芳香族 C-H 平面弯曲振动	纤维素和木质素
898	C-H 弯曲振动	纤维素和半纤维素
851	紫丁香基 C-H 面外弯曲振动	木质素
834	紫丁香基 C-H 面外弯曲振动	木质素
668	O-H 面外弯曲振动	纤维素

外光在物质内部发生全反射衰减后,对物质的吸收情况进行测量,从而识别物质并完成相关鉴定。在相同的测试条件下,用某种 ATR 附件检测同一类样品时的测试深度和入射角度等都是相同的。经国内外学者验证<sup>[24-26]</sup>,在用 ATR 法对木材进行定性和半定量分析时,数据可靠且重现性好。故选用 FTIR-ATR 法来研究户县公输堂小木作木材的化学组成和结构的变化。本次检测所用的 ATR 附件——Smart iTR 是一种多功能型采样附件。经学者验证<sup>[27]</sup>,作为一种新型红外光谱技术,该方法具有良好的重现性、稳定性和精确性,并且具有简单、高效、重复性好的特点。

用 ATR 法测得的红外谱图具有与透射谱图相同的特性和形状。但 ATR 技术的灵敏度在不同波数区间内有所区别。样品中红外光的穿透深度与波长成正比。波长越长,红外光的穿透深度越大,红外谱图上的吸收峰越强。所以 ATR 谱图的吸收峰强度与透射谱图并不完全一致,因此需要对其进行 ATR 校正<sup>[28]</sup>。本研究均采用经 ATR 校正后的红外光谱图。检测分析结果表明,粉末样品的数据重复性更好。所以本文分析所用数据为粉末样品检测所得的平均图谱。

由于 3300 cm<sup>-1</sup>附近的峰为木材的各组分和水中-OH的特征吸收峰,2900cm<sup>-1</sup>附近的峰

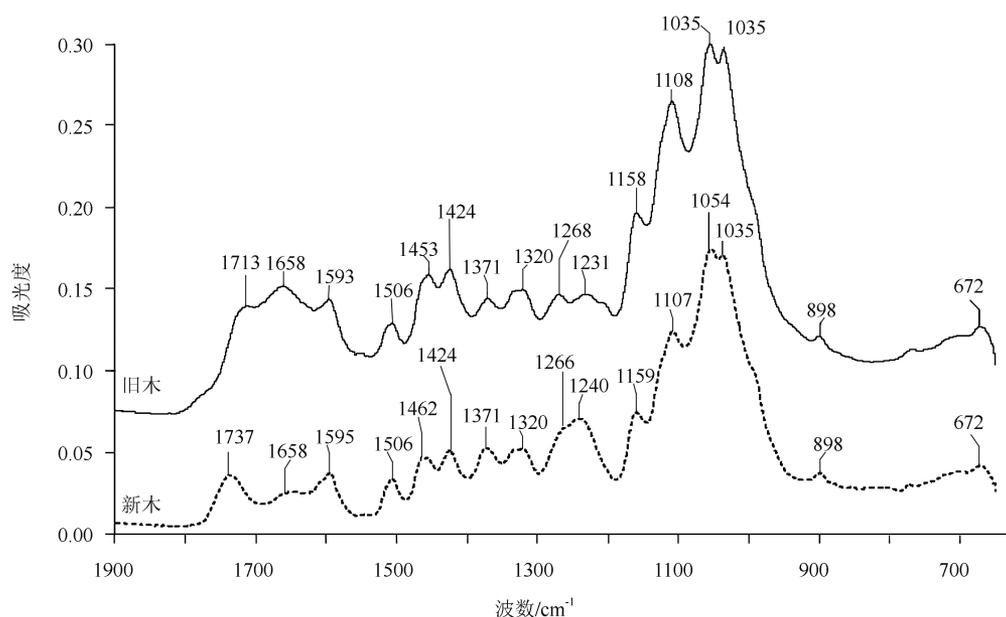


图3 新鲜杨木与公输堂旧木样品的红外光谱对比图

为C-H的特征吸收峰,纤维素、半纤维素和木质素均有贡献。因此,这部分峰位对分析木材的化学组成和结构的变化作用不大。木材的主要组分——纤维素、木质素和半纤维素的红外特征吸收峰在 $1900\text{ cm}^{-1}\sim 800\text{ cm}^{-1}$ 波段,所以选择该波段进行研究(见图3)。

### 2.3 新鲜杨木与公输堂旧木的化学组成和结构的变化

红外光谱定量分析的理论基础是朗伯-比尔定律。也就是说,红外光谱的峰值强度与基团的含量相关,谱带比值法可以量化基团含量的相对变化。国内外学者已经采用多种方法对腐朽木材的化学成分进行了分析研究,普遍认为木质素的苯环结构相对稳定。因此本文选用的参考基准是苯环碳骨架在 $1506\text{ cm}^{-1}$ 附近的振动吸收峰<sup>[29-30]</sup>,并对旧木进行归一化处理。表2列出了新木与旧木的红外光谱特征吸收峰峰高对比数据。

波数 $1737\text{ cm}^{-1}$ 、 $898\text{ cm}^{-1}$ 和 $1372\text{ cm}^{-1}$ 所对应的吸收强度变化的主要原因分别是半纤维素、纤维素和综纤维素的降解。可以依据这三种波数相应吸收强度的增加、减少和消失等来分析半纤维素、纤维素以及综纤维素的变化。而根据 $1594\text{ cm}^{-1}$ 、 $1506\text{ cm}^{-1}$ 和 $1263\text{ cm}^{-1}$ 这

表2 新木与旧木的红外光谱特征吸收峰峰高对比表

波数/ $\text{cm}^{-1}$	新木峰高	旧木峰高 (归一化)	吸光度 变化
1737	0.018	—	消失
1714	—	0.016	新增
1657	0.003	0.014	升高
1594	0.015	0.014	降低
<b>1506</b>	<b>0.014</b>	<b>0.014</b>	<b>归一化基准</b>
1462	0.014	0.020	升高
1453	0.011	0.018	升高
1424	0.011	0.016	升高
1372	0.010	0.008	降低
1329	0.008	0.012	升高
1320	0.009	0.014	升高
1263	0.003	0.007	升高
1240	0.028	0.012	降低
1207	—	0.008	新增
1159	0.016	0.024	升高
1105	0.016	0.038	升高
1054	0.014	0.022	升高
1036	0.008	0.016	升高
898	0.006	0.005	降低

三种波数则可分析木质素的化学成分变化。

$1737\text{ cm}^{-1}$ 附近是由半纤维素的非共轭的酮、羰基和酯中的C=O伸缩振动产生的红外

特征吸收峰。比较新木与旧木的吸收峰峰高可知, 旧木的  $1730\text{ cm}^{-1}$  吸收峰强度降低, 而且新增了  $1714\text{ cm}^{-1}$  峰。这是由半纤维素中的酯化羧基结构的减少和游离酸基团的增多造成的, 表明半纤维素已部分降解且含量很低。

$898\text{ cm}^{-1}$  附近主要表征为纤维素的 C-H 弯曲振动吸收峰。比较新木与旧木的吸收峰峰高可知, 旧木的吸收峰强度略有降低, 表明纤维素产生降解。

$1372\text{ cm}^{-1}$  附近是纤维素和半纤维素的 C-H 弯曲振动吸收峰。比较新木与旧木的吸收峰峰高可知, 旧木的吸收峰强度微弱减小, 表明棕纤维素产生降解。

而  $1320\text{ cm}^{-1}$  吸收峰的明显增强和  $1207\text{ cm}^{-1}$  吸收峰的位移被认为是由木质素凝聚态结构的形成引起的。 $1263\text{ cm}^{-1}$  吸收峰被认为是木质素愈创木基 C-O 伸缩振动产生的。旧木中  $1263\text{ cm}^{-1}$  吸收峰的增强以及  $1240\text{ cm}^{-1}$  吸收峰的减弱可能是由半纤维素中木聚糖的降解造成的。而  $1657\text{ cm}^{-1}$  吸收峰的增强则是由纤维素和木质素降解老化过程中羧基部分的增强造成的。 $1594\text{ cm}^{-1}$  峰变化不明显, 说明苯环结构相对稳定, 基本没有受到影响。

依据红外光谱定量理论的基础——朗伯-比尔法则, 并结合 Pandey K K 的定量分析方法<sup>[16]</sup>, 以  $1506\text{ cm}^{-1}$  处的吸光度作为基准, 对腐朽木材数据进行归一化处理, 再计算腐朽木材中官能团或化学成分 *i* 的吸光度相对于新鲜木材有关数值的百分比。该值用留存率 *C* 表示:

$$C = (A_{wi}/A_{w1506}) / (A_{ni}/A_{n1506}) \times 100\% \quad (1)$$

式中,  $A_{wi}$  和  $A_{w1506}$  为腐朽木材的参数,  $A_{ni}$  和  $A_{n1506}$  为新鲜木材的参数。根据式(1)可知, 半纤维素(以  $1737\text{ cm}^{-1}$  计算)的留存率为 0; 纤维素(以  $898\text{ cm}^{-1}$  计算)的留存率为 83.3%; 综纤维素(以  $1372\text{ cm}^{-1}$  计算)的留存率为 80%; 木质素(以  $1594\text{ cm}^{-1}$  计算)的留存率为 93.3%。由结果可知, 半纤维素几乎完全降解, 纤维素和木质素部分降解。

纤维素、半纤维素和木质素在细胞壁中起着不同的作用。其中, 由纤维素形成的微纤丝在细胞壁中起骨架作用; 半纤维素常结合在纤维素微纤丝的表面上, 相互交织在一起且分散分布, 一般存在于纤维素与微纤丝之间, 成为骨架间的粘结和填充材料; 木质素以固结物质的形式填充在细胞壁与微纤丝之间, 它也存在于胞间层并会将相邻的细胞粘结在一起, 从而起到加固木质化植物组织的作用。

当木构件暴露在空气中时, 受到周围环境因素(包括光照、空气、温湿度等)的影响, 木材的化学组分以及化学结构会发生改变, 自身的力学性质等也会产生不可逆的变化<sup>[29]</sup>。木材的腐朽与木材中半纤维素和纤维素的降解有关。木质素经过紫外线的辐射后容易产生光降解, 而纤维素和半纤维素的降解主要为微生物降解<sup>[13,19]</sup>。由于环境中的水分及微生物较多, 埋在地下的棺木中的半纤维素和纤维素都降解严重, 但是木质素却几乎没有降解或者仅部分降解<sup>[31-33]</sup>。本文中公输堂天宫楼阁的木构件是暴露在空气中的木材, 因此受微生物、环境温度湿度变化以及紫外线等多重因素的影响。由实验结果可知, 本文所测木材的半纤维素几乎完全降解, 纤维素和木质素则部分降解。由于公输堂建在室内, 常年受紫外线光照较少, 所以其木材的腐蚀主要是由微生物及干湿交替的环境造成的。

### 3 结论

FTIR-ATR 法用于定量分析木材中各主要组分时, 具有准确、快速、无损的优点, 而且其数据重现性好, 可得到木材各组分的相对含量。但 ATR 法有一个限制: 红外光束的穿透深度很小(仅有几微米)。因此, 通过采集不同区域的木材, 可以在一定程度上减少测试深度带来的影响。

由于长期暴露在空气中, 公输堂“天宫楼阁”斗拱使用的木材受环境中湿度变化、微生物、紫外线等因素的影响, 木材中起填充和粘结作用的半纤维素已基本完全降解。虽然木材

能保持外形基本不变,但是木构件的强度、韧性和承载力都有所降低。因此,在后期的保护及维修中,应该对公输堂小木作的木材进行必要的加固处理。利用红外光谱检测古建筑木构件中半纤维素、纤维素和木质素的相对含量,有助于研究老化古建筑木结构构件的承载力,可为后期的文物保护及修复工作提供可靠的数据支撑。

### 参考文献

- [1] 陈崇凯. 天下第一古建佛堂万佛堂 [J]. 法音, 1992, **12**(10): 28-29.
- [2] 户县文物志编撰委员会. 户县文物志 [M]. 西安: 陕西人民教育出版社, 1995.
- [3] 王大卫. 陕西户县公输堂明代小木作建筑装饰艺术初探 [J]. 美术大观, 2015, **28**(3): 60-61.
- [4] 赵生博. 漫话“公输堂”. 户县文史资料(第九辑) [M]. 西安: 陕西省户县委员会学习文史委员会, 1993.
- [5] 裴玲玲. 浅析木质文物的受损原因及保护方法 [J]. 安徽文学, 2015, **10**(4): 158-160.
- [6] 泽金. 浅析古建筑木构件与木质文物的保护方法 [J]. 中国民族博览, 2017, **33**(4): 205-206.
- [7] 陈国莹. 古建筑旧木材材质变化及影响建筑形变的研究 [J]. 古建园林技术, 2003, **21**(3): 49-52.
- [8] 汪中红, 姚杰, 钱庭柱. 浅析古建筑木构件与木质文物的保护方法 [J]. 木材加工, 2009, **25**(4): 59-61.
- [9] 何强, 吴春渝, 薛丽丹, 等. 几种木材表面化学成分分布特征的 XPS 分析 [J]. 贵州林业科技, 2011, **39**(2): 56-61.
- [10] Sudiyani Y, Imamura Y, Doi S, et al. Infrared spectroscopic investigations of weathering effects on the surface of tropical wood [J]. *Journal of Wood Science*, 2003, **49**(1): 86-92.
- [11] Vartanian E, Barres O, Roque C. FTIR spectroscopy of woods: A new approach to study the weathering of the carving face of a sculpture [J]. *Spectrochimica Acta Part A, Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, 2015, **136**: 1255-1259.
- [12] 黄红英, 尹齐和. 傅里叶变换衰减全反射红外光谱法(ATR-FTIR)的原理与应用进展 [J]. 中山大学研究生学刊(自然科学、医学版), 2011, **32**(1): 20-31.
- [13] 南京林业大学. 木材化学 [M]. 北京: 中国林业出版社, 1990.
- [14] 王翀, 杨金炜, 杨洁等. 公输堂小木作保存现状调查 [J]. 文博, 2017, **34**(1): 89-93.
- [15] 邸明伟, 高振华. 生物质材料现代分析技术 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2010.
- [16] Pandey K K. A study of chemical structure of soft and hardwood and wood polymers by FTIR Spectroscopy [J]. *Journal of Applied Polymer Science*, 1999, **71**(12): 1969-1975.
- [17] 李坚. 木材波谱学 [M]. 北京: 科学出版社, 2003.
- [18] 黄安民, 周群, 费本华, 等. 杨木和桉木的二维相关红外光谱 [J]. 光谱学与光谱分析, 2008, **28**(8): 1749-1752.
- [19] 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, **51**(2): 136-140.
- [20] 麻馨月. 红外光谱技术快速预测杨木中木质素含量的研究 [J]. 林产工业, 2015, **42**(11): 46-48.
- [21] Collier W E, Chultz T P, Kalasinsky V, et al. Infrared study of lignin: reexamination of aryl-alkyl ether C-O stretching peak assignments [J]. *Holzforchung*, 1992, **46**(6): 523-528.
- [22] Pandey K K, Pitman A J. FTIR studies of the changes in wood chemistry following decay by brown-rot and white-rot fungi [J]. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 2003, **52**(3): 151-160.
- [23] Faix O, Böttcher J H. The influence of particle size and concentration in transmission and diffuse reflectance spectroscopy of wood [J]. *Holz als Roh- und Werkstoff*, 1992, **50**(6): 221-226.
- [24] Zhou G W, Taylor G, Polle A. FTIR-ATR-based prediction and modelling of lignin and energy contents reveals independent intra-specific variation of these traits in bioenergy poplars [J]. *Plant Methods*, 2011, **7**(4): 9.

- [25] Christelle G C, Jääskeläinen A S, Froidevaux J, et al. Natural and artificial ageing of spruce wood as observed by FTIR-ATR and UVRR spectroscopy [J]. *Holzforschung*, 2012, **66**(2): 163-170.
- [26] Paul M L, Jin G W, Maree B J, et al. Using NIR and ATR-FTIR spectroscopy to rapidly detect compression wood in *Pinus radiata* [J]. *Canadian Journal of Forest Research*, 2014, **44**(7): 820-830.
- [27] 罗丽梅, 刘向萍. 紫花地丁的 SmartiTR 指纹图谱研究 [J]. *世界科学技术(中医药现代化)*, 2012, **14**(6): 2192-2195.
- [28] 杨瑶. 模式识别技术在木材 ATR 识别中的应用研究 [D]. 北京: 北京林业大学, 2011.
- [29] Winandy J E, Morrell J J. Relationship between incipient decay, strength, and chemical composition of Douglas-fir heartwood [J]. *Wood and Fiber Science*, 1993, **25**(3): 278-288.
- [30] 路鹏. 老化对古建筑木构件受力性能的影响分析 [D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2017.
- [31] 邓启平, 李大纲, 张金萍. FTIR 法研究出土木材化学结构及化学成分的变化 [J]. *西北林学院学报*, 2008, **23**(2): 149-153.
- [32] 肖麟. 成都商业街船棺葬出土棺木的红外光谱研究 [J]. *江汉考古*, 2014, **35**(S1): 128-134.
- [33] 肖麟. 成都商业街船棺葬出土棺木保存状况的初步分析 [J]. *文物保护与考古科学*, 2015, **27**(2): 27-33.

(上接第 4 页)

- [8] Shao J, Lv X, Guo S, et al. Impurity levels and Bandedge Electronic Structure in As-grown Arsenic-doped HgCdTe by Infrared Photoreflectance Spectroscopy [J]. *Physical Review B*, 2009, **80**(15): 155125.
- [9] 林达荃. 铋化钢的物理特性及其应用 [J]. *物理通报*, 1963, **13**(2): 72-81.
- [10] 陈刚, 孙维国, 吕衍秋. 高工作温度 InAlSb 红外探测器的研究进展 [J]. *红外*, 2016, **37**(2): 1-6.