

“古建筑木材科研基地”专栏 (12) DOI: 10.12326/j.2096-9694.2025134

编者按: 2023年5月, 国家文物局公布第八批重点科研基地名单, 依托中国林业科学研究院木材工业研究所的古建筑木材科学研究与保护国家文物局重点科研基地(简称古建筑木材科研基地)位列其中。古建筑木材科研基地围绕国家文物保护重大需求, 以古建筑木材保护为目标, 全力解决古建筑木材劣化病害机理等科学问题, 攻克病害诊断识别、材料服役评价、绿色多效防护等技术难题, 创制绿色防护产品, 着力构建古建筑木材病理学理论体系, 强化古建筑的系统性保护, 提高古建筑预防性保护能力。本刊于2024年系列报道古建筑木材科研基地相关研究成果, 为古建筑文物科技创新和保护提供支撑, 助力文物保护事业高质量发展。

故宫古华轩木构件材料性能劣化机制: 化学组分与微观结构的协同作用

程丽婷¹, 段鸿莺², 杨志国³, 陈媛⁴, 王雨晨⁴

(1. 故宫博物院文保标准部, 北京 100009; 2. 故宫博物院古建部, 北京 100009;

3. 昆仑数智科技有限责任公司, 北京 100007; 4. 中国林业科学研究院木材工业研究所, 北京 100091)



摘要: 古建筑木构件材料性能与其化学组分和微观结构的动态演变密切相关。为探究材料性能劣化机理, 以故宫古华轩檐檩硬木松(*Pinus* spp.)木构件为研究对象, 通过傅里叶变换红外光谱(FTIR)、X射线衍射(XRD)及扫描电镜(SEM)等多尺度表征手段, 系统分析纤维素、半纤维素及木质素的降解特征, 探究其与木构件密度、弹性模量(E_d)等宏观性能的关联性, 并揭示檐檩沿距离墙体位置梯度(近柱端、中端、近墙端)的劣化差异规律。结果表明: 该檐檩无太阳光直射且整体通风较好, 但其材性劣化仍呈现显著的位置差异, 中端(D)劣化程度高于近墙端(G)和近柱端(A), 纤维素与半纤维素在近墙端降解明显; α -纤维素对材性影响最显著(与弹性模量相关系数 $r=0.91$, $R^2=0.83$), 纤维素结晶度下降导致密度与弹性模量协同劣化; 局部微环境是驱动不同位置木构件劣化差异的核心因素。研究揭示无直射光照、良好通风环境下硬木松构件劣化过程中化学组分演化与微观结构损伤的协同作用机制, 并基于纤维素结晶度及化学组分降解特征构建可量化的古建筑木构件劣化评估框架, 为同类文物建筑的科学修复与保护提供支撑。

关键词: 古建筑保护; 故宫古华轩; 劣化机制; 弹性模量; 木材化学组分; 微观结构

中图分类号: TU366.2; S781 文献标识码: A 文章编号: 2096-9694 (2026) 02-0001-11

Degradation Mechanism of Wooden Components from Guhuaxuan in the Palace Museum: Interactive Action between Chemical Composition and Microstructure

CHENG Liting¹, DUAN Hongying², YANG Zhiguo³, CHEN Yuan⁴, WANG Yuchen⁴

(1. Department of Cultural Heritage Preservation Standards, The Palace Museum, Beijing 100009, China;

2. Department of Ancient Architecture, The Palace Museum, Beijing 100009, China; 3. KUNLUN Digital Technology Co., Ltd., Beijing 100007, China; 4. Research Institute of Wood Industry, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China)

收稿日期: 2025-12-04; 修改日期: 2026-03-17

基金项目: 古建筑木材科学研究与保护国家文物局重点科研基地2024年开放基金项目“故宫古华轩木构件的老化和微结构演变机理研究”(202403); 故宫博物院2023年度科研课题“故宫古华轩木构件的老化和微结构演变机理研究”(KT202317)。

作者简介: 程丽婷(1986—), 女, 副研究馆员。Email: chengling@126.com

通讯作者: 杨志国, 男, 高级工程师。Email: yangherozhi@126.com

Abstract: The mechanical properties of wooden components from ancient buildings are closely related to the dynamic evolution of their chemical components and microstructure. To investigate the deterioration mechanism of material properties, this study took the eave purlin of Guhuaxuan in the Palace Museum as the research object. Multi-scale characterization methods, including Fourier transform infrared spectroscopy (FTIR), X-ray diffraction (XRD), and scanning electron microscopy (SEM), were used to analyze the degradation characteristics of cellulose, hemicellulose, and lignin. The correlations between these components and mechanical properties such as density and modulus of elasticity (E_d) were explored, and the gradient deterioration patterns along the eave purlin at different positions relative to the wall (near column, mid-span, and near wall) were analyzed. The results showed that although the eave purlin was free from direct sunlight and generally well-ventilated, its mechanical deterioration still exhibited significant positional differences: the deterioration degree at the mid-span (D) was slightly higher than that at the near-wall end (G), and the near-column end (A) showed the slightest deterioration. Cellulose and hemicellulose degrade significantly at the near-wall end. α -cellulose had the most significant effect on the mechanical properties, with a correlation coefficient of $r=0.91$ ($R^2=0.83$) for E_d , and the decrease in its crystallinity directly led to the deterioration of density and E_d . The local microenvironment was found to be the core factor driving the differential deterioration of wooden components at different positions. This study revealed the interactive actions between chemical component degradation and microstructure evolution during the deterioration of wooden components under conditions free of direct sunlight and with good ventilation, providing a quantitative evaluation framework for the restoration of ancient architectural wood components based on cellulose crystallinity and chemical degradation.

Key words: ancient architecture conservation; Guhuaxuan in the Palace Museum; deterioration mechanisms; modulus of elasticity; wood chemical components; microstructure

古建筑木构件在长期环境荷载（光照、温湿度波动）及生物侵蚀（虫蛀、菌腐）作用下，其材性逐渐退化，威胁建筑结构安全。现有研究多聚焦于宏观损伤与力学性能的关联^[1]，而对于化学组分降解与微观结构演变的协同机制，尚缺乏系统性解析。木材的承载性能主要取决于细胞壁化学组分（纤维素、半纤维素、木质素）的稳定性^[2]，其中纤维素结晶度与木质素氧化程度是决定细胞壁刚度的关键因素^[3]。然而，现有针对古建筑木构件的劣化研究仍存在明显局限：一方面，化学组分动态变化与材性退化之间的定量关联尚未清晰建立；另一方面，古建筑文物的不可替代性严格限制了大规模取样与破坏性试验的开展，导致原位、非破坏性的劣化机理研究尤为薄弱。

随着古建筑保护研究的不断深入，木构件劣化评价已逐步从宏观力学性能分析向微观结构演变与化学机理层面延伸。张利朋等^[4]系统梳理木材

本构模型的发展脉络，重点围绕各向异性力学行为、非线性受力特征、弹塑性损伤耦合三大核心问题开展综述，指出现有模型亟需考虑材质劣化效应、环境时变效应、微结构不均匀性。QIN等^[1]以藏族古建筑为对象，对比藏青杨（*Populus cathayana*）350年旧材与现代新材（气干密度为0.418、0.519 g/cm³，含水率12%）的强度，发现旧材顺纹抗压强度剩余率55.65%，抗弯强度剩余率仅26.17%，并基于木材胞壁微观形貌与截面损伤特征建立强度退化模型。该研究聚焦宏观力学与结构可靠度，未揭示化学组分降解与微观结构演变的内在驱动机制。GUO等^[5]对古建筑木材老化研究表明，长期自然老化会导致半纤维素与木质素解聚、纤维素微纤丝重排，细胞壁结构改变与结晶度变化直接影响木材吸湿性与宏观力学性能。针对严重劣化的考古木材，GUO等^[6]进一步发现，深度降解会造成纤维素微晶碎片化、结晶度几乎

丧失，无定形区与结晶区同步破坏，纤维素超分子结构崩溃是材性劣化的核心微观机制。刘文斌^[7]发现故宫武英殿软木松 (*Pinus* spp.)、落叶松 (*Larix gmelinii*) 木构件的力学性能下降与纤维素降解显著相关。王传贵等^[8]以杉木 (*Cunninghamia lanceolata*) 成熟材晚材为研究对象，探究半纤维素和木质素对木材细胞壁力学性能的影响，发现木质素对细胞壁弹性模量和硬度影响显著 ($P < 0.05$)，半纤维素对细胞壁弹性模量影响极显著 ($P < 0.01$)。李雄等^[9]进一步证实故宫长春宫落叶松木构件的老化伴随结晶度降低与木质素氧化。相关研究^[10-11]表明，纤维素结晶度的提升可增强细胞壁纵向弹性模量，但长期的环境暴露会导致结晶区向无定形区转化，加剧材料性能衰退。

总体而言，现有研究已揭示纤维素、半纤维素、木质素等单一化学组分变化，以及结晶度等微观结构参数对木材力学性能的影响，但尚未系统阐明多化学组分同步降解、微观结构协同演变的耦合机制，尤其缺乏古建筑木构件不同空间位置微环境差异导致的劣化异质性规律的深入解析。本研究以故宫古华轩檐檩为对象，结合无损检测与傅里叶变换红外光谱 (Fourier transform infrared spectroscopy, FTIR)、X 射线衍射 (X-ray diffraction, XRD)、扫描电镜 (scanning electron microscopy, SEM) 等多尺度表征技术，揭示木构件化学组分降解路径及其对微观结构 (纤维素结晶度、细胞壁形貌) 的影响机制，建立材性劣化的化学组分-微观结构关联模型，旨在古建筑木构件的科学修复与保护策略提供理论支撑。

1 试验材料与方法

1.1 试验材料

古华轩始建于清乾隆三十七年 (1772 年)，作为宁寿宫花园 (乾隆花园) 第一进院落的主体建筑，为座北面南的三开间带回廊敞轩，采用卷棚歇山式顶，黄琉璃瓦绿剪边。檐檩作为屋顶结构的重要组成部分，自建成后一直承担着支撑屋面的功能，至最近一次大修前已使用约 253 年 (1772—2025 年)。古华轩为四面不设门窗的敞轩，属于半户外环境 (图 1)。檐檩整体处于廊下遮蔽空间，



图1 故宫古华轩照片

Fig.1 Guhuaxuan in the Palace Museum

无太阳光直射，且整体通风条件较好；受建筑空间布局影响，檐檩不同位置与墙体、柱子的空间关系形成局部通风湿度梯度，构成驱动材性劣化差异的三大核心微环境因素：一是通风梯度。檐檩整体通风良好，中端 (D) 处于檐下外露区域，通风最为顺畅；近柱端 (A) 受柱头节点适度遮蔽，通风条件次之；近墙端 (G) 紧邻墙体构造，空气流通速度相对平缓，局部湿度偏高且水汽不易散失。二是荷载长期作用。檐檩作为水平承重构件承受屋面均布荷载，全段荷载作用与弯矩水平无本质差异，荷载疲劳损伤对各位置劣化的影响无显著区别；仅中端 (D) 因跨中受力特征更易伴随微裂纹萌生与扩展，为水分与降解介质侵入提供通道，放大了环境劣化效应。三是温湿度波动。檐檩全段温湿度整体同步变化，但近墙端 (G) 因通风较弱，湿度滞留效应更显著，木材含水率波动幅度相对更大；中端 (D) 虽然通风强、干湿循环作用突出，但无长期高湿滞留；近柱端 (A) 温湿度最为稳定，干湿循环作用微弱。

选取古华轩修缮替换的檐檩 (直径约 30 cm，长度约 300 cm)，取自图 2a 中 D5-D6 位置处。观察样品切片，具有如下微观构造特征：横切面早材管胞为矩形、六边形或不规则多边形，径壁具缘纹孔为单列极少两列，纹孔缘为圆形或椭圆形；纺锤形木射线中部可见横向树脂道；射线管胞位于木上下边缘 1~3 列细胞处，内壁深锯齿化，具缘纹孔结构与轴向管胞纹孔特征一致。交叉场纹孔类型为窗格型，1~3 个；轴向树脂道分布于晚材带内，径向树脂道存在于纺锤形木射线内。按国

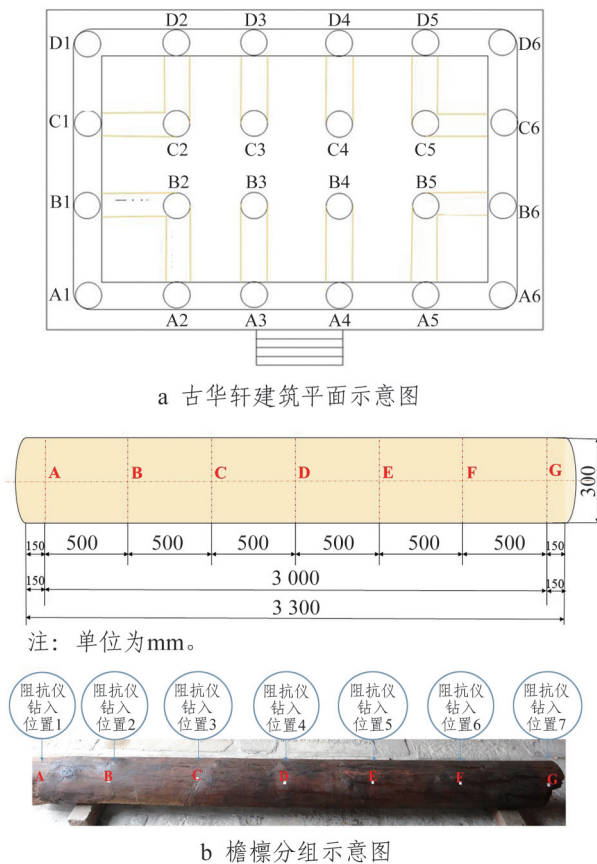


Fig.2 Sampling locations of the gable purlin collected from Guhuaxuan

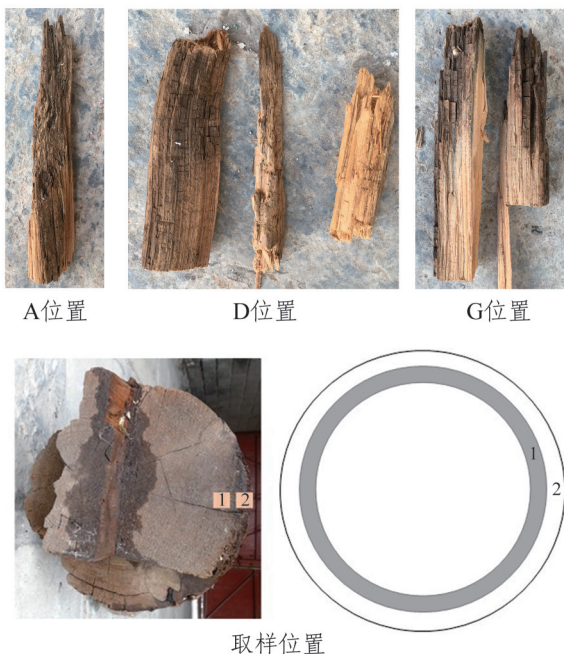


Fig.3 Schematic diagram of specimen and sampling location

家标准 GB/T 29894—2013《木材鉴别方法通则要求》进行取样鉴别^[12]，通过与《中国木材志》记载的木材特征对比，识别该木构件树种为硬木松。

为研究檐檩沿距离墙体方向的微环境异质性及劣化梯度，沿其纵向由近柱端向近墙端以每50 cm为一个区段，划分为A~G共6组（图2b），其中A为近柱端（最远离墙体）、D为纵向中端、G为近墙端（最紧邻墙体），B、C为A与D间过渡区段，E、F为D与G间过渡区段，全段均处于廊下无直射光照、通风较好的环境。

基于“近柱-中端-近墙”的梯度代表性，仅选择A（近柱端）、D（中端）、G（近墙端）三个核心位置取样，每个取样点在檐檩横切面的1、2两个位置（心材和边材的过渡区域，其中A2、D2、G2为靠近边材区，A1、D1、G1为靠近心材区，距离A2、D2、G2约5 cm）采集试样。B、C、E、F区段为纵向梯度辅助区段，仅用于验证A、D、G三点的梯度连续性，无实际检测数据，其设置意义为保障取样梯度的完整性，避免因单点取样导致的规律偏差。该取样策略聚焦于“距离墙体位置”核心变量，为分析通风湿度梯度对木材保存状态的影响提供科学实验基础。

选取树龄30年左右的健康硬木松成熟材为现代对照样（C），取样部位为边材至心材的过渡区域。该区域与古华轩檐檩的初始用材部位一致，且为硬木松材性稳定的典型区域，可有效反映健康硬木松的基础化学组分特征。

1.2 试验仪器与设备

FAKOPP两针应力波仪、傅里叶变换红外光谱仪（Alpha型）、X射线衍射仪（Bruker D8 ADVANCE）、扫描电镜等。

1.3 试验方法

1.3.1 无损检测试验 1) 采用应力波仪测定样品纵向传播速度，每个位置重复测量3次，取平均值；2) 测定样品的含水率和密度。经检测，6个样品的含水率在9%~14%之间。

按式（1）计算动态弹性模量。

$$E_d = \rho V_c^2 \quad (1)$$

式中： E_d 为木材动态弹性模量，MPa； ρ 为试件密度，g/cm³； V_c 为木材中应力波的传播速度，m/s。

1.3.2 化学组分分析 1) 取木构件A、D、G三个位置的样品，每个位置取样2个，共计6个。6个样品分别制取40~60目的木粉样品，参照国家标准GB/T 2677.8—1994《造纸原料酸不溶木素含量的测定》^[13]、GB/T 2677.10—1995《造纸原料综纤维素含量的测定》^[14]、GB/T 744—2004《纸浆 抗碱性的测定》^[15]测定木质素、综纤维素及α-纤维素含量。每个样品测定2次，取平均值。

2) 采用傅里叶变换红外光谱仪，波数范围4 000~400 cm⁻¹，分辨率为4 cm⁻¹，每个试样在3个不同位置扫描3次，利用仪器自带的Ominic7.1软件对数据进行归一化处理。

1.3.3 微观表征 1) 取样品上尺寸不超过5 mm×5 mm×3 mm的小样品，对切面进行喷金、抽真空处理后进行扫描观察，重点分析不同位置细胞壁微观结构差异。

2) 在取样点取适量木片粉碎研磨制成80目的木粉，室温下压片。使用X射线衍射仪对上述试样进行XRD图谱采集，扫描区间5°~40°，扫描速率5°/min。根据Segal^[16]经验方法计算6个样品的结晶度。

$$CrI = (I_{002} - I_{am}) / I_{002} \times 100\% \quad (2)$$

式中：CrI为相对结晶度，%； I_{002} 为（002）木材晶格衍射角的极大强度，代表结晶区和非结晶区； I_{am} 为（2θ=18°附近的最小强度）木材非晶格背景衍射的散射强度， I_{002} 与 I_{am} 单位相同。

2 试验结果与讨论

2.1 化学组分降解特征

表1为檐檩化学组分含量（以质量计）的检测结果。各组分含量以绝干木材质量为基准，未检出组分主要为木材提取物（如树脂、单宁）、低分子糖类及少量挥发性物质。这些物质在木构件长期老化过程中自然流失或分解，属于正常老化现象，因此各组分占比之和小于1，符合古建筑木构件化学组分检测的普遍规律。

不同位置试样化学组分的单因素方差分析结果列于表2。综纤维素、α-纤维素、木质素及灰分含量在各组间均存在极显著差异（ $P<0.01$ ），表明微环境差异对木材化学组分降解的影响极显著。

表1 不同位置试样的化学组分含量

Tab.1 Chemical composition content of wood specimens at different locations

编号	综纤维素	α-纤维素	木质素	灰分
C	68.37%	46.36%	27.76%	-
A1	42.06%	27.56%	21.16%	0.29%
A2	44.69%	31.62%	23.74%	0.34%
D1	25.64%	21.87%	30.29%	0.43%
D2	23.62%	19.21%	32.68%	0.77%
G1	43.49%	30.72%	21.08%	1.55%
G2	40.23%	25.83%	22.50%	1.12%

注：C为现代硬木松对照材。

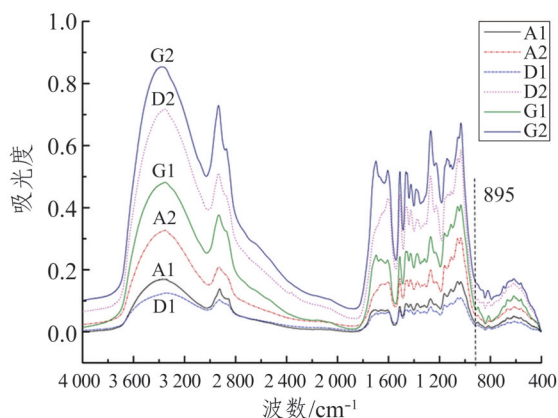
表2 木材化学组分方差分析

Tab.2 Analysis of variance of wood chemical components

指标	方差来源	平方和	自由度	均方	F值	P值	显著性
综纤维素	组间	3 215.64	6	535.94	126.38	<0.001	***
	组内	25.47	6	4.25			
	总计	3 241.11	12				
α-纤维素	组间	1 124.77	6	187.46	98.75	<0.001	***
	组内	11.39	6	1.90			
	总计	1 136.16	12				
木质素	组间	232.81	6	38.80	47.22	<0.001	***
	组内	4.93	6	0.82			
	总计	237.74	12				
灰分	组间	2.15	6	0.36	121.45	<0.001	***
	组内	0.02	6	0.00			
	总计	2.17	12				

与现代健康材相比，檐檩木构件A、D、G三个位置试样的综纤维素及α-纤维素含量较健康材大幅降低，说明纤维素组分发生了明显的降解，且劣化程度呈现一定的梯度规律：D（中端）>G（近墙端）>A（近柱端）。相比于综纤维素，木质素的降解程度较低，A和G位置木质素含量略低于健康材，D位置的木质素含量甚至高于健康材。这并非表明木质素没有发生降解，而是由于纤维素、半纤维素的降解速率远高于木质素，多糖类物质大量流失后，木质素发生了相对富集，导致其相对含量升高。D2、G2位置试样因直接暴露于热湿环境，半纤维素与纤维素降解加剧，含量略低于D1、G1位置试样，同时导致所有“2”位置试样的木质素相对含量均高于“1”位置试样。结果反映硬木松在无直射光照、良好通风条件下，“多糖优先降解，木质素相对稳定”的核心降解特征。这与考古木材、古建筑木材的普遍劣化规律

高度一致：半纤维素与纤维素作为细胞壁多糖组分，结构稳定性较弱，易在湿热循环、弱酸环境及微生物作用下发生水解与氧化降解。而木质素因具有芳香族三维交联结构，化学稳定性强、抗水解与抗氧化能力更强，因而在长期老化过程中降解缓慢，随多糖大量流失呈现相对富集现象。相关研究表明^[6, 17]，自然老化与微生物劣化均优先消耗纤维素与半纤维素，木质素仅发生轻度氧化与侧链修饰，整体骨架得以保留，形成“多糖降解-木质素支撑”的典型模式。本研究，中端（D）位置多糖降解最为剧烈、木质素相对含量最高，进一步证实无光照但干湿循环显著的微环境会加速多糖消耗，而木质素仍保持高稳定性，与重度劣化考古木材的组分演变规律相吻合。



不同位置试样灰分含量以近墙端的最高，原因是近墙端湿度偏高，同时木材内部少量金属离子随水分迁移富集，符合局部湿度偏高的微环境特征。

图4为6个样品的红外光谱图，及其在1800~800 cm⁻¹指纹区的局部放大图。6个样品在1800~800 cm⁻¹指纹区检测到1736 cm⁻¹（半纤维素C=O伸缩振动）、1510 cm⁻¹（木质素苯环碳骨架振动）及1260 cm⁻¹（木质素C—O伸缩振动）特征峰，证实半纤维素与木质素未完全降解，仍保留基本化学结构；895 cm⁻¹处纤维素C—H变形振动特征峰显著减弱，表明纤维素发生显著降解但部分结晶结构仍保留。该结果与化学组分分析及后续XRD结果高度一致，进一步验证旧木构件中综纤维素降解显著，而木质素因结构稳定得以较好保留。

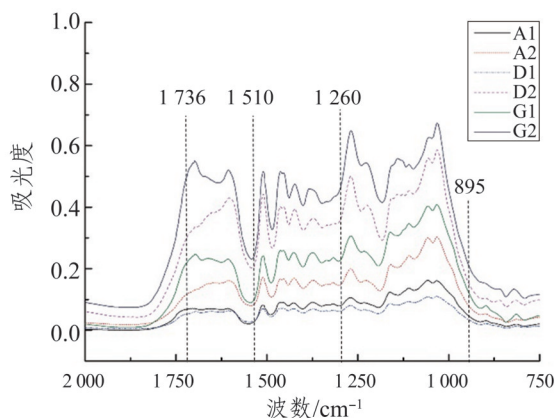


图4 不同位置试样红外光谱指纹区特征对比

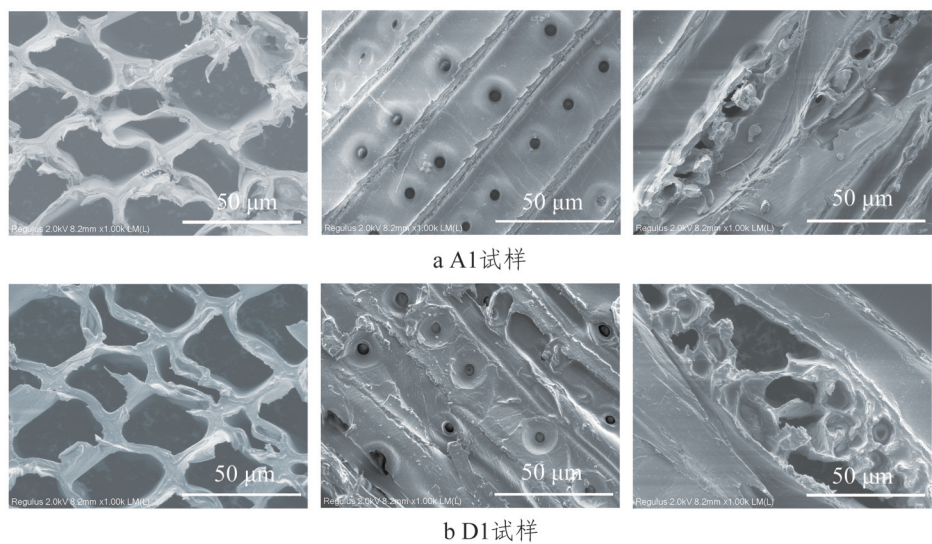
Fig.4 Comparison of infrared spectroscopy fingerprint region characteristics of specimens at different locations

D1位置的化学组分显示木质素相对含量偏高，其红外光谱图显示，与健康材或其他位置相比，其在1510 cm⁻¹处的吸收峰强度虽然存在，但峰形出现宽化或伴有向低波数方向的轻微偏移，这常被归因于木质素芳香环发生氧化或共轭体系改变^[18]。1260 cm⁻¹处的C—O峰强度与面积的相对变化，可用于半定量评估愈创木基单元的保存状况或缩合程度^[19]。这些光谱特征表明，D1位置的木质素在经历微环境的长期作用后，并非保持化学惰性，而是可能发生了氧化、侧链修饰或有限的缩合反应。这类结构变化虽然不直接导致木质素总量的快速减少，但会改变其化学性质。结合文献来看，硬木松心材部位（D1）富含高交联的木质素结构，本身降解难度大于边材^[20]；加之其内部

微环境可能抑制了需氧白腐真菌的深度侵蚀，从而导致了“多糖严重降解、木质素结构改变但大量残留”的独特降解模式^[17]。因此，D1处木质素含量偏高，是纤维素优先降解导致的相对富集与木质素自身发生结构重排而非彻底分解共同作用的结果^[21]，这区别于单纯的质量损失，反映更为复杂的生物化学劣化机制^[6]。

2.2 微观结构特征

采用扫描电子显微镜（SEM）观察A1和D1位置处试样的横切面、径切面和弦切面，如图5a、5b所示，可见部分出现S₂与S₁层分离的现象，管胞壁变形明显，且细胞壁发生收缩变形，厚度变薄，表明长期环境暴露已经导致木材细胞壁破坏。



注：从左至右分别为横切面、径切面、弦切面。

图5 A1和D1位置试样的横、径、弦切面电子扫描图像

Fig.5 SEM images of the transverse, radial, and tangential sections of specimens from position A1 and D1

XRD 分析表明，木构件样品纤维素结晶结构未发生改变，但结晶度呈现梯度差异，如图6、表3所示：近柱端A结晶度最高，近墙端G次之，中端D最低。中间位置D因长期暴露于热湿环境，纤维素结晶区部分转化为无定形态，导致大幅下降；而两端A和G因半纤维素及纤维素无定形区降解较少，纤维素结晶度较高。D2样品无定形区衍射强度最低，表明其无定形区与结晶区同步劣化。结合化学组分含量变化分析，D2位置纤维素含量显著降低，可能与半纤维素降解生成乙酸破坏纤维素结构有关。上述结果表明，环境暴露引发木材化学组分降解与微观结构演变协同作用，是木构件材性劣化的核心机制。

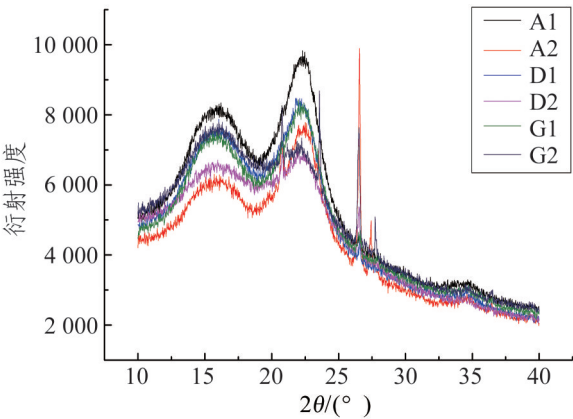


图6 不同位置试样XRD谱图
Fig.6 XRD spectra of specimens at different locations

表3 不同位置试样的纤维素结晶度

Tab.3 Cellulose crystallinity of specimens at different locations

试样编号	A1	A2	D1	D2	G1	G2
纤维素结晶度	34.23%	35.10%	28.20%	19.34%	30.57%	27.54%

2.3 化学组分-微观结构协同劣化机制

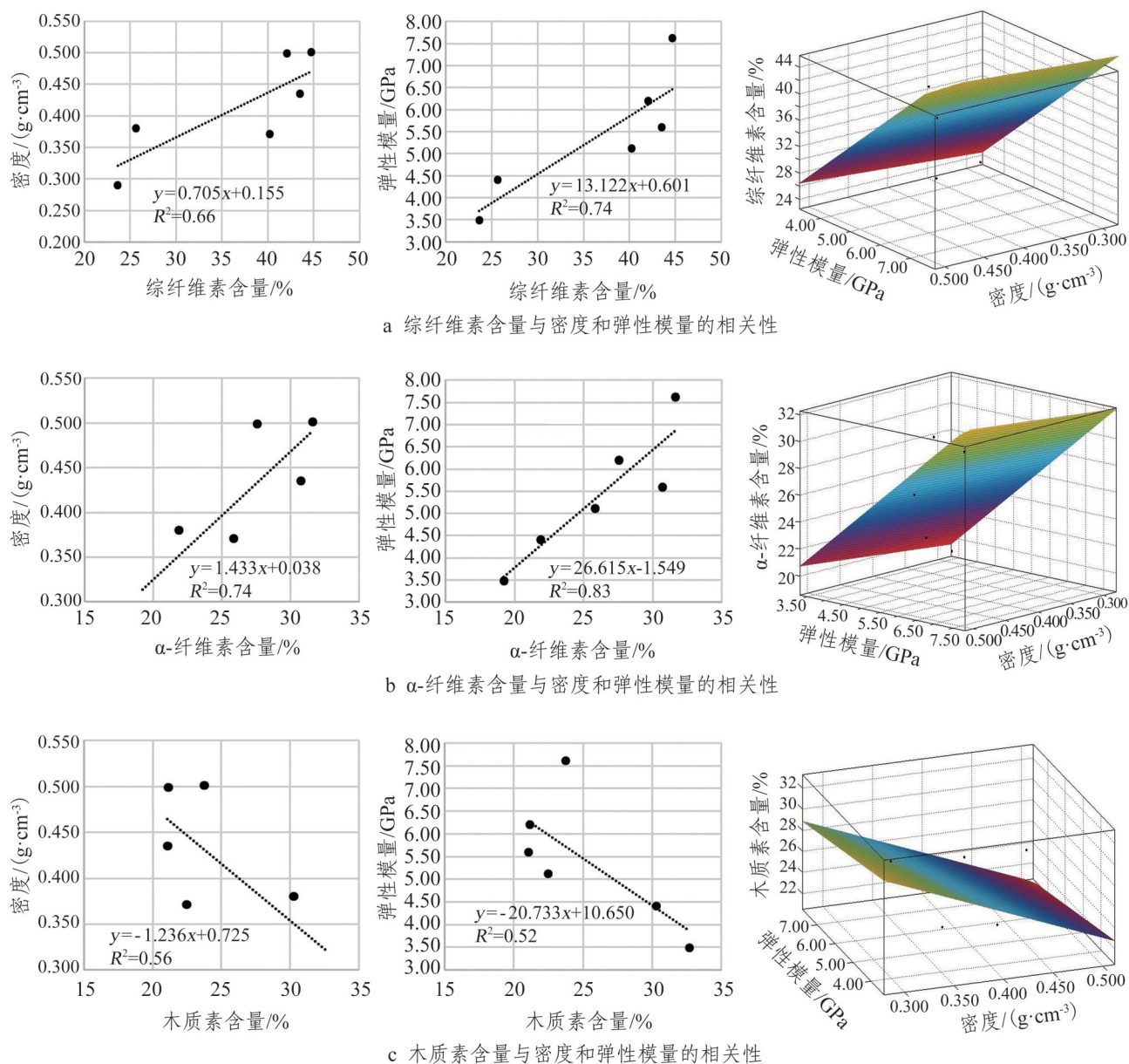
2.3.1 化学组分演变对木材劣化的影响 基于6个样本数据，化学组分含量与弹性模量的相关性（表4、图7）强弱顺序为： α -纤维素>综纤维素>木质素。其中， α -纤维素含量、综纤维素含量与密度、弹性模量呈正相关关系；木质素则不同，其含量与密度、弹性模量呈显著负相关（ $r=-0.75$ ）。

表4 木材化学组分与密度和弹性模量的关系

Tab.4 Relationship of wood chemical components between density and elastic modulus

变量	相关系数 r	决定系数 R^2	P 值	显著性
综纤维素含量与密度	0.81	0.66	0.052	
综纤维素含量与弹性模量	0.86	0.74	0.028	*
综纤维素含量与密度、弹性模量	0.86	0.74		
α -纤维素含量与密度	0.86	0.74	0.018	*
α -纤维素含量与弹性模量	0.91	0.83	0.004	**
α -纤维素含量与密度、弹性模量	0.91	0.83		
木质素含量与密度	-0.75	0.56	0.039	*
木质素含量与弹性模量	-0.72	0.52	0.057	
木质素含量与密度、弹性模量	-0.75	0.56		

注：*、**分别代表结果在0.05、0.01水平上显著。



注:图b、c中为5个样品数据点。因D1样品的 α -纤维素含量与密度的关联性为异常值,为保证相关分析的准确性,暂未纳入,该异常值源于D1心材层木质素相对富集的特殊降解模式。

图7 木材化学组分与密度、弹性模量的相关性

Fig.7 Correlation of wood chemical components between density and elastic modulus

上述关系揭示了木材化学组分降解与弹性模量之间并非孤立,而是存在一个动态的协同劣化循环机制。首先,环境因素引发半纤维素优先发生脱乙酰化与水解反应,释放乙酸等有机酸,导致细胞壁基质(无定形区)理化环境改变与结构疏松化。其次,酸性环境和基质疏松协同作用,使得纤维素结晶区的保护屏障被削弱, β -1,4糖苷键发生酸催化水解,导致结晶度下降与分子链断

裂,直接表现为 α -纤维素含量锐减与弹性模量降低。最后,结晶区破坏和基质疏松不仅削弱了细胞壁的力学骨架,更暴露出新的化学反应界面,使得环境因子更易侵入,从而引发新一轮、更剧烈的降解反应。“环境诱发→化学降解→结构疏松→新界面暴露→进一步降解”的循环,最终导致木材力学性能加速丧失。

2.3.2 微观结构损伤对木材劣化的影响 纤维素结晶度是表征宏观材性劣化程度的核心微观指标，不同位置试样纤维素结晶度与密度、动态弹性模量检测结果列于表5。从图8可知，试样纤维素结晶度与密度、动态弹性模量均呈显著正相关（ R^2 分别为0.96、0.91， P 均 <0.01 ）。结晶区分子链的致密排列是木材承载能力的核心结构基础，结晶度下降直接导致木材分子间作用力减弱，进而引发密度与弹性模量的协同劣化。

表5 试样纤维素结晶度、密度、动态弹性模量与含水率检测结果

Tab.5 Cellulose crystallinity, density, dynamic elastic modulus, and moisture content of specimens

试样编号	纤维素结晶度/ %	密度/ (g/cm ³)	动态弹性模量/ GPa	含水率/ %
A1	34.23	0.498 9	6.20	12.20
A2	35.10	0.501 1	7.62	12.26
D1	25.54	0.380 6	4.41	12.90
D2	19.34	0.290 0	3.49	12.70
G1	30.47	0.435 3	5.60	13.07
G2	28.20	0.371 2	5.12	13.06

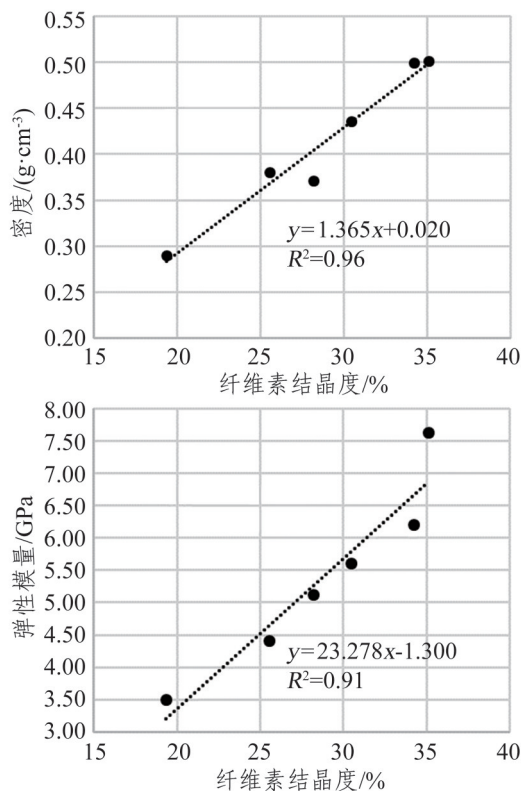


图8 木材纤维素结晶度与密度、弹性模量的相关性
Fig.8 Correlation of cellulose crystallinity between density and elastic modulus

2.3.3 综合解析 古华轩檐檩无太阳光直射、整体通风较好，光照并非劣化的驱动因素。局部通风、湿度梯度是导致A、D、G三个位置劣化差异的核心环境因素；半纤维素降解释放乙酸形成的酸性环境，是驱动纤维素微结构崩溃并最终导致木材力学性能丧失的核心化学机制；木质素相对高保留则是微环境异质性与材料固有特性协同作用的结果。三者共同构成了檐檩木构件化学组分-微观结构的协同劣化体系。

1) 空间位置差异导致通风与湿度场分布不均，是引发材料劣化异质性的关键环境因素。

受空间位置差异影响，檐檩近墙端（G）、中端（D）与近柱端（A）的通风条件、湿度场分布呈现显著梯度特征，进而驱动木材化学组分与宏观力学性能产生明显劣化异质性。檐檩整体处于无太阳光直射且通风较好的环境，其不同位置与墙体、柱子的空间关系，共同形成通风条件、湿度滞留、受力状态三项微环境差异，成为材性劣化异质性的核心驱动因素。

檐檩中端（D）劣化程度最为突出。该部位处于跨中受力最大区域，弯曲应力促使微裂纹大量萌生，为水分与介质侵入提供通道；同时受环境温度湿度波动直接影响，干湿交替频繁，加速化学组分降解与结构破坏。

近墙端（G）劣化程度次之。该部位紧邻墙体、通风较差、湿度偏高且滞留时间长，易引发真菌腐朽与纤维素水解降解，造成化学组分与力学性能衰减；但因受墙体遮蔽、微裂纹发育较弱，物理劣化与介质侵入程度弱于中端。

近柱端（A）劣化程度最轻。该部位受柱头节点构造保护，通风与湿度环境稳定，干湿循环与高湿腐朽风险均被显著抑制，同时以剪压应力为主、木材内部结构完整性好，微裂纹与生物降解不明显，纤维素、木质素保留相对完整，密度与弹性模量衰减幅度最小。

2) 木质素保留机制与微环境异质性。

研究发现檐檩D1位置样品的木质素显著高保留、相对富集，结合李雄等^[9]对故宫长春宫木构件的研究，从微环境、生物侵蚀、树种特性三方面讨论机理。

①微环境差异是木质素稳定的主控因素。D1处试样位于构件内层,无直射光照、温湿度波动小,低氧低扰动环境有效抑制木质素氧化与芳香环降解^[22]。与之对比,长春宫C2处于南侧向阳外露区,长期光氧老化导致 $1\,510\text{ cm}^{-1}$ 木质素特征峰完全消失,降解极为严重^[9]。遮蔽环境是木质素高保留的关键。

②生物侵蚀程度决定木质素损耗差异。古华轩檐檩较长春宫木构件服役时间短,虫蛀、真菌腐朽程度较轻,木质素消耗少;而长春宫木构件长期外露,环境复杂,伴随明显蛀蚀与粉末化腐朽,木质素损耗显著加剧^[7]。生物侵蚀程度决定木质素保留水平。

③树种固有特性强化抗降解能力。本研究用材为硬木松,木质素以愈创木基(G型)为主,结构致密、交联度高、化学稳定性高;长春宫为落叶松,木质素亦以G型单元为主,不含紫丁香基(S型)单元,二者木质素基本类型一致。虽然同为针叶树材,但落叶松心材木质素酚羟基含量更高、易形成醌类与发色结构,在强光、高湿耦合环境下更易发生氧化降解与结构重排^[9, 23],因此在相同恶劣环境下劣化更显著。

综上,D1位置木质素高保留是稳定微环境、轻微生物侵蚀、优良树种特性三者协同作用的结果,微环境是主导木构件劣化异质性的核心因素。结果揭示木构件劣化的空间异质性,可为分区保护提供理论依据。

3)半纤维素降解生成乙酸对纤维素结晶度的影响。

半纤维素降解尤其是乙酰基脱除反应,是古建筑木材化学劣化的起始与核心步骤^[24]。半纤维素分子链上的乙酰基($-\text{OCOCH}_3$)在高湿、弱酸或微生物作用下发生水解,直接生成并释放乙酸,使细胞壁微环境pH值下降,形成局部酸性条件,进而启动对纤维素的持续侵蚀。本研究中劣化最严重的D2位置,半纤维素损失幅度最大,伴随灰分富集,可间接反映乙酸累积量最高、局部酸性最强。上述推论可通过后续pH值原位测定与乙酸定量分析进一步验证。结合红外光谱与热重分析可知,半纤维素特征峰 $1\,736\text{ cm}^{-1}$ ($\text{C}=\text{O}$ 伸缩振

动)的显著减弱或消失,是半纤维素脱乙酰化与深度降解的直接标志,这与已有考古木材劣化规律完全一致。

乙酸对纤维素结晶度的破坏主要通过两条明确路径实现:①酸催化水解(非均相降解)。乙酸解离产生的 H^+ 优先攻击纤维素无定形区与结晶区表面的 β -1,4-糖苷键,导致分子链断裂、聚合度下降;结晶区表层无序化后,内部结晶结构失去保护,逐渐解聚、晶粒尺寸减小,结晶度持续降低^[24]。②溶胀与结构松弛效应。乙酸小分子可渗透进入纤维素无定形区,削弱分子间氢键,增大分子链间距,使结晶区更容易发生滑移、扭曲并向无序结构转化,进一步加速结晶度下降^[8]。

试验结果显示,D2位置试样半纤维素降解最显著,乙酸生成量最高,对应纤维素结晶度、密度与弹性模量均最低(表5)。D2位置试样的XRD图谱表明,在 $2\theta=18^\circ$ 附近无定形散射强度最低(图6),这一现象并非无定形组分相对增加,而是无定形区优先深度降解,结晶区随之解聚崩塌,纤维素整体超分子结构被彻底破坏。

综上,半纤维素脱乙酰化产生的乙酸所构建的酸性微环境,通过定向催化糖苷键断裂与结构溶胀松弛共同破坏纤维素结晶结构,是驱动木材微观结构崩溃、最终导致宏观力学性能衰减的核心化学机制。

3 结论与建议

1)以故宫古华轩硬木松檐檩为研究对象,揭示无直射光照、整体通风良好条件下木构件的多尺度协同劣化机制:木材劣化由化学组分降解与微观结构破坏共同驱动,呈现纤维素、半纤维素优先降解,木质素相对稳定并相对富集的典型特征,灰分含量随劣化程度加剧而升高;纤维素结晶度与木构件密度、弹性模量呈高度正相关,纤维素结晶区有序结构破坏是导致宏观力学性能衰退的核心机制。

2)在空间分布上,檐檩劣化程度呈现“中端(D)>近墙端(G)>近柱端(A)”梯度变化。在无直射光照且整体通风良好的条件下,光照并非劣化的主要驱动因素,局部微环境的通风差异

与湿度不均成为控制劣化异质性的关键变量, 劣化程度与通风效果呈负相关、与局部湿度呈正相关。

3) 研究揭示无直射光照、良好通风条件下, 檐檩沿近柱端-中端-近墙端位置的化学组分-微观结构协同劣化规律及梯度特征, 初步构建以“ α -纤维素含量-纤维素结晶度-宏观力学性能(密度、弹性模量)”为核心参数的量化评估框架。该框架可通过化学组分与纤维素结晶度指标, 为同类环境下硬木松木构件劣化程度半定量诊断与性能预测提供参考依据。

4) 受限于样本量与单一树种、单一环境条件, 本研究提出的劣化程度梯度变化及其评估框架的普适性尚需进一步验证。未来的研究将扩展至多树种及不同通风、湿度梯度的古建筑木构件对比分析, 同时结合长期环境监测, 构建基于微环境的木构件劣化预测模型, 进一步完善古建筑木构件的科学保护体系。

参考文献:

- [1] QIN S J, YANG N. Strength degradation and service life prediction of timber in ancient Tibetan building[J]. *Eur J Wood Wood Prod*, 2017, 76(2): 731-747.
- [2] 葛明裕. 木材加工化学[M]. 哈尔滨: 东北林业大学出版社, 1985: 1-3.
- [3] 米晓琛. 应县木塔损伤分析及材性微观劣化与保护研究[D]. 山西: 太原理工大学, 2021.
- [4] 张利朋, 谢启芳, 吴亚杰, 等. 木材本构模型研究进展[J]. *建筑结构学报*, 2023, 44(5): 286-304.
ZHANG L P, XIE Q F, WU Y J, et al. Research progress on constitutive model for wood[J]. *Journal of Building Structures*, 2023, 44(5): 286-304.
- [5] GUO J, ZHOU H B, STEVANIC J S, et al. Effects of aging on the cell wall and its hygroscopicity of wood in ancient timber construction[J]. *Wood Science and Technology*, 2018, 52(1): 131-147.
- [6] GUO J, CHEN J B, MENG Q L, et al. Molecular and crystal structures of cellulose in severely deteriorated archaeological wood[J]. *Cellulose*, 2022, 29: 9549-9568.
- [7] 刘文斌. 故宫古建筑木构件化学成分及抗弯强度的变化与腐朽的相关性研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2006.
- [8] 王传贵, 江泽慧, 费本华, 等. 化学成分对木材细胞壁纵向弹性模量和硬度的影响[J]. *北京林业大学学报*, 2012, 34(3): 107-110.
WANG C G, JIANG Z H, FEI B H, et al. Effects of chemical components on longitudinal MOE and hardness of wood cell wall[J]. *Journal of Beijing Forestry University*, 2012, 34(3): 107-110.
- [9] 李雄, 符小慧, 张文博, 等. 故宫长春宫木构件材质劣化研究[J]. *文物保护与考古科学*, 2019, 31(1): 58-64.
LI X, FU X H, ZHANG W B, et al. Study of the degradation of wood structural components of the Changchun Palace[J]. *Sciences of Conservation and Archaeology*, 2019, 31(1): 58-64.
- [10] WANG X Z, DENG Y H, WANG S Q, et al. Evaluation of the effects of compression combined with heat treatment by nanoindentation (NI) of poplar cell walls[J]. *Holzforschung*, 2014, 68(2): 167-173.
- [11] HAN L Y, WANG K, WANG W B, et al. Nanomechanical and topochemical changes in elm wood from ancient timber constructions in relation to natural aging[J]. *Materials*, 2019, 12(5). <https://doi.org/10.3390/ma12050786>.
- [12] GB/T 29894—2013 木材鉴别方法通则[S].
- [13] GB/T 2677.8—1994 造纸原料酸不溶木素含量的测定[S].
- [14] GB/T 2677.10—1995 造纸原料综纤维素含量测定[S].
- [15] GB/T 744—2004 纸浆 抗碱性的测定[S].
- [16] SEGAL L, CREELY J J, MARTIN A E, et al. An empirical method for estimating the degree of crystallinity of native cellulose using the X-ray diffractometer[J]. *Textile Research Journal*, 1959, 29(10): 786-794.
- [17] 李仁, 殷亚方, 焦立超, 等. 重度降解沉船考古木材的树种识别与细胞壁化学组分研究[J]. *林产化学与工业*, 2025, 45(4): 35-44.
LI R, YIN Y F, JIAO L C, et al. Wood species identification and cell wall chemical composition of severely degraded archaeological wood from ancient shipwreck[J]. *Chemistry and Industry of Forest Product*, 2025, 45(4): 35-44.
- [18] PANDEY K K. Study of the effect of photo-irradiation on the surface chemistry of wood[J]. *Polymer Degradation and Stability*, 2005, 90(1): 9-20.
- [19] BERTHOMIEU C, HIENERWADEL R. Fourier transform infrared (FTIR) spectroscopy[J]. *Photosynthesis Research*, 2009, 101(2/3): 157-170.
- [20] 方旋, 张景朋, 熊怡心, 等. 自然老化杉木梁的分区可处理性[J]. *北京林业大学学报*, 2024, 46(11): 124-132.
FANG X, ZHANG J P, XIONG Y X, et al. Sub-regional treatability of a naturally aging Chinese fir beam[J]. *Journal of Beijing Forestry University*, 2024, 46(11): 124-132.
- [21] 董少华, 王翀, 相建凯, 等. 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[J]. *红外*, 2020, 41(7): 30-38.
DONG S H, WANG C, XIANG J K, et al. Research on changes of chemical composition and structure of the minor carpentry work in Gongshu Hall of Hu County based on FTIR-ATR[J]. *Infrared*, 2020, 41(7): 30-38.
- [22] ROMAGNOLI M, GALOTTA G, ANTONELLI F, et al. Micro-morphological, physical and thermogravimetric analyses of waterlogged archaeological wood from the prehistoric village of Gran Carro (Lake Bolsena-Italy)[J]. *Journal of Cultural Heritage*, 2018, 33: 30-38.
- [23] 李世民, 王梦丹, 黄斌, 等. 建水指林寺大殿木构件材种鉴定及配置研究[J]. *文物保护与考古科学*, 2020, 32(3): 91-98.
LI S M, WANG M D, HUANG B, et al. Identification of species and investigation of allocation of wood components in the hall of Zhilin Temple in Jianshui County[J]. *Sciences of Conservation and Archaeology*, 2020, 32(3): 91-98.
- [24] 袁诚, 翟胜丞, 章一蒙, 等. 红外光谱结合热重法对考古木材降解状况的分析[J]. *光谱学与光谱分析*, 2020, 40(9): 2943-2950.
YUAN C, ZHAI S C, ZHANG Y M, et al. Simple evaluation of the degradation state of archaeological wood based on the infrared spectroscopy combined with thermogravimetry[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2020, 40(9): 2943-2950.

(责任副主编 张治国/编校 向琴)