Hans Journal of Chemical Engineering and Technology 化学工程与技术, 2026, 16(6), 359-367
Published Online November 2026 in Hans. https://www.hanspub.org/journal/hjcet
https://doi.org/10.12677/hjcet.2026.166035

纸质文物快速光谱分析：技术特点、应用现状与展望

傅文佳[1]，朱　志[1]，张　继[1]，贺　丹[1]，陈　立[2]，吴永忠[3]，谭　超[1]，邱　笛[1*]

[1]宜宾学院过程分析与控制四川省教育厅高校重点实验室，四川 宜宾
[2]和光同程光伏科技(宜宾)有限公司，四川 宜宾
[3]宜宾天原集团股份有限公司，四川 宜宾

收稿日期：2026年9月29日；录用日期：2026年10月27日；发布日期：2026年11月3日

摘　要

纸作为中国古代四大发明之一，自东汉发明以来，记录了中华民族的历史发展、科技进步和文化创造的过程。纸质文物不仅是研究古代社会、民俗、科技和艺术的重要资料，也在文化交流中发挥了关键作用，因此开展纸质文物材质鉴别、老化状态评估等相关研究，对文物鉴别和保护修复具有重要意义。本文围绕快速光谱技术在纸质文物分析中的应用展开综述，分别阐述近红外光谱、中红外光谱、拉曼光谱、高光谱成像的技术特点，归纳四类技术在古纸纤维鉴别、含水率等老化指标反演方面的研究现状。随着快速光谱技术研究的不断深入，同时结合多种分析方法与化学计量学协同应用，该技术将在未来纸质文物材质鉴别、工艺解析及老化评价等研究中发挥更为重要的作用。

关键词

纸质文物，近红外光谱，中红外光谱，拉曼光谱，高光谱成像

Rapid Spectral Analysis of Paper Cultural Relics: Technical Characteristics, Current Applications, and Prospects

Wenjia Fu[1], Zhi Zhu[1], Ji Zhang[1], Dan He[1], Li Chen[2], Yongzhong Wu[3], Chao Tan[1], Di Qiu[1*]

[1]Key Laboratory of Process Analysis and Control of Sichuan Universities, Yibin University, Yibin Sichuan
[2]Heguang Tongcheng Photovoltaic Technology (Yibin) Co., Ltd., Yibin Sichuan
[3]Yibin Tianyuan Group Co., Ltd., Yibin Sichuan

Received: September 29, 2026; accepted: October 27, 2026; published: November 3, 2026

*通讯作者。

文章引用: 傅文佳, 朱志, 张继, 贺丹, 陈立, 吴永忠, 谭超, 邱笛. 纸质文物快速光谱分析: 技术特点、应用现状与展望[J]. 化学工程与技术, 2026, 16(6): 359-367. DOI: 10.12677/hjcet.2026.166035

Abstract

Paper, as one of the four major inventions of ancient China, has recorded the historical development, technological progress and cultural creation of the Chinese nation since its invention in the Eastern Han Dynasty. Paper-based cultural relics are not only important materials for studying ancient society, folk customs, science and technology, and art, but also play a key role in cultural exchanges. Therefore, conducting research on the identification of paper material properties, aging status assessment, etc. is of great significance for the identification and protection restoration of cultural relics. This article reviews the application of rapid spectroscopy technology in the analysis of paper cultural relics, respectively elaborating on the technical characteristics of near-infrared spectroscopy, Mid-infrared spectroscopy, Raman spectroscopy, and hyperspectral imaging, and summarizing the current research status of these four types of technologies in the identification of ancient paper fibers, moisture content and other aging indicators. With the continuous deepening of research on rapid spectroscopy technology and the combined application of multiple analytical methods and chemometrics algorithms, this technology will play an even more important role in the research of paper material identification, process analysis and aging evaluation of paper cultural relics in the future.

Keywords

Paper-Based Cultural Relics, NIR, MIR, Raman Spectrum, HSI

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.
This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).
http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/
Open Access

1. 引言

古代纸质文物是人类文明的传承载体，文化、科技的发展乃至社会进步都离不开纸张的作用[1]。我国纸质文物存量巨大[2]，但近年来，纸张文物交易市场充斥着大规模数量的仿造品，仿造品的出现不仅严重破坏了文物交易市场的秩序，也在很大程度上破坏了纸张文物的文化传承[3]。真品与仿造品纸张在成分和老化程度方面有较大区别，不同年代的纸质文物有特定的时代特征，所用的原料和老化程度各有不同[4]。因此，研究纸质文物的成分、纸张表面或内部物质的种类和特点，以及老化程度是鉴别和保护纸质文物的关键[5]。

传统的纸张文物分析方法需对样品进行破坏性前处理，且检测流程繁琐、耗时较长，难以满足对大量纸质文物进行鉴别的需求[6]。近年来，随着快速光谱技术的发展，近红外光谱、中红外光谱、拉曼光谱、高光谱成像技术在纸质文物领域的应用范围不断扩大，为纸质文物的分析提供了新的思路[7]。快速光谱技术具有操作便捷、无损等优点，相较于等其他检验方法具有明显的优势，在纸质文物分析中展现出良好的应用前景[8]。

2. 光谱学分析检测技术

2.1. 近红外光谱技术在纸质文物分析中的应用

近红外光谱是一种波长在 780~2526 nm 范围内的电磁波，其核心原理为分子振动的倍频与合频吸收效应，可捕获有机物中 C-H、O-H、N-H 等含氢基团的特征振动信息[9]。该光谱技术能够无损预测有机

物样本的物理、化学等性质，同时有维护和检测成本低的优点，随着光谱数据处理技术的发展，近红外光谱技术在纸质文物分析中的应用范围不断扩大，为无损预测纸张的具体种类与成分提供一种快速并准确的分析方法(见表 1)。

Table 1. The application of near-infrared spectroscopy in the analysis of paper-based cultural relics in recent years
表 1. 近年来近红外光谱技术在纸质文物分析中的应用

	应用	波数与波长范围	数据处理与建模方法	结果	参考论文
近红外光谱	纸质文物含水率无损检测	900 nm~1700 nm	CARS-PLSR、DL-BPNN	实现纸张含水率高精度无损检测	[10]
	古籍纸张性能无损分析	4000~12,000 cm^{-1}	MSC、SNV一阶导数、PLS	实现纸质文物相关理化参数的无损检测	[11]
	书画相关无损检测	780~2526 nm	MSC、一阶导数、PLS Savitzky-Golay 平滑	实现书画的鉴定与老化程度预测	[12]
	史书无损断代	1000~1900 nm 2000~2300 nm	PLS、RF、kNN	实现 1851~2000 年史书断代预估	[13]

关于近红外光谱技术在纸质文物分析方面的应用，谭银雨[10]以棉料四尺单宣和竹纸为研究对象，建立含水率预测最优模型线性。结果显示，宣纸验证集决定系数(R_p^2)为 0.9438，竹纸验证集 R_p^2 为 0.9613，虽然该模型受到多种因素的影响，但为纸质文物含水率的快速无损检测提供了思路。易晓辉等[11]基于近红外光谱技术，对纸样的化学性质进行测定。结果表明，近红外光谱分析模型对纸样 pH 值、纤维聚合度、高锰酸钾值的预测值跟实测值相关性较好，证明近红外光谱技术可应用于珍贵文献纸张的无损检测中。谷岸等[12]梳理了近红外光谱在天然材料鉴定、书画与丝织品等文物检测方面的应用进展。在书画文物中，实验根据纸绢与印泥近红外光谱的谱峰差异，确定了有效的纸绢背景信号排除方法和合理特征谱段，表明近红外光谱结合化学计量学方法能够实现印泥的鉴定。Coppola [13]等采用近红外光谱技术并分别结合偏最小二乘回归(PLS)、随机森林(RF)、k-最近邻(kNN)三种机器学习方法对纸质书籍出版年份进行预测，该研究实现了对历史文献的无损、快速且高精度的年代测定。

上述研究表明近红外光谱技术与化学计量学算法构建模型相结合，可实现纸张内部理化参数与纤维类型的分析，具有快速、无损获取样品分子基团信息的优势。因此，近红外光谱技术用于纸质文物的定性鉴别与定量分析是可行的，可广泛应用于纸质文物的科学分析实践当中。

2.2. 中红外光谱技术在纸质文物分析中的应用

中红外光谱技术可采集 4000~400 cm^{-1} 红外区间内物质的分子振动信号。应用于纸质文物分析领域时，傅里叶变换红外光谱是获取中红外光谱信号最常用的检测技术。纸张样品内部纤维素、颜料、胶料等组分对特定波数红外光产生特征吸收，得到能够表征物质官能团组成的红外光谱数据[14]，可在不会对文物造成二次损伤的前提下，获取肉眼无法得到的分子层面化学信息[15] (见表 2)。

关于中红外光谱技术在纸质文物分析方面的应用，Sharma 等[16]提供了一种估计未知纸张年龄的方法，将衰减全反射傅里叶变换红外光谱法与化学计量学结合，采用二阶导数等预处理方法，建立了能预测不同类型纸张在自然老化条件下的年龄统计模型，实际和预测日期的最小误差仅为±5 d。吕淑贤等[17]采集不同种类中国古纸纤维样品的傅里叶变换红外光谱，通过对比二阶导数谱图特征差异进行古纸纤维

Table 2. The application of mid-infrared spectroscopy technology in the analysis of paper-based cultural relics in recent years
表 2. 近年来中红外光谱技术在纸质文物分析中的应用

	应用	波数与波长范围	数据处理与建模方法	结果	参考论文
中红外光谱	纸张区分判别 老化年龄估算	4000~400 cm^{-1}	Curve Estimation MLR、PLSR	精准判别纸种、估算纸张老化年份	[16]
	中国古纸纤维 无损鉴别	4000~500 cm^{-1}	二阶导数光谱解析 峰高/峰面积比值计算	实现区分不同古纸纤维种类	[17]
	纸质文物 种类判别	4000~650 cm^{-1}	PLS-LDA、LS-SVM	模型准确率 100%	[18]
	涂层无机填料 组分分析	4000~600 cm^{-1}	特征吸收峰比对解析	推测涂层主体矿物填料为高岭土	[19]

无损鉴别。结果表明红外二阶导数谱最终能够放大不同纤维原料的特征吸收差异，可区分桑皮纸、构皮纸、竹纸、宣纸等古纸纤维类型。Xia 等[18]结合偏最小二乘法与支持向量机等化学计量学方法，采用傅里叶变换红外光谱技术对 15 种中国传统手工纸进行研究，建立的预测模型的标样集分类准确率最高可达 100%。实验表明，傅里叶变换红外光谱技术在文化遗产的纸质鉴定中可以广泛应用。崔志宾等[19]利用傅里叶变换红外光谱技术对清宫“天禄琳琅”古籍书衣粉笺纸成分进行分析，通过特征吸收峰比对预测涂层物质含量。样品红外光谱图出现了高岭土对应的硅氧化合物特征峰，初步判断粉笺纸涂层主体矿物填料为高岭土。

综上，中红外光谱技术是当前古籍纸张无损表征与老化分析的重要手段。相较于传统检测方法，中红外光谱技术可通过获取样品分子官能团的特征吸收信息，精准区分不同原料的古纸品类、鉴别古籍加工填料与涂层成分，还可实现纸张老化程度评估与未知纸张年龄预测，符合珍贵古籍文物的检测要求。

2.3. 拉曼光谱技术在纸质文物分析中的应用

拉曼光谱是研究分子振动和转动的散射光谱。其核心原理是基于拉曼非弹性散射效应，反映分子与晶格的振动信息[20]。由于拉曼光谱能够提供分子结构的信息，能进行微区分析，因此在纸质文物分析中应用广泛(见表 3)。

Table 3. The application of Raman spectroscopy in the analysis of paper-based cultural relics in recent years
表 3. 近年来拉曼光谱法在纸质文物分析中的应用

	应用	波数与波长范围	数据处理与建模方法	结果	参考论文
拉曼光谱	手工纸样品分类鉴别	100~4000 cm^{-1}	PCA-LR	PCA-LR 模型预测性能最优 $R^2 = 1$	[21]
	明代瓷青纸材料与制作工艺解析	200~1800 cm^{-1}	光谱特征峰归属解析	确定瓷青纸的染料组分以及制作工艺	[22]
	纸张化学组分微观分析	400~4000 cm^{-1}	PCA、拉曼显微微区扫描	实现纸张多组分原位解析	[23]
	自然老化纸张保存状态评估	750~3500 cm^{-1}	拉曼与发光光谱映射成像，光谱解析	可评估纸张老化与保存劣化状态	[24]
	纸质文物 真伪鉴别	100~4000 cm^{-1}	对比特征峰 位移强度	实现纸质文物真假鉴别	[25]

关于拉曼光谱技术在纸质文物分析方面的应用，Yan 等[21]以中国传统手工纸为研究对象，采用拉曼光谱对 18 种手工纸进行种类区分。实验运用多种光谱预处理并结合 PCA、PLS、支持向量机(SVM)、K 近邻算法(KNN)、随机森林(RF)算法构建分类模型，其中 PCA-LR 模型在多组数据下均取得最优预测效果(R^2 = 1)，为手工纸及相关文物分析提供技术支撑。田江南等[22]以一件明代瓷青纸为样品，对样品上层染色纸的蓝色染料进行拉曼测试分析。样品蓝色染料在 1570 cm^{-1} 出现的强拉曼峰符合靛蓝的拉曼光谱特征，因此可以确定为靛蓝，为明代瓷青纸的研究、保护及复制提供了关键依据。Enrico Pigorsch [23]利用显微拉曼光谱技术对 15 世纪和 19 世纪的两种旧纸进行详细化学成分和结构分析，可以为打击纸质文物市场上伪造和欺诈的行为，为研究古代造纸原料和工艺提供了新思路。Botti 等[24]结合显微拉曼光谱与发光光谱技术，对 1873 年至 2021 年不同老化程度的纸张样本进行状态评估，并跟踪其老化过程并定义了系列光谱标记物。结果显示，古纸局部粗糙度随扫描面积增大而增大，在 1.7 μm 处趋于饱和；现代纸张粗糙度则随面积增大持续上升，未呈现饱和趋势，该技术可为评估珍贵古籍纸张保存状态提供依据。刘文庆[25]等利用拉曼光谱技术的唯一性和差异性，对纸质文物进行辨别真假。结果表明，拉曼光谱显示了纸质文物的光谱独有特征，可在文物的保护及研究等方面发挥积极的作用。

上述研究表明拉曼光谱技术应用于纸质文物的成分分析具有参考价值，该技术具备无损、原位检测的特点，能够获取纸张纤维、颜料的分子振动光谱信息。该技术可完成纸张微区化学信息采集，结合其他技术还能够评估自然老化纸张的保存劣化状态，可以为纸质文物保护修复工作提供科学的理论参考。

2.4. 高光谱成像技术在纸质文物分析中的应用

高光谱成像技术起源于 20 世纪 80 年代初期[26]，可利用样品在可见光到近红外波段的连续光谱信息来表征其特性。高光谱成像技术以高光谱分辨率与“图谱合一”为突出优势，可在无损条件下捕捉文物表面肉眼难以辨识的隐藏信息，已应用于颜料种类识别[27]、修复痕迹提取[28]等文物保护与修复领域(见表 4)。

Table 4. The application of high-resolution spectral imaging in the analysis of paper-based cultural relics in recent years
表 4. 近年来高光谱成像在纸质文物分析中的应用

	应用	波数与波长范围	数据处理与建模方法	结果	参考论文
高光谱成像	古书画纸张老化程度评估	400~2500 nm	贪心-PLSR、Savitzky-Golay 平滑	实现古书画纸张老化程度无损评估	[29]
	纸张粘度分析	400~2500 nm	SRL-FD、CARS、SVR Savitzky-Golay 平滑	可无损检测纸张粘度	[30]
	纸张鉴别方法研究	350~2500 nm	MSC、SPA、SVM SNV、CARS、RF	实现不同种类和年份纸张快速鉴别	[31]
	不同老化程度的纸张粘度检测	400~2500 nm	(SI − SAD)/(SI + SAD) 归一化指数	实现纸张粘度含量变化的测定	[32]

关于高光谱成像技术在纸质文物分析方面的应用，李广华等[29]采用高光谱成像技术开展古书画纸张老化程度评估研究，构建 PLSR 纸张老化评估模型，结果表明，该模型对宣纸及竹草混合纤维纸张预测效果良好，为纸质文物预防性保护提供技术支撑。王讽等[30]选取多组纸张样品，对比 SVR 等多种回归算法构建纸张粘度预测模型，最终总结出最优模型。该模型证明了高光谱成像技术在纸张粘度无损分析的适用性，为纸张文物的保护和修复提供技术参考。张娇娇[31]该研究采集多类纸张样本的高光谱数据，

围绕纸张种类与生产年份开展鉴别研究，对比多种机器学习分类算法，完成不同纸张样本的区分。高宇等[32]以纸张粘度为核心老化评价指标，采用高光谱技术无损采集不同老化程度纸张的光谱影像数据，通过构建回归预测模型建立光谱信号与粘度参数之间的定量关联，以此实现对纸张老化状态的表征，为纸张粘度的无损检测提供了可行的技术思路。

由此表明，利用纸张光谱特征的差异，高光谱成像技术可实现纸张粘度等老化指标的反演、古纸多糖属性的像素级可视化以及不同纸张样本的分类识别，所建立模型拥有较好的预测精度，为古书画等纸质文物的无损分析提供有效的技术手段，既可以完成纸张老化程度的定量评估，也能够实现纸张种类、字迹的快速分析，可为纸质文物保护研究和纸质文物现场、非接触式检测开辟新的思路。

由表 4 可知，近红外光谱、中红外光谱、拉曼光谱以及高光谱成像技术均可应用于纸质文物的科学分析，四类光谱技术均具备快速、近乎无损的检测优势，可为纸质文物材质鉴别、老化评价以及保护修复工作提供有效的技术手段与理论参考，实际研究中可根据分析目标灵活选用，必要时采用多技术联合检测的方式，进一步提升纸质文物解析结果的可靠性。

3. 讨论

3.1. 四种快速光谱检测技术对比

近红外光谱、中红外光谱、拉曼光谱、高光谱成像均可以实现纸质文物的近乎无损检测，但四类技术的物理机制不同，在分析对象、分析尺度、信息维度、固有技术缺陷与干扰因素方面存在显著差异，不存在普适性的最优技术。在实际纸质文物保护工作中，应当依据研究目标扬长避短选择单一技术或多技术联合方案。下面围绕分析对象、分析尺度、信息维度、技术挑战开展批判性对比，并面向典型文保任务给出技术选择建议见表 5。

Table 5. Multidimensional comparison of four types of spectroscopic techniques
表 5. 四类光谱技术多维度对比表

技术类型	分析对象	分析尺度	信息维度	技术挑战	适用范围
近红外光谱	植物纤维、胶料、含水率、pH、聚合度等	宏观，获得样品整体平均信息，无法获取局部微区信息	获取 C-H、O-H、N-H 基团倍频、合频吸收信号；	含水量严重干扰光谱基线；谱峰严重重叠，原始光谱辨识度差；无机组分信号弱	大批量古籍馆藏筛查、纸张含水率/老化指标快速定量、历史文献粗断代
中红外光谱	纤维素、半纤维素、胶料等	宏观表面分析，ATR 模式可实现有限微区采样	官能团指纹光谱，定性解析分子结构能力强，同时支持定量分析	ATR 模式受纸张表面粗糙度影响大；测试易受环境水汽、CO_2 干扰；穿透深度浅	古纸纤维原料鉴别、古籍涂层/胶料/矿物填料解析、纸张老化官能团演变追踪
拉曼光谱	各类矿物颜料、染料、无机填料	微观原位点检测，显微模式可达微米尺度，单点/微区扫描，非面成像	分子与晶格的散射振动信号	光斑小，大面积样品检测效率低下；容易出现激光致样品热损伤风险	书画局部颜料染料鉴定、纸张斑点病害微区分析、真伪样品微点比对
高光谱成像	纤维基体老化差异、颜料、修复补纸痕迹	面成像，像素级空间尺度，一次性获取整张样品二维空间信息	图谱合一，同时得到每个像素点的光谱数据与空间位置分布；擅长物质空间分布可视化	数据量巨大，存在严重波段冗余；存在混合像元问题；	古书画整幅非接触扫描、修复痕迹/隐藏字迹提取、纸张老化程度空间分布图绘制

3.2. 纸质文物光谱分析中化学计量学方法

光谱原始数据普遍存在基线漂移、颗粒散射、环境噪声、谱峰重叠等干扰。纸质文物样本基质复杂，纸张原料差异、老化程度离散、污渍与环境湿度都会进一步劣化光谱质量。化学计量学不是简单的算法工具套用，而是从复杂原始光谱中剥离干扰信息、挖掘有效特征，构建可靠定性分类与定量预测模型的核心手段。在纸质文物研究中，不仅需要明确“使用哪些算法”，更需要厘清“为什么使用”以及“如何合理使用”，主要体现在光谱预处理、算法适配选择、模型验证与稳健性评估三个关键环节。

1) 光谱预处理

多元散射校正(MSC)、标准正态变量变换(SNV)主要用于消除纸张表面颗粒、粗糙度带来的散射基线偏移；Savitzky-Golay 平滑用于压制随机噪声；一阶、二阶导数能够分离重叠谱峰，放大纤维老化、填料带来的微弱光谱差异，在古纸鉴别研究中应用广泛。但导数运算在放大特征信号的同时也会放大噪声，针对珍贵文物样本，需要审慎选择微分窗口与阶数，避免过度处理造成真实光谱信息丢失。中红外 ATR 测试还需要做好水汽与二氧化碳背景扣除。预处理并非叠加越多效果越好，应当以模型实际性能作为评判标准，盲目堆砌多种预处理手段容易引入人为偏差，造成模型在真实文物样本上失效。

2) 不同算法的适用场景

偏最小二乘回归(PLS-R)适合含水率、聚合度、纸张粘度这类连续理化指标的定量回归任务；PLS-LDA、LS-SVM 多用于古纸纤维、纸种的分类判别；随机森林(RF)、k-近邻(k-NN)等机器学习算法对非线性关系拟合能力更强，适合文献年代预估、复杂混合体系识别，但该类算法对样本数量要求较高，小样本条件极易发生过拟合；主成分分析(PCA)多用于光谱数据降维、样本聚类探索，一般不直接作为预测模型使用。纸质文物研究经常面临样本稀缺的现实条件，在样本量有限的情况下，传统 PLS 类模型稳定性优于深度学习，当具备充足多源数据集时，可引入非线性机器学习提升预测精度。

3) 模型验证与稳健性评估

纸质文物领域普遍存在真实古纸样本获取困难的问题，很多研究依靠加速老化模拟纸样建立模型。但人工加速老化与自然老化的反应路径、产物组成并不完全等同，直接将模拟样本训练得到的模型迁移至古代真品会带来不可忽视的系统误差。模型性能不能仅依靠训练集、内部交叉验证结果进行评价，应当尽量采用独立外部验证集，优先采用经过传统理化方法标定的真实古纸开展外部验证；同时需要测试模型对纸张厚度、表面污渍、环境湿度扰动的抗干扰能力。当前制约该领域发展的一大痛点是缺少统一的古纸光谱数据集，不同实验室仪器条件、预处理流程、建模参数不统一，模型可复现性较差。推动标准化光谱数据库建设，是提升模型泛化能力的重要途径[33]。

4. 结论与展望

纸质文物市场仿品泛滥，给真伪鉴定与科学修复带来不少困难，发展高效、无损、准确的检测手段已成为该领域的迫切需求。传统方法流程繁琐、耗时较长，且多数需要取样分析，不利于文物的完整保存。光谱技术能够识别纸张纤维、颜料及老化产物在微观组分上的差异，凭借无损原位、检测高效的优势，为纸质文物的材质判别、工艺解析与老化评估提供了有力的技术支撑。

面向纸质文物保护的发展需求，后续研究可重点围绕以下方向推进：开展多模态数据融合，在数据、特征、决策不同层级耦合高光谱的空间信息与红外、拉曼的分子指纹信息，建立“宏观成像定位–微区精准解析”的分析范式；突破便携式设备信噪比不足、模型跨设备迁移困难等技术难点，研发适配博物馆现场检测的轻量化装备与校正算法；整合多源样本资源，构建带有理化真值标签的公开古纸光谱共享数据库；建立适配文物小样本特征的化学计量学应用规范，重视外部独立验证以抑制模型过拟合；同时推动光谱与 X 射线荧光、显微形貌分析等技术交叉协同，多维度解析纸张组分与病害机理，助力纸质文

物真伪鉴别、工艺溯源与科学保护修复工作走向标准化与实用化。

基金项目

2026 年省级大学生创新创业训练计划项目(S202610641058)和宜宾学院本科工程(教学改革)项目。

参考文献

[1] 阎春生, 黄晨, 韩松涛, 等. 古代纸质文物科学检测技术综述[J]. 中国光学, 2020, 13(5): 936-964.

[2] 朱佳佳. 纸质文物加固保护技术研究综述[J]. 客家文博, 2020(1): 53-59.

[3] 李洪飞. 浅谈文物的鉴定与鉴赏[J]. 文物鉴定与鉴赏, 2019(15): 90-91.

[4] 牛飞. 纸质文物修复科学配纸实践——以一本族谱的保护修复为例[J]. 中国文物科学研究, 2023(3): 70-78.

[5] Zhang, X., Yan, Y.E., Yao, J.J., *et al*. (2022) Chemistry Directs the Conservation of Paper Cultural Relics. *Polymer Degradation and Stability*, **207**, Article 110228. https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2022.110228

[6] 艾孜拉·达吾夏提, 王林. 近红外光谱结合大数据的纸张物理性能快速预测模型[J]. 华东纸业, 2026, 56(2): 10-12.

[7] 张旭, 闫玥儿, 杨光辉, 等. 8 部《诗经》类古籍的红外光谱无损检测研究[J]. 复旦学报(自然科学版), 2021, 60(5): 655-664.

[8] 朱晓晗, 姜红. 常用纸张填料的光谱分析[J]. 中华纸业, 2020, 41(14): 27-30.

[9] 刘宇, 陈瀑, 李敬岩, 等. 中国近红外光谱分析技术 30 年——回顾、述评与展望[J]. 分析测试学报, 2025, 44(10): 2001-2016.

[10] 谭银雨. 基于近红外光谱技术的纸质文物含水率无损检测的研究[D]: [硕士学位论文]. 重庆: 重庆理工大学, 2025.

[11] 易晓辉, 龙堃, 任珊珊, 等. 近红外光谱无损检测技术在古籍纸张性能分析中的可行性研究[J]. 文物保护与考古科学, 2018, 30(3): 21-32.

[12] 谷岸. 近红外光谱结合化学计量学无损检测新技术在文物保护中的应用与展望[J]. 中国文物科学研究, 2019(1): 72-76.

[13] Coppola, F., Frigau, L., Markelj, J., Malešič, J., Conversano, C. and Strlič, M. (2023) Near-Infrared Spectroscopy and Machine Learning for Accurate Dating of Historical Books. *Journal of the American Chemical Society*, **145**, 12305-12314. https://doi.org/10.1021/jacs.3c02835

[14] 张旭, 闫玥儿, 张春梅, 等. 延安时期红色文献的红外光谱无损检测研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2022, 42(10): 3097-3102.

[15] 吕淑贤. 应用衰减全反射红外光谱无损鉴别中国传统手工纸的方法研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2024, 44(9): 2450-2458.

[16] Sharma, V., Kaur, J. and Kumar, R. (2021) Proof of Concept Study for Paper Discrimination and Age Estimation through Its Degradation Process by ATR-FTIR Spectroscopy and Chemometric Models. *Australian Journal of Forensic Sciences*, **53**, 703-726. https://doi.org/10.1080/00450618.2020.1781254

[17] 吕淑贤, 张艳霞, 王旭. 红外二阶导数谱图特征在中国古纸纤维无损鉴别中的应用[J]. 中国造纸学报, 2024, 39(4): 134-145.

[18] Xia, J.J., Zhang, J.X., Zhao, Y.T., *et al*. (2019) Fourier Transform Infrared Spectroscopy and Chemometrics for the Discrimination of Paper Relic Types. *Spectrochimica Acta Part A*: *Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, **219**, 8-14. https://doi.org/10.1016/j.saa.2018.09.059

[19] 崔志宾, 易晓辉, 王锋, 等. 对一种清宫古籍书衣用粉笺纸的检测分析与仿制研究[J]. 文物保护与考古科学, 2025, 37(3): 111-120.

[20] 郑冬青, 张高愿, 鲁钢, 等. 拉曼光谱技术在纸质文物成分与结构分析研究中的进展[J]. 光散射学报, 2026, 38(1): 16-28.

[21] Yan, C.S. (2022) Analysis of Handmade Paper by Raman Spectroscopy Combined with Machine Learning. *Journal of Raman Spectroscopy*, **53**, 260-271. https://doi.org/10.1002/jrs.6280

[22] 田江南, 解明思, 刘锦缘, 等. 基于光谱技术的瓷青纸材料及工艺分析——以一件明代瓷青纸为例[J]. 光谱学与光谱分析, 2023, 43(6): 1787-1791.

[23] Pigorsch, E. (2020) New Insights into Paper—Chemical Paper Analysis Using Raman Microscopy. *Journal of Raman Spectroscopy*, **52**, 78-84. https://doi.org/10.1002/jrs.5877

[24] Botti, S., Bonfigli, F., Nigro, V., Rufoloni, A. and Vannozzi, A. (2022) Evaluating the Conservation State of Naturally Aged Paper with Raman and Luminescence Spectral Mapping: Toward a Non-Destructive Diagnostic Protocol. *Molecules*, **27**, Article 1712. https://doi.org/10.3390/molecules27051712

[25] 刘文庆, 王平. Raman 光谱及 DR 技术在可移动文物追溯中的实验研究[J]. 陶瓷学报, 2022, 43(6): 1105-1112.

[26] 童庆禧, 张兵, 张立福. 中国高光谱遥感的前沿进展[J]. 遥感学报, 2016, 20(5): 689-707.

[27] 王乐乐, 李志敏, 马清林, 梅建军. 高光谱技术无损鉴定壁画颜料之研究[J]. 敦煌研究, 2015(3): 122-128.

[28] 周新光, 沈骅, 吴来明. 高光谱图像系统应用于模糊印章的提取研究[J]. 文物保护与考古科学, 2020, 32(1): 56-60.

[29] 李广华, 高宇, 郑冬青, 等. 基于高光谱成像技术的古书画纸张老化程度评估研究[J]. 北京化工大学学报(自然科学版), 2025, 52(5): 209-218.

[30] 王飒, 曲亮, 张立福, 等. 基于高光谱数据的纸张粘度反演模型构建[J]. 光谱学与光谱分析, 2024, 44(12): 3524-3533.

[31] 张娇娇. 高光谱结合机器学习的纸张鉴别方法研究[D]: [硕士学位论文]. 西安: 西安石油大学, 2023.

[32] 高宇, 孙雪剑, 李广华, 等. 光谱信息扩展下的纸张粘度光谱指数构建研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2023, 43(9): 2960-2966.

[33] Yun, L., Tom, F. and Matija, S. (2021) Quantitative NIR Spectroscopy for Determination of Degree of Polymerisation of Historical Paper. *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems*, **214**, Article ID: 104337. https://doi.org/10.1016/j.chemolab.2021.104337