

文章编号: 1672-8785(2024)02-0042-11

大幅面高光谱扫描系统在文物研究中的应用

李广华^{1,2} 陈 垚^{1,2} 孙雪剑^{2,3} 张立福^{2,3} 曲 亮^{1,2*}

(1. 故宫博物院, 北京 100009;

2. 中国-希腊文物保护技术“一带一路”联合实验室, 北京 100009;

3. 中国科学院空天信息创新研究院, 北京 101408)

摘 要: 为使高光谱成像技术能够在大幅面绘画类文物研究和保护中充分发挥面分析的优势, 研制了大幅面高光谱扫描系统, 同时建立了传统颜料数据库。与以往高光谱成像技术对文物进行的局部分析相比, 该系统不仅提高了分析效率, 而且可对绘画文物整体进行颜料鉴别和相对浓度分布研究, 可以为绘画中复杂调色工艺的研究提供巨大的帮助。目前, 已使用该系统对故宫博物院东华门天花彩画、纸本书画《丁观鹏画不二尊者图轴》、绢本书画《沈庆兰画贴落》和唐卡《吉祥天母画佛像》进行分析研究, 并将其用于文物隐藏病害、隐藏墨迹、底稿线等信息的提取与增强, 颜料成分鉴别和混合颜料工艺研究等方面, 取得了良好的效果, 对绘画类文物的研究与保护具有重要的意义。

关键词: 大幅面高光谱; 绘画类文物; 隐藏信息提取; 颜料鉴别

中图分类号: K85; P23 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1672-8785.2024.02.006

Application of Large-Format Hyperspectral Scanning System in Cultural Relics Research

LI Guang-hua^{1,2}, CHEN Yao^{1,2}, SUN Xue-jian^{2,3}, ZHANG Li-fu^{2,3}, QU Liang^{1,2*}

(1. Palace Museum, Beijing 100009, China;

2. China-Greece "Belt and Road" Joint Laboratory on Cultural Heritage Conservation Technology, Beijing 100009, China;

3. Aerospace Information Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Beijing 101408, China)

Abstract: In order to give full play to the advantages of surface analysis in the study and protection of large-format painting cultural relics, a large-format hyperspectral scanning system is developed and a database of traditional pigments is established. Compared with the previous hyperspectral imaging technology for local analysis of cultural relics, the system not only improves the efficiency of analysis, but also can identify pigments and study the relative concentration distribution of the whole painting cultural relics, which can provide great

收稿日期: 2023-12-20

基金项目: 国家重点研发计划项目(2020YFE0204600); 故宫博物院院课题项目(KT2014-18)

作者简介: 李广华(1989-), 女, 河南安阳人, 副研究馆员, 主要从事文物研究与保护工作。

*通讯作者: E-mail: quliang@dpm.dpm.org.cn

help to the research of complex color mixing technology in painting. At present, the system has been used to analyze and study the Donghuamen ceiling painting in the Forbidden City, the paper painting “Buer zunzhe by Ding Guanpeng”, the silk painting “Tieluo by Shen Qinglan” and the Tanka “Auspicious Heavenly Mother Painting Buddha Statue”, and has been used to extract and enhance the information of hidden diseases of cultural relics, hidden ink stains and manuscript lines. The system is also used in the identification of pigment components and the research of mixing pigment technology. Good results have been obtained, which is of great significance to the research and protection of painting cultural relics.

Key words: large-format hyperspectral; painting cultural relics; hidden information extraction; pigment identification

0 引言

高光谱成像技术可以同时获得文物的二维几何空间及一维光谱信息, 能获取高分辨率的反射光谱和图像数据, 是目前最安全的无损检测新技术之一, 很适合用于文物的研究和保护。

高光谱成像技术在文物研究和保护中具有三个显著特点: 第一, 用高光谱成像技术对文物进行检测时, 不接触文物, 而且由于使用的是可见光和近红外光谱, 相较于拉曼光谱、红外光谱等常用的成分识别方法, 可以实现完全无损的状态; 第二, 近红外波段具有穿透性^[1], 能够穿透大部分矿物颜料, 探测到颜料底层的墨线信息, 对于彩绘文物中隐藏信息的提取能够发挥很大的作用; 第三, 高光谱成像技术具有图谱合一的特点, 其反射光谱可以起到鉴别物质成分的作用, 配合图像信息可以得到成分的相对浓度分布图, 对于大尺幅文物的快速研究具有较大的帮助。这三大特点促进了高光谱成像技术在壁画和书画等绘画类文物研究中的应用: (1) 通过高光谱成像技术不仅可以有效地获得壁画、古书画等绘画类文物的底稿线信息和一些隐藏的文字图案, 而且对于一些模糊不清无法辨认的信息, 也可以通过高光谱数据的增强处理, 获得更为清晰的图像。这些结果可用于绘制技法研究。(2) 高光谱成像技术所获得的反射光谱可以用于鉴别颜料种类, 结合图像信息并通过数据处理可以得到颜料的浓度分布图。这对于混合颜料的分析以及调色工艺的研究具有很大的价值。

近些年来, 国外学者在文物上开展了大量的高光谱成像技术应用研究。例如, Delaney J K^[2-3]、Haida L^[4]和 Cucci C^[5]等都在油画、壁画等绘画类文物上开展了颜料鉴别和绘制工艺研究。目前, 国内已有多家文博单位购买了高光谱相机, 并将其用于文物的研究与分析。例如, 故宫博物院史宁昌^[6]、李广华^[7]等使用 400~2500 nm 高光谱相机对故宫馆藏书画进行了印章提取、底稿线提取和颜料鉴别等研究。四川博物院巩梦婷等^[8]使用 400~1000 nm 高光谱相机对宜宾市博物院藏族谱印记进行了研究。上海博物院周新光等^[9]使用 400~1000 nm 高光谱相机对上海博物馆馆藏莫晋书法立轴进行了印章提取。首都博物馆武望婷等^[10]使用 400~1000 nm 高光谱相机对馆藏书画进行了颜料鉴别、病害识别等研究。中国国家博物馆丁莉等^[11]也使用 400~1000 nm 高光谱相机对宋代绘画进行了研究。

国内外学者大多使用 400~1000 nm 高光谱相机, 而且其研究都局限于文物的局部区域, 缺乏对大幅面文物的整体分析。故宫博物院目前将大幅面高光谱分析方法用于古书画文物研究^[12], 取得良好效果, 目前正在将该方法用于对唐卡、壁画等其他大幅面绘画类文物的研究。除了将高光谱成像技术用于文物研究, 也有学者在高光谱数据处理方面针对文物的特征进行了深入的探索。例如, 刘依依^[13]利用高光谱成像技术进行颜料光谱分段识别, 并对填图方法进行研究; 孙振容^[14]对彩绘文物线条提取方法进行研究。

对于文物的分析与研究,高光谱成像技术最大的优点是高效率地实现大幅面文物的扫描。但是在实际扫描过程中却发现了多个问题:第一,在扫描过程中商用高光谱相机移动不灵活,扫描范围有限,导致大幅面文物的数据获取存在难度;第二,商用高光谱相机常用的卤素灯为面光源,光照强度不均匀导致图像数据无法拼接,而且扫描过程中文物的照射时间长,文物表面温度容易升高。为了解决以上问题,故宫博物院和中国科学院空天信息创新研究院针对平面绘画类文物搭建了大幅面高光谱扫描系统,建立了传统颜料高光谱数据库,并配合 X 射线荧光面扫描技术对故宫博物院的天花彩画、唐卡以及古书画等文物进行了扫描和数据处理,从隐藏信息提取与增强、成分识别与分类两方面对隐藏病害、墨迹提取以及颜料调和工艺等进行了科学解读。

1 大幅面高光谱扫描系统的搭建

针对文物高光谱成像,特别是大幅面绘画类文物的需求,故宫博物院联合中国科学院空天信息创新研究院联合研制了一种大幅面高光谱扫描系统(见图 1)。该系统主要包括推扫式高光谱成像仪、线状光源和扫描平台,探测光谱范围为 400~2500 nm,光源与高光谱成像仪同步移动对文物进行面扫描成像。该扫描系统的最大范围为 2 m×2 m,可满足大部分大幅面绘画文物的分析需求。扫描平台在采集程序控制下自动完成高光谱数据的采集^[15]。采



图 1 研制的大幅面高光谱扫描系统

集完成后,通过相邻条带数据的拼接,实现文物整体的高光谱数据采集。

1.1 推扫式高光谱成像仪

本系统中使用的高光谱成像仪为美国 Headwall 光谱仪,其光谱范围为 400~2500 nm。该高光谱成像仪具有两个传感器,光谱范围分别为 400~1000 nm 和 1000~2500 nm。这两个传感器是共光路设计的,因此需要进行波段合成和像元配准才能够正常使用。表 1 列出了高光谱成像仪的具体参数。

1.2 线性光源

高光谱成像系统的光源类型为卤素灯,其光谱可以覆盖高光谱成像仪的采集波段。该扫描系统中使用的卤素灯与高光谱相机常用的卤素灯相比具有以下特点:第一,该光源为线性光源,使用的是匀化带状照明方式(见图 2),光照均匀性可达 90% 以上;第二,考虑到绘

表 1 成像光谱仪参数

Co-registered VNIR-SWIR 全波段高光谱成像仪			
光谱范围	VNIR(400~1000 nm)		SWIR(950~2500 nm)
光学设计	高光谱同心反射光学系统		
波长范围	400~2500 nm		
空间通道数	1600		384
空间配准像素数		384	
狭缝宽度	20 μm		25 μm
光谱采样值	1.6 nm		9.6 nm
传感器类型	sCMOS		Stirling 制冷 MCT
位深		16 bit	
最大帧率		200 fps	

画类文物的特点, 该光源在扫描过程中与成像光谱仪同时移动, 在画面停留时间很短, 避免了光源热效应对文物造成的破坏。



图 2 线光源实物及均匀照明区域

1.3 扫描平台

扫描平台是一个二维移动的自动平台。通过调整扫描速度、照明强度和成像速率的关系获取较好的近红外光谱信号和高分辨率图像。扫描速度、成像范围、帧频和曝光时间可以通过软件进行控制和调整。

该扫描系统采用了龙门架的方式, 有三个移动维度。如图 1 所示, 其中 X 轴和 Y 轴可移动的最大距离为 2 m, Z 轴可调节的最大距离为 30 cm, 主要用来调整高光谱成像仪的焦距。整个系统在软件的控制下, 可以按照“之”字形方式对文物进行扫描。扫描时, 光源的照明角度保持不变; 光源随着高光谱成像仪一起在文物上方匀速移动, 尽量保证光照的均匀性。移动路径如图 3 所示。该系统采集的条带高光谱数据亮度基本一致, 能够进行数据的拼接处理。

2 颜料高光谱数据库的建立

为实现高光谱成像技术对文物颜料的有效鉴别, 本研究建立了文物常用传统颜料的反射光谱库。该反射光谱库的各种颜料是根据中国传统颜料以及在文物上常用的颜料, 购置于德国 Kremer 公司的: 蓝色颜料包括群青、青金石、石青、靛蓝和普鲁士蓝、汉蓝、汉紫和 smalt; 绿色颜料包括氯铜矿、石绿、巴黎绿和绿土; 红色颜料包括红赭石、深色红赭石、

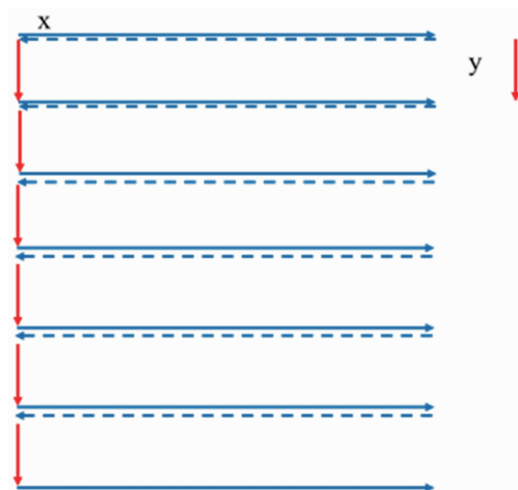


图 3 高光谱成像仪的扫描路径示意图

赤铁矿、朱砂、铅丹、茜草和胭脂; 黄色颜料包括黄赭石、雄黄、雌黄和藤黄; 白色颜料包括铅白、高岭土和碳酸钙; 黑色颜料包括炭黑和骨黑。其中, 对于石青、石绿和朱砂颜料, 都采购了四种颗粒度的颜料; 而对于赭石, 则采购了中国、摩洛哥和西班牙三个产地的颜料。

为模拟文物的颜料, 制备了颜料色块。制备方法如下: 使用 5% 的明胶水溶液与颜料混合, 然后将颜料绘制于宣纸上 (见图 4)。采用本文中的高光谱成像仪对颜料色块进行数据采集。

2.1 颗粒度和产地对光谱的影响

在传统矿物颜料中, 由于颜料制作时方法步骤不同, 制得的颜料颗粒度会有差别, 因此颜色的深浅程度也会不同。例如, 头青、二青、三青均为石青颜料, 但是颗粒度是逐渐变小的, 颜色也是逐渐变浅的。还有些颜料 (如赭石), 由于产地差别, 其有效呈色成分和其他物质的比例存在差异, 所以颜色会有些差别。为了验证颜料的颗粒度是否会影响反射光谱, 我们对不同颗粒度大小的同种颜料进行了测试, 发现其反射光谱特征峰的位置并没有发生明显改变; 同样对不同产地的同一种颜料进行了测试, 发现其光谱曲线也基本一致。这与故宫博物院李广华等人对颜料 400~1000 nm 反射光谱进行的研究结果一致^[16]。

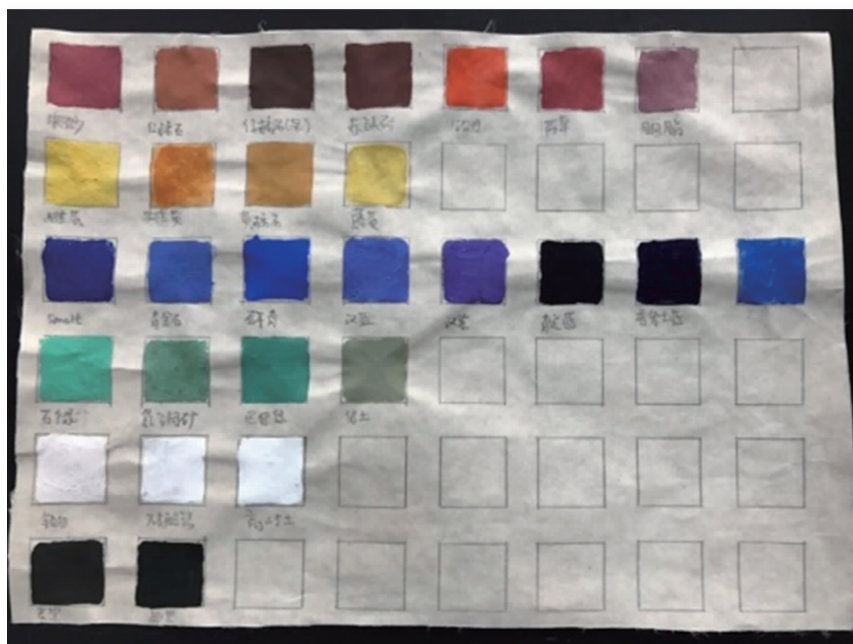


图 4 标准颜料色块

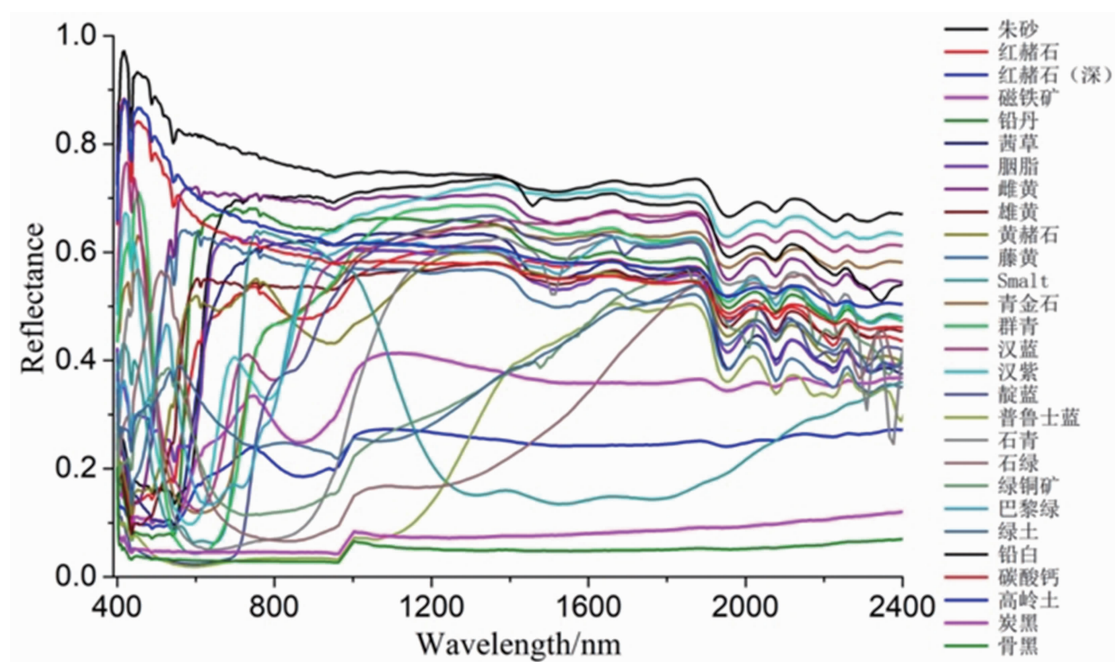


图 5 颜料光谱库

2.2 光谱数据库的建立

使用本文的高光谱成像仪对制备的颜料色块进行数据采集、预处理和波段合成,生成具有全谱段覆盖的反射光谱。利用 ENVI 软件的感兴趣区域(Region of Interest, ROI)工具,勾选颜料色块中间位置并求均值,即为该颜料的标准反射光谱。将所有颜料色块的反射光谱构建光谱数据库,如图 5 所示。

3 应用案例与讨论

3.1 文物对象

选取故宫东华门天花彩画、纸本书画《丁观鹏画不二尊者图轴》、绢本书画《沈庆兰画贴落》和唐卡《吉祥天母画佛像》作为研究对象,使用本文中研制的大幅面高光谱扫描系统对其进行扫描、数据拼接和处理。

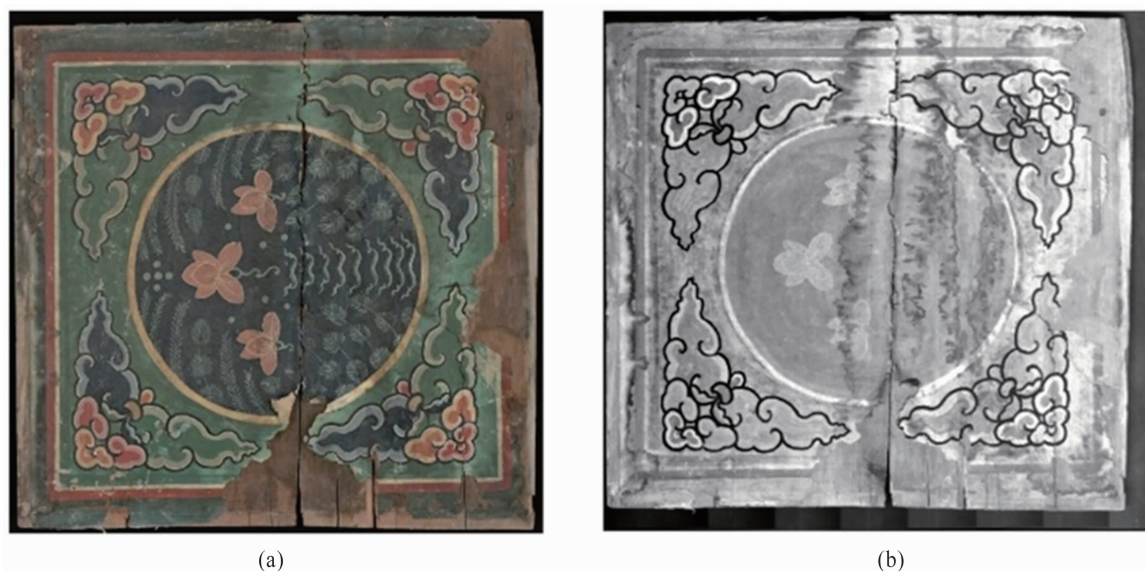


图 6 (a)故宫东华门天花彩画; (b)2300 nm 高光谱图像

东华门天花彩画原位于紫禁城东华门顶棚。东华门始建于 1420 年,是紫禁城最早的建筑之一,也是紫禁城的大门,保留了大量天花彩画。其中一部分天花彩画(见图 6(a))绘制在纸上,纸被粘贴在木板上,纹饰为红莲水草。根据其图案风格和制作工艺,推测这些天花彩画为清代遗存^[17]。

古书画《丁观鹏画不二尊者图轴》(见图 7(a))是一幅传统的纸本卷轴画,是由清代宫廷画家丁观鹏绘制的。丁观鹏擅长绘制宗教画^[18],是深受乾隆皇帝喜爱的一位宫廷画家^[19]。该画中的文殊菩萨坐在左侧,被五个菩萨环绕;由乾隆皇帝假扮的维洁摩,坐在右侧的台子上。画中展示的是文殊菩萨和维洁摩讨论佛法的故事。诗塘部位有一幅书法(见图 7(b)),由落款可知该画是于 1750 年绘制的。

唐卡《吉祥天母画佛像》为故宫博物院养心殿西暖阁佛堂悬挂供奉的 38 轴唐卡之一(见图 8),绘制于清乾隆(公元 1736~1796 年)时期,至今已有 200 多年的历史。吉祥天母^[20]是藏传佛教中最重要的女性护法神,又称“吉祥天女”、“功德天”、“骡子天王”和“宝光天女”。该唐卡画面尺幅较大,画心纵长 108.5 cm,宽 92.5 cm。

古书画《沈庆兰画贴落》是一幅绢本画

(见图 10),画面内容为中国的传统吉祥图案“华封三祝”。根据落款可知,《沈庆兰画贴落》是由冯宁、沈焕和沈庆兰绘制的。三人均为如意馆画画人。如意馆是宫中画师作画的地方,隶属于清内务府造办处。有一份名为“如意馆”的档案,负责记录宫中画家作画诸事。冯宁主要活动于公元 1805 年(嘉庆十年)之前,说明《沈庆兰画贴落》的创作起始年代很可能在嘉庆元年到嘉庆十年之间^[12]。

3.2 隐藏信息提取与增强

3.2.1 隐藏病害提取

高光谱数据往往比可见光图像包含更多的信息,特别是一些隐藏的病害。从图 6 中东华门天花彩画的 2300 nm 高光谱图像中可以看出明显的病害痕迹,通过后期显微观察判断其为污渍。由于位于深蓝色区域,肉眼很难分辨,因此通过高光谱图像将其区域识别出来,对后期该文物的清洗和保护处理具有重要的参考意义。

3.2.2 隐藏墨迹提取

对《丁观鹏画不二尊者图轴》的高光谱单波段图像进行观察,发现诗塘部位除了表面的字迹还有一些模糊不清的墨迹。为将模糊的墨迹更加清楚地显示出来,将高光谱数据经过滤波去噪处理后,分别使用基于信息成分法的主

成分分析(Principal Components Analysis, PCA)与基于光谱提纯的连续最大角凸锥(Sequential Maximum Angle Convex Cone, SM-ACC)端元光谱提取方法,识别出字画中隐藏的墨迹信息,如图 7(c)所示。

通过对墨迹的研究发现,这些墨迹位于纸背面,是一篇经文,说明这张纸是乾隆皇帝最喜欢使用的写经纸。乾隆皇帝最喜欢使用的写经纸是宋代的,后来随着宋代写经纸的不断消耗,乾隆皇帝开始命人仿造宋代写经纸。通过将宋代写经纸与乾隆时期仿宋写经纸的行距进行对比,推测《丁观鹏画不二尊者图轴》使用的写经纸是乾隆时期的仿宋写经纸。

3.2.3 底稿线提取

近红外波段具有穿透性,可以穿透大部分矿物颜料,探测到颜料底下的墨线信息。因此通过高光谱成像技术获取画面的底稿线,可以

更好地了解画面风格,让后人解读画面的绘制工艺,也可以为修复时的画面补绘提供参考。

观察唐卡《吉祥天母画佛像》近红外单波段图像,发现在 1805 nm 波长处能够获得最清晰的底稿线图像(见图 8)。将其与原图对比,发现底稿线和画面存在差异。图 8(d)所示为马匹前腿上部附近,可在近红外图像中看到一个头颅和两条缰绳,而在可见光画面中却没有明显痕迹。图 8(f)所示为马后蹄处,在近红外图像中可以看到完整的马蹄轮廓,而在实际画面上马蹄被覆盖住。这说明作者在创作过程中放弃了部分区域的设计原稿,在上色过程中并没有去除绘制好的底稿线,后来底稿线被颜料层覆盖。通过高光谱成像技术分析发现了底稿线信息和底稿改动的痕迹,还原了肉眼所看不到的底稿信息。



图 7 (a) 书画文物《丁观鹏画不二尊者图轴》; (b) 诗塘部位的乾隆御笔心经; (c) 通过高光谱图像增强处理的图像

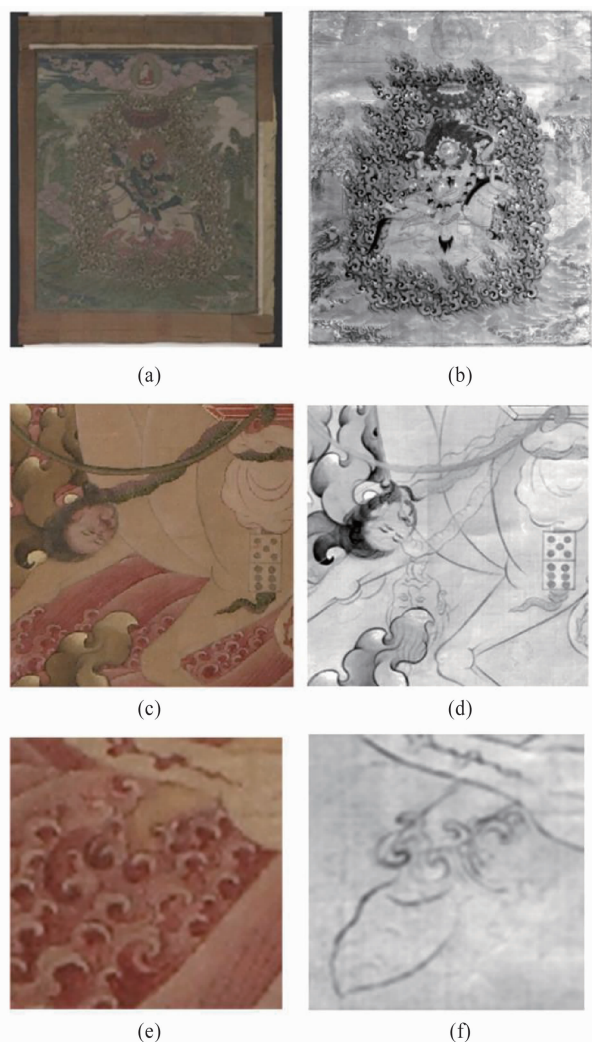


图 8 唐卡《吉祥天母画佛像》的可见光图像和高光谱图像

3.3 成分识别与分类

3.3.1 颜料鉴别与分布

对书画、壁画等绘画文物表面的颜料进行分类与识别, 首先应对高光谱数据进行预处理。采用 ROI、纯净像元指数 (Pixel Purity Index, PPI) 等方法提取样本的端元光谱。采用光谱角填图 (Spectral Angle Mapper, SAM) 等算法对文物整体进行颜料的图像分类, 得到相应的分类图; 然后比对标准颜料光谱库进行颜料识别并获得分布图。

由于唐卡《吉祥天母画佛像》保持环境不好, 表面污渍较多, 颜料比较模糊。为了方便修复人员对其进行研究和修复, 需要对其颜料进行鉴别。首先, 通过 ROI 端元提取来获得

蓝色颜料区域可见近红外反射光谱图, 将其与标准颜料库进行比对后确定为石青。它在 2200~2400 nm 区间有显著的独特光谱特征——由分子中 CO_3^{2-} 和 O-H 键的振动产生的相邻双吸收峰。然后通过光谱特征拟合 (Spectral Feature Fitting, SFF) 方法对图像光谱进行分类, 可获取图 9(a) 所示的石青空间分布图。从图中可以看出, 主尊身体、天空等区域石青含量非常高, 四周草地等区域使用了低浓度石青或混合了其他颜料。同样地, 从石绿空间分布图 (见图 9(b)) 可以看出, 石绿主要分布在菩萨的法器、绸带、植被和祥云中。这些结果为画面复杂、大幅面的唐卡文物的研究和修复提供了坚实的科学依据。

3.3.2 混合颜料工艺研究

对东华门天花彩画的高光谱数据进行拼接和预处理。通过 ROI 端元提取并与光谱库进行比对后发现, 天花彩画上有朱砂、铅白、铅丹、普鲁士蓝、氯铜矿和炭黑六种颜料。然后将光谱数据库中这六种颜料的反射光谱作为参考光谱, 利用完全约束最小二乘 (Full Constrained Least Squares, FCLS) 算法计算每种矿物颜料的分布信息和相对浓度分布 (见图 10), 发现天花彩画叉角云叠晕的区域是由铅白和朱砂、铅白和铅丹混合而成的粉色和淡橘色。为验证高光谱分析结果, 使用广域 X 射线荧光成像光谱仪和拉曼光谱仪对结果进行验证。天花彩画颜料的分布以及混合信息可以为保护修复以及复制时颜料的选取提供依据。

《沈庆兰画贴落》宽 2 m、高 3 m, 画面颜色种类很多, 其中大部分是多种颜料混合的效果。要想把所有颜色的颜料分析清楚, 如果使用点分析方法, 则工作量巨大, 而且难以得到较好的分析效果。大幅面高光谱成像系统可以同时分析颜料种类和分布范围, 并且通过数据处理得到颜料的相对浓度分布图, 可以为研究颜料的调配工艺提供很大的帮助。将扫描得到的高光谱数据使用 ENVI 软件拼接, 进行最小噪声分离变换 (Minimum Noise Fraction, MNF),

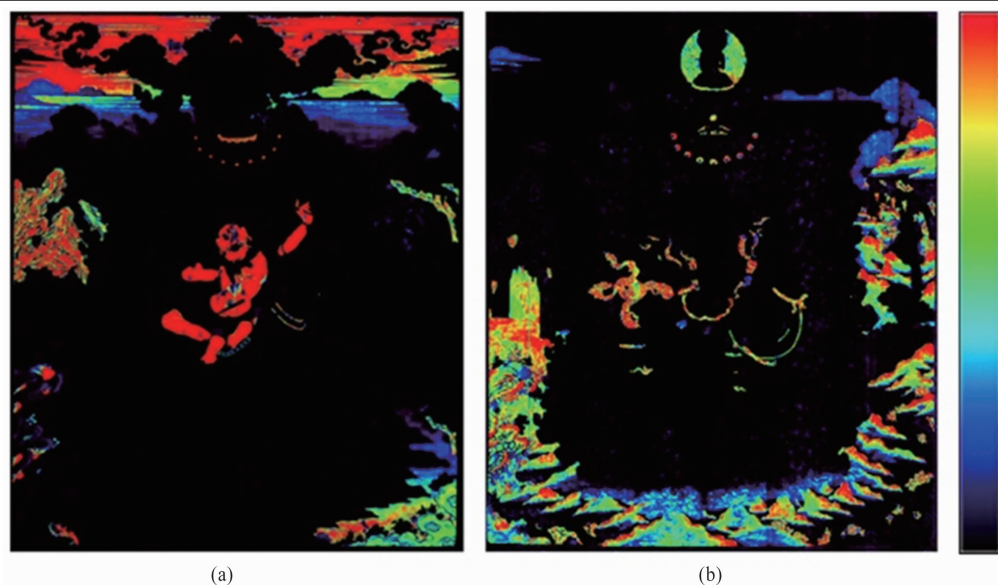


图 9 唐卡《吉祥天母画佛像》的石青和石绿分布图

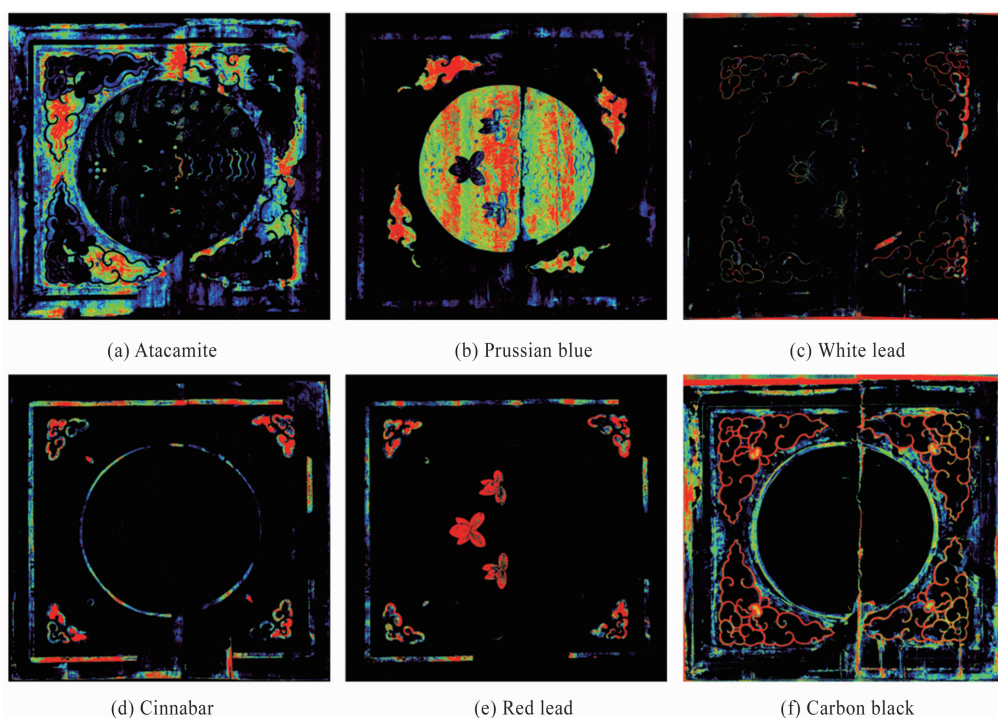


图 10 东华门天花彩画的颜料分布图

最后使用 FCLS 方法进行颜料解混，得到颜料的相对浓度分布图。部分颜料的分布图如图 11 所示。可以看出，石青主要分布在屏风、人物衣服和头冠上，其中人物衣服和头冠上有部分蓝色叠晕区域是由石青和铅白调和而成的。白色主要分布于人物面部和接近于白色的浅色区域。铅白除了用作白色颜料，还被多次用于调和其他颜料。例如，铅白与石青调和形

成淡蓝色，与石绿调和形成淡绿色，与朱砂调和显示粉色或橘色。

4 总结及展望

4.1 总结

高光谱技术具有光谱分辨率高和图谱合一的特点，并且在对文物进行数据采集时快速、无损，因此在文物研究中的应用越来越广泛。



图 11 书画文物《沈庆兰画贴落》(200 cm×300 cm)及石青和铅白分布图

在对文物表面褪色的墨迹, 绘画文物的底稿线、重绘痕迹, 文物上模糊不清的印章, 肉眼难以识别的污染物、霉菌等病害进行识别和观察时, 可采用原始或降维后的单波段图像直接观察, 或通过进一步灰度拉伸、特征提取、光谱吸收指数(Spectral Absorption Index, SAI)构建等方法进行信息提取与增强。

在对书画、油画、壁画和纺织品等文物表面的颜料和染料进行分类与识别时, 可通过与

标准光谱库比对进行初步识别, 然后对高光谱数据进行预处理。采用 ROI、PPI 等方法提取样本的端元光谱。采用 SAM、光谱信息散度(Spectral Information Divergence, SID)等算法对文物整体进行颜料和染料的图像分类, 得到相应的分类图, 并结合标准颜料光谱库进行颜料识别。

与传统的文物高光谱采集数据方式相比, 大幅面高光谱扫描系统将会发挥其技术优势,

使文物的分析与研究提升到一个新的高度。

4.2 展望

高光谱成像技术在文物上应用时具有得天独厚的优势。在未来的研究工作中,针对大幅面高光谱扫描系统,应该建立更加完善的高光谱文物数据库、更加成熟的文物高光谱数据处理流程,并结合更多无损分析方法,形成一套针对多种分析需求、适用于多种文物类型的高光谱文物分析方法体系。

致谢

感谢故宫博物院文保科技部雷勇、马越、王璐、方小季和张蕊等在文物研究中给予的帮助。

参考文献

- [1] Walmsley E, Metzger C, Delaney J K, et al. Improved Visualization of Underdrawings with Solid-State Detectors Operating in the Infrared [J]. *Studies in Conservation*, 1994, **39**: 217–231.
- [2] Delaney J K, Ricciardi P, Glinsman L, et al. Use of near infrared reflectance imaging spectroscopy to map wool and silk fibres in historic tapestries [J]. *Analytical Methods*, 2016, **8**(44): 7886–7890.
- [3] Delaney J K, Thoury M, Zeibel J G, et al. Visible and infrared imaging spectroscopy of paintings and improved reflectography [J]. *Heritage Science*, 2016, **4**: 1–10.
- [4] Haida L, Kafing K, Tom V. PRISMS: a portable multispectral imaging system for remote in situ examination of wall paintings [C]. *SPIE*, 2007, **6618**: 661815.
- [5] Cucci C, Delaney J K, Picollo M. Reflectance hyperspectral imaging for investigation of works of art: old master paintings and illuminated manuscripts [J]. *Accounts of Chemical Research*, 2016, **49**(10): 2070–2079.
- [6] 史宁昌, 李广华, 雷勇, 等. 高光谱成像技术在故宫书画文物保护中的应用 [J]. *文物保护与考古科学*, 2017, **29**(3): 23–29.
- [7] Li G H, Chen Y, Sun X J, et al. An automatic hyperspectral scanning system for the technical investigations of Chinese scroll paintings [J]. *Microchemical Journal*, 2020, **155**: 104699.
- [8] 巩梦婷, 张秋佳, 杜少飞, 等. 高光谱成像技术对宜宾市博物院藏族谱印记的分析 [J]. *文物保护与考古科学*, 2021, **33**(5): 78–84.
- [9] 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.
- [10] 武望婷, 张陈锋, 高爱东, 等. 基于高光谱技术对一幅清代画信息提取研究 [J]. *文物保护与考古科学*, 2017, **29**(4): 45–52.
- [11] 丁莉, 杨琴, 姜鹏, 等. 基于高光谱成像技术的中国古代书画研究——以中国国家博物馆藏《职贡图》(北宋摹本)为例 [J]. *中国国家博物馆馆刊*, 2022, **44**(7): 148–159.
- [12] 李广华, 陈焱, 段佩权, 等. 中国书画文物研究中的自动高光谱扫描系统应用 [J]. *中国博物馆*, 2021, **38**(2): 180–185.
- [13] 刘依依. 彩绘文物表面颜料光谱分段识别与填图方法研究 [D]. 北京: 北京建筑大学, 2020.
- [14] 孙振荣. 彩绘文物线条提取方法研究与实现 [D]. 西安: 西北大学, 2020.
- [15] 鹿旭晖. 大幅面线阵推扫型文物成像光谱系统指标优化 [D]. 北京: 中国科学院大学, 2019.
- [16] 李广华, 陈焱, 马越, 等. 光纤反射光谱在彩绘文物颜料鉴别中的应用研究 [J]. *文物保护与考古科学*, 2018, **30**(6): 96–105.
- [17] Li G H, Peng W W, Yang H, et al. Conservation research for architectural ceiling paintings in Donghua Men (the east city entrance gate), the Forbidden City, Beijing [C]. New York: International Architectural Paint Research Conference, 2017.
- [18] 聂崇正. 宫廷画家丁观鹏、丁观鹤兄弟 [J]. *紫禁城*, 2011, **32**(8): 84–93.
- [19] 张蕊. 丁观鹏《释迦及十六尊者像屏》的粉本来源及其艺术特色 [J]. *故宫博物院院刊*, 2013, **56**(6): 127–138.
- [20] 张锦秀. 雍和宫藏宫廷风格唐卡鉴赏 [J]. *艺术市场*, 2007, **6**(8): 54–55.