

天水仙人崖石窟壁画颜料层原位-无损分析研究

张 遥¹, 郭 宏¹, 杨健都², 李 博², 田进锋³, 叶荣波^{4*}

1. 北京科技大学科技史与文化遗产研究院, 北京 100083
2. 北京国文琰文物保护发展有限公司, 北京 100029
3. 天水市麦积区文体广电和旅游局, 甘肃 天水 741300
4. 云南大学, 云南 昆明 650091

摘 要 壁画是我国极为重要的文化遗产类型, 具有极高的历史价值、艺术价值、科学价值、文化价值和社会价值。颜料层作为壁画的核心价值所在, 包含古代历史文化、宗教信仰、政治经济、科学技术等多方面的信息内涵。常规的颜料层分析方法有原位无损和微损取样两种, 取样分析方法虽能满足这类珍贵、脆弱文物的研究, 但获取样品数量有限且会对本体造成不可逆转的损伤。综合运用数字成像以及光谱等分析技术对天水仙人崖石窟壁画颜料层进行工艺与制作材料研究。结果显示, 正射影像图能够真实记录壁画当前纹理信息, 色度仪可以量化表征壁画颜料的颜色, 红紫外摄影可以提取可见光下不易探查的壁画绘制线稿、修复痕迹等隐含信息, 高倍数码显微镜可观察壁画表面的微观形态及破损处的层次信息, 便携式 X 射线荧光光谱仪可检测出颜料中的元素由此判断主要显色元素, 高光谱采集所得数据与标准图谱比较后能够准确判定颜料的矿物种类。因此, 多种原位无损分析方法的联合运用, 可以减少对文物的直接干预, 亦可达到对壁画颜料层认知的目的。这些非接触式的无损检测方法, 可精细化研究壁画颜料层的色彩、物理、化学属性等内容, 是壁画现场分析的重要手段, 可在石窟寺、寺观殿堂、墓葬壁画的研究上进行推广, 发挥其应有之用。

关键词 原位-无损分析; 壁画; 颜料层; 高光谱; 仙人崖

中图分类号: K879.41 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3964/j.issn.1000-0593(2022)11-3526-07

引 言

无损检测(non-destructive testing, NDT)是指对材料或工件实施一种不损害或不影响其未来使用性能或用途的分析检测手段^[1]。文物具有不可再生性, 对于这种珍贵、脆弱的研究对象, 必须选用安全、可靠的技术进行研究。无损检测凭借不改变宏观物理性质、不造成潜在危害的优势, 被引入文化遗产的研究与保护领域^[2]。通常情况下, 为了全面研究文化遗产的性质, 采用多种不同分析方法来进行综合检测, 充分发挥不同仪器的特点和优势, 并相互印证和补充, 从而获取更为准确地研究文物产地来源、制作年代、制作工艺与材料、病害发生发展原因等物理信息和化学特性^[3]。

作为我国文化遗产重要组成的古代壁画, 不仅表现着艺术美感, 同时也承载着不同时期政治、经济、文化、宗教、历史、建筑、风俗、科技等多方面信息。对于规模宏大、结构复

杂、制作精细的壁画而言, 最大程度的保留其画面信息是文物研究的前提。这不仅需要检测手段是无损的, 通常还需要在文物原址进行。光学调查法因无需采样, 以非接触、不介入、快速性、面积大等优点越来越受到文物工作者的重视^[4]。近年来, 原位-无损检测技术, 尤其是光谱分析技术, 已成功在国内外文物调查、研究和保护中应用。在壁画等不可移动文物研究中, 便携式 X 射线荧光光谱仪、数码显微镜已成为最基本操作^[5-6]。近几年, 又增加了多光谱成像技术, 即在不同波段光源下的一种拍摄方式, 光源大体分为紫外光、可见光和红外光。多光谱成像技术已经应用到航天、天文、遥感、医疗、军事、刑侦等领域^[7]。随着波段宽度变窄、分辨率变高, 在绘画作品的调查、文物保护档案的记录、前人修复工作的评估、文物最初状态的还原、艺术品真伪的辨别、画家创作技法演变等文物形貌信息研究实例不断增加, 甚至是矿物颜料的识别方面均发挥着重要作用。综合运用各类无损检测仪器记录壁画画面特征、微观结构, 解析壁画创

收稿日期: 2021-09-01, 修订日期: 2022-04-24

基金项目: 国家重点研发计划项目(2020YFC1522404)资助

作者简介: 张 遥, 1988 年生, 北京科技大学科技史与文化遗产研究院博士研究生 e-mail: 846852743@qq.com

* 通讯作者 e-mail: 19660462@qq.com

作过程中所使用颜料的化学组成以及光谱和颜色等多方面信息。

仙人崖石窟位于天水市麦积区后川村,由三崖、六寺、五峰组成,包括西崖、东崖、南崖,木莲寺、水莲寺、花莲寺、石莲寺、灵应寺、铁莲寺,玉皇峰、献珠峰、东崖峰、西崖峰、宝盖峰。现保存有明清殿宇 27 座,房屋 54 间,以及南北朝、宋、明、清各类塑像 197 尊,壁画 460 m²。此处石窟是佛、道、儒三教合一的宗教“圣地”。

仙人崖初建于北魏中晚期,与相距 7 公里的麦积山石窟属同一时期。但由于历史、地理和生产水平等原因,仙人崖石窟并未像麦积山石窟一样有连续的宗教艺术创作。目前,仙人崖石窟中未发现西魏、北周、隋、唐时期造像,停滞 400 年左右,直至宋、元时期,才继续有所创造^[8]。

以仙人崖石窟壁画数字化勘察测绘项目为契机,对该处石窟壁画进行全面调查。利用高清影像拍摄获取壁画的形貌特征信息和图案色彩信息,使用色度仪量化壁画颜料层色彩信息;运用物质对红外光吸收差异性,提取壁画绘制底稿和修改信息;高倍数码显微镜观察壁画绘制工艺细节,进一步研究矿物颜料形态特征;使用便携式 X 射线荧光光谱仪检测颜料化学元素组成,初步判定颜料种类,再使用高光谱分析蓝色、绿色、红色等颜料的矿物种类。在此基础上,探索原位-无损分析流程,尝试建立壁画颜料层调查研究的普遍流程与工序。

1 实验部分

1.1 数字成像系统

尼康 D800E,传感器尺寸 35.9 mm×24 mm,最大像素数 3 677 万,图像最高分辨率 7 360×4 912,对焦点数 51 点。

保富图 D4 系列电源箱,以 1/10 档光圈微调,1/1 档光圈粗调,输出能量稳定性±1/100 级光圈(f-stop),色温浮动优于±150 K。灯头带有 UV-coated 磨砂玻璃罩,稳定输出 4 800 Ws 最大闪光。

Z+F IMAGER5010C 三维扫描仪,扫描范围:1~187 m,扫描速度为 10.167 万点·s⁻¹,最高分辨率 25 m 处点间隔 1 mm。

1.2 色度仪

Konica Minolta CM-700d,脉冲氙灯(含 UV 滤镜),测量时间 2 s,口径 8 mm,测量波长范围为 400~690 nm,测量波长间隔为 10 nm。

1.3 红紫外照相机

EOS 60D 的佳能数码相机,配备定焦 78 mm F3.8 镜头;猎踪专业红紫外光源,发光波长为 400~1 100 nm;成像窄带 850 和 254 nm 滤光片。

1.4 数码显微镜

日本 KEYENCE 公司 VHX-5000 型,镜头型号:VH-Z20R,倍率:20~200×,自带照明灯。

1.5 X 射线荧光光谱(XRF)

美国 Thermo Fisher Scientific 公司 NitonXL3t800,激发源:银靶,管电压 6~50 kV,管电流 0~200 μA;探测器:Si-

PIN(硅半导体探测器)。分辨率<190 eV;测试模式:土壤模式;检测时间:90 s。

1.6 高光谱相机

美国 Themis Vision Systems 公司 VNIR400H 型高光谱相机,光谱范围:400~1 000 nm,光谱宽度:0.6 nm,光谱分辨率:2.6 nm。

2 结果与讨论

2.1 表观信息

(1) 形貌信息

按照《古建筑壁画数字化测绘技术规程》(WW/T 0082—2017)对仙人崖石窟壁画进行建筑扫描及泛光正射影像采集。

对壁画所在建筑本体进行入射角大于 30°、点间距优于 3 mm 的三维扫描,台明、墙体、柱网、梁架等结构均在记录范围内,如图 1 所示。

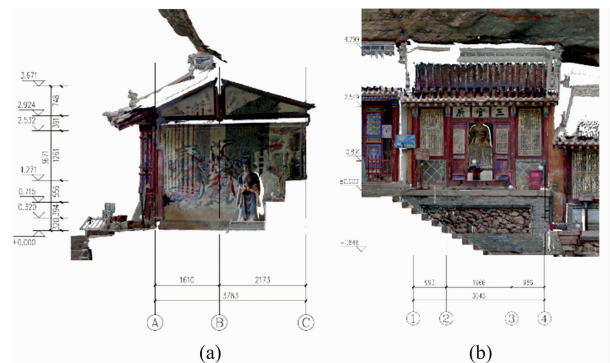


图 1 建筑点云图

(a): 剖面图; (b): 立面图

Fig. 1 Cloud map of construction points

(a): Section diagram; (b): Elevation diagram

数字成像现场工作是通过矩阵式高清晰数字摄影法,即正直多基线高清晰数字摄影法,获取文物和环境的影像信息。拍摄泛射光影像时,被摄区域布光均匀,色温在(5 500±550) K,区块各点照度差小于 10%,数码相机影像传感器侧倾角与水平面成 0°。使用色彩校准管理系统进行色彩管理,按照采集顺序进行拼接,通过透视校正和点云模型校准,最终生成高清晰影像图。本次仙人崖石窟壁画正射影像图采集分辨率 300DPI,真实记录当时色温下壁画的保存状态和病害分布情况。以三圣殿北壁壁画为例,如图 2 所示。

该幅壁画以工笔手法描绘说法与朝拜故事,笔触细腻,场景丰富,人物造型精致,人物表情传神,栩栩如生。此幅壁画存在严重的颜料层脱落、刻划、疱疹等病害。

(2) 绘制工艺

仙人崖石窟壁画山石和树木等部位采用皴、擦技法;人物主要用工笔重彩的技法,其头、手、颜面及裸露肌肤则工笔细描,人物微妙情感表达出神入化,构图、设色凝练,虽繁多而不芜杂。贴金的装饰使壁画人物服饰更为精美,典雅富丽,活灵活现,同时使画面更为庄严、肃穆,提升了壁画整体的艺术感。

对不同殿宇颜料进行观察, 表现其制作工艺的微观特征。如图 4 所示, 分别为仙人崖石窟壁画红色、蓝色、绿色、白色颜料放大 200 倍的显微状态, 颜颗粒呈团状, 色彩浓郁。



图 2 三圣殿北壁壁画泛射光正射影像图及局部图

Fig. 2 Orthographic image and local maps of the northern wall paintings of the Three Sages Temple in diffused lighting

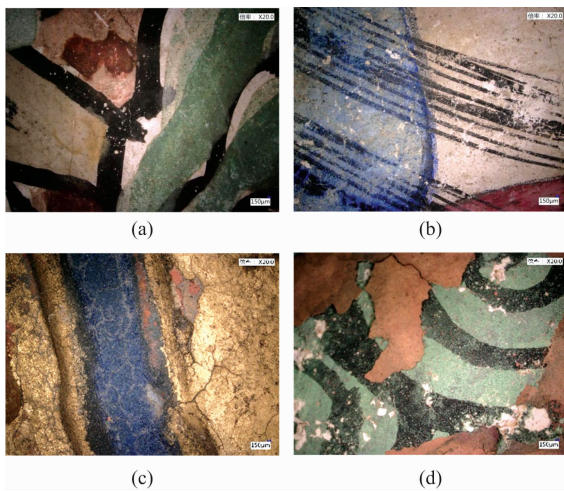


图 3 绘制工艺

(a): 先勾线后填色的绘制顺序; (b): 先填色后勾线的绘制顺序;
(c): 沥粉贴金; (d): 颜料层叠压

Fig. 3 Drawing process

(a): Checking the thread first and filling in the color;
(b): Filling in the color first and checking the thread;
(c): Gilding with leach powder; (d): Pigment layer superimposed

(3) 颜色信息

数字成像中的泛光正射影像图是基于色度学三原色颜色科学理论基础, 通过高分辨率 CCD 或成像系统以 RGB 信息表征方式所得^[9]。虽具有极高精度, 但它只能表征物质表面在特定环境与设备条件下的色彩信息, 并非壁画真实颜色信息。

Lab 是一种与设备无关的颜色显示方式, 可将颜色从一个色彩空间转换到另一个色彩空间, 加强对颜色的理性认识。测量壁画的 Lab 值, 并在高清图上详细标注色度测试点位置, 记录当前颜色信息。测量时, 选取长度大于 8 mm 的纯色区域进行, 避开壁画龟裂、起甲等区域, 防止颜料层脱

落; 同时避开严重积尘、泥渍、水渍等表面覆盖区域。

受颜料和胶结材料成分, 光照、渗水、积尘等环境因素影响, 颜料层的色彩出现变化。后期可在同一区域进行多次采集, 比对壁画颜料层色度变化, 实现壁画颜色的长期监测。

数字图像在可见光范围内获取壁画颜料层整体形貌, 更深层次的研究细节需要借助其他技术^[4, 7], 从而实现底稿墨线、纹饰修改、胶料分布等研究, 深入分析细节和表征文物整体表现特征。

(4) 隐含信息

在可见光下, 字迹或线条与周边物质具有相同的反射或透射率, 人眼无法区分。有些绘画颜料对红外光有较高的吸收性, 例如普鲁士蓝、石青、炭黑、墨汁等, 它们在红外光源的照射下, 与具有较强红外反射性的物质形成反差, 从而与周围物质区分出来^[4]。利用红外光的这一特性, 可对壁画轮廓信息、底稿信息、修补痕迹、擦除或污损笔记等进行研究。选取位于南崖的华严殿南壁壁画进行隐含信息调查。

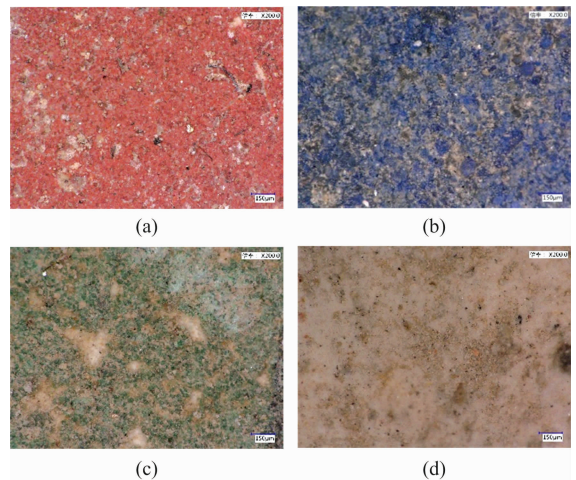


图 4 各色颜料数码显微镜放大图

(a): 红色颜料测试点; (b): 蓝色颜料测试点;
(c): 绿色颜料测试点; (d): 白色颜料测试点

Fig. 4 Digital microscope magnification of pigments by color

(a): Red pigment test site; (b): Blue pigment test site;
(c): Green pigment test site; (d): White pigment test site

该幅壁画创作于清代, 图 5 为手持宝剑的南方增长天王。对比可见光和红外光照片可知, 壁画天王腹部蓝色衣衬下面有被覆盖的铠甲鳞纹, 这和头盔处的纹饰十分相似。推测, 画匠在上色时没有按照底稿进行, 而是用颜色较深的蓝色覆盖住了原有墨线。壁画底层墨线和颜料绘制有所出入。紫外光对有机物质具有荧光效应^[7], 可以帮助调查绘画中有机胶结质或历史修复的分布情况。

图 6 为东崖罗汉堂西侧壁画, 图 6(a)为可见光照片, 图 6(b)为紫外光照片。3 人的面部、红衣袖口、白衣长袍均为白色, 但在紫外光照片中均呈现黑色; 而 3 人头饰、扇子边缘, 白衣长袍袖口处呈现亮色, 有明显的荧光反应, 此处有机胶结物质较其他区域更多。

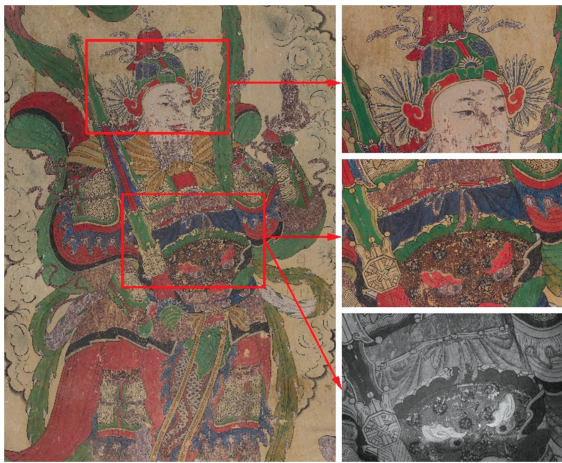


图 5 华严殿壁画底稿信息

Fig. 5 Information about the background of Huayan murals

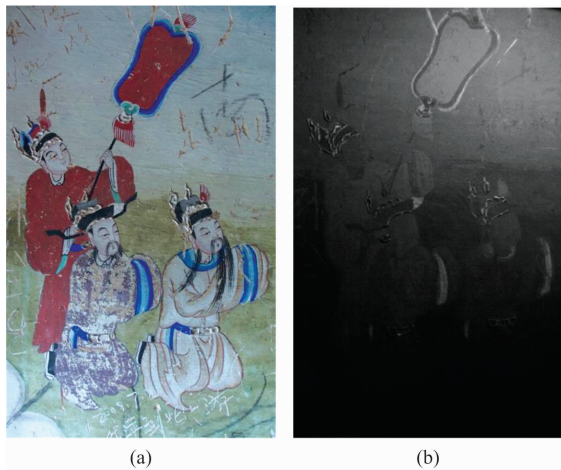


图 6 可见光与紫外光照片

(a): 可见光照片; (b): 紫外光照片

Fig. 6 Visible image and ultraviolet image

(a): Visible image; (b): Ultraviolet image

2.2 元素组成

以大雄宝殿西壁壁画为例，使用便携式 X 射线荧光光谱仪对壁画中红色、橙色、蓝色、绿色和白色进行原位测试，测定各类元素色含量，将数据归一化处理，根据显色元素推断颜料种类。由于仪器的激发能量具有一定的穿透力，在检测时会显示底层材料元素，故而各色颜料中均含有地仗层常见的 Ca, S, K, Fe 等元素。红色颜料测试点检测出 Hg 和 Fe，推测红色调色时可能使用了朱砂，无法确定铁红的使用情况。橙色颜料测试点检测出大量的 Pb 和 Fe，推测其为铅丹，无法确定铁红的使用情况。蓝色、绿色颜料测试点中全部含有 Cu，和极为少量 Fe，其中 Fe 元素可能来自地仗层。白色颜料中含有大量的 S 和 Ca，不能确定白垩或石膏的使用情况。

对于化学组成相对简单的矿物颜料，例如红色、橙色，X 射线荧光光谱可初步判定物相，但对于元素种类相近的蓝色、绿色，仅通过 Cu 和 Fe 等元素进行判定，证据不充分。

此时，需要引入其他无损检测方法确定颜料结构。

2.3 矿物种类

高光谱成像是将光谱技术与成像技术相结合，具有非接触性、无损性、成像快、测量区域广、“图谱合一”的特点^[10]，利用每种物质具有特定光谱曲线这一现象进行分析，描绘壁画的颜料组成与分布情况，为考古、艺术研究和科学保护修复提供依据。对大雄宝殿西壁壁画进行高光谱数据采集，所用光谱波段为 400~1 000 nm。

采用 ENVI 软件对所采集的数据进行最小噪声分离 (minimum noises fraction, MNF)、纯净像元指数 (pixel purity index, PPI)、*n* 维可视化 (*n*-Dvisualizer) 流程处理，提取图像区域纯净端元光谱曲线。将已提取的颜料光谱曲线与数据库光谱曲线进行比对、分析。本文所用的数据库为中央美术学院颜料厂生产颜料所测光谱曲线，包括石绿、石青、群青、朱砂、铅丹、铁红、雌黄、雄黄等标准物。由于壁画颜料层受环境影响，胶料发生老化，故测量样品的特征峰发生部分位移，属于正常现象。

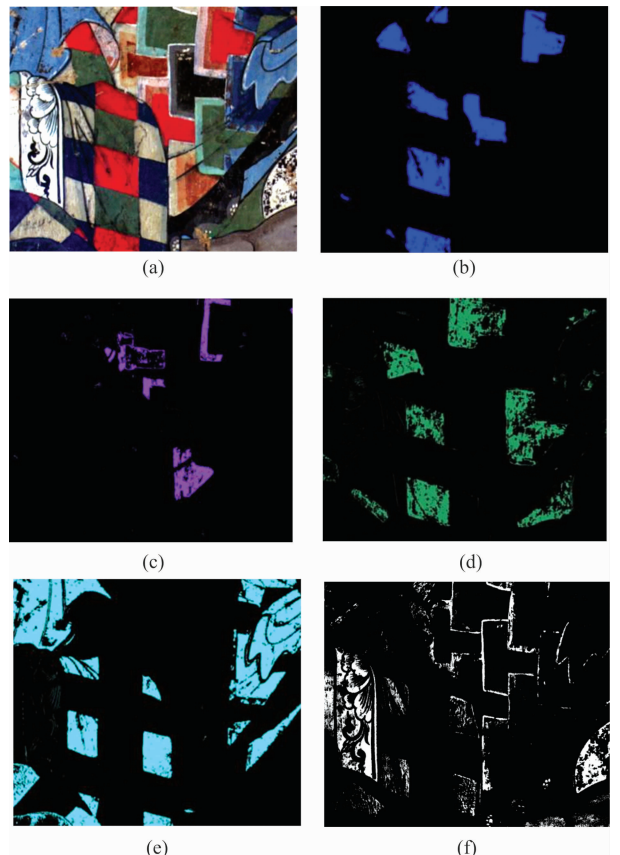


图 7 高光谱颜料采集图

(a): 采集区域; (b): 红色; (c): 橙色;

(d): 绿色; (e): 蓝色; (f): 白色

Fig. 7 Pigment collection area by hyperspectral imaging

(a): Collection area; (b): Red; (c): Orange;

(d): Green; (e): Blue; (f): White

高光谱通过计算光谱匹配度和比较光谱曲线及其一阶导数鉴定颜料种类，光谱反射率曲线与数据库匹配所得结果见

表 1。表中所示光谱角填图(SAM)、光谱特征拟合(SFF)、二进制编码(BE)的数字分别为 3 种波谱曲线拟合算法计算得到的该光谱曲线与数据库中光谱曲线的拟合值。拟合值越高,拟合算法计算的匹配度越高,所鉴定的曲线为此种物质的可能性越高^[11]。

表 1 颜料物质分析结果

Table 1 Analysis results of pigment substances

颜色	种类	化学式	Score	SAM	SFF	BE
红色	朱砂	HgS	2.569	0.902	0.669	0.999
红色	铁红	Fe ₂ O ₃	1.745	0.830	0.000	0.916
	雄黄	As ₂ S ₂	1.726	0.792	0.000	0.934
橙色	铅丹	Pb ₃ O ₄	2.598	0.750	0.867	0.980
橙色	朱砂	HgS	2.372	0.710	0.867	0.976
	铁红	Fe ₂ O ₃	2.347	0.750	0.630	0.967
石青		2CuCO ₃ · Cu(OH) ₂	2.114	0.595	0.592	0.926
蓝色	石绿	CuCO ₃ · Cu(OH) ₂	1.540	0.427	0.353	0.760
群青		2Na ₂ O · 3Al ₂ O ₃ · 6SiO ₂ · Na ₂ S	0.973	0.369	0.000	0.604
石绿		CuCO ₃ · Cu(OH) ₂	2.105	0.439	0.906	0.760
绿色	石青	2CuCO ₃ · Cu(OH) ₂	1.613	0.405	0.438	0.769
	群青	2Na ₂ O · 3Al ₂ O ₃ · 6SiO ₂ · Na ₂ S	0.660	0.263	0.000	0.397

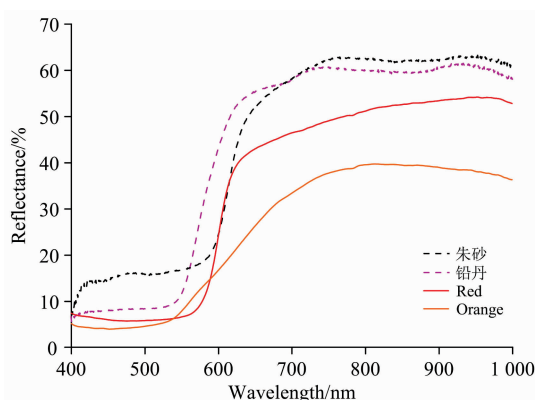


图 8 红色、橙色区域平均光谱曲线

Fig. 8 Mean spectrum of red and orange pigment

朱砂和铅丹的标准光谱曲线特征相一致,均为 585 nm 附近区域内反射率呈现陡增趋势,650 nm 后呈直线走势,但二者的一阶导数特征峰不同。朱砂的一阶导数特征峰在 610 nm,铅丹的一阶导数峰在 580 nm 左右。此处的红色颜料光谱曲线在 605 nm 处反射率呈现陡增趋势,在 645 nm 后呈现直线走势,一阶导数峰在 600 nm,判定红色颜料为朱砂。橙色颜料的光谱曲线在 595 nm 处出现反射率陡增,在 650 nm 开始呈现直线趋势,一阶导数峰在 570 nm,判定橙色颜料为铅丹。

蓝色颜料光谱曲线在 460 nm 处有一明显波峰,在 600~875 nm 区域呈现低反射率且反射率缓慢增加的趋势,900 nm 处反射率陡然增大,与石青的标准光谱曲线形状(特征峰 457 nm)基本一致,参照表 1 中的拟合值,此处蓝色颜料应为石青。绿色颜料经光谱分析鉴定后与石绿光谱的相似度最高。此处绿色颜料的峰值为 540 nm,石绿特征峰为 532 nm,

两者相匹配,参考拟合值,此处使用石绿作为绿色颜料。

白色颜料的光谱曲线在 400~1 000 nm 波段中走势相近,呈一条平缓的近似直线,无特征峰,这与光谱库中标准曲线结果一致,也与相关研究^[12]结果相一致,故而无法判定其矿物组成。

同种颜色颜料在进行比对时会出现光谱曲线形状基本相同,但反射率存在差异的现象。颜料层厚度在 0.2~1.6 mm 范围内,颜料的高光谱反射率曲线与厚度无关;颜料颗粒度在一定范围减小,其光谱反射率增大,但光谱反射率曲线的形状等关键信息没有明显改变^[13]。在后续的研究中可将颜料颗粒度差异性纳入探究范围。

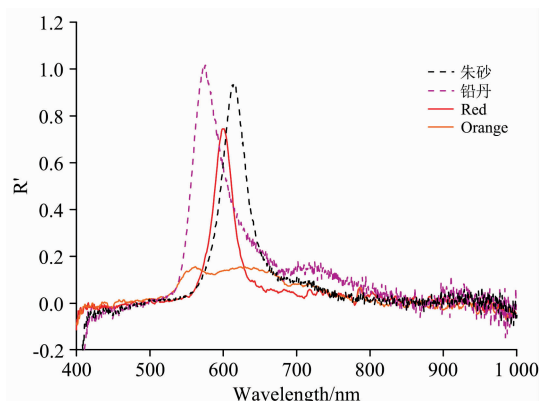


图 9 红色、橙色颜料一阶导数曲线

Fig. 9 First derivative curve of red and orange pigment

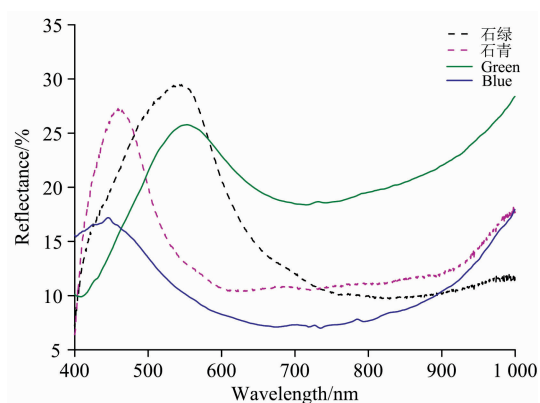


图 10 绿色、蓝色区域平均光谱曲线

Fig. 10 Mean spectrum of green and blue pigment

2.4 原位-无损分析流程

以仙人崖石窟壁画颜料层为对象,进行了原位-无损数据采集及分析研究工作,基本确定了颜料层工艺及制作材料研究的工作流程,如图 11 所示。

首先使用三维激光扫描仪获取壁画载体的结构和尺寸;通过数码摄影方法获取图像、病害、绘制技法等信息;色度仪记录画面色彩,并可以此开展色彩监测工作。显微镜通过放大画面获取绘制技法和颜料形貌;红外照相透过表层明确底稿墨线,紫外照相获取有机胶结质的分布情况;X 射线荧光光谱测定颜料元素后,可初步判定矿物种类,对于不确定

的颜料可进一步使用高光谱判定矿物种类。以此完成颜料的工艺与制作材料分析,为后续文物研究、文物保护提供科学依据。

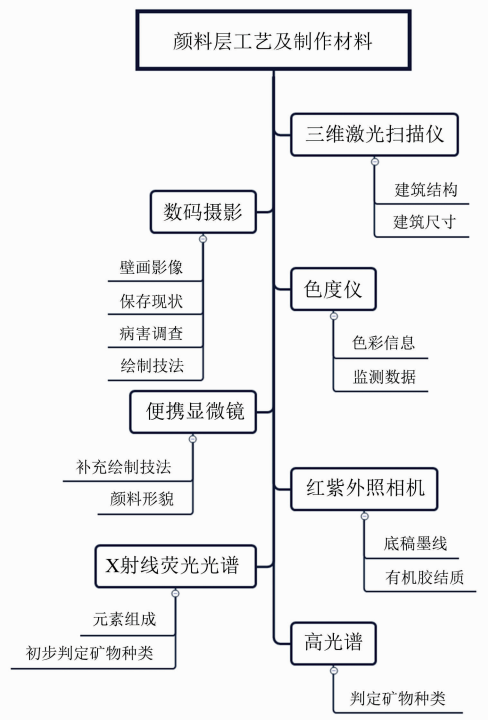


图 11 颜料层原位-无损分析流程图

Fig. 11 Flow chart of pigment layers by nondestructive in-situ analysis

3 结 论

将多种原位-无损分析技术,正射光影像拍摄、色度测量、红紫外摄影、数码显微镜、X射线荧光光谱、高光谱等技术应用于壁画颜料层的研究中,获得壁画形貌信息、颜料

显微形态、元素组成和矿物种类等分析结果。多种技术的综合运用可相互印证、补充,全面揭示壁画颜料层所蕴含的时代特点、工艺技法、宗教信仰、艺术审美等内容,充分认识壁画所承载的价值,为考古提供实物依据,实现文物保护的科学修复。

(1)仙人崖石窟壁画绘制精美,笔触细腻,皴、擦技法丰富故事场景,晕染、勾线等工笔手法细描人物头部、手部、面部、肌肤等处。

(2)提取壁画底稿以及绘制时修改的痕迹,探讨变更意图。此类隐藏信息有助于研究壁画的绘画风格、创作目的,也可为绘画时代判定提供依据。

(3)画匠在壁画创作中使用矿物颜料混合胶黏剂进行填色。其中,大雄宝殿西墙壁画红色颜料为朱砂、橙色颜料为铅丹、蓝色颜料为石青、绿色颜料为石绿,白色颜料暂未检出。

(4)各类原位-无损检测技术均存在自身的局限性,需多种技术的综合运用,提高研究精度,通过相互补充和印证才能实现壁画颜料层信息的准确分析。其中,高光谱成像技术在矿物种类的判定上具有较大优势,但由于文物的多样性以及已有研究的局限性,目前仍存在标准数据库种类不完全的问题,有待完善。同时,混合颜料配比的分析方法也应尽快开展。

(5)将壁画颜料层原位-无损分析过程进行系统化、规范化、程序化,建立壁画颜料层调查研究的普遍流程与工序。借助多种原位检测技术的安全性、可靠性、快速性,实现壁画颜料层的无损检测和全面信息解读。原位-无损光谱技术作为理想的壁画颜料层分析技术,工作流程简便,可广泛应用,推动我国古代壁画及文化传播研究。

致谢:在使用原位-无损光谱技术手段研究仙人崖石窟古代壁画颜料层时,得到了天水市麦积区文体广电和旅游局、仙人崖石窟保护管理所的大力支持与指导,在此表示衷心感谢。

References

- [1] The National Standard of the People's Republic of China(中华人民共和国国家标准). GB/T 20737—2006/ISO/TS 18173: 2005 Non-Destructive Testing—General Terms and Definitions(无损检测通用术语和定义).
- [2] TIAN Xing-ling, ZHOU Xiao, GAO Feng(田兴玲,周霄,高峰). Nondestructive Testing(无损检测), 2008, (3): 178.
- [3] ZHAO Lin-yi, LI Yan-fei, FAN Yu-quan, et al(赵林毅,李燕飞,范宇权,等). Dunhuang Research(敦煌研究), 2010, (6): 69.
- [4] ZHANG Yao, LI Bo, ZHENG Yu, et al(张遥,李博,郑宇,等). Spectroscopy and Spectral Analysis(光谱学与光谱分析), 2020, 40(11): 3628.
- [5] Giovanni Paternoster, Raffaele Rinzivillo, Felice Nunziata, et al. Journal of Cultural Heritage, 2005, 6(1-3): 21.
- [6] CUI Qiang, ZHANG Wen-yuan, SU Bo-min, et al(崔强,张文元,苏伯民,等). Dunhuang Research(敦煌研究), 2010, (6): 77.
- [7] CHAI Bo-long, WANG Xiao-wei, TANG Ai-ling, et al(柴勃隆,王小伟,汤爱玲,等). Dunhuang Research(敦煌研究), 2008, (6): 54.
- [8] DONG Yu-xiang(董玉祥). Dunhuang Research(敦煌研究), 2003, (6): 32.
- [9] LIANG Jin-xing, WAN Xiao-xia, SUN Zhi-jun, et al(梁金星,万晓霞,孙志军,等). Dunhuang Research(敦煌研究), 2017, (1): 132.
- [10] Sun M, Zhang D, Wang Z. Scientific Reports, 2015, (5): 371.
- [11] DENG Shu-bin, CHEN Qiu-jin, DU Hui-jian, et al(邓书斌,陈秋锦,杜会建,等). Enviremote Sensing Image Processing Method(ENVI 遥感图像处理方法). Beijing: Higher Education Press(北京:高等教育出版社), 2014. 338.
- [12] GONG Meng-ting, FENG Ping-li(巩梦婷,冯萍莉). Proceedings of the Ninth Annual Conference of China Cultural Relics Protection

Technology Association(中国文物保护技术协会第九次学术年会论文集). China Cultural Relics Protection Technology Association, Chongqing Municipal Bureau of Cultural Relics(中国文物保护技术协会、重庆市文物局), 2016. 453.

- [13] MAO Zheng-ke, ZHANG Wen-yuan, YU Zong-ren, et al(毛政科, 张文元, 于宗仁, 等). Materials Science and Engineering of Powder Metallurgy(粉末冶金材料科学与工程), 2017, 22(3): 429.

The Application of Nondestructive In-Situ Analysis on the Murals of the Xianrenya Grottoes in Tianshui

ZHANG Yao¹, GUO Hong¹, YANG Jian-du², LI Bo², TIAN Jin-feng³, YE Rong-bo^{1*}

1. Academy of History of Science Technology and Cultural Heritage, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China
2. Beijing Guowenyan Conservation and Development of Cultural Heritage Co., Ltd., Beijing 100029, China
3. Maiji Cultural Relics Bureau in Tianshui, Tianshui 741300, China
4. Yunnan University, Kunming 650091, China

Abstract The mural is an extremely important type of cultural heritage in China, with historical, artistic, scientific, cultural, and social value. The paint layer is the core value of the mural cultural relic, which contains important information and connotation of the ancient history and culture, religious belief, political economy, science and technology. The conventional and research methods are divided into nondestructive in-situ analysis and micro damage sampling. Although the sampling analysis method can satisfy the research of this precious and fragile cultural relics, the number of samples obtained is limited, and it causes irreversible damage to the noumenon. This paper uses digital imaging and spectral analysis to analyze the material and technology of the paint layers of Xianrenya grottoes in Tianshui. The results show that orthographic image can record the texture morphology information of the murals. Colorimeter can quantify the color of the pigments. Infrared-ultraviolet photography can extract hidden information such as drawing lines and repairing traces of murals which are not easy to detect under visible light. High-power digital microscope can observe the micro morphology of the mural surface and the hierarchical information of damaged parts. Portable X-ray fluorescence spectrum can detect the color elements in the murals. After comparing the data collected by Hyperspectral with the standard spectrum, the mineral types of the pigment can be accurately determined. Therefore, using various kinds of nondestructive in-situ analysis can reduce the direct intervention on cultural relics and achieve the purpose of understanding the material and technology of the paint layers of murals. These non-contact and non-destructive testing methods can study the color, physical and chemical properties of the paint layer of murals systematically. They are all important and rapid means of nondestructive and in-situ analysis murals. They can be widely used in the study of grottoes, temples and tombs.

Keywords In-situ nondestructive analysis; Murals; Paint layer; Hyperspectral imaging; Xianrenya Grottoes

(Received Sep. 1, 2021; accepted Apr. 24, 2022)

* Corresponding author