

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.20251225002

石窟造像不当妆彩清理工艺与效果评估研究： 以四川南江石飞河摩崖造像为例

尚雪健^{1,2}, 刘建成^{1,2}, 谢振斌^{2,3}, 黎俊豪^{1,2}, 郭国良⁴, 杨计泽^{1,2},
郑逸轩^{1,2}, 韩 明^{1,2}

(1. 四川省文物考古研究院, 四川 成都 610041; 2. 石窟寺保护与传承四川省文化和旅游厅重点实验室, 四川 成都 610041; 3. 四川博物院, 四川 成都 610071; 4. 南江县文物保护研究中心, 四川 巴中 636699)

摘要:近年来,四川偏远地区中小石窟造像不当妆彩常有发生。以2023年被当地群众不当妆彩与局部重塑的南江石飞河摩崖造像为例,为清除造像表面遮盖力强、透气性差、颜色艳丽且外观极不协调的不当妆彩与重塑层,恢复造像的原貌以展示其真实的价值信息,通过现场调查、取样分析及现场试验等研究不当妆彩与重塑层的成分、结构及制作工艺,采用物理、化学、热蒸汽、超声振动等4种方法展开清理试验,并评估不同方法的清理效果。结果表明:石飞河摩崖造像妆彩颜料以丙烯酸有机合成颜料为主,厚度约0.01~0.2 mm,妆彩方法主要为喷涂和刷涂,喷涂颜料薄厚不均、表面有颗粒感、边缘有明显的散射现象,刷涂颜料显微结构更致密、透水性差且眩光明显;重塑材料为无水硫酸钙和二水合硫酸钙为主的石膏粉,其硬度较低,与造像表面存在空隙。对妆彩颜料以化学清理为主,而重塑层以超声振动清理为主,再辅以物理清理和热蒸汽清理的复合清除工艺具有最佳效果,且不会损伤造像本体。该案例为其它石窟造像近现代不当妆彩的清理保护与效果评估提供了可借鉴的方法。

关键词:四川石窟造像;不当妆彩;清理工艺;保护效果评估

中图分类号: K879.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2026)03-0492-14

Research on Cleaning Process and Effect Evaluation of Improper Repainting of Grotto Statues: A Case Study of Shifeihe Grotto Statues in Nanjiang County, Sichuan Province

SHANG Xuejian^{1,2}, LIU Jiancheng^{1,2}, XIE Zhenbin^{2,3}, LI Junhao^{1,2}, GUO Guoliang⁴,
YANG Jize^{1,2}, ZHENG Yixuan^{1,2}, HAN Ming^{1,2}

(1. Sichuan Provincial Institute of Cultural Relics and Archaeology, Chengdu 610041, China;
2. Key Laboratory of Conservation and Inheritance of Cave Temple, Sichuan Provincial Department of Culture and Tourism, Chengdu 610041, China; 3. Sichuan Museum, Chengdu 610071, China; 4. Nanjiang County Research Center for Cultural Heritage Conservation, Bazhong 636699, China)

Abstract: In recent years, improper repainting of small- and medium-sized grotto statues has frequently occurred in remote areas of Sichuan Province. Taking the Shifeihe Grotto Statues in Nanjiang County, which were improperly repainted and partially reshaped by local people in 2023, as an example,

* 收稿日期:2025-12-25;修回日期:2026-02-03

作者简介:尚雪健(1998—),女,硕士。主要从事岩土质文物保护研究。E-mail: SXJSXJ192410@163.com

通信作者:刘建成(1990—),男,副研究馆员。主要从事岩土质保护研究。E-mail: liujc90@163.com

this study investigated the composition, structure, and fabrication techniques of the improper repainting and reshaped layers through field investigation, sample analysis, and on-site tests in order to remove the improper repainting and reshaped layers, which had strong covering power, poor air permeability, bright colors, and highly discordant appearance, and to restore the original appearance of the statues so that their authentic value could be presented. Four methods, namely physical cleaning, chemical cleaning, hot-steam cleaning, and ultrasonic vibration cleaning, were used for cleaning tests, and the cleaning effects of different methods were evaluated. The results showed that the repainting pigments on the Shifeihe Grotto Statues were mainly acrylic synthetic pigments with a thickness of about 0.01-0.2 mm. The repainting was mainly applied by spraying and brushing. The sprayed pigments were uneven in thickness, had a granular surface, and showed obvious scattering at the edges, whereas the brushed pigments had a denser microstructure, poor water permeability, and obvious glare. The reshaping material was gypsum powder mainly composed of anhydrous calcium sulfate and calcium sulfate dihydrate, which had low hardness and interfacial gaps with the statue surface. A combined cleaning process using chemical cleaning as the main method for the repainting pigments and ultrasonic vibration cleaning as the main method for the reshaped layer, supplemented by physical cleaning and hot-steam cleaning, achieved the optimal effect without damaging the statues. This case provides a reference method for the cleaning, conservation, and effect evaluation of modern improper repainting on other grotto statues.

Keywords: grotto statues in Sichuan; improper repainting; cleaning process; conservation effect evaluation

0 引言

四川现存石窟造像2 134处,其中有近现代不当妆彩的多达五百余处,大多妆彩活动给石窟造像的原貌展示、价值阐释与本体保护都带来不利影响^[1]。石飞河摩崖造像位于四川巴中,地处交通不便的偏远山村,直至2021年被发现,现有研究成果较少,仅见一篇调查简报^[2]。2023年11月,当地群众对造像重新妆彩和局部重塑,不当妆彩层不仅掩盖了造像本体的信息,还可能引发文物次生病害,同时重塑区域缺乏修复依据。此次妆彩活动极大程度改变了造像外观,严重影响了造像的价值内涵和保护利用。因此,有必要展开对石窟造像近现代不当妆彩的清理工艺与效果评估研究。

石窟造像等石质文物本体研究在失稳、渗水和风化机理与治理等方面已有显著成果^[3-5],表面清洗方法及相关应用研究也较为广泛,清洗对象涉及粉尘、烟熏、水泥、盐碱结晶、地衣苔藓、石膏壳层、雨迹水渍、油烟污物、鼠雀秽物、涂鸦划痕等表面污染物^[6-7],文物材质有砂岩、大理石、汉白玉、白云岩等^[8-11];清洗技术包括物理清洗、化学清洗、生物清洗

等常规清洗技术^[12-14],以及借助特殊设备的蒸汽清洗、激光清洗、微粒子喷射清洗、空化射流清洗等特殊清洗技术^[15-18];清洗前后可通过宏观与显微形貌观察,检测石质文物表面色度、粗糙度、力学强度等参数评估清洗效果^[19-21]。近年来,结合物理清洗、化学清洗和蒸汽清洗等多种技术的应用研究在云冈石窟^[21-22]、大足石刻^[23]、齐云山摩崖石刻^[24]、蒲江石窟^[25]等已有试验,并有效清除了岩体表面的粉尘、油烟、盐碱、微生物和字迹刻画等污染物,石质文物表面清洗越来越趋向采取多种清洗技术实施综合治理和精细处理。

近年来,部分学者开始关注石质文物表面近现代不当妆彩的特征和清除方法,郭建波、韩明、张孜江等^[1,26-27]对四川地区部分石窟造像近现代妆彩现状进行调查与取样分析,魏忠武等^[28]以浙江石窟寺及石刻为例研究得出漆类涂层对露天石质文物受盐害侵蚀有一定防护作用,但对文物本体原真性影响较大,而且对岩体表层存在老化破坏作用。张孜江等^[29]曾公开一种以双氧水为促进剂、十六烷基三甲基溴化铵为表面活性剂的专用材料,用于去除石质文物表面油漆;何静^[30]梳理了去除石质文物表面喷漆等材料常见的化学、物理和生物方法,分析了

各类方法的优势与局限。综上,对石窟造像表面喷漆涂料等近现代不当妆彩的针对性研究仍较少见,还缺乏对不同类型近现代不当妆彩的清理材料、清理工艺的探讨及清理效果的跟踪评估,已有方法对清除石窟造像表面近现代不当妆彩的适用性与清理效果还有待探究。

本研究以石飞河摩崖造像为例,现场调查石飞河摩崖造像不当妆彩后的保存现状,结合超景深显微观察、扫描电镜能谱分析、X射线衍射分析和拉曼光谱分析等取样研究造像本体及不当妆彩的特征信息;基于对国内外石质文物表面污染物清洗研究成果的梳理,通过室内妆彩清理模拟实验与现场试验筛选安全有效的清理工艺,并通过目视观察与显微观察色度、硬度、粗糙度及清理时长等指标评估清理效果。研究提出清除石飞河摩崖造像不当妆彩与重塑层的方法程序,为恢复石飞河摩崖造像的原貌与保护造像本体价值信息等提供支撑,同时为其它石窟造像的不当妆彩清理保护研究提供借鉴。

1 研究内容与方法

1.1 研究区概况

石飞河摩崖造像位于四川省巴中市南江县赤溪镇金银村,地处连接川陕地区的历史交通要道米仓道旁侧,造像开凿在南江左岸二级阶地的两块孤石上,分为A区和B区,两区相距15 m,开凿面积共约30 m²,造像整体规模较小,向西距南江和244国道一百余米,向东及周边为村庄农田(图1)。



图1 石飞河摩崖造像位置示意

Fig.1 Schematic diagram of location of Shifeihe Grotto Statues

造像所在孤石岩体系下白垩统白龙组(K₁b)灰白色长石砂岩,境内地形平缓,地质环境较稳定,为低山丘陵和河流等地貌类型,气候属亚热带季风型湿润气候,夏季降水集中且降水量大,造像曾受到

过洪水冲蚀破坏。2010年当地群众出资在A区搭建简易彩钢保护棚遮蔽风雨,一定程度上延缓了造像表面风化,此次不当妆彩后当地使用封闭式彩钢棚临时保护,造像暂未开放展示。

造像始凿于北魏晚期,唐代有所续凿,现存造像碑1通,造像龕16个^[2]。此次不当妆彩主要分布于A区和B区9号龕,妆彩面积约12.02 m²;局部重塑主要在A区部分造像头部、颈部、胸部等位置,重塑覆盖造像的表面积约0.92 m³,不当妆彩和重塑前后照片如图2所示。据历史照片和走访:9号龕曾在20世纪90年代被涂刷妆彩、补塑过主尊佛和弟子造像的头部,现有颜料有重层现象,其它龕窟未见明显历史妆彩痕迹。



图2 石飞河摩崖造像不当妆彩与局部重塑前后

Fig.2 Shifeihe Grotto Statues before and after improper repainting and partial reshaping

1.2 样品信息

本研究样品分为文物表面不当妆彩样品、重塑样品和模拟实验样品。不当妆彩样品和重塑样品采集自石飞河摩崖造像表面,共6个,编号Y1~Y6,样品信息与分析检测项目见表1。

模拟实验样品基材为3块造像周边岩性相同的风化砂岩块体,为减少对风化岩块的再次干扰,未做切割处理。依据走访和现场调查结果,选择与此

次不当妆彩和重塑一致的材料制备样品,并用面积分布最广的红色颜料模拟妆彩,具体过程为:在2块砂岩块体划分出16个4 cm×5 cm的实验区,用毛刷、镊子清理掉表面浮土和苔藓等附着物后,8个实验区用温莎牛顿大红色丙烯酸颜料刷涂红色,编号

M1~M8;8个实验区用三和牌罐装大红色手摇自动喷漆喷涂红色,编号M9~M16,再将样品置于室内通风处风干备用。1块砂岩块体表面清理后划分出3个实验区,编号SG-1~SG-3,上覆1~2 cm的石膏层,用于模拟造像本体的局部重塑(图3)。

表1 石飞河摩崖造像样品及分析检测信息表
Table 1 Information of samples and analytical testing of Shifeihe Grotto Statues

编号	颜色	工艺	取样位置	检测分析项目			
				SDM	SEM	XRD	Raman
Y1	红色	刷涂	A区正面石碑南侧佛造像衣袖处	✓	✓	—	✓
Y2	绿色	刷涂	A区背面主尊佛像胸部	✓	✓	—	✓
Y3	金棕色	刷涂	A区正面石碑南侧佛造像胸部	✓	✓	—	—
Y4	肉色	刷涂	A区背面主尊佛像足部	✓	✓	—	—
Y5	红色	喷涂	B区9号龕右侧力士造像表面	✓	✓	—	—
Y6	灰色	局部重塑	A区正面石碑南侧佛造像胸部	✓	✓	✓	—

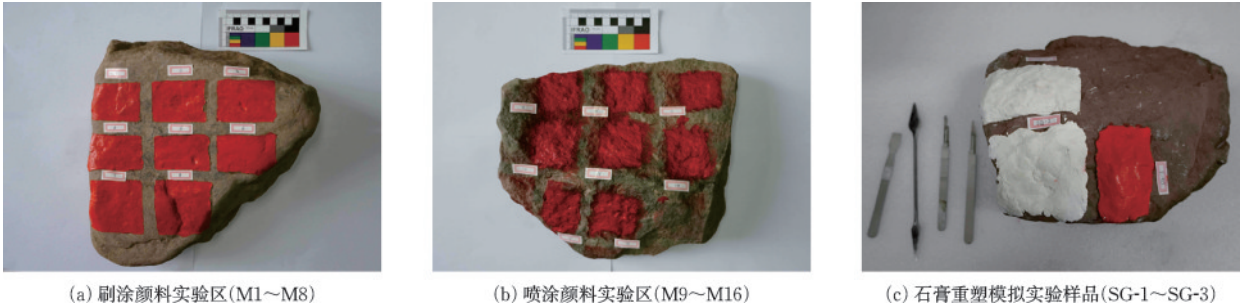


图3 模拟实验样品照片
Fig.3 Photos of simulated experimental samples

1.3 仪器与方法

1.3.1 检测分析方法

先用超景深显微镜观察样品表面的显微结构和工艺特征,再用X射线衍射仪、拉曼光谱仪分析样品成分,最后选取部分喷涂、刷涂颜料样品和重塑样品,表面喷金处理后,进行扫描电镜和能谱分析。实验均在四川省文物考古研究院三星堆实验室完成。仪器与测试条件如下。

超景深显微镜(SDM):日本KEYENCE公司VHX7000超景深显微镜,放大倍数可达6 000倍,可用于样品高精度观察、拍照、测量和图像拼接。

激光共聚焦拉曼光谱仪(Raman):日本HORIBA公司LabRAM Soleil型激光共聚焦拉曼光谱仪,物镜放大倍率分为50倍,红色颜料测试的激光波长638 nm,绿色颜料测试的激光波长532 nm,信号采集时间5~8 s,测量范围100~2 000 cm⁻¹。

X射线衍射仪(XRD):日本理学公司SmartLab SE型X射线衍射仪,扫描范围5°~75°,步长0.02°,扫描速度5°/min,电压40 kV,电流40 mA。

扫描电镜-能谱联用仪(SEM-EDS):德国ZEISS公司Evo18型扫描电镜-能谱联用仪,工作电压15~20 kV,WD=8~10 mm,信号类型HDBSD。

1.3.2 模拟实验方法

采用物理清理、化学清理、热蒸汽清理和超声振动清理4种方法,通过剔除、刮除、刷除和贴敷等工艺展开模拟样品的清理试验,筛选出清理效果佳的单一方法再进行组合方法的清理实验,实验方法见表2。本次实验所用工具、试剂、仪器及测试条件如下。

物理清理采用手术刀、竹签、镊子、洗耳球和软毛刷等工具。

化学清理分别用到以丙酮、四氯化碳、乙酸丁酯、苯甲醇、γ-戊内酯、多效脱漆溶媒为主要成分的6类清理材料,依次编号为材料1~6。其中,苯甲醇

表 2 妆彩与重塑模拟样品清理实验

Table 2 Cleaning experiments of simulated samples for repainting and reshaping

编号	清理工艺	操作方法	备注
M1、M9	热蒸汽清理	使用热蒸汽枪斜向喷射与击破妆彩颜料层,喷射距离约 3~5 cm,辅以软毛刷刷除软化的颜料碎片,再用滤纸吸干残留水分	—
M2、M10	超声振动清理	使用 1~5 档中低档位的超声波洁牙机缓慢击碎与剔除颜料层,辅以软毛刷刷除颜料碎片	—
M3、M11	材料 1 清理	使用胶头滴管将材料滴注于颜料层表面,静置 5~10 min 待颜料层软化后,辅以无纺布吸附和棉签擦除颜料及材料混合物	—
M4、M12	材料 2 清理	同材料 1 操作方法	—
M5、M13	材料 3 清理	同材料 1 操作方法	—
M6、M14	材料 4 清理	同材料 1 操作方法	化学清理与评估后,再用热蒸汽清理与评估
M7、M15	材料 5 清理	将凝胶材料贴敷于颜料层表面,使用纸胶带贴合固定,贴敷 1 h 后,辅以无纺布吸附和棉签擦除已软化剥离的颜料	—
M8、M16	材料 6 清理	将材料均匀喷涂于颜料层,静置 2~3 min 待颜料层软化后,辅以镊子剔除和棉签擦除已软化剥离的颜料及材料混合物	—
SG-1	物理机械清理	使用手术刀沿重塑层与岩体边缘缓慢撬动与刮除重塑层,辅以软毛刷刷除石膏碎块	—
SG-2	超声振动清理	使用 1~5 档中低档位的超声波洁牙机逐层缓慢击碎重塑层,辅以软毛刷刷除石膏碎块	—
SG-3	物理机械清理	使用手术刀逐层缓慢刮除重塑层,辅以软毛刷刷除石膏碎块	石膏上刷涂红色颜料

类材料 4 由四川博物院研发,需现配现用^[29];γ-戊内酯类材料 5 是由重庆市文物考古研究院等研发的凝胶材料,需贴敷使用^[31];多效脱漆溶媒类材料 6 选用三和牌罐装多效脱漆剂。

热蒸汽清理采用德国 KARCHER 公司 DE4002 型蒸汽清洁机,配合集中喷射高温蒸汽的强力喷头,蒸汽压力最大 3.2Bar。

超声振动清理采用瑞士 EMS 公司 PIEZON 150 型超声波洁牙机,超声波输出功率 8 W,频率 24~32 Hz,档位选择 1~5 档中低档位。

其它材料工具包括无水乙醇、超纯水、无纺布、滤纸、胶头滴管、电子天平等。

1.3.3 清理效果评估方法

参考《石质文物保护修复方案编写规范》(WW/T 0007—2007)^[20]附录 A,本次实验通过观察与检测模拟实验样品妆彩与重塑前后的直观视觉特征、显微结构特征、色度、硬度、粗糙度和操作时长,评估

不同工艺方法的清理效果。

显微观察使用北京爱迪泰克科技有限公司 any-ty 系列 3R-MSBTVTY 型便携式显微镜,色度检测使用日本柯尼卡美能达 700D 型色差仪,硬度检测使用瑞士 Equotip 公司 500leebD 型里氏硬度,粗糙度检测使用东莞三量公司 RS-310 表面粗糙度检测仪。

2 实验结果及分析

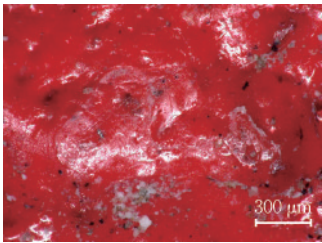
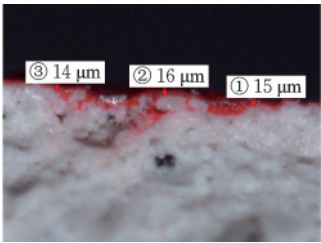
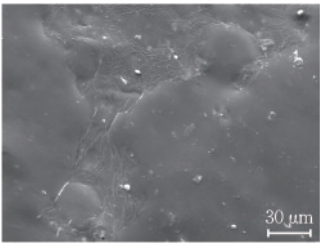
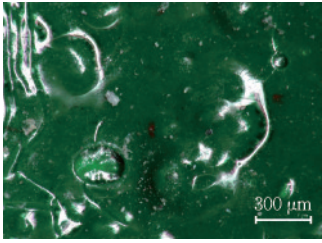
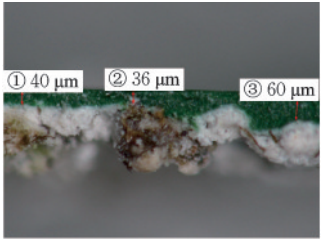
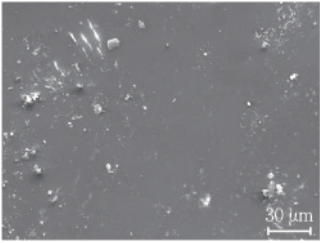
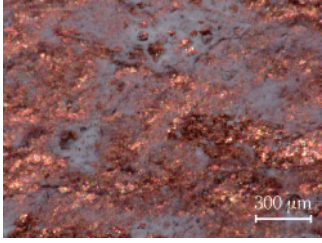
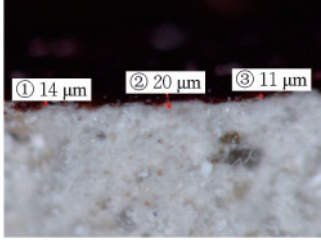
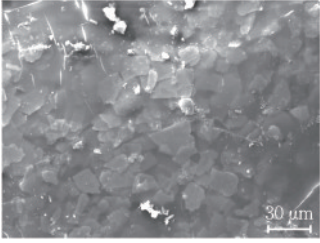
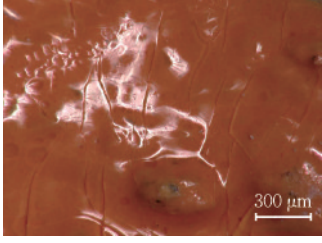
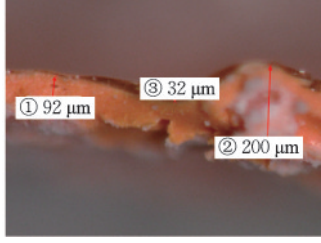
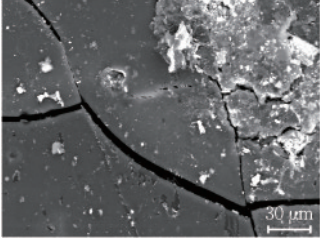
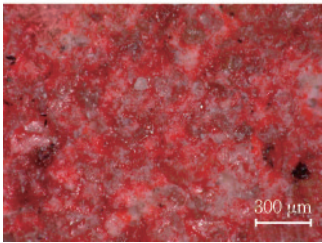
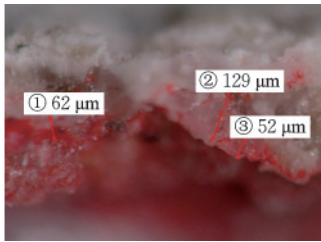
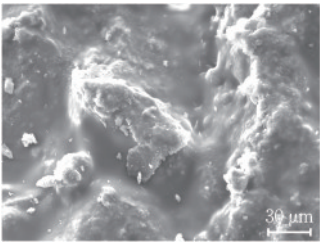
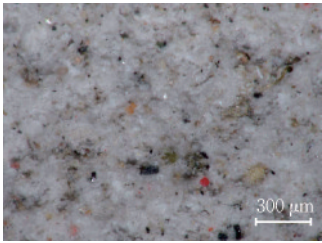
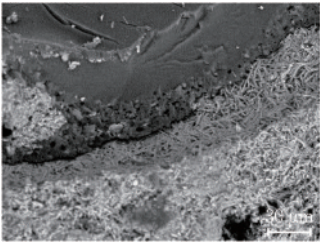
2.1 近现代妆彩特征

2.1.1 结构工艺分析

结合目视、超景深显微镜和扫描电镜观察不当妆彩和重塑样品,表明此次不当妆彩工艺主要为毛刷刷涂和手摇喷漆喷涂,局部存在重塑,显微观察结果见表 3。

表 3 不当妆彩和重塑样品显微照片

Table 3 Micrographs of improper repainting and reshaping samples

编号	平面 200 倍照片	剖面 200 倍照片	扫描电镜 500 倍照片
Y1			
Y2			
Y3			
Y4			
Y5			
Y6		—	

刷涂颜料包括红色、绿色、金棕色和肉色等,颜色艳丽,光泽较高,局部有刷涂痕迹,刷涂面积约

7.71 m²。Y1~Y4样品显微观察下表面相对致密平整,颜料层成膜性好,薄厚不均,妆彩厚度约0.01~

0.2 mm,遮盖力强,透水性差,眩光明显。Y1和Y2样品表面与剖面无明显分层和孔隙;Y3样品表面有微裂隙零星分布,颜料层内有较多碎片叠压嵌合,推测金棕色由人工现场混合金粉调色而成;Y4样品表面光滑,出现龟裂,颜料层剖面有分层现象,表层为半透明壳状油膜,下层为膏状橙色颜料。

喷涂颜料以红色为主,有少量灰色和黑色,颜料表面有颗粒感,边缘有明显的散射现象,喷涂面积约4.36 m²。Y5样品显微观察下表面相对粗糙起伏,成膜性一般,岩石颗粒缝隙间有喷涂颜料团聚填充现象,妆彩厚度约0.05~0.13 mm,推测是因为颜料干燥速度、入渗深度、喷涂中心和边缘的位置差异等而薄厚不均。

局部重塑所用材料为灰白色,硬度较低,重塑后造像结构相对完整,但细节处理与原貌风格不协调,现场敲击表明重塑层与造像表面存在空隙。Y6样品显微观察下呈针状或条状松散堆积,有大量孔隙分布,整体结构疏松。

2.2.2 颜料与重塑材料分析

经现场走访调查,此次不当妆彩所用刷涂和喷涂颜料均为以丙烯酸树脂为主要成分的有机合成颜料。刷涂颜料为罐装温莎牛顿大红色丙烯酸颜料,其成膜性好,耐晒牢度高,色料着色力强;喷涂颜料为三和牌罐装大红色手摇自动喷漆,具有质地细腻、遮盖力强、干燥速度快的特点。为进一步验证分布面积最广泛的红色和绿色刷涂颜料中色料成分,选取Y-1和Y-2样品进行拉曼光谱分析,将所得谱图与Wiley数据库有机颜料谱图匹配表明,Y-1样品在1 363.6 cm⁻¹处信号最强,在1 184.7 cm⁻¹处信号次强,与颜料红14(C₂₄H₁₇N₄O₄Cl)标准图谱基本一致,在1 164.4、1 490.9、1 593.8 cm⁻¹处高波数峰与颜料红170(C₂₆H₂₂N₄O₄)标准图谱较匹配,推测Y-1样品的色料是颜料红14和颜料红170的混合颜料(图4)。Y-2样品拉曼信号在1 538.7、1 339.1、1 286.2、685.0 cm⁻¹等位置出现的强峰与酞菁绿(C₃₂H₁₂Cl₁₄₋₁₅CuN₈)标准谱图基本一致,因此确定刷涂绿色颜料的色料为酞菁绿^[32](图5)。颜料红14、颜料红170和酞菁绿的颜色鲜艳,着色力强,不溶于水和醇类、烃类等一般有机溶剂,广泛应用于涂料和油墨等领域^[33]。

对Y-8样品进行X射线衍射分析,用Jade 9.0软

件物相检索和半定量分析表明,重塑材料由47.2%的硬石膏(CaSO₄)、38.6%的生石膏(CaSO₄·2H₂O)和14.2%的石英(SiO₂)组成,主要成分为硫酸钙,由此确定重塑材料为石膏粉(图6)。

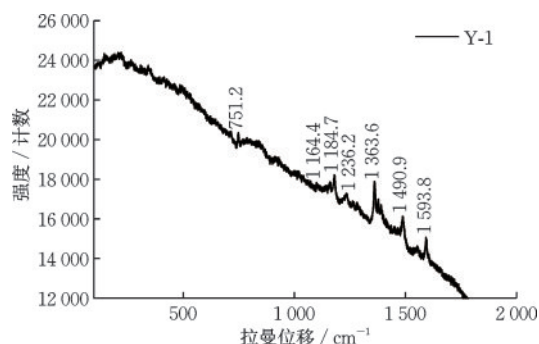


图4 Y-1样品拉曼光谱

Fig.4 Raman spectrum of sample Y-1

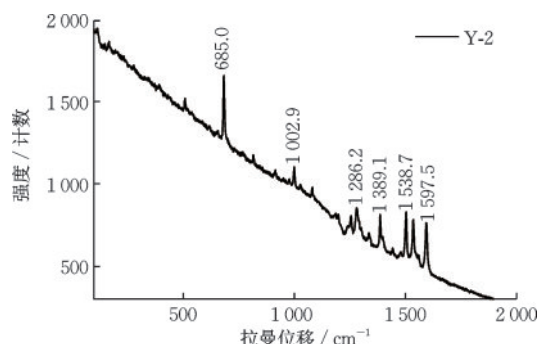


图5 Y-2样品拉曼光谱

Fig.5 Raman spectrum of sample Y-2

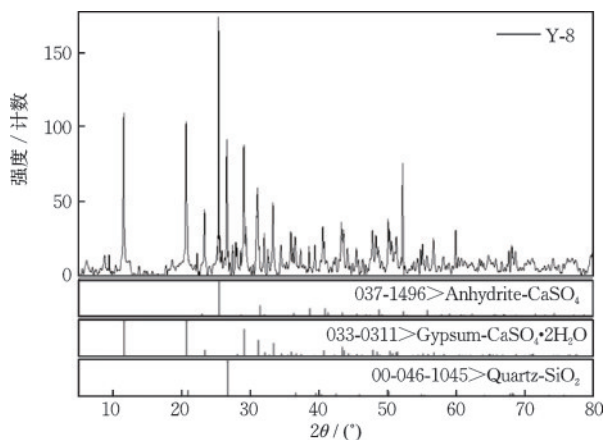


图6 Y-8样品X射线衍射分析结果

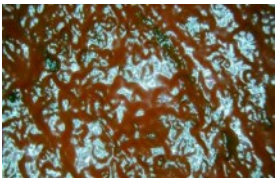
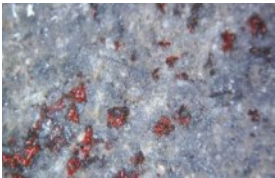
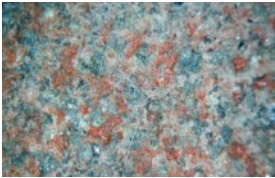
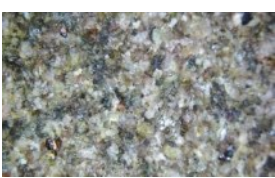
Fig.6 X-ray diffraction analysis results of sample Y-8

2.2 模拟实验结果

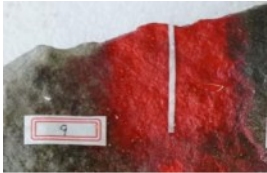
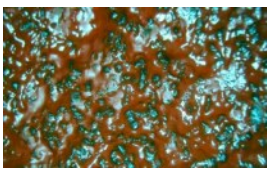
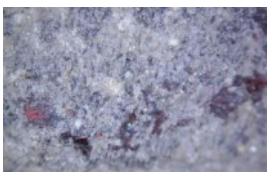
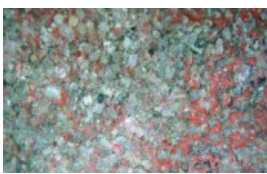
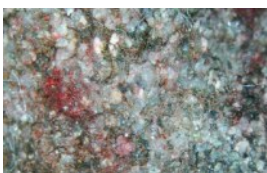
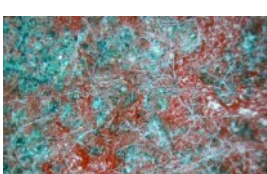
按表2的清理工艺和方法完成19个妆彩和重塑模拟样品的清理实验,结果见表4。

表 4 模拟样品清理实验结果照片

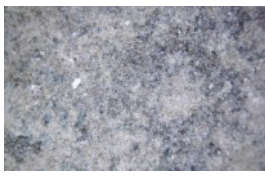
Table 4 Photos of cleaning experiment results of simulated samples

编号	妆彩后照片	清理后	
		照片	平面 100 倍显微照片
M1			
M2			
M3			
M4			
M5			
M6			
M6'			
M7			
M8			

续表

编号	妆彩后照片	清理后	
		照片	平面100倍显微照片
M9			
M10			
M11			
M12			
M13			
M14			
M14'			
M15			
M16			

续表

编号	妆彩后照片	清理后	
		照片	平面100倍显微照片
SG-1			
			
			

注:M6'和M14'是在M6和M14样品经过化学清理后,再通过热蒸汽清理的样品

2.3 清理效果评估

2.3.1 妆彩颜料清理

刷涂与喷涂颜料模拟样品的清理结果表明,物

理清理、热蒸汽清理、超声振动清理和化学清理等4种方法均有一定效果,但效果差异明显,从目视与显微观察到色度、硬度、粗糙度和操作时长等多角度进行评估,各样品清理前后变化数据见表5。

表5 刷涂与喷涂颜料模拟样品清理前后变化数据
Table 5 Change data of brushed and sprayed pigment simulated samples before and after cleaning

编号	色差值ΔE	硬度差值/	粗糙度差值/μm			清除时长/ min	目视/显微观察 颜料残留
		HL	R_a	R_z	R_q		
M1	997.76	-15.67	-4.819	-33.972	-4.897	10	极多
M2	82.02	-62.67	3.263	10.612	3.840	42	较少
M3	91.71	0.89	-2.403	-12.464	-3.412	40	较多
M4	117.81	-7.11	-3.470	2.117	-2.601	40	较多
M5	51.59	-6.67	-4.930	-12.984	-4.123	30	较少
M6	4.59	-7.67	-0.602	0.719	-0.204	45	极少
M6'	7.06	-8.56	-	-	-	55	无明显残留
M7	38.78	-38.67	-6.855	-10.352	-6.655	70	较多
M8	9.03	-10.56	-4.153	-22.443	-4.876	15	极少
M9	824.22	-13.00	-5.964	-14.902	-4.803	10	极多
M10	28.10	-98.56	2.989	11.963	3.234	56	较少
M11	77.09	-0.22	-1.145	18.914	0.529	30	较多
M12	11.11	1.22	-1.105	-12.672	-2.624	24	较多
M13	29.74	6.56	-1.759	-4.559	-1.121	22	较多
M14	6.46	-2.89	-0.360	-0.671	0.249	45	极少
M14'	8.98	5.11	-	-	-	55	无明显残留
M15	246.96	4.00	-5.358	-7.333	-5.540	70	极多
M16	10.72	-12.78	-1.468	8.288	-0.277	5	无明显残留

注:差值计算结果均通过清理后数据减去清理前数据所得。颜料残留分为极多、较多、较少、极少和无明显残留共5类

物理清理即机械清理,本次实验使用手术刀、镊子、竹签和洗耳球等工具清除妆彩颜料,操作方法简便,主要用以辅助清理软化剥落的颜料碎片,由于颜料结合岩体较为紧密,机械刮除时容易在岩体表面形成划痕破坏,因此未单独设计对照组。

热蒸汽清理是通过高压破坏颜料与岩体表面结合力,并利用高温蒸汽加快颜料分子熵增的清理方法。M1和M9样品清理后目视与显微观察岩体表面仍残留大量颜料,与清理前色差值 ΔE 远大于12,硬度和粗糙度的算数平均偏差(R_s)、最大值(R_z)和均方根偏差(R_q)减小,说明热蒸汽对岩体表层妆彩颜料具有一定软化作用,但对与岩体结合紧密的丙烯酸颜料的剥离与去除能力有限,仅使用热蒸汽清理颜料几乎没有效果。

超声振动清理是利用超声洁牙机高频震动产生的机械冲击力达到清理颜料的目的。M2和M10样品清理结果表明,该方法可使妆彩颜料产生破碎并剥落,但清理后色差值明显变化,局部区域出现泛白现象;清理后岩体硬度值变化幅度较大,为-62.67HL和-98.56HL,说明长时间近距离的高频振动对岩体力学强度有一定损伤;粗糙度变增大,岩体颗粒间凹陷处和孔隙内的颜料不易清除,有部分颜料残留,且清理所需时间较长,因此对颜料清理效果较差。

化学清理使用了针对丙烯酸颜料具有溶解性的6类有机清理材料。M3~M5及M11~M13样品妆彩颜料被清理时发生软化和溶胀,但各材料实际的溶解能力一般,清理后颜料残留普遍较多,色差值在29.74~117.81;硬度差值介于-7.11~6.56HL,对岩体力学强度影响较小;由于较多颜料颗粒填充于岩体颗粒孔隙间,岩体表面粗糙度呈减小趋势,整体清理效果不彻底。M7和M15样品通过贴敷软化颜料,安全性较高,但由于贴敷时间较长,在立面较难有效贴合岩体表面,导致清理后颜料残留较多,作用受限,整体效果较差。M6与

M14、M8与M16样品以苯甲醇或多效脱漆溶媒为主要成分的材料进行溶解剥离,清理后目视和显微观察表明颜料残留极少,色差值在4.59至10.72之间,与清理前属同一颜色但具有明显色差,色差变化主要是因为风化岩体表面积尘污染等同时被清理地较为彻底;硬度值和粗糙度略有降低,说明岩体力学强度和结构受影响较小;操作时长上,材料5所需清理时间较长,材料6作用迅速,操作时间短,2类材料均可有效清除妆彩颜料,再辅以热蒸汽清理后,岩体表明无明显残留。但材料6在石质文物清理领域还未见到广泛应用与经验验证,其对岩体结构、矿物成分及力学性能的影响及残留特征等还不明确,需进一步开展该材料安全性和适用条件的系统研究和长期评估。

通过对比实验筛选适宜石飞河摩崖造像表面不当妆彩颜料清理的方法,综合考虑试剂的安全性、有效性及操作效率等因素,针对刷涂与喷涂颜料,采用苯甲醇为主要成分的化学清理,再辅以物理清理和热蒸汽清理的复合清理工艺可达到最佳清理效果。

2.3.2 重塑材料清理

SG-1、SG-2和SG-3样品清理结果表明,物理清理与超声振动清理均可有效去除石膏重塑层,各样品清理前后变化数据见表6。SG-1和SG-3采用物理清理,操作时间较短,清理过程中由于撬动较大范围的重塑材料而粘连底部风化岩体,清除后岩体表面视觉色差较小,硬度值降低,粗糙度略有增大,对操作者技术要求较高,需谨慎控制力度以避免对岩体造成划痕损伤和破碎风险。SG-2采用超声振动清理,设备易于操控,清理过程相对精细和温和,超声振动可小范围逐渐击碎与岩体结合较疏松的石膏材料,清理后色差不明显;硬度差值小于物理机械清理的差值,表明对岩体表面力学强度改变较小;粗糙度变化极小,算数平均偏差(R_s)仅增大0.879 μm ,但清理时间较长。

表6 重塑模拟样品清理前后变化数据
Table 6 Change data of reshaping simulated samples before and after cleaning

编号	色差值 ΔE	硬度差值/HL	粗糙度差值/ μm			清除时长/ min	目视/显微观察 石膏残留
			R_s	R_z	R_q		
SG-1	5.32	-37.56	2.861	1.729	2.684	10	极少
SG-2	2.50	-18.89	0.879	-4.125	-0.207	40	极少
SG-3	7.65	-24.56	2.91	7.366	2.926	10	极少

注:差值计算结果均通过清理后数据减去清理前数据所得

基于文物安全性和清除效率的角度,针对石飞河摩崖造像局部重塑可采用超声振动清理为主的方法,对厚度大的重塑层沿其边缘缓慢击碎,避免重塑层大块脱落粘连文物本体,岩体凹陷处残留可辅以物理清理和热蒸汽清理予以清除。

2.4 现场清理

根据石飞河摩崖造像表面不当妆彩的颜色、工艺、位置和筛选出的清理工艺方法,划定刷涂、喷涂和局部重塑等现场试验区进行小范围清理实验,对刷涂与喷涂颜料以化学清理为主,对重塑以超深振

动清理为主,再辅以物理清理和热蒸汽清理的复合清理工艺,实际清理效果明显,同时表明材料5对不同颜色的丙烯酸颜料均有较好清理效果。

基于室内外试验结果,进行石飞河摩崖造像不当妆彩和重塑的全面清理,未对造像本体造像损伤,清理后效果见图7。此外,B区第9龕此次不当妆彩喷涂颜料清理后,其20世纪90年代的妆彩和补塑层得以保留,推测与早期妆彩颜料的成分结构、附着状态、以及材料5的适用范围和清理力度等关系密切,下一步可对重层颜料上的不当妆彩进行清理实验研究。



图7 石飞河摩崖造像不当妆彩和重塑清理后

Fig.7 Photos of Shifeihe Grotto Statues after cleaning of improper repainting and reshaping

3 结 论

本研究采用现场调查、取样分析和室内外妆彩清理实验等方法对石飞河摩崖造像的近现代不当妆彩的特征、清理工艺与清理前后效果评估进行分析,得出以下结论:

(1) 石飞河摩崖造像不当妆彩的颜料艳丽,遮盖力强,透气性差,与岩体结合紧密,妆彩颜料以丙烯酸树脂为主要成分的有机合成颜料,妆彩方法主要为喷涂和刷涂;重塑层主要为成分为硫酸钙,硬度较低,与造像表面结合较松,存在空隙。

(2) 4种清理方法综合评估结果表明,单一物理清理或热蒸汽清理对妆彩和重塑层的清理效果较差;针对妆彩层以溶解性较好的化学清理为主,通过溶解、软化与剥离妆彩颜料达到清理目的,重塑层以小范围缓慢击碎的超声振动清理为主,避免重塑层大块脱落粘连文物本体,再辅以物理清理和热蒸汽清理的复合清理工艺具有最佳效果,且不会对造像本体造成损伤。

(3) 该案例为石窟造像近现代不当妆彩清理保

护与评估提供了研究思路与可借鉴的方法,但清理剂的有效性评估、安全性评估、以及重层颜料上的不当妆彩清理方面还不够系统,有待评估清理剂的适用范围、残留特征及对岩体的影响等,未来可探索适宜方法展开进一步评估,提升清理效果。

参考文献:

- [1] 郭建波, 韩明, 关明, 等. 四川地区石窟造像近现代妆彩调查与分析研究[J]. 石窟与土遗址保护研究, 2022, 1(3): 18-33.
Guo J B, Han M, Guan M, et al. Research on the modern repainting of the sculptures in the cave temples in Sichuan [J]. Research on the Conservation of Cave Temples and Earthen Sites, 2022, 1(3): 18-33. (in Chinese)
- [2] 巴中市文物局, 四川大学考古文博学院, 西安碑林博物馆, 等. 四川省南江县石飞河摩崖造像调查简报[J]. 南方民族考古, 2023(25): 120-136.
Bazhong City Bureau of Cultural Relics, School of Archaeology and Museology, Sichuan University, Xi'an Beilin Museum, et al. Preliminary report of shifeihe cliff carvings in Nanjiang County, Sichuan Province [J].

- Southern Ethnology and Archaeology, 2023(25): 120-136. (in Chinese)
- [3] 张景科, 谷留杨, 李黎, 等. 石窟寺岩体稳定性监测技术发展现状及展望[J]. 工程地质学报, 2024, 32(6): 1916-1934.
Zhang J K, Gu L Y, Li L, et al. Development status and prospect of rock mass stability monitoring technology in grottoes temple [J]. Journal of Engineering Geology, 2024, 32(6): 1916-1934. (in Chinese)
- [4] 刁汉婷, 仇文岗, 王鲁琦, 等. 石窟岩体水致劣化机理与防治研究进展[J]. 重庆大学学报, 2024, 47(10): 1-24.
Diao H T, Zhang W G, Wang L Q, et al. Research progress on mechanisms and prevention of water-induced deterioration of grotto rock mass in China [J]. Journal of Chongqing University, 2024, 47(10): 1-24. (in Chinese)
- [5] 王颖红, 郭青林, 杨善龙, 等. 风化砂岩石窟表面热响应及力学性能变化: 对砂岩石窟本体表层风化(劣化)评价的启示[J]. 文物保护与考古科学, 2024, 36(5): 8-16.
Wang Y H, Guo Q L, Yang S L, et al. Surface thermal response and mechanical property changes of weathered sandstone rock-hewn cave temples: Implication for the evaluation of surface weathering (deterioration) [J]. Sciences of Conservation and Archaeology, 2024, 36(5): 8-16. (in Chinese)
- [6] 石美风, 陈刚, 张秉坚. 石质文物保护中的化学清洗技术[J]. 文物保护与考古科学, 2011, 23(1): 89-96.
Shi M F, Chen G, Zhang B J. Review on chemical cleaning techniques for the conservation of historic stone relics [J]. Sciences of Conservation and Archaeology, 2011, 23(1): 89-96. (in Chinese)
- [7] Liu R Z, Zhang B J, Zhang H, et al. Deterioration of Yungang grottoes: Diagnosis and research [J]. Journal of Cultural Heritage, 2011, 12(4): 494-499.
- [8] 齐扬. 云冈石窟砂岩文物表面污物激光清除机理及应用研究[D]. 武汉: 中国地质大学, 2015.
Qi Y. Study of mechanisms of laser cleaning of sandstone surface contaminants in Yungang grottoes and its applications [D]. Wuhan: China University of Geosciences, 2015. (in Chinese)
- [9] 王锋, 韩化蕊, 李迪, 等. 大理岩石刻文物黑色结壳清洗研究[J]. 文物保护与考古科学, 2024, 36(1): 65-73.
Wang F, Han H R, Li D, et al. Study on the cleaning of black crusts on ancient marble carvings [J]. Sciences of Conservation and Archaeology, 2024, 36(1): 65-73. (in Chinese)
- [10] 李万博, 胡占勇. 石质文物保护工程中汉白玉石材的清洗及保护[J]. 建筑技术, 2021, 52(6): 734-736.
Li W B, Hu Z Y. Cleaning and protection of white marble stone in stone cultural relics protection project [J]. Architecture Technology, 2021, 52(6): 734-736. (in Chinese)
- [11] 朱博雅, 胡东波. 龙门石窟潜溪寺石刻造像表面清洗研究[J]. 石窟寺研究, 2010(1): 244-267.
Zhu B Y, Hu D B. The research on the cleaning of stone sculptures in Qianxixi cave at Longmen grottoes [J]. Studies of the Cave Temples, 2010(1): 244-267. (in Chinese)
- [12] 荆海燕, 蔡淋. 意大利文物化学清洗方法在一件石像保护修复中的应用[J]. 文博, 2016(3): 94-97.
Jing H Y, Cai L. The application of the Italian chemical cultural relic cleaning method in the conservative restoration of a stone statue [J]. Relics and Museology, 2016(3): 94-97. (in Chinese)
- [13] 郭箐, 周双林. 酶材料及凝胶对碑刻文物表面墨迹的清洗研究[J]. 文物保护与考古科学, 2023, 35(5): 57-65.
Guo Q, Zhou S L. Study on the cleaning of ink marks on stone monuments by enzyme and gel [J]. Sciences of Conservation and Archaeology, 2023, 35(5): 57-65. (in Chinese)
- [14] Cappitelli F, Zanardini E, Ranalli G, et al. Improved methodology for bioremoval of black crusts on historical stone artworks by use of sulfate-reducing bacteria [J]. Applied and Environmental Microbiology, 2006, 72(5): 3733-3737.
- [15] Siano S, Agresti J, Cacciari I, et al. Laser cleaning in conservation of stone, metal, and painted artifacts: State of the art and new insights on the use of the Nd: YAG lasers [J]. Applied Physics A, 2012, 106(2): 419-446.
- [16] 齐扬, 周伟强, 赵林娟. 石质文物表面有害污染物清除技术研究[M]. 北京: 电子工业出版社, 2019: 46-50.
- [17] 王昊, 张碧健. 水下石质文物原址保护空化射流清洗实验研究[J]. 中国文化遗产, 2021(3): 82-87.
Wang H, Zhang B J. Experimental study on cavitation jet cleaning of underwater stone cultural relics in situ protection [J]. China Cultural Heritage, 2021(3): 82-87. (in Chinese)
- [18] 王昊. 石质文物清洗技术研究综述[J]. 中国文物科学研究, 2018(1): 81-88.
Wang H. Review of cleaning technologies for stone cul-

- tural relics [J]. China Cultural Heritage Scientific Research, 2018(1): 81-88. (in Chinese)
- [19] 叶良, 杨平. 基于色差原理对石质文物表面污染物清洗效果的评价研究[J]. 浙江科技学院学报, 2024, 36(1): 87-96.
- Ye L, Yang P. Evaluation studies of cleaning effect of contaminants on stone relics' surface based on principle of color difference [J]. Journal of Zhejiang University of Science and Technology, 2024, 36(1): 87-96. (in Chinese)
- [20] 石质文物保护修复方案编写规范: WW/T 0007—2007[S]. 北京: 文物出版社, 2008.
- [21] 周华, 高峰, 王扬, 等. 云冈石窟石质文物表面污染物清洗效果检测技术实验[J]. 文物保护与考古科学, 2013, 25(1): 15-23.
- Zhou H, Gao F, Wang Y, et al. Evaluation of surface cleaning technology for Yunguang Grottos [J]. Sciences of Conservation and Archaeology, 2013, 25(1): 15-23. (in Chinese)
- [22] 刘仁植, 张秉坚, 张润平. 不可移动石质文物化学清洗的操作工艺[J]. 文物保护与考古科学, 2012, 24(4): 86-94.
- Liu R Z, Zhang B J, Zhang R P. Research on standard processes of chemical cleaning of stone relics [J]. Sciences of Conservation and Archaeology, 2012, 24(4): 86-94. (in Chinese)
- [23] 赵岗, 阮方红, 蒋思维, 等. 大足石刻广大山摩崖造像表面油烟清洗研究[J]. 四川文物, 2018(2): 90-96.
- Zhao G, Ruan F H, Jiang S W, et al. Study on soot cleaning of the cliff carvings on Guangda mountain of Dazu rock carvings [J]. Sichuan Cultural Relics, 2018(2): 90-96. (in Chinese)
- [24] 汪涛. 齐云山摩崖石刻保护[M]. 杭州: 西泠印社出版社, 2016: 63-66.
- [25] 柏红英, 金普军, 付倩丽, 等. 蒲江石窟上油烟污物的分析研究及其清洗对策[J]. 人类文化遗产保护, 2011(1): 86-89.
- Bai H Y, Jin P J, Fu Q L, et al. Analysis and cleaning method of the obstinate filth of Oils and smokes on the surface of Pujiang cliff [J]. Human Culture Heritage Preservation, 2011(1): 86-89. (in Chinese)
- [26] 韩明, 郭建波. 石窟造像重妆现象研究[J]. 石窟寺研究, 2025(1): 244-256.
- Han M, Guo J B. An analysis on the issues of repainted sculptures in grottoes [J]. Studies of the Cave Temples, 2025(1): 244-256. (in Chinese)
- [27] 张孜江, 刘宇, 韦荃. 四川地区石窟寺造像表面油饰妆彩的调查与研究[J]. 文博, 2023(6): 85-90.
- Zhang Z J, Liu Y, Wei Q. Investigation and research of oil decoration on the surface of grotto temples and stone carvings in the Sichuan Region [J]. Relics and Museology, 2023(6): 85-90. (in Chinese)
- [28] 魏忠武, 张秉坚. 漆涂层对题刻类石质文物的影响研究[J]. 石材, 2022(4): 19-25.
- Wei Z W, Zhang B J. Study on the influence of lacquer coating on inscribed stone cultural relics [J]. Stone, 2022(4): 19-25. (in Chinese)
- [29] 张孜江, 刘宇, 韦荃. 一种用于去除石质文物表面油漆的清洗剂及使用方法: 中国, CN116333524A[P]. 2023-06-27.
- Zhang Z J, Liu Y, Wei Q. Cleaning agent for removing paint from stone cultural relics and its application method: China, CN116333524A[P]. 2023-06-27. (in Chinese)
- [30] 何静. 浅谈去除石质文物表面涂鸦的几种方法[J]. 石材, 2016(6): 27-30.
- He J. A brief study on methods for removing graffiti from stone cultural relics [J]. Stone, 2016(6): 27-30. (in Chinese)
- [31] Jia Y, Zhang L, Tan K, et al. A new deep eutectic solvent-based green gel for the removal of polymeric coating from mural painting [J]. Journal of Cultural Heritage, 2025, 71(0): 51-60.
- [32] Rúa C, Sepúlveda M, Gutiérrez S, et al. Raman identification of pigments in wall paintings of the colonial period from Bolivian churches in the Ruta De La Plata[J]. Conservation Science in Cultural Heritage, 2018, 17(1): 117-137.
- [33] 崔春芳, 项哲学. 化工产品手册-颜料[M]. 6版. 北京: 化学工业出版社, 2016: 293-432.

(本文编辑:张 艺)