

文章编号:1005-1538(2023)06-0124-13  
DOI: 10.16334/j.cnki.cn31-1652/k.20221002700

## 壁画酥碱病害研究概述

徐莉娜,岳永强,马 千,张 强  
(敦煌研究院麦积山石窟艺术研究所,甘肃天水 741020)

**摘要:**酥碱病害是壁画最为严重的病害之一,被称为壁画的“癌症”。因其受诸多因素的影响,使得病害产生机理复杂、修复材料匮乏和修复方法难度大等问题,严重制约着酥碱病害的修复与防治。本文系统梳理酥碱病害的成因、病害机理、加固材料、地仗修补材料,以及针对不同盐霜的保护修复方法的研究成果,客观评价酥碱壁画修复过程中的经验和教训,为古代壁画酥碱病害的防治与修复提供系统的技术参考和实践借鉴。

**关键词:**壁画;酥碱病害;病害机理;加固材料;修复材料;修复工艺

**中图分类号:**K879.41 **文献标识码:**A

### 0 引言

壁画是指通过绘制手段,在天然或人工壁面上制作的画,是一种具有装饰和美化功能的绘画艺术,一般为建筑物的附属部分。根据制作材料和工艺的不同可将壁画分为干壁画、湿壁画和镶嵌壁画。干壁画和湿壁画保存数量最多,干壁画主要分布在东方,湿壁画则主要保存在欧洲。根据支撑体的不同,又可将壁画分为殿堂壁画、石窟寺壁画、墓葬壁画三种类型<sup>[1]</sup>。

受自然环境和人为因素的长期影响,各类壁画均会产生诸如起甲、龟裂、空鼓、裂隙、酥碱等多种病害。其中,酥碱病害是最严重的病害之一,会造成无法挽回的损失(图1和图2)。“酥碱”是传统文物病害术语,被广泛用于文物领域的古建筑、壁画以及土遗址等专业范围。何流<sup>[2-3]</sup>通过对《王力古汉语字典》《辞源》等相关文献中对“酥”“碱”这两个字的内容和表述方式的发展过程进行研究,指出历史上人们把卤水中洗出的除盐以外的结晶称之为“碱”,民间将出汗在衣服上留下的白色污痕称为“汗碱”,土壤、石头、墙壁等表面的白色晶体现象称为“泛碱”。其中,“酥”有着松脆和柔软之意,因此就不难理解传统文物术语中使用“酥碱”的原因了。

《古代壁画病害与图示》中将壁画的酥碱病害定义为由可溶盐作用导致壁画地仗层产生的疏松状态,且在此标准中将“酥碱”英文名称指定为“plaster disruption”<sup>[4]</sup>。《中国古代壁画保护规范研究》中指出酥碱为壁画地仗中可溶盐随环境温湿度变化溶解、结晶所产生的膨胀、收缩反复作用,使得壁画地仗结构被破坏而产生的疏松状态,且在英文中将“酥碱”定义为“disruption”<sup>[5]</sup>。其中:“plaster”意为“地仗”,指出了酥碱病害产生的位置为地仗层,属于地仗层病害<sup>[6]</sup>;“disruption”则有“破裂,破坏,瓦解”之意,形象地指出了酥碱病害产生的严重性和毁灭性。

我国壁画的科学保护与研究始于20世纪50年代,从简单壁画病害调查、预防壁画病害发生,制作材料、病害机理的研究,到修复材料的应用及保存环境的控制等,其目的均是尽最大可能保存文物本体,延长文物寿命,为文物的保护、研究和利用争取更多时间。其中,酥碱病害作为壁画最难治理的病害之一,相关研究人员针对其开展了一系列研究和保护工作,在此过程中既有成功经验也有不足之处,本工作通过系统梳理病害成因、病害机理、修复材料与脱盐工艺的相关文献,为酥碱壁画的保护提供技术参考和实践借鉴。

收稿日期:2022-10-08;修回日期:2023-05-01

基金资助:国家自然科学基金项目(32260292)、甘肃省科技计划项目(23JRRF0008)资助

作者简介:徐莉娜(1988—),女,2019年毕业于北京科技大学科学技术史专业,馆员,研究方向为文物保护,壁画、彩塑保护研究,E-mail: 873174970@qq.com

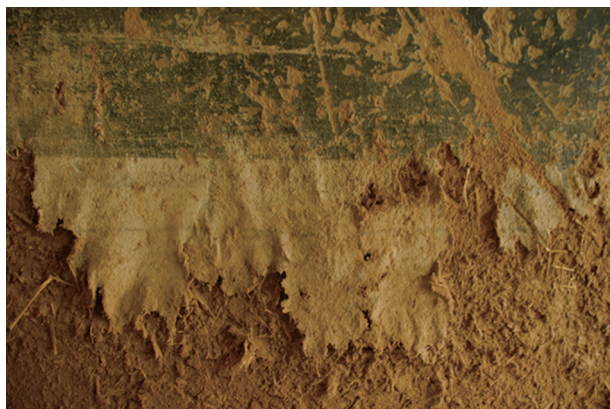


图1 北石窟寺戏楼酥碱壁画

Fig. 1 Murals of the theater in the North Cave Temple



图2 炳灵寺洞沟2窟酥碱壁画

Fig. 2 Murals from Cave 2 of Donggou in Thousand Buddha Caves of Bingling Temple

## 1 壁画酥碱病害成因及机理研究

### 1.1 成因分析

关于酥碱病害的成因,国内外学者做了大量研究。国内多位学者采取 XRD、XRF、IC 等多种测试方法对莫高窟多个洞窟、兴隆寺摩尼殿、奉国寺、吐峪沟壁画颜料层的盐霜、地仗层及支撑体中可溶盐的种类进行了分析,发现其可溶盐主要包含硫酸盐、硝酸盐、氯盐及钾盐等,其中:莫高窟颜料层、地仗层及支撑体中可溶盐包含大量 NaCl 和  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  及少量的  $\text{MgSO}_4$ 、 $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ;兴隆寺摩尼殿可溶盐主要为 NaCl;奉国寺及吐峪沟的可溶盐主要为硫酸盐、硝酸盐、氯盐<sup>[7-14]</sup>。关于壁画酥碱病害产生的原

因,张明泉等<sup>[15]</sup>结合莫高窟洞窟位置、窟内自身裂隙、窟前灌水、洞窟内温湿度变化产生的凝结水等各种外界因素,推断导致莫高窟壁画发生酥碱病变的原因是洞窟围岩和地仗层中的易溶盐在水分的参与下发生溶解、迁移、沉淀、阳离子交换和重结晶作用,使得地仗颗粒之间联结力减弱,导致颜料层剥落,地仗层疏松、掉块或散落。严妍等<sup>[16]</sup>结合克孜尔石窟环境监测数据,提出降雨、地下水及游客带来的水汽都是造成壁画酥碱病害的原因。黄美燕等<sup>[17]</sup>根据陈道望故居壁画酥碱病害产生的分布区域指出,降雨是导致屋角当沟滴水处壁画酥碱病害产生的主要因素。刘文兵等<sup>[18]</sup>通过壁画的材质对壁画产生酥碱病害的相关性进行了分析,指出壁画地仗层结构的酥松、颗粒大小的不均匀及较多的孔隙,是可溶性盐的通道,为壁画酥碱病害的产生提供了基础条件。

国外学者对多处壁画盐霜和酥碱样品进行分析研究,发现国外壁画盐霜和酥碱地仗中的可溶盐种类较多,各个国家存在一定差异,例如:英国克莱夫修道院盐霜和酥碱样品可溶盐主要为硝酸盐、硫酸盐及数量可观的钙离子、钠离子、氯离子和钾离子<sup>[19]</sup>;意大利庞贝壁画样品主要包含  $\text{CaCO}_3$ 、 $\text{K}_2\text{CO}_3$ 、 $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ 、 $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 、 $\text{CaC}_2\text{O}_4$  等可溶盐,且在不同环境下墙面的酥碱样品中所含可溶盐的成分不一样<sup>[20]</sup>;罗马圣克莱门特教堂样品其主要成分为  $\text{CaSO}_4$  和  $\text{CaCO}_3$ ,且作者推测,以上两种盐分存在是由于空气中高浓度的污染物  $\text{CO}_2$  和富硫颗粒在高湿度和极弱的空气循环下导致地仗层表面发生碳化和硫酸化过程<sup>[21]</sup>;葡萄牙 17 世纪 Casa de Fresco 的样品主要成分为  $\text{CaCO}_3$  和 Ca-Mg 碳酸盐<sup>[22]</sup>;土耳其希拉波利斯岛 104 岛壁画酥碱样品主要含有不同水合状态的  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ 、 $\text{NaNO}_3$ 、 $\text{KNO}_3$ 、KCl 和  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ <sup>[23]</sup>。

通过对国内外壁画表面盐霜及地仗样品主要成分的分析结果进行比较和统计(表1),发现国内外壁画表面盐霜和地仗层可溶盐的种类有所不同,推测导致国内外可溶盐主要成分不同的原因为国内外壁画类型及所属地域的不同。文献中所提到的国内莫高窟壁画样品中可溶盐的种类基本一致,但有区别于其他地区导致酥碱病害发生的主要可溶盐种类;国外为多个国家样品,其制作材料、工艺及环境之间的差异更使得可溶盐呈现出多样性的现象。尽管不同国家、不同区域壁画盐霜及地仗层可溶盐的种类有差异,但导致壁画酥碱病

害产生的原因基本一致,即地仗层及支撑体中可溶盐在外界毛细水、湿度等环境因素的影响产生溶解、结晶、迁移等反复作用,最终使地仗结构破坏而产生疏松状态。

表 1 国内外壁画酥碱样品可溶盐分析  
Table 1 Soluble salt analysis of domestic and foreign mural samples suffering from plaster disruption

| 样品来源               | 分析方法                | 可溶盐主要成分                                                                                                                                                                                                                                            |
|--------------------|---------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 莫高窟 53、194 窟       | XRD、XRF             | NaCl、Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>                                                                                                                                                                                                               |
| 莫高窟 196 窟          | IC、XRD              | NaCl、Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>                                                                                                                                                                                                               |
| 莫高窟多个洞窟            | IC                  | Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> 、NaCl、MgSO <sub>4</sub> 、CaSO <sub>4</sub> ·2H <sub>2</sub> O                                                                                                                                                      |
| 莫高窟 98 窟           | IC                  | Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> 、NaCl、CaSO <sub>4</sub> ·2H <sub>2</sub> O                                                                                                                                                                         |
| 兴隆寺摩尼殿             | IC                  | NaCl                                                                                                                                                                                                                                               |
| 奉国寺                | IC                  | 硫酸盐、硝酸盐、氯盐、钾盐、镁盐                                                                                                                                                                                                                                   |
| 吐峪沟                | XRD                 | 硫酸盐、硝酸盐                                                                                                                                                                                                                                            |
| 英国克利夫修道院           | ICPAES、IC、XRD、偏光显微镜 | 硝酸盐、硫酸盐及数量可观的钾离子、钠离子、氯离子和少量的钙离子                                                                                                                                                                                                                    |
| 意大利庞贝              | 便携式 Raman、ED-XRF    | CaCO <sub>3</sub> 、K <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> 、Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> ·10H <sub>2</sub> O、<br>K <sub>2</sub> Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> ·10H <sub>2</sub> O、CaSO <sub>4</sub> ·2H <sub>2</sub> O、CaC <sub>2</sub> O <sub>4</sub> |
| 罗马圣克莱门特教堂          | SEM-EDS、XRF         | CaCO <sub>3</sub> 、CaSO <sub>4</sub> ·2H <sub>2</sub> O                                                                                                                                                                                            |
| 葡萄牙 Casa de Fresco | XRD、μ-Raman、μ-FT-IR | CaCO <sub>3</sub> 、Ca-Mg 碳酸盐                                                                                                                                                                                                                       |
| 土耳其希拉波利斯 104 岛壁画   | XRD、IC 和 OM         | Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> 、NaNO <sub>3</sub> 、KNO <sub>3</sub> 、Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> 、KCl                                                                                                                                         |

1.2 机理研究

在 1.1 中各位学者对不同地区酥碱样品中可溶盐成分进行分析,并对酥碱病害产生原因进行简单推理。为了能够进一步验证以上分析及推理的科学性和合理性,相关学者做了大量模拟试验,不仅从动力学和热力学方面阐述了可溶盐在不同环境下溶解和结晶的现象,还通过制作模拟试块探讨了不同含量可溶盐在不同载体下以毛细迁移及吸湿/脱湿作用对酥碱病害产生的影响。

1.2.1 可溶盐阈值探索试验 陈港泉等<sup>[24-25]</sup>、王菊琳等<sup>[26]</sup>分别从含盐量和盐水比两方面对模拟试块酥碱病害产生时可溶盐阈值进行了研究,为更直观地对比两者相关研究之间的关系,将王菊琳等研究成果中的盐水比转换为含盐量(表 2),两者试验

方案及结果对比见表 3。

表 2 盐水比和含盐量的对应值  
Table 2 Corresponding values of salt water ratio and salt content

| 对应序号 | 盐水比   | 含盐量/% |
|------|-------|-------|
| 1    | 1:10  | 1.19  |
| 2    | 2:10  | 2.35  |
| 3    | 3:10  | 3.52  |
| 4    | 4:10  | 4.60  |
| 5    | 5:10  | 5.69  |
| 6    | 6:10  | 6.75  |
| 7    | 9:10  | 9.81  |
| 8    | 11:10 | 11.74 |
| 9    | 13:10 | 13.02 |

表 3 可溶盐阈值探索模拟试验对比  
Table 3 Comparison of soluble salt threshold exploration simulation tests

| 试验组            | 试块成分                      | 试验条件          | 含盐种类                                                                                                                                                                                           | 盐水比/含盐量                                                | 试验结果                                                                                                                                                    |
|----------------|---------------------------|---------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 陈港泉组模拟试验(试验 1) | 澄板土:沙=3:1<br>麻:3% (澄板土+沙) | 20℃,25% 和 85% | NaCl、Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> 、Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> ·10H <sub>2</sub> O、<br>NaNO <sub>3</sub> 、MgSO <sub>4</sub> ·7H <sub>2</sub> O、<br>CaSO <sub>4</sub> ·2H <sub>2</sub> O | 1%、1.5%、3%、<br>5%、6%、13%                               | 含盐量为 1% 未产生酥碱现象;<br>含盐量为 3% 产生裂隙;含盐量<br>≥6% 产生酥碱现象                                                                                                      |
| 王菊琳组模拟试验(试验 2) | 土:沙=10:100                | 20℃,25% 和 85% | NaCl、Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> 、<br>KCl、KNO <sub>3</sub> 、<br>Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> 、CaSO <sub>4</sub>                                                                         | 1:10、2:10、3:10、<br>4:10、5:10、6:10、<br>9:10、11:10、13:10 | 盐水比为 1:10 (含盐量为<br>1.19%) 未产生酥碱现象;盐水比<br>为 2:10 (含盐量 2.35%)、盐水比<br>为 3:10 (含盐量 3.52%) 产生和<br>莫高窟酥碱病害相同现象;盐水<br>比≥4:10 (含盐量 4.60%) 未见酥<br>碱现象,但颜料层、地仗层脱落 |

通过对比以上两组学者的研究成果(下文中将陈港泉组和王菊琳组的试验分别称为试验1、试验2)发现在同种试验条件下:当两种模拟试块含盐量 $\leq 2\%$ 时,均不产生酥碱病害;含盐量 $\geq 2\%$ 时,均产生了病害,但病害呈现方式存在差异。其中:试验1中模拟试块在含盐量为3%时,试块仅产生裂隙;试验2的模拟试块在含盐量为2.35%~3.52%之间已经产生了和莫高窟酥碱病害相同的现象;试验1中模拟试块含盐量在达到6%时,也产生了和莫高窟酥碱病害相同的现象;试验2中模拟试块的含盐量超过了4.60%时,虽未见酥碱病害产生,但

颜料层、地仗层全部脱落。因此,可以从以上现象推断:首先,高含盐量的模拟试块容易产生酥碱病害且含盐量越高破坏性越严重;其次,不同含量、不同种类可溶盐及不同成分的地仗均会影响到酥碱病害的产生及呈现方式。

**1.2.2 毛细迁移试验** 考虑到壁画地仗、支撑体均为多孔材料,且地仗和支撑体材料中可溶盐会随着毛细水的迁移而运移。因此,以土的毛细性质为基础,研究了不同盐溶液在不同成分试块、不同试验条件下的毛细迁移性能,现将已有研究试验方案和结果归纳到表4。

表4 毛细迁移试验对比  
Table 4 Comparison of capillary migration tests

| 研究人员                       | 试验条件<br>(温度、相对湿度) | 试验土样                                   | 溶液类型                                                                                     | 试验结果                                                                                                                        |
|----------------------------|-------------------|----------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 张虎元、姜啸等 <sup>[28-29]</sup> | 20℃、55%           | 天然澄板土、脱盐澄板土                            | 蒸馏水、KCl 溶液、Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> 溶液、KCl 和 Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> 的混合液 | 1)同一种盐溶液上升速率:脱盐澄板土>天然澄板土;<br>2)KCl 和 Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> > KCl > Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> > 蒸馏水(溶液的迁移速率) |
| 贾全全等 <sup>[29-30]</sup>    | 20℃、43%           | 澄板土、脱盐澄板土、粗泥层、细泥层、加沙澄板土、粗泥层和细泥层组合的复合试块 | 0.2 mol/L NaCl                                                                           | NaCl 的迁移速率:粗泥层>混合试块>细泥层、加沙澄板土、脱盐澄板土、澄板土                                                                                     |
| 闫玲 <sup>[31]</sup>         | 20℃、(15±2)%       | 新疆交河故城的粉质黏土                            | 0.3 mol/L KCl 和 0.15 mol/L Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> 混合溶液                          | 迁移速率:Cl <sup>-</sup> > SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>                                                                        |

张虎元、姜啸等<sup>[27-28]</sup>的研究结果显示:首先,KCl 和 Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 混合盐溶液在每种模拟试块中迁移速率最快,对壁画的破坏最大;其次,脱盐澄板土试样中所有溶液毛细上升速率均大于天然澄板土,这是由于试样中原有盐分对溶液的毛细上升有一定阻碍作用。贾全全等<sup>[29-30]</sup>的试验结果表明,由于筋物存在,粗泥层试样毛细上升速率最快,其次为复合试样,且复合地仗样品中粗泥层和细泥层界面处对于毛细水的运移有毛细屏障作用,含水率在粗泥层和细泥层界面处发生了突变。当有较高的非饱和和导水率存在时,盐分会在界面处富集。且对盐水迁移前后的试块进行了 SEM 试验,发现了试验前的土壤结构相当密实,但盐水迁移后的土壤结构变得疏松和多孔,进一步证明实了2.1部分的成因分析中,水盐运移会导致壁画酥碱的结论。闫玲<sup>[31]</sup>通过模拟试验得出氯离子的迁移速率大于硫酸根离子,以此为依据推测莫高窟53窟壁画地仗层在0~200 cm 高度范围内 NaCl、Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 的富集主要是由于毛细水输盐造成,且在此高度 Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 的含量远超 NaCl,是酥碱病害发生的主要部位,即 Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 是酥碱病害产生

的主要原因,与郭宏等<sup>[9]</sup>的研究结果一致。靳治良等<sup>[32]</sup>指出在-2~32.4℃的温度区间,Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 随着温度变化在与之呈平衡的固相 Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>·10H<sub>2</sub>O 之间发生变化,由于 Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>·10H<sub>2</sub>O 的产生不仅能带出结晶水,还增加了体积,使 Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 对壁画产生的破坏更加严重。

通过以上学者的试验研究及结果分析可以得出,溶液中可溶盐成分及试块土样成分不同均会影响盐溶液毛细迁移速率。常见阴离子中,氯离子的迁移速率大于硫酸根离子的迁移速率,混合盐溶液的迁移速率均大于单一盐溶液的迁移速率,且当盐溶液在不同地仗层迁移时,盐分会在不同地仗层的界面产生富集。

**1.2.3 吸湿/脱湿试验** Sawdy 等<sup>[33]</sup>研究了不同相对湿度条件下单一盐类 Mg(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>·6H<sub>2</sub>O 和 NaCl 的潮解和结晶,以及与 KNO<sub>3</sub>、NaNO<sub>3</sub>、CaSO<sub>4</sub> 混合时对其的影响程度,发现:混合盐的吸湿速率高于单一盐分的吸湿速率,混合盐溶液的平衡湿度和环境相对湿度间的差值越大,混合盐的吸湿速率相应增加;反之,当混合盐的相对平衡湿度

和环境相对湿度值相差越小时,混合盐放湿速率越慢,即混合盐的潮解和结晶取决于外界的相对湿度及混合盐的组成。Piqué 等<sup>[34]</sup>也研究了欧洲壁画中常见的  $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$  对水吸附的动力学,发现  $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$  的潮解不仅受到盐的质量、成分的影响,还受到盐所在载体的影响,其中以灰泥层、

玻璃、铝为载体,发现盐分以灰泥层为载体的吸水速率最快,其次为玻璃,最后为铝,即多孔材料更利于吸附。

国内学者就不同盐含量、不同载体为变量,研究了其试块的吸湿和放湿状况,试验方案及结果见表 5。

表 5 吸湿/脱湿试验对比  
Table 5 Comparison of moisture absorption/desorption tests

| 研究<br>人员                | 试验条件 |                                         | 试验土样                             | 含盐量       | 试验结果                                                                                                                                                       |                                 |
|-------------------------|------|-----------------------------------------|----------------------------------|-----------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------|
|                         | 温度/℃ | 相对湿度                                    |                                  |           | 脱湿量                                                                                                                                                        | 吸湿量                             |
| 苏伯民等 <sup>[35]</sup>    | —    | 85%、30%                                 | 澄板土:砂:麻                          | 1%、6%、13% | 13% > 6% > 1%                                                                                                                                              | 13% > 6% > 1%                   |
| 闫玲 <sup>[31]</sup>      | —    | 95%、11%                                 | 纯澄板土、加砂澄板土                       | —         | 纯澄板土 > 加砂澄板土                                                                                                                                               | 纯澄板土 > 加砂澄板土                    |
| 贾全全 <sup>[29]</sup>     | 20℃  | 97%、13%                                 | 澄板土、脱盐澄板土、粗泥层、细泥层、加砂澄板土          | —         | 澄板土 > 脱盐澄板土 > 粗泥层 > 细泥层 > 加砂澄板土                                                                                                                            | 澄板土 > 脱盐澄板土 > 粗泥层 > 细泥层 > 加砂澄板土 |
| 李凤洁等 <sup>[36-37]</sup> | 20℃  | 11%、23%、33%、43%、55%、59%、75%、85%、97%、99% | 脱盐地仗层(不同土砂比、密度、白粉层、植物纤维种类及含量为变量) | —         | 1) 低湿度对不同白粉层、不同种类的植物纤维、不同含量的植物纤维、不同密度、不同土砂比地仗土的吸湿量影响不大;<br>2) 当 RH > 80%,不同白粉层、不同植物纤维种类、不同植物含量地仗土的吸湿量影响不大;<br>3) 当 RH > 80%,脱盐地仗土的密度越大,吸湿量越大;土砂比含量越大,吸湿量越大 | —                               |

苏伯民等<sup>[35]</sup>通过模拟不同含盐量试块在高湿和低湿的环境下的吸湿/脱湿性能,发现高含盐量的地仗会优先吸收空气中的水分,且含盐量越大,对空气中水分吸收越快,持续时间越长。当空气湿度降低,脱湿时间相对比较恒定,但高含盐地仗脱湿速度更快。因此,推测在洞窟内湿度发生剧烈变化时,含盐量较高的壁画地仗更容易发生酥碱病害。贾全全<sup>[29]</sup>、闫玲<sup>[31]</sup>分别研究了在高湿和低湿条件下,不同成分模拟试块(即成分不同)的吸湿量,均得出模拟试块的吸湿量随着试块澄板土含量的增加而增加。李凤洁等<sup>[36-37]</sup>通过对不同类型的脱盐地仗土在不同相对湿度条件下的吸湿量进行测定,得出黏土量高的地仗试块吸湿量大;此外,作者还指出当相对湿度 > 80% 的时候,壁画表面的盐分与空气中的水分结合,参与水盐反应,诱发或加重壁画酥碱病害的产生。不同地仗层的弱结合水的含水量随着地仗中土砂比增加而增加,因此,相对湿度为 80% 可以作为莫高窟地仗层中吸湿量显著增加的临界湿度。

无论是从动力学和热力学理论知识,还是直接

模拟不同及相同地仗在不同含盐量、不同相对湿度条件下吸湿和放湿的研究,发现壁画产生酥碱病变的主要因素与壁画地仗材料自身成分,壁画地仗中所含可溶盐种类及可溶盐含量,壁画地仗所在环境湿度等因素均有一定关系。因此,壁画酥碱病害产生是在以上多种因素的耦合作用之下,使得壁画地仗层可溶盐以毛细水和吸湿放湿为主要方式,产生运移和反复溶解、结晶,最终导致地仗层各成分结构发生破坏,进而产生酥碱脱落现象。

总结壁画酥碱病害产生原因和机理研究的相关文献:首先能够发现地仗样品中可溶盐的分析均为采样分析法,为了避免对文物的破坏,采样数量的有限性将导致分析结果不够全面;其次,壁画的地仗成分、制作工艺及导致壁画酥碱病害产生的可溶盐种类和含量因壁画所在地域的不同而有所差异;再次,模拟试验中大多采用的是敦煌莫高窟壁画的土沙比,同样,这种单一模拟的结果也不具有全面性;最后,关于模拟试验环境条件参数的设定,研究者们一般选择一组或两组温湿度数据。然而,这一组或两



组数据不能完全代表国内各处壁画所处的环境条件。因此,在将来关于壁画酥碱病害成因及机理的研究中,首先应采用无损或微损的分析方法对所研究壁画支撑体、地仗层以及表层盐霜进行全面分析,依据当地壁画的制作材料和工艺制作模拟试块,结合当地环境中全年的温湿度总体变化趋势对其进行模拟试验,从而得到更符合当地环境下壁画酥碱病害产生的现象,确定当地壁画酥碱病害产生的主要影响因素,才能为酥碱壁画预防和治理给出更科学的措施。

2 壁画酥碱病害修复材料及工艺研究

通过第 1 部分对壁画酥碱病害产生的位置、原因及机理的研究成果总结发现,酥碱病害的产生主要是地仗材料及岩体中所含可溶盐在环境水参与下发生的共同结果。因此,在关于壁画酥碱病害修复和治理过程中,应该将以上两个因素作为重点考虑对象,以上述研究的理论基础为依据,对已经酥碱的壁画进行加固及脱盐处理。

2.1 修复材料研究

2.1.1 加固材料 酥碱壁画加固是治理酥碱病害的前期工作,包含着酥碱壁画颜料层加固及酥碱地仗的加固——以上两者是后期对酥碱壁画脱盐过程的前期稳定性处理。目前常用加固剂主要分为有机加固剂和无机加固剂(表 6)。

表 6 加固剂  
Table 6 Reinforcement agents

| 种类 | 加固剂                                                                     |
|----|-------------------------------------------------------------------------|
| 有机 | 丙烯酸乳液、有机硅丙烯酸乳液、聚醋酸乙烯乳液、丙烯酸树脂、明胶、Funori、 $H_3PO_4 - Ba(OH)_2 - TEOS$ 、…… |
| 无机 | 石灰水、纳米氢氧化钙、纳米氢氧化钡、纳米氢氧化镁                                                |

注: Funori 是一种从海藻中提取出的以多糖为基础的粘合剂。

有机材料在国外文物保护中的应用较早,在 20 世纪 30 年代,欧洲就将聚醋酸乙烯乳液(PVAC)应用于壁画、塑像艺术品的保护当中,到 20 世纪 50 ~ 60 年代,PVAC 已被广泛使用于印度、希腊、波兰等国各个类型的壁画加固中<sup>[38]</sup>。在国内的使用则始于 20 世纪 50 年代捷克壁画专家约瑟夫·格拉尔对莫高窟 474 窟壁画进行的现场修复<sup>[39]</sup>,随后聚醋酸乙烯酯乳液、聚乙烯醇乳液、聚乙烯醇缩丁醛、乙基纤维素、聚甲基丙烯酸甲酯等多种高分子材料开始被应用于莫高窟壁画的加固中<sup>[40-43]</sup>。在莫高窟 60

多年保护历程中经过不断地筛选和现场应用,逐渐形成了三类五种加固材料——聚醋酸乙烯酯乳液和聚乙烯醇类、有机硅和丙烯酸类、明胶类<sup>[44-46]</sup>,它们被广泛应用于全国各类壁画的保护修复中:西藏萨迦寺、新疆和达玛沟遗址、山西云冈五华洞等多处酥碱壁画均采用丙烯酸乳液或改性丙烯酸乳液作为加固剂<sup>[47-51]</sup>;陕西省考古研究所与德国专家采用丙烯酸树脂(B72)对揭取前旬邑东汉墓室壁画表面进行加固修复<sup>[52]</sup>等。同时也有部分其他加固材料被采用,例如:莫高窟 465 窟酥碱地仗的修复中采用甲基纤维素作为加固剂<sup>[53]</sup>;戎岩<sup>[54]</sup>则根据墓葬壁画特殊环境的需求,研发出了  $H_3PO_4 - Ba(OH)_2 - TEOS$  加固剂,且在陕西师范大学遗址模拟坑内进行了试验,发现  $H_3PO_4 - Ba(OH)_2 - TEOS$  加固剂加固试块后色差改变较小,渗透性及透气性好,具备一定的耐盐性特征,随后作者将  $H_3PO_4 - Ba(OH)_2 - TEOS$  加固剂应用于丁家闸五号墓出现的酥碱等病害的加固和修复中,通过加固剂修复前后对比发现,加固区颜料层、地仗层各自的性能都有所改善;Funori 作为一种新提出的加固材料,通过模拟试验发现其有着较好的光学性能,不易老化,与壁画的无机支撑体有着很好亲和性,加固后的地仗保持了孔隙度,过高的黏度也使得其渗透性较差<sup>[55]</sup>,目前没有在国内相关壁画实体上作为加固剂的案例。

多种有机高分子材料作为加固剂的应用,也使得多位学者对其性能和加固效果的评估进行研究。李燕飞等<sup>[56]</sup>对聚醋酸乙烯酯的物理化学性能进行了表征,且通过该乳液对酥碱壁画的模拟试块修复后进行了 12 个老化循环后,颜料层再次出现了龟裂和疱疹病害,指出聚醋酸乙烯酯乳液在彩绘类文物保护中的应用应慎重选择。贺翔等<sup>[57]</sup>从热胀和湿胀性能方面对用 PVAC(聚醋酸乙烯乳液)、PAA(聚丙烯酸乳液)、SMPA(有机硅改性的丙烯酸乳液)、B72(丙烯酸树脂)、明胶作为加固剂分别对壁画地仗层、颜料层、白粉层进行加固后的模拟试块进行分析并发现:在一般的室温下,热膨胀对壁画造成的劣化远远小于湿胀;使用 PAA 和 PVAC 加固的样品有着较小的层间膨胀差异,也因此有较小的层间应力;明胶对壁画颜料层加固效果较好,但是由于明胶黏度大,渗透性较差,不能用于壁画地仗加固;PAA、PVAC、SMPA、B72 四种材料的孔隙率、盐水吸收量、盐的富集程度等性能基本一致,但 PVAC 具有较弱的憎水性,加固后样品的孔隙率较小,水盐通透性更强,盐的分布及应力的分布越均匀,因此样品耐候性

更好。

然而,由于壁画支撑体和制作材料多为无机材料,因此,采用有机材料进行加固后,加固材料与壁画本体无机材料的膨胀系数、导热系数、老化速率等各项性能之间的差异导致应力的产生,致使壁画本体和加固层之间剥离,对壁画造成保护性破坏<sup>[58]</sup>。

无机加固材料常见的有石灰水、纳米氢氧化钡、二磷酸铵等。其中,纳米氢氧化钙在水中的溶解度太小,因此提出使用乙醇或者短链醇作为分散剂增加其溶解度,通过对纳米氢氧化钙的碳化程度、孔隙度、硬度、表面黏性等加固效果进行了表征,得出以乙醇为分散剂的纳米氢氧化钙可适用于壁画的保护<sup>[59]</sup>,同时也提出纳米氢氧化镁、纳米氢氧化钡、纳米氢氧化锶等纳米级的碱土金属氢氧化物均能在壁画颜料层加固过程中取代壁画材料在降解过程中失去的粘合剂,且以更兼容的方式对壁画进行加固<sup>[60]</sup>。除了以短链乙醇为分散剂,纳米氢氧化钙和硅酸乙酯结合使用能够加固较大空隙或者分层区域,但经加固的材料吸水率和毛细度会降低<sup>[61]</sup>。国内学者采用纳米氢氧化钙对奉国寺常见的颜料进行实验室内模拟加固,对以奉国寺壁画中常见的颜料和奉国寺壁画制作材料和工艺为依据制作的酥碱试块进行加固,发现纳米氢氧化钙作为加固剂对其壁画颜料的色差、透气性及反应前后矿物颜料颗粒的形貌影响较小;在对酥碱样块的加固中发现纳米氢氧化钙与空气中二氧化碳作用,生成碳酸钙,能够实现酥碱壁画加固效果,增强文物基底的黏结力,同时光散射的影响最小<sup>[62]</sup>。

从目前研究成果可见,我国壁画加固剂使用最广泛的为有机高分子材料,但有机高分子材料中 C—C、C—H 及 C = C 等键在受外界环境中光、热、氧的影响均会产生老化<sup>[63]</sup>。因此,近些年来通过对常用的有机加固材料丙烯酸树脂进行纳米改性、有机硅改性以及光稳定性改性来提高其亲水性、渗透性,改善其光敏感性<sup>[64]</sup>。无机加固材料自身渗透性较差,与文物本体间的黏结作用较弱,加固强度有限,因此,无机材料在文物保护中的应用也有一定的局限性。

通过文献总结发现,无论是有机加固材料还是无机加固材料都有自身的一些优缺点。因此,在加固材料筛选的过程中不仅要参考加固剂材料的一些物理化学参数,还需要根据材料的修复性质进行评估,同时更应根据所要加固壁画的制作材料及所处环境,对现有的加固材料进行相关改性及筛选,以满

足不同地区、不同类型壁画在加固过程中的需求。

**2.1.2 地仗修补材料** 地仗修补主要指在酥碱壁画修复过程中对酥碱造成的地仗缺失进行填垫泥浆,使壁画地仗更加平整,为酥碱壁画的脱盐提供一个良好的条件,相关地仗修补材料研究见表 7。

表 7 地仗修补材料

Table 7 Materials for plaster restoration

| 研究者                      | 地仗加固材料                 |
|--------------------------|------------------------|
| 马赞峰等 <sup>[65]</sup>     | 澄板土、棉、麻、聚醋酸乙烯乳液        |
| 马赞峰等 <sup>[66]</sup>     | 甲基纤维素、碳素纤维、澄板土、硅藻土     |
| 赵林毅等 <sup>[67]</sup>     | 烧料礞石、烧阿嘎土和欧洲的水硬石灰 NHL5 |
| 马清林、陈庚林等 <sup>[69]</sup> | 烧料礞石                   |

注: 料礞石、烧阿嘎土和欧洲的水硬石灰 NHL5 的主要成分为生石灰  $\text{CaO}$  或  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  和水硬性胶凝材料  $\beta - \text{C}_2\text{S}$  ( $\beta$ -硅酸钙) 以及  $\text{C}_2\text{AS}$  (铝硅酸钙)。

在采用传统的修复材料对莫高窟地仗进行修复后依旧会产生病害。因此,新材料(甲基纤维素、碳素纤维、澄板土、硅藻土)被提出,但通过实验室研究,发现新材料制作的试块在强度、收缩率等性能方面有着一定的优势,但甲基纤维素的加入使得修补后的地仗色度发生了大的变化<sup>[65-66]</sup>;同时,烧料礞石被作为潮湿环境下地仗加固材料被提出,并从烧料礞石水合凝胶后产物的形貌、成分、抗拉抗压强度、透气性、收缩性等性能及对以烧料礞石为主要修复材料制作的试块的性能进行研究,发现烧料礞石水合产物凝胶有着优良的胶结性能、透气性、透水性,作为主要的修补材料具有较强的抗压、抗折性,较小收缩性和较好的耐老化性能<sup>[67]</sup>。通过对烧料礞石、烧阿嘎土和欧洲水硬石灰 NHL5 分别与石英砂、粉煤灰做填料的浆液结石体的流动速度、强度、耐盐碱性、收缩性等物理力学性能对比分析,发现:生石灰和空气中的二氧化碳、水合作用生成了孔隙率较大、强度较差的碳酸钙,但碳酸钙和文物本体兼容性较好,结合性较强; $\beta - \text{C}_2\text{S}$  和  $\text{C}_2\text{AS}$  生成的结石体,其透气性、透水性均差,但强度较高,这两种材料的性能刚好互补,能够形成具有很好透气性、透水性、兼容性及黏结性的修复胶凝体<sup>[68]</sup>。其中,将烧料礞石作为主要加固材料用于潮湿的丁家闸 5 号墓(常年相对湿度在 85% 以上)的酥碱地仗加固,发现加固后壁画地仗酥碱状况得到了明显改善,且具有一定的透气透水性,表面干燥,无微小水珠形成<sup>[69]</sup>。

关于地仗修补材料筛选的报道较少,常用的修补材料有当地土、砂、澄板土、料礞石、麦秸、麻等材料,且由于在修补地仗时为了增加其强度也会在地

仗层中加入一定的加固剂,应根据壁画环境选择合适的加固材料(2.1.1中已阐述),同时需要根据修补地仗的性能及壁画环境,筛选合适的修补材料,若采用土作为地仗修补材料,应对其进行脱盐处理。

## 2.2 脱盐材料及工艺

对东千佛洞<sup>[70]</sup>和莫高窟<sup>[71]</sup>酥碱病害修复区域调查发现,加固修复后的酥碱壁画在经历一段时间后重新产生了酥碱病害。因此,酥碱病害的治理与修复时所使用加固材料种类无关,即现用的各种加固材料都很难阻止酥碱病害的再次发生。结合酥碱病害产生的原因和机理,酥碱病害治理最根本的措施是维持壁画保存环境中相对湿度的稳定及从壁画地仗层和支撑体中去除可溶盐。

壁画的脱盐处理包括壁画表面盐霜的清理和地仗层的脱盐。表面盐霜的清理有机械剔除法、敷贴法、转换法<sup>[72]</sup>,常用的是剔除法和敷贴法。瑞士圣劳伦斯大教堂壁画表面盐霜  $\text{MgSO}_4$  在相对湿度低于80%的时候很稳定,采用手术刀、刷子清除<sup>[73]</sup>。对于不适合机械剔除的盐霜或地仗脱盐多用敷贴法,采用纸浆、去离子水、日本纸为敷贴材料,整个脱盐工艺为:日本纸(去离子水浸润)粘附在处理区域→手涂抹纸浆约5 mm(纸浆:去离子水=1:5.5)→移除<sup>[74]</sup>。对于无法用以上传统方法清除的盐霜,可将琼脂作为微生物载体、日本纸作为保护层,利用微生物的还原性清除以  $\text{KNO}_3$  为主的盐霜,微生物的选择则根据盐霜的不同而不同<sup>[75]</sup>。

国内学者利用淀粉、丙烯酸酰胺作为主要原料制备了一种淀粉接枝的聚丙烯酰胺高吸水性树脂,通过对这种材料吸水 and 吸盐效果、吸水 and 吸盐后 pH 值的研究,发现该材料均具有明显的吸水、吸盐效果,且在吸水、吸盐后仍呈中性,不会对壁画产生损坏<sup>[76]</sup>,因此采用淀粉接枝的聚丙烯酰胺树脂为脱盐材料,以36种不同的负载形式进行脱盐效果评估,最终发现 KC-X60(Ⅱ)(即两层 KC-X60 纸中负载淀粉接枝的聚丙烯酰胺树脂)脱盐性能最佳,以此方法对莫高窟98窟壁画酥碱壁画进行脱盐,发现效果较好<sup>[77]</sup>。其次,应用以上方法对仓颉庙部分酥碱壁画进行脱盐处理,发现该材料能将仓颉庙  $\text{Na}^+$ 、 $\text{K}^+$ 、 $\text{Cl}^-$ 、 $\text{NO}_3^-$  降低约三分之一,且二次脱盐可以降低其含盐量的70%<sup>[78]</sup>。关于国内酥碱壁画的修复工艺,敦煌研究院在最早的除尘-加固-回贴-喷涂-滚压工艺<sup>[35-37]</sup>的基础上规范并且总结了关于酥碱壁画修复整个工艺流程为:除尘→填垫泥浆→注射粘结剂→回贴颜料层→颜料层补胶→滚压→压

平壁画→敷设脱盐板→更换脱盐材料→脱盐板内空气相对湿度检测→二次脱盐,且规定了壁画脱盐应该在气温为15~35℃之间,相对湿度低于75%的环境条件下进行<sup>[79]</sup>。目前国内酥碱壁画修复均以此为标准进行。

无论是对壁画表层盐霜的剔除,还是对壁画表层不易剔除盐霜以及地仗层盐霜的脱盐处理都存在着一定的危险性:剔除盐霜容易伤到壁画颜料层;采用 KC-X60(Ⅱ)脱盐垫处理盐霜容易再次将水分带到壁画中,增加壁画中的含水量;采用纸浆或微生物琼脂敷贴脱盐不仅会带入一定的水分进壁画,同时若纸浆或微生物清除不当会对壁画造成保护性破坏。也有学者通过监测壁画脱盐区发现在经历一段时间后该区域含盐量又达到了治理之前的水平,指出关于壁画的脱盐处理仅仅是防止酥碱进一步严重的短期措施<sup>[74]</sup>。D'Agostino 通过监测莱切大教堂(意大利南部)壁画保存室环境,建立三维计算流体力学模型,通过温度、相对湿度等参数模型提出适合保护壁画等文物的微环境<sup>[72]</sup>。但由于壁画所含可溶盐及所处环境的复杂性,也有学者提出通过转换壁画墙体底部存在的易溶盐转换为溶解性小得多的盐,如将一些易溶解的硫酸盐、磷酸盐或碳酸盐转化为难溶的钙盐、钡盐<sup>[80-81]</sup>,但依旧未见到可行的实施方案。

因此,关于壁画酥碱病害的修复和预防性保护,只能将对壁画颜料层、地仗层进行脱盐和环境控制相结合,以严防壁画酥碱病害的进一步发展,并且坚持对修复后的壁画进行长时间监测,评估其修复材料和工艺的效果,为后期的保护修复提供数据支撑和经验借鉴。

## 3 总结与展望

研究人员通过多年来对壁画酥碱病害产生原因和机理的探究,提出壁画的酥碱病害是由于壁画地仗中可溶盐在毛细水和外界环境温湿度变化下反复发生溶解和结晶等作用,导致壁画地仗层自身成分和结构遭到破坏,使其强度下降,最终造成壁画地仗层和颜料层破损、脱落的现象。为了更好地保护壁画,保护人员开始研究酥碱壁画的加固材料——从有机材料到无机材料,力求做到减少酥碱病害发生的频率,减轻酥碱病害带来的破损程度,同时也开始寻找酥碱壁画地仗较为合适的修补材料。学者们通过研究还指出,除盐和控制环境水是控制壁画酥碱病害的主要方式,并且针对已酥碱壁画的



修复给出了一套可行的修复标准和工艺。

本文通过对大量文献进行梳理,发现虽然各位学者针对壁画酥碱病害产生的原因、机理、修复方法及预防措施已做了大量的研究工作,但由于研究者在研究过程中所采集的样品、模拟条件等相关信息的单一性,研究结果也有一定的局限性。由于导致壁画酥碱病害产生的可溶盐因壁画类型和所在区域的不同而不同,应因地制宜,采用无损或微损方法对其进行全面分析;壁画酥碱病害发生相关环境阈值的确定应结合当地温湿度环境、根据壁画的制作材料、制作工艺及地仗中所含可溶盐的种类进行模拟试验;酥碱壁画加固材料各有其优缺点,应根据当地环境对加固材料进行筛选;壁画修补材料则应采用当地土、砂材料对其进行修补,修补前应进行脱盐处理;脱盐处理中剔除法、转换法及敷贴法,均有一定的风险,因此关于壁画、地仗中盐分的处理亟待解决。同时,在酥碱壁画的研究中应将实验室内的模拟试验和现场试验进行结合,并对修复后的酥碱壁画进行长期监测,以评估修复材料和修复方法的可行性,对壁画保存环境和病害的发生进行建模,旨在为酥碱壁画修复材料的选择、研究和保存环境控制提供更好的数据支撑,为预防性保护提供一定的理论基础。

#### 参考文献:

- [1] 郭宏. 古代干壁画与湿壁画的鉴定[J]. 中原文物, 2004(2): 76-80.  
GUO Hong. Identification of ancient dry and wet frescoes[J]. Cultural Relics of Central China, 2004(2): 76-80.
- [2] 何流. “酥碱”的溯源探究及现代学理浅析[J]. 中国科技术语, 2012, 14(6): 47-49.  
HE Liu. Research on the etymology of “plaster disruption” and a brief analysis of modern theory[J]. China Terminology, 2012, 14(6): 47-49.
- [3] 何流. 文物病害术语“酥碱”的再认识[N]. 中国文物报, 2013-04-19(7).  
HE Liu. Re-understanding of the term “plaster disruption” for cultural relics diseases[N]. China Cultural Relics News, 2013-04-19(7).
- [4] 中华人民共和国国家文物局. 古代壁画病害与图示: WW/T 0001—2007[S]. 北京: 文物出版社, 2008.  
National Cultural Heritage Administration of the People's Republic of China. Specification on damage glossary and legend of ancient murals: WW/T 0001—2007[S]. Beijing: Cultural Relics Press, 2008.
- [5] 王旭东. 中国古代壁画保护规范研究[M]. 北京: 科学出版社, 2013.  
WANG Xudong. Research on the protection regulations of ancient Chinese murals[M]. Beijing: Science Press, 2013.
- [6] 郭宏, 马清林. 馆藏壁画保护技术[M]. 北京: 科学出版社, 2011.  
GUO Hong, MA Qinglin. The protection technology for murals in collections[M]. Beijing: Science Press, 2011.
- [7] 郭宏, 段修业, 李军. 莫高窟 53 窟壁画酥碱病害原因的初步研究[J]. 敦煌研究, 1992(3): 73-85, 129-140.  
GUO Hong, DUAN Xiuye, LI Jun. A preliminary study on the causes of efflorescence disease on the murals in Cave 53 of the Mogao Grottoes[J]. Dunhuang Research, 1992(3): 73-85, 129-140.
- [8] 郭宏, 李最雄, 宋大康, 等. 敦煌莫高窟壁画酥碱病害机理研究之一[J]. 敦煌研究, 1998(3): 153-163, 188.  
GUO Hong, LI Zuixiong, SONG Dakang, et al. Research on the mechanism of efflorescence disease in the frescoes of the Mogao Grottoes in Dunhuang (I)[J]. Dunhuang Research, 1998(3): 153-163, 188.
- [9] 郭宏, 李最雄, 裴元勋, 等. 敦煌莫高窟壁画酥碱病害机理研究之三[J]. 敦煌研究, 1999(3): 153-175.  
GUO Hong, LI Zuixiong, QIU Yuanxun, et al. Research on the mechanism of efflorescence disease in the frescoes of the Mogao Grottoes in Dunhuang (III)[J]. Dunhuang Research, 1999(3): 153-175.
- [10] 郭宏, 李最雄, 裴元勋, 等. 敦煌莫高窟壁画酥碱病害的机理研究之二[J]. 敦煌研究, 1998(4): 159-172, 184.  
GUO Hong, LI Zuixiong, QIU Yuanxun, et al. Research on the mechanism of efflorescence disease in the frescoes of the Mogao Grottoes in Dunhuang (II)[J]. Dunhuang Research, 1998(4): 159-172, 184.
- [11] 张亚旭. 莫高窟 196 窟壁画保存现状研究[D]. 西安: 西北大学, 2018.  
ZHANG Yaxu. Research on the preservation status of the frescoes in Cave 196 of the Mogao Grottoes[D]. Xi'an: Northwest University, 2018.
- [12] 于宗仁, 王彦武, 王小伟, 等. 壁画盐害水汽来源研究——以隆兴寺为例[J]. 地球科学进展, 2017, 32(6): 668-676.  
YU Zongren, WANG Yanwu, WANG Xiaowei, et al. Study on the source of water vapor from salt disaster in murals: taking Longxing Temple as an example[J]. Advances in Earth Science, 2017, 32(6): 668-676.
- [13] 魏瑞, 刘成. 辽宁奉国寺建筑壁画可溶盐调查与分析[J]. 文物鉴定与鉴赏, 2018(13): 92-93.  
WEI Rui, LIU Cheng. Investigation and analysis of soluble salt in architectural murals of Fengguo Temple in Liaoning[J]. Identification and Appreciation to Cultural Relics, 2018(13): 92-93.
- [14] 张一博. 吐峪沟石窟壁画病害及治理对策研究[D]. 西安: 西北大学, 2021.  
ZHANG Yibo. Research on the diseases and treatment measures of Tuyugou Grottoes mural paintings[D]. Xi'an: Northwest University, 2021.
- [15] 张明泉, 张虎元, 曾正中, 等. 莫高窟壁画酥碱病害产生机理[J]. 兰州大学学报(自然科学版), 1995(1): 96-101.  
ZHANG Mingquan, ZHANG Huiyuan, ZENG Zhengzhong, et al.

- Mechanism of efflorescent disease in Mogao Grottoes murals[J]. Journal of Lanzhou University (Natural Sciences), 1995(1):96 – 101.
- [16] 严妍,刘成,赵丽,等. 从环境监测结果分析克孜尔石窟的主要病害成因[M]//西部考古. 北京:科学出版社,2012:307 – 327.
- YAN Yan, LIU Cheng, ZHAO Li, *et al.* Analysis of the main causes of diseases in Kizil Grottoes from environmental monitoring results[M]//Western Archaeology. Beijing: Science Press,2012: 307 – 327.
- [17] 黄美燕,杨景龙. 江南传统建筑的壁画保护修复研究——以陈望道故居照墙纠偏和壁画修复实践为例[J]. 东方博物,2022(4):112 – 120.
- HUANG Meiyang, YANG Jinglong. Research on the protection and restoration of murals in traditional buildings in the south of the Yangtze River: taking the rectification of screen wall and the restoration of murals in Chen Wangdao's former residence as an example[J]. Cultural Relics of the East,2022(4):112 – 120.
- [18] 刘文兵,胡钢. 吉林省博物院藏库伦一号辽墓壁画材质与病害相关性分析[C]//西安曲江艺术博物馆. 色·物象·变与辩——首届曲江壁画论坛论文集. 北京:文物出版社,2013: 64 – 71.
- LIU Wenbing, HU Gang. Analysis on the correlation between the materials and diseases of mural paintings from the Liao Tomb No. 1 in the collection of the Jilin Provincial Museum [C]//Xi'an Qujiang Art Museum. Color, Object, Change, and Debate: Proceedings of the First Qujiang Mural Forum. Beijing: Cultural Relics Press,2013:64 – 71.
- [19] SAWDY A, PRICE C. Salt damage at Cleve Abbey, England, Part I: a comparison of theoretical predictions and practical observations[J]. Journal of Cultural Heritage,2005,6(2):125 – 135.
- [20] MADARIAGA J M, MAGUREGUI M, DE VALLEJUELO F O, *et al.* In situ analysis with portable Raman and ED – XRF spectrometers for the diagnosis of the formation of efflorescence on walls and wall paintings of the Insula IX 3 (Pompeii, Italy) [J]. Journal of Raman Spectroscopy,2014,45(11/12):1059 – 1067.
- [21] DI TULLIO V, PROIETTI N, GENTILE G, *et al.* Unilateral NMR: a noninvasive tool for monitoring *in situ* the effectiveness of intervention to reduce the capillary raise of water in an ancient deteriorated wall painting[J]. International Journal of Spectroscopy, 2012:494301.
- [22] GIL M, MARTINS M R, CARVALHO M L, *et al.* Microscopy and microanalysis of an extreme case of salt and biodegradation in 17th century wall paintings [J]. Microscopy & Microanalysis, 2015,21(3):606 – 616.
- [23] VETTORI S, BRACCI S, CANTISANI E, *et al.* A multi – analytical approach to investigate the state of conservation of the wall paintings of Insula 104 in Hierapolis (Turkey) [J]. Microchemical Journal, 2016,128:279 – 287.
- [24] 陈港泉,苏伯民,赵林毅,等. 莫高窟第85窟壁画地仗酥碱模拟试验[J]. 敦煌研究,2005(4):62 – 66.
- CHEN Gangquan, SU Bomin, ZHAO Linyi, *et al.* The simulation test of plaster disruption on the frescoes of the 85th cave of the Mogao Grottoes[J]. Dunhuang Research,2005(4):62 – 66.
- [25] 陈港泉. 敦煌莫高窟壁画盐害分析及治理研究[D]. 兰州:兰州大学,2016.
- CHEN Gangquan. Analysis and treatment of salt damage to murals in the Mogao Grottoes of Dunhuang [D]. Lanzhou: Lanzhou University,2016.
- [26] 王菊琳,张屹东,吴玉清,等. 盐水平比壁画酥碱病害产生和发展速率的影响[J]. 表面技术,2017,46(2):1 – 7.
- WANG Julin, ZHANG Yidong, WU Yuqing, *et al.* Effects of brine ratio on the occurrence and development rate of efflorescence disease on murals[J]. Surface Technology,2017,46(2):1 – 7.
- [27] 姜啸. 壁画地仗盐分毛细输送机制研究[D]. 兰州:兰州大学,2014.
- JIANG Xiao. Study on the capillary transport mechanism of salt on the mural plaster[D]. Lanzhou: Lanzhou University,2014.
- [28] 张虎元,姜啸,王锦芳,等. 壁画地仗中盐分的毛细输送机制研究[J]. 岩土力学,2016,37(1):1 – 11.
- ZHANG Huyuan, JIANG Xiao, WANG Jinfang, *et al.* Study on capillary transport mechanism of salt in fresco plaster[J]. Rock and Soil Mechanics,2016,37(1):1 – 11.
- [29] 贾全全. 莫高窟壁画地仗持水特性研究[D]. 兰州:兰州大学,2020.
- JIA Quanquan. Research on the water – holding characteristics of the Mogao Grottoes murals [D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2020.
- [30] JIA Quan, CHEN Wenwu, TONG Yanmei, *et al.* Experimental study on capillary migration of water and salt in wall painting plaster: a case study at Mogao Grottoes, China[J]. International Journal of Architectural Heritage,2022,16(1):705 – 716.
- [31] 闫玲. 壁画地仗酥碱病害非饱和水盐迁移试验研究[D]. 兰州:兰州大学,2009.
- YAN Ling. Experimental study on the migration of unsaturated water and salt in the caustic soda disease of murals[D]. Lanzhou: Lanzhou University,2009.
- [32] 靳治良,陈港泉,夏寅,等. 硫酸盐与氯化物对壁画的破坏性对比研究——硫酸钠超强的穿透、迁移及结晶破坏力证据[J]. 文物保护与考古科学,2015,27(1):29 – 38.
- JIN Zhiliang, CHEN Gangquan, XIA Yin, *et al.* Comparative study on the destructive effects of sulfates and chlorides on murals: evidence of the super strong penetration, migration, and crystal destructive power of sodium sulfate[J]. Sciences of Conservation and Archaeology,2015,27(1):29 – 38.
- [33] SAWDY A, HERITAGE A. Evaluating the influence of mixture composition on the kinetics of salt damage in wall paintings using time lapse video imaging with direct data annotation [J]. Environmental Geology,2007,52(2):303 – 315.
- [34] PIQUÉ F, DEI L, FERRONI E, *et al.* Physicochemical aspects of the deliquescence of calcium nitrate and its implications for wall painting conservation[J]. Studies in Conservation,1992,37(4): 217 – 227.
- [35] 苏伯民,陈港泉. 不同含盐量壁画地仗泥层的吸湿和脱湿速度的比较[J]. 敦煌研究,2005(5):62 – 65.

- SU Bomin, CHEN Gangquan. Comparison of moisture absorption and evaporation rates of mud layers of murals with different salt contents[J]. *Dunhuang Research*, 2005(5): 62–65.
- [36] 李凤洁. 敦煌莫高窟地仗层吸湿特征及机理试验研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2020.
- LI Fengjie. Experimental research on moisture absorption characteristics and mechanism of the Mogao Grottoes in Dunhuang [D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2020.
- [37] 李凤洁, 王旭东, 郭青林. 莫高窟壁画地仗层水汽吸附特征及其影响因素[J]. 西北大学学报(自然科学版), 2020, 50(4): 606–614.
- LI Fengjie, WANG Xudong, GUO Qinglin. Water vapor adsorption characteristics and influencing factors in the strata of the frescoes in the Mogao Grottoes[J]. *Journal of Northwest University (Natural Science Edition)*, 2020, 50(4): 606–614.
- [38] 张化冰, 苏伯民, 段修业, 等. 壁画保护材料 PVAc、PVA 的性质研究与表征[J]. 敦煌研究, 2011(6): 29–35.
- ZHANG Huabing, SU Bomin, DUAN Xiuye, *et al.* Research and characterization of the properties of mural protection materials PVAc and PVA[J]. *Dunhuang Research*, 2011(6): 29–35.
- [39] 段文杰. 莫高窟保护工作进入新阶段[J]. 敦煌研究, 1988(3): 1–2.
- DUAN Wenjie. The protection of Mogao Grottoes enters a new stage[J]. *Dunhuang Research*, 1988(3): 1–2.
- [40] 胡继高. 文物保护科学的规律性[J]. 科技导报, 2001(4): 52–55.
- HU Jigao. The regularity of cultural relic protection science[J]. *Science & Technology Review*, 2001(4): 52–55.
- [41] 王进玉. 高分子粘合剂在壁画保护上的应用[J]. 自然杂志, 1987(1): 31–34.
- WANG Jinyu. Application of polymer adhesives in mural protection [J]. *Chinese Journal of Nature*, 1987(1): 31–34.
- [42] 李云鹤. 莫高窟壁画修复初探[C]//中国文物保护技术协会. 文物保护技术(1981~1991). 北京: 科学出版社, 2010: 93–102.
- LI Yunhe. Preliminary exploration on the restoration of Mogao Grottoes murals[C]//China Association for Conservation Technology of Cultural Heritage. *Cultural Relic Conservation Technology (1981—1991)*. Beijing: Science Press, 2010: 93–102.
- [43] 段修业, 孙洪才. 莫高窟第108窟酥碱起甲壁画的修复报告[J]. 敦煌研究, 1990(3): 98–100, 121, 125.
- DUAN Xiuye, SUN Hongcai. Report on the restoration of the alkalized murals in Cave 108 of Mogao Grottoes[J]. *Dunhuang Research*, 1990(3): 98–100, 121, 125.
- [44] 苏伯民, 李茹. 三种加固材料对壁画颜色的影响[J]. 敦煌研究, 1996(2): 171–179.
- SU Bomin, LI Ru. The influence of three reinforcement materials on the color of murals[J]. *Dunhuang Research*, 1996(2): 171–179.
- [45] 范宇权, 李最雄, 于宗仁, 等. 修复加固材料对莫高窟壁画颜料颜色的影响[J]. 敦煌研究, 2002(4): 45–56, 111.
- FAN Yuquan, LI zuixiong, YU Zongren, *et al.* The effect of restoration and reinforcement materials on the color of pigments in Mogao Grottoes murals[J]. *Dunhuang Research*, 2002(4): 45–56, 111.
- [46] 苏伯民, 张化冰, 谈翔, 等. 高分子材料应用于莫高窟壁画保护的历史、现状与研究[J]. 敦煌研究, 2018(1): 80–84.
- SU Bomin, ZHANG Huabing, TAN Xiang, *et al.* The history, current situation, and research of the application of polymer materials in the protection of Mogao Grottoes murals [J]. *Dunhuang Research*, 2018(1): 80–84.
- [47] 樊再轩, 薛止昆, 唐伟, 等. 新疆和田达玛沟遗址出土壁画修复试验报告[J]. 敦煌研究, 2013(1): 18–22, 126.
- FAN Zaixuan, XUE Zhikun, TANG Wei, *et al.* Experimental report on restoration of frescoes unearthed from Damagou site in Hotan, Xinjiang [J]. *Dunhuang Research*, 2013(1): 18–22, 126.
- [48] 张天宇. 云冈石窟五华洞壁画修复保护技术[D]. 北京: 中央美术学院, 2017.
- ZHANG Tianyu. Restoration and protection technology of Wuhua Cave murals in Yungang Grottoes[D]. Beijing: Central Academy of Fine Arts, 2017.
- [49] 王旭东, 段修业, 李最雄, 等. 西藏萨迦寺壁画修复现场试验研究[J]. 敦煌研究, 2005(4): 16–23.
- WANG Xudong, DUAN Xiuye, LI Zuixiong, *et al.* Field test research on the restoration of frescoes in Sajia Temple in Tibet[J]. *Dunhuang Research*, 2005(4): 16–23.
- [50] 李最雄. 丝绸之路石窟壁画彩塑保护[M]. 北京: 科学出版社, 2005.
- LI Zuixiong. The protection of painted sculptures in Silk Road grottoes[M]. Beijing: Science Press, 2005.
- [51] 杨欢. 天梯山搬迁壁画保护修复技术研究——以第三窟一幅明代佛像为例[D]. 西安: 西北大学, 2016.
- YANG Huan. Research on the protection and restoration technology for mural relocation of Tianti Mountain: a case study of a Ming Buddha statue mural at the No. 3 cave [D]. Xi, an: Northwest University, 2016.
- [52] 李淑琴, 王啸啸. 中德壁画修复保护方法初探[C]//中国文物保护技术协会. 中国文物保护技术协会第二届学术年会论文集, 2002: 137–141.
- LI Shuqin, WANG Xiaoxiao. A preliminary study on the methods for restoration and protection of Sino-German fresco paintings [C]//Proceedings of the Second Academic Annual Meeting of the China Association for Conservation Technology of Cultural Heritage, 2002: 137–141.
- [53] 陈港泉. 干旱环境下古代壁画保护成套技术集成与应用示范研究[M]. 北京: 科学出版社, 2019.
- CHEN Gangquan. Research on the integration and application demonstration of complete technologies for the protection of ancient murals in arid environments[M]. Beijing: Science Press, 2019.
- [54] 戎岩. 北方墓葬壁画水盐运移规律及其病害治理研究[D]. 西安: 陕西师范大学, 2017.
- RONG Yan. Study on the law of water and salt migration and disease control on murals in northern tombs [D]. Xi, an: Shanxi Normal University, 2017.
- [55] CATENAZZI K. Evaluation of the use of Funori for consolidation

- of powdering paint layers in wall paintings [J]. *Studies in Conservation*, 2016, **62**(1/2): 96–103.
- [56] 李燕飞, 赵林毅, 王磊, 等. 聚醋酸乙烯酯乳液的表征、性能及其在彩绘类文物保护中的应用[J]. *文物保护与考古科学*, 2021, **33**(4): 22–32.
- LI Yanfei, ZHAO Linyi, WANG Lei, *et al.* Characterization, performance and application of polyvinyl acetate lotion in the protection of painted cultural relics[J]. *Sciences of Conservation and Archaeology*, 2021, **33**(4): 22–32.
- [57] HE Xiang, XU Magen, HUI Zhang, *et al.* An exploratory study of the deterioration mechanism of ancient wall – paintings based on thermal and moisture expansion property analysis[J]. *Journal of Archaeological Science*, 2014, **42**: 194–200.
- [58] 贺翔. 彩绘文物次生病害与典型保护材料失效机理研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2018.
- HE Xiang. Study on secondary disease damage of painted cultural relics and failure mechanism of typical protective materials[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2018.
- [59] GIORGI R, DEI L, BAGLIONI P, *et al.* A new method for consolidating wall paintings based on dispersions of lime in alcohol [J]. *Studies in Conservation*, 2000, **45**(3): 154–161.
- [60] BAGLIONI P, CHELAZZI D, GIORGI R, *et al.* Colloid and materials science for the conservation of cultural heritage: cleaning, consolidation, and deacidification[J]. *Langmuir*, 2013, **29**(17): 5110–5122.
- [61] D'ARMADA P, HIRST E. Nano – lime for consolidation of plaster and stone [J]. *Journal of Architectural Conservation*, 2014, **18**(1): 63–80.
- [62] 魏瑞. 纳米氢氧化钙在奉国寺酥碱壁画加固中的可行性研究[D]. 西安: 西北大学, 2019.
- WEI Rui. Feasibility study of nano calcium hydroxide in the reinforcement of frescoes in Fengguo Temple [D]. Xi'an: Northwest University, 2019.
- [63] 成倩, 赵丹丹, 郭宏. 早期失效保护修复材料对壁画的影响[J]. *文物保护与考古科学*, 2013, **25**(2): 77–82.
- CHENG Qian, ZHAO Dandan, GUO Hong. The impact of early failure protection and restoration materials on murals[J]. *Sciences of Conservation and Archaeology*, 2013, **25**(2): 77–82.
- [64] 郑军. 浅议丙烯酸树脂在文物保护领域中的应用[J]. *文物世界*, 2018(6): 74–76.
- ZHENG Jun. Discussion on the application of acrylic resin in the field of cultural relic protection [J]. *World of Antiquity*, 2018(6): 74–76.
- [65] 马赞峰, 青木繁夫, 犬竹和. 敦煌莫高窟壁画地仗修补材料筛选[J]. *敦煌研究*, 2007(5): 22–27.
- MA Zanfeng, AOKI S, INUZHU K. Screening of repair materials for the plaster on the frescoes of the Mogao Grottoes in Dunhuang [J]. *Dunhuang Research*, 2007(5): 22–27.
- [66] 马赞峰, 汪万福, 唐伟, 等. 不同土沙比壁画地仗性能测试[J]. *敦煌研究*, 2009(6): 36–39.
- MA Zanfeng, WANG Wanfu, TANG Wei, *et al.* Test of the plaster performance of murals with different soil and sand ratios [J]. *Dunhuang Research*, 2009(6): 36–39.
- [67] 马清林, 陈庚龄, 卢燕玲, 等. 潮湿环境下壁画地仗加固材料研究[J]. *敦煌研究*, 2005(5): 66–70.
- MA Qinglin, CHEN Gengling, LU Yanling, *et al.* Research on the reinforcement materials for the murals in the wet environment [J]. *Dunhuang Research*, 2005(5): 66–70.
- [68] 赵林毅, 李黎, 樊再轩, 等. 古代墓室壁画地仗加固材料的室内研究[J]. *敦煌研究*, 2016(2): 108–116.
- ZHAO Linyi, LI Li, FAN Zaixuan, *et al.* Indoor research on the reinforcement materials for the wall of ancient tomb murals [J]. *Dunhuang Research*, 2016(2): 108–116.
- [69] 陈庚龄, 马清林. 潮湿环境下壁画地仗修复材料与技术[J]. *敦煌研究*, 2005(4): 51–56.
- CHEN Gengling, MA Qinglin. Materials and techniques for restoration of mural plaster in wet environment [J]. *Dunhuang Research*, 2005(4): 51–56.
- [70] 郭宏, 段修业. 东千佛洞壁画颜料色彩规律及壁画病害治理的研究[J]. *敦煌研究*, 1995(3): 59–73.
- GUO Hong, DUAN Xiuye. Study on the color regularity of the frescoes in the East Thousand Buddha Caves and the control of the fresco diseases [J]. *Dunhuang Research*, 1995(3): 59–73.
- [71] 李佳珉. 莫高窟壁画病害和已用典型保护材料的调查研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2013.
- LI Jiamin. Investigation and research on the diseases of Mogao Grottoes murals and typical protective materials used [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2013.
- [72] MATTEINI M. Review: an assessment of florentine methods of wall painting conservation based on the use of mineral treatments [J]. *The Conservation of Wall Paintings*, 1992: 137–148.
- [73] CORNFORTH C, SIMPSON C. Change and continuity in the governance of nonprofit organizations in the United Kingdom: the impact of organizational size [J]. *Nonprofit Management & Leadership*, 2010, **12**(4): 451–470.
- [74] BRAJER I, LARSEN P K. The salt reduction treatment on the wall paintings in Tirsted Church [C]//Proceeding of the Conference on Salt Weathering of Buildings and Stone Sculptures, Copenhagen, 22–24 October, 2008: 219–228.
- [75] GILARD J, MANSHIP E. Change and continuity: material and ethical issues in the restoration of wall paintings in the Cathedral of Saint Lawrence, Switzerland [J]. *Studies in Conversation*, 2020, **65**(1): 1–7.
- [76] 苏伯民, 陈港泉, 樊再轩, 等. 新型合成脱盐材料在治理莫高窟盐害壁画中的试验研究[J]. *文博*, 2009(6): 175–183.
- SU Bomin, CHEN Gangquan, FAN Zaixuan, *et al.* Experimental study of new synthetic desalination materials in the control of salt damage murals in Mogao Grottoes [J]. *Relics and Museology*, 2009(6): 175–183.
- [77] 樊再轩, 陈港泉, 苏伯民, 等. 莫高窟第98窟酥碱壁画保护修复试验研究[J]. *敦煌研究*, 2009(6): 4–7.
- FAN Zaixuan, CHEN Gangquan, SU Bomin, *et al.* Experimental study on the protection and restoration of the alkaline murals in Cave 98 of the Mogao Grottoes [J]. *Dunhuang Research*, 2009(6): 4–7.
- [78] 陈港泉, 樊再轩, 于群力, 等. 陕西白水仓颉庙酥碱壁画脱盐修

- 复的初步试验[J]. 敦煌研究, 2009(6): 8-12.
- CHEN Gangquan, FAN Zaixuan, YU Qunli, *et al.* Preliminary experiment on desalting restoration of efflorescent murals in Cangjie Temple, Baishui, Shaanxi [J]. *Dunhuang Research*, 2009(6): 8-12.
- [79] 中华人民共和国国家文物局. 古代壁画脱盐技术规范: WW/T 0031—2010[S]. 北京: 文物出版社, 2010.
- National Cultural Heritage Administration of the People's Republic of China. Technical specification for desalination of ancient murals: WW/T 0031—2010[S]. Beijing: Cultural Relics Press, 2010.
- [80] D'AGOSTINO D, CONGEDO P M, CATALDO R. Computational fluid dynamics (CFD) modeling of microclimate for salts crystallization control and artworks conservation [J]. *Journal of Cultural Heritage*, 2014, 15(4): 448-457.
- [81] BLAEUER C, ROUSSET B. Salt sources revisited [C]// SWBSS2014, 3rd International Conference on Salt Weathering of Buildings and Stone Sculptures, October 14-16, 2014.

## Overview of research on plaster disruption in murals

XU Lina, YUE Yongqiang, MA Qian, ZHANG Qiang

(*Art Institute of Maijishan Cave - Temple Complex, Dunhuang Academy, Tianshui 741020, China*)

**Abstract:** Plaster disruption, called the “cancer” of murals, is one of the most serious diseases of murals. Since the formation of plaster disruption is influenced by many factors, the related treatment and prevention are severely restricted by the indefinite mechanism of formation, lack of repair materials, and difficulty of repair methods. This paper systematically reviews previous research on the cause and mechanism of formation of plaster disruption, reinforcement and plaster repair materials, as well as conservation and restoration methods for different salts. Also, the experiences gained during the restoration of murals suffering from plaster disruption are objectively evaluated in this paper. We hope this article will provide systematic technological and practical references for the prevention and treatment of plaster disruption of ancient murals.

**Key words:** Mural; Plaster disruption; Disease mechanism; Reinforcement material; Repair material; Repair technique

(责任编辑 谢 燕; 校对 马江丽)