

## 点石成色：敦煌壁画的彩色世界

张天龙<sup>1</sup>, 张鑫媛<sup>1</sup>, 赵星<sup>2</sup>, 汤宏胜<sup>1,\*</sup>, 李延<sup>1,\*</sup>, 李华<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 西北大学化学与材料科学学院, 西安 710127

<sup>2</sup> 西北大学文化遗产学院, 西安 710127

**摘要:** 敦煌壁画, 作为中国古代艺术的瑰宝, 是一个丰富的历史、文化、艺术和宗教文化遗产宝库, 其价值不可估量。这些壁画所用的颜料, 皆为天然矿物精心挑选而成, 它们为敦煌壁画带来了独一无二的色彩与质感。深入理解这些颜料的特性, 有助于我们更好地欣赏艺术、文化和历史的深厚底蕴, 也是壁画保护与修复的基础。本文采用生动拟人化的叙述方式, 通俗易懂地描绘了莫高窟壁画的色彩来源, 重点阐述了常用典型的矿物颜料及其来源, 旨在促进壁画的保护工作, 以及文化遗产的普及、宣传和传承。

**关键词:** 敦煌壁画; 矿物颜料; 科普; 文物保护

**中图分类号:** G64; O6

## Colors of Dotted Stone: The Colorful World of Dunhuang Murals

Tianlong Zhang<sup>1</sup>, Xinyuan Zhang<sup>1</sup>, Xing Zhao<sup>2</sup>, Hongsheng Tang<sup>1,\*</sup>, Yan Li<sup>1,\*</sup>, Hua Li<sup>1</sup>

<sup>1</sup> College of Chemistry and Materials Science, Northwestern University, Xi'an 710127, China.

<sup>2</sup> College of Cultural Heritage, Northwestern University, Xi'an 710127, China.

**Abstract:** The Dunhuang murals, as the jewels of ancient Chinese art, represent a rich repository of history, culture, art, and religious heritage, whose value is immeasurable. The pigments used in these murals, meticulously selected from natural minerals, bring unparalleled color and texture to the Dunhuang paintings. A deeper understanding of the characteristics of these pigments aids in the appreciation of the profound layers of art, culture, and history, and serves as the foundation for the preservation and restoration of the murals. This article employs a vivid, anthropomorphic narrative to make the origins of the colors in the Mogao Caves' murals accessible and understandable. It focuses on elucidating the typical mineral pigments used and their sources, with the aim of promoting the conservation of these murals, as well as the popularization, dissemination, and heritage of cultural treasures.

**Key Words:** Dunhuang murals; Mineral pigments; Popularization of science; Preservation of cultural relics

小张是一位对中国古代文明充满好奇心的年轻人, 在一个风和日丽的下午, 他沉浸在最钟爱的动画片《九色鹿》的世界里。这部动画是根据敦煌壁画《鹿王本生》故事改编, 由中国上海美术电影制片厂1981年出品的动画艺术杰作。当夜幕降临, 小张进入了甜美的梦乡。梦中, 他发现自己竟然置身于一片荒无人烟的沙漠中, 小张害怕极了, 这时, 一只熠熠生辉的九色鹿突然出现在他的面前, 他感到一种莫名的熟悉和安心, 急忙开口问道: “你是那个动画片里乐于助人的九色鹿吗? 你可以帮助我吗? 我好像被困在这片沙漠里了。”九色鹿告诉他, 自己是这片土地的守护者, 拥有带

收稿: 2024-01-19; 录用: 2024-02-21; 网络发表: 2024-05-13

\*通讯作者, Emails: tanghongsheng@nwu.edu.cn (汤宏胜); yanli@nwu.edu.cn (李延)

基金资助: 教育部高等学校化学类专业教学指导委员会教学研究与实践项目(H20210602, H20210603); 教育部基础学科拔尖学生培养计划2.0研究课题(20222159)

领人们穿越沙漠，探寻古老的文明的能力。九色鹿对小张说：“你被选中了，我将会带你去参观一个神秘而辉煌的地方。”

## 1 初识敦煌

随着九色鹿的引领，小张来到了敦煌莫高窟，他被眼前壮观而震撼的壁画深深吸引，这些古老的壁画以绚丽多彩的色彩和栩栩如生的场景展现着历史的沧桑与辉煌仿佛将他带回了古代的辉煌时期。

小张疑惑地问：“为什么古人要把石窟建在荒凉的沙漠里呢？”

九色鹿沉思片刻回答道：“这个问题的答案，需要我们将视角放到整个亚欧大陆上。敦煌地理位置独特，位于丝绸之路的重要节点，使其成为了希腊、伊斯兰、印度以及中国文化的交汇点<sup>[1]</sup> (图1)。得益于其独特的地理位置，这里的经济持续繁荣，并为宗教的传播提供了基础。西汉末年佛教东传入中原，权贵们纷纷借助开凿石窟艺术来体现家族荣誉与财富。自公元366年乐僔和尚在敦煌开凿第一窟起，莫高窟便拉开了延续千年的石窟建造序幕<sup>[2]</sup>。”

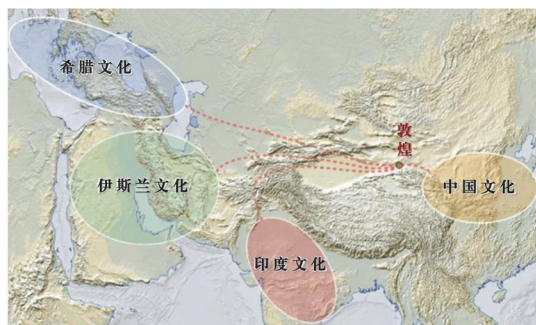


图1 敦煌在欧亚大陆位置

小张不禁惊叹道：“真没想到莫高窟竟然有如此悠久的历史！那您能给我讲讲，古人究竟是如何创造出这些精美绝伦的壁画吗？”

“当然可以。”九色鹿缓缓答道，“首先，我带你去看看壁画的结构。它大致分为三层，分别是支撑体、地仗层和彩绘层。支撑体对壁画起到基础支撑和保护作用，就像现代建筑中的钢筋一样；地仗层一般由粗泥层和细泥层组成，粗泥层直接贴附在天然崖体上，起到形成较平整表面的作用，其主要是由较粗的纤维、土和沙组成，而细泥层覆盖在粗泥层上，提供了更加细腻平整的表面，组成一般为较细的纤维和过筛后的土和沙<sup>[3]</sup>；至于彩绘层，就是你现在能看到的这些壁画，它们是通过运用红色、绿色、蓝色、黄色、白色等颜色多层叠加和混搭，由工匠的技巧和创意才完成绘画创作，最终展现在人们的眼前。”

小张好奇地追问：“这些五彩斑斓的壁画，是用什么颜料画上去的呢？”

九色鹿回答道：“敦煌壁画所使用的颜料多是矿物颜料，主要来源于敦煌本地及周边地区、中原地区，甚至远至西亚。颜料的种类和质量直接影响了敦煌壁画的色彩。既然你这么好奇，那我就给你详细讲解一下吧。”

## 2 色彩之舞

“接下来我就以北魏敦煌第257窟西壁中层的《鹿王本生》壁画<sup>[4]</sup>为例来讲解吧(图2)，这正是我诞生的地方。从这个壁画里，你能看到我的身上都有哪些颜色呢？”九色鹿提问道。

“我看到鹿王主要是白色和黄色的，而且身体上还点缀着绿色、蓝色和红色的斑点。”小张兴奋地回答。

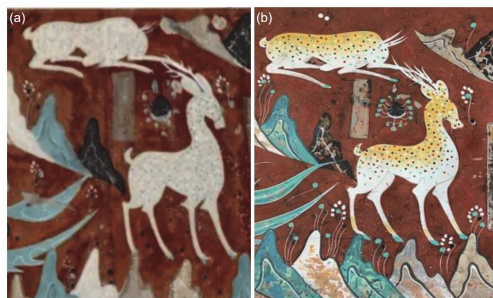


图2 鹿王本生(a)及其临摹图(b)

“那么，就先请白色小精灵们先介绍一下自己吧！”九色鹿说道。

“好的，好的！”白色小精灵们在壁画中跳跃着，兴奋地等待着展示自己的机会。小张好奇地东张西望，寻找着小精灵们。

## 2.1 露从今夜“白”

九色鹿清了清嗓子，继续说道：“在壁画中，白色颜料的使用最为广泛。不同时代的莫高窟壁画所用的白色颜料有所不同。早期壁画、彩塑主要使用高岭土作为白色颜料，而唐代则以方解石为主。到了唐代晚期，石膏成为主要的白色颜料。云母和滑石在每个时代都有出现，但用量较少<sup>[5]</sup>。”说到这里，九色鹿回头喊道：“方解石、高岭土、石膏、云母、滑石，你们快过来，赶紧向小张介绍一下自己。”

首先跳出来的是方解石(图3a)，它急切地说：“我是地球上分布最广的矿物之一<sup>[6]</sup>，化学式是 $\text{CaCO}_3$ ，我的晶体形态多样，可以呈立方体、六角柱、菱形等形状，属于立方晶系。你们的祖先李时珍在《本草纲目》中介绍，‘其似硬石膏成块，击之块块方解，墙壁光明者，名方解石也’。我在距今约7000年的仰韶文化时便开始作为白色颜料使用。从初唐开始，几乎所有白色颜料都将我作为主要成分。敦煌千佛洞大部分壁画的底色成分都含有我，性质稳定，不易变色，常温不易分解，只有到达 $800\text{ }^\circ\text{C}$ 以上才会被分解成 $\text{CaO}$ 和 $\text{CO}_2$ 。”



图3 方解石(a)、高岭土(b)和石膏(c)

方解石还没说完，高岭土就迫不及待地插话道：“接下来是我，高岭土(图3b)<sup>[7]</sup>！，别名白垩土、白云土、观音土、阁土粉，化学式为 $\text{Al}_2[(\text{OH})_4/\text{Si}_2\text{O}_5]$ ，晶体化学式 $2\text{SiO}_2 \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ，因江西景德镇的高岭村而得名。我属于硅酸铝矿物的一种，晶体主要由硅氧四面体和铝氢氧八面体组成。我干燥时具有吸水性，湿态具有可塑性，还具有良好的烧结性能<sup>[8]</sup>。在莫高窟十六国南北朝时期的壁画中的白色颜料大多我都有参与哟。”

石膏(图3c)<sup>[9]</sup>一直站在方解石后面探头探脑，不想小张突然激动地说：“你是石膏！我知道你。如今人们骨折受伤了就会用到你，没想到你还能用来作画！”石膏骄傲地说：“是的，我的化学式

$\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ，属于单斜晶系，常为白色。我在西夏、宋、元、清代时经常用来作画，可以和别的颜料混合调成深浅不同的各种颜色。然而沙漠太干燥了，会让我失去水分，变成硬石膏( $\text{CaSO}_4$ )，我们会相互转化，但变大变小的时候会对壁画产生破坏，呜呜呜……”还没说完，石膏就伤心地哭了。

在它旁边的小精灵马上安慰石膏，小张发现它亮晶晶的，夸赞道：“你是谁，你好漂亮啊！怎么还会闪光？”云母<sup>[10]</sup>回答道：“我是白云母(图4a)，我的化学式是 $\text{K}\{\text{Al}_2[\text{AlSi}_3\text{O}_{10}](\text{OH})_2\}$ ，属于单斜晶系，能分割成有弹性的透明薄片。我变成细粉后会有珍珠般的光泽，能给壁画中的云气、皮肤、飘带形成微微闪光的效果。敦煌莫高窟中唐112窟，著名的反弹琵琶壁画就绘于此窟南壁(图4b)。莫高窟晚唐的12窟中，天王塑像衣着上就点缀着粒径约1–2 mm大小的白云母片，工匠借助我的闪光效果来突显天王的威严<sup>[11]</sup>。”

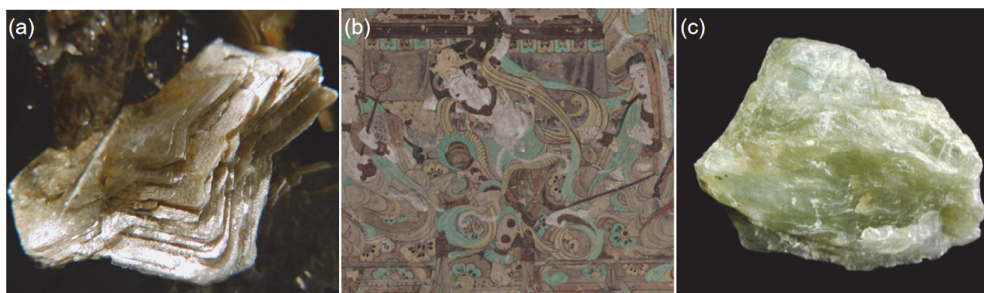


图4 白云母(a)、反弹琵琶(b)和滑石(c)

最后，滑石轻轻站出来，娇羞地说道：“你好！小张，我是滑石(图4c)，又名画粉、腻子粉，化学式为 $\text{Mg}_3[\text{Si}_4\text{O}_{10}](\text{OH})_2$ ，是具有层状的晶体结构，属于单斜晶系，其晶格由硅氧四面体层和氢氧化镁层交替排列而成，层状结构赋予我优良的滑动性，这使得我能够轻松涂抹于壁面。特别是在一些难附着的底材表面，我能提高涂料的附着力和耐溶剂性<sup>[11,12]</sup>。莫高窟所有白色颜料样品几乎都含有我，现代许多涂料也离不开我呢。”

## 2.2 落“红”不是无情物

九色鹿又继续说道：“好了，白色小精灵已经自我介绍过了，接下来给你说说红色颜料吧！红色是敦煌壁画中使用较为普遍且重要的一种颜色，它能够让作品更加鲜活、生动、富有艺术感。红色系的颜料主要使用的是朱砂、铅丹、土红等，它们通常用于描绘人物的衣服、唇部、脸颊等部位。下面有请红色小精灵们出场吧！”

不等小张回答，一个红色小精灵风风火火地闪现说：“我是朱砂，也称为辰砂(图5)，化学式是 $\text{HgS}$ ，晶体属三方晶系，在一定条件下可以转换成黑色辰砂<sup>[13]</sup>。在壁画中，高品质的朱砂多用于描绘佛像的嘴唇、头光、红日等细节部位。虽然使用面积不大，但我鲜艳而沉稳的色彩能够为画面增添生机和魅力。质地较次的朱砂，因为含有较多杂质，色泽相对较差，通常用来作为底色。比如在北魏时期敦煌257窟西壁中层的《鹿王本生》壁画中，就有我的身影。”

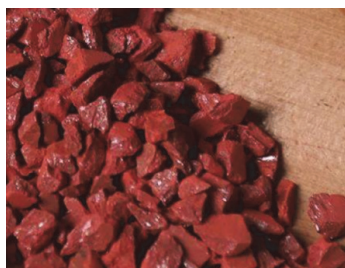


图5 朱砂

紧接着，一个橙红色的小精灵来了，他的旁边还跟着一个棕黑色的同伴，小张赶忙说道：“现在是红色颜料的介绍时间哦！”铅丹(图6a)解释道：“他是我变异后的样子，我稍后会介绍它，我的化学式 $\text{Pb}_3\text{O}_4$ ，通常为橙红色或橙黄色。我在室温下结晶，属于四方晶系，我是在东汉时期由西方经丝绸之路传入中国，主要加工工艺是将铅加热到 $600\text{ }^\circ\text{C}$ ，制成一氧化铅( $\text{PbO}$ )，再在 $450\text{--}480\text{ }^\circ\text{C}$ 下于空气中煅烧 $\text{PbO}$ ，即得橘红色的我。化学式为： $2\text{PbO} + \text{O}_2 \rightarrow 2\text{Pb}_3\text{O}_4$ 。我不易溶于水，因此用于水调颜料时，无法很好地分散，并且无法受到分散剂的保护。不稳定价态的 $\text{Pb}_3\text{O}_4$ 经过千百年大自然中日光及紫外光的长期作用，就会成为棕色的4价铅的化合物 $\text{PbO}_2$ <sup>[5]</sup>。也就是我身旁的棕褐色颜料。魏晋南北朝时代，敦煌壁画中主要用铅丹加白色调成肉色，故如莫高窟部分北朝时期壁画中(图6b)<sup>[4]</sup>，人物身体和面部变黑了。这种化学反应不仅对古代艺术品的研究和保护提供了科学依据，而且为铅类化合物的化学理论增加了新的内容。”“原来是这样，是我错怪你了。”小张脸红地说。



图6 铅丹(a)和铅丹氧化(b)

这时，一个棕红色地小精灵说道：“我是赭石(图7a)，我的化学式 $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ，暗棕红色或灰黑色，三方晶系，结构稳定，不易变色。我是中国画传统着色中不可缺少的颜料，在敦煌壁画中可用作打底色。如敦煌第323窟的初唐壁画《张骞出使西域》画中的青山绿水<sup>[4]</sup>(图7b)，先用我打底，再着石绿(孔雀石)<sup>[11]</sup>。”



图7 赭石(a)和张骞出使西域(b)

### 2.3 “黄”花开后叶初霜

“敦煌壁画中的黄色是一个非常重要的色彩，它不仅能够丰富画面的层次和表现力，更能够反映出古代艺术家的审美观和文化特征。黄色通常被运用于描绘皇室贵族的服饰、建筑上的装饰以及其他具有特殊意义的部分。”九色鹿柔和地说道，“下面就由那位黄色的小精灵告诉你吧。”

一位身穿柠檬黄色衣服的精灵，面带微笑地说：“我是雌黄(图8a)，我的化学式是 $\text{As}_2\text{S}_3$ ，晶体结构属于单斜晶系，晶体呈棱柱状。虽然我在色彩上鲜明迷人，但请记住，我是有毒的。我的用途广泛，例如在敦煌石窟壁画和藏经洞的唐代绢画中都有我的身影。你甚至可以在敦煌西千佛洞的盛唐15窟西壁小佛的足莲座上找到我，那里的米黄色颜料就含有雌黄成分<sup>[11]</sup>。”

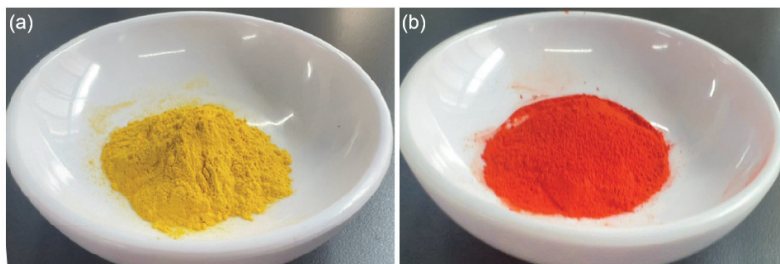


图8 雌黄(a)和雄黄(b)

接着，它拉了拉旁边穿着橘红色衣服的精灵说道：“它叫雄黄(图8b)，颜色比我要深得多，是我的弟弟，也经常被称为石黄、鸡冠石，晶体结构也与我相同，但它的化学式是 $\text{As}_4\text{S}_4$ 。它是敦煌壁画中较少使用的色彩，它比较怕光照，暴露在阳光和空气里，表面会慢慢转变成黄色、易脆的粉末，除去表层的黄色粉末后，不久还会产生新的黄色粉末。莫高窟西夏第310窟有雄黄和铅丹调成的红色。”

#### 2.4 春来江水“绿”如“蓝”

一个绿色颜料匆匆走近，气息急促地介绍自己：“我是石绿<sup>[7]</sup>(图9a)，大家也叫我孔雀石。我的化学式为 $\text{Cu}_2[\text{CO}_3](\text{OH})_2$ ，我通常呈现出鲜亮的绿色，属于单斜晶系，晶体呈葡萄状。我来自铜矿的氧化区，与蓝铜矿和氯铜矿共生。陆游曾在他的诗《旅游》中用‘螺青点出莫山色，石绿染成春浦潮’来形容我的鲜艳色彩。在中国古代广泛用作绿色颜料，特别是在壁画中绘制祥云和植物叶子。据记载，我最早出现在十六国时期的壁画中。”

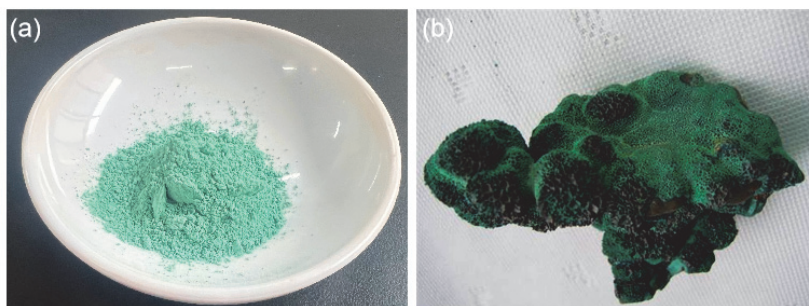


图9 石绿(a)和氯铜矿(b)

在一旁的氯铜矿关心地说：“你先坐下休息，看你喘得这么厉害。我来做个自我介绍，我是氯铜矿(图9b)，化学式为 $\text{Cu}_2(\text{OH})_3\text{Cl}$ ，斜方晶系，晶体呈柱状。我的颜色通常是亮绿色或浅黑绿色。在敦煌石窟中，我是最早被使用的颜料之一，从北朝开始，绿色颜料中既有单独使用我的，也有我与石绿或石青混合使用的。自唐代的壁画中，主要的绿色颜料就是我。比如在晚唐时期的第232窟，整个洞窟只使用了一种绿色，那就是我！”

接着，一位气质高贵的身影缓步而来，他拥有高挺的鼻梁和深邃的眼睛，带着浓厚的外国口音介绍说：“我是青金石<sup>[7]</sup>(图10a)，也被称作金精、佛青、蓝赤、天然群青等，我的化学式是 $(\text{Na,Ca})_8[\text{AlSi}_6\text{O}_{20}][\text{S}_2\text{Cl}_2]$ ，晶体为菱形十二面体。我的故乡是现在的阿富汗，人们通过丝绸之路将我带到了中国。我是一种纯度极高的蓝色颜料，早在中国古代就被广泛用于彩绘。你可以在西北地区的壁画中找到我的踪迹。在莫高窟早期的壁画和彩塑中，我是蓝色颜料的主要成分，直到唐代，本土的蓝铜矿才开始逐渐取代我。”

压轴出场的乃一位沉稳的蓝色小精灵。它语气平和地说：“我是石青<sup>[7]</sup>(图10b)，亦称作蓝铜矿，我的化学式是 $\text{Cu}_3(\text{CO}_3)_2(\text{OH})_2$ ，属单斜晶系的碳酸盐矿物。我色泽深蓝，拥有玻璃般的光泽。我对酸

极为敏感，遇到醋酸便会呈现蓝绿色。但在常温下，我的颜色经久不变。由于我独特的晶体结构能产生镜面反射，我的颜色显得更自然、柔和且华丽。你可以在敦煌莫高窟、天水麦积山石窟等多处石窟寺的壁画中找到我的踪迹。”

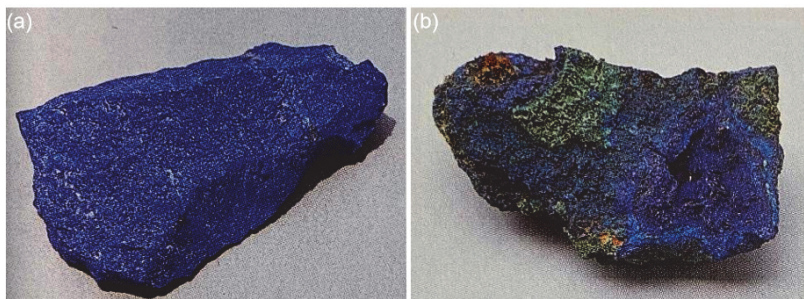


图10 青金石(a)和石膏(b)

在众多小精灵各自介绍了自己的特性后，小张由衷地感叹道：“这颜料的世界真是博大精深，丰富多彩！”

### 3 瑰丽重生

在详细揭示了壁画颜料的奥秘之后，九色鹿引领小张继续探索壁画的其他秘密。小张注意到某些壁画色彩变得模糊，甚至出现了鼓包和脱落现象时，他满怀困惑地问九色鹿：“这些壁画为何变得如此？”

九色鹿沉默了片刻，神情忧伤地回答道：“这些壁画的状况令人惋惜，它们在古代并未得到有效的保护，随着时间的流逝，遭受了多种病害的侵扰，比如盐害和褪色等问题<sup>[14]</sup>。壁画底层所含的矿物盐，在水分的作用下会在表面不断溶解和结晶，导致颜料层和底层结构稳定性发生变化，从而引发了脱落、疱疹、酥碱、空鼓等一系列问题(图11)。”

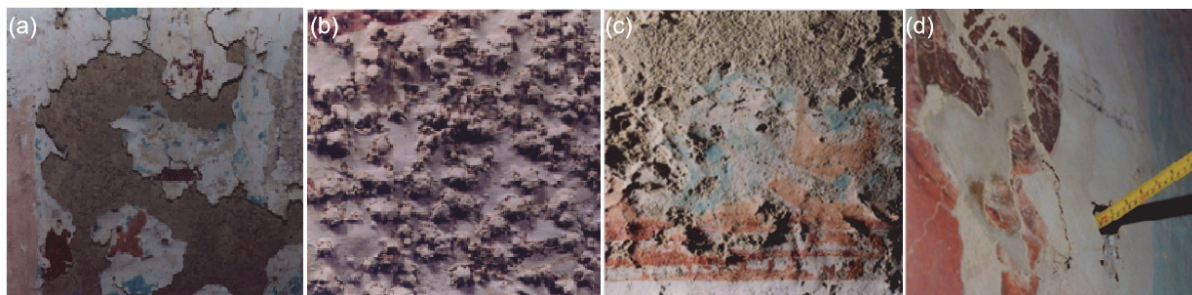


图11 盐害对壁画造成的脱落、疱疹、酥碱、空鼓

小张露出惊讶的表情，问道：“那我们该怎么办呢？是不是需要用加固材料来修复和加固这些壁画？”

九色鹿缓缓回答道：“实际上，单纯依赖加固材料是无法彻底解决壁画受盐害的问题。壁画中的盐分仍然会不断侵蚀破坏。因此，进行脱盐处理，尽可能地去掉壁画内的盐分至关重要。比如，针对盐害引起的空鼓现象，我们可以采用灌浆加固的方法。灌浆后，壁画内的水分会激活残留的盐分，使其随水分迁移到壁画表面。接着使用透气性好的顶板，配合吸水性强的衬垫材料，快速吸收水分和溶解的盐分，达到脱盐的目的。”

小张赞叹不已：“这真是个高明的方法，科学家们真是太聪明了！”

九色鹿继续解释道：“壁画褪色(图2)的问题也十分严重。这些壁画在经历数百年岁月后，颜料性质也随之发生了改变。比如，氧气在光照下会变得活跃，导致颜料被氧化变质。因此，深入理解和掌握这些复杂的颜料特性，对于解开敦煌壁画的艺术之谜，以及进行壁画的保护与修复都至关重要。”

九色鹿严肃地说：“我们必须认识到，敦煌壁画的修复是一项极其严肃和精细的工作。必须遵循科学原则，并且只能由经验丰富的专业艺术修复师来完成。他们拥有先进的修复技术和方法，能够在保护和修复之间找到恰当的平衡。这样可以确保在修复过程中不会对壁画进一步损害，并尽可能地保留其原始风貌和历史价值。”

小张感慨道：“我明白了，修复敦煌壁画是一项既复杂又艰巨的使命，它需要社会各界的关注与协作，唯有如此，才能有效地保护并传承这份宝贵的文化遗产。未来，我也要学习相关知识，为壁画的保护与修复贡献自己的力量。”

九色鹿微笑着点头赞道：“你说得对，小张，你的理解力很强，也很有悟性。然而，你的梦即将醒来，是时候返回现实了。你的愿望和决心，我们都会铭记在心。再见了，朋友……”

### 参 考 文 献

- [1] 长达千年的开凿: 为什么要建莫高窟. [2023-12-15]. <https://baijiahao.baidu.com/s?id=1671756664916032965>
- [2] 柴剑虹. 敦煌研究, **2016**, No. 6, 21.
- [3] 郭宏. 中原文物, **2004**, No. 2, 76.
- [4] 数字敦煌. [2023-12-15]. <https://www.e-dunhuang.com/index.htm>
- [5] 李最雄. 敦煌研究, **2002**, No. 4, 11.
- [6] 方解石. [2023-12-20]. <https://baike.baidu.com/item/方解石/177167>
- [7] 曹简. 现代中国画颜料研究[博士学位论文]. 杭州: 中国美术学院, 2021.
- [8] 王浩. 砂质高岭土的工艺矿物学及选矿试验研究[硕士学位论文]. 武汉: 武汉理工大学, 2013.
- [9] 石膏. [2023-12-20]. <https://www.51ore.com/kcxt/shigao.com>
- [10] 白云母. [2023-12-21]. <http://www.chinaneolithic.net>
- [11] 中国传统颜料矿物. [2023-12-21]. <https://zrzy.hebei.gov.cn/heb/gongk/gkml/kjxx/kpyd/10582189558894325760.html>
- [12] 滑石. [2023-12-22]. <https://baike.baidu.com/item/滑石/465268>
- [13] 句晨男, 杨静, 朱亚先. 大学化学, **2023**, *38* (7), 98.
- [14] 陈港泉. 敦煌莫高窟壁画盐害分析及治理研究[博士学位论文]. 兰州: 兰州大学, 2017.