

# 中国彩绘书画的颜色特征分析及虚拟修复

刘思鲁, 刘振\*, 刘莉, 樊硕, 赵安然

曲阜师范大学, 山东 日照

收稿日期: 2022年12月6日; 录用日期: 2022年12月26日; 发布日期: 2023年1月10日

## 摘要

敦煌壁画是我国灿烂辉煌的绘画史中最为浓墨重彩的一笔, 经过千年的风雨洗礼, 大部分壁画正在面临褪色、变色等问题。敦煌壁画的保护性研究主要针对褪色和变色区域修复, 提出一种基于L\*a\*b\*颜色空间实现颜色分割的虚拟修复方法。该方法首先分析不同时期壁画常用颜料及其主要特征, 归纳总结不同颜料褪色、变色的规律, 得到壁画常用颜料的褪色、变色机理; 其次, 利用L\*a\*b\*颜色空间实现褪变色壁画的颜色分割, 同时利用Photoshop软件在Lab模式下对壁画进行虚拟修复, 通过改变L曲线、a曲线和b曲线调整壁画色貌。本文的复原结果得到专家的认可, 对壁画虚拟修复提供了一定的参考。

## 关键词

敦煌壁画, 褪色, 变色, 图像分割, 颜色复原

# Color Characteristics Analysis and Restoration for Chinese Painting and Calligraphy

Silu Liu, Zhen Liu\*, Li Liu, Shuo Fan, Anran Zhao

Qufu Normal University, Rizhao Shandong

Received: Dec. 6<sup>th</sup>, 2022; accepted: Dec. 26<sup>th</sup>, 2022; published: Jan. 10<sup>th</sup>, 2023

## Abstract

The Dunhuang murals are the most colorful part of China's brilliant painting history, after a thousand years of exposure to the elements, most of them are facing problems such as fading and discoloration. The conservation study of Dunhuang murals focuses on the restoration of faded and discolored areas, and proposes a virtual restoration method based on L\*a\*b\* color space to achieve

\*通讯作者。

文章引用: 刘思鲁, 刘振, 刘莉, 樊硕, 赵安然. 中国彩绘书画的颜色特征分析及虚拟修复[J]. 图像与信号处理, 2023, 12(1): 9-20. DOI: 10.12677/jisp.2023.121002

color segmentation. The method first analyzes the common pigments used in murals of different periods and their main characteristics, summarizes the laws of fading and discoloration of different pigments, and obtains the mechanism of fading and discoloration of common pigments used in murals; second, uses L\*a\*b\* color space to realize the color segmentation of faded and discolored murals, and at the same time uses Photoshop software in Lab mode to virtually restore the murals by changing the L curve, a curve, and b curve to adjust the color appearance of the mural. The restoration results of this paper are recognized by experts and provide a certain reference for the virtual restoration of murals.

## Keywords

Dunhuang Murals, Fading, Discoloration, Image Segmentation, Color Restoration

Copyright © 2023 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

传统彩绘文物的保护方法主要为物理修复与显现加固[1][2]。物理修复通过调配近似颜料对彩绘文物进行修补,但由于经验探索模式的局限性以及修复工作操作的不可逆性,此类保护及修复始终存在着一定的风险,尤其对色彩的控制程度很难把握;显现加固通过对文物病害机理研究,采用保护性材料对某类属性进行修复,但是需要考虑所用材料性能对病害治理的全面性要求,避免给修复文物引入其他潜在危害。针对传统修复方式存在的问题,本文采用计算机的虚拟修复,以克服传统修复方法的不可逆性、难以长久保存和图像复制信息失真等问题。

在数字化保护与虚拟修复方面,欧美等发达国家相关研究学者从光谱数据获取、跨媒介复现、颜料成份分析、色彩复原等领域、展开了大量先驱性研究,积累了丰富的研究成果,同时也形成了若干效果良好的、成功实践案例。瑞士 Gschwind [3]通过对胶片等成像材料加速老化实验,建立基于密度值的颜色褪变模型,实现对老照片颜色的仿真复原;韩国庆北大学 Kyung 等人[4]提出了基于 Lcybcrg 色空间分类的褪色图像颜色校正方法,在 Lcybcrg 对立色空间中对褪变色图像进行分解,并在 RGB 色空间中对褪变颜色进行校正;美国孟塞尔颜色科学实验室的 Berns 等[5][6]人,针对乔治修拉名作《大碗岛的星期日下午》中锌黄颜料变色导致的整体光泽度变暗问题,在 LAB 颜色空间进行了数字修复,再现了该艺术品的原始风貌;瑞典 Ström M [7]通过油画与挂毡的颜色类比,利用计算机技术对挂毡褪变的颜色进行了虚拟复原。与国外相比,我国文化遗产的数字化保护研究起步较晚,目前只有浙江大学、武汉大学、云南师范大学以及杭州电子科技大学等几家研究机构从事相关研究。Soo-chang Pei [8]主要通过增强饱和度实现褪色颜料的调整,适合针对全局颜色较为单一均匀的画像,对色彩丰富的图像效果较差;浙江大学华忠、鲁东明、潘云鹤[9]利用色彩学相关知识、图像处理与人工智能等技术模拟了敦煌壁画初始到现状的变色、褪色、脱落的渐变过程,为敦煌壁画的数字化修复提供了一个思路;Dongming Lu [10]通过分析和建模壁画中的颜料成分,利用计算机对壁画色彩的褪变过程进行了仿真。

在彩色图像分割方面,国内外学者开展大量的研究。乔建等[11]针对传统的彩色图像的分割方法,通过变换阈值将目标信息准确的从图像中分离,但由于采用各分量高度线性相关的 RGB 色彩空间,分割的色彩效果并不理想。Zheng 等[12]利用 K 均值算法在 LAB 颜色空间中实现彩色图像的分割,消除了不理想的分割色彩效果,但需要用户依据经验指定初始聚类数目,不具有普遍性。李翠等[13]在 HLS 颜色空

间中改进欧氏距离实现彩色图像分割,区别于传统的K均值分割算法,得到较好的分割结果。庞晓敏等[14]提出两个颜色空间相结合的分割方法,得到准确的分割结果,克服了单个算法的局限性,但该算法不适用于噪声大和颜色不均匀的彩色图像。

为了得到较为真实的数字化敦煌壁画,本文利用 Photoshop 图像编辑软件和 Matlab 仿真模拟软件相结合的方式对褪变色的敦煌壁画进行虚拟复原。L\*a\*b\*颜色空间是基于色彩进行图像分割的最优空间,在 Matlab 软件中采用 L\*a\*b\*颜色空间实现基于颜色的分割,提取多个具有相似颜色的区域,在 Photoshop 软件中实现敦煌壁画的数字化虚拟复原。复原结果具有明显的敦煌特征,保持了壁画的颜色和纹理信息。为敦煌壁画的复原提供一定的参考。

## 2. 敦煌壁画颜料分析

### 2.1. 不同时期的颜料分析

敦煌莫高窟壁画已有上千年的历史,通过学者对不同时期洞窟壁画的颜料进行分析研究,总结出不同时期的敦煌壁画所使用的颜料具有类似的规律。依据壁画和颜料相似程度,本文将敦煌壁画分为早期(十六国、北魏、西魏和北周)、中期(隋、初唐、盛唐、中唐、晚唐和五代)和晚期(西夏、宋代、元代和清代)[15]。如表1所示:

**Table 1.** Analysis of pigment composition in different periods

**表 1.** 不同时期的颜料成分分析

朝代	颜色	含量
魏晋南北朝	红色	主要为红土和朱砂
	绿色	大量为氯铜矿,少量是石绿
	蓝色	大量为青金石,少量是石青
	白色	主要为高岭土,其次是非颜料滑石,少量是方解石、云母和石膏
	棕黑色	主要为 $PbO_2$ , 其次是 $PbO_2 + Pb_3O_4$
隋朝	红色	主要为朱砂,其次是铅丹
	绿色	主要为石绿,其次是氯铜矿
	蓝色	主要为青金石和石青
	白色	主要为方解石,其次是滑石、高岭土、云母、石膏,极少量是氯铅矿和硫酸铅矿
	棕黑色	大量为 $PbO_2$ , 极少量是 $PbO_2 + Pb_3O_4$
初唐 盛唐 中唐 晚唐	红色	(初唐-晚唐)主要为:朱砂、少量铅丹和红土;朱砂、少量朱砂 + 铅丹;红土和朱砂;红土
	绿色	(初唐-晚唐)主要为:石绿,其次石绿 + 石青、石绿 + 氯铜矿;氯铜矿,其次石绿 + 氯铜矿;氯铜矿,少量石绿 + 氯铜矿;石绿,其次为石绿 + 氯铜矿
	蓝色	(初唐-晚唐)主要为:石青,其次石青 + 石绿、石青 + 氯铜矿;石青;石青,少量青金石;青金石,其次为石青 + 氯铜矿
	白色	(初唐-晚唐)主要为:方解石,其次是滑石、石英、云母;方解石,其次滑石、云母;方解石 + 滑石,少量云母;滑石,其次为方解石、石膏、云母
	棕黑色	(初唐-晚唐)主要为: $PbO_2$ , 少量是 $PbO_2 +$ 铅丹; $PbO_2$ ; $PbO_2$ ; $PbO_2$ , 少量 $PbO_2 +$ 铅丹

## Continued

五代	红色	主要为红土
	绿色	主要为石绿
元朝	红色	主要为红土
	绿色	主要为石绿和铜绿

## 2.2. 褪变色颜料及其原因分析

颜料的褪色与变色并不相同。褪色指构成颜料的细小微粒受时间、风雨等不可抗力的因素脱落或吸附灰尘杂物,降低壁画的鲜艳程度,即颜料的饱和度降低。土红的彩度和明度的变化程度与土红颜料中包含的水和胶结材料的多少有关。杂质含量越多的土红,明度和彩度降低严重,褪色结果越明显[16]。

朱砂有两种晶体结构,颜色分别为红色和黑色,稳定性处于土红和铅丹中间。对比受光照程度不同的壁画可知,朱砂变色受湿度的影响较小,主要与光照有关。在长时间的光照后,部分朱砂结晶发生变化生成黑色黑辰砂的结晶,明度发生改变。敦煌壁画中绿色和蓝色颜料与土红颜料褪色原因类似,经历千百年的风吹日晒,蓝色和绿色颜料中掺杂的胶结材料老化变色,影响蓝色和绿色颜料自身的颜色。

变色指在某些因素的影响下(光照、湿度、碱性环境等),壁画的颜料的色相发生改变。敦煌壁画中主要是含铅颜料(铅白和铅丹)发生变色。铅丹是敦煌壁画红色系列中最易变色且变色最严重的一种颜料,大部分含有铅丹的壁画都已经变成了棕褐色。仅有少量干燥区域的壁画中观察到未变色的铅丹。经学者实验发现,铅丹颜料单独使用时更容易出现变色问题;但通过和土红、朱砂和雄黄等颜料的混合,其稳定性较好,不易出现变色问题[16]。

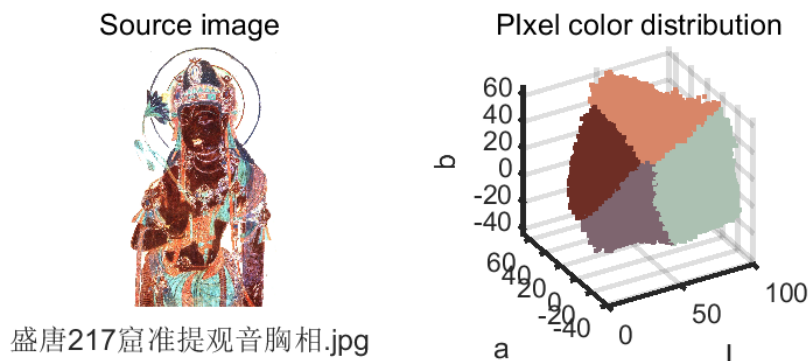
在光照、高湿和碱性环境下,铅丹经化学反应首先生成铅白,再由铅白生成棕褐色的二氧化铅。除此之外,二氧化碳和过氧化氢对铅丹变色进程也有一定程度的影响。铅丹变色主要发生在洞窟建成初期,窟内湿度较高,加上碱性地仗环境,大部分铅丹在较短时间内发生严重变色,渐渐地洞窟处于相对干燥的状态,变色的铅丹趋于稳定。

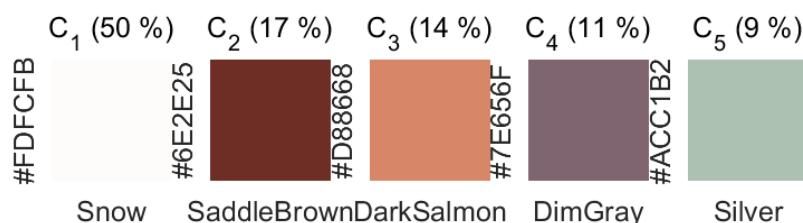
## 3. 基于 L\*a\*b\*颜色空间实现颜色分割

基于 L\*a\*b\*颜色空间实现颜色分割步骤如下:

### 1) 选择复原对象

载入图像“盛唐 217 窟准提观音胸相.jpg”,该图像的空间像素颜色分配及颜色分析如图 1 所示:





**Figure 1.** Quasi-mention Guanyin bust in Cave 217 of the Prosperous Tang Dynasty

**图 1.** 盛唐 217 窟准提观音胸相

2) 基于  $L^*a^*b^*$  颜色空间计算每个区域的样本颜色

观察图像可知共有五种主要颜色：棕黑色、桔红色、绿色、蓝色和白色。 $L^*a^*b^*$  颜色空间可以量化这些视觉差异。盛唐 217 窟准提观音胸相的颜料信息与初始和现状的颜色信息如表 2 所示：

**Table 2.** Pigment analysis of the chest of quasi-mention Guanyin bust in Cave 217 of the Prosperous Tang Dynasty

**表 2.** 盛唐 217 窟准提观音胸相的颜料分析

颜料	目前颜色	初始颜色
铅丹 + 白色颜料	棕黑色	肉色
雄黄	浅桔红色	深桔红色
氯铜矿	浅绿色	翠绿色
石青	浅蓝色	深蓝色

选择实验对象后，为每种颜色选择一个小样本区域，显示小样本区域查看是否合适。将 RGB 图像转换为  $L^*a^*b^*$  图像。计算每个样本区域的基于  $a^*b^*$  空间的平均颜色，将平均颜色视为颜色标记，使用这些颜色标记对每个像素进行分类。

3) 基于颜色最近邻规则的图像分割

已知每个颜色的小样本区域的一个  $a^*$  值和一个  $b^*$  值，即五个颜色的小样本区域的平均颜色。通过计算图像中每个像素与每个颜色标记之间的欧几里德距离(也称欧氏距离)对该像素进行分类。最小距离表示像素与颜色标记相似匹配。例如，如果某像素和棕黑色标记之间的距离最小，则该像素将被标记为棕黑色像素。创建一个包含颜色标签的数组。

4) 显示最近邻分类的结果

标签矩阵包含褪变色的敦煌壁画图像中每个像素的颜色标签。使用标签矩阵按颜色分离原始褪变色的敦煌壁画图像中的对象。分别显示五种分割颜色图像，分割结果如图 2 所示。

通过绘制分类为不同颜色的像素的  $a^*$  和  $b^*$  值，观察可知最近邻分类对不同颜色总体的区分情况。出于显示目的，用颜色标签标注每个点。如图 3 所示。

## 4. 敦煌壁画褪变色区域的虚拟修复

### 4.1. 褪变色图像的参考色

通过制作色卡，得到铅丹加白、石青、雄黄和氯铜矿的参考色，利用 X-rite 积分球式分光光度计(美国 X-rite 公司生产)测得参考色的 Lab 值和 XYZ 值，得到光谱反射率的数据，在 Matlab 中绘制四种参考色的光谱反射率曲线。

四种参考色如下图 4。



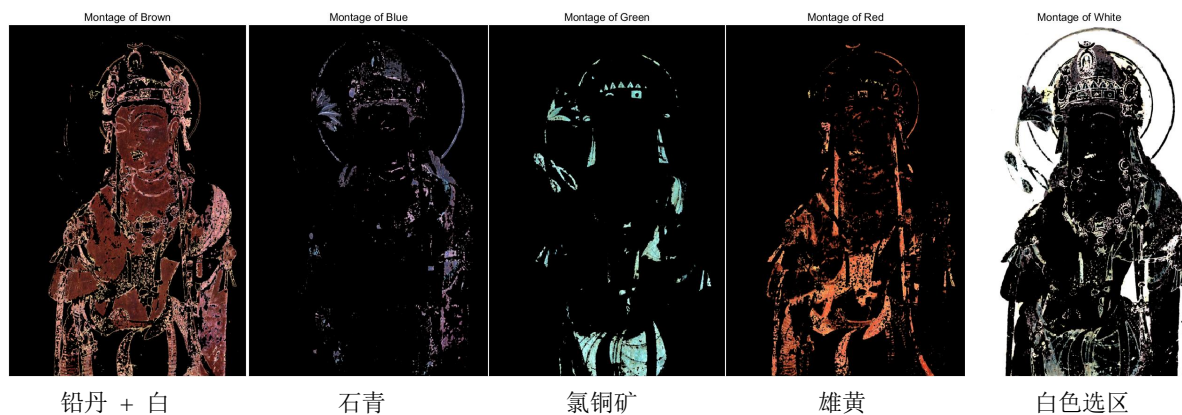


Figure 2. Segmentation results  
图 2. 分割结果

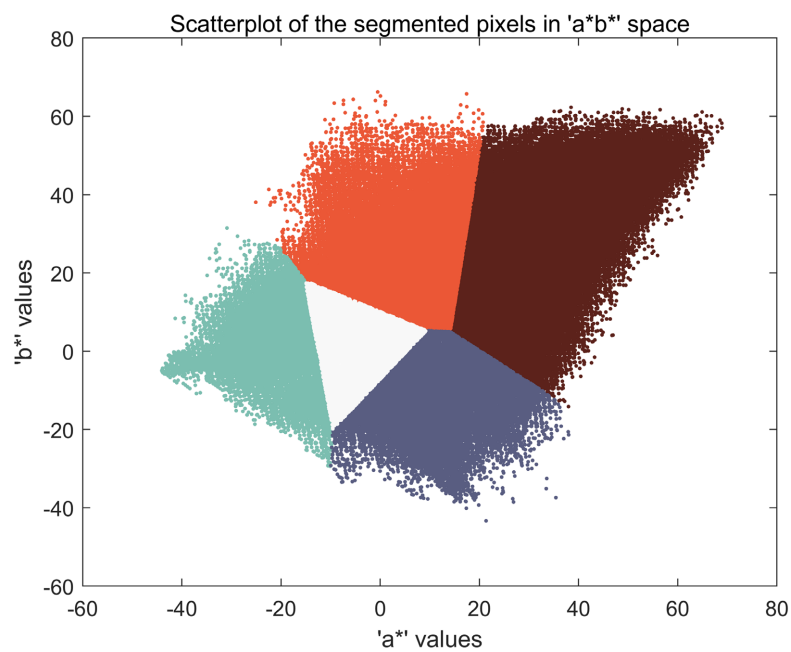


Figure 3. Scatter plot of split pixels in "a\*b\*" space  
图 3. 分割像素在 "a\*b\*" 空间中的散点图

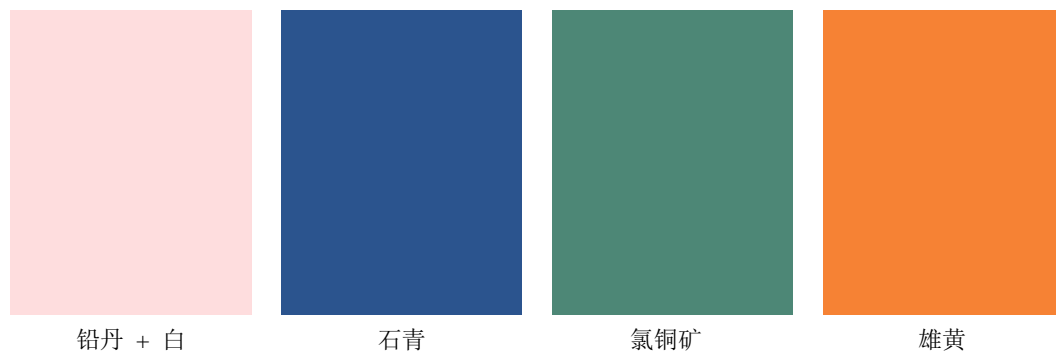


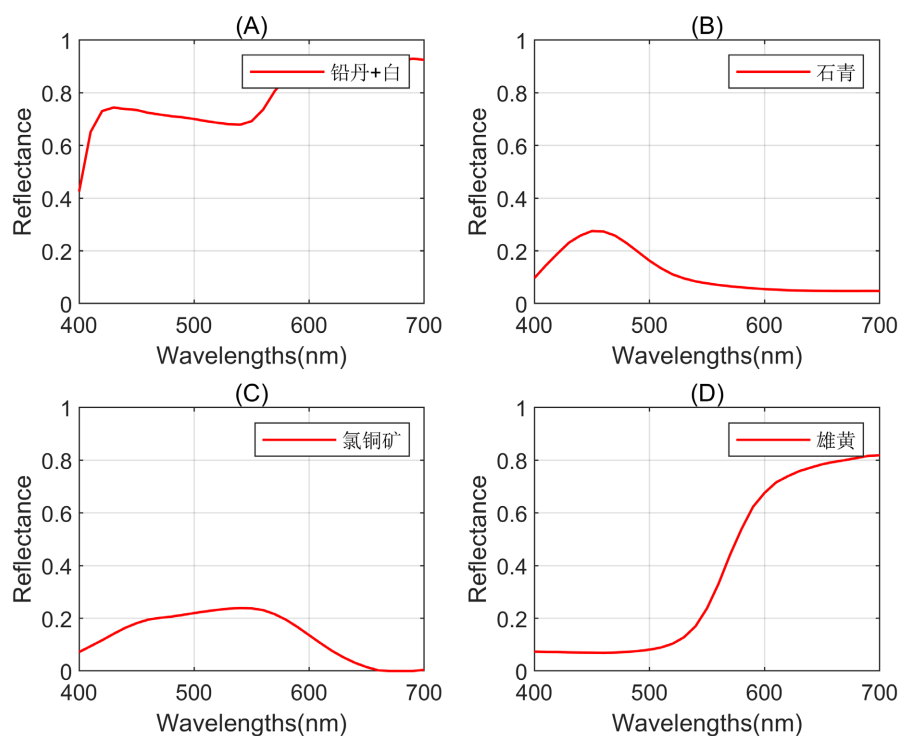
Figure 4. Restoration of the reference color of the quasi-mention Guanyin bust in the 217 caves of the Prosperous Tang Dynasty  
图 4. 复原盛唐 217 窟准提观音胸相的参考色

四种参考色的 Lab 值和 XYZ 值见表 3:

**Table 3.** Lab and XYZ value of reference color  
**表 3.** 参考色的 Lab 和 XYZ 值

颜色	L	a	b
	X	Y	Z
铅丹 + 白	90.6	11.9	4.3
	80.8	77.6	4.3
石青	34.9	1.1	-37.0
	8.3	8.5	20.1
氯铜矿	51.0	-23.0	3.0
	14.5	19.2	14.4
雄黄	67.3	41.9	60.3
	49.8	37.1	5.9

四种参考色的光谱反射率曲线见图 5:



**Figure 5.** Spectral reflectance curves for reference colors

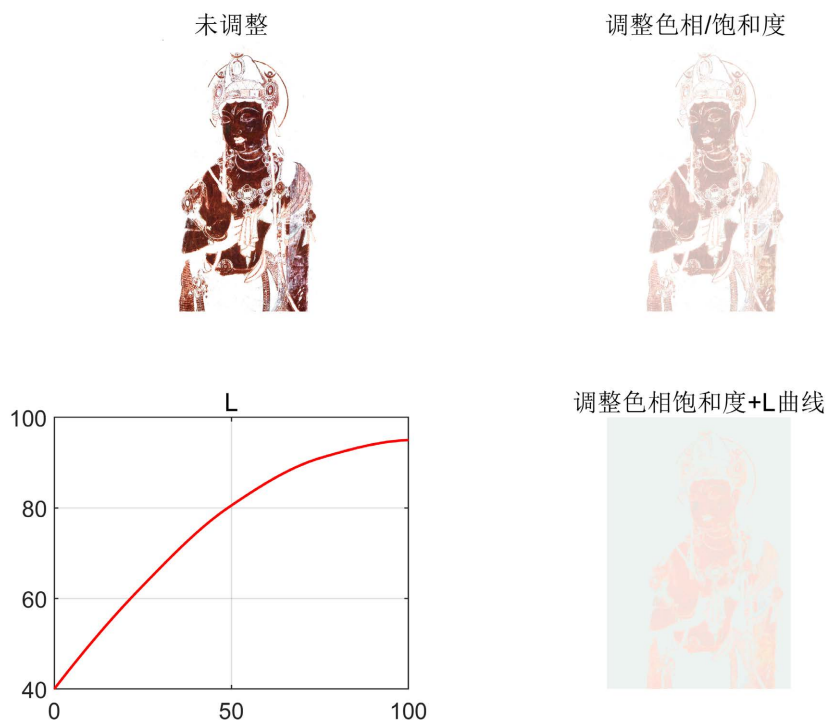
**图 5.** 参考色的光谱反射率曲线

## 4.2. 褪变色图像的复原

本文选择盛唐时期二一七窟准提观音胸相为实验对象。古时人们常用铅白和铅丹为白色和红色颜料，大量用于人物面部、皮肤等处。由于铅白和铅丹不稳定，容易发生化学反应生成黑色物质二氧化铅。因

此壁画作品大多呈现黑色，失去往日色彩。观察图像可知，主要有五种颜色，红棕色、桔红色、绿色、蓝色和白色。其中只有棕黑色的人物肤色处出现变色问题，其余颜色区域为不同程度的褪色。隋唐时期，人物脸部、肤色部分为加入白色颜料的铅丹调制而成的肉色，现多变为棕黑色。盛唐时期，常用氯铜矿为绿色颜料，石青为蓝色颜料。桔红色的雄黄常绘制于人物服饰。总结得出，人物面部、肤色区域所用颜料为加入白色颜料的铅丹，服饰部分所用颜料为雄黄，绿色区域为氯铜矿绘制，蓝色区域为石青绘制。

棕黑色区域的复原。通过颜色分割得到棕黑色的单一颜色选区，将该选区导入 Photoshop，执行“图像 - 模式 - Lab 颜色”，将图像转换为 Lab 颜色模式。在 Lab 模式中，可以单独调整图像的颜色信息和亮度信息。调整图像的亮度信息，只需要调整 L 通道，不会破坏图像的颜色；调整颜色信息，分别对 a、b 通道进行调整，不会破坏图像的亮度。首先调整部分选区范围，执行“选择 - 色彩范围”，适当调整参数，得到更为精细的选区图层，最后合并图层，提高棕黑色选区的准确性。选择合适的参考色作为对照，要想实现棕黑色到肉色的变化，需要首先调整棕黑色的色相和饱和度，执行“图像 - 调整 - 色相/饱和度命令”，分别调整红色、绿色、青色、蓝色和洋红色的色相、饱和度和明度滑块至合适位置，消除斑驳的效果，得到较为均匀的肉色的人物脸部、肤色图像。调整后，图像整体依旧呈现暗调，执行“图像 - 调整 - 曲线”命令，调整棕黑色图像的 L 值曲线，暗调加灰，亮调压低，减小整体的明暗差距。调整前后对比见图 6。

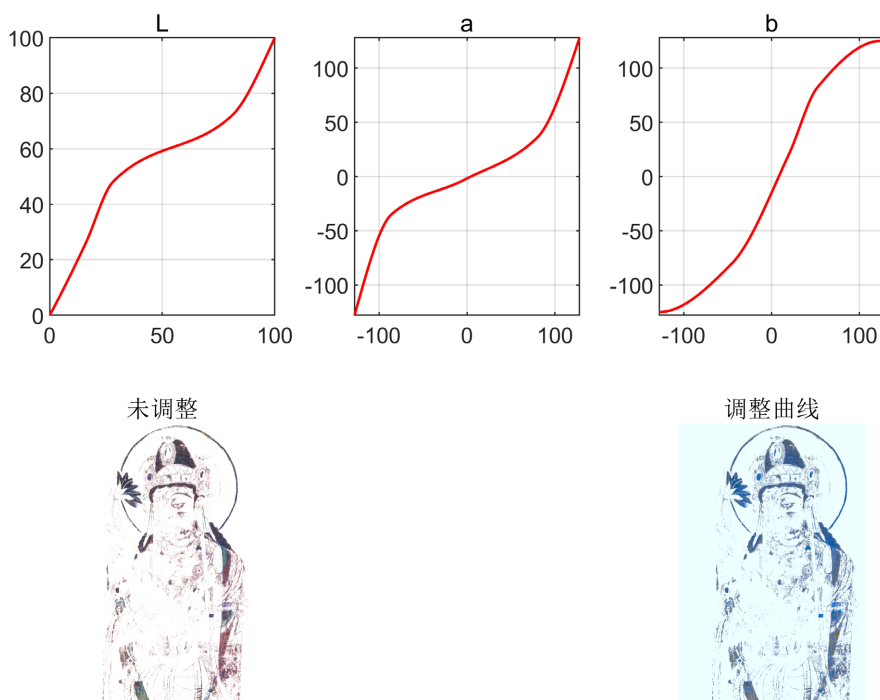


**Figure 6.** The L curves of red lead + white and the comparison of red lead + white before and after adjustment  
**图 6.** 铅丹 + 白的 L 曲线图及调整前后对比

石青、氯铜矿、雄黄区域的复原。通过图像分割得到蓝色、绿色和桔红区域的选区。执行“选择 - 色彩范围”，得到更为精细的选区图层，合成图层以增加图片的准确性。由于准提观音胸相的蓝色、绿色和桔红色处并未发生变色，色相保持不变，但是受光照、温度等外界影响，仍会出现一定程度的褪色。以雄黄、石青的参考色卡和同窟中其他的绿色区域为依据，调整三个颜色的 a、b 值，使得颜色变得鲜亮，最后合并图层。



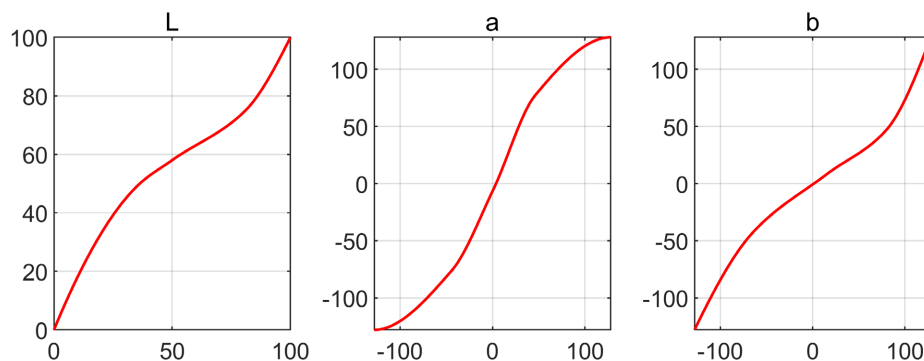
蓝色区域的复原。以石青色卡为参考色，分别对 L、a、b 曲线进行调整。针对 a 曲线，拉高暗调，压低亮调，中间调减少；针对 b 曲线，暗调拉低，亮调拉高，使得中间调增加；针对明度曲线，拉高暗调，降低亮调，中间调减少。图像的对比度增加，颜色由较暗的蓝色变为深蓝色。石青的 L、a、b 曲线调整和前后效果对比见图 7。



**Figure 7.** The L, a, b curves of the azurite and the comparison of azurite before and after adjustment  
**图 7.** 石青的 L、a、b 曲线图及调整前后对比

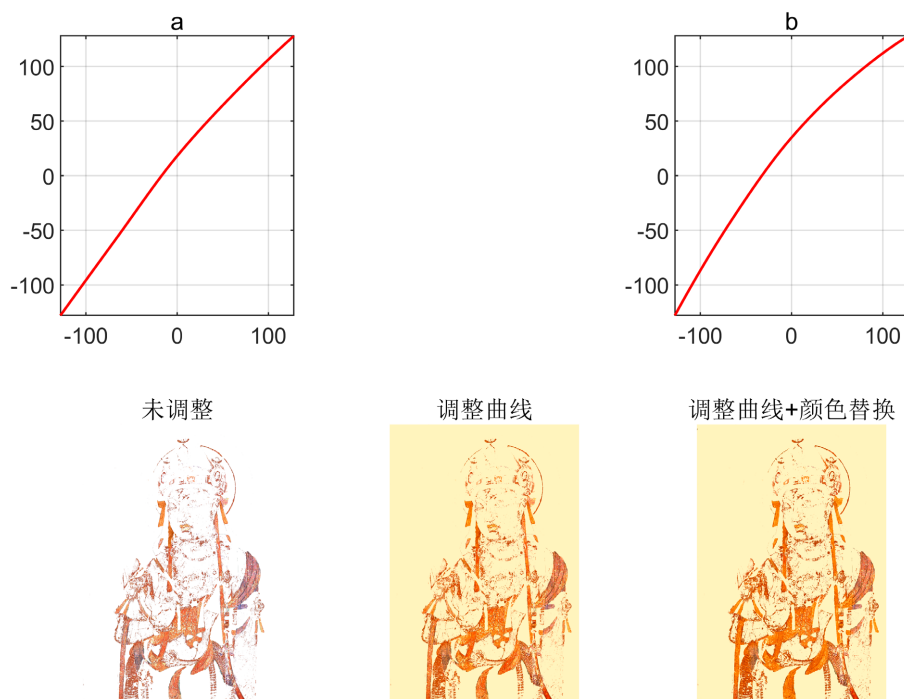
绿色区域的复原。以氯铜矿为参考色，分别对 L、a、b 曲线进行调整。针对 a 曲线，压低暗调，调高亮调，中间调增加；针对 b 曲线，暗调拉高，亮调拉低，压缩中间调；针对明度曲线，拉高暗调，降低亮调，中间调减少。图像的对比度增加，颜色由浅绿色变为翠绿色。针对调整过曲线的图像中混有的杂色(红色)，执行颜色替换命令，得到色彩饱和、没有杂色的翠绿色图像。氯铜矿调整前后对比见图 8。

黄色区域的复原。以雄黄为参考色，分别对 a、b 曲线进行调整。略微拉高 a 曲线和 b 曲线，得到较为鲜亮的雄黄色。执行颜色替换命令，应用于调整过曲线的图像，得到近似于参考色的雄黄图像。雄黄调整前后对比图 9。





**Figure 8.** The L, a, b curves of the atacamite and the comparison of atacamite before and after adjustment  
**图 8.** 氯铜矿的 L、a、b 曲线图及调整前后对比



**Figure 9.** The a and b curves of realgar and the comparison of realgar before and after adjustment  
**图 9.** 雄黄的 a、b 曲线图及调整前后对比

### 4.3. 褪变色图像的合成

将变色、褪色的图像修复完成之后，部分细节信息有所丢失，参考盛唐时期同窟的其他壁画作品，应用 Photoshop 软件中的其他工具对合并之后的图像进行操作。关于图像斑驳地区，灵活运用 Photoshop 软件的仿制图章工具和修复画笔工具进行适当调整。调整过后的肤色图像颜色单一，没有立体感，缺少阴影、高光、腮红等自然的效果加持，通过观察褪变色图片和同窟保存较好的壁画作品，在适当的地方添加腮红、阴影和高光效果。采用钢笔工具绘制细节轮廓，适当调整画笔的大小、硬度和颜色参数，针对细节轮廓执行描边路径命令，参考原图像，填充合适的颜色。复原前后的盛唐 217 窟准提观音胸相如下图 10。

### 4.4. 敦煌壁画原貌调整

敦煌壁画历经千年，不可避免地出现褪色和变色等问题，颜料由初始状态的鲜亮渐渐变得灰暗，由一种色相转变为另一种色相。不同时期，画家使用的颜料和绘画技法也不尽相同。因此，想要复原受损

的壁画，需要建立在对颜料褪变色规律、不同时代衣冠制度、佛教文化和民俗风情分析了解的基础上，以受损程度较轻的作品为参考，利用当代的研究成果、理论经验，综合实现敦煌壁画虚拟复原的结果。在 Photoshop 软件中基本完成壁画的虚拟复原之后，不能实现颜色从局部到整体的协调性和统一性，需要对数字化壁画作品做颜色调整，获得整体自然协调的壁画图像。通过查阅文献资料以及翻看画家绘制的临摹图，调整壁画的色相、明度、饱和度数值，使得壁画作品具有绘制之初的鲜亮色彩。色调调整前后对比见图 11。



**Figure 10.** Comparison before and after restoration of the quasi-mention Guanyin bust in Cave 217 of the Prosperous Tang Dynasty

**图 10.** 盛唐 217 窟准提观音胸相复原前后对比



**Figure 11.** Comparison before and after adjusting hues of the quasi-mention Guanyin bust in Cave 217 of the Prosperous Tang Dynasty

**图 11.** 盛唐 217 窟准提观音胸相色调调整前后对比

目前针对文化遗产复原的评判依据尚没有统一的评价标准，对复原结果好坏的判断，主要依靠经验丰富的专家进行主观评价。针对本文的壁画复原图，邀请专家进行专业角度的评判。评价结果表明，本文复原后的数字化壁画图像具有非常明显的敦煌壁画特征，保留了原始壁画的构图、色彩与纹理规律。为今后敦煌壁画的复原研究提供参考。

## 5. 总结

本文通过分析不同历史时期不同颜料的褪变色规律, 总结得出壁画常用矿物颜料的褪色和变色原因。针对具有褪变色问题的壁画, 首先, 通过参考色卡或查看同时代其他保存较为完好的壁画作品, 得到壁画的参考色; 其次, 针对选择的褪变色图像, 在 Matlab 软件中实现基于颜色的图像分割, 得到不同颜色的选区图层, 在 Photoshop 软件中分别调整不同颜色的色相/饱和度和 Lab 曲线, 消除斑驳的颜色效果, 添加腮红、高光、阴影至选区, 得到自然的人物图像; 最后合成图层, 综合运用 Photoshop 软件中的修复工具, 对图像的细节丢失处进行修补, 找到合适的像素点近似替代破损区域。采用计算机软件实现敦煌壁画的虚拟复原, 解决了人工修复带来的难度大、不易保存和不可逆性等问题。

## 基金项目

国家自然科学基金(61405104), 山东省自然科学基金(ZR2020MF125)。

## 参考文献

- [1] 白天佑. 莫高窟壁画数字化重要性刍议[J]. 美术教育研究, 2011(12): 18-19.
- [2] 潘云鹤, 鲁东明. 古代敦煌壁画的数字化保护与修复[J]. 系统仿真学报, 2003(3): 310-314.
- [3] Rudolf, G. and Lukas, R. (1995) Electronic Imaging: A Tool for the Reconstruction of Faded Color Photographs and Color Movies. Univ. of Basel, Basel, Rochester Institute of Technology, Rochester, 2421.
- [4] Kyung, W.J., Kim, D.C., Ha, H.G., et al. (2012) Color Enhancement for Faded Images Based on Multi-Scale Gray World Algorithm. 2012 IEEE 16th International Symposium on Consumer Electronics, Harrisburg, 4-6 June 2012, 1-4. <https://doi.org/10.1109/ISCE.2012.6241722>
- [5] Berns, R.S., Byrns, S., Casadio, F., et al. (2006) Rejuvenating the Color Palette of Georges Seurat's a Sunday on La Grande Jatte-1884: A Simulation. *Color Research and Application*, **31**, 278-293. <https://doi.org/10.1002/col.20223>
- [6] Tominaga, S. and Tanaka, N. (2008) Spectral Image Acquisition, Analysis, and Rendering for Art Paintings. *Journal of Electronic Imaging*, **17**, Article ID: 043022. <https://doi.org/10.1117/1.3036180>
- [7] Marie, S. and Eija, J. (2012) Mapping Colors from Paintings to Tapestries: Rejuvenating the Faded Colors in Tapestries Based on Colors in Reference Paintings. *Proceedings of the SPIE*, **8291**, 82911F.
- [8] Soo-Chang, P. and Yi-Mei C. (2006) Background Adjustment and Saturation Enhancement in Ancient Chinese Paintings. *IEEE Transactions on Image Processing*, **15**, 3230-3234. <https://doi.org/10.1109/TIP.2006.877478>
- [9] 华忠, 鲁东明, 潘云鹤. 敦煌壁画虚拟复原及演变模拟模型研究[J]. 中国图象图形学报, 2002(2): 79-84+108.
- [10] Shi, X.F. and Lu, D.M. (2005) Colorimetric and Chemical Modeling Based Aging Simulation of Dunhuang Murals. *The Fifth International Conference on Computer and Information Technology (CIT'05)*, Shanghai, 21-23 September 2005, 570-574. <https://doi.org/10.1109/CIT.2005.85>
- [11] 乔建, 赵洁, 乔宝民, 等. 基于彩色阈值变换的香蕉彩色图像分割[J]. 电脑与信息技术, 2011, 19(1): 3-5.
- [12] Zheng, X., Lei, Q., Yao, R., et al. (2018) Image Segmentation Based on Adaptive K-Means Algorithm. *EURASIP Journal on Image and Video Processing*, **2018**, Article No. 68. <https://doi.org/10.1186/s13640-018-0309-3>
- [13] 李翠, 冯冬青. 基于改进 K-均值聚类的图像分割算法研究[J]. 郑州大学学报(理学版), 2011, 43(1): 109-113.
- [14] 庞晓敏, 闵子建, 阚江明. 基于 HSI 和 LAB 颜色空间的彩色图像分割[J]. 广西大学学报(自然科学版), 2011, 36(6): 976-980.
- [15] 李最雄. 敦煌莫高窟唐代绘画颜料分析研究[J]. 敦煌研究, 2002(4): 11-18+110.
- [16] 李最雄. 莫高窟壁画中的红色颜料及其变色机理探讨[J]. 敦煌研究, 1992(3): 41-54+128-129+135-137.