

基于可见光谱的古代壁画颜料识别与颜色分析

李淼鑫^{1,3}, 位春傲^{2,3}, 万晓霞³, 李俊锋^{2,3*}

¹河南牧业经济学院信息工程学院, 河南 郑州 450046;

²河南牧业经济学院包装与印刷工程学院, 河南 郑州 450046;

³武汉大学湖北省文物颜色信息数字化与虚拟再现工程技术研究中心, 湖北 武汉 430079

摘要 针对主观颜色分析受照明光源、观察者等因素影响的问题, 本文采用可见光谱识别不同朝代典型壁画的颜料信息, 然后根据色度学理论, 客观地分析了古代壁画的颜色特征和历史流变。本文搭建了非接触式获取系统, 并采用该系统对莫高窟不同朝代典型洞窟壁画的可见光谱数据进行了无损采集。此外, 本文模拟古代工艺制备颜料样本, 测量其可见光谱和粒径尺度数据, 建立颜料标准数据库。分析颜料的可见光谱与其物质成分、粒径及颜色特性之间的关联, 并据此构建基于可见光谱的壁画颜料的识别方法, 识别莫高窟典型洞窟壁画的颜料信息。本文通过将识别的颜料信息与颜料标准数据库数据进行对比, 客观地分析了莫高窟壁画的颜色特征和历史流变。

关键词 光谱学; 颜料识别; 粒径尺度; 颜色分析; 历史流变

中图分类号 O433.4

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP202158.0630002

Pigment Identification and Color Analysis of Ancient Murals Based on Visible Spectroscopy

Li Miaoxin^{1,3}, Wei Chun'ao^{2,3}, Wan Xiaoxia³, Li Junfeng^{2,3*}

¹ School of Information Engineering, Henan University of Animal Husbandry and Economy, Zhengzhou, Henan 450046, China;

² School of Packaging and Printing Engineering, Henan University of Animal Husbandry and Economy, Zhengzhou, Henan 450046, China;

³ Hubei Province Engineering and Technical Research Center for Digitization and Virtual Reproduction of Color Information of Culture Relics, Wuhan University, Wuhan, Hubei 430079, China

Abstract Subjective color analysis is affected by factors such as lighting sources and observers. To avoid this subjectivity, the pigments of ancient murals are identified using visible spectroscopy, and the characteristics and historical evolution of the ancient murals' color are then analyzed objectively using the chromatic theory. We built a nondestructive acquisition system and used it to capture the visible spectra of the typical Mogao Grottoes murals painted in different dynasties. Many typical pigment samples were prepared by simulating the ancient process. The visible spectra and particle sizes were measured to construct a standard reference database from the obtained results. After analyzing the relationships among the visible spectra, material composition, particle size, and color attributes, a pigment identification method was proposed to identify the pigment used on the murals. The color attributes and historical evolution of the Mogao Grottoes murals were analyzed by comparing the identified pigments with those in the reference database.

收稿日期: 2020-08-05; 修回日期: 2020-08-28; 录用日期: 2020-08-31

基金项目: 国家自然科学基金(61575147, 61275172)、河南省科技攻关项目(192102310028, 202102310352)、河南省教育厅人文社会科学研究一般资助性计划(2019-ZZJH-128)

* E-mail: ljf@hnahe.edu.cn

Key words spectroscopy; pigments identification; particle size; color analysis; historical evolution

OCIS codes 300.6550; 070.4790; 120.4290

1 引言

莫高窟壁画的颜色绚丽多彩,充分展现了颜色的艺术感染力和表现力,且隐含了众多文化功用,是学者研究敦煌壁画的重要切入点^[1-3]。人对颜色的感觉是由光源光线经物体反射进入人眼转为神经冲动后,传至大脑视觉中枢产生的。从色度学上讲,人对颜色的感觉受光源光谱功率分布、物体可见光谱反射特性及观察者对光谱的敏感度等因素的影响。在不确定光源、观察者和呈色物质的情况下,主观探讨颜色规律,易导致分析结果出现偏差。为此,有必要在确定的照明光源、观察者和呈色物质下,对莫高窟壁画的颜色规律进行客观分析。其中,照明光源和观察者可以采用通用的标准确定,而呈色物质则需通过相应的物质成分分析技术确定。

早期,研究者多采用扫描电子显微镜-能谱仪分析(SEM-EDS)^[4-5]、X射线衍射分析(XRD)^[6-7]、傅里叶变换红外吸收光谱分析(FTIR)^[8-9]等取样分析技术确定颜料的成分。但这些方法需提取少量或微量样本,对文物本体有一定的损伤,已不能满足要求。近年来出现了许多非接触检测设备,如手持拉曼光谱仪^[10-11]、光谱辐射度计^[12-13]、光导纤维反射光谱仪^[14-16]等,这些设备不需要接触文物即可采集文物的光谱信息,且体积小,便于携带。其中,基于光谱辐射度计和光导纤维反射光谱仪的可见光谱分析技术,因能够表征物体的真实颜色信息而备受研究者关注。

基于可见光谱的颜料识别可分为人工看谱法和自动识别法。人工看谱法^[17-18]通过人工比对标准样与待测样可见光谱曲线峰值位置以及导数特征的近似程度来判别待测样的颜料成分,主观性强且效率低,难以满足大批量颜料的识别需求。自动识别法^[19-21]通过算法提取可见光谱的相应特征,自动比对标样与待测样特征的近似程度来判别待测样的颜料成分,具有速度快、效率高等优势,如光谱角、光谱相关系数、主成分分析及独立成分分析等方法。但中国壁画所用颜料多为矿物质颜料,存在粒径的变化,现有方法未考虑颜料物质成分和粒径尺度对其可见光谱的耦合影响,且未对颜料的粒径尺度进行识别,亦未从呈色物质的角度客观分析绘画的颜色特征。

本课题组采用分光辐射度计搭建了非接触式获取系统,采用该系统无损采集莫高窟不同朝代典型洞窟壁画的可见光谱数据,构建基于可见光谱的壁画颜料识别方法;然后将壁画可见光谱与颜料标准光谱库进行比对,识别莫高窟壁画颜料的物质成分和粒径尺度,并根据识别结果,在特定的照明和观察条件下,客观分析莫高窟壁画的颜色特征和历史流变。

2 数据采集

2.1 壁画光谱数据的采集

壁画是不可再生的珍贵资源,为此,本课题组搭建了非接触式采集系统,并采用该系统无损地获取了壁画的可见光谱数据。该非接触式采集系统的几何架构如图 1 所示,分光辐射度计(Photo Research PR-705)的光轴垂直于采集对象表面,两个相对光谱率分布连续的照明光源(Elinchrom Scanlite 1000)对称放置在物体表面法线的两侧,并分别与法线呈 45°角。该几何条件与国际照明委员会(CIE)规定的 45°/0°颜色测量几何条件所演化出的双方位角照明相同。

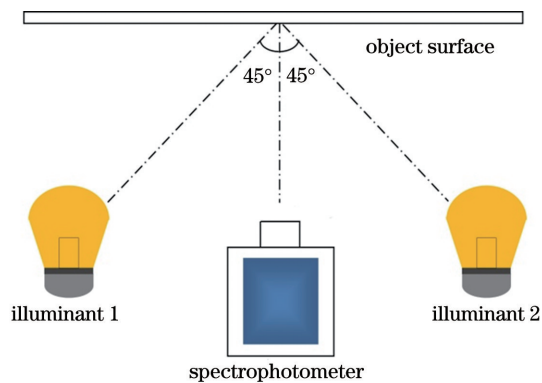


图 1 非接触式壁画可见光谱采集系统的几何架构
Fig. 1 Geometric structure of non-contact mural visible spectrum acquisition system

测量时关闭洞窟大门,营造暗室环境。打开测量设备预热 0.5 h,而后测量标准白板和壁画颜料的可见光谱辐射度,然后通过(1)式计算壁画颜料的绝对可见光谱反射值。

$$R_{\lambda} = \frac{L_{\lambda}}{L_{\lambda}^{\text{ref}}} R_{\lambda}^{\text{ref}}, \quad (1)$$

式中: λ 为可见光波长(以 10 nm 间隔在 400~730 nm 内取样); R_{λ}^{ref} 为标准白板的可见光谱反射值; L_{λ}^{ref} 和 L_{λ} 分别为测得的标准白板和壁画颜料的光谱辐

射度。

稳定且准确的非接触式测量平台是颜料识别结果正确性的重要保证,为此,在测量标准颜料色块样本之前,需要先评价非接触式测量平台的可重复性。为测试平台的短期可重复性,在 Gretag Macbeth Color Checker 标准色卡中选取蓝、绿、红、黄、品、青 6 个不同主波段色块,在系统预热 0.5 h 后,结合聚四氟乙烯标准白板连续循环测试 10 次。然后按(1)式计算出 6 个标准色块的实测可见光谱反射值,并计算实测可见光谱幅值与标准可见光谱幅值之间的均方根误差(RMSE),统计结果如表 1 所示。

表 1 采集系统的短期可重复性测试结果

Table 1 Short-term repeatability test results of the acquisition system

Color	RMSE		
	Max	Min	Mean
Blue	0.0067	0.0020	0.0043
Green	0.0053	0.0020	0.0035
Red	0.0047	0.0021	0.0035
Yellow	0.0072	0.0039	0.0054
Magenta	0.0069	0.0033	0.0048
Cyan	0.0059	0.0017	0.0036

为测试平台的长期可重复性,仍选用以上 6 个色块,每间隔 1 h 测量一次,循环测量 10 次。以第一次获得的可见光谱为标准光谱,计算每次测量光谱幅值与标准光谱幅值之间的均方根误差,统计结果如表 2 所示。从表 2 中可以看到,所有色块的平均均方根误差均小于 0.0054,最大均方根误差均不大于 0.0080。

表 2 采集系统的长期可重复性测试结果

Table 2 Long-term repeatability test results of the acquisition system

Color	RMSE		
	Max	Min	Mean
Blue	0.0075	0.0027	0.0051
Green	0.0067	0.0017	0.0038
Red	0.0055	0.0028	0.0036
Yellow	0.0066	0.0021	0.0043
Magenta	0.0080	0.0030	0.0053
Cyan	0.0077	0.002	0.0044

经咨询敦煌研究院相关专家,本课题组以颜色丰富、画面经典为依据,从十六国至元代开凿的洞窟中,筛选出 16 个典型洞窟作为壁画颜料识别和颜色

特性分析的谱源。

2.2 标准颜料数据库的构建

本研究采用比较壁画可见光谱与标准颜料光谱的方式识别壁画颜料的成分信息,识别结果的正确性在很大程度上取决于标准颜料样品的制备质量。为保证结果的准确性,标准颜料样品应依据壁画颜料的特征进行制备。

莫高窟开凿在松散的砂砾壁面上,表面极其粗糙且易于风化,无法直接作画。画师要先在作画的沙砾岩壁上制作一层由粗泥层、细泥层、白粉层构成的地仗层,而后涂布颜料层,创作绘画。按照该工艺,标准颜料样本由基层、细泥层、白粉层和颜料层构成。将揭去表层装裱纸的白卡纸板作为基底,在基底中增加断裂纤维,以模拟壁画地仗层中的棉、麻纤维。以明胶为胶结材料,将其均匀分散在宕泉河的澄板土中,然后将其涂在基底上制成细泥层;再将均匀分散的石膏涂在干燥后的细泥层上制成白粉层;最后分散颜料,并将其涂在干燥后的白粉层上制成颜料层。

待标准颜料样本自然干燥后,仍采用上述非接触式采集系统获取每个颜料样本的可见光谱数据。由于我国古代颜料多由矿石经研磨、筛分、漂洗等工艺制成,存在粒径尺度的变化,因此本研究采用激光粒度仪(Mastersizer 2000)测量各样本所用颜料的粒径尺度。收集颜料可见光谱数据和粒径尺度数据,构建标准颜料数据库。

根据早期点取样有损分析技术的研究成果和现存史料记载,并听取了敦煌研究院美术研究所和文物保护研究所专家的意见,本课题组最终选取 45 种古代壁画常用的典型颜料,制成了含颜料粒径尺度变化的 144 个标准颜料样本,图 2 展示了其中的部分样本。



图 2 部分标准颜料样本

Fig. 2 Some standard pigment samples

2.3 标准颜料数据库分析

从标准颜料数据库中选择不同物质成分和粒径尺度的标准颜料样本,绘制其可见光谱曲线。图 3 给出了石绿、石青和土红三种颜料的可见光谱曲线,其中#前的数字代表粒径番号,数字越大表示粒径越小。选择 D65 照明体和 CIE 标准色度

观察者,在 CIE1976L*a*b* 均匀颜色空间中计算各颜料样本的色相角、明度和饱和度等颜色特性。其中,D65 照明体代表相关色温约为 6504 K 且在可见光谱范围内的平均北方天空日光,CIE 标准色度观察者代表人眼在 2° 视场下的平均色觉特性。

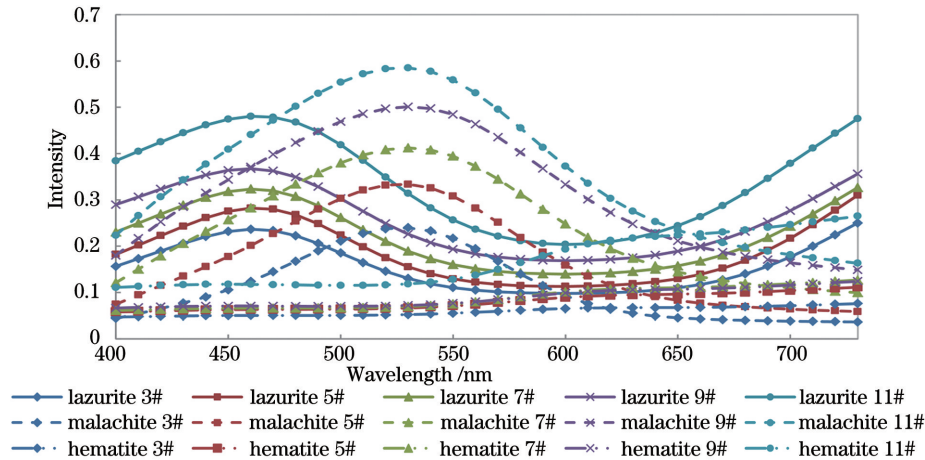


图 3 石绿、青金石和土红三种颜料的可见光谱曲线

Fig. 3 Visible spectra of malachite, lazurite and hematite pigment

通过分析可见光谱曲线的分布特征和颜色特性可以归纳出以下两条规律:

1) 对于物质成分相同的颜料,其可见光谱的峰值位置相同,光谱曲线的变化趋势一致,颜料的色相基本保持恒定;而物质成分不同的颜料,其可见光谱的峰值位置不同,光谱曲线的变化趋势不一致。

2) 颜料粒径尺度的差异主要反映在可见光谱幅值的变化上,颜料粒径越小,可见光谱的幅值越大,颜料颜色的亮度越高,饱和度一般越低;反之,颜料粒径越大,可见光谱的幅值越小,颜料颜色的亮度越低,而饱和度一般越高。

3 颜料识别

根据以上分析,依次建立壁画颜料物质成分和粒径尺度的识别方法,即:先提取可见光谱的峰值和曲线变化趋势特征,实现壁画颜料物质成分的识别;然后在同一类颜料内,提取可见光谱的幅值特征,实现壁画颜料粒径尺度的识别。

3.1 颜料物质成分的识别

物质成分相同的颜料,其可见光谱的峰值和曲线变化趋势一致,但受粒径尺度的影响,它们的光谱

幅值不同。为此,在识别颜料物质成分之前,需要对可见光谱进行标准化处理,以剔除粒径尺度对可见光谱幅值的影响。本研究先对可见光谱进行零均值化处理,再进行归一化处理,以实现可见光谱的标准化^[5]。设 $r = [r_1 \ r_2 \ \dots \ r_n]^T$ 是 n 个取样元素的可见光谱序列,则零均值化公式为

$$r_i = r_i - \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n r_j, \quad (2)$$

归一化公式为

$$r_i = r_i / \sqrt{\sum_{j=1}^n r_j^2}. \quad (3)$$

标准化可见光谱序列的一阶中心差分序列 s 的表达式为

$$s_i = (r_{i+1} - r_{i-1})/2, \quad (4)$$

二阶中心差分序列 c 的表达式为

$$c_i = r_{i+1} + r_{i-1} - 2r_i. \quad (5)$$

取上述两个序列再次进行上述标准化处理后,然后将处理结果与标准化可见光谱序列加权组合,构建特征向量 x ,用以表示可见光谱的峰值和曲线变化趋势,表征颜料的物质成分信息,即

$$x = [ar \ \beta s \ \gamma c] = [ar_1 \ ar_2 \ \dots \ ar_n \ \beta s_1 \ \beta s_2 \ \dots \ \beta s_n \ \gamma s_1 \ \gamma s_2 \ \dots \ \gamma s_n] = [x_1 \ x_2 \ \dots \ x_{3n-4}], \quad (6)$$

式中： α 、 β 和 γ 为加权系数，它们的取值范围均为 $[0, 1]$ ，且满足 $\alpha + \beta + \gamma = 1$ ，用以调节三个序列对颜料物质成分特征的贡献率。

在特征空间中，将待识别颜料特征向量与标准颜料数据库进行比对，然后根据欧氏距离判断颜料的物质成分。经测试，取 $\alpha = 0.5$ ， $\beta = \gamma = 0.25$ 。需要指出的是，因颜料存在粒径尺度的变化，因此本文

用数据库中同物质成分颜料在各粒径尺度下特征向量的平均值，与待识别颜料的特征向量进行比对。

图 4 为莫高窟第 288 窟西壁部分区域的识别结果，其中，图 4(b) 为壁画的光谱信息特征曲线以及从数据库中识别出的颜料的光谱信息特征曲线，色块 CP1 为石绿 (malachite)，色块 CP2 和 CP3 为青金石 (lazurite)，色块 CP4 为土红 (hematite)。

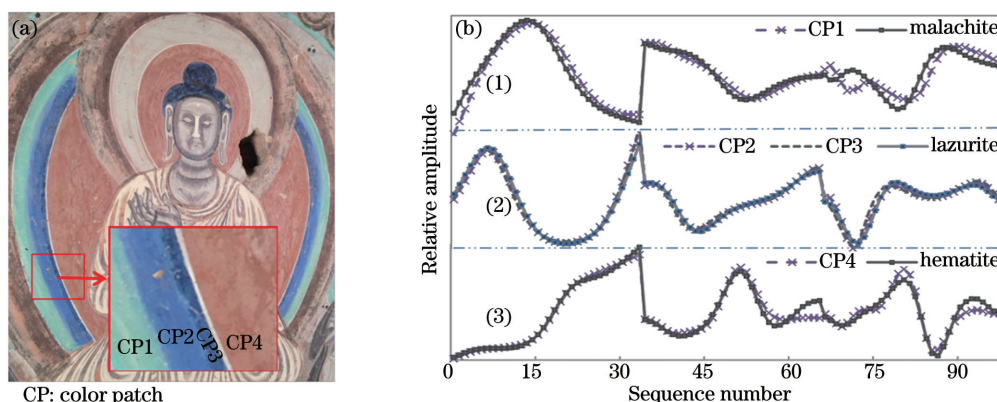


图 4 莫高窟第 288 窟西壁部分区域的识别结果。(a) 识别的壁画区域；(b) 特征向量比对

Fig. 4 Pigment identification of partial area of the west wall of Cave 288 of Mogao Grotto. (a) Identified areas of the murals; (b) comparisons of the feature vectors

3.2 颜料粒径尺度的识别

对于同种物质成分的颜料而言，其粒径尺度的变化主要影响其可见光谱的幅值，因此可以根据其可见光谱的幅值差异来识别颜料的粒径尺度。

3.2.1 直观判别法

数据库中含有同物质成分的颜料在不同粒径尺度下的可见光谱信息，因此，在完成颜料的物质成分识别后，调出数据库中各粒径尺度下该颜料的可见光谱数据，将其与壁画实测光谱幅值进行比较，直观地判别壁画绘制时所用的颜料的粒径尺度，为壁画临摹者选择临摹用颜料的粒径尺度提供粗略参考。

前文已鉴别出第 288 窟西壁色块 CP2 和色块 CP3 为青金石颜料，其可见光谱具有不同的幅值，因此，可将其与数据库中各粒径尺度下青金石颜料的可见光谱进行比较，以判断壁画上色块 CP2 和色块 CP3 所用青金石颜料的粒径。如图 5 所示，色块 CP2 的粒径介于颜料数据库中青金石 5# 和 7# 颜料之间，而色块 CP3 的粒径近似于颜料数据库中青金石 3# 颜料的粒径。

3.2.2 数值分析法

为定量识别壁画颜料的粒径尺度信息，可依据标准颜料数据库建立同物质成分颜料可见光谱幅值与其粒径尺度之间的数值关系，然后通过数值关系预测壁画实测光谱对应的颜料的粒径。本文先对可

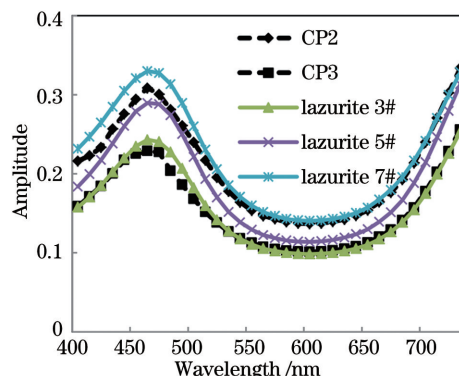


图 5 莫高窟第 288 窟西壁色块 CP2 和色块 CP3 的粒径尺度鉴别结果

Fig. 5 Particle size identification of CP2 and CP3 on the west wall of Cave 288 of Mogao Grotto

见光谱进行积分，用积分值表征可见光谱的幅值特征，然后建立其与颜料表面积平均粒径 D 之间的数值关系。采用(7)式对可见光谱进行积分。

$$I = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} r(\lambda) d\lambda, \quad (7)$$

式中：积分的上下限 λ_1 、 λ_2 为可见光谱的波段范围； $r(\lambda)$ 为颜料在可见光波长 λ 处的光谱反射率；积分值 I 表征颜料可见光谱的幅值。对于可见光谱序列 $r = [r_1 \ r_2 \ \dots \ r_n]^T$ 而言，可取

$$I = \sum_{i=1}^n r_i. \quad (8)$$

测试后发现,利用二次多项式对颜料可见光谱积分值与颜料表面积平均粒径 D 之间的关系进行拟合,拟合度高,效果好。图 6 为岩肌颜料的拟合关系。在识别出壁画上的颜料为岩肌后,用(8)式获得壁画可见光谱的积分值,将积分值代入到图 6 中的拟合式中即可获得壁画岩肌颜料的表面积平均粒径 D 。

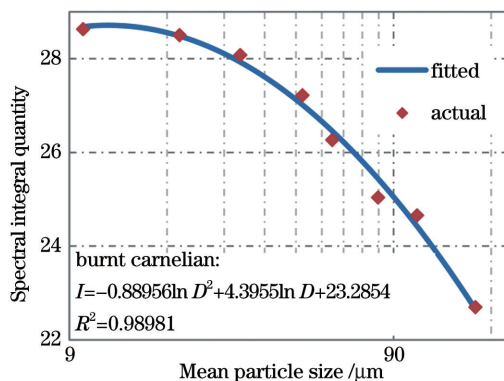


图 6 岩肌颜料的拟合结果

Fig. 6 Fitting result of the skin color pigment

4 颜色分析

依据本研究提出的颜料识别方法,对采集的可见光谱进行识别,并对鉴别出的颜料颜色进行分析,以研究壁画用色的特点以及不同朝代壁画用色风格的演化变迁。

4.1 用色特征分析

在同一洞窟的不同区域可鉴别出同种颜料,对其粒径尺度进行鉴别后发现,同一洞窟内的同种颜料存在着粒径尺度的变化。如图 4 所示西魏开凿的第 288 窟西壁佛像的佛光部分,用到了两种粒径的颜料。图 7 为开凿于初唐的第 220 窟不同位置处的

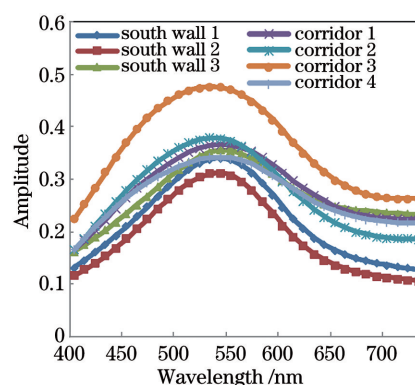


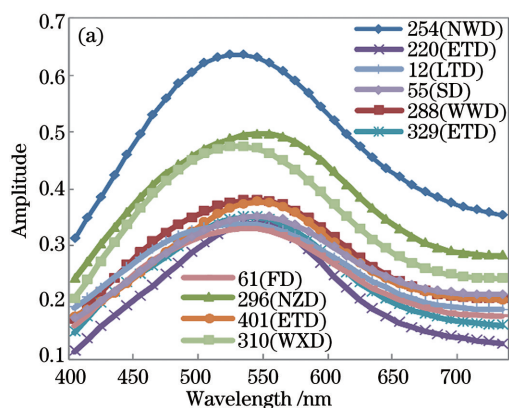
图 7 莫高窟第 220 窟不同区域石绿颜料的可见光谱
Fig. 7 Visible spectra of malachite pigment in different areas of Cave 220 of Mogao Grotto

石绿颜料的可见光谱变化,将其与颜料数据库不同粒径尺度的石绿颜料进行对比,可粗略判断该洞窟中的多数石绿颜料粒径尺度介于 5# 和 7# 之间,另外还有较细的 9#。

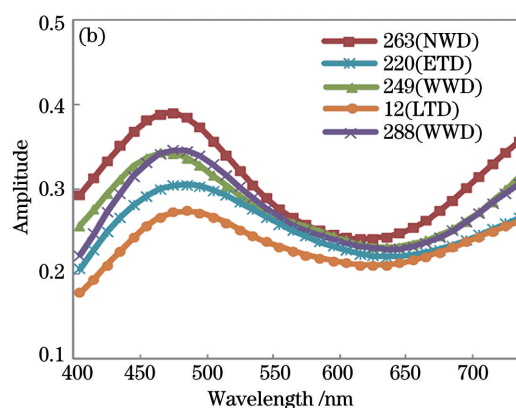
根据前述分析,颜料粒径尺度的变化会引起颜料可见光谱幅值的变化,这一变化会反映在颜料颜色亮度和饱和度的变化上。这说明,我国古代画师很早即掌握了研漂工艺,通过控制颜料的粒径尺度来丰富颜料的色彩层次。

4.2 历史流变分析

以朝代划分典型洞窟,对各朝代壁画的可见光谱进行鉴别分析,结果表明,尽管古代画师会以颜料粒径尺度的变化来丰富色彩层次,但魏晋南北朝时期壁画的颜料粒径相对较小,而唐代壁画颜料的粒径相对较大。如图 8 所示,唐代壁画的石绿颜料和青金石颜料的可见光谱幅值较小,相应的颜料粒径尺度较大,而魏晋南北朝时期壁画的可见光谱幅值较大,相应的颜料粒径较小。



NWD: Northern Wei Dynasty; WWD: Western Wei Dynasty; NZD: North Zhou Dynasty; ETD: early Tang Dynasty; LTD: late Tang Dynasty; FD: Five Dynasties; WXD: Western Xia Dynasty; SD: Song Dynasty



NWD: Northern Wei Dynasty; WWD: Western Wei Dynasty; ETD: early Tang Dynasty; LTD: late Tang Dynasty

图 8 不同朝代石绿和青金石颜料的可见光谱。(a)石绿颜料;(b)青金石颜料

Fig. 8 Visible spectra of malachite and lazurite pigment in different dynasties. (a) Malachite; (b) lazurite

根据前述分析,可见光谱幅值的减小,对应着颜料颜色亮度的减小和饱和度的增加。因此,唐代壁画的颜色饱和度高,鲜明华丽,而魏晋南北朝时期壁画的颜色饱和度低,平淡淳朴。这从侧面反映出了魏晋南北朝处于壁画绘制的初期,用色尚不成熟,人们对佛教教义的理解还不深入,用平淡的颜色表达内心感受;而唐代经济繁荣,社会富足,大乘佛教深入人心,佛教艺术逐步世俗化和人性化。莫高窟出现了争奇斗胜的创作竞争,人们希望通过最饱和艳丽的色彩表达,获得佛祖和菩萨的庇佑。

5 结 论

本研究提出了通过壁画颜料的识别,采用色度学理论客观分析壁画颜色特性和历史流变的方法。本文首先建立了基于可见光谱的文物颜料原位无损鉴别方法,即以非接触测量方式获得壁画表面的可见光谱反射数据,然后将其与颜料数据库中的数据进行了对比,实现了壁画颜料种类和粒径尺度的鉴别。本文基于颜料粒径尺度与其可见光谱、颜色之间的关系,对敦煌壁画颜料的鉴别结果进行分析,探讨了敦煌壁画的用色特征和历史流变。本研究为绘画的颜色视觉要素分析提供了一种客观的新方法。

参 考 文 献

- [1] Song Y L. Dress color evolution of Qi State in Pre-Qin Dynasty[J]. *Humanity World*, 2019(16): 122-124.
宋玉立. 先秦齐国服饰色彩观之流变[J]. *人文天下*, 2019(16):122-124.
- [2] Liu M, Gao Y. The color of algae pattern in the Sui Dynasty of Mogao Grottoes [J]. *Art and Design (Theory)*, 2018, 2(3): 120-122.
刘敏, 高阳. 莫高窟隋代藻井图案色彩探究[J]. *艺术与设计(理论)*, 2018, 2(3): 120-122.
- [3] Wu Y X. Research on color performance of Dunhuang Mogao Grottoes murals in the Tang Dynasty [D]. Lanzhou: Northwest Normal University, 2017: 1-5.
吴宜轩. 唐代敦煌莫高窟壁画色彩表现研究[D]. 兰州: 西北师范大学, 2017: 1-5.
- [4] Hui N, Wang L, Wang C Y, et al. The applications of the scanning electron microscope and energy dispersive spectrometer in the analyses of the color-painted cultural relics [J]. *Relics and Museology*, 2015(1): 99-103.
惠娜, 王亮, 王春燕, 等. 扫描电子显微镜及能谱仪在彩绘文物分析中的应用[J]. *文博*, 2015(1): 99-103.
- [5] Zhang S X, Fang X Y, Fu Q L, et al. Preliminary study of the pigments on an acrobat figurine excavated from Emperor Qinshihuang's Mausoleum [J]. *Sciences of Conservation and Archaeology*, 2019, 31(3): 115-121.
张尚欣, 方晓阳, 付倩丽, 等. 秦陵陪葬坑出土百戏俑彩绘颜料的初步研究[J]. *文物保护与考古科学*, 2019, 31(3): 115-121.
- [6] Zhou G X. X-ray diffraction analysis to the pigment of Maijishan Grottoes' murals and sculptures [J]. *Archaeology*, 1991(8): 744-755,776.
周国信. 麦积山石窟壁画、彩塑无机颜料的 X 射线衍射分析[J]. *考古*, 1991(8): 744-755,776.
- [7] Guo R, Zhao F Y, Feng J, et al. Study of yellow pigments used for Tang Dynasty mural paintings in Xi'an[J]. *Sciences of Conservation and Archaeology*, 2019, 31(6): 62-71.
郭瑞, 赵凤燕, 冯健, 等. 西安出土唐墓壁画黄色颜料的分析研究[J]. *文物保护与考古科学*, 2019, 31(6): 62-71.
- [8] Prati S, Joseph E, Sciutto G, et al. New advances in the application of FTIR microscopy and spectroscopy for the characterization of artistic materials [J]. *Accounts of Chemical Research*, 2010, 43(6): 792-801.
- [9] Zhou Z B, Yang J, Gao Y M. Analysis of a blue pigment unearthed from the Kizil Grottoes [J]. *Sciences of Conservation and Archaeology*, 2019, 31(4): 109-115.
周智波, 杨杰, 高愚民. 克孜尔石窟出土蓝色颜料研究[J]. *文物保护与考古科学*, 2019, 31(4): 109-115.
- [10] Papiakia Z E, Philippidis A, Siozos P, et al. A multi-technique approach, based on mobile/portable laser instruments, for the *in situ* pigment characterization of stone sculptures on the island of Crete dating from Venetian and Ottoman period[J]. *Heritage Science*, 2016, 4(1): 1-18.
- [11] Shui B W, Su B M, Yu Z R, et al. Analysis of mimetite-group minerals in mural paintings from the Wei and Jin Dynasty tombs of Jiayuguan [J]. *Dunhuang Research*, 2020(1): 133-140.
水碧纹, 苏伯民, 于宗仁, 等. 嘉峪关新城魏晋墓壁画砷铅矿族矿物颜料分析研究[J]. *敦煌研究*, 2020(1): 133-140.
- [12] Li J, Wan X, Bu Y, et al. *In situ* identification of pigment composition and particle size on wall paintings using visible spectroscopy as a noninvasive measurement method [J]. *Applied Spectroscopy*, 2016, 70(11): 1900-1909.

- [13] Bu Y J, Wan X X, Li J F, et al. Automatic pigment recognition of Dunhuang murals based on feature extraction of visible reflectance spectrum [J]. *Sciences of Conservation and Archaeology*, 2017, 29(3): 45-51.
补雅晶, 万晓霞, 李俊锋, 等. 基于可见光谱特征提取的敦煌壁画颜料识别方法研究[J]. *文物保护与考古科学*, 2017, 29(3): 45-51.
- [14] Zhao X, Wang L Q. Progress in the analysis and conservation of cultural relics and artworks with fiber optic reflectance spectroscopy [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2017, 37(1): 21-26.
- [15] Zhang W Y, Su B M, Yin Y P, et al. *In situ* nondestructive analysis of the mural pigments in the Northern Liang caves at the Tiantishan Grottoes [J]. *Dunhuang Research*, 2019(4): 128-140.
张文元, 苏伯民, 殷耀鹏, 等. 天梯山石窟北凉洞窟壁画颜料的原位无损分析[J]. *敦煌研究*, 2019(4): 128-140.
- [16] Fonseca B, Schmidt P C, Ganio M, et al. Seeing red: towards an improved protocol for the identification of madder- and cochineal-based pigments by fiber optics reflectance spectroscopy (FORS) [J]. *Heritage Science*, 2019, 7(1): 1-15.
- [17] Cavaleri T, Giovagnoli A, Nervo M. Pigments and mixtures identification by visible reflectance spectroscopy [J]. *Procedia Chemistry*, 2013, 8: 45-54.
- [18] Liang H D, Lucian A, Lange R, et al. Remote spectral imaging with simultaneous extraction of 3D topography for historical wall paintings [J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2014, 95: 13-22.
- [19] Wang K, Wang H Q, Yin Y, et al. Pigment spectral matching recognition method based on adaptive edit distance [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2018, 55(11): 113004.
王可, 王慧琴, 殷颖, 等. 基于自适应编辑距离的颜料光谱匹配识别方法[J]. *激光与光电子学进展*, 2018, 55(11): 113004.
- [20] Rohani N, Salvant J, Bahaadini S, et al. Automatic pigment identification on Roman Egyptian paintings by using sparse modeling of hyperspectral images [C]// 24th European Signal Processing Conference (EUSIPCO), August 29-September 2, 2016, Budapest, Hungary. New York: IEEE Press, 2016: 2111-2115.
- [21] Wang W C, Wang H Q, Wang K, et al. An identification method of spectral information divergence pigment based on statistical manifold [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2018, 55(1): 013002.
王伟超, 王慧琴, 王可, 等. 一种基于统计流形的光谱信息散度颜料识别方法[J]. *激光与光电子学进展*, 2018, 55(1): 013002.