

# 高光谱成像技术在中国画颜料分类和识别上的应用初探 ——以光谱角填图(SAM)为例

巩梦婷,冯萍莉

(四川博物院文物保护与修复中心,四川成都 610071)

**摘要:**为探索光谱角填图法在颜料分类和识别上的操作方法,用高光谱成像系统采集了现代中国画的高光谱图像,利用光谱角填图法对绘画所用颜料进行分类和识别。通过将多次分类识别结果与绘画实际所用颜料进行对比,发现采用光谱角填图时应根据不同的物质设置不同的阈值,方能取得好的填图效果;阈值大小的确定可通过对比已分类区域的平均光谱曲线和标准光谱库曲线来进行。通过对已知颜料进行光谱角填图的实践,探索颜料的光谱角填图规律,为未知中国画文物颜料的填图在阈值的设置上提供数据支撑,使高光谱成像技术更有效地应用于中国画文物颜料的鉴定和识别。

**关键词:**高光谱成像技术;ENVI;国画颜料;光谱角填图

**中图分类号:** G26;TH74;TP317.4 **文献标识码:** A

## 0 引言

高光谱成像技术兴起于20世纪80年代,最初被应用于地质学、植被生态学、生态环境学和城市调查等领域中。然而,直至近十年在文物领域方见诸其应用的迹象。国外学者针对高光谱在文物艺术品上的研究展开较多的工作,主要集中在对文物蕴含信息的揭示、增加图像的可视性、文物保护修复过程或材料老化的监控评估、颜料的鉴定及文物数字化等方面<sup>[1-2]</sup>。国内学者针对文物展开的高光谱研究零星可见,如中国文化遗产研究院的周霄等利用高光谱成像技术对云冈石窟砂岩的风化状况进行分类和识别<sup>[3]</sup>。北京建筑工程学院的芦鑫利用高光谱对壁画进行底稿信息、颜料信息和病害信息的分析<sup>[4]</sup>。此外,学者也用高光谱成像技术展开了一些考古研究,如陕西省考古研究所的段清波、曹玮等联合上海大学遥感与空间信息科学研究中心的谭克龙等人采用高光谱对秦始皇陵区、西安神禾塬地区进行考古调查<sup>[5,6]</sup>。南京大学国际地球系统科学研究所的田庆久对在江苏西溪贝丘遗址采集的贝壳、土壤和地表裸地进行了光谱测量和分析<sup>[7]</sup>,为贝丘遗址考古提供

理论依据。西北大学的王琳琳用高光谱数据对古遗址信息进行提取分析<sup>[8]</sup>等。

中国的传统绘画所用颜料种类繁多,对绘画所用颜料进行鉴定是文物保护修复工作的前提。鉴定颜料的传统方法大都是有损或微损的(如显微镜观察、XRD、FTIR、XRF等),需取样才能分析。此外,有损测试的分析结果只局限于测试点或取样点,而不能得出未经测试或取样部位的信息。高光谱成像技术能同时提供待测物各个像元的几何和光谱信息,建立在不同物质具有不同的光谱曲线,同种物质具有相同或相似的光谱曲线的原理上,可以对目标物进行识别和分类。此外,高光谱分析技术具有快速测量、能大面积识别和分类等优点,且对文物无损伤。因此,其在文物分析领域具有较广阔的前景。

现有的对颜料鉴定的高光谱研究大部分集中在油画和壁画上,在中国画上则少见。而中国画与颜料层较厚的油画和壁画存在较大的不同,在技术应用上有可能存在差异。因此,本研究通过创建国画颜料的光谱库、采集并分析国画的高光谱图像、探索光谱角填图法在颜料分类和识别上的操作方法,为高光谱成像技术在未知中国画文物颜料的分类和识别上的应用奠定实践基础。

收稿日期:2013-05-09;修回日期:2013-07-17

作者简介:巩梦婷(1988—),女,2012年毕业于复旦大学文物与博物馆学系考古学及博物馆学专业,硕士,助理馆员, E-mail:09210540008@alu.fudan.edu.cn

## 1 实验样品和方法

### 1.1 高光谱图像采集和分析

**1.1.1 高光谱图像样品和采集** 待检测国画为一用马利牌国画颜料绘制于夹江净皮单宣上的国画,且已知国画上各部位所用颜料(用以评估高光谱图像分类和识别的准确性)。

本实验所选纸基为夹江净皮宣纸(考虑到基质对颜料光谱曲线有可能产生影响<sup>[9]</sup>,应尽量减少制作光谱库的标准样品与待测绘画在纸基上的差异),颜料为上海马利实业画材有限公司生产的马利牌国画颜料(花青、酞青蓝、三绿、朱膘、曙红、胭脂、赭石、藤黄)。实验样品分为两组。第一组用于颜料标准光谱库的建立,制作方法是将未经稀释的上述八种国画颜料均匀涂刷于夹江净皮宣纸上,自然干燥即可。第二组样品用以研究颜料浓度对光谱曲线的影响。其制作方法是:用蒸馏水对赭石逐步稀释,并将其涂刷于宣纸上,赭石的浓度依次为100%,67%,50%,40%,30%,20%,10%和5%。

本实验中所有高光谱图像数据均采用 THE-MIS NUVNIR-350 推扫型高光谱成像仪在卤素灯下采集,物镜距样品约50cm。采集图像的光谱分辨率为1.5nm,光谱范围为350~1000nm,共920个波段。

**1.1.2 高光谱图像预处理** 为了获取样品像元的光谱特性,需对采集图像进行校正,即反射率反演。本实验采用标准白色校正板对待测物进行点对点的反射率反演,并使用暗电流对采集图像进行校正,排除因仪器产生的噪声、误差等。

**1.1.3 高光谱图像分析** 采用 ENVI 软件对高光谱数据进行分析。

### 1.2 国画颜料的分类和识别方法

**1.2.1 目标分类与识别原理** 高光谱图像分类是以区别图像中所含的多个目标物为目的,对每个像元或比较匀质的像元组给出对应其特征的名称。高光谱图像分类的理论依据是:图像中的同类物质在相同条件下(纹理、地形、光照等),应具有相同或相似的光谱信息特征和空间信息特征,从而表现出同类物质的某种内在的相似性,即同类物质像元的特征向量将集群在同一特征空间区域<sup>[10]</sup>。

高光谱图像目标识别的实质是光谱识别,通过量测两条光谱间的特征确定某一未知光谱属于某一种已知光谱的确认概率。

**1.2.2 光谱库的建立** 目标识别需建立在目标光谱库的基础上,所以,首先要建立颜料的标准光谱数据库。

利用 ENVI 软件的端元波谱提取功能(End-member Collection)提取颜料的光谱曲线,将其保存至光谱库。

**1.2.3 国画颜料的分类和识别方法** 高光谱图像的分类识别算法较多,常用的有光谱角填图(Spectral Angle Mapper)、二进制编码(Binary Encoding)和光谱信息散度(Spectral Information Divergence)等。本研究以光谱角填图法为例介绍高光谱成像技术在书画颜料分类和识别上的应用。光谱角填图将像元N个波段的光谱响应作为N维空间的矢量,通过计算它与最终光谱端元的光谱(来自光谱库)间的广义夹角来表征其匹配程度:夹角越小,说明越相似<sup>[11]</sup>。使用此算法时,需要设置最大角度阈值,当像元波谱与端元波谱的夹角小于该角度时则将此像元归为该端元波谱。

本研究方法为:设置阈值进行光谱角填图——提取填图区域的光谱曲线并与相应的光谱库曲线进行对比——评估光谱角填图阈值的大小——重新设置阈值进行光谱角填图直至提取填图区域的光谱曲线与相应的标准光谱库曲线基本一致时,便可取得较好的填图效果。

## 2 结果和讨论

### 2.1 光谱数据库及待测物高光谱图像

图1显示了八种马利牌国画颜料的光谱曲线,图例用“颜料@净皮”表示。图中的八种国画颜料的光谱曲线各有特征,通过其波形、特征吸收位置、反射率大小等可对未知颜料进行鉴定识别。下文的光谱角填图便以这八种颜料的光谱曲线为标准对待分析国画进行分类和识别。

图2为采用 ENVI 软件对待分析国画高光谱数据进行的真彩色显示(R:650nm, G:550nm, B:450nm)。

### 2.2 国画颜料的分类识别——最大角度阈值统一为0.2(约11.4°)

将八种颜料的\*\*最大角度阈值统一设为0.2进行光谱角填图,填图结果见图3。将此填图结果与该国画实际颜料信息进行对比后发现:三绿的填图匹配度较好;花青填图区域比实际区域小;该国画中实际不含酞青蓝,而填图表示含少量酞青蓝;有部分朱膘颜料被填图为赭石;胭脂和曙红未被填图,这与该国画上不存在这两种颜料的事实相同。

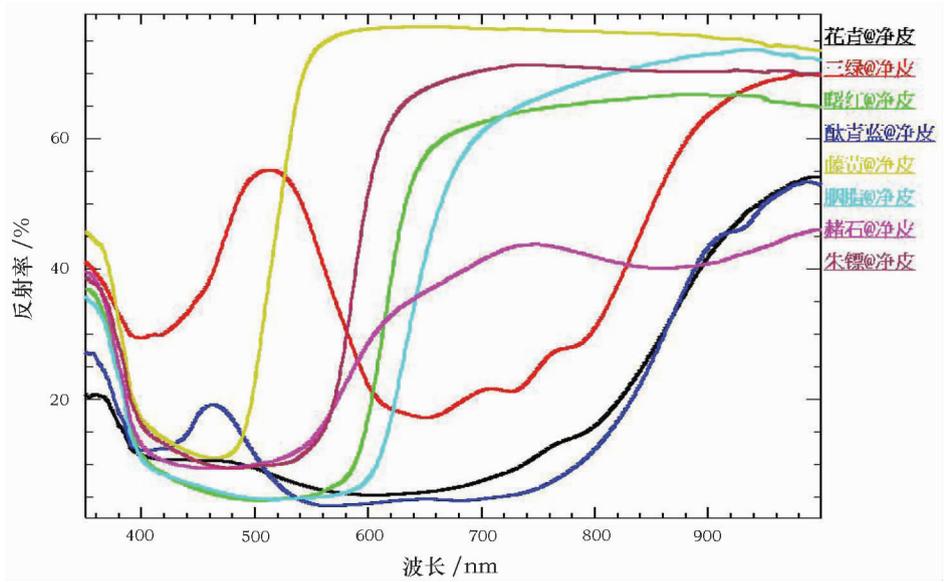


图 1 八种马利国画颜料的光谱曲线

Fig. 1 Spectral curves of eight Marie's Chinese traditional pigments

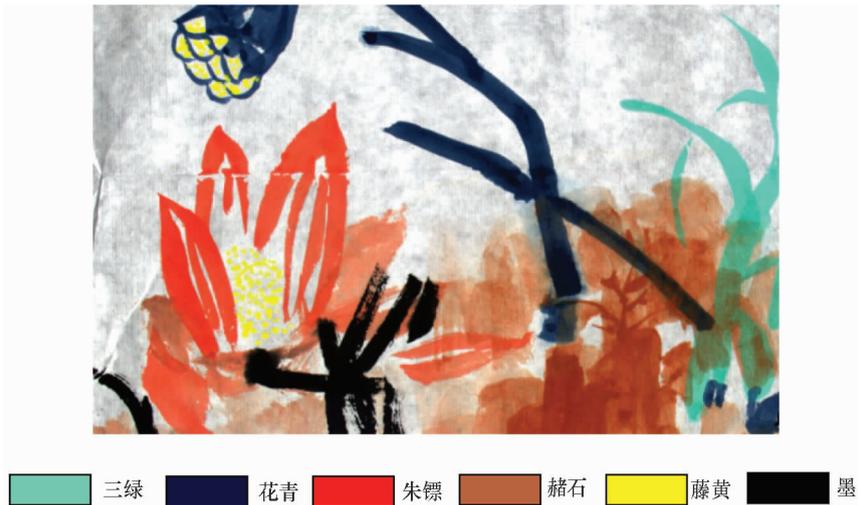


图 2 国画高光谱数据的真彩色图像

Fig. 2 The "true color image" of the Chinese painting

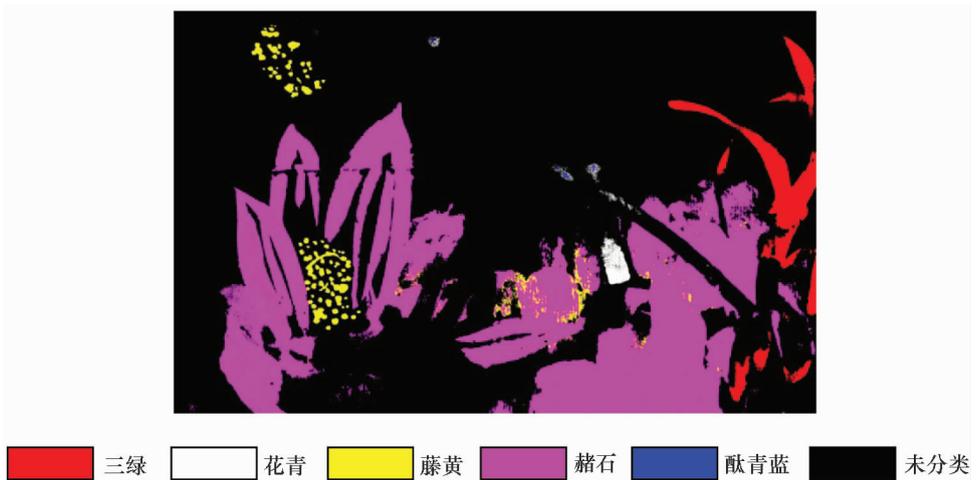


图 3 光谱角填图结果(阈值 = 0.2)

Fig. 3 SAM results (value of threshold: 0.2)

为分析填图出现较大差异的原因,采用 ENVI 软件中的“mean class”功能提取了各填图区域的平均光谱曲线,见图 4。由于填图过程中未识别出胭脂和曙红,因此,这两种颜料的反射率曲线均为零。从图 4 中可以看出花青和酞青蓝所在区域的平均光谱曲线波形基本一致,反射率大小差异也较小,因此可以推断这两组区域有可能为一种物质。将被填图区域为花青和酞青蓝区域的平均波谱曲线与花青、酞青蓝的标准光谱库曲线进行对比,见图 5。图中可看出两组填图区域的光谱曲线与花青相似,与酞青蓝的差别较大。此外,通过 ENVI 中的“Spectral

Analyst”工具(该工具使用二进制编码 BE、光谱角填图 SAM 及波谱特征拟合分类法 SFF 对波谱进行匹配,输出一个总体的匹配度得分(0 至 1),得分越高,说明相似度越高)对酞青蓝填图区域的平均光谱曲线与花青和酞青蓝标准曲线的匹配度进行计算,结果见表 1。表 1 数据表明酞青蓝填图区域的平均波谱曲线与花青的相似度较高,是花青的概率较大。综上所述,之所以出现花青被误判为酞青蓝的现象,是因为酞青蓝的阈值设置过大,造成酞青蓝匹配准确度降低。因此,应当适当降低酞青蓝填图时的阈值。

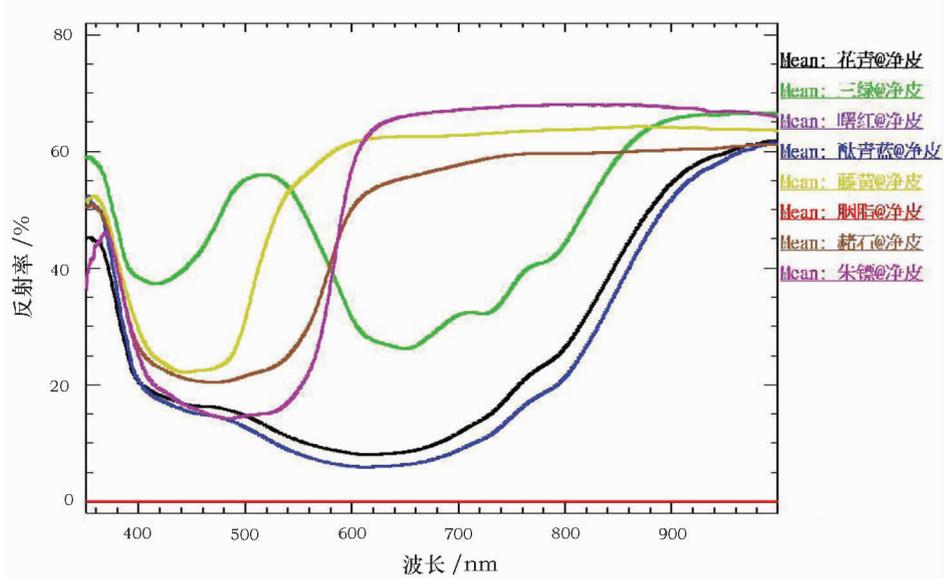


图 4 各填图区域的平均光谱曲线  
Fig.4 Mean spectrum of all the classes

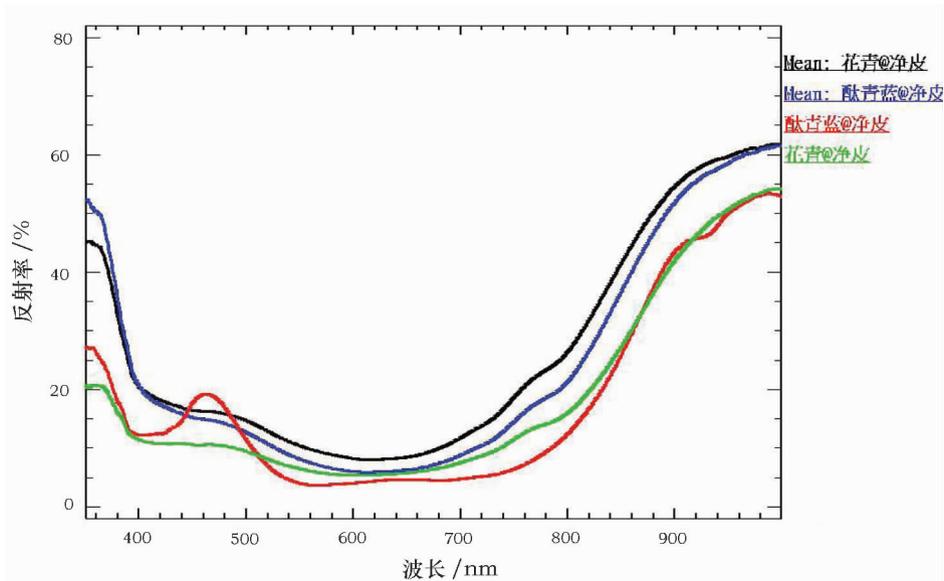


图 5 花青、酞青蓝填图区域平均光谱与标准光谱库的对比

Fig.5 The standard cyanin and phthalo blue spectrum by comparison with the mean spectra of different classes

表1 酞青蓝填图区域平均光谱与花青和酞青蓝标准光谱的匹配度

Table 1 Matching degree of phthalo blue mean spectrum compared with the standard cyanin and phthalo blue spectrum

	光谱角填图(SAM)	光谱特征拟合(SFF)	二进制编码(BE)	总分
花青	0.551	0.588	0.967	2.106
酞青蓝	0.570	0.035	0.925	1.530

将图1和图4中代表相同颜料的光谱曲线进行对比也可发现:除赭石填图区域的平均光谱曲线与光谱库曲线存在明显差异外(图6),三绿、花青、朱膘和藤黄的光谱曲线基本一致。赭石曲线的差异应是由朱膘造成的,因为实际颜料为朱膘的区域被认为是赭石,这部分区域也参与了平均光谱曲线的计算。以赭石为对比标准,采用 Spectral

Analyst 分析工具对其与朱膘的相似度进行打分,总分值高达 2.008 (SAM = 0.844; SFF = 0.219; BE = 0.945)。这说明赭石和朱膘的光谱曲线特征存在某种程度的相似性,可分离性不好,容易相互干扰。因此,采用光谱角填图时,应适当降低阈值、突出各颜料的光谱特征,从而提高颜料识别准确度。

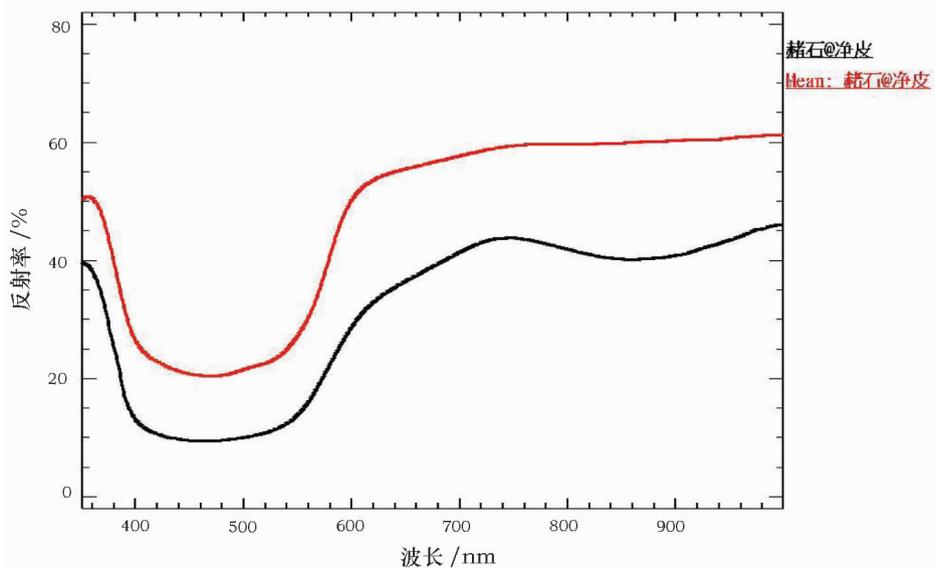


图6 赭石的光谱库曲线和填图区域平均光谱曲线对比

Fig. 6 Comparison between mean spectrum of selected class and standard spectrum of ochre

针对花青填图区域小于实际区域的问题,有可能是因为待检测书画所用花青颜料浓度较小造成的。颜料的光谱曲线受颜料浓度影响会发生变化,可通过适当增大阈值来达到满意的填图结果。

光谱角填图时,在国画中未发现胭脂和曙红的存在,这与该国画的实际颜料使用情况是一致的。这也说明了:在四种红色颜料中,胭脂和曙红对赭石或朱膘的可分离性优于赭石与朱膘间的可分离性。

### 2.3 国画颜料的分类识别——对八种颜料设置不同的最大角度阈值

通过实验方法,即,设置阈值进行光谱角填图——提取填图区域的光谱曲线并与标准库曲线进行对比——评估光谱角填图阈值的大小——

重新设置阈值进行光谱角填图直至发现,当填图区域所代表颜料的光谱曲线特征与该颜料标准光谱库曲线特征基本一致时对应的八种颜料阈值分别为:藤黄和朱膘均为 0.18;赭石为 0.07;花青为 0.3;酞青蓝为 0.15;三绿、胭脂和曙红为 0.2。采用上述阈值对国画进行光谱角填图后的结果见图7。将填图结果与国画实际所用颜料信息进行对比,发现光谱角填图的匹配效果较好。

从图1和图7的对比中还可以看出,有少量颜色较浅的赭石被认为朱膘,部分颜色较浅的颜料没有被填图。出现误认的原因有二:赭石和朱膘的可分离性较差;当赭石颜料浓度较小时,其光谱曲线特征逐渐弱化,部分区域接近朱膘。图8为不同浓度的赭石颜料在夹江净皮单宣上提取

的光谱曲线的对比。从图中可以看出,随着颜料浓度的降低,赭石的光谱特征逐渐弱化。这也是

待测书画上部分颜色较浅的颜料没有被填图的原因。

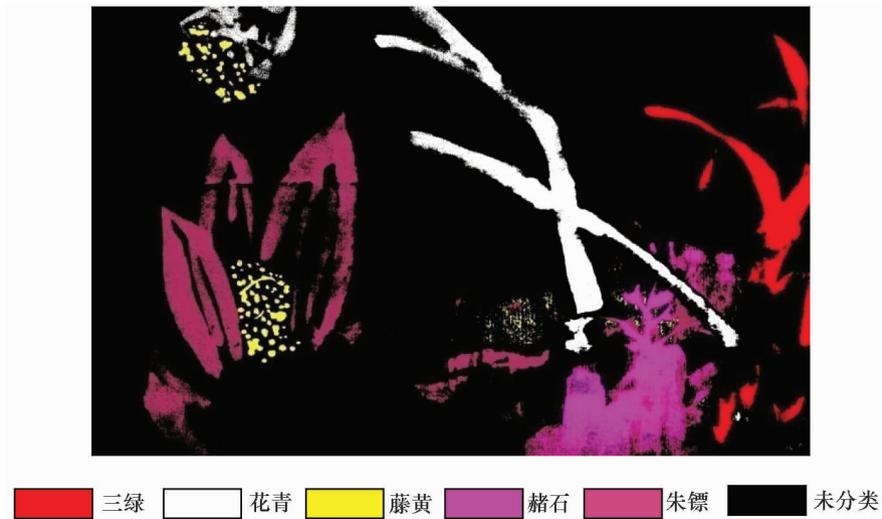


图7 光谱角填图结果(不同阈值)

Fig.7 SAM results (multiple threshold values)

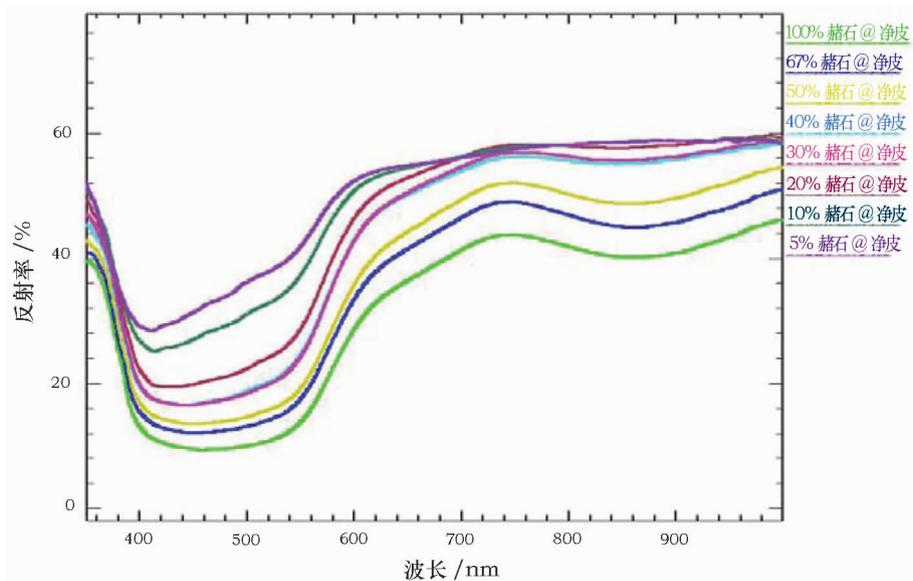


图8 不同浓度的赭石颜料在夹江净皮单宣上的光谱曲线

Fig.8 Spectrums of various concentrations of ochre collected on Jiajiang Xuan paper

### 2.4 两次填图结果的对比分析

图9为两次光谱角填图中代表相同颜料区域的平均光谱曲线与标准光谱库曲线的对比。图中“Mean 1:颜料@净皮”表示采用统一阈值0.2进行填图的结果;“Mean 2:颜料@净皮”表示采用不同阈值进行填图的结果;“颜料@净皮”表示光谱库数据。(两次填图中,三绿的阈值均为0.2,故只有一条平均光谱曲线)图中可

以看出,相对于 Mean1 曲线,Mean2 曲线更有效地表示了该种颜料的光谱特征。这也说明了针对不同的颜料应采用相应的阈值进行光谱角填图。

此外,待测书画上的混色区域均未被填图。对于混色区域颜料的识别需要引入“Kubelka - Munk”理论进行计算后才能鉴定<sup>[1]</sup>,这在本研究中尚未涉及,需再展开细致研究。

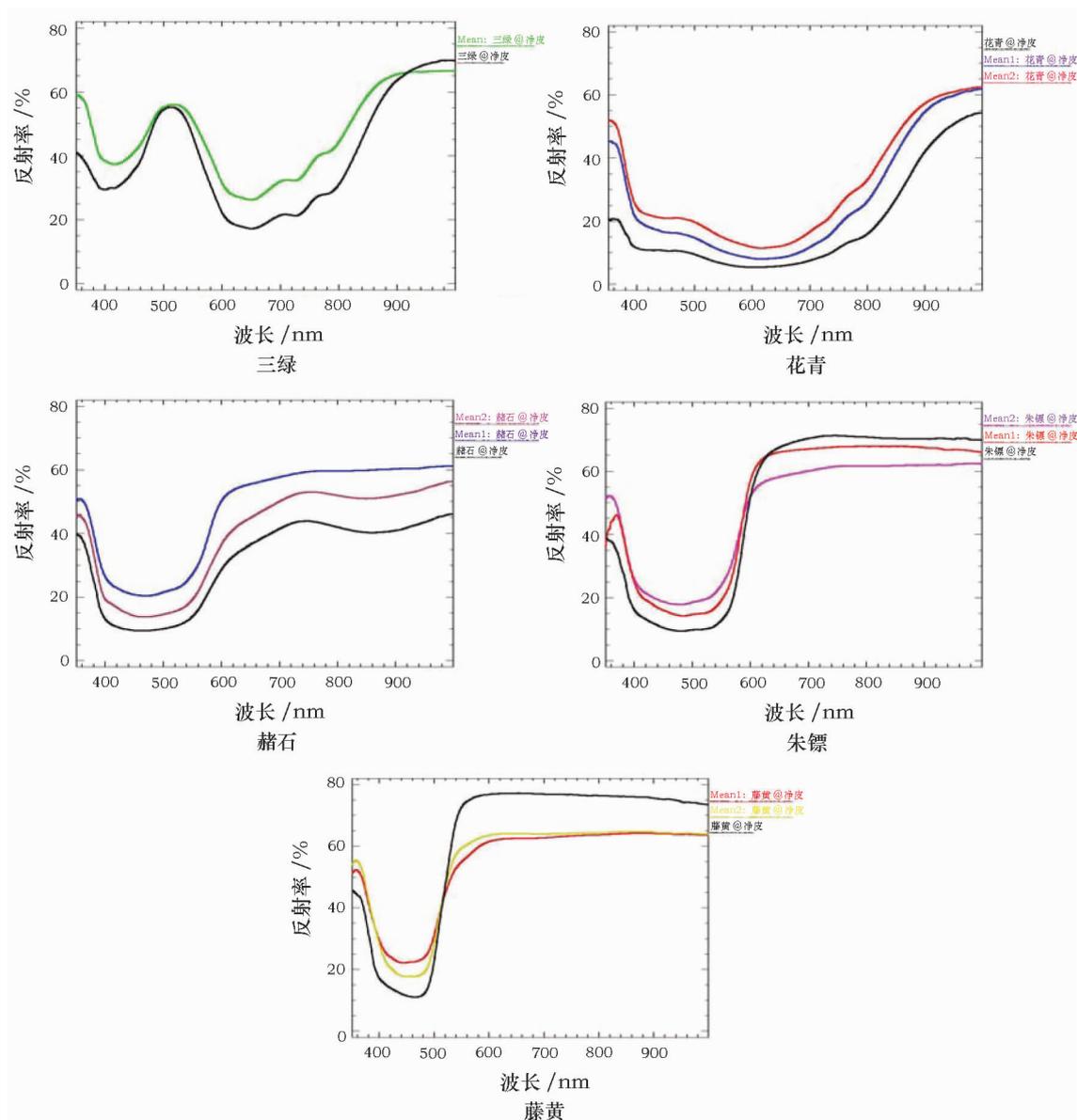


图9 两次填图的平均光谱曲线与光谱库曲线的对比

Fig. 9 Comparison between standard spectrum and the two mean spectra for each pigment

### 3 结论

本研究介绍了一种基于高光谱数据的颜料分类识别方法,即设置阈值进行光谱角填图——提取填图区域的光谱曲线并与相应的光谱库曲线进行对比——评估光谱角填图阈值的大小——重新设置阈值进行光谱角填图。该方法能有效地提高对待测颜料进行分类和识别的准确度。通过该方法可以逐步掌握颜料的光谱角填图特性,为未知古书画文物颜料的分析奠定基础。

若将高光谱成像技术应用于古书画颜料的分析上,还存在许多问题亟待解决。如完善的颜料标准光谱库的建立,各颜料的填图规律,基质(纸张、绢

等绘画载体)对颜料光谱曲线的影响规律,古书画颜料的老化对光谱曲线的影响等。

高光谱成像技术在中国画上的应用尚浅,随着细致的、系统的研究的深入开展,高光谱将会在文物的分析检测上表现出广阔的应用前景。

#### 参考文献:

- [1] Haida L. Advances in multispectral and hyperspectral imaging for archaeology and art conservation[J]. Appl Phys A, 2012; 106(2): 309-323.
- [2] Christian F, Ioanna K. Multispectral and hyperspectral imaging technologies in conservation: current research and potential applications[J]. Rev Conserv, 2006; 3-16.
- [3] 周霄, 高峰, 张爱武, 等. VIS/NIR 高光谱成像在中国云冈

- 石窟砂岩风化状况分布研究中的进展[J]. 光谱学与光谱学分析,2012,(3):790-794.
- ZHOU Xiao, GAO Feng, ZHANG Ai-wu, *et al.* Advances in hyperspectral imaging for studies in distribution of weathered sandstones in Yungang Grottoes[J]. Spectr Spectr Anal, 2012,(3):790-794.
- [4] 芦鑫. 基于高光谱数据的壁画信息提取与分析[D]. 北京建筑工程学院硕士论文. 2012.
- LU Xin. Information extraction and analysis of wall painting using the hyperspectral imging system[D]. Master's thesis of Beijing University of Civil Engineering and Architecture, 2012.
- [5] 谭克龙, 万余庆, 杨一德, 等. 高光谱遥感考古探索研究[J]. 红外与毫米波学报, 2005, 24(6):437-440.
- TAN Ke-long, WAN Yu-qing, YANG Yi-de, *et al.* A hyperspectral remote sensing study in archeology[J]. J Infr Millim Waves, 2005, 24(6):437-440.
- [6] 谭克龙, 杨林, 周日平, 等. 西安神禾塬地区高光谱遥感考古研究[J], 应用基础与工程科学学报, 2009, (5):675-682.
- TAN Ke-long, YANG Lin, ZHOU Ri-ping, *et al.* Hyperspectral remote sensing study for archeology in Shen He Yuan of Xi'an[J]. J Appl Basic Eng Sci, 2009, (5):675-682.
- [7] 田庆久. 江苏西溪贝丘遗址的高光谱遥感考古研究[J]. 遥感信息, 2007, (1):22-25.
- TIAN Qing-jiu. An archaeological study of Shell Mound in Xixi of Jiangsu province by hyperspectral remote sensing [J]. Remote Sensing Inf, 2007, (1):22-25.
- [8] 王琳琳. 古遗址的高光谱数据信息提取方法研究[D]. 西北大学硕士论文, 2012. 6.
- WANG Lin-lin. Study on information extraction from hyperspectral data of ancient sites[D]. Master's thesis of Northwest University, 2012. 6.
- [9] Attas M, Cloutis E, Clooins C, *et al.* Near-infrared spectroscopic imaging in art conservation: investigation of drawing constituents [J]. J Cult Herit, 2003, 4:127-136.
- [10] 童庆禧, 张兵, 郑兰芬. 高光谱遥感——原理、技术与应用[M]. 北京: 高等教育出版社, 2006:166-167.
- TONG Qing-xi, ZHANG Bing, ZHENG Lan-fen. The principal, technique and application of Hyperspectral remote sensing [M]. Beijing: Higher Education Press, 2006: 166-167.
- [11] 邓书斌. ENVI 遥感图像处理方法[M]. 北京: 科学出版社, 2010:353.
- DENG Shu-bin. Remote sensing image processing methods of ENVI [M]. Beijing: Science Press, 2010: 353.

## Preliminary study on the application of hyperspectral imaging in the classification of and identification Chinese traditional pigments classification——a case study of spectral angle mapper

GONG Meng-ting, FENG Ping-li

(Centre for Conservation and Restoration of Cultural Heritage, Sichuan Museum, Chengdu 710061, China)

**Abstract:** Hyperspectral imaging instrumentation was used to collect the spectral and spatial information on a modern Chinese painting. The spectral angle mapper (SAM) was selected to classify and identify the pigments used in the painting. The classification and identification results with actual pigments used are compared. It is found that in order to achieve more satisfactory results different threshold values must be assigned due to the different characteristics of the pigments. The threshold value could be ascertained by studying the mean spectrum of different classes in comparison with the standard pigments data base. Some technical details of SAM are discussed in order to provide data support for future studies on identification of pigments used in Chinese relic paintings.

**Key words:** Hyperspectral imaging; ENVI; Chinese traditional pigment; Spectral angle mapper

(责任编辑 谢燕)