

# 多光谱成像技术分析彩色艺术品的相关基础研究

王雪培<sup>1</sup> 赵虹霞<sup>1</sup> 李青会<sup>1</sup> 刘卫东<sup>2</sup> 苏伯民<sup>3</sup>

<sup>1</sup>中国科学院上海光学精密机械研究所科技考古中心, 上海 201800

<sup>2</sup>武汉东羽光电科技有限公司, 湖北 武汉 430073

<sup>3</sup>敦煌研究院保护研究所, 甘肃 敦煌 736200

**摘要** 多光谱成像技术集数字成像和光谱测量技术于一体, 是一种记录光学信息的新型无损分析技术。基于对国内外文化遗产领域多光谱成像技术研究现状的分析, 使用自行搭建的多光谱成像系统对敦煌壁画颜料模拟试板和现代国画在 300~1000 nm 范围内进行光谱图像采集, 检验多光谱成像系统的适用性。结果显示多光谱图像能对外观相近的不同颜料做出快速区别, 结合激光显微拉曼光谱技术, 可进一步识别样品中颜料的种类; 同时, 多光谱图像还能够揭示具有紫外激发可见荧光特性的物质分布、画稿中的底稿信息、水渍痕迹等信息。实验表明多光谱成像技术可以有效获取彩色艺术品的多样化信息, 在彩色艺术品研究领域具有良好的应用前景。

**关键词** 光谱学; 多光谱成像; 拉曼显微光谱; 颜料

中图分类号 O433

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201535.1030003

## Relevant Fundamental Research of Colored Artworks by Multispectral Imaging Technology

Wang Xuepei<sup>1</sup> Zhao Hongxia<sup>1</sup> Li Qinghui<sup>1</sup> Liu Weidong<sup>2</sup> Su Bomin<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Center of Sci-Tech Archaeology, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics,

Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China

<sup>2</sup>Wuhan East Feather Light Mechanical and Electrical Technology Co., Ltd, Wuhan, Hubei 430073, China

<sup>3</sup>Conservation Research Institute of Dunhuang Academy, Dunhuang, Gansu 736200, China

**Abstract** With digital imaging and spectral measurement, multispectral imaging technology is a new non-invasive technique to record optical information. Based on the analysis of the application of multispectral imaging in domestic and overseas cultural heritage field, simulated plate of Dunhuang mural pigments and modern Chinese paintings are analyzed using self-developed system at 300~1000 nm to prove its applicability. The results show that pigments with similar color can be identified quickly in multispectral images. Combined with laser Raman microspectroscopy, mineral phases in these pigments can be further determined. Meanwhile, the distribution of materials with ultraviolet induced visible fluorescence, the draft, the watermark in the painting can be well revealed. It is illustrated that various information of colored artworks can be obtained effectively by multispectral analysis, and the technique has good application foreground in the study of colored artworks.

**Key words** spectroscopy; multispectral imaging; Raman microspectroscopy; pigment

**OCIS codes** 300.6450; 110.4234; 100.2000

## 1 引 言

多光谱成像技术, 全称为多通道光谱成像技术, 是利用分光元件对目标样品进行多通道成像。每个通

收稿日期: 2015-05-04; 收到修改稿日期: 2015-06-09

基金项目: 国家 973 计划(2012CB720906, 2012CB720901)、国家自然科学基金(51402326)、上海市研发平台专项(13DZ2295800)

作者简介: 王雪培(1992—), 女, 硕士研究生, 主要从事多光谱成像技术在古代材料研究中的应用方面的研究。

E-mail: wangxp0929@126.com

导师简介: 李青会(1973—), 男, 博士, 研究员, 主要从事可移动文物的科技研究及无损检测分析技术的发展和應用等方面的研究。E-mail: qinghui@sina.com(通信联系人)

道获取的图像具有较高光谱分辨率,代表了目标样品在此通道上的光谱反射情况,所有通道获取的图像组合成 $X-Y-\lambda$ 数据立方,在直观显示目标样品的二维形态信息的同时,还记录了样品的反射光谱信息。

光谱成像技术出现于20世纪60年代,早期应用于遥感、地面军事等领域,随着半导体光电探测器的出现,光谱成像技术迅速发展,其应用范围扩展到药理学、环境科学、食品工程、农业等领域<sup>[1-7]</sup>。20世纪90年代,多光谱成像技术在欧洲开始用于文物的研究和保护,相继出现了众多配置各异的多光谱成像系统<sup>[8-11]</sup>,被用于油画、文稿、陶质彩绘器物等文物的物质分析与鉴定<sup>[12-15]</sup>、状态评估<sup>[16-17]</sup>、数字图像存档<sup>[18]</sup>等方面。国内,多光谱成像技术应用于文物保护和研究领域的起步较晚,现仍处于探索阶段,敦煌研究院利用商业彩色相机和宽带滤波片组成的多光谱摄影装置对莫高窟壁画进行物质分析和原貌恢复<sup>[19]</sup>,关于多光谱成像装置的研究<sup>[20]</sup>以及多光谱成像实际应用于文物分析从而获取考古和历史信息的研究报道还比较少,多数集中于光谱重建和虚拟修复等数字图像典藏方面<sup>[21-24]</sup>。

自行搭建的多光谱成像系统相比于已报道的多光谱成像装置具有光谱响应范围宽、光谱分辨率高、无需再次聚焦等优点,使用该系统对现代彩色艺术样品进行分析,检验该系统的适用性,并结合激光显微拉曼光谱技术,对样品中的多样化信息进行探索。

## 2 实验部分

### 2.1 仪器设备和样品

#### 2.1.1 多光谱成像系统

自行搭建的多光谱成像系统如图1所示。

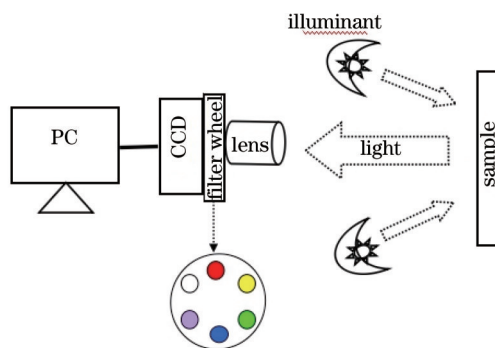


图1 多光谱成像系统示意图

Fig.1 Schematic of multispectral imaging system

多光谱成像系统主要由图像采集元件CCD、滤波轮、镜头、照明光源和控制软件组成,其中CCD(日本Bitran公司,BU-56DUV,响应波段为200~1000 nm)使用风扇冷却技术,温度保持在 $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,较一般CCD和商业相机具有较高灵敏度且在蓝光至近紫外短波段具有较好的响应度。基于成本和稳定性考虑,分光元件选择滤波轮装置,受设备限制滤波轮内仅有6个滤波片安装孔,权衡成像光谱范围和图像光谱分辨率,实验中选择中心透过波长分别为300、410、500、610、700、910 nm,半峰全宽均在10 nm左右的6枚窄带滤光片(美国Andover公司),编号为1~6,覆盖紫外(UV)、可见(VIS)、近红外(NIR)波段范围。镜头(德国JENOPTIK Optical Systems公司,60 mm UV-VIS-IR APO Macro)在315~1100 nm复消色差,拍摄过程中无需再次聚焦。光源为输出稳定且功率可调的LED阵列灯组,包括2个LED摄像灯(YN600L,中国深圳永诺电器有限公司)作为可见光源,色温为5500 K,2个输出中心波长为850 nm的LED近红外灯,2个输出中心波长为365 nm的LED紫外灯(日本Opter光电株式会社),为使样品表面光场均匀,光源对称放置在样品中心法线两侧,与法线成 $45^{\circ}$ 角照射样品表面。通过自主设计的软件控制图像采集并进行后期处理。

采用可移动式LabRAM XploRA型共焦激光显微拉曼光谱仪(法国Horiba)<sup>[25]</sup>完成拉曼光谱的测量。RGB彩色图像均由尼康D300在自然光下拍摄。

#### 2.1.2 现代彩色艺术品

现代彩色艺术品有敦煌壁画颜料模拟试板和现代国画,其中花卉国画由扬州市沈蕙兰女士提供,使用

马利牌中国画颜料绘制,其RGB彩色图像如图2所示,敦煌壁画颜料模拟试板由敦煌研究院提供,采用莫高窟壁画中的常见颜料制成,其RGB彩色图像如图3(a)所示。



图2 2幅花卉国画RGB彩色图像

Fig.2 RGB color images of two Chinese paintings of plants

## 2.2 数据定标

首先通过调节曝光时间使图像具有较高的信噪比,然后采用标准板(8°/Hemispherical Reflectance Calibration Certificate,美国 Labsphere 公司)对多光谱数据进行归一化处理。标准板对 300~1000 nm 的电磁波反射率达到 99%,通过定标,既修正了光场分布不均引起的误差,又得到样品对不同波段电磁波的反射率值,计算公式为

$$R_i = \frac{I_i}{I_w}, \quad (1)$$

式中  $R_i$  为样品在第  $i$  个通道上的反射率值,  $I_i$  为样品在第  $i$  个通道获取的光谱图像的灰度值,  $I_w$  为相应的标准板光场图像的灰度值。

## 3 结果与讨论

### 3.1 敦煌模拟颜料板可见和近红外多光谱图像

敦煌壁画颜料模拟试板上有些颜料块颜色相似[图3(a)],如4块黄色颜料(Y1~Y4)、3块绿色颜料(G1~G3)、2块蓝色颜料(B1~B2)、2块深色颜料(K1~K2)等。从多光谱图像图3(b)、(c)可知,颜色相似的颜料块在多光谱图像中能够显示出反射光谱的差异,将光谱图像中颜料块内所有像素点的反射率值求平均值,即为该颜料块的反射率值,表1列出了部分颜料的反射率值。

反射率值的差异代表物质的选择吸收光谱不同,在一定程度上说明了颜料所含成分的不同,但是在实

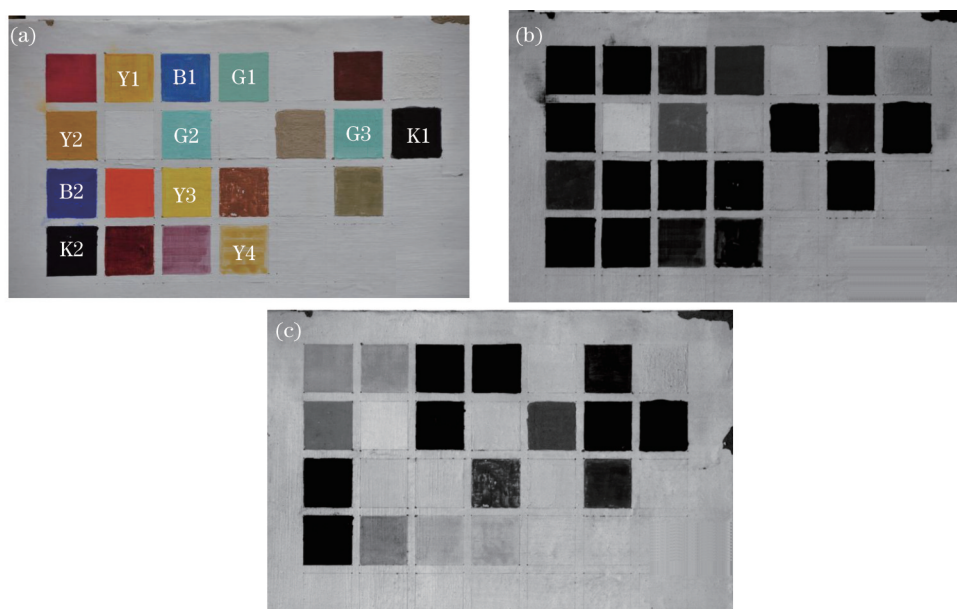


图3 敦煌壁画颜料模拟试板。(a) RGB彩色图像; (b) 410 nm 波段图像; (c) 700 nm 波段图像

Fig.3 Simulated plate of Dunhuang mural pigments. (a) RGB color image; (b) image at 410 nm; (c) image at 700 nm

际的文物研究中,颜料情况复杂多变,老化、粘合剂、污染物等因素的客观存在都会影响其反射谱线,由于目前还没有建立统一的多光谱数据库,所以单纯依靠多光谱数据还不能达到鉴定物质成分的目的。但多光谱图像在窄波段范围内直观显示了颜色相似颜料的反射光谱差异,达到了很好的区分效果。

表1 敦煌壁画颜料模拟试板部分颜料的反射率值

Table 1 Reflectivity of some pigments on simulated plate of Dunhuang mural pigments

Filter	2	3	4	5	6
Center wavelength /nm	410 (VIS)	500 (VIS)	610 (VIS)	700 (VIS)	910 (NIR)
K1	0	0	0	0	0
K2	0	0	0	0	0.51
B1	0.07	0.08	0	0	0.09
B2	0.10	0	0	0	0.27
G1	0.13	0.45	0.15	0	0.06
G2	0.28	0.62	0.20	0	0.13
G3	0.05	0.54	0.14	0	0.15
Y1	0	0	0.57	0.60	0.72
Y2	0	0	0.41	0.43	0.46
Y3	0	0.29	0.80	0.83	0.91
Y4	0.02	0.17	0.60	0.71	0.81

从表1可以看出,在RGB彩色图像中差异不明显的深色颜料K1、K2,以及蓝色颜料B1、B2对可见光均具有较强的吸收,而对910 nm近红外光的响应差异明显。3块绿色颜料(G1~G3)的反射率随波长增加的变化趋势接近,其中颜色较为清亮的G2在可见光通道上反射率值较大,在410 nm短波通道上三者差异相对较大。4块黄色颜料(Y1~Y4)的反射率均呈现出随波长增加而变大的趋势,其中610 nm通道的反射率相对于500 nm通道上的反射率增幅较大,500~610 nm电磁波正是黄绿色光,500 nm之后,Y2反射率的增长相对稳定平缓(低于0.5),在910 nm波段,Y3的反射率值甚至超过0.9,表明Y3对此波段的电磁波吸收最少,4块黄色颜料对长波段电磁波的响应差异更为明显。

### 3.2 激光显微拉曼光谱结果

利用激光显微拉曼光谱技术对敦煌壁画颜料模拟试板上的颜料进行拉曼光谱测试,分析结果如表2和图4所示,其中Y4的拉曼光谱没有获得理想的谱峰。

表2 敦煌壁画颜料模拟试板拉曼光谱结果

Table 2 Results of Raman spectra of simulated plate of Dunhuang mural pigments

Pigments	Main Raman peaks /cm <sup>-1</sup>	Chemical formula
K1	1584, 1353 <sup>[26-27]</sup>	C (ink)
K2	1567, 1307, 595, 541, 250, 131 <sup>[28]</sup>	C <sub>16</sub> H <sub>10</sub> N <sub>2</sub> O <sub>2</sub> (indigo)
B1	1092, 828, 764, 394, 243 <sup>[26]</sup>	2CuCO <sub>3</sub> ·Cu(OH) <sub>2</sub> (azurite)
B2	1094, 543, 252 <sup>[26]</sup>	Na <sub>5</sub> Al <sub>3</sub> Si <sub>3</sub> O <sub>12</sub> S (ultramarine)
G1	1095, 633, 430, 270, 175 <sup>[26-27]</sup>	CuCO <sub>3</sub> (OH) <sub>2</sub> (malachite)
G2	3571, 3384, 969, 601, 479, 380 <sup>[29]</sup>	Cu <sub>4</sub> SO <sub>4</sub> (OH) <sub>6</sub> (brochantite)
G3	970, 910, 510, 119 <sup>[26]</sup>	Cu <sub>2</sub> Cl(OH) <sub>3</sub> (atacamite)
Y1	434, 361, 342, 228, 195, 187, 140 <sup>[30]</sup>	As <sub>4</sub> S <sub>4</sub> (realgar)
Y2	540, 480, 388, 292	FeO(OH)·nH <sub>2</sub> O (goethite)
Y3	354, 308, 290, 202, 154 <sup>[30]</sup>	As <sub>2</sub> S <sub>3</sub> (orpiment)
Y4	--	--

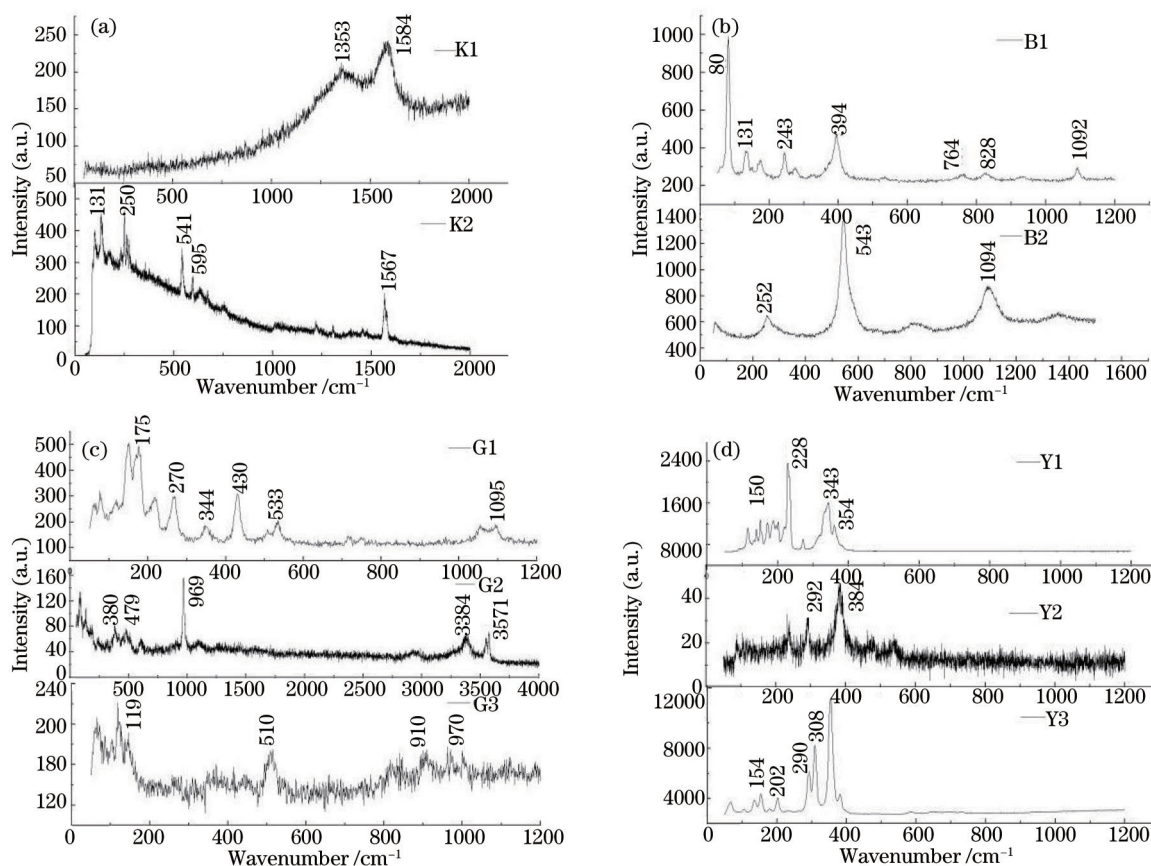


图4 敦煌壁画颜料模拟试板部分颜料的拉曼光谱图。(a) K1和K2; (b) B1和B2; (c) G1~G3; (d) Y1~Y3

Fig.4 Raman spectra of some pigments on simulated plate of Dunhuang mural pigments. (a) K1 and K2; (b) B1 and B2; (c) G1~G3; (d) Y1~Y3

上述拉曼光谱结果表明前文所获得的多光谱图像有效区分了敦煌壁画颜料模拟试板中颜色相近的不同物质,为之后的精确检测提供了科学依据。将可实现大面积数据采集的多光谱成像技术和高精度的微区激光拉曼光谱分析技术相结合,能够显著提高文物的检测效率。另外,多光谱图像中能显示一些人眼不可见的信息,如样品上紫外激发可见荧光物质的分布、底稿信息、水渍痕迹等。

### 3.3 敦煌壁画颜料模拟试板紫外荧光多光谱图像

敦煌壁画颜料模拟试板的紫外激发可见荧光的多光谱图像如图5所示,紫外光源波长为365 nm,白色虚线框标记区域为全反射标准板,用于评估环境光强度,在多光谱图像中灰度值大于标准板灰度值的区域,即为在紫外光激发下产生了可见光荧光的区域,对比各个通道获取的光谱图像可以获知荧光的峰值范围。从图5中可以看出颜料试板上产生荧光效应的物质的分布,多数颜料块的边缘部分都出现了微弱的荧光,推测试板上颜料中含有相同的混合介质,该介质具有紫外荧光性质,不同颜料的混合会影响介质荧光效应的强

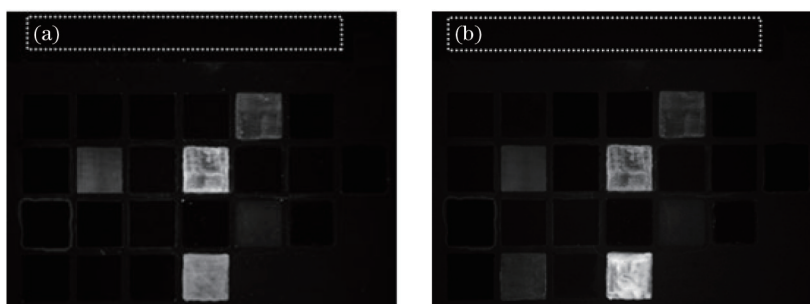


图5 敦煌壁画颜料模拟试板紫外激发可见荧光多光谱图像(白色虚线标记出标准板)。(a) 500 nm波段; (b) 610 nm波段

Fig.5 Multispectral images of ultraviolet induced visible fluorescence of simulated plate of Dunhuang mural pigments (non-luminescent 99% reflectance standard is marked with white dashed line). (a) 500 nm; (b) 610 nm

弱, 荧光产生的具体原因需要对颜料和混合介质开展进一步研究。

### 3.4 花卉国画的多光谱分析

对两幅花卉国画分别进行多光谱图像数据的采集, 图 6(a)、图 7(a) 和图 8(a) 分别为画中不同部分的 RGB 彩色图像。除对所用颜料进行分析以外, 在两幅国画的多光谱图像中, 还发现了画稿中的一些隐藏信息。例如, 牡丹花的 910 nm 光谱图像[图 6(b)]中, 花朵部位被颜料覆盖住的轮廓勾勒线条非常明显, 这是画者在作画初期描绘的底稿, 经后期颜料描绘之后单凭肉眼很难分辨。而在 410 nm 图像中画稿上水渍痕迹突显, 黑色叶子右边两处肉眼几乎无法分辨的不规则圆形痕迹(白色虚线区域内)突显出来[图 7(b)], 这是滴在画稿上的清水干涸后所留下的痕迹; 图 8(b) 中黑色叶子边缘外围扩散状痕迹(白色虚线区域内)为水调颜料的水渍痕迹。这些隐藏信息有助于研究人员了解该画作的历史、保存状况、作者的绘画过程和绘画技法等。



图 6 国画中牡丹花处近红外图像中的底稿信息。(a) RGB 图像; (b) 910 nm 波段图像; (c) 处理后的图 6(b) 局部放大

Fig.6 Draft of peony in NIR image of the Chinese painting. (a) RGB color image; (b) image at 910 nm;

(c) partially enlarged view of Fig. 6(b) after processing

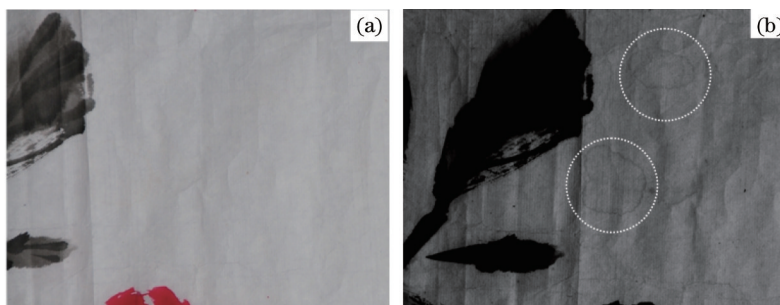


图 7 国画中的水滴痕迹(白色虚线内)。(a) RGB 彩色图像; (b) 410 nm 波段图像

Fig.7 Trace of water drop in the Chinese painting (area within the white dashed line). (a) RGB color image; (b) image at 410 nm

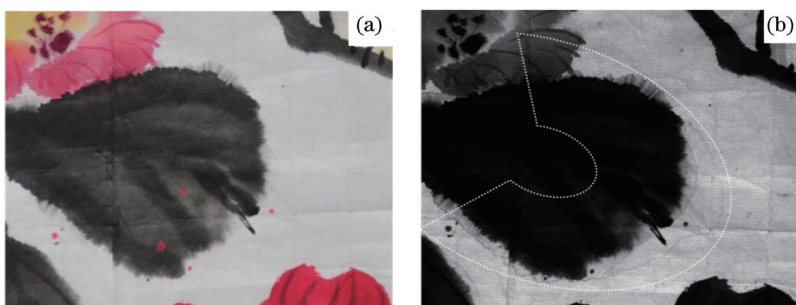


图 8 国画中叶子边缘的水渍痕迹。(a) RGB 彩色图像; (b) 410 nm 波段图像

Fig.8 Trace of water diffusion around the edge of the leaf in the Chinese painting (area within the white dashed line).

(a) RGB color image; (b) image at 410 nm

## 4 结 论

多光谱图像可以直观反映物体窄波段的反射光谱特性。人眼和普通的彩色相机由于自身局限, 容易产生同色异谱现象, 而高光谱分辨率的光谱图像以灰度差异直观展现出不同物质的反射光谱差异; 紫外激发可见荧光多光谱图像不仅显示了产生荧光的物质的分布, 还展示了产生荧光的强度和峰值范围; 短波长电磁波具有较高能量, 易被样品表面吸收, 410 nm 光谱图像突显了画稿表面的水渍痕迹; 而波长较长的近红外

电磁波具有较强的穿透力,可到达样品深处,910 nm 光谱图像揭示了颜料层下的底稿痕迹。同时,与激光显微拉曼光谱技术结合,可以快速获取彩色艺术品的物相组成。

通过对现代彩色艺术品的研究,探索了该多光谱成像系统在壁画和国画两类文物研究领域的适用性,也为今后多光谱成像检测过程中减少对文物的可能损伤提供借鉴。作为一种无损、高效的信息获取方法,多光谱成像技术在文物研究和保护领域将具有广阔的应用前景。

## 参 考 文 献

- 1 Fishecher C, Kakoulli I. Multispectral and hyperspectral imaging technologies in conservation: Current research and potential applications [J]. *Reviews in Conservation*, 2006, 51(suppl2): 3–16.
- 2 Xue Qingsheng, Cao Diansheng, Yu Xiangyang. Optical design of neotype Schwarzschild spectral imaging system with a large relative aperture[J]. *Chinese J Lasers*, 2014, 41(1): 0116001.  
薛庆生, 曹佃生, 于向阳. 新型大相对孔径 Schwarzschild 光谱成像系统设计[J]. *中国激光*, 2014, 41(1): 0116001.
- 3 Xue Qingsheng. Optical system design of large relative-aperture and wide field of view spaceborne imaging spectrometer[J]. *Chinese J Lasers*, 2014, 41(3): 0316003.  
薛庆生. 星载大相对孔径宽视场成像光谱仪光学系统设计[J]. *中国激光*, 2014, 41(3): 0316003.
- 4 Wang Jincheng, Kuang Cuifang, Wang Yifan, *et al.*. Multispectral fluorescence microscopic imaging based on compressive sensing[J]. *Chinese J Lasers*, 2013, 40(12): 1204003.  
王金成, 匡翠芳, 王轶凡, 等. 基于压缩感知的荧光显微多光谱成像[J]. *中国激光*, 2013, 40(12): 1204003.
- 5 Cui Daijun, Pang Qichang, Ma Ji, *et al.*. Rapid and nondestructive detection of quality of *Panax quinquefolium* effected by humidity[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2011, 48(9): 093001.  
崔代军, 庞其昌, 马 骥, 等. 湿度对西洋参品质影响的快速无损检测[J]. *激光与光电子学进展*, 2011, 48(9): 093001.
- 6 Cao Pengfei, Li Hongning, Luo Yanlin, *et al.*. Selection of feature bands for *Phaseolus vulgaris* leaves based on multi-spectral imaging [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2014, 51(1): 011101.  
曹鹏飞, 李宏宁, 罗艳林, 等. 基于多光谱成像选取四季豆叶片的特征波段[J]. *激光与光电子学进展*, 2014, 51(1): 011101.
- 7 Zhao Jiewen, Hui Zhe, Huang Lin, *et al.*. Quantitative detection of TVB-N content in chicken meat with hyperspectral imaging technology [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2013, 50(7): 073003.  
赵杰文, 惠 喆, 黄 林, 等. 高光谱成像技术检测鸡肉中挥发性盐基氮含量[J]. *激光与光电子学进展*, 2013, 50(7): 073003.
- 8 Martinez K, Cupitt J, Saunders D, *et al.*. Ten years of art imaging research[J]. *Proceedings of the IEEE*, 2002, 90(1): 28–41.
- 9 Chane C S, Mansouri A, Marzani F S, *et al.*. Integration of 3D and multispectral data for cultural heritage applications: Survey and perspectives[J]. *Image and Vision Computing*, 2013, 31(1): 91–102.
- 10 Liang H, Keita K, Vajzovic T. PRISMS: A portable multispectral imaging system for remote *in situ* examination of wall paintings[C]. *SPIE*, 2007, 6618: 661815.
- 11 Carcagni P, Patria A D, Fontana R, *et al.*. Multispectral imaging of paintings by optical scanning [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2007, 45(3): 360–367.
- 12 Elias M, Cotte P. Multispectral camera and radiative transfer equation used to depict Leonardo's sfumato in Mona Lisa[J]. *Applied Optics*, 2008, 47(12): 2146–2154.
- 13 Cornelis B, Doms A, Leen F, *et al.*. Multispectral imaging for digital painting analysis: A Gauguin case study[C]. *SPIE*, 2010, 7798: 779801.
- 14 Melis M, Miccoli M, Quarta D. Multispectral hypercolorimetry and automatic guided pigment identification: Some masterpieces case studies [C]. *SPIE*, 2013, 8790: 87900W.
- 15 Baronti S, Casini A, Lotti F, *et al.*. Multispectral imaging system for the mapping of pigments in works of art by use of principal-component analysis[J]. *Applied Optics*, 1998, 37(8): 1299–1309.
- 16 Papadakis V, Loukaiti A, Pouli P. A spectral imaging methodology for determining on-line the optimum cleaning level of stonework[J]. *Journal of Cultural Heritage*, 2010, 11(3): 325–328.
- 17 Kautek W, Pentzien S, Mueller-Hess D, *et al.*. Probing the limits of paper and parchment laser cleaning by multispectral imaging[C]. *SPIE*, 2001, 4402: 130–138.
- 18 Ribés A, Schmitt F, Pillay R, *et al.*. Calibration and spectral reconstruction for CRISATEL: An art painting multispectral acquisition system [J]. *Journal of Imaging Science and Technology*, 2005, 49(6): 563–573.

- 19 Chai Bolong, Wang Xiaowei, Tang Ailing, *et al.*. Preliminary application of multispectral imaging in the research of status and painting skill of murals in Mogao grottoes[J]. *Dunhuang Research*, 2008, (6): 54-57.  
柴勃隆, 王小伟, 汤爱玲, 等. 多光谱摄影在莫高窟壁画现状调查及绘画技法研究中的初步应用[J]. *敦煌研究*, 2008, (6): 54-57.
- 20 Du Lili, Yi Weining, Zhang Dongying, *et al.*. Multispectral image acquisition system based on liquid crystal tunable filter[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, 29(1): 187-191.  
杜丽丽, 易维宁, 张冬英, 等. 基于液晶可调谐滤光片的多光谱图像采集系统[J]. *光学学报*, 2009, 29(1): 187-191.
- 21 Li Suixian, Liao Ningfang, Sun Yunan, *et al.*. Multispectral imaging on digital museum archive of works of art[J]. *Computer Applications and Software*, 2008, 24(12): 10-11.  
李遂贤, 廖宁放, 孙雨南, 等. 传世艺术画作的多光谱图像数字典藏技术[J]. *计算机应用与软件*, 2008, 24(12): 10-11.
- 22 Yan Lixia. Researches on Virtual Recovery of Chinese Paintings Based on Multispectral Technology[D]. Tianjin: Tianjin University, 2012: 6-21.  
闫丽霞. 基于多光谱技术的中国古画虚拟修复研究[D]. 天津: 天津大学, 2012: 6-21.
- 23 Zhang Zhechao. Reconstruction of Spectral Reflectance in Imaging Systems[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2010: 24-45.  
张哲超. 成像系统中的光谱反射率重建[D]. 杭州: 浙江大学, 2010: 24-45.
- 24 Li Hongning, Feng Jie, Yang Weiping, *et al.*. Spectral-based rendering method and its application in multispectral color reproduction [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2010, 47(12): 123301.  
李宏宁, 冯 洁, 杨卫平, 等. 基于光谱的渲染技术及其在多光谱颜色再现中的应用[J]. *激光与光电子学进展*, 2010, 47(12): 123301.
- 25 Zhao H X, Li Q H, Liu S, *et al.*. Characterization of microcrystals in some ancient glass beads from china by means of confocal Raman microspectroscopy[J]. *Journal of Raman Spectroscopy*, 2013, 44(4): 643-649.
- 26 Liu Zhaojun, Wang Jiying, Han Ligang, *et al.*. Raman spectra of some mineral pigments used in ancient Chinese artworks(II)[J]. *The Journal of Light Scattering*, 2013, 25(2): 170-175.  
刘照军, 王继英, 韩礼刚, 等. 中国古代艺术品常用矿物颜料的拉曼光谱(二)[J]. *光散射学报*, 2013, 25(2): 170-175.
- 27 Liu Zhaojun, Han Yunxia, Yang Rui, *et al.*. Micro-Raman analysis of the pigments in the mural paintings from a Ming dynasty tomb[J]. *Chinese J Lasers*, 2013, 40(6): 0615003.  
刘照军, 韩运侠, 杨 蕊, 等. 明代古墓壁画颜料的显微拉曼光谱分析[J]. *中国激光*, 2013, 40(6): 0615003.
- 28 He Qiuju. Analysis of blue plant dyes on a group of Chinese ancient silk samples[J]. *Science of Conservation and Archaeology*, 2012, 24(3): 59-66.  
何秋菊. 一组古代丝织品上蓝色植物染料的分析鉴定[J]. *文物保护与考古科学*, 2012, 24(3): 59-66.
- 29 Hayez V, Guillaume J, Hubin A, *et al.*. Micro-Raman spectroscopy for the study of corrosion products on copper alloys: Setting up of a reference database and studying works of art[J]. *Journal of Raman Spectroscopy*, 2004, 35(8-9): 732-738.
- 30 Wang Jiying, Wei Ling, Liu Zhaojun. Raman spectra of some mineral pigments used in ancient Chinese artworks[J]. *The Journal of Light Scattering*, 2012, 24(1): 86-91.  
王继英, 魏 凌, 刘照军. 中国古代艺术品常用矿物颜料的拉曼光谱[J]. *光散射学报*, 2012, 24(1): 86-91.

栏目编辑: 吴秀娟