

历代景德镇青花瓷光谱特征分析研究

赵恒谦¹, 强加成^{2,3}, 赵红蕊^{2,3}, 赵学胜^{1*}

1. 中国矿业大学(北京)地球科学与测绘工程学院, 北京 100083
2. 清华大学土木系地球空间信息研究所, 北京 100084
3. 清华大学3S中心, 北京 100084

摘要 景德镇青花瓷是我国最具代表性的陶瓷品种之一, 具有很高的学术价值和社会经济价值。不同年代的青花瓷仅靠外观难以区分, 如何快速准确区分不同年代景德镇青花瓷是文物保护界面临的一个难题。高光谱技术是一种完全无损的分析方法, 并已经在壁画、字画等文物的颜料分析中得到成功应用, 目前还没有关于瓷器文物的高光谱研究成果出现。选取28个历代景德镇青花瓷碎片样本, 使用地面光谱仪测量样本胎釉和青花料部位反射率光谱, 分析其典型光谱特征, 并对历代青花料光谱特征参量变化趋势进行了分析。研究表明, 青花料部位在可见近红外波段光谱特征较为显著, 历代青花料光谱特征参量有较明显的差异, 并有一定的变化规律。高光谱技术对于景德镇青花瓷的断代研究有很大潜力。

关键词 景德镇青花瓷; 高光谱技术; 光谱特征分析

中图分类号: TP722 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3964/j.issn.1000-0593(2019)03-0942-06

引言

青花瓷是中国陶瓷发展史上影响最大、成就最高的陶瓷品种之一^[1]。现有的考古资料表明, 我国青花瓷的起源最早可追溯到唐代, 至元代青花瓷已开始景德镇大量生产^[2]。随着景德镇窑的崛起, 青花瓷的影响已波及到全国各地, 明代开始已成为瓷器生产的主流品种, 并大量外销至亚、非、欧美各洲^[3]。由于青花瓷特殊的地位和影响, 青花瓷的研究, 尤其是历代景德镇青花瓷的断代研究, 同时具有较高的学术价值和社会经济价值, 一直是人们关注的焦点^[4]。

不同年代的青花瓷仅靠外观很难区分, 尤其瓷器碎片难以提供完整器型和整体绘画风格等信息, 经验丰富的专业人员也有较大难度。如何科学而又准确地地区分不同年代的青花瓷并了解它们的制造工艺, 是古陶瓷研究者们极感兴趣的问题^[5]。国内学者自20世纪50年代开始即开始对青花瓷的胎、釉及青花料开展研究, 系统地分析和讨论了景德镇历代青花瓷的特色以及原料来源等^[6]。由于制瓷配方、原料的来源和精制等方面的变化等原因, 不同时期的青花瓷在胎、釉以及青花料形成了各阶段不同的元素组成模式。在此基础

上, 一些研究人员通过对青花瓷残片样本的瓷胎或瓷釉化学组成进行多元统计分析, 对青花瓷的产地及大致历史时期进行了较成功的判别研究^[7-9]。但是, 传统化学元素分析方法对测试样品有破坏作用, 而青花瓷研究样本较为稀缺珍贵, 这一矛盾严重阻碍了研究工作的开展和深入。同时, 以往的断代研究主要依据瓷胎或釉当中元素组成的变化, 关于青花料的研究相对较少。

近年来, 以高光谱技术为代表的无损测试方法逐渐在文物保护领域推广, 给青花瓷研究提供了新的契机。传统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。高光谱技术具有测量速度快和对文物无损伤的特点, 能同时提供待测物的影像和光谱信息, 并根据不同物质的光谱特征对目标物进行识别和分类^[10-11]。因此, 高光谱技术在文物分析领域具有广阔的前景, 并已经被应用于壁画、古字画的信息提取和虚拟修复领域^[12-14]。目前, 还未见采用高光谱技术分析瓷器文物的研究成果出现。本工作利用地面光谱仪获取不同年代景德镇青花瓷胎釉及青花料的反射率光谱, 提取青花瓷典型光谱特征和光谱特征参量, 分析历代青花瓷光谱特征变化规律及其原因, 探讨高光谱技术在青花瓷断代研究中的应用潜力。

收稿日期: 2017-11-26, 修订日期: 2018-04-27

基金项目: 国家自然科学基金项目(41701488)资助

作者简介: 赵恒谦, 1986年生, 中国矿业大学(北京)地球科学与测绘工程学院副教授 e-mail: zhaohq@cumtb.edu.cn

* 通讯联系人 e-mail: zxs@cumtb.edu.cn

表 1 青花瓷碎片样本信息汇总

Table 1 Information of blue and white porcelain samples

No.	Sample ID	Cobalt blue material	Dynasty
1	A1	Suliao	Yuan
2	A2	Suliao	Yuan
3	A3	Suliao	Yuan
4	A4	Suliao	Yuan
5	B1	Suliao	Ming(Hongwu)
6	C1	Suliao	Ming(Yongle to Xuande)
7	C2	Suliao	Ming(Yongle to Xuande)
8	C3	Suliao	Ming(Yongle to Xuande)
9	D1	Pingdengqing	Ming(Chenghua to Zhengde)
10	D2	Pingdengqing	Ming(Chenghua to Zhengde)
11	D3	Pingdengqing	Ming(Chenghua to Zhengde)
12	D4	Pingdengqing	Ming(Chenghua to Zhengde)
13	D5	Pingdengqing	Ming(Chenghua to Zhengde)
14	D6	Pingdengqing	Ming(Chenghua to Zhengde)
15	D7	Pingdengqing	Ming(Chenghua to Zhengde)
16	D8	Pingdengqing	Ming(Chenghua to Zhengde)
17	E1	Huiqing	Ming(Jiajing to Wanli)
18	F1	Shiziqing	Ming(Jiajing to Wanli)
19	F2	Shiziqing	Ming(Jiajing to Wanli)
20	F3	Shiziqing	Ming(Jiajing to Wanli)
21	G1	Zheliao	Since the late Ming
22	G2	Zheliao	Since the late Ming
23	G3	Zheliao	Since the late Ming
24	G4	Zheliao	Since the late Ming
25	G5	Zheliao	Since the late Ming
26	H1	Zhumingliao	Qing(Kangxi)
27	H2	Zhumingliao	Qing(Kangxi)
28	I1	Yanglan	Qing(Guangxu)

1 实验部分

1.1 材料

本研究共选取了 28 个景德镇青花瓷碎片样本，其青花

料类别涵盖了苏料、平等青等 7 种，样品出自元代、明代、清代、民国等不同历史时期，并经过专家分析鉴定，具有很强的代表性。青花料以氧化钴为主要成分，同时包含氧化锰、氧化铁等，经高温烧制呈蓝色，而这也是青花瓷得名的由来^[15]。不同类型青花料成分有一定差别，再加上不同年代烧制工艺的差别，会使得青花瓷色彩有细微差异，但目视辨别有较大难度。综合青花料和年代的不同，可以将其大致分为 9 个小类(表 1)。

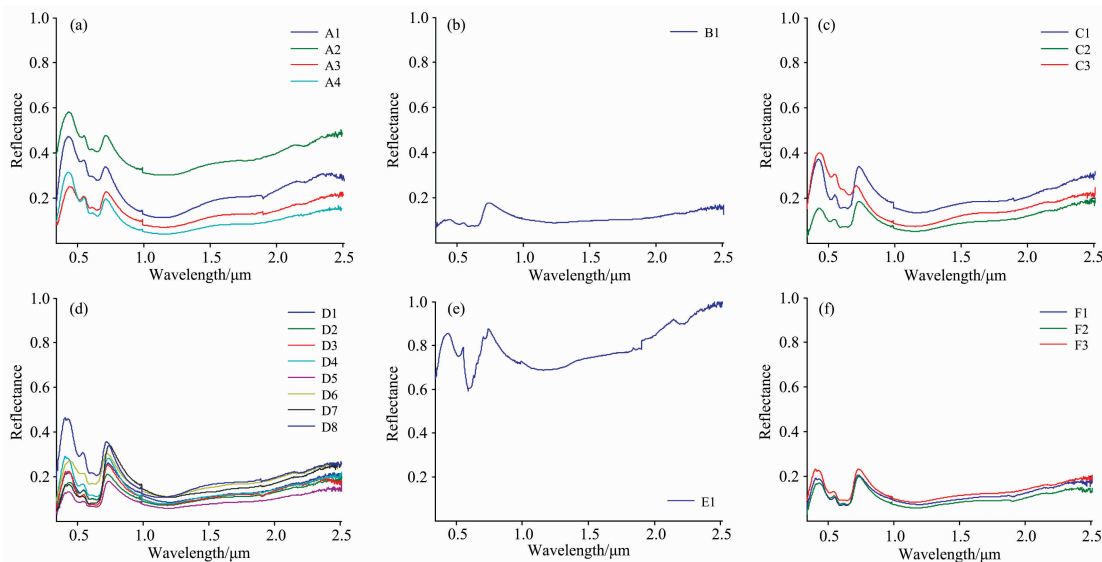
1.2 数据获取与预处理

在每个青花瓷样本上分别选取典型蓝色青花料部位以及纯净胎釉部位，利用美国 SVC 1024i 便携式地物光谱仪测定样本青花料和胎釉光谱，波长范围是 340~2 510 nm。观测时使用仪器自带光源，由专人手持光纤，保持探头垂直向下并距离瓷器样本 3 cm 左右观测，且确保观测范围内无镜面反射及阴影影响。对原始数据进行重叠波段去除等预处理，得到各个样本的青花料反射率光谱(图 1)和胎釉反射率光谱(图 2)。可以看到，青花料在可见光近红外波段有三个典型的反射峰，并在其两两之间形成了吸收谷，而青花瓷胎釉部位光谱仅有一个典型反射峰。在 2.2 节，将基于青花瓷胎釉和青花料光谱分析其典型光谱特征并提取特征参量，分析历代景德镇青花瓷光谱特征变化规律。

2 结果与讨论

2.1 青花瓷光谱特征分析

从图 2 可以看到，不同类别胎釉光谱波形比较相近，仅在青色(510 nm 左右)有一典型反射峰。相比较而言，青花料光谱特征更为丰富，比如在蓝色(430 nm 左右)、绿色(550 nm 左右)、近红外(710 nm 左右)波段都有较为明显的反射峰，并在反射峰之间形成了两个吸收谷。此外，不同类别青花料光谱差异也更为显著。因此，在对青花瓷进行高光谱分析时，青花料部位能够提供更丰富的信息。以下将主要针对青花料部位光谱展开分析。



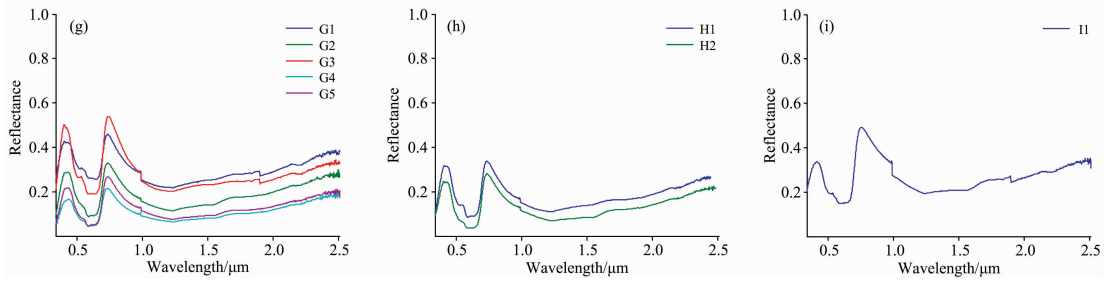


图 1 不同类别青花瓷样本反射率光谱(青花料)

Fig. 1 Reflectance spectra of different blue and white porcelain categories (cobalt blue material)

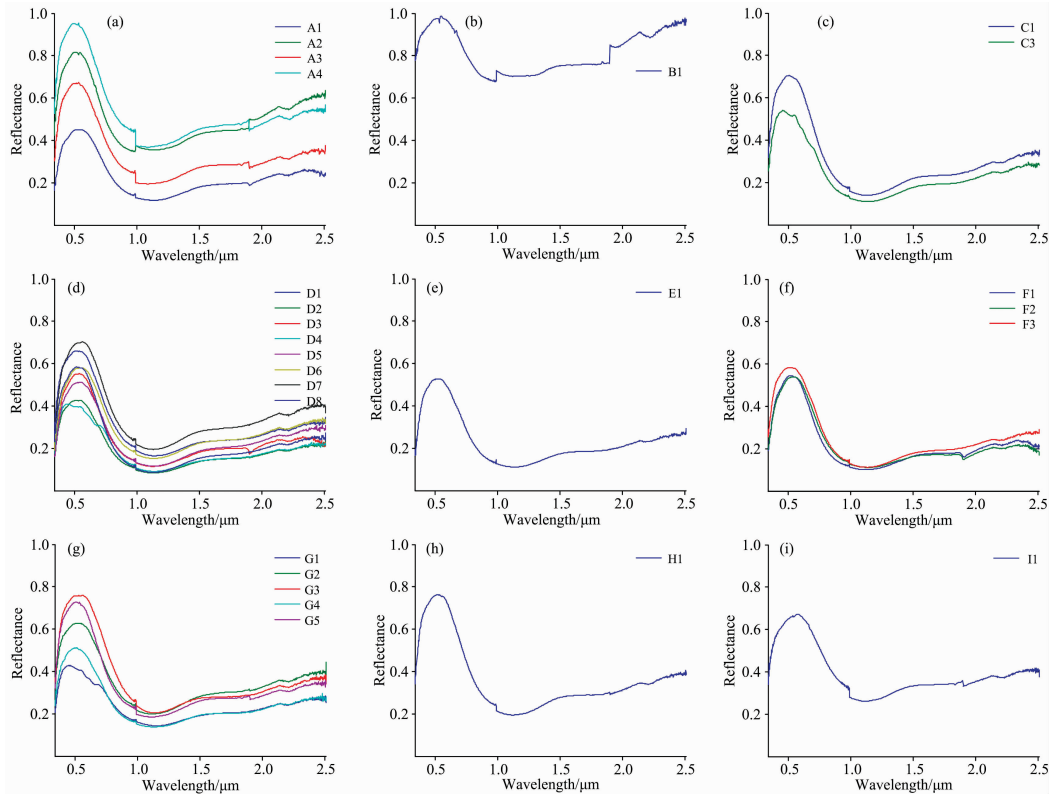


图 2 不同类别青花瓷样本反射率光谱图(胎釉)

Fig. 2 Reflectance spectra of different blue and white porcelain categories (body and glaze)

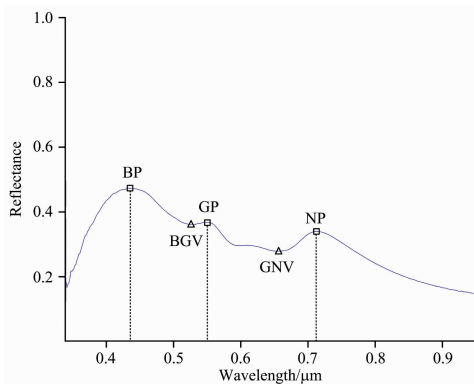


图 3 青花料典型光谱特征示意图(样品 A1)

Fig. 3 Diagnostic spectral features of cobalt blue material (sample ID: A1)

本研究将青花料光谱反射峰分别命名为蓝峰(blue peak, BP)、绿峰(green peak, GP)、近红外峰(near-infrared peak, NP),将吸收谷命名为BG吸收谷(BG valley, BGV)和GN吸收谷(GN valley, GNV),并定义如下特征参量(图 3):

(1)蓝峰中心波长(center wavelength of BP, W_{BP})和中心反射率(center reflectance of BP, R_{BP}): 400~500 nm 波段反射率最大值对应的波长是中心波长,该最大值为中心反射率;

(2)绿峰中心波长(center wavelength of WP, W_{GP})和中心反射率(center reflectance of GP, R_{GP}): 530~580 nm 波段反射率最大值对应的波长是中心波长,该最大值为中心反射率;

(3)近红外峰中心波长(center wavelength of NP, W_{NP})和中心反射率(center reflectance of NP, R_{NP}): 650~

750 nm 波段反射率最大值对应的波长是中心波长, 该最大值为中心反射率;

(4)BG 吸收谷中心波长(center wavelength of BGV, W_{BGV})和中心反射率(center reflectance of BGV, R_{BGV}): 在蓝峰和绿峰之间反射率最小值对应的波长是中心波长, 该最小值为中心反射率;

(5)GN 吸收谷中心波长(center wavelength of GNV, W_{GNV})和中心反射率(center reflectance of GNV, R_{GNV}): 在绿峰和近红外峰之间反射率最小值对应的波长是中心波

长, 该最小值为中心反射率。

2.2 历代青花料光谱特征参量变化趋势分析

提取不同类别青花料光谱的特征参量(表 2)。可以看到, 中心波长光谱特征取值较为接近, 而中心反射率光谱特征取值变化更大。这是由于青花瓷表面釉色光亮程度不同, 且有一定弧度, 反射率值容易受镜面反射等因素的干扰而产生较大变化, 而中心波长光谱特征则不容易受该因素影响。综合来看, 不同类别青花料光谱特征参量有较明显的差异, 而这也为青花瓷高光谱分类识别打下了基础。

表 2 不同类型青花瓷光谱特征参量平均值

Table 2 Mean spectral feature parameters of different blue and white porcelain categories

Group Number	W_{BP}	R_{BP}	W_{GP}	R_{GP}	W_{NP}	R_{NP}	W_{BGV}	R_{BGV}	W_{GNV}	R_{GNV}
1	0.439 2	0.405 2	0.550 5	0.313 7	0.716 5	0.309 9	0.528 5	0.300 7	0.654 8	0.236 3
2	0.449 3	0.102 7	0.551 2	0.087 8	0.743 5	0.176 9	0.511 9	0.119 2	0.658 2	0.456 2
3	0.433 9	0.308 9	0.548 9	0.208 4	0.725 9	0.260 0	0.521 8	0.193 6	0.634 6	0.145 3
4	0.431 8	0.241 7	0.546 5	0.161 0	0.734 6	0.273 4	0.519 9	0.151 9	0.635 4	0.110 7
5	0.439 2	0.855 7	0.554 0	0.790 2	0.746 1	0.876 0	0.517 6	0.749 3	0.590 0	0.592 3
6	0.416 5	0.197 7	0.547 9	0.116 2	0.733 0	0.212 3	0.518 1	0.106 9	0.630 1	0.077 4
7	0.422 7	0.320 5	0.532 4	0.176 8	0.736 9	0.361 7	0.526 8	0.174 3	0.613 7	0.124 4
8	0.408 9	0.282 0	0.539 3	0.105 7	0.736 9	0.309 0	0.532 3	0.104 6	0.593 4	0.060 2
9	0.420 4	0.337 3	0.535 8	0.196 7	0.750 0	0.490 0	0.533 0	0.191 6	0.595 5	0.147 6
All	0.428 7	0.304 9	0.544 5	0.203 1	0.732 8	0.314 7	0.523 3	0.195 0	0.628 4	0.158 5

为了更清楚地表现历代青花瓷光谱特征参量的变化规律, 将中心波长光谱特征变化用折线图的形式展现出来(图 4)。整体上看, 蓝峰、绿峰和 GN 吸收谷中心波长有向短波

方向移动趋势, 近红外峰中心波长有向长波方向移动趋势, BG 吸收谷中心波长变化规律不明显。

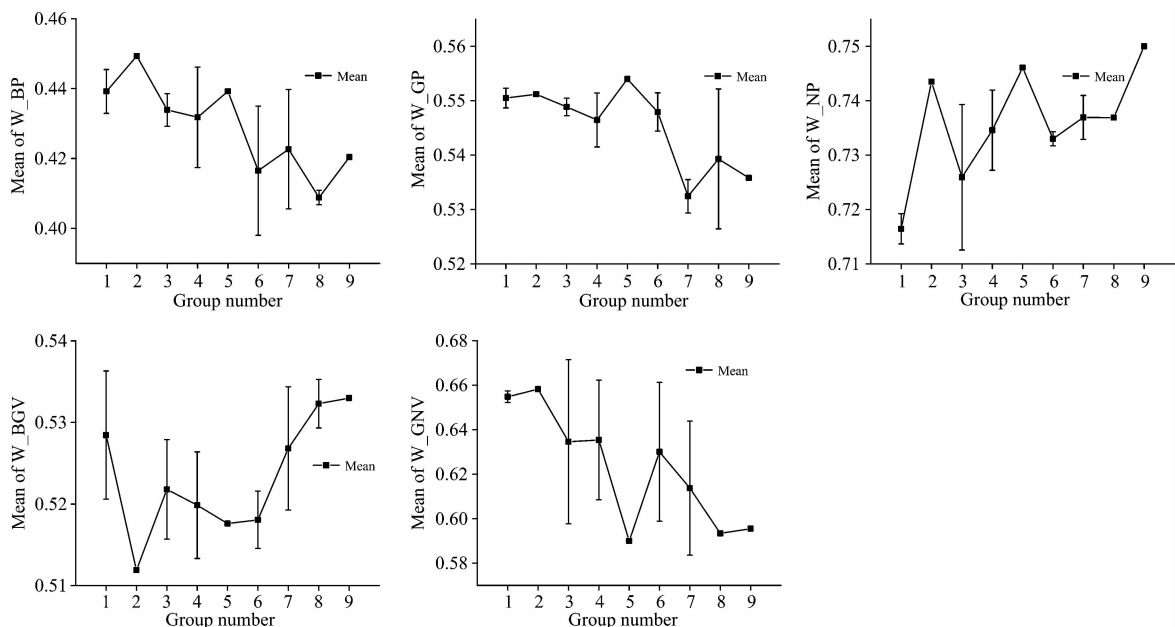


图 4 各青花料典型光谱特征中心波长变化

Fig. 4 Wavelength center change trend of cobalt blue material's spectral features

绿峰和近红外峰是相邻的两个反射峰, 中心波长变化趋势却相反。因此, 绿峰和近红外峰之间的距离(distance between GP and NP, D_{GN})会呈逐渐增大的趋势(图 5)。此

外, 若定义 GN 吸收特征的对称因子(symmetry of GNV, S_{GNV})为特征左端点到中心波长的距离与右端点到中心波长的距离之商, 则不同类别青花瓷 GN 吸收特征对称因子变化

如图 6 所示。除去第 5 类(回青)样本外, GN 吸收特征对称因子呈明显下降趋势, 即早期 GN 吸收特征中心波长与近红外峰更接近, 而后期则与绿峰更接近。随着青花料原料和制作工艺的提升, 其纯度不断提高, 而这是青花料光谱特征参量随年代发生改变的根本原因^[16-17]。

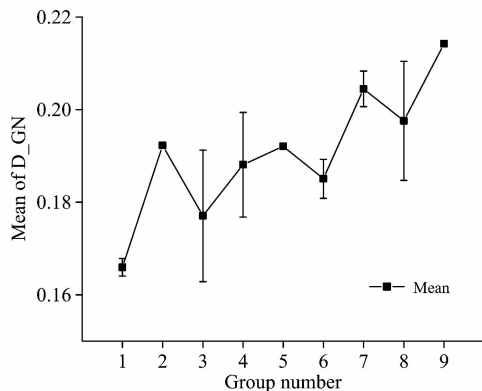


图 5 青花料绿峰和近红外峰中心波长间距变化
Fig. 5 Change trend of D_GN of different blue and white porcelain categories

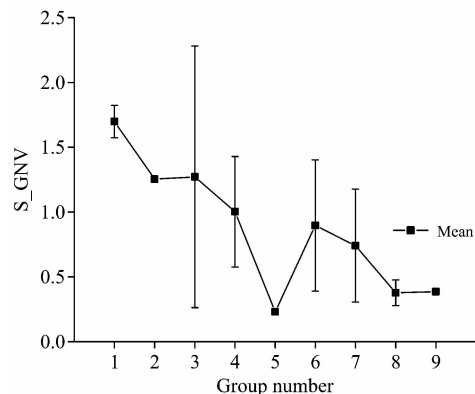


图 6 青花料 GN 吸收特征对称因子变化
Fig. 6 Change trend of S_GNV of different blue and white porcelain categories

3 结 论

针对青花瓷无损分析的需求和高光谱瓷器研究不足的现状, 本文选取历代景德镇青花瓷碎片样本, 使用地面光谱仪测量样本胎釉和青花料部位反射率光谱, 分析其典型光谱特征, 并对历代青花料光谱特征参量变化趋势进行了分析。研究得到如下结论:

(1) 历代青花瓷胎釉部位光谱特征较为单一, 仅在 510 nm 附近有一典型反射峰, 难以对不同类别青花瓷进行区分;

(2) 青花料部位在可见近红外波段光谱特征较为显著, 有蓝峰、绿峰、近红外峰三个反射峰, 并在其之间形成 BG 吸收谷和 GN 吸收谷, 能够通过光谱特征中心波长和中心反射率对不同类别青花瓷进行区分;

(3) 历代青花料光谱特征参量有较明显的变化规律, 其中绿峰和近红外峰中心波长之间的距离逐渐增大, GN 吸收谷的对称因子逐渐降低。

本研究表明, 高光谱技术在青花瓷文物研究中有非常大的潜力, 为历代景德镇青花瓷的演变规律和断代研究提供了新思路和新方法。今后的研究中, 将对更多青花瓷碎片及完整瓷器样本进行分析, 构建更全面的光谱数据库。此外, 还将依据青花料光谱特征的变化规律, 尝试构建历代景德镇青花瓷断代模型。

References

- [1] MA Xi-gui(马希桂). Chinese Blue and White Porcelain(中国青花瓷). Shanghai: Shanghai Rarebooks Publishing House(上海: 上海古籍出版社), 1999.
- [2] ZHU Yu-ping(朱裕平). Blue and White Porcelain Yuan Dynasty(元代青花瓷). Shanghai: Shanghai Science and Technology Publishing Company(上海: 上海科学技术出版社), 2015.
- [3] WU Zhan-lei(吴战垒). The history of chinese ceramics(图说中国陶瓷史). Tianjin: Baihua Literature and Art Publishing House(天津: 百花文艺出版社), 2009.
- [4] WU Juan, LI Jia-zhi, DENG Ze-qun(吴 隽, 李家治, 邓泽群). SCIENTIA SINICA Technologica(中国科学: 技术科学), 2004, 34(5): 516.
- [5] LUO Hong-jie, LI Jia-zhi, GAO Li-ming(罗宏杰, 李家治, 高力明). Journal of Shaanxi University of Science & Technology • Natural Science Edition(陕西科技大学学报), 1994, (1): 1.
- [6] WU Juan, LI Jia-zhi(吴 隽, 李家治). Journal of Ceramics(陶瓷学报), 1997, (3): 130.
- [7] WU Juan, LI Jia-zhi, GUO Jing-kun, et al(吴 隽, 李家治, 郭景坤, 等). Journal of Ceramics(陶瓷学报), 1998, 3(3): 134.
- [8] CAO Qun, ZHOU Yong-zheng, YU Shao-wei(操 群, 周永正, 余绍为). Chinese Ceramics(中国陶瓷), 2011, (7): 48.
- [9] XIONG Ying-fei, HE Wen-quan, JIN Yan-ling(熊樱菲, 何文权, 金延龄). Sciences of Conservation and Archaeology(文物保护与考古科学), 2006, 18(4): 14.
- [10] WU Feng-qiang, YANG Wu-nian, LI Dan(武锋强, 杨武年, 李 丹). Acta Mineralogica Sinica(矿物学报), 2014, 34(2): 166.
- [11] Liang H. Applied Physics A, 2012, 106(2): 309.
- [12] GONG Meng-ting, FENG Ping-li(巩梦婷, 冯萍莉). Sciences of Conservation and Archaeology(文物保护与考古科学), 2014, 26(4): 76.

- [13] WANG Le-le, LI Zhi-min, MA Qing-lin, et al(王乐乐, 李志敏, 马清林, 等). Dunhuang Research(敦煌研究), 2015, (3): 122.
- [14] Cloutis E, Norman L, Cuddy M, et al. Journal of Near Infrared Spectroscopy. 2016, 24(2): 119.
- [15] CHEN Yao-cheng, GUO Yan-yi, ZHANG Zhi-gang(陈尧成, 郭演仪, 张志刚). Journal of the Chinese Ceramic Society(硅酸盐学报), 1978, (4): 4.
- [16] CHEN Rao-cheng, ZHANG Fu-kang, ZHANG Xiao-wei, et al(陈尧成, 张福康, 张筱薇, 等). Chinese Ceramics(中国陶瓷), 1995, (2): 40.
- [17] WANG Jian-hua(王健华). Palace Museum Journal(故宫博物院院刊), 1998, (1): 75.

Research on the Absorption Feature Analysis of Jingdezhen Blue and White Porcelain

ZHAO Heng-qian¹, QIANG Jia-cheng^{2,3}, ZHAO Hong-rui^{2,3}, ZHAO Xue-sheng^{1*}

1. College of Geoscience and Surveying Engineering, China University of Mining & Technology, Beijing, Beijing 100083, China
2. Institute of Geomatics, Department of Civil Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China
3. 3S Center, Tsinghua University, Beijing 100084, China

Abstract Jingdezhen blue and white porcelain is one of the most representative ceramic types in China, which is famous for its high academic and economic values. However, it is hard to discriminate blue and white porcelains of different time periods from their appearance, and how to solve this problem quickly and accurately is a major challenge to preservation of cultural relics. As a totally nondestructive technique, hyperspectral remote sensing has been successfully applied in pigment analysis of historic frescoes and paintings. In this study, 28 Jingdezhen blue and white porcelain samples of different time periods were collected, and their reflectance spectra of both bodies and cobalt blue materials were measured by ground spectrometer. The typical spectral features of blue and white porcelain were summarized, and the change trend of spectral feature parameters for cobalt blue material was analyzed. The study indicated that cobalt blue material has abundant spectral features in visible to near infrared bands, and the spectral feature parameters of different cobalt blue material types showed obvious difference. Hyperspectral remote sensing has significant potential in the cohort analysis of Jingdezhen blue and white porcelains.

Keywords Jingdezhen blue and white porcelain; Hyperspectral remote sensing; Spectral feature analysis

(Received Nov. 26, 2017; accepted Apr. 27, 2018)

* Corresponding author