

DOI: 10.13957/j.cnki.tcx.2022.01.016

鹰潭龙虎山大上清宫遗址出土青花瓷胎釉的成分分析

胡 胜^{1,2}, 郁永彬¹, 吴 琳¹, 袁 枫¹, 李其江¹

(1. 景德镇陶瓷大学 古陶瓷研究中心, 江西 景德镇 333001; 2. 江西省文物考古研究院, 江西 南昌 330025)

摘要:以鹰潭龙虎山大上清宫遗址出土青花瓷为研究对象, 采用能量色散 X 射线荧光光谱仪对青花瓷样品胎、釉的化学组成进行无损分析。结果表明, 龙虎山大上清宫青花瓷胎中 Al_2O_3 含量均值为 22.2%, 明显高于景德镇周边瓷石原料, 应为使用高岭土加瓷石的二元配方; 青花瓷釉采用了釉灰加釉果的配方, 釉灰和釉果的使用比例变化幅度较大。

关键词:大上清宫遗址; 青花瓷; 化学组成; 科学分析; EDXRF

中图分类号: TQ174.4⁺³

文献标志码: A

文章编号: 1000-2278(2022)01-0139-06

Nondestructive Components Analysis of Blue and White Porcelain Unearthed from Dashangqinggong Site, Longhushan, Yingtan

HU Sheng^{1,2}, YU Yongbin¹, WU Lin¹, YUAN Feng¹, LI Qijiang¹

(1. Center of Ancient Ceramics Research, Jingdezhen Ceramic University, Jingdezhen 333001, Jiangxi, China;
2. Jiangxi Institute of Cultural Relics and Archaeology, Nanchang 330025, Jiangxi, China)

Abstract: Blue and white porcelain unearthed from Dashangqinggong site, Longhushan, Yingtan, was analyzed by using energy dispersive X-ray fluorescence spectrometer (EDXRF), in order to achieve nondestructive analysis of chemical composition of the tire, glaze, blue and white. It is showed that, the average content Al_2O_3 in the blue and white porcelain body is 22.2%, which is significantly higher than that in the porcelain stone materials with binary recipe of kaolin and porcelain stone surrounding Jingdezhen. The blue and white porcelain glaze consists of glaze ash and glaze fruit, with larger variation in composition.

Key words: Dashangqinggong site; blue and white porcelain; chemical composition; nondestructive analysis; EDXRF

0 引言

龙虎山大上清宫遗址位于江西省鹰潭市上清镇东, 地处泸溪河北岸, 距嗣汉天师府约一公里。经国家文物局批准, 2014 年至 2018 年间, 江西省文物考古研究院联合鹰潭市博物馆对该遗址进行了系统的考古发掘, 共发掘面积约 5000 m^2 , 出土大量陶瓷器碎片, 包括青白瓷、卵白釉瓷、青瓷、青花瓷和颜色釉瓷等多个品种。2018 年 4 月, 龙虎山大上清宫遗址荣获“2017 年度全国十大考古新发现”, 引起专家学者的高度关注, 其中出土的大量明代青花瓷残片产自哪里? 有着怎样的技术

特征和文化内涵? 值得深入研究。

青花是继我国陶瓷刻、划、雕、印等装饰技术后, 创造的又一新装饰方法, 是利用含钴的矿物原料作为着色颜料绘画在白瓷坯上, 经上釉后高温一次烧成, 呈现蓝色彩饰的釉下彩。据考古发掘, 青花瓷的生产制作在唐代已经开始, 经元、明、清诸朝发展起来, 并成为全国瓷器生产的主流^[1]。大上清宫遗址出土青花瓷胎、釉和青花色泽特征与景德镇青花瓷器十分相似。鉴于此, 在江西省文物考古研究院的大力支持下, 本文选择了 40 件有代表性的大上清宫遗址出土明代地层青花瓷样品, 分别测定它们的胎、釉化学组成, 并与

收稿日期: 2021-04-26。

修订日期: 2021-10-12。

基金项目: 国家社科基金青年项目(19CKG012); 江西省高校人文社会科学重点研究基地项目(JD19072); 江西陶瓷文物遗存保护暨御窑研究协同创新中心项目(JXYY1904)。

通信联系人: 郁永彬(1987-), 男, 博士, 副研究员。

Received date: 2021-04-26.

Revised date: 2021-10-12.

Correspondent author: YU Yongbin (1987-), Male, Ph.D., Associate Professor.

E-mail: yu_yb1987@163.com

景德镇青花瓷器进行对比分析,初步探讨了大上清宫遗址出土明代青花瓷的技术特征和文化内涵,为深入认识中国古代道教用瓷制度提供必要的参考。

1 样品与实验

此次测试分析的青花瓷样品共40件,皆选自江西龙虎山大上清宫遗址明代地层,编号为qh01~qh40。部分样品照片如图1所示。将样品整理编号后进行切割,再放入比朗超声波清洗机内清洗30 min,最后放进101-1型电热鼓风烘箱中100℃恒温烘3 h。实验采用能量色散X射线荧光光谱仪测试青花瓷样品胎与釉的主量化学元素组成。实验设备为美国EDAX公司生产的Eagle-III型能量色散X射线荧光光谱仪。测试时,X光管电压为50 kV,管电流为200 μA,经毛细管光学系统聚焦后的光斑直径为40 μm,掠射和出射角分别为65°和60°。Si(Li)探测器采用Al-Cu合金的 AlK_{α} 和 CuK_{α} 峰来标定能量刻度。分析结果详见表1和表2。

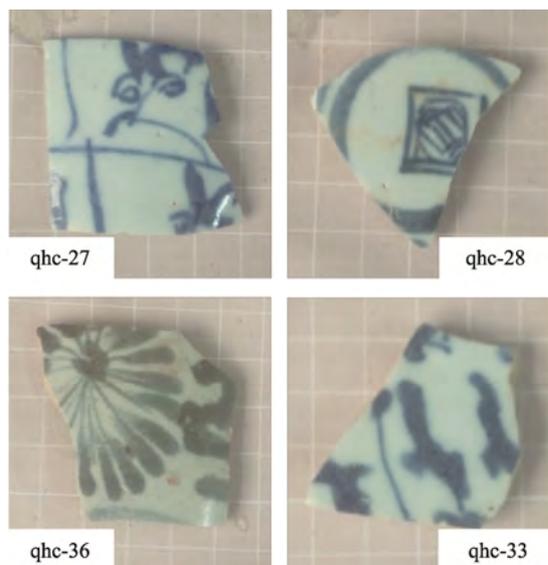


图1 龙虎山大上清宫遗址出土部分青花瓷样品
Fig. 1 Blue and white porcelain samples unearthed from the Dashangqinggong site

2 结果与讨论

2.1 青花瓷胎组成分析

通过表1中龙虎山大上清宫遗址出土青花瓷胎的化学组成结果可以看出,瓷胎中 Al_2O_3 和 SiO_2 成分含量变化较大。其中: Al_2O_3 含量较高,基本

在18 wt.%~26 wt.%之间,仅有1件样品含量为17 wt.%; SiO_2 的含量波动较大,在64 wt.%~75 wt.%之间; Fe_2O_3 的含量在0.9 wt.%~2.4 wt.%之间,助熔剂氧化物 K_2O 、 Na_2O 、 CaO 、 MgO 的总含量在3.9 wt.%~7.7 wt.%之间, TiO_2 含量较低,多数在0.1 wt.%以下。

景德镇早期烧制瓷器时只使用单一瓷石作为原料^[2], Al_2O_3 含量一般在18 wt.%以下,最高不超过20 wt.%。当瓷胎中 Al_2O_3 含量大于20 wt.%时,仅用单一瓷石作原料是无法达到的。刘新园^[3]曾对景德镇白釉瓷胎进行分析研究,元代青白釉瓷和枢府白釉瓷 Al_2O_3 含量都在20 wt.%左右,高者达到22 wt.%。分析表明即使在接近地表上层,风化程度较深的瓷石中 Al_2O_3 的含量在18 wt.%~19 wt.%之间。由此可见,龙虎山大上清宫遗址出土青花瓷胎中 Al_2O_3 的含量超过此数值,一定是在制胎原料中加入了能够提高 Al_2O_3 含量的原料。瓷胎中增加 Al_2O_3 可以提高瓷器的烧成温度,减少烧成时的变形,增加瓷器的强度,从而提高瓷器的质量。结合景德镇制瓷原料化学组成^[1],将龙虎山大上清宫样品瓷胎中 Al_2O_3 含量和景德镇及周边高岭土、瓷石中 Al_2O_3 含量进行对比,如图2所示。通过图2发现,龙虎山大上清宫青花瓷胎中 Al_2O_3 含量均值为22.2 wt.%,最高可达26 wt.%,明显高于景德镇周边瓷石原料。说明大上清宫青花瓷胎应使用了含铝较高的高岭土,从而增加了胎体的强度,提高了瓷器的烧成温度,使得烧制出的青花瓷胎质更优。

周仁^[4]对明清官窑青花瓷做过一些科学分析,结果表明,从洪武到万历年间,官窑青花胎中 Al_2O_3 含量呈现由低(Al_2O_3 含量18 wt.%~19 wt.%)到高(Al_2O_3 含量22 wt.%左右),而后又回落到较低(Al_2O_3 含量18 wt.%~20 wt.%)的趋势,且成化时期青花瓷胎的 Al_2O_3 含量最高,多数在22 wt.%左右。到了清康熙、雍正和乾隆时期,瓷胎中的 Al_2O_3 含量达到一个更高的水平:康熙青花瓷胎 Al_2O_3 含量达26 wt.%~29 wt.%之间,雍正和乾隆青花瓷胎 Al_2O_3 含量在24 wt.%左右^[4-5]。由于EDXRF测试数据是多维的,难以用直观的方法来描述或比较其组成的异同和变化。本文采用多元统计方法中的因子分析进行数据处理,此法尽可能用最少的几个综合因子F1、F2、F3等($F_i = x_{1i}A + x_{2i}B + \dots$, A、B...是元素含量 x_{1i} 、 x_{2i} ...是通过相应程序计算得到的正负加权因子)来提取表征研究对象的绝大部分信息,以达到数据降维的目的。本

表 1 龙虎山大上清宫遗址出土青花瓷胎的主、微量化学组成(wt.%)

Tab. 1 Chemical compositions of body of the blue and white porcelain unearthed from the Dashangqinggong site (wt.%)

Serial number	Na ₂ O (wt.%)	MgO (wt.%)	Al ₂ O ₃ (wt.%)	SiO ₂ (wt.%)	K ₂ O (wt.%)	CaO (wt.%)	TiO ₂ (wt.%)	Fe ₂ O ₃ (wt.%)
qh-01	1.20	0.09	18.76	74.24	3.40	1.33	0.05	0.92
qh-02	0.53	0.54	20.84	71.97	4.16	0.73	0.05	1.19
qh-03	2.72	0.31	21.05	70.39	3.88	0.55	0.06	1.05
qh-04	2.34	0.08	25.01	66.83	3.40	1.00	0.06	1.27
qh-05	1.23	0.12	25.58	67.88	3.56	0.47	0.07	1.09
qh-06	1.79	0.10	20.38	73.15	3.22	0.39	0.04	0.93
qh-07	2.72	0.02	25.44	66.48	3.31	0.65	0.09	1.28
qh-08	2.55	0.17	24.07	67.68	3.28	1.16	0.05	1.04
qh-09	0.83	0.10	23.41	70.98	3.06	0.49	0.08	1.05
qh-10	1.70	0.20	26.51	66.93	3.25	0.22	0.09	1.09
qh-11	0.74	0.40	24.64	69.49	3.09	0.51	0.09	1.04
qh-12	2.49	0.19	19.33	73.35	3.35	0.35	0.08	0.86
qh-13	0.80	0.32	21.48	72.07	3.00	0.80	0.05	1.48
qh-14	0.98	0.03	23.44	71.12	3.10	0.24	0.08	1.01
qh-15	2.39	0.29	22.35	69.44	3.19	1.08	0.04	1.21
qh-16	5.07	0.13	21.44	66.70	2.11	3.57	0.05	0.93
qh-17	1.09	0.13	21.94	71.18	3.36	0.59	0.08	1.63
qh-18	0.81	0.53	22.75	69.72	4.41	0.76	0.07	0.96
qh-19	1.20	0.43	19.48	72.15	5.04	0.42	0.08	1.18
qh-20	0.44	0.07	25.06	69.82	3.17	0.24	0.12	1.07
qh-21	2.84	0.30	21.53	69.69	3.35	0.76	0.07	1.45
qh-22	0.84	0.18	25.88	67.72	3.36	0.62	0.08	1.32
qh-23	2.64	0.14	24.03	67.55	3.65	0.61	0.08	1.31
qh-24	1.29	0.27	25.62	66.69	3.25	1.94	0.04	0.90
qh-25	1.77	0.32	25.74	66.99	3.25	0.43	0.10	1.39
qh-26	1.65	0.35	21.54	69.05	3.77	2.01	0.07	1.57
qh-27	1.86	0.38	21.43	71.89	2.46	0.67	0.07	1.24
qh-28	0.60	0.48	21.53	72.09	3.18	0.46	0.11	1.55
qh-29	1.68	0.39	22.89	68.62	4.30	0.95	0.06	1.11
qh-30	3.52	0.60	26.23	64.73	3.13	0.43	0.06	1.29
qh-31	1.07	0.10	19.61	72.69	4.21	0.78	0.09	1.44
qh-32	0.79	0.57	22.06	68.31	5.22	0.45	0.16	2.43
qh-33	2.02	0.00	15.47	69.16	8.91	3.91	0.10	0.42
qh-34	0.27	0.13	17.31	75.90	4.28	0.23	0.05	1.82
qh-35	0.72	0.30	19.58	72.94	3.52	0.76	0.13	2.06
qh-36	0.03	0.37	19.83	71.89	4.28	1.02	0.32	2.25
qh-37	2.12	0.39	24.80	66.87	3.57	1.15	0.04	1.06
qh-38	1.38	0.27	21.58	69.01	5.31	0.53	0.06	1.86
qh-39	1.50	0.54	18.31	72.05	4.44	0.77	0.22	2.16
qh-40	1.50	0.35	22.20	70.06	3.91	0.66	0.09	1.23

表2 龙虎山大上清宫遗址出土青花瓷釉的主、微量化学组成

Tab. 2 Chemical compositions of glaze of the blue and white porcelain unearthed from the Dashangqinggong site

Serial number	Na ₂ O (wt.%)	MgO (wt.%)	Al ₂ O ₃ (wt.%)	SiO ₂ (wt.%)	K ₂ O (wt.%)	CaO (wt.%)	TiO ₂ (wt.%)	Fe ₂ O ₃ (wt.%)	MnO (wt.%)	P ₂ O ₅ (wt.%)	RO (mol)
qh-01	1.85	0.28	12.78	71.89	4.45	7.73	0.03	0.63	0.12	0.22	0.65
qh-02	0.80	0.41	12.99	72.79	5.40	6.62	0.05	0.70	0.12	0.13	0.65
qh-03	1.88	0.14	12.93	73.24	3.16	7.48	0.04	0.88	0.13	0.12	0.68
qh-04	1.95	0.93	12.49	70.75	2.48	10.18	0.04	1.08	0.08	0.02	0.78
qh-05	1.99	0.26	14.81	73.95	4.36	3.62	0.05	0.87	0.06	0.03	0.48
qh-06	2.82	0.12	14.13	70.73	4.67	6.58	0.04	0.72	0.16	0.03	0.56
qh-07	2.60	0.38	14.28	72.77	3.06	6.20	0.03	0.59	0.07	0.02	0.62
qh-08	2.74	0.27	14.76	72.69	3.18	5.16	0.04	1.05	0.08	0.02	0.56
qh-09	2.30	0.37	14.17	70.46	3.13	8.54	0.04	0.88	0.08	0.03	0.70
qh-10	2.22	0.08	12.36	76.10	3.64	4.72	0.03	0.72	0.07	0.06	0.54
qh-11	2.02	0.30	14.59	71.36	3.22	7.58	0.05	0.78	0.07	0.03	0.68
qh-12	2.08	0.19	12.89	72.48	4.09	7.19	0.04	0.82	0.19	0.04	0.63
qh-13	0.42	0.40	13.75	70.42	3.26	10.39	0.04	1.20	0.07	0.04	0.82
qh-14	2.07	0.10	11.46	77.38	3.55	4.23	0.03	1.05	0.10	0.04	0.52
qh-15	2.19	0.40	12.90	73.14	3.10	7.32	0.06	0.77	0.09	0.03	0.67
qh-16	3.84	0.57	13.12	73.31	2.41	5.76	0.05	0.85	0.06	0.03	0.57
qh-17	1.84	0.05	13.86	72.17	3.54	7.52	0.05	0.85	0.10	0.03	0.67
qh-18	1.37	0.22	13.27	71.37	5.99	6.92	0.04	0.64	0.15	0.03	0.60
qh-19	1.17	0.44	17.09	70.46	6.38	2.76	0.04	1.57	0.07	0.02	0.41
qh-20	1.59	0.29	12.04	77.38	3.68	4.13	0.02	0.74	0.10	0.03	0.55
qh-21	2.28	0.15	13.51	72.23	2.58	8.31	0.04	0.72	0.16	0.02	0.70
qh-22	2.12	0.27	13.62	74.95	3.39	4.71	0.05	0.78	0.08	0.03	0.56
qh-23	2.40	0.12	13.51	73.86	3.25	6.09	0.06	0.59	0.12	0.00	0.60
qh-24	4.29	0.31	12.74	69.73	3.91	7.96	0.04	0.70	0.30	0.01	0.58
qh-25	2.20	0.05	12.96	74.90	3.27	5.72	0.05	0.72	0.10	0.03	0.60
qh-26	1.80	0.02	13.18	70.54	3.45	10.14	0.05	0.51	0.28	0.02	0.73
qh-27	1.89	0.06	13.34	73.04	3.29	7.52	0.04	0.74	0.08	0.01	0.67
qh-28	1.29	0.31	12.29	75.22	2.87	7.03	0.04	0.77	0.14	0.03	0.72
qh-29	1.01	0.01	13.12	71.32	3.44	10.12	0.05	0.82	0.08	0.03	0.77
qh-30	2.16	0.09	13.94	71.28	2.80	8.70	0.04	0.91	0.07	0.02	0.71
qh-31	1.59	0.81	14.83	67.02	4.29	10.15	0.04	1.16	0.06	0.04	0.74
qh-32	1.08	0.44	13.85	70.08	4.04	9.48	0.08	0.89	0.05	0.01	0.75
qh-33	2.02	0.00	15.47	69.16	8.91	3.91	0.10	0.42	0.09	0.04	0.75
qh-34	0.42	0.26	11.25	71.51	3.57	11.26	0.04	1.55	0.10	0.03	0.82
qh-35	1.52	0.16	12.95	73.18	3.58	7.42	0.04	1.03	0.08	0.03	0.69
qh-36	1.28	0.54	13.63	70.06	3.27	10.10	0.06	0.96	0.07	0.02	0.78
qh-37	2.25	0.84	12.37	73.48	3.73	6.15	0.04	1.03	0.08	0.03	0.63
qh-38	1.13	0.27	12.69	72.96	4.63	7.35	0.01	0.87	0.07	0.02	0.67
qh-39	0.49	0.08	12.39	74.08	3.72	8.25	0.05	0.80	0.08	0.05	0.76
qh-40	0.99	0.09	13.12	72.62	3.50	8.85	0.04	0.69	0.07	0.03	0.75

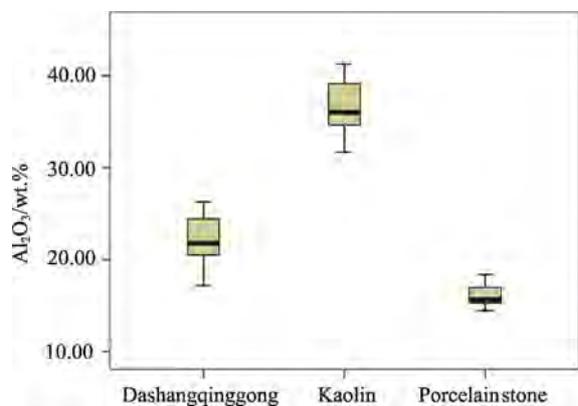


图 2 大上清宫遗址青花瓷胎与景德镇周边高岭土、瓷石中 Al_2O_3 含量箱式图

Fig. 2 Box diagram of Al_2O_3 content in the bodies of Kaolin, porcelain stone around Jingdezhen and the blue and white porcelain body from the Dashangqinggong site

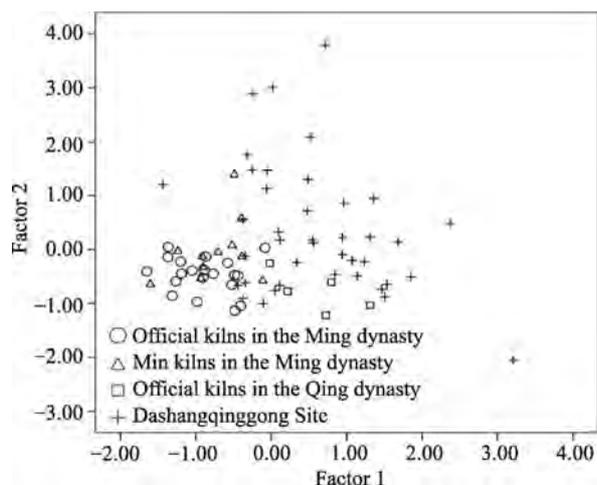


图 3 大上清宫与明代官窑、民窑和清代官窑青花瓷胎元素因子散点图

Fig. 3 Scatter diagram of the blue and white porcelain body from the Dashangqinggong site and Guan kiln of Ming and Qing

文对大上清宫出土青花瓷胎化学组成进行降维，通过 SPSS 软件制做了大上清宫明代青花瓷胎与明清官窑及民窑青花瓷胎的因子分析散点图(见图 3)，当提取的两个因子 Factor1 和 Factor2 的累积贡献率为 65.75%，且能够反映出数据的绝大部分信息时，明代官窑与清代官窑互不重叠，明代官窑与明代民窑聚在一起，大上清宫青花瓷单独分布在一个较宽泛的区域内，与明清官窑少有重叠，表明大上清宫青花瓷胎原料使用比较宽泛。

2.2 青花瓷釉组成分析

根据表 2 可知，龙虎山大上清宫遗址出土青花瓷釉的成分为： Al_2O_3 含量在 11 wt.% ~ 17 wt.% 之间， SiO_2 含量多数在 69 wt.% ~ 77 wt.% 之间，

仅个别低至 66 wt.%； K_2O 含量高达 2.4 wt.% ~ 6.3 wt.%； CaO 含量在 2.7 wt.% ~ 11.0 wt.% 之间； MgO 和 TiO_2 含量相对较低； Fe_2O_3 含量大多在 1 wt.% 以下，仅有几件含量大于 1 wt.%； MnO 含量在 0.05 wt.% ~ 0.30 wt.% 之间； P_2O_5 含量在 0.01 wt.% ~ 0.22 wt.% 之间。总体看来，龙虎山大上清宫遗址出土青花瓷釉的化学组成分布比较宽泛。

传统的景德镇青花瓷釉含有较高的 MnO 和 P_2O_5 ，其是由釉灰和釉果配制而成，釉灰含有较高的 CaO ，而釉果则提供了较多的 K_2O 。从表 2 可以看出，龙虎山大上清宫遗址青花瓷釉的成分中 K_2O 和 CaO 含量分布都比较宽泛，说明这批青花瓷釉灰和釉果的使用比例变化幅度较大。由于釉灰中含有较多的着色氧化物 Fe_2O_3 ^[3]，减少其用量可以降低 Fe_2O_3 含量，从而增加釉的白度，而龙虎山遗址出土青花瓷釉白度不一，说明其釉灰使用量也不一。另外，大上清宫青花瓷釉中 K_2O 、 Na_2O 含量变化较大(见表 2)，说明使用的釉果来源丰富。

众所周知，早期瓷釉主要是以 CaO 作为熔剂，从表 2 数据结果可看出，龙虎山大上清宫青花釉样品 CaO 含量不一。为了探明大上清宫青花瓷釉的类型，罗宏杰等^[6]给出的钙系釉的划分标准，以釉式中碱土金属氧化物(RO)摩尔量作为划分钙釉的参照标准， $\text{RO} \geq 0.76$ 为钙釉， $0.76 > \text{RO} \geq 0.50$ 为钙碱釉， $\text{RO} < 0.50$ 为碱钙釉。对表 2 的化学组成进行换算可知，钙碱釉有 32 件，钙釉有 6 件，碱钙釉仅有 2 件。传统的钙釉，釉中气泡较少，白中泛青，容易流釉，釉面光泽度较强，透明度好；钙碱釉中 K_2O 的含量稍高，增加了釉面的光亮程度，使得釉层表面较为莹润；碱钙釉中碱性氧化物含量最高，使得釉的高温粘度提高，流动性较低，烧成温度更宽，从而不易流釉^[7]。龙虎山大上清宫遗址出土青花瓷标本釉的质量不一(图 1)，说明使用的釉灰质量不一，对釉的质量要求不高，只要釉灰和釉果能成釉即可，反映了民窑青花瓷器釉的特点。

为了更深入地了解龙虎山大上清宫遗址出土青花瓷釉的变化规律，将龙虎山青花瓷釉与明代官窑、明代民窑青花瓷釉数据进行比较，如图 4 和图 5 所示。通过 SiO_2 - Al_2O_3 散点图 4 和因子分析散点图 5 可以看出，除少量样品数据点有重叠外，龙虎山大上清宫遗址出土明代青花瓷釉与明代官窑青花瓷釉有着明显的区别。其青花瓷釉与明代民窑的青花瓷釉有部分重叠，说明龙虎山大

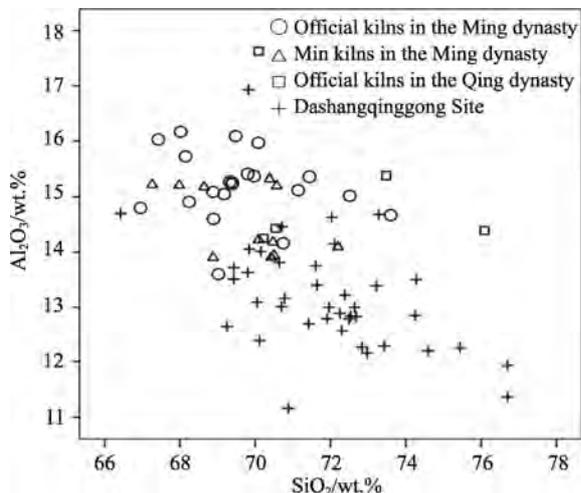


图4 大上清宫与明代官窑和民窑青花瓷釉 SiO_2 - Al_2O_3 散点图

Fig. 4 Scatter diagram of SiO_2 - Al_2O_3 in the blue and white porcelain glaze from the Dashangqinggong site and Guan kiln of Ming

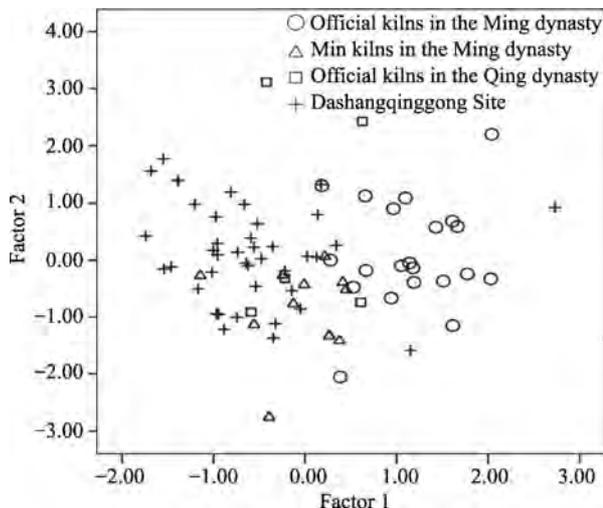


图5 大上清宫与明代官窑和民窑青花瓷釉元素因子分析散点图

Fig. 5 Scatter diagram of blue and white porcelain glaze from the Dashangqinggong site and Min and Guan kiln of Ming

上清宫青花瓷釉的化学组成与景德镇民窑青花瓷釉的化学组成比较接近。

3 结论

(1) 龙虎山大上清宫青花瓷胎中 Al_2O_3 含量均值为 22.2 wt.%, 明显高于景德镇周边瓷石原料, 表明绝大部分青花瓷胎应使用瓷石加高岭土的二元配方。

(2) 龙虎山大上清宫遗址出土青花瓷釉采用了釉灰加釉果的配方, 釉灰和釉果的使用比例变化幅度较大; 使用的釉灰质量不一, 对釉的质量要求不高, 这一结果与景德镇明代民窑青花瓷釉的特征接近。龙虎山青花瓷釉用原料与官窑青花瓷相比有着明显的区别。

参考文献:

- [1] 李家治. 中国科学技术史·陶瓷卷[M]. 北京: 科学出版社, 1998.
- [2] 周仁, 李家治. 景德镇历代瓷器胎、釉和烧制工艺的

研究[J]. 硅酸盐, 1960, 4(2): 49-62.

ZHOU R, LI J Z. Journal of the Chinese Ceramic Society, 1960, 4(2): 49-62.

- [3] 李其江, 张茂林, 熊露, 等. 景德镇“釉灰”的发展演变研究[J]. 陶瓷学报, 2020, 41(1): 115-120.

LI Q J, ZHANG M L, XIONG L, et al. Journal of Ceramics, 2020, 41(1): 115-120.

- [4] 周仁. 景德镇瓷器的研究[M]. 北京: 科学出版社, 1958.

- [5] 李其江, 张茂林, 熊露, 等. 景德镇“釉灰”的发展演变研究[J]. 陶瓷学报, 2020, 41(1): 115-120.

LI Q J, ZHANG M L, XIONG L, et al. Journal of Ceramics, 2020, 41(1): 115-120.

- [6] 罗宏杰, 李家治, 高力明. 中国古瓷中钙系釉类型划分标准及其在瓷釉研究中的应用[J]. 硅酸盐通报, 1995(2): 50-53.

LUO H J, LI J Z, GAO L M. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 1995(2): 50-53.

- [7] 张福康. 中国古陶瓷的科学[M]. 上海: 上海人民美术出版社, 2000.

(编辑 王三海)