

DOI: 10.13957/j.cnki.texb.2021.01.015

南宋官窑与龙泉哥窑瓷胎的对比分析

包启富¹, 于欢², 董伟霞¹, 肖卓豪¹, 徐轶男¹, 程志鹏¹,
周健儿¹, 陈猛², 蔡仪²

(1. 景德镇陶瓷大学, 江西 景德镇 333403; 2. 景德镇学院, 江西 景德镇 333000)

摘要: 明代《遵生八笺》一文中提到“官窑品格大率与哥窑相同”, 近年来, 随着杭州与龙泉两地出土考古资料不断丰富, 南宋官窑与龙泉哥窑因外观特征相近而成为了当前古陶瓷界的研究热点之一。为更好区分两地青瓷, 本文通过能量色散 X 射线荧光光谱仪、X 射线衍射仪、扫描电子显微镜等仪器设备对杭州郊坛下南宋官窑和龙泉大窑、溪口瓦窑特征瓷片的瓷胎进行测试表征, 对比分析两地瓷胎在原料选取、化学组成、制瓷工艺与外观特征、显微结构、物理性能之间的异同点。结果表明, 化学组成上南宋官窑瓷胎的 Fe_2O_3 低于龙泉哥窑, 但由于南宋官窑中存在一定量的 TiO_2 与 Fe_2O_3 混合呈色, 使得两者瓷胎颜色相近; 此外, 南宋官窑与龙泉哥窑瓷胎相比, 胎质较为疏松且组成上呈现高硅低铝的特点。

关键词: 南宋官窑; 龙泉哥窑; 对比分析; 显微结构; 化学组成

中图分类号: TQ174.1

文献标志码: A

文章编号: 1000-2278(2021)01-0122-08

Comparison of the Porcelain Bodies between the Southern Song Guan Kiln and the Longquan Ge Kiln

BAO Qifu¹, YU Huan², DONG Weixia¹, XIAO Zhuohao¹, XU Yinan¹, CHENG Zhipeng¹,
ZHOU Jian'er¹, CHEN Meng², CAI Yi²

(1. Jingdezhen Ceramic Institute, Jingdezhen 333403, Jiangxi, China;

2. Jingdezhen University, Jingdezhen 333000, Jiangxi, China)

Abstract: It was mentioned in the "Zunsheng Bajian" (Ming Dynasty) that "The character and rate of the Guan Kiln are the same as those of the Ge Kiln". In recent years, with the continuous enrichment in archaeological materials from Hangzhou and Longquan, the Southern Song Guan Kiln and Longquan Ge Kiln have attracted attentions in the field of ancient ceramics, due to their special appearance characteristics. In order to better distinguish the celadons from the two places, energy dispersive X-ray fluorescence (XRF) spectrometer, X-ray diffractometer (XRD), scanning electron microscopy (SEM) and so on were used to characterize the ceramic bodies of Southern Song Guan Kiln, Longquan Da Kiln and Xikou Wayaoyang from Hangzhou Jiaotianxia, Dayao and Xikou Wayaoyang from Longquan. Their differences and similarities were analyzed, in terms of chemical composition, processing technology, appearance characteristics, microstructure and physical properties. It was found that the content of Fe_2O_3 in the porcelain body from the Southern Song Guan Kiln was lower than that in the one from the Longquan Ge Kiln. However, due to the presence of a certain content of TiO_2 together with Fe_2O_3 in the porcelain body from the Southern Song Guan Kiln, the colors of the two porcelain bodies were nearly identical. In addition, as compared with the one from the Longquan Ge Kiln, the porcelain body from the Southern Song Guan Kiln was relatively loose, with high content of silicon and lower content of aluminum.

Key words: Southern Song Guan Kiln; Longquan Ge Kiln; contrastive analysis; microstructure; chemical composition

收稿日期: 2020-07-27。

修订日期: 2020-09-15。

基金项目: 江西省高校人文社会科学研究(JD18048); 国家自然科学基金(51962013, 51762023); 江西省科技厅项目(20192ACB80007, 20192ACB20018); 江西省教育厅项目(GJJ 190707); 景德镇市科技项目(2017GYZD021-02)。

通信联系人: 于欢(1984-), 男, 硕士, 助教。

Received date: 2020-07-27.

Revised date: 2020-09-15.

Correspondent author: YU Huan (1984-), Male, Master, Assistant.

E-mail: 15961030@qq.com

0 引言

宋代是我国传统文化事业空前发展的历史时期，其中，宋代陶瓷技术的发展更是突飞猛进、璀璨夺目；与之对应的是宋代重文轻武的思想理念，这在很大程度上推动了宋朝皇权的更替。宋室南渡且南宋政权逐步稳定后，礼制的恢复被提上朝廷议程之内，南宋官窑便开始作为祭器及皇家用器出现在世人眼前^[1,2]。早期南宋官窑在一定程度上借鉴了龙泉等地的制瓷工艺技法^[3,4]；然而进入南宋中期，南宋官窑因其专供皇室独特地位，使其所投入的人力、财力、物力等条件非龙泉各窑口所能及，该历史阶段下官窑的制瓷工艺显著提高并已超过各地民办窑口，为满足贵族显赫及文人墨客对官窑的向往，此时的龙泉制瓷工匠们便开始着手模仿南宋官窑。故南宋时期，南宋官窑与龙泉哥窑均受到宋人追求古人尚玉之风的主流审美影响；且两者同产于浙江地区，工艺技法的相互借鉴导致了两者在外观上难以辨别。

鉴于此，本文通过借助各种古陶瓷测试仪器，并选取南宋官窑与龙泉哥窑的特征瓷片，从外观特征-物理性能-显微结构-化学组成等方面来深入研究南宋官窑与龙泉哥窑瓷胎，并从科技分析角

度来讨论两者的异同点。

1 样品与测试

1.1 样品选取

实验共收集了两地 47 块南宋时期青瓷瓷片，其中，选取杭州郊坛下南宋官窑窑址瓷片 3 块(JTX1-3)、龙泉大窑窑址瓷片 24 块(DY1-24)、龙泉溪口瓦窑窑址瓷片 20 块(XKWYY1-20)。上述样品瓷片均为灰或黑胎青瓷。代表性样品照片如图 1 所示^[5]。(备注：JTX 为杭州乌龟山郊坛下南宋官窑青瓷瓷片，DY 为龙泉大窑青瓷瓷片，XKWYY 为龙泉溪口瓦窑青瓷瓷片)

1.2 测试与表征

采用美国 EDAX 公司 Eagle-III 型能量色散 X 射线荧光光谱分析仪测定瓷胎化学元素组成。使用德国 Bruker 公司 D8-Advance 型 X 射线衍射仪对试样瓷胎物相进行定性分析。采用日本 JEOL 公司 JSM-6700F 型场发射扫描电镜(SEM)对样品断面结构进行显微观察。利用德国卡尔-蔡司股份公司生产的 Stemi508 型体视显微镜和 BK-POLR 型偏光显微镜对样品的外观及微观形貌进行观察，并用自带测量软件对瓷胎厚度进行测量。

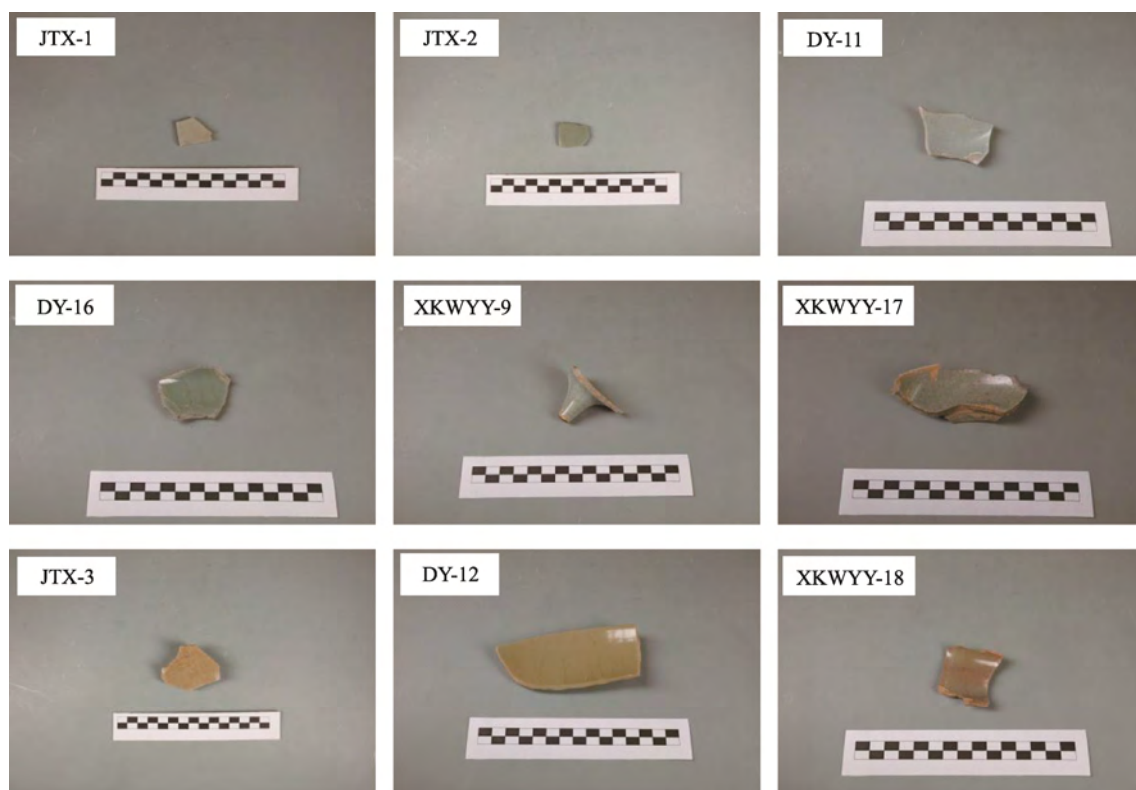


图 1 南宋官窑与龙泉哥窑古瓷片照片

Fig. 1 Photographs of the ancient shards from the Southern Song Guan Kiln and Longquan Ge Kiln

2 结果与讨论

2.1 瓷片的外观分析

结合体视显微镜对瓷片的外观情况进行分析。体式显微镜下分别观察瓷片断面的形态特征

(断面放大 20 倍), 如图 2 所示^[5]。

表 1 为南宋官窑与龙泉哥窑代表性古瓷片在体视显微镜下的瓷胎外观特征描述。不难发现, 南宋官窑瓷片胎体与龙泉哥窑相比较疏松且胎体较薄。

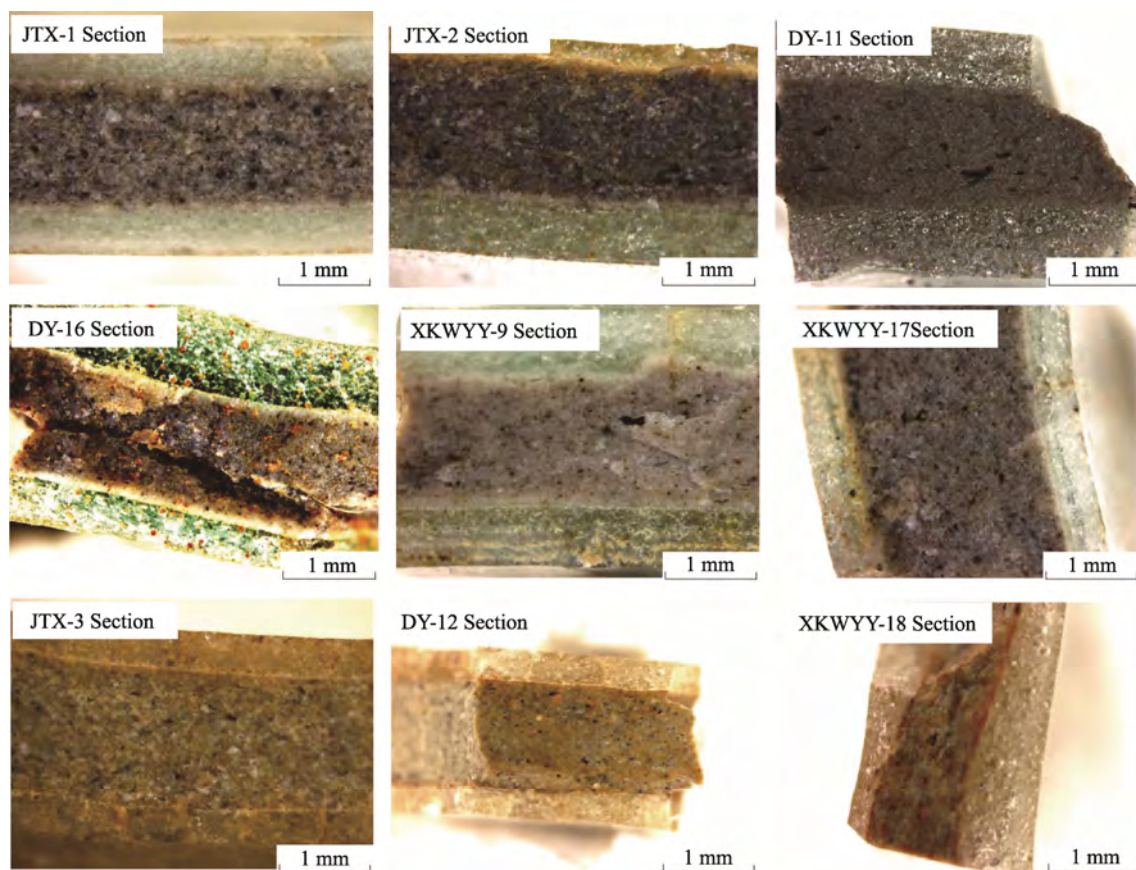


图 2 体视显微镜下南宋官窑与龙泉哥窑断面微观特征

Fig. 2 Cross-sectional stereo microscopic images of the porcelain bodies from the Southern Song Guan Kiln and Longquan Ge Kiln

表 1 体视显微镜下南宋官窑与龙泉哥窑古瓷片瓷胎外观特征

Fig. 1 Appearance characteristics of the ancient shards from the Guan Kiln and Longquan Ge Kiln according to the stereo microscopic images

Specimen number	Device type	Porcelain body appearance
JTX-1	Unknown	Dark gray in color and loose in microstructure, with a thickness of about 1.8 mm
JTX-2	Unknown	Black in color and loose in microstructure, with a thickness of about 2.0 mm
JTX-3	Bowl	Gray in color and loose in microstructure, with a thickness of about 2.1 mm and branch marks at the bottom
DY-11	Bowl	Black in color and dense in microstructure, with a thickness of about 1.9 mm
DY-12	Dish	Dark gray in color and dense microstructure, with a thickness of about 2.5 mm
DY-16	Bowl	Dark gray in color and dense in microstructure, with a thickness of about 2.3 mm
XKWYY-9	Unknown	Dark gray in color and dense in microstructure, with a thickness of about 2.0 mm
XKWYY-17	Plate	Black in color and dense in microstructure, with a thickness of about 3.0 mm
XKWYY-18	Unknown	Dark gray in color and dense in microstructure, with a thickness of about 1.3 mm

2.2 瓷胎的物理性能及显微结构分析

由上述古瓷片形态特征可知，单独从外观上很难将两者瓷片区分开来，即便借助体视显微镜也只能略微观察到两者在瓷胎疏松度上略有区别。为了探究两地瓷片在原料、组成、工艺等方面的异同点，本文进一步对上述古瓷片进行了物理性能及显微结构的测试分析。

古代制瓷工匠通过调整投柴密度来控制龙窑的升温速率及窑内气压，各通风孔则用来调节龙窑气氛及浓度，而通过观火孔观察火照状态、火焰颜色及匣钵颜色从而判断龙窑的烧成温度。上述诸多烧窑细节在古时全凭经验而行，只不过南宋官窑因其窑炉形制较短，烧成温度和气氛较龙泉青瓷更易把控，因而成品率高于龙泉青瓷诸窑^[6]。加之南宋时期官窑青瓷与龙泉哥窑在制瓷工艺、原料、燃料、窑炉及气候等因素上有所不同，均导致了二者在物理性能及显微结构方面存在着一定的差异。

表 2 为南宋官窑与龙泉哥窑代表性古瓷片(粉青色调及米黄色调)瓷胎的吸水率、显气孔率及体

积密度。
由表 2 可知，南宋官窑瓷胎的吸水率与显气孔率的平均值分别为 2.88%及 5.22%，而龙泉哥窑瓷胎的吸水率与显气孔率的平均值分别为 1.91%及 3.69%，易知南宋官窑瓷胎中的开口气孔率应高于龙泉哥窑瓷胎，使得前者的体积密度反而低于后者。

吸水率、显气孔率及体积密度的高低与瓷胎的烧结情况有密切的关系，因此，需对古瓷片瓷胎做进一步的显微结构分析测试，见图 3^[5]。

瓷胎的致密性跟原料的陈腐、练泥以及瓷胎的烧结程度相关。由图 3 中的(a)-(c)图观察可见，南宋官窑瓷胎中的孔隙率要明显高于龙泉青瓷瓷胎，这可能与龙泉哥窑烧成温度略高于南宋官窑有关^[5, 7]；且南宋官窑与龙泉哥窑的瓷胎中均有大量莫来石晶体出现。从图 3 中的(d)-(f)图可以明显看出，其中，南宋官窑胎体烧结情况较差，胎中分布着大量颗粒状莫来石晶体和石英晶体，玻璃液相较少；相比之下龙泉哥窑胎体玻璃相较多烧结状态较好，胎中大量分布着析出的针状二次莫来石晶体，且石英晶体相对较少。

表 2 南宋官窑与龙泉哥窑瓷胎吸水率、显气孔率、体积密度平均值与标准差
Tab. 2 Mean values and standard deviations of apparent porosity, bulk density, water absorption of the porcelain bodies from the Southern Song Guan Kiln and Longquan Ge Kiln

		Water absorption (%)	Apparent porosity (%)	Bulk density (g/cm ³)
Three pieces of Guanyao in Southern Song Dynasty	Average value	2.88	5.22	2.01
	Standard deviation	1.71	3.73	0.08
Six pieces of Longquan Ge Kilns	Average value	1.91	3.69	2.09
	Standard deviation	1.36	1.97	0.12

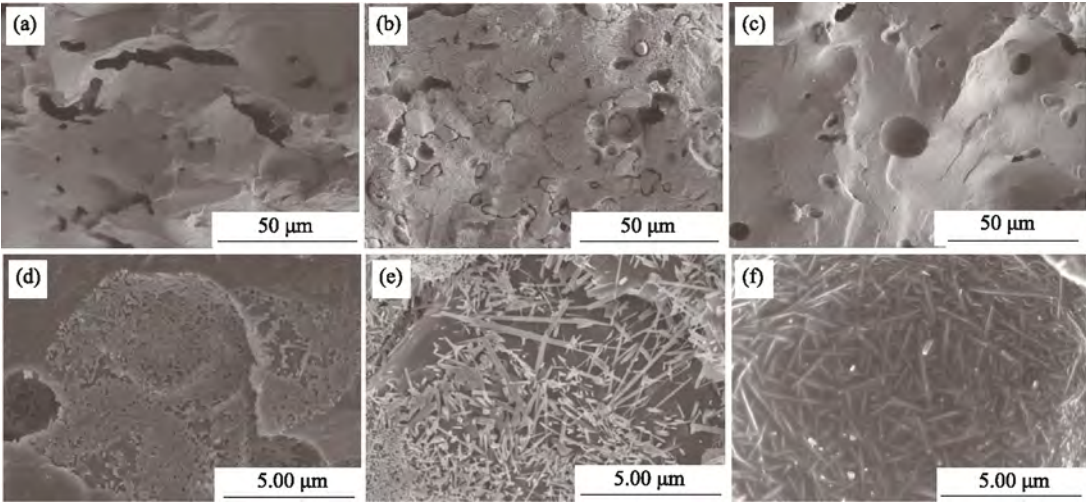


图 3 南宋官窑与龙泉哥窑瓷胎的显微结构：(a) JTX-1, (b) DY-11, (c) XKWYY-9, (d) JTX-1, (e) DY-11, (f) XKWYY-9
Fig. 3 Microstructures of the porcelain bodies from the Southern Song Guan Kiln and Longquan Ge Kiln:
(a) JTX-1, (b) DY-11, (c) XKWYY-9, (d) JTX-1, (e) DY-11 and (f) XKWYY-9

2.3 瓷胎的化学组成分析

表 3 分别列出了南宋官窑与龙泉哥窑瓷胎的主次量元素组成的均值与标准差, 从中可以清晰地看出, 两地青瓷瓷胎在化学组成含量上有明显的区别。其中, 南宋官窑瓷胎 SiO_2 含量平均值为 65.89%, 高于龙泉大窑与溪口瓦窑垟哥窑的瓷胎 SiO_2 含量(平均值分别为 62.54%与 59.53%); 而在 Al_2O_3 含量上, 南宋官窑的平均值为 23.82%, 低于龙泉大窑青瓷与溪口瓦窑垟哥窑的瓷胎 Al_2O_3 含量(平均值分别为 25.65%与 28.73%)。

南宋官窑瓷胎 Fe_2O_3 含量平均值为 2.26%, 低

于龙泉大窑青瓷及溪口瓦窑垟哥窑瓷胎的 Fe_2O_3 含量(平均值分别为 4.09%与 4.12%); 然而 TiO_2 含量上南宋官窑的平均值为 0.76%, 高于龙泉大窑青瓷及溪口瓦窑垟哥窑瓷胎的 TiO_2 含量(平均值分别为 0.42%与 0.37%)。瓷胎的颜色主要受着色氧化物 Fe_2O_3 含量影响, 南宋官窑瓷胎虽然在 Fe_2O_3 含量上是低于龙泉哥窑的, 但两者瓷胎却在颜色上非常接近, 这主要是由于南宋官窑瓷胎的 TiO_2 含量高于龙泉哥窑。 TiO_2 在还原气氛中易转变为紫色的 Ti_2O_3 , 同时 TiO_2 会强烈地影响变价过度元素的呈色, 如与 Fe_2O_3 混合则呈褐色^[8]。

表 3 南宋官窑与龙泉哥窑瓷胎主次量元素化学组成均值与标准差(wt.%)

Tab. 3 Mean values and standard deviations of chemical compositions of the porcelain bodies from Southern Song Guan Kiln and Longquan Ge Kiln (wt.%)

Sample		SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	TiO_2	CaO	MgO	K_2O	Na_2O
JTX 1-3	Average value	65.89	23.82	2.26	0.76	0.35	1.40	4.32	0.19
	Standard deviation	2.33	1.25	0.13	0.15	0.01	0.27	0.68	0.12
DY 1-24	Average value	62.54	25.65	4.09	0.42	0.43	0.86	4.43	0.57
	Standard deviation	2.60	2.19	0.49	0.11	0.33	0.18	0.64	0.38
XKWYY 1-20	Average value	59.53	28.73	4.12	0.37	0.36	0.80	4.68	0.41
	Standard deviation	1.30	1.13	0.30	0.13	0.19	0.19	0.43	0.26

表 4 杭州与龙泉两地制胎原料化学组成(wt.%)

Tab. 4 Chemical compositions of the raw materials in the Hangzhou and Longquan muds (wt.%)

Place of origin	名称	SiO_2	Al_2O_3	CaO	MgO	K_2O	Na_2O	Fe_2O_3	TiO_2	IL
Hangzhou ^[9, 10]	Clay of Wugui mountain	73.56	17.02	0.15	0.25	1.81	0.18	1.03	0.93	5.05
	Purple Gold soil of Wugui mountain	62.65	21.95	0.79	0.24	0.59	0.29	7.80	1.09	-
	Purple Gold soil block of Wugui mountain	58.85	22.40	0.27	0.49	3.16	0.22	7.04	0.76	-
	Porcelain stone of Wugui mountain	78.87	13.30	0.04	0.14	4.00	0.17	0.65	0.07	-
	Limestone of Wugui mountain	1.48	0.79	54.38	0.12	0.20	-	0.53	-	42.49
	Porcelain clay of Dayao	71.66	17.96	0.01	0.22	2.13	0.16	1.63	-	6.06
Longquan ^[11, 12]	Purple Gold soil of Dayao Huangliankeng	45.92	24.77	0.46	0.86	1.53	0.53	13.85	2.00	10.38
	Purple Gold soil of Dayao Gaojitou	66.93	18.01	1.23	0.51	5.23	0.45	3.11	0.45	4.47
	Porcelain clay of Maojiashan	71.82	18.31	-	0.20	4.18	0.21	0.58	-	-
	Limestone of Fulin	2.11	0.01	53.77	0.83	-	-	0.05	-	43.02

据前人研究发现,南宋时期的官窑青瓷与龙泉青瓷瓷胎均采用二元配方即瓷土加一定量紫金土配制而成^[9]。结合表 4 中两地窑址发掘的原料化学组成分析,瓷土的组成方面,杭州乌龟山粘土及瓷石的 SiO_2 含量(分别为 73.56%及 78.87%)均高于龙泉大窑及毛家山瓷土(SiO_2 含量分别为 71.66%及 71.82%),但 Al_2O_3 含量上前者(分别为 17.02%及 13.30%)均低于后者(Al_2O_3 含量分别为 17.96%及 18.31%);紫金土的组成方面,乌龟山紫金土的 SiO_2 含量(62.95%)也高于大窑黄连坑紫金土(45.92%),而 Al_2O_3 含量上前者(21.95%)同样低于后者(24.77%)。通过比较分析可知,两地采用的制胎原料在组成上有较大的区别,与龙泉青瓷的制胎原料相比,南宋官窑的瓷土与紫金土原料均表现出高硅低铝特征。结合表 3 南宋官窑与龙泉哥窑在瓷胎组成上 SiO_2 、 Al_2O_3 含量的差异可推断,由于南宋官窑的制胎原料较龙泉哥窑在组成上表现出高硅低铝的特点,导致了南宋官窑瓷胎的 SiO_2 含量高于龙泉哥窑,而其瓷胎的 Al_2O_3 含量则低于后者。

由图 4 瓷胎的 XRD 图谱可知,南宋官窑与龙泉哥窑胎体的主晶相均为莫来石与石英,其中,南宋官窑胎体中的石英晶体含量高于龙泉哥窑,这可能是由南宋官窑胎中 SiO_2 含量较高所致^[5]。

南宋时期官窑青瓷与龙泉青瓷泥条成形工艺均以轮制拉坯为主,兼带模制、手工捏塑^[9],因此,瓷胎颗粒粗细主要与原料的粉碎、分级有关,特别是与淘洗程度相关。从图 5 的偏光显微镜图片可明显观察到,南宋官窑的胎中含有多个 100 μm 大小的残留石英晶体,而龙泉哥窑的瓷胎残留石英晶体尺寸多为 10 μm -20 μm ,且南宋官窑瓷胎的石英晶体数量远大于龙泉哥窑瓷胎。文献[13]记载,南宋官窑的制瓷工匠迫于为皇族生产贡瓷所带来的巨大压力,除使用微生烧的方式以防止制品因过烧产生变形问题外,可能选用了不同淘洗

程度的原料调和成泥^[14]以提高瓷胎的烧成温度,故残余石英相对较多;而龙泉青瓷瓷胎因高铝低硅的特点,使其能在烧成温度相对高的环境下烧制而不易产生形变。

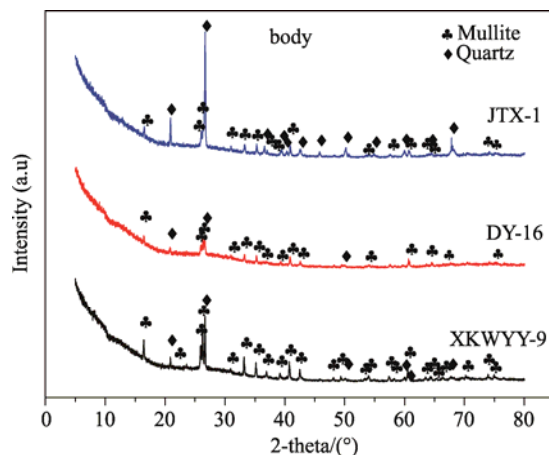


图 4 南宋官窑与龙泉哥窑胎体的 XRD 图谱

Fig. 4 XRD patterns of the porcelain bodies from the Southern Song Guan Kiln and Longquan Ge Kiln

表 5 为南宋官窑与龙泉哥窑瓷胎痕量元素的均值与标准差,从中发现瓷胎化学组成在 Rb_2O 、 ZrO_2 、 P_2O_5 含量上有较大的区别,故就南宋官窑与龙泉哥窑瓷胎的 Rb_2O 、 ZrO_2 、 P_2O_5 化学组成含量做箱式图,如图 6 所示。

由图可见,南宋官窑瓷胎的 Rb_2O 含量明显低于龙泉哥窑(Rb_2O 含量差值约为 100 $\mu\text{g/g}$),而 ZrO_2 含量则明显高于龙泉哥窑(ZrO_2 含量差值约为 150 $\mu\text{g/g}$),与前人研究^[15]结果相符,进一步指明了 Rb、Zr 可以作为区分南宋官窑与龙泉青瓷瓷胎的指纹元素^[16]。并且南宋官窑 P_2O_5 含量亦明显高于龙泉哥窑(P_2O_5 含量差值大于 100 $\mu\text{g/g}$),说明 P 也可能作为区别两地瓷胎的微量元素。上述三个瓷胎微量元素含量的差异都有效反映了两青瓷产地相距甚远,制胎原料均为各自因地制宜、就地取材,故龙泉生产南宋官窑的说法不足为信。

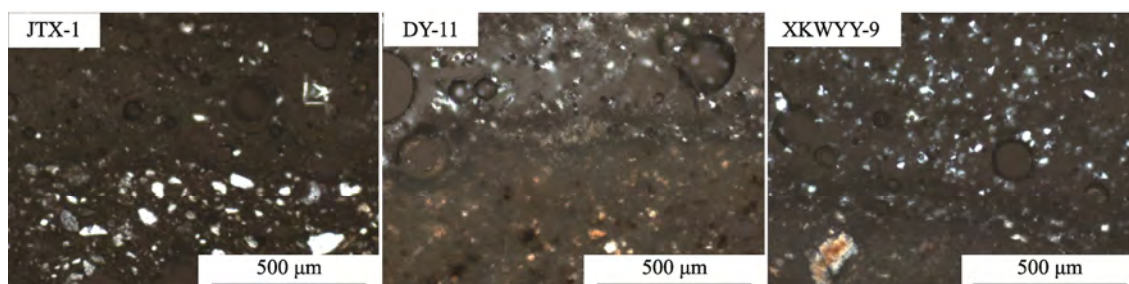
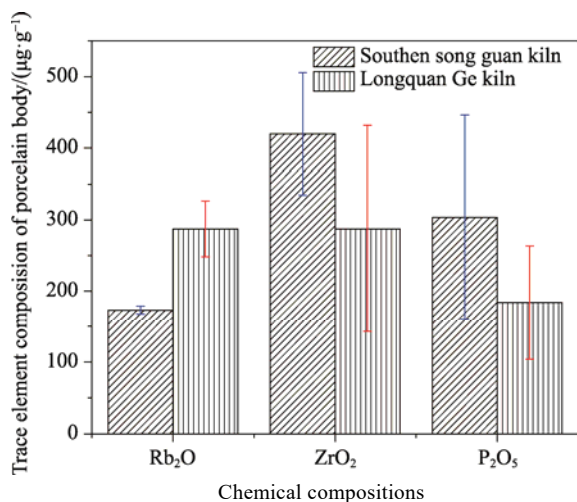


图 5 南宋官窑与龙泉青瓷断面微观特征^[5] (正交偏光)

Fig. 5 Cross-sectional microscopic features of the porcelain bodies from the Southern Song Guan Kiln and the Longquan Ge Kiln^[5] (orthogonal polarization)

表 5 南宋官窑与龙泉哥窑瓷胎痕量元素均值与标准差($\mu\text{g/g}$)Tab. 5 Mean values and standard deviations of chemical compositions (trace elements) of the porcelain bodies from the Southern Song Guan Kiln and the Longquan Ge Kiln ($\mu\text{g/g}$)

Sample		MnO	CuO	ZnO	PbO ₂	Rb ₂ O	SrO	Y ₂ O ₃	ZrO ₂	P ₂ O ₅
JTX 1-3	Average value	187	80	83	47	173	63	33	420	303
	Standard deviation	21	16	21	9	5	5	5	70	117
DY 1-24	Average value	392	41	138	75	283	65	55	275	182
	Standard deviation	96	20	32	44	41	44	12	151	69
XKWYY 1-20	Average value	279	40	122	101	292	65	58	302	186
	Standard deviation	71	25	27	46	35	39	14	131	89

图 6 南宋官窑与龙泉哥窑瓷胎的 Rb₂O、ZrO₂、P₂O₅化学组成含量箱式图($\mu\text{g/g}$)Fig. 6 Contents of Rb₂O, ZrO₂ and P₂O₅ in the porcelain bodies from the Southern Song Guan Kiln and the Longquan Ge Kiln (histogram)

3 结 论

(1) 显微结构测试表明,与龙泉哥窑相比,南宋官窑瓷胎中的石英晶体含量高,且尺寸偏大,多为 100 μm ,莫来石的生长情况较差,胎体结构相对疏松,故吸水率较高。

(2) 化学组成方面,受两地胎用原料在 SiO₂、Al₂O₃ 含量差异的影响,南宋官窑较之龙泉青瓷表现出高硅低铝的特点;在痕量元素中,Rb 的含量明显偏低(差值约为 100 $\mu\text{g/g}$)而 Zr 的含量明显偏高(差值约为 150 $\mu\text{g/g}$),均有效表明两者制胎原料的产地不同。

参考文献:

- [1] 唐俊杰. 祭器, 礼器, “邵局”——关于南宋官窑的几个问题[J]. 故宫博物院院刊, 2006, (6): 45-60+156.
TANG J J. Palace Museum Journal, 2006, (6): 45-60+156.
- [2] 邓禾颖. 南宋官窑探微——对南宋官窑若干问题的回顾与思考[J]. 东南文化, 2003, (5): 69-72.
DENG H Y. Southeast Culture, 2003, (5): 69-72.
- [3] 施群. 南宋龙泉窑制瓷工艺与艺术风格的探究[J]. 中国陶瓷工业, 2018, 25(3): 20-26.
SHI Q. China Ceramic Industry, 2018, 25(3): 20-26.
- [4] NIGEL W, LI H, ZHOU S H. Some remarkable Southern Song "Guan Type" shards from the Silongkou Kiln site [C]. 宋代五大名窑科学技术国际学术讨论会论文集, 2015: 115-125.
- [5] 于欢, 李其江, 包启富, 等. 南宋时期官窑青瓷与龙泉青瓷的对比分析[J]. 中国陶瓷, 2019, 55(6): 47-54.
YU H, LI Q J, BAO Q F, et al. China Ceramics, 2019, 55(6): 47-54.
- [6] 吴隽. 陶瓷科技考古[M]. 北京: 高等教育出版社, 2012.
- [7] 段鸿莺, 李合, 王光尧. 浙江龙泉哥窑与杭州老虎洞官窑青瓷瓷片的对比研究[C]. 宋代五大名窑科学技术国际学术讨论会论文集, 2015: 187-197.
- [8] 戴长禄, 杨勇, 杨明. 钛在建筑陶瓷坯体、釉料及微晶玻璃中的作用与影响[J]. 佛山陶瓷, 2011, 21(2): 35-40.
DAI C L, YANG Y, YANG M. Foshan Ceramics, 2011, 21(2): 35-40.
- [9] 王芳. 南宋时期龙泉窑与官窑的比较性研究[D]. 中央民族大学, 2012.
- [10] 周少华, 陈全庆. 杭州南宋郊坛下官窑原料的研究[J]. 中国陶瓷, 1994, (2): 58-62.
ZHOU S H, CHEN Q Q. China Ceramics, 1994, (2):

- 58-62.
- [11] 李国桢, 叶宏明. 龙泉青瓷釉的研究[J]. 硅酸盐学报, 1964, (1): 1-13+65-66.
LI G Z, YE H M. Journal of the Chinese Ceramic Society, 1964, (1): 1-13+65-66.
- [12] 李家治. 中国科学技术史(陶瓷卷)[M]. 北京: 科学出版社. 1998.
- [13] 叶宏明, 叶国珍, 边坤永, 等. 南宋官窑莹青金丝纹片釉瓷的研究与仿制(续)[J]. 河北陶瓷, 1988, (2): 7-13.
YE H M, YE G Z, BAIN K Y, et al. Hebei Ceramics, 1988, (2): 7-13.
- [14] 李合, 侯佳钰, 丁银忠, 等. 南宋官窑制胎原料的科技分析——兼谈制瓷工艺对锶同位素比值的影响[J]. 中国陶瓷, 2016, 52(8): 116-121.
LI H, HOU J Y, DING Y Z, et al. China Ceramics, 2016, 52(8): 116-121.
- [15] 周少华, 苗建民, 骆明明, 等. 浙江地区出土宋代薄胎厚釉青瓷的 EDXRF 研究. 宋代五大名窑科学技术国际学术讨论会论文集[C]. 北京: 科学出版社, 2015.
- [16] 周少华, 付略, 梁宝鏊. EDXRF 微量元素分析在文物断源断代中的研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2008, 28(5): 1181-1185.
ZHOU S H, FU L, LIANG B L. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2008, 28(5): 1181-1185.