龙泉青瓷胎釉成分特征研究 *

故宫博物院　浙江省文物考古研究所　龙泉青瓷博物馆

内容提要　为揭示浙江龙泉窑不同时期青瓷的胎、釉成分特征及时代发展规律，探讨龙泉南区与东区窑址产品之间的技术传播发展关系，本次研究采用能量色散 X 射线荧光－光谱仪（EDXRF）对龙泉南区的叶坞底窑、岙底窑、枫洞岩窑、金村窑、大窑犇窑以及东区的源口窑、周垟窑和岭脚窑八个不同窑口和不同时期烧制的龙泉青瓷胎、釉元素组成含量进行了测试分析。本工作不仅为科学认识龙泉青瓷胎釉成分特征和时代发展规律提供了科学数据，同时也为相关遗址出土的龙泉类青瓷标本甚至外销青瓷的产地判别提供了新的参考数据。

关键词　龙泉窑　南区　东区　成分特征　产地判别

一　引言

龙泉窑是我国著名的瓷窑之一，在中国陶瓷史上占有重要地位‹1›，除供给民用外，还曾外销、供御‹2›。考古工作者对龙泉地区不同时期青瓷窑址进行的持续不断科学发掘工作，极大地丰富了对龙泉窑的科学认识，对龙泉窑的断源断代研究具有极其重要的意义‹3›。考古发掘表明，龙泉青瓷自北宋中期以后逐渐形成了自己独特的风格；南宋时期龙泉青瓷质量有了显著提高，特别南宋后期烧制出了粉青、梅子青等青翠娇艳的釉色，使龙泉青瓷达到极盛；元代龙泉窑的生产规模进一步扩大，其烧制工艺、器型和装饰方面均有所创新；到了明代中期后，龙泉青瓷的质量渐趋粗糙，逐渐淡出朝廷的视野‹4›。龙泉地区烧制青瓷的窑口众多，其中以大窑、金村和溪口为代表的南区一带窑场最多、最密，其产品质量也最优。位于龙泉东区的安仁、安福等地的瓷窑厂亦烧制了大量青瓷产品以供国内外市场的需求。

为揭示龙泉地区青瓷的制作工艺特征和发展规律，诸多研究单位和学者从胎釉元素组成、显微结构

*　本研究得到了国家自然科学基金（项目编号：51702054和51402054）的资助。

‹1›　中国硅酸盐学会编：《中国陶瓷史》，文物出版社，2009年7月。

‹2›　王光尧：《从大窑到故宫——元、明皇宫用龙泉青瓷产地的确定》，《紫禁城》2007年第5期。

‹3›　朱伯谦、汪士伦：《浙江省龙泉青瓷窑址调查发掘的主要收获》，《文物》1963年第1期；朱伯谦：《龙泉大窑古瓷窑遗址发掘报告》，《龙泉青瓷研究》页38－67，文物出版社，1989年；浙江省文物考古研究所：《龙泉东区窑址发掘报告》，文物出版社，2005年。

‹4›　沈岳明：《中国青瓷史上的最后一个亮点——大窑枫洞岩明代龙泉窑址考古新发现》，《紫禁城》2007年第5期。

以及呈色机理等多方面对龙泉青瓷进行了深入研究[1]，并与南宋官窑、越窑等窑址出土的青瓷标本进行了科学对比研究[2]，对认知龙泉青瓷的技术发展水平和地位提供了科学数据。然而，过往的科研工作主要集中于对龙泉南区的大窑、金村以及溪口等相关窑址产品进行的科学研究，而对龙泉东区各个窑口产品的研究相对较少，且缺乏对龙泉南区青瓷与东区青瓷产品之间的横向对比研究。鉴于此，本文采用能量色散X射线荧光－光谱仪(EDXRF)对龙泉南区的大窑叶坞底窑、岙底窑、枫洞岩窑和金村窑、大窑犇窑以及龙泉东区的周垟窑、源口窑和岭脚窑八个窑口采集的青瓷标本进行无损分析，旨在通过对胎、釉元素组成特征的分析，科学系统地揭示龙泉地区不同窑口青瓷的制瓷工艺特征及其时代发展规律，并初步探讨龙泉南区与东区不同窑址青瓷产品之间的技术传播途径。

二　实验样品

实验样品由故宫博物院考古研究所、浙江省文物考古研究所的科研人员赴浙江龙泉地区相关窑址采集所得。其中龙泉南区的窑址有大窑的叶坞底窑、岙底窑和枫洞岩窑，金村的金村窑和大窑犇窑；东区的有源口窑、岭脚窑和周垟窑。样品具体信息详见[表一]，所测八个窑口典型瓷片见〔图一至图八〕。

[表一] 实验样品信息

区域	窑口	时代	数量
龙泉南区	大窑叶坞底窑	南宋至元代	26
	大窑岙底窑	元代中晚期	33
		元末明初	8
	大窑枫洞岩窑	元代	20
		明初	6
	金村窑	南宋晚期	19
		元代	15
	金村大窑犇窑	北宋	9
		南宋	15
		元代	3
龙泉东区	源口窑	元代	20
	岭脚窑	南宋晚期	5
		元代	20
	周垟窑	南宋晚期	2
		元代	20
数量统计			221

‹1› 周仁、张福康、郑永圃：《龙泉历代青瓷烧制工艺的科学总结》，《考古学报》1973年第1期；李家治：《中国科学技术史——陶瓷卷》页286－312，科学出版社，2007年；熊樱菲、何文权等：《历代龙泉青瓷釉的初步研究》，《文物保护与考古科学》2004年第5期。

‹2› 吴隽、罗宏杰等：《越窑、龙泉及南宋官窑青瓷等我国南方青釉名瓷的元素组成模式和显微结构特征研究》，《硅酸盐学报》2009年第8期；吴隽、吴艳芳等：《景德镇仿龙泉青瓷与龙泉青瓷组成特征研究》，《光谱学与光谱分析》2013年第8期。

〔图一〕大窑叶坞底窑瓷片标本

〔图二〕大窑香底窑瓷片标本

〔图三〕大窑枫洞岩窑瓷片标本

〔图四〕金村大窑犇窑瓷片标本

〔图五〕金村窑瓷片标本

〔图六〕龙泉东区源口窑瓷片标本

〔图七〕龙泉东区岭脚窑瓷片标本

〔图八〕龙泉东区周垟窑瓷片标本

三　实验方法与结果

采用美国EDAX公司的EAGLE Ⅲ XXL大样品室能量色散X射线荧光－光谱仪对瓷片标本的胎、釉元素组成含量进行测试。实验测试条件为：主次量元素采用的电压为25KV，电流400uA，束斑0.3mm，测量时间300s，经标准样品校准校正后得到近似定量分析结果。微量元素采用的电压为40KV，电流300uA，束斑0.3mm，测量时间300s，半定量分析结果。所测龙泉八个窑口青瓷胎、釉元素组成含量数据列于[表二]和[表三]。

［表二］ **龙泉七个窑口青瓷标本胎体元素组成含量（wt%）**

窑口	时代	数量		Na_2O	MgO	Al_2O_3	SiO_2	K_2O	CaO	TiO_2	MnO	Fe_2O_3	Rb_2O	SrO	Y_2O_3	ZrO_2
大窑叶坞底窑	南宋至元代	26	平均值	0.16	0.49	22.03	69.21	3.15	0.15	0.13	0.01	2.50	0.0147	0.0038	0.0043	0.0135
			SD	0.10	0.07	1.64	1.86	0.67	0.05	0.04	0.01	0.56	0.0026	0.0017	0.0015	0.0026
大窑岙底窑	元代	33	平均值	0.36	0.46	21.37	69.31	3.92	0.29	0.07	0.03	2.02	0.0206	0.0032	0.0060	0.0128
			SD	0.19	0.10	1.12	1.17	0.43	0.24	0.03	0.02	0.24	0.0023	0.0017	0.0015	0.0026
	元末明初	8	平均值	0.31	0.45	21.13	69.58	4.16	0.11	0.07	0.04	2.03	0.0212	0.0026	0.0056	0.0109
			SD	0.19	0.06	0.74	0.79	0.37	0.06	0.02	0.02	0.22	0.0028	0.0009	0.0010	0.0023
大窑枫洞岩窑	元代	20	平均值	0.32	0.42	21.04	69.73	4.04	0.10	0.07	0.02	2.06	0.0206	0.0032	0.0052	0.0135
			SD	0.24	0.08	0.96	1.02	0.87	0.06	0.04	0.01	0.32	0.0030	0.0015	0.0023	0.0036
	明初	6	平均值	0.21	0.47	20.48	70.01	4.60	0.07	0.07	0.03	2.03	0.0219	0.0035	0.0051	0.0119
			SD	0.14	0.08	0.81	1.00	0.34	0.04	0.03	0.01	0.20	0.0036	0.0010	0.0013	0.0033
金村窑	南宋	19	平均值	0.17	0.48	20.36	71.03	2.76	0.20	0.13	0.01	2.60	0.0152	0.0036	0.0053	0.0178
			SD	0.10	0.07	1.40	1.44	0.31	0.16	0.03	0.00	0.30	0.0018	0.0011	0.0021	0.0029
	元代	15	平均值	0.23	0.53	20.65	70.85	2.51	0.17	0.13	0.00	2.50	0.0138	0.0037	0.0047	0.0173
			SD	0.14	0.10	2.24	2.20	0.27	0.16	0.03	0.00	0.37	0.0013	0.0009	0.0017	0.0026
金村大窑犇窑	北宋	9	平均值	0.23	0.50	18.08	73.50	2.35	0.16	0.24	0.01	2.34	0.0132	0.0037	0.0053	0.0205
			SD	0.16	0.10	1.63	1.87	0.38	0.04	0.10	0.01	0.78	0.0017	0.0013	0.0020	0.0044
	南宋	15	平均值	0.17	0.52	19.59	71.95	2.61	0.10	0.13	0.01	2.43	0.0126	0.0035	0.0050	0.0186
			SD	0.14	0.07	0.92	0.81	0.38	0.06	0.02	0.00	0.24	0.0012	0.0007	0.0016	0.0050
	元代	3	平均值	0.22	0.51	18.55	72.91	2.38	0.20	0.15	0.01	2.65	0.0106	0.0015	0.0049	0.0183
			SD	0.02	0.07	0.99	0.79	0.14	0.03	0.06	0.01	0.29	0.0018	0.0003	0.0020	0.0017
源口窑	元代	20	平均值	0.29	0.42	16.77	74.13	3.94	0.16	0.09	0.02	1.83	0.0213	0.0038	0.0058	0.0150
			SD	0.19	0.12	1.43	1.76	0.49	0.08	0.06	0.01	0.42	0.0033	0.0013	0.0015	0.0032
岭脚窑	南宋	5	平均值	0.22	0.54	16.58	74.52	2.93	0.15	0.26	0.01	2.47	0.0152	0.0043	0.0044	0.0166
			SD	0.21	0.08	1.56	2.61	1.01	0.05	0.20	0.01	0.35	0.0011	0.0009	0.0012	0.0022
	元代	20	平均值	0.31	0.61	18.32	72.02	3.80	0.21	0.18	0.02	2.59	0.0181	0.0042	0.0043	0.0174
			SD	0.24	0.11	1.33	1.57	1.05	0.11	0.07	0.01	0.48	0.0026	0.0011	0.0012	0.0058
周垟窑	南宋	2	平均值	0.17	0.48	18.59	72.21	3.89	0.43	0.14	0.02	2.00	0.0180	0.0039	0.0047	0.0137
			SD	0.24	0.04	2.14	3.59	1.63	0.40	0.03	0.02	0.08	0.0013	0.0006	0.0014	0.0005
	元代	20	平均值	0.27	0.56	17.59	68.28	3.69	0.19	0.17	0.02	2.37	0.0190	0.0050	0.0044	0.0171
			SD	0.19	0.20	4.56	16.23	1.37	0.08	0.08	0.01	0.74	0.0025	0.0010	0.0012	0.0058

［表三］ **龙泉七个窑口青瓷标本釉层元素组成含量（wt%）**

窑口	时代	数量		Na_2O	MgO	Al_2O_3	SiO_2	K_2O	CaO	TiO_2	MnO	Fe_2O_3	Rb_2O	SrO	Y_2O_3	ZrO_2
大窑叶坞底窑	南宋至元代	26	平均值	0.29	0.65	13.54	70.37	3.98	7.10	0.06	0.07	1.15	0.0161	0.0332	0.0040	0.0110
			SD	0.21	0.14	0.90	1.27	0.43	1.03	0.02	0.05	0.23	0.0016	0.0082	0.0012	0.0020
大窑岙底窑	元代	33	平均值	0.53	0.84	13.81	69.42	4.49	6.19	0.08	0.18	1.87	0.0191	0.0356	0.0053	0.0121
			SD	0.29	0.23	1.48	1.63	0.46	1.65	0.02	0.08	0.44	0.0023	0.0086	0.0014	0.0082
	元末明初	8	平均值	0.39	0.82	12.99	70.32	4.61	5.93	0.07	0.17	2.12	0.0195	0.0359	0.0047	0.0114
			SD	0.32	0.15	0.55	1.02	0.37	1.31	0.02	0.04	0.21	0.0015	0.0056	0.0011	0.0018
大窑枫洞岩窑	元代	20	平均值	0.46	0.81	13.70	69.32	4.48	6.79	0.06	0.18	1.77	0.0182	0.0342	0.0050	0.0110
			SD	0.27	0.38	0.75	1.87	0.36	1.40	0.03	0.09	0.45	0.0023	0.0077	0.0012	0.0018
	明初	6	平均值	0.37	1.05	13.52	68.64	4.75	6.87	0.08	0.25	2.11	0.0189	0.0344	0.0059	0.0121
			SD	0.24	0.25	0.52	1.54	0.46	1.50	0.02	0.05	0.18	0.0028	0.0038	0.0011	0.0008

（续表三）

窑口	时代	数量		Na_2O	MgO	Al_2O_3	SiO_2	K_2O	CaO	TiO_2	MnO	Fe_2O_3	Rb_2O	SrO	Y_2O_3	ZrO_2
金村窑	南宋	19	平均值	0.25	1.15	14.85	67.14	3.16	9.37	0.09	0.18	1.45	0.0146	0.0424	0.0070	0.0138
			SD	0.13	0.35	1.51	3.09	0.60	2.57	0.05	0.07	0.39	0.0020	0.0075	0.0025	0.0038
	元代	15	平均值	0.19	1.25	13.99	67.46	3.06	10.25	0.11	0.22	1.24	0.0131	0.0425	0.0057	0.0156
			SD	0.18	0.23	0.88	2.16	0.59	2.41	0.04	0.07	0.40	0.0033	0.0126	0.0017	0.0040
金村大窑犇窑	北宋	9	平均值	0.31	1.54	13.73	67.95	2.60	9.23	0.16	0.26	1.59	0.0146	0.0345	0.0054	0.0230
			SD	0.17	0.54	1.25	2.39	0.67	1.53	0.05	0.06	0.66	0.0018	0.0100	0.0013	0.0114
	南宋	15	平均值	0.20	1.10	13.84	68.46	3.35	8.99	0.09	0.19	1.21	0.0140	0.0413	0.0064	0.0162
			SD	0.13	0.20	1.41	2.34	0.42	1.67	0.03	0.08	0.29	0.0029	0.0075	0.0016	0.0049
	元代	3	平均值	0.20	1.20	13.62	68.47	2.82	9.48	0.12	0.22	1.10	0.0134	0.0382	0.0066	0.0165
			SD	0.04	0.39	0.85	4.34	0.43	4.65	0.07	0.06	0.33	0.0029	0.0129	0.0015	0.0018
源口窑	元代	20	平均值	0.40	1.23	13.45	68.92	3.95	7.23	0.09	0.26	1.76	0.0193	0.0395	0.0068	0.0159
			SD	0.20	0.24	0.89	1.40	0.38	1.22	0.01	0.05	0.45	0.0022	0.0052	0.0016	0.0023
岭脚窑	南宋	5	平均值	0.21	1.58	13.51	67.25	3.09	9.65	0.14	0.27	1.99	0.0148	0.0486	0.0050	0.0137
			SD	0.16	0.30	0.52	1.54	0.71	2.01	0.07	0.06	0.49	0.0018	0.0073	0.0012	0.0032
	元代	20	平均值	0.27	1.35	13.49	68.11	3.19	8.76	0.12	0.21	2.12	0.0160	0.0366	0.0055	0.0161
			SD	0.16	0.32	0.91	1.75	1.07	1.68	0.05	0.06	0.66	0.0028	0.0101	0.0018	0.0042
周坪窑	南宋	2	平均值	0.29	1.19	13.07	68.79	3.92	8.72	0.07	0.17	1.31	0.0115	0.0577	0.0063	0.0115
			SD	0.28	0.06	0.53	1.00	0.41	1.19	0.01	0.04	0.01	0.0025	0.0049	0.0008	0.0008
	元代	20	平均值	0.25	1.40	13.61	68.13	3.21	8.44	0.12	0.23	2.02	0.0165	0.0377	0.0058	0.0155
			SD	0.23	0.36	0.68	1.36	0.91	1.78	0.03	0.04	0.35	0.0036	0.0093	0.0021	0.0053

四　分析讨论

（一）龙泉青瓷胎体的成分特征规律

明代陆容《菽园杂记》记载：“青瓷初出于刘田，去县六十里。次则有金村窑，与刘田相去五里余。外则白鹰、梧桐、安仁、安福、绿绕等处皆有之。然泥、油（釉）精细，模范端巧，俱不若刘田。泥则取于窑之近地。其他处皆不及。”‹1›由此文献可知，古代窑工认为龙泉大窑地区的制瓷原料最好，金村次之；而处于龙泉东区的窑厂周边的制瓷原料则更次之。

根据[表二]可知，来自龙泉南区大窑地区的叶坞底窑、岙底窑和枫洞岩窑不同时期的青瓷胎体中氧化铝和氧化硅平均含量为21.38%和69.44%，来自金村地区的金村窑和大窑犇窑的则分别为19.82%和71.65%，而来自东区的源口窑、周坪窑和岭脚窑的青瓷胎体中氧化铝和氧化硅的平均含量仅为17.51%和71.73%。显然，龙泉大窑地区烧制的青瓷胎体中氧化铝含量最高，金村次之，东区最低〔图九〕。研究表明，由于氧化铝能显著提高胎体的耐火度和热稳定性，使胎体在高温烧成过程中不易变形‹2›，如景德

‹1›　（明）陆容：《菽园杂记》卷一四，页176—177，中华书局，1985年。

‹2›　李家驹主编：《陶瓷工艺学》页420，中国轻工业出版社，2009年。

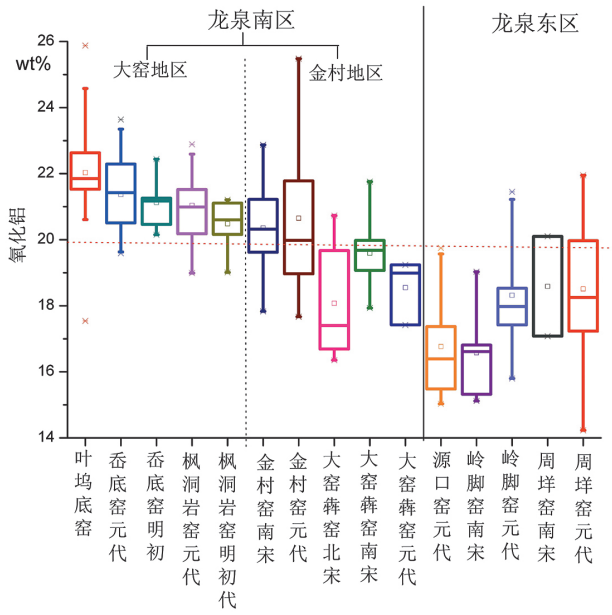
镇元、明、清历代青花瓷器胎体中氧化铝含量就有逐渐升高的趋势‹1›，因此，从胎体中的氧化铝含量来看，龙泉大窑地区的制瓷原料更耐高温，胎体在烧制过程中不易变形。

此外，据[表二]可知，龙泉南区大窑地区的叶坞底窑、岙底窑、枫洞岩窑青瓷胎体中氧化钛和氧化铁平均含量为0.09%和2.15%，金村地区的金村窑和大窑犇窑的分别为0.14%和2.49%，而来自东区源口窑、周垟窑和岭脚窑的分别为0.15%和2.27%。对比可知，大窑地区烧制的青瓷胎体中氧化钛和氧化铁含量最低，金村和东区相关窑址的则相对较高〔图十〕。氧化钛和氧化铁是能引起胎体显色的杂质，随着铁、钛含量的升高，其还原气氛下烧后的胎体颜色逐渐由白转变成青灰甚至黑色‹2›。对于龙泉白胎青瓷而言，其制瓷原料中氧化钛和氧化铁含量显然越低越好。从钛、铁含量角度而言，大窑地区的制瓷原料亦是最好。

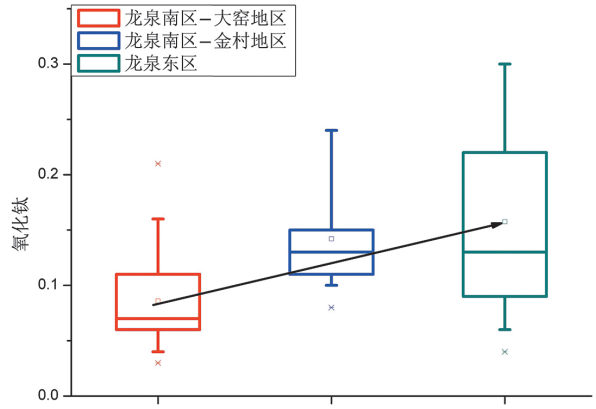
（二）龙泉青瓷的制釉技术

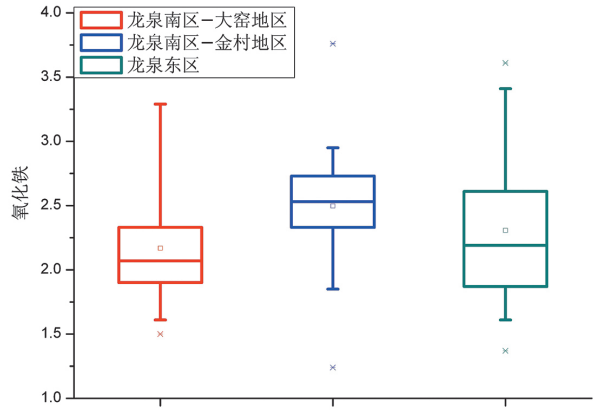
从[表三]可以看出，龙泉青瓷呈现出一定的时代发展规律和区域特征。其中龙泉南区青瓷从北宋、南宋早中期、南宋晚期至元早期、元代中晚期直至明代，其釉中氧化钙的平均含量分别为9.23%、8.99%、7.10%、7.30%和6.33%，即氧化钙含量呈逐渐降低的趋势〔图十一〕；而釉中氧化钾的变化则与氧化钙相反，从北宋、南宋、南宋至元代、元代直至明代，平均含量分别为2.60%、

〔图九〕所测龙泉青瓷胎体中氧化铝含量箱式图



〔图十〕所测龙泉青瓷胎体中氧化钛和氧化铁含量箱式图

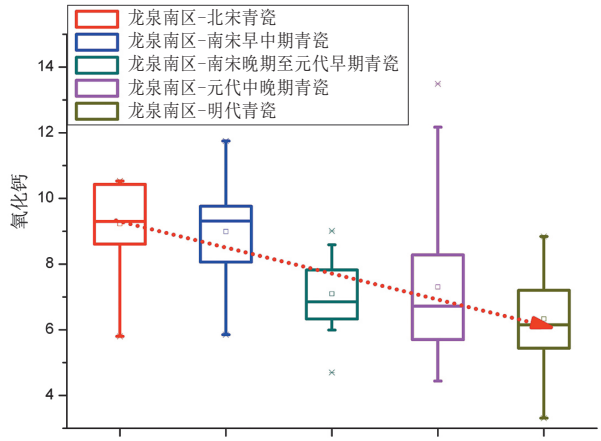




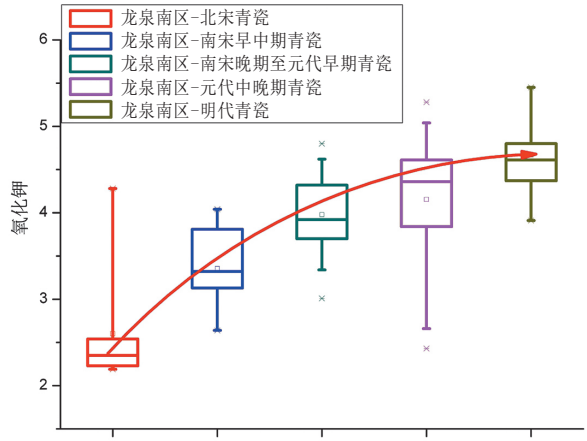
‹1› 吴隽、李家治等：《中国景德镇历代官窑青花瓷的断代研究》，《中国科学E辑・工程科学 材料科学》2004年第5期。

‹2› 李家驹：《陶瓷工艺学》页27，中国轻工业出版社，1999年。

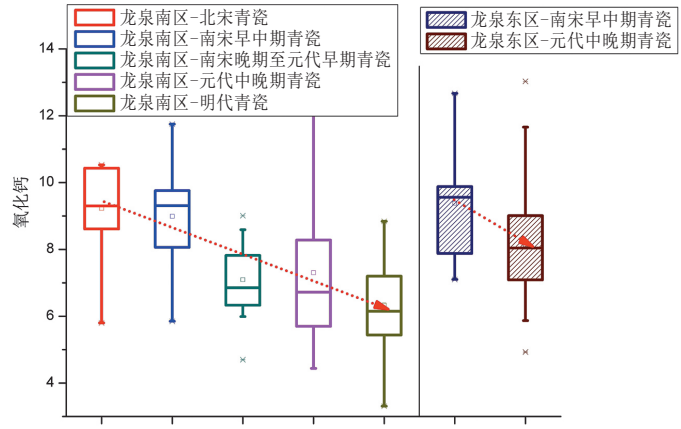
〔图十一〕所测龙泉南区青瓷釉中氧化钙含量箱式图



〔图十二〕所测龙泉南区青瓷釉中氧化钾含量箱式图



〔图十三〕龙泉南区和东区青瓷釉中氧化钙含量箱式图



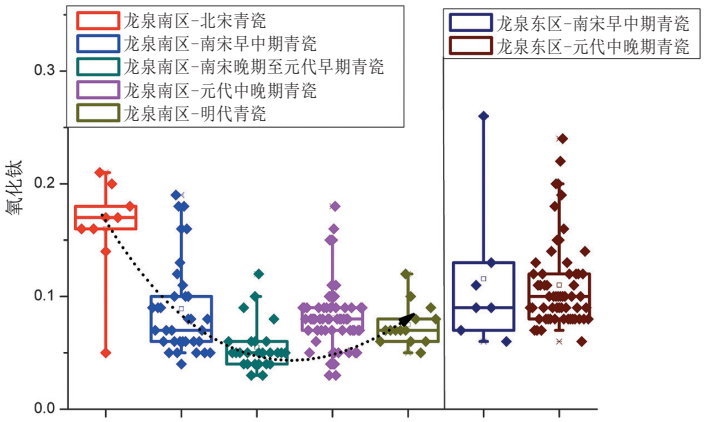
3.35%、3.98%、4.15%和4.67%，即呈逐渐升高的趋势〔图十二〕。这表明从北宋直至明初，瓷石类原料的用量不断提高，而钙质助熔原料的引入量则不断降低。

相比之下，龙泉东区青瓷釉的成分特征与发展规律与龙泉南区暨存在相似性、又存在差异性，具体表现在龙泉东区青瓷从南宋至元代，氧化钙含量亦呈现逐渐降低的趋势。龙泉东区南宋和元代青瓷釉中氧化钙平均含量均要略高于同时代龙泉南区的青瓷中钙的含量〔图十三〕。根据我国瓷釉的一般发展规律以及结合龙泉南区青瓷的时代发展规律可知，龙泉东区烧制的青瓷产品的演变速率比龙泉南区青瓷相对迟缓。总体而言，龙泉南区青瓷和东区青瓷釉随时代发展由一般的高钙釉向钙碱釉逐渐转变，均符合我国南北方瓷釉的时代发展规律[1]。

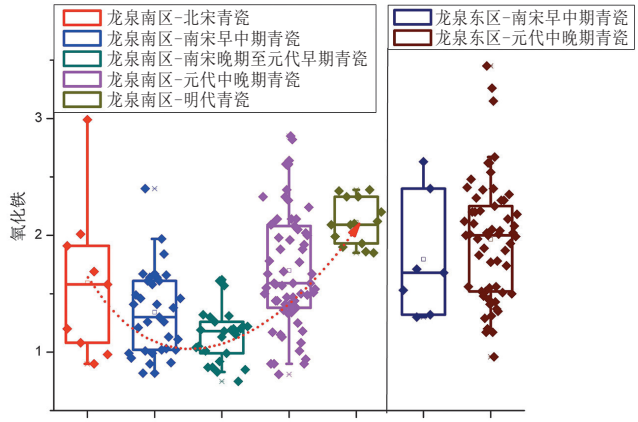
根据[表三]和〔图十四，图十五〕可知，龙泉南区青瓷从北宋、南宋早中期、南宋晚期至元代早期(叶坞底窑)、元代中晚期直至明初，其釉中氧化钛的平均含量分别为0.16%、0.09%、0.06%、0.08%、0.07%和0.12%，即随着时代早晚，釉中氧化钛含量经历了由高至低再变高的过程；釉中氧化铁的平均含量则分别为1.59%、1.34%、1.15%、1.70%、2.11%、1.80%和1.97%，即随着时代早晚，釉中氧化铁含量亦经历了由高至低再变高的过程。氧化铁含量的高低直接影响青瓷的呈色，英国武德教授的实验表明，如果釉中

‹1› 罗宏杰、李家治等：《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》，《硅酸盐通报》1995年第2期。

〔图十四〕龙泉南区和东区青瓷釉中氧化钛含量箱式图



〔图十五〕龙泉南区和东区青瓷釉中氧化铁含量箱式图



氧化钛的含量较高时，釉色则易偏灰，很难烧成颜色很正的天青、粉青色来[1]，即氧化钛含量的降低有利于青瓷釉色变得更加纯正。从这一角度而言，南宋时期的釉料配方显然优于北宋时期以及元代、明代青瓷的釉料配方。位于大窑地区的叶坞底窑烧制的青瓷釉中氧化钛和氧化铁含量最低，这表明大窑地区对釉料的选择和处理更加精细。相对而言，龙泉东区窑口烧制的青瓷釉中氧化钛和氧化铁含量则相对较高，由此可知龙泉东区的青瓷产品质量略次于南区青瓷，当与窑址所在地周边的制瓷原料质量密切相关。

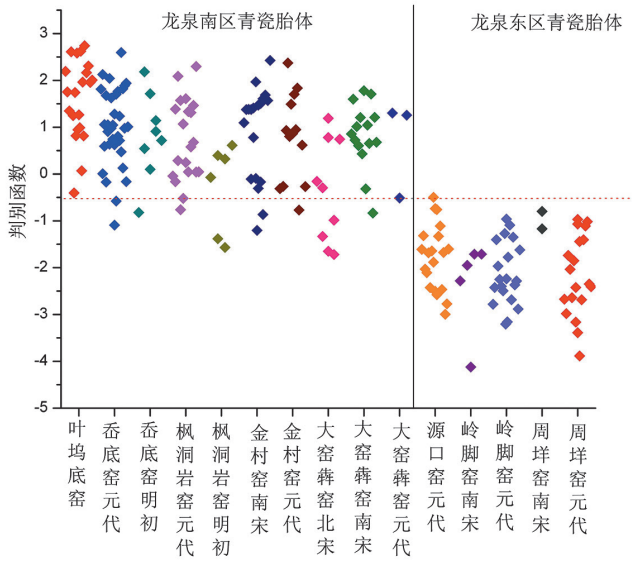
（三）龙泉南区与东区产品的区域特征

宋元时期龙泉窑产品不仅满足国内的大量需求，还畅销海外。由于龙泉青瓷的大量输出，在亚洲、非洲许多国家都发现有遗存，并且陆续地被发掘出来。据统计，目前发现有龙泉青瓷出土的国家有亚洲的日本、韩国、越南、泰国、新加坡、菲律宾、印度尼西亚、马来西亚、文莱、斯里兰卡、印度、伊朗、伊拉克和阿拉伯半岛诸国，非洲的有埃及、坦桑尼亚、马达加斯加和肯尼亚等国，欧洲的有法国和俄罗斯等国[2]。这些海外遗址出土了大量的龙泉青瓷以及仿龙泉青瓷标本，科学鉴别出这些标本的产地甚至定位出具体的烧制窑口极为重要。本工作采用Spss软件中的判别分析方法对龙泉窑南区和东区青瓷标本的胎体成分数据进行分析，得到〔图十六〕。从〔图十六〕可知，建立的判别分析方法基本上可将龙泉南区和东区青瓷进行区分。这为相关遗址出土龙泉类青瓷标本甚至外销青瓷产地窑口的精准定位提供了科学依据。

‹1› Nigel Wood, *Chinese Glazes, – their Chemistry, Origins and Recreation*, University of Pennsylvania Press and A & C Black, London, 1999, 159-160.

‹2› Ran Zhang, *An Exploratory Quantitative Archaeological Analysis and the Classification of Chinese Ceramics Trade in the Western Indian Ocean, AD c. 800-1500*, Durham University. 2016.

〔图十六〕龙泉南区和东区青瓷标本胎体的判别分析函数



四　研究结论

(1)测试表明龙泉大窑地区青瓷胎体中氧化铝平均含量最高，而氧化钛和氧化铁含量则最低；金村地区的青瓷和龙泉东区窑址青瓷胎体中氧化铝含量则依次降低，而氧化钛和氧化铁含量则相对较高。本工作科学证明了大窑地区所用制瓷原料最好，金村次之，而龙泉东区相关窑址烧制的青瓷原料则更次之。

(2)龙泉青瓷从北宋直至明初，其釉中氧化钙含量逐渐降低、氧化钾含量逐渐升高，即龙泉青瓷逐渐由钙釉向钙碱釉发生转变。

(3)釉中氧化钙含量变化趋势表明，龙泉东区青瓷的演变发展相对迟缓，且釉中氧化钛和氧化铁含量相对较高。整体而言，龙泉东区青瓷产品的质量略次于南区青瓷。

(4)判别分析基本可定位出龙泉南区和东区青瓷产品的烧制区域，这为今后相关遗址出土的龙泉类青瓷标本甚至外销青瓷的窑口溯源研究提供了科学数据。

（执笔人：李合、翟毅、郭子莉、吴明俊、裘晓翔、沈岳明、史宁昌、王光尧）

（责任编辑：何　芳）