

宋元明时期龙泉窑青瓷胎釉成分 和烧成温度的测定研究 *

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 本文以龙泉金村地区大窑彝窑和大窑地区枫洞岩窑北宋至明代青瓷标本为研究对象,探讨龙泉窑青瓷胎釉的元素组成和胎体的烧成温度及其时代发展规律。初步研究表明:(1)龙泉窑青瓷胎体元素组成大致于北宋至元代呈现 Al_2O_3 含量逐渐升高而明代又略有降低的趋势。元代青瓷胎体中 Al_2O_3 含量提高,是当时能够大规模生产大花瓶和大盘的重要原因之一。(2)龙泉窑青瓷釉料配方于北宋至南宋基本属于钙釉,元代则大规模出现钙碱釉料配方。(3)北宋和南宋时期龙泉窑青瓷胎体的烧成温度比较接近且波动范围较小,基本处在 $1220 - 1310^\circ\text{C}$ 间。元明时期龙泉窑青瓷质量有优劣两类产品:一类产品烧成温度较高,与两宋时期接近;另一类烧成温度较低,约为 1150°C 左右。

关键词 龙泉窑 青瓷 元素组成 烧成温度

一 引言

龙泉市是龙泉窑的中心分布区,目前保存的窑址超过300处,规模庞大。按照窑址的地域分布,可分为龙泉东区与龙泉南区两大部分,以龙泉南区为核心。龙泉南区又以大窑为核心,大窑龙泉窑遗址位于龙泉市南40公里处的琉华山下大窑村一带,是龙泉窑的起源地和中心产区。大窑龙泉窑遗址包含大窑、金村(含上垟)、石隆和溪口四大片区,约有160处窑址^{〔1〕}。金村地区是龙泉窑早期的生产中心,目前可确定的有大窑彝、后岙、溪东、屋后山及庆元的上垟等8处窑址,其中以大窑彝窑址最为集中,堆积最厚,序列最完整,产品质量最高,种类也最为丰富,产品时代涵盖北宋至元代^{〔2〕}。2006年9月至2007年1月,浙江省文物考古研究所、北京大学考古文博学院和龙泉青瓷博物馆联合对龙泉窑大窑地区的枫洞岩窑址进行了考古发掘,发掘面积160多平方米,发现了一系列的作坊遗迹,出土了大量的窑具和瓷片,

* 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〕 郑建明、谢西营、周光贵等:《浙江龙泉金村青瓷窑址调查简报》,《文物》2018年第5期,页26—43。

〔2〕 同上。

出土器物的年代涵盖元代晚期至明代早中期^{〔1〕}。鉴于此，本文选择金村地区的大窑彝窑和大窑地区的枫洞岩窑分别作为龙泉青瓷北宋至南宋时期的样本，作为元至明代时期的主要代表，测定两个窑址出土标本的胎、釉元素组成和胎体的烧成温度，以揭示龙泉窑青瓷胎、釉元素组成和烧成工艺的时代发展规律。上述两个时期的检测数据为探讨龙泉窑青瓷技术发展史提供了数据支持。

二 样品及测试方法

（一）样品

本文选取龙泉金村地区大窑彝窑和大窑地区枫洞岩窑的青瓷为研究对象，时代涵盖北宋、南宋、元和明代，所有标本共53个。大窑彝窑标本27个，其中北宋标本9个，南宋标本15个，元代标本3个。枫洞岩窑标本26个，其中元代标本14个，明代标本6个，垫饼5个，匣钵1个。

（二）测试方法及结果

采用美国EDAX公司EAGLE III XXL大样品室能量色散X射线荧光—光谱仪对大窑彝窑和枫洞岩窑标本的胎、釉元素组成含量进行测试。实验测试条件为：主、微量元素采用的电压为25KV，电流600uA，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，测定数据分别见[表一]和[表三]。利用所有标本釉的元素组成数据，分别依据釉式计算公式^{〔2〕}计算各氧化物的摩尔含量值，并计算其釉的b值，其中b为木灰釉式系数，计算公式为 $b = n_{RO} / n_{(RO+R_2O)}$ ，RO为碱土金属氧化物(CaO+MgO)，R₂O为碱金属氧化物(Na₂O+K₂O)^{〔3〕}，将其与测定的釉元素组成中各氧化物含量一起，分别列入[表二]和[表四]中。

运用德国耐驰公司DIL402C型热膨胀仪测定大窑彝窑和枫洞岩窑标本胎体的重烧热膨胀曲线，测试条件如下：样品尺寸为25mm×5mm×5mm，测试升温速率为5℃/min，吹扫气为氮气，流量为50ml/min。运用李家治^{〔4〕}先生的热膨胀仪法判定胎体的烧成温度，即重烧热膨胀曲线拐点法，所测结果如[表五]所示。

〔表一〕 龙泉金村地区大窑彝窑青瓷标本胎体元素组成（wt%）

时代	编号	Na ₂ O	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	K ₂ O	CaO	TiO ₂	MnO	Fe ₂ O ₃
北宋	DYB-6	0.23	0.58	17.42	73.81	2.29	0.18	0.21	0.01	2.90
	DYB-7	0.19	0.60	20.73	70.20	2.10	0.21	0.35	0.00	3.76

〔1〕 沈岳明、秦大树、施文博等：《龙泉窑枫洞岩窑址考古发掘学术座谈会纪要》，《文物》2007年第5期。
〔2〕 李家驹：《陶瓷工艺学》页176—180，中国轻工业出版社，2001年。
〔3〕 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》，《硅酸盐通报》1995年第2期。
〔4〕 周仁、李家治：《景德镇历代瓷器胎、釉和烧制工艺的研究》，《中国古陶瓷研究论文集》页134—149，1982年。

(续表一)

时代	编号	Na ₂ O	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	K ₂ O	CaO	TiO ₂	MnO	Fe ₂ O ₃
	DYB-8	0.00	0.48	16.37	75.67	1.92	0.20	0.23	0.01	2.44
	DYB-9	0.24	0.51	16.69	74.63	2.32	0.14	0.24	0.01	2.83
	DYB-10	0.15	0.52	16.35	75.46	1.90	0.14	0.25	0.00	2.53
	DYB-11	0.54	0.67	17.40	73.18	2.95	0.18	0.19	0.00	2.58
	DYB-12	0.41	0.54	18.52	73.44	2.31	0.21	0.16	0.01	1.24
	DYB-13	0.21	0.47	19.70	71.96	2.29	0.12	0.43	0.01	1.99
	DYB-14	0.20	0.38	17.27	75.03	2.41	0.09	0.16	0.00	1.27
南宋	DYB-15	0.31	0.54	20.40	71.41	2.09	0.23	0.12	0.01	2.33
	DYB-16	0.15	0.54	17.93	73.23	3.21	0.09	0.16	0.02	2.21
	DYB-17	0.13	0.61	21.76	69.75	2.72	0.14	0.18	0.00	2.03
	DYB-19	0.00	0.67	20.06	71.78	2.52	0.08	0.14	0.01	2.07
	DYB-20	0.20	0.58	19.92	71.71	2.43	0.06	0.13	0.01	2.41
	DYB-21	0.00	0.50	19.98	72.07	2.13	0.17	0.13	0.01	2.40
	DYB-22	0.20	0.46	19.68	71.49	3.16	0.12	0.12	0.01	2.57
	DYB-23	0.42	0.51	19.57	71.67	2.67	0.06	0.13	0.01	2.51
	DYB-25	0.39	0.49	18.23	72.84	3.34	0.04	0.11	0.01	2.18
	DYB-24	0.23	0.55	18.73	72.36	2.78	0.06	0.15	0.01	2.79
	DYB-29	0.21	0.42	19.07	72.67	2.38	0.06	0.11	0.01	2.49
	DYB-30	0.00	0.44	19.89	72.13	2.27	0.09	0.11	0.01	2.35
	DYB-31	0.00	0.48	19.28	72.47	2.40	0.11	0.11	0.01	2.73
	DYB-32	0.00	0.53	19.94	71.55	2.61	0.19	0.10	0.01	2.74
	DYB-33	0.27	0.43	19.45	72.15	2.45	0.05	0.13	0.01	2.67
元代	DYB-1	0.23	0.52	18.99	72.39	2.55	0.20	0.10	0.01	2.72
	DYB-2	0.20	0.44	19.24	72.52	2.31	0.23	0.14	0.00	2.33
	DYB-3	0.11	0.34	19.67	71.90	2.92	0.15	0.13	0.01	2.41

[表二] 龙泉金村地区大窑群窑青瓷标本釉的元素组成 (wt%)

时代	编号	Na ₂ O	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	K ₂ O	CaO	TiO ₂	MnO	Fe ₂ O ₃	b
北宋	DYB-6	0.22	1.60	13.86	64.82	2.47	13.41	0.18	0.29	1.47	0.90
	DYB-7	0.41	1.50	12.71	68.03	2.95	10.54	0.17	0.25	1.08	0.86
	DYB-8	0.56	2.34	14.97	65.04	2.19	9.23	0.20	0.36	2.99	0.87
	DYB-9	0.38	1.20	13.45	69.36	2.35	8.40	0.16	0.21	1.69	0.85
	DYB-10	0.00	2.16	14.55	66.99	2.29	8.61	0.17	0.36	2.01	0.89
	DYB-11	0.41	1.11	14.74	66.99	2.38	10.46	0.16	0.20	1.58	0.87
	DYB-12	0.15	1.28	13.35	68.49	2.54	10.32	0.14	0.24	0.98	0.88
	DYB-13	0.35	2.07	14.14	65.80	2.20	10.44	0.21	0.20	1.91	0.89
	DYB-14	0.30	1.39	14.57	67.66	2.23	9.31	0.18	0.22	1.20	0.88
南宋	DYB-15	0.00	1.09	15.55	67.25	2.64	9.60	0.11	0.17	0.82	0.88
	DYB-16	0.30	0.80	14.42	69.04	3.87	7.61	0.06	0.07	0.99	0.77
	DYB-17	0.30	1.09	14.64	66.45	2.70	11.31	0.16	0.15	1.67	0.87
	DYB-19	0.22	1.31	14.73	65.29	2.99	11.76	0.13	0.21	1.41	0.87
	DYB-20	0.00	0.85	10.82	74.23	3.32	5.85	0.06	0.14	0.90	0.78

(续表二)

时代	编号	Na ₂ O	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	K ₂ O	CaO	TiO ₂	MnO	Fe ₂ O ₃	b
	DYB-21	0.15	1.08	15.27	66.81	3.13	9.67	0.10	0.18	1.30	0.85
	DYB-22	0.20	1.28	13.88	67.69	3.38	9.31	0.06	0.28	1.58	0.83
	DYB-23	0.15	0.90	14.11	68.55	3.34	9.07	0.05	0.07	1.26	0.83
	DYB-24	0.21	1.24	14.21	68.84	3.23	8.06	0.08	0.19	1.02	0.82
	DYB-25	0.22	1.00	13.19	68.39	3.93	9.76	0.06	0.30	1.01	0.81
	DYB-29	0.46	1.50	14.95	65.78	3.24	10.44	0.12	0.22	1.26	0.84
	DYB-30	0.26	0.96	14.91	68.23	3.21	8.51	0.10	0.17	0.82	0.82
	DYB-31	0.00	1.28	11.46	70.40	4.04	8.18	0.08	0.40	1.03	0.81
	DYB-32	0.35	0.93	12.17	71.98	3.49	6.10	0.07	0.21	1.46	0.76
	DYB-33	0.19	1.16	13.28	67.95	3.81	9.67	0.10	0.16	1.64	0.82
元代	DYB-1	0.22	0.83	12.68	73.27	3.30	4.34	0.05	0.17	0.85	0.72
	DYB-2	0.15	1.16	14.33	67.32	2.69	10.69	0.12	0.19	0.97	0.88
	DYB-3	0.22	0.77	11.06	73.27	4.28	5.80	0.05	0.27	0.90	0.71

[表三] 龙泉大窑地区枫洞岩窑青瓷标本胎体的元素组成(wt%)

时代	胎体	Na ₂ O	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	K ₂ O	CaO	TiO ₂	MnO	Fe ₂ O ₃
元代	FDY-12	0.39	0.44	20.97	70.13	3.55	0.05	0.05	0.02	1.97
	FDY-14	0.45	0.43	21.14	69.62	4.04	0.18	0.04	0.02	1.92
	FDY-15	0.22	0.42	20.85	69.50	5.36	0.00	0.03	0.03	1.50
	FDY-18	0.13	0.44	19.88	70.95	4.31	0.14	0.06	0.04	1.91
	FDY-20	0.41	0.41	20.74	69.21	5.56	0.02	0.04	0.03	1.61
	FDY-22	1.02	0.56	18.99	70.61	4.66	0.05	0.09	0.03	1.89
	FDY-26	0.53	0.27	21.73	68.90	3.62	0.07	0.18	0.03	2.44
	FDY-29	0.41	0.46	21.84	68.58	4.38	0.15	0.07	0.02	2.13
	FDY-33	0.39	0.41	21.78	69.02	3.91	0.16	0.06	0.02	2.12
	FDY-37	0.00	0.34	21.47	69.72	4.07	0.16	0.06	0.03	2.00
	FDY-41	0.00	0.46	22.59	68.48	4.10	0.09	0.05	0.02	2.07
	FDY-49	0.40	0.38	21.40	69.87	3.35	0.14	0.05	0.04	1.99
	FDY-59	0.35	0.55	19.61	71.02	3.70	0.16	0.08	0.03	2.27
	FDY-60	0.60	0.31	21.28	69.27	4.13	0.19	0.07	0.02	2.00
明代	FDY-1	0.13	0.55	21.21	68.65	5.15	0.08	0.09	0.03	2.39
	FDY-2	0.21	0.32	21.11	69.50	4.78	0.07	0.04	0.03	2.09
	FDY-3	0.08	0.52	19.01	71.54	4.62	0.09	0.13	0.02	1.90
	FDY-4	0.17	0.43	20.60	70.21	4.29	0.13	0.06	0.03	1.89
	FDY-9	0.49	0.48	20.81	69.59	4.51	0.02	0.04	0.05	1.83
	FDY-10	0.20	0.50	20.16	70.56	4.25	0.02	0.08	0.02	2.05
垫饼	FDY-40	0.33	0.45	20.99	69.45	4.97	0.04	0.03	0.03	1.52
	FDY-47	0.21	0.53	21.52	68.83	4.12	0.10	0.16	0.01	2.60
	FDY-50	0.26	0.50	20.18	70.66	3.93	0.08	0.07	0.02	2.03
	FDY-56	0.00	0.34	20.76	70.52	3.86	0.07	0.08	0.02	2.03
	FDY-64	0.08	0.41	22.89	68.14	3.97	0.08	0.07	0.01	2.29
匣钵	FDY-66	0.19	0.35	20.14	72.19	1.27	0.11	0.09	0.01	2.81

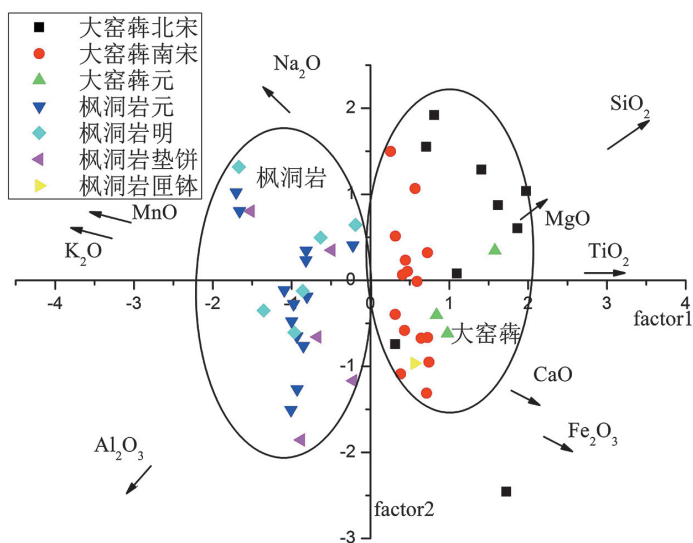
[表四] 龙泉大窑地区枫洞岩窑青瓷标本釉的元素组成 (wt%)

时代	编号	Na ₂ O	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	K ₂ O	CaO	TiO ₂	MnO	Fe ₂ O ₃	b
元	FDY-12	0.85	0.58	12.58	71.15	4.57	6.02	0.04	0.09	1.13	0.66
	FDY-14	0.68	0.45	12.45	71.41	4.38	6.40	0.04	0.16	1.25	0.69
	FDY-15	0.13	1.02	12.90	69.15	4.47	7.93	0.09	0.19	2.02	0.77
	FDY-18	0.42	0.73	14.22	68.97	4.61	6.48	0.08	0.09	2.10	0.71
	FDY-20	0.12	1.40	14.08	67.66	4.23	7.64	0.10	0.30	2.00	0.79
	FDY-22	0.54	1.02	13.38	69.88	4.37	5.68	0.07	0.28	2.09	0.70
	FDY-26	0.99	1.68	14.29	64.68	4.03	9.65	0.11	0.40	2.82	0.78
	FDY-29	0.35	1.12	14.55	68.01	4.95	6.36	0.08	0.20	2.24	0.71
	FDY-33	0.62	0.37	14.12	69.63	4.36	6.60	0.07	0.10	1.78	0.69
	FDY-37	0.24	0.92	14.46	69.05	5.28	5.38	0.08	0.19	1.59	0.66
	FDY-41	0.43	0.60	12.93	72.00	5.02	4.27	0.05	0.11	1.15	0.60
	FDY-49	0.53	0.64	14.54	67.64	3.97	9.02	0.05	0.20	1.67	0.78
	FDY-59	0.00	0.47	12.99	71.09	4.21	6.96	0.03	0.12	1.67	0.75
	FDY-60	0.53	0.60	14.05	69.02	4.43	7.66	0.05	0.15	1.55	0.73
	FDY-66	0.43	0.48	13.90	70.46	4.37	5.85	0.03	0.11	1.51	0.69
明代	FDY-1	0.52	1.01	13.32	69.35	5.11	5.90	0.07	0.20	1.85	0.68
	FDY-2	0.62	1.38	13.90	66.65	4.25	8.36	0.09	0.31	2.38	0.77
	FDY-3	0.00	0.66	13.87	69.87	5.45	5.05	0.12	0.29	2.12	0.65
	FDY-4	0.58	1.00	12.83	70.00	4.74	5.94	0.07	0.20	1.99	0.69
	FDY-9	0.28	1.23	14.12	66.73	4.37	8.84	0.08	0.26	2.20	0.79
	FDY-10	0.22	0.99	13.06	69.25	4.57	7.13	0.06	0.25	2.09	0.74

[表五] 龙泉大窑窑窑和枫洞岩窑标本胎体的烧成温度 (°C)

窑口	时代	编号	T测试烧成温度(±20°C)	窑口	时代	编号	T测试烧成温度(±20°C)
金村地区大窑窑	北宋	DYB-6	1160	大窑地区枫洞岩	元代	FDY-15	1270
		DYB-7	1230			FDY-18	1280
		DYB-8	1270			FDY-20	1190
		DYB-9	1280			FDY-22	1150
		DYB-13	1270			FDY-26	1130
		DYB-14	1310			FDY-1	1160
	南宋	DYB-15	1260		明代	FDY-2	1320
		DYB-19	1270			FDY-4	1120
		DYB-24	1220			FDY-9	1140
		DYB-31	1230			FDY-10	1170
		DYB-33	1230				
	元代	DYB-1	1270				
		DYB-2	1150				
		DYB-3	1220				

〔图一〕龙泉窑不同时期标本胎体元素组成的因子分析图



三 讨论

（一）龙泉窑不同时期青瓷胎体元素组成的时代规律

为了分析龙泉不同时期青瓷及不同窑口间标本元素组成的异同，使用多元统计学中的主成分分析方法(PCA)对〔表一〕和〔表三〕中大窑彝窑和枫洞岩窑不同时期标本胎体所有氧化物含量测试数据进行分析，得到如〔图一〕所示的第一和第二主成分分布散点图。同时，为了解龙泉青瓷标本胎体、垫饼和匣钵间的元素组成关系，将枫洞岩窑的垫饼和匣钵元素组成进行了分析。

在〔图一〕中，龙泉大窑彝窑的标本与枫洞岩窑的标本明显区分开来，因子分布于不同区域，仅见枫洞岩窑的匣钵落在大窑彝窑标本区域内，表明大窑彝窑所有标本胎体的元素组成与枫洞岩窑标本存在明显差异。结合〔表一〕和〔表三〕数据看，两个窑址标本胎体各种元素组成中 SiO_2 、 Al_2O_3 、 K_2O 、 TiO_2 、 Fe_2O_3 等氧化物的百分含量存在一定区别，大窑彝窑标本胎体的 SiO_2 、 TiO_2 和 Fe_2O_3 等氧化物百分含量相对较高，而胎体中 Al_2O_3 和 K_2O 含量略低些，其窑址标本 SiO_2 、 Al_2O_3 、 K_2O 、 TiO_2 和 Fe_2O_3 含量平均值分别为73%、19%、2.5%、0.17%和2.42%。枫洞岩窑标本胎体的 Al_2O_3 和 K_2O 含量相对高些，而 SiO_2 、 TiO_2 和 Fe_2O_3 含量略低些，其窑址标本 SiO_2 、 Al_2O_3 、 K_2O 、 TiO_2 和 Fe_2O_3 含量平均值分别为70%、21%、4.2%、0.07%和2.05%。相对大窑彝窑而言，枫洞岩窑标本胎体中 Al_2O_3 、 K_2O 含量的升高和 TiO_2 和 Fe_2O_3 含量的降低，表明枫洞岩窑制备胎体原料中高岭石矿物和绢云母质类物质含量相对较高，这样不仅胎泥的可塑性好，烧成后胎体的物理化学性能较好且胎体颜色较浅，即枫洞岩窑址附近的制胎原料比较好^{〔1〕}，这也印证了明代陆容《菽园杂记》记载的可信性：“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，外则白雁、梧桐、安仁、安福、绿绕等处皆有之，然泥、油（釉）精细，模范端巧，俱不如刘田。”^{〔2〕}

大窑彝窑北宋、南宋和元代时期青瓷标本在该窑址区域内又相互有所区分，其中北宋时期青瓷标本分布区域比较大〔图一〕，表明这一时期胎体元素组成波动范围较大，即大窑彝窑北宋、南宋和元代时期青瓷胎体原料或原料处理工艺可能有所不同。枫洞岩窑元代、明代时期青瓷标本和垫饼在〔图一〕相互集聚在一起，仅匣钵样品落入大窑彝窑标本区域〔图一〕，即标本胎体和垫饼的元素组成无明显的差异，表明元明时期制胎原料比较接近，同时也使用制备青瓷胎体的原料制备垫饼，但该窑址制备匣钵的原料与

〔1〕 李家治：《中国科学技术史·陶瓷卷》页286—306，科学出版社，2007年。

〔2〕 （明）陆容：《菽园杂记》卷十四，页176—177，中华书局，1985年。

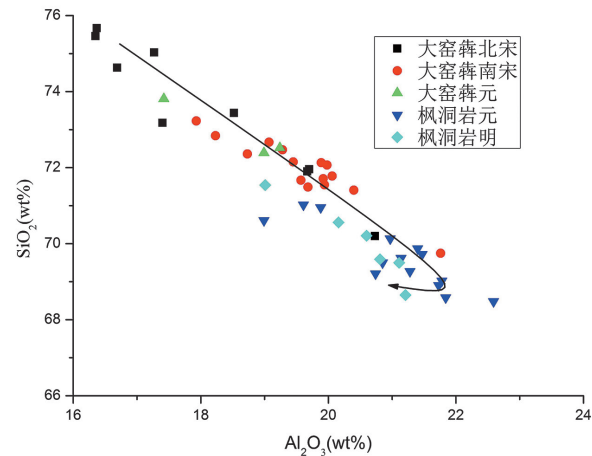
制备青瓷胎体和垫饼的有所差异。

综合大窑彝窑和枫洞岩窑不同时期青瓷标本胎体元素组成变化特征，其中 SiO_2 和 Al_2O_3 含量变化具有一定发展规律，北宋时期胎体 SiO_2 和 Al_2O_3 含量波动范围比较大，到南宋时， SiO_2 有所降低而 Al_2O_3 含量有所升高，到元代 Al_2O_3 含量进一步升高，即从北宋至元代大致呈现 Al_2O_3 含量升高而 SiO_2 含量降低趋势〔图二〕，而到明代 Al_2O_3 含量又略有降低。这一变化趋势也符合龙泉窑青瓷发展的时代规律，即北宋时期为龙泉窑青瓷创烧期，南宋和元代为发展鼎盛期，明代为龙泉青瓷的衰落期^{〔1〕}。通常情况下风化深的制瓷原料的选择和精细的淘洗工艺皆能够提高原料中高岭石类和绢云母质矿物的含量，使原料中 Al_2O_3 的含量升高，进而提高胎泥的可塑性和操作性，同时也能够提高胎体高温烧成过程中的力学性能，减少高温变形，利于大型器物的成型和烧制。因此从北宋至元代胎体元素组成中 Al_2O_3 含量的提高，体现了龙泉青瓷在制瓷原料类型选择和淘洗工艺控制上的不断探索和改进，也是当时能够大量生产大花瓶和大盘的重要原因之一。

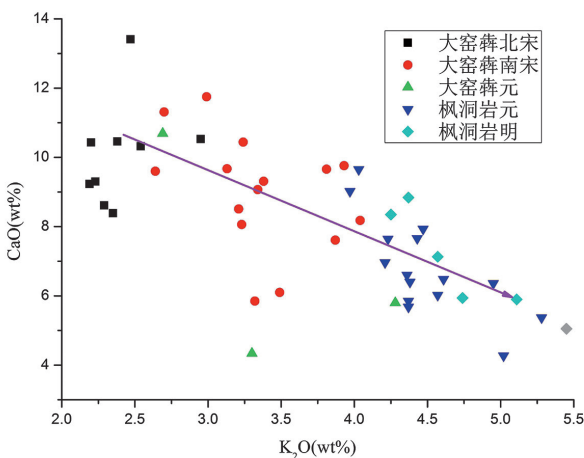
（二）龙泉窑不同时期青瓷釉元素组成的时代规律

从〔表二〕和〔表四〕知：大窑彝窑北宋时期标本 K_2O 和 CaO 含量分别2.2—4.3%和5.8—10.5%，南宋时期标本分别2.2—4.0%和5.9—11.8%，元代标本分别2.5—3.3%和4.3—13.8%；枫洞岩元代时期标本 K_2O 和 CaO 含量分别4.0—5.3%和4.3—9.7%，明代标本分别4.3—5.1%和5.0—8.8%。整体上看，随着时代发展，从北宋经南宋至元明时期，龙泉青瓷釉的元素组成呈现了釉中 CaO 含量逐渐降低，而 K_2O 含量逐渐升高的发展趋势〔图三〕。这一变化趋势与龙泉青瓷产品艺术外观特征的时代发展规律基本吻合，即北宋时期龙泉青瓷通常为淡青色薄釉，南宋末期和元代初期出现薄胎厚釉，元代后期及明早期，大规模厚釉青瓷出现^{〔2〕}。通常 K_2O 高温粘度和随烧成温度的变化率较 CaO 的比较平缓，因此 K_2O 含量提高和 CaO 含量的减低不仅能够提高釉的成熟温度，且能够拓宽釉的烧成温度范围，进而利于形成厚釉和成品率^{〔3〕}。据此判断，釉中 K_2O 含量的提高和 CaO 含量的降低可能是龙泉青瓷在南宋末期和元代初期形成厚

〔图二〕龙泉窑不同时期标本胎体 SiO_2 和 Al_2O_3 含量变化图



〔图三〕龙泉窑不同时期标本胎体 K_2O 和 CaO 含量分布图



〔1〕 朱伯谦：《龙泉青瓷简史》，《龙泉青瓷研究》页1—37，文物出版社，1989年。
〔2〕 任世龙：《论龙泉窑的时空框架和文化结构》，《龙泉窑瓷器研究》页5—13，故宫出版社，2013年。
〔3〕 罗宏杰：《中国古陶瓷与多元统计分析》页120，中国轻工业出版社，1997年。

釉的重要原因之一。

罗宏杰等^{〔1〕}提出了区分钙釉与钙—碱釉的定量标准： $b \geq 0.76$ 为钙釉，而 $0.5 \leq b < 0.76$ 则为钙碱釉。“b”是釉中碱土金属氧化物在碱金属和碱土金属氧化物总和中的摩尔比值。据[图四]可知：龙泉金村地区大窑彝窑北宋和南宋时期青瓷皆在钙釉与钙碱釉分界线($b=0.76$)以上，即他们的b值基本皆大于0.76，且南宋时期青瓷釉料配方的b值略低于北宋时期，即北宋和南宋时期青瓷釉料配方基本属于钙釉。相比北宋时期，南宋时期青瓷釉料配方中CaO含量有所降低， K_2O 含量有所提高。金村地区大窑彝窑元代时期、大窑地区枫洞岩窑元代和明代时期青瓷釉的b值有大于0.76也有低于0.76的，且绝大部分青瓷釉的b值皆小于0.76，即金村地区大窑彝窑元代时期和枫洞岩窑元明时期青瓷釉料配方既有钙釉也有钙碱釉。依据大窑彝窑和枫洞岩窑青瓷标本釉料配方的时代发展规律推断，该地区在南宋时期釉料配方中已经出现了CaO含量减低和 K_2O 含量升高的现象，但青瓷釉料配方基本仍属于钙釉。随着时代发展，直到元代大规模的钙碱釉配方才得以广泛应用。然鉴于目前研究标本无元代早期或晚期之分，尚无法判定龙泉窑青瓷钙碱釉配方大规模出现的具体时间，有待未来做进一步研究。

（三）龙泉窑不同时期青瓷烧成温度的时代规律

历代龙泉青瓷的质量优劣与当时的烧成技术有密切关系，其中包括窑炉的构造、窑具以及烧成温度和气氛的控制^{〔2〕}。据[表五]知：金村地区大窑彝窑北宋时期青瓷标本胎体烧成温度约在 $1220-1310^{\circ}\text{C}$ 间，南宋时期标本约为 $1220-1270^{\circ}\text{C}$ 间，元代标本约为 $1150-1270^{\circ}\text{C}$ 间。大窑枫洞岩窑元代青瓷标本胎体烧成温度约 $1130-1270^{\circ}\text{C}$ 间，明代标本约 $1120-1270^{\circ}\text{C}$ 间。整体上看[图五]，北宋和南宋时期龙泉青瓷标本胎体烧成温度波动范围较小且胎体烧成温度基本皆在 1200°C 以上；而元代胎体烧成温度波动范围较大，基本可分两类，第一类大致为 1270°C 左右，第二类大致处于 1150°C 左右。表明北宋和南宋时期龙泉青瓷产品烧成工艺比较接近，产品的烧结程度相对较高。而元代青瓷一类烧结程度较高，成品烧结质量和两宋时期接近，另一类产品烧结程度低，产品质量较差。

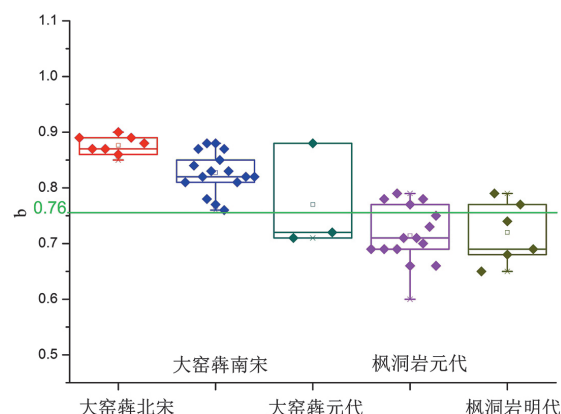
综合以上数据，龙泉窑南宋时期在窑炉结构和烧成技术上有较大改进，且釉料配方中 K_2O 升高，提高了釉料高温粘度，利于青瓷厚釉的形成，进而在南宋时期烧制出高质量的粉青和梅子青釉，表明南宋时期龙泉窑烧制青瓷的工艺已经达到相当高的水平。从窑室长度和坡度看，窑室短、坡度平缓，温度和气氛易于达到均匀，即元、明时期的烧成工艺更容易控制^{〔3〕}。此外青瓷胎体中 Al_2O_3 含量升高，提高了胎体抗变形能力，拓宽了胎体烧成温度范围。同时元代青瓷中钙碱釉大规模的出现，也拓宽了釉料的烧成温度范围，降低了流釉效果出现的概率。综合窑炉结构、产品胎釉元素组成的物化性能可知，元代青瓷

〔1〕 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》，《硅酸盐通报》1995年第2期。

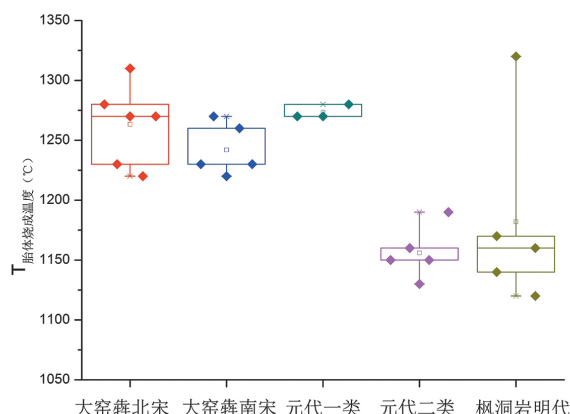
〔2〕 李家治：《中国科学技术史·陶瓷卷》页286—306，科学出版社，2007年。

〔3〕 同上。

〔图四〕龙泉窑不同时期青瓷釉的b值箱式图



〔图五〕龙泉窑不同时期青瓷胎体烧成温度分布箱式图



产品应易于烧成且成品率较高，然而事实是，元明时期除少量产品质量较高外，大部分产品质量却有所下降，因此推断龙泉窑在元明时期可能为了满足国内外需求量的猛增，较注重产量的提高，而在烧成工艺上缺乏精细控制，致使部分产品烧成温度较低，进而使烧成质量有所下降。

四 结论

(1) 龙泉窑北宋和南宋时期青瓷胎体元素组成 Al_2O_3 含量基本低于20%，而元代处于21%左右。随着时代发展，胎体中 Al_2O_3 含量有所提高，体现出龙泉青瓷在制瓷原料类型选择和淘洗工艺控制上有着不断探索和改进的过程。因为原料中 Al_2O_3 含量升高能够提高胎泥成型能力和胎体抗高温抗变形能力，使龙泉窑在元代能够大规模生产大花瓶和大盘成为可能。

(2) 龙泉青瓷釉从北宋经南宋至元明时期，其釉元素组成呈现了 CaO 含量逐渐降低和 K_2O 含量逐渐升高的发展趋势。北宋和南宋时期青瓷釉料配方基本属于钙釉，到元代，青瓷釉料配方仅有少量标本属于钙釉，绝大部分属于钙碱釉。但是目前尚无法判定龙泉窑青瓷钙碱釉配方大规模出现的具体时间为元代早期还是晚期。

(3) 龙泉窑北宋和南宋时期青瓷胎体烧成温度比较接近且波动范围小，基本处在 $1220-1310^\circ\text{C}$ 间。依据元代青瓷胎体的烧成温度高低，可将元代和明代青瓷分为两类：一类烧成温度较高，约在 1270°C 左右，基本上与两宋时期相同；另一类烧成温度较低，约在 1150°C 。表明北宋和南宋时期青瓷产品烧成工艺控制得比较好，烧成质量好；而元明时期产品优劣差异明显，一类烧成质量好，一类烧成质量较差。

（执笔人：丁银忠、郭子莉、翟毅、吴明俊、裘晓翔、沈岳明、史宁昌、王光尧）

（责任编辑：何 芳）