

景德镇明代御窑遗址 出土瓷器分析研究

胡东波 张红燕 刘树林 著



科学出版社

景德镇明代御窑遗址 出土瓷器分析研究

胡东波 张红燕 刘树林 著



科学出版社

北京

图书在版编目 (CIP) 数据

景德镇明代御窑遗址出土瓷器分析研究. 下/胡东波、张红燕、刘树林著. — 北京: 科学出版社, 2011.2

ISBN 978-7-03-030127-7

I. ①景… II. ①胡… ②张… ③刘… III. ①官窑—瓷器 (考古)—研究—景德镇市—明代 IV. ①K876.34

中国版本图书馆CIP数据核字 (2011) 第014502号

责任编辑: 闫向东 雷 英 杨明远/责任印制: 赵德静

文物摄影: 马燕如、胡东波/显微摄影: 张红燕、姚青芳

责任校对: 李 颖/封面设计: 谭 硕/制版: 辉煌前程

科学出版社出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码: 100717

<http://www.sciencep.com>

北京天时彩色印刷有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2011年2月第 一 版 开本: 889 × 1194 1/16

2011年2月第一次印刷 印张: 41

印数: 1—1 500 字数: 1 152 000

定价: 520.00元 (上、下册)

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

目 录 Contents

序

第一章 景德镇明代御窑遗址出土瓷器概述	1
1.1 明代御器厂瓷器发展简述	1
1.2 明代御器厂的艺术成就	2
第二章 微观形态分析	7
2.1 洪武瓷器（1368 ~ 1399年）	7
2.2 永乐瓷器（1403 ~ 1425年）	32
2.3 宣德瓷器（1426 ~ 1436年）	134
2.4 正统瓷器（1436 ~ 1449年）	271
2.5 成化瓷器（1465 ~ 1488年）	278
2.6 弘治瓷器（1488 ~ 1506年）	387
2.7 正德瓷器（1506 ~ 1522年）	401
2.8 嘉靖瓷器（1522 ~ 1567年）	422
2.9 隆庆瓷器（1567 ~ 1573年）	440
2.10 万历瓷器（1573 ~ 1620年）	443
第三章 理化分析	453
3.1 胎	453

3.2	白釉	467
3.3	青花釉下彩及高温钴蓝釉	480
3.4	青釉	488
3.5	铜系红釉	490
3.6	黑釉、紫金釉、铁系高温红釉（彩）	495
3.7	高碱釉	497
3.8	低温铅釉及釉上彩	503
3.9	其他	509
第四章	工艺研究	511
4.1	瓷胎	511
4.2	白釉	512
4.3	青花	515
4.4	高温钴蓝釉	522
4.5	青釉	523
4.6	铜系红釉	526
4.7	黑釉、紫金釉、铁系高温红釉（彩）	530
4.8	高碱釉	532
4.9	低温铅釉及釉上彩	536
4.10	其他	539
第五章	景德镇出土御用瓷器的病害分析	540
5.1	出土瓷器的腐蚀现象	540

5.2	瓷器出土后病害的发展	553
5.3	瓷器腐蚀机理探讨	554
5.4	高碱釉的腐蚀分析	560
5.5	铅釉的腐蚀分析	565
5.6	其他瓷釉的腐蚀分析	578
第六章	沉积物分析及瓷器常用清洗材料研究	580
6.1	瓷器表面沉积物分析	580
6.2	瓷器常用清洗剂和清洗原理	584
6.3	清洗材料的清洗效果和对瓷器的损伤	586
	参考文献	601
附录I	景德镇明代御窑遗址出土瓷器样品描述	606
附录II	使用仪器及实验条件	630
附录III	成化釉里红表面锈点物相检测	634
附录IV	成化绿彩上的虹彩薄膜物相检测	635
附录V	瓷器表面沉积物物相分析	636

第三章 理化分析

我们对考古出土的景德镇明代御器厂遗址出土瓷器样品的理化分析,主要是应用激光剥蚀进样电感耦合等离子体光谱(LA-ICP-AES)仪、能量色散X荧光能谱(EDXRF)分析仪、X射线衍射(XRD)分析仪、扫描电镜(SEM)、红外光谱、离子色谱等分析设备,对样品的胎体和各种釉、彩分别进行了整体的成分分析,对一些特殊的釉、彩还进行了成分扫描、不同部位的元素对比以及特殊物质的物相分析。另外对瓷器表面沉积物和景德镇御器厂的土壤也做了相应分析。分析的样品主要为附录 I 中的样品三(C01~C99),少数为附录 I 中的样品二(B01~B31)。各种仪器的实验条件见附录 II。在第四章中,应用分析结果对景德镇出土的御用瓷器制作工艺进行了试探性分析。

能量色散X荧光分析仪(EDXRF)分析作为一种无损的分析方法,目前已经广泛地应用于陶瓷文物的分析检测中。激光剥蚀进样电感耦合等离子体光谱(LA-ICP-AES)分析是一种微损的分析方法,可以说已经将对样品的损害降到了极低——即肉眼刚可以分辨出来的程度。只是目前的仪器样品室很小。不仅如此,等离子体光谱分析法有可能在分析陶瓷中具有指纹特性的痕量元素上取得某种突破。但是,无论哪一种分析方法,为了降低误差,都应当使用标准样品进行标定。最理想的状态是使用相关的陶瓷标样,但目前陶瓷标样千金难求。为了尽可能降低误差,我们采用了其他标样进行标定,并将一些分析结果与上海硅酸盐研究所化学法分析的数据进行对比,认为其结果达到了我们的基本要求,在系统中横向对比可以用来反映景德镇明代御用瓷器的工艺特点和成分变化趋势。附录,给出了仪器的使用条件以及误差分析,对于个别有可能出现偏离的数据(如第二章提到的红釉分析结果),我们也如实给出,并标示出来,以供参考。

3.1 胎

1. 分析数据

本书所论及的景德镇出土瓷器虽然是落选淘汰的御用瓷器,但其胎体大多瓷化程度很高,选料非常考究,胎色白,仅青瓷的胎体因工艺的需要颜色较深,呈灰色。有个别瓷胎气孔较多,瓷化度略差。我们对这些不同年代、不同品种的瓷器的胎体分别用激光剥蚀进样电感耦合等离子体光谱(LA-ICP-AES)和能量色散X荧光能谱(EDXRF)分别进行了成分分析。分析结果见表3-1-1和表3-1-2。

表3-1-1 景德镇御窑瓷器瓷胎化学组成 (LA-ICP-AES测定)

时代	编号	瓷器品种	瓷胎化学组成（重量%）											$\frac{\text{SiO}_2}{\text{Al}_2\text{O}_3}$	
			SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	MnO	P ₂ O ₅	TiO ₂	总量	Al ₂ O ₃	
元	C01-t	青花	66.07	26.35	1.46	0.32	0.13	1.31	3.72	0.04	0.07	0.31	99.77	2.51	
	C02-t	青花	68.44	23.97	1.10	0.24	0.16	2.32	3.42	0.03	0.08	0.09	99.85	2.86	
	C03-t	蓝地浮雕	68.90	23.74	1.09	0.21	0.14	1.85	3.65	0.04	0.08	0.09	99.77	2.90	
明	洪武	C04-t	青花	70.15	23.50	0.95	0.25	0.11	1.27	3.26	0.07	0.08	0.08	99.71	2.99
		C05-t	青花	68.33	23.80	0.94	0.28	0.32	2.12	3.85	0.06	0.06	0.07	99.82	2.87
		C08-t	青花	69.88	23.72	1.03	0.24	0.33	1.10	3.27	0.05	0.06	0.10	99.78	2.95
		B01-t	青花	72.90	21.48	0.58	0.25	0.42	1.55	2.37	0.06	0.16	0.05	99.82	3.39
		C06-t	釉里红	70.94	23.68	0.80	0.17	0.10	0.92	3.12	0.02	0.03	0.07	99.85	3.00
		B03-t	白釉	70.50	24.56	0.45	0.17	0.17	1.45	2.19	0.03	0.16	0.07	99.75	2.87
	永乐	C09-t	白釉	67.87	27.56	0.67	0.20	0.10	0.56	2.78	0.01	0.06	0.07	99.87	2.46
		C10-t	甜白	68.89	26.99	0.74	0.19	0.04	1.03	1.89	0.01	0.05	0.06	99.90	2.55
		C99-t	甜白	71.05	24.96	0.76	0.20	0.03	0.92	1.71	0.01	0.04	0.08	99.76	2.85
		C13-t	红釉	71.24	24.31	0.87	0.20	0.04	0.99	1.86	0.01	0.11	0.08	99.71	2.93
		C14-t	釉里红	69.96	25.27	0.80	0.20	0.03	0.73	2.53	0.02	0.10	0.08	99.71	2.77
		C15-t	釉里红	70.50	24.18	0.61	0.19	0.05	0.70	3.02	0.01	0.30	0.08	99.65	2.92
		C16-1-t	青花	66.36	27.10	0.77	0.20	0.21	1.88	3.04	0.04	0.10	0.07	99.77	2.45
		C17-t	青花	70.76	24.62	0.66	0.19	0.07	0.79	2.49	0.02	0.13	0.08	99.82	2.87
		B08-t	黑釉	66.49	28.71	0.52	0.21	0.15	1.03	2.36	0.03	0.21	0.11	99.81	2.32
		B09-t	紫金	71.85	25.00	0.48	0.19	0.20	0.51	—	0.02	0.13	0.09	99.71	2.87
	宣德	C19-t	红三果	69.24	25.72	0.69	0.20	0.07	0.98	2.47	0.03	0.15	0.12	99.69	2.69
		C20-t	霁红	68.58	25.68	0.64	0.19	0.07	1.39	3.19	0.02	0.05	0.08	99.88	2.67
		C21-t	紫金	67.54	27.39	0.71	0.21	0.08	0.56	3.09	0.02	0.13	0.07	99.78	2.47
		C22-t	孔雀绿	68.23	26.47	0.69	0.19	0.04	0.61	3.28	0.02	0.17	0.07	99.77	2.58
		C23-t	铁绘花卉	67.37	27.60	0.68	0.20	0.05	0.54	3.05	0.02	0.15	0.08	99.74	2.44
		C25-t	青花	70.03	25.92	0.63	0.19	0.05	1.04	1.78	0.01	0.09	0.07	99.82	2.70
		C26-t	青花	69.13	26.14	0.65	0.19	0.05	0.30	3.20	0.02	0.08	0.09	99.84	2.64
		C27-t	青花	67.28	27.92	0.78	0.20	0.05	0.70	2.53	0.02	0.14	0.09	99.70	2.41
		B12-t	白釉	70.19	27.14	0.53	0.21	0.07	0.89	—	—	0.19	—	99.36	2.59
		B13-t	仿哥	70.44	24.44	1.29	0.43	0.06	0.54	1.89	0.02	0.16	0.47	99.75	2.88
		B14-t	蓝釉	71.27	26.25	0.50	0.19	0.10	0.37	—	0.01	0.42	—	99.28	2.72
		B16-t	洒蓝	71.21	25.28	0.47	0.16	0.05	0.52	2.10	0.01	0.04	0.07	99.92	2.82
	正统	C29-t	青花	64.76	28.08	0.93	0.16	0.16	2.99	2.30	0.06	0.20	0.11	99.76	2.31
		C32-t	青花	71.22	20.89	0.67	0.18	0.17	2.51	3.67	0.05	0.23	0.06	99.65	3.41
		C33-t	青花	69.68	22.87	0.65	0.17	—	1.96	3.54	0.04	0.19	0.08	99.57	3.05
	成化	C34-t	斗彩	75.18	20.55	0.76	0.19	0.04	0.54	2.28	0.01	0.08	0.10	99.73	3.66
		C35-t	斗彩	68.98	26.49	0.67	0.23	0.05	0.67	2.68	0.01	0.03	0.06	99.87	2.60
		C36-t	绿彩	65.45	29.90	0.73	0.22	0.04	0.44	2.91	0.01	0.07	0.07	99.84	2.19
		C37-t	黄釉	66.66	27.13	0.78	0.23	0.07	0.43	4.15	0.01	0.10	0.08	99.64	2.46

续 表

时代		编号	瓷器品种	瓷胎化学组成（重量%）											SiO ₂	
				SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	MnO	P ₂ O ₅	TiO ₂	总量	Al ₂ O ₃	
明	成化	C38-t	青花	69.69	23.15	0.68	0.29	—	1.12	4.44	0.01	0.05	0.06	99.87	3.01	
		C40-t	白釉薄胎	67.89	26.81	0.47	0.16	—	1.30	2.82	0.01	0.04	0.08	99.89	2.53	
		C44-t	青花	64.58	29.39	0.69	0.23	0.03	0.73	4.15	0.01	0.02	0.07	99.90	2.20	
		C97-t	青花	71.53	24.13	0.67	0.19	0.04	0.65	2.49	0.01	0.01	0.07	99.80	2.96	
		C46-t	仿官	68.74	23.57	2.07	0.45	0.04	0.60	3.56	0.03	0.07	0.57	99.70	2.92	
		C47-t	仿哥	68.01	24.37	2.15	0.40	0.04	1.07	3.25	0.03	0.05	0.44	99.82	2.79	
		C48-t	仿官	69.99	22.92	1.97	0.39	0.03	0.81	3.16	0.03	0.05	0.45	99.80	3.05	
		B19-t	釉里红	70.45	26.40	0.46	0.18	—	0.74	—	—	—	—	99.22	2.67	
		B20-t	红釉	71.22	24.81	0.41	0.18	0.03	1.08	1.97	0.01	0.07	0.06	99.83	2.87	
		B23-t	宝石蓝	70.77	25.37	0.42	0.20	—	1.05	—	0.01	0.03	0.06	99.77	2.79	
		B24-t	绿彩	68.92	27.34	0.52	0.19	0.07	0.71	2.10	0.01	0.02	0.06	99.93	2.52	
		B25-t	素三彩	70.30	25.53	0.54	0.21	0.06	0.14	3.02	0.01	0.03	0.06	99.90	2.75	
	弘治	C50-t	鸡油黄	69.60	23.79	0.56	0.20	0.04	1.54	4.00	0.01	0.04	0.05	99.82	2.93	
		C51-t	绿彩	70.65	23.53	0.58	0.21	0.04	0.80	3.87	0.01	0.04	0.06	99.78	3.00	
		C53-t	青花	66.84	26.24	0.63	0.22	0.07	1.18	4.61	0.01	0.02	0.06	99.88	2.55	
	正德	C54-t	青花	69.08	24.73	0.65	0.19	0.04	1.38	3.64	0.01	0.06	0.06	99.83	2.79	
		C57-t	黄釉	70.11	23.52	0.61	0.20	0.04	1.30	3.59	0.02	0.12	0.06	99.57	2.98	
		C58-t	斗彩	70.41	22.91	0.75	0.22	0.41	0.82	4.10	0.03	0.05	0.06	99.76	3.07	
	嘉靖	C60-t	青花	69.13	24.28	0.78	0.24	0.16	1.58	3.40	0.04	0.08	0.07	99.75	2.85	
		C64-t	青花	69.95	23.35	0.82	0.26	0.09	1.36	3.84	0.02	0.05	0.09	99.84	3.00	
		C65-t	青花	72.64	21.39	0.66	0.22	0.06	1.21	3.42	0.01	0.09	0.08	99.79	3.40	
		C66-t	青花	70.90	22.66	0.94	0.21	0.13	1.49	3.39	0.06	0.04	0.06	99.88	3.13	
	隆庆	C67-t	青花	68.17	25.33	0.94	0.23	0.09	1.50	3.37	0.04	0.07	0.08	99.82	2.69	
	万历	C69-t	青花	72.52	20.84	0.88	0.22	0.72	1.23	3.19	0.05	0.09	0.07	99.81	3.48	
		C72-t	青花	76.51	17.80	0.66	0.19	0.06	1.49	2.90	0.01	0.08	0.08	99.79	4.30	
		C73-t	青花	73.71	20.35	1.04	0.22	0.64	0.88	2.76	0.05	—	0.17	99.79	3.62	
清	康熙	C75-t	青花	69.71	24.15	0.75	0.15	0.98	1.13	2.76	0.09	0.07	0.06	99.83	2.89	
		C76-t	白釉	68.93	26.02	0.69	0.11	0.68	0.98	2.10	0.10	0.10	0.04	99.77	2.65	
	雍正	C78-t	霁蓝	69.31	24.05	0.90	0.14	0.14	1.75	3.29	0.06	0.15	0.05	99.85	2.88	
	乾隆	C81-t	青花	68.55	26.09	0.68	0.11	0.56	1.36	2.23	0.09	0.10	0.05	99.83	2.63	
	嘉庆	C84-t	黄釉	64.10	28.85	0.68	0.13	0.30	1.36	3.47	0.07	0.47	0.07	99.50	2.22	
		C85-t	涩胎	68.10	26.38	0.79	0.14	0.30	0.79	3.12	0.12	0.05	0.04	99.83	2.58	
	道光	C86-t	青花	67.57	24.87	0.75	0.14	0.10	2.26	4.02	0.08	0.08	0.04	99.90	2.72	
	同治	C88-t	青花	62.50	30.23	1.01	0.18	0.23	1.47	4.03	0.08	0.10	0.06	99.89	2.07	
	光绪	C91-t	紫金	68.78	23.87	0.87	0.14	0.13	1.96	3.79	0.06	0.14	0.07	99.81	2.88	
		C94-t	青花	65.36	27.76	0.79	0.11	0.15	1.89	3.51	0.08	0.16	0.04	99.87	2.35	
	宣统	C95-t	青花	66.93	26.33	0.78	0.13	0.22	1.86	3.33	0.09	0.12	0.05	99.86	2.54	

注: B09、B12、B14、B19、B23、C33、C38样品量较少。样品量少时, ICP有时测不到K₂O、MnO含量。胎样太小时, 所测CaO含量可能会受釉的影响。C40胎很薄, 所测CaO含量受周围釉的影响。

表3-1-2 景德镇御窑瓷器瓷胎化学组成(重量%)(EDXRF测定)

时代	编号	瓷器品种	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	K ₂ O	MnO	P ₂ O ₅	TiO ₂	总量	样品说明	
元	C01-t	青花	70.38	24.54	1.05	1.12	2.60	0.02	0.06	0.23	100.00	样品较窄	
	C03-t	蓝地浮雕	73.96	21.42	0.94	0.53	2.83	0.02	0.22	0.07	100.00	胎凹	
明	洪武	C04-t	青花	73.49	20.71	1.01	1.51	3.06	0.04	0.12	0.07	100.00	受釉影响, CaO含量偏高
		C05-t	青花	77.86	16.23	1.23	0.57	3.77	0.04	0.22	0.09	100.00	略不平
		C06-t	釉里红	76.28	18.29	0.98	0.74	3.46	0.02	0.15	0.08	100.00	不平
		B02-t	釉里红	77.83	16.38	1.24	0.51	3.71	0.04	0.17	0.12	100.00	受表面污染影响
	永乐	C09-t	白釉	72.86	22.33	0.71	0.84	2.98	0.02	0.21	0.07	100.00	胎不平
		C14-t	釉里红	70.59	25.72	0.53	0.74	2.09	0.01	0.26	0.06	100.00	胎较小
		C16-1-t	青花	69.08	26.40	0.66	1.23	2.32	0.02	0.24	0.06	100.00	胎不平
	宣德	C19-t	红三果	69.93	26.33	0.55	0.75	2.23	0.01	0.15	0.04	100.00	较薄且不够平
		C23-t	铁绘花卉	70.61	25.75	0.64	0.58	2.15	0.01	0.19	0.05	100.00	较小
		C26-t	青花	76.92	18.62	0.90	0.32	3.03	0.03	0.11	0.08	100.00	面积大
		C27-t	青花	70.29	26.23	0.64	0.67	2.06	0.03	0.03	0.05	100.00	较薄, 不平
		C28-t	青花	71.25	25.86	0.49	0.56	1.63	0.02	0.16	0.04	100.00	不平, 不大
		B16-t	洒蓝	76.29	18.66	1.02	0.42	3.05	0.02	0.44	0.10	100.00	可能受釉影响
	正统	C29-t	青花	73.95	21.11	1.21	1.17	2.15	0.06	0.20	0.13	100.00	胎色较深, 气孔多, 似过烧
		C33-t	青花	75.68	18.79	0.86	0.85	3.53	—	0.12	0.06	100.00	
	成化	C34-t	斗彩	70.85	24.27	0.63	1.22	2.76	0.02	0.21	0.05	100.00	受釉影响, CaO含量偏高
		B22-t	仿官	76.27	16.40	2.20	0.80	3.66	0.04	0.16	0.47	100.00	受釉影响, CaO含量偏高
		B25-t	素三彩	76.14	19.43	0.80	0.34	3.04	0.01	0.16	0.07	100.00	似陶
	弘治	C50-t	鸡油黄	73.21	22.71	0.51	0.52	2.68	0.01	0.32	0.04	100.00	胎较薄
		C53-t	青花	73.15	22.54	0.63	0.49	2.84	0.02	0.27	0.05	100.00	不太平
	正德	C54-t	青花	77.39	17.25	0.79	0.51	3.67	0.03	0.29	0.07	100.00	
		B30-t	青花	73.81	20.98	0.82	0.54	3.48	0.02	0.28	0.07	100.00	
		C58-t	斗彩	77.18	16.43	1.00	0.66	4.31	0.03	0.33	0.07	100.00	
	万历	C73-t	青花	74.77	19.86	1.19	0.81	3.19	0.03	0.07	0.09	100.00	胎颜色较深, 有黑点
清	康熙	C75-t	青花	70.74	24.49	0.62	1.46	2.49	0.03	0.12	0.04	100.00	胎较薄
		C76-t	白釉	69.31	26.24	0.53	1.40	2.43	0.03	0.02	0.04	100.00	较小, 不够平
	雍正	C78-t	霁蓝	74.97	19.91	1.04	0.64	3.20	0.09	0.09	0.07	100.00	受蓝釉影响, Fe、Mn含量偏高
	嘉庆	C84-t	黄釉	71.11	24.72	0.73	0.42	2.74	0.03	0.21	0.04	100.00	
		C85-t	涩胎	70.86	25.30	0.73	0.28	2.62	0.04	0.13	0.04	100.00	胎似过烧, 略不平
	道光	C86-t	青花	76.45	18.38	0.95	0.61	3.31	0.13	0.12	0.06	100.00	

注: 样品量少时所测数值Al高Ca低。因胎一般较薄, 而光斑较大, 所测数值有时会受釉影响, 使CaO含量偏高。

2. 结果分析

(1) 胎分子式

根据ICP测定的结果(表3-1-1),以中性氧化物(Al_2O_3 、 Fe_2O_3)的摩尔数为1,计算出胎中各类氧化物的胎式系数,得到胎的分子式,计算结果如表3-1-3所示。以 RO_2 (SiO_2)的胎式系数为横坐标,以 $\text{RO}+\text{R}_2\text{O}$ ($\text{CaO}+\text{MgO}+\text{K}_2\text{O}+\text{Na}_2\text{O}$)的胎式系数之和为纵坐标作胎分子式分布图,如图3-1-1所示。

表3-1-3 景德镇御窑瓷器瓷胎的胎式系数

时代		编号	品种	各氧化物胎式系数							
				SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	RO+R ₂ O
元		C01-t	青花	4.11	0.97	0.03	0.03	0.01	0.08	0.15	0.26
		C02-t	青花	4.70	0.97	0.03	0.02	0.01	0.15	0.15	0.34
		C03-t	蓝地白浮雕	4.78	0.97	0.03	0.02	0.01	0.12	0.16	0.32
明	洪武	C04-t	青花	4.93	0.97	0.03	0.03	0.01	0.09	0.15	0.27
		C05-t	青花	4.75	0.98	0.02	0.03	0.02	0.14	0.17	0.37
		C08-t	青花	4.86	0.97	0.03	0.02	0.02	0.07	0.15	0.27
		B01-t	青花	5.66	0.98	0.02	0.03	0.04	0.12	0.12	0.30
		C06-t	釉里红	4.97	0.98	0.02	0.02	0.01	0.06	0.14	0.23
		B03-t	白釉	4.81	0.99	0.01	0.02	0.01	0.10	0.10	0.22
	永乐	C09-t	白釉	4.11	0.98	0.02	0.02	0.01	0.03	0.11	0.16
		C10-t	甜白	4.25	0.98	0.02	0.02	0.00	0.06	0.07	0.16
		C99-t	甜白	4.74	0.98	0.02	0.02	0.00	0.06	0.07	0.15
		C13-t	红釉	4.86	0.98	0.02	0.02	0.00	0.07	0.08	0.17
		C14-t	釉里红	4.60	0.98	0.02	0.02	0.00	0.05	0.11	0.17
		C15-t	釉里红	4.86	0.98	0.02	0.02	0.00	0.05	0.13	0.20
		C16-1-t	青花	4.08	0.98	0.02	0.02	0.01	0.11	0.12	0.26
		C17-t	青花	4.79	0.98	0.02	0.02	0.01	0.05	0.11	0.18
		B08-t	黑釉	3.88	0.99	0.01	0.02	0.01	0.06	0.09	0.17
		B09-t	紫金	4.81	0.99	0.01	0.02	0.01	0.03	—	—
	宣德	C19-t	红三果	4.49	0.98	0.02	0.02	0.01	0.06	0.10	0.19
		C20-t	霁红	4.46	0.98	0.02	0.02	0.00	0.09	0.13	0.24
		C21-t	紫金	4.11	0.98	0.02	0.02	0.00	0.03	0.12	0.18
		C22-t	孔雀绿	4.30	0.98	0.02	0.02	0.00	0.04	0.13	0.19
		C23-t	铁绘花卉	4.07	0.98	0.02	0.02	0.00	0.03	0.12	0.17
		C25-t	青花	4.51	0.98	0.02	0.02	0.00	0.07	0.07	0.16
		C26-t	青花	4.41	0.98	0.02	0.02	0.00	0.02	0.13	0.17
		C27-t	青花	4.01	0.98	0.02	0.02	0.00	0.04	0.10	0.16
		B12-t	白釉	4.33	0.99	0.01	0.02	0.00	0.05	—	—
		B13-t	仿哥	4.73	0.97	0.03	0.04	0.00	0.04	0.08	0.16
		B14-t	蓝釉	4.55	0.99	0.01	0.02	0.01	0.02	—	—
		B16-t	洒蓝	4.72	0.99	0.01	0.02	0.00	0.03	0.09	0.14
		正统	C29-t	青花	3.83	0.98	0.02	0.01	0.01	0.17	0.09
	C32-t		青花	5.66	0.98	0.02	0.02	0.01	0.19	0.19	0.42
	C33-t		青花	5.07	0.98	0.02	0.02	—	0.14	0.16	—

续 表

时代		编号	品种	各氧化物胎式系数							
				SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	RO+R ₂ O
明	成化	C35-t	斗彩	4.34	0.98	0.02	0.02	0.00	0.04	0.11	0.17
		C36-t	绿彩	3.65	0.98	0.02	0.02	0.00	0.02	0.10	0.15
		C37-t	黄釉	4.09	0.98	0.02	0.02	0.00	0.03	0.16	0.21
		C38-t	青花	5.01	0.98	0.02	0.03	—	0.08	0.20	—
		C40-t	白釉薄胎	4.25	0.99	0.01	0.02	—	0.08	0.11	—
		C44-t	青花	3.67	0.99	0.01	0.02	0.00	0.04	0.15	0.21
		C97-t	青花	4.94	0.98	0.02	0.02	0.00	0.04	0.11	0.18
		C46-t	仿官	4.68	0.95	0.05	0.05	0.00	0.04	0.15	0.24
		C47-t	仿哥	4.48	0.95	0.05	0.04	0.00	0.07	0.14	0.25
		C48-t	仿官	4.91	0.95	0.05	0.04	0.00	0.06	0.14	0.24
		B19-t	釉里红	4.47	0.99	0.01	0.02	—	0.05	—	—
		B20-t	红釉	4.82	0.99	0.01	0.02	0.00	0.07	0.09	0.18
		B23-t	宝石蓝	4.68	0.99	0.01	0.02	—	0.07	—	—
		B24-t	绿彩	4.22	0.99	0.01	0.02	0.00	0.04	0.08	0.15
		B25-t	素三彩	4.61	0.99	0.01	0.02	0.00	0.01	0.13	0.16
	弘治	C50-t	鸡油黄	4.89	0.99	0.01	0.02	0.00	0.10	0.18	0.31
		C51-t	绿彩	5.01	0.98	0.02	0.02	0.00	0.05	0.18	0.25
		C53-t	青花	4.25	0.99	0.01	0.02	0.00	0.07	0.19	0.29
	正德	C54-t	青花	4.66	0.98	0.02	0.02	0.00	0.09	0.16	0.27
		C57-t	黄釉	4.97	0.98	0.02	0.02	0.00	0.09	0.16	0.28
		C58-t	斗彩	5.10	0.98	0.02	0.02	0.03	0.06	0.19	0.30
	嘉靖	C60-t	青花	4.73	0.98	0.02	0.02	0.01	0.11	0.15	0.29
		C64-t	青花	4.97	0.98	0.02	0.03	0.01	0.09	0.17	0.30
		C65-t	青花	5.65	0.98	0.02	0.03	0.01	0.09	0.17	0.29
		C66-t	青花	5.17	0.97	0.03	0.02	0.01	0.11	0.16	0.30
	隆庆	C67-t	青花	4.46	0.98	0.02	0.02	0.01	0.09	0.14	0.26
	万历	C69-t	青花	5.75	0.97	0.03	0.03	0.06	0.09	0.16	0.34
		C72-t	青花	7.12	0.98	0.02	0.03	0.01	0.13	0.17	0.34
		C73-t	青花	5.95	0.97	0.03	0.03	0.06	0.07	0.14	0.29
清	康熙	C75-t	青花	4.80	0.98	0.02	0.02	0.07	0.08	0.12	0.28
		C76-t	白釉	4.42	0.98	0.02	0.01	0.05	0.06	0.09	0.20
	雍正	C78-t	霁蓝	4.77	0.98	0.02	0.01	0.01	0.12	0.14	0.29
	乾隆	C81-t	青花	4.38	0.98	0.02	0.01	0.04	0.08	0.09	0.22
	嘉庆	C84-t	黄釉	3.71	0.99	0.01	0.01	0.02	0.08	0.13	0.23
		C85-t	涩胎	4.30	0.98	0.02	0.01	0.02	0.05	0.13	0.21
	道光	C86-t	青花	4.52	0.98	0.02	0.01	0.01	0.15	0.17	0.34
	同治	C88-t	青花	3.43	0.98	0.02	0.02	0.01	0.08	0.14	0.25
	光绪	C91-t	紫金	4.77	0.98	0.02	0.01	0.01	0.13	0.17	0.32
		C94-t	青花	3.92	0.98	0.02	0.01	0.01	0.11	0.13	0.26
	宣统	C95-t	青花	4.23	0.98	0.02	0.01	0.02	0.11	0.13	0.28

注：RO+R₂O为碱性氧化物之和。

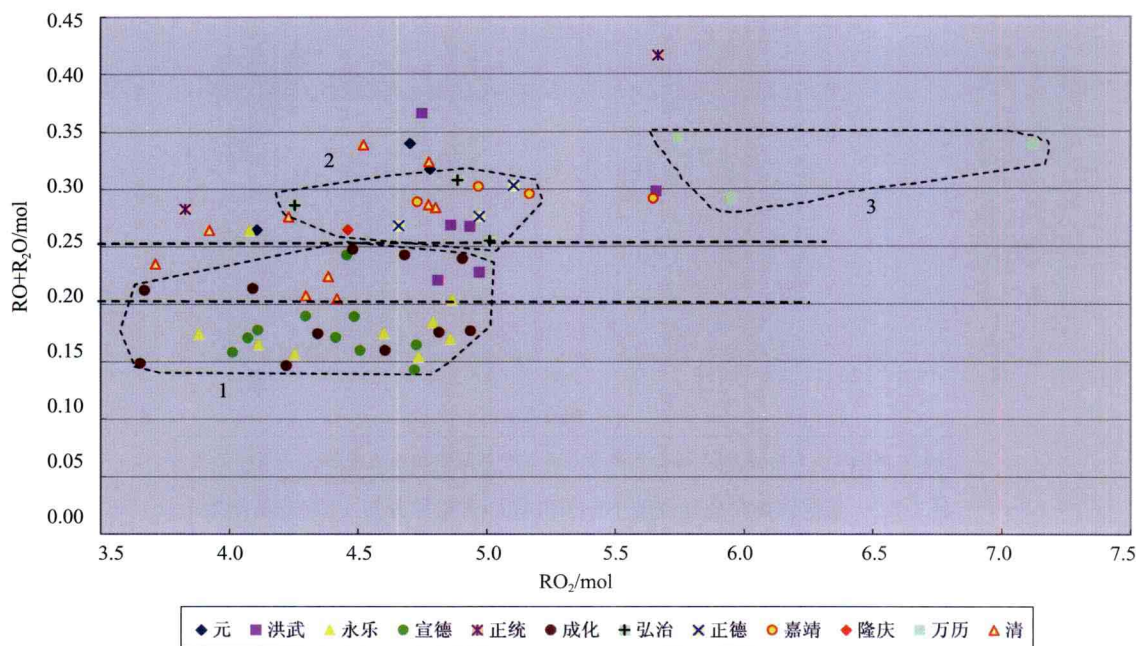


图3-1-1 景德镇御窑瓷器瓷胎的 $(RO+R_2O)$ 与 RO_2 胎式图

从整体上看，景德镇明代御窑瓷器瓷胎成分较为接近，但从胎式图上可看出，不同时期的瓷胎仍有各自分布的区域：

永乐、宣德、成化时期的瓷胎基本都分布在区域1内，其范围为 RO_2 ：3.6~5； $RO+R_2O$ ：0.15~0.25。其中永乐、宣德瓷胎大都分布在 $RO+R_2O$ 等于0.2的水平线以下。

明代洪武、永乐、宣德、成化之外的其他朝代的瓷胎全部分布在 $RO+R_2O$ 等于0.25的水平线以上，与永乐、宣德、成化的明显分离。洪武瓷胎也全部分布在 $RO+R_2O$ 等于0.2的水平线以上。

弘治、正德、嘉靖、隆庆时期的瓷胎较集中分布在区域2内，其范围为 RO_2 ：4.2~5.2； $RO+R_2O$ ：0.25~0.31。另外，嘉靖瓷胎都集中分布在 $RO+R_2O$ 等于0.3的水平线周围。

万历瓷胎都分布在区域3内，距离其他时期瓷胎较远，其范围为 RO_2 ：5.7~7.2， $RO+R_2O$ ：0.29~0.34。

(2) 胎中硅和铝的含量

ICP分析结果显示（表3-1-1），景德镇元、明、清御窑瓷胎中 SiO_2 含量多数在64%~74%， Al_2O_3 多数在20%~30%内；EDXRF分析结果显示（表3-1-2），其 SiO_2 含量多数在69%~78%， Al_2O_3 多数在16%~27%。与罗宏杰先生的《中国古陶瓷与多元统计分析》附表1中化学法分析结果相比^①，ICP分析结果Si含量略低，而Al含量略高；EDXRF分析结果与化学法分析结果较接近，但EDXRF法受样品大小影响较大，样品小时所测数值Al偏高而Ca偏低。

景德镇元、明、清时期各瓷胎中的 SiO_2 和 Al_2O_3 含量分布如图3-1-2和图3-1-3所示。

① 罗宏杰：《中国古陶瓷与多元统计分析》，中国轻工业出版社，1997年，178~183页。

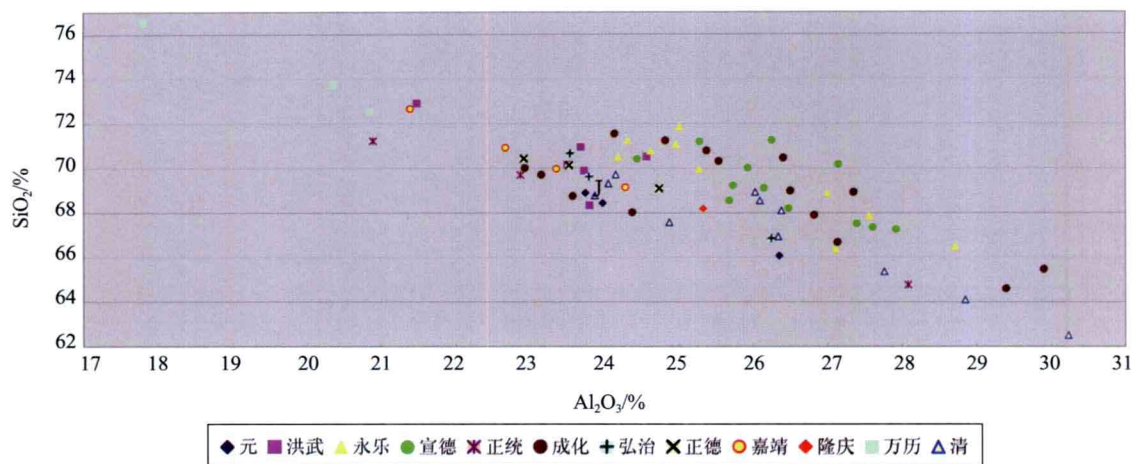


图3-1-2 景德镇御窑瓷器瓷胎中SiO₂和Al₂O₃含量的分布（ICP分析结果）

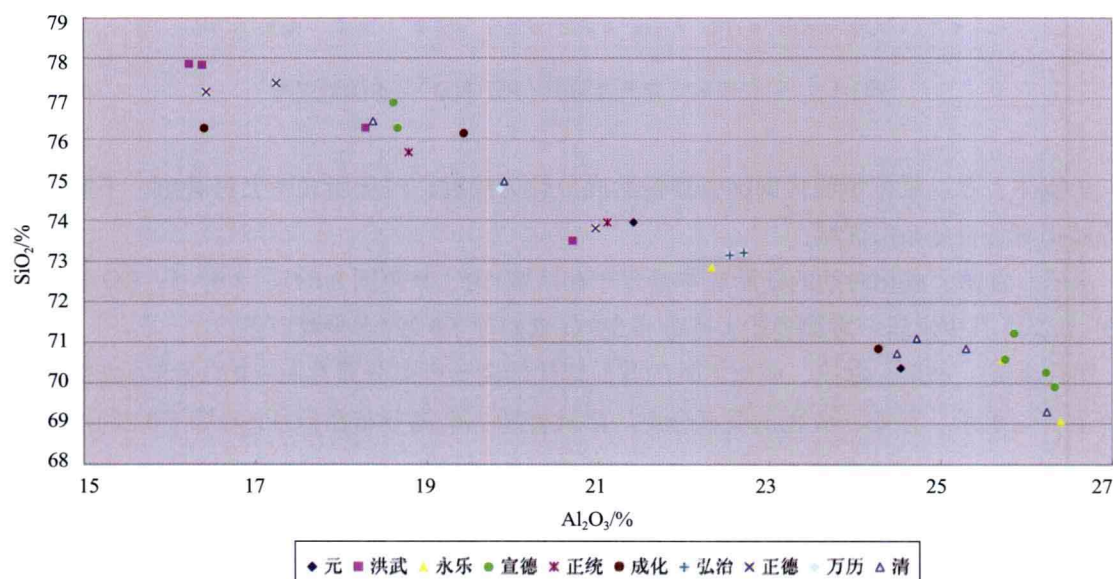


图3-1-3 景德镇御窑瓷器瓷胎中SiO₂和Al₂O₃含量的分布（EDXRF分析结果）

由图3-1-2和表3-1-1可知：

宣德和成化时期仿哥和仿官青瓷的灰胎与同时期白胎相比，Al含量略低。不同品种瓷器所用白胎在同一时期的Si、Al含量没有明显区别。明代各时期瓷胎的Si、Al含量分布得很分散，元代和清代瓷胎的Si、Al含量都没有与明代瓷胎明显分离。但明代永乐、宣德、成化瓷胎与元代、清代瓷胎相比，在Al含量相同的水平上，Si含量一般也都较高。

元代瓷胎Si含量都较低，在69%以下，而Al含量都不是特别低，处于中部，个别Al含量甚至在26%以上。清代瓷胎Si含量都在70%以下，多数瓷胎Si、Al含量分布与明代瓷胎趋于相同，少量瓷胎中Si很低而Al很高，瓷胎质量非常好。

明代从洪武到万历年间，瓷胎中 Al_2O_3 含量有一个从低到高，而又回落到最低的变化。

明洪武瓷胎与元代瓷胎相比，Si含量较高而Al含量有的较低。这些反映出洪武时期瓷胎的质量不是很高，甚至要低于元代，部分瓷胎中高岭石的掺入量或原料的淘洗程度还不如元代时高。但洪武时期也有个别样品接近永乐时期。

永乐、宣德瓷胎 SiO_2 含量在66%~72%， Al_2O_3 含量多在24%~28%。永乐、宣德时期的瓷胎质量比洪武时期明显提高，其中宣德瓷胎更集中在Al含量较高的区域；永乐部分瓷胎中Al含量较宣德时低，但也有的Si含量较低，而Al含量很高，甚至个别胎中Al含量接近29%。成化时期瓷胎的分布略分散，大部分与永乐、宣德时期瓷胎的分布相同，个别瓷胎中Al较低，但也有的胎中Si很低而Al很高，Al含量接近于30%。

弘治以后，胎中Al含量趋于降低，瓷胎质量有所下降。尤其到万历时期，胎中Al含量已降到非常低，在17%~21%，而Si含量已升得很高，在72%~77%，Si、Al分布远离其他时期瓷胎，其质量是历代中最差的。

EDXRF所分析的各时期的样品比较少（图3-1-3、表3-1-2），各时期瓷胎中Si、Al含量的规律性不是很明显，但分析结果同样显示：明洪武瓷胎与元代瓷胎相比质量降低；多数永乐、宣德瓷胎的质量很高；成化仿官青瓷胎与同时期的白胎相比，Al含量较低。

从图3-1-4中的 $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ 含量比值分布上可知，元、明、清瓷胎较为相近，没有明显分离，其 $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ 比值大都在2~3.4。永乐、宣德、成化时期瓷胎的 $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ 比值基本都在3以内，大多数都较明代其他时期低，而与清代水平接近。但万历时期的 $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ 比值较高，与其他瓷胎有较大差异。

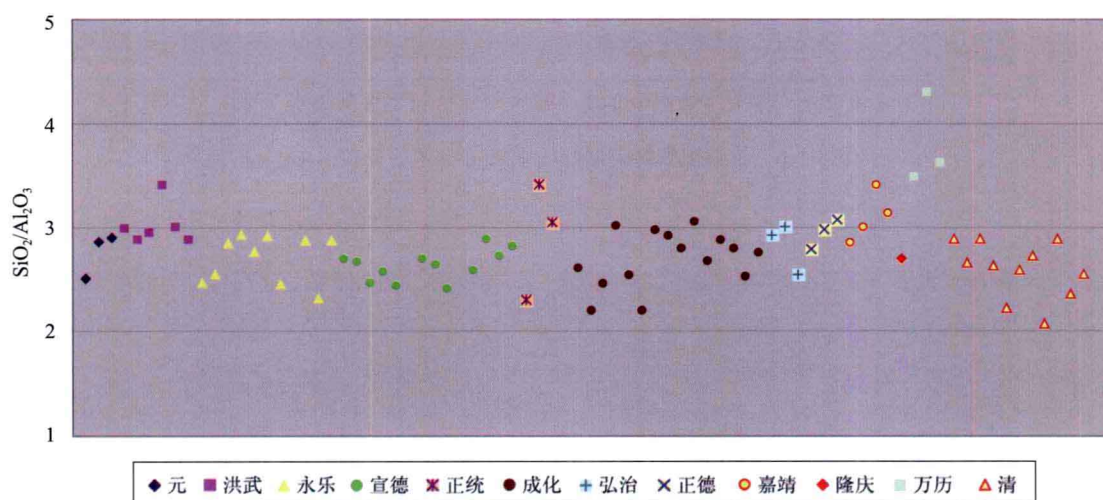


图3-1-4 景德镇御窑瓷器瓷胎中 $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ 含量比值分布图（ICP分析结果）

（3）碱性氧化物含量

根据表3-1-1的ICP所测结果，对景德镇御窑瓷胎所含的碱性氧化物CaO、MgO、 K_2O 、 Na_2O 及碱性氧化物熔剂总量分别作含量分布图，结果如图3-1-5 ~ 图3-1-9所示。

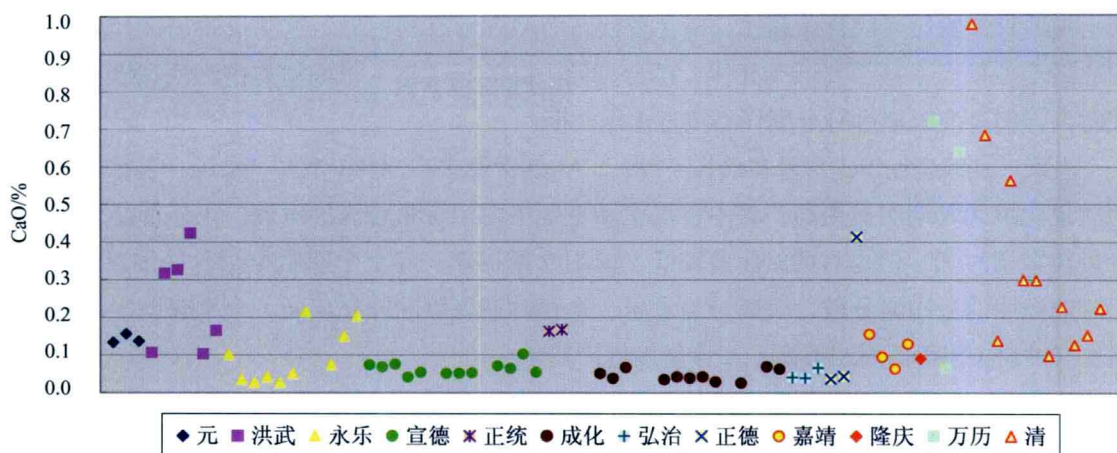


图3-1-5 景德镇御窑瓷器瓷胎中CaO含量的分布 (ICP分析结果)

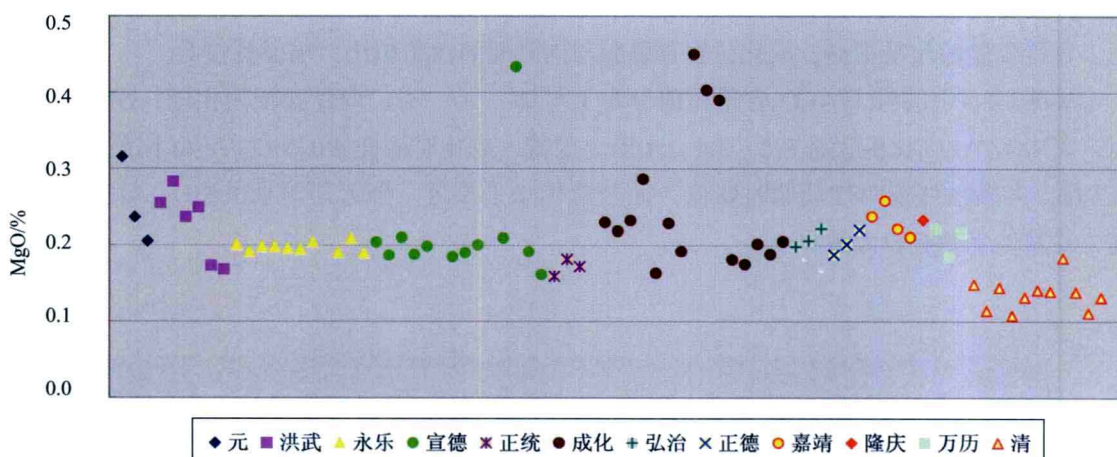


图3-1-6 景德镇御窑瓷器瓷胎中MgO含量的分布 (ICP分析结果)

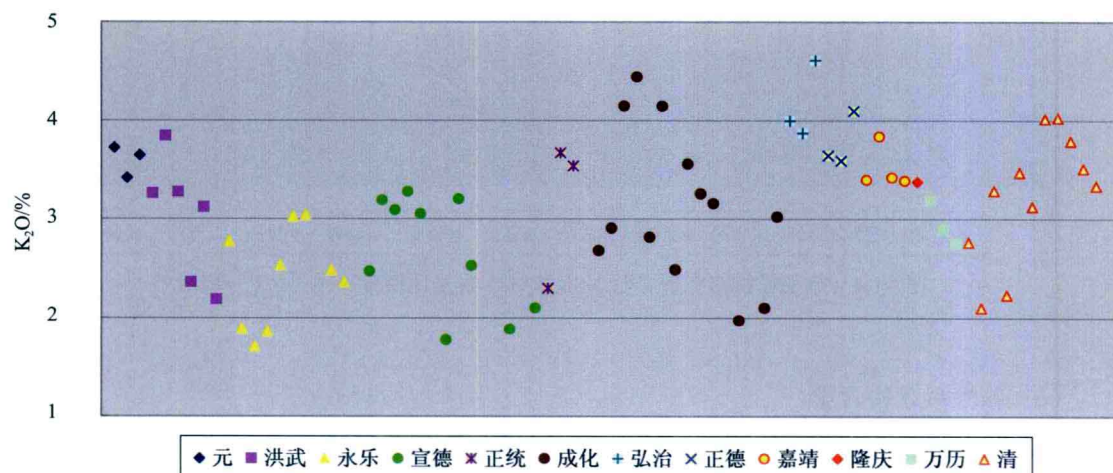


图3-1-7 景德镇御窑瓷器瓷胎中K₂O含量的分布 (ICP分析结果)

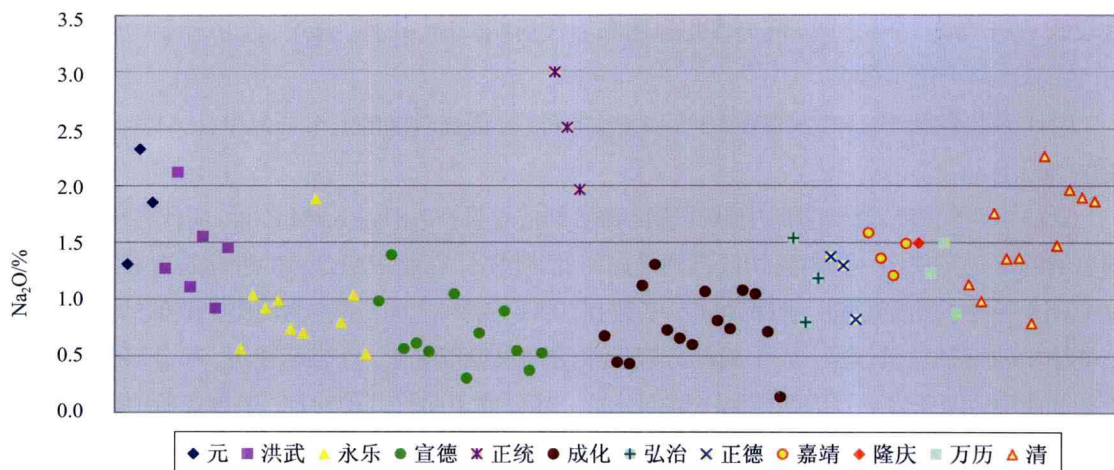


图3-1-8 景德镇御窑瓷器瓷胎中 Na_2O 含量的分布 (ICP分析结果)

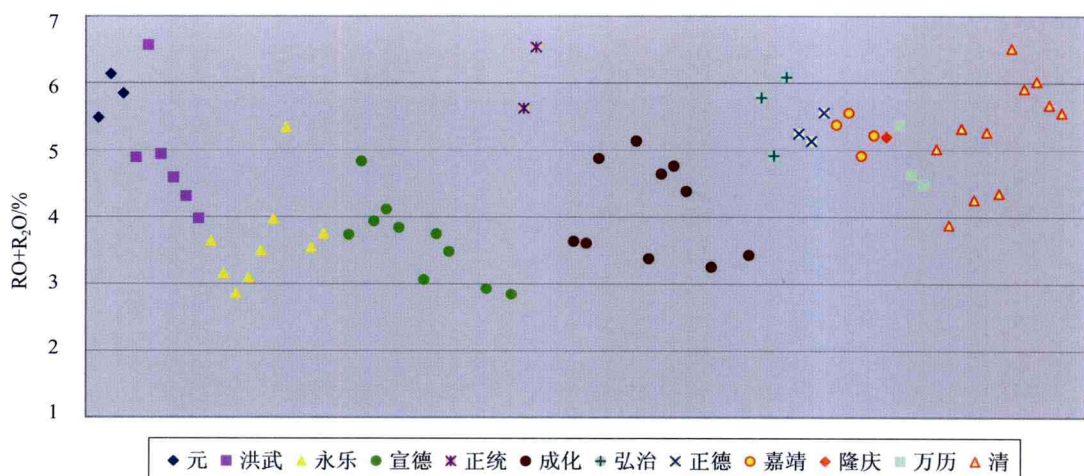


图3-1-9 景德镇御窑瓷器瓷胎中 $\text{RO}+\text{R}_2\text{O}$ ($\text{CaO}+\text{MgO}+\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$) 含量的分布 (ICP分析结果)

由表3-1-1和图3-1-5~图3-1-9可知:

景德镇明代御窑瓷器瓷胎中 CaO 含量一般比较低,一般都在0.2%以内,宣德、成化、弘治朝的瓷胎中 CaO 含量基本都在0.1%以内,永乐朝大部分瓷胎中 CaO 含量也在0.1%以内。永乐甜白釉瓷胎中 CaO 含量都很低,在0.03%~0.05%之间。明代洪武朝个别样品中 CaO 含量较高。明代末期万历朝和清代的瓷胎中 CaO 含量一般都较高,部分瓷胎中 CaO 含量与明后期嘉靖、隆庆朝接近,另一部分瓷胎中 CaO 含量较高,最高的接近1%。

明代宣德、成化朝的仿哥和仿官青瓷的灰胎中 MgO 含量较白胎中高很多,灰胎中 MgO 含量在0.39%~0.45%。明代其他瓷器白胎中 MgO 含量则都在0.16%~0.29%之间,其中永乐、宣德朝的白胎中 MgO 含量基本都很稳定地分布在0.2%左右。洪武部分瓷胎同元代瓷胎,其 MgO 含量较永乐、宣德朝高。成化瓷胎中 MgO 含量分布略分散。清代瓷胎中 MgO 含量一般都比明代瓷胎低,多数在0.11%~0.15%之间。

明代御窑瓷胎中 K_2O 含量都在1.7%~4.6%之间,元代和清代瓷胎中 K_2O 含量也分布在此区域内。明代永乐、宣德瓷胎中 K_2O 含量基本分布在1.7%~3.2%之间。永乐甜白釉瓷的瓷胎中 K_2O 含