

赤峰北部辽代窑址出土陶瓷残片及窑具的科学分析

崔剑锋¹ 刘爽^{1,2} 彭善国² 吴小红¹

(1 北京大学考古文博学院; 2 吉林大学边疆考古研究中心)

摘要: 使用 LA-ICP-AES 方法分析了赤峰北部四个辽代窑址出土的 12 件陶瓷残片及窑具残片的胎釉化学成分。分析结果表明, 釉有高温钙釉和低温铅釉两种, 胎则分为石灰质粘土胎和普通粘土胎。其中低温铅釉器物都是用石灰质粘土胎, 而高温钙釉则使用普通粘土胎。分析结果还表明, 辽代陶瓷烧制技术和北宋北方以及中亚近东等地区的烧制技术都有密切的关系, 可能受到了这些地区陶瓷技术的影响。统计分析表明, 胎和窑具的成份结果相近, 显示了陶瓷烧制原料可能是就地取材。

关键词: 辽代陶瓷, 窑址, 成份分析, 技术交流

中图分类号: K871 **文献标识码:** A

1 前言

随着辽代主要窑址如北京龙泉务窑、赤峰缸瓦窑等的考古调查和发掘, 辽代陶瓷的考古学研究已经有较大的进展。辽代陶瓷最有特色的是契丹形式的各类陶瓷制品, 包括鸡冠壶、鸡腿瓶等特殊形制的器物, 这些器物在中原所见甚少, 而以辽国所产种类最为丰富、形制最为特殊。辽陶瓷的另一特点是生产大量白釉器、白釉绿彩器以及三彩等釉陶器物, 这些器物占窑址产品的比重较高^[1]。

辽代陶瓷的测试分析主要集中在龙泉务窑、缸瓦窑等几个经过系统调查和发掘的窑址上。根据科学分析结果, 大部分学者都认为辽的制瓷工艺仿自当时中国北方, 主要是河北、山西等地的瓷窑, 其产品也以仿制这些瓷窑的主要产品为主^[2]。其中对龙泉务窑的低温釉器的分析, 发现了我国最早使用硼做低温釉助熔剂的证据^[3]; 而对辽代陶瓷主要品种之一的辽三彩的科学分析显示, 辽三彩和早期的唐三彩及同时期的宋三彩相比, 除了其在化妆土上施釉, 同时辽三彩无蓝彩等特点之外, 其它制作工艺大致与唐三彩相同; 经过分析的辽代白瓷都是使用北方制瓷常用的高铝粘土烧制的, 特别是龙泉务窑的白瓷所使用的制胎粘土的铝含量是目前所知的北方瓷胎最高的^[4]; 辽三彩釉是典型的低温铅釉, 而辽白瓷釉则是典型的高温钙釉或者北方白瓷常见的钙碱釉^[5]。根据以上这些分析的结果, 大多数学者都认为, 由于北宋时北方地区制瓷工艺相对发达, 而辽以通过战争俘获的北方地区制瓷工匠为主要技术力量, 建立起辽国自己的窑址, 因此大部分辽瓷的制作工艺都是来自同时期的北方瓷窑^[6]。

吉林大学边疆考古研究中心于 2008 年 10 月对内蒙古赤峰市阿鲁科尔沁旗代白乌苏村南、宝山小南沟、巴林左旗白音格勒、南山等 4 处窑址进行了田野调查, 采集了部分陶瓷残片及窑具(窑址调查简报见本辑)。北京大学考古文博学院和吉林大学边疆考古研究中心合作, 对其中的部分标本进行了测试和分析。

此次共分析样品 12 件, 分别来自四个窑址, 样品简介参见表 1。这四处窑址都地处辽上京及其周边, 特别是阿鲁科尔沁旗的两窑址, 是目前我国发现的地理位置最北的窑址。对这些窑址出土器物进行科学分析, 对了解辽国以及契丹民族制瓷手工业有着重要的意义^[7]。

表 1 样品简介

样品编号	窑址	器物名称
A-NY-1	阿鲁科尔沁代白乌苏村南窑址	白釉器
A-NY-2	阿鲁科尔沁代白乌苏村南窑址	绿釉器残片
A-NY-3	阿鲁科尔沁代白乌苏村南窑址	三叉支钉
A-XNG-1	阿鲁科尔沁宝山小南沟辽代窑址	白釉绿彩鸡冠壶残片
A-XNG-2	阿鲁科尔沁宝山小南沟辽代窑址	三叉支钉
A-XNG-3	阿鲁科尔沁宝山小南沟辽代窑址	无釉鱼纹盆
A-XNG-4	阿鲁科尔沁宝山小南沟辽代窑址	白釉器
B-BYGL-1	巴林左旗白音格勒窑址	茶叶末釉鸡腿瓶
B-BYGL-2	巴林左旗白音格勒窑址	支钉
B-SJ-1	巴林左旗上京城南南山窑址	白釉器
B-SJ-2	巴林左旗上京城南南山窑址	淡绿釉残片
B-SJ-3	巴林左旗上京城南南山窑址	三叉支钉

2 分析方法

本文采用北京大学考古文博学院考古文博学院的激光剥蚀电感耦合等离子体发射光谱进行胎釉的主、微量元素成分分析。激光剥蚀电感耦合等离子体发射光谱是目前国际上较为先进的化学成分分析设备,使用该分析设备可以在微损状态下定量分析元素周期表中的大多数元素。根据釉层和胎体的物理特性不同,本文在分析釉层的方法采用单标样元素归一校正方法,而胎体则采用多固体标样加硅内标校正方法。具体分析方法可参看我们对安徽萧县釉陶^[8]以及登封王城岗古代陶器的分析^[9]。分析结果参见表 2。

3 结果讨论

从釉的成份分析结果看,除茶叶末釉鸡腿瓶 B-BYGL-1 为高温钙釉外,其它所有带釉陶瓷都为低温铅釉器。从胎的成份分析结果看,这些器物也可以分为两大类,即含氧化钙很高的钙质粘土胎和普通粘土胎。以下分别从胎和釉的角度进行讨论。

3.1.釉

所分析的带釉器都是辽产陶瓷中最主要的产品:白釉器、白釉绿彩器以及茶叶末釉鸡腿瓶。其中白釉器和白釉绿彩器为低温铅釉,其铅含量均超过 30%,因此这些器物都应该被定名为低温釉陶器。

从分析结果看,这些单色釉器(如绿釉器 A-NY-2 和白釉器 A-XNG-4 等)或者白釉绿彩器和经过发表的辽三彩的白釉或者是绿釉的主量元素 Si、Al、Pb 等的含量都十分接近,据

此表明其烧制工艺和辽三彩相同。同时白釉器的着色剂元素 Fe、Cu 等含量均十分低，说明白釉实际上由于着色元素含量很低而形成的透明色，而显示白色的原因，是由于胎釉之间施了一层化妆土所致，这和辽三彩的特点亦相符合。分析结果还表明，绿彩的主要着色元素为 Cu（铜），Cu 离子含量的高低也决定了颜色的深浅。如淡绿釉器残片 B-SJ-2 的 CuO 含量为 0.188%，其釉色呈现非常淡的浅绿色；而白釉绿彩器中绿彩的 CuO 含量超过 2%，其绿色则较为浓艳。以上这些也都是辽三彩的釉料化学组成的特点，这表明这些单色釉器或者是双色釉彩器和三彩的制作工艺是一脉相承的。

我们根据 N. Wood 分析汉代铅釉陶器的数据处理方法^[10]，从釉数据中将 PbO、CuO、SnO₂ 等可能由助熔剂引入的氧化物去除，仅留下 Si、Al、Fe、Mg、Ca、Na、K、Ti 等粘土中最常见的氧化物，并将其进行标准化处理。结果见表 2。

表 2 釉层去除助熔剂后归一化结果

Label	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	TiO ₂	Si/Al
A-NY-1	83.04	11.44	0.59	0.16	0.70	1.26	2.73	0.089	7.26
A-NY-2	83.77	10.34	0.41	0.13	0.66	2.06	2.56	0.088	7.89
A-XNG-1(G)	80.39	12.30	1.49	0.25	0.99	1.30	2.97	0.304	6.54
A-XNG-1(W)	81.70	12.39	1.09	0.18	1.09	0.94	2.30	0.312	6.59
A-XNG-4	83.04	10.78	1.14	0.26	0.80	1.26	2.54	0.183	7.70
B-SJ-1	80.85	10.61	0.60	0.10	0.69	1.34	5.72	0.091	7.62
B-SJ-2	80.58	11.83	2.44	0.39	1.99	0.71	1.90	0.161	6.81

分析结果显示，样品的 SiO₂ 含量显著偏高，Si/Al 的结果亦证实了这一点，这说明在釉料配制时，加入了砂或石粉之类的高硅质原料，而并没有单纯使用粘土配釉。我们曾分析了陕西黄堡窑和河南黄冶窑的唐三彩的釉层成份，结果表明这两个窑址出土的黄釉唐三彩都直接采用制胎粘土进行配釉^[11]。同时部分经过分析的辽三彩，其 Si/Al 也明显偏高，据此，说明辽三彩和这些单色釉器的配釉方式也非常相似。还需要指出的是，到了元明清时期，我国著名的低温彩瓷素三彩、釉上五彩等均均以 SiO₂ 含量很高的石末配釉^[12]，这一点似乎体现出辽代铅釉器在我国低温色釉陶瓷烧造史上有着承前启后的作用。

综上所述，经过分析的这几件单色釉器和白釉绿彩器都是低温铅釉器。白釉是由于釉层透明，而下施化妆土所致，绿釉和绿彩的着色元素都是 Cu，Cu 离子的含量决定了绿颜色的深浅。对釉层配方的分析结果显示，与唐三彩配釉原料不同，这些单色釉器和双色釉彩器配釉时加入了砂或者石粉之类的高硅质原料。和分析过的辽三彩进行对比的结果表明，辽三彩的配釉工艺和我们分析的这些器物的配釉工艺基本相同，彭善国先生指出，单色釉器和双色釉彩器可能是辽三彩的源头^[13]。本次分析的结果在某种程度上验证了他的结论。

高温钙釉

巴林左旗白音格勒窑址采集的鸡腿瓶 B-BYGL-1 釉层的含钙量为 10.61%，其它助熔剂的含量较低，是我国传统的高温钙釉。釉中 Fe₂O₃ 的含量超过 5%，说明釉的着色元素为 Fe。茶叶末釉的形成原理被认为是在釉中形成了单斜辉石[Ca（MgAlFe）Si₂O₆]结晶，因此要求釉中含有较高量的 Fe，同时釉中的 Mg 含量超过 2%^[14]。此次分析的这件残片恰好满足了

上述条件。从分析结果看,该鸡腿瓶釉层的组成和耀州窑几件唐代茶叶末釉的组成十分接近,似乎说明二者之间存在着一定的联系,但具体情况需要对同时期耀州窑的同类产品进行分析后才能确定。鸡腿瓶是辽国特有的器物类型,茶叶末釉却是典型的北方烧制的黑釉类的高温钙釉的一种,这也在一定程度上说明辽国的制瓷工艺与中国北方的渊源关系。

3.2 胎

胎的成份分析结果表明,这些器物的胎分为两种情况,一种是含钙很高的石灰质粘土胎,其钙含量可高达 26%以上,这种石灰质粘土烧结温度为 1000℃左右,一般在 1200℃以上时就会熔融,因此适合烧制低温釉陶。另一种则是普通粘土质胎,在分析的四个窑址中,只有白音格勒窑址使用这种粘土,这种粘土的特点是 Al_2O_3 含量高,而其它助熔剂的含量皆低,其耐高温特性较好,适合烧制高温钙釉。因此,辽国陶工可能很清楚的掌握了不同种类粘土的高温特性,可以根据施釉的需要选择不同的粘土。

石灰质粘土胎

石灰质粘土 (calcareous clay) 被用来制胎是本次实验中非常重要的发现。由于目前的古陶瓷研究界普遍认为,类似质地的粘土只在中东、中亚等阿拉伯帝国控制的地区被用作制陶的原料,因此目前国外的一些学者,都通过分析陶器胎的 CaO 含量来区分中东地区出土的中国风格的陶瓷是从中国进口的还是本地仿制的^[15]。在中东地区,类似的原料被用来制陶可以追溯到公元前 6000 年^[16],而到了公元 8 世纪以后,随着中国唐三彩等陶瓷器的外销,这些地区开始使用石灰质粘土仿制中国的陶瓷,并创造出伊斯兰虹彩釉、伊斯兰三彩等诸多陶瓷的新品种。这些器物对我国的陶瓷制造业也产生了相应的影响^[17]。我国古代传统的陶瓷原料主要是瓷石、高岭土、高铁易熔粘土这三大类,迄今为止,尚未有类似石灰质粘土制胎的实例见诸报道。由于其熔融温度较低,很容易玻璃化,我国古代通常使用类似的粘土配釉,如此次分析的鸡腿瓶,从其釉的元素组成看,可以认为是一种石灰质粘土。

本次分析的使用类似粘土制胎的器物都是铅釉器,中东地区的带釉陶器亦多施以铅釉,二者之间可能有着密切的关系。根据历史记载,辽国和波斯以及后来的大食之间关系密切,波斯和大食曾多次进贡,大食还曾和辽国联姻^[18]。同时辽国疆域广大,往西直接和中亚相连。契丹民族最早又是逐水草而居的游牧民族,尽管其发源于我国东北地区,但在广袤的欧亚草原活动的北方游牧民族应该有很频繁的接触,因此早期契丹民族的制陶工艺很有可能受到中亚、西亚等地制陶工艺的影响。一些辽瓷中特有的器形如陶瓷折肩壶、陶瓷凤首瓶等都被认为是来自西方的文化因素。我们认为,使用类似石灰质粘土和铅釉等原料制做陶瓷的工艺很可能就是契丹民族制陶工艺受到西方制陶工艺影响的例证。成份分析结果显示,这些陶器的 Si/Al 都在 3-5 之间,和白音格勒窑址出土的普通粘土制胎的鸡腿瓶 (3.6) 的接近;同时,除了 CaO 的含量较高, MgO 的含量并不高。以上这些表明制胎粘土可能使用了和鸡腿瓶相似的粘土,而加入了石灰石的钙质羼和料。

综上所述,石灰质粘土质胎的发现,表明早期契丹民族的制陶工艺很有可能受到中亚以及中东地区制陶工艺的影响。

产地分析

使用多元统计方法中的主成份分析方法对带釉器物的胎和同窑出土的支钉等窑具的元

素组成进行了分析,结果参见图 1。同时,微量元素 TiO_2 和 MnO 的含量作图参见图 2。

从以上两图可以看出,不同窑址之间胎体的元素成份差异比较明显,而同一窑址陶瓷胎体和窑具之间的元素差异则较为接近。这表明,尽管窑址之间相距较近,并且其中三个窑的产品种类都相近,但所用原料来源都不相同,可能每个窑口都有自己的原料供应地。此外, TiO_2 - MnO 散点图中可以看出, TiO_2 的含量可以区分阿鲁科尔沁旗和巴林左旗制胎粘土的差别。通常来说,为了降低烧制成本,制作窑具所用的粘土很可能是附近取得的粘土,而分析的结果亦表明,陶器胎体和支钉等窑具的元素组成相近,表明烧陶所用粘土应该是就地取材的。

结论

综上所述,单色釉器和白釉绿彩器物都是低温铅釉器。白釉是由于釉层透明,而下施化妆土所致,绿釉和绿彩的着色元素都是 Cu , Cu 离子的含量决定了绿颜色的深浅。对釉层配方的分析结果表明铅釉在配釉时加入了高硅质原料。和辽三彩的制作工艺进行对比后的结果表明分析的这些铅釉器和辽三彩的制作工艺相同,证实了二者的同源性。

鸡腿瓶釉层的含钙量为 10.61%,是我国传统的高温钙釉。釉中 Fe_2O_3 的含量较高,说明釉的着色元素为 Fe 。

胎的成份分析结果表明,胎分为两种情况,一种是含钙很高的石灰质粘土胎,另一种则是普通粘土质胎。而胎料的选择因施釉种类的不同而不同,说明辽国陶工可能很清楚的掌握了不同种类粘土的高温特性。石灰质粘土质胎的发现,表明早期契丹民族的制陶工艺很有可能受到中亚以及中东地区制陶工艺的影响。

不同窑址之间胎体的元素成份差异比较明显,而同一窑址陶瓷胎体和窑具之间的元素差异则较为接近。陶器胎体和支钉等窑具的元素组成相近,表明烧陶所用粘土应该是就地取材的。

总之,辽上京周边几处窑址出土的陶瓷残片的成份分析结果,为我们了解辽国腹地制瓷工艺提供了极为重要的实物资料,值得更进一步的研究。

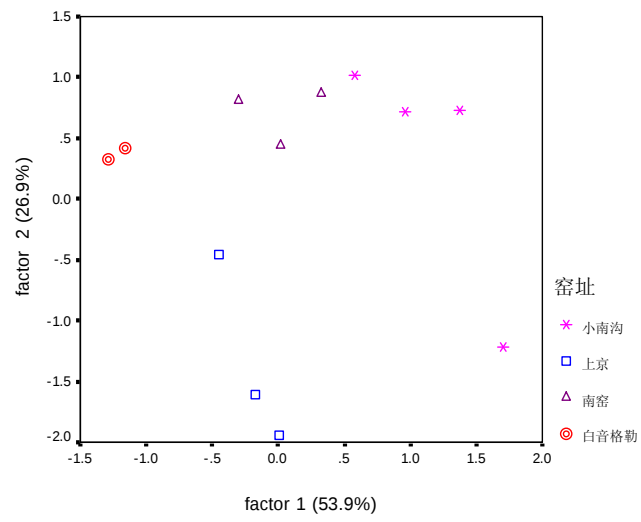


图 1 陶瓷胎体元素的主成份分析结果散点图

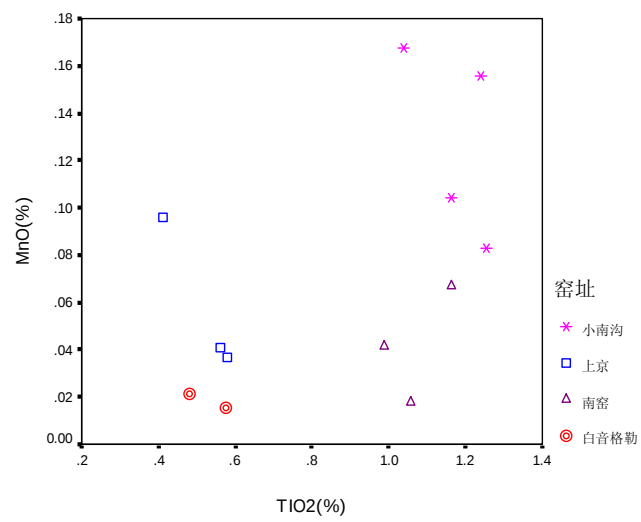


图 2 TiO_2 - MnO 散点图

表 3 样品的分析结果（质量百分比 w%）

Label	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	TiO ₂	MnO	BaO	SrO	PbO	CuO	SnO ₂
A-NY-1（釉）	46.75	6.44	0.33	0.09	0.39	0.71	1.54	0.050	0.039	0.015	0.002	41.63	0.048	0.012
A-NY-1（胎）	66.33	18.36	3.95	1.33	4.57	1.43	2.98	1.06	0.018	0.024	0.175			
A-NY-2（釉）	38.81	4.79	0.19	0.06	0.31	0.95	1.18	0.041	0.024	0.003	0.001	52.41	0.798	0.005
A-NY-2（胎）	65.12	15.78	5.31	1.73	7.03	1.28	2.58	1.16	0.067	0.028	0.157			
A-NY-3	67.18	16.33	4.74	1.14	6.26	1.29	2.09	0.99	0.042	0.039	0.119			
A-XNG-1(绿彩)	37.96	5.81	0.71	0.12	0.47	0.61	1.40	0.143	0.011	0.011	0.004	48.06	2.489	0.214
A-XNG-1(白釉)	40.36	6.12	0.54	0.09	0.54	0.47	1.14	0.154	0.011	0.013	0.004	49.98	0.077	0.012
A-XNG-1（胎）	65.14	15.48	5.85	1.92	6.37	1.45	2.63	1.16	0.104	0.034	0.141			
A-XNG-2	62.35	13.29	5.83	2.19	11.60	1.43	2.05	1.26	0.083	0.041	0.123			
A-XNG-3	61.81	12.29	6.81	2.49	11.96	0.99	2.41	1.24	0.156	0.034	0.192			
A-XNG-4（釉）	43.14	5.60	0.59	0.14	0.42	0.66	1.32	0.095	0.054	0.007	0.002	47.36	0.159	0.009
A-XNG-4（胎）	51.03	11.69	4.66	1.79	26.79	0.99	2.01	1.04	0.168	0.049	0.221			
B-BYGL-1（釉）	60.51	15.43	5.42	2.01	10.61	1.44	3.22	0.825	0.081	0.087	0.043	0.00	0.012	0.009
B-BYGL-1（胎）	68.72	18.86	2.96	1.45	2.05	1.16	4.32	0.48	0.021	0.019	0.052			

B-BYGL-2	63.94	21.39	3.55	1.66	2.76	1.36	4.77	0.57	0.015	0.022	0.057			
B-SJ-1（釉）	52.35	6.87	0.39	0.07	0.45	0.87	3.70	0.059	0.039	0.004	0.003	34.28	0.031	0.006
B-SJ-1（胎）	55.67	12.81	2.58	1.17	24.24	0.49	2.48	0.56	0.041	0.039	0.082			
B-SJ-2（釉）	40.16	5.90	1.22	0.20	0.99	0.35	0.95	0.080	0.058	0.012	0.008	49.65	0.188	0.011
B-SJ-2（胎）	55.95	16.96	3.25	1.18	17.69	0.60	3.97	0.41	0.096	0.040	0.121			
B-SJ-3	62.80	15.28	3.21	1.48	12.33	1.04	3.28	0.58	0.037	0.028	0.076			

参考文献:

- [1] a. 中国硅酸盐学会编:《中国陶瓷史》[M], 文物出版社, 1982: 312-323; b. 冯先铭主编《中国陶瓷》[M], 上海古籍出版社, 2001: 360-374; c. 彭善国:《辽代陶瓷的考古学研究》[M], 吉林大学出版社, 2003: 3-32.
- [2] 李家治等著:《中国科学技术史·陶瓷卷》[M], 科学出版社, 1998.
- [3] 陈尧成:《北京辽代琉璃器中的硼釉》[A], 见李家治, 陈显求编:《古陶瓷科学技术国际讨论会论文集-1》[C], 上海科学技术出版社, 1992: 290-296.
- [4] 从文玉, 关宝琮, 赵永超:《辽代白瓷的研究》[A], 见李家治, 陈显求编:《古陶瓷科学技术国际讨论会论文集-1》[C], 上海科学技术出版社, 1992: 364-370.
- [5] 李家治等著:《中国科学技术史·陶瓷卷》[M], 科学出版社, 1998.
- [6] 冯先铭主编:《中国陶瓷》[M], 上海古籍出版社, 2001: 360-374;
- [7] 彭善国:《辽代陶瓷的考古学研究》[M], 吉林大学出版社, 2003: 47-47.
- [8] 崔剑锋, 贾庆元, 杨哲峰:《安徽萧县汉墓出土部分汉代施釉陶瓷的 LA-ICP-AES 分析》[A], 安徽省文物考古研究所//安徽省萧县博物馆《萧县汉墓》[M], 文物出版社, 2008.
- [9] 崔剑锋, 张海:《颍河流域龙山文化晚期陶器的 LA-ICP-AES 分析》[A], 《登封王城岗考古发现与研究·2002-2005》[M], 大象出版社, 2007.
- [10] N. Wood, J. Watt 等著, 刘绍德译:《某些汉代铅釉器的研究》[A], 李家治, 陈显求主编:《92 古陶瓷科学技术会议论文集》[C], 上海科学技术出版社, 1995.
- [11] 崔剑锋, 雷勇:《铜川黄堡窑与黄冶窑出土唐三彩黄釉的产地与工艺初步研究》[A], 见罗宏杰, 郑新淼主编:《2009 国际古陶瓷科学技术会议论文集》[C], 上海科学技术出版社, 2009: 95-100.
- [12] 张福康:《中国传统低温色釉和釉上彩》[A], 见李家治等编:《中国古代陶瓷科学技术成就》[C], 上海科学技术出版社, 1985: 333-348.
- [13] 彭善国:《辽代陶瓷的考古学研究》[M], 吉林大学出版社, 2003: 63-69.
- [14] 张福康著:《中国古陶瓷的科学》[M], 上海人民美术出版社, 2000.
- [15] 马文宽:《中国陶瓷对早期阿拔斯王朝伊斯兰陶瓷技术的影响》[A], 见罗宏杰, 郑新淼主编:《2009 国际古陶瓷科学技术会议论文集》[C], 上海科学技术出版社, 2009: 570-576
- [16] Kingery D., Vandiver P., Ceramic Masterpieces [M], 7-18, The Free Press, New York, 1986.
- [17] Rawson, J., Tite M., Hughes M., 1989, The Export of Tang sancai Wares: Some Recent research. Transactions of the Oriental Ceramic Society [J], 1987-1988, 52, 39-61.
- [18] 彭善国:《辽代陶瓷的考古学研究》[M], 吉林大学出版社, 2003: 188-193.

Scientific Analysis of the Ceramic and Kiln-furniture Shards Unearthed from the Kiln Sites of Liao Dynasty in the North of Chifeng City

Cui Jianfeng¹, Liu Shuang^{1, 2}, Peng Shanguo², Wu Xiaohong¹

1 School of Archaeology and Museology, Peking University

2 the Research Center for Frontier Archaeology, Jilin University

Abstract: Twelve ceramic and kiln-furniture shards unearthed from the four kiln sites of Liao dynasty (辽代) in the north of Chifeng(赤峰) city were chemically analyzed using LA-ICP-AES method. The results suggest that two kinds of glazes were applied on these ceramics, one was high-fired calcareous glaze and the other was low-fired lead glaze. The ceramic bodies can be divided into two types also, one is made of calcareous clay and the other is made of clay with high alumina content. In addition, the only ware with high-fired glaze was made of high alumina clay, other wares with low-fired lead glazes were all made of calcareous clays. The results also indicate that the ceramic making of Liao dynasty had been influenced by the ceramic technology from the north of Northern Song dynasty (北宋) and the Near East or Central Asia simultaneously. According to the statistical analysis, the ceramic bodies and kiln-furniture wares from the same kiln site have the similar chemical compositions, which indicates that the raw materials of these four kiln sites were all local provenances.

Keywords: ceramics of Liao dynasty, kiln site, chemical compositional analysis, technical communication