

河南小双桥遗址出土印纹硬陶和原始瓷的外束 PIXE 分析*

曹凌子¹ 王世航² 高肖玲² 张斌² 师东辉¹ 李素婷¹★

(1. 河南省文物考古研究院, 河南 郑州市 450099; 2. 复旦大学现代物理研究所, 上海市 200433)

关键词: 小双桥遗址; 印纹硬陶; 原始瓷; PIXE; 产地

摘要: 为了解河南小双桥遗址出土印纹硬陶和原始瓷的工艺特征和产地, 本文运用外束质子激发 X 射线荧光分析 (PIXE) 对河南小双桥遗址出土的 9 件印纹硬陶和 28 件原始瓷样品进行了分析测试。结果显示, 与湖州和吴城地区相比, 小双桥印纹硬陶和原始瓷具有“高铝低硅”特性, 推测使用北方二次沉积黏土作为胎体原料; 印纹硬陶胎体的 Fe_2O_3 和 TiO_2 相对百分含量平均值均高于原始瓷胎体, 表明原始瓷的原料处理工艺较印纹硬陶更为严格。原始瓷釉层中 CaO 的相对百分含量为 9.02 ~ 21.14 wt%, 属于典型的高温钙釉。 P_2O_5 的相对百分含量平均值为 1.76 wt%, 表明釉层是以草木灰的主要助熔剂。多元统计分析结果显示, 小双桥遗址出土印纹硬陶和原始瓷胎体具有很强化学成分相似性, 并非来自南方湖州和吴城地区, 很有可能是本地烧制。

Keywords: the Xiaoshuangqiao Site; stamped hard pottery; proto-porcelain; PIXE; provenance

Abstract: To understand the technological characteristics and provenance of stamped hard pottery and proto-porcelain unearthed from the Xiaoshuangqiao Site in Henan, external beam PIXE (proton-induced X-ray emission) is used to analyze the 9 stamped hard pottery and the 28 proto-porcelain unearthed from the site. The results indicate that, compared to those discovered in Huzhou and at the Wucheng Site, the stamped hard pottery and proto-porcelain found at the Xiaoshuangqiao Site are characterized by “high-aluminum and low-silicon”, suggesting the use of sedimentary clay from northern regions as the raw material for the bodies. The average relative percentages of Fe_2O_3 and TiO_2 in the bodies of the unearthed stamped hard pottery are respectively higher than those in the proto-porcelain, indicating that the processing techniques of raw material for proto-porcelain were more rigorous than those of the stamped hard pottery. With the CaO relative percentage content ranging from 9.02 to 21.14 wt%, the glaze of the proto-porcelain is classified as typical high-temperature calcium glaze. As the average relative percentage of P_2O_5 is 1.76 wt%, plant ash was used as the primary fluxing agent in the glaze. Multivariate statistical analysis reveals a strong similarity of chemical composition between the bodies of the stamped hard pottery and proto-porcelain unearthed from the Xiaoshuangqiao Site, and that they are likely to be locally produced rather than in Huzhou or at the Wucheng Site in the south of China.

中国古代陶瓷技术的发展是人类文明进步的重要标志之一, 其由陶到瓷的转变不仅是材料科学的飞跃, 更是工艺技术与文化内涵的深刻体现^[1]。印纹硬陶与原始瓷作为这一演进过程中的关键节点, 其胎体致密化、釉料应用

及高温烧制技术的进步, 为后世瓷器的成熟奠定了关键基础。迄今为止, 北方印纹硬陶和原始瓷主要发现于大型遗址或墓葬, 如二里头遗址^[2]、大辛庄遗址^[3]、郑州商城遗址^[4]、小双桥遗址^[5]及殷墟遗址^[6]等, 出土数量相

*本文为科技部国家重点研发计划项目“公元前1500年至公元前1000年中华文明早期发展关键阶段核心聚落综合研究”课题“商代都邑的资源与技术综合研究”(编号: 2022YFF09063604)和“黄河流域商早期都邑综合研究”(编号: 2022YFF0903601)的阶段性成果。

★通讯作者。

对较少,且未发现原始瓷窑址。而南方原始瓷不仅发现于遗址和墓葬中,还发现了原始瓷窑址,如吴城窑址^[7]、鹰潭角山窑址^[8]和浙江东苕流域窑址^[9]等。因此,南方本地可以烧制原始瓷是无可置疑的,而北方出土的原始瓷是否在当地烧制至今未达成共识。学界目前有两种主流观点:以安金槐为代表的“北方说”认为北方原始瓷烧制于本地^[10];以李家治为代表的“南方说”认为北方原始瓷来自南方制瓷中心,如江西吴城和浙江湖州地区^[11]。

化学成分能够为研究古陶瓷的原料特征和产地提供科学依据。目前运用于古陶瓷研究的化学成分分析方法主要包括湿化学分析、中子活化分析(INAA)^[12]、X射线荧光分析(XRF)^[13]、激光剥蚀电感耦合等离子体质谱法(LA-ICP-MS)^[14]和外束质子激发X射线荧光分析(PIXE)^[15]等。原始瓷作为最早的瓷器,因施釉工艺初创和埋藏年代久远,釉层多呈斑点状,普遍存在开裂与剥落的现象。早期研究受样品保存状态及技术的局限,对釉层成分的解析十分有限。湿化学法、LA-ICP-MS和INAA分析需要破坏样品,并且难以得到足够的样品量。传统XRF技术因X射线易穿透釉层会导致胎、釉信息混杂。相比之下,外束PIXE技术凭借质子束入射深度可控、束斑较微小和无损等优势,可避免胎体的干扰,精准获取釉层的独立成分信息,可在大气环境下直接分析珍贵文物样品。

小双桥遗址是郑州地区的一处都邑性大型聚落,被认为是仲丁“自亳迁于隰”之“隰都”^[16]。陈铁梅等^[17]使用中子活化分析对小双桥遗址出土的商周时期原始瓷进行了研究,其中4件小双桥遗址样品被划为江西吴城组。而朱剑等^[18]对小双桥遗址出土的6件原始瓷样品进行中子活化分析后,认为小双桥遗址出土原始瓷并非来源于吴城地区。

这表明关于小双桥原始瓷的研究仍存在较大争议。值得注意的是,夏商时期烧制原始瓷的窑炉也常兼烧硬陶^[19]。而针对小双桥印纹硬陶的研究尚不充分,其与原始瓷的关系、胎土来源等关键问题尚未厘清。同时受技术手段限制,也缺乏关于小双桥原始瓷釉层的研究。

本文采用外束PIXE无损分析测试方法对河南小双桥遗址出土的37件印纹硬陶和原始瓷样品胎、釉的化学成分进行分析,并结合因子分析探讨小双桥原始瓷的产地和原料特征信息,旨在揭示小双桥遗址出土印纹硬陶和原始瓷的烧制特征,为中国北方地区出土商代印纹硬陶和原始瓷的研究提供更多数据支撑。

1 样品与实验方法

本文检测的37件样品中,涵盖了小双桥遗址1996年、2000年及2022年三次发掘出土的样本,具体包含印纹硬陶残片9块和原始瓷残片28块^[20]。这些样本分别出土于遗址中心区域IV区和现分区IV区^[21],属遗址主要的祭祀场所。(表1)

首先使用无水乙醇对样品表面进行预处理以减轻污染。外束PIXE实验在复旦大学现代物理研究所NEC 9SDH-2 3MV串联加速器30°管道进行。实验中,能量为3.0 MeV的质子束穿过7.5 μm厚的Kapton膜后,进入10 mm空气层,随后以45°入射角打在样品上,样品表面处质子能量为2.8 MeV,束斑直径小于1 mm。样品表面被质子激发出的特征X射线通过15 mm氦气流后由Si(Li)探测器收集,最后生成X射线能谱。使用成分已知的标样GSD-6水系沉淀物进行实验校准,光谱分析采用GUPIX-96程序^[22],拟合并扣除峰本底,外束PIXE分析技术的检测灵敏度可达ppm量级。

表1 小双桥遗址出土的印纹硬陶和原始瓷样本信息

发掘时间	器物种类	样本编号	数量(块)	出土区域	纹饰
1996年	原始瓷	H135:10、H6:106、H126:2、H135:10、H126:27	5	中心区域IV区	条纹、方格纹
2000年	原始瓷	T132④:1、T9④:27-1、T9④:27-3、T137④:256、 T137④:258、T135④:49、 T135④:66、T135④:68、T135④:70、 T135④:48、H80:142	11	中心区域IV区	条纹、方格纹
2022年	原始瓷	T1643J13④:64、T1441H104:5、T1441H110:3、 T1441H104:6、T1643J13:13、T1643J13:18-1、 T1643J13:5-1、T1643J13:5-2、T1643J13:7-1、 T1643J13:50-1、T1643J13:62-2、T1643J13:62-3	12	现分区IV区	条纹、方格纹
	印纹硬陶	T1645G8:6、T1645G8:7、T1441H103:3、 T1441H103:4、T1441H103:8、T1441H104:4、 T1441H110:2、T1441H120:22、T1441H158:1	9	现分区IV区	云雷纹、绳纹和斜方格纹

2 实验结果分析

图1展示了小双桥遗址出土代表性原始瓷样品胎体和釉层的PIXE能谱图,其中Na、Mg、Al、Si、P、K、Ca、Ti、Mn和Fe的特征峰清晰可见。为反映原始瓷样品原料的特征信息,本文以氧化物的形式来表示每种元素的相对含量。需要说明的是,这种表征不能完全反映元素在胎、釉中的存在形式。表2列出了小双桥遗址出土印纹硬陶和原始瓷胎、釉的化学成分数据。为直观、有效地反映小双桥样品的化学成分特征,本文结合箱式图来表示胎、釉分析结果,箱式图的箱体由数

据的上四分位数和下四分位数确定。

从表2可见,印纹硬陶和原始瓷样品的胎体化学成分以 Al_2O_3 和 SiO_2 为主。原始瓷与印纹硬陶样品胎体中 Al_2O_3 的相对百分含量平均值分别为18.51 wt%和23.13 wt%, SiO_2 的相对百分含量平均值分别为71.80 wt%和66.90 wt%。原始瓷与印纹硬陶胎体中碱金属氧化物(Na_2O+K_2O)和碱土金属氧化物($MgO+CaO$)相对百分含量平均值的总和分别为4.45 wt%和3.47 wt%, P_2O_5 、 TiO_2 、 MnO 和 Fe_2O_3 等氧化物相对百分含量平均值的总和分别为5.10 wt%和6.38 wt%。这一数据特征基本与目前已知的大多数印纹硬陶和原始瓷胎体的

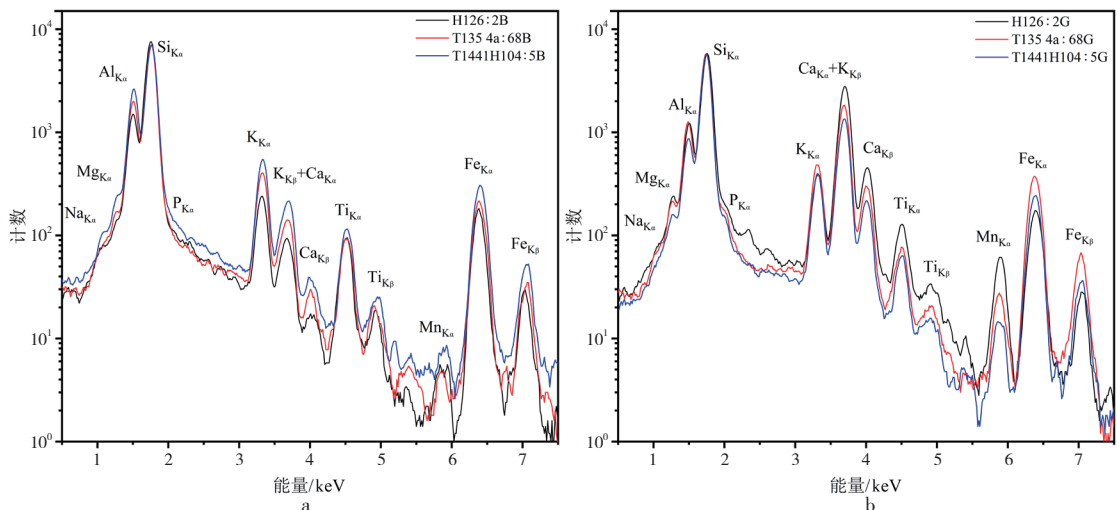


图1 小双桥遗址出土代表性原始瓷样品的PIXE能谱
a. 胎体 b. 釉层

表2 小双桥遗址出土印纹硬陶和原始瓷的化学成分相对百分含量 单位: wt%

样品种类	位置		Na ₂ O	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	P ₂ O ₅	K ₂ O	CaO	TiO ₂	MnO	Fe ₂ O ₃
原始瓷	胎体	平均值	0.63	1.10	18.51	71.80	0.67	2.14	0.58	0.99	0.03	3.41
		标准差	0.27	0.31	2.67	3.39	0.23	0.56	0.22	0.15	0.03	0.60
		最小值	0.20	0.67	14.07	65.69	0.30	0.81	0.21	0.64	0.00	2.37
		最大值	1.32	1.81	24.28	77.56	1.20	2.98	1.09	1.44	0.09	5.13
	釉层	平均值	0.74	2.89	12.83	57.50	1.76	2.49	16.16	0.88	0.41	4.10
		标准差	0.23	0.51	1.34	4.34	0.47	0.66	3.43	0.17	0.17	0.92
		最小值	0.38	1.80	10.05	50.72	1.03	1.24	9.02	0.66	0.19	2.70
		最大值	1.49	3.82	16.77	66.65	2.99	3.80	21.14	1.32	0.85	6.25
印纹硬陶	胎体	平均值	0.39	1.03	23.13	66.90	0.76	1.64	0.41	1.23	0.01	4.38
		标准差	0.16	0.22	3.51	3.95	0.18	0.45	0.13	0.23	0.02	1.07
		最小值	0.11	0.73	17.53	61.22	0.46	1.10	0.27	0.81	0.00	2.30
		最大值	0.65	1.43	27.46	74.31	1.03	2.47	0.68	1.52	0.04	6.17
	外表面	平均值	0.57	1.40	22.83	65.04	0.70	3.04	0.79	1.18	0.03	0.57
		标准差	0.28	0.33	3.40	3.48	0.26	1.24	0.29	0.15	0.02	0.28
		最小值	0.24	0.71	18.04	61.25	0.42	1.70	0.53	0.94	0.00	2.29
		最大值	1.20	1.91	28.38	72.22	1.27	5.05	1.40	1.39	0.06	8.04

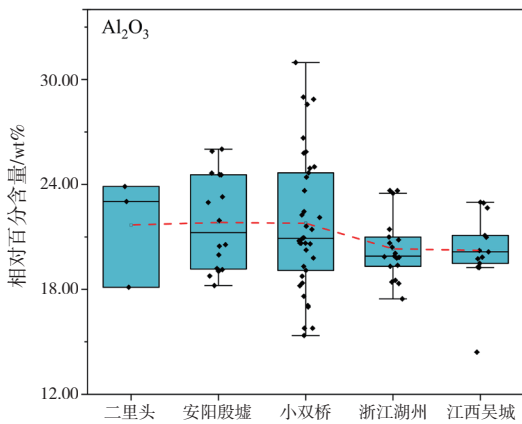
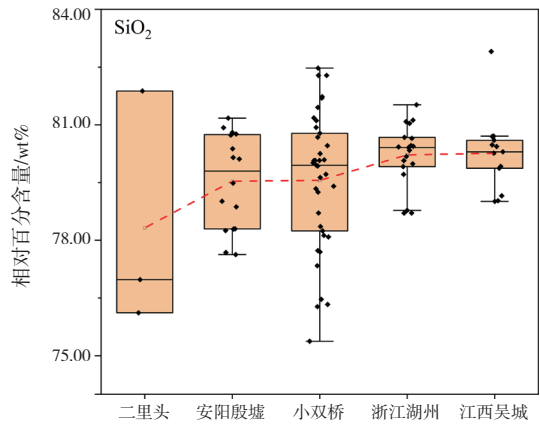
化学组成相吻合^[23]。

2.1 胎体特征

为深入研究小双桥印纹硬陶和原始瓷胎体的硅铝特性,挖掘胎体原料的产地信息,本文将小双桥遗址与二里头遗址、殷墟遗址、浙江湖州南山窑址和江西吴城遗址出土样品胎体中的化学成分进行对比,选取的数据涵盖印纹硬陶与原始瓷^[24]。考虑到化学分析手段的不一致性,对Al₂O₃和SiO₂相对百分含量进行归一计算,绘制样品间硅铝相对含量的箱式图。(图2)可以发现,北方地区印纹硬陶和原始瓷的Al₂O₃和SiO₂含量比南方地区波动范围更大,南方地区原始瓷化学成分更为稳定,这反映了南方地区的烧制工艺比北方地区更加成熟。同时,北方地区样本中,属于晚商时期的安阳殷墟遗址样本数据最为集中,表明北方的烧制工艺也在随时代发展而逐渐稳定。相对于南方地区,北方

地区样本的整体胎体化学成分有着“低硅高铝”特性。小双桥遗址的印纹硬陶和原始瓷胎体中Al₂O₃和SiO₂的相对百分含量平均值与殷墟遗址的保持一致,与浙江湖州和江西吴城地区相比,Al₂O₃含量偏高, SiO₂含量偏低。综上,小双桥遗址印纹硬陶和原始瓷满足北方地区原始瓷的总体特征,很有可能选用了北方地区含较高岭土的二次沉积黏土作为制胎原料。

进一步对比印纹硬陶与原始瓷样品中碱性氧化物的含量差异可以看出,原始瓷样品胎体的碱金属氧化物R₂O(Na₂O+K₂O)和碱土金属氧化物RO(MgO+CaO)相对百分含量大部分高于印纹硬陶样品。(图3)古陶瓷胎体中的碱土金属氧化物能够提高瓷胎的热稳定性和机械强度^[25]。而原始瓷胎体中碱土金属氧化物的含量略高,表明了胎体热稳定性和机械强度的变强,与原始瓷胎质较印纹

图2 不同地区印纹硬陶和原始瓷胎体中 Al_2O_3 和 SiO_2 相对百分含量对比

硬陶更致密的现象一致。

古陶瓷胎体的色泽主要受着色元素Fe和Ti含量的影响。小双桥遗址出土印纹硬陶胎体中的 TiO_2 和 Fe_2O_3 含量明显高于原始瓷样品，因而印纹硬陶胎体颜色多为较深的青灰色。

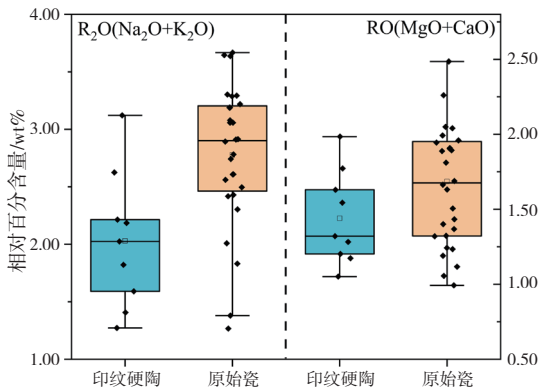
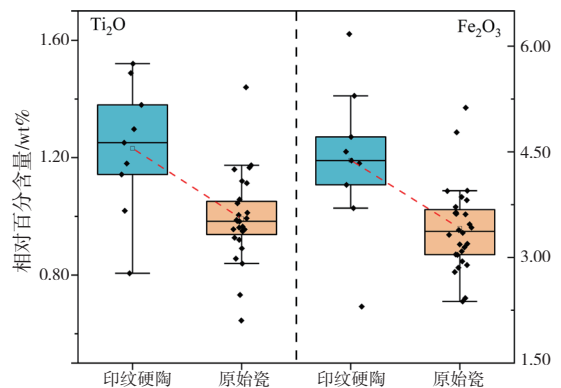
(图4)特别是样品T1645G8:7, 其 Fe_2O_3 含量为6.17wt%, 大幅高于其他样品, 胎色呈现较深的黄灰色。同时Fe和Ti也是黏土中最难去除的杂质元素, 原始瓷 Fe_2O_3 和 TiO_2 含量略低也体现了小双桥遗址原始瓷的原料筛选应较印纹硬陶更为严格。

化学元素的差异反映了古陶瓷胎体不同的原料组成。印纹硬陶和原始瓷作为陶器向瓷器发展阶段的过渡性产物, 工匠对原料的选择仍处于摸索阶段, 具有一定的随意性和多样性, 因此造成了小双桥印纹硬陶与原始瓷胎

体化学成分之间的差异。这些差异反映了古陶瓷发展过程中原料选用、淘洗以及精炼等技术的发展。

2.2 原始瓷釉层特征

原始瓷釉是世界上最早的高温釉。 CaO 、 K_2O 、 MgO 和 Na_2O 是我国古代陶瓷釉中的主要助熔剂。小双桥原始瓷釉中的 CaO 含量较胎体中 CaO 含量高, 且高于其他助熔剂含量, 说明原始瓷样品的釉以 CaO 为主要助熔剂, 属于典型的高温高钙釉。(见表2)另外, 对比原始瓷胎体成分可以发现, 原始瓷釉层虽以 SiO_2 和 Al_2O_3 为主要成分, 但其相对百分含量要低于胎体, 这是釉层中引入了 CaO 作为助熔剂而稀释了 SiO_2 和 Al_2O_3 导致的。同时, 原始瓷釉层中 MgO 和 MnO 的含量高于胎体, 而草木灰中富含Ca、Mg、Mn、P和K等元素, 反映出小双桥

图3 印纹硬陶与原始瓷胎体的 R_2O 和RO含量图4 印纹硬陶与原始瓷胎体的 TiO_2 和 Fe_2O_3 含量

原始瓷釉原料中可能添加了草木灰成分。值得注意的是, 早期陶瓷釉层中的CaO还有可能来自富含石灰石的黏土。小双桥原始瓷釉层中 P_2O_5 的含量较高。有学者认为釉层中 P_2O_5 含量大于1.00 wt%, 便可认为釉料助熔剂的主要来源为草木灰^[26]。故小双桥遗址原始瓷釉料配方可能为“胎土+草木灰”。

从表2中可以看出, 印纹硬陶胎体和外表面的化学成分相近, 这表明印纹硬陶表面不存在人工施釉。

2.3 产地分析

先秦时期的陶瓷一般是就地取材, 胎体的化学成分反映了原料产地的基本信息。为进一步厘清小双桥遗址出土印纹硬陶和原始瓷样品间的关系, 我们使用因子分析将胎体的化学成分中多个指标降维成两个变量, 从而突出样品之间的联系; 使用统计软件进行因子分析降维, 并用主成分分析方法提取因子, 不对最终的成分矩阵进行旋转, 得到因子F1和F2。

(表3)

根据图5中数据点的分布情况可以看出, 小双桥遗址的印纹硬陶和原始瓷样品分布离

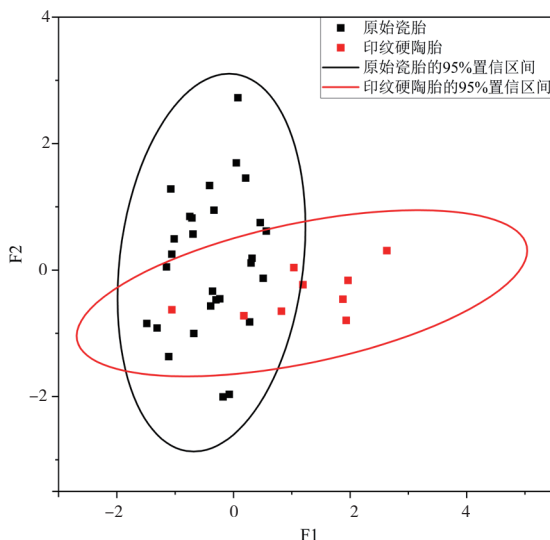


图5 小双桥遗址出土印纹硬陶和原始瓷胎体化学成分的因子分析图

表3 小双桥遗址印纹硬陶和原始瓷胎体因子分析的成分矩阵

成分	Na ₂ O	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	P ₂ O ₅	K ₂ O	CaO	TiO ₂	MnO	Fe ₂ O ₃
F1	-0.672	0.097	0.873	-0.855	0.413	-0.324	-0.273	0.724	-0.078	0.723
F2	0.332	0.835	-0.298	-0.468	0.031	0.703	0.604	-0.189	0.384	0.398

散程度较大, 95%的置信区间下呈椭圆相互交叉重叠, 表明印纹硬陶和原始瓷样品间在胎料组成上有一定的相似性。两者可能利用成分相近的原料制作, 很有可能是同一地区生产的, 进一步佐证了原始瓷起源于印纹硬陶的观点。而印纹硬陶和原始瓷两者之间的主要区别是胎体表面是否施釉。

硅铝含量往往被用作区别我国南北方瓷器的重要指标^[27]。前文论及, 小双桥遗址出土的印纹硬陶和原始瓷的硅铝含量与南方同类器的硅铝含量差异明显。为进一步佐证小双桥遗址出土原始瓷的产地问题, 本文对夏商时期南北方典型遗址的印纹硬陶和原始瓷胎体化学成分的数据进行因子分析^[28]。在分析过程中, 由于不同化学分析方法对Na、Mg等元素的检测灵敏度存在显著差异, 导致引用数据中缺失部分元素信息。因此, 本研究主要选取各类分析方法均能检测到的Al、Si、K、Ca、Fe和Ti元素氧化物含量进行分析。结果显示, 除二里头遗址样品和殷墟遗址样品分布相对较为分散外, 其他遗址样品数据均较为聚集。样品分布可大致分为两部分, 上部为北方地区, 下部为南方地区。虽然二里头遗址样品由于数据量少, 较为分散, 但整体仍位于北方地区样品范围内。小部分殷墟样品同南方地区样品重叠, 可能是由于晚商时期商王朝疆域的扩张, 文化和经济贸易范围扩大, 导致有部分样品从南方传入。(图6)

综上, 小双桥遗址出土原始瓷和印纹硬陶样品的胎体原料与南方地区具有不同的化学元素组合特征, 暗示其瓷胎原料并非来源于南方, 如浙江湖州和江西吴城地区。小双桥遗址样品与殷墟、二里头样品交叉区域较

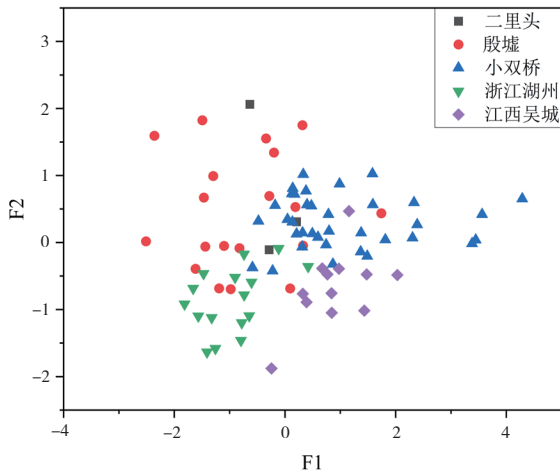


图6 小双桥遗址与其他遗址印纹硬陶与原始瓷胎体成分因子分析图

大,且这三个遗址同属于河南地区,推断北方印纹硬陶和原始瓷具有独立的烧制工艺传承,小双桥遗址原始瓷很有可能是本地烧制。

3 结语

本文使用外束PIXE分析方法对河南小双桥遗址出土的印纹硬陶和原始瓷胎、釉的化学组成进行了分析。结果表明,小双桥原始瓷原料的处理工艺较印纹硬陶更为严格,其釉层属于典型的高温钙釉。同时,小双桥遗址出土印纹硬陶和原始瓷与南方地区胎体的硅铝差异大,其胎体原料可能选用北方二次沉积黏土。基于因子分析的多元统计分析表明,小双桥遗址的印纹硬陶和原始瓷样品胎体的化学成分相似,很有可能是利用相近的原料制成,佐证了原始瓷起源于印纹硬陶的观点。对比同时期其他典型遗址的相关数据可知,小双桥原始瓷并非来源于南方的湖州和吴城地区,很有可能是本地烧制。

- 白陶、印纹硬陶和原始瓷的研究. 考古, 2012, (10).
- [3] 陈茜茜, 马进伟. 山东大辛庄遗址出土商代印纹硬陶与原始瓷化学组成分析研究. 安徽建筑大学学报, 2019, 27 (04).
- [4] 黎海超, 耿庆刚. 黄河流域商时期印纹硬陶和原始瓷器产地研究: 以郑州商城和殷墟为中心. 江汉考古, 2017, (4).
- [5] 朱剑, 宋国定, 樊昌生, 等. 小双桥遗址出土原始瓷器的INAA分析. 华夏考古, 2015, (3).
- [6] 李文静, 朱剑, 何毓灵, 等. 安阳殷墟出土原始瓷的产地与工艺. 华夏考古, 2021, (3).
- [7] 黄水根, 申夏. 吴城商代遗址窑炉的新发现. 南方文物, 2002, (2).
- [8] 江西省文物工作队, 鹰潭市博物馆. 江西鹰潭角山窑址试掘简报. 华夏考古, 1990, (1).
- [9] 浙江省文物考古研究所, 湖州市博物馆, 德清县博物馆. 浙江东苕溪中游商代原始瓷窑址群. 考古, 2011, (7).
- [10] 安金槐. 对于我国瓷器起源问题的初步探讨. 考古, 1978, (3).
- [11] a. 同 [1]: 111.
b. 陈铁梅. 在宏观和历史的视角下对北方出土商周原始瓷产地的再探讨. 文物, 2016, (6).
c. 周仁, 李家治, 郑永圃. 张家坡西周陶瓷烧造地区的探讨. 考古, 1961, (8).
- [12] 同 [5].
- [13] a. 同 [4].
b. 吴隽, 黄梦璇, 张茂林, 等. 南方各窑址原始瓷产地特征的EDXRF分析. 光谱实验室, 2012, 29 (06).
- [14] WANG Min, ZHU Tiequan, DING Xing, et al. Composition Comparison of Zhejiang Longquan Celadon and its Imitation in Dapu Kiln of Guangdong in the Ming Dynasty of China (1368-1644CE) by LA-ICP-MS. *Ceramics International*, 2018, 44 (02).
- [15] 张斌, 承焕生, 郑建明. PIXE分析浙江德清火烧山窑址出土原始瓷. 核技术, 2014, 37 (05).
- [16] 杨童舒. 小双桥遗址性质研究述评. 华夏考古, 2023, (1).
- [17] 陈铁梅, Rapp G. Jr., 荆志淳. 商周时期原始瓷的中子活化分析及相关问题讨论. 考古, 2003, (7).
- [18] 同 [5].
- [19] 郑建明. 21世纪以来先秦时期印纹硬陶窑址考古新进展: 上. 文物天地, 2021, (6).

[1] 李家治, 编. 中国科学技术史: 陶瓷卷. 北京: 科学出版社, 1998: 13.

[2] 鲁晓珂, 李伟东, 罗宏杰, 等. 二里头遗址出土

- [20] 样品资料由河南省文物考古研究院提供。
- [21] 河南省文物考古研究院, 北京大学考古文博学院, 郑州市文物考古研究院. 郑州小双桥遗址2014年ⅣA02区发掘报告. 华夏考古, 2019, (5).
- [22] a. MAXWELL A J, TEESDALE J W, CAMPBELL L J. The Guelph PIXE Software Package II. Nucl Instrum Meth B, 1995, 95(3).
b. CAMPBELL L J, HOPMAN L T, MAXWELL A J, et al. The Guelph PIXE Software Package III: Alternative Proton Database. Nucl Instrum Meth B, 2000, 170(1-2).
- [23] a. 同 [4].
b. 李科友, 彭适凡. 略论江西吴城商代原始瓷器. 文物, 1975, (7).
c. 金志斌, 崔剑锋, 吴小红. 江西鹰潭角山窑址出土原始瓷及印纹硬陶的成分分析. 考古学研究, 2022, (2).
- [24] a. 同 [6].
b. ZHU Letian, GAO Xiaoling, ZHANG Bin, et al. PIXE and FCA Study on the Provenance of Proto-porcelain of Xia and Shang Dynasty Unearthed from Erlitou and Yinxu Sites, China. Nucl Instrum Meth B, 2023, 540.
- [25] 曾令园, 何汉生, 杨玉璋, 等. 江苏镇江孙家村遗址印纹硬陶制作工艺及相关问题研究. 中国陶瓷, 2022, 58(02).
- [26] 马颖, 马清林, 马泓蛟. 河南巩义窑、河北邢窑出土瓷器的原料来源研究: 以北朝和隋唐时期出产的青瓷、白瓷为例. 文物保护与考古科学, 2018, 30(05).
- [27] 杨玉璋, 曾令园, 陈国梁, 等. 偃师商城遗址出土印纹硬陶和原始瓷的科技分析. 华夏考古, 2024, (2).
- [28] 同 [24].

(责任编辑: 宋笑琳)

(上接92页)

- b. 同 [14]: 80~82, 142~144, 209.
- [53] a. 同 [51].
b. 陈国梁. 偃师商城小城城市空间格局的新认识. 考古, 2023, (12).
- [54] 同 [14]: 226, 227.
- [55] 同 [14]: 232, 233.
- [56] 同 [14]: 229, 230.
- [57] 同 [14]: 230, 231.
- [58] 同 [14]: 110.
- [59] 同 [17].
- [60] 同 [14]: 321, 365.
- [61] 同 [17].
- [62] 谷飞. 关于偃师商城西一城门外护城壕内桥涵设施的复原设想 // 三代考古: 四. 北京: 科学出版社, 2011: 234~241.
- [63] 同 [19].
- [64] 同 [14]: 196~199.
- [65] 同 [18] a.
- [66] 同 [18] a.
- [67] 同 [14]: 200.
- [68] 沈钰, 李国华. 偃师商城水关建筑初探. 智能建筑与智慧城市, 2020, (3).
- [69] 同 [18] b.
- [70] a. 同 [14]: 178.
b. 同 [51].
c. 中国社会科学院考古研究所(中国历史研究院考古研究所)河南第二工作队. 偃师商城遗址Ⅲ号建筑基址群2021—2023年发掘简报. 中原文物, 2023, (5).
- [71] 同 [14]: 185.
- [72] a. 同 [14]: 715~722.
b. 邓玲玲, 陈国梁, 曹慧奇, 等. 偃师商城遗址制陶作坊区的产品与布局结构研究. 江汉考古, 2023, (5).
- [73] 同 [4].
- [74] 刘建国, 彭小军, 陶洋, 等. 江汉平原史前治水文明. 北京: 中国社会科学出版社, 2023: 35~129.
- [75] 同 [1] b.
- [76] 刘亦方. 二里头宫城水利设施的初步研究. 江汉考古, 2025, (1).
- [77] 同 [8] a.

(责任编辑: 贾正言)