

DOI: 10.13957/j.cnki.texb.2021.05.021

三星堆遗址出土陶器成分与夹杂物研究

郭 富¹, 金普军², 雷 雨¹, 冉宏林¹, 李婷婷², 贾 怡²

(1. 四川省文物考古研究院, 四川 成都 610041; 2. 陕西师范大学 材料科学与工程学院, 陕西 西安 710062)

摘 要:三星堆遗址位于鸭子河冲积平原, 富含夹杂物的黏土深刻地影响着三星堆先民的制陶工艺。三星堆遗址第一期至第四期陶器样品的元素含量和夹杂物研究显示, 石英颗粒是陶器中主要夹杂物, 其数量多少直接影响陶器中 Si 元素含量; 第三期陶器组成变化最为显著, 出现了富含 Al 矿物颗粒, 以及石英夹杂物显著减少的现象。三星堆遗址第三期出现了璀璨的青铜器冶铸业, 其采用的陶质坩埚很可能是通过添加富 Al 矿物和减少石英等夹杂物的方式来提高性能, 这种变化亦深刻地影响了当时夹砂陶器的制作。

关键词:三星堆遗址; 陶器; 青关山; 夹杂物

中图分类号: K876.3

文献标志码: A

文章编号: 1000-2278(2021)05-0863-11

Composition and Inclusion of the Potteries Excavated from Sanxingdui Site

GUO Fu¹, JIN Pujun², LEI Yu¹, RAN Honglin¹, LI Tingting², JIA Yi²

(1. The Sichuan Province Cultural Relics and Archaeology Research Institute, Chengdu 610041, Sichuan, China;

2. School of Materials Science and Engineering, Shaanxi Normal University, Xi'an 710062, Shaanxi, China)

Abstract: Sanxingdui site is located on the alluvial plain of Yazhi River with the quartz-rich clay, which influenced deeply the pottery making techniques of Sanxingdui people. This study was aimed to focus on the chemical composition and inclusions of the pottery samples collected from the first to the fourth period of Sanxingdui site. It was revealed that quartz was present as the main inclusion that directly determined the content of Si. Meanwhile, a significant change in chemical composition and inclusion happened in the potteries in the third period, with abundant Al-rich mineral particles and significant reduction in the content of quartz. As well known, brilliant bronze smelting and founding profession were flourished in the third period of Sanxingdui site, during which earthen smelting furnace was strongly demanded, thus having an impact on the production of sand-containing potteries at that time.

Key words: Sanxingdui site; pottery; Qingguanshan; inclusion

0 引 言

陶器是最为重要的标志性发明成果之一, 体现了早期人类利用物理和化学作用促使物质发生质变的一种创造性活动, 揭开了人类利用自然和改造自然的新篇章^[1,2]。陶器在各种文物中具有数量最大、形态复杂多变、与人们生活密切相关的特点, 是各种考古遗存中最为“敏感”的门类,

也是蕴含信息最为丰富的一类文物^[3]。

古代陶器研究涉及诸多方面, 如制陶术的产生及其技术演变、不同陶器使用功能的确定与变化、形态与纹饰(包括附加堆纹)的演变、陶器的产地及其交换等^[4]。西方学者较早关注古陶器所反映的人类行为与社会活动信息, 注重运用各种自然科学手段复原陶器技术, 并建立考古学文化的时空框架^[5,6]。

收稿日期: 2021-04-13。

修订日期: 2021-05-21。

基金项目: 2019 年度四川省省级科研院所基本科研业务费项目“三星堆遗址出土陶器成分分析与研究”; 陕西省科技厅重点研发项目(2020SF-355); 陕西师范大学中央高校重点项目(GK201902014)。

通信联系人: 金普军(1976-), 男, 博士, 教授。

Received date: 2021-04-13.

Revised date: 2021-05-21.

Correspondent author: JIN Pujun (1976-), Male, Ph.D., Professor.

E-mail: jinpj@snnu.edu.cn

科技手段可以提供原料来源、原料加工、成型技术、修整技术、烧制温度、烧制气氛和陶器功能等诸多方面的信息^[7-11],据此建立古陶瓷科技测定和数据处理方法体系^[12-14],从而对古陶器制作工艺进行系统研究。Barone 等人^[15]使用 XRF 及红外光谱对意大利四个遗址中出土的陶片主微量元素进行聚类分析,研究发现,这批陶器的矿料均来源于当地。鲁晓珂^[16]利用显微共聚焦拉曼光谱研究发现,良渚遗址夹砂陶器采用了石器工具和建筑材料废料作为制陶掺合料。崔剑锋等^[17, 18]利用激光剥蚀电感耦合等离子体发射光谱仪对四川、内蒙古等地的陶器进行成分分析,并利用多元统计分析及聚类分析法科学地揭示了这些陶器矿料的来源。

成都平原从中原龙山时期左右到战国先秦文化划可以分成为三大文化阶段,即宝墩文化—三星堆文化—十二桥文化^[19-21]。其中,三星堆古遗址距今已有 3000-5000 年的历史,形成了一支分布范围甚广、影响较大的考古学文化,被称为 20 世纪人类最伟大的考古发现之一,其大量出土的陶器成为遗址考古学文化分期及研究的关键依据。目前,三星堆遗址考古学文化分期存在三期说、四期说和五期说^[22],其中,四期说认可度较高。第一期,属于龙山时代晚期遗存,距今 4500±150 年;第二期,文化面貌较第一期有显著的变化,距今 3765±80 年;第三期与第二期文化面貌相似,是三星堆文化的繁盛期,约属商代中期左右,一号祭祀坑约属于本期后段;第四期距今 3005±105 年,相当于商代晚期,其下限可晚至周初,二号祭祀坑约属于本期前段^[23]。

“十二五”期间,三星堆工作站发掘了“蜀王城”,不仅确认了北城墙,还发现了月亮湾和仓包包两座小城,并且在月亮湾小城内发现了青关山人工土台和大型红烧土建筑,表明青关山台地很有可能在相当长时间内都是三星堆古城的核心区域之一^[24]。值得注意的是,在青关山遗址发现一个长径约 3 m 的三星堆遗址第四期器物坑(编号 H105),出土了大量可修复陶质文物,为认识三星堆文化提供了重要资料。

三星堆遗址位于鸭子河冲积平原,富含夹杂物的黏土深刻地影响着三星堆先民的制陶工艺。本文利用 X 射线荧光光谱法(XRF)对三星堆四期遗址出土的陶片成分含量进行检测及其数理统计分析,同时采用 SEM-Mapping 技术研究了典型陶

器样品夹杂物元素分布特征,并结合陶器气孔率和密度等物理性质,探讨了三星堆陶器夹杂物含量变化规律,为科学地认知三星堆陶器制作技术和考古学分期提供了新思路 and 重要依据。

1 样品与测试

1.1 样品信息

本次试验选取三星堆遗址 86GSIII 区(三星堆发掘点)、2013GsFg(青关山)、2015GsEg(西城墙北段夯土)、2016GsHe(三星堆东城墙)、2017GsEg(西城墙北段内侧)等地点出土陶器样品。陶器样品以砂陶质为主,泥质陶较少,色泽有灰、灰褐、黄等,共计 59 件,见表 1。

三星堆遗址第一期(早期)陶器主要有泥质灰陶和夹砂褐陶两大类;第二期陶器以夹砂褐陶为主,并有一定数量的泥质灰陶和泥质橙黄陶;第三期以夹砂陶为主,有灰褐和黑灰两色;第四期以夹砂褐陶为主,泥质灰陶比例大增,还有少量的夹砂红褐陶和夹砂黑褐陶^[25]。夹砂陶器烧制和使用一直贯穿着三星堆遗址各个时期,这与遗址所处鸭子河冲积平原土质富含石英颗粒有关。

1.2 仪器与方法

采用日本岛津公司生产的 XRF-1800 型波长色散 X 射线荧光光谱仪对陶器样品进行成分分析,铑靶(Rh),工作电压和电流分别为 40 kV 和 95 mA。样品经过研磨成为细粉,采用硼酸压片,分析区域直径为 2.0 cm。

采用 FEI 公司 Quanta 200 型环境扫描电子显微镜进行样品元素分布(Mapping)研究,分析条件为高真空模式 6×10^{-3} Pa,加速电压为 20 kV,样品表面进行喷金处理。

采用水煮法测试陶器样品的显气孔率跟表观相对密度。首先,把样品在 110 °C 下烘 24 h;然后,将样品加热煮沸并保持沸腾状态 2 h,切断电源,使陶器样品完全浸泡在水中冷却至室温,并保持 4 h;最后,用密度仪测量。

试样吸水率计算公式如式(1):

$$w = \frac{m_1 - m_0}{m_0} \times 100\% \quad (1)$$

式中: w 为试样吸水率(%); m_0 为干燥样品质量(g); m_1 为吸水试样质量(g)。

试样显气孔率计算公式如式(2):

$$P = \frac{m_1 - m_0}{m_1 - m_2} \times 100\% \quad (2)$$

表 1 三星堆遗址出土陶器样品信息
Tab. 1 Information of the potteries excavated from the Sanxingdui site

Sample	Archaeological number	Thickness (mm)	Property	Dynasty	Period	Excavated position
No.1-1	2015GsEgcQ1c23	5.93	Grey pottery mixed with sand	Neolithic	First period	North rammed earth of west city wall
No.1-2	2015GsEgH11	7.04	Grey pottery mixed with sand	Neolithic	First period	South part of west city wall
No.1-3	2015GsEgQd25	8.76	Brown pottery mixed with sand	Neolithic	First period	North rammed earth of west city wall
No.1-4	2015GsEgQd25	9.24	Red pottery mixed with sand	Neolithic	First period	North rammed earth of west city wall
No.1-5	2015GsEgcQ1c23	6.78	Grey pottery mixed with sand	Neolithic	First period	North rammed earth of west city wall
No.1-6	2015GsEgQd25	6.23	Yellow pottery mixed with sand	Neolithic	First period	North rammed earth of west city wall
No.1-7	2015GsEgQd25	6.97	Grey pottery mixed with sand	Neolithic	First period	North rammed earth of west city wall
No.1-8	2015GsEgQd25	9.23	Grey pottery mixed with sand	Neolithic	First period	North rammed earth of west city wall
No.1-9	2015GsEgcQ1c23	5.11	Grey-brown pottery mixed with sand	Neolithic	First period	North rammed earth of west city wall
No.1-10	2015GsEgcQ1c23	6.44	Yellow pottery mixed with sand	Neolithic	First period	North rammed earth of west city wall
No.1-11	2015GsEgcQ1c23	6.41	Argillaceous grey pottery	Neolithic	First period	North rammed earth of west city wall
No.1-12	2015GsEgQd25	6.61	Yellow pottery mixed with sand	Neolithic	First period	North rammed earth of west city wall
No.1-13	2015GsEgcQ1c23	5.20	Grey pottery mixed with sand	Neolithic	First period	North rammed earth of west city wall
No.1-14	2015GsEgH11	7.69	Grey pottery mixed with sand	Neolithic	First period	South part of west city wall
No.1-15	2015GsEgH11	9.80	Grey pottery mixed with sand	Neolithic	First period	South part of west city wall
No.2-1	2017GsEgT7067 扩方⑦B	10.65	Grey pottery mixed with sand	Xia-Shang Dynasty	Second period	North inside region of west city wall
No.2-2	2017GsEgT7067 扩方⑦B	5.91	Grey pottery mixed with sand	Xia-Shang Dynasty	Second period	North inside region of west city wall
No.2-3	2017GsEgT7067 扩方⑦B	5.85	Grey pottery mixed with sand	Xia-Shang Dynasty	Second period	North inside region of west city wall
No.2-4	2017GsEgT7067 扩方⑦B	5.95	Grey pottery mixed with sand	Xia-Shang Dynasty	Second period	North inside region of west city wall
No.2-5	2017GsEgT7067 扩方⑦B	6.97	Grey pottery mixed with sand	Xia-Shang Dynasty	Second period	North inside region of west city wall
No.2-6	2017GsEgT7067 扩方⑦B	9.13	Grey pottery mixed with sand	Xia-Shang Dynasty	Second period	North inside region of west city wall
No.2-7	2017GsEgT7067 扩方⑦B	8.20	Grey pottery mixed with sand	Xia-Shang Dynasty	Second period	North inside region of west city wall
No.2-8	2017GsEgT7067 扩方⑦B	6.03	Argillaceous grey pottery	Xia-Shang Dynasty	Second period	North inside region of west city wall
No.2-9	2017GsEgT7067 扩方⑦B	5.45	Argillaceous grey pottery	Xia-Shang Dynasty	Second period	North inside region of west city wall
No.2-10	2017GsEgT7067 扩方⑦B	7.42	Grey pottery mixed with sand	Xia-Shang Dynasty	Second period	North inside region of west city wall
No.2-11	2017GsEgT7067 扩方⑦B	6.14	Grey pottery mixed with sand	Xia-Shang Dynasty	Second period	North inside region of west city wall
No.2-12	2017GsEgT7067 扩方⑦B	7.96	Grey pottery mixed with sand	Xia-Shang Dynasty	Second period	North inside region of west city wall
No.2-13	2017GsEgT7067 扩方⑦B	11.25	grey pottery mixed with sand	Xia-Shang Dynasty	Second period	North inside region of west city wall
No.2-14	2017GsEgT7067 扩方⑦B	5.17	Argillaceous grey pottery	Xia-Shang Dynasty	Second period	North inside region of west city wall

续表 1

Sample	Archaeological number	Thickness(mm)	Property	Dynasty	Period	Excavated position
No.3-1	2017GsEgT7067 扩方⑤d-3	4.26	grey pottery mixed with sand	Shang Dynasty	Third period	North inside region of west city wall
No.3-2	2017gsegt7067 扩方⑤d-3	6.71	Grey-brown pottery mixed with sand	Shang Dynasty	Third period	North inside region of west city wall
No.3-3	2017gsegt7067 扩方⑤d-3	5.75	Grey pottery mixed with sand	Shang Dynasty	Third period	North inside region of west city wall
No.3-4	2017gsegt7067 扩方⑤d-3	10.02	Grey-black pottery mixed with sand	Shang Dynasty	Third period	North inside region of west city wall
No.3-5	2017gsegt7067 扩方⑤d-3	7.80	Grey pottery mixed with sand	Shang Dynasty	Third period	North inside region of west city wall
No.3-6	86gsIII1516⑧b	6.45	Brown pottery mixed with sand	Shang Dynasty	Third period	Excavated site
No.3-7	86gsIII1516⑧b	13.83	Red pottery mixed with sand	Shang Dynasty	Third period	Excavated site
No.3-8	2017gsegt7067 扩方⑤d-3	6.03	Grey pottery mixed with sand	Shang Dynasty	Third period	North inside region of west city wall
No.3-9	2017gsegt7067 扩方⑤d-3	8.12	Grey-yellow pottery mixed with sand	Shang Dynasty	Third period	North inside region of west city wall
No.3-10	2017gsegt7067 扩方⑤d-3	10.64	Grey pottery mixed with sand	Shang Dynasty	Third period	North inside region of west city wall
No.3-11	86gsIII1516⑧b	7.51	Grey pottery mixed with sand	Shang Dynasty	Third period	Excavated site
No.3-12	86gsIII1516⑧b	6.15	Grey pottery mixed with sand	Shang Dynasty	Third period	Excavated site
No.3-13	86gsIII1516⑧b	10.7	Grey-brown pottery mixed with sand	Shang Dynasty	Third period	Excavated site
No.3-14	86gsIII1516⑧b	7.47	Grey pottery mixed with sand	Shang Dynasty	Third period	Excavated site
No.3-15	86gsIII1516⑧b	7.40	Grey-yellow pottery mixed with sand	Shang Dynasty	Third period	Excavated site
No.4-1	2016gsheg3①	13.11	Grey pottery mixed with sand	West Zhou Dynasty	Fourth period	East city wall
No.4-2	2016gsheg3①	6.70	Brown pottery mixed with sand	West Zhou Dynasty	Fourth period	East city wall
No.4-3	2017gsegt6667 东扩方④	6.69	Brown pottery mixed with sand	West Zhou Dynasty	Fourth period	North inside region of west city wall
No.4-4	2016gsheg3①	4.48	Grey-brown pottery mixed with sand	West Zhou Dynasty	Fourth period	East city wall
No.4-5	2016gsheg3①	6.85	Yellow pottery mixed with sand	West Zhou Dynasty	Fourth period	East city wall
No.4-6	2017gsegt6667 东扩方④	7.31	Grey-brown pottery mixed with sand	West Zhou Dynasty	Fourth period	North inside region of west city wall
No.4-7	2017gsegt6667 东扩方④	9.96	Grey pottery mixed with sand	West Zhou Dynasty	Fourth period	North inside region of west city wall
No.4-8	2017gsegt6667 东扩方④	7.81	Grey pottery mixed with sand	West Zhou Dynasty	Fourth period	North inside region of west city wall
No.4-9	2017gsegt6667 东扩方④	7.67	Grey pottery mixed with sand	West Zhou Dynasty	Fourth period	North inside region of west city wall
No.4-10	2017gsegt6667 东扩方④	6.05	Grey-brown pottery mixed with sand	West Zhou Dynasty	Fourth period	North inside region of west city wall
No.4-11	2013gsfgh105	5.92	Grey pottery mixed with sand	West Zhou Dynasty	Fourth period	Qingguanshan
No.4-12	2013gsfgh105	7.33	Grey-brown pottery mixed with sand	West Zhou Dynasty	Fourth period	Qingguanshan
No.4-13	2013gsfgh105	3.94	Argillaceous grey pottery	West Zhou Dynasty	Fourth period	Qingguanshan
No.4-14	2013GsFgH105	7.17	grey pottery mixed with sand	West Zhou Dynasty	Fourth period	Qingguanshan
No.4-15	2013GsFgH105	5.64	grey pottery mixed with sand	West Zhou Dynasty	Fourth period	Qingguanshan

试样表观相对密度计算公式如式(3):

$$T = \frac{m_0}{m_0 - m_2} \quad (3)$$

式(2)、(3)中: P 为显气孔率(%); T 为表观相对密度; m_0 为干燥样品质量(g); m_1 为吸水饱和试样质量(g); m_2 为真空法吸水饱和后悬挂在水中的试样质量(g)。

2 结果与讨论

2.1 样品 XRF 检测分析

三星堆第一期至第四期陶器样品中夹砂陶器一直占有主要地位, 利用 XRF 元素检测分析有助于认知陶器原料使用特点。因此, 在陶器样品制备时, 采用锤击粉碎后, 进行直接研磨处理的方式制备粉末测试样品。XRF 检测数据见表 2。

通过采用 SPSS 软件对表 2 的成分数据进行聚类分析发现, 三星堆各期样品相互重叠, 说明基

于元素含量数据不能有效地区分各期陶器。表 3 是三星堆遗址出土陶器主次量元素化学组成均值与标准差。从表中可以发现, SiO_2 、 Al_2O_3 、 Fe_2O_3 和 P_2O_5 标准差较大, 表明这些成分在不同样本个体中含量偏离度大, 与夹杂物存在一定的关系, 见表 3。图 1 是三星堆遗址不同分期陶器样品元素含量分布箱线图, 由 SiO_2 、 Al_2O_3 、 Fe_2O_3 和 P_2O_5 的平均含量变化可以发现: SiO_2 含量从第三期开始下降; Al_2O_3 含量从第二期开始上升; Fe_2O_3 含量从第三期开始上升; P_2O_5 含量变化不明显。其中, SiO_2 含量变化幅度最大, 说明含硅类物质是陶器中重要夹杂物。

2.2 三星堆陶器样品断面元素分布 Mapping

古代陶质文物一般以黏土和高岭土为主要原料, 经过选料、淘洗、沉淀、制胎、成型、干燥、低温焙烧(700 °C-1000 °C)等一系列工艺制成, 其除了晶体、玻璃和气相之外, 还夹杂了大量的掺杂物^[26]。三星堆遗址位于鸭子河两侧, 土壤中存在大量石英颗粒。

表 2 三星堆遗址出土陶器样品 XRF 化学组成 (wt.%)

Tab. 2 Chemical compositions of the potteries excavated from the Sanxingdui site analyzed with XRF (wt.%)

Sample	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	P_2O_5	CaO	Na_2O	MgO	TiO_2	K_2O
No.1-1	65.40	21.10	4.39	3.74	1.66	1.66	1.28	0.63	—
No.1-2	69.71	19.30	3.90	3.70	1.26	0.76	0.69	0.70	—
No.1-3	63.17	22.53	5.77	1.42	1.33	0.87	1.79	0.80	2.31
No.1-4	64.50	20.76	5.94	1.43	1.25	1.17	1.71	0.81	2.35
No.1-5	62.15	22.54	5.78	2.61	1.02	0.93	1.27	0.80	2.77
No.1-6	60.94	23.49	5.74	3.80	1.13	0.79	0.81	0.82	2.47
No.1-7	62.97	21.06	5.67	4.82	1.79	1.34	1.43	0.92	—
No.1-8	62.93	21.79	6.87	2.33	1.81	1.27	2.01	0.89	—
No.1-9	61.60	22.44	5.42	2.70	1.66	1.25	1.85	0.69	2.40
No.1-10	63.43	21.26	6.11	3.49	1.62	1.23	1.99	0.87	—
No.1-11	64.10	23.61	5.92	1.05	1.28	0.85	2.32	0.83	—
No.1-12	63.04	21.88	4.93	2.51	1.57	1.47	1.23	0.79	2.54
No.1-13	65.36	23.43	7.21	—	0.96	—	1.94	1.02	—
No.1-14	65.05	22.03	4.98	3.70	1.17	0.83	1.41	0.82	—
No.1-15	64.87	22.73	6.21	0.82	1.41	0.72	2.26	0.86	—
No.2-1	67.78	23.55	3.89	—	1.65	0.96	1.36	0.81	—
No.2-2	66.43	24.89	4.50	—	1.27	0.90	1.24	0.78	—
No.2-3	61.46	23.18	5.24	1.95	1.77	1.02	2.06	0.89	2.38
No.2-4	64.05	23.02	4.77	0.98	1.39	—	1.98	0.84	2.97
No.2-5	64.41	22.74	4.58	1.69	1.12	0.90	1.25	0.76	2.55
No.2-6	64.34	21.21	8.13	2.00	1.90	—	1.59	0.84	—

续表 2

Sample	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	P ₂ O ₅	CaO	Na ₂ O	MgO	TiO ₂	K ₂ O
No.2-7	65.83	22.75	5.33	1.71	1.25	0.90	1.45	0.70	—
No.2-8	67.47	22.82	1.72	4.25	1.21	0.91	0.83	0.79	—
No.2-9	68.00	23.57	5.02	0.29	0.88	—	1.31	0.93	—
No.2-10	63.87	23.37	5.82	—	1.23	1.06	1.44	0.86	2.34
No.2-11	58.51	22.25	5.94	5.38	2.06	1.30	1.25	0.79	2.40
No.2-12	67.11	20.80	4.79	3.28	1.50	0.75	1.09	0.67	—
No.2-13	69.82	23.36	3.07	0.18	0.39	—	2.19	0.93	—
No.2-14	66.31	22.77	2.60	3.89	1.55	1.04	0.93	0.90	—
No.3-1	57.47	24.78	8.11	4.59	1.82	0.78	1.53	0.81	—
No.3-2	64.19	23.39	6.46	—	2.01	1.46	1.73	0.66	—
No.3-3	57.21	26.71	8.27	2.61	1.49	0.86	1.80	1.05	—
No.3-4	62.38	23.28	4.25	4.83	1.83	1.06	1.09	1.23	—
No.3-5	60.84	22.25	6.25	3.25	1.66	0.80	1.49	0.85	2.48
No.3-6	58.65	22.59	8.73	3.10	1.58	0.92	1.40	0.89	2.11
No.3-7	59.69	22.06	5.95	5.28	1.54	0.73	1.52	0.65	2.42
No.3-8	53.28	26.21	7.94	4.77	2.00	1.11	1.66	0.97	2.01
No.3-9	65.66	24.00	5.27	—	1.54	1.12	1.51	0.80	—
No.3-10	60.50	21.48	8.23	4.41	1.91	0.99	1.53	0.94	—
No.3-11	56.96	22.41	7.02	5.66	2.02	0.82	1.45	0.86	2.78
No.3-12	61.37	23.58	4.94	5.47	1.54	1.23	0.97	0.83	—
No.3-13	62.83	22.74	9.16	—	1.76	1.19	1.23	1.01	—
No.3-14	57.89	22.33	7.52	3.08	2.43	1.05	2.09	0.90	2.50
No.3-15	60.25	24.97	6.59	3.98	1.58	0.73	0.99	0.74	—
No.4-1	62.78	21.76	4.82	3.52	1.49	1.29	1.29	0.65	2.34
No.4-2	61.15	23.48	6.32	1.67	1.12	1.39	1.70	0.94	2.10
No.4-3	64.12	22.07	5.90	2.50	1.91	1.28	1.21	0.82	—
No.4-4	60.09	23.95	7.28	1.10	0.90	1.35	1.97	0.91	2.27
No.4-5	65.75	24.92	4.71	—	1.26	0.75	1.59	0.87	—
No.4-6	60.12	22.04	6.76	3.46	1.77	0.83	1.09	0.98	2.80
No.4-7	56.28	24.78	7.22	3.44	1.73	1.19	1.63	0.96	2.61
No.4-8	65.55	21.22	4.75	3.15	1.71	1.38	1.49	0.70	—
No.4-9	61.60	22.71	5.76	3.04	1.26	0.92	1.40	0.86	2.37
No.4-10	66.80	22.19	5.76	—	1.78	1.15	1.43	0.74	—
No.4-11	64.78	21.29	5.55	1.16	1.36	1.16	1.62	0.71	2.31
No.4-12	54.43	23.60	8.00	6.23	1.96	1.31	1.25	0.73	2.30
No.4-13	60.97	24.51	5.11	3.80	1.13	0.65	—	1.14	2.64
No.4-14	60.50	24.28	6.09	5.21	—	1.58	1.38	0.82	—
No.4-15	63.54	22.31	5.84	4.46	1.63	—	1.24	0.82	—

注: Cr₂O₃、CuO、ZnO、ZrO₂等微量未计入

表 3 三星堆遗址出土陶器主次量元素化学组成均值与标准差 (wt.%)

Tab. 3 Mean values and standard deviation of chemical compositions of the potteries from the Sanxingdui site (wt.%)

	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	P ₂ O ₅	K ₂ O	CaO	Na ₂ O	MgO	TiO ₂	MnO
Average value	62.75	22.85	5.84	2.67	1.03	1.49	0.95	1.46	0.84	0.05
Number	59	59	59	59	59	59	59	59	59	59
Standard deviation	3.54	1.36	1.47	1.79	1.22	0.41	0.40	0.41	0.12	0.05

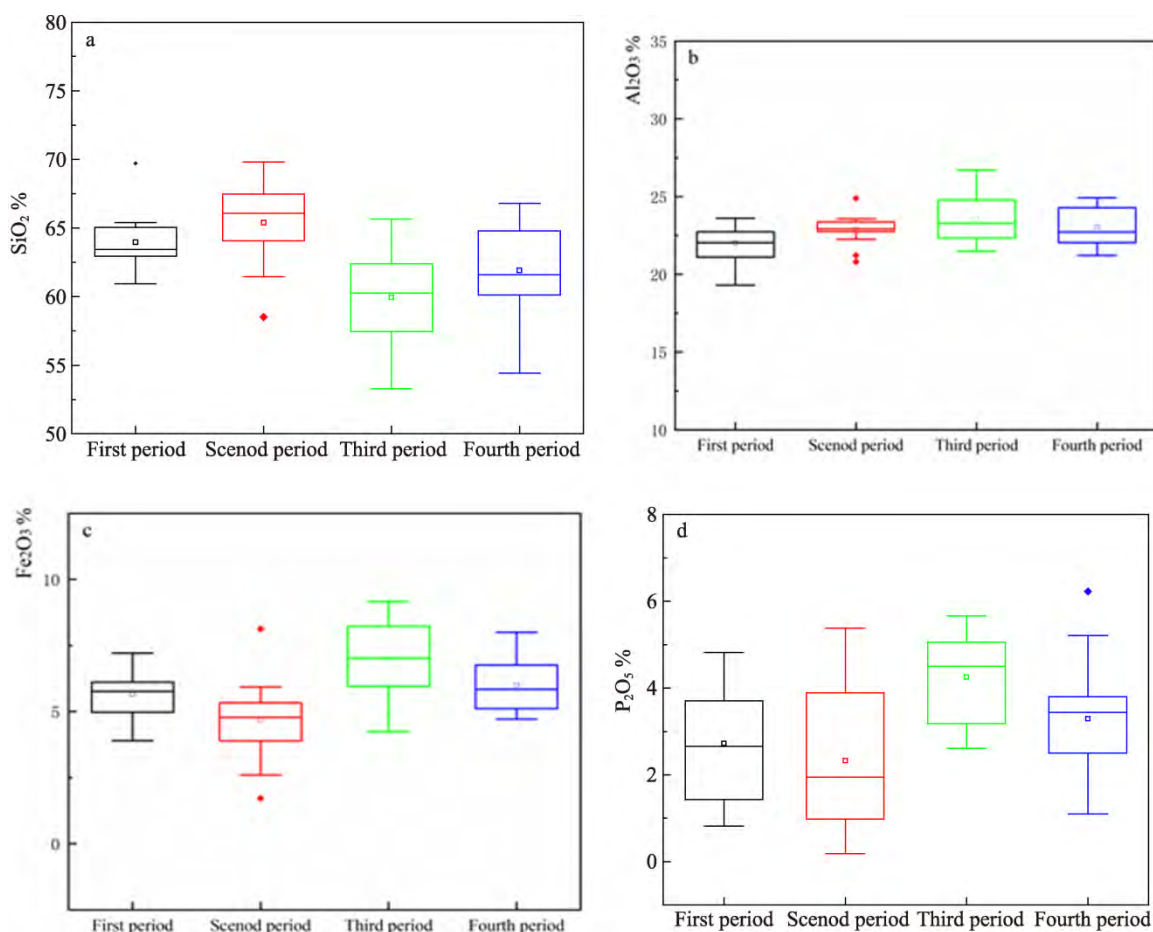


图 1 三星堆遗址第一到第四期陶器样品化学组成箱线图

Fig. 1 Chemical composition box-plots of the potteries from the first period to the fourth period of Sanxingdui site

针对样品中 SiO₂、Al₂O₃ 和 Fe₂O₃ 标准差较大, 变化规律显著的特点(表 3), 利用 SEM 对第一期到第四期的夹砂陶器进行了断面元素分布研究, 见图 2。样品中 Si 元素分布显示了第一、二期陶器存在粗大的石英颗粒, 在第三期时显著减少, 在第四期则又大量出现。三星堆遗址处于鸭子河冲积平原, 黏土中富含石英颗粒, 第三期陶器中石英颗粒大量减少说明当时工匠很可能采用筛分技术去除了黏土中大量的夹杂物。

样品中石英颗粒含量、粒径尺寸和分布情况, 反映出三星堆先民对陶器原料加工处理过程的技术选择^[27, 28]。夹杂物多少和粒径不仅会影响生坯

收缩和开裂, 也会影响到陶器的耐热性、机械强度、气孔率和密度等物理性能。

此外, Al₂O₃ 分布显示第三、四期陶器出现了富含铝的颗粒物, 也导致第三、四期陶器 Al₂O₃ 含量较第一、二期略有升高。第三、四期中 Al₂O₃ 含量升高与其原料中含 Al 矿物颗粒密切相关。

三星堆遗址第一至第四期陶器中石英颗粒和含铝矿物添加情况充分说明三星堆先民在陶器制备技术方面存在技术选择的过程。值得注意的是, 三星堆遗址在第三期发展出璀璨的黄金和青铜冶铸技术, 作为冶炼工具的陶质坩埚是必不可少的工具。含铝矿物能够在陶器烧制时形成耐高温的

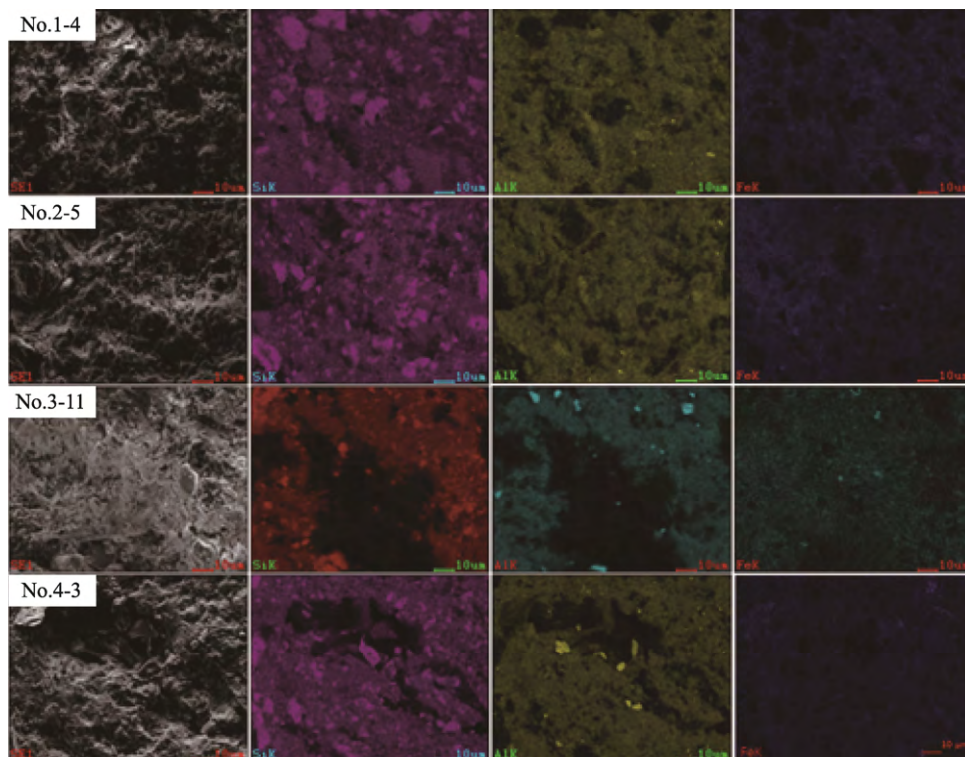


图2 Si、Al和Fe的元素分布图
Fig. 2 Elemental mapping profiles of Si, Al and Fe

Al_2O_3 ，提升陶器耐高温性能。

中国早期发现的商代重庆彭水徐家坝遗址出土的冶铜用船形杯陶胎中含有大量石英颗粒^[29]，且出土的殷墟孝民屯坩埚存在较多粉砂和孔隙^[30]。晚期外加热坩埚通常含有较高的 Al_2O_3 和较低的 SiO_2 ，其可能是通过加入高岭土类耐火黏土—“甘土”来提高性能^[31]。

三星堆遗址第三期陶器开始出现含铝矿物和石英夹杂物减少的现象，导致 Al 含量有所上升，这很可能与当时青铜冶炼技术密切相关。因为迅速兴起的青铜冶炼业大幅促进了高性能陶质坩埚的发展。制陶工匠通过添加含铝矿物(或者选择富含铝矿的黏土)和筛除技术来降低石英颗粒等夹杂物的含量，从而提高陶质坩埚耐热性能，同时把这种工艺延伸至一般陶器的制作。随着第四期三星堆冶铸业的衰落，制陶工匠可能会考虑成本问题而放弃对石英颗粒等夹杂的深度筛除。

2.3 三星堆陶器样品吸水率、显气孔率及表观相对密度分析

图3是三星堆陶器气孔率和表观相对密度箱线图。Morariu等人发现古代陶器中存在的气孔与陶器原料和烧成温度密切相关，低温烧制的陶器存在较多大而不均的气孔^[32]。三星堆大部分陶器

气孔率分布在20%-35%，反映了制陶工艺的复杂性。这与其原料和烧制温度变化大有重要关系。

图3(b)是陶器表观相对密度的分布箱线图。从图中可以看出，第一、二期陶器密度接近，第三、四期陶器密度接近，从第一、二期到第三、四期密度略微增大。这可能是由于受到后期陶器中 Al 和 Fe 元素含量增大的影响。此外，第一期和第四期存在较窄范围的密度分布范围，说明这两期陶器在各自原料处理和制作工艺高度统一。

三星堆陶器表观相对密度箱线图显示，第一期陶器和第四期陶器表观相对密度呈窄分布趋势。这也充分地说明三星堆先民定居于鸭子河两岸后，在制陶业存在一个技术选择的过程。

3 结 论

(1) 三星堆遗址陶器中夹杂物以石英颗粒为主。第一、二期陶器夹杂大量粒径不一的石英颗粒；第三期陶器出现了富含 Al 的矿物颗粒以及石英颗粒显著减少的现象；第四期陶器中石英颗粒又显著增加。这一过程体现了第三期陶器制作技术很可能受到了同时期青铜冶铸业陶质坩埚制作工艺的影响。

表 4 三星堆遗址出土陶器样品吸水率、显气孔率和表观相对密度数据
Tab. 4 Water absorption, apparent porosity and relative density of the potteries from the Sanxingdui site

Sample	Water absorption (%)	Apparent porosity (%)	Apparent relative density	sample	Water absorption (%)	Apparent porosity (%)	Apparent relative density
No.1-1	14.10	23.82	2.22	No.3-2	10.62	22.41	2.72
No.1-2	15.25	26.68	2.39	No.3-3	18.25	27.76	2.11
No.1-3	13.88	24.67	2.36	No.3-4	13.00	20.46	1.98
No.1-4	13.45	23.43	2.28	No.3-5	11.81	24.44	2.74
No.1-5	17.35	28.37	2.28	No.3-6	11.57	27.45	3.27
No.1-6	13.11	23.40	2.33	No.3-7	16.05	34.74	3.32
No.1-7	14.66	26.77	2.49	No.3-8	17.20	26.94	2.14
No.1-8	7.30	14.62	2.35	No.3-9	15.68	37.77	3.87
No.1-9	20.67	31.19	2.19	No.3-10	13.39	26.10	2.64
No.1-10	19.17	30.05	2.24	No.3-11	10.62	22.41	2.72
No.1-11	17.51	26.70	2.08	No.3-12	9.74	20.90	2.71
No.1-12	16.02	26.24	2.22	No.3-13	12.59	32.14	3.76
No.1-13	23.33	35.19	2.33	No.3-14	11.00	20.24	2.31
No.1-14	11.34	20.56	2.28	No.3-15	11.38	24.35	2.83
No.1-15	15.94	25.79	2.18	No.4-1	13.31	26.04	2.65
No.2-1	12.99	39.25	4.97	No.4-2	20.24	34.68	2.62
No.2-2	13.32	22.19	2.14	No.4-3	17.08	31.02	2.63
No.2-3	20.77	32.75	2.34	No.4-4	20.59	35.14	2.63
No.2-4	20.77	28.42	1.91	No.4-5	17.00	30.56	2.59
No.2-5	16.33	25.71	2.12	No.4-6	10.91	21.86	2.56
No.2-6	17.26	42.77	4.33	No.4-7	17.98	32.15	2.64
No.2-7	13.72	24.03	2.31	No.4-8	11.02	22.12	2.58
No.2-8	6.15	10.59	1.93	No.4-9	13.68	25.65	2.52
No.2-9	22.06	32.83	2.22	No.4-10	6.99	14.27	2.38
No.2-10	16.73	30.94	2.68	No.4-11	14.35	27.03	2.58
No.2-11	8.72	15.16	2.05	No.4-12	15.47	29.34	2.68
No.2-12	10.02	20.61	2.59	No.4-13	18.46	31.21	2.46
No.2-13	20.74	35.72	2.68	No.4-14	16.20	30.08	2.66
No.2-14	15.99	27.21	2.34	No.4-15	11.84	23.31	2.57
No.3-1	12.15	21.51	2.26				

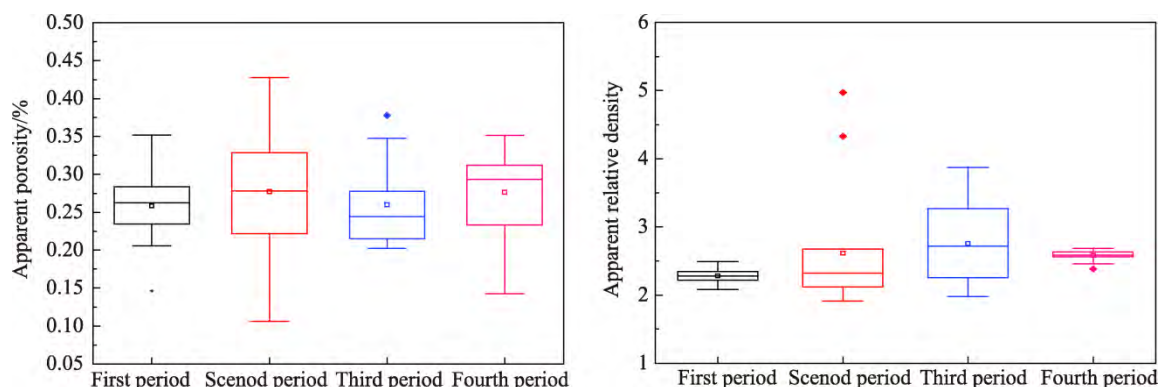


图3 三星堆陶器出土陶器的显气孔率和表观相对密度箱线图

Fig. 3 Apparent porosity and relative density box-plots of the potteries from the Sanxingdui site

(2) 三星堆陶器密度显示,三星堆遗址第一期和第四期存在较窄密度分布范围,而第二和三期陶器密度范围较广。这充分说明三星堆先民定居于鸭子河两岸后,其制陶业也经历了一个技术选择过程。

参考文献:

- [1] WU X H, ZHANG C, PAUL G, et al. Early pottery at 20,000 years ago in Xianrendong cave [J]. *Science*, 2012, 336(6089): 1696-1700.
- [2] SHELACH G. On the invention of pottery [J]. *Science*, 2012, 336(6089): 1644-1645.
- [3] 赵辉. 当今考古学的陶器研究[J]. *南方文物*, 2019, (1): 1-10.
ZHAO H. Cultural Relics in Southern China, 2019, (1): 1-10.
- [4] 李文杰. 中国古代制陶工艺研究[M]. 北京: 科学出版社, 1996.
- [5] SHEPARD A O. Problems in pottery analysis [J]. *American Antiquity*, 1966, 31(6): 870-871.
- [6] PEACOCK D P S. The scientific analysis of ancient ceramics: A review [J]. *World Archaeology*, 1970, 1(3): 375-389.
- [7] JUDIT M, MARIO V S, JOSEFINA P A. Chemical and textural characterization of tin glazes in Islamic ceramics from eastern Spain [J]. *Journal of Archaeological Science*, 2001, 28(3): 331-340.
- [8] 单洁. 古陶产地理论及相关研究[D]. 中国科学技术大学, 2002.
- [9] 朱铁权, 王昌燧, 王晓琪, 等. 古代陶衣的微区拉曼光谱与电子探针线扫描分析[J]. *分析测试学报*, 2005, 24(6): 66-69.
ZHU T Q, WANG C S, WANG X Q. *Journal of Instrumental Analysis*, 2005, 24(6): 66-69.
- [10] 雷勇, 冯松林, 冯向前, 等. 唐恭陵哀妃墓出土唐三彩的中子活化分析和产地研究[J]. *中原文物*, 2005, (1): 86-89.
LEI Y, FENG S L, FENG X Q, et al. *Cultural Relics of Central China*, 2005, (1): 86-89.
- [11] 王正东, 毛振伟, 陈国庆, 等. 上机房营子遗址出土陶器的 XRF 分析研究[J]. *光谱实验室*, 2007, 4(24): 725-728.
WANG Z D, MAO Z W, CHEN G Q, et al. *Chinese Journal of Spectroscopy Laboratory*, 2007, 4(24): 725-728.
- [12] 李家治. 中国科学技术史: 陶瓷卷[M]. 北京: 科学出版社, 1998.
- [13] 罗宏杰. 中国古陶瓷和多元统计分析[M]. 北京: 中国轻工业出版社, 1997.
- [14] 陈铁梅, 王建平. 古陶瓷的成分测定, 数据处理和考古解释[J]. *文物保护与考古科学*, 2003, 15(4): 50-56.
CHEN T M, WAGN J P. *Sciences of Conservation and Archaeology*, 2003, 15(4): 50-56.
- [15] BARONE G, GIUDICE A L, MAZZOLENI P, et al. Chemical characterization and statistical multivariate analysis of ancient pottery from Messina, Catania, Lentini and Siracusa (Sicily) [J]. *Archaeometry*, 2010, 47(4): 745-762.
- [16] 鲁晓珂, 李伟东, 李新伟. 夹砂陶器掺合料的初步研究[J]. *文物保护与考古科学*, 2018, 30(5): 1-8.
LU X K, LI W D, LI X W, *Sciences of Conservation and Archaeology*, 2018, 30(5): 1-8.
- [17] 崔剑锋, 吴小红, 杨颖亮. 四川茂县新石器遗址陶器的成分分析及来源初探[J]. *文物*, 2011, (2): 79-85.
CUI J F, WU X H, YANG Y L. *Cultural Relics*, 2011, (2): 79-85.
- [18] 崔剑锋, 刘爽, 彭善国, 等. 赤峰北部辽代窑址出土陶瓷残片及窑具的成分分析[J]. *边疆考古研究*, 2009: 309-316.

- CUI J F, LIU S, PENG S G, et al. Research of China's Frontier Archaeology, 2009: 309-316.
- [19] 江章华, 王毅, 张擎. 成都平原先秦文化初论[J]. 考古学报, 2002, (1): 1-22.
- JIANG Z H, WANG Y, ZHANG Q. Acta Archaeologica Sinica, 2002, (1): 1-22.
- [20] 高大伦, 郭明. 三星堆遗址古文明的长度宽度和高度[J]. 四川文物, 2016, (6): 79-83.
- GAO D L, GUO M. Sichuan Cultural Relics, 2016, (6): 79-83.
- [21] 赵殿增. 三星堆考古新发现与古蜀文明新认识[J]. 四川文物, 2017, (1): 68-75.
- ZHAO D Z. Sichuan Cultural Relics, 2017, (1): 68-75.
- [22] 雷雨, 冉宏林. “三星堆与世界上古文明暨纪念三星堆祭祀坑发现三十周年国际学术研讨会”综述[J]. 四川文物, 2016, (5): 91-96.
- LEI Y, RAN H L. Sichuan Cultural Relics, 2016, (5): 91-96.
- [23] 杜金鹏. 三星堆文化与二里头文化的关系及相关问题[J]. 四川文物, 1995, (1): 3-9.
- DU J P. Sichuan Cultural Relics, 1995, (1): 3-9.
- [24] 国家文物局编. 中国重要考古发现 2013[M]. 北京: 文物出版社, 2014.
- [25] 陈德安. 三星堆遗址的发现与研究[J]. 中华文化论坛, 1998, (2): 57-63.
- CHEN D A. Forum on Chinese Culture, 1998, (2): 57-63.
- [26] MATA M P, PEACOR D R, GALLART-MARTI M D. Transmission electron microscopy (TEM) applied to ancient pottery [J]. Archaeometry, 2002, 44(2): 155-176.
- [27] SILLAR B, TITE M S. The challenge of ‘Technological choices’ for material science approaches in archaeology [J]. Archaeometry, 2000, 42(1): 2-20.
- [28] 郭梦. 操作链理论与陶器制作技术研究[J]. 考古, 2013, (4): 96-104.
- GUO M. Archaeology, 2013, (4): 96-104.
- [29] 杨小刚, 邹后曦, 赵丛苍, 等. 重庆彭水徐家坝遗址出土商周时期的船形杯功能研究[J]. 文物保护与考古科学, 2012, 24(1): 26-31.
- YANG X G, ZOU H X, ZHAO C C, et al. Sciences of Conservation and Archaeology, 2012, 24(1): 26-31.
- [30] 岳占伟, 荆志淳, 刘煜, 等. 殷墟陶范、陶模、泥芯的材料来源与处理[J]. 南方文物, 2015, (4): 152-159.
- YUE Z W, JING Z C, LIU Y, et al. Cultural Relics in Southern China, 2015, (4): 152-159.
- [31] 周文丽, 刘思然, 陈建立. 中国古代冶金用坩埚的发现和研究[J]. 自然科学史研究, 2016, 35(3): 358-370.
- ZHOU W L, LIU S R, CHEN J L. Studies in the History of Natural Sciences, 2016, 35(3): 358-370.
- [32] MORARIU V, BOGDAN V, ARDELEAN M. Ancient pottery: Its pore structure [J]. Archaeometry, 1977, 19(2): 187-192.

(编辑 王三海)