

“工”与“匠”的多元性重建： 三星堆祭祀坑青铜器铸造工艺再观察^{*}

肖红艳（北京大学考古文博学院）
张跃芬（三星堆博物馆）
吴钰洁（北京大学考古文博学院）
雷雨（四川省文物考古研究院）
冉宏林（北京大学考古文博学院）
崔剑锋（北京大学考古文博学院）

摘要：长期以来，三星堆青铜器群的产源问题一直存在争议。三星堆青铜器群铸造工艺多样，铜容器合金成分和铅同位素复杂，可能存在多个来源，铜神器成分和铅同位素比值较一致，很可能是同时同地铸造的。三星堆祭祀坑青铜器群是多组工匠组织分工协作的产物，包括中原系、南方系在内的多组工匠在短时间内共同铸造了三星堆祭祀坑中大量的青铜神器，本地工匠出于使用需要又进行了铸后切割、穿孔。这种多地区多工种共同参与青铜器生产的工匠组织形式表明，晚商时期全国至少形成了以中原和长江中下游为代表的多个冶金中心，并可能通过原料交易、产品输出和技术转移扩大其自身的影响力，一个广域的市场体系已经初步形成。

关键词：三星堆；青铜器；铸造工艺；工匠组织；科技分析

Abstract: The discovery of numerous distinctive bronze wares in the sacrificial pits at Sanxingdui site reveals a completely new civilization in the southwestern China. Addressing the 'origination' issue is of significant importance in accurately understanding the developmental level of the Sanxingdui civilization as well as the relationship between Sanxingdui society and Shang Dynasty. However, no consensus has been reached about the provenance of the bronze artifacts unearthed from sacrificial pits of Sanxingdui site. Aimed at solving this problem, the focus of this paper has been innovatively put on the craftsman organization. The casting methods, trace elemental compositions and lead isotopic data of bronze wares unearthed from No.1 and No.2 sacrificial pits at Sanxingdui site are systematically reviewed in this paper. The results suggested that the bronze wares were produced by at least three different craftsman groups respectively originated from Central Plain, the Middle and Lower reaches of the Yangtze River (M-L Yangtze River) and local area. Craftsmen from Central Plain and M-L Yangtze River jointly cast most of local sacrificial bronze artifacts such as trees, masks, statues in a short time, while local craftsmen drilled holes on some masks later for a certain practical purpose. The high similarity in elemental compositions and lead isotopes of sacrificial bronze artifacts of local style indicates a high probability that they were cast simultaneously at the same spot. Conversely, the bronze vessels exhibit relatively dispersed chemical compositions and lead isotopes, suggesting multiple raw material sources, different production locations and subsequent circulation might be involved. The fact of multi-region and multi-labor cooperation for bronze casting shows that during the late Shang Period, several metallurgical centers, represented by the Central Plains and the M-L Yangtze River, expanded their influence through raw material trading, product exporting and even technology transferring.

Key Words: Sanxingdui site, Bronze wares, Casting technique, Craftsman organization, Scientific analysis

^{*} 基金项目：国家重点研发计划“中华文明起源进程中的生业、资源与技术研究”（课题编号：2020YFC1521606）；国家重点研发计划“中国古代铅锡物料溯源指标及其变化规律”（课题编号：2022YFF0903702）；国家社会科学基金重大项目“三星堆文化与中华文明研究”（批准号：21&ZD224）。

三星堆遗址位于四川省广汉市三星堆镇，成都平原北部，长江水系沱江支流鸭子河南岸，分布面积约12平方千米，核心区域为三星堆古城。1986年，三星堆古城东南部两个祭祀坑（K1、K2）被发现，坑内出土了青铜神树、铜人像、玉璋、象牙等珍贵文物，揭示出一个与中原青铜文化风格迥异的全新的青铜文明——三星堆文明。2019—2020年，考古工作者在一、二号祭祀坑附近又发现6个祭祀坑，随后开始了全面发掘，进一步丰富和深化了对三星堆文化的认识。综合研究表明，三星堆文明已经进入古国时代，是一个与夏、商同时矗立的相对独立的文化体^[1]。

祭祀坑出土铜器大致可分为土著铜神器和商式铜容器两类。以青铜神树、铜面具、铜人像、太阳轮为代表的铜神器风格突出，同类型器不见于其他遗址，大部分研究者均认为是本地铸造的产品^[2]。尊、罍等商式铜器的来源则至今仍未达成共识，中原输入说^[3]、长江中下游输入说^[4]和本地铸造说^[5]各有拥趸。类型学分析表明祭祀坑青铜器的制造年代绝大多数为商代中、晚期^[6]，四号坑的最新碳十四测年结果表明铜器群的埋藏年代为商代晚期^[7]。

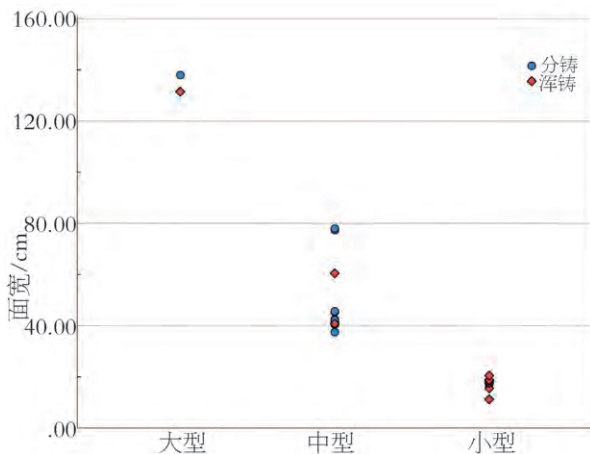
本文在以往研究的基础上，以铜器的生产主体——工匠组织为考察对象，通过对三星堆铜神器和铜容器进行制作工艺观察，结合已发表的铅同位素和成分分析数据，探讨祭祀坑出土铜器的工匠组织模式，进而分析三星堆文化青铜铸造业的技术源头、生产水平和物料流通等情况。

一 制作工艺再观察

对三星堆出土铜神器和铜容器的金相组织观察显示，两类铜器均为铸造成型，这与中原地区商周青铜器的范铸传统是一致的，说明三星堆青铜铸造技术根植于中原地区^[8]。但仔细观察铸造工艺痕迹可以发现，三星堆出土铜器的制作工艺体系复杂，主要体现在铜神器、铜容器附件的连接技术和表面孔洞成型方式等具体细节上，以下分作论述。

（一）铜面具双耳

三星堆祭祀坑出土的青铜面具，按照尺寸大小可以分为大、中、小三型。其中，小型面具双耳均为浑铸成型，而中型面具双耳则几乎均为分铸铸铆连接^[9]（图一）。同样形制、不同规格的铜面具使用不同的双耳连接方式，意味着至少存在两个工匠组织的横向分工。具体分析如下。



图一 三星堆祭祀坑出土铜面具成型工艺统计图

1. 浑铸

铜面具耳廓中空，内存泥芯，且与面部交界处不见任何缝隙，系与面具一体翻模浇铸成型。如K2②：153，其耳部与面颊连接处不见铸缝，为浑铸（图二：1）；另如K2②：314，耳部中空，背面不见任何分铸痕迹（图二：2）；还有K2②：331，耳背与面部连接处亦无铸缝（图二：3）。

2. 铆铸

双耳为前后耳廓分铸拼合而成，耳侧处可见拼合缝。如K2②：142，双耳与面部结合处有明显铸缝，且耳部叠压面部（图二：4），背面还可见三个凸起的不规则形铜块（图二：5），另在面具耳后侧可见漫溢的铜液，并同时叠压住耳部和面部（图二：6）。表明铜面具主体和双耳系分铸，即先在面部两侧预铸出铆口，再浇注铜液将铸好的双耳和面部通过铆口铸接在一起，连接思路与浑铸法明显不同。

浑铸法是中原青铜铸造技术一以贯之的“执简驭繁”传统的体现，是中原青铜器铸造技术

的主流^[10]。而铆式分铸法则最早起源于南方地区，被认为是南方铸工的发明^[11]。由此看来，青铜面具的铸造至少有两组工匠，其中一组掌握了中原系的铸造工艺，而另一组的技术则传承自南方系。

（二）其他铜神器的部件连接

在其他铜神器上也可以看到类似的铸造技术二分现象。青铜大立人、人头像等没有任何分铸痕迹，可以认定为浑铸法成型。其中大立人像通高1.8米，但从各部分的连接情况看，都只有范缝，看不到分铸连接的痕迹。这表明这部分神器都是由掌握中原系技术的工匠铸造而成的。

铜神树、神坛等神器由于体型硕大、造型复杂，难以一次性浑铸成型，因此几乎都是分铸的。从工艺遗痕看，铆铸法和焊接法的普遍使用是三星堆铜神器附件分铸连接技术的突出特色，具体表现为：

1. 铆铸

从工艺遗痕看，太阳形器（K2②：67）系阳部先铸成后被嵌铸在芒部，二者衔接处重叠并钻孔，最后在孔中灌注铜液，通过形成机械

自锁结构以强化固定效果，可在阳部与芒部结合处清晰看到圆形铆孔（图三：1），此外CT技术^[12]也揭示了铆钉的存在。类似的还有铜蛇（K2②：330），其由蛇头、蛇身、蛇尾分段铸成，并在连接处穿设铆孔进而浇注铜液以强化固定，另外，蛇脊的羽翅、身侧的圆环亦是通過蛇身预留的孔洞铆接而成（图三：2）。

2. 焊接

铜神树波曲纹树座（K2②：194）为3块“几”字形构件分铸后铆接，即三片式分铸后铆接而成，并在树座上部浇注铜液与主干焊接，焊块同时叠压树座和主干（图三：3）。另一树座（K2③：55）上装饰有对称的岐羽附件，在附件与底座的接触面、附件脱落处均可见铜焊料，据此判断附件与底座亦为焊接成型（图三：4）。

神树波曲纹树座、太阳形器、铜蛇等器形相对简单，可以通过浑铸法一体浇铸成型，但有些铜神器均为分段铸成，甚至连小型器物，如神坛上装饰的神兽尾部垂羽亦为单面分铸后铆接而成，表现出不同于中原浑铸系统的分铸倾向。在

大量使用分铸技术的同时，铆铸焊的地位又格外突出，这一技术在晚商时期的殷墟极少使用，表现出强烈的南方特色。

（三）铜容器兽首、扉棱

三星堆祭祀坑出土尊、罍多是商式风格，肩部常装饰高浮雕兽首、立鸟扉棱等附件。由于造型突出器表，脱模十分困难，对铸造技术提出了新的挑战。三星堆出土的尊、罍可以看到三种附件连接技术。

1. 浑铸法

如K8出土的圆尊，肩部突出的兽首和尊体之间浑然一体，不见铸缝；兽首上下均可见芯撑孔，内含泥芯，应是使用了复合范技术，即整体制范



图二 铜面具双耳连接方式细节图

1.K2②：153 2.K2②：314 3.K2②：331 4~6.K2②：142



图三 其他铜神器部件连接细节图

1. 太阳形器 (K2②: 67) 2. 铜蛇 (K2②: 330) 3. 波曲纹树座 (K2②: 194) 4. 树座 (K2③: 55)

浇注,属于浑铸技术的范畴(图四:1)。另在该尊内壁,不见榫口或铸疵等分铸痕迹;内壁平整,不随纹饰作凹凸变化(图四:2),是中原式铜尊的作风。

2. 榫式后铸法(活块范法)

K2出土圆尊(K2②:109)肩部牛首覆压肩部纹饰,说明牛首是在尊体铸成后,在肩部设置铸型后铸而成,属活块范法后铸(图四:3)。颈部一处扉棱脱落,露出被扉棱叠压的凸棱,且凸棱上的纹饰与地纹连通,可见是为了增强后铸扉棱与器体间的连接强度,在制作器体范时已经预制了凸榫(图四:4)。据此猜测牛首下方应该也预制了类似的凸榫。

3. 铆式后铸法(铆铸法)

K2出土铜方罍(K2③:205)盖上的鸟形附件与器盖间有明显接缝,且铜鸟叠压器盖,在器盖内腔还可见明显的铸块^[13],说明在铸造罍盖时于器脊处预留了铆口,器体铸成后再通过孔洞铆接立鸟(图四:5)。三号坑出土铜顶尊跪坐人像(K3QW:26)尊体颈部兽首脱落,露出底部预铸的方孔(图四:6),是铆铸法的直接证据^[14]。经苏荣誉观察,铜尊K2②:146、K2②:129、K2②:127同样可见铸块^[15],均为

铆式后铸的产品。

中晚商之际,中原地区铜尊、罍兽首以浑铸为主,从殷墟二期开始,流行以榫式后铸法(活块范法)为代表的各式分铸技术^[16]。南方尊、罍则普遍采用铆铸法铸造兽首,与此同时遵循器壁等厚原则,在外壁纹饰凸起的器内壁做相应凹陷,且多使用垫片,这些工艺特征构成了南方青铜器的突出特色^[17]。从上述兽首或扉棱的连接方式看,三星堆出土尊、罍的铸造技术同时包含中原系和南方系两种因素。但值得注意的是,从殷墟二期起,殷墟的罍基本消失,尊也很少见,而此时尊、罍在南方却十分发达。三星堆祭祀坑出土尊、罍虽然多

是商式风格,但纹饰特征更接近长江中下游流域的同类尊、罍^[18],内壁在浮雕处均作凹陷处理,兽首连接方式也以南方系铆式后铸为主,暗示南方系技术或工匠在铜容器的制作中发挥了更大的影响力。

(四) 开孔方式

三星堆祭祀坑出土铜神器和铜容器器身开孔现象普遍,在铜面具、铜人像、铜神树、铜尊罍等器物上均可见各类方孔、十字孔或圆孔。根据工艺痕迹观察,具体使用了三种技术。

1. 铸造

铜尊、罍圈足上的方孔或十字镂孔,是在范或芯上设制相应形状的凸起,合范后浇注而成的。如K2出土圆罍(K2②:88),圈足上部方孔规整,为铸造成型,是制范时在范或模上设置了方块状凸起,合范浇注后即形成方孔(图五:1)。分铸而成的铜面具为了连接器耳,也多通过同样的方法在面具两侧预铸3个方孔。如K2②:57耳根处方孔规整,为铸造成型(图五:2)。

2. 切割

铜面具额部、眉尾多开方孔,铜大立人脑后和背部同样可见类似方孔。从铜面具上残留的线



图四 铜容器兽首、扉棱细节图

1、2.K8 出土圆尊 3、4. 圆尊 (K2 ②: 109) 5. 方罍 (K2 ③: 205)
6. 顶尊跪坐人像 (K3QW: 26)

(6 采自《四川文物》2021 年第 3 期)

性切割痕迹看, 应该是铸后切割而成, 其操作方法应该是先大致划刻出方孔范围, 再进行进一步切割 (图五: 3、4)。具体操作步骤为使用砣具类工具划出开孔边界, 然后使用实心钻类工具从中心打孔, 并不断扩宽至所需范围, 其工艺类似于玉器加工的实心钻工艺。

3. 钻孔

铜面具在耳部多开圆孔, 从部分铜面具的耳孔未能凿穿而仅形成圆形凹槽看, 其使用了玉器加工中的管钻工艺。开孔位置并不固定, 随意性较强, 似乎是视使用需求即时开凿而成。如 K2 出土铜面具 (K2 ②: 100), 耳洞凿而未穿, 从穿孔处中部突起看, 应使用了空心管钻 (图

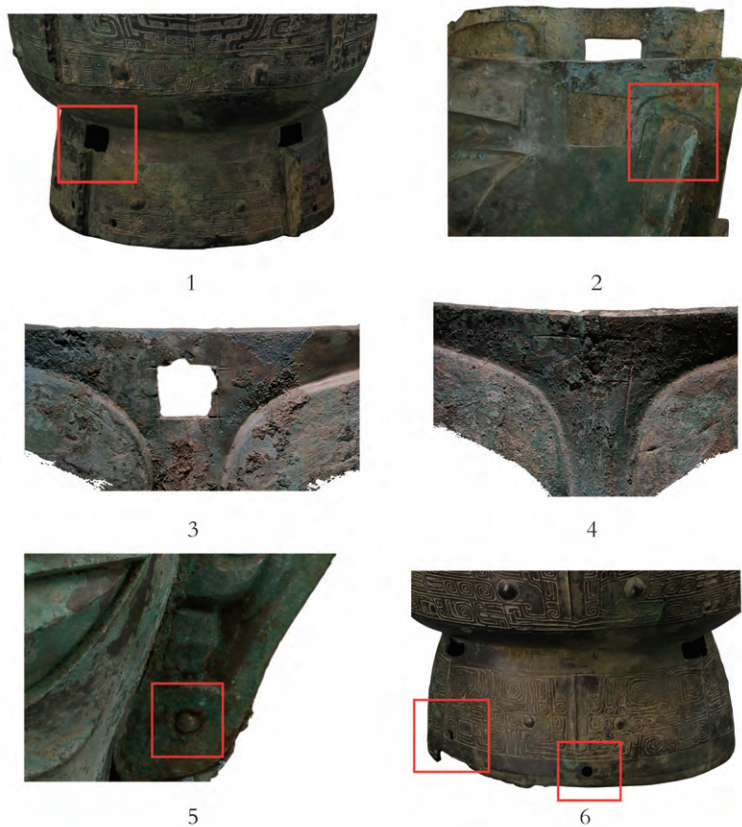
五: 5)。另外部分铜容器足底也有仅见于三星堆遗址的小圆孔, 且圆孔位置往往高低不等, 穿孔位置分布不对称, 有时打破圈足纹饰, 如 K2 出土圆尊 (K2 ②: 112), 圈足穿孔, 中部孔位于近底素面处, 左侧孔位于偏上部并打破地纹, 应为铸后钻凿而成 (图五: 6)。此外, 铜神树底座圈足亦有同类圆孔, 可见尊、罍的圆孔更可能是铸后钻凿而成的。

由此可见, 三星堆祭祀坑出土青铜器至少存在铸时和铸后两次及以上的开孔行为。用范铸法制作方孔和圆孔显然更简单, 工匠不直接铸出, 而采用切割或钻凿这类如此费时费力的工艺, 只能说明切割或钻凿行为与铸造行为并非由一个工匠组织完成。铜面具和铜容器上孔洞所用的砣具切割、实心钻、管钻等加工工艺均是治玉工艺的基本操作技术, 且所开凿的孔洞位置灵活多变, 系在使用时加工出, 这表明本地的治玉工匠很可能参与到了这些孔洞的加工过程当中, 这再次说明三星堆祭祀坑的铜神器应是由掌握不同工艺的多个工匠组织完成的。

二 合金成分与铅同位素分析再认识

三星堆 K1、K2 出土的同类青铜器所见不同铸造技术共存的现象, 可能源于多组工匠在同一铸造地的分工协作, 也可能肇因于不同冶金中心产品的跨区域流通。三星堆铜神器和铜容器铸造工艺差异化的背后究竟是哪种原因, 有赖于成分分析和铅同位素分析结果的揭示。

成分分析^[19]表明铜神器铸造存在较为严格的铸造配方控制。从整体看, 三星堆铜神器铜、铅含量偏高, 锡含量偏低, 与尊、罍等铜容器差异较大。铜神器内部据合金配比可分为两类, 一



图五 铜器开孔工艺细节图

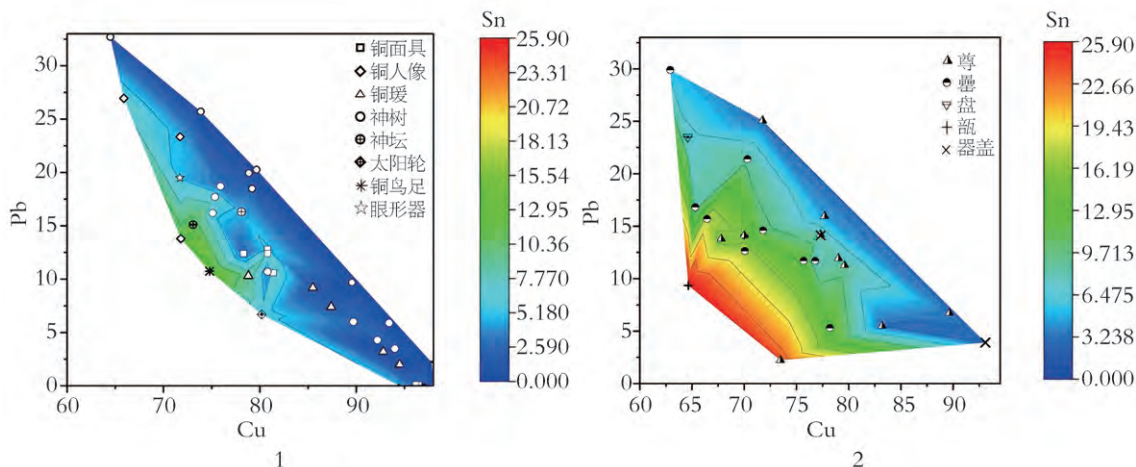
1. 圆罍 (K2②: 88) 2. 铜面具 (K2②: 57) 3. 铜面具额间方孔框缘处刻痕 4. 铜面具尚未凿穿的方孔处切割前刻划的作业范围 5. 铜面具 (K2②: 100) 耳洞 6. 圆尊 (K2②: 112) 圈足穿孔

类为几乎不加锡的铜铅合金, 另一类则为铅锡青铜, 表明制作时存在两种不同的合金配比规范, 再次暗示了工匠的组别差异。在铅锡青铜中, 大部分铜神器的铜、铅几乎都位于同一条直线上 (图六: 1), 这一特征说明虽然铜、铅的含

量各不相同, 但它们是以一个固定的总量加入的, 即铜和铅很可能是一起与锡来共同配置合金。从分布看, 铜树、铜面具、铜罍等铜神器主要对应了锡含量5%左右的一个合金配比, 特别是神树, 虽然树座和不同树枝铅含量可以相差15%以上, 但是所有的锡含量却相近, 这表明铸造时严格控制了锡的含量, 而铜、铅却由于以混合料的形式加入而无法精准控制二者比例。

铜神器和铜容器中的铅均为典型高放射性成因铅^[20], 而其中大部分铜神器的铅同位素比值分布尤为密集, 其分布的区间甚至小于热电质谱仪仪器测量铅同位素比值的误差。而对于高放射性成因铅这样数据分散的铅来说, 形成这种情况的最可能原因是这些青铜器的原料来源和铸造时间相当统一, 甚至很可能为使用同一批原料同时铸造^[21]。基于晚商时期高放射性成因铅在三星堆、汉中盆地、晋陕高原等非殷墟文化区域的出现, 崔剑锋^[22]、黎海超^[23]、王庆铸^[24]等提出高放射性成因铅的铜器与中原殷商文化的关系非常密切。

尊、罍等铜容器的锡含量远高于铜神器, 铜、铅分布虽也有反比的情况, 但并不像铜神器



图六 三星堆铜器锡含量等值线图

1. 铜神器 2. 铜容器

那样集中分布在一条反相关直线上，而是沿多条平行直线分布（图六：2），这表明铜容器有多个来源。部分呈集聚或共线分布的铜容器，其锡的加入量接近，说明铸造这些铜器使用了相同或相近的合金配比，亦说明这些铜器都是同一种规范下生产的。但在整体上，无论是主量成分还是铅同位素比值特征，尊、罍等铜容器的分布更为分散，暗示出这些器物的来源或者铸造时间并不相同。

综上，三星堆K1、K2出土铜神器的原料来源和成分高度一致，很有可能是同时同地铸造完成的，其铸造技术的多样化是多组工匠组织集体协作的直接反映；铜容器在元素组成和铅同位素上均表现出了相当的分散性，表明有多个来源，其兽首和扉棱成型方式的差异更可能源于中原和南方所铸青铜器的直接流通。

三 三星堆祭祀坑所见工匠组织模式

铸造工艺观察结果表明，三星堆祭祀坑铜器群是多组工匠组织分工协作的产物。K1、K2出土的小型 and 少数中型浑铸成型面具、兽首浑铸或使用榫式后铸法（活块范法）分铸的铜容器可能由中原系工匠完成，而多数中型使用铆式后铸法成型的铜面具、铜容器，以及在分铸处大量使用铆铸、焊接技术的神树、太阳形器、铜蛇等极具地方色彩的铜神器则更可能是由南方系工匠完成。出于使用需要，三星堆对铜面具、尊、罍进行了本地切割、穿孔，表明本地系治玉工匠也直接参与到了铜器制作中。

铜容器铸造技术多样，合金成分和铅同位素复杂，表明铜容器可能存在多个来源，来自南北方不同冶金中心的尊、罍经跨区域流通汇聚于三星堆。而各类铜神器虽然同样存在铸造技术的多元化，但成分和铅同位素比值非常一致，说明大部分的铜神器很可能是同时同地铸造的，即三星堆铜神器群的铸造主体本身就是一个复杂的工匠集合体，至少包括了中原系、南方系、本地治玉工匠等多组工匠，在很短时间内共同铸造和加工了三星堆祭祀坑中的大量铜神器。

三星堆祭祀坑青铜器群的这种多地区多工种共同参与青铜器生产的工匠组织形式表明，晚商时期全国至少形成了以中原和长江中下游为代表的多个冶金中心，并可能通过原料交易、产品输出和技术迁移扩大其自身的影响力，一个广域的市场体系已经初步形成。

注释：

- [1] 孙华、苏荣誉著：《神秘的王国——对三星堆文明的初步理解和解释》，第18页，巴蜀书社，2003年。
- [2] a. 四川省文物考古研究所编：《三星堆祭祀坑》，第22页，文物出版社，1999年；
b. [德] 罗泰主编：《奇异的凸目——西方学者看三星堆》，第56页，巴蜀书社，2003年。
- [3] 李伯谦：《从对三星堆青铜器年代的不同认识谈到如何正确理解和运用“文化滞后”理论》，四川省文物考古研究所编：《四川考古论文集》，第64~69页，文物出版社，1996年。
- [4] 黎海超著：《资源与社会：以商周时期铜器流通为中心》，第109~119页，中国社会科学出版社，2020年。
- [5] 孙华、苏荣誉著：《神秘的王国——对三星堆文明的初步理解和解释》，第437页。
- [6] 雷雨：《三星堆、金沙与古蜀文明》，香港文化博物馆编制：《三星闪耀金沙流彩——神秘的古蜀文明》，第22页，（香港）康乐及文化事务署，2007年。
- [7] 四川省文物考古研究院、国家文物局考古研究中心与北京大学考古文博学院考古年代学联合实验室：《四川广汉三星堆遗址四号祭祀坑的碳十四年代研究》，《四川文物》2021年第2期。
- [8] 崔剑锋、吴小红：《三星堆遗址祭祀坑中出土部分青铜器的金属学和铅同位素比值再分析——对三星堆青铜文化的一些新认识》，四川大学博物馆等编：《南方民族考古》第9辑，第237~250页，科学出版社，2013年。
- [9] 大型面具K2②：314出土时仅存右耳，后修复为完整的面具并陈列于博物馆内。根据其耳部中空的形态判断应是浑铸成型，但报告认定其双耳为分

铸。参见四川省文物考古研究所编：《三星堆祭祀坑》，第188页。

- [10] 苏荣誉等著：《中国上古金属技术》，第102~145页，山东科学技术出版社，1995年。
- [11] 苏荣誉：《安阳殷墟青铜技术渊源的商代南方因素——以铸铆结构为案例的初步探讨兼及泉屋博古馆所藏凤柱斿的年代和属性》，泉屋博古馆、九州国立博物馆编，黄荣光译：《泉屋透赏：泉屋博古馆青铜器透射扫描解析》，第352~386页，科学出版社，2015年。
- [12] 郭建波等：《三星堆出土青铜器铸造工艺补议》，《南方文物》2021年第3期。
- [13] 苏荣誉：《三星堆祭祀坑青铜器铸造工艺的初步考察》，孙华、苏荣誉著：《神秘的王国——对三星堆文明的初步理解和解释》，第412~416页。
- [14] 四川省文物考古研究院、上海大学文学院：《三星堆遗址三号祭祀坑出土铜顶尊跪坐人像》，《四川文物》2021年第3期。
- [15] 苏荣誉：《巫山李家滩出土大口折肩青铜尊探微——兼据同类尊的风格和关键工艺探讨其年代和扩散》，四川大学博物馆等编：《南方民族考古》第14辑，第131~187页，科学出版社，2017年。
- [16] 刘煜：《试论殷墟青铜器的分铸技术》，《中原文物》2018年第5期。
- [17] 苏荣誉：《岐山出土商凤柱斿的铸造工艺分析及其相关问题的探讨》，陕西省考古研究院、上海博物馆编：《两周封国论衡——陕西韩城出土芮国文物暨周代封国考古学研究国际学术研讨会论文集》，第551~563页，上海古籍出版社，2014年。
- [18] 张昌平：《自产与输入——从纹饰风格看三星堆铜器群的不同产地》，《南方文物》2006年第3期。
- [19] a. 曾中懋：《广汉三星堆二号祭祀坑出土铜器成分的分析》，《四川文物》1991年第1期；
b. 马江波等：《三星堆铜器的合金成分和金相研究》，《四川文物》2012年第2期；
c. 崔剑锋、吴小红：《三星堆遗址祭祀坑中出土部分青铜器的金属学和铅同位素比值再分析——对三星堆青铜文化的一些新认识》，四川大学博物馆等编：《南方民族考古》第9辑，第

237~250页。

- [20] a. 金正耀等：《广汉三星堆遗址坑青铜器的铅同位素比值研究》，《文物》1995年第2期；
b. 崔剑锋、吴小红：《三星堆遗址祭祀坑中出土部分青铜器的金属学和铅同位素比值再分析——对三星堆青铜文化的一些新认识》，四川大学博物馆等编：《南方民族考古》第9辑，第237~250页。
- [21] 金正耀等：《成都金沙遗址铜器研究》，《文物》2004年第7期。
- [22] 崔剑锋、吴小红：《三星堆遗址祭祀坑中出土部分青铜器的金属学和铅同位素比值再分析——对三星堆青铜文化的一些新认识》，四川大学博物馆等编：《南方民族考古》第9辑，第237~250页。
- [23] 黎海超著：《资源与社会：以商周时期铜器流通为中心》，第109~119页。
- [24] 王庆铸等：《济南市刘家庄遗址出土商代青铜器的铅同位素分析》，《考古》2021年第7期。