

# 四川彭州大宝山铜矿矿石与三星堆 青铜器关联性研究



刘建成<sup>1)</sup>, 王运生<sup>2)</sup>, 唐涛<sup>2)</sup>, 谢振斌<sup>1)</sup>, 井浩<sup>3)</sup>, 詹明斌<sup>2)</sup>, 唐之茗<sup>2)</sup>, 肖礼颖<sup>4)</sup>

1) 四川省文物考古研究院, 成都, 610041;

2) 成都理工大学地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室, 成都, 610059;

3) 青海交通职业技术学院, 西宁, 810003; 4) 彭州市文物保护管理所, 成都, 611930

**内容提要:**四川广汉三星堆遗址出土了大量青铜器,目前关于三星堆青铜器铜料来源的研究尚无定论,通过大宝山铜矿遗留矿洞进行实际调查,并在不同采矿点采集矿石以及冶炼弃渣样品进行铅同位素测定以及 Cu、Pb、Zn 等主要金属元素, Au、Ag、Se、As、Sb 等亲铜元素和 Ni、Co 等亲铁元素的含量测定。采用铅同位素比值法和微量元素示踪法,与前人对三星堆青铜器化学成分的研究结果进行比对,综合分析大宝山铜矿与三星堆青铜器铜料来源的关联性,结果揭示:①大宝山铜矿石为普通铅,用铅同位素比值法对三星堆这类含特殊铅青铜器的铜料进行溯源研究不能准确得到其铜矿石来源。②微量元素含量特征表明三星堆大部分青铜器的微量元素组合特征与大宝山铜矿的微量元素特征接近。③通过微量元素的进一步因子分析和聚类分析,表明三星堆部分青铜器的微量元素组合特征与大宝山铜矿大部分样品相似,该部分青铜器铜料很可能来自大宝山铜矿。

**关键词:**大宝山铜矿;三星堆青铜器;铅同位素;微量元素示踪法

20 世纪 80 年代,三星堆一号、二号“祭祀坑”的考古发掘将一个灿烂的古蜀文明呈现在世人面前(陈德安等,1987,1989)。2019~2020 年新发现的六座“祭祀坑”及随后的全面发掘震惊世界,再次出土大量青铜器(冉宏林等,2022)。三星堆“祭祀坑”出土的青铜器造型独特,做工精美,工艺复杂,已有学者对其进行了相关研究(陈显丹,1990;施劲松,2004,2023;张昌平,2023;孙华,2023)。但对于这些青铜器的铜料来源研究尚无定论。杨华(1997)通过三星堆青铜器的成分组成结合历史资料认为其铜料有相当部分来源于长江中游地区。赫荣定等(2013)通过对龙门山铜矿的勘探与分析则认为玉垒山支脉部分地区可能是三星堆青铜器重要的铜矿开采和冶炼地之一。黎海超等(2023)对三星堆一二号祭祀坑青铜器、成都平原其他铜器、殷墟及长江流域青铜器等铅同位素比值分析,认为三星堆祭祀坑铜器与成都平原铜器原料不同,并指出三星堆铜

器使用了外来原料。程文斌等(2023a)研究认为三星堆可能采用了含异常铅和正常铅的两类铜料,其中含高放射性成因铅的铜料,可能来自四川云南交界处的 IOCG 型铜矿和山西中条山铜矿峪铜矿床,三星堆则很可能是商代含高放射性成因铅的铅料及部分铜料贸易的大型中转地。

前人研究观点不同主要集中在三星堆青铜器铜料是来自成都平原还是由外地输入,三星堆青铜器风格迥异,既有蜀地独特的宗教信仰特征,又有与中原地区相似之处(宋治民,2009)。随着现代科技的进步,关于古代青铜器铜料来源的研究手段也愈加丰富,主要研究方法有铅同位素比值法和微量元素示踪法(柴建国,2006)。铜矿床在形成过程中其地质年代和环境铀钍浓度具有差异性,其 Pb 同位素组成也就各有差异,Pb 的四种稳定同位素的含量比率也就各有特征。已有相关学者对商周青铜器(Cu、Pb、Sn 等元素的合金)进行了 Pb 同位素比值

注:本文为国家重点研发计划项目(编号:2022YFF0903703)、国家自然科学基金项目(编号:21&ZD223)和国家自然科学基金项目(编号:41877235)的成果。

收稿日期:2023-12-27;改回日期:2024-07-04;网络首发:2024-07-20;责任编辑:章雨旭。Doi: 10.16509/j.georeview.2024.07.045

作者简介:刘建成,男,1990 年生,副研究馆员,主要从事文物保护方面的研究;Email: liujc90@163.com。通讯作者:王运生,男,1960 年生,教授,博士生导师,主要从事环境地质与工程地质力学方面的教学和科研;Email: wangys60@163.com。通讯作者:唐涛,男,1999 年生,硕士研究生,主要从事环境地质与灾害方面的研究;Email: 1152558431@qq.com。

分析(李晓岑, 2002; 王庆铸等, 2021)。文娟等(2013)对安徽六安地区出土的东周楚国青铜器进行铅同位素比值分析反映出铜料可能来源楚国内矿山。李强等(2022)对皖北地区出土的周代青铜器进行了矿料来源研究。铅同位素比值法在青铜器铜料来源研究中的应用越来越丰富(张吉等, 2017; 赵凤燕等, 2022)。既然 Pb 可以作为添加剂在炼铜中使用, 采用铅同位素比值法来示踪的唯一性就值得商榷。而微量元素示踪正好规避了这一不确定性。微量元素示踪法即利用青铜器的微量元素含量来探索其铜料来源(李清临等, 2007)。在铜矿石冶炼时, Au、Ag、Se、Te、Sb 等亲铜元素以及 Ni、Co 等亲铁元素富集于铜料之中, 舍弃冶炼后富集于炉渣中的亲铁等元素, 而仅选取富集于铜料中的这些亲铜元素及一些具有亲铜性, 又具有亲铁性元素的成分数据, 通过多元统计分析, 能较好地地区别不同产地的铜矿料(李清临等, 2004; 秦颖等, 2004)。廖华军等(2013)利用 ICP-AES 方法分析了丹江口吉家院墓地出土的战国青铜器微量元素, 结果表明其矿料可

能来源于长江中下游地区。魏国锋等(2017)对枞阳出土的西周至战国青铜器进行微量元素分析探讨了其铜料来源。程文斌等(2024a)综述了近 20 年来 Cu、Sn、Ag 同位素在古代金属制品应用研究中的相关进展, 结果表明这些非传统同位素与 Pb 同位素、微量元素相结合分析是今后古代金属制品溯源研究的一个发展方向。

综上, 在研究三星堆青铜器原料来源问题时, 应该运用历史学、考古学、冶金学、地质学等多学科的研究方法。笔者等在前人研究的基础上, 运用地质学理论与地球化学手段, 对彭州市龙门山地区的大宝山铜矿进行野外调查与取样测试, 采用铅同位素比值法与微量元素示踪法探索大宝山铜矿与三星堆青铜器之间的关联性, 对三星堆文化的进一步深入研究提供科学依据。

## 1 大宝山铜矿地质特征

龙门山地区的前南华纪海相火山—沉积岩型铜多金属成矿带, 是由年代、地质构造环境、类型均不

相同的若干地体组成的与板块俯冲作用有关的复杂构造带, 大宝山铜矿位于彭州市西北部的龙门山镇, 地理坐标为东经 103°50', 北纬 31°15', 距成都市区约 80 km, 交通便利。矿区地处后龙门山褶皱带中南段, 彭灌杂岩(“彭灌”原指彭县—灌县, 现为彭州—都江堰)东侧中北段(图 1), 北西以茂县—汶川断裂为界, 南东与四川盆地川西凹陷毗邻, 其间被北川—映秀断裂隔开。矿区出露地层为前南华系白水河群下部的马松岭组, 在矿区外围称作黄铜尖子组, 为一套巨厚的海相火山碎屑岩系, 变质程度为绿片岩相, 同时夹杂有次火山岩、碎屑岩与碳酸盐岩(匡学文等, 1996)。川西龙门山地区元古代岛弧构造环境及相应的岛弧火山活动, 决定了该区域大宝山铜矿床的形成, 即为是一套元古代海相火山岛弧活动和海水沉积作用下变质火山碎屑岩系中发育的黄铁矿型铜矿床(杨



图 1 彭灌地体构造略图(“彭灌”原指彭县—灌县, 现为彭州—都江堰; 杨钻云, 2011)

Fig. 1 Sketch of Pengguan Terrain Structure (from Yang Zuanyun, 2011&)

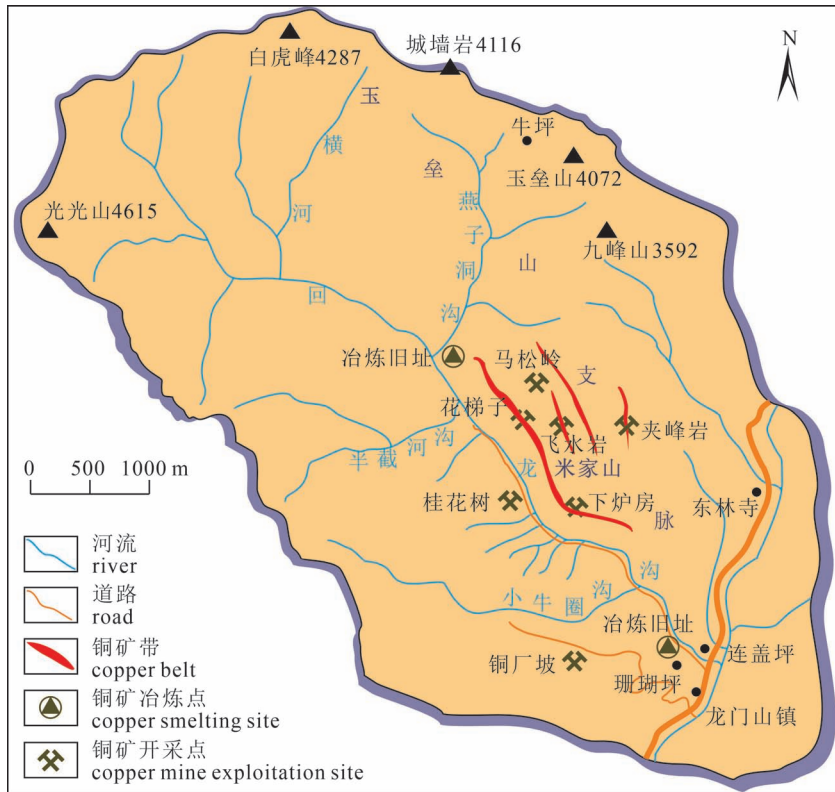


图 2 四川彭州大宝山铜矿开采点及冶炼点分布图

Fig. 2 Distribution of mining and smelting points in Dabaoshan copper deposit

钻云等,2009)。其铜矿体含矿层长达数千米,厚度几米到十几米不等。矿层中的铜矿带主要呈复透镜状、透镜状、似层状和层状,单个矿带最长可达 400 m,厚度一般为 1~3.5 m。矿体围岩主要为绿片岩、变粒岩、变质熔岩,包括石英角斑质凝灰岩、变质角斑质凝灰岩、透闪石大理岩、变质凝灰质砂岩、变质沉凝灰岩等。矿石中金属矿物以黄铁矿为主,占含量的 90%左右,多呈浸染状分布(杨钻云,2011)。

大宝山铜矿主要集中分布在龙门山镇北部回龙沟左岸,矿区于 20 世纪末逐渐废弃,“5·12”汶川地震后,矿区又受到严重破坏,矿山道路与矿洞多数垮塌掩埋,野外调查发现,现存矿洞尚有马松岭、花梯子、半截河、飞水岩、夹峰岩等几处,龙门山镇场镇后山区域的铜厂坡矿洞已被崩塌堆积体所掩埋,现存大宝山铜矿开采点及冶炼点分布见图 2,废弃矿洞见图 3。

## 2 样品采集与测试分析方法

彭州铜矿开采历史悠久,近代曾于矿区内铜厂坡处发现有古人采矿冶炼遗迹和崇宁古钱数千枚,可知宋代时已开采(张肖梅,1939)。大宝山矿区位

于三星堆遗址旁鸭子河上游(又称湔江)(图 4),加之湔江水运条件良好,古蜀人有通过水运将铜料运输至遗址处的可能。现已有研究表明三星堆出土的蛇纹石质玉石器的大部分石料以及大玉料来自彭州大宝山地区的蛇纹石矿区(刘建成等,2021;肖倩等,2023)。因此对大宝山地区的现存铜矿洞进行取样测试。

此次采样区域主要集中在废弃矿洞及其周围,包括飞水岩、花梯子、半截河、夹峰岩,同时在沟道中采集到被河水冲刷下来的铜矿石样品。此外因铜厂坡矿洞被掩埋只在其周围采集到含少量铜的石质样品。原彭州铜矿厂有燕子洞沟口和回龙沟沟口两处冶炼点,均采集到矿渣样品。此外在回龙沟中龙门寺后山斜坡处也发现有冶炼矿渣,推测其为原来的一处冶炼点并取样。具体样品类型及采样点见表 1。

样品测试在澳实分析检测(广州)有限公司的矿物实验室完成,铅同位素采用四酸消解法提取元素,

称取试样于 Teflon 试管中,加入硝酸、高氯酸、氢氟酸和盐酸消解,蒸发至近干,加入盐酸和去离子水,于电热炉上加热,进行进一步的消解。消解完并待溶液冷却后,用容量瓶定容,然后用等离子体质谱仪(ICP-MS)测定。微量元素中 Au 元素采用火试金原子吸收光谱法处理样品,先往试样中加入由氧化铅、碳酸钠、硼砂、石英砂及其他试剂混合组成的熔剂,再加入不含金的银,然后高温熔融和灰吹至生成金银合珠,往金银合珠加入稀释的硝酸,置于微波炉中进行消解去银后,然后加入浓盐酸进行进一步的消解溶金。消解完并待溶液冷却后,用去离子水稀释定容,再用原子吸收光谱仪分析,检测范围为 0.005~10.0  $\mu\text{g/g}$ 。Se 元素采用王水消解法处理,取试样(25 g)先用冷  $\text{HNO}_3$  消解,再加入 HCl,于石墨炉上 130  $^\circ\text{C}$  加热 40 min,然后用等离子体质谱测定硒的含量,检测范围为 0.003~100  $\mu\text{g/g}$ 。其余微量元素均采用四酸消解法电感耦合等离子体发射光谱仪测定其含量,其中 Ag 检测范围为 1~1500  $\mu\text{g/g}$ ,As 检测范围为 0.001%~30%,Co 检测范围为 0.005%~30%,Ni 检测范围为 0.01%~30%,Sb 检测范围为





图 3 四川彭州大宝山铜矿部分遗弃矿洞

Fig. 3 Some abandoned mining caves in the Dabaoshan copper deposit, Pengzhou

0.01%~20%。测试结果如表 1 所示。

### 3 结果分析

#### 3.1 铅同位素比值分析

铅同位素法是现今研究青铜器矿料来源的重要方法,它的理论基础源自同位素地球化学。Pb 是自然界中常见的元素之一,价态通常以  $Pb^{2+}$  为主,主要以硫化物的形式存在。Pb 有  $^{204}Pb$ 、 $^{206}Pb$ 、 $^{207}Pb$  和  $^{208}Pb$  4 种同位素,其中  $^{204}Pb$  是天然稳定同位素,它保持着地球形成之初的丰度,不随时间改变,而  $^{206}Pb$ 、 $^{207}Pb$  和  $^{208}Pb$  则分别是由  $^{238}U$ 、 $^{235}U$  和  $^{232}Th$  经放射性衰变所产生,其丰度随时间的演化而逐步增长(程文斌等,2024)。而地球上不同地区金属矿床的铅同位素组成各不相同,各地矿床具有特定的铅同位素特征。因而可以通过测定青铜器的铅同位素比值,来探索其矿料来源。同时利用同位素进行古金属制品矿料溯源研究,需满足以下 3 个前提(程文斌等,2024),分别为:①来源假设,即不同矿床的矿石能够根据其同位素组成相互区分,对基于参照组的研究(将未知矿石来源的金属制品与已知矿石来源的金属制品进

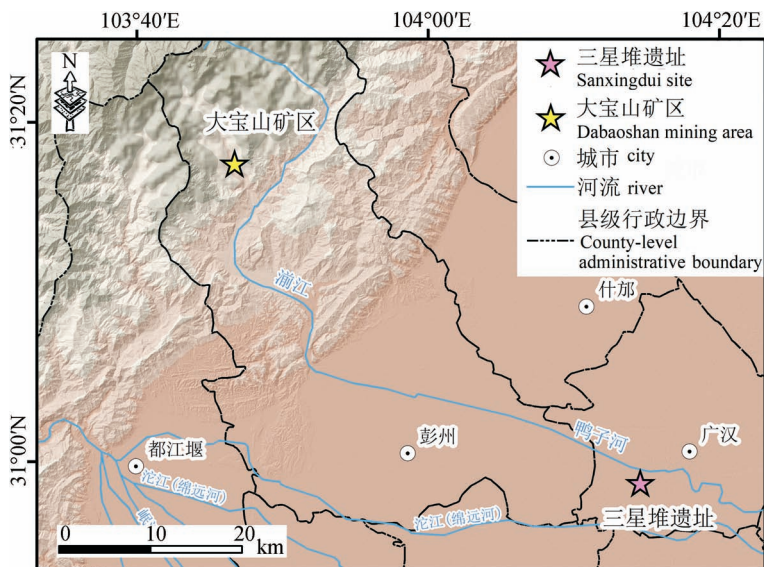


图 4 四川彭州大宝山铜矿与广汉三星堆遗址位置图

Fig. 4 Schematic map of the location of the Dabaoshan copper deposit, Pengzhou, and the Sanxingdui Site, Guanghan





图 5 四川彭州大宝山铜矿采集的部分样品

Fig. 5 Some collected samples from the Dabaoshan copper deposit, Pengzhou

行对比研究);②冶炼过程不发生显著的同位素分馏;③实验室提纯与测试分析不会引起显著的同位素分馏。1967年,Brill和Wampler(1967)首次将铅同位素法应用于金属文物的分析之中,对青铜器矿料来源产生了重大而深远的影响。此后,铅同位素法逐渐成为古金属制品矿料来源研究的主要手段(Mabuchi,1985;Desaulty et al,2013)。

金正耀等(1995)对三星堆两个祭祀坑出土的53件青铜器进行了铅同位素比值分析,得到了部分青铜器的铅同位素比值结果。崔剑锋等(2013)又对三星堆青铜器的铅同位素进行了比值再分析,结果与金正耀等(1995)的一致。现将此次测试结果与金正耀等人的结果进行对比,结果如图6所示。

从三星堆青铜器的铅同位素比值中可以看出,其比值比较离散,所含铅均为“高放射性成因铅”,在 $n(^{206}\text{Pb})/n(^{204}\text{Pb})-n(^{207}\text{Pb})/n(^{204}\text{Pb})$ 图上呈现一条直线,具有明显的线性关系。大宝山铜矿的铅同位素比值相对集中, $n(^{206}\text{Pb})/n(^{204}\text{Pb})$ 较低,为“普通铅”,但其中部分铅同位素比值也呈离散分

布,具有线性关系。由图6可知,大宝山铜矿与三星堆青铜器铅同位素比值分布不同,为两种不同铅,但其中部分大宝山铜矿样品的铅同位素比值分布与三星堆青铜器铅同位素比值大致在同一条直线上,呈现相似的线性关系。金正耀(2004)研究认为三星堆青铜器所含特殊铅矿料都出自同一高放射性成因铅矿山。但青铜的冶炼是一个相当复杂且发展变化的过程,青铜器中铅的来源可能是多方面的,古蜀三星堆很可能是商代含高放射性成因铅的铅料贸易的大型中转地(程文斌等,2023a)。也就是说,青铜合金中铅同位素比值的代表性可能是多方面的。综上,三星堆青铜器的铅同位素比值大部分反映的是其铸造时添加的高放射性成因铅矿,这类特殊铅矿可能来自西南地区的滇东川南一带(金正耀,2004),而大宝山铜矿为普通铅,因此用铅同位素比值法对这类含特殊铅青铜器的铜料进行溯源研究不能准确的得到其铜矿来源。

### 3.2 微量元素分析

前人的相关研究(李清临等,2004)表明,采用





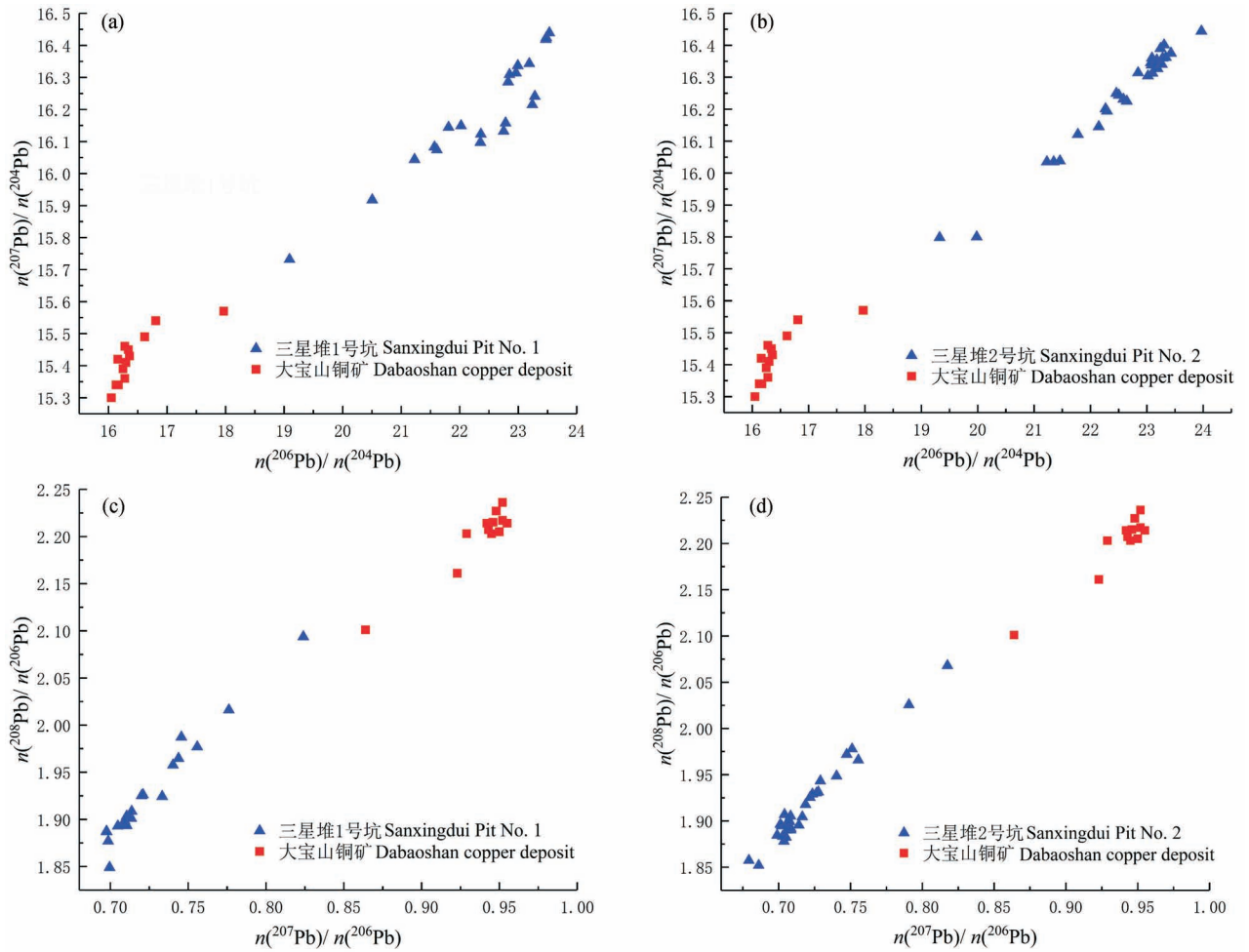


图 6 四川彭州大宝山铜矿矿石与三星堆青铜器不同铅同位素比值分布图

Fig. 6 Different lead isotope ratios distribution of the ore from the Dabaoshan copper deposit in Pengzhou and the Sanxingdui bronze ware

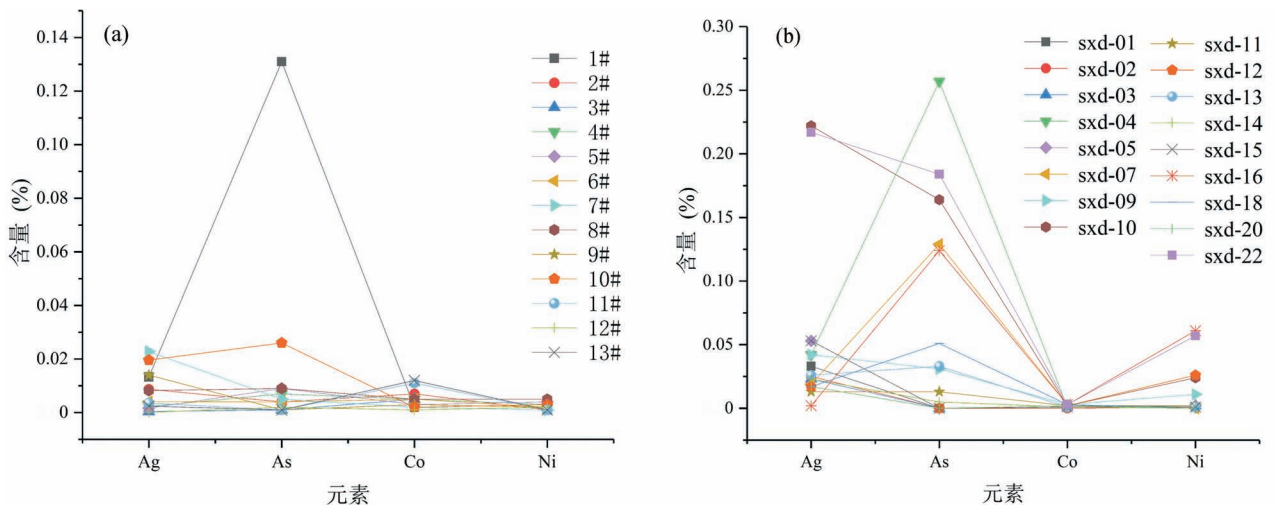


图 7 四川彭州大宝山铜矿矿石 (a) 和三星堆青铜器 (b) 微量元素特征

Fig. 7 Trace elements characteristics of the ore from the Dabaoshan copper deposit in Pengzhou (a) and the Sanxingdui bronze ware (b)

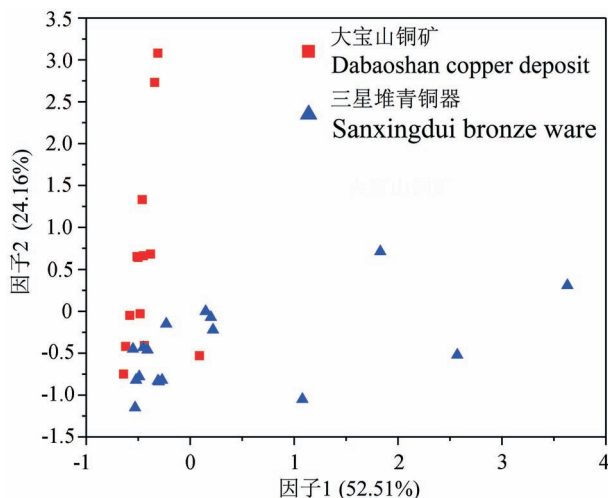


图8 四川彭州大宝山铜矿矿石和三星堆青铜器

Ag, As, Co, Ni 因子分析散点图

Fig. 8 Scatter plot of factor analysis for Ag, As, Co, Ni in the ores and smelting slags from the Dabaoshan copper deposit in Pengzhou and the Sanxingdui bronze ware

提取公因子,提取的因子1方差为52.51%,因子2方差为24.16%,累计方差为76.67%,表明提取结果可信度高。因子分析散点图见图8。

如图8所示,大宝山铜矿和三星堆青铜器样品分布均较分散,大宝山铜矿在因子2上分布较广,三星堆青铜器在因子1上分布较广。但它们均有部分样品集中于同一区域,表明这一区域样品的微量元素组合特征相似,可推测三星堆部分青铜器的铜料来源于大宝山铜矿区的部分矿脉。

为验证因子分析的可信度,以每个样品的综合得分因子为变量进行聚类分析,采用平均联接的方法得到其谱系图如图9所示。

当阈值 $\lambda=4$ 时,所有样品被聚为四类,11个大宝山铜矿样品与13个三星堆青铜器样品聚为一类且交叉分布,2个大宝山铜矿样品与1个三星堆青铜器样品聚为一类,2个三星堆青铜器样品聚为一类,另外一个青铜器样品聚为一类。当阈值 $\lambda=10$ 时,所有样品被聚为两类,多数青铜器样品与铜矿样品聚为一类且交叉分布,另有3个青铜器样品聚为一类。表明前文因子分析结果可信度高,三星堆部分青铜器的微量元素组合特征与大宝山铜矿部分样品相似,该部分青铜器铜料可能来自大宝山铜矿。

## 4 结论

通过以上的测试结果分析,可得到以下结论:

(1)青铜合金中铅同位素比值的代表性可能是

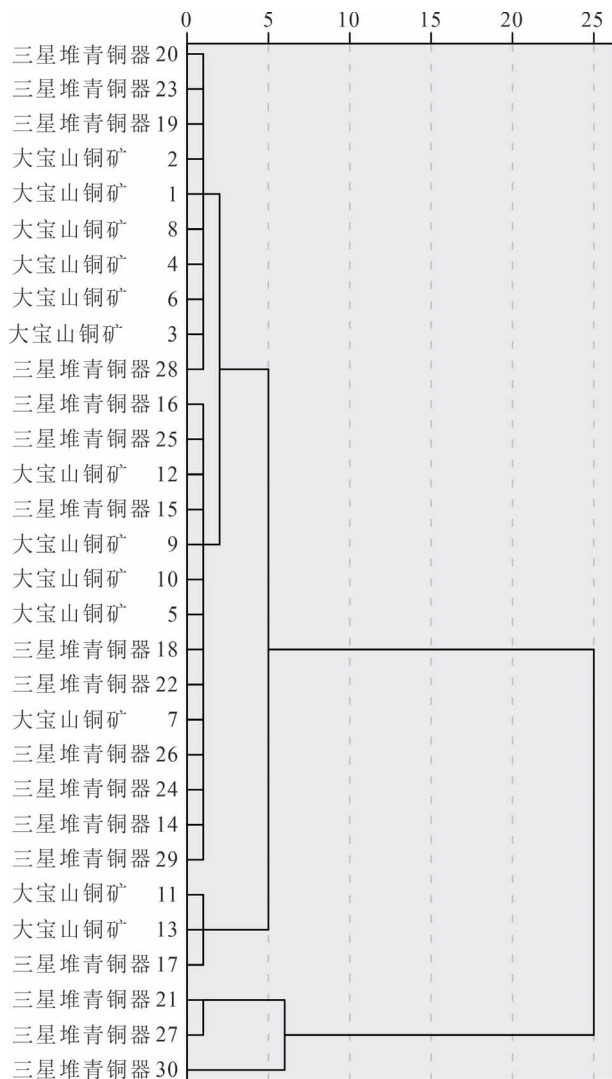


图9 四川彭州大宝山铜矿矿石和三星堆青铜器聚类分析谱系图

Fig. 9 Cluster analysis lineage diagram of the ore from the Dabaoshan copper deposit in Pengzhou and the Sanxingdui bronze ware

多方面的,大宝山铜矿为普通铅,用铅同位素比值法对三星堆这类含特殊铅青铜器的铜料进行溯源研究不能准确的得到其铜矿来源。

(2)微量元素含量特征表明三星堆青铜器中大部分青铜器的微量元素组合特征与大宝山铜矿的微量元素特征接近。

(3)通过微量元素的进一步因子分析和聚类分析,表明三星堆部分青铜器的微量元素组合特征与大宝山铜矿大部分样品相似,该部分青铜器铜料有可能来自大宝山铜矿。结合大宝山铜矿距三星堆较近,且有良好的运输条件,可以推测,三星堆青铜器铜料来自大宝山铜矿的可能性较高。



## 参 考 文 献 / References

(The literature whose publishing year followed by a “&” is in Chinese with English abstract; The literature whose publishing year followed by a “#” is in Chinese without English abstract)

柴建国. 2006. 先秦铜矿来源问题的探析. 见:山西省考古学会论文集, 313~317.

陈德安, 陈显丹. 1987. 广汉三星堆遗址一号祭祀坑发掘简报. 文物, (10): 1~15+97~101.

陈德安, 陈显丹. 1989. 广汉三星堆遗址二号祭祀坑发掘简报. 文物, (5): 1~20+97~103.

陈显丹. 1990. 广汉三星堆青铜器研究. 四川文物, (6): 22~30+81.

程文斌, 郎兴海, 欧阳辉, 彭义伟, 谢富伟, 王勇, 彭强, 杨超, 陈翠华, 向芳. 2023. 商代含高放射性成因铅的青铜器矿料来源与古蜀三星堆在矿业贸易中的地位. 地质论评, 69(6): 2247~2262.

程文斌, 郎兴海, 欧阳辉, 彭义伟, 陈翠华, 谢富伟, 王勇, 彭强, 杨超. 2024a. Cu, Sn, Ag 同位素在古金属制品溯源研究中的应用. 地质学报, 98(7): 2001~2024.

程文斌, 郎兴海, 欧阳辉, 彭义伟, 陈翠华, 谢富伟, 苟冰璐, 李梦林, 王勇, 彭强, 杨超. 2024b. Pb 同位素在古金属制品溯源研究中的应用——原理、方法和实例[J/OL]. 成都理工大学学报(自然科学版), [2024-07-03]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/51.1634.n.20240112.1553.007.html>.

崔剑锋, 吴小红. 2013. 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. 南方民族考古, (1): 237~250+472~473.

赫荣定, 陈晨, 张鹭鹭, 赫英航, 魏艳, 杨扬, 李德生, 鲍秀夫, 赫荣乔. 2013. 探索三星堆青铜铜矿之源[C]. 见: Information Engineering Research Institute, USA. Proceedings of 2013 International Conference on Psychology, Management and Social Science(PMSS 2013), 18.

黄桂香. 1994. 影响锡冶炼回收率的主要因素及对策探讨. 有色金属(冶炼部分), (6): 36~39.

金正耀, 马渊久夫, Tom Chase, 陈德安, 三轮嘉六, 平尾良光, 赵殿增. 1995. 广汉三星堆遗址青铜器的铅同位素比值研究. 文物, (2): 80~85.

金正耀. 2004. 论商代青铜器中的高放射成因铅. 考古学集刊, (2): 269~278.

匡学文, 吴春明. 1996. 四川彭县铜矿岩石地球化学特征及成矿环境探讨. 四川地质学报, 16(4): 331~339.

黎海超, 朱亚蓉, 余健, 董静, 张跃芬, 卢林明, 崔剑锋. 2023. 三星堆一、二号祭祀坑出土铜器产地问题初论. 四川文物, (1): 85~98.

李强, 黄海燕, 李立新, 魏国锋. 2022. 皖北地区出土几件周代青铜器的铅同位素比值分析. 岩矿测试, 41(1): 14~21.

李清临, 朱君孝, 秦颖, 王昌燧, 董亚巍, 龚长根. 2004. 微量元素示踪古代青铜器铜矿料来源的可行性. 文物保护与考古科学, 16(3): 13~17.

李清临, 王然. 2007. 微量元素示踪法在青铜器铜料来源研究中的应用与进展. 江汉考古, (2): 77~82+41.

李晓岑. 2002. 从铅同位素比值试析商周时期青铜器的矿料来源. 考古与文物, (2): 61~67.

廖华军, 罗武干, 李桃元, 魏国锋, 周卫荣, 王昌燧. 2013. 吉家院墓地出土青铜器的矿料来源初探. 华夏考古, (2): 140~144.

刘建成, 明伟庭, 王运生, 王奖臻, 余健. 2021. 三星堆遗址出土大玉料溯源研究. 四川文物, (6): 84~94.

秦颖, 朱继平, 王昌燧, 董亚巍. 2004. 利用微量元素示踪青铜器矿料来源的实验研究. 东南文化, (5): 89~92.

冉宏林, 雷雨, 赵昊, 谢振斌, 黎海超, 王冲, 徐斐宏, 许丹阳. 2022. 四川广汉市三星堆遗址祭祀区. 考古, (7): 15~33+2.

施劲松. 2023. 中国青铜时代的三星堆. 中国社会科学, (1): 104~123+205~207.

施劲松. 2004. 三星堆器物坑的再审视. 考古学报, (2): 157~182.

宋治民. 2009. 六十年来蜀文化研究的重大收获. 四川文物, (4): 23~27.

孙华. 2023. 三星堆埋藏坑的组合铜器——三星堆神庙中沟通人神的供奉器具. 中国国家博物馆馆刊, (9): 42~55.

王庆铸, 郭俊峰, 陈建立, 刘思然, 房振, 李铭, 方辉. 2021. 济南市刘家庄遗址出土商代青铜器的铅同位素分析. 考古, (7): 106~120+2.

魏国锋, 秦颖, 王乐群. 2017. 安徽枞阳出土西周至战国时期青铜器的矿料来源研究. 光谱学与光谱分析, 37(11): 3610~3615.

文娟, 凌雪, 赵丛苍, 张钟云, 姚政权, 宗春蕾, 袁洪林, 吴忠. 2013. 安徽六安地区东周楚国青铜器铅同位素特征的初步研究. 西北大学学报(自然科学版), 43(6): 1016~1020.

肖倩, 刘建成, 向芳, 王运生, 王奖臻. 2023. 四川三星堆遗址蛇纹石质玉石器的石料来源. 成都理工大学学报(自然科学版), 50(1): 79~91.

谢书碧, 曾仕贵. 1994. 锡冶炼中铍的走向及回收. 有色金属(冶炼部分), (5): 9~12.

杨华. 1997. 对川西地区早期青铜器铸造原料来源问题的研究及其认识. 西南师范大学学报(哲学社会科学版), 23(2): 35~40.

杨钻云, 邱仁轩, 秦泰凯, 仲世新, 张羽洋. 2009. 川西龙门山地区元古代 VMS 铜矿床: 硫化物微量元素和硫同位素证据. 地质科技情报, 28(4): 59~64.

杨钻云. 2011. 川西龙门山中段彭州式铜矿构造与成矿关系研究. 导师: 施泽进. 成都: 成都理工大学博士学位论文.

曾中懋. 1989. 广汉三星堆一、二号祭祀坑出土铜器成分的分析. 四川文物, (S1): 76~80.

张昌平. 2023. 论三星堆祭祀坑出土物所展现的祭祀场景. 江汉考古, (4): 65~78.

张吉, 陈建立. 2017. 东周青铜器铅同位素比值的初步研究. 南方文物, (2): 94~102.

张肖梅. 1939. 四川经济参考资料. 中国国民经济研究所.

赵凤燕, 郎剑锋, 任相宏, 李秀辉, 张吉, 陈建立. 2022. 长清仙人台墓地出土青铜器铅同位素比值的初步分析. 南方文物, (5): 164~169.

Brill R H, Wampler J M. 1967. Isotope studies of ancient lead. American Journal of Archaeology, 71(1): 63~77.

Cai Jianguo. 2006#. An analysis of the sources of copper mines in the Pre-Qin Period. In: Treatises for the Third Conference of Shanxi Archaeology Association: 313~317.

Chen Dean, Chen Xiandan. 1987#. Excavation report of the first sacrificial pit at the Sanxingdui Ruins in Guanghan. Cultural Relics, (10): 1~15; 97~101.

Chen Dean, Chen Xiandan. 1989#. Excavation report of the second sacrificial pit at the Sanxingdui Ruins in Guanghan. Cultural Relics, (5): 1~20; 97~103.

Chen Xiandan. 1990#. A study of bronze ware from Sanxingdui Site in Guanghan. Sichuan Cultural Relics, (6): 22~30; 81.

Cheng Wenbin, Lang Xinghai, Ouyang Hui, Peng Yiwei, Xie Fuwei, Wang Yong, Peng Qiang, Yang Chao, Chen Cuihua, Xiang Fang. 2023&. The source of mineral materials for Shang Dynasty bronze containing high-radioactive lead and the position of Ancient

- Sanxingdui in mining trade. *Geological Review*, 69(6): 2247~2262.
- Cheng Wenbin, Lang Xinghai, Ouyang Hui, Peng Yiwei, Chen Cuihua, Xie Fuwei, Wang Yong, Peng Qiang, Yang Chao. 2024a&. Application of Cu, Sn and Ag isotopes in tracing the ancient metal products. *Acta Geologica Sinica*. [2024-07-03]. <https://doi.org/10.19762/j.cnki.dizhixuebao.2023056>.
- Cheng Wenbin, Lang Xinghai, Ouyang Hui, Peng Yiwei, Chen Cuihua, Xie Fuwei, Gou Binglu, Li Menglin, Wang Yong, Peng Qiang, Yang Chao. 2024b&. Application of Pb isotope in tracing the ancient metal products: Theory, method, and practice. *Journal of Chengdu University of Technology(Science & Technology Edition)*. [2024-07-03]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/51.1634.n.20240112.1553.007.html>
- Cui Jianfeng, Wu Xiaohong. 2013&. Metallurgical and lead isotope analysis of bronze wares unearthed from Sanxingdui Site of sacrificial pits: Some new insights on Sanxingdui Culture. *Southern Ethnology and Archaeology*, (00): 237~250+472~473.
- Desaulty A M, Albarède F. 2013. Copper, lead, and silver isotopes solve a major economic conundrum of Tudor and early Stuart Europe. *Geology*, 41(2): 135~138.
- He Rongding, Chen Chen, Zhang Sisi, He Yinghang, Wei Yan, Yang Yang, Li Desheng, Bao Xiufu, He Rongqiao. 2013&. A probable copper resource for Sanxingdui Bronze Artifacts [ C ]. In: Information Engineering Research Institute, USA. *Proceedings of 2013 International Conference on Psychology, Management and Social Science(PMSS 2013)*, 18.
- Huang Guixiang. 1994#. Discussion on the main factors affecting the recovery rate of tin smelting and countermeasures. *Nonferrous Metals (Extractive Metallurgy)*, (6): 36~39.
- Jin Zhengyao, Hisao Mabuchi, Tom Chase, Chen Dean, Karoku Miwa, Yoshimitsu Hirao, Zhao Dianzeng. 1995&. A study on lead isotope ratios of the Shangxingdui pit-burial bronzes. *Cultural Relics*, (2): 80~85.
- Jin Zhengyao. 2004#. On the high radiogenic lead in bronze vessels of the Shang Dynasty. *Archaeological Collectanea*, (2): 269~278.
- Kuang Xuewen, Wu Chunming. 1996&. Litho geochemistry and ore-forming conditions of Pengxian copper deposit. *Acta Geologica Sichuan*, (4): 331~339.
- Li Haichao, Zhu Yarong, Yu Jian, Dong Jing, Zhang Yuefen, Lu Linming, Cui Jianfeng. 2023&. Preliminary study on the origin of bronze artifacts from Sanxingdui No. 1 and No. 2 Sacrificial Pits. *Sichuan Cultural Relics*, (1): 85~98.
- Liao Huajun, Luo Wugan, Li Taoyuan, Wei Guofeng, Zhou Weirong, Wang Changsui. 2013&. On the sources of the ore material for the bronzes unearthed from the Jijiayuan Cemetery. *Huaxia Archaeology*, (2): 140~144.
- Liu Jiancheng, Ming Weiting, Wang Yunsheng, Wang Jiangzhen, Yu Jian. 2021&. A study on the origin of large jade materials unearthed at Sanxingdui Site. *Sichuan Cultural Relics*, (6): 84~94.
- Li Qiang, Huang Haiyan, Li Lixin, Wei Guofeng. 2022&. Lead isotope ratio analysis of several Zhou Dynasty bronzes unearthed in northern Anhui Province. *Rock and Mineral Analysis*, 41(1): 14~21.
- Li Qinglin, Zhu Junxiao, Qin Ying, Wang Changsui, Dong Yawei, Gong Changgen. 2004&. Trace elements analysis for the provenance of copper minerals of ancient bronzes. *Sciences of Conservation and Archaeology*, (3): 13~17.
- Li Qinglin, Wang Ran. 2007&. Application and development of trace element analysis in identifying sources of bronze. *Jianghan Archaeology*, (2): 77~82+41.
- Li Xiaocen. 2002&. Research on the mineral sources of bronze vessels in Shang—Zhou by lead-isotope ratio. *Archaeology and Cultural Relics*, (2): 61~67.
- Mabuchi H, Hirao Y, Nishida M. 1985. Lead isotope approach to the understanding of early Japanese bronze culture. *Archaeometry*, 27(2): 131~159.
- Qin Ying, Zhu Jiping, Wang Changsui, Dong Yawei. 2004&. A study on the experiment of searching source of bronze material with trace elements. *Southeast Culture*, (5): 89~92.
- Rang Honglin, Lei Yu, Zhao Hao, Xie Zhenbin, Li Haichao, Wang Chong, Xu Feihong, Xu Danyang. 2022&. Sacrificial area of the Sanxingdui Site in Guanghan City, Sichuan. *Archaeology*, (7): 15~33+2.
- Shi Jinsong. 2004&. Re-examination of the object pits at Sanxingdui, Guanghan. *Acta Archaeologica Sinica*, (2): 157~182.
- Shi Jinsong. 2023#. Sanxingdui in China's Bronze Age. *Social Sciences in China*, (1): 104~123; 205~207.
- Song Zhimin. 2009&. Important achievements on study of the Shu Culture in six decades. *Sichuan Cultural Relics*, (4): 23~27.
- Sun Hua. 2023&. Bronze sets from Sanxingdui burial pits: Sacred offerings in the Sanxingdui Temple to communicate with the deities. *Journal of National Museum of China*, (9): 42~55.
- Wang Qingzhu, Guo Junfeng, Chen Jianli, Liu Siran, Fang Zhen, Li Ming, Fang Hui. 2021&. Lead stable isotope analysis of Shang bronzes unearthed from the Liujiashuang Site in Jinan. *Archaeology*, (7): 106~120+2.
- Wei Guofeng, Qin Ying, Wang Lequn. 2017&. Study on copper ores source of bronze vessels in Zongyang County, Anhui Province, dated from the Western Zhou Dynasty to Warring States Period. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 37(11): 3610~3615.
- Wen Juan, Ling Xue, Zhao Congcang, Zhang Zhongyun, Yao Zhengquan, Zong Chunlei, Yuan Honglin, Wu Zhong. 2013&. Primary analysis on lead isotope characteristics in Chu State bronzes in East-Zhou period unearthed from Lu'an District, Anhui Province. *Journal of Northwest University (Natural Science Edition)*, 43(6): 1016~1020.
- Xiao Qian, Liu Jiancheng, Xiang Fang, Wang Yunsheng, Wang Jiangzhen. 2023&. Study on the material source of serpentine jade stone implement at Sanxingdui Ruin Site, Sichuan Province. *Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition)*, 50(1): 79~91.
- Xie Shubi, Zeng Shigui. 1994#. The flow and recovery of bismuth in tin smelting. *Nonferrous Metals(Extractive Metallurgy)*, (5): 9~12.
- Yang Hua. 1997#. Research and Understanding of the sources of raw materials for early bronze casting in western Sichuan Region. *Journal of Southwest University(Social Sciences Edition)*, (2): 35~40.
- Yang Zuanyun, Qiu Renxuan, Qin Sukai, Zhong Shixin, Zhang Yuyang. 2009&. The Proterozoic VMS copper deposit in Longmen Mountain area of Chuanxi: Evidence from sulphide trace element and sulfur isotope. *Bulletin of Geological Science and Technology*, 28(4): 59~64.
- Yang Zuanyun. 2011&. The relationship between mineralization and structure in Pengzhou-type copper deposits in the central segment of Longmen Shan, Western Sichuan. *Chengdu University of Technology*.
- Zeng Zhongmao. 1989#. Analysis of the composition of bronze vessels unearthed from sacrificial pits 1 and 2 at Sanxingdui in Guanghan.



Sichuan Cultural Relics, (S1): 76~80.

Zhang Changping. 2023&. Sacrificial scene displayed by artifacts from the sacrificial pits at Sanxingdui. *Jiangan Archaeology*, (4): 65~78.

Zhang Ji, Chen Jianli. 2017&. Preliminary study on the lead isotope ratio of bronze in the Eastern Zhou Dynasty. *Cultural Relics in Southern China*, (2): 94~102.

Zhang Xiaomei. 1939#. *Economic Reference Materials of Sichuan Province*. China Institute for National Economic Research.

Zhao Fengyan, Lang Jianfeng, Ren Xianghong, Li Xiuhui, Zhang Ji, Chen Jianli. 2022&. Preliminary analysis of lead isotope ratios of bronze ware unearthed from Xianrentai Cemetery in Changqing District. *Cultural Relics in Southern China*, (5): 164~169.

## Research on the correlation between the ore from Dabaoshan copper deposit in Pengzhou, Sichuan, and Sanxingdui Bronze Ware

LIU Jiancheng<sup>1)</sup>, WANG Yunsheng<sup>2)</sup>, TANG Tao<sup>2)</sup>, XIE Zhenbin<sup>1)</sup>, JING Hao<sup>3)</sup>, ZHAN Mingbin<sup>2)</sup>, TANG Zhiming<sup>2)</sup>, XIAO Liying<sup>4)</sup>

1) *The Sichuan Cultural Relics and Archaeology Research Institute, Chengdu*, 610041;

2) *State Key Laboratory of Geohazard Prevention and Geoenvironment Protection, Chengdu University of Technology, Chengdu*, 610059;

3) *Qinghai Communications Technical College, Xining*, 810003;

4) *Pengzhou Cultural Relics Protection and Management Institute, Chengdu*, 611930

**Abstract:** A large number of bronze wares have been unearthed from the Sanxingdui site in Guanghan, Sichuan Province. Currently, there is no consensus on the source of copper used in the Sanxingdui bronze wares. Through actual investigations of abandoned mines in the Dabaoshan Copper Deposit, samples of ores and smelting slags were collected from different mining sites for lead isotope determination and the measurement of Cu, Pb, Zn, and other major metallic elements, as well as copper-philic elements such as Au, Ag, Se, As, Sb, and iron-philic elements like Ni, Co. By utilizing the lead isotope ratio method and trace element tracing method, and comparing with previous research results on the chemical composition of Sanxingdui bronze wares, this study comprehensively analyzes the correlation between the copper sources of Dabaoshan Copper Deposit and Sanxingdui bronze wares. The results reveal the following: ① The copper ores from Dabaoshan are ordinary lead, and using the lead isotope ratio method to trace the copper source of Sanxingdui bronze wares containing special lead cannot accurately determine their copper ore origins. ② The trace element content characteristics indicate that the trace element combination features of most of the Sanxingdui bronze wares are similar to those of the Dabaoshan Copper Deposit. ③ Further factor analysis and cluster analysis of trace elements show that the trace element combination characteristics of some Sanxingdui bronze wares are similar to those of most samples from the Dabaoshan Copper Deposit, suggesting that the copper material for these bronze wares likely originated from the Dabaoshan Copper Deposit.

**Keywords:** Dabaoshan copper deposit; Sanxingdui Bronze Ware; lead isotope; trace element tracing method

**Acknowledgements:** This study was financially supported by the National Key Research and Development Program project (No. 2022YFF0903703), the National Social Science Foundation project (No. 21&ZD223) and the National Natural Science Foundation project (No. 41877235)

**First author:** LIU Jiancheng, male, born in 1990, associate research librarian, is mainly engaged in conservation; Email: liujc90@163.com

**Corresponding author:** WANG Yunsheng, male, born in 1960, doctor, professor, is mainly engaged in teaching and research in environmental geology and engineering geomechanics; Email: wangys60@163.com

**Corresponding author:** TANG Tao, male, born in 1999, master degree in geological engineering, is mainly engaged in research on environmental geology and disasters; Email: 1152558431@qq.com

**Manuscript** received on: 2023-12-27; Accepted on: 2024-07-04; Published online on: 2024-07-20

**Doi:** 10.16509/j.georeview.2024.07.045

**Edited by:** ZHANG Yuxu