

doi:10.3969/j.issn.1007-7545.2023.11.019

广西馆藏古代含砷麻江型铜鼓初步科学研究

邹桂森¹,张喜²,陆秋燕³

- (1. 广西民族大学 科技史与科技文化研究院, 南宁 530006;
2. 广西壮族自治区文物保护与考古研究所, 南宁 530022; 3. 广西民族博物馆, 南宁 530028)

摘要: 通过对比便携式荧光分析仪(pXRF)、扫描电子显微镜能谱仪(SEM-EDS)与能量色散型X射线荧光光谱仪(ED-XRF)测定铜鼓基体的成分数据, 差异较小, 显示 pXRF 在检测锈蚀程度较低的麻江型铜鼓可靠性较高。使用 pXRF 对广西民族博物馆馆藏 221 面麻江型铜鼓进行系统地检测, 砷含量 $\geq 2\%$ 麻江型铜鼓共 53 面, 占比高达 24%, 可确认铜锡砷铅四元合金是麻江型铜鼓(含砷麻江型)重要的合金类型。研究表明, 含砷麻江型铜鼓是中国南方重要的青铜器之一, 其生产专业且复杂, 是研究广西乃至南方砷铜矿开发与利用的重要材料。

关键词: 冶金考古; 麻江型铜鼓; 铜锡砷铅合金; 科学分析

中图分类号: K875.5 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-7545(2023)11-0144-07

Preliminary Scientific Research on Ancient Arsenic-Containing Majiang Type Bronze Drums in Guangxi Museum

ZOU Guisen¹, ZHANG Xi², LU Qiuyan³

- (1. Institute for History and Culture of Science & Technology, Guangxi Minzu University, Nanning 530006, China;
2. Guangxi Institute of Cultural Relics Conservation and Archaeology, Nanning 530022, China;
3. Anthropology Museum of Guangxi, Nanning 530028, China)

Abstract: By comparing the data of the bronze drums matrix with the portable fluorescence analyzer (pXRF), SEM-EDS and the energy dispersive X-ray fluorescence spectrometer (ED-XRF), it is shown that pXRF is reliable in detecting the Majiang type bronze drum with a lower degree of corrosion. pXRF was used to systematically detect 221 Majiang-type bronze drums in Anthropology Museum of Guangxi, the results show that the arsenic content of $\geq 2\%$ is 53, accounting for 24%. Arsenic-containing Majiang type is an important alloy type of Majiang type bronze drum. The arsenic-containing Majiang-type bronze drum is one of the most important bronzes in southern China. Its production is professional and complex, and provides important research materials for studying the development and utilization of arsenic-copper deposits in Guangxi and even southern China.

Key words: archaeometallurgy; Majiang type bronze drums; Cu-Sn-Pb-As alloy; scientific analysis

铜鼓是我国南方民族特有的青铜器, 经历了 2 700 多年的发展, 现今仍为众多民族使用。1988 年中国古代铜鼓研究会将中国境内的铜鼓按照各自特征划分为八大类型, 其中麻江型铜鼓是使用时间最

长、造型优美、纹饰多样、分布范围最广的类型^[1]。前期研究发现, 部分麻江型铜鼓成分中含有一定量的砷且不固定, 通过对收集到的含砷麻江型铜鼓与含砷遵义型铜鼓进行铅同位素分析, 结果显示其矿

收稿日期: 2023-07-13

基金项目: 广西自然科学基金面上基金资助项目(2020GXNSFAA297210); 广西科技计划资助项目(桂科 AD23026242)

作者简介: 邹桂森(1988-), 男, 博士, 副教授

料来源较为接近或者同源,地缘关系较为密切,应分布于云南文山地区与广西百色地区区域间^[2]。但本研究仅对桂林博物馆3面、百色起义纪念馆1面古代含砷麻江型铜鼓进行研究,样品数量及分布范围有限,难以较为全面地反映含砷麻江型铜鼓在麻江型铜鼓中的占比,其分布范围、成分特征、纹饰特征等也待进一步揭示。本研究将对广西民族博物馆馆藏麻江型铜鼓开展系统检测,以期揭示含砷麻江型铜鼓重要的研究价值。

1 广西民族博物馆馆藏麻江型铜鼓调查

截至2014年,在广西各县市博物馆共登记有

375面麻江型铜鼓^[3],其中,广西民族博物馆馆藏有221面(图1),占比59%,该馆麻江型铜鼓主要由政府部门于1955—1976年和2004年征集,大部分来自河池、柳州、百色等地,这些区域也是麻江型铜鼓使用较为集中的地区。广西民族博物馆馆藏麻江型铜鼓在广西各级单位机构中,数量最多、来源最广泛,因此对其馆藏麻江型铜鼓研究具有代表性。为了深入开展该研究,团队于2022年四次前往广西民族博物馆,使用pXRF对馆藏麻江型铜鼓进行成分检测,获得基础数据后又在广西民族大学科技考古实验室进行ED-XRF分析和金相分析。



(a) 鼓0192, 含砷

(b) 鼓0264, 不含砷

图1 广西民族博物馆馆藏麻江型铜鼓

Fig. 1 The Majiang-type bronze drum in Anthropology Museum of Guangxi

2 分析方法

1) 便携式X射线荧光光谱分析(pXRF)是一种准确、快速的成分分析技术,试验仪器为广西民族博物馆便携式X射线荧光分析仪,型号为美国尼通Niton XL3t 950,可测定元素周期表中Mg—U的元素,用于金属器、陶瓷、玻璃等古代遗物无损定性定量分析。本研究各项检测均按照统一方法进行,为保证所测数据的可比性,统一使用合金模式对铜鼓太阳纹中心无锈蚀区域进行检测。机器贴近铜鼓表面呈90°,测试时间大于30 s,聚酯薄膜厚度<100 μm。

2) 能量色散型X射线荧光光谱仪分析(ED-XRF),仪器型号为日本岛津EDX8100,在广西民族大学科技考古实验室进行,使用金属模式对基体成分测定,扫描电压50 kV,测试时间60 s,光斑直径5 mm。

3) 扫描电子显微镜(SEM-EDS)分析,型号为TESCAN VEGA 3 XMU;能谱分析仪型号为Bruker Nano Gmbh XFlash Detector 610M。

4) 金相分析:使用金相显微镜对样品的金相显微结构、夹杂物形貌及分布特征进行金相观察与拍

摄,型号为ZEISS蔡司Axio scope 5。

3 试验结果

3.1 pXRF数据的可靠性分析

pXRF是一种无损的成分测定方式,且使用简单、便捷,具有许多优势,近年来在考古研究中广泛使用。为了验证pXRF对于铜鼓基体检测数据的可靠性,将其所测数据与ED-XRF、SEM-EDS所测数据进行比对。选取三个样品:样品1(鼓0098)、样品2与样品3为铜鼓残片(未入藏,无鼓号),使用环氧树脂包埋,打磨并抛光。

3种方式检测结果见表1。3个样品中,Cu、Sn相对误差较小,基体中铅颗粒分布不均匀,因此不同检测方式测得的不同位置中的铅含量差异较大,但两个含砷样品的荧光析检测结果与SEM-EDS的检测结果相差均在2%以内,因此,pXRF在砷含量的测定中较为准确,所测结果满足定性、定量分析的要求。马仁杰等^[4]对祥云地区出土铜器的pXRF数据和电镜结果比对,发现pXRF如果选取基体保存较好区域,对原子序数较大的元素特别是金属元素基本可以做到定量分析。

表 1 铜鼓残片检测结果

Table 1 The test results of bronze drums fragments

编号	测试方法	检测位置	Cu	Pb	Sn	As
样品 1	pXRF	鼓面	72.667	6.778	11.850	6.778
	ED-XRF		73.673	7.933	10.331	4.801
	SEM-EDS		79.8	3.9	10.5	5.8
样品 2	pXRF	鼓面	74.249	9.137	9.911	6.956
	ED-XRF		75.081	4.225	10.268	6.863
	SEM-EDS		81.7	4.3	8.0	6.0
样品 3	pXRF	鼓身	69.922	10.365	11.224	0
	ED-XRF		71.595	14.543	7.678	0
	SEM-EDS		85.3	5.8	8.5	0

3.2 馆藏麻江型铜鼓 pXRF 检测结果

目前学界通常将 2% 作为合金的划分标准,考虑到设备的误差,确保数据分析更为合理,砷含量为 0 至 2%(表 2)铜鼓暂不作分析,此次数据分析选取麻江型铜鼓不含砷(表 3)、砷含量 ≥ 2%(表 4)进行划分并讨论,其检测部位均为鼓面中心位置,所有分析结果均保留一位小数,数据未进行归一化处理。

表 2 砷含量 0~2% 的麻江型铜鼓 pXRF 成分测定结果

Table 2 Determination results of pXRF composition of Majiang type copper drum with arsenic content between 0 and 2%

鼓号	部位	Cu	Sn	Pb	As
鼓 0284	鼓面	55.4	20.3	9.5	1.1
鼓 0237	鼓面	69.7	20.7	4.1	1.4
鼓 0173	鼓面	71.8	15.7	10.2	1.2
族 0177	鼓面	76.7	15.3	5.9	1.0
族 0292	鼓面	73.7	19.7	3.4	1.1
族 0233	鼓面	69.2	17.5	10.1	1.1
族 0221	鼓面	73.1	15.9	5.2	1.5
鼓 0024	鼓面	73.5	16.4	3.6	1.1
鼓 0076	鼓面	58.9	19.4	13.6	1.4
鼓 0009	鼓面	69.2	17.8	10.6	1.2
鼓 0041	鼓面	64.1	19.6	8.3	1.3
鼓 0198	鼓面	63.3	28.6	4.1	1.2
鼓 0287	鼓面	52.1	26.3	14.8	1.4
鼓 0222	鼓面	81.1	12.8	3.6	1.2
鼓 0185	鼓面	71.6	18.7	7.2	1.2
鼓 0236	鼓面	66.2	12.8	10.5	1.4
鼓 0012	鼓面	79.4	11.5	5.3	1.3
族 0341	鼓面	78.2	12.1	5.6	1.2
鼓 0282	鼓面	59.6	23.9	12.9	1.3
鼓 0005	鼓腰	35.4	36.6	12.7	1.5

表 3 不含砷麻江型铜鼓 pXRF 成分测定结果

Table 3 The results of pXRF composition determination of non-arsenic Majiang type bronze drums

鼓号	Cu	Sn	Pb	As
鼓号 0243	71.0	13.7	13.6	0
鼓号 0003	67.4	20.3	7.8	0
鼓号 0297	68.7	16.8	11.2	0
鼓号 017665	65.5	1.4	3.9	0
鼓号 017663	85.5	0.8	3.5	0
鼓号 017662	69.5	1.1	2.6	0
鼓号 017663	86.0	0.6	3.0	0
鼓号 017664	63.6	0.9	3.4	0
族鼓 0200	71.7	22.6	1.6	0
鼓号 0294	67.2	25.2	5.5	0
族鼓 0072	63.4	24.9	8.3	0
族鼓 0004	53.9	17.5	23.3	0
∴	∴	∴	∴	∴

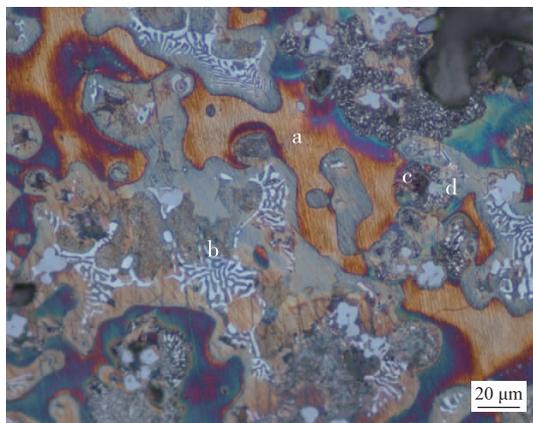
表 4 砷含量 ≥ 2% 麻江型铜鼓 pXRF 成分测定结果

Table 4 The results of pXRF composition determination of Majiang type bronze drums with arsenic content ≥ 2%

鼓号	部位	Cu	Sn	Pb	As
鼓号 0011	鼓面	66.0	9.2	14.4	5.6
鼓号 0010	鼓面	67.1	3.6	17.0	7.8
族鼓 0001	鼓面	73.3	13.1	6.7	5.0
族鼓 0084	鼓面	61.6	17.7	7.5	8.2
族鼓 0093	鼓面	61.5	14.6	11.1	7.1
鼓号 0082	鼓面	61.2	16.1	11.5	5.8
族鼓 0112	鼓面	75.1	8.8	6.3	7.1
族鼓 0087	鼓面	64.1	12.9	11.2	5.4
族鼓 0285	鼓面	71.7	8.7	12.4	5.0
族鼓 0016	鼓面	66.8	4.6	14.1	9.2
族鼓 0048	鼓面	69.2	9.0	9.7	7.8
鼓 0209	鼓面	57.7	18.4	11.1	6.9
鼓 0014	鼓面	67.8	5.5	14.4	7.0
鼓 0219	鼓面	77.5	10.9	2.4	7.1
鼓 0277	鼓面	66.3	13.1	9.4	9.1
鼓 0005	鼓面	61.5	2.4	22.1	10.2
鼓 02887	鼓面	68.7	7.9	8.4	13.0
鼓 0239	鼓面	69.5	16.5	4.0	8.0
鼓 0208	鼓面	72.4	7.4	6.2	10.4
鼓 0097	鼓面	75.6	8.7	5.5	6.9
鼓 0067	鼓面	65.3	13.8	7.3	7.8
族鼓 0098	鼓面	61.7	11.8	14.3	9.4
族鼓 0008	鼓面	63.5	5.0	17.4	11.4
鼓 0263	鼓面	63.5	14.2	12.8	6.5
鼓 0247	鼓面	65.0	19.7	8.5	5.3
鼓 0017	鼓面	71.4	4.7	6.6	12.8
鼓号 0007	鼓面	67.2	4.5	20.3	4.4
族鼓 0094	鼓面	51.3	27.2	11.4	2.1
鼓号 0253	鼓面	66.6	10.1	14.7	4.2
族鼓 0226	鼓面	63.6	12.7	16.6	3.4
族鼓 0113	鼓面	73.0	15.4	5.2	4.1
鼓 0080	鼓面	73.0	15.0	8.0	3.2
鼓 0081	鼓面	72.8	13.5	9.1	3.4
族鼓 0192	鼓面	72.9	15.0	5.2	4.3
族鼓 0204	鼓面	68.4	16.5	7.3	4.9
鼓 0302	鼓面	62.3	17.9	12.7	2.1
鼓 0039	鼓面	70.5	18.9	4.5	3.4
鼓 0083	鼓面	63.4	11.8	16.8	4.1
鼓号 0298	鼓面	59.1	14.1	17.3	2.9
鼓 0235	鼓面	74.2	18.4	2.7	3.0
族鼓 0176	鼓面	73.7	12.2	9.0	2.1
鼓 0260	鼓面	80.1	9.5	4.9	4.1
鼓 0304	鼓面	75.0	14.8	6.8	2.3
鼓 0205	鼓面	69.7	15.5	10.0	3.6
鼓 0270	鼓面	57.6	16.3	16.9	3.6
鼓 0180	鼓面	65.8	7.0	17.9	4.7
鼓 0170	鼓面	71.1	13.8	8.8	3.7
族鼓 0289	鼓面	65.7	17.8	8.8	2.1
族鼓 0196	鼓面	70.4	15.1	6.7	4.7
族鼓 0088	鼓面	65.7	6.0	18.5	4.5
族鼓 0175	鼓面	73.2	4.1	14.2	4.5
鼓 0064	鼓面	67.6	20.1	6.7	2.6
鼓 0052	鼓面	74.4	15.2	4.5	3.0

3.3 金相分析

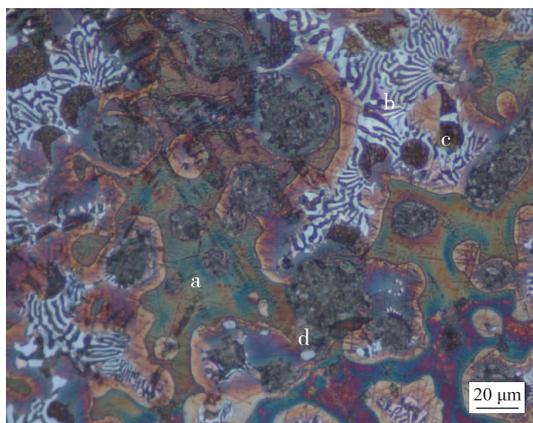
样品 1 和样品 2 的金相分析结果见图 2 和图 3。



铜锡砷 α 固溶体树枝晶偏析明显(a 点), 枝晶间白析出相为 Cu-Sn-As 化合物(b 点), 呈菊花状, 大量铅呈团块状、颗粒状分布于枝晶间(c 点), 暗灰相硫化物夹杂较多呈簇状(d 点)。

图 2 样品 1 金相图片

Fig. 2 Metallographic picture of sample No. 1



铜锡砷 α 固溶体树枝晶偏析明显(a 点), 亮白相为 Cu-As-Sn 金属化合物(b 点), 铅呈球状、团块状、颗粒状分布于枝晶间(c 点), 暗灰硫化物较多(d 点), 多与析出相一起分布。

图 3 样品 2 金相图片

Fig. 3 Metallographic picture of sample No. 2

4 讨论

4.1 麻江型铜鼓砷含量的分布

共对 221 面广西民族博物馆馆藏麻江型铜鼓进行检测, 其中不含砷 33 面, 含砷 188 面, 135 面铜鼓砷含量小于 2% (不包括砷含量为 0 部分), 大部分含量约为 1%, 砷含量 $\geq 2\%$ 有 53 面。

对 pXRF 数据分析可知, 不含砷麻江型铜鼓, Cu 含量在 51.1% ~ 86%, Sn 含量在 0.6% ~ 28.6%, Pb 含量在 1.6% ~ 30.2%。砷 $\geq 2\%$ 的麻江型铜鼓, Cu 含量 51.3% ~ 80.1%, Sn 含量在 2.4% ~ 27.2%, Pb 含量在 2.4% ~ 22.1%。由图 4 可知, 在部分偏离数据的影响下, 三组铜鼓 Sn 和 Pb 含量变化范围都较大, 但含砷麻江型铜鼓的 Cu、Sn 和 Pb 的含量范围相比不含砷的差异要小。

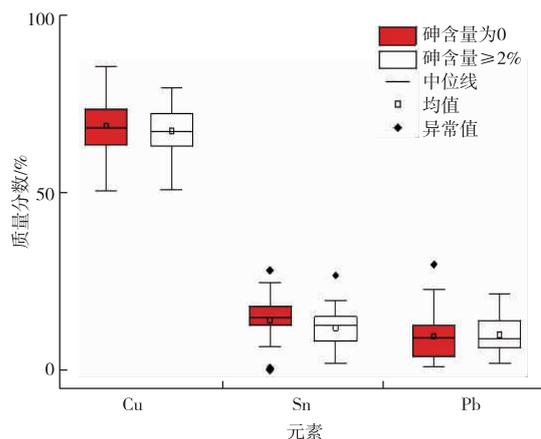


图 4 麻江型铜鼓 Cu-Pb-Sn 含量图

Fig. 4 Cu-Pb-Sn content map of Majiang type bronze drum

研究表明, 使用含砷氧化铜矿冶炼铸造青铜制品时, 砷存留比例最高可达 7%^[5], 但此次研究砷含量最高可达 13.0%, 表明存在人为添加砷单质进行合金化铸造的可能。整体来看, Sn 和 Pb 差异较大, 与不含砷麻江型铜鼓相比, 含砷麻江型铜鼓合金配比更为稳定, 且偏离数据更少。

为探讨含砷与不含砷麻江型铜鼓在 Cu、Sn、Pb 配比的差异, 将其制成三元图(图 5), 可发现含砷麻江型铜鼓主元素更为集中, 异常数据较少, 而不含砷麻江型铜鼓的主量元素分布要更加分散。

部分铜鼓铅与砷数据值得注意, 如鼓 0219, 铅含量为 2.4%, 但砷含量却有 7.1%; 鼓 0239, 铅含量有 4.0%, 但砷含量却有 8.0%, 这两面铜鼓都是铅低砷高。而鼓 0007, 铅含量为 20.3%, 砷含量为 4.4%; 鼓 0298, 铅含量为 17.3%, 砷含量为 2.9%。这两面为高铅低砷。那铅和砷是有何关系? 砷是否是由含砷铅矿带入熔铸? 为探讨两者关系, 将 53 面含砷麻江型铜鼓 Pb 与 As 制成散点图(图 6), 分析可知 Pb 与 As 对应关系较差。

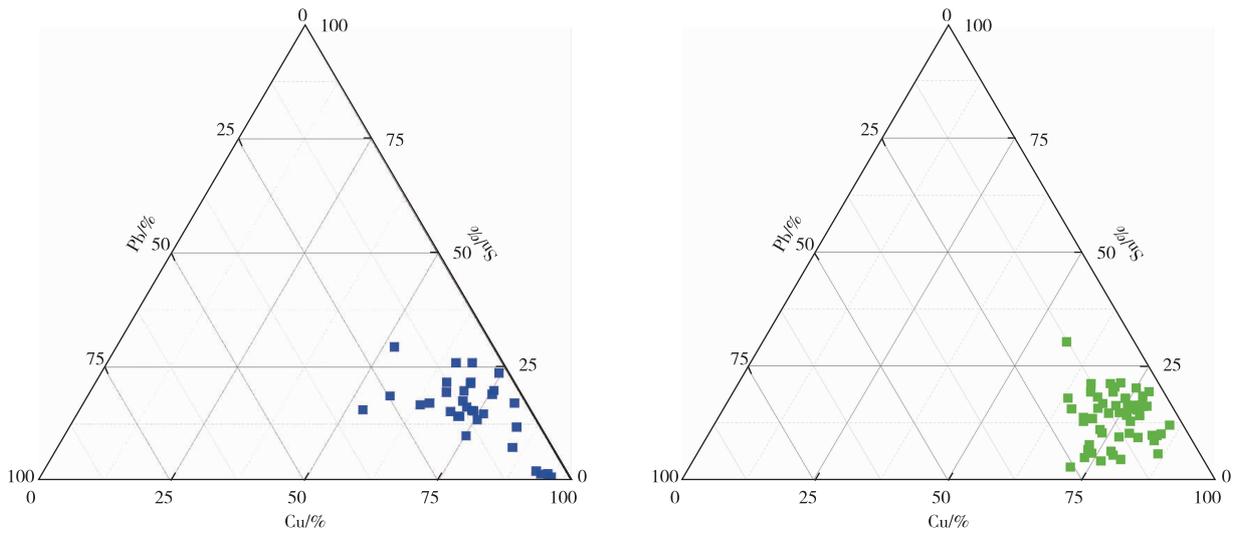


图 5 不含砷麻江型铜鼓(a)和含砷麻江型铜鼓(b)的 Cu、Sn、Pb 三元图

Fig. 5 Cu, Sn, Pb ternary diagrams of non-arsenic Majiang type bronze drum (a) and arsenic-containing Majiang type bronze drum (b)

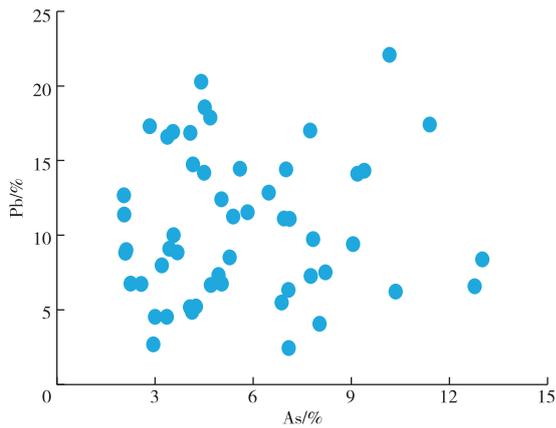


图 6 含砷麻江型铜鼓 Pb 与 As 散点图

Fig. 6 Scatter diagram of Pb and As in Majiang-type bronze drum containing arsenic

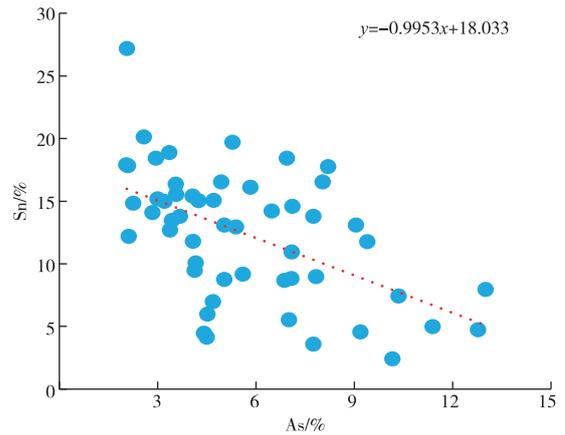


图 7 含砷麻江型铜鼓 Sn 与 As 含量散点图

Fig. 7 Scatter diagram of Sn and As in Majiang-type bronze drum containing arsenic

将砷含量 $\geq 2\%$ 的 53 面铜鼓的 Sn 和 As 制作散点图(图 7),研究其 Sn 与 As 含量的相关性,可见含砷麻江型铜鼓两者呈负相关,根据现有数据,其比例关系大致可用函数 $Sn = -0.9953As + 18.033$ 表达。

上述分析表明,含砷麻江型铜鼓铜元素含量、其他主元素含量之和(锡、铅和砷)波动较小,锡含量与砷含量呈负相关关系,因此,砷含量大于 2% 的麻江型铜鼓中砷的加入有可能是人为因素,相比不含砷麻江型铜鼓,含砷麻江型铜鼓的合金配比更为严格,这表现出该类铜鼓铸造可能掌握于部分工匠手中。

4.2 古代含砷麻江型铜鼓研究情况及其重要性

铜冶金在人类历史上经历了大致相同的发展道路:自然铜—人工冶炼红铜—铜的合金化^[6]。砷铜是人类历史上使用的第一种合金,在机械性能上较红铜有显著优势。在我国青铜时代早期,河西走廊的玉门火烧沟^[7]、酒泉干骨崖^[8]、民乐东灰山^[9]等(1900BC~1600BC)均有砷铜出土。早期出现含砷制品是偶尔使用含砷矿物冶炼的结果,但在经过长时间探索后,工匠对砷铜机械性能有所认识,并有意加入砷矿物进行铜合金冶炼^[10],但随后被性能更加优良的锡青铜所取代。早期砷铜以铜砷二元合金为主,Cu-Sn-As-Pb 四元合金较少,晚期发现较

少,已发现该类铜器有广西博物馆馆藏宋代遵义型铜鼓(186号)^[11]、文山遵义型铜鼓^[12]等,含砷麻江型铜鼓则是其中一类^[2]。

麻江型铜鼓含砷是其重要特征,以往研究并未引起关注。李世红等^[13]在研究麻江型铜鼓声学特性时,曾检测到8面含砷。孙淑云等^[14-15]在分析越南一批铜鼓时发现了1面含砷麻江型铜鼓。邹桂森等^[2]在百色起义纪念馆、桂林博物馆发现了4面含砷麻江型铜鼓,对其与含砷遵义型铜鼓的关系开展了讨论,提出了系统研究含砷遵义型与麻江型铜鼓的重要性。

上述研究已发现了一定数量的含砷麻江型铜鼓,但由于未开展系统调研与检测分析,该类铜鼓整体面貌还不明晰。本研究通过对广西民族博物馆麻江型铜鼓开展系统检测,发现含砷麻江型铜鼓占比较高,其中,砷含量 $\geq 2\%$ 的有53面,总占比约为24%。此外,还有135面砷含量为0~2%。因此,可确认铜锡砷铅四元合金是麻江型铜鼓一类重要合金类型。

LECHTMAN等^[16]指出,砷铜经过加工,其合金机械性可以显著提高。BUDD等^[17]发现,当含砷量为2%~6%时,砷铜具有很好的延展性、可降低熔点、易于铸造、耐腐蚀等特点。此次调查中,砷含量为2%~6%占有砷大于2%的铜鼓比重较大,表明砷在麻江型铜鼓铸造及使用中有重要作用。含砷麻江型铜鼓在声学上与其他合金成分的麻江型铜鼓并无显著差异^[13],表明当时工匠已能够熟练运用铜锡砷铅四元合金铸造麻江型铜鼓,并利用砷铜的特性提高了其延展性和防腐性,在提高麻江型铜鼓强度和硬度的同时还保持了其出色的声学特性。但需要注意,由于砷具有较强的挥发性且剧毒,冶铸时挥发气体可通过呼吸、毛孔、饮水进入体内,可引起不适甚至死亡^[18]。但含砷麻江型铜鼓却使用大量砷作为原料,是一个复杂的合金化过程。赵匡华等^[19]曾模拟“点丹阳方”,点炼砷单质最后才获得9.92%的砷白铜。“凡红铜……用砷升者为白铜器,工费倍难,侈者事之”^[20],复杂的工艺体系表明含砷铜鼓铸造工匠与传统铸鼓工匠可能不是同一个群体,或者铜鼓铸造工匠与其他群体的技术结合或引进了新的工艺,因为铸造该类铜鼓不仅要能够成熟地掌握青铜铸造成型工艺,在引入砷作为合金元素时还需满足声学特性,同时还要避免砷挥发的伤害,技术上更为复杂。但砷是否直接由熔炼砷单质加入,还需要进行深入研究。

5 结论

1)使用pXRF、ED-XRF与SEM-EDS对三块铜鼓残片检测并对结果进行对比分析,表明pXRF检测含砷铜鼓的数据具有一定的可靠性。在此基础上,对广西壮族自治区民族博物馆馆藏221面麻江型铜鼓开展系统的成分分析,其中,不含砷33面,含砷188面,135面铜鼓砷含量在0%~2%, $\geq 2\%$ 有53面(占比24%)。考虑到pXRF仪器误差,主要对含砷 $\geq 2\%$ 的麻江型铜鼓进行分析研究,具有较强的统计意义,可确认铜锡砷铅四元合金是麻江型铜鼓(含砷麻江型)重要的合金类型之一。

2)在含砷麻江型铜鼓铸造过程中,砷和锡呈负相关,铜与其他主元素之和相对比较稳定,由于砷铜铸造需要更为复杂的技术,因此含砷麻江型铜鼓需要更为专业化的生产。但砷如何应用,含砷麻江型铜鼓技术体系如何,与含砷遵义型铜鼓传承关系如何,仍有待进一步研究。

致谢:感谢广西民族大学科技史与科技文化研究院万辅彬教授、容志毅教授对本文提供的宝贵意见,感谢广西民族博物馆陈嘉副研究馆员在检测过程中给予的帮助。

参考文献

- [1] 蒋廷瑜. 古代铜鼓通论[M]. 北京:紫禁城出版社, 1999:108.
JIANG T Y. The general theory of ancient bronze drums[M]. Beijing:Forbidden City Press, 1999:108.
- [2] 邹桂森,李延祥,梁燕理. 古代含砷麻江型铜鼓研究[J]. 文物保护与考古科学, 2018(1):1-10.
ZOU G S, LI Y X, LIANG Y L. Research on ancient arsenic-containing Majiang type bronze drums [J]. Sciences of Conservation and Archaeology, 2018(1): 1-10.
- [3] 中国古代铜鼓研究会,广西民族博物馆. 广西铜鼓精华[M]. 北京:文物出版社, 2017.
Chinese Association for Ancient Bronze Drums Research, Anthropology Museum of Guangxi. Bronzedrums in Guangxi[M]. Beijing:Cultural Relics Press, 2017.
- [4] 马仁杰,崔剑锋,闵锐,等. 祥云地区出土铜器pXRF成分分析:昆明夷铜器工艺类型初探[J]. 文物保护与考古科学, 2018, 30(3):75-86.
MA R J, CUI J F, MIN R, et al. XRF analysis of bronzes unearthed from the Xiangyun area; exploration of the bronze technique tradition of Kunming Yi[J].

- Sciences of Conservation and Archaeology, 2018, 30(3): 75-86.
- [5] SCOTT D A. Metallography and microstructure of ancient and historic metals[M]. Oxford: Oxford University Press, 1992.
- [6] 潜伟, 孙淑云, 韩汝玢. 古代砷铜研究综述[J]. 文物保护与考古科学, 2000(2): 43-50.
QIAN W, SUN S Y, HAN R B. A review on ancient copper-arsenic alloy[J]. Sciences of Conservation and Archaeology, 2000(2): 43-50.
- [7] 孙淑云, 潜伟, 王辉. 火烧沟四坝文化铜器成分分析及制作技术的研究[J]. 文物, 2003(8): 86-96.
SUN S Y, QIAN W, WANG H. The bronze of the Siba culture from Huoshaogou: a component analysis and manufacture technique study [J]. Cultural Relics, 2003(8): 86-96.
- [8] 孙淑云, 韩汝玢. 甘肃早期铜器的发现与冶炼、制造技术的研究[J]. 文物, 1997(7): 75-84.
SUN S Y, HAN R B. Studies of early bronze objects from Gansu in terms of their casting and manufacturing techniques[J]. Cultural Relics, 1997(7): 75-84.
- [9] 孙淑云. 东灰山遗址四坝文化铜器的鉴定及研究[M]//民乐东灰山考古: 四坝文化墓地的揭示与研究. 北京: 科学出版社, 1998: 191-195.
SUN S Y. Identification and research of Siba culture bronze ware at Donghuishan site [M]//Minle Donghuishan archeology: revelation and research of Siba culture cemetery. Beijing: Science Press, 1998: 191-195.
- [10] CHARLES J A. The coming of copper and copper-base alloys and iron: a metallurgical sequence [M]//WERTIME T A. The coming of the age of iron. New Haven and London: Yale University Press, 1980: 151-182.
- [11] 孙淑云, 韩汝玢, 李秀辉. 砷铜及多元铜合金显微组织[M]//中国古代金属材料显微组织图谱·有色金属卷. 北京: 科学出版社, 2010: 120-132.
SUN S Y, HAN R B, LI X H. Microstructure of arsenic-copper and multi-component copper alloys[M]//Microstructure atlas of ancient Chinese metal materials: nonferrous metals. Beijing: Science Press, 2010: 120-132.
- [12] 崔剑锋, 吴小红. 铅同位素考古研究: 以中国云南和越南出土青铜器为例[M]. 北京: 文物出版社, 2008: 78-83.
CUI J F, WU X H. The study of lead-isotope archaeology: take the bronzes unearthed in Yunnan, China and Vietnam as examples[M]. Beijing: Cultural Relics Press, 2008: 78-83.
- [13] 李世红, 万辅彬. 麻江型铜鼓声学特性及雌雄铜鼓的探讨[J]. 自然科学史研究, 1992(3): 237-244.
LI S H, WAN F B. The discussion on the acoustic characteristics and the male and female drum of Majiang type bronze drums[J]. Studies in the History of Natural Sciences, 1992(3): 237-244.
- [14] 孙淑云, 姚智辉, 万辅彬. 越南铜鼓及相关器物金相分析[J]. 桂林工学院学报, 2005, 25(4): 498-505.
SUN S Y, YAO Z H, WAN F B. Metallographical study on ancient bronze drums and artifacts from Vietnam[J]. Journal of Guilin University of Technology, 2005, 25(4): 498-505.
- [15] 孙淑云, 姚智辉, 万辅彬. 越南铜鼓和其他器物成份分析报告[J]. 广西民族学院学报(自然科学版), 2005, 11(4): 46-50.
SUN S Y, YAO Z H, WAN F B. Analysis of the chemical composition of the Vietnamese timbal and other objects[J]. Journal of Guangxi Minzu University (Natural Science Edition), 2005, 11(4): 46-50.
- [16] LECHTMAN H. Arsenic bronze: dirty copper or chosen alloy? a view from the Americas[J]. Journal of Field Archaeology, 1996, 23(4): 477-514.
- [17] BUDD P, OTTAWAY B S. The properties of arsenical copper alloys: implications for the development of eneolithic metallurgy [M]//BUDD P. Archaeological Science. Oxford: Oxbow Books, 1989: 132-142.
- [18] HARRISON A P, CATTANI I, TURFA J M. Metallurgy, environmental pollution and the decline of Etruscan civilisation [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2010, 17(1): 1-16.
- [19] 赵匡华, 阮慎康, 骆萌. 我国金丹术中砷白铜的源流与验证[J]. 自然科学史研究, 1983(1): 24-31.
ZHAO K H, RUAN S K, LUO M. The origin and verification of arsenic-nickel copper in Jindan surgery in China[J]. Studies in the History of Natural Sciences, 1983(1): 24-31.
- [20] 潘吉星. 天工开物译注[M]. 上海: 上海古籍出版社, 2008.
PAN J X. Tiangong Kaiwu translation and annotation[M]. Shanghai: Shanghai Ancient Books Publishing House, 2008.