

辽宁建昌县东大杖子墓地 M11 出土铜器的科学分析



柏艺萌

(辽宁省文物考古研究院)



徐韶钢



陈建立

(北京大学考古文博学院)



张 吉

摘 要:东大杖子墓地是辽西地区战国时期的一处重要遗址。本研究对东大杖子 M11 出土的 15 件铜器进行了金相分析、扫描电镜与能谱分析以及铅同位素比值分析。分析结果显示, M11 出土铜器的制作工艺以铸造为主, 另外还有热锻及热锻后冷加工; 合金成分以铅锡青铜为主, 仅有一件铜斧是铜锡合金。铜器的合金成分和器物类型之间的关系明显, 表明制作者已经能根据青铜器的成型工艺和用途而选择合适的制作材料。铅同位素比值显示 M11 出土铜器虽文化背景各异, 但铅料来源却较为相近, 反映出辽西与中原地区在物料流通方面存在着密切的联系。

关键词:东大杖子; 青铜器; 铅同位素; 科学分析

Abstract: Dongdazhangzi cemetery is an important site in western Liaoning during the Warring States period. In this study, 15 bronzes unearthed from M11 of Dongdazhangzi were analyzed by metallography, SEM, EDS and Pb isotope ratios. The analysis results show that the production process of M11 unearthed bronze ware is mainly casting, in addition to hot forging and cold working after hot forging; the alloy composition is mainly lead tin bronze, and only one axe is tin bronze. The relationship between the alloy composition and the type of bronze ware is obvious, which shows that the manufacturer has been able to choose the appropriate materials according to the forming process and use of bronze ware. The lead isotope ratios show that although the cultural backgrounds of M11 bronzes are different, the sources of lead materials are relatively similar, reflecting the close relationship between western Liaoning and Central Plains in material circulation.

Key Words: Dongdazhangzi; Bronze; Lead isotope; Scientific analysis

东大杖子墓地位于辽宁省建昌县碱厂乡东大杖子村, 地处大凌河上游的辽西丘陵山区, 是沟通北方、中原文化和辽西地区文化的重要节点。自 2000 年至 2012 年, 辽宁省文物考古研究所等单位对其进行了 6 次抢救性发掘, 共清理墓葬 47 座, 在 2000 年发掘的战国早期墓葬 M11 中出土了 28 件(套)青铜器^①, 按使用功能可分为容器、兵器、工具、车马器等,

基本涵盖了东大杖子墓地出土铜器的所有器类, 是研究辽西地区战国铜器的重要实物资料。有鉴于此, 本文通过金相组织鉴定、合金成分分析、铅同位素分析等多种检测方法, 对东大杖子墓地 M11 出土铜器进行科学分析, 以期揭示其所蕴含的工艺技术信息, 探讨其矿料及产地来源, 为深入认识战国时期辽西地区铜器的生产与交流提供更多科学依据。



图一 本次分析部分 M11 出土铜器照片

1. M11:1 盖豆
2. M11:5 铸镶红铜壶
3. M11:4 鼎
4. M11:8 鼎
5. M11:3 洗
6. M11:10 刻刀
7. M11:19 斧
8. M11:6 连体壶

一、取样及分析方法

为最大限度保护文物,仅对铜器铸缝、破损处或器形可辨的铜器残片进行取样。按此取样原则,从 M11 出土铜器中共取得基体样品 15 件,涉及铜器 15

件,包括容器 7、兵器 4、工具 3 及车马器 1。将样品进行镶嵌、打磨、抛光,使用 Leica DM-4000M 金相显微镜观察未浸蚀和经 3%三氯化铁盐酸酒精溶液浸蚀后样品的金相组织、夹杂物形貌及分布等;随后将样品重新抛光,用北京大学考古文博学院科技考

表一 东大杖子墓地 M11 出土铜器金相组织观察和合金成分分析结果

样品编号	器名及取样部位	出土号	元素含量 [wt.%]				材质	显微组织	加工工艺	图号
			Cu	Sn	Pb	其他				
JC1	盖豆残片	M11:1	74.5	12.7	12.8		Cu-Sn-Pb	基体为 α 固溶体枝状晶,有大量 ($\alpha+\delta$) 共析体;铅呈球状及小颗粒状弥散分布,并伴有硫化物夹杂	铸造	图二
JC2	匜底部残片	M11:2	82.7	14.1	3.2		Cu-Sn-Pb	α 再结晶晶粒及孪晶,有大量滑移带存在;铅呈圆形小颗粒状弥散分布,并伴有硫化物夹杂	热锻+冷加工	图三
JC3	洗口沿残片	M11:3	82.6	14.1	3.3		Cu-Sn-Pb	α 再结晶晶粒及孪晶,晶粒细碎并有少量滑移带存在;铅沿加工方向拉长成条带状,并伴生少量颗粒状硫化物夹杂	热锻+冷加工	图四
JC4	鼎身残片	M11:4	/	/	/		Cu-Sn-Pb	基体为 α 固溶体枝状晶;圆球形的铅呈链状分布	铸造	

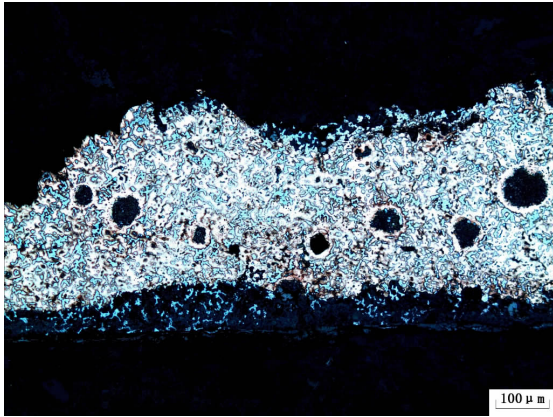
续表

JC5	铸镶红铜壶 本体残片	M11:5	71.1	15.0	12.6	Fe: 1.3	Cu- Sn- Pb	α 固溶体枝状晶, 偏析明显, 有大量 ($\alpha+\delta$) 共析体; 铅呈球状弥散分布并伴有硫化物夹杂	铸造	图五
JC6	连体壶壶盖 残片	M11:6	67.7	8.5	23.8		Cu- Sn- Pb	α 固溶体枝状晶, 偏析明显, 晶间有较多 ($\alpha+\delta$) 共析体; 大量铅呈球状和颗粒状弥散分布并伴有硫化物夹杂	铸造	图六
JC7	小鼎鼎身残 片	M11:8	74.2	9.3	16.5		Cu- Sn- Pb	α 固溶体枝状晶, 偏析明显, 晶间有较多 ($\alpha+\delta$) 共析体; 铅呈颗粒状弥散分布并伴有硫化物夹杂	铸造	图七
JC8	凿凿身	M11:9	81.7	12.8	5.5		Cu- Sn- Pb	α 再结晶晶粒及孪晶, 晶粒细碎; 铅呈颗粒状弥散分布, 并伴有少量硫化物夹杂	热锻	图八
JC9	刻刀毛刺	M11:10	79.2	11.0	9.8		Cu- Sn- Pb	α 固溶体枝状晶, 晶间有少量 ($\alpha+\delta$) 共析体; 铅呈颗粒状及圆球状弥散分布并伴有硫化物夹杂	铸造	图九
JC10	钺刃部	M11:17	83.9	12.7	3.4		Cu- Sn- Pb	基体为 α 再结晶晶粒及少量孪晶, 晶粒变形拉长, 有大量滑移带存在; 铅与硫化物沿加工方向拉长成条带状	热锻+ 冷加工	图一〇
JC11	斧刃部	M11:19	86.6	13.4			Cu- Sn	α 再结晶晶粒及孪晶, 晶粒细碎, 有大量滑移带存在; 硫化物细小并沿加工方向拉长	热锻+ 冷加工	图一一
JC12	戈下阑	M11:26	77.4	13.8	8.8		Cu- Sn- Pb	α 固溶体枝状晶, 偏析明显, 晶间有较多 ($\alpha+\delta$) 共析体; 铅呈颗粒状弥散分布并伴有硫化物夹杂	铸造	图一二
JC13	短剑刃部	M11:27	/	/	/		Cu- Sn- Pb	α 固溶体枝状晶, 偏析明显, 大量 ($\alpha+\delta$) 共析体连成网状; 铅呈圆球状弥散分布	铸造	
JC14	铍锋部	M11:33	76.0	17.0	7.0		Cu- Sn- Pb	α 固溶体枝状晶, 偏析明显, 大量 ($\alpha+\delta$) 共析体连成网状; 铅呈颗粒状弥散分布并伴有少量硫化物夹杂; 有自由铜沉积并取代部分铅颗粒	铸造	图一三
JC15	盖弓帽残片	M11:35	75.9	15.2	8.9		Cu- Sn- Pb	α 固溶体枝状晶, 偏析明显, 大量 ($\alpha+\delta$) 共析体连成网状; 铅呈颗粒状弥散分布, 有少量硫化物夹杂	铸造	

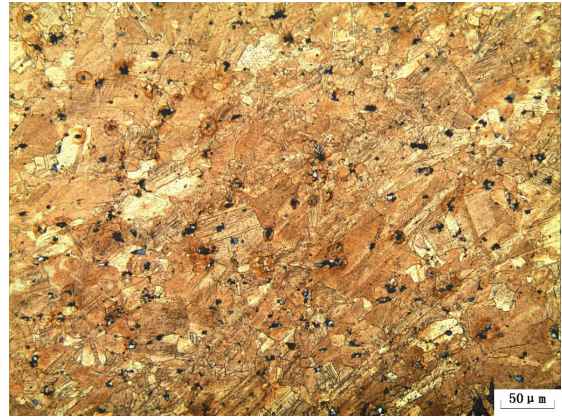
古实验室 Hitachi TM3030 超景深电子显微镜观察样品形貌, 选取无锈或少锈蚀区域, 以联用的 EDAX 能谱仪对样品不同部位分别测定成分, 取平均值作为整体成分分析结果。测试条件为: 电压 15kV, 采集时间 90 至 120 秒。金相分析及成分分析结果详见表一。

二、金相组织鉴定

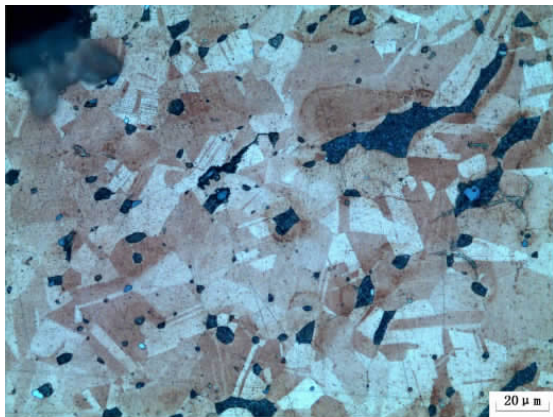
通过金相分析发现, 东大杖子 M11 出土的 15 件铜器有铸造、热锻和热锻后冷加工三种组织形态 (表



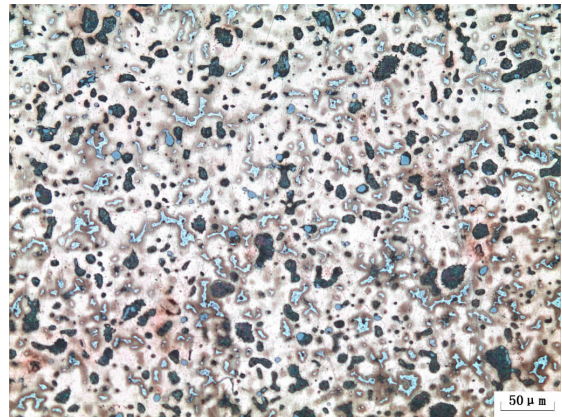
图二 盖豆 M11:1 金相组织



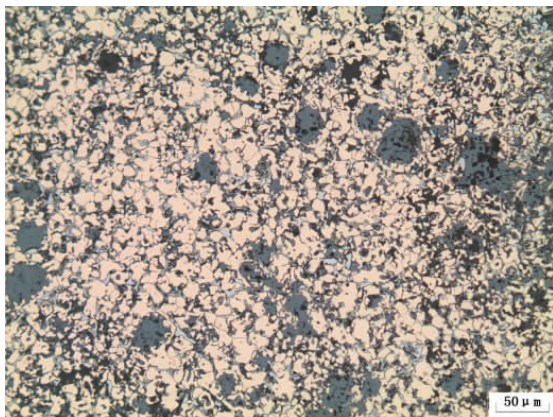
图三 匜(口沿) M11:2 金相组织



图四 洗 M11:3 金相组织



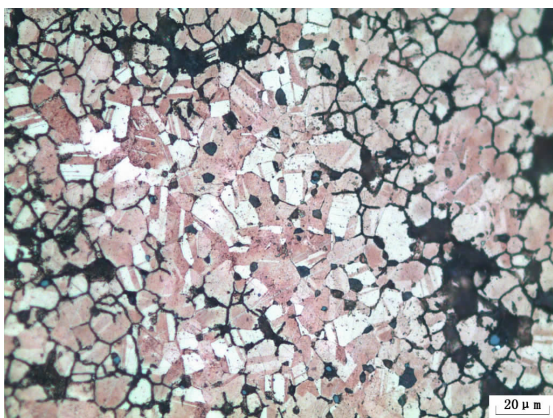
图五 铸镶红铜壶 M11:5 金相组织(未浸蚀)



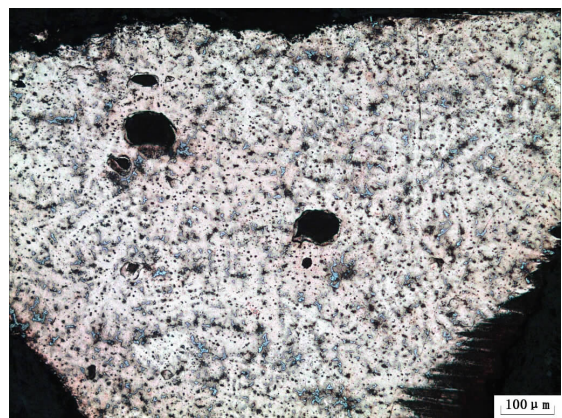
图六 连体壶 M11:6 金相组织



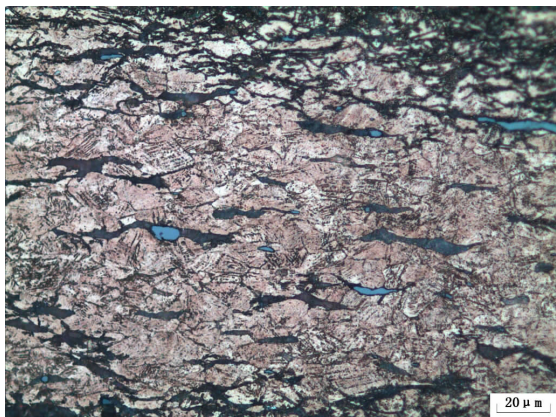
图七 鼎 M11:8 金相组织



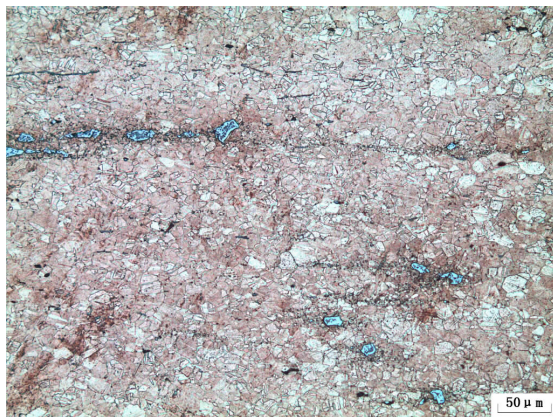
图八 匚 M11:9 金相组织



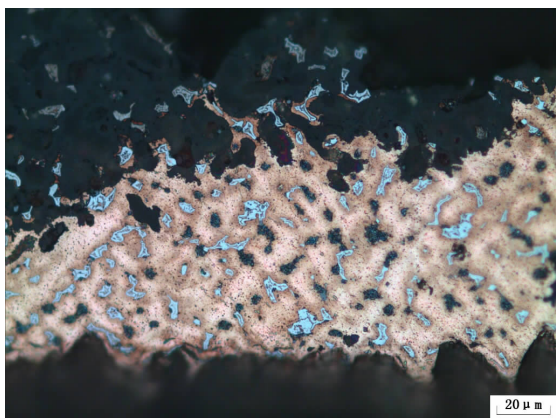
图九 刻刀 M11:10 金相组织



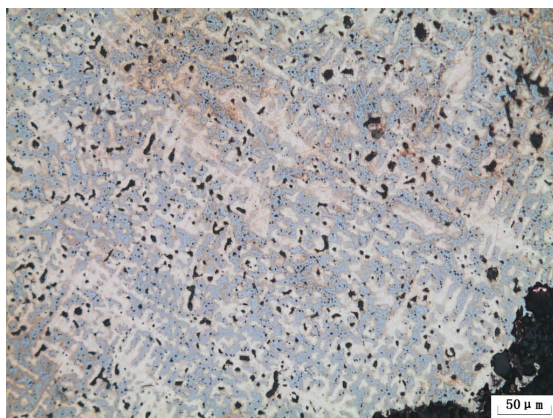
图一〇 钺 M11:17 金相组织



图一一 斧 M11:19 金相组织



图一二 戈 M11:26 金相组织



图一三 镞 M11:33 金相组织

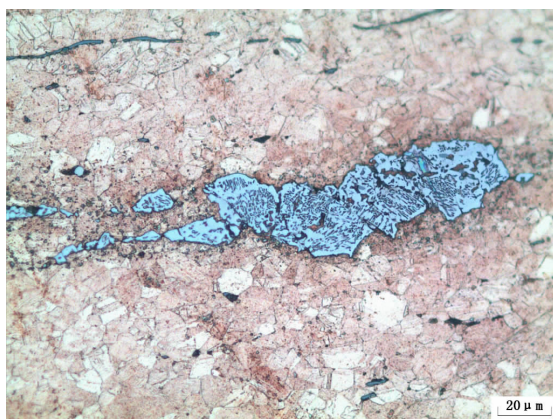
一)。其中鼎、壶等 10 件铜器样品的金相组织为 α 固溶体树枝晶, ($\alpha+\delta$) 共析体分布于晶间, 为典型的铸造组织, 表明均为铸造成型。由于铅、锡含量及冷却速度的不同, 其 α 固溶体、($\alpha+\delta$) 共析体及铅颗粒的数量、形态及分布有所差异; 各样品金相组织中均含有数量不等且多与铅伴生呈蓝灰色点状、颗粒状及不规则状分布于晶间或晶内的硫化物夹杂; 在铜镞 (M11:33)、盖弓帽 (M11:35) 等小件样品中还发现有纯铜晶粒 (图一四)。纯铜晶粒多存在于铸造或锈蚀

原因形成的孔洞和缝隙中, 在锡含量较高、锈蚀严重、 δ 相优先腐蚀的古代铜器中常出现自由铜沉积^②。

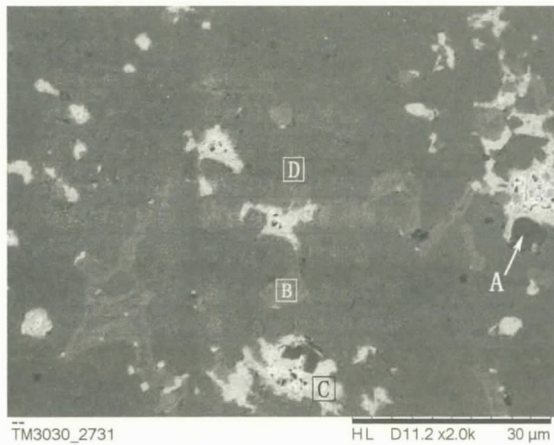
金相实验结果还显示, 铜凿 (M11:9) 等 5 件铜器样品组织形态出现 α 再结晶晶粒及孪晶, 说明是热锻成型, 其中匜 (M11:2)、洗 (M11:3)、钺 (M11:17)、斧 (M11:19) 的金相组织中还存在滑移带, 说明在热锻成型后又经过冷加工。匜和铜凿中的铅呈圆形颗粒状弥散分布在晶间, 而洗和钺中的铅沿加工方向拉长成条带状, 或可反映出加工量多少的差别。较为



图一四 盖弓帽 M11:35 金相组织



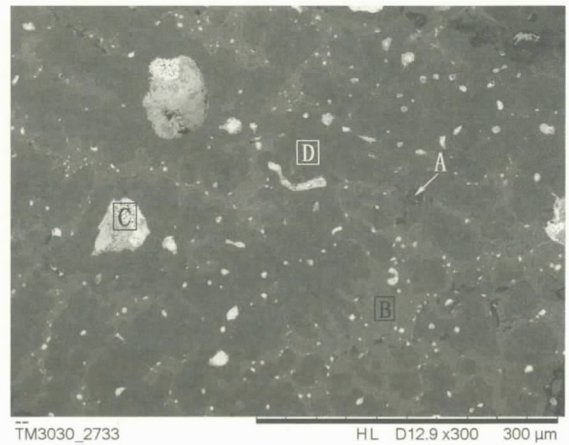
图一五 斧 M11:19 金相组织



图一六 刻刀 M11:10 背散射图像

EDS 微区分析[wt.%]

A: Cu 70.01, S 24.16, Sn 5.84 B: Cu 64.16, Sn 35.84
C: Cu 17.57, Sn 2.79, Pb 79.64 D: Cu 90.25, Sn 9.75



图一七 盖弓帽 M11:35 背散射图像

EDS 微区分析[wt.%]

A: Cu 69.70, S 24.87, Sn 5.43 B: Cu 65.30, Sn 34.70
C: Cu 18.45, Sn 3.08, Pb 78.47 D: Cu 85.83, Sn 14.17

特殊的是铜斧样品,局部可见大块的($\alpha+\delta$)共析体,蓝灰色硫化物夹杂也沿加工方向拉长成条状(图一五)。

三、合金成分分析

经分析的 15 个样品中,仅铜斧(M11:19)是锡青铜,其余 14 件样品均为铅锡青铜,其中鼎(M11:4)和铜剑(M11:27)样品腐蚀较为严重,成分数据不计入统计。整体来看,样品中的锡含量的波动范围较小,介于 8.5%至 17.0%,铅含量则差别较大,最低含量 3.2%,最高则含 23.8%。所有样品都含有铜硫化物夹杂,呈小颗粒状,多与铅共生,或存在于晶界界面上。能谱分析结果表明,多数样品夹杂物的含硫量在 20%左右(图一五、图一六),铜硫化物夹杂的存在表明冶炼所用矿石不是纯净的氧化矿。值得注意的是,铜壶(M11:5)本体中检测到了铁元素,含量为 1.3%,推测是由冶炼共生矿所致。

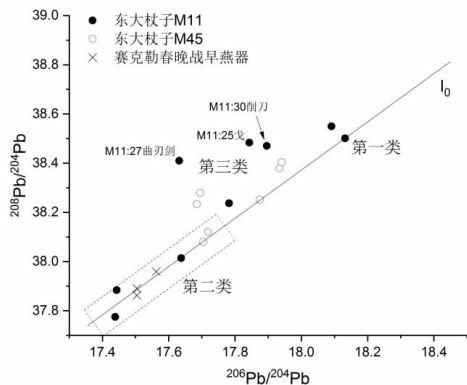
四、铅同位素分析

9 件铜器样品以王水溶解,所得溶液稀释至 Pb^{2+} 浓度低于 0.5 mg/l 后,加入 Tl_2SO_4 标液作为内标^③。使用北京大学地球与空间学院的 VG Elemental 型多接收电感耦合等离子体质谱仪(MC-ICP-MS)测试铅同位素比值。测试时使用国际铅同位素标准溶液 SRM 981 校正仪器,测试相对误差小于 0.05%,结果详见表二。

铅同位素分析结果显示,东大杖子墓地 M11 铜器样品 $^{208}Pb/^{206}Pb$ 的比值在 37.7~38.6 之间, $^{206}Pb/^{204}Pb$ 的比值在 17.4~18.2 之间,均属普通铅。根据 $^{206}Pb/^{204}Pb$ 比值特征,这批数据又可分为三类,第一类比值在 18.0~18.2 间,包括刻纹匜及铜铍;第二类比值在 17.4~17.8 之间,M11 中典型的燕式青铜器如卧兽钮盖鼎、中原各地战国墓常见的铸镶红铜铺首圆壶及连体提链壶等不同背景的青铜器均属此类。若

表二 东大杖子墓地 M11 部分铜器样品铅同位素比值分析结果

样品编号	器物号	器物名称	$^{207}Pb/^{206}Pb$	$^{208}Pb/^{206}Pb$	$^{206}Pb/^{204}Pb$	$^{207}Pb/^{204}Pb$	$^{208}Pb/^{204}Pb$
JC1	M11:1	盖豆	0.8783	2.1553	17.638	15.503	38.014
JC2	M11:2	匜	0.8636	2.1309	18.091	15.624	38.550
JC4	M11:4	鼎	0.8754	2.1503	17.782	15.566	38.237
JC5	M11:5	铸镶红铜壶	0.8900	2.1719	17.443	15.524	37.884
JC6	M11:6	连体提梁壶	0.8894	2.1661	17.439	15.511	37.775
	M11:25	戈	0.8754	2.1567	17.843	15.620	38.483
JC13	M11:27	曲刃短剑	0.8852	2.1787	17.632	15.605	38.410
	M11:30	削刀	0.8725	2.1496	17.896	15.615	38.470
JC14	M11:33	铍	0.8610	2.1233	18.132	15.612	38.501

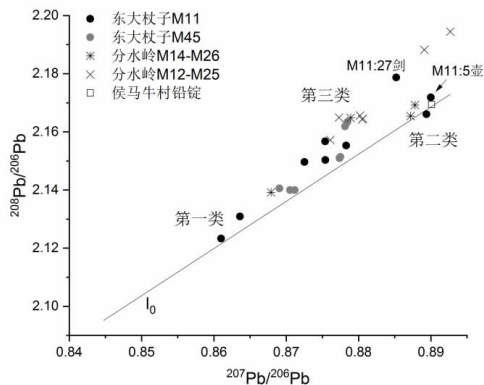


图一八 东大杖子墓地青铜器
铅同位素比值及相关比较

以 M11 铜器样品的 $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 对 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 比值作图,则第一、二类比值数据大致落在于一条直线上,第三类比值则偏处直线上方(图一八),实例包括戈(M11:25)、曲刃短剑(M11:27)及削刀(M11:30)等。

李瑞亮曾对东大杖子 M45 出土部分青铜器进行过铅同位素比值分析^④,结果也包括上述三类,并与 M11 同类器物基本对应。M45 刻纹盘、匜与 M11 所出形制及纹饰近同;李文报导的 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 比值在 17.9~18.0 之间,也与 M11 匹较为接近,属于第一类比值。M45:10 鼎与 M11:4 鼎数据十分接近, $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 比值在 17.7 附近,比值为第二类;M45:21 盖豆与 M11:27 曲刃剑相似,属于第三类比值。东大杖子 M45 与 M11 相距较近,器物组合及风格相近,年代较 M11 稍晚,对应的铅同位素比值总体分布也十分相似。

燕国青铜器的铅同位素比值随时代变化较大。齐思(W. T. Chase)分析过美国赛克勒博物馆藏三足舟(馆藏编号 V-79)、盖豆(V-258)及嵌红铜环钮敦(V-163)等春秋晚期至战国早期的燕式青铜器, $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 比值均在 17.5~17.6 间,均为上述第二类比值;此类比值的铅料在晋地大量使用,如山西侯马牛村铸铜作坊所出铅锭即属此类^⑤。战国早期晚段至战国早中期之际,燕国青铜器的铅料仍然与同期三晋青铜器基本相似(图一九)。辽宁东大杖子 M11 的比值与山西长治分水岭 M14—M26 组墓所出青铜器相近,而东大杖子 M45 的比值则与分水岭 M12—M25 组墓相近^⑥。战国中晚期的燕国青铜器尚少科技分析研究报道,金正耀对河北燕下都遗址所出不同期别的明刀进行过分析^⑦。早期弧背明刀比值较为杂乱,有一件 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 比值在 17.4 附近,接近上文所述的第二类比值,此外还包括高放射性成因铅及高比值铅等异常比值类别;晚期弧背及折背明刀则主要是高比值铅,并与齐国在战国末期铸行的刀币及圜钱



图一九 东大杖子墓地青铜器
铅同位素比值及相关比较

相近。据以上分析可知,春秋晚期至战国早期燕国青铜器的铅料与晋及三晋青铜器较为相似,至战国中晚期逐渐与中原地区趋异,而与海岱北部的齐地具有较强共性。

五、讨论

1. 东大杖子墓地 M11 出土青铜器的工艺特征

从加工工艺来看,东大杖子墓地 M11 出土青铜器表现出多样化的制作方式,这批青铜器不仅有铸造的(10件),还有热锻(1件)和热锻后冷加工的(4件)。铸造样品所占比重最大,器物种类丰富,涵盖了容器、武器、工具以及车马器等。工具铜凿的制作工艺为热锻,匜、洗的制作工艺为热锻后冷加工。器物经过热锻,可以使成分均匀,组织发生再结晶变化,从而增加致密度,提高机械性能。斧、钺样品的金相组织显示其制作工艺为热锻后冷加工,但从外表观察其整体应为铸造成型,推测是刃部经过铸后加工和研磨、使用。斧、钺都是通过锋利的刃部来实现其作为工具和武器的使用功能的,通过对其刃部进行热锻和冷加工,可使其加工硬化,并显著提高强度和硬度。此工艺在西周时期工具及兵器加工中即有发现,如周原宋家西周墓地 3 件兵器工具类器物^⑧、叶家山 M65 出土的 1 件铜戈^⑨、北京房山琉璃河西周墓葬出土的 5 件铜戈、1 件铜戟和 1 件铜刀^⑩、陕西沔西张家坡西周墓葬出土的 5 件铜戈^⑪等均经过冷热加工处理。至东周时期,中原地区发现了许多采用此工艺加工的铜器:如河北平山中山国东周墓出土铜针^⑫、山西长治分水岭 M84 出土铜刀及 M126 出土铜戈^⑬、湖北宜城跑马堤战国墓地出土铜钺^⑭、陕北地区出土东周铜刀^⑮等。此外,在边疆地区也发现了大量采用此工艺的工具兵器类铜器,如吉林白城双塔战国墓地出土铜锥^⑯、内蒙古林西县井沟子西区出土铜锥、铜刀^⑰、青海都兰县塔温塔

里哈晚期青铜时代遗址出土铜刀^⑧、四川宣汉罗家坝出土战国铜锯^⑨、重庆开县余家坝遗址出土战国铜剑、铜削^⑩、贵州红营盘东周墓地出土铜剑、铜铍^⑪、滇西古哀牢地区出土战国青铜剑^⑫、云南曲靖横大路墓地出土东周铜剑及铜戈^⑬等。可见,对青铜兵器与工具的刃部以冷热锻打的方式进行铸后加工处理这种技术在东周时期得到了非常广泛的应用,这也印证了《尚书·费誓》^⑭中“备乃弓矢,锻乃戈矛,砺乃锋刃,无敢不善”的记载。

值得注意的是,匜、洗两件铜容器也采用了热锻后冷加工的制作工艺,且器壁极薄,均不足1毫米,是东北地区发现最早的热锻薄壁铜容器。东周时期,热锻铜容器在各地大量出现,如山西定襄中霍春秋墓出土盘、匜^⑮;湖北郧县乔家院墓地出土的春秋及战国时期铜盘、铜匜^⑯;河南陕县后川战国墓出土盘、匜^⑰;陕西西安北郊秦墓出土战国时期铜盘^⑱;山东新泰周家庄墓地出土战国时期铜盘^⑲;淮阴高庄战国墓出土盘、匜^⑳;四川宣汉罗家坝出土战国铜盆、盘、鉴等^㉑。这些薄壁铜容器都采用了热锻成型工艺,说明当时工匠已经熟练掌握了在锻打过程中通过加热保温来降低材料的硬度,从而恢复其延展性,使其更容易进行加工的技术。

2.东大杖子墓地 M11 出土青铜器的材质特征

从材质成分来看,东大杖子墓地 M11 出土青铜器的 15 份样品中有 14 件 Cu-Sn-Pb 三元合金,仅铜斧是 Cu-Sn 二元合金。这些青铜器的合金化程度较高,主要合金元素的总体平均含量(Sn% + Pb%)接近 22%。其中锡含量较为集中,基本以 13%为中心呈正态分布,工具兵器类铜器的锡含量略高于铸造铜容器。铅含量的差异则非常大,连体壶样品含铅 23.8%,而匜、洗、钺等仅略高于 3%。整体来看,锻造成型铜器的铅含量明显小于铸造铜器,而热锻后经冷加工的铜器铅含量还要更低,且铸造成型铜容器的铅含量显著高于工具兵器类铜器。这种现象从商代开始就已经出现,郝欣等对盘龙城商代中期遗址出土铜器的分析结果显示,工具兵器类铜器的含铅量明显低于礼器的含铅量^⑳;张利洁等通过对北京琉璃河西周墓地出土铜器的分析也发现器物类型与合金成分有着密切的关系,认为琉璃河西周铜器在合金成分上不仅继承了商代的技术,而且有了进一步提高^㉑。锡的增加是为了获得更高的机械性能,使器物获得更高的硬度,主要是应用于工具与兵器中,铅的增加主要是为了提高合金溶液的流动性,增强充填铸型能力,更适用于具有繁缛纹饰的器物,但过高的铅含量会降低铜器的机械性能。以东大杖子墓地 M11 出土匜、洗样品为例,因为需要锻打成型,所以需要一定的强度,其约 14%的锡含量,恰好可提

供较高的抗拉强度、硬度和一定的延伸率;而约 3%的铅含量,可以保证器物在锻打和使用过程中不至因拉伸过大而产生结构损伤。这些都表明,当时工匠充分认识到了锡、铅对比对合金性能的影响,并可根据制作工艺与使用功能的不同,选择适宜的锡、铅配比,显示出了成熟的铜器制作技术与多样性的手段。

3.东大杖子墓地 M11 出土青铜器的铅同位素比值分析

东大杖子 M11 青铜器铅同位素比值的总体分布与 M45 大体相似,并与同时期三晋青铜器接近,体现较为鲜明的时代特征,也反映燕地青铜器与中原地区存在密切的关联。东大杖子 M11 青铜器的文化背景各异,但铅料来源却较为相近。如铸镶红铜壶(M11:5)在中原及周边地区战国早期墓葬中多有发现,连体提链壶(M11:6)则罕见于中原及河北北部,但两件器物的铅同位素比值基本相同,也与侯马铸铜作坊所出铅锭类似。

东大杖子 M11 青铜器的铅同位素比值还暗示辽西地区对中原资源向东北地区传播的枢纽地位。金柄曲刃剑(M11:27)有浓厚的地方色彩,但铅同位素比值则与战国早中期中原各地青铜器相近。较此更北的内蒙古林西井沟子西区墓地^㉒,所出北方系青铜器的铅料也与中原及燕地具有强烈共性。由此可见,辽宁地区战国时期青铜器的溯源研究,除了需要与辽西东胜、辽东青城子等东北地区铅矿进行比对,也需要考虑共时背景下可能存在与中原地区的金属材料流通。

六、结语

通过对东大杖子墓地 M11 出土的 15 件青铜器的科学检测分析研究,初步得出以下结论:

1.M11 出土青铜器的制作工艺多样化,存在铸造、热锻、热锻后冷加工三种制作方式。

当时的工匠为了提升工具兵器类铜器的硬度和强度,会有意识地对其锋刃部位进行热锻和冷加工;两件薄壁铜容器洗和匜也采用了热锻成型工艺,并进行了冷加工处理。

2.15 件铜器样品有 14 件是 Cu-Sn-Pb 三元合金,仅铜斧是 Cu-Sn 二元合金,锡含量较为集中,锻造成型铜器的铅含量明显小于铸造铜器,而热锻后经冷加工的铜器铅含量还要更低,且铸造成型铜容器的铅含量显著高于工具兵器类铜器,表明制作者已经能根据青铜器的器类、功能及加工方式而选择合适的制作材料。

3.东大杖子 M11 出土铜器的铅同位素比值与同时期三晋青铜器接近,虽然铜器具有中原文化、燕文化及土著文化等不同文化因素,但他们的铅料来源

却较为相近,反映出辽西与中原地区在物料流通方面存在着密切的联系。

总体来看,东大杖子墓地 M11 出土铜器反映出了专业的冶炼技术和成熟的制作工艺,为研究战国早期青铜器加工技术以及辽西地区铜器的生产与交流提供了新的资料。

注释:

①徐韶钢、万欣、王爽等:《辽宁建昌县东大杖子墓地 2000 年发掘简报》,《文物》2015 年第 11 期。

②郁永彬、黄建勋、包洪波等:《随州羊子山 M4 出土盟国青铜器的检测分析及相关问题》,《文物》2016 年第 12 期。

③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》,文物出版社,2008 年。

④李瑞亮、金正耀、陈彪等:《铅同位素比值法研究辽宁东大杖子战国墓地出土铜器的矿料来源》,《岩矿测试》2018 年第 6 期。

⑤Chase W. T., et. al., Lead isotope ratios, in Eastern Zhou ritual bronzes from the Arthur M. Sackler collections, Jenny F., (1995)489-492.

⑥崔剑锋等:《长治分水岭青铜器矿料的铅同位素比值分析》,山西省考古研究所等编著:《长治分水岭东周墓地》,第 386~391 页,文物出版社,2010 年。

⑦金正耀、[美]W. T. Chase、[日]马渊久夫等:《战国古币的铅同位素比值研究——兼说同时期广东岭南之铅》,《文物》1993 年第 8 期。

⑧刘思然、陈建立、种建荣等:《周原孔头沟遗址宋家墓地铜器的科学分析与研究》,《南方文物》2017 年第 2 期。

⑨郁永彬、常怀颖、黄凤春等:《随州叶家山西周墓地 M65 出土铜器的金相实验研究》,《江汉考古》2014 年第 5 期。

⑩张利洁、赵福生、孙淑云等:《北京琉璃河燕国墓地出土铜器的成分和金相研究》,《文物》2005 年第 6 期。

⑪杨军昌:《陕西关中地区先周和西周早期铜器的技术分析是比较研究》,北京科技大学博士学位论文,2002 年。

⑫张智博、李延祥、刘连强等:《河北平山中山国墓葬出土青铜器的科学分析研究》,《文物春秋》2018 年第 6 期。

⑬韩炳华、崔剑锋:《山西长治分水岭东周墓地出土青铜器的科学分析》,《考古》2009 年第 7 期。

⑭刘建宇、肖梦娅、王璐等:《湖北宣城跑马堤墓地出土铜器的科学分析研究》,《文物保护与考古科学》2018 年第 3 期。

⑮刘建宇、陈坤龙、梅建军等:《陕北地区出土东周时期铜器及冶铸遗物的科学分析研究》,《中国文物科学研究》2018 年第 1 期。

⑯李延祥、许倩、王立新:《吉林白城双塔墓地出土铜器的科学分析》,《中国文物科学研究》2015 年第 2 期。

⑰李延祥、李丽辉、李建西:《内蒙古林西县井沟子西区出土青铜器的成分与金相分析》,《有色金属工程》2015 年

第 3 期。

⑱席光兰、李延祥:《青海都兰县塔温塔里哈遗址铜器的初步科学分析》,《有色金属》2020 年第 4 期。

⑲宋艳:《宣汉罗家坝出土部分青铜器的合金成分和金相组织》,《四川文物》2010 年第 6 期。

⑳杨小刚、邹后曦、金普军等:《开县余家坝遗址出土青铜兵器与工具金相学研究》,《文博》2013 年第 2 期。

㉑赵凤杰、李晓岑、张合荣:《贵州红营盘墓地铜器技术研究》,《中原文物》2012 年第 3 期。

㉒巢云霞、李晓岑、王黎锐:《古哀牢地区出土青铜剑的科学分析》,《大理学院学报》2011 年第 4 期。

㉓李晓岑、赵凤杰、刘成武等:《曲靖横大路墓地出土铜器的技术分析》,《广西民族大学学报(自然科学版)》2013 年第 3 期。

㉔《十三经注疏》,第 255 页,中华书局,1980 年。

㉕张登毅、李延祥、郭银堂:《山西定襄中霍墓地出土铜器的初步科学分析》,《文物保护与考古科学》2016 年第 1 期。

㉖罗武干:《古麋地出土青铜器初步研究》,中国科学技术大学博士学位论文,2008 年。

㉗李敏生:《陕县东周墓出土部分铜器的成分分析》,《陕县东周秦汉墓》,科学出版社,1994 年。

㉘陈坤龙等:《陕西西安出土的两件薄壁铜容器的科学分析》,《西安北郊秦墓》,第 222~223 页,三秦出版社,2006 年。

㉙李延祥等:《金属器分析》,《新泰周家庄东周墓地》,第 490~513 页,文物出版社,2014 年。

㉚孙淑云、王金潮、田建花等:《淮阴高庄战国墓出土铜器的分析研究》,《考古》2009 年第 1 期。

㉛宋艳:《宣汉罗家坝出土部分青铜器的合金成分和金相组织》,《四川文物》2010 年第 6 期。

㉜郝欣、孙淑云:《盘龙城商代青铜器的检验与初步研究》,《盘龙城》(上),文物出版社,2001 年。

㉝张利洁、赵福生、孙淑云等:《北京琉璃河燕国墓地出土铜器的成分和金相研究》,《文物》2005 年第 6 期。

㉞李延祥、李丽辉、董利军等:《内蒙古林西县井沟子西区出土青铜器的铅同位素分析》,《有色金属工程》2015 年第 4 期。

(责任编辑:周广明)