

分水岭东周墓地铜器材质、工艺及矿料特征的再认识

◆ 南普恒

◆ 贾 尧

(山西省考古研究院)

◆ 高振华

◆ 罗武干

(中国科学院大学人文学院考古学与人类学系)

摘 要:分水岭墓地 M269 和 M270 是晋文化墓葬中重要的春秋中期墓葬。通过金相组织观察、合金成分分析、铸造工艺考察及铅同位素比值分析对 M269、M270、M26 及 M229 部分铜器的金相组织、合金成分及铅同位素比值进行了科学分析。同时,结合以往研究,进一步探讨了分水岭墓地铜器的材质工艺和铅料来源。研究结果表明,出土铜器主要为铅锡青铜合金以分铸法铸造成型,纹饰制作以模印法为主;铜器生产所用铅料均为普通铅,铅料来源在春秋中期发生显著变化,其原因应与侯马铸铜作坊的兴起和发展关系密切。

关键词: 分水岭墓地;材质工艺;矿料来源;春秋中期

Abstract: The M269 and M270 in Fenshuiling Cemetery are important tombs of Jin Culture in the middle Spring and Autumn Period. The metallographic structure, alloy composition and lead isotope ratio of partial bronzes in M269, M270, M26 and M229 were analyzed by metallographic observation, alloy composition analysis, casting process investigation and lead isotope ratio analysis. Meanwhile, Combined with previous research results, the material technology and lead source of bronzes in the Fenshuiling Cemetery were further discussed. The results show that the bronzes are mainly made of lead-tin bronze alloy by casting method, and the decoration processing is mainly made by Stamping Mold. Lead materials used in bronzes production are ordinary lead, and the source of lead materials has changed significantly in the middle of spring and autumn. And the reason should be closely related to the rise and development of Houma bronzes Workshop.

Key Words: Fenshuiling cemetery; Material Craft; Mineral provenance; The middle spring and autumn period

分水岭墓地位于山西省长治市北城墙外,墓地范围东西长约 2、南北宽约 0.75 千米。20 世纪 50~70 年代对该墓地进行了多次钻探和发掘,发现墓葬 550 余座,清理墓葬 270 余座,时代从春秋中期延续至战国中晚期,出土铜容器、兵器、乐器、车马器及杂器等 1985 件,为研究东周时期墓葬制度、文化特征提供了重要资料^①。

2009 年,韩炳华、崔剑锋曾对分水岭墓地 59 件东周铜容器、乐器、兵器、车马器等金相组织、合金成

分及 19 件铜器的铅同位素比值进行了科学分析,并就制作技术和矿料来源进行了研究,取得一些重要认识和收获^②。本文在以往研究基础上,对分水岭墓地春秋中期墓葬 M269、M270 及战国早期墓葬 M26 和 M229 部分铜器取样进行了金相组织、合金成分、铸造工艺及铅同位素比值分析,同时结合以往科学分析数据进一步探讨了该墓地铜器材质、工艺及矿料来源特征。

一、样品描述

分水岭墓地年代为春秋中期至战国中晚期,以往科学分析铜器主要为战国时期,春秋时期铜器仅有铜鼎 M269:9 一件。M269 和 M270 是分水岭墓地重要的春秋中期墓葬,出土铜器对进一步认识东周时期社会变革及春秋中晚期晋国铜器风格变化、技术演进及晋系风格铜器形成均具有重要意义。本次取样分析铜器包括 4 座墓葬的 7 件铜器,其中 M26 铜鼎 2 件、M229 铜鼎 1 件、M270 铜壶 2 件、M269 编钟 2 件。其中,M26、M229 均为战国早期墓葬。另外,取样时遵循最小干预原则,取样位置也尽可能选择铜器残损之处或底部铸缝。

二、分析方法

金相组织观察:按照金相样品制备要求对采集样品制样,使用 OLYMPUS BX41M 型金相显微镜对 7 件铜器样品金相显微组织观察和拍照。

合金成分分析:将完成金相组织鉴定样品重新抛光,使用 EDAX Orbis Micro 型 X 射线荧光能谱仪(ED-XRF)对 7 件铜器样品进行合金成分分析。考虑到样品腐蚀和成分偏析,分析时选择 3 个不同区

域检测,取平均值作为最终检测结果。实验条件:铯靶,激发电压 40 kV,电流 300~800 μ A,CPS12000 左右,有效时间 100s,死时间 30%以内,测试光斑 300 μ m、1mm 及 2mm,无标样基本参数法。

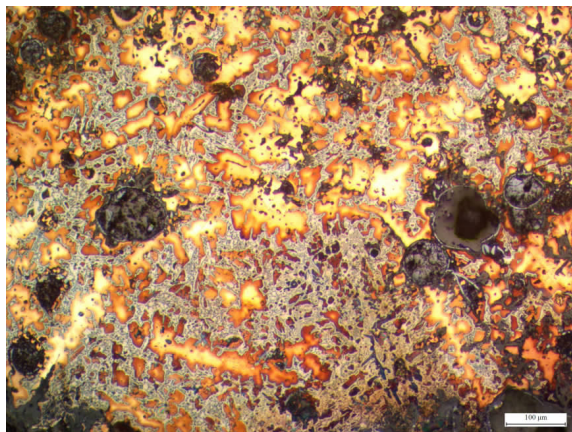
铸造工艺考察:使用肉眼观察和记录 7 件铜器表面合范范线、浇冒口、芯撑孔、铜芯撑、不同部位叠压关系、补铸痕迹等范铸特征,对铸型分范、铸造方式、芯撑设置、连接方式等进行判断和复原。

铅同位素分析:溶样后,使用 VG-Elemental 型多接收电感耦合等离子体质谱仪(MC-ICP-MS)对 6 件铜器样品进行铅同位素比值分析。测试过程中,使用国际铅同位素标准溶液 NBS 981 对仪器进行外部校正,每测试 2 或 3 个样品即测试一次 NBS 981。 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 和 $^{208}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 比值误差低于 0.05%。

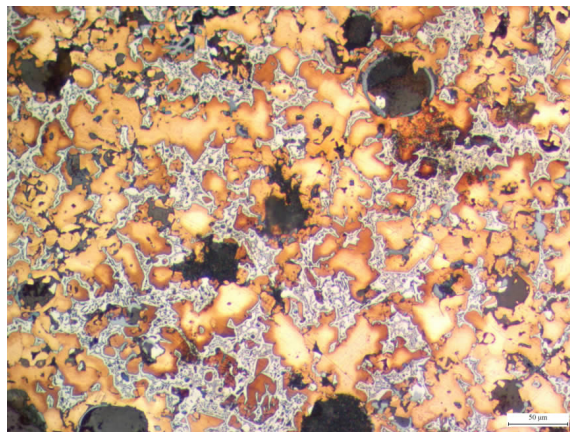
三、分析结果

1. 金相组织

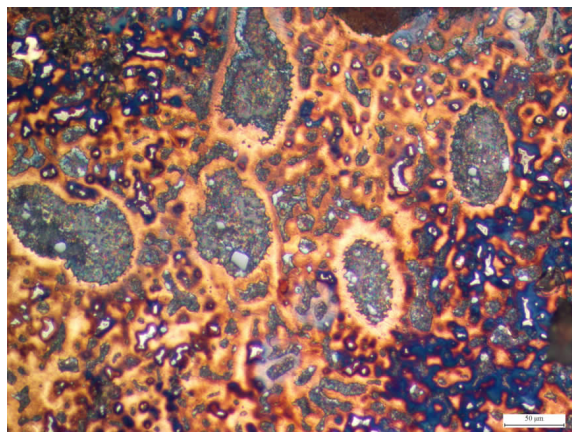
金相组织观察显示,本次检测的 7 件铜器均为铸造成型,金相组织基本特征是 α 固溶体树枝晶偏析,晶间分布较多($\alpha+\delta$)共析体,部分共析体连接成网状(图一~图二),表明锡含量较高。铅颗粒多呈不规则球状、椭球状、条状及小颗粒状分布(图三~图六)。其



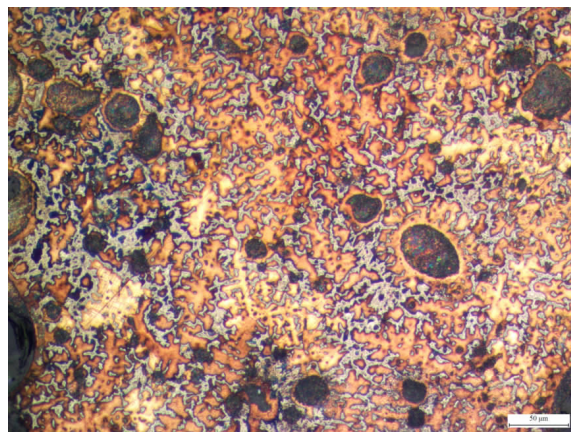
图一 铜鼎 M26:1 金相组织



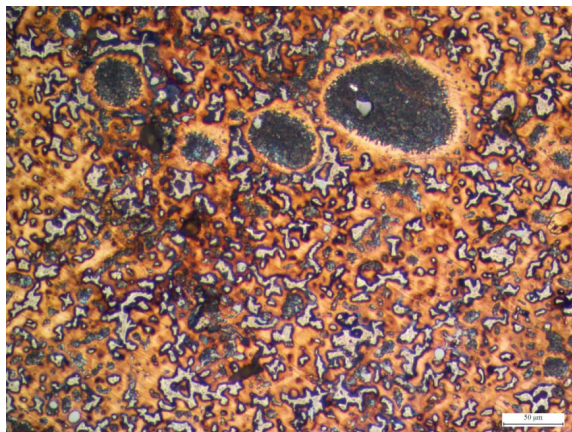
图二 铜鼎 M26:2 金相组织



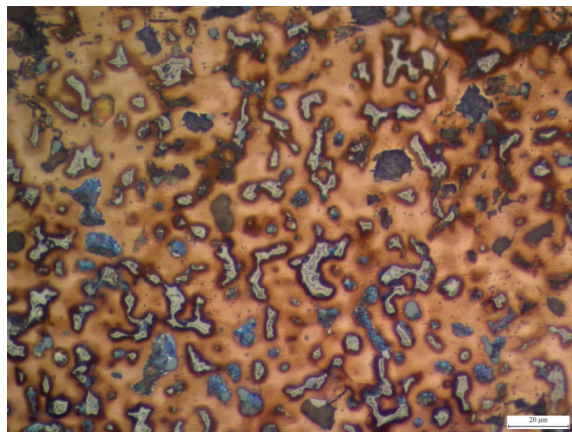
图三 铜鼎 M229:1 金相组织



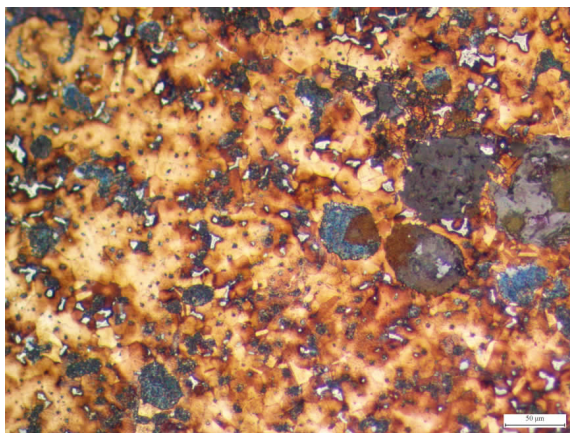
图四 铜壶 M270:16 金相组织



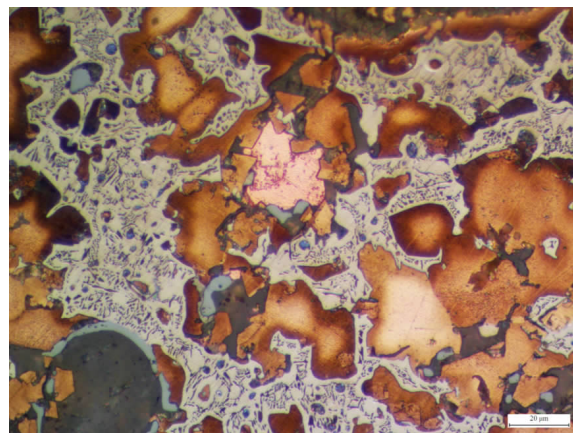
图五 铜编钟 M269:27 金相组织



图六 铜编钟 M269:34 金相组织



图七 铜壶 M270:15 金相组织



图八 铜鼎 M26:2 金相组织

中,铜壶 M270:15 金相组织较为特殊,为未完全退火的 α 固溶体和等轴晶组织,存在较多未完全熔解的 $(\alpha+\delta)$ 共析体(图七)。另外,铜鼎 M26:2 金相组织中存在少量小颗粒自由铜沉积(图八),其是一种较为常

见的腐蚀现象,也见于三门峡虢国墓地^③、隰县瓦窑坡墓地^④等铜器中,一般认为与合金腐蚀密切相关^⑤。详细情况见表一。

2. 合金成分

表一 分水岭东周墓地部分铜器金相组织鉴定结果

| 实验编号 | 器物编号 | 器物名称 | 采集部位 | 时代 | 金相组织 | 材质及制作方法 |
|------|---------|------|------|------|--|------------------|
| CF-1 | M26:1 | 铜鼎 | 底部 | 战国早期 | α 固溶体树枝晶偏析明显,晶间 $(\alpha+\delta)$ 共析体局部连接成网状,铅呈颗粒状、小颗粒状弥散分布。存在少量硫化物夹杂。 | 铸造 Cu-Sn-Pb |
| CF-2 | M26:2 | 铜鼎 | 底部 | 战国早期 | α 固溶体树枝晶偏析明显,晶间 $(\alpha+\delta)$ 共析体局部连接成网状,铅呈不规则小颗粒状分布。存在少量自有铜和硫化物夹杂。 | 铸造 Cu-Sn-Pb |
| CF-3 | M229:7 | 铜鼎 | 腹部 | 战国早期 | α 固溶体树枝晶偏析明显,晶间 $(\alpha+\delta)$ 共析体较细小,铅颗粒数量较多,呈颗粒状和较小条状分布。存在少量硫化物夹杂。 | 铸造 Cu-Sn-Pb |
| CF-4 | M270:15 | 铜壶 | 腹部 | 春秋中期 | α 固溶体偏析明显,局部为等轴晶,晶间部分未完全熔解的 $(\alpha+\delta)$ 共析体数量,铅颗粒数量较多,呈颗粒状分布。存在少量硫化物夹杂。 | 铸造退火 Cu-Sn-Pb |
| CF-5 | M270:16 | 铜壶 | 腹部 | 春秋中期 | α 固溶体树枝晶偏析明显,晶间 $(\alpha+\delta)$ 共析体局部连接成网状,铅呈颗粒状分布,较多球状铅颗粒。存在少量硫化物夹杂。 | 铸造 Cu-Sn-Pb |
| CF-6 | M269:27 | 钮钟 | 底部 | 春秋中期 | α 固溶体树枝晶偏析明显,晶间较多 $(\alpha+\delta)$ 共析体,铅呈颗粒状分布,较多球状铅颗粒。存在少量硫化物夹杂。 | 铸造 Cu-Sn-Pb |
| CF-7 | M269:34 | 钮钟 | 底部 | 春秋中期 | α 固溶体树枝晶偏析明显,晶间 $(\alpha+\delta)$ 共析体较细小,铅呈小颗粒状弥散分布。存在少量硫化物夹杂。 | 铸造 Cu-Sn-Pb |

表二 长治分水岭墓地部分铜器 ED-XRF 合金成分分析结果 (wt%)

| 实验编号 | 器物编号 | 器物名称 | Cu | Sn | Pb | Fe | S | 材质 |
|------|---------|------|------|------|------|-----|-----|------|
| CF-1 | M26:1 | 铜鼎 | 74.9 | 19.6 | 4.0 | 0.7 | 0.7 | 铅锡青铜 |
| CF-2 | M26:2 | 铜鼎 | 74.1 | 18.6 | 5.6 | 0.9 | 0.9 | 铅锡青铜 |
| CF-3 | M229:7 | 铜鼎 | 73.7 | 11.6 | 14.1 | 0.1 | 0.6 | 铅锡青铜 |
| CF-4 | M270:15 | 铜壶 | 71.7 | 13.8 | 13.6 | 0.1 | 0.8 | 铅锡青铜 |
| CF-5 | M270:16 | 铜壶 | 66.9 | 18.2 | 14.1 | 0.1 | 0.7 | 铅锡青铜 |
| CF-6 | M269:27 | 铜钮钟 | 71.1 | 15.7 | 12.3 | 0.1 | 0.8 | 铅锡青铜 |
| CF-7 | M269:34 | 铜钮钟 | 79.2 | 13.6 | 6.3 | 0.1 | 0.8 | 铅锡青铜 |

成分分析显示(表二),7件铜器均为铅锡青铜材质,锡含量 11.6%~19.6%,铅含量 4.5%~14.1%。其中, M26 两件铜鼎较为特别,较之其他铜器,高锡低铅的成分特征较为显著。

3. 铸造工艺

无盖铜鼎 M26:1 体量较大,形制特别,沿耳外撇,弧腹外鼓,足呈蹄形,底部略圆,口沿饰螭首四个,两耳内外均饰蟠螭纹,外腹满饰蟠螭纹与垂叶纹。两沿耳均分铸后与器身铸接,内腹相接处可见三角形加强筋(图九)。器身三分外范,外腹有三条垂直

范线贯通沿底,并与器底圆形范线相接。口沿四个螭首和三蹄形足分铸后与器腹铸接,近器腹处可见清晰的微包裹痕迹(图一〇)。沿耳和外腹纹饰均为模印法制作,纹饰带中可见较多纹饰范错范痕迹(图一一~图一二)。

铜盖鼎 M229:7。器盖弧形略鼓,上有三环钮。器身圆鼓,圆角方形附耳略外撇,底部近平,下承三蹄足。盖、腹均饰蟠螭纹。附耳、蹄足均分铸后与器身铸接,近器身处均可见微包裹痕迹(图一三~图一四)。器身铸型两分外范,外腹两条垂直范线贯通口沿和



图九 铜鼎 M26:1 沿耳分铸铸接



图一〇 铜鼎 M26:1 器足分铸铸接



图一一 铜鼎 M26:1 沿耳模印法纹饰



图一二 铜鼎 M26:1 螭首分铸铸接与螭首铸接



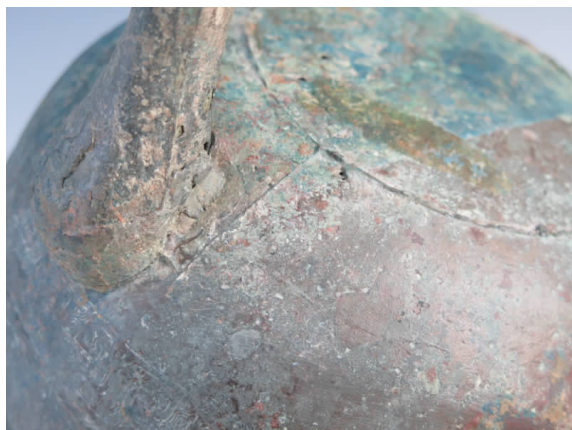
图一三 铜鼎 M229:7 沿耳分铸铸接



图一四 铜鼎 M229:7 器足分铸铸接



图一五 铜鼎 M229:7 器腹两分外范



图一六 铜鼎 M229:7 外腹范线

器底圆形范线(图一五~图一六)。盖钮对开分型,横向分范。器足两侧可见竖直范线,对开分型。因纹饰带锈蚀严重,是否使用模印法不详。

铜钮钟 M269:20、M269:24 及 M269:27 形制纹饰相同,大小相次,铸型均对开分型,浑铸而成。舞部可见长方形芯撑孔,内腹可见较多残留泥芯。钲间篆带和两鼓面饰内填云纹蟠虺纹,单元纹饰范痕迹清晰(图一七~图一八),均为模印法制作。

铜方壶 M270:15、M270:16 形制相同,颈部附有双耳,仰莲瓣盖,内填蟠虺纹,颈腹部饰三周蟠虺纹,并以宽带相间。莲瓣与器盖分铸铸接,相接处可见清晰的微包裹痕迹。器身铸型四分外范,并于颈部水平分范,分为上下两部分。内腹颈部可见一道凸棱(图一九),外腹对应部位也可见凸于器表的金属条带(图二〇)。颈腹部蟠虺纹均为模印法制作,纹饰带中单元纹饰范拼接痕迹清晰(图二一)。颈部两耳缺失,



图一七 铜钮钟 M269:20 篆带纹饰错范痕迹



图一八 铜钮钟 M269:27 舞部纹饰错范痕迹



图一九 铜方壶 M270:15 内腹颈部凸棱



图二〇 铜方壶 M270:15 内腹凸棱对应金属带



图二一 铜方壶 M270:15 器腹纹饰错范痕迹



图二二 铜方壶 M270:16 器耳钎焊焊料痕迹

表三 长治分水岭墓地部分青铜器铅同位素比值分析结果

| 样品编号 | 器物编号 | 器物名称 | $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ | $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ | $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ | $^{208}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ | $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ |
|------|---------|------|-----------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|
| CF1 | M26:1 | 铜鼎 | 38.183 | 15.531 | 17.568 | 2.1734 | 0.8840 |
| CF3 | M229:7 | 铜鼎 | 37.824 | 15.515 | 17.492 | 2.1623 | 0.8870 |
| CF4 | M270:15 | 铜壶 | 37.855 | 15.522 | 17.533 | 2.1591 | 0.8853 |
| CF5 | M270:16 | 铜壶 | 37.881 | 15.522 | 17.538 | 2.1599 | 0.8850 |
| CF6 | M269:27 | 编钟 | 38.014 | 15.539 | 17.714 | 2.1459 | 0.8772 |
| CF7 | M269:34 | 编钟 | 38.048 | 15.550 | 17.775 | 2.1405 | 0.8748 |

对应器腹残留少量灰白色焊料(图二二),说明应为钎焊连接。另外,外腹可见较多不规则方形或长方形垫片。

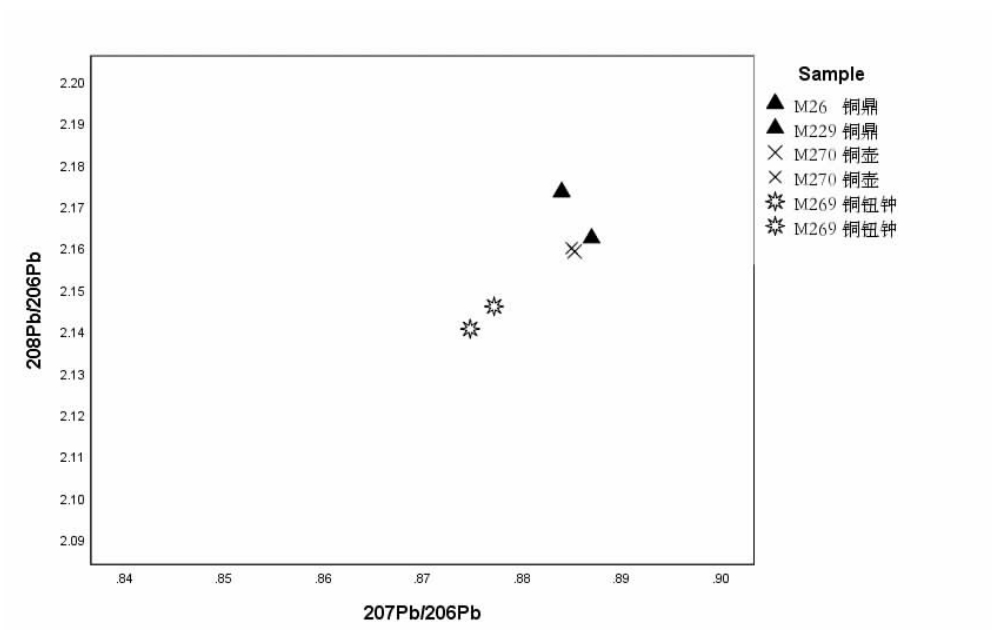
4. 铅同位素比值

铅同位素比值分析显示(表三),6件样品均是 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}>0.84$ 的普通铅,其中 $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 数值范围为37.8240~38.1833, $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 数值范围为15.515~15.550, $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 数值范围为17.492~17.775, $^{208}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 数值范围为2.1405~2.1734, $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 数值范围为0.8748~0.8870。铅同位素比值分布散点图详见图二三。

四、相关讨论

1. 材质工艺

金相组织观察和合金成分分析结果显示,本次分析的7件分水岭墓地铜器均使用铅锡青铜铸造而成,铜容器、乐器的高锡合金特征(11.6%~19.5%)与以往分析结果基本一致,铅含量波动范围也仍然较大(4.0%~14.1%)。需要说明的是,ED-XRF分析结果显示铜鼎M26:1为含锡19.6%、含铅4.0%的铅锡青铜,与以往ICP-AES分析结果(含锡15.8%、含铅14.5%)存在一定差异。其原因有两个方面,一是分析方法不同导致的测量误差,二是采集样品的腐蚀程

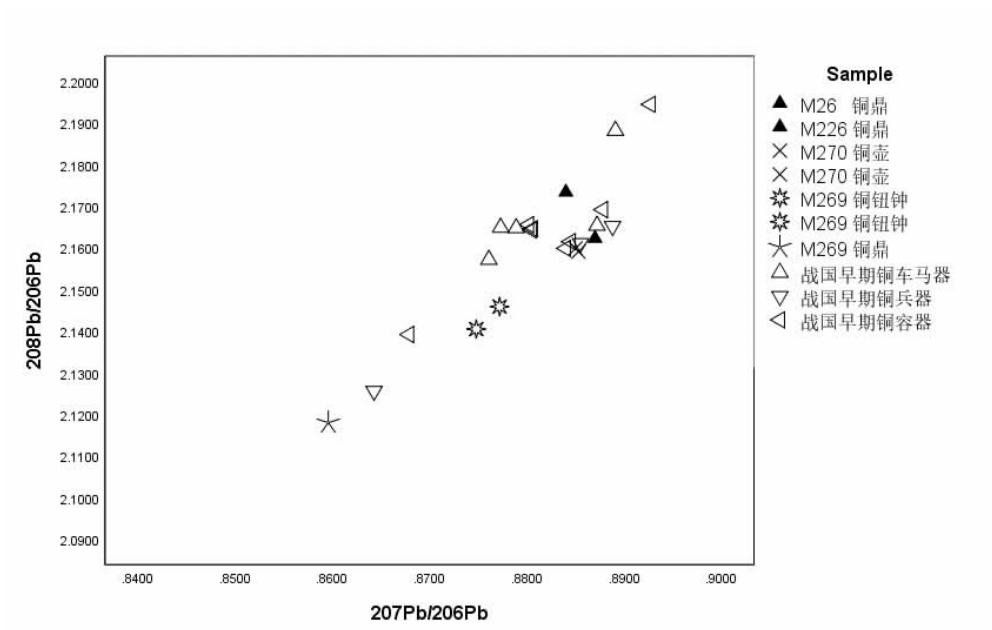


图二三 长治分水岭墓地部分青铜器铅同位素比值分布散点图

度不同和铅的不均匀分布，但两种方法对铜鼎高锡铅锡青铜材质的分析结果却是一致的。

从铸造工艺角度看，春秋中期墓葬 M269 出土三件铜钮钟均为浑铸法范铸而成，并在舞部设置泥芯撑，未发现使用垫片痕迹。春秋中期墓葬 M270 出土两件铜壶和战国早期墓葬 M26、M229 出土三件铜鼎均为分铸法范铸而成，其器盖莲瓣、耳、足及螭首等附件均提前分铸，待浇铸主体器身时再将其嵌入器身铸型铸接或钎焊连接。另外，铜器多数纹饰带中发现模印法形成的单元纹饰范错范痕迹，说明使用模印法制作纹饰已广泛应用于铜容器、乐器等器类的纹饰制作。

整体来看，分水岭墓地 M269、M270 铜钮钟、铜壶的合金材质和成型方法、分范方式及器盖莲瓣连接方式等工艺技术特征与隰县瓦窑坡墓地春秋中期墓葬 M29、M30 铜钮钟、铜壶^⑥相似，表明年代也应相去不远。需要指出的是，分水岭墓地 M270 器耳与器身主体钎焊连接，腹部纹饰使用模印法制作，而瓦窑坡墓地 M30 铜壶器耳与器身主体铸销连接，腹部纹饰未见模印法使用痕迹。再者，M269 三件编钟篆带纹饰均使用了模印法，而瓦窑坡 M29、M30 铜钮钟仅发现一件鼓部纹饰使用了模印法。以往研究表明，春秋时期晋国铜器生产具有较为明确的技术演进，技术简化趋向极为明显，分铸法、钎焊连接、垫片使用



图二四 长治分水岭东周墓地青铜器铅同位素比值分布散点图

及模印法逐渐成为主流工艺,促使此时期铜器生产朝着分工化和批量化方向发展^⑦。仅就技术演进而言,M269、M270年代应略晚于瓦窑坡墓地M29、M30。

另外,铜鼎M26:1也值得关注,较之分水岭墓地战国早期其他铜鼎,形制风格和工艺技术较为特殊。无盖、沿耳及口沿螭首等均非战国时期铜鼎流行样式风格,而属于春秋中期之前铜鼎风格特点。但其沿耳、螭首、蹄足均与器身主体分铸铸接,沿耳、腹部蟠螭纹均采用模印法制作的工艺特点却与此时期其他铜容器基本一致。不难看出,此件铜鼎是使用当时铜器范铸技术对早期铜鼎的仿制。此类仿古之器在三晋两周地区春秋中期晚段至战国中期墓葬中经常出现,部分另配有铜簋、方壶或方座铜豆等,均为仿制西周晚期至春秋早期同类器物,具有一定的身份象征意义^⑧。

2. 铅料来源

铅同位素比值分析是目前铜器矿料溯源的重要手段,广泛应用于商周铜器矿料来源和产地研究。一般而言,铅青铜或铅锡青铜材质铜器的铅同位素比值反映的是其铅料来源信息^⑨,而锡青铜材质铜器铅同位素比值反映的则是其铜料和锡料所含杂质铅的同位素比值混合^⑩,但由于锡矿石所含杂质铅较少,对铜器铅同位素数据影响也较小,更多指征的是铜料来源信息^⑪。

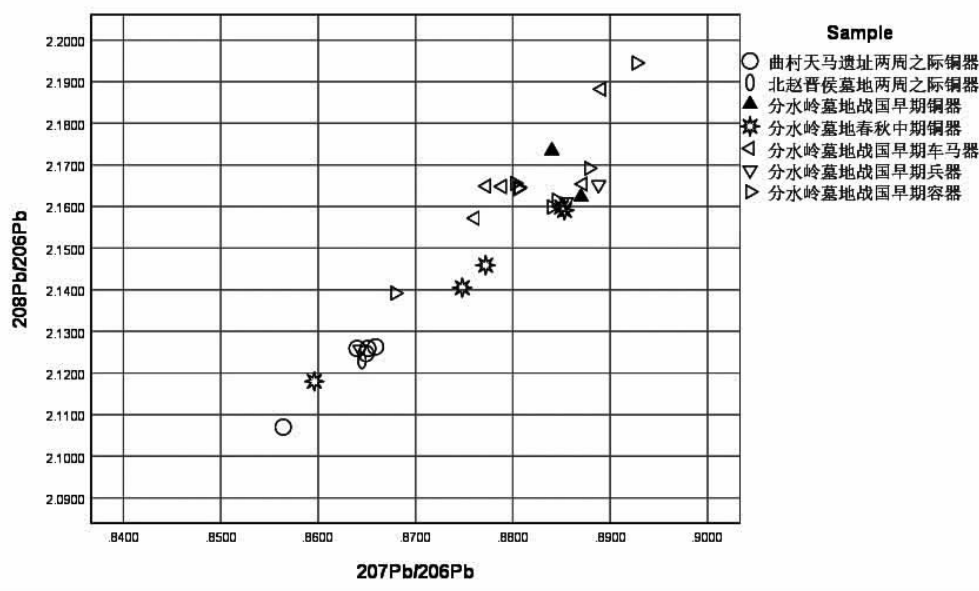
成分分析显示,长治分水岭东周墓地铜器合金材质主要为铅锡青铜,因而其铅同位素比值主要表征铅料信息。综合本次分析结果和以往研究数据^⑫,不难看出,分水岭墓地铜器主要分布在两个区域(图二四),其中春秋中期墓葬M269铜钮钟、铜鼎主要聚集于2.11~2.15(²⁰⁸Pb/²⁰⁶Pb),春秋中期墓葬M270铜壶

和M26、M229等战国早期铜器主要聚集于2.15~2.20(²⁰⁸Pb/²⁰⁶Pb),表明分水岭墓地春秋中期墓葬和战国早期墓葬铜器使用了不同来源铅料,其铜器铅料来源在春秋中期时发生转变。另外,M269铜钮钟、M270铜壶铅同位素比值均各自聚集,特征近似,分别为同批次生产的可能性极大。

需要特别指出的是,春秋中期墓葬M270两件铜壶分布于M26等战国早期墓葬铜器铅同位素比值数据范围之内,却距离M269铜钮钟和铜鼎较远。战国早期墓葬部分铜兵器和铜容器也分布于春秋中期墓葬M269的铅同位素比值范围之内,距离M26等战国早期墓葬铜器较远。其原因,一方面后期铜器生产所用铅料对前期铅料有所承继,另一方面可能存在晚期铜器生产时对部分早期铜器回收重铸的情况。

同一地域不同时期铜器的铅同位素比值特征能够反映这一地域一定时期铜器生产所用铅料供应的变迁和变化。东周时期,除长治分水岭墓地外,曲沃北赵晋侯墓地两周之际铜器^⑬和天马-曲村遗址曲村北墓地两周之际铜器^⑭也均进行过铅同位素比值分析。为了解东周时期晋国铜器所用铅料来源变化,将此三处墓地出土两周之际、春秋中期及战国早期铅锡青铜或铅青铜材质铜器的铅同位素比值数据与本文所分析的长治分水岭墓地春秋中期和战国早期铜器铅同位素比值数据进行了综合分析。

从铅同位素比值散点图(图二五)可以看出:曲村天马遗址和北赵晋侯墓地两周之际铜器数据多位于2.10~2.13(²⁰⁸Pb/²⁰⁶Pb),分水岭墓地M26等战国墓葬铜器数据多位于2.15~2.20(²⁰⁸Pb/²⁰⁶Pb),两者数据特征具有较大不同。另外,分水岭墓地春秋中期墓葬M270铜壶与战国早期墓葬铜器聚集,但M269铜钮钟和铜鼎则分别与战国早期和两周之际铜器接近,



图二五 晋国东周墓葬出土青铜器铅同位素比值分布散点图

特征近似。不难看出,分水岭墓地春秋中期墓葬 M269 和 M270 铜器铅料来源较为复杂,即使用了大量用于早期的铅料,又使用了即将大量用于晚期的铅料,显示出过渡阶段的显著特征。从另一个角度来看,这也意味着春秋时期铜器生产使用的铅料来源发生了变化。

李夏廷等认为分水岭墓地 M269、M270 时代为春秋中期晚段, M126、M127 时代为春秋晚期, M14、M26 时代为春秋战国之际,出土铜器造型和纹饰均见于侯马铸铜遗址各段陶范^⑤,可见分水岭墓地铜器已进入侯马铸铜作坊时期,主要为侯马铸铜作坊生产。晋都新田之后,随着侯马铸铜作坊的兴起及发展,晋国青铜文化和艺术风格也在此时期发生转变,逐渐形成了地域特色鲜明的晋系风格铜器。由此可见,分水岭墓地铜器显示的春秋中期铅料来源变化很可能与侯马铸铜作坊的兴起和发展密切相关。

另外,关于分水岭墓地铜器铅料的具体来源,崔剑锋等已有详细论述^⑥,在此不再赘述。

五、结语

综合以上分析,可以得到以下认识:分水岭墓地春秋中期墓葬 M269、M270 铜器合金材质主要为铅锡青铜,与墓地战国早期铜器合金材质和成分特征基本一致。铜器主要成型工艺为分铸法铸造成型,部分器物局部铸后受热退火,应为实用器。模印法大量应用于铜容器和铜钮钟纹饰制作,并成为主要纹饰制作方法。铜器所用铅料均为普通铅,且春秋中期墓葬和战国早期墓葬铜器各自主要分布于不同区域,表明不同时期墓葬铜器具有不同的矿料来源。同时,也说明春秋中期,晋国铜器生产所用铅料均发生较为显著的来源变迁,且金属物料供应体系具有一定承继关系。另外,铅料来源变迁,与晋国侯马铸铜作坊的兴起和发展关系密切。

致谢:本文得到国家社科基金重大项目(17ZDA219),山西省青年拔尖人才支持计划(第七批)及山西省青铜器修复保护技术开发实验室运行补贴项目(2019)共同资助,谨致谢忱。

注释:

① a. 山西省考古研究所、山西博物院、长治市博物馆:《长治分水岭东周墓地》,第 370~373 页,文物出版社,2010 年; b. 李夏廷、李建生:《也谈长治分水岭东周墓地》,《中国国家博物馆馆刊》2012 年第 3 期。

② a. 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; b. 崔剑锋、韩炳华、金志斌等:《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、山西博物院、长治市博物馆:

《长治分水岭东周墓地》,第 386~391 页,文物出版社,2010 年。

③ 魏强兵、王鑫光、李秀辉等:《三门峡虢国墓地出土青铜器的材质与矿料来源分析》,《有色金属(冶炼部分)》2019 年第 1 期。

④ 南普恒、王晓毅、潜伟:《山西隰县瓦窑坡墓地 M23 出土铜器的技术特征及相关问题》,《中原文物》2019 年第 1 期。

⑤ a. HANSON D, DELL-WAPOLE W T. Chill-Cast Tin Bronzes. London: Edward Arnold & Co, 1951: 242-243; b. 贾莹、苏荣誉、华觉明等:《腐蚀青铜器中纯铜晶粒形成机理的初步研究》,《文物保护与考古科学》1999 年第 2 期。

⑥ 南普恒、王晓毅、潜伟等:《瓦窑坡墓地 M29、M30 出土铜器的技术特征及相关问题》,山西省考古研究所等:《山西隰县瓦窑坡墓地的两座春秋时期墓葬》,《考古》2017 年第 5 期。

⑦ 南普恒:《春秋时期晋国青铜器制作技术研究》,第 57~70 页,北京科技大学博士学位论文,2018 年。

⑧ 张亮、滕铭予:《中原地区东周铜器墓中的仿古器物》,《文物》2017 年第 7 期。

⑨ Noel H. Gale, Zofia Stos-Gale. Lead Isotope Analyses Applied to Provenance Studies, Modern Analytical Methods in Art and Archaeology, New York: John Wiley & Sons, Inc., 2000, pp503-584.

⑩ a. Pernicka E, Begemann F, Schmitt-Strecker S, et al. On the composition and provenance of metal objects from Poliochni on Lemnos [J]. Oxford Journal of Archaeology, 1990. 9: 263-298.; b. Gale NH, Stos-Gale ZA. Bronze Age copper sources in the Mediterranean: a new approach [J]. Science, 1982. 216: 11-19.

⑪ 金正耀:《铅同位素示踪方法应用于考古研究的进展》,《地球学报》2003 年第 6 期。

⑫ 崔剑锋、韩炳华、金志斌等:《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、山西博物院、长治市博物馆:《长治分水岭东周墓地》,第 386~391 页,文物出版社,2010 年。

⑬ 杨颖亮:《晋侯墓地出土青铜器的合金成分、显微结构和铅同位素比值研究》,北京大学硕士学位论文,2005 年。

⑭ 金正耀、W.T. Chase、平尾良光等:《天马-曲村遗址西周墓地青铜器的铅同位素比值研究》,北京大学考古学系商周组、山西省考古研究所:《天马-曲村(1980~1989)》,第 1174~1175 页,科学出版社,2000 年。

⑮ a. 李夏廷、李建生:《也谈长治分水岭东周墓地》,《中国国家博物馆馆刊》2012 年第 3 期; b. 杨建军:《三晋东周铜器墓初论》,《中原文物》2005 年第 3 期。

⑯ 崔剑锋、韩炳华、金志斌等:《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、山西博物院、长治市博物馆:《长治分水岭东周墓地》,第 386~391 页,文物出版社,2010 年。

(责任编辑:周广明)