

A Review of Archaeometallurgical Research on the Copper Ore Belt of the Middle and Lower Reaches of the Yangtze River in the Pre-Qin Period

综论长江中下游铜矿带先秦矿冶考古

刘海峰 梅皓天 Liu Haifeng & Mei Haotian

南京信息工程大学文化遗产科学认知与保护研究基地, 南京, 210044

白国柱 Bai Guozhu

河北师范大学历史文化学院, 石家庄, 050024

陈建立 Chen Jianli

北京大学考古文博学院, 北京, 100871

内容提要:

梳理长江中下游铜矿带先秦时期铜矿冶考古研究可见,目前在矿冶遗址调查与发掘、采矿技术、冶炼技术、合金技术、铸造技术、矿料来源、青铜文化交流等领域,已展开过充分探讨,形成一系列重要成果。在采矿技术方面,出现了碗口式、榫卯式等多种井巷支护技术,并呈现出一定的时代、区域特征;在冶铸技术方面,三种冶炼技术并存,至迟在西周中晚期出现冰铜冶炼技术,普遍存在本土冶铸,形成了不同的区域特征;在铜料流通、文化交流等方面,从多种分析结果出发,发现存在多个铜料流通目的地,在商周青铜文明发展中起到重要作用。但目前的研究仍存在区域失衡、对象单一、对技术与资源的关系以及技术适应性关注较少等问题,对冶铸技术起源及资源流通问题也存在较多空白,因而长江中下游铜矿带矿冶考古研究,仍需要更多的技术研究与综合研究。

关键词:

先秦 长江中下游 铜矿带 矿冶 青铜冶铸

Abstract: In the field of mining and metallurgy research of the copper ore belt in the middle and lower reaches of the Yangtze River, many aspects have been fully discussed and formed a series of important results. It is believed that the earliest mining activity in the middle and lower Yangtze River occurred in the late Neolithic period. As for mining technology, there are many kinds of roadway support techniques, such as Bowl type and Mortise-Tenon type, which have exhibited certain characteristics of the time and region. For the smelting and casting technology, three kinds of smelting technologies coexisted; the ice copper smelting technology appeared no later than in the late Western Zhou dynasty, and local metallurgy was prevalent at that time. In the aspects of the circulation of copper materials and cultural exchange, there were multiple copper transmission destinations, which have played an important role in the development of the Shang and Zhou Bronze civilization. Further researches are needed in metallurgy of more areas and objects, as well as in the relationship between technology, resources and cultures.

Key Words: Pre-Qin period; the middle and lower reaches of the Yangtze River; copper ore belt; metallurgy; bronze technology

先秦时期长江中下游铜矿带铜矿资源已被频繁开发和利用。近年来,在湖北、江西、安徽、湖南、江苏一带兴起了对先秦时期矿冶遗址的调查、发掘和研究工作,揭示了当时当地的矿冶技术,研究发现,以上区域是商周王朝重要的矿料来源^[1],为商周青铜文明的发展提供了重要的物质基础,因而长江中下游铜矿带矿冶考古是青铜时代考古、冶金史研究中的重要课题。本文着眼于概述长江中下游铜矿带矿冶遗址调查与发掘、采矿技术研究、冶金技术研究等内容,通过回顾过往研究,爬梳长江中下游铜矿带矿冶考古的研究现状和问题,为今后的工作提供一定的参考。

一 长江中下游铜矿带先秦矿冶遗址的分布

我国的铜矿资源分布相对集中,而在长江中下游铜矿带、川滇铜矿带、中条山矿区和甘肃白银—金川矿区四大矿区中,长江中下游铜矿带居首位,矿区内富含铜、铁、钨、锡等资源,铜矿资源占我国的铜矿总储量的16.4%^[2]。地质研究表明,长江中下游铜矿带主要集中于鄂东南、赣北、皖南和宁镇一带。

丰富的矿产资源使该地区先秦时期存在大规模矿冶活动成为可能,通过多年的田野调查,目前长江中下游铜矿带上已确认的先秦矿冶遗址已达上百处(表一;图一)。

表一 长江中下游铜矿带先秦时期铜矿冶遗址^[3]

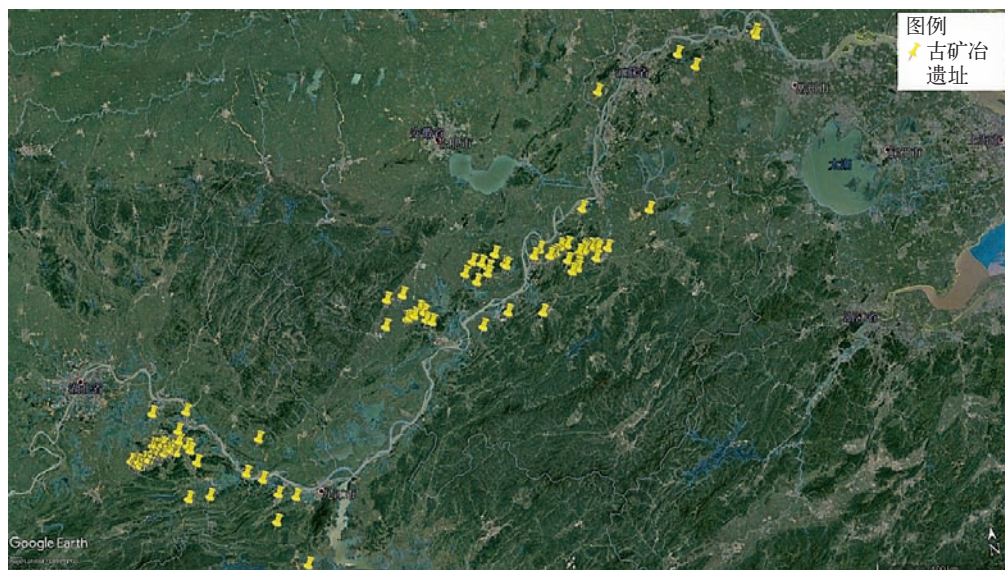
省份	年代	遗址
湖北	商周	木鱼墩遗址、王公林遗址、古塘墩遗址、郭华一遗址、眠羊地遗址、香炉山遗址、乌龟墩遗址、苦莲山遗址、大路铺遗址、张家墩遗址、铜绿山古铜矿遗址
	周代	张万山冶炼遗址、曹家嘴冶炼遗址、太子山遗址、狮子山遗址
	西周	叶家山遗址、大泉遗址、铁屎墩遗址、狮子挂铜岭遗址、港背遗址、李家湾遗址、下首岭遗址、葫芦山采矿遗址、土山遗址、泰兴垸遗址、铁墩包遗址、风住山遗址、铁世包遗址、石信林遗址
	东周	熊家垸遗址、土葬山遗址、中咀山遗址、岩阴山遗址、南东桥曹家湾遗址、陈儒后背山遗址、茅草山东坡遗址、王家湾遗址、青山小区遗址
湖北	时代不详	刘家咀矿冶遗址、铁铺垸冶炼遗址、枫桥村冶炼遗址、余元垸冶炼遗址、石井山冶炼遗址、燕窝山冶炼遗址、解家畈冶炼遗址、新屋冶炼遗址、靠背山冶炼遗址、山下王冶炼遗址、国和冶炼遗址、对面山冶炼遗址、下首山冶炼遗址、老屋卡冶炼遗址、邹界田冶炼遗址、尹家嘴冶炼遗址、烟包山冶炼遗址、瓦雪地冶炼遗址、彭家垸冶炼遗址、铁屎包冶炼遗址、王家后背山冶炼遗址、王家铺冶炼遗址、石头嘴冶炼遗址、罗家铺冶炼遗址、银屎背冶炼遗址、跳水下冶炼遗址、当明山冶炼遗址、化牛山冶炼遗址、陈咸春冶炼遗址、细屋山冶炼遗址、细金云冶炼遗址、夏林余冶炼遗址、李德贵后背山冶炼遗址、王祠冶炼遗址、铜子包冶炼遗址、何垸湾冶炼遗址、猴子山冶炼遗址、铁屎墩冶炼遗址、熊家坳冶炼遗址、港背湾冶炼遗址
江西	商周	思姑墩遗址、共青城龟山遗址、瑞昌檀树狙遗址、螺石口遗址、神墩遗址、荞麦岭遗址(商)
	商至春秋	铜岭矿冶遗址
安徽	商周	吴家墩遗址、小孤墩遗址、大孤墩遗址、唐形山遗址、沙包墩遗址、大墩子遗址、神墩遗址、竹园山遗址(小神墩遗址)、龟山遗址、大印顿遗址、汤家墩遗址、老林嘴遗址、黄老屋遗址、江古墩遗址、学墩遗址、三元观遗址、王家大墩遗址、朱相屋遗址、七星墩遗址、陈家山遗址、城河遗址、天宁寨遗址、师姑墩遗址

省份	年代	遗址
安徽	周代	小冲冶铜遗址、大冲冶铜遗址、金山冶铜遗址、岗巴垅冶铜遗址、余庄神墩遗址、金牛洞采铜遗址、木鱼山冶铜遗址、凤凰山古矿区、祖家墩遗址
	西周	象山小脚园遗址、船形山遗址、神墩庄遗址、江木冲冶铜遗址址、十字街遗址、鞠隐神墩遗址、牛形地遗址、夏家墩遗址(后四处遗址延续至春秋)
	春秋	冲口冶铜遗址、小乔村冶铜遗址、崔家涝冶铜遗址、江村冶铜遗址、录岭冶铜遗址、西边冲冶铜遗址、西湖采铜遗址、夏家柏冶铜遗址、冷水冲冶铜遗址、刘家井冶铜遗址、井边采铜遗址
	战国	铜山冶铜遗址、徐冲冶铜遗址、小村冶炼遗址
江苏	商周	点将台遗址、护国庵遗址、城头山遗址、牛头岗遗址
	西周至春秋	断山墩遗址、孙家村铸铜遗址、伏牛山铜矿遗址(春秋)

注:部分遗址年代跨度长,延续至明清时期,本文仅取其先秦时段统计。遗址多数未经发掘,未经详细年代分析,所推测年代跨度不一,仅给出大致年代范围,本文从之。遗址统计、名称上可能存在疏漏,特此说明。

长江中下游铜矿带鄂东南段先秦矿冶遗址主要分布在湖北黄石、大冶、阳新、鄂州一带,以大冶铜绿山遗址(以下简称铜绿山)知名度最高,遗址内炉渣总量超过40万吨,井巷总长近8000余米,铜产量巨大。近年来在铜绿山周边及鄂州地区的考古调查,对该地矿冶程序及采选矿技术有了进一步认识^[4]。此外,在湖北大冶四方塘还发现有铜绿山矿冶工匠的公用墓地,具有明显的等级制度,说明春秋中期楚国对铜绿山已有了严格的统治与经营^[5]。

长江中下游铜矿带赣北段先秦矿冶遗址主要分布在江西瑞昌,西接湖北阳新地区,瑞昌铜岭遗址(以下简称铜岭)为赣北段规模最大的铜矿冶遗址,与湖北铜绿山遗址、阳新港下遗址相距较近。出土坑木的¹⁴C年代数据显示其开采年代不晚于商,为长江中下游地区目



图一 长江中下游铜矿带先秦时期古矿冶遗址分布图

前所发现开采时间最早的遗址之一^[6]。

长江中下游铜矿带皖南段先秦矿冶遗址主要分布于安徽铜陵、南陵两地。铜陵地区大部分遗址中均能发现采坑、废石、井巷以及炼渣，各遗址的冶炼水平不一^[7]。南陵地区的采矿遗址多分布在高山的山腰处或低山地带，冶炼遗址或分布在采矿点附近，或分布在稍远于采矿点但水源充足的地区^[8]。

长江中下游铜矿带宁镇段所发现先秦矿冶遗址数量相对较少，年代也较晚，其早期铜矿的开采和利用状况最为模糊。以上考古发现表明，先秦时期长江中下游铜矿带已存在大范围的矿冶活动，逐渐成为中原铜矿料产地及加工地。目前已发现的长江中下游铜矿带先秦时期矿冶遗址主要集中于鄂东南、赣北和皖南段，时代上各地区最早开采和利用铜矿的时间普遍不晚于商，部分遗址可能早到二里头文化三、四期，但关于各地铜矿的最早开采时间仍有待深入研究，在各矿冶遗址持续时间问题上也需要进一步明确，以全面认识矿冶遗址的时空分布情况。

二 长江中下游铜矿带先秦采矿技术研究概况

探矿是开采的前提。早期探矿方法大致相似，存在用植物探矿、重砂探矿法和探矿工程法等多种探矿方法。商代以后探矿方法主要为两类，即重砂探矿法和探矿工程法。重砂探矿法多利用淘沙木勺、淘沙木盘等工具对软岩层矿物取样淘洗分析，根据碎屑物追寻矿物；探矿工程法则多在露天槽坑底部开凿探槽和探井，达到探矿与采矿并行的目的，是后期井巷开采重要的探矿方法^[9]。

矿石开采是矿冶活动的准备工序，主要包括露天开采和地下开采，由于山体内部矿石蕴藏量巨大，地下开采逐渐成为主要开采方式，但其难度相对较大，需综合考虑探采、支护、装载、提运、照明、排水、通风等问题。

随着工作效率的提高以及安全性的需求，采矿技术逐步发展，主要体现在工具的更新以及支护技术的提高等方面。关于长江中下游铜矿带铜矿的先秦开采技术，黎海超曾结合考古学文化对其展开综合研究^[10]。本文主要依据采矿技术的分类，对采矿工具和井巷支护技术的发展进行再总结，认为遗址间存在不同的技术发展脉络。

（一）采矿工具

矿石剥离方面，商代主要使用石质采矿工具，也出现了少量小件木柄铜工具。西周时期铜工具的种类和数量明显增多，但也多为小件。春秋时期铜工具重量明显增加，对矿石的开采冲击力显著提高，极大地提高了工作效率。战国时期采矿工具材质已由石质、铜质变为铁质，韧性有所提高；此时多人合作开采的现象大量出现，如铜绿山矿区一人高的开拓巷道逐步取代了以前的曲蹲式窄矮巷道，可见此时的采掘空间相较于前期已明显增大。

装载工具方面，由于木、竹材取料方便且质量较轻，被沿用于各时代。商代使用的木铲、木锹、木瓢、竹筐等在后期均有发现，但战国时因铁器的推广，木铲、木锹等铲装工具已被铁锄、铁耙等代替。

提运工具方面，早在商代，先人便已将力学原理应用在采矿工具上，如利用定滑轮原理使用木滑车、转向滑柱等工具提运矿石。西周时提运工具种类有所增多，除了木滑车之外还

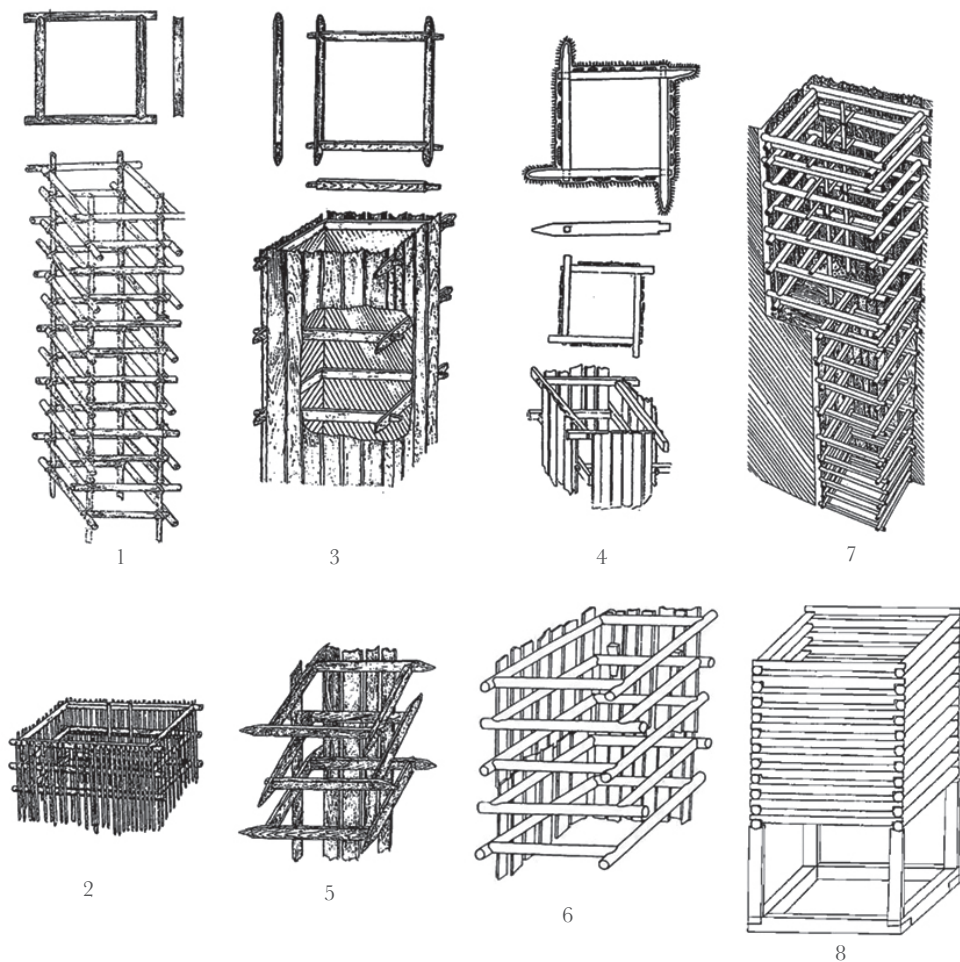
出现了桔槔、滑杆。东周时提运技术进一步发展，滑车出现了凹槽结构，可防止绳子滑动，绞车的应用可以在矿石提运中达到紧急制动的目的。

照明方面，早期多依赖手持火把，西周以后出现了移动式火把和固定式火把、油灯，照明能力有所提升。通风方面，使用井的高低差形成自然风，并封堵井下废井巷，保证风流畅通，还发明了通过人工井下烧火形成气压差达到通风目的之法。

(二) 井巷支护技术

良好的井巷支护结构是地下开采的安全保障。目前发现的支护技术主要分为碗口式支护技术、榫卯式支护技术、密集垛盘式支护技术及藤条式支护技术等，前两种支护技术在木框架与井巷壁之间需加设一层背板，以保护井壁。

铜岭竖井支护技术的特点为：商代采用碗口式支护技术，西周早中期采用榫卯式支护技术，西周晚期至春秋时期通用碗口式与榫卯式支护技术，稳定性有明显提高。战国时期



图二 先秦时期江西铜岭竖井支护技术^[11]

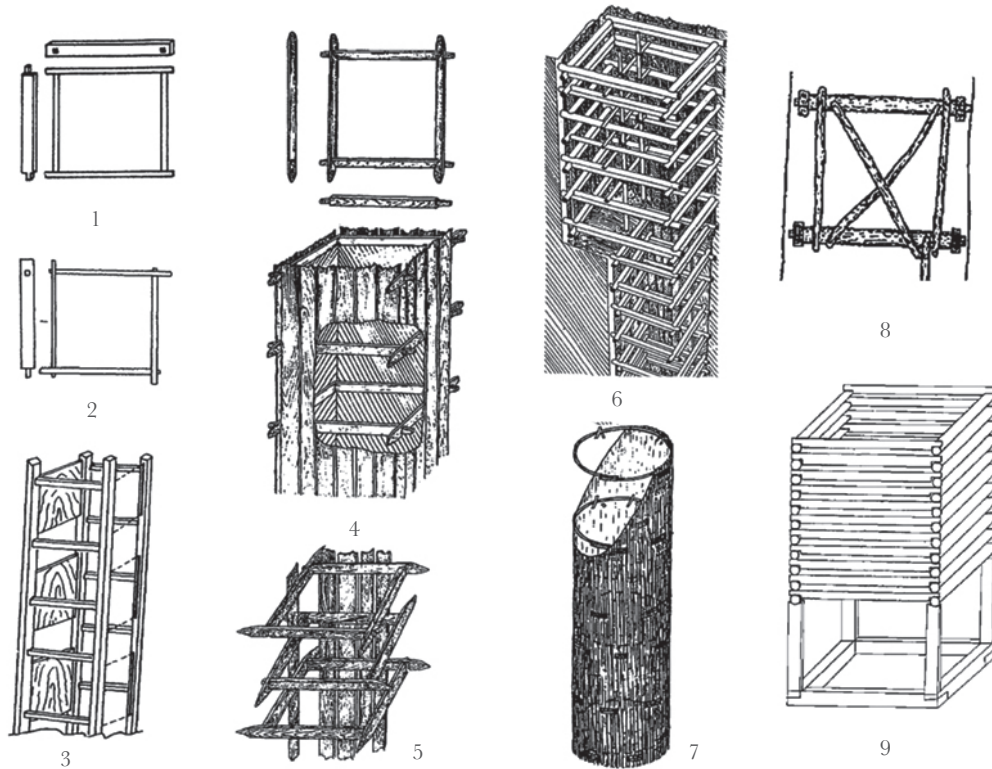
商代中期：1.同壁碗口接内撑式

商代晚期：2.同壁碗口内撑加强式

西周早中期：3.尖头透卯榫接内撑式 4.平头单透卯单榫串联套接式

西周晚期-春秋时期：5.剑状单透卯单榫串联套接式 6.交替碗口接内撑式 7.交替碗口接内撑加强式

战国时期：8.密集搭口垛盘式



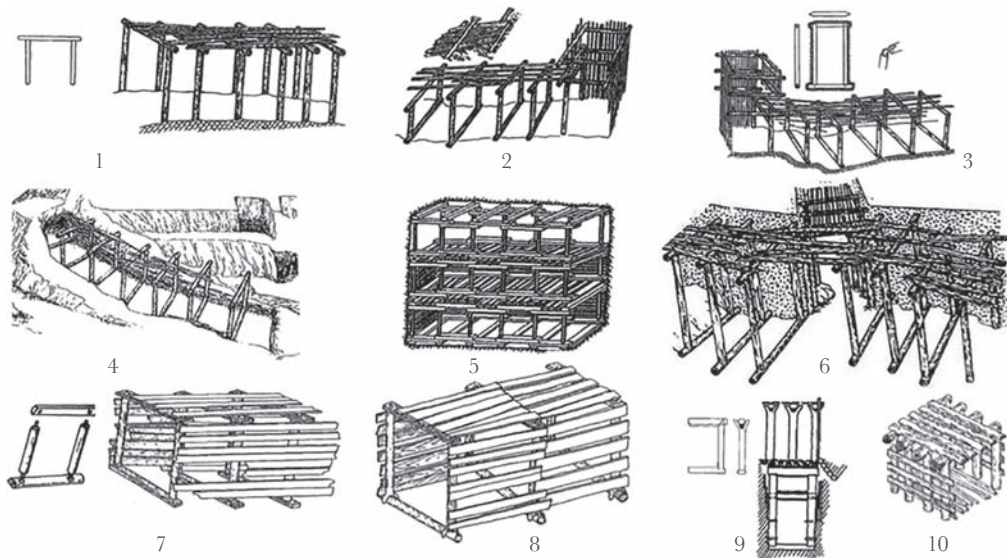
图三 先秦时期湖北铜绿山竖井支护技术^[12]

商代晚期: 1.平头透卯单榫内撑式 2.平头榫卯接串联式 3.柱卯内撑筒式

西周时期: 4.尖头透卯榫接内撑式 5.剑状单透卯单榫串联套接式 6.交替碗口接内撑加强式 7.藤条圈式

春秋时期: 8.榫卯内撑木棍式截面

春秋晚期-战国时期: 9.密集搭口垛盘式



图四 先秦时期江西、湖北、安徽平巷支护技术^[13]

江西铜岭: 1.商代中期-碗口接半框架式 2.商代中晚期-碗口接框架式 3.商代晚期-开口贯通榫接框架式

4.西周-圆周截肩单榫透卯接框架式 5.春秋-链式榫卯套接加强式 6.春秋-碗口接架厢式

湖北铜绿山: 7.商代晚期-圆角截肩单榫接框架式 8.西周-上榫卯下杈框架式 4.春秋-圆周截肩单榫透卯接框架式

5.春秋-链式榫卯套接加强式 9.战国-鸭嘴亲口排架式

安徽: 10.东周-南陵寺冲岭-碗口式结构

所使用的密集垛盘式支护技术在稳定性方面优于碗口式及榫卯式支护技术，也不需要背材保护井壁（图二）。铜绿山竖井支护技术特点为：商代晚期使用榫卯式支护技术，西周时期改善了榫卯式支护技术，并出现了藤条圈式支护技术。同时期阳新地区的交替碗口式支护技术与铜岭类似，东周时所使用的支护技术与铜岭相同（图三）。

地下开采时，开凿的竖井或斜井一般配以平巷或斜巷以追踪富矿。铜岭平巷支护技术特点为：商代中期以碗口式结构为主，西周以单榫式的榫卯结构为主，且与铜绿山商代晚期的榫卯式结构类似，东周时碗口式与榫卯式结构并行，在稳定性和抗压性上有所提升；铜绿山平巷支护技术特点为：商代晚期至西周以单榫式的榫卯结构为主，西周至东周出现的上榫卯下杈框式支护与鸭嘴亲口排架式，支撑原理上综合应用了碗口式与榫卯式支护结构（图四）^[14]。

综上，从平巷技术的演变来看，铜岭竖井支护技术的发展脉络为碗口式—榫卯式—碗口榫卯并行式—密集垛盘式；铜绿山则表现为榫卯式—多元式—密集垛盘式的特点，其中多元式指的是该地西周时期通用的榫卯式结构、藤条圈式结构以及阳新地区的交替碗口式结构，但主要流行榫卯式结构；平巷支护技术的发展脉络为碗口式—榫卯式—碗口榫卯结合式，其中早期碗口式只在商代见于铜岭。

矿石经开采、运输到地面后，需要对矿石进行清洗筛选，去除杂质。商周时期的选矿方法分为两类，一类是利用肉眼进行人工选矿，包括碎散、破碎作业等；另一类是依靠重力差异进行选矿，如铜岭地区的溜槽选矿技术，在选矿时，先用水流冲击，再反复摇晃溜槽，较重的矿石会被沉在水底，被闸门拦住，而较轻的杂质则漂浮在水面，随水流冲走。矿石经分选、破碎、整粒后，达到适宜的炉料粒度，才能适合冶炼。

三 长江中下游铜矿带先秦冶铸技术研究概况

我国早期炼铜技术为火法炼铜，直至宋代才出现胆水炼铜。火法炼铜主要为“氧化矿—铜”、“硫化矿—铜”和“硫化矿—冰铜—铜”三类。“氧化矿—铜”和“硫化矿—铜”工艺较为简单，用时较短，多用于早期矿冶活动。“硫化矿—冰铜—铜”工艺虽耗时较长，但其原料较多，是我国在炼铜技术上的重大进步。通过对皖南、鄂东南两地冶炼技术的研究发现，该地区冰铜冶炼技术出现时间至迟可到西周中晚期。

（一）冶炼技术研究

对于长江中下游铜矿带先秦铜矿冶遗址冶炼技术的研究，主要通过分析炉渣、铜器、炼炉炉壁等携带技术信息的遗物，讨论冶炼所使用的原料、燃料，复原冶炼工艺流程等。

1. 炼铜原料的研究

硫化矿炼铜特别是冰铜冶炼是我国铜冶金技术的重要发展阶段，学界对长江中下游铜矿带各地区硫化矿炼铜技术尤其关心。对于如何判断炼铜原料是否为硫化矿，主要分为两种方法：

其一，通过铜器及铜锭中的化学成分来判定。相较于氧化矿而言，高铁、高硫是硫化矿的特征，如安徽贵池铜锭中较高的铁、硫含量表明这批铜锭的原料为硫化矿，但也可能与

硫化矿炼铜技术掌握不成熟有关，导致铜铁分离效果不佳^[15]。

其二，通过炉渣的铜硫比或是否存在低品位冰铜颗粒来判断。如铜绿山 XI 矿体所采集炉渣根据公式推算，当时的冰铜品位在 60%—70%，且炉渣中含铜量很少，说明鄂东南段对于炼铜知识的掌握已十分充分^[16]。安徽南陵江木冲遗址（以下简称江木冲）的炉渣中的铜硫比远超冰铜标准值，表明这批炉渣应是冰铜工艺所产生的冰铜渣^[17]。安徽枞阳汤家墩遗址（以下简称汤家墩）炉渣中的冰铜颗粒表明皖南段在商代晚期至春秋时期可能已经使用了“硫化矿—冰铜—铜”工艺^[18]，但该工艺出现的具体年代仍需进一步确认。

2. 冶炼竖炉的研究

铜绿山遗址发掘了多座春秋时期的炼铜竖炉，其竖炉构造及工作方式曾引起广泛争议。卢本珊等人通过对铜绿山春秋时期竖炉的复原研究，已基本解释了春秋时期铜绿山竖炉下方沟道的作用、鼓风方式、取铜方法及炉身形状。竖炉下方的风沟，经高温烘烤质地坚硬，位于炉基顶端炉缸底端，可同时起到防潮和保温的作用。通过对出土炉体通风口及炉渣和粗铜性质的研究，发现鼓风口较小，通过自然鼓风无法满足风量要求，且炉渣的流动性强，粗铜质量也较好，应是在较好的冶炼环境下所得，证明了铜绿山竖炉采用的应是人工风而非自然风。而经过单风道模拟实验炉的试炼后发现，该炉的炉料呈现不均匀分布的状态，因此，铜绿山竖炉不仅采用了自然鼓风，其鼓风方式也应是双风道对应鼓风。此外，针对金门的功用，经过出土铜锭外观、模拟实验分析发现，铜锭规格完整，大小相等，应是经过铸锭所得；而模拟实验炉连续冶炼数十小时，间断性的排放铜和渣，证明了铜绿山竖炉可连续工作的性能。经过对现存炉样的几何分析，结合竖炉工艺源流、春秋稍晚期的腰鼓型竖炉的对比研究，得出铜绿山竖炉的炉身形状应为正截锥型，即自炉底至炉口的截面积依次减小^[19]。

（二）铸造与加工技术研究

1. 铸造技术研究

在长江中下游铜矿带周边的湖北黄陂盘龙城（以下简称盘龙城）、江西新干大洋洲等地发现的早期青铜器有较多为中原风格，大型礼器在中晚期才逐渐转为融合型及本土型。针对铜器的铸造与加工技术研究，目前多用三种方法：第一，通过对铜器或铸范直接观察，确定其采取的铸造方法；第二，通过对铜器的金相分析研究其加工技术；第三，用模拟实验的方法，验证铜器特定铸造和加工方法的可行性。

范铸法为中国古代青铜器铸造所采用的主要方法，根据所用范料可细分为石范、陶范及金属范。先秦时期长江中下游铜矿带所用铸范多为石范和陶范，以工具范、铤范为主，容器范较少（表二）。

表二 长江中下游铜矿带出土先秦时期铸范概况^[20]

遗址	类型	概况
湖北黄陂盘龙城	石范、陶范	石范 6 件，多为工具范，材质包括黑灰色板岩、灰色板岩、灰色页岩、深灰板页岩等；小嘴遗址出土陶范 36 件，泥质，夹微量细砂，其中 1 件可能为青铜尊或鼎类陶范块，34 件碎小陶范块

遗址	类型	概况
湖北大冶舒家山遗址	石范	石范 1 件
湖北大冶蟹子地遗址	陶范、石范	陶范 2 件, 夹砂陶为主; 石范 1 件
湖北大冶古塘埕遗址	石范	铜铸石范 1 件
湖北阳新大路铺遗址	陶范	残, 2 件
江西德安陈家墩遗址	石范	铲范 2 件
江西德安猪垅山遗址	石范	石范 1 件
江西德安石灰山遗址	石范	石质铸范、镞范 3 件
江西德安黄牛岭遗址	石范	石范 2 件
江西德安岭上遗址	石范	1 件石镞范
江西永修新祺周 绍溪山遗址	石范	1 件
江西九江神墩遗址	石范	残件
安徽南陵凤凰山古矿区	石范	锤形石范
安徽铜陵师姑墩遗址	陶范、石范	陶范为容器范, 泥质灰白陶, 合范中的一块, 带有纹饰; 石范为工具范
安徽枞阳汤家墩遗址	陶范	夹砂红陶范及泥质灰褐陶范两种类型, 表面带有弦纹及云雷纹

由表二可知, 目前该地区发现的铸造和加工工具仍较少, 早期矿冶遗址铸范材料以石范和陶范为主。铸造器物类型的不同, 可能导致其所使用的范料也有所区别。生产工具或小件兵器多使用石范铸造, 生活用具多使用陶范铸造。石范具有多次利用的优点, 适合用于生产工具或小件兵器这类需要批量生产的青铜器; 陶范材质较软, 利于刻画纹饰, 用于青铜容器的铸造效果更佳。这一点说明先人在青铜器铸造上已能根据不同类别使用不同方法。

对汤家墩遗址及安徽铜陵师姑墩遗址(以下简称师姑墩)陶范进行科学分析, 并对比周原陶范, 发现其具有一定地域性特色, 纹饰范与素面范的硅钙含量有一定区别, 可能与纹饰刻画要求有关, 陶范中有意的加入了磷^[21]。质量上乘的陶范需具备良好的耐热性、透气性, 不同地区为了保障这一性能所采取的措施不一, 如殷墟采用碳酸钙类物质作为掺合料, 郑韩故城陶范中的大量孔隙提升了透气性, 有利于减少铸造缺陷^[22]; 皖南地区陶范中高粉砂量配以适量粘土可以提升泥料可塑性, 部分陶范夹杂草木灰提升其耐热性, 与周原的明显差别还在于磷和钙的含量。这与不同地域的土壤特征可能也有一定关系, 也是地域特征的体现。

对于青铜器铸造技术的复原, 采取模拟实验的方法较为直观, 已有学者通过模拟实验研究商周青铜器的铸造工艺。何微通过对铜甬铸造的模拟实验研究, 认为黄冈博物馆藏商代前期铜甬为三分法所得, 甬腹部与柱帽上的纹饰为范面所制, 甬腹芯及鑿芯均由芯盒制作而成, 并指出铸型可不加草拌泥单独阴干、焙烧及浇铸^[23]。

2. 铜器加工技术研究

针对铜器加工技术, 主要通过对铜器进行金相分析开展研究, 如通过金相组织分布排列和工艺痕迹, 对其锻造加工技术加以判断。表三统计了对长江中下游铜矿带出土铜器的金相分析结果。

表三 长江中下游铜矿带出土先秦时期铜器的金相分析结果^[24]

遗址	所属年代	检测样品数	合金类型	加工工艺
湖北至安徽部分遗址	东周至秦汉	19	铅锡青铜 11, 锡青铜 8, 同一地区铜锡成分接近	多为铸造组织, 存在冷加工痕迹
安徽铜陵师姑墩遗址	二里头文化三至四期	铜颗粒	合金种类丰富, 包括铅、砷铜和铅锡青铜	
	西周早中期	铜器 5, 铜块 2	出现红铜原料, 西周早中期以铅锡青铜为主, 西周中期以砷铜合金为主	
	西周中期	铜器 14, 铜块 10, 铅锭 1		
	西周晚期至两周之际	铜器 3, 铜块 1	西周晚期砷铜、锡青铜、铅青铜共存, 春秋后砷铜急剧减少	
	春秋早中期	铜器 3, 铜块 1		
安徽枞阳部分遗址	西周至战国	22	11 锡青铜, 7 铅锡青铜, 4 铅青铜	均为铸造而成, 部分铜器有铸后受热迹象; 青铜器的制作工艺较为复杂, 部分铜剑使用了错金、镶嵌及复合剑的制作工艺
吴国青铜容器	西周至战国	34	铅锡青铜为主, 较多砷青铜, 铅青铜很少	均为铸造而成, 虽存在冷加工痕迹, 但多为后期使用所致
吴国青铜兵器	西周至战国	17	锡青铜为主, 少量铅青铜, 铅含量少	均为铸造而成, 部分兵器使用了退火或淬火处理

先秦时期长江中下游铜矿带青铜器的加工技术较为发达, 体现在以下几点: 其一, 部分兵器进行了铸后冷加工处理, 这在一定程度上提升了兵器的硬度, 提升了作战性能; 其二, 多元化的加工技术, 结合器物特征, 采用了铸造、热锻、冷锻等不同组合形式, 表明先人对铜器加工技术的熟练程度较高; 其三, 错金、镶嵌、错红铜等工艺的出现, 使得战国时期长江中下游青铜器的精美成为可能。

(三) 矿料来源研究

对于矿料来源的研究, 从研究方法上区分, 大致可以分为文献考证法及实验室分析法。其中实验室分析法根据实验方法又可分为铅同位素示踪法、微量元素示踪法、泥芯及陶范信息示踪法等。

1. 文献考证

易德生结合文献及考古证据综合分析, 认为长江中下游地区应是周代重要的铜料和锡料产地。此外还从铅锡多金属矿的角度考察异常铅铜器的矿料来源, 对比了多地异常铅铜器合金数据, 认为这类铜器很有可能是采用铅锡多金属矿冶炼铸造而成, 江西和湖南很有可能是商王朝重要的锡料来源; 并认为“金道锡行”路线很可能有中条山铜矿区和长江中游地区两条路线^[25]。

田建花通过耶律简中新发现的史料, 认为无锡、长沙、云南三地锡矿早在先秦时便

已开采,江西、湖南、晋南、豫西南、鄂西北的锡矿虽可能已开采,但尚缺乏有力证据。燕辽地区的锡料资源在二里头二期可能已开采使用,在二里头四期和二里岗下层期进入高峰期^[26]。

2. 铅同位素示踪研究

铅同位素示踪法最早被运用于矿料来源的科学研究,针对不同合金成分的青铜器,铅同位素有着不同的指示信息,纯铜的铅同位素指示铜料来源,而锡青铜或铅锡青铜的铅同位素为各合金元素的加权和,在指示性上有一定局限性。

彭子成认为赣、鄂两地青铜器铜矿源主要来自铜岭和铜绿山,河南部分青铜器矿源可能来源于商王朝的北方地区,部分可能来源于湖南、江西一带^[27]。孙淑云等通过对比盘龙城、二里头、殷墟出土青铜器,认为夏、商前期、商晚期铜器的矿源存在不同,盘龙城青铜器的高放射性成因铅与普通铅数据与周边矿产均存在差别^[28];彭子成则认为盘龙城一部分青铜器矿料来源于铜绿山和铜岭^[29]。郁永彬认为湖北随州叶家山墓地铜器铅料可能来自两个地区,其中大部分为东秦岭地区;铜料来源虽无法确认,但来自铜绿山的可能性较高^[30]。张吉将东周青铜器整理分组,初步构建了当时青铜器矿料的时空框架,认为自春秋至战国早期,矿料来源地虽有不同,但相对集中,而战国中期之后矿料来源相对分散,这与当时的战争以及国别交流有一定联系^[31]。

3. 微量元素示踪研究

各地矿产的微量元素有一定的地域特征,冶炼过程中一些微量元素分别进入金属和炉渣,但无论在金属还是炉渣中均可能保留部分原始组成信息。通过对冶炼遗物及矿石中微量元素特征的对比,可以对其矿料来源加以研究。但各地矿产微量元素不一,因此,在利用微量元素示踪法研究矿料来源时首先要确认适合的指向性微量元素,而这也是微量元素示踪法的局限表现之一。基于此原理,相关学者开展了研究。

陈建立等对盘龙城青铜器的微量元素分析,认为盘龙城采用了外来的铜锡铅料在本地铸造青铜器,其中铜锡同源,铅的来源可能不同,并揭示了重熔等工艺对微量元素比值可能在时代上造成差异^[32]。魏国锋对安徽枞阳青铜器^[33],淮北、铜陵、南陵、繁昌一带青铜器^[34],滁州何郢遗址青铜器^[35]开展研究,结果表明枞阳地区包括具有中原风格的青铜器均来源于当地,淮北至繁昌一带的青铜器矿料来自于长江中下游一带的古铜矿,何郢遗址青铜器矿料来源于滁州当地,以上研究表明安徽当地已具有较为成熟的青铜冶金技术。秦颖研究了铜陵、南陵部分青铜器的铜矿料来源,发现部分来自于皖南,部分来自于其他地区,但并未说明具体地点,鼎等大件器物可能在其它地区铸造后传入本地^[36]。在此基础上还进一步研究了淮北部分铜器的铜料来源,发现其来自于铜陵或铜绿山^[37]。此外,通过对江木冲古铜矿冶炼遗物的研究,发现矿石来源于沙滩角铜矿^[38]。廖华军对比宁夏照壁山铜矿遗址和山西中条山遗址发现的古铜锭,以及安徽铜陵和铜绿山仿古所炼粗铜的微量元素数据,认为湖北丹江口吉家院墓地出土青铜器的矿料来源于长江中下游地区^[39]。

牛津大学推出牛津研究体系,将铜器所含微量元素进行分组,整理铜器数据,认为早期工匠致力寻找相似矿源,但不同时期开发的不同资源有一定区别,晚商和西周铜器的矿料来源具有较高的一致性^[40]。黎海超利用此方法,对盘龙城和郑州出土的青铜器进行了分析,

认为盘龙城出土的一部分铜器具有自身特点,可能存在独立的青铜器生产体系,从新的角度对盘龙城青铜器的生产状况进行了补充^[41]。

对于微量元素示踪法的延伸,还有学者将其应用至矿料类型的研究上。相关研究表明,原生硫化矿、次生硫化矿、氧化矿具有不同微量元素特征,根据冶炼遗物的微量元素特征,可以推测其矿料类型。如汤家墩遗址中炉渣内铜颗粒微量元素与当地硫化矿有较高重合度^[42]。但诸如此类的研究需要考虑的问题是铜料选取是否单一的问题,古人在实际冶炼过程中,往往会将高品位硫化矿与氧化矿掺杂,其所产出的炉渣微量元素特征可能会是两类矿石的权重和。

4. 残留泥芯和陶范示踪法研究

由于古代矿料稀缺,加之对青铜铸造技术的垄断,矿石冶炼和铜器铸造可能在两地进行,无论通过铅同位素或是微量元素的研究,都只能探知矿料来源,而无法得知其铸造地信息。古代青铜器多采用范铸法铸造,陶范所采用的原料多就地取材,不同地区土质不同且有较多元素在铸造活动中并不会流失,使得通过分析范内残留泥芯来探知青铜器铸造地成为可能。对此,魏国锋测试了湖北、陕西、内蒙古和辽宁等地古代遗址出土陶范、泥芯等铸造遗物的稀土元素,发现特征上有一定差异,而同一区域内差异不明显。同时通过对湖北枣阳九连墩和荆门左冢楚墓群出土青铜器上的泥芯进行稀土元素分析进行验证,证实这一方法可行^[43]。魏国峰、秦颖分析了九连墩楚墓青铜器的铸造地,结果表明,外来风格青铜器的泥芯在岩相、物相、化学成分以及植硅体组合上与本地青铜器有较大区别,结合中国黄土特征,推测这部分外来青铜器可能由北方铸造完成后运往楚国^[44]。黄凰分析了湖北襄樊的余岗、沈岗、团山、陈坡四处墓地出土的部分青铜器泥芯、陶片的元素成分,对比山西侯马、湖北盘龙城遗址数据,结果表明襄樊地区这部分铜器应为本地铸造,暗示江汉流域存在本土文化^[45]。

除了上述方法外,合金体系也可被作为辅助判断工具。崔春鹏认为越靠近赣北,青铜生产中锡信号越强烈,且安徽、湖北地质报道中未见有锡矿的记载,表明锡的来源地位于江西的可能性很大^[46]。这与前文学者所述结论相近。

通过总结长江中下游铜矿带先秦时期青铜冶铸技术的研究,认为目前仍存在一些不足。首先,在研究对象上,仍较多关注原料、器物和炉渣,对于冶金设施、燃料、鼓风等问题较少涉及,有待寻找更多的考古证据全面复原当时当地矿冶技术发展面貌;其二,在技术研究层面,缺乏系统的技术研究,多数研究只关注“一地一问题”,综合性技术研究较少,尚不能把一地采矿、冶炼、铸造、加工等问题阐释清楚;第三,长江中下游铜矿带上各矿点之间存在一定差异,但目前缺乏系统的数据分析,故而尚不能完全体现各地区间的差异,缺乏横向比较,也较少关注铜矿带上各区域之间的技术交流问题;第四,在技术与文化交流层面,多数集中在中原与长江中下游铜矿带的铜矿利用关系上,较少关注本地铜矿利用的问题,如周边出土青铜器与冶金废弃物之间的关系少有涉及,此研究可以帮助了解一地的冶金生产组织和产品利用模式,对于认识本土冶金技术特征具有重要作用。

四 长江中下游铜矿带先秦铜器合金技术的区域特征

长江中下游铜矿带矿床成分复杂,加之对青铜冶铸技术掌握程度的不同,各地会表现

出不同类型的合金体系,弄清这一问题,对于丰富长江中下游铜矿带矿冶考古研究有重要意义。

对于合金技术体系的科学研究,主要可以通过两种方法:其一,通过检测矿冶遗址的冶炼废弃物,判断其种类,进而推测其合金技术。通过对赣北、鄂东南、皖南地区矿冶遗址的系统调查及对冶炼废弃物的科学研究表明,多数遗址均掌握了合金化技术,但又各有特色。其中,鄂东南、赣北、皖西南地区主要以锡青铜为主,鄂东南、皖南中西段地区有铈青铜及含镍砷铅锡青铜,皖南地区则存在锡青铜和砷铜两种合金体系^[47]。其二,对出土青铜器的合金成分进行研究,了解其合金体系。目前在长江中下游铜矿带周边墓地中发现的纹饰精美具有典型中原特色的青铜器可能由多种形式传入本地,但大部分青铜器是本地青铜冶金技术的产物,在长江中下游铜矿带所发现的较多矿冶遗址很有可能是这些青铜器的生产地。

目前对于湖北地区出土青铜器合金成分的研究大多集中于荆门、襄阳一带,并不位于长江中下游铜矿带,而长江中下游铜矿带鄂东南段出土青铜器的研究则相对较少,因而其在反映长江中下游铜矿带的矿冶技术上具有一定局限性,但不排除湖北区域内青铜器矿料来源于鄂东南带的可能。

整理长江中下游铜矿带皖南段出土青铜器的合金成分数据(表四)可知,西周早期皖南段检测结果少,青铜合金技术面貌不明。西周中期,铜锡砷合金技术明显,铅的加入方式不明,砷的来源很有可能为铜矿带入。容器中锡含量普遍不高;兵器均为三元合金,含锡量总体在10%左右,与同时期青铜容器的合金特征有显著区别,可考虑其是否为本地产物。春秋时期,出现了大量三元合金,容器的含锡量普遍在15%左右,含铅量较为不稳定,最高可达17%,而兵器的含锡量则普遍高于20%。这说明古人对于合金配比技术已经达到一定了解,能够通过增加锡含量提高兵器硬度,增加铅含量提高溶液流动性,但铅含量的控制不佳。战国时期的容器有一定分化现象,出现了较多二元合金,而三元合金的含铅量较高,大多在20%左右,兵器中也出现了较多二元合金,锡含量与春秋时期无明显差别,说明上述两类铜器可能并非同一地区产物。总体来说,皖南段的合金体系体现为,西周时期合金元素控制不佳;春秋时期,技术有明显进步,铜器以三元合金为主,对于合金元素的控制相对成熟;战国时期,则体现出一定的弱化现象,这可能与矿产资源流通有关。

表四 长江中下游铜矿带皖南段先秦时期青铜器合金成分^[48]

遗址	类型	年代	器物类型	Cu	Sn	Pb	Fe	As
师姑墩遗址	容器及残器	西周早期	铜块	87.37			3.17	3.81
师姑墩遗址		西周中期	残铜器	62.21		32.9		
师姑墩遗址		西周中期	铜块	32.36	1.45		18.6	2.77
师姑墩遗址		西周中期	残铜器	86.97	3.91			5.54
师姑墩遗址		西周中期	残铜器口沿	83.52	7.8			5.08
师姑墩遗址		西周中期	铜块	95.76	3.04			1.21
师姑墩遗址		西周中期	铜块	41.05	1.88		31.18	
师姑墩遗址		西周晚期	残铜器	62.83		16.9	4.01	
师姑墩遗址		西周晚期	残铜器	67.61		29.8		
枞阳地区		西周	鼎	84	1.2	14.8		
枞阳地区		西周	鼎	95.3	2.7	2		
枞阳地区		西周	鼎	88.5	0.7	10.1	0.7	

遗址	类型	年代	器物类型	Cu	Sn	Pb	Fe	As	
枞阳地区	容器及残器	西周	弦纹爵	96.5	3.5				
枞阳地区	铜器	西周	觚形尊	88.9	0.9	10.2			
师姑墩遗址	兵器	西周早期	铜镞	75.24	13.49	8.56			
师姑墩遗址		西周中期	残铜刀	69.58	7.04	12.6			
师姑墩遗址	容器	春秋	铜块	79.11	18.14				
枞阳地区		春秋	龙螭四组匝	79.7	13.4	13.9			
师姑墩遗址	兵器	春秋早期	残铜矛	53.8	28.01	2.79		0.87	
枞阳地区	容器	战国	弦纹壶	67.5	33.2				
枞阳地区		战国	铜勺	84.3	15.7				
枞阳地区		战国	鼎	68.8	7.6	23.6			
枞阳地区		战国	鼎	70	10.6	19.5			
枞阳地区		战国	鼎	81.7	2	16.3			
枞阳地区		战国	铁足鼎	67.5	3.8	28.7			
枞阳地区		战国	铁足鼎	89.4	10.6				
枞阳地区		战国	铁足鼎	85.6	14.4				
枞阳地区		兵器	战国	铜剑	81.4	18.7			
枞阳地区			战国	铜剑	82	18			
枞阳地区	战国		铜剑	67.2	32.8				
枞阳地区	战国		铜矛	73.8	26.2				
枞阳地区	战国		铜矛	81.3	7.8	10.8			
枞阳地区	战国		铜矛	88.7		11.3			
枞阳地区	战国		铜戈	78	15.5	6.9			
枞阳地区	战国		铜戈	66.4	27.2				

长江中下游铜矿带宁镇段青铜合金技术体现为早期青铜容器以三元合金为主,多为铅青铜,也有一定砷青铜,还出现了部分铅砷青铜,铅含量普遍较高,有利于容器铸造;晚期的青铜容器均为铅青铜,铅含量较早期有明显减少。兵器中,以铅青铜为主,存在少量锡青铜,锡含量普遍较高,大多在20%以上。表明古人在兵器铸造中刻意提高了锡含量以增加其硬度。总体来说,宁镇段早期青铜器中也出现较多砷青铜,容器则体现出了早期高铅、晚期低铅的特征(表五)。

表五 长江中下游铜矿带宁镇段先秦时期青铜器合金成分^[49]

遗址	年代	类型	器物类型	Cu	Sn	Pb	As
丹阳司徒公社窖藏	西周	容器	大铜鼎	75.4	1.7	8.9	10.3
丹阳司徒公社窖藏	西周		大铜鼎	76.2	2.1	11.6	2.8
丹阳司徒公社窖藏	西周		铜鼎	58.1	5.2	34.6	
丹阳司徒公社窖藏	西周		铜鼎	83.9	6.9	4	3.7
丹阳司徒公社窖藏	西周		铜鼎	69	8.4	13.4	2.8
丹阳司徒公社窖藏	西周		铜鼎	63.1	8.7	28.2	
丹阳司徒公社窖藏	西周		铜鼎	62.8	13.2	21.9	
丹阳司徒公社窖藏	西周		铜鼎	71.8	7.5	16.6	
丹阳司徒公社窖藏	西周		铜鼎	69.8	6.5	22.9	
丹阳司徒公社窖藏	西周		铜鼎	65.9	9.6	15.4	4.1
丹阳司徒公社窖藏	西周		铜鼎	59.4	10.4	23.6	0.3
丹阳司徒公社窖藏	西周		铜鼎	65.8	11	22.7	

遗址	年代	类型	器物类型	Cu	Sn	Pb	As	
丹阳司徒公社窖藏	西周	容器	铜鼎	60.9	26.5	3.3		
丹阳司徒公社窖藏	西周		铜棘刺纹尊	64.8	18.5	16.3		
丹阳司徒公社窖藏	西周		铜棘刺纹尊	74.2	21.4	4.1		
丹阳司徒公社窖藏	西周		铜棘刺纹尊	77.6	11.2	4.7		
丹阳司徒公社窖藏	西周		铜棘刺纹尊	68.9	16.6	14.4		
丹徒大港母子墩	西周		铜雷纹鬲	82.4	0.5	11		
丹徒大港母子墩	西周		铜雷纹鬲	84.1	0.3	7.1		
溧水乌山西周墓	西周		铜卣	56.2	0.3	38.7		
丹阳县高桥公社	西周		百乳簋	63.1	17.5	14.4		
丹阳县高桥公社	西周		百乳簋	68.8	17	11.7	2.5	
高淳县收购	西周		铜簋	67.2	5	17.5	2.2	
高淳县收购	西周		铜簋	78.1	5.6	9.7		
溧水乌山西周墓	西周		铜盘	42.1	0.9	38.4	8.9	
丹徒青龙山墓	春秋		铜甗	52.3	6.8	39.7		
丹徒青龙山墓	春秋		铜甗	40	7.1	43.2		
高淳顾陇公社	春秋		铜尊	66.4	12.3	17.9		
高淳县双塔公社	春秋		铜鼎	70.4	7.5	11.9		
王家山墓	春秋晚期		兵器	矛	20.05	3.42		
王家山墓	春秋晚期			镞	32.78			
丹徒青龙山墓	春秋晚期			戈	21.92			
丹徒青龙山墓	春秋晚期	矛		18.04	1.65			
丹徒青龙山墓	春秋晚期	矛		20.46	11.3			
丹徒青龙山墓	春秋晚期	矛		19.17	3.7			
丹徒青龙山墓	春秋晚期	矛		25.72	1.51			
丹徒青龙山墓	春秋晚期	矛		27.15	1.13			
丹徒青龙山墓	春秋晚期	戟		23.72	7.52			
丹徒申子墩	东周	容器		铜盘	77.7	10.8	11.5	
丹徒申子墩	东周		铜盘	78.1	11.2	4.2		
高淳固城	东周		铜鼎	61.5	19.5	10.2		

对长江中下游铜矿带周边遗址、墓葬出土青铜器合金成分数据分析认为,该地区出土青铜器年代虽早晚不一,但仍有规律可循。从合金成分来看,青铜器的合金成分以铅锡青铜及铅青铜为主,仅安徽铜陵师姑墩遗址春秋时期出现少量红铜器,这与文化交流及墓葬等级有一定联系。早期,长江中下游铜矿带虽已开始冶金活动,但技术不成熟,铸造铜器多为小件器物,外形粗糙,这类器物也较少被带入稍晚时的大型墓葬中。之后,中原地区通过征战或分封将大批精美青铜器带入长江中下游地区,成为贵族随葬品,随之带来的还有中原高超的合金技术,这可能是长江中下游地区自西周至战国墓葬中青铜器多以铅锡青铜或锡青铜为主的原因之一。此外,部分数据也体现了合金技术的区域性特征:第一,不同于鄂东南段,皖南及宁镇段均有砷青铜冶炼过程,这可能与当地特有的矿产资源有关;第二,鄂东南段及皖南段较多青铜器中出现了铁元素,一方面反映了当地对于合金元素的提纯率可能不够完善,另一方面也说明可能当地多铜铁共生矿;第三,大多地区体现了早期高铅、晚期低铅的特征。

目前长江中下游铜矿带先秦时期青铜合金技术格局仍不明确,主要原因可能在于区域性研究失衡,长江中下游铜矿带皖南段、宁镇段的铜器研究相对较多,而鄂东南段、赣北段则

明显偏少，在一定程度上无法全面体现长江中下游铜矿带的铜器制作技术，而对于冶金废弃物的研究则多在鄂东南段及皖南段，宁镇段及赣北段偏少。上述情况均不利于全面了解长江中下游铜矿带冶金技术脉络。

五 结语

长江中下游铜矿带先秦时期的铜矿冶遗址众多，现有研究重点关注了该地区的采矿技术、冶炼技术、合金技术、铸造技术及资源流通等问题，对于该地区先秦时期青铜冶金技术区域特征也有了初步认识。研究表明，随着技术的发展以及原料需求的增大，古人开采矿石的方式由露天开采逐渐转变为露天—地下开采相结合的方式，考虑开采量以及操作安全等因素，井巷支护技术亦逐步发展，能针对不同地形采取不同的支护技术，支护木连接的稳定性逐渐提高，采掘工具、运输工具、装载工具、照明工具等均顺应技术要求有所改变。遗址周边普遍存在小型冶炼场所，出土了较多的炉渣、陶范等冶铸遗物，显示了各地区普遍存在本土冶铸活动，而对于矿石的冶炼，在氧化矿不足的情况下，各地区均尝试采用硫化矿炼铜，并逐渐掌握冰铜冶炼工艺。合金配比技术方面，由于各地矿石有一定区别，加之对于青铜冶铸技术掌握程度不同，各地区青铜器虽主要以铅锡青铜及锡青铜为主，但又形成了有地域特色的合金体系。通过铅同位素示踪法、微量元素示踪法、残留泥芯和陶范示踪法等现代科技手段发现中原地区部分矿料来源于长江中下游铜矿带，而长江中下游各铜矿带遗址使用的矿料大部分来自于本地，反映了商周时期长江中下游铜矿带与中原地区的文化交流并非单向被动接受，而是具有一定独立性。

目前的研究除了区域性研究失衡、研究对象较为单一、系统研究和数据分析少、本土认识不足外，研究也多关注器物和技术本身，而对技术的本地适应性、环境资源与技术发展的关系等问题关注也较少。因而，长江中下游铜矿带矿冶考古研究仍然需要更多的技术与综合研究。

附记：本文得到教育部人文社会科学研究青年基金项目“宁镇地区早期铜矿冶遗址调查与研究”（项目编号：17YJJCZH108）、江苏省基础研究计划（自然科学基金）青年基金项目“宁镇地区历代矿冶景观时空演变及其成因研究”（项目编号：BK20170951）和国家社会科学基金重大项目“先秦时期中原与边疆地区冶金手工业考古资料整理与研究”（项目编号：17ZDA219）资助。

注释：

- [1] 陈建立：《蓬勃发展的冶金考古研究》，《南方文物》2016年第1期；华觉明、卢本珊：《长江中下游铜矿带的早期开发和中国青铜文明》，《自然科学史研究》1996年第1期。
- [2] 华觉明：《中国古代金属技术——铜和铁造就的文明》，大象出版社，1999年，第48-49页；张景森、张静、周俊杰：《矽卡岩和矽卡岩型矿床研究方法》，《河北工程大学学报（自然科学版）》2009年第1期。
- [3] 秦颖、魏国锋、罗武干、杨立新、张国茂：

《长江中下游古铜矿及冶炼产物输出方向判别标志初步研究》，《江汉考古》2006年第1期；国家文物局：《中国文物地图集——湖北分册》，西安地图出版社，2002年；黄石市博物馆：《铜绿山古铜矿遗址》，文物出版社，1999年；朱俊英主编《大冶五里界——春秋城址与周围遗址考古报告》，科学出版社，2006年；王文平、李小波、余骏、冯务建、陈树祥、李延祥、席奇峰、崔春鹏：《湖北省鄂州市冶炼遗址调查简报》，《江汉考古》2016年第3期；

- 刘诗中、卢本珊：《江西铜岭铜矿遗址的发掘与研究》，《考古学报》1998年第4期；国家文物局：《中国文物地图集——安徽分册》，中国地图出版社，2014年；崔春鹏：《长江中下游早期矿冶遗址考察研究》，北京科技大学博士论文，2017年；国家文物局：《中国文物地图集——江苏分册》，中国地图出版社，2007年；刘海峰、陈虹利、白国柱：《南京矿冶文化遗产研究与保护模式探索》，《阅江学刊》2018年第6期。
- [4] 陈树祥、冯海潮、席奇峰、张国祥：《大冶铜绿山古铜矿遗址考古新发现与初步研究》，《湖北理工学院学报（人文社会科学版）》2012年第6期；王文平、李小波、余骏、冯务建、陈树祥、李延祥、席奇峰、崔春鹏：《湖北省鄂州市冶炼遗址调查简报》，《江汉考古》2016年第3期。
- [5] 陈丽新、陈树祥：《试论大冶铜绿山四方塘基地的性质》，《江汉考古》2015年第5期。
- [6] 刘诗中、卢本珊：《江西铜岭铜矿遗址的发掘与研究》，《考古学报》1998年第4期。
- [7] 张国茂：《安徽铜陵地区古矿冶遗址调查报告》，《东南文化》1988年第6期。
- [8] 官希成：《安徽南陵县古铜矿采冶遗址调查与试掘》，《考古》2002年第2期。
- [9] 卢本珊：《商周选矿技术及其模拟实验》，《中国科技史料》1994年第4期；韩汝玢、柯俊：《中国科学技术史——矿冶卷》，科学出版社，2007年，第19-21、56-58、84-87页。
- [10] 黎海超：《长江中下游地区商周时期采矿遗址研究》，《考古》2016年第10期。
- [11] 韩汝玢、柯俊：《中国科学技术史——矿冶卷》，科学出版社，2007年，第30、47-51、88-92页。
- [12] 同[11]，第30-32、47-51、88-92页，部分同类型竖井支护图与图二相同。
- [13] 同[11]，第30-35、52-56、93-95页。
- [14] 韩汝玢、柯俊：《中国科学技术史——矿冶卷》，科学出版社，2007年，第56-58、84-87页；黎海超：《长江中下游地区商周时期采矿遗址研究》，《考古》2016年第10期。
- [15] 张敬国、李仲达、华觉明：《贵池东周铜锭的分析研究——中国始用硫化矿炼铜的一个线索》，《自然科学史研究》1985年第2期。
- [16] 李延祥、卢本珊：《铜绿山XI矿体古代炉渣冶炼炼铜说》，《有色金属》1998年第3期。
- [17] 穆荣平：《皖南古铜矿遗址及其冶炼技术的初步研究》，中国科学技术大学硕士学位论文，1990年。
- [18] 郁永彬、王开、陈建立、梅建军、官希成：《皖南地区早期冶铜技术研究的新收获》，《考古》2015年第5期；魏国锋、高顺利、秦颖、王乐群：《汤家墩遗址冶炼遗物的科技研究》，《光谱学与光谱分析》2017年第3期。
- [19] 卢本珊、华觉明：《铜绿山春秋炼铜竖炉的复原研究》，《文物》1981年第8期。
- [20] 韩用祥、余才山、梅笛：《盘龙城遗址首次发现铸造遗物及遗迹》，《江汉考古》2016年第2期；武汉大学历史学院、湖北省文物考古研究所、盘龙城遗址博物院：《武汉市盘龙城遗址小嘴2015-2017年发掘简报》，《考古》2019年第6期；彭明瀚：《赣江鄱阳湖地区商代青铜工具和铸铜石范的发现与研究》，《农业考古》2006年第1期；罗运兵、曲毅、陈斌、陶洋、杨胜：《湖北大冶蟹子地遗址2009年发掘报告》，《江汉考古》，2010年第4期；陈树祥：《关于早期铜矿业探索如何深化的思考——以鄂东南及铜绿山古铜矿遗址考古为例》，《南方文物》，2016年第1期。因盘龙城距长江中下游铜矿带地理位置十分接近，本文一并讨论。
- [21] 郁永彬、王开、陈建立、梅建军、官希成：《皖南地区早期冶铜技术研究的新收获》，《考古》2015年第5期。
- [22] 刘煜、岳占伟：《殷墟陶范的材料及处理工艺的初步研究》，《2004年安阳殷商文明国际学术研讨会》，2004年；Liu S., Wang K., Cai Q., et al., "Microscopic study of Chinese bronze casting moulds from the Eastern Zhou period," *Journal of Archaeological Science*, 40,(5), (2013):2402-2414.
- [23] 何薇、董亚巍、周卫荣、王昌隧：《商前期青铜甬铸造工艺分析与模拟实验研究》，《南方文物》2008年第4期。
- [24] 秦颖、李世彩、晏德付、罗武干：《湖北及安徽出土东周至秦汉时期热锻青铜容器的科学分析》，《文物》2015年第7期；王开、陈建立、朔知：《安徽铜陵县师姑墩遗址出土青铜冶铸遗物的相关问题》，《考古》2013年第7期；郁永彬、梅建军、张爱冰、王乐群：《安徽枞阳地区出土先秦青铜器的初步科学分析》，《中原文物》2014年第3期；田建花、王金潮、孙淑云：《吴国青铜容器的合金成分和金相研究》，《江汉考古》2014年第2期；贾莹、苏荣誉：《吴国青铜兵器的金相学考察与研究》，《文物科技研究》，2004年，第21-51页。

- [25] 易德生：《科技考古视野下的商王朝锡料来源与“金道锡行”》，《中国社会科学》2013年第5期。
- [26] 田建花、马江波：《先秦青铜生产的锡料来源探讨》，《有色金属（冶炼部分）》2017年第12期。
- [27] 彭子成、孙卫东、黄允兰、张巽、刘诗中：《赣鄂皖诸地古代矿料去向的初步研究》，《考古》1997年第7期；彭子成、刘永刚、刘诗中、华觉明：《赣鄂豫地区商代青铜器和部分铜铅矿料来源的初探》，《自然科学史研究》1999年第3期。
- [28] 孙淑云、韩汝玢、陈铁梅等：《盘龙城出土青铜器的铅同位素比测定报告》，湖北省文物考古研究所编《盘龙城——1963—1994考古发觉报告》，文物出版社，2001年，第545—551页。
- [29] 彭子成、王兆荣、孙卫东、刘诗中、陈贤一：《盘城商代青铜器铅同位素示踪研究》，同[28]，第552—558页。
- [30] 郁永彬、陈建立、梅建军、陈坤龙、常怀颖：《关于叶家山青铜器铅同位素比值研究的几个问题》，《南方文物》2016年第1期。
- [31] 张吉、陈建立：《东周青铜器铅同位素比值的初步研究》，《南方文物》2017年第2期。
- [32] 陈建立、孙淑云、韩汝玢、陈铁梅等：《盘龙城出土青铜器的微量元素分析报告》，同[28]，第559—573页。
- [33] 魏国锋、秦颖、王乐群：《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》2017年第11期。
- [34] 魏国锋、秦颖、王昌燧、刘博、杨立新：《若干地区出土部分商周青铜器的矿料来源研究》，《地质学报》2011年第3期。
- [35] 魏国锋、秦颖、王昌燧、张爱兵、官希成：《何郢遗址出土青铜器铜矿料来源的初步研究》，《中原文物》2005年第5期。
- [36] 秦颖、王昌燧、张国茂、杨立新、汪景辉：《皖南古铜矿冶炼产物的输出路线》，《文物》2002年第5期。
- [37] 秦颖、王昌燧、冯敏、杨立新、汪景辉：《安徽淮北部分地区出土青铜器的铜矿来源分析》，《东南文化》2004年第1期。
- [38] 秦颖、王昌燧、冯敏、刘平生：《安徽省南陵县江木冲古铜矿冶炼遗物自然科学研究及意义》，《东南文化》2002年第1期。
- [39] 廖华军、罗武干、李桃元、魏国锋、周卫荣：《吉家院墓地出土青铜器的矿料来源初探》，《华夏考古》2013年第2期。
- [40] 马克·波拉德、彼得·布睿、彼得·荷马、徐幼刚、刘睿良、杰西卡·罗森：《牛津研究体系在中国古代青铜器研究中的应用》，《考古》2017年第1期。
- [41] 黎海超：《试论盘龙城遗址的区域特征》，《南方文物》2016年第1期。
- [42] 魏国锋、高顺利、秦颖、王乐群：《汤家墩遗址冶炼遗物的科技研究》，《光谱学与光谱分析》2017年第3期。
- [43] 魏国锋、秦颖、胡雅丽、黄凤春、徐天进：《利用泥芯中稀土元素示踪青铜器的产地》，《岩矿测试》2007年第2期。
- [44] 魏国锋、秦颖、姚政权、王昌燧、胡雅丽：《利用泥芯示踪九连墩楚墓青铜器的产地》，《岩石矿物学杂志》2011年第4期；秦颖、姚政权、魏国锋、胡雅丽、王昌燧：《利用植硅石示踪九连墩战国楚墓出土青铜器产地》，《中国科学技术大学学报》2008年第3期。
- [45] 黄凰、秦颖、孙升、王先福、陈千万：《利用同墓葬出土泥芯、陶器示踪青铜器铸造地初探——以湖北襄樊部分东周墓为例》，《文物保护与考古科学》2010年第3期。
- [46] 崔春鹏：《长江中下游早期矿冶遗址考察研究》，北京科技大学博士论文，2017年。
- [47] 李延祥、崔春鹏、李建西、陈树祥、龚长根：《大冶香炉山遗址采集炉渣初步研究》，《江汉考古》2015年第2期；崔春鹏：《长江中下游早期矿冶遗址考察研究》，北京科技大学博士论文，2017年；郁永彬、王开、陈建立、梅建军、官希成：《皖南地区早期冶铜技术研究的新收获》，《考古》2015年第5期。
- [48] 王开、陈建立、朔知：《安徽铜陵县师姑墩遗址出土青铜冶铸遗物的相关问题》，《考古》2013年第7期；郁永彬、梅建军、张爱冰、王乐群：《安徽枞阳地区出土先秦青铜器的初步科学分析》，《中原文物》2014年第3期。
- [49] 田建花、王金潮、孙淑云：《吴国青铜容器的合金成分和金相研究》，《江汉考古》2014年第2期；贾莹、苏荣誉：《吴国青铜兵器的金相学考察与研究》，《文物科技研究》，2004年。

（责任编辑 姜舜源）