

doi:10.3969/j.issn.1007-7545.2024.11.021

中国冶金考古研究五十年:回顾与展望

陈建立¹,梅建军²,潜伟³,刘海峰⁴

(1. 北京大学 中国考古学研究中心,北京大学 考古文博学院,北京 100871;

2. 英国剑桥李约瑟研究所,剑桥 CB2 1TN;

3. 北京科技大学 科技史与文化遗产研究院,北京 100083;

4. 江苏科技大学 科学技术史研究所,江苏 镇江 212100)

摘要:20 世纪 70 年代开始,中国冶金考古进入大发展时期。多学科学者纷纷参与中国冶金考古研究,在冶铜术起源与青铜冶铸体系形成、钢铁技术形成与发展、金银铅锡锌等有色金属冶炼技术、古代金属流通与国家治理等方面取得了一系列重要成果,但在田野冶金考古与信息采集标准规范、古代金属材质与工艺及其流通研究关键技术、古代冶金与文明和国家起源发展机制等方面的研究仍具有极大空间,有待于今后开展更多的冶金考古理论与方法、关键科学问题研究。本文对 1974 年以来的重大成果进行简要回顾与总结,分析存在的问题,提出未来发展建议。

关键词:冶金考古;青铜冶铸技术体系;钢铁技术体系;冶金与文明

中图分类号:K871

文献标志码:A

文章编号:1007-7545(2024)11-0247-11

Archaeometallurgical Research in China Over the Past Fifty Years: Review and Prospect

CHEN Jianli¹, MEI Jianjun², QIAN Wei³, LIU Haifeng⁴

(1. Chinese Archaeology Research Center, School of Archaeology and Museology, Peking University, Beijing 100871, China;

2. Needham Research Institute, Cambridge CB2 1TN, UK;

3. Institute for History of Science and Technology & Cultural Heritage,

University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China;

4. Institute for History of Science and Technology, Jiangsu University of Science and Technology,

Zhenjiang 212100, Jiangsu, China)

Abstract: Since the 1970s, archaeometallurgical research in China has entered a period of great development. Scientists, archaeologists, and historians have participated in the research, and have achieved a series of important results in the origin of copper smelting and the formation of bronze smelting and casting system, the formation and development of iron and steel making technology, non-ferrous metal smelting technology, ancient metal production and national governance. However, there is still great space for research in field work and information collection standards, key research methods for ancient metal materials, crafts and communication studies, as well as the origin and development of Chinese civilization and nation research. More archaeometallurgical theories and methods, as well as key scientific issues, need to be studied in the future. In this

收稿日期:2024-09-29

基金项目:国家重点研发计划项目(2022YFF0903700);国家社会科学基金重大项目(17ZDA219);江苏省重点研发计划项目(BE2022784);国家自然科学基金资助项目(52374296)

作者简介:陈建立(1973-),男,博士,教授

paper, the major achievements since 1974 were briefly reviewed and summarized. The existing problems were analyzed. The suggestions for future development were put forward.

Key words: archaeometallurgy; bronze smelting and casting system; iron and steel making technology system; metallurgy and civilization

利用现代科技手段对中国古代冶金技术进行研究的冶金考古始于20世纪20年代,迄今已有百年历史。以1974年湖北大冶铜绿山矿冶遗址的发掘和北京钢铁学院(现北京科技大学)冶金史编写组的成立为标志,将中国冶金考古分为前后两个阶段,各有特色。当前的冶金考古更加重视田野调查和考古发掘,更加重视对冶铸遗物和金属产品开展全面、系统、科学的信息提取和全方位检测分析,更加重视基于全球视野分析中国古代冶金技术发展面貌和特点,也更加重视矿冶文化遗产的保护和利用,充分体现出多学科交叉融合优势,展示出良好的发展态势。本文主要对1974年以来的重大成果进行简要回顾与总结,分析存在的问题,提出未来发展建议。

1 中国冶金考古发展简史

1920—1923年,王琨在《科学》杂志陆续发表论文《中国古代金属原质之化学》《中国古代金属化合物之化学》和《五铢钱化学成分及古代应用铅、锡、锌、铜考》,开创了中国学者利用现代化学分析方法对古物进行检测分析之先河。1933年,刘屿霞利用殷墟考古出土资料发表《殷代冶铜术之研究》,开启了考古学背景下的青铜冶铸技术研究。这些工作为中国冶金考古的发展奠定了良好基础,而冶金考古也可以视作中国科技考古的开端。

自中华人民共和国成立到1970年代,受马克思主义考古学和苏联考古学的影响,历史、考古、冶金等多个学科学者不同程度地关注中国古代冶金技术及其与社会生产力、生产关系的问题,河北承德寿王坟战国至东汉时期铜矿遗址、山西运城东汉铜矿遗址、侯马铸铜遗址,以及河南、山西、河北等地冶铁遗址得到考古调查与发掘,李恒德^[1]、张子高^[2]、华觉明等^[3]和杨宽^[4]等发表不少研究论文,冶金考古成为新中国科技考古的最重要研究方向之一。在众多学者中,以柯俊、华觉明为代表的具有自然科学背景又对冶金史研究有浓厚兴趣的学者,由于学缘和工作关系,被编入科学技术史研究队伍,最终在北京科技大学、中国科学院自然科学史研究所形成冶金考古研究团队。反观考古学、历史学领域,则没有形成专门的研究团队,但夏鼐和李京华比较例外。夏鼐

关于河北藁城商代铁刃铜钺^[5]、江苏宜兴西晋周处墓出土“铝片”的研究^[6],李京华积极参加和推动矿冶遗址调查与发掘、开展铸造工艺研究,为考古学家开展冶金考古研究树立了榜样。夏鼐还为以柯俊、华觉明和李京华等不同单位研究人员组成的“中国冶金史编写组”的研究工作提供支持,从而在1970年代中期初步取得关于中国古代生铁技术等方面的体系化认识^[7],形成了考古学与检测分析密切结合、相互成就的良好学风,促进了中国冶金考古的快速发展。

1974年湖北大冶铜绿山矿冶遗址开始发掘,迄今整整50年,走过了一条虽然艰难但成效卓著的研究、保护与利用之路,形成了较好的冶金考古工作模式^[8];同年,北京钢铁学院中国冶金史编写组正式成立,组建了当时世界上最大的冶金考古研究团队,则带动了各地区矿冶遗址的调查、发掘、研究、保护和利用工作。以这两个事件为标志,中国冶金考古进入大发展阶段。

1974—2000年,很多学术问题得到更加深入的讨论,冶金考古理论和方法研究得到重视,现代科技更加广泛地应用于冶金考古领域,关于中国冶金技术起源与传播、青铜冶铸工艺与物料产地溯源、生铁冶炼和生铁制钢技术体系等取得的重大成果,引起国内外学界高度重视。新世纪以来,随着中华文明探源工程、指南针计划等一系列重大科研项目的持续推进,冶金考古研究经费有很大改善,研究人员数量逐渐增多,理论与方法更加成熟,工作模式和学科范式有较大改变和发展,成果更为突出,在探讨文明起源、国家治理等议题上发挥了重要作用。

2 五十年来中国冶金考古研究的重大成果

1974年以来,冶金考古始终将冶金技术与文明发展之间的关系问题作为研究主旋律,探讨中国冶金技术起源的时间、地域与机制,研究青铜、生铁冶铸技术谱系的形成过程,探究金属物料和产品流通面貌,重点解决冶金技术推动文明发展的机制问题,取得大量突破性进展,部分成果已在王巍主编的《中国百年考古史》一书有系统性梳理和评价^[9],本文仅选择部分重大成果进行介绍与分析。

2.1 中国冶铜技术起源与青铜冶铸技术体系的形成研究

1981 年,孙淑云和韩汝玢在对早期铜器进行铸造工艺观察、成分分析和模拟试验的基础上,提出“我国古代开始出现铜器的年代,应该早于齐家文化时期,而且是红铜、锡青铜、铅青铜器物同时存在。……我国商代高度发达的青铜技术不是突然出现的,对早期铜器的分析研究,可以为其渊源提供一个粗略的轮廓”^[10]。这篇论文为论证中国铜和青铜冶金独立起源奠定了基础。华觉明^[11]、苏荣誉等^[12]、王昌燧等通过历史文献和考古资料的梳理^[13],并结合检测分析认为冶金技术具有独立起源的条件,部分学者^[14]仍持中国境内独立发明铜和青铜冶金技术的观点。

1993 年,安志敏指出铜器最早可能是通过史前“丝绸之路”进入中国的,挑战了当时仍然流行的铜冶金技术独立起源说^[15],促使在此后的 30 余年里,中国早期矿冶遗址的考古调查、发掘和综合研究迅速增长,也标志着冶金考古研究从爱国主义教条转向以实际考古证据为指导的开放思想研究路线。2005 年,李水城^[16]指出“中国西北地区早期冶铜业的发达是与中亚地区保持文化互动为前提的”,“中国西北地区对来自中亚及以远地区的冶金术并非全盘被动地接受,而是主动加以改造和利用,并不断形成自身的特色”,“而中原地区冶金术的真正崛起并形成独立的华夏风格,则是在二里头文化晚期才最终实现”。显而易见,西北地区在冶金术的东西交流方面起到独特而重要的作用,陈坤龙等^[17]进一步指出,公元前 2000 年前后,欧亚草原地带的青铜文化对铜和青铜技术在中国西北地区的出现和早期发展有着重要影响;其后,中国西北和北方地区在中西互动的技术交流中持续发挥着桥梁作用,铜鍍和铜镜的向西传播与此有关。目前越来越多的学者主张中国冶金术的起源来自外部刺激。

无论是本土起源还是外来传播的观点,仰韶文化时期早期黄铜的发现、马家窑文化时期早期青铜的发现都是不能回避的问题,金正耀^[18]“尝试提出‘铜矿物试验期—铜合金试验期—青铜工业’这一新的模式,以期准确理解人类早期金属利用和冶炼活动的现象及规律”。近年新疆北部等地公元前三千纪的青铜器发现日益增多,而河西走廊地区则是公元前二千纪初中国境内冶金生产最为活跃的地区,从考古发现层面体现冶金技术西来的阶段性与路径的多样性。

冶金术起源与发展的研究,关键在于矿冶遗址考古调查和发掘工作。2004 年以来,北京科技大学

李延祥组织北京大学、吉林大学、中国社会科学院考古研究所等多家考古单位研究人员,持续在各地进行矿冶遗址考古调查与发掘,揭示出早期冶金业的普遍规律与区域差别。如确认甘肃张掖西城驿遗址系目前中国最早的青铜冶铸遗址,复原和阐释了其技术面貌、冶金人群变迁及其在中国冶金史的地位^[19];在山西运城条山地区发现和发掘了闻喜千金耙、绛县西吴壁、夏县东下冯等多处铜矿开采、冶炼和铸造遗址,表明不晚于二里头文化时期,中条山腹地的铜矿已得到开采,二里冈文化时期规模有所扩大,并可肯定本地区主要进行采矿和冶炼活动,为铸造业输送原料,而铜礼器和兵器的生产应主要集中在区域性中心聚落,充分表明早期王朝国家对铜资源及其产业链的直接控制^[20]。各地区早期冶铜业的共性是普遍存在采冶分离,采矿在山,冶炼近水,河流是重要通道,普遍使用欧亚大陆常见的亚腰形采矿石器,冶炼和铸造作坊经过精心选址;不同点在于中原和边疆地区往往具有不同的冶金生产管理模式,其中中原地区的青铜手工业最具标准化,冶金活动的生产组织管理对于社会复杂化以及早期国家的形成有着重要的推动作用^[21]。这项工作于 2022 年孵化出中国考古领域第一个科技基础资源调查专项“中国先秦两汉时期矿冶遗址综合调查”,凸显冶金考古研究的影响力和引领性。

随着田野考古工作的开展,特别是以 2003 年在河南安阳殷墟孝民屯和陕西周原李家铸铜作坊的发掘为标志,学界愈加关注铸铜遗址的调查、发掘与研究。最直接的结果是,近 20 年来若干重大研究课题和田野考古发掘项目得到批准实施,在河南安阳洹北商城和辛店、安徽阜南台家寺、湖北黄陂盘龙城和郭元咀、江苏镇江孙家村、江西九江莽麦岭、宁夏彭阳姚河源、新疆尼勒克吉仁台沟口等地新发现、发掘了近百处商周时期冶铸铜作坊,呈遍地开花之势,新理念、新方法和新成果不断涌现^[22],来自国内外各高校和文物考古研究机构的年轻一代学者更加紧密地合作起来,从不同侧面研究商周青铜冶铸业问题,成为当前冶金考古的突出特点。

通过铸造工艺考察也可研究青铜器的生产技术和背景。早在安阳殷墟发掘初期,李济已将青铜器的制造列为青铜器研究内容之首,1960 年代其与万家保合作研究青铜器铸造工艺,是中国考古学家利用科技考古方法进行金属铸造技术研究的发端^[23]。20 世纪 70 年代,华觉明等^[24-26]对妇好墓出土青铜器、随州曾侯乙墓出土编钟、曾侯乙尊盘制作

技术进行研究。20世纪80年代,谭德睿^[27]编纂中国古代失蜡铸造图录、讨论失蜡法的源流和传统失蜡铸造工艺。郭宝钧^[28]也将铸造技术纳入考量,探讨了包括早期铜器焊接工艺在内的诸多问题。随后,苏荣誉等^[29]先后发表关于宝鸡虢国墓地、新干大洋洲商墓青铜器群的铸造技术研究;并结合文献考订、实物分析检测等多种研究手段,对金属技术的起源、发展以及不同金属的综合运用进行了系统论述。廉海萍^[30]展开了对东周时期陶范、铜兵器的科技检测分析研究。刘煜^[31]对殷墟铸铜作坊出土陶范、铜器进行细致研究,补充大量铸型制作、设计、组合方面的细节。张昌平等^[32]梳理中国青铜时代青铜器制作技术的关键变化,通过对芯撑设置、分型设计、分铸焊接等技术的讨论,为青铜器及冶金考古研究提供了新的视角和方法。关于曾侯乙尊盘是否为失蜡法铸造的争议,以及四川广汉三星堆出土风格迥异的青铜器、陕西临潼秦兵马俑遗址出土青铜水禽和东周锻造青铜容器的制作工艺研究成果,则进一步深化了关于中国古代青铜器制作工艺体系的认识。

由以上讨论可以看出,青铜器块范法铸造技术体系的形成,是冶金术传入中国之后的第一次本土化创造,也是区别于其他文明的典型特征。分析青铜冶铸技术本土化的原因,一是技术积累,中国新石器时代晚期已经有高水平的找矿、高温控制和制模翻范技术,为青铜器块范法铸造技术体系的形成奠定基础;二是社会需求,当青铜器及冶铜技术进入中原地区后,中原贵族选择并垄断了青铜器这种新型奢侈品的生产与使用,并通过青铜资源的贡赋、赏赐等手段,构建青铜礼制,形成等级关系,提升和彰显自身的社会地位,强化统治秩序。青铜器冶铸技术本土化的结果是,因对金属资源占有及流通网络的管理,提升了国家治理方式,扩大了早期国家的疆域。故青铜冶炼技术对中原早期国家的形成起到了“牵一发而动全身”的关键性作用,是中原社会真正进入早期国家文明的一个重要推动力量^[33]。

2.2 中国古代青铜资源与产品流通网络研究

纵观中国从新石器时代中期至秦汉时期的社会变迁,冶金技术的发展起到重要推动作用,在这一过程中,金属物料和产品流通网络的构建是关键因素。中原地区发展出与王权和礼制密切结合的发达的青铜器产业格局,对远离都邑地区金属原料的需求,导致广域范围内的社会演进得以加速,从而打破了各地域性文明并列的格局,形成了以中原为中心的广域性的中华文明。如二里头遗址铸铜作坊与宫殿区

仅一路之隔,并筑有围垣以起到保护作用,这种集中分布式的作坊布局在中原地区数处都邑性聚落中具有相同特点,说明铸铜业是国家严格控制的生产活动之一。终夏商周三代,青铜物料始终都是王权国家着意控制的关键资源,对这种贵重资源的生产、利用或占有,以及控制性的生产活动,其背后应有配套的支撑网络与管理系统。

古代金属生产、流通的组织管理对古代中国国家治理产生了深远影响。目前,随着众多商周时期青铜冶铸遗址的发现,学者试图通过冶铸作坊的时空分布与功能布局,探讨冶金生产在国家治理层面的作用^[34],指出青铜冶铸业的出现对中原社会文明化进程产生了重要影响,是该地区进入早期国家的关键性推动力量^[35]。而二里头文化对晋南地区的控制、商周王朝向长江中游铜矿区的扩张,体现了中央王朝对于铜矿资源产区的重视,同时三代为了保证铜料资源运输通道的安全与稳定,采取了一系列包括征伐与赏赐在内的“政治行为”,对特定区域内地方权力格局重塑产生重要影响,如西周王朝在“金道锡行”战略之下,江汉地区诸姬封国的建立则是例证。

学者从金属资源及产品流通网络构建的角度探讨三代青铜产业发展与国家治理的关系,收获重大。1980年代初,金正耀^[36]首次发现商代青铜器中含有高放射性成因铅,揭示了高放射性成因铅随时间而变的历史过程,并以此为基础,讨论了金属资源的控制和流通问题。之后,铅同位素比值这一方法广泛应用于青铜器的流通和物料产地溯源研究^[37]。张吉、陈建立等关于金属物料流通网络的研究表明^[38-45],在二里头至早商时期,青铜物料主要由中原流向南方,商代中晚期至西周早期,南方冶金业逐步发展,青铜物料在中原与南方之间双向流动;西周中期起,长江中下游形成多个冶铜业中心,成为中原地区最主要的铸铜资源地,同时长江中游与下游凭借各自资源禀赋长期竞争,南岭的锡在其中举足轻重,吸引广域金属流通网络不断向南延伸;整个商周时期,中原各地之间的金属物料产地几乎同步转变、过程高度一致,代表了金属原材料在各地区之间的互通,从而指示政府对青铜业及铸铜资源的严格控制。

2.3 中国古代钢铁技术体系的形成与发展研究

1974年到1980年代,集中形成了一批代表性成果,基本构建出中国古代钢铁技术体系,相关成果1987年获国家自然科学奖三等奖。其中1975年李众《中国封建社会前期钢铁冶炼技术发展的探讨》一文,确定了中国古代钢铁技术体系的基本框架与内

容,描述了铁器显微组织、成分、非金属夹杂物特征及其成因,成为认识古代钢铁遗存性质的重要依据。这项研究为之后构建铁器制作工艺判定方法奠定了基础。河南巩县铁生沟、南阳瓦房庄、郑州古荥等汉代冶铁遗址的发掘及出土资料整理,为认识封建社会早期生产力水平提供了关键实证。

20世纪90年代以来,铁冶金考古的理论与方法研究取得一系列重大收获。宏观方面,更加注重冶铁技术的起源、发展和传播问题,充分运用“操作链”和“运营链”理论及空间信息技术等现代科技手段,有了示范性成果^[46]。微观方面,更加重视从冶金原理角度探讨铁器材质和冶炼技术的判定标准问题,特别是在炒钢工艺判定标准的建立方面有重大进展^[47]。在山东章丘东平陵、陕西杨陵郃城、河南鲁山望城岗和福建安溪下草埔等冶铁遗址的发掘及多学科合作研究,展现了冶金考古与田野考古交融的新方法与新理念。

冶铁技术起源问题持续得到关注。研究发现,新疆早在距今5000年左右就利用了陨铁,与中亚地区联系密切^[48],中原最早的陨铁制品是河北藁城台西村商代墓地出土的铁刃铜钺^[5];甘肃陈旗磨沟距今3300年左右寺洼文化墓地出土了目前中国最早的人工冶铁(块炼铁)制品,但块炼铁制品在新疆迟到公元前10世纪开始、在中原地区大致在公元前8世纪,才得到较为广泛的使用^[49];在豫陕晋交界地带的河南三门峡虢国墓地、陕西韩城梁带村墓地和山西曲沃天马曲村遗址,集中出土了一批春秋前期的陨铁、块炼铁和生铁制品,其中生铁是迄今世界上年代最早的^[50]。因此,我们认为中国生铁冶炼技术是在块炼铁技术的刺激下,基于社会经济发展需求,结合中原地区已有的制陶、铸铜技术传统,率先在晋陕豫交界地带发明,并逐步发展演变出具有中原独特“华夏风格”的生铁冶炼和生铁制钢技术体系。

冶铁设施和耐火材料研究是本时期颇有新意的研究成果。李京华、刘云彩、韩汝玢等聚焦于冶炼设施,通过总结文献和考察重点遗址,指出古代冶铁竖炉起源于冶铜炉,复原了冶铁竖炉、炒钢炉和退火窑结构,初步总结了冶铁竖炉的演变模式^[50-51]。黄兴等^[52]在系统整理炼炉遗存资料的基础上,将古代冶铁竖炉分为“六型九式”,并从鼓风技术变革的视角探讨了冶铁竖炉演进的驱动因素。刘海峰^[53]则以竖炉炉壁为研究对象,综合文献梳理、田野调查和实验室分析结果,将制铁炉壁分为黏土质、砂质、砂泥质和石质等材质,并描绘出炉壁材料随时代变化的

清晰发展脉络。

关于块炼铁遗址的发现、确认与保护工作,成为近年来铁冶金考古重大收获之一。黄全胜等从冶铁遗址的田野调查入手,在广西贵港发掘出“碗式”炼炉,利用炉渣分析的方法,确认汉代至六朝时期的块炼铁冶炼遗址,属国内首次^[54]。李映福^[55]认为这种“碗式”炼炉的起源与世界其他地区“碗式”炼炉的起源途径相同,是西亚地区“碗式”炼炉对外扩散的结果,其传播线路是沿印度洋经由西亚、南亚、东南亚传入。在福建安溪下草埔^[56]、湖北大冶^[57]等地也发现宋元至清代的块炼铁遗存,说明块炼铁与生铁冶炼两种技术长期并存,因社会环境、资源禀赋等差异呈现不同的技术选择面貌。特别是福建安溪下草埔遗址于2021年7月25日成为中国首个被列入世界文化遗产点的冶铁遗址,意义重大。

生铁冶炼和生铁制钢技术体系是继青铜冶铸技术之后世界冶金史上的又一重大发明创造。为克服生铁性脆的缺点,中原地区发明了世界上最早的铸铁退火和炒钢等技术,最终在秦汉时期形成一套较为完整的钢铁技术体系^[58]。从陨铁、块炼铁到生铁冶炼的技术演变轨迹,准确展示了冶铁技术从西北到中原地区不断进步的发展历程。中原地区接受块炼铁冶炼技术的同时,将其与本区域发达的青铜冶铸技术传统结合,创造性地发明了以生铁为基础的钢铁技术体系,并向周边地区传播,对秦汉帝国的建立和东亚地区的文明进程产生了重要影响,再次体现了中华文明包容性和创新性的特点。

2.4 其他有色金属冶炼技术研究

关于早期金器的制作工艺、使用制度及其反映的文化交流问题,杨军昌、黄维等人的工作揭示出早期金器多为未经精炼的自然金锻造成形的特点,并提出中国早期黄金工艺及其制品与中亚地区有密切联系,但中原地区存在改造与创新,从而形成商周时期金器使用方式南北有别的特点^[59-60]。但无论从材料还是技术角度,金矿的开采、冶炼和精炼技术研究工作非常少见,刘思然等^[61]关于江西上饶包家金矿的研究是这方面的突破。他们通过田野调查、矿石和炉渣的检测分析,基本复原了包家金矿冶炼流程,这是国内首次发现的火法炼金证据。

锡是青铜冶铸活动中重要的金属资源之一。目前经过科学鉴定,中国最早的锡器是公元前16世纪新疆小河墓地出土的纯锡耳环^[62];内蒙古克什克腾旗喜鹊沟遗址、哈巴其拉遗址是目前经过考古发掘年代最早的锡矿开采和冶炼遗址,年代为商代中晚

期^[63];另外在湖北赤壁大湖咀遗址、荆州纪南城遗址等地也发现两周时期炼锡遗存,各项研究工作进展顺利。陕西、山西、湖北、云南、江西等地出土一定数量两周时期的锡器、锡及铅锡焊料。这些证据说明中国至少自公元前1500年前后已经存在炼锡技术,也证明当时已经可以直接使用金属锡来配制青铜。李延祥等^[64]关于广西贺县铁屎岭遗址炼锡技术研究首次科学认定宋代两步炼锡流程,他还通过文献的梳理指出山西可能存在锡矿^[65],值得关注。

铅是青铜冶铸活动中另一重要的金属资源,因银铅通常共生,故炼银技术通常与炼铅技术一起考虑。考古发现较多数量的商周和历史时期铅锭,相关研究较多,本文主要讨论炼铅技术研究状况。目前,已在各地发现数十处从商周至明清时期炼铅遗址,其中宋金时期存在以煤炭为燃料的北方坩埚炼铅(银)技术区与以木炭为燃料的南方竖炉炼铅(银)技术区分,但坩埚冶炼和竖炉冶炼之间关系如何,目前尚不明晰。研究发现,中国古代存在三种主要的银铅矿石冶炼技术:第一种为直接熔炼法,第二种为烧结—还原熔炼法,第三种为铁还原沉淀熔炼法(简称铁还原法)。其中第三种方法的技术优势在于可以避免对含银铅矿进行死焙烧,减少银在焙烧时的损失,提高银的提取效率。文献中有关此法最早的记载为清乾隆年间,且只见其被应用于坩埚炼铅而非竖炉炼铅工艺中。近年来的冶金考古研究为了解此法在中国古代的发展历史提供了更多信息。经研究,江西上饶包家与上高蒙山东区、重庆石柱老厂坪和广西贺州铁屎岭等竖炉炼铅遗址,河北曲阳燕川、山西翼城等坩埚炼铅遗址,均使用铁还原法冶炼含银铅精矿。根据这些研究结果,显示中国可能是古代铁还原银铅冶炼技术的一个重要起源中心,而这项技术创新的产生与传播除与古代社会对于白银需求量的快速增长有关外,还显示了古代工匠对于铅、铁金属性能认识的加深。

中国是世界上最早掌握炼锌技术的国家之一。由于缺乏实物及考古资料,胡文龙、韩汝玢、徐笠和周卫荣等先后对贵州和云南的土法炼锌技术开展了系统调查,梅建军^[66]根据历史文献,研究了近代湖南、贵州、四川和云南等地的传统炼锌术。这些研究弥补了宋应星《天工开物》对炼锌术记载的模糊不清。2002年河南省文物考古研究所负责发掘的丰都庙背后明代冶炼遗址,经分析被确认为炼锌遗址,标志着中国炼锌史研究从文献调研、黄铜分析和传统工艺调查阶段发展到田野考古调查和发掘阶段^[67]。以此为契机,考古工作者在重庆市调查、发掘了30余处明清

炼锌遗址^[68];在广西罗城县、环江县调查了5处清代炼锌遗址;在湖南桂阳调查、发掘了桐木岭和陡岭下等14处清代炼锌遗址,并对这些遗址出土冶炼遗物进行了科技分析,取得较好示范意义。

2.5 冶金考古人才培养和学科建设成效显著

1970年代中期,柯俊、李京华、华觉明等在开展研究的同时,也不遗余力地培养年轻学者,创建了规模不等的研究团队。改革开放初期,北京科技大学、中国科学技术大学和中国科学院自然科学史研究所等单位已着力培养冶金考古方向的研究生,如金正耀、梅建军、李延祥和苏荣誉等在1980年代获得硕士学位的学者,不断开辟冶金考古研究新领域,至今仍活跃在研究一线。2000年以后的毕业生,不断进入考古文博单位和高校任职并逐渐成长起来,冶金考古更加受到各单位的重视。据不完全统计,目前包括中国社会科学院考古研究所、河南省文物考古研究院、北京科技大学、北京大学在内的45家考古文博单位和高校拥有在职冶金考古研究人员75人,约为1974年全国冶金考古研究人员的五倍,这是当前冶金考古研究的主要力量。

冶金考古专题培训工作的开展,为更好促进人才培养、交流以及行业的整体发展作出重要贡献。2016年,北京大学考古文博学院与湖南省文物考古研究院合作,在桂阳桐木岭炼锌遗址发掘期间,举办为期七天的冶金考古培训班,30多名来自考古文博单位和高校的工作人员参加。2016年至今,北京大学考古文博学院连续9年举办“冶金实验考古暑期课程”,已有国内外400余人参加。北京科技大学分别与伦敦大学学院、泰国艺术大学共同举办冶金考古暑期学校等,推动中外冶金考古青年学者与学生之间的相互交流。

中国冶金考古学者通过举办和参加国际学术会议、开展国际合作研究等方式扩大国际学术影响力。由北京科技大学柯俊教授和美国宾夕法尼亚大学麦丁教授(R. Maddin)共同发起的国际冶金史大会,1981年首次在北京召开,这是改革开放初期为数不多的在中国举办的国际性学术会议,促进了东西方冶金考古的交流和相互了解,反响强烈;1986、1995年分别在北京和三门峡召开第二和第三次会议,之后又在中国、日本、韩国、印度和泰国连续举办,2025年,将在福建泉州召开第11届大会。该会成为国际冶金史学界的盛会,影响愈来愈大,目前梅建军担任主席,潜伟、陈建立担任执委会委员。亚洲铸造技术史学会是由中日韩等国家铸造技术史研究者组成的

国际交流平台,目前白云翔任亚洲铸造技术史学会副会长、中国分会会长。该会每年召开一次年会,逐渐成为东亚地区冶金考古交流的优秀平台。2016年,北京科技大学成立了“考古材料研究研讨会”,迄今已连续举办9届,并推出英文学术期刊 *Advances in Archaeomaterials*,使冶金考古成为中心话题。另外,中国社会科学院考古研究所、四川大学、成都市文物考古研究院、河南省文物考古研究院等单位与日本、韩国开展的国际合作交流,促进了学术研究和人才培养。

3 中国冶金考古研究的问题与未来

3.1 中国冶金考古研究的突出问题

近年来,国内冶金考古工作成效显著,在一定程度上做到了考古学研究 with 冶金史研究的双赢,但仍有较多深层次问题需要系统性解决。考古学研究一般可以分为相互交织的三个方面,一是问题、观念和理论,二是研究方法和技术,三是田野考古发现,三个方面彼此衔接、相互依存^[69]。然而目前国内冶金考古在三个方面均存在体系化认识不足的问题。具体到研究问题方面,关于田野冶金考古和实验室工作整体流程的标准和规范体系尚未建立;冶金考古标本库与数据库建设尚不健全;古代金属材质和工艺的判定标准以及检测分析标样制备也有很多不足;在冶金术起源、发展、传播及其与文明进程的关系、三代青铜产业体系与国家治理体系演进、中国冶铁技术起源的时间和机制、铁器取代铜器的技术过程及其对社会的影响、生铁与生铁制钢技术体系促进秦汉帝国形成机制等问题尚未完全解决。再者,冶金考古在技术史、技术与社会、文明史三大视角以及在考古学与其他学科的交叉中,如何做好融合、转向并成为独立议题,如何回答至今尚不清楚的中国古代冶金技术是怎样和为什么能够影响文明起源、发展以及古代国家治理问题,以及如何为建设中华民族现代文明提供理论支撑尤为紧迫,但相关研究极为匮乏。

3.2 中国冶金考古研究的未来展望

针对冶金考古研究存在的问题,应继续深入不同地区金属冶炼遗址的调查工作,加强冶炼遗址田野考古的样品采集工作,全面揭示遗物、遗迹中蕴含的技术和文化信息,构建完善的冶炼设施形制与技术谱系;加强考古资料的整理工作,深化冶炼遗址的单位属性、功能分区和聚落结构研究;加强冶金考古理论、技术方法体系建设。

明确发展目标,推动冶金考古理论方法体系构

建。冶金考古的总目标是通过冶金技术的复原研究讨论文明起源和发展的途径与内在机制问题,这需要先进的理论和扎实的技术方法作为支撑。今后应探索更加有效的冶金考古田野工作方法、信息与样品采集方法、实验室分析技术等,构建基于数据驱动的科学分析、考古阐释和理论构建融合的冶金考古方法论,力求建立一套涵盖古代冶金与环境资源、技术创新、产业发展、社会建构、国家治理演进等方面的冶金考古研究“范式”,推动国内冶金考古研究进入新阶段。

研究学科历史,开辟冶金考古研究新局面。夏鼎和柯俊关于冶金考古合作研究的范例,需要认真梳理、学习并汲取营养,以更好指导今后研究工作。正确、合理地使用各类科技手段,最大限度获取冶金考古各类信息,准确阐释科学数据的考古价值,是两位前辈的工作理念,也是冶金考古学科史发展特点。今后的冶金考古工作,依然在于探索最新科技手段用于冶金考古的可能性,增强获取检测分析数据的快捷和准确性,持续开展兼顾全体与局部的田野考古和实验室分析工作以填补时空和技术空白,紧紧围绕资源、技术与文明问题加强冶金考古数据库建设和大数据分析,不断开辟冶金考古研究新局面。

加强基础研究,解决冶金考古重点难点问题。首先是全面深化关于矿冶遗址、冶铸遗物和金属制品的综合研究,构建更加清晰的中国古代冶金技术发展谱系,深入探讨其形成机制。其次是加强冶金技术传播、金属物料和器物的流通机制研究。冶金技术传播方面,今后应对部分关键区域进行系统调查与发掘,把握关键技术要素在不同区域出现的时间节点,研究技术扩散模式。关于金属物料和器物流通问题,应从科技检测、传统类型学或铭文信息、文献资料记载等方面多管齐下,对使用范围和流通网络进行细致梳理,探讨物料流通机制。最后,加强冶金业与社会经济发展和国家治理之间关系的理论研究,提出相关理论成果。

4 结束语

五十年来,随着现代科技的发展以及中华文明探源工程等一系列重大项目的实施,中国冶金考古在多种金属冶炼技术的起源、发展、传播与技术谱系的构建等方面都取得了一系列丰硕成果,基本构建出先秦时期青铜资源流通网络,初步探讨了冶金技术与文明起源和国家治理的关系问题。然而,在田野冶金考古与信息采集、古代金属材质与工艺及其流通关键技术、古代冶金与文明和国家起源发展机制研究等方面仍具有较大潜力。今后应积极推进冶

金考古理论和方法体系建设,不断开拓冶金考古新领域,持续深化金属资源、冶金技术与文明发展之间互动关系综合研究,进一步提高冶金考古理论与实践成果服务中华民族现代文明建设能力。

参考文献

- [1] 李恒德. 中国历史上的钢铁冶金技术[J]. 自然科学, 1951(7):591.
LI H D. Steel metallurgy technology in Chinese history[J]. Natural Sciences, 1951(7):591.
- [2] 张子高. 六齐别解[J]. 清华大学学报(自然科学版), 1958(2):159-166.
CHANG T K. A critical interpretation of “Liu-Chi”[J]. Journal of Tsinghua University (Natural Science Edition), 1958(2):159-166.
- [3] 华觉明, 杨根, 刘恩珠. 战国两汉铁器的金相学考查初步报告[J]. 考古学报, 1960(1):73-88, 136-143.
HUA J M, YANG G, LIU E Z. Preliminary report on the metallographic examination of ironware from the Warring States period to the Han Dynasties[J]. Acta Archaeologica Sinica, 1960(1):73-88, 136-143.
- [4] 杨宽. 试论中国古代冶铁技术的发明和发展[J]. 文史哲, 1955(2):26-30.
YANG K. On the invention and development of iron smelting technology in ancient China[J]. Literature, History and Philosophy, 1955(2):26-30.
- [5] 河北省博物馆文物管理处. 河北藁城台西村的商代遗址[J]. 考古, 1973(5):266-271, 329-331.
Cultural Relics Management Office at Hebei Museum. The Shang Dynasty site in Taixi village, Gaocheng, Hebei province[J]. Archaeology, 1973(5):266-271, 329-331.
- [6] 夏鼐. 晋周处墓出土的金属带饰的重新鉴定[J]. 考古, 1972(4):34-39.
XIA N. Re-identification of metal belt decorations unearthed from Zhouchu tomb of the Jin dynasty[J]. Archaeology, 1972(4):34-39.
- [7] 李众. 中国封建社会前期钢铁冶炼技术发展的探讨[J]. 考古学报, 1975(2):1-22, 174-179.
LI C. The development of iron and steel technology in ancient China[J]. Acta Archaeologica Sinica, 1975(2):1-22, 174-179.
- [8] 大冶市铜绿山古铜矿遗址保护管理委员会. 铜绿山古铜矿遗址考古发现与研究[M]. 北京:科学出版社, 2013.
Tonglushan Ancient Copper Mine Site Protection and Management Committee of Daye City. Archaeological discoveries and research on the copper mine site in Tonglushan[M]. Beijing: Science Press, 2013.
- [9] 王巍. 中国考古学百年史(1921—2021)[M]. 北京:中国社会科学出版社, 2021.
WANG W. A century history of Chinese archaeology (1921—2021) [M]. Beijing: China Social Sciences Press, 2021.
- [10] 孙淑云, 韩汝玢. 中国早期铜器的初步研究[J]. 考古学报, 1981(3):287-302.
SUN S Y, HAN R B. Preliminary study of early Chinese copper and bronze artefacts [J]. Acta Archaeologica Sinica, 1981(3):287-302.
- [11] 华觉明. 中国古代金属技术:铜和铁造就的文明[M]. 郑州:大象出版社, 1999.
HUA J M. Ancient Chinese metallurgy: a civilization made of copper and iron [M]. Zhengzhou: Daxiang Press, 1999.
- [12] 苏荣誉, 华觉明, 李克敏, 等. 中国上古金属技术[M]. 济南:山东科学技术出版社, 1995.
SU R Y, HUA J M, LI K M, et al. Ancient Chinese metallurgy[M]. Ji'nan: Shandong Science and Technology Press, 1995.
- [13] FAN X, HARBOTTLE G, GAO Q, et al. Brass before bronze? early copper-alloy metallurgy in China [J]. Journal of Analytical Atomic Spectrometry, 2012, 27(5):821-826.
- [14] 郭静云, 邱诗莹, 范梓浩, 等. 中国冶炼技术本土起源:从长江中游冶炼遗存直接证据谈起(一)[J]. 南方文物, 2018(3):57-71.
GUO J Y, QIU S Y, FAN Z H, et al. The local origin of Chinese smelting technology: starting from direct evidence of smelting remnants in the middle reaches of the Yangtze river (Part 1) [J]. Cultural Relics in Souther China, 2018(3):57-71.
- [15] 安志敏. 试论中国的早期铜器[J]. 考古, 1993(12):1110-1119.
AN Z M. Early bronze ware in China[J]. Archaeology, 1993(12):1110-1119.
- [16] 李水城. 西北与中原早期冶铜业的区域特征及交互作用[J]. 考古学报, 2005(3):239-275, 278.
LI S C. Regional characteristics and interaction of early copper smelting industry in Northwest and Central Plains [J]. Acta Archaeologica Sinica, 2005(3):239-275, 278.
- [17] 陈坤龙, 梅建军, 潜伟. 丝绸之路与早期铜铁技术的交流[J]. 西域研究, 2018(2):127-137, 150.
CHEN K L, MEI J J, QIAN W. Silk Road and the exchange of early bronze and iron techniques[J]. The Western Regions Studies, 2018(2):127-137, 150.
- [18] 金正耀. “何以河南”之问与中国科技考古新方向[J]. 历史研究, 2020(5):28-36.

- JIN Z Y. The question of "Why Henan" and the new direction of China's archaeological science[J]. Historical Research, 2020(5): 28-36.
- [19] 李延祥, 陈国科, 潜伟, 等. 张掖西城驿遗址冶铸遗物研究[J]. 考古与文物, 2015(2): 119-128.
- LI Y X, CHEN G K, QIAN W, et al. Research on metallurgical remains of Xichengyi site at Zhangye[J]. Archaeology and Cultural Relics, 2015(2): 119-128.
- [20] 崔春鹏, 戴向明, 田伟, 等. 夏及早商时期晋南地区的冶铜技术: 以山西绛县西吴壁遗址为例[J]. 考古, 2022(7): 96-108.
- CUI C P, DAI X M, TIAN W, et al. Copper smelting technology in southern Shanxi during the Xia and Early Shang Dynasties: a case study of the Xiwubi site in Jiang county, Shanxi province[J]. Archaeology, 2022(7): 96-108.
- [21] 万辅彬, 李延祥. 冶金考古行万里 另辟蹊径探文明: 李延祥教授访谈录[J]. 广西民族大学学报(自然科学版), 2019(2): 1-11.
- WAN F B, LI Y X. Archaeometallurgy travels thousands of miles to explore civilization in a new way: interview with Professor Li Yanxiang[J]. Journal of Guangxi Minzu University (Natural Science Edition), 2019(2): 1-11.
- [22] 陈建立, 刘煜. 冶金考古 I: 商周青铜器的陶范铸造技术研究[M]. 北京: 文物出版社, 2011.
- CHEN J L, LIU Y. Archaeometallurgy I: research on bronze casting technology of Shang and Zhou wares[M]. Beijing: Cultural Relics Press, 2011.
- [23] 李济, 万家保. 殷墟出土青铜爵形器之研究[M]//古器物研究专刊第二本. 中央研究院历史语言研究所, 1966.
- LI J, WAN J B. Research on the bronze Jue unearthed in Yinxu [M]//The special issue on the study of antiquities II. [S. l.]: the Institute of History and Philology, Academia Sinica, 1966.
- [24] 华觉明. 曾侯乙编钟复制研究中的科学技术工作[J]. 文物, 1983(8): 55-60.
- HUA J M. The scientific and technological research of the replica of chime-bells of Marquis Yi of the Zeng State[J]. Cultural Relics, 1983(8): 55-60.
- [25] 华觉明, 冯富根, 王振江, 等. 妇好墓青铜器群铸造技术的研究[M]//考古学集刊. 北京: 中国社会科学出版社, 1981: 244-272.
- HUA J M, FENG F G, WANG Z J, et al. Research on the casting technology of bronze objects from Fu Hao's tomb[M]//Archaeological Bulletin, Beijing. China Social Sciences Press, 1981: 244-272.
- [26] 华觉明, 贾云福. 曾侯乙尊、盘和失蜡法的起源[J]. 自然科学史研究, 1983(4): 352-359.
- HUA J M, JIA Y F. Zun, Pan of Marquis Yi of the Zeng State and the origin of the lost wax casting methods[J]. Studies in the History of Natural Sciences, 1983(4): 352-359.
- [27] 谭德睿. 灿烂的中国古代失蜡铸造[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1989.
- TAN D R. Splendid ancient Chinese lost wax casting methods[M]. Shanghai: Shanghai Science and Technology Press, 1989.
- [28] 郭宝钧. 商周铜器群综合研究[M]. 北京: 文物出版社, 1981.
- GUO B J. A comprehensive study of bronze objects from Shang and Zhou Dynasty [M]. Beijing: Cultural Relics Press, 1981.
- [29] 苏荣誉, 华觉明, 李克敏, 等. 中国上古金属技术[M]. 济南: 山东科学技术出版社, 1995.
- SU R Y, HUA J M, LI K M, et al. Ancient Chinese metallurgy[M]. Ji'nan: Shandong Science and Technology Press, 1995.
- [30] 廉海萍. 河北省易县燕下都战国陶范的分析研究[J]. 文物保护与考古科学, 1992(4): 25-31.
- LIAN H P. A study on the performance of the casting clay moulds in Warring States in Yan-xiadu county in Hebei province [J]. Sciences of Conservation and Archaeology, 1992(4): 25-31.
- [31] 刘煜. 殷墟出土青铜礼器铸造工艺研究[M]. 广州: 广东人民出版社, 2019.
- LIU Y. Research on the casting process of bronze ritual vessels unearthed in Yinxu [M]. Guangzhou: Guangdong People's Publishing House, 2019.
- [32] 张昌平, 刘煜, 岳占伟, 等. 二里冈文化至殷墟文化时期青铜器范型技术的发展[J]. 考古, 2010(8): 79-86.
- ZHANG C P, LIU Y, YUE Z W, et al. The development of bronze casting technology from the Erligang culture to the Yinxu culture[J]. Archaeology, 2010(8): 79-86.
- [33] 刘莉, 陈星灿. 中国早期国家的形成: 从二里头和二里岗时期的中心和边缘之间的关系谈起[M]//古代文明(第一卷). 北京: 文物出版社, 2002: 71-134.
- LIU L, CHEN X C. The formation of early Chinese states: starting from the relationship between the center and the periphery during the Erlitou and Erligang periods[M]//Ancient Civilization (Volume 1). Beijing: Cultural Relics Press, 2002: 71-134.
- [34] 常怀颖. 夏商西周城邑的街区制布局新识[J]. 江汉考古, 2024(4): 68-79.
- CHANG H Y. New insights into the block layout of cities in the Xia, Shang, and Western Zhou Dynasties[J]. Jiangnan Archaeology, 2024(4): 68-79.

- [35] 张海,陈建立. 史前青铜冶铸业与中原早期国家形成的关系[J]. 中原文物, 2013(1):52-59,90.
ZHANG H, CHEN J L. The relationship between prehistoric bronze industry and the formation of early Central Plains countries[J]. Cultural Relics of Central China, 2013(1):52-59,90.
- [36] 金正耀. 中国铅同位素考古[M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 2008.
JIN Z Y. Lead isotope archaeology in China [M]. Hefei: University of Science and Technology China Press, 2008.
- [37] 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.
CUI J F, WU X H. Lead isotope archaeological study: the case of bronzes excavated in Yunnan, China and Viet Nam[M]. Beijing: Cultural Relics Press, 2008.
- [38] 张吉, 陈建立. 东周青铜器铅同位素比值的初步研究[J]. 南方文物, 2017(2):94-102.
ZHANG J, CHEN J L. A preliminary study on lead isotope ratio in bronzes of Eastern Zhou Dynasty[J]. Cultural Relics in Southern China, 2017(2):94-102.
- [39] 张天宇, 张吉, 黄凤春, 等. 叶家山 M111 出土的商代铁援铜戈[J]. 江汉考古, 2020(2):110-115.
ZHANG T Y, ZHANG J, HUANG F C, et al. Discovery of bronze ge-dagger with iron yuan-blade of the Shang Dynasty in Tomb M111 at the Yejiashan Cemetery[J]. Jiangnan Archaeology, 2020(2):110-115.
- [40] 王庆铸, 郭俊峰, 陈建立, 等. 济南市刘家庄遗址出土商代青铜器的铅同位素分析[J]. 考古, 2021(7):106-120.
WANG Q Z, GUO J F, CHEN J L, et al. Lead isotope analysis of Shang bronzes unearthed at the Liujiashan Site in Jinan city[J]. Archaeology, 2021(7):106-120.
- [41] 张吉, 郜向平, 丁思聪, 等. 河南荥阳官庄遗址铸铜技术与金属资源变迁初步研究[J]. 南方文物, 2021(2):162-173.
ZHANG J, GAO X P, DING S C, et al. The preliminary research on copper casting technology and metal resources changes of Guanzhuang Site, Xingyang, Henan province[J]. Cultural Relics in Southern China, 2021(2):162-173.
- [42] 张吉, 柏艺萌, 梁志龙, 等. 公元前一千纪通往辽东山地的青铜物流动[J]. 南方文物, 2022(5):198-210.
ZHANG J, BAI Y M, LIANG Z L, et al. The flow of bronze materials towards the Liaodong Mountainous Region in the Millennium B. C. [J]. Cultural Relics in Southern China, 2022(5):198-210.
- [43] 张吉, 何汉生, 徐征, 等. 江苏镇江孙家村遗址出土青铜器及铸铜遗物的分析研究[J]. 江汉考古, 2022(5):117-128.
ZHANG J, HE H S, XU Z, et al. Scientific analysis of the bronzes and casting remains unearthed at the Sunjiacun Site in Zhenjiang city of Jiangsu province[J]. Jiangnan Archaeology, 2022(5):117-128.
- [44] 胡毅捷, 孙战伟, 种建荣, 等. 陕西澄城刘家洼遗址东I区墓地出土青铜器的技术与资源研究[J]. 文物, 2023(4):86-96.
HU Y J, SUN Z W, ZHONG J R, et al. Research on techniques and resources of bronzes unearthed from East I Cemetery of Liujiawa Site in Chengcheng, Shaanxi[J]. Cultural Relics, 2023(4):86-96.
- [45] SUN Z F, LIU S R, YANG S G, et al. Investigating the origins of metals used in the Early Shang capital of Zhengzhou [J]. Journal of Archaeological Science, Reports, 2023, 48: 103872. DOI: 10. 1016/j. jasrep. 2023. 103872.
- [46] 陈建立. 中国古代冶金研究: 对“生业与社会”冶金考古专题的总结和思考[J]. 南方文物, 2022(5):135-142,115.
CHEN J L. Research on ancient Chinese metallurgy: a summary and reflection on the special topic of archaeometallurgy [J]. Cultural Relics in Southern China, 2022(5):135-142,115.
- [47] 张周瑜. 炒钢工艺研究[D]. 北京: 北京科技大学, 2022.
ZHANG Z Y. A research on steel fining process in ancient China [D]. Beijing: University of Science and Technology Beijing, 2022.
- [48] 张昕瑞, 李延祥, 阿里甫江·尼亚孜. 新疆托里县那仁苏墓地出土陨铁器分析[J]. 西域研究, 2023(3):88-94,175.
ZHANG X R, LI Y X, ARIFUJIANG NIYAZI. The analysis of meteoric iron objects unearthed from the Narensu cemetery in Tuoli county, Xinjiang [J]. The Western Regions Studies, 2023(3):88-94,175.
- [49] 陈建立, 毛瑞林, 王辉, 等. 甘肃临潭磨沟寺洼文化墓葬出土铁器与中国冶铁技术起源[J]. 文物, 2012(8):45-53,2.
CHEN J L, MAO R L, WANG H, et al. Research on the iron artifacts from the Siwa cultural tomb in Mogou, Lintan, Gansu and the origin of Chinese iron smelting technology [J]. Cultural Relics, 2012(8):45-53,2.
- [50] 韩汝芬, 柯俊. 中国科学技术史: 矿冶卷[M]. 北京: 科学出版社, 2007:377-389.
HAN R B, KO T. Chinese history of science and technology: mining and metallurgy[M]. Beijing: Science Press, 2007:377-389.
- [51] 刘云彩. 中国古代高炉的起源和演变[J]. 文物, 1978(2):18-27.
LIU Y C. The origin and evolution of blast furnaces in ancient China[J]. Cultural Relics, 1978(2):18-27.

- [52] 黄兴,潜伟. 中国古代冶铁竖炉炉型研究[M]. 北京:科学出版社,2022.
HUANG X, QIAN W. Research on the typology of ancient Chinese iron-smelting shaft furnace [M]. Beijing: Science press, 2022.
- [53] 刘海峰. 中国古代制铁炉壁材料初步研究[D]. 北京:北京科技大学,2015.
LIU H F. Preliminary study on the materials of ancient Chinese iron-making furnaces[D]. Beijing: University of Science and Technology Beijing, 2015.
- [54] 北京大学考古文博学院, 泉州市文化和广电旅游局, 安溪县人民政府, 等. 安溪下草埔遗址 2019—2020 年度考古发掘报告[M]. 北京:文物出版社,2021.
Peking University, School of Archaeology and Museology, Quanzhou Municipal Bureau of Culture, Radio, Television and Tourism, Anxi County People's Government, et al. Archaeological excavation report of Anxi Xiacaopu site for 2019—2020[M]. Beijing: Cultural Relics Press, 2021.
- [55] 李映福. 广西平南“碗式”炼炉与我国“碗式”炼炉的起源[J]. 考古, 2014(6):64-77, 2.
LI Y F. The “bowl” furnace in Pingnan, Guangxi and the origin of the “bowl” furnace in China [J]. Archaeology, 2024(6):64-77, 2.
- [56] 黄全胜. 广西贵港地区古代冶铁遗址调查与炉渣研究[M]. 桂林:漓江出版社,2013.
HUANG Q S. Investigation and study of ancient iron smelting sites and slags in Guigang area, Guangxi[M]. Guilin: Lijiang Press, 2013.
- [57] LARREINA- GARCIAA D, LI Y X. Bloomery iron smelting in the Daye county (Hubei): technological traditions in Qing China[J]. Archaeological Research in Asia, 2018(16):148-165.
- [58] 陈建立,韩汝汾. 汉晋中原及北方地区钢铁技术研究[M]. 北京:北京大学出版社,2007:72.
CHEN J L, HAN R B. Research on the iron and steel making technology in the Central Plains and Northern regions of the Han and Jin periods[M]. Beijing: Peking University Press, 2007:72.
- [59] YANG J C, PULL J, CHEN J L. Archaeometallurgy IV: gold in ancient China 2000—200BCE[M]. Beijing: Cultural Relics Press, 2017.
- [60] 黄维,陈建立,王辉,等. 冶金考古 II: 马家塬墓地出土金属制品的技术研究;兼论战国时期西北地区文化交流[M]. 北京:北京大学出版社,2013.
HUANG W, CHEN J L, WANG H, et al. Archaeometallurgy II: technical study on metal products excavated from Majiayuan cemetery; also on cultural exchange in northwest China during the Warring States period[M]. Beijing: Peking University Press, 2013.
- [61] 刘思然,陈建立,徐长青,等. 江西上饶包家金银冶炼遗址的冶金考古调查与研究[J]. 南方文物, 2016(1):122-131.
LIU S R, CHEN J L, XU C Q, et al. Archaeological survey and research on the Baojia silver and gold smelting site in Shangrao, Jiangxi province[J]. Cultural Relics in Southern Chian, 2016(1):122-131.
- [62] 梅建军,凌勇,陈坤龙,等. 新疆小河墓地出土部分金属器的初步分析[J]. 西域研究, 2013(1):39-49, 141.
MEI J J, LIN Y, CHEN K L, et al. A preliminary scientific analysis of metal objects excavated from the Xiaohe cemetery in Xinjiang, China[J]. The Western Regions Studies, 2013(1):39-49, 141.
- [63] 王立新,付林. 论克什克腾旗喜鹊沟铜矿遗址及相关问题[J]. 考古, 2015(4):79-87, 2.
WANG L X, FU L. Research on the Xiqueogou copper mine site and related issues in Keshiketeng banner[J]. Archaeology, 2015(4):79-87, 2.
- [64] 李延祥,周卫荣. 广西贺县铁屎岭遗址宋代锡铅及含锡铁钱冶炼技术初步研究[J]. 有色金属, 2000, 52(2):91-95.
LI Y X, ZHOU W R. Study on smelting of tin, lead, and tin-contained iron coin in He county, Guangxi in Song Dynasty[J]. Nonferrous Metals, 2000, 52(2):91-95.
- [65] 李延祥.《中国通邮地方物产志》记载山西产锡及其意义[J]. 有色金属, 2004, 56(8):146-150.
LI Y X. Significance of Tin Production Records in Shanxi Province in 1930's[J]. Nonferrous Metals, 2004, 56(8):146-150.
- [66] 梅建军. 近代中国传统炼锌术[J]. 中国科技史料, 1990(2):22-26.
MEI J J. Traditional zinc smelting techniques in modern China [J]. Historical Materials of Chinese Science and Technology, 1990(2):22-26.
- [67] ZHOU W L, MARTINÓN-TORRES M, CHEN J L, et al. Distilling zinc for the Ming Dynasty: the technology of large scale zinc production in Fengdu, southwest China[J]. Journal of Archaeological Science, 2012, 39(4):908-921.
- [68] 重庆市文物局,重庆市移民局. 重庆炼锌遗址群[M]. 北京:科学出版社,2018.
Chongqing Cultural Heritage Administration, Chongqing Immigration Administration. Chongqingzinc smelting sites[M]. Beijing: Science Press, 2018.
- [69] 科林·伦福儒,保罗·巴恩. 考古学:理论与方法与实践[M]. 陈淳,译. 6 版. 上海:上海古籍出版社,2014.
RENFREW C, BAHN P. Archaeology: theories, methods, and practice[M]. CHEN C, translate. 6th ed. Shanghai: Shanghai Classics Publishing House, 2014.