

聚焦重大问题，寻求全面突破

——2016—2026年冶金考古研究综述

刘 煜 张周瑜

中国社会科学院科技考古与文化遗产保护重点实验室

摘要：2016—2026年，中国冶金考古在国家政策与重大科研项目支撑下，依托跨单位协同、多学科研究实现跨越式发展，学科建设、研究队伍与技术手段持续完善，铜铁冶金研究获全面突破，铅锡等有色金属研究加速推进。铜冶金考古厘清了夏商青铜冶铸技术体系的时空演进脉络，探讨西北地区在冶金术传播过程中的重要路径，并构建起商周青铜物料资源交流的时空网络，同时深化了铸造工艺、技术风格及区域特色研究；铁冶金考古进入精细化阶段，围绕钢铁技术判定方法、冶金机理展开探索，系统开展冶铁遗址田野工作并厘清其与社会经济的关联，复原模拟试验也取得系列成果。此外，铅、锡等有色金属的冶炼技术、物料利用等研究均获新进展。本阶段研究依托材料科学以及理化检测，完善金属同位素考古的研究方法，引入CT扫描、机器学习等手段，与历史学、考古学等学科深度融合，为探索古代手工业发展、文明演进与区域互动提供了关键支撑，也为后续研究奠定了坚实基础。

关键词：冶金考古；青铜器；冶铸技术；产地研究；技术传播；钢铁技术

一、引言

2016—2026这十年，在构建中国特色哲学社会科学理论方向指导下，中国冶金考古研究取得了长足的进步和跨越式的发展，这不仅体现在学科建设的完善、学科平台的多元和学术队伍的壮大上，也体现在研究手段的增强以及研究内容的丰富上。借助田野考古的新发现与科技检测手段的广泛应用，以科技部支撑项目、重点研发项目、自然科学基金、社会科学基金、考古中国、科技振兴人才计划等重大项目为依托，采用多单位协

同合作、跨学科综合研究的范式，在铜和铁这样的传统研究领域里聚焦重大问题，寻求全面突破，而其他如铅、锡等有色金属的研究方兴未艾，呈现出加速的态势。

二、冶金考古的学科建设

近十年来，冶金考古的研究队伍持续扩大，以高校、各考古科研院所及博物馆为研究主体，如北京大学考古文博学院、北京科技大学科技史与文化遗产研究院、中国科学院大学考古学与人类学系、中国科学技术大学科技史与科技考古系、四川大学考古文博学院等高校院系，中国社会科学院科技考古与文化遗产保护重点实验室、中国科学院自然科学史研究所、国家考古中心等科研院所，以及陕西、河南、湖北、四川、山西等省市级考古研究院，上海博物馆、南京博物院、故宫博物院等大型博物馆等，均有自己的冶金考古团队或专业人才，共同承担着全国的冶金考古研究工作，也培养出大量研究人才。除了本科和研究生教学之外，很多单位还以夏令营、暑期学校、实习等多种方式，培养冶金考古的专业人才。

专业学术团体诸如世界冶金史大会（BUMA）、亚洲铸造技术史学会、东亚科技史学会（ICHSEA）、科技考古学会、中国科技史学会等召开的国际学术会议，以及各个学术团体召开的各种类型的学术研讨会和工作坊，构成讨论、交流、合作的公共平台。

多家单位协同合作，充分利用多学科综合研究方法，借助文明探源工程、商文明综合研究、夏商时期金属产地调查及溯源方法研究、先秦两汉时期矿冶遗址综合调查、可移动文物价值认知及关键技术研究（无机质类）等国家级课题的实施，在对学术史进行回顾和梳理的基础上，聚焦重大问题，寻求全面突破——在诸如青铜冶铸技术体系的形成及时空框架格局的建立、青铜冶铸技术起源和传播路径、金属物料来源及其流通、古代钢铁技术判定方法及其冶金机理研究、冶铁手工业发展与社会经济关系，模拟实验复原古代钢铁生产等方面取得重大进展。

三、冶金考古的研究进展

（一）综述性研究、探索与思考

中国古代青铜器的技术研究，伴随着中国考古学的发展，走过了接近百年的研究历程。可分为三个发展阶段^[1]，20世纪30年代到70年代末为起始阶段，其后到20世纪末为发展阶段。这两个阶段也被认为是考古学家和金属史家分别主导的阶段^[2]。从21世纪开始，进入综合研究阶段，将技术置于动态的历史进程之中，研究技术的传承、交流、

传播,更加注重手工业生产的研究^[3],关注作坊布局、生产流程、生产组织和管理、经济与社会形态的关系等问题。陈建立从20世纪70年代末成建制的冶金考古研究开始,总结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的重要成果,指出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^[4]。田长浒主编的《中国铸造发展史》(第一卷)^[5],是从铸造技术发展角度所作的学术史研究。作为科技考古研究的重要组成部分,冶金考古显现出技术进步以及综合研究的发展趋势^[6-7]。对卡尔贝尓克《安阳之范》以及盖顿斯《弗利尔艺术馆藏中国青铜器Ⅱ·技术研究》等经典著作的研究回顾^[8-9],探讨如何从前人著作中汲取营养并“更上一层楼”,在学术史的纵深维度中展示学术研究的生长路径。对传统工艺调查^[10]、田野考古^[11]、分析技术^[12-13]等研究手段的讨论,以及对一些研究专题的回顾,如二里头青铜器研究^[14]、海外青铜器的收藏和研究^[15]、长江中下游铜矿带的矿冶考古^[16]、坩埚炼铅技术^[17]、矿炼黄铜^[18-19]以及砷铜^[20-22]的研究等,丰富了对于冶金考古研究整体性的认知。

(二) 铜冶金考古

1. 夏商时期青铜冶铸技术体系的建立

夏商时期重要冶铸遗址以及青铜器群的发现,为复原当时的青铜生产提供了重要的实物资料。运用综合性的研究手段,通过对河南偃师二里头^[23-26]、郑州商城^[27-28]、偃师商城^[29-30]、小双桥^[31]、洹北商城^[32]及安阳殷墟^[33-37]、湖北黄陂盘龙城^[38-39]等都邑性遗址出土冶铸遗物(炉壁、坩埚、陶范、炉渣等)以及青铜器的检测分析,探讨夏商时期中原地区都邑遗址青铜生产及冶铸技术的发展演进。研究显示,从二里头文化时期开始出现规模化的青铜冶铸生产,存在硫化铜矿冶炼—粗铜精炼—青铜合金化的全流程工序。二里头文化时期逐渐成熟的冶铸技术、对来自山西中条山铜矿等物料的远程控制以及对青铜生产的组织管理,构建“礼乐中国”的物质基础。从二里头文化时期开始出现规模化的青铜器冶铸生产,经历早中商的技术进步,到商晚期到达高峰,这一历程是中国青铜器最重要的发展阶段。研究显示:从早商到晚商,商代都邑遗址的青铜冶铸生产经历了更加专门化的过程,而同一时期的都邑遗址与地方性中心聚落的青铜生产也存在差异,对青铜资源的利用和获取与商王朝的政治格局变迁息息相关。早商时期的冶铸技术继承了二里头时期的技术传统而有大发展,这一时期构建了整体的规则和风格:出现了青铜时代绝大部分的铜器种类,使用合金化程度较高的锡青铜或是中等锡、铅含量的三元合金;铸造工艺流程已基本确立,经过淘洗的高粉砂材料成为制作陶范的主要材料,以分范合铸为主的基本铸型工艺规范化,容器上纹饰的各种做法已较成熟;开始较

多使用分铸法来连接主体与附件，使用泥芯撑和金属芯撑等定位、保持壁厚的辅助工艺来实现质量控制。中商时期精简的铸型材料处理策略以及“嵌范”技术的使用，中商末期盲芯技术的出现、铸型分范、定位等技术的改变，成就晚商时期青铜器制作技法升华之基础。铸型材料选择的精细化、铸型设计的复杂化、铸型工艺的规范化以及铸造工艺流程的固定化，为大规模生产奠定了技术基础。而地方青铜文化的兴起，构建了晚商时期更为复杂多元的技术面貌和生产格局。

通过对夏商时期多地区遗存的综合考察，复原了从矿石开采、冶炼到合金配制与铸造的完整技术链条。机器学习的尝试应用于对古代铜冶金的微遗物鉴别^[40]。山西绛县西吴壁遗址的研究证实，夏及早商时期晋南地区已经具备成熟的冶铜技术，存在独立的原生铜冶炼产业，且生产规模巨大^[41]。江西瑞昌铜岭遗址的研究揭示了商代南方大型铜矿的开采、洗选及初步冶炼工艺，遗址内发现了完整的采矿与冶炼遗迹^[42-44]。郑州商城出土的矿石遗物表明都邑级遗址具备汇聚多种地质来源矿石的能力^[45]，而关中东部及东下冯遗址的分析结果则显示，这些地区多采用重熔精炼与本地铸造相结合的生产方式^[46-47]。淮河中游地区中商时期的青铜手工业研究发现，该区域冶铸活动规模有限，主要生产小型工具与兵器，服务于商王朝的经略与资源流通^[48-49]。这些研究构建了夏商时期多层次、分工明确的青铜生产体系，深刻揭示了中央王朝对关键金属资源的控制机制以及不同区域间技术的流通模式。

2. 青铜冶铸技术起源及传播路径

在青铜冶铸技术起源和传播路径等方面，进一步厘清了西北地区作为冶金术传入关键区域的历史地位。通过对甘肃张掖西城驿^[50]、临潭磨沟^[51]、新疆温泉阿敦乔鲁^[52]等遗址的系统工作，确认了在二里头文化之前，河西走廊及新疆地区已存在铜矿开采与冶炼活动，并呈现出红铜、砷铜与锡青铜共存的技术特征。这一结果表明，冶金术经由欧亚草原传入后，在西北地区经历了本地化的技术实践与转化^[53]。与此同时，在陕西神木石峁遗址皇城台发现的铜刀、铜簇及铸铜遗存，揭示了北方长城地带在公元前2000年左右已具备成熟的金属生产能力，体现了中国早期青铜文明发展的区域性特征^[54]。结合铅同位素及微量元素分析等科技手段，研究者进一步探讨了早期矿料来源与资源流通网络^[55-59]。刘煜等对浙川及沈那遗址出土倒钩铜矛进行取样分析，研究显示这5件铜矛均为红铜铸造而成，中国境内的塞伊玛—图尔宾诺式倒钩铜矛似乎已不具有太多的武器功用，很可能属于礼仪或仪仗性质的礼器，是一种改造和仿制的器物^[60]。此前刘瑞等使用便携式X荧光仪检测了铜矛的成分，认为河南浙川出土的倒钩铜矛和安阳宜家苑所出铜矛都是砷铜^[61]，与刘煜等所做的检测结果不同^[62]。综上所述，近十年的研究勾勒出了早期冶金技术从西北引进、在中原创新并在不同区域形成特色发展的历史图景，丰富了对中华文明起源阶段技术与社会互动关系的认知^[63-64]。

3. 青铜器群及冶铸遗物的检测分析

更多的研究致力于对出土青铜器或冶铸遗物进行系统的分析检测,分析其合金成分和金相组织,测试铅同位素比值,讨论合金配比和成形技术、资源流动和分配等技术问题。这些研究中,既有对特定时段或区域青铜器群及冶铸遗物的研究,诸如南阳地区东周青铜器^[65-66]、洛阳地区西周青铜器^[67]、东周楚系青铜器^[68]、山东半岛商周青铜器及炉渣^[69]、成都平原商周铜器^[70]、湖南战国至汉代铜镜^[71-72]、湖南邵阳东周铜器^[73]、重庆地区战国至秦青铜器^[74]、甘肃陇东地区青铜器^[75]、关中地区商周青铜器^[76]、河南桐柏县文管所藏商周青铜器^[77]、战国秦汉时期西南夷青铜器^[78]等,也有遗址、墓葬出土青铜器或冶铸遗物的研究,如河南信阳罗山天湖墓地^[79]、正阳闰楼墓地^[80]、荥阳小胡村墓地^[81]、荥阳官庄遗址^[82]、洛阳北窑遗址^[83]、林州大菜园墓地^[84]、新郑郛楼墓地^[85]、三门峡虢国墓地^[86]、鹤壁辛村及山西侯马白店遗址^[87]、山西长治分水岭墓地^[88]、闻喜邱家庄墓地^[89]、侯马上马墓地^[90]、陕西岐山贺家遗址^[91]、周原孔头沟遗址^[92]、澄城刘家洼遗址^[93]、宝鸡边家庄墓地^[94]、临潼新丰墓地^[95]、黄龙界子河墓地^[96]、山东滕州薛国故城及峄城徐楼遗址^[97]、昌乐都北墓地^[98]、滕州大韩墓地^[99]、长清仙人台墓地^[100]、北京延庆玉皇庙^[101]、河北行唐故郡遗址^[102]、内蒙古和林格尔遗址^[103]、辽宁东大杖子墓地^[104]、吉林白城双塔墓地^[105]、大安后套木嘎遗址^[106]、青海大通上孙家寨墓地^[107]、新疆哈密盆地^[108-109]及伊犁河谷^[110]、安徽寿县西圈墓地^[111]、寿县朱家大圩墓地^[112]、枞阳前程及旗山^[113]、阜阳储台墓地^[114]、湖北宜城跑马堤墓地^[115-116]、随州羊子山墓地^[117]、随州枣树林墓地^[118]、京山苏家垄遗址^[119]、荆州窑台子墓地^[120]、荆门余湾墓地^[121]、云梦郑家湖墓地^[122]、宜昌万福垸遗址^[123]、郧阳乔家院墓地^[124]、黄梅刘岳墓地^[125]、湖南宁乡炭河里遗址^[126-127]、岳阳商代遗址^[128]、四川成都双元村遗址^[129-131]、成都百寿路墓地^[132]、牟托遗址^[133]、盐源老龙头墓地^[134]、彭山江口遗址^[135]、浙江宁波镇海鱼山遗址^[136]、衢州庙山尖土墩墓^[137]、跳头遗址^[138]、江苏镇江孙家村遗址^[139]、建湖大同铺遗址^[140]、徐州狮子山楚王陵^[141]、昌宁大甸山墓地^[142]、云南江川光坟头遗址^[143]、云南晋宁河泊所与上西河遗址^[144]、岭南地区^[145]、福建晋江庵山遗址^[146]、江西南昌海昏侯汉墓^[147-148]、高句丽墓葬^[149]、辽祖陵一号陪葬坑^[150]等。这些研究提供了中国古代青铜技术演进历程的重要材料,全方位复原青铜手工业的技术面貌和生产格局。

其中一些重要的考古发现引发了大量的研究与讨论,比如三星堆青铜器,因其独特的造型和风格为世人瞩目,关于其合金技术^[151]、物料来源^[152-154]、铸造工艺^[155-160]等技术研究及文化研究^[161-166]等一系列研究,开始逐渐揭开三星堆文明的神秘面纱。对湖北随州叶家山西周墓地出土青铜器的系列研究^[167-174],探讨了西周早期社会青铜工业生产机制。

4. 青铜器物料来源与产地研究

自中国考古学诞生以来,青铜器的物料来源问题便备受关注。近十年来,这一研

究领域的发展非常迅速，上一节提到的青铜器分析检测论文基本上都会检测铅同位素比值，还有些论文会测试微量元素，并根据数据讨论青铜器的物料来源及资源流通。刘思然综述了中国青铜器产地研究五十年的历史，重点阐述了该领域的近期研究趋势与面临的挑战^[175]。他指出，高放射成因铅是中国青铜器产地研究中最具代表性的议题，中国历史上至少有四个使用高峰：商代^[176-177]、战国时期^[178-179]、东汉时期^[180-181]及北朝晚期至隋代^[182]。商代高放射成因铅广泛应用于商文化的二里岗上层至晚商时期，并在殷墟四期消失^[183-184]。多数学者认为高放射成因铅的使用是商王室控制下的大规模金属流通体系的体现，但也有学者提出，也许存在更为复杂的金属流通体系^[185-186]。西周时期，仅成都平原金沙遗址^[187]和湖南宁乡炭河里遗址的少量西周早期铜器中仍发现高放射成因铅^[126]，这可能是周边地区继续使用前代金属原料的结果。西周王室控制下存在中央集权的金属供应体系^[76,188-191]。

在金属物料来源研究中，更重要的是对原理的深入探讨^[192]和研究方法的改进^[193]，比如关于铅同位素比值到底反映何种矿源的问题的探讨^[194]。针对铅同位素比值分析中重熔难点问题，利用贝叶斯模型构建了商周时期金属重熔体系^[195]。在山东莱芜嬴城遗址首次发现商代高放铅炉渣，证实了海岱地区矿山的开采，为大辛庄等地的资源供应提供了线索^[196]。多位学者的研究构建了商周时期青铜物料来源及传播的时空网络^[93,185,197-201]，这些研究表明，商周时期各地的资源流变高度同步，反映了中原王朝对青铜工业及跨区域资源的严格管控。但是，也有部分区域呈现出独特的金属流通体系，比如成都平原^[202]。

张吉等对东周时代江淮地区遗址出土青铜器做了大量技术研究，比如湖北襄阳余岗墓地^[203]、钟祥黄土坡墓地^[204]、河南南阳夏馆铺墓地^[205]、湖北随州文峰塔墓地^[206]等，在此基础上完成了对江淮地区东周青铜器的资源和技术的研究^[207]。陈建立指出，传世曾伯簠铭“金道锡行”反映金属铜与锡具有共同的运输途径或能够相伴流动，具有鲜明的春秋早期时代特征。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，中游与下游立足各自金属资源禀赋形成竞争，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。长江中游地区能够耦合鄂东赣北所产铜料与湘南所产锡料，具有突出的资源禀赋和流通优势，因而能够在春秋早期协助中原地区摆脱金属匮乏的局面，并促进楚文化在域内的整合成型^[208]。近期研究重点转向东周至汉代滇南的金属资源开发^[144,209]，该区域的矿石主要来自多金属锡矿。中国西南地区正成为理解更广泛金属流通网络的关键区域^[210]。

鉴于同位素在铜锡产地研究中的局限性，研究青铜的微量元素特征正在成为辅助的工具之一，2010年后，建立了更广泛的青铜微量元素数据库，使得不同地区器物的

实际交叉对比成为可能^[211-213]。牛津大学团队引入了铜组方法来处理遗留的微量元素数据^[214]，并用于二里头、商代和西周时期的青铜器物，识别出微量元素模式的显著年代和区域变化^[186,215]。杨丹和吴小红收集了已发表的二里头和商代的微量元素数据，探讨其历时性变化模式，结果显示铅和铜的流通体系可能是分离的^[216]。目前使用微量元素作为产地指标仍存在很多问题，这是因为矿石通常都是不均匀的，表面风化会显著改变其微量元素模式。其次，青铜时代的矿工可能在同一遗址开采氧化矿和硫化矿^[217]，而氧化矿和硫化矿产物之间微量元素浓度差异很大^[218]。锡、铅的添加也会对微量元素产生影响。随着铜同位素分析^[219]、锡同位素分析^[220]等多种方法的引入，溯源研究的技术路径越来越丰富。

5. 铸造工艺与技术风格

这些研究主要基于青铜器的表面痕迹观察，结合出土陶范以及X射线照相技术，CT扫描等^[48]，探讨包括分范方式、连接技术、芯撑等辅助技术、补铸、浇注系统设置等一系列与铸造工艺有关的问题，并进而探讨青铜器制作的技术风格。比如廉海萍对二里头青铜鼎^[26]、金属芯^[221]的研究，邵安定对秦陵随葬坑出土青铜水禽制作工艺^[222]，杨欢对秦陵铜车马的铸造工艺研究^[223]等，彭鹏对青铜时代失蜡法的研究^[224]等。刘煜在对殷墟出土青铜礼器铸造工艺的研究中，系统复原了其工艺流程，探讨技术来源，还关注到工匠身份、组织管理和祭祀占卜等问题^[33]。陕北商周青铜器的研究从不同角度展开，作者研究了青铜器的产地。多个来源的铜器指示晚商时期的黄土丘陵与华北平原，关中盆地，北方草原都有跨地区的联系。结合考古材料和文字记录，作者提出晚商时期的中国北方存在一个涉及广泛的贸易网络。它充当了跨地区联系的枢纽，扮演了中原文明与北方草原联系的中间人角色。黄土丘陵的本地社会在贸易网络中变得更复杂，中原文明也在跨区域的联系中获得成长^[225]。另一个研究则以陕北地区商周时期青铜器的技术研究为基础，开展了元素成分、金相组织、铅同位素比值以及制作工艺等几方面的检测分析，探讨了陕北地区商代晚期至战国晚期青铜冶金技术的特点及铸铜原料来源等相关问题^[226]。

有些研究从特定青铜器类的铸造工艺入手，根据同时期的工艺变化，探讨青铜器的技术演进、技术选择和技术风格形成等问题。并对形制特点、分范技术、演变轨迹进行了全面的分析，从铜爵的功能、形制和分范作为延续时间最长的青铜器，鼎的工艺演进非常有代表性，苏荣誉对春秋战国时期鼎的工艺做了更为细致的描述^[227]。黎海超对商周时期铜爵的形制特点、分范技术、演变轨迹进行了全面的分析^[228]，楚小龙讨论了从二里头文化时期到西周的爵的铸型工艺变迁^[229]，岳占伟等则根据出土陶范，讨论殷墟时期爵^[230]和扁体卣^[231]的铸型工艺等。

有些论文针对具体的铸造技术，比如分铸法（铸接技术）的分类和起源问题^[232-236]，

焊接技术传统的形成^[237-238]、泥芯撑和金属芯撑（垫片）等辅助技术^[239]，补铸^[240]和铸后加工等。山东枣庄徐楼出土了大量铸镶红铜青铜器，推动了对铸镶红铜技术的研究。胡钢等对春秋时期红铜纹饰青铜器透镶工艺进行了分析^[241]、盛崇珊等对一件红铜嵌镶的战国青铜豆进行了工艺分析^[242]、对铸镶法和嵌镶法进行了比较研究^[243]。多位学者通过对山东枣庄市徐楼村出土红铜铸镶青铜器的工艺分析^[244-245]，探讨了铸镶工艺的技术特征^[246-247]。

近年来对南方冶铸遗址和遗物的发现和研究，对殷墟青铜器中可能来自异域工匠技术风格的辨识，非王室控制铸铜遗址的发现等，极大地改变了人们对先秦时期青铜器冶铸业面貌的整体认知。张昌平对陶范铸造技术传统的形成^[248]、青铜器釜^[249]、足^[250]的技术演进、青铜器发展阶段^[251]、制作理念^[252]、商周之际的青铜生产^[253]等问题的研究，苏荣誉对中原早期铜器生产^[254]、殷墟青铜器中的“南方因素”^[255]以及对湖南商周青铜器的系列研究^[256]，将青铜器的形制、装饰、功能、技术、演进、交流及相关的考古学问题有机地融合起来。丰富了我们对于商周青铜器制作与生产全貌的认知。

（三）铁冶金考古

近十年来，铁冶金考古方向进入了精细化研究阶段，前沿热点在于围绕中国古代钢铁技术发展史相关议题，深耕古代钢铁技术判定方法及其冶金机理研究，积极开展铁质文物非金属夹杂物研究的体系化建设，落实复原模拟试验研究形式的推广，同时协同推进冶铁遗址的田野考古发掘与调查、各遗址铁质文物与冶铁遗存的检测分析、古文献资料的细致梳理与阐释等工作。

1. 古代钢铁技术判定方法及其冶金机理研究

自2010年以来，随古代遗存分析工作的不断积累，因生产产物的高度相似性与区分困难，块炼铁技术与炒钢工艺的判定重新成为热点话题，也推动学界重新关注铁质文物与炉渣的工艺判定方法研究。2016年前后，杨菊^[257]、陈建立^[258]关注到了铁质文物与渣铁混合物内的高磷物相，并分别提出“含磷非金属夹杂物”与“磷酸钙物相或夹杂物”可作为炒钢工艺的判定指标，张周瑜等人还针对古代钢铁生产过程中磷元素的转移与赋存形态进行了理论阐释^[259]。后续，刘亚雄等人综合了这两个观点，并将单件铁质文物绝大多数非金属夹杂物的磷氧化物含量与氧化钙含量综合看待，认为磷氧化物含量与氧化钙含量均较高的铁质文物属于炒钢制品^[260]。同时期，黄全胜等人借鉴了欧洲学者对块炼铁技术特征的总结，结合我国本土生铁渣、广西贵港地区块炼铁渣的特征，给出了一套基于炉渣的古代钢铁技术判定方法^[261]。但是，由于缺乏充足的技术背景明确的实物资料，炒钢工艺的冶金机理研究薄弱，铁质文物非金属夹杂物形成机理不明，上述判定方法仍未能从根本上解决块炼铁技术与炒钢工艺的判定难题。

在铁质文物加工工艺判定方法研究中,非金属夹杂物研究的体系化建设是必不可少的步骤,其中涉及分析手段的完善与新技术的应用^[262-263]、夹杂物分类体系的完善^[264]、夹杂物形成机理的研究^[259]等不同方面。新的分析手段与分析理念被用于研究铁质文物非金属夹杂物。高温共聚焦技术被用于原位观察灌钢制品的夹杂物形成过程;全自动扫描电镜被用于全面获取铁质文物样品所有夹杂物的元素组成、截面尺寸、数量等信息;玄武岩标准样品被用于扫描电镜能谱分析铁质文物铁硅系夹杂物元素组成。

2. 冶铁手工业发展与社会经济关系

冶铁遗址的田野考古发掘与调查夯实了研究冶铁手工业生产与社会经济关系研究的材料基础,包括但不限于河南鲁山、驻马店、新郑、泌阳^[265],河北邯郸^[266]、平山^[267],山西翼城^[268]、高平,陕西韩城芝川^[269],福建安溪,湖北鄂州^[270-271]、大冶^[272-273],云南昭通、大理,湖南桑植官田、永兴平田、怀化大塘,广西梧州^[274-275]、平南^[276]、玉林、田东^[277],黑龙江阿城^[278],广东罗定^[279],江苏铜山利国,甘肃天水,西藏山南^[280]等,一系列块炼铁冶炼遗址被确定,集中分布于我国南方、西南、西北等边疆地区,这也为深入认识我国古代“块炼铁及块炼渗碳钢技术并存发展”的钢铁技术格局提供了重要的实物资料。此外,学界在新疆托里县那仁苏墓地发现了公元前3000年左右的陨铁制品,更新了我国最早的陨铁制品纪录^[281]。《邰城铸铁》^[282]以及《安溪下草埔遗址2019—2020年度考古发掘报告》^[283]相继出版,前者在遗址生产设施遗迹缺失的前提下,从手工业生产角度入手,细化遗址内发掘与遗物提取过程,以求全面揭示遗址存在的生产工艺;后者则是通过大面积揭露遗址内核心区域,明确内部功能设施及其分区,同时考察遗址内外的冶炼地点、采矿地点、运销路线以及其他手工业作坊,连接遗址内外、产业上下游,以求呈现区域手工业生产的整体面貌。

3. 模拟实验复原古代钢铁生产

复原模拟试验能获取详细的生产信息与技术背景明确生产资料。北京科技大学联合阳城县科技咨询服务中心,依据北京延庆水泉沟遗址辽代生铁炉形制,复原模拟了高炉生铁冶炼。2017年开始,北京大学联合诸多高校与研究机构开展了多年度的冶金实验考古暑期班,先后于北京大兴、陕西周原、湖南桂阳、福建安溪、云南弥渡等地开展了不同形式的冶金复原模拟试验,试验涉及竖炉块炼铁冶炼、地炉块炼铁、炒钢、炼铜、青铜合金化、坩埚炼锌、竖炉炼铅等内容。此外,四川大学联合诸多单位于四川蒲江开展了竖炉冶铁生产;广西民族大学开展了搅拌炒钢的模拟试验;中国科学院自然科学史所开展了生铁退火的模拟试验。结合古文献、传统工艺、考古发现等相关资料,针对我国古代炒钢^[284]、灌钢^[285]、百炼钢^[286]等核心制钢工艺,研究人员进行了综合研究,从具体生产形式分类、冶金机理、夹杂物形成过程、判定方法等多方面,详细阐释了我国古代钢铁技术特征,为深入研究冶铁史提供了重要资料。

（四）其他有色金属的冶金考古研究

除铜铁外，对金、银、铅、锡、锌、汞等其他金属的技术研究亦取得一定程度的进展。

铅、锡是人类较早开发利用的金属，在我国先秦时期作为配制青铜合金的原料发挥了重要的作用，同时亦可单独用于制作礼容器、工具和装饰品，殷墟时期就有铅鼎出土，铅还可用于青铜器“钎焊”的低熔点焊料^[287]，这种低熔点焊料至迟在西周早期即已使用。如对湖北随州义地岗墓地出土锡器^[118]以及绍兴南山遗址出土东周铅锡器的科学分析研究^[288]，显示春秋以后铅锡使用非常多。

对江西上高蒙山遗址进行古代银铅冶炼技术研究，研究结果显示，蒙山西区主要使用烧结—还原熔炼法冶炼含银铅矿石，而东区则主要使用铁还原沉淀熔炼法进行冶炼。铁还原沉淀熔炼法的技术优势在于可以避免对含银铅矿进行死焙烧，从而减少银在这一步骤中的损失，提高银的提取效率。目前由于缺乏两区域冶炼活动的准确年代数据，尚无法判断两种技术间的相互关系^[289]。

目前经过检测的中原地区最早的锡器是宝鸡虢国墓地出土的西周早中期的锡鼎、锡簋和锡鱼，这表明西周时期古人已经能够炼出纯度很高的锡。近年来，锡冶炼遗存的发现及研究引人注目，比如近年出土的赤壁大湖咀炼锡遗址^[290]，对其出土锡冶金微遗物进行研究，该遗址存在锡冶炼、青铜冶炼、青铜熔炼、铜器浇铸等多种生产环节，反映了鄂东南地区青铜产业的区域特色。锡粒、冶炼渣等明确指征冶锡生产的微遗物，为研究东周时期锡物料的开发与利用提供了线索^[291]。荆州纪南城内的战国锡铅锭块及金属产地的研究^[292]显示这些锡锭经检测均为高锡的锡铅合金，多样的形制与多处出土地点反映楚国都邑铸锡生产规模及复杂性。

通过对陕西孔头沟遗址宋家墓地与周原遗址姚家墓地出土的4件镀锡青铜器的分析，发现该批样品均为热镀锡工艺所成。在此基础上，通过对以往中国古代镀锡铜器分析数据的梳理对比，发现中国古代青铜器表面镀锡技术自西周早中期开始出现直到东汉早期，陕甘宁地区镀锡制品年代最早，巴蜀文化区、古滇文化区以及北方毛庆沟等地相对较晚。陕甘宁、巴蜀、古滇地区技术熟练，镀锡处理工艺具有当地特色^[293]。

四、结 语

好风凭借力，送我上青云。近十年来，冶金考古的进步在国家政策方针的指导下，充分利用跨单位合作、多学科综合研究的优势，借助国家级课题的研究平台，取得了重大的学术突破。这种突破不仅体现在研究方法的推进，材料科学、分析化学、地球化

学、金属工艺学、无损检测、机器学习等多种科学技术手段的综合运用,更体现在打破学科壁垒,与历史学、考古学、人类学、艺术史、技术史等学科的深度融合之中。未来十年,冶金考古研究的发展会更精彩。

附记 本研究得到中国社会科学院科技考古与文化遗产保护重点实验室联合攻关项目“中国古代手工业生产体系的科技考古研究”(课题编号:S20250205)资助。感谢陈建立、张吉、颜非、张颖在查找资料时给予的帮助,喻明玥、刘书毓、赵雨桐、秦小凡、王焱君、李欣苒亦有贡献,一并在此致谢。

参考文献

- [1] 刘煜. 古代青铜制造工艺技术研究历程[M]//中国考古学百年史: 1921—2021: 第四卷下册. 北京: 社会科学文献出版社, 2021.
- [2] 苏荣誉. 先秦青铜礼器铸造技术研究历史回顾(1930—2000)[C]//中国科学院自然科学史研究所. 科学技术史研究六十年: 中国科学院自然科学史研究所论文选. 北京: 中国科学技术出版社, 2018.
- [3] 白云翔. 手工业考古的理论与实践: 以临淄齐故城汉代铜镜铸造业考古为例[EB/OL]. (2018-10-16) [2026-04-01]. http://kaogu.cssn.cn/xwzx/kgdt/201810/t20181016_5944556.shtml.
- [4] 陈建立, 梅建军, 潜伟, 等. 中国冶金考古研究五十年: 回顾与展望[J]. 有色金属(冶炼部分), 2024(11).
- [5] 田长浒. 中国铸造发展史: 第一卷[M]. 北京: 国家开放大学出版社, 2018.
- [6] 袁靖. 科技考古的思考[J]. 江汉考古, 2018(4).
- [7] 潜伟. 中国考古科技史及几点思考[J]. 南方文物, 2021(3).
- [8] 刘煜. 重读经典: 从《安阳之范》说起[J]. 南方文物, 2019(3).
- [9] 刘煜. 青铜器技术研究的里程碑[J]. 南方文物, 2020(5).
- [10] 刘煜. 传统工艺调查与金属史研究[N]. 中国文物报, 2020-09-18(6).
- [11] 陈建立. 冶金考古收获来自田野和实验室的密切结合[J]. 南方文物, 2018(3).
- [12] 杨东平. 现代科技解读古代钢铁秘密: EBSD技术在冶金考古与材料教学中的新视野[J]. 金属世界, 2025(5).
- [13] 杨东平. 金相实验室中的冶金考古探索: 实验模块建设与文化传承[J]. 金属世界, 2025(6).
- [14] 刘煜, 陈国梁. 铜器[M]//中国社会科学院考古研究所. 二里头考古六十年. 北京: 中国社会科学出版社, 2019.
- [15] 张昌平. 中国青铜器在海外的收藏与研究[J]. 南方文物, 2019(4).
- [16] 刘海峰, 梅皓天, 白国柱, 等. 综论长江中下游铜矿带先秦矿冶考古[J]. 中国国家博物馆馆刊, 2020(7).

- [17] ZHOU W L, LIU S R, LIU H F, et al. Traditional Chinese technology of crucible lead smelting: a comprehensive study based on historical records and archaeological findings[J]. CAHST, 2021, 5(1).
- [18] 肖红艳, 崔剑锋. 古代矿炼黄铜研究综述[J]. 考古学研究, 2022(2).
- [19] 肖红艳, 崔剑锋. “黄铜”、“青铜”源流考[J]. 中国科技史杂志, 2022, 43(4).
- [20] 崔春鹏, 李延祥, 潜伟. 近年国外早期砷铜冶金的研究进展[J]. 中国国家博物馆馆刊, 2020(1).
- [21] 蔺诗芮. 西北地区青铜时代早期的金属使用: 从技术与资源角度探讨[J]. 文博, 2021(5).
- [22] 张旻. 试论古代中国的砷铜发现及传播问题[J]. 文物世界, 2016(2).
- [23] 刘煜. 二里头文化时期的青铜技术[N]. 中国社会科学报, 2025-03-14(8).
- [24] 刘煜, 张颖. 二里头遗址出土青铜器合金技术和矿料来源的再思考[J]. 江汉考古, 2025(1).
- [25] 张周瑜, 刘煜. 二里头遗址冶铸生产新认知[N]. 人民日报, 2025-08-09(8).
- [26] 廉海萍. 二里头遗址出土青铜鼎的制作技术及相关问题讨论[J]. 中原文物, 2025(1).
- [27] SUN Z, LIU S, YANG S, et al. Investigating the origins of metals used in the Early Shang capital of Zhengzhou[J]. Journal of Archaeological Science: Reports, 2023, 48: 103872.
- [28] YAN B, LIU S, CHASTAIN M L, et al. A new FTIR method for estimating the firing temperature of ceramic bronze-casting moulds from early China[J]. Scientific Reports, 2021, 11(1): 3316.
- [29] 张颖, 刘煜, 陈国梁, 等. 偃师商城铜器及冶铸遗物的科技分析研究[J]. 中原文物, 2023(5).
- [30] 张颖, 刘煜, 陈国梁, 等. 偃师商城出土铜器的铸造工艺[M]//中国社会科学院考古研究所科技考古中心. 科技考古: 第八辑. 北京: 科学出版社, 2024.
- [31] 黄娟. 小双桥遗址出土冶铸遗物及青铜器的初步分析[D]. 北京: 中国科学院大学, 2009.
- [32] 钟正权. 洹北商城出土冶铸遗物的材料和工艺研究[D]. 北京: 中国社会科学院大学, 2021.
- [33] 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, 2018.
- [34] 中国社会科学院考古研究所. 安阳孝民屯: (三)殷商遗存·铸铜遗物[M]. 北京: 文物出版社, 2020.
- [35] 岳占伟, 刘煜, 岳洪彬, 等. 殷墟陶模、陶范、泥芯的制作工艺研究[J]. 南方文物, 2016(2).
- [36] 蔺诗芮. 商代铸铜陶范的材料学研究[D]. 北京: 北京大学, 2025.
- [37] 周文丽, 刘煜, 岳占伟. 安阳殷墟孝民屯出土两类熔铜器具的科学研究[J]. 南方文物, 2015(1).
- [38] 刘思然, 邹秋实, 路晋东, 等. 盘龙城遗址小嘴商代冶金遗物的分析与研究[J]. 江汉考古, 2020(6).
- [39] 武汉大学历史学院, 湖北省文物考古研究院, 武汉市文物考古研究所, 等. 盘龙城(1995—2019): (五)青铜器研究. 北京: 科学出版社, 2024.
- [40] 胡茜茜. 基于机器学习的古代铜冶金微遗物反射光谱判别方法研究[D]. 北京: 北京科技大学, 2023.
- [41] 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).
- [42] 崔涛, 刘薇. 江西瑞昌铜岭铜矿遗址新发现与初步研究[J]. 南方文物, 2017(4).

- [43] 邹桂森. 江西瑞昌铜岭遗址商代冶金考古综合性研究[D]. 北京: 北京科技大学, 2020.
- [44] 邹桂森, 崔涛, 刘思然, 等. 江西瑞昌铜岭遗址商代冶金技术初步研究[J]. 江汉考古, 2025(1).
- [45] 孙振飞, 杨树刚, 刘思然, 等. 郑州商城遗址创新街小学(北校区)改扩建项目H1136出土矿石遗物分析与研究[J]. 华夏考古, 2025(4).
- [46] 长孙樱子, 吴晓桐, 金正耀, 等. 关中东部地区商代冶金遗物的科学分析研究[J]. 文物, 2020(2).
- [47] 李建西, 李延祥, 田建文. 东下冯遗址冶铸遗存研究[J]. 考古与文物, 2018(1).
- [48] 孙振飞. 淮河中游地区中商青铜手工业研究[D]. 北京: 北京科技大学, 2025.
- [49] 崔春鹏, 李延祥, 李辰元, 等. 安徽安庆地区早期采矿与冶金遗址考察研究[J]. 有色金属(冶炼部分), 2021(1).
- [50] 陈国科. 西城驿: 齐家冶金共同体: 河西走廊地区早期冶金人群及相关问题初探[J]. 考古与文物, 2017(5).
- [51] 王璐, 梅建军, 陈坤龙, 等. 甘肃临潭县磨沟遗址出土齐家文化铜器的分析与研究[J]. 考古, 2022(7).
- [52] 谭宇辰, 李延祥, 丛德新, 等. 新疆温泉县阿敦乔鲁遗址出土早期铜器的初步科学分析[J]. 西域研究, 2021(3).
- [53] CHEN K, MEI J, WANG L, et al. Interaction and localization: new insights into early metallurgy in China[J]. Journal of World History, 2022, 33(4): 581-608.
- [54] 陈坤龙, 杨帆, 梅建军, 等. 陕西神木石峁遗址出土铜器的科学分析及相关问题[J]. 考古, 2022(7).
- [55] 王璐. 甘青地区早期铜器的科学分析研究[D]. 北京: 北京科技大学, 2019.
- [56] 董小帅, 李秀辉. 甘肃地区先秦时期铜器检测分析资料的整理与研究[J]. 南方文物, 2021(3).
- [57] 谭宇辰. 新疆西天山地区公元前2千纪铜冶金技术研究[D]. 北京: 北京科技大学, 2022.
- [58] 陈坤龙, 王璐, 梅建军, 等. 玉门火烧沟遗址出土骊马文化铜器的科学分析研究[J]. 考古与文物, 2018(1).
- [59] 陈坤龙, 王璐, 王颖琛, 等. 甘肃玉门火烧沟四坝文化铜器的科学分析及相关问题[J]. 中原文物, 2018(2).
- [60] 刘煜. 浙川下王岗遗址出土塞伊玛—图尔宾诺式倒钩铜矛的科学分析[M]//浙川下王岗: 2008—2010年考古发掘报告. 北京: 科学出版社, 2020.
- [61] 刘瑞, 高江涛, 孔德铭. 中国所见塞伊玛—图尔宾诺式倒钩铜矛的合金成分[J]. 文物, 2015(10).
- [62] 刘煜, 孔德铭. 安阳宜家苑墓地出土倒钩铜矛的无损检测[C]//中国社会科学院考古研究所夏商周考古研究室. 三代考古(七). 北京: 科学出版社, 2017.
- [63] 张弛. 龙山—二里头: 中国史前文化格局的改变与青铜时代全球化的形成[J]. 文物, 2017(6).
- [64] 陈坤龙, 梅建军, 王璐. 中国早期冶金的本土化与区域互动[J]. 考古与文物, 2019(3).
- [65] 牟笛. 南阳东周青铜器科技考古研究: 以夏饷铺、八一路、徐家岭青铜器为例[D]. 北京: 中国科学院大学, 2016.

- [66] MU D, LUO W G, SONG G D, et al. The features as a county of Chu State: chemical and metallurgical characteristics of the bronze artifacts from the Bayilu site[J]. *Archaeological and Anthropological Sciences*, 2019, 11: 1123-1129.
- [67] 袁晓红. 成周地区出土西周铜器的合金技术和金属资源研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2016.
- [68] 刘铮峰. 东周楚系青铜器的冶金考古研究[D]. 北京: 中国科学院大学, 2017.
- [69] 崔春鹏, 李延祥, 代全龙. 山东半岛所见青铜器及炉渣的矿料产地问题试析[J]. *南方文物*, 2021(3).
- [70] LI H C, ZUO Z Q, CUI J F. Bronze production in the Ancient Chengdu Plains: a diachronic metallurgical perspective on a separate cultural region[J]. *Journal of Cultural Heritage*, 2020, 43: 26-36.
- [71] LUO Z, FAN A C, JIN Z Y, et al. Scientific analysis and research on the Warring States bronze mirrors unearthed from Changsha Chu cemetery, Hunan province, China[J]. *Archaeometry*, 2022: 1-15.
- [72] LUO Z, JIN Z, ZHAO Z, et al. Lead isotope reveals the mineral source change of late bronze age bronze mirrors excavated in Hunan province, southern China[J]. *Journal of Archaeological Science: Reports*, 2023, 49: 103994.
- [73] 罗喆, 金正耀, 胡国海, 等. 湖南邵阳东周青铜器的铅同位素比值研究[J]. *江汉考古*, 2023(3).
- [74] Fan X P, MU D, YI J, et al. Sourcing copper ores for production of bronzes excavated at Shuangyantang, a Western Zhou (1046–771 BC) site in Chongqing (Southwest China): evidence from lead isotope analysis[J]. *Archaeological and Anthropological Sciences*, 2016, 8: 197-204.
- [75] 魏强兵. 陇东地区出土两周时期铜器科学分析与制作技术研究[D]. 北京: 北京科技大学, 2024.
- [76] ZHANGSUN Y Z, WU X T, LIU L X, et al. Bronze technology and metal resources in the Zhouyuan area before and after the replacement of Shang and Zhou Dynasties[J]. *Archaeological and Anthropological Sciences*, 2024, 16: 164.
- [77] 张吉, 陈建立, 徐磊. 河南省桐柏县文物管理所藏商周青铜器的检测分析[J]. *南方文物*, 2018(3).
- [78] 杨盛. 战国秦汉时期西南夷地区青铜器生产问题研究[D]. 成都: 四川大学, 2021.
- [79] 肖梦娅, 楚小龙, 郁永彬, 等. 信阳罗山天湖墓地出土青铜器的检测分析及相关问题初探[J]. *华夏考古*, 2016(2).
- [80] 刘群, 肖梦娅, 梅建军, 等. 正阳闰楼墓地出土商代铜器的检测及相关问题研究[J]. *有色金属（冶炼部分）*, 2016(5).
- [81] 王鑫光, 梁法伟, 唐静, 等. 荥阳小胡村墓地出土部分铜器的科学分析[J]. *文物保护与考古科学*, 2018, 30(1).
- [82] 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(3).

- [83] 郁永彬, 陈建立, 陈坤龙, 等. 试论商末周初青铜料的使用问题: 从殷墟到北窑再到叶家山[J]. 文物, 2025(12).
- [84] 方立阳. 林州大菜园出土东周青铜器的科学分析[D]. 北京: 北京大学, 2019.
- [85] 陈建立, 张吉, 樊温泉. 新郑郛楼两周墓地出土青铜器的初步研究[M]//河南省文物考古研究院. 新郑郛楼两周墓地. 上海: 上海古籍出版社, 2020: 349-352.
- [86] 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[J]. 有色金属(冶炼部分), 2019(1).
- [87] WANG C, GAO Z L, WANG Q Z, et al. The diversity of bronze production technologies during the Eastern Zhou dynasty revealed by analysis of slags from the Baidian and Xincun sites in Central China[J]. Heritage Science, 2024, 12: 133.
- [88] 张吉, 韩炳华, 崔剑锋, 等. 长治分水岭墓地出土战国器物研究三题[C]//北京大学考古文博学院, 北京大学中国考古学研究中心. 考古学研究(十四). 北京: 科学出版社, 2022: 112-141.
- [89] 谈金卓, 吴晓桐, 范文谦, 等. 闻喜邱家庄 M5001号墓出土战国早期青铜器矿料来源研究[J]. 中国国家博物馆馆刊, 2023(4).
- [90] 郭志勇, 闫文祥, 严贤盛, 等. 山西侯马上马墓地青铜器铅同位素比值分析[J]. 文物季刊, 2024(3).
- [91] 孙淑畅, 黄晓娟, 杜冠博, 等. 周原贺家遗址铜马车的矿料来源[J]. 有色金属(冶炼部分), 2022(12).
- [92] 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[J]. 南方文物, 2017(2).
- [93] 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).
- [94] 贾莹, 苏荣誉, 田仁孝, 等. 宝鸡边家庄青铜器初步金相学研究[C]//青铜文化研究: 第九辑. 合肥: 黄山书社, 2016.
- [95] ZHANG R X, WEI G F, HUANG X J. Scientific analysis of the bronze artifacts excavated from Xinfeng cemetery, Lintong district, Xi'an City, China: raw material sources determined by lead isotopes and trace elements[J]. The European Physical Journal Plus, 2023, 138: 813.
- [96] 胡毅捷, 夏培朝, 张蓓, 等. 陕西黄龙界子河墓地出土青铜器的资源与技术特征研究[J]. 考古与文物, 2025(2).
- [97] 张吉, 孙波, 郝导华, 等. 山东滕州薛国故城出土部分青铜器的时代及科学分析研究[J]. 中国国家博物馆馆刊, 2020(10).
- [98] 郝导华, 张吉, 杜晓军, 等. 山东昌乐都北墓地出土东周青铜器的分析研究[J]. 中国国家博物馆馆刊, 2021(6).

- [99] 代全龙, 张吉, 刘延常, 等. 山东滕州大韩东周墓地第一次发掘出土青铜器的科学分析研究[J]. 南方文物, 2021(3).
- [100] 赵凤燕, 郎剑锋, 任相宏, 等. 长清仙人台墓地出土青铜器铅同位素比值的初步分析[J]. 南方文物, 2021(3).
- [101] 任文勋. 军都山玉皇庙文化青铜器的铅同位素分析与微量元素分析[D]. 北京: 北京科技大学, 2017.
- [102] 包淑滨. 行唐故郡遗址出土铜器科学分析与研究[D]. 北京: 中国社会科学院大学, 2021.
- [103] 白树新. 和林格尔土城子古城遗址及周边墓葬出土金属器的科学分析研究[D]. 北京: 北京科技大学, 2024.
- [104] 柏艺萌, 徐韶钢, 陈建立, 等. 辽宁建昌县东大杖子墓地M1出土铜器的科学分析[J]. 南方文物, 2021(3).
- [105] 刘函, 李延祥, 王立新. 吉林白城双塔墓地出土铜器的铅同位素研究[J]. 有色金属(冶炼部分), 2019(1).
- [106] 刘函. 吉林大安后套木嘎遗址铜器的科学分析及相关研究[D]. 北京: 北京科技大学, 2020.
- [107] 李晓敏. 青海大通上孙家寨墓地铜器研究[D]. 北京: 北京大学, 2020.
- [108] GAO J, JIN Z Y, WANG B H, et al. A provenience study of Bronze Age metal objects from the Hami Basin, Xinjiang, China[J]. Journal of Archaeological Science: Reports, 2021, 39: 103175.
- [109] 苏贝·乃比, 王永强, 张杰, 等. 哈密柳树沟墓地出土青铜器科技分析[J]. 西域研究, 2019(4).
- [110] WANG L, CHEN F, WANG Y Q, et al. Copper metallurgy in prehistoric upper Ili Valley, Xinjiang, China[J]. Archaeological and Anthropological Sciences, 2019, 11: 2407-2417.
- [111] 刘思然, 韩玉, 蔡波涛, 等. 寿县西圈墓地M25出土金属器的金相和成分分析[J]. 河南博物院院刊, 2021(1).
- [112] 蔡波涛, 刘知柔, 张吉, 等. 安徽寿县南朱家大圩战国墓出土青铜器的材质与铅资源分析[J]. 南方文物, 2025(1).
- [113] Wang Y J, WEI G F, LI Q, et al. Provenance of Zhou Dynasty bronze vessels unearthed from Zongyang County, Anhui Province, China: determined by lead isotopes and trace elements[J]. Heritage Science, 2021, 9: 97.
- [114] Luo Z, YANG M, LIU J S, et al. Diversified manufacturing processes and multiple mineral sources: features of Warring States bronze vessels excavated from Chutai Cemetery M1, Anhui Province[J]. Science China Technological Sciences, 2023, 66(8): 2297-2307.
- [115] 刘煜, 常怀颖, 刘建宇, 等. 湖北宜城跑马堤墓地战国西汉墓出土部分青铜器的制作工艺研究[J]. 南方文物, 2017(2).
- [116] 刘建宇, 肖梦娅, 王璐, 等. 湖北宜城跑马堤墓地出土铜器的科学分析研究[J]. 文物保护与考古科学, 2018, 30(3).

- [117] 郁永彬, 黄建勋, 包洪波, 等. 随州羊子山M4出土噩国青铜器的检测分析及相关问题[J]. 文物, 2016(12).
- [118] 胡毅捷, 胡涛, 陈虎, 等. 随州义地岗枣树林墓地M190出土青铜器与锡器的科技分析[J]. 中国国家博物馆馆刊, 2023(7).
- [119] 湖北省文物考古研究院, 北京大学考古文博学院. 湖北京山苏家垄遗址2020年H39、H40发掘简报[J]. 江汉考古, 2024(5).
- [120] 张吉, 刘建业, 李建西, 等. 荆州荆北新区窑台子M10出土裂瓣纹鎏金银铜匜的科学分析研究[J]. 江汉考古, 2024(2).
- [121] ZHANG K, LI Q, BAI B, et al. The production of bronze weapons in the Chu State: a case study of bronze arrowheads excavated from the Yuwan Cemetery in Hubei, China[J]. Archaeological and Anthropological Sciences, 2024, 16: 152.
- [122] 蔺诗芮, 杜舒懿, 罗运兵, 等. 湖北云梦郑家湖墓地出土青铜容器的科学分析研究[J]. 江汉考古, 2025(4).
- [123] 马仁杰. 湖北宜昌万福垸遗址出土铜器的科学研究: 兼论西周甬钟起源问题[D]. 北京: 北京大学, 2019.
- [124] 张吉, 丁静玉, 黄旭初, 等. 湖北郢阳乔家院墓地出土东周青铜器金属物料变迁研究[J]. 中国国家博物馆馆刊, 2024(1).
- [125] 张吉, 凡国栋, 蔺诗芮, 等. 湖北黄梅刘岳墓地M1出土青铜器的科学分析研究[J]. 江汉考古, 2021(4).
- [126] 马江波, 金正耀, 范安川, 等. 湖南宁乡县炭河里遗址出土青铜器的科学分析[J]. 考古, 2016(7).
- [127] 蔺诗芮. 湖南宁乡县炭河里遗址和望城高砂脊遗址出土铜器的科学分析[D]. 北京: 北京大学, 2019.
- [128] 马江波, 吴晓桐, 金正耀, 等. 岳阳商代遗址出土铜器及炉渣的分析研究[J]. 江汉考古, 2018(3).
- [129] CHEN D, YANG Y, WANG T, et al. Improvement and integration: scientific analyses of willow-leaf shaped bronze swords excavated from the Shuangyuan Village Cemetery, Chengdu, China[J]. Heritage Science, 2022, 10: 92.
- [130] WANG X T, YANG Y D, WANG T Y, et al. Subdivision of culture and resources: raw material transformation and cultural exchange reflected by bronze poleaxes from the Warring States sites in the Chengdu Plain[J]. Archaeological and Anthropological Sciences, 2022, 14: 121.
- [131] WANG X T, YANG Y D, WANG T Y, et al. A feast: indigenous production and interregional exchange reflected by the bronze vessels unearthed from Shuangyuan Village Cemetery in southwestern China[J]. Archaeometry, 2024, 66: 352-367.
- [132] LI H C, ZUO Z Q, CUI J F, et al. Copper alloy production in the Warring States period (475-221 BCE) of the Shu state: a metallurgical study on copper alloy objects of the Baishoulu cemetery in Chengdu, China[J]. Heritage Science, 2020, 8: 67.

- [133] LI H, GONG Y, CUI J, et al. Imports or imitations: scientific and typological analysis of the bronze artefacts at the Moutuo archaeological site, Sichuan, China[J]. *Archaeometry*, 2021.
- [134] 江磊. 盐源地区出土金属器技术研究[D]. 北京: 北京大学, 2021.
- [135] QIU T, LIU Z Y, LI Y F, et al. Scientific analysis of bronze objects of the first millennium to the second century BCE excavated from the Jiangkou Site, Pengshan, Sichuan[J]. *Archaeological and Anthropological Sciences*, 2023, 15: 151.
- [136] 王颖琛, 张吉, 雷少, 等. 宁波镇海鱼山遗址出土铜器的初步科学分析[J]. *南方文物*, 2019(3).
- [137] 王志雄. 浙江衢州庙山尖土墩墓出土青铜器科学分析研究[D]. 北京: 北京科技大学, 2021.
- [138] 杨冬宜, 林森, 吴晓桐. 浙江余杭跳头遗址出土商周铜器和土壤沉积物的铅同位素分析[J]. *南方文物*, 2025(1).
- [139] 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).
- [140] BAI G Z, ZHANG J, LIU H F, et al. Technological and material insights into bronze casting remains at the Datongpu site, Jianhu County, Jiangsu province from the Eastern Zhou Dynasty[J]. *Archaeological and Anthropological Sciences*, 2025, 17: 40.
- [141] 迟鹏, 李秀辉, 陈建立, 等. 徐州狮子山楚王陵出土青铜器的科学分析[J]. *中国文物科学研究*, 2016(4).
- [142] 胡毅捷. 昌宁大甸山墓地出土青铜器锈蚀成因及模拟腐蚀研究[D]. 北京: 北京大学, 2017.
- [143] 马仁杰. 云南江川光坟头遗址出土铜器初步分析: 兼论战汉时期西南夷铜器工艺传统[D]. 北京: 北京大学, 2017.
- [144] PRYCE T O, LAM W C, CADET M. A late 2nd/early 1st millennium BC interaction arc between Mainland Southeast Asia and Southwest China: archaeometallurgical data from Hebosuo and Shangxihe, Yunnan[J]. *Journal of Archaeological Science*, 2022, 143: 105612.
- [145] 任静. 岭南地区出土先秦钺及相关问题研究[D]. 北京: 北京大学, 2020.
- [146] 马仁杰, 潘岩, 黄运明, 等. 晋江庵山遗址出土铜器的初步科学分析[J]. *南方文物*, 2025(1).
- [147] 汪森. 海昏侯墓出土鎏金青铜器工艺与腐蚀相关性研究[D]. 北京: 北京大学, 2018.
- [148] 黄泽方. 海昏侯墓M1墓回廊薄壁青铜器工艺与腐蚀研究[D]. 北京: 北京大学, 2017.
- [149] 贾莹. 高句丽青铜器及冶铸遗物的检测分析与探讨[J]. *文物保护与考古科学*, 2016(3).
- [150] 肖红艳, 董新林, 崔剑锋. 辽祖陵一号陪葬墓和四号建筑基址出土铜器的科技分析[J]. *北方文物*, 2022(5).
- [151] 曾晓天. 三星堆一、二号坑再研究[D]. 北京: 北京科技大学, 2023.
- [152] 黎海超. 多学科视角下三星堆互动网络的探索[N]. *光明日报*, 2025-03-19(11).
- [153] 黎海超. 从资源互动网络看三星堆文明崛起[J]. *历史研究*, 2025(5).

- [154] 霍巍. 三星堆文明的资源体系与交流网络[J]. 清华大学学报(哲学社会科学版), 2024(1).
- [155] 郭建波, 梅建军, 肖庆, 等. 浅析三星堆青铜器中芯骨与条形芯撑技术的应用[J]. 故宫博物院院刊, 2025(2).
- [156] 郭建波, 陈坤龙, 李映福, 等. 三星堆遗址出土三号青铜神树铸造工艺及相关问题研究[J]. 文物, 2025(4).
- [157] 苏荣誉, 朱亚蓉. 三星堆青铜容器研究[M]. 成都: 巴蜀书社, 2023.
- [158] 郭建波, 郑芦, 王冲, 等. 三星堆祭祀坑出土铜顶尊跪坐人像科技分析及相关问题[J]. 考古, 2026(1).
- [159] 郭建波, 田灏, 余健, 等. 三星堆出土青铜器铸造工艺补议[J]. 南方文物, 2021(3).
- [160] 肖红艳, 张跃芬, 吴钰洁, 等. “工”与“匠”的多元性重建: 三星堆祭祀坑青铜器铸造工艺再观察[J]. 四川文物, 2023(5).
- [161] 施劲松. 中国青铜时代的三星堆[J]. 中国社会科学, 2023(1).
- [162] 施劲松. 三星堆研究的多重路径[J]. 故宫博物院院刊, 2025(9).
- [163] 张昌平. 三星堆、金沙、竹瓦街: 公元前1100年前后的成都平原[N]. 光明日报, 2026-03-28(10).
- [164] 施劲松. 区域文明与沟通的意义: 成都平原青铜时代的考古学建构[M]. 北京: 文物出版社, 2023.
- [165] 王鹏. 论奥库涅夫文化与三星堆文化的“顶尊人像”[C]//考古学集刊: 第30集. 北京: 社会科学文献出版社, 2024: 98-109.
- [166] 李新伟. 三星堆铜顶尊屈身鸟足人像和中美地区柔术者形象[J]. 四川文物, 2022(6).
- [167] 郁永彬, 陈丽新, 黄凤春, 等. 湖北随州叶家山墓地M27出土铜器科学分析研究[J]. 中原文物, 2024(3).
- [168] 郁永彬, 陈建立, 陈坤龙, 等. 叶家山曾侯墓地出土晚商青铜器组科技分析研究[J]. 中原文物, 2023(1).
- [169] 郁永彬, 常怀颖, 陈坤龙, 等. 湖北随州叶家山墓地M28出土青铜器的检测分析及相关问题[J]. 考古, 2018(7).
- [170] 郁永彬, 陈丽新, 陈建立, 等. 湖北随州叶家山墓地M126出土铜器科学分析[J]. 文博, 2024(1).
- [171] 郁永彬, 陈建立, 梅建军, 等. 试析西周早期社会青铜工业生产机制: 以湖北随州叶家山墓地出土铜器为中心[J]. 文物, 2019(5).
- [172] 江磊. 湖北随州叶家山墓地出土西周青铜器的金相实验研究[D]. 北京: 北京大学, 2019.
- [173] 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).
- [174] 张天宇. 叶家山墓地研究[D]. 北京: 北京大学, 2020.
- [175] LIU S, SUN Z, ZHANG J, et al. 50 years of bronze provenance studies: a perspective from China[J]. Journal of Archaeological Science, 2025, 180.

- [176] JIN Z, LIU R, RAWSON J, et al. Revisiting lead isotope data in Shang and Western Zhou bronzes[J]. *Antiquity*, 2017, 91: 1574-1587.
- [177] LIU S, CHEN K L, REHREN T, et al. Did China import metals from Africa in the bronze age?[J]. *Archaeometry*, 2018, 60.
- [178] Wu X, Tan J, Yan X, et al. Highly radiogenic lead in Shandong bronzes (5th-3rd century BC) and lead mines provides evidence of a metal road from China to Korea and Japan[J]. *Journal of Archaeological Science*, 2024, 170: 106047.
- [179] 张吉, 赵国靖, 张恒, 等. 战国齐文化区青铜器的铅料演替及分期研究[J]. *中国国家博物馆馆刊*, 2025(2): 105-119.
- [180] HUANG M, WU X, CHEN X, et al. Wuchuan bronzes and cinnabar mining immigrants during the Qin and Han Dynasties—new perspectives from typological and lead isotope analysis[J]. *Archaeological and Anthropological Sciences*, 2021, 13: 198.
- [181] OKAMURA H, WATANABE Y, SUMI H. Analysis of bronze Yu vessels from Kurokawa Institute[J]. *Research of Ancient Culture*, 2024, 23: 1-10 (in Japanese).
- [182] 代全龙, 赵益超, 逢硕, 等. 临淄赵家徐姚北朝墓出土金属器的科学分析研究[J]. *海岱考古*, 2024(1): 175-180.
- [183] 马仁杰, 崔剑锋. 商与远方: 商代高放射性成因铅资源时空演变与流通模式的初步探索[J]. *中国国家博物馆馆刊*, 2024(9): 84-104.
- [184] LI Q, WEI G, HUANG H, et al. Lead isotope ratio analysis of lead ingots and bronze wares unearthed from Yinxu[J]. *Archaeometry*, 2023.
- [185] CHEN K, MEI J, REHREN T, et al. Hanzhong bronzes and highly radiogenic lead in Shang period China[J]. *Journal of Archaeological Science*, 2019, 101: 131-139.
- [186] LIU R, POLLARD A M, RAWSON J, et al. Panlongcheng, Zhengzhou and the movement of metal in early Bronze Age China[J]. *Journal of World Prehistory*, 2019, 32.
- [187] 黎海超, 崔剑锋, 周志清, 等. 金沙遗址“祭祀区”出土铜器的生产问题研究[C]//吉林大学边疆考古研究中心. *边疆考古研究*: 第25辑. 北京: 科学出版社, 2019: 14.
- [188] HSU Y K, O'SULLIVAN R, LI H. Sources of Western Zhou lead: a new understanding of Chinese Bronze Age supply networks[J]. *Archaeological and Anthropological Sciences*, 2021, 13(2).
- [189] 袁晓红. 西周中央王朝的金属控制策略: 以雒邑地区出土西周铜器金属资源研究为中心[M]//*考古学集刊*: 第22集. 北京: 社会科学文献出版社, 2019: 239-278.
- [190] 汪海港. 宝鸡地区西周铜器生产和资源流通研究: 以周原和彘国为例[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2017.

- [191] LI H C, CHEN J L, CUI J F, et al. Production and circulation of bronzes among the regional states in the Western Zhou Dynasty[J]. *Journal of Archaeological Science*, 2020, 121: 105191.
- [192] KILLICK D J, STEPHENS J A, FENN T R. Geological constraints on the use of lead isotopes for provenance in archaeometallurgy[J]. *Archaeometry*, 2020, 62: 86-105.
- [193] LIU S, HE X, CHEN J, et al. Micro-slag and “invisible” copper processing activities at a Middle-Shang period (14th-13th century BC) bronze casting workshop[J]. *Journal of Archaeological Science*, 2020, 122: 105222.
- [194] HE X, SUN Z, LIU S, et al. Provenancing copper in the middle Shang period through isotopic analysis of metallurgical remains[J]. *Journal of Archaeological Science*, 2024, 168: 106020.
- [195] 赵野, 刘思然, 孙振飞. 基于铅同位素贝叶斯混合模型的西周早期青铜器物料混熔问题研究[J]. *江汉考古*, 2025(1).
- [196] 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).
- [197] 马仁杰. 商时期高放射性成因铅资源的时空框架与贸易网络[D]. 北京: 北京大学, 2024.
- [198] 黎海超. 资源与社会: 以商周时期铜器流通为中心[M]. 北京: 中国社会科学出版社, 2020.
- [199] LIU R, RAWSON J, POLLARD A M. Beyond ritual bronzes: identifying multiple sources of highly radiogenic lead across Chinese history[J]. *Scientific Reports*, 2018, 8(1).
- [200] WANG Q, LIU S, CHEN J, et al. The first discovery of Shang period smelting slags with highly radiogenic lead in Yingcheng and implications for the Shang political economy[J]. *Journal of Archaeological Science*, 2023, 149: 105704.
- [201] LUO Z, JIN Z Y, CHEN Q, et al. New scientific analysis reveals the independent bronze production system of indigenous Yue Group in Southern China during early Western Zhou period[J]. *Archaeological and Anthropological Sciences*, 2025, 17: 37.
- [202] 黎海超, 崔剑锋, 周志清, 等. 科技视野下“异族同俗”现象的观察: 以巴蜀青铜器为例[J]. *考古*, 2021(12): 104-115.
- [203] 张吉, 梁超, 王志刚, 等. 襄阳余岗墓地出土青铜容器的金相及成分分析[J]. *江汉考古*, 2019(3).
- [204] 张吉, 王丹, 贾汉清, 等. 钟祥黄土坡墓地出土春秋青铜器的检测分析及相关问题研究[J]. *南方文物*, 2019(3).
- [205] 张吉, 崔本信, 陈建立. 南阳夏饷铺墓地出土青铜器的检测分析及相关问题研究[J]. *华夏考古*, 2020(5).
- [206] 张吉. 随州文峰塔墓地青铜器工艺与腐蚀研究[D]. 北京: 北京大学, 2015.
- [207] 张吉. 东周青铜器的资源和技术: 以汉淮地区为中心[D]. 北京: 北京大学, 2020.
- [208] 陈建立, 张吉, 方勤, 等. 金道锡行: 简论商周时期长江中游地区金属流通网络[J]. *江汉考古*, 2024(5).

- [209] LI Y, YANG S, HAN D, et al. A metal production center on the southwest frontier of the Han Empire: an archaeometallurgical study of the Heimajing Cemetery Site in Gejiu, Yunnan Province, China[J]. *Asian Perspectives*, 2023, 62: 77-96.
- [210] PRYCE T O, CARRIGNON S, CADET M, et al. A partial prehistory of the Southwest Silk Road: archaeometallurgical networks along the Sub-Himalayan corridor[J]. *Cambridge Archaeological Journal*, 2023, 34: 1-40.
- [211] 魏强兵, 李秀辉, 王鑫光, 等. 虢国墓地出土部分青铜器微量元素的分析[J]. *文物保护与考古科学*, 2020, 32(5): 7.
- [212] 南普恒. 春秋时期晋国青铜器制作技术研究[D]. 北京: 北京科技大学, 2017.
- [213] MA D, WANG N, LI P, et al. How the metal supply for mintage shifts in the transforming monetary system of the Han Empire: archaeometallurgical study of the Wuzhu coins from the Guanghuacun cemetery, Chengdu, Southwest China[J]. *Journal of Archaeological Science: Reports*, 2024, 53: 104341.
- [214] POLLARD A M, BRAY P, HOMMEL P, et al. Beyond provenance: new approaches to interpreting the chemistry of archaeological copper alloys[M]. Leuven: Leuven University Press, 2018.
- [215] POLLARD A M, BRAY P, HOMMEL P, et al. Bronze Age metal circulation in China[J]. *Antiquity*, 2017, 91: 674-687.
- [216] YANG D, WU X, LIU R, et al. From diversity to monopoly: major economic policy change in the Western Han Dynasty revealed by lead isotopic analysis[J]. *Archaeological and Anthropological Sciences*, 2023, 15: 37.
- [217] LIU S, SUN Z, CUI T, et al. Beyond linear narratives: complex copper ore exploitation strategies in Early Bronze Age China revealed by geochemical characterization of smelting remains[J]. *Journal of Archaeological Science*, 2024, 171: 106092.
- [218] LIN J, LIU S, ZOU G, et al. Unveiling diverse copper trace element profiles from a single smelting site through LA-ICP-MS analysis[J]. *Archaeometry*, 2025.
- [219] JANSEN M, HAUPTMANN A, KLEIN S, et al. The potential of stable Cu isotopes for the identification of Bronze Age ore mineral sources from Cyprus Andraya: results from Uluburun and Khirbat Hamra Ifdan[J]. *Archaeological and Anthropological Sciences*, 2018, 10: 1485-1502.
- [220] BERGER D, FIGUEIREDO E, BRÜGMANN G, et al. Tin isotope fractionation during experimental cassiterite smelting and its implication for tracing the tin sources of prehistoric metal artefacts[J]. *Journal of Archaeological Science*, 2018, 92: 73-86.
- [221] 廉海萍. 商代晚期—西周早期金属芯在青铜鼎铸造中的应用[C]//河南省文物考古研究院, 香港承真楼. 商周青铜器铸造工艺研究. 北京: 科学出版社, 2019.
- [222] 邵安定. 秦始皇陵园出土彩绘青铜水禽制作工艺及相关问题研究[M]. 北京: 科学出版社, 2019.

- [223] 杨欢. 秦始皇帝陵出土青铜马车铸造工艺新探[J]. 文物, 2019(4).
- [224] PENG P. Metalworking in Bronze Age China: the lost-wax process[M]. New York: Cambria Press, 2020.
- [225] 曹大志. 贸易网络中的黄土丘陵[M]. 北京: 北京大学出版社, 2021.
- [226] 刘建宇, 梅建军, 刘煜, 等. 陕北出土商周青铜器的科学分析研究: 兼论商代晚期晋陕高原与殷墟的联系[M]. 北京: 科学出版社, 2023.
- [227] 苏荣誉. 鼎革时代的铸鼎: 春秋晚期到战国早期泛中原地区青铜鼎的铸造[C]//鼎与中华文明: 鼎与中华文明学术研讨会论文集. 郑州: 大象出版社, 2016.
- [228] 黎海超. 试论商周铜爵铸造传统与形制演变的关联[J]. 江汉考古, 2018(1).
- [229] 楚小龙. 二里头文化至西周文化时期青铜爵铸型分范技术的演进[J]. 华夏考古, 2017(1).
- [230] 岳占伟, 岳洪彬. 殷墟铜爵铸造工艺研究[J]. 文物, 2018(4).
- [231] 岳占伟, 岳洪彬, 牛世山, 等. 商代扁体铜卣的铸造工艺研究[J]. 南方文物, 2019(5).
- [232] 苏荣誉, 董韦. 盖钮铸铆式分铸的商代青铜器研究[J]. 中原文物, 2018(1).
- [233] 刘煜. 试论殷墟青铜器的分铸技术[J]. 中原文物, 2018(5).
- [234] 苏荣誉, 张昌平. 盘龙城青铜器的铸接工艺研究[C]//盘龙城与长江文明国际学术研讨会论文集. 北京: 科学出版社, 2016.
- [235] 苏荣誉. 论三足锯齿形铸接青铜鼎: 论联裆鼎和侯马铸铜作坊生产诸题[C]//高明先生九秩华诞庆寿论文集. 北京: 科学出版社, 2016.
- [236] 苏荣誉. 论铰接提梁卣中的枢分铸青铜器[M]//青铜器与金文. 上海: 上海古籍出版社, 2018.
- [237] 张昌平. 商周青铜礼器铸造中焊接技术传统的形成[J]. 考古, 2018(2).
- [238] 陈丽新. 随州叶家山曾国墓地铜觚钩连接技术及相关问题[J]. 考古与文物, 2018(3).
- [239] 苏荣誉. 见微知著: 中国古代青铜器的垫片及相关问题[C]//国博讲堂: 2013—2014. 上海: 上海古籍出版社, 2016.
- [240] 叶琳, 杨小刚, 黄悦, 等. 青铜器补铸现象的初步研究: 以三件重庆地区馆藏青铜器为例[M]//四川大学博物馆. 南方民族考古: 第十四辑. 北京: 科学出版社, 2018.
- [241] 胡钢, 王丽华. 春秋时期红铜纹饰青铜器透镶铸造工艺探讨[J]. 铸造技术, 2018(10).
- [242] 盛崇珊, 胡刚, 付淑华. 一件战国红铜嵌镶青铜豆的工艺逻辑探究[J]. 铸造技术, 2019(11).
- [243] 盛崇珊. 红铜装饰青铜器铸镶法和嵌镶法的比较研究[D]. 北京: 北京大学, 2018.
- [244] 刘百舸. 枣庄徐楼出土红铜纹饰青铜器铸镶工艺研究[D]. 北京: 北京大学, 2017.
- [245] 苏荣誉, 王丽华. 枣庄徐楼出土铸镶红铜青铜器探讨: 兼及红铜铸镶纹饰青铜器的时代与产地问题[C]//青铜器与山东古国学术研讨会论文集. 上海: 上海古籍出版社, 2017.
- [246] 刘百舸, 胡钢. 红铜铸镶青铜器的几个技术和艺术问题探析[J]. 中国历史文物, 2019(10).
- [247] 胡刚. 枣庄徐楼青铜器科技研究[M]. 上海: 上海古籍出版社, 2024.

- [248] 张昌平. 从三棱锥形器足看中国青铜时代块范法铸造技术特质的形成[J]. 考古, 2022(3).
- [249] 张昌平. 二里头文化至殷墟文化时期青铜器釜的铸造技术及其发展[J]. 文物, 2016(9).
- [250] 张昌平. 中国青铜时代青铜礼器器形、装饰、工艺与社会需求的互动: 关于器足[C]//河南省文物考古研究院, 香港承真楼. 商周青铜器铸造工艺研究. 北京: 科学出版社, 2019: 160-239.
- [251] 张昌平. 论二里岗文化早期青铜器的阶段性[J]. 文物, 2025(5).
- [252] 张昌平. 从曾仲旂父方壶看青铜礼器的制作理念[J]. 文物, 2019(11).
- [253] 张昌平. 商周之际的凤鸟纹卣: 从孝民屯到石鼓山[J]. 考古与文物, 2019(4).
- [254] 苏荣誉. 关于中原早期铜器生产的几个问题: 从石峁发现谈起[J]. 中原文物, 2019(1).
- [255] 苏荣誉. 妇好墓青铜器与南方影响[C]//河南省文物考古研究院, 香港承真楼. 北京: 科学出版社, 2019.
- [256] 苏荣誉. 商周青铜器技艺研究: 以湖南省博物馆代表性藏品为研究对象[M]. 合肥: 安徽科学技术出版社, 2023.
- [257] 杨菊, 李延祥, 赵福生, 等. 北京昌平马刨泉长城戍所遗址出土的铁器分析: 兼论炒钢工艺的一种判据[J]. 中国科技史杂志, 2014(2).
- [258] 陈建立, 张周瑜. 基于炉渣分析的古代炒钢技术判定问题[J]. 南方文物, 2016(1).
- [259] 张周瑜, 陈建立, 潜伟. 浅析中国古代生铁冶炼中的磷[J]. 南方文物, 2018(3).
- [260] 刘亚雄, 陈坤龙, 梅建军, 等. 陕西临潼新丰秦墓出土铁器的科学分析及相关问题[J]. 考古, 2019(7).
- [261] 黄全胜, 李延祥, 陈建立, 等. 以炉渣分析为主揭示古代炼铁技术的研究与探索[J]. 中国国家博物馆馆刊, 2016(11).
- [262] 卢欣彤, 潜伟, 张周瑜. 古代钢铁制品夹杂物研究述评[J]. 文物保护与考古科学, 2023, 35(6).
- [263] 卢欣彤. “南海 I 号”沉船出水铁器夹杂物研究[D]. 北京: 北京科技大学, 2022.
- [264] ZHANG Z, CHEN J, QIAN W, et al. Characteristics of various non-metallic inclusions in ancient cast iron and solid-state decarburized iron products from a government-run iron workshop during the Han Dynasty in Dongpingling Ruins, Shandong Province[J]. Journal of Archaeological Science: Reports, 2022, 46: 103663.
- [265] 齐雪义, 李安娜, 刘莉, 等. 河南泌阳东高庄遗址发掘简报[J]. 华夏考古, 2021(1).
- [266] 王荣耕. 邯郸地区冶铁遗址初步调查研究[D]. 北京: 北京科技大学, 2018.
- [267] 袁浩铭, 李永春, 黄全胜. 河北平山战国冶铁遗址初步调查[J]. 有色金属(冶炼部分), 2024(2).
- [268] 武越, 黄全胜, 李永春, 等. 山西翼城冶南汉代冶铁遗址初步调查[J]. 有色金属(冶炼部分), 2024(3).
- [269] 朱谨, 黄全胜, 李永春. 陕西韩城芝川古代冶铁遗址初步考察[J]. 有色金属(冶炼部分), 2024(2).

- [270] 王文平, 李小波, 余骏, 等. 湖北省鄂州市冶炼遗址调查简报[J]. 江汉考古, 2016(3).
- [271] 崔春鹏, 李延祥, 陈树祥, 等. 湖北鄂州古代冶炼遗物初步分析[J]. 江汉考古, 2016(3).
- [272] 魏国锋, 秦颖, 韩楚文, 等. 大冶李德贵冶炼遗址矿冶遗物分析[J]. 岩矿测试, 2008(2).
- [273] LARREINA-GARCÍA D, LI Y X, LIU Y X, et al. Bloomery iron smelting in the Daye County (Hubei): technological traditions in Qing China[J]. Archaeological Research in Asia, 2018, 16: 148-165.
- [274] 蒙长旺, 邹桂森. 广西梧州六朝冶铁遗址初探[J]. 金属世界, 2017(4).
- [275] 邹桂森, 蒙长旺, 李延祥, 等. 广西梧州后背山遗址冶炼技术初步研究[J]. 有色金属(冶炼部分), 2022(8).
- [276] 邹桂森, 蒙长旺, 黄全胜, 等. 广西平南六浊岭冶铁遗址出土冶金遗物初步研究[J]. 有色金属(冶炼部分), 2022(6).
- [277] 李凯旭, 罗立书, 黄全胜. 广西田东县大僚古代冶铁遗址初步考察[J]. 有色金属(冶炼部分), 2025(5).
- [278] 崔萍, 黄全胜. 黑龙江阿城西川冶铁遗址初步调查研究[J]. 有色金属(冶炼部分), 2023(7).
- [279] 黄全胜, 黄谦玺, 邹桂森, 等. 广东罗定船步铁炉村古代冶金遗址初步研究[J]. 有色金属(冶炼部分), 2023(3).
- [280] QIU T, TASHI N, WANGDUE S, et al. New discovery of iron smelting in central Xizang: analysis of metallurgical remains excavated from the Sermatang site in Shannan, Xizang, China[J]. Journal of Archaeological Science: Reports, 2025, 66: 105326.
- [281] 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).
- [282] 陕西省考古研究院. 郃城铸铁[M]. 上海: 上海古籍出版社, 2018.
- [283] 北京大学考古文博学院, 泉州市文化广电和旅游局, 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.
- [284] 张周瑜. 炒钢工艺研究[D]. 北京: 北京科技大学, 2023.
- [285] 乔尚孝. 灌钢工艺研究[D]. 北京: 北京科技大学, 2022.
- [286] 丁一. 百炼钢工艺研究[D]. 北京: 北京科技大学, 2024.
- [287] 刘煜, 杨树刚, 张颖, 等. 鹿邑太清宫长子口墓出土铜尊兽头的连接方式: 兼论商周青铜器的焊接技术[J]. 南方文物, 2022(6).
- [288] 彭启晗, 徐新民, 陈寅炜, 等. 绍兴南山遗址出土东周铅锡器的科学分析研究[J]. 南方文物, 2025(1).
- [289] 刘思然, 陈建立, 徐长青, 等. 江西上高蒙山遗址古代银铅冶炼技术研究[J]. 江汉考古, 2018(1).
- [290] 方立阳, 张吉. 大湖咀遗址发掘与周代金道锡行的新认识: 先秦时期冶金考古与金属物料溯源研究学术研讨会会议纪要[J]. 江汉考古, 2023.

- [291] 方立阳, 陈建立, 凡国栋, 等. 湖北赤壁大湖咀H58出土锡冶金微遗物的技术研究[J]. 江汉考古, 2025(6).
- [292] 张吉, 刘建业, 邬涵, 等. 荆州纪南城内的战国锡铅锭块及金属产地研究[J]. 江汉考古, 2025(6).
- [293] 陈建立, 张周瑜, 种建荣, 等. 西周时期周原地区的周原出土周原镀锡技术及文化意义[J]. 南方文物, 2016(1).

Focusing on Major Issues and Striving for Comprehensive Breakthroughs: A Review of Archaeometallurgical Research from 2016 to 2026

LIU Yu ZHANG Zhou-yu

Key Laboratory of Archaeological Sciences and Cultural Heritage,
Chinese Academy of Social Sciences

Abstract: From 2016 to 2026, supported by national policies and major scientific research projects, Chinese archaeometallurgical research has achieved leapfrog development relying on inter-institutional collaboration and interdisciplinary research. The disciplinary development, research teams and technical methods have been continuously improved, with comprehensive breakthroughs made in the research of copper and iron metallurgy, and accelerated progress in the study of non-ferrous metals such as lead & tin etc. Copper archaeometallurgical research has clarified the spatiotemporal evolution of the bronze smelting and casting technology system in the Xia and Shang dynasties, explored the important transmission path of metallurgical technology in the northwest region, and constructed a spatiotemporal network of bronze resource provenance exchanges in the Shang and Zhou dynasties, while further deepening the research on casting techniques, technical styles and regional characteristics. Iron archaeometallurgical research has entered a refined stage, with explorations carried out on the identification methods and metallurgical mechanisms of iron and steel technology, systematic fieldwork conducted at iron smelting sites and the correlation between such sites and social economy clarified, and a series of achievements made in restoration and simulation experiments. In addition, new progress has been made in the research on smelting technologies and material utilization of non-ferrous metals including lead and tin. Relying on materials

science and physical and chemical detection, the research in this period has improved the research methods of metal isotope archaeology, introduced techniques such as CT scanning and machine learning skill, and achieved in-depth integration with disciplines such as history and archaeology. It has provided key support for exploring the development of ancient handicrafts, the evolution of civilization and regional interactions, and laid a solid foundation for subsequent research.

Keywords: Archaeometallurgy; bronzes; smelting and casting technology; provenance; technology communication; iron and steel technology