



蓬勃发展的冶金考古研究



陈 建 立

(北京大学考古文博学院)

冶金技术对中华文明起源和发展起到重要推动作用,很长时期以来,中国冶金技术起源、发展及其对社会的影响问题一直是历史学、考古学和科技史研究的重点内容。2015年初,梅建军等对2005至2014的10年间中国冶金考古研究(特别是青铜冶金起源、商代青铜技术区域特征、早期铁器、失蜡法铸造、金器制作和秦代冶金技术等方面)系统总结之后,指出多学科交叉、冶金技术与社会和冶金术的中西交流是未来的研究重点,这一看法是很有见地的。可以说,近年来中国冶金考古的研究一直秉持学术研究 with 科普并重的理念,持续围绕冶金技术与中华文明这一主题开展的。具不完全统计,2015年国内共发表有关冶金考古研究文章书籍60余篇部,在田野考古调查和发掘、样品采集的标准化、冶铸遗物分析、冶金技术与社会、冶金技术的传播与交流以及研究成果的公众推广方面均有重要进展;2014年成立的“长江流域矿冶考古联盟”和“中国科学技术史学会工业考古专业委员会,为冶金考古研究提供了合作共享的平台。本文简要介绍2015年冶金考古研究的主要收获(因篇幅所限,未对每篇文献进行介绍,特此说明),探讨冶金考古研究的发展趋势,并对本期“生业与社会”专栏收入的7篇文章进行简单评述。

一、青铜冶铸技术研究成果丰硕

2015年在辽西、河西走廊、中原和长江中下游地区开展的早期铜矿冶遗址调查与发掘工作迎来

了收获高潮。

西北地区早期青铜冶铸遗址的年代和性质得以确认。西北地区是研究中国冶金技术起源的关键,北京科技大学、甘肃省文物考古研究所河西走廊矿冶遗址调查的基础上,确认张掖西城驿遗址是一处与早期铜冶金相关的聚落遗址,年代大致在2000BC~1600BC之间;对出土金属遗物和冶铸遗物的检测分析结果,表明西城驿遗址的冶金已进入从红铜—砷铜合金到锡青铜的青铜时代早期阶段,并显示至少在西城驿二期中段该遗址已经能够使用普通的铜氧化矿石冶炼红铜,再配入含有锡、砷、铅、锑、铋的矿石炼制青铜合金;对该遗址出土人骨和木炭样品进行的检测分析,初步揭示了当时人群的食物状况、树木利用和古环境之间的关系问题。西城驿遗址冶铸性质的判定以及生业状况的分析结果,为研究中国冶金技术起源问题提供了科学资料,该项工作充分说明多学科交叉在冶金考古研究中的重要与必要性。

辽西地区早期青铜冶金格局研究进入综合研究阶段。自2005年李延祥组织开展辽西地区早期矿冶遗址调查工作以来,截至2014年取得的收获包括:1)证实牛河梁保护区内存在一个属于夏家店下层文化早期以冶炼纯铜为目的的冶炼遗址群。2)发现克什克腾旗喜鹊沟、依和沃门特等多处青铜时代铜、锡矿开采遗址。3)赤峰北部地区存在一个以林西大井铜矿为起点的夏家店上层文化青铜冶铸遗址群。群内所有冶炼地点皆位于经过精心选择的具有安全保护条件的近水遗址上,尽管使用了同样

矿石,但因冶炼技术不同而生产出不同的青铜合金种类。4)与夏家店下层文化相比,夏家店上层文化的青铜产业格局出现了“简单和倒退”的趋势。王立新和付琳在对2011年发掘的克什克腾旗喜鹊沟铜矿遗址的文化、年代、聚落特点和生计方式、生产方式等问题进行了综合探讨,认为该遗址显然不是普通的定居性村落,而应是一处季节性的以开采铜矿为目的的特殊聚落;开采矿石和加工选取矿料的工作是同时进行的,出产的矿砂很可能主要是被输送到他地进行冶炼;推测喜鹊沟遗址出产的矿料至少应有一部分是向商王朝或其他具备铸造大型青铜器能力的方国输出。当然情况是否如此,需要更多的考古证据,也需要从科技检测方法上有所突破,其实,从金属资源的角度探讨中原地区与周边的关系是多年来商周考古研究的重点内容。

长江中下游地区矿冶遗址调查、发掘与研究工
作有重大突破。该地区的丰富的铜锡铅矿资源及其开发利用在中国冶金史上具有十分重要地位,对该地区的矿冶遗址进行系统调查、价值认知与保护利用即是生业与社会研究的重要内容,也是全面认识中原与周边关系的必然要求。安徽、江西和湖北省文物考古研究所分别对铜陵师姑墩、九江莽麦岭、瑞昌铜岭和大冶铜绿山遗址的田野调查与发掘,试图全方位揭示矿山、开采、焙烧、冶炼、青铜器物、居址、墓葬等方面的信息,并以此为基础开展瑞昌铜岭和大冶铜绿山遗址的大遗址保护与展示工作。对九江莽麦岭、瑞昌铜岭、枞阳汤家墩和阜南台家寺等遗址出土冶铸遗物的年代测定与检测分析,则进一步深化了对长江中下游地区早期铜冶金技术的认识。李延祥等对安徽长江两岸和江西九江的调查,发现了数十处早期(春秋之前)矿冶遗址,并采集样品进行检测分析。通过铜陵师姑墩、枞阳汤家墩和大冶香炉山遗址出土冶铸遗物的研究,发现这些早期遗址多为冶炼、熔炼和铸造共存,冶铸技术多样,冶炼活动的控制性不强,而锡矿资源可能来自赣西北的矿山。在长江中下游地区青铜器特别是随枣走廊地区青铜器群的研究中,将矿冶遗址与资源环境、金属文物腐蚀与埋藏环境之间关系的调查和分析引入田野工作之中,加强冶金遗存采样和

实验室检测分析的规范化研究,也有重要进展。

基于长江中下游矿冶遗址的重要性,建设国家矿冶遗址考古公园是时代的必然。湖北省于2011年重启中断26年的大冶铜绿山遗址考古工作,截至2015年底,发现春秋至宋明时期的矿井、选矿场、焙烧炉、冶炼炉、工棚、墓葬等与采冶活动有关的遗迹,为重构大冶铜绿山矿冶技术发展史、丰富矿冶文化内涵提供了弥足珍贵的资料。本期陈树祥的《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》一文,简单报告了这些新收获,从矿冶考古领队的角度,重点对矿冶考古存在的问题进行了深入剖析,并提出今后的工作重点在于系统整理资料,细致开展田野调查与发掘,加强多学科合作研究。这也是生业与社会研究的重要方法。

黄陂盘龙城遗址因其重要的地理位置以及独特的文化性质,是商周考古持续讨论的热点问题之一。但以往研究,多强调盘龙城遗址与商王朝之间的隶属关系,重点着笔于其是商王朝获取南方铜资源的军事据点,而忽略了盘龙城的自身特点。黎海超的《试论盘龙城遗址的区域性特征》一文,采用牛津大学 Mark Pollard 团队提出的关于利用微量元素分组来研究青铜器的生产与流通问题的方法,对盘龙城和郑州出土的青铜器进行了分析,并从青铜器的器形、纹饰、铸造工艺以及印纹硬陶和原始瓷器几个方面对盘龙城和郑州商城进行对比。发现盘龙城出土的一部分铜器可能来源于自身独立的青铜器生产体系,盘龙城出土的印纹硬陶和原始瓷器在类型和使用上也与郑州商城存在差别,因此认为盘龙城遗址虽主体因素属商文化,但具有一定的区域特征。此篇文章利用国外关于青铜资源研究的新方法,结合中国考古学研究的实际情况,即根据青铜器的形制、技法与纹样的分析结果讨论微量元素分组问题,结论虽与张昌平关于盘龙城青铜器生产的总体判断一致,但从新的角度给予了补充;另外将商周时期两种重要与远程运输有关的原始瓷与青铜器结合起来综合分析,也是冶金技术与社会研究需要倡导的。

随州叶家山墓地的发掘掀起了西周考古研究

的新高潮,仅青铜器就出土 800 余件套,还有铜铤,这批铜器年代明确、保存完好、组合与共存关系清晰、族属铭文内容多样,为研究商周铜器生产、青铜物料流通等相关问题提供了良好素材。郁永彬等完成的《关于叶家山青铜器铅同位素比值研究的几个问题》一文,有针对性的选择了 129 件铜器样品进行了铅同位素比值测定,就合金料的添加对青铜器铅同位素比值的影响,不同合金类型器物的铅同位素比值特征,叶家山铜器群的构成,曾国铜器制作原料的来源等进行了分析;另选择西周时期其他遗址和墓地 60 件铜器样品进行了铅同位素比值测定,并结合已发表的数据对西周青铜工业生产、组织、管理和运营模式进行了阐释。论文提出“叶家山曾国铜器的铅料可能有两个来源,其中铅焊料和大部分铅锡青铜曾器的铅同位素与东秦岭地区铅矿有较高的重合度;铜料的来源尚难以确认,可能有多个来源,但与大冶铜绿山古矿区铜矿料的铅同位素数据更为接近”,这是值得关注与深入研究的。该文以问题为导向,在选择样品时兼顾不同器类、组合、风格和族属铭文内容,在分析问题过程中注意到不同合金类型的铅同位素比值所指示的原料信息不同,使得利用铅同位素比值进行不同铜器群比较和原料溯源研究更具有针对性和说服力,从铜器技术、文化和社会三个层面解决考古学问题。如果说这种研究方法及结果对考古学研究有所推动的话,我们也希望未来的冶金考古研究能够走出一条与考古学研究更加紧密结合的道路。

2015 年冶金技术的中外交流研究依然得到学界的重视。林梅村、刘翔和刘瑞等发表的关于倒钩铜矛系列文章,在梅建军关于倒钩铜矛研究的基础上,进一步指出塞伊玛—图尔宾诺文化在中国的重要性,它以实物说明中国冶金术来自欧亚草原文化;再次揭示了中国与西方之间的文化交流是从欧亚草原开始的,中国文明的发展是中国文化与世界其他国家或民族优秀文化不断交流的历史^⑩。尽管该系列文章关于铜矛合金成分的解释存在一定问题,但不可否认,我们欣喜地看到这种有意识地利用自然科学手段从事考古研究的进步。杨建华、邵会秋通过欧亚大陆青铜时代和早期铁器时代金属

技术传播的分析,将北方欧亚草原金属之路和新疆丝绸之路的兴衰关系进行了讨论^⑪。陈坤龙等对宝鸡石鼓山铜甲的分析,指出铜甲锻造成型的工艺特点或许显示了与境外青铜文化的联系,它在宝鸡地区的出现可能反映了外来工艺与中原技术传统相结合而进行的新的创造^⑫。白云翔通过对韩国完州郡上林里发现的铜剑和日本福冈县平原 1 号墓出土铜镜的考察,指出前者是公元前 4 世纪后半的战国中期东渡朝鲜半岛的吴越地区铸剑工匠在当地采用泥土范或陶范铸剑技术制作的;后者是公元 2 世纪中叶前后的东汉中期后半东渡日本九州的洛阳地区铸镜工匠采用泥土范或陶范铸镜技术在当地制作的;在各地交往和文化交流的过程中,人的远距离移动发挥了根本性的作用^⑬。探究古代各地之间人群的移动和交流,研究区域间的文化与技术交流,也是冶金考古的研究取向。

本期刊发的《西周时期周原镀锡技术及其文化意义》一文,结合镀锡技术讨论了文化与技术交流问题。随着考古工作不断的进展,发现的先秦时期镀锡铜器数量越来越多,出土地点相对比较集中,集中发现于从东北到西南的半月形文化传播带地区,从西周早期持续到战汉时期。该文以陕西岐山宋家墓地与扶风姚家墓地出土的 4 件镀锡青铜器为切入点,逐步深入讨论了中国先秦时期周原地区的镀锡技术、各地镀锡技术的区域性特征、相互影响及传播路线,周原镀锡技术最早出现的文化背景及其内涵等。文章通过金相、扫描电镜微区观察等多种手段揭示了周原地区镀锡样品的技术特征,指出镀锡层厚度在 15~36 μm 之间,镀锡层主要为 δ 相和 $(\alpha+\delta)+\delta$ 组织,均为热镀锡的产物。文章还集中收集梳理了中国其他地区、不同时期的镀锡铜器材料的测试分析结果,通过比较指出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,其中陕甘宁、巴蜀、古典地区技术熟练,且已形成当地特色的表面镀锡处理工艺,分析结果深化了中国北方草原地区的铜器生产、实用以及青铜镀锡技术的认识,并在此基础上总结了晚期巴蜀文化区、古滇文化区镀锡工艺特点,勾勒出中国先秦时期镀锡工艺出现和传播的技

术路线。

二、钢铁冶炼技术研究纵深发展

多年来,关于中国早期铁器的出现和冶铁技术起源问题有较多的讨论。近 10 年来,中国古代钢铁技术研究的收获主要体现在新疆、甘肃等西北地区,河南、陕西和山西等中原地区和吉林、辽宁和黑龙江等东北地区早期铁器的检测分析;四川成都平原地区、广西贵港地区、河南南阳盆地周边地区、山东临淄齐故城、章丘东平陵遗址、北京延庆水泉沟等地古代冶铁遗址的调查与发掘;以及古代钢铁技术的考古学研究方面,其中广西等地块炼铁遗址的发现及其冶炼性质的认定是最突出的成果之一。尽管成果较多,但部分地区冶铁遗址的田野工作较少、铁器的检测分析工作不多;块炼铁技术的发展历程、生铁技术的发展历程以及块炼铁和生铁技术之间的交互作用尚不清楚;特别是尚未建立起公认的炒钢、块炼渗碳钢以及对应的冶炼、炒炼或精炼技术的判定标准,严重影响了对中国古代冶铁技术和铁器材质的正确判定,也严重影响了对钢铁技术传播与交流的认识。因此,中国古代钢铁技术研究需要向纵深方向发展。

2015 年 4 月,由北京市文物研究所、北京科技大学、北京大学和延庆县合作发掘的北京延庆大庄科冶铁遗址群被评为“2014 年全国十大考古新发现”,是矿冶考古的新突破。本项工作采用“聚落考古”理念,全程运用多学科交叉的方法和较为全面的科技手段、从技术本体拓展到产业整体的研究理念,在田野考古调查、发掘、实验室检测分析、实验考古验证、保护与展示等各方面,对钢铁冶金所涉及的整个“产业链”和“运营链”开展了全方位研究和探索,以探视冶铁遗址群的全貌。本项目发现了采矿、冶铁、加工、居住、生活等遗址遗迹,涵盖冶铁产业全流程,规模大、保存好、类型全,具有极其重要的历史意义和学术价值;对炉型、耐火材料、炉料、鼓风、工艺等方面的检测分析,开展冶铁实验考古实践,深度揭示了辽代钢铁技术,为考察辽代钢铁工业的水平和规模,探讨中国先进的钢铁技术向

周边地区的传播途径和方式,提供了最新的考古证据;同时,项目组根据矿冶遗址的特点,对该遗址群钢铁产业流程各环节的遗址遗迹进行了全面保护与展示研究。尽管因条件所限,我们对大庄科冶铁遗址群的冶金遗物分析、遗址功能分区、冶铁生产管理、工匠的居与葬、技术传播交流等问题的认识仍不深入,但通过这项工作所展示的冶金考古研究模式的探索,得到学界的认可。因此,研究方法及模式的建立是冶金考古可持续发展的关键。

近年来,随着湖北、四川、贵州、云南、广西和福建等地冶铁遗址或出土铁器的研究,结果表明在春秋战国时期,中原以及邻近的楚地最先建立的生铁技术自产生之后已逐渐向南方传播,大约在战国晚期至汉代,传至西南地区、岭南地区和东南沿海地区,并影响到中南半岛诸国。而在隋唐以后,这些随着海上丝绸之路的繁盛,中国生产的铸铁制品及生铁冶炼技术也随着贸易和移民传播至东南亚的更广大地区。广西地处中国中原地区与中南半岛大陆地区的主要连接地带,从古至今多种文化在广西地区传播、交流,并融合成为具有本地的文化特征。考古研究表明,广西地区至迟于战国时代晚期开始使用铁器,但关于广西铁器时代的早期面貌及其制作工艺、技术内涵等至今仍然是模糊不清。黄全胜等完成的《广西战国汉代墓葬出土铁器的科学研究》一文,分析了广西武鸣马头安等秧的战国墓葬、桂平市寻旺乡大塘城的汉代墓葬出土的铁器,指出安等秧战国铁锤为生铁制品;大塘城长铁剑为炒钢制品,是广西地区的首次发现;大塘城铁釜为生铁制品,短铁剑为块炼铁制品。文章认为铁锤的使用提高了农业生产力,促进了农耕文明的发展,武鸣战国铁锤标志着中原地区的农耕技术至迟于战国时期传播到广西南部地区,为深入认识中国西南地区农耕文明发展提供了资料。但应当看到,铁器和冶铁技术的传播与交流具有分阶段的不平衡性、传播方式的多样性,以及钢铁技术在不同文化的作用也有所不同。该文仅通过数件铁器的检测分析,探讨钢铁技术的传播与交流、钢铁技术与社会发展的关系问题,显然资料是不够的。因此,我们建议将来能够对包括广西在内的南方地区(岭南和西南地区)

古代钢铁技术进行系统研究,以更细致地梳理块炼铁和生铁的关系、生铁技术的传播路线,研究这种传播的技术与社会原因,并深入分析生铁技术对传入地的影响。

炒钢工艺作为中国古代重要制钢技术之一,是利用生铁在半熔融状态下氧化脱碳制钢的一种方法。以往研究鉴定出不少炒钢制品,并发现一些炒钢遗存,如北京延庆水泉沟冶铁遗址疑为炒钢的地炉,舞钢石门郭和沟头赵遗址、辽代饶州城和昌图永安冶铁遗址、广西南平六陈遗址等地发现的高铁炉渣等。我们曾提出一个中国古代炒钢制品的判定标准,即通过钢铁制品中非金属夹杂物的成分和物相类型来区分炒钢与其它制铁技术产品。但这些判定仅是以往经验的总结,缺乏理论分析;另外分析的高铁炉渣也与国外精炼渣有相似的显微组织结构,因此对中国古代炒钢技术及炒钢制品的判定在国际上还有争议。李延祥等发现归入炒钢的铁制品中普遍存在含磷非金属夹杂物或磷钙相,提出这些物相为炒钢判定的依据^⑤,从而打开了炒钢判定标准研究的新局面。本期刊发张周瑜的《中国古代炒钢技术判定标准的再探讨》一文结合最新考古发现,分析山东章丘东平陵故城冶铁遗址出土的高炉炼铁炉渣及积铁块样品,通过磷元素在不同冶炼过程和气氛(炒钢或钢铁精炼)中转移过程的物理化学变化分析,初步解释了不同冶炼过程炉渣的形成机理,并对中国古代炒钢制品的判定标准作出补充。通过本项工作,我们认为对冶金考古中长期存在的难点问题,需要进一步加强理论研究,以进一步夯实构建中国古代钢铁技术体系的基础。

三、金银冶炼技术研究茁壮起步

黄金和白银的生产在任何古代社会都是非常重要的手工业部门,但国内外均很少从田野冶金考古方面开展研究工作。赣东北的上饶地区自古以来便是金、银的重要产地,《史记·货殖列传》中便有“豫章出黄金”的记载。自汉代以来该地区金银冶炼活动频繁,在唐宋时期达无论从金银产量及文献所载矿场数量都达到了高峰,成为当时重要的金银产

区。因此,该地区存留的大量金银冶炼遗迹、遗物为我们开展有关冶金考古研究提供了良好素材。

自2011年以来,我们与江西省文物考古研究所合作,重点对上饶包家金银冶炼遗址开展了田野调查和试掘工作,初步廓清了该遗址的采矿、冶炼区域;采集矿石、炉渣和木炭样品进行检测分析,并根据分析结果进行模拟实验,对遗址的年代、生产规模以及生产技术有了较为系统的认识,初步重建了其冶炼技术。2015年刘思然等发表的论文认定包家遗址存在“铁还原法”冶炼技术,也就是加入铁或铁的氧化物作为还原剂对贵金属的硫化矿石进行冶炼,这是世界冶金史上的首次发现^⑥。《上饶县包家金银冶炼遗址的冶金考古调查与研究》一文在上文的基础上,通过多种证据再次综合论证了该遗址的主要使用年代为唐宋,且有可能延续至更晚时期;指出包家遗址主要开采岩金矿,由于含金矿物颗粒细小,需要通过火法冶炼提取黄金;除此以外,包家遗址矿石和炉渣的银含量较高,因此古人可能同时生产金、银两种金属;包家矿石中铅含量较低,影响了银的提取效率。推测该遗址工匠因受到其专业化程度及生产组织模式的影响,未从其他区域大量进口铅以提高提银效率。本文还对竖炉冶炼和坩埚冶炼的环境特征进行了分析,认为冶炼技术与赋存环境具有广泛的动态联系,揭示了一系列制约了冶炼遗址选择的技术因素,这也导致不同地区形成了不同的技术传统。

包家遗址的发现为研究中国古代脉金开采以及火法冶炼金银技术提供了新的材料,本项研究再次说明通过文献研究、考古调查以及科技分析手段对古代冶金遗址进行综合考察的重要性,也标志着中国古代金银冶炼技术研究从文献调研到田野调查与综合研究阶段,未来发展值得期许。

四、结语

2014年11月在北京大学考古文博学院召开的“冶金技术与中华文明发展”学术研讨会上,李伯谦教授指出:“冶金考古近年来研究进展与学科走向,实际上是传统考古如何走向科学化问题的缩

影,要充分融合实验室分析和田野考古调查、发掘、整理、研究,不同学科的学者应该有更为广泛的交流和整合”。韩汝玢教授也期望“冶金考古的未来,一定要结合材料、技术、时代三个方面,充分整合考古与实验室检测资源,建立冶金考古采样、检测与分析的标准化,这是未来冶金考古人的历史使命”。从2015年的冶金考古研究来看,在田野考古调查与发掘方面有新的发现与突破,在检测分析方法与“大数据”背景下考古学解释方面有新的发展,多学科交叉的冶金考古研究模式也得到重视,这些工作一方面丰富了手工业考古理论、技术与方法的探索,一方面也对矿冶文化遗产保护提供了支撑。

2016年1月在北京大学考古文博学院召开的“冶金技术与中华文明发展:长江流域矿冶遗址联盟第一次学术研讨会”上,与会代表普遍认为矿冶遗址的田野考古与冶金考古实验室工作密切结合,将田野延伸至实验室,将实验室扩展到野外,在田野发掘、取样全程与科技分析检测充分结合的研究方式,由器物研究转向了背景研究和社会行为模式研究,是中国考古学未来的发展方向。因此,全面总结多年来冶金考古的发现和成果,整合研究力量,有针对性地设计学术课题联合攻关,加强相关地区的工作以填补区域性和技术性空白,同时建立统一的采样、发掘和分析标准,设计建立可共享的数据库,进行了大数据分析,深入开展冶金技术中华文发展之关系的理论研究,必将为探索中华文明的形成贡献更多的成果。

注释:

Jianjun Mei, Pu Wang, Kunlong Chen et al.. Archaeometallurgical studies in China: some recent developments and challenging issues. *Journal of Archaeological Science* 56 (2015) 221-232

北京科技大学冶金与材料史研究所、甘肃省文物考古研究所:《张掖西城驿冶金遗址调查报告》,《考古与文物》2015年第2期。

陈国科、李延祥、潜伟等:《张掖西城驿遗址出土铜器的初步研究》,《考古与文物》2015年第2期。

李延祥、陈国科、潜伟等:《张掖西城驿遗址冶铸遗物研究》,《考古与文物》2015年第2期。

张雪莲、张君、李志鹏等:《甘肃张掖市西城驿遗址

先民食物状况的初步分析》,《考古》2015年第7期。

王树芝、李虎、张良仁等:《甘肃张掖黑水国西城驿遗址出土木炭指示的树木利用和古环境》,《第四纪研究》2014年第1期。

李延祥:《中原与北方地区早期青铜产业格局的初步探索》,《中国文物报》2014年2月28日第5版。

王立新、付琳:《论克什克腾旗喜雀沟铜矿遗址及相关问题》,《考古》2015年第7期。

a. 郁永彬、王开、陈建立等:《皖南地区早期冶铜技术研究的新收获》,《考古》2015年第5期; b. 湖北省文物考古研究所、北京科技大学冶金与材料史研究所、大冶市博物馆等:《湖北大冶市香炉山遗址调查简报》,《江汉考古》2015年第2期。

a. Bray, P., Cuénod, A., Gosden, C., Hommel, P., Liu, R., Pollard, A.M. Form and flow: the ‘karmic cycle’ of copper, *Journal of Archaeological Science*. 56, 2015. 202-209; b. A. M. Pollard, P. Bray, C. Gosden, A. Wilson, H. Hamerow. Characterizing copper-based metals in Britain in the First Millennium AD: A preliminary quantification of metal flow and recycling. *Antiquity*. Vol.89. 2015. pp697-713.

⑪林梅村:《塞伊玛—图尔宾诺文化与史前丝绸之路》;刘翔:《青海大通县塞伊玛—图尔宾诺式倒钩铜矛考察与相关研究》;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》,《文物》2015年第10期。

⑫a. 杨建华、邵会秋:《匈奴联盟与丝绸之路的孕育过程——青铜时代和早期铁器时代中国北方与欧亚草原的文化交往》,《吉林大学社会科学学报》2015年第1期。 b.邵会秋、杨建华:《从夏家店上层文化青铜器看草原金属之路》,《考古》2015年第10期。

⑬陈坤龙、梅建军、邵安定等:《陕西宝鸡石鼓山新出西周铜甲的初步科学分析》,《文物》2015年第4期。

⑭白云翔:《从韩国上林里铜剑和日本平原村铜镜论中国古代青铜工匠的两次东渡》,《文物》2015年第8期。

⑮ a.杨菊、李延祥、赵福生等:《北京昌平马刨泉长城戍所遗址出土铁器的实验研究——兼论超纲工艺的一种判据》,《中国科技史杂志》2014年第2期; b. 檀剑:《黑龙江省凤林古城出土铁器研究》,北京科技大学硕士学位论文,2014年。

⑯ Siran Liu, Thilo Rehren, Jianli Chen, et al.. Bullion production in imperial China and its significance for sulphide ore smelting world-wide. *Journal of Archaeological Science* 55 (2015) 151-165

(责任编辑:周广明)