

史前至夏商时期陶器生产的科技研究

金秀妍

中国社会科学院大学历史学院, 北京 102488

摘要 陶器生产一直是史前至夏商时期科技考古研究的重要议题。从历时角度来看, 相关研究基本经历了起步、初步发展、快速发展三个时期。其研究对象从单纯的陶片扩展至陶泥、麇和料、陶窑等与陶器生产相关的各类遗存; 研究内容从对基础的原料成分、成型工艺、物理性能、烧制技术的关注转向成型技术的演进、生产组织面貌、贸易流通等深层次问题; 研究方法则从依赖单一的科技手段发展至多技术、多学科的综合研究, 一些研究范式被陆续提出, 为陶器生产科技研究提供了新的思路 and 方向。

关键词 史前至夏商时期; 陶器生产; 科技考古

1 引言

史前至夏商时期的陶器生产研究是科技考古的关键议题, 主要借助化学成分分析、显微结构分析、痕迹观察及实验模拟等多种技术手段, 围绕陶器从原料到成型的各个环节展开探讨, 揭露各环节所反映的生产面貌、产品流通与技术交流情况, 以为建构文化谱系、还原人群的生产生活提供必要信息。然而, 尽管这一时段的陶器生产研究在科技考古领域占据重要地位, 但尚未见到学界有对其研究历程的全面回顾, 仅部分学者在梳理科技考古发展史时有所述及^[1-12], 但因缺乏专题性视角, 对具体内容的总结往往不够详尽, 对研究意义的评述则局限于技术手段层面, 未结合大的学科发展背景, 因而缺乏应有的广度与深度。

在全面搜集、梳理已发表的相关论著后, 可将史前至夏商时期的陶器生产研究细化为陶泥与麇和料、成型工艺、绘彩与施釉、物理性能与烧制技术、生产组织与性质、产地与流通、理论与方法七个专题, 此外还包括融合多种技术手段, 讨论多个专题问题的综合性研究成果。其研究历程又可依据研究内容的转变与研究视角、方法的革新划分为1990年以前、1990—2010年、2011年至今三个阶段。本文拟以上述专题为切入点, 系统回顾各阶段陶器生产的研究情况、亮点与不足之处, 并在此基础上对研究前景予以讨

收稿日期: 2024-08-13; 接受日期: 2024-11-19

基金项目: 中国社会科学院大学研究生科研创新支持计划科学研究项目: 彩陶纹饰个体特征研究——基于多元统计与卷积神经网络 (2024-KY-048)

作者简介: 金秀妍, 博士研究生, 主要从事史前考古、陶器生产等研究。Email: jinxiuyan0722@163.com

论,以为关注此议题的同仁提供有益参考,不足之处,还请方家指正^①。

2 起步阶段:1990年以前

陶器作为科技考古研究的先锋领域,早在新中国成立前便吸引了自然科学与考古两大学科的关注。当时,以王琏、周仁为代表的自然科学研究者专注于历史时期瓷器的化学成分研究,如1921年王琏发表的《中国古代陶业之科学观》,便是对陶瓷化学成分的深入剖析^[13]。1928年,周仁牵头创办国立中央研究院陶瓷及钢铁试验工场,着重对陶瓷坯泥、彩釉进行研究。一年后,他还领导陶瓷试验场系统调研了全国各地的瓷土与耐火泥资源,并多次赴杭州凤凰山万松岑南宋官窑遗址进行实地发掘,取得了大批历代烧瓷的数据,可视为自然科学与考古学初步融合的典范^[14]。

此时虽正值中国考古学的起步阶段,但部分学者已前瞻性地将科技手段运用于史前至夏商时期的陶器生产研究中。最早如安特生在发掘仰韶村时,便邀请奥地利共和国陶瓷化学家梅耶斯保(Meyersberg)对仰韶村遗址与秦王寨遗址出土的两组彩陶片进行烧成温度测试^[15]。李济也有对殷墟发掘所获的不同类别陶器进行化学成分、呈色、吸水率等物理性能方面的考察^[16]。在1938年出版的《赤峰红山后:热河省赤峰红山后史前遗迹》中,矾松岭造对红山后遗址出土的陶器残片进行礞和料、呈色与物理性能等方面的分析,这部著作是最早刊录我国陶器生产科技分析结论的考古发掘报告^[17]。在实验考古领域,吴金鼎在整理高井台子遗址发掘材料时利用模拟实验讨论了陶色与烧制技术之间的关系,他的博士学位论文《中国史前陶器》(Prehistoric Pottery in China)更是通过观摩数万片陶片实物、借鉴原始制陶技艺写成,可视为实验考古研究的集大成之作^[18,19]。

新中国成立后,周仁领导下的中国科学院上海硅酸盐研究所成为古陶瓷研究领域最具实力的科研机构,虽研究内容多聚焦于历史时期瓷器的理化分析,但其思路与技术方法仍对史前至夏商时期的陶器生产研究产生了重要影响。此时有关这一时段的研究集中于陶泥与礞和料、绘彩与施釉、物理性能与烧制技术三个专题。在陶泥与礞和料方面,以彭适凡发表的《我国南方古代印纹陶制作工艺的探讨》为代表,该文收集了史前至汉代南方地区的陶器与印纹硬陶标本,通过观察它们在 Al_2O_3 、 Fe_2O_3 等化学成分上的变化,揭示出南方地区陶器制作工艺的演变过程^[20]。在绘彩与施釉方面,N. Sundius指出马家窑文化的陶片中包含一种钙和铝组成的铝酸盐化合物,这是造成甘肃仰韶陶片较河南仰韶村陶片陶色偏黄的重要原因^[21]。在物理性能与烧制技术方面,孙再清、孙仲田与潘贤家利用穆斯堡尔谱讨论陶器的烧制气氛,详解 Fe^{3+} 与 Fe^{2+} 在氧化或还原气氛中的转换及其对

① 本文对史前至夏商时期陶器生产科技研究的回顾主要聚焦于普通陶器,对于如印纹硬陶、低温铅釉陶等特殊陶器,鉴于它们在物理特性、科技分析手段、研究目的及所依据的理论方法上与普通陶器存在显著区别,在此不纳入讨论范围。

陶色、烧制温度的影响^[22-32]；李文杰特别关注关庙山遗址所出大溪文化陶器的渗碳工艺，总结出窑内与窑外两种渗碳方法^[33]；大连瓷厂则通过模拟实验讨论了陶泥料细度、烧成温度与陶器成品机械强度之间的关系^[34]。

1964年，周仁等发表《我国黄河流域新石器时代和殷周时代制陶工艺的科学总结》一文，综合科技手段、民族学材料与实验考古方法，对黄河流域史前至三代陶器的陶泥与髹和料成分、成型工艺、绘彩、物理性能与烧制技术多个专题进行剖析，开创了陶器生产综合性研究的新路径^[35]。受此启发，一系列综合性研究专著相继问世^[36-38]，其中以中国硅酸盐学会编著的《中国陶瓷史》尤为突出，该书系统介绍了史前至秦汉各个时段陶瓷的种类与制作工艺，阐述了历代陶瓷工艺的发展历程^[39]。在针对特定遗址的综合性分析方面，如李家治对河姆渡遗址所出陶器的髹和料类型、化学成分的历时性变化与烧成温度进行讨论，多角度揭露了河姆渡先民制陶技术的发展过程^[40]；李敏生等不仅讨论了关庙山遗址所出陶器的化学成分、物理性能与烧制技术，还特别对陶衣与施彩部位的化学成分有所关注^[41]。

1990年以前是史前至夏商陶器生产科技研究的萌芽期，由于学界对科技分析的认识和重视程度不高，考古学者多作为研究对象及资料的提供者，不直接参与陶器生产的科技研究。在这一阶段，仅殷墟小屯、藁城台西、北首岭、崧泽等遗址的考古报告收录了陶器生产研究的科技检测结果^[16,17,42-44]，全国范围内开展相关研究的遗址仅有56处，其中经过系统田野考古发掘的并不多，而只是对采集来的陶片进行了测试分析。在这一阶段的传统考古学研究中，陶器多凭借其形制特征成为构建各个地区考古学文化序列的关键遗物，在此影响下，科技研究者也多集中对特定地域或遗址进行长时段、综合性的探讨，旨在讨论不同陶器成分类别或历时性变化，为考古学文化中的类型学研究和文化谱系构建提供依据，故而研究角度、方法与理论都处于摸索和积累阶段。尽管这一阶段的研究内容局限于陶泥与髹和料、绘彩与施釉、物理性能与烧制技术三个专题，但对跨区域的制陶技术交流与产地流通问题也有触及，虽不够深入，但仍为后续研究提供了宝贵思路。

3 初步发展阶段：1990—2010年

20世纪80年代末90年代初，中国社会科学院考古研究所、中国科学技术大学、北京科技大学等多家单位联合召开第一届全国科技考古学术讨论会，正式将断代测年、冶金技术与古陶瓷研究纳入科技考古的主体内容^[12]。进入20世纪90年代，随着科技手段的普及应用与国内外考古学理论的密切交流，学界进一步认识到陶器在科技考古领域的重要性，在此背景下，“中华文明探源工程”第二阶段正式将陶器专项纳入研究范畴，带动了史前至夏商时期陶器生产科技分析的热潮^[45,46]。

此阶段有关陶泥与髹和料的研究中，李文杰的贡献不容忽视，他系统梳理了史前至汉代的制陶黏土，将其划分为普通易熔黏土、高镁质易熔黏土、高铝质耐火黏土与高硅

质黏土四类,为后续的相关研究奠定了分类标准^[47]。针对具体遗址的研讨也陆续开展^[48-52],研究者在测定化学元素和矿物成分的基础上,开始尝试揭露原料配比中的更多细节,如Stoltman等对涿北商城及殷墟遗址不同类型的陶器及黏土进行岩相分析,发现安阳地区的商代工匠掌握了三种陶泥配比技术,包括以不含羼和料的陶土制作日用陶器、以加入非塑性特征的羼和料制作炊器,还有以具有高含量粉砂的陶土制作陶范^[53];赵春燕等选取兴隆洼遗址不同房址中各层位的陶器进行中子活化分析,发现大部分房址所出陶片的原料可能相同,位居聚落中心的大房址则在不同时期采用不同的制陶原料制作陶器,此房址可能具有特殊地位^[54]。

成型工艺是此阶段新出现的专题。钟华南对海岱地区大汶口与龙山文化的陶器进行一系列模拟实验,发现部分蛋壳黑陶杯采用了注浆成型法^[55-57];以尉崇德为代表的学者采取实验考古方法,详解陵阳河、大朱家村与杭头村三处遗址所出“足核”在制作袋足中的作用,并通过复制工艺成功还原了白陶鬲的成型流程^[58];范黛华等利用X光透视技术对两城镇遗址的陶器进行工序拆解,通过观察陶器胎体内气孔的排列与器底、内壁轮旋痕迹的角度关系,精准推断出制作时陶轮的旋转状态以及陶工手提泥筒时施力的方向,还根据薄胎陶杯内壁的水平平行凹槽宽度,推测器壁在晾干后可能经历了进一步的刮磨处理,还原了陶器生产的微观工序^[59]。

针对各遗址出土彩陶或陶器陶衣的成分测定在这一阶段颇为流行^[60-72]。在此基础上,以马清林、李文杰为代表的学者就颜料的矿物成分或化学成分达成了系统认识。马清林总结认为,史前先民分别以浓黄土、褐铁矿和赤铁矿制作黄色、棕色和红色颜料,以软锰矿和磁铁矿制作黑色颜料,以重晶石、硬石膏和高岭土制作白色颜料^[73];李文杰指出,红彩的显色主要归因于颜料中的硅、铝构成的化合物,黑彩主要由硅、铝、铁和锰等元素组成,棕彩与黑彩的化学组成相似,但锰含量较黑彩低,铁含量较黑彩高,白彩的化学组成与白陶衣相同^[47]。

对烧制技术的研究延续了上一阶段的特点,聚焦于陶器的烧成温度、烧制氛围与黑陶的渗碳工艺^[74-79]。刘鹏选取了沧州黏土作为实验原料,综合运用了化学分析、X射线粉末衍射技术、扫描电子显微镜和差热分析等多种手段,对比不同烧制温度下渗碳样品的成色与渗碳效果^[80];王向阳、周理坤特别针对早期陶器的低温烧结条件与烧制方法进行讨论^[81,82];赵文艺等模拟实验了半坡遗址陶窑的烧造过程^[83]。在物理性能方面,温睿对西山遗址出土的夹砂陶与泥质陶的导热性能进行测试,发现夹砂陶的导热系数明显高于泥质陶,西山时期的古人已可以根据不同陶器的用途选用具有不同导热性能的原料配方^[84]。

生产组织与性质同为此阶段新出现的专题,多在测定陶胎成分与物理性能的基础上,结合遗存的出土背景,对制陶的生产组织类型进行推论。邱平发现,贾湖遗址中晚期每组居址都有自己的制陶作坊,对泥质陶样品化学成分的分类分析显示同一灰坑或相邻灰坑的陶片数据基本聚在一类,这在一定程度上反映出贾湖的制陶业处于以家庭为单位的作坊阶段^[85];朱君孝等测定了二里头遗址的陶器样品,发现不同发掘区所出陶器的

元素和物相组成具有明显差异, 这表明当时可能存在多个居住区域, 每个区域内都有较固定的制陶作坊^[86]; 王正东等对上机房营子遗址两座红山文化陶窑的陶片进行化学成分聚类, 发现二者之间无太大区别, 但两座陶窑又各自生产不同类型的陶器, 说明红山文化的制陶业已有了精细的分工^[87]; 贾宾认识到南洼遗址同时代的灰坑中出土陶器的吸水率和孔隙率明显不同, 推测这些陶器由不同的作坊制造, 质量高低有别, 南洼聚落存在多家制陶作坊并存的情况^[88]。

1990年, 陈铁梅等对阳山墓地与徐家山遗址的陶器元素成分进行中子活化分析, 探讨距今约4000年前半山—马厂文化时期黄河两岸先民的互动交流情况, 拉开了陶器产地与流通专题的研究序幕^[89]。对这一专题的研究往往通过对陶器胎体中的元素成分或包含物进行测量或鉴定, 并与已知遗址或具有明确产地的陶器资料对比, 进而推测出不同组别样品的大致来源^[90]。此阶段这一专题的研究内容可细化为两个方面: 一是探索各考古学文化、遗址间的制陶技术交流、人群互动情况, 以围绕花厅遗址大汶口、良渚文化风格陶器的一系列研究最为经典^[91-93], 此外还包括对凌家滩、薛家岗与北阴阳营文化^[94,95], 薛家岗、良渚与黄鳝嘴文化^[96], 二里头与周边地区考古学文化^[97], 广东博罗梅花墩、银岗与横岭山遗址的讨论^[98]; 二是讨论陶器的生产贸易情况, 包括尉迟寺遗址大口尊的传播路线^[99,100], 山东地区龙山文化晚期的陶器流通^[101], 垣曲盆地与周边地区的陶器贸易^[102], 白陶在二里头、南洼与颍河中上游龙山文化晚期各遗址的生产贸易情况等^[103-105]。

在理论与方法专题方面, 高正耀率先从古陶瓷的烧成温度、烧制气氛、烧制周期等多个维度剖析了穆斯堡尔谱在陶器生产研究中的独特优势^[106]。接着如刘方新探讨利用长石分析追溯陶器产地的科学方法^[95], 三辻利一、单洁、张巽等也相继就波长分散型与能量分散型X荧光分析仪、铅与铋同位素、岩相分析在陶器产地研究中的应用进行了对比讨论^[107-111]。何文权、吴隼则聚焦于无损分析技术, 特别阐述QuanX型能谱仪、EDXRF在古陶瓷研究中的应用^[112-114]。在多种现代科学技术成熟运用的背景下, 王斌等系统整合了X射线衍射、原子发射光谱、差热分析、扫描电子显微镜、电子微区能谱分析与磁性测量的应用原理、优势与局限^[115]。张仕定、熊樱菲等深入对比了XRF、PIXE、SRXRF、ICP-AES等分析技术的相关原理、发展前景及测量的误差来源^[116,117]。面对测定出的化学成分数据, 罗宏杰、陈铁梅、许志勇等则特别对多种数据处理方法进行了介绍^[81,118-121]。

值得注意的是, 新兴的计算机技术也在此阶段崭露头角, 应用于陶器产地的研究。马清林等利用人工神经网络对甘肃地区新石器时代的陶片进行化学成分数据处理, 并与摩尔数比值法、主成分分析法进行对比, 实证神经网络技术具有更好的预测与分类效果^[122,123]。印春生等利用新型无隐含层的人工神经网络处理花厅遗址陶器的微量元素数据, 发现该技术可较准确地识别遗址所出陶片的真实产地^[124]。面对古陶瓷化学成分数据量庞大、特性变量繁多且关系复杂的情况, 熊樱菲等深入研究了粗糙集理论(RST)的相关概念和基本步骤, 通过实验验证了基于粗糙集算法所构建的分类模型的有效性^[125]。这些新兴技术的应用表明国内学者对前沿科技分析方法的关注, 但遗憾的是, 这些研究

未在学界获得应有的反响,这一方面是因为神经网络技术相对较新,不易被接受运用,另一方面则是因为神经网络的基础学习依赖已知的测定、分析材料,对于产地未知的陶器样品,即未曾在网络中学习过的样本数据,其判断产地的准确性存在局限,故此方法一直处于不断摸索和完善之中。

这一阶段针对特定地域陶器生产情况的综合性研究热度不高,但仍不乏代表性成果^[47,126-132],如李家治等分析新石器时代早期陶器的化学组成、显微结构与烧制工艺差异,揭示了我国陶器从诞生到成熟这一发展阶段中胎体成分与烧制工艺的多样性^[133]。相较之下,针对具体遗址的综合性研究更为新颖和深入,所涉及的专题更多,强化了学界对各遗址陶器生产技术和文化内涵的理解^[134-142]。鲁晓珂对古城寨遗址的泥质陶和夹砂陶胎体及绘彩部位进行成分分析,并对特殊陶缸内壁残留的微量元素进行实验,探究烧制陶器的燃料来源^[143];吴隽等对广富林遗址不同文化层、不同类型的陶器样本及相关土样进行化学成分组成变化研究,指出该区域在广富林文化阶段正处于普通陶器向印纹硬陶的过渡时期,陶工正在积极探索符合化学组成和烧成温度要求的新原料^[144];何弩等将中子活化分析与文化因素分析法相结合,对荆南寺遗址的文化因素进行分析对比,获得了中堡岛与荆南寺两地巴、蜀文化进退关系的新认识^[145];部分学者还特别关注仙人洞遗址、甑皮岩遗址、上山遗址所出的新石器时代早期陶器,针对泥料成分及来源、成型技术、烧制方法等进行讨论^[146-148]。

1990—2010年是史前至夏商陶器生产科技研究的初步发展期,经过数年努力,各地区的考古学文化谱系基本构建完成,研究重心逐渐从以年代学为重心的文化史研究转变至对古代社会的研究。与此同时,科技考古在考古学研究中得以普及与应用,其重要性得到了前所未有的提升,成为陶器生产研究中不可或缺、必须采纳的关键手段。在这一阶段,《民和阳山》《兖州西吴寺》《汝州洪山庙》等约37部史前至夏商时期考古报告收录了遗址所出土陶器的科技分析结果,有89处遗址开展了相关的检测分析^[57,89,137,149-182],研究地域主要集中于黄河与长江流域,对辽西与华南地区也有涉及。在考古学研究目的深刻转变、科技考古方法逐渐普及的背景下,陶器生产研究的理论与方法也发生着变革。汪海宁在《古代陶器的研究视野——有关中国考古学方法的几点思考》中提出,陶器研究需要考察所涉及的各个环节,同时注意其与人及社会之间的密切关系,在制作过程中,专业化过程、技术传承、分配、使用等生命史环节和自然环境对制陶业的影响都可予以讨论;在制作过程之外,产品的分配与使用也都是不容忽视的领域^[183]。1992年,俞伟超在山东临淄举办“中美古代陶器研讨班”,邀请国外学者介绍陶器生产的民族学调查成果^[184],文德安、秦小丽等学者也陆续将国外先进的陶器分析方法引入中国^[185,186]。在这些新理论方法的加持下,陶器生产科技研究的目的也逐渐从辅助构建区域文化序列、探索基础的制陶工艺转变为还原先民的生产生活面貌与人群交往情况。虽然这一阶段的研究思路仍受到上一阶段的影响,但利用新技术、新视角的陶器生产专题性研究案例开始涌现,在既有专题的基础上,以成型工艺、绘彩与施釉、生产组织与性质、产地

与流通、理论与方法为专题的研究相继开展,更多学者开始倾向于将科技分析结论与遗存出土背景、类型学等传统研究结论相结合,以形成对陶器生产更全面、更深入的认识。

4 快速发展阶段:2011年至今

进入2011年,史前至夏商的陶器生产科技研究步入快速发展期,除成型技术外,其他专题均得到了学界的持续关注与推进。

本阶段针对陶泥与髹和料的研究可细化为两个方面。一是测定样品的成分或髹和料类型,分析其化学组成或物理特性,由测定结果探索其反映的社会文化背景^[187-206]。鲁晓珂、赵潇涵等分析良渚文化出土陶器的组成结构,发现开采或切削加工玉器后的玉料有可能被用作制陶髹和料^[207,208];王增林发现在陶寺文化早中期,贵族所使用的陶器在原材料和制作工艺上是一致的,宫殿区与宫殿废弃区陶器的原料差别是由贵族与平民的身份等级不同造成的^[209];刘莉等对伊洛地区二里头、灰嘴、稍柴遗址出土的陶器进行岩相和便携式X射线荧光仪分析,结果显示三处遗址的陶器拥有各自的陶土与髹和料来源,该地区的陶器生产从新石器时代到二里头时期都为分散的多元模式,且并没有因中心聚落的出现及政治结构变化而明显改变^[210]。二是围绕陶泥与髹和料的配比技术,探讨其历时性变化、工艺细节或其反映的生产模式^[203,211-216]。陈茜茜等对小黄山遗址和贾湖遗址的陶器化学成分进行平均值和标准差计算,发现贾湖遗址的陶器中滑石粉和夹云母逐渐增多,小黄山遗址的陶器化学组成稳定,制陶原料或加工方式没有发生历时性变化^[217];郁永彬等对张掖西城驿遗址陶器的化学组成和显微结构进行分析,揭示了马厂-西城驿-四坝-齐家文化陶器制作技术的历时性特征,马家窑文化马厂类型进入河西走廊后,其制陶工艺出现了变化,在细碎陶土中添加髹和料再制陶的工艺被齐家文化继承,而直接使用夹杂各种原生矿物陶土的工艺被西城驿文化继承,并延续至四坝文化时期。西城驿文化与齐家文化陶器各自代表的社群可能均有独立的制陶手工业,齐家、西城驿、马厂晚期与四坝文化间可能存在制陶技术、陶工的交流^[218]。

在绘彩与施釉方面,除基础的成分测定外^[219-232],学界特别针对陶衣的制作方式、施彩的工艺细节展开探讨^[224,233]。严小琴等对西安半坡遗址出土彩陶的陶衣进行表征研究,发现陶衣与胎体取自相同黏土,其制作工艺可能是先将经过淘洗的较细黏土调和成泥浆,再加入研磨细致的石灰石颗粒涂在陶胎上烧制而成^[222]。鲁晓珂等发现陶寺遗址部分彩陶上的朱砂颗粒已经嵌入石灰颜料,推测古代陶工将朱砂涂上彩陶后使用工具对颜料层进行了滚压,在陶豆样品表面还发现黑亮指纹,表明这种陶衣颜料不经过专门的渗碳工艺,仅通过一般的高温烧制就可达到黑亮效果^[234,235]。

低温陶器的烧成温度是本阶段物理性能与烧制技术的研究热点。在诸多测定陶器烧成温度的方法中,热膨胀实验法应用最广泛。李迎华等通过模拟制备不同烧成温度的陶器,利用热膨胀仪重烧以获取DIL曲线,发现对于烧成温度高于800℃的陶器,其烧成温

度与烧结程度有着——对应的线性关系,若烧成温度低于800℃,原则上不能鉴别其原始烧成温度^[236];鲁晓珂等就低温陶器烧成温度的测量误区进行解释,由于陶器烧结达到一定温度时,玻璃相会形成并伴随明显收缩,所以即使原始烧成温度低于该温度,重烧热膨胀曲线的收缩转折点依然会在该处出现^[237];以张怡为代表的学者则通过一系列低温烧成陶器的实验研究,修正了以往判断陶器样品烧成温度的错误标准,提出利用逐步升温加热法,观测样品热膨胀曲线的相对位置,可有效确定低温陶器的原始烧成温度^[238-240];王福莲等进一步拓展了研究路径,模拟制作夹砂红陶炊器并逐步升温烧制,发现其烧成温度下限在500℃,故甑皮岩遗址的陶器不宜称为陶制品,而是处于泥塑制品向陶器过渡的中间形态^[241];王犖、鲁晓珂、朱逸冰、刘晓迪等也分别对禹会村、二里头、广富林、大岩等遗址所出陶器开展了烧成温度测试^[242-246]。针对烧制氛围及黑陶渗碳工艺的研究本阶段仍在进行,肖芮观察屈家岭遗址黑衣蛋壳陶黑色表层与露胎部分的颜色差异,推断蛋壳黑彩陶的烧制经过了氧化—还原—氧化三个阶段,黑色表层已经完全呈现玻璃态,其呈色原理与后世黑釉瓷器的黑釉完全一致^[232];贾耀祺以南洼遗址二里头文化陶器为例,选用不同黏土与五种粒度的沙粒混合,在既定的温度中依次烧制,比较了它们在气孔率、真密度、假密度等指标上的差异,为探讨古代陶器的物理性能提供了较好的参考指标^[247];杨剑等基于周家嘴头遗址发现的陶窑和出土陶器开展制陶及烧制实验,对该遗址仰韶晚期整个制陶业的操作链技术及生产方式进行研究^[248]。

在生产组织与性质方面,除揭露如二里头、古城寨、马岭、庙底沟等遗址大致的生产面貌外^[249-255],以陆青玉、Druc、李涛为代表的学者开启了陶器生产组织的微观探索^[250,256-259]。陆青玉在讨论鲁北地区大汶口文化中晚期至龙山文化时期的陶器生产情况时,明确提出区分不同生产单位或组织的“指纹性”方法,即着眼于陶器胎体的包含物量化特征,如包含物密度、粒度以及包含物、气孔和黏土基质之间的比例关系。利用此方法,陆青玉讨论了丁公遗址不同阶段白陶的陶泥及礪和料配比,推断出了三个时段内陶器生产组织存在的数量^[260,261]。Druc等讨论了两城镇遗址与丹徒遗址的陶器生产组织,发现两城镇陶器的陶泥配方表现出极强的多样性,黏土、粉砂的数量及花岗岩和变质碎屑的类型均存在差异,一些陶片中残留的烧焦材料表明了某些产品缺乏温度控制或使用不同的烧制结构,这为陶器生产存在多个生产者提供了证据^[262]。李涛则将分析生产的尺度放在红山的家户之间,结合化学成分分析与多元统计估算出陶器生产者的数量,认为在红山文化时期,三家、东山嘴和二布尺的陶器生产共依赖12个左右的陶器生产者,每个红山家户的陶器都由数个陶器生产单位提供,三地的陶器生产均以地方性社群或村落为中心,缺乏超越村落和集中化的生产与组织模式^[263-265]。

在产地与流通方面,本阶段特别围绕甘青与川西两大地区马家窑文化彩陶的技术传播与贸易流通开展了一系列研究^[266-272],以洪玲玉等发表的《移民、贸易、仿制与创新——宗日遗址新石器时代晚期陶器分析》一文为代表,在探索宗日遗址马家窑文化风格彩陶来源的基础上,结合不同时段内马家窑文化在甘青地区的进退情况,分析彩陶外

来的原因与背景^[273]。就这一专题的其他研究中,如对案板、喇家、禹会村等遗址所出陶器的产地分析,仅凭借特殊陶器的化学成分差异就推断了其外来的可能^[249,274-276],而对盘龙城、苏家村、小双桥等遗址特殊陶器的分析则辅以出土背景、器物形制、制作工艺等佐证^[193,277-283]。陆青玉同样针对陶器产地的判别方法提出了“指向性”特征,因不同地质环境下黏土中的矿物质或岩屑的构成和比例各不相同,对陶器胎体中不同类型的包含物进行多元统计计量,可以量化地对具有不同包含物类型的陶器进行归类,将其与各陶器所出遗址周边的自然标本进行对比,即可推测出陶器产地^[90]。借助这一方法,陆青玉对鲁北地区大汶口至龙山文化时期重要遗址所出陶器进行讨论,发现这些遗址的日用陶器均为独立生产,但也有相互间的交流情况,但这并非高级聚落向低级聚落的单一输入,而是中心聚落与次级聚落间的相互交流^[260]。

在理论与方法层面,袁超、李蔓、郭梦等学者分别就傅里叶变换红外光谱技术(FT-IR)、偏光显微分析、拉曼光谱分析与便携式X射线荧光光谱仪(pXRF)在陶器烧成温度测定、彩绘颜料鉴定、产地来源分析等方面的应用潜力予以介绍^[284-286];吴卫红提出不同屾和料与胎料一起混合后会造成陶胎的化学组成发生变化或偏移,LIBS光谱特征具有良好的辨识度,可以有效区分屾植物和屾细砂的样品^[287];陆青玉、吴双等着重对岩相分析法进行介绍,前者从步骤、主要功能、优势及弊端、研究现状及应用前景展开讨论^[288],后者将其与“操作链”概念结合,介绍了“操作链”视角下岩相学数据的提取与运用^[289];李清临、郭明建、李涛则特别讨论了陶器产地的多种研究方法^[90,290-292]。在数据的处理和分析领域,苑世领与王芬两位学者结合实际的研究案例详细阐述了陶器元素的多元统计分析流程^[293]。针对陶器生产理论与方法的研究性专著也有出版,如吴隽所著的《陶瓷科技考古》一书,按照陶瓷科技考古的研究流程,系统介绍了陶瓷科技考古各环节的主要内容与研究方法,包括与古陶瓷相关遗址的调查、勘探与发掘方法,针对古陶瓷组成、结构及性能的分析方法等^[294];秦小丽与张萌合著的《陶器研究的理论与方法》则系统梳理、总结了国内外近百篇相关论著,并以分专题的形式介绍,为国内陶器生产的研究方向提供了宝贵的思路和建议^[295]。

最后,本阶段发表的综合性研究成果多围绕具体的遗址开展^[296-309],如范宗祥等通过多种方法对福建明溪南山、将乐岩仔洞遗址所出陶器进行物理性能、制陶原料、烧成温度分析,发现两遗址的厚胎灰白陶是使用瓷石质原料并在高温下烧成的结果,突破了学界对中国最早瓷石高温烧造技术的认识^[310];陆青玉等通过对金寨遗址史前陶器的系统性分析,发现遗址中具有大汶口-龙山文化风格的陶器为本地生产,具有良渚文化、大河村文化和部分屈家岭文化风格的陶器是本地生产的仿制品,而多数具有屈家岭文化风格的白色系陶器则为外来产品,该遗址在很长一段时间都保持着相对稳定的生产传统,具有生产专业化的特点^[311]。跨地域、长时段的研究则不多,如申静怡、秦金娇、杨玉璋等学者分别就东天山、淮河中下游、金衢盆地等地区的陶器生产情况进行了整体性研究^[312-318]。

进入本阶段,除具备深厚科技考古背景的研究者外,许多传统考古出身的学者也积

极参与陶器生产的研究,这种跨学科的合作促使相关研究得以与考古背景更紧密地结合,力求深层次复原制陶生产活动与生活场景。截至2024年,已有29部考古报告收录了陶器生产的科技分析结果^[210,319-346],参与相关研究的遗址数也上升至156处,研究地域大大扩展。开展的研究专题虽较上一阶段没有大的变化,但就内容而言,各专题更以问题为导向,研究视角呈现多元化趋势,在陶泥与羼和料、绘彩与施釉方面,不仅对原料配比与生产过程中的诸多细节进行微观探索,还将陶器样本的科技检测分析结果与其背后的使用者相联系,尝试还原人群的社会生活面貌;在物理性能与烧制技术方面,由基础的烧成温度测定、烧制氛围讨论上升至烧制原理、温度测定技术等深层次问题的探讨;在生产组织与性质、产地与流通方面,则摒弃了以往的推测性结论,针对具体问题提出切实可行的解决方案,确保了结论的严谨性与可靠性。本阶段的研究方法承袭并深化了上一阶段末所展现出的趋势,在采用化学成分分析、岩相分析等科技手段的基础上,融合传统考古学研究、实验考古以及民族学调查等方法进行交叉研究成为大势所趋。

5 结语

历经一个世纪的探索与积累,史前至夏商时期的陶器生产科技研究呈现出如下特点:研究对象从单纯的陶片扩展至陶泥、羼和料、陶窑等与陶器生产相关的各类遗存中;研究内容从对基础的原料成分、成型工艺、物理性能与烧制技术的关注转向各类技术演进、人群交往、贸易流通等深层次问题;研究目的从制陶工艺复原、服务于考古学文化谱系建构与类型学研究转移至还原陶器生产背后人群的生产生活;研究方法则从依赖单一的科技手段发展至多技术、多学科的综合研究,一些研究范式被陆续提出,为陶器生产科技研究提供了新的思路和方向。

但是,针对这一时段的陶器生产科技研究依旧存在一些问题。首先,陶器尽管是这一时段的核心遗物,其科技研究的深度与广度却未能与之匹配,特别是一些已揭示重要生产迹象的遗址,所发布的报告往往遗漏了关键的科技分析结果。目前开展相关研究的遗址也多聚焦于黄河、长江两大流域,其他地区则少有涉足,基于陶器生产相关专题的跨地域、长时段研究成果相对匮乏,由早到晚陶器生产各方面的历时性变化有待进一步凸显,如技术演变、生产状况及其背后的人群交往等宏观性研究体现不够。其次,对陶器样品的取样过程缺乏统一标准,已有学者指出,遗址内生产区与消费区的陶器在尺寸标准化程度上存在差异^[347],这也启发我们在选择陶器样品与分组时必须充分考虑样品的出土背景。多数研究仍止步于基础的成分检测分析,缺乏明确的问题导向和深入的研究模式探讨。最后,如岩相分析、人工神经网络等新兴技术的运用尚显薄弱,其所具有的微观性研究优势未得到很好发挥,融合传统考古学研究、实验考古以及民族学调查等方法进行交叉研究需进一步加强。有鉴于此,今后的陶器生产研究应着重从以下几个方面开展。

第一,进一步提升对陶器生产科技分析的重视程度,使之成为遗址出土陶器研究的必经环节,针对存在大规模、专业化陶器生产活动的遗址,应对相关遗存所反映的生产面貌开展全面分析。研究的地域范围需进一步拓展,在综合性研究框架的指导下,对具体地域内多个遗址出土的陶器进行综合性、整体性的剖析,并围绕技术演变、生产状况及其背后的人群交往等宏观议题展开总结性探讨。

第二,不断提升陶器生产相关遗存的获取水平,充分考虑出土情景,对生产面貌复杂的遗址,分层次、等级选取能代表该遗址陶器生产面貌的样品。摒弃过度依赖基础成分测定的传统研究模式,转而以问题为导向,深入探索陶器生产背后所蕴含的社会生活、政治、经济与文化信息。基于具体陶器生产的遗存类型,提出针对性解决方案,如对制陶生产组织与性质的讨论,尝试搭建微观、系统的分析框架,力求还原生产过程中的具体细节,在讨论早期所谓家庭经济、陶土多样性等方面的问题时,则在宏观视野下对周边陶土资源开展系统调查。

第三,提升与改进已有的测定、研究手段,基于检测方法本身存在的局限结合其他方法进行补充,整合出一套逻辑清晰的多技术路线,在解释测定结果时充分考虑到所有可能性,以避免简单对应,产生误判或不严密的论证结果。在分析过程中设定关键的技术参数和指标,科学分析陶泥与原料、成型工艺、绘彩与施釉、物理性能与烧制技术的特点,对于陶器生产组织性质、产地与流通等问题,与陶器研究中如“操作链”“标准化”“专业化”概念对接,提出切实的判断标准,避免推测性结论。

最后,科技分析并非万能,需要多种方法有机结合,除引入如人工智能等新兴技术,还需结合传统的考古学研究、民族学观点,形成多手段、多学科的综合性研究体系,以求为全面揭露史前至夏商时期的陶器生产面貌提供新的视角。

参考文献

- [1] 钱俊龙,熊樱菲,潘小伦.从九种核心期刊的文献计量分析看中国科技考古的发展[J].文物保护与考古科学,2004,16(2): 51-63.
- [2] 赵丛苍.科技考古学概论[M].北京:高等教育出版社,2006.
- [3] 易立.三十年来中国陶瓷考古发现与研究述略[J].中华文化论坛,2008(4): 144-154.
- [4] 陈铁梅.科技考古学[M].北京:北京大学出版社,2008.
- [5] 王昌燧.科技考古进展[M].北京:科学出版社,2013.
- [6] 钱俊龙,谢燕,潘小伦,等.从9种核心期刊的文献计量分析看核技术在文物保护与考古中的应用[J].文物保护与考古科学,2012,24(S1): 98-103.
- [7] 潜伟.中国科技史与考古学:历史回顾[J].自然科学史研究,2017,36(2): 218-230.
- [8] 袁靖.中国科技考古导论[M].上海:复旦大学出版社,2018.
- [9] 鲍怡,郑建明.21世纪以来古陶瓷科技考古研究新进展(上)[J].文物天地,2020(12): 89-95.
- [10] 鲍怡,郑建明.21世纪以来古陶瓷科技考古研究新进展(中)[J].文物天地,2021(1): 104-110.
- [11] 鲍怡,郑建明.21世纪以来古陶瓷科技考古研究新进展(下)[J].文物天地,2021(2): 96-99.
- [12] 胡耀武.中国科技考古的发展历程、研究方法和展望——以全国科技考古学术讨论会为例[J].文物保护与考古科学,2024,36(1): 176-181.
- [13] 王璠.中国古代陶业之科学观[J].科学,1921,6: 869-882.

- [14] 张旭. 中央陶瓷试验场早期发展历程述略(1928—1930)[J]. 科学文化评论, 2020, 17(6): 55-64.
- [15] 阿尔纳. 河南石器时代之着色陶器[M]. 北京: 农商部地质调查所, 1925: 35-40.
- [16] 李济. 小屯: 殷墟器物·甲编(陶器)[M]. 台北: “中央研究院”历史语言研究所, 1956.
- [17] 东亚考古学会. 赤峰红山后: 热河省赤峰红山后史前遗迹[M]. 东京: 东亚考古学会, 1938.
- [18] 吴金鼎. 高井台子三种陶业概论[J]. 田野考古报告, 1936(1): 201-212.
- [19] WU G D. Prehistoric pottery in China[M]. London: Kegan Paul, Trench, Trubner and Co., Ltd., 1938.
- [20] 彭适凡. 我国南方古代印纹陶制作工艺的探讨[J]. 景德镇陶瓷, 1984(S1): 8-20.
- [21] 郁永彬. 科技考古实证中华陶器源远流长[N]. 中国社会科学报, 2024-05-31(6).
- [22] 潘贤家, 孙仲田, 金国樵. 公元前2000年河南龙山文化时期古陶片的穆斯堡尔谱研究[J]. 核技术, 1983(5): 49-50.
- [23] 潘贤家, 金国樵, 孙仲田. 中国古代陶器穆斯堡尔谱的初步研究[J]. 中原文物, 1983(4): 106-109.
- [24] 金国樵, 潘贤家, 孙仲田. 穆斯堡尔效应在考古学中的应用[J]. 核技术, 1984(1): 71-72.
- [25] 孙再清. 关于瓷器还原烧成气氛的若干问题[J]. 景德镇陶瓷, 1984(4): 34-37.
- [26] 孙仲田, 金国樵, 潘贤家. 二里头文化与龙山文化古陶片的穆斯堡尔谱研究[J]. 中原文物, 1985(1): 83-85.
- [27] 孙仲田, 潘家贤, 金国樵. 河南荥阳古陶片穆斯堡尔谱和X射线研究[J]. 中原文物, 1986(总5号): 314-316.
- [28] 潘贤家, 孙仲田, 李仓, 等. 青台遗址第十四文化层古陶片的穆斯堡尔谱分析[J]. 中原文物, 1986(总5号): 317-319.
- [29] 时庆云, 潘贤家, 孙仲田. 考古学中的穆斯堡尔技术[J]. 物理, 1987(5): 270-274.
- [30] 秦广雍, 熊宏齐, 潘贤家, 等. 古陶烧制温度的穆斯堡尔谱研究[J]. 郑州大学学报(自然科学版), 1988(2): 43-45.
- [31] 潘贤家, 金国樵, 孙仲田. 已知年代陶片的穆斯堡尔谱研究[J]. 核技术, 1989, 12(1): 10-14.
- [32] 李士, 秦广雍. 穆斯堡尔谱技术在考古学中的应用[J]. 核技术, 1989, 12 (8-9): 557-560.
- [33] 李文杰, 黄素英. 浅说大溪文化陶器的渗碳工艺[J]. 江汉考古, 1985(4): 46-51.
- [34] 大连电瓷厂. 泥料细度与强度、烧成温度的关系[J]. 电瓷避雷器, 1976(6): 10-11.
- [35] 周仁, 张福康, 郑永圃. 我国黄河流域新石器时代和殷周时代制陶工艺的科学总结[J]. 考古学报, 1964(1): 1-27.
- [36] 李家治, 陈显求, 张福康, 等. 中国古代陶瓷科学技术成就[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1985.
- [37] 中国科学院上海硅酸盐研究所. 中国古陶瓷研究[M]. 北京: 科学出版社, 1987.
- [38] 李家治, 陈显求. 古陶瓷科学技术1: 1989年国际讨论会文集[C]. 上海: 上海科学技术文献出版社, 1989.
- [39] 中国硅酸盐学会. 中国陶瓷史[M]. 北京: 文物出版社, 1982.
- [40] 李家治, 陈显求, 邓泽群, 等. 河姆渡遗址陶器的研究[J]. 自然杂志, 1979(6): 345-346.
- [41] 李敏生, 黄素英, 武亦文. 湖北枝江关庙山新石器时代遗址陶片的初步研究[G]//田昌五, 石兴邦. 中国原始文化论集: 纪念尹达八十诞辰. 北京: 文物出版社, 1989: 428-440.
- [42] 河北省博物馆, 文管处台西考古队, 河北省藁城县台西大队理论小组. 藁城台西商代遗址[M]. 北京: 文物出版社, 1977.
- [43] 中国社会科学院考古研究所. 宝鸡北首岭[M]. 北京: 文物出版社, 1983.
- [44] 上海市文物保管委员会. 崧泽: 新石器时代遗址发掘报告[M]. 北京: 文物出版社, 1987.
- [45] 科技部社会发展科技司, 国家文物局博物馆与社会文物司. 中华文明探源工程文集: 环境卷I[M]. 北京: 科学出版社, 2009.
- [46] 科技部社会发展科技司, 国家文物局博物馆与社会文物司. 中华文明探源工程文集: 技术与经济卷I[M]. 北京: 科学出版社, 2009.
- [47] 李文杰. 中国古代制陶工艺研究[M]. 北京: 科学出版社, 1996.
- [48] 申斌. 殷代白陶的物理研究结果[J]. 殷都学刊, 1991, 12(3): 9-11.
- [49] 陆巍. 北辛文化和山东龙山文化陶器成分的聚类分析[J]. 考古, 1996(11): 78-83.
- [50] 吉林大学边疆考古研究中心, 吉林大学测试科学实验中心. 内蒙古大山前遗址陶片化学成分测定

- 和分析[G]/吉林大学边疆考古学研究中心. 边疆考古研究: 第4辑. 北京: 科学出版社, 2006: 330-338.
- [51] 朱铁权, 王昌燧, 姚政权, 等. 双墩遗址陶器掺和物的显微研究[G]/西北大学文博学院, 中国化学会应化委员会考古与文物保护化学委员会, 中国科技考古学会. 文物保护与科技考古. 西安: 三秦出版社, 2006: 87-90.
- [52] 王小娟, 王晓毅. 垣曲上亳遗址陶器化学成分的初步研究[J]. 文物世界, 2009(1): 74-77.
- [53] STOLTMAN J, 荆志淳, 唐际根, 等. 商代陶器生产——殷墟、洹北商城出土陶器的岩相学分析[G]/荆志淳, 唐际根, 高嶋谦一. 多维视域: 商王朝与中国早期文明研究. 北京: 科学出版社, 2009: 198-218.
- [54] 赵春燕, 冯松林, 刘国祥. 内蒙古兴隆洼遗址出土陶器的初步分析与研究[C]/广西壮族自治区博物馆, 广西文物考古研究所, 中国化学会应用化学委员会, 等. 文物保护研究新论: 全国第十届考古与文物保护化学学术研讨会论文集. 北京: 文物出版社, 2008: 209-218.
- [55] 钟华南. 大汶口—龙山文化黑陶高柄杯的模拟实验[G]/苏秉琦. 考古学文化论集: 二. 北京: 文物出版社, 1989: 255-273.
- [56] 钟华南. 北辛文化制陶工艺初探[G]/苏秉琦. 考古学文化论集: 三. 北京: 文物出版社, 1993: 419-428.
- [57] 钟华南. 建新遗址大汶口文化的制陶工艺[M]/山东省文物考古研究所, 枣庄市文化局. 枣庄建新: 新石器时代遗址发掘报告. 北京: 科学出版社, 1996: 229-231.
- [58] 尉崇德. 大汶口文化时期白陶鬲制作工艺的探讨与复原研究[J]. 考古与文物, 1999(3): 34-38.
- [59] 范黛华, 栾丰实, 方辉, 等. 山东日照市两城镇龙山文化陶器的初步研究[J]. 考古, 2005(8): 65-73.
- [60] 李敏生, 黄素英, 李虎侯. 陶寺遗址陶器和木器上彩绘颜料鉴定[J]. 考古, 1994(9): 849-857.
- [61] 王昌燧, 左健, 毛振伟, 等. 班村遗址出土彩陶的陶彩分析[J]. 中国历史博物馆馆刊, 1995(1): 78-80, 84.
- [62] 黄允兰, 彭子成, 杨肇清. 新石器时期西山遗址古陶器表面陶彩的分析及其与烧结温度的关系[J]. 光谱学与光谱分析, 1997, 17(6): 89-92.
- [63] 陈尧成, 张筱薇, 宋建, 等. 上海马桥夏商陶器研究[J]. 陶瓷学报, 1999, 20(3): 146-152.
- [64] ZUO J, XU C Y, WANG C S, et al. Identification of the pigment in painted pottery from the Xishan site by Raman microscopy[J]. *Journal of Raman Spectroscopy*, 1999, 30(12): 1053-1055.
- [65] 陈晓峰, 马清林, 宋大康, 等. 马家窑类型彩陶黑、白颜料的X-射线衍射分析[J]. 兰州大学学报(自然科学版), 2000, 36(2): 54-58.
- [66] 陈晓峰, 马清林, 赵广田, 等. 半山、马厂类型黑、红复彩陶器复合颜料研究[J]. 兰州大学学报(自然科学版), 2000, 36(5): 71-76.
- [67] 马清林, 胡之德, 李最雄, 等. 甘肃秦安大地湾遗址出土彩陶(彩绘陶)颜料以及块状颜料分析研究[J]. 文物, 2001(8): 1, 84-92.
- [68] 董俊卿, 朱铁权, 毛振伟, 等. 双墩遗址、侯家寨遗址彩陶与红衣陶制作工艺的初步研究[J]. 东南文化, 2006(1): 24-30.
- [69] 董俊卿, 冯敏, 王昌燧, 等. 双墩彩陶颜料来源的测试研究[J]. 岩矿测试, 2007, 26(1): 13-16.
- [70] CLARK R J H, WANG Q, CORREIA A. Can the Raman spectrum of anatase in artwork and archaeology be used for dating purposes? Identification by Raman microscopy of anatase in decorative coatings on Neolithic (Yangshao) pottery from Henan, China[J]. *Journal of Archaeological Science*, 2007, 34(11): 1787-1793.
- [71] 李乃胜, 杨益民, 何弩, 等. 陶寺遗址陶器彩绘颜料的光谱分析[J]. 光谱学与光谱分析, 2008, 28(4): 946-948.
- [72] WANG Q, ANDREWS K C. Technological investigation of the decorative coatings on Yangshao pottery from Henan, China[J]. *Archaeometry*, 2002, 44(2): 241-250.
- [73] 马清林, 李现. 甘肃古代各文化时期制陶工艺研究[J]. 考古, 1991(3): 263-272.
- [74] 李文杰, 郎树德, 赵建龙. 甘肃秦安大地湾一期制陶工艺研究[J]. 考古与文物, 1996(2): 22-34.
- [75] 郭强. 黑陶呈色原理与烧制工艺[J]. 山东陶瓷, 1996(3): 35-37.

- [76] 邱平, 王昌燧, 李凡庆, 等. 大汶口、龙山文化黑陶内碳纤维的初步研究[J]. 自然科学史研究, 2001, 20(1): 79-83.
- [77] 朱铁权, 王昌燧, 徐大力, 等. 双墩遗址黑陶渗炭工艺初探[J]. 文物保护与考古科学, 2005, 17(2): 1-8.
- [78] 沈建兴, 翟纪伟, 李传山, 等. 龙山黑陶显微结构分析和渗炭工艺研究[J]. 中国陶瓷, 2008, 44(3): 43-45.
- [79] 王犇. 禹会遗址出土陶器烧成温度的研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2019.
- [80] 刘鹏. 黑陶渗炭机理研究[J]. 硅酸盐通报, 1992(5): 20-26.
- [81] 王向阳, 姚莉秀, 杨杰, 等. 新石器时代古陶器的化学计量学研究[J]. 分析化学, 2006, 34(12): 1767-1770.
- [82] 周理坤, 王涛, 李珺, 等. 南庄头遗址早期陶器烧成温度研究[J]. 岩矿测试, 2010, 29(2): 148-152.
- [83] 高强. 简述半坡博物馆的史前考古实验[C]//中国文物保护技术协会. 中国文物保护技术协会第二届学术年会论文集. 北京: 科学出版社, 2002: 479-481.
- [84] 温睿, 胡芑, 赵晓军, 等. 西山遗址陶器导热性能初探[J]. 中国科学技术大学学报, 2004, 34(5): 643-646.
- [85] 邱平, 王昌燧, 张居中. 贾湖遗址出土古陶产地的初步研究[J]. 东南文化, 2000(11): 41-47.
- [86] 朱君孝, 李清临, 王昌燧, 等. 二里头遗址陶器产地的初步研究[J]. 复旦学报(自然科学版), 2004, 43(4): 589-596, 603.
- [87] 王正东, 毛振伟, 陈国庆, 等. 上机房营子遗址出土陶器的XRF分析研究[J]. 光谱实验室, 2007, 24(4): 725-728.
- [88] 贾宾. 南洼遗址制陶原料研究[J]. 文物鉴定与鉴赏, 2010(7): 68-73.
- [89] 陈铁梅, 成志忠, 莫友芳. 阳山墓地和徐家山遗址部分陶片的中子活化分析[M]//青海省文物考古研究所. 民和阳山. 北京: 文物出版社, 1990: 177-180.
- [90] 陆青玉, 王芬, 栾丰实. 综合性陶器产地分析: 方法和实践[J]. 东南文化, 2020(5): 27-35.
- [91] 池锦祺, 王昌燧, 河西学, 等. 中国新沂县新石器时期古陶器的产地分析研究[J]. 中国科学技术大学学报, 1995, 25(3): 302-308.
- [92] 徐安武, 王昌燧, 池锦祺, 等. 新沂县花厅遗址出土古陶器产地的INAA研究[J]. 核技术杂志, 1997, 20(12): 727-731.
- [93] 张巽, 陈江峰, 芦雪峰, 等. 花厅新石器时代古陶器产地铅同位素示踪的初步探讨[J]. 科学通报, 1997, 42(6): 637-640.
- [94] 刘方新, 王昌燧, 姚昆仑, 等. 古代陶器的长石分析与考古研究[J]. 考古学报, 1993(2): 239-250.
- [95] 陈树榆, 林淑钦, 彭子成, 等. 苏皖地区新石器时代陶器的稀土元素特征的初步探讨[J]. 中国科学技术大学学报, 1995, 25(1): 59-64.
- [96] 吕利亚, 毛振伟, 朔知, 等. 薛家岗遗址出土古陶的产地分析[J]. 中原文物, 2007(5): 104-107.
- [97] 王增林, 许宏. 二里头遗址陶器样品中子活化分析与研究[G]//中国社会科学院考古研究所. 科技考古: 第二辑. 北京: 科学出版社, 2007: 83-96.
- [98] 王建平, 陈铁梅, 程玉冰. 广东博罗先秦硬陶的XRF和INAA研究[J]. 文物保护与考古科学, 2004, 16(4): 43-49.
- [99] 徐安武, 杨晓勇, 林辉, 等. 安徽蒙城尉迟寺遗址大口尊古陶器的稀土元素地球化学研究[J]. 稀土, 1999, 20(3): 1-4.
- [100] 徐安武, 杨晓勇, 孙在泾, 等. 大汶口文化陶大口尊产地的初步研究[J]. 考古, 2000(8): 87-92.
- [101] 王增林, 梁中合, 袁靖, 等. 山东地区龙山文化陶器的中子活化分析与研究[J]. 考古, 2003(10): 86-94.
- [102] 成小林, 郝少康, 戴向明, 等. 山西垣曲盆地新石器时代及早期青铜时代陶器的产地分析研究[J]. 中国历史文物, 2009(3): 22-32.
- [103] 韩国河, 赵维娟, 张继华, 等. 用中子活化分析研究南洼白陶的原料产地[J]. 中原文物, 2007(6): 83-86, 90.
- [104] 崔剑锋, 张海. 龙山文化、二里头文化陶器的激光剥蚀进样电感耦合等离子体发射光谱(LAICP-OES)研究[G]//北京大学考古文博学院, 河南省文物考古研究所. 登封王城岗考古发现与研究:

- 2002—2005. 北京: 大象出版社, 2007: 645-656.
- [105] 李宝平, 刘莉, 陈星灿, 等. 偃师二里头遗址出土白陶产地的初步探讨及锶同位素分析的重要意义[C]//罗宏杰, 郑欣森. '09古陶瓷科学技术7国际讨论会论文集. 上海: 上海科学技术文献出版社, 2009: 65-70.
- [106] 高正耀, 陈松华. 穆斯堡尔谱学在古陶瓷研究中的应用[J]. 文物保护与考古科学, 1990, 2(1): 39-46.
- [107] 三辻利一, 郎惠云. 用新的X荧光分析法进行古代陶器产地推定法的开发研究[J]. 文博, 1996(4): 92-101, 106.
- [108] 单洁. 古陶产地理论及相关研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2002.
- [109] 张巽, 马林, 陈江峰, 等. 铅同位素组成在古陶产地判别中的应用[J]. 核技术, 2003, 26(9): 693-696.
- [110] 张巽, 陈江峰, 马林, 等. 铅和锶同位素组成在古陶产地判别中的联合应用[J]. 核技术, 2004, 27(3): 201-206.
- [111] 段天璟. 陶器岩相分析在史前陶器产地和交流研究中的应用[G]//吉林大学边疆考古研究中心. 边疆考古研究: 第9辑. 北京: 科学出版社, 2010: 305-315.
- [112] 何文权, 熊樱菲. 古陶瓷完整器元素成分无损分析的实现(一)——方法确认和总体设计[J]. 文物保护与考古科学, 2002, 14(S1): 272-283.
- [113] 何文权, 熊樱菲. 古陶瓷完整器元素成分无损分析的实现(二)——设备改建和定量分析方法[J]. 文物保护与考古科学, 2002, 14(S1): 284-297.
- [114] 吴隽, 李家治, 吴瑞. EDXRF在古陶瓷断源断代无损分析中的应用[C]//郭景坤. '05古陶瓷科学技术6国际讨论会论文集. 上海: 上海科学技术文献出版社, 2005: 502-504.
- [115] 王斌, 刘中夏. 几种现代实验技术在古陶瓷考古学中的应用[J]. 文物保护与考古科学, 1992, 4(2): 42-45.
- [116] 张仕定, 朱剑, 毛振伟, 等. 陶瓷检测参考样应用于古陶瓷XRF分析中的探讨[J]. 陶瓷学报, 2004, 25(4): 221-225.
- [117] 何文权, 熊樱菲. 古陶瓷元素成分分析技术定量方法的探讨[J]. 文物保护与考古科学, 2003, 15(3): 13-20.
- [118] 罗宏杰. 中国古陶瓷与多元统计分析[M]. 北京: 中国轻工业出版社, 1997.
- [119] 陈铁梅, 王建平. 古陶瓷的成分测定, 数据处理和考古解释[J]. 文物保护与考古科学, 2003, 15(4): 50-56.
- [120] 许志勇. 陶器化学组成分析在新石器时代考古研究中的意义[J]. 北方文物, 2004(4): 101-106.
- [121] 蒋胜晖, 文畅平. 陶瓷原料分类的Bayes判别分析法[J]. 硅酸盐通报, 2008, 27(2): 419-423.
- [122] 马清林. 甘肃新石器时代与青铜时代制陶工艺陶器颜料及陶器成分分类研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2000.
- [123] 马清林, 梁宝璠, 阎爱侠, 等. 能量色散X荧光光谱和人工神经网络在甘肃新石器时代陶片分类研究中的应用[J]. 兰州大学学报(自然科学版), 2003, 39(1): 47-53.
- [124] 印春生, 邱平, 王昌燧, 等. 人工神经网络在古陶器产地研究中的应用[J]. 科学通报, 2000, 45(19): 2109-2112.
- [125] 熊樱菲, 何文权, 王兵. 粗糙集理论(RST)及其在古陶瓷分类上应用的初探[J]. 文物保护与考古科学, 2002, 14(S1): 298-308.
- [126] 李士, 秦广雍. 现代实验技术在考古学中的应用[M]. 北京: 科学出版社, 1991.
- [127] 李家治, 陈显求. '89古陶瓷科学技术1国际讨论会文集[C]. 上海: 上海科学技术文献出版社, 1992.
- [128] 郭景坤. 古陶瓷科学技术3国际讨论会论文集[C]. 上海: 上海科学技术文献出版社, 1997.
- [129] 彭子成, 黄允兰, 孙卫东, 等. 广西古代陶器组成的研究[J]. 硅酸盐学报, 1996, 24(3): 291-296.
- [130] 李家治. 中国科学技术史: 陶瓷卷[M]. 北京: 科学出版社, 1998.
- [131] 马清林, 康明大, 卢燕玲, 等. 甘肃新石器时代与青铜代陶器研究的内容和科学意义[J]. 文物保护与考古科学, 2002, 14(2): 44-51.
- [132] 李新燕. 甘肃彩陶制作工艺实验与探索[J]. 考古与文物, 2005(6): 85-89.
- [133] 家治, 张志刚, 邓泽群, 等. 新石器时代早期陶器的研究——兼论中国陶器起源[J]. 考古, 1996(5): 83-91.

- [134] 焕志. 八千年前查海古陶器初探[J]. 中国陶瓷, 1991(6):61-62.
- [135] 李敏生, 黄素英. 山西襄汾陶寺遗址陶片的测试和分析[J]. 考古, 1993(2): 176-188.
- [136] 左健, 王昌燧, 高正耀, 等. 河南舞阳贾湖遗址陶片的研究[J]. 文物, 1997(12): 81-83.
- [137] 邓泽群, 吴隼, 吴瑞, 等. 跨湖桥遗址陶器的研究[M]//浙江省文物考古研究所, 萧山博物馆. 跨湖桥. 北京: 文物出版社, 2004: 336-343.
- [138] 马清林, 苏伯民, 胡之德, 等. 甘肃秦安大地湾遗址出土陶器成分分析[J]. 考古, 2004(2): 86-93.
- [139] 吴隼, 李家治, 吴瑞, 等. 广东博罗横岭山墓葬群出土陶器及原始瓷器的科学技术研究[C]//郭景坤. '05古陶瓷科学技术6国际讨论会论文集. 上海: 上海科学技术文献出版社, 2005: 57-67.
- [140] 王增林, 许宏. 河南偃师二里头遗址出土陶器的科技研究[G]//中国社会科学院考古研究所考古科技中心. 科技考古: 第二辑. 北京: 科学出版社, 2007: 97-115.
- [141] 王海圣, 李伟东, 邓泽群, 等. 桐林遗址出土龙山时期陶器的研究[C]//罗宏杰, 郑欣森. '09古陶瓷科学技术7国际讨论会论文集. 上海: 上海科学技术文献出版社, 2009: 56-64.
- [142] 董俊卿. 双墩文化陶器研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2007.
- [143] 鲁晓珂, 李伟东, 王海圣, 等. 新密古城寨龙山文化遗址陶器的研究[C]//罗宏杰, 郑欣森. '09古陶瓷科学技术7国际讨论会论文集. 上海: 上海科学技术文献出版社, 2009: 40-46.
- [144] 吴隼, 王海圣, 吴瑞, 等. 广富林遗址出土陶器的初步研究[C]//罗宏杰, 郑欣森. '09古陶瓷科学技术7国际讨论会论文集. 上海: 上海科学技术文献出版社, 2009: 47-55.
- [145] 何笃, 拉普, 荆志淳, 等. 湖北荆南寺遗址陶器中子活化技术与文化因素综合分析[J]. 考古, 1999(10): 83-96.
- [146] 吴瑞, 邓泽群, 张志刚, 等. 江西万年仙人洞遗址出土陶片的科学技术研究[J]. 考古, 2005(7): 62-69.
- [147] 吴瑞, 吴隼, 邓泽群, 等. 广西桂林甑皮岩遗址陶器的科学研究[J]. 中国陶瓷工业, 2005, 12(4): 5-10.
- [148] 王海圣, 李伟东, 蒋乐平, 等. 上山文化遗址出土陶器的科技研究[C]//罗宏杰, 郑欣森. '09古陶瓷科学技术7国际讨论会论文集. 上海: 上海科学技术文献出版社, 2009: 1-11.
- [149] 国家文物局考古领队培训班. 兖州西吴寺[M]. 北京: 文物出版社, 1990.
- [150] 河南省文物考古研究所. 汝州洪山庙[M]. 郑州: 中州古籍出版社, 1995.
- [151] 中国历史博物馆考古部, 山西省考古研究所, 垣曲县博物馆. 垣曲商城(一): 1985—1986年度勘察报告[M]. 北京: 科学出版社, 1996.
- [152] 中国社会科学院考古研究所. 敖汉赵宝沟: 新石器时代聚落[M]. 北京: 中国大百科全书出版社, 1997.
- [153] 北京大学考古学系, 驻马店市文物保护管理所. 驻马店杨庄: 中全新世淮河上游的文化遗存与环境信息[M]. 北京: 科学出版社, 1998.
- [154] 中国社会科学院考古研究所, 西藏自治区文物局. 拉萨曲贡[M]. 北京: 中国大百科全书出版社, 1999.
- [155] 中国社会科学院考古研究所. 师赵村与西山坪[M]. 北京: 中国大百科全书出版社, 1999.
- [156] 湖北省荆州博物馆, 湖北省文物考古研究所, 北京大学考古学系. 肖家屋脊[M]. 北京: 文物出版社, 1999.
- [157] 国家文物局考古领队培训班. 兖州六里井[M]. 北京: 科学出版社, 1999.
- [158] 中国社会科学院考古研究所. 偃师二里头: 1959年—1978年考古发掘报告[M]. 北京: 中国大百科全书出版社, 1999.
- [159] 北京市文物研究所. 镇江营与塔照: 拒马河流域先秦考古文化的类型与谱系[M]. 北京: 中国大百科全书出版社, 1999.
- [160] 成都市文物考古研究所, 四川大学历史系考古教研室, 早稻田大学长江流域文化研究所. 宝墩遗址: 新津宝墩遗址的发掘与研究[M]. 东京: 有限会社阿普(ARP), 2000.
- [161] 国家文物局三峡考古队. 朝天嘴与中堡岛[M]. 北京: 文物出版社, 2001.
- [162] 湖北省文物考古研究所. 盘龙城: 一九六三年—一九九四年考古发掘报告[M]. 北京: 文物出版社, 2001.
- [163] 湖北省文物考古研究所. 宜都城背溪[M]. 北京: 文物出版社, 2001.
- [164] 中国历史博物馆考古部, 山西省考古研究所, 垣曲县博物馆. 垣曲古城东关[M]. 北京: 科学出版社,

- 2001.
- [165] 中国社会科学院考古研究所, 广西壮族自治区文物工作队, 桂林甑皮岩遗址博物馆, 等. 桂林甑皮岩[M]. 北京: 文物出版社, 2003.
- [166] 浙江省文物考古研究所. 河姆渡: 新石器时代遗址考古发掘报告[M]. 北京: 文物出版社, 2003.
- [167] 福建博物院, 漳州市文管办, 漳州市博物馆. 虎林山遗址[M]. 福州: 海潮摄影艺术出版社, 2003.
- [168] 南京博物院. 花厅: 新石器时代墓地发掘报告[M]. 北京: 文物出版社, 2003.
- [169] 宁夏文物考古研究所, 中国历史博物馆考古部. 宁夏菜园: 新石器时代遗址、墓葬发掘报告[M]. 北京: 科学出版社, 2003.
- [170] 中国社会科学院考古研究所. 安阳小屯[M]. 北京: 世界图书出版公司, 2004.
- [171] 广东省文物考古研究所, 珠海市博物馆. 珠海宝镜湾: 海岛型史前文化遗址发掘报告[M]. 北京: 科学出版社, 2004.
- [172] 广东省文物考古研究所. 博罗横岭山: 商周时期墓地2000年发掘报告[M]. 北京: 科学出版社, 2005.
- [173] 浙江省文物考古研究所. 南河浜: 崧泽文化遗址发掘报告[M]. 北京: 文物出版社, 2005.
- [174] 广东省博物馆, 佛山市博物馆. 佛山河宕遗址: 1977年冬至1978年夏发掘报告[M]. 广州: 广东人民出版社, 2006.
- [175] 甘肃省文物考古研究所. 秦安大地湾: 新石器时代遗址发掘报告[M]. 北京: 文物出版社, 2006.
- [176] 中国社会科学院考古研究所. 徐家碾寺洼文化墓地: 1980年甘肃庄浪徐家碾考古发掘报告[M]. 北京: 科学出版社, 2006.
- [177] 北京市文物研究所, 北京市昌平区文化委员会. 昌平张营: 燕山南麓地区早期青铜文化遗址发掘报告[M]. 北京: 文物出版社, 2007.
- [178] 安徽省文物考古研究所, 蚌埠市博物馆. 蚌埠双墩: 新石器时代遗址发掘报告[M]. 北京: 科学出版社, 2008.
- [179] 国务院三峡工程建设委员会办公室, 国家文物局. 秭归卜庄河[M]. 北京: 科学出版社, 2008.
- [180] 云南省文物考古研究所, 中国社会科学院考古研究所, 成都文物考古研究所, 等. 耿马石佛洞[M]. 北京: 文物出版社, 2010.
- [181] 中国社会科学院考古研究所, 河南省文物考古研究所. 灵宝西坡墓地[M]. 北京: 文物出版社, 2010.
- [182] 山西省考古研究所. 垣曲上亳[M]. 北京: 科学出版社, 2010.
- [183] 汪海宁. 古代陶器的研究视野——有关中国考古学方法的几点思考[J]. 东南文化, 1997(2): 6-19.
- [184] 曹兵武. 陶器研究琐谈——“中美古代陶器研讨班”侧记[J]. 文物天地, 1992(6): 31-33.
- [185] 文德安. 北美考古学陶器分析的几种方法[C]//中国社会科学院考古研究所. 21世纪中国考古学与世界考古学: 纪念中国社会科学院考古研究所成立50周年大会暨21世纪中国考古学与世界考古学国际学术研讨会论文集. 北京: 中国社会科学出版社, 2002: 667-676.
- [186] 秦小丽. 陶器研究方法论——以恢复社会生活为目的的陶器研究方法[G]//陕西省文物局, 陕西省考古研究所, 西安半坡博物馆. 中国史前考古学研究: 祝贺石兴邦先生考古半世纪暨八秩华诞文集. 西安: 三秦出版社, 2003: 417-435.
- [187] 鲁晓珂, 李伟东, 罗宏杰, 等. 上海广富林遗址陶器的科技研究[G]//中国社会科学院考古研究所科技考古中心. 科技考古: 第三辑. 北京: 科学出版社, 2011: 259-266.
- [188] 张茂林, 郭富, 金普军, 等. 四川汉源麻家山遗址出土陶器的科技研究[J]. 中国陶瓷, 2011, 47(5): 85-89, 92.
- [189] 郭富, 黄伟, 金普军. 四川汉源县狮子山、麻家山遗址出土陶器成分分析与研究[J]. 四川文物, 2015(5): 88-94.
- [190] 鲁晓珂, 方燕明, 李伟东. 瓦店遗址龙山文化白陶的科技研究[J]. 华夏考古, 2015(4): 118-124.
- [191] 王小娟, 南普恒, 郭银堂. 河曲坪头遗址龙山时期陶器及其制陶原料的化学成分分析[J]. 文物保护与考古科学, 2015, 27(4): 61-69.
- [192] 郁永彬, 吴小红, 崔剑锋, 等. 宜昌中堡岛新石器遗址彩陶的初步分析研究[J]. 中原文物, 2016(3): 118-124.
- [193] 王小娟. 中国古代白陶化学组成的多元统计分析[J]. 考古与文物, 2017(5): 124-138.
- [194] 江柏毅. 成都平原出土史前陶器岩相学初步分析[J]. 四川文物, 2018(2): 80-89.

- [195] 陈娟, 崔剑锋, 崔天兴, 等. 荥阳官庄遗址制陶作坊出土陶泥陶坯的科学分析[J]. 文物保护与考古科学, 2018, 30(5): 77-83.
- [196] 李宏飞, 赵海涛, 崔剑锋, 等. 试论二里头遗址出土陶器化学成分所见选料传统[J]. 南方文物, 2019(2): 103-110.
- [197] 张又尹, 朱剑, 吴卫红. 安徽凌家滩遗址出土陶器的岩相分析[J]. 南方文物, 2020(3): 159-164.
- [198] 吴卫红, 邱振威. 安徽怀宁孙家城遗址夹植物陶器初步研究[J]. 江汉考古, 2020(4): 92-101.
- [199] 王小娟, 何努, 戴向明. 晋南地区新石器末期制陶粘土原料EDXRF分析[J]. 中国国家博物馆馆刊, 2020(5): 146-160.
- [200] 高守雷. 辽西地区新石器时代陶器制作技术研究[D]. 上海: 上海大学, 2021.
- [201] 盛钰洁. 广西感驮岩遗址出土陶器科技分析研究[D]. 南宁: 广西民族大学, 2021.
- [202] 高守雷, 熊增珑, 张童心. 牛河梁遗址红山文化陶器成分分析与研究[J]. 北方文物, 2021(6): 80-91.
- [203] 郭富, 金普军, 雷雨, 等. 三星堆遗址出土陶器成分与夹杂物研究[J]. 陶瓷学报, 2021, 42(5): 863-873.
- [204] 郭富, 金普军, 李婷婷. 四川汉源麦坪遗址出土陶器成分分析与研究[J]. 四川文物, 2021(3): 95-103.
- [205] 臧雅帆, 王涛, 袁广阔. 基于X射线谱学和操作链分析的煤山遗址出土陶器综合研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2021, 41(5): 1355-1359.
- [206] 周亦超. 高明古椰贝丘遗址陶器X射线荧光光谱分析研究[J]. 陶瓷, 2022(11): 44-49.
- [207] 鲁晓珂, 李伟东, 刘斌, 等. 良渚古城遗址陶器的分析研究[J]. 中国科学: 技术科学, 2013, 43(4): 460-466.
- [208] ZHAO X H, ZHAO Y, QIN X L, et al. On Liangzhu culture tremolite-tempered pottery: social complexity, logistical networks and cross-craft interaction in Neolithic China[J]. Journal of Archaeological Science, 2024, 167.
- [209] 王增林, 何弩. 陶寺遗址出土泥质陶器的中子活化分析与研究[J]. 南方文物, 2014(3): 72-78.
- [210] 中国社会科学院考古研究所, 中澳美伊洛河流域联合考古队. 洛阳盆地中东部先秦时期遗址: 1997—2007年区域系统调查报告[M]. 北京: 科学出版社, 2019: 1227-1228.
- [211] 王海圣, 李伟东, 罗宏杰, 等. 山东龙山文化陶器的科技研究[G]//中国社会科学院考古研究所科技考古中心. 科技考古: 第三辑. 北京: 科学出版社, 2011: 222-242.
- [212] 王海圣, 李伟东, 罗宏杰, 等. 中华文明形成时期长江下游地区陶器的科技研究[G]//中国社会科学院考古研究所科技考古中心. 科技考古: 第三辑. 北京: 科学出版社, 2011: 243-258.
- [213] 王增林, 李新伟, 栾丰实, 等. 中华文明形成时期多个遗址陶器的中子活化分析与研究[G]//中国社会科学院考古研究所科技考古中心. 科技考古: 第三辑. 北京: 科学出版社, 2011: 177-202.
- [214] 鲁晓珂, 李伟东, 李新伟. 夹砂陶器掺合料的初步研究[J]. 文物保护与考古科学, 2018, 30(5): 1-8.
- [215] 栗媛秋. 内蒙古敖汉旗兴隆沟遗址出土陶器岩相与成分的初步分析[J]. 四川文物, 2020(4): 110-118.
- [216] 宫鑫, 孙战伟, 刘思然, 等. 清涧辛庄遗址出土陶器的红外光谱分析[J]. 河南博物院院刊, 2022(2): 138-145.
- [217] 陈茜茜, 杨玉璋, 张居中, 等. 浙江小黄山与河南贾湖遗址出土新石器时代前期陶器化学组成的WDXRF分析研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2011, 31(11): 3140-3144.
- [218] 郁永彬, 吴小红, 崔剑锋, 等. 甘肃张掖西城驿遗址陶器的科技分析与研究[J]. 考古, 2017(7): 108-120.
- [219] 鲁晓珂, 李伟东, 罗宏杰, 等. 河南灵宝西坡遗址陶器的科技研究[G]//中国社会科学院考古研究所科技考古中心. 科技考古: 第三辑. 北京: 科学出版社, 2011: 203-212.
- [220] 严小琴, 刘逸堃, 李立, 等. 新石器时期马家窑文化彩陶的科技分析[J]. 电子显微学报, 2013, 32(5): 403-409.
- [221] 钟黎, 肖永明, 王涛, 等. 化隆县纳卡遗址彩陶颜料的拉曼光谱分析[J]. 南方文物, 2013(3): 139-142.
- [222] 严小琴, 刘逸堃, 刘成, 等. 新石器时期半坡遗址鱼纹彩陶的科技分析[J]. 硅酸盐通报, 2014, 33(6): 1389-1393.
- [223] 王晓毅, 南普恒, 金普军. 山西南部新石器时代末期彩绘陶器颜料的科学分析[J]. 考古与文物,

- 2014(4): 108-113.
- [224] 鲁晓珂, 方燕明, 李伟东, 等. 新石器时代中晚期黄河流域陶衣技术的发展研究[J]. 华夏考古, 2017(2): 66-73, 152.
- [225] 赵灵委, 陈海龙, 赵虹霞, 等. 庙底沟遗址出土仰韶文化彩陶的科学研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2018, 38(5): 1420-1429.
- [226] 李曼, 刘东兴, 吴金涛, 等. 大河村遗址出土仰韶时代彩陶颜料及块状颜料初步分析[J]. 洛阳考古, 2018(2): 90-95.
- [227] 朱新选. 会宁牛门洞遗址出土马家窑文化彩陶颜料分析[G]//秦始皇帝陵博物院. 秦始皇帝陵博物院2018年: 总编辑. 西安: 西北大学出版社, 2018: 207-212.
- [228] 周本源, 马清林. 甘肃秦安大地湾遗址出土白色块状颜料成分分析[J]. 文物保护与考古科学, 2019, 31(4): 87-99.
- [229] 鲁晓珂, 李伟东, 李新伟. 西坡遗址出土器物的光谱学分析[J]. 光谱学与光谱分析, 2020, 40(4): 1186-1194.
- [230] 杨真真, 夏寅, 王丽琴, 等. 青海民和县出土马家窑文化彩陶的科学分析研究[J]. 文物保护与考古科学, 2021, 33(3): 81-92.
- [231] LI Y, WU S, YANG J. Multi-analytical investigation of decorative coatings on Neolithic Yangshao pottery from Ningxia, China (4000-3000 BCE)[J]. *Journal of the European Ceramic Society*, 2021, 41(13): 6744-6755.
- [232] 肖芮, 罗运兵, 陶洋, 等. 屈家岭遗址史前黑釉蛋壳陶研究[J]. 江汉考古, 2022(2): 114-122.
- [233] 郭梦, 何毓灵, 李建西, 等. 殷墟锡衣仿铜陶礼器的发现与研究[J]. 考古学报, 2020(2): 291-308.
- [234] 鲁晓珂, 李伟东, 罗宏杰, 等. 古代陶器残留物及彩绘颜料的测试研究[J]. 中国陶瓷, 2011, 47(7): 63-65, 69.
- [235] 鲁晓珂, 李伟东, 罗宏杰, 等. 陶寺遗址龙山时代黑色陶衣的研究[J]. 中国科学: 技术科学, 2011, 41(7): 906-912.
- [236] 李迎华, 王昌燧, 郑克祥. 古代陶器测温的模拟实验研究[J]. 陶瓷学报, 2012, 33(2): 215-221.
- [237] 鲁晓珂, 徐嫦松, 李伟东. 顶杆热膨胀法测定古陶瓷烧成温度的应用研究[J]. 文物保护与考古科学, 2020, 32(5): 70-80.
- [238] 张怡, 朱剑, 王涛, 等. 低温陶器的烧成温度测定及其初步应用[J]. 南方文物, 2012(1): 140-146.
- [239] ZHU J, ZHANG Y, WANG T, et al. Determining the firing temperature of low-fired ancient pottery: an example from the Donghulin site, Beijing, China[J]. *Archaeometry*, 2014, 56(4): 562-572.
- [240] 刘思然, 宫鑫, 严弼宸. 古代陶器烧制温度的红外光谱分析研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2023, 43(5): 1495-1500.
- [241] 王福莲, 安宁, 汪伟. 实验考古: 夹砂红陶烧成温度下限的探索[J]. 南方文物, 2015(3): 199-203.
- [242] 鲁晓珂, 李伟东, 罗宏杰, 等. 二里头遗址出土白陶、印纹硬陶和原始瓷的研究[J]. 考古, 2012(10): 89-96.
- [243] 孟庆蛟. 海岱地区史前陶器烧成温度问题探讨[D]. 济南: 山东大学, 2019.
- [244] 王犖, 金正耀, 吴又进, 等. 禹会遗址出土陶器的烧成温度测定[G]//王春法. 中国国家博物馆文物保护修复论文集. 北京: 北京时代华文书局, 2019: 377-386.
- [245] 朱逸冰, 陈杰, 熊樱菲, 等. 广富林遗址出土陶器的烧成温度研究[J]. 东方博物, 2022(1): 104-111.
- [246] 刘晓迪, 胡耀武, 王树芝, 等. 广西大岩和顶蛳山遗址陶器残留物分析及相关问题[J]. 考古, 2023(7): 104-120.
- [247] 贾耀祺. 古代陶器物理属性研究方法初探——以南洼遗址二里头文化陶器为例[D]. 郑州: 郑州大学, 2012.
- [248] 杨剑, 霍耀, 郭梦. 宁夏隆德周家嘴头遗址制陶模拟实验[J]. 中原文物, 2022(3): 49-57.
- [249] 宋建. 陶器理化测试分析对社会复杂化进程探索[G]//中国社会科学院考古研究所科技考古中心. 科技考古: 第三辑. 北京: 科学出版社, 2011: 165-176.
- [250] 王芬, 陈淑卿. 北阡遗址史前陶器化学成分分析和物性特征分析[G]//山东大学文化遗产研究院. 东方考古: 第10集. 北京: 科学出版社, 2013: 137-153.

- [251] 岳占伟, 荆志淳, 岳洪彬, 等. 殷墟出土灰陶器的制作与烧制实验研究[J]. 南方文物, 2014(3): 100-109.
- [252] 李默然. 浙川马岭遗址仰韶早期居址和墓葬陶器的不同生产方式[J]. 南方文物, 2019(6): 101-107.
- [253] LI T, LI P F, SONG H C, et al. Pottery production at the Miaodigou site in central China: archaeological and archaeometric evidence[J]. Journal of Archaeological Science: Reports, 2022, 41.
- [254] 刘娜妮, 刘思然, 陈坤龙, 等. 石峁遗址皇城台东护墙北段出土陶器的成分与岩相分析[J]. 考古与文物, 2022(2): 155-160.
- [255] 郎婧真. 日照苏家村遗址龙山文化陶器生产及聚落形态研究[D]. 济南: 山东大学, 2023.
- [256] 袁超. 花地嘴遗址新砦期陶器生产相关问题探讨[D]. 济南: 山东大学, 2019.
- [257] 郁永彬, 向光华, 崔剑锋, 等. 宜昌地区大溪文化彩陶化学组成与显微分析[J]. 江汉考古, 2023, 188(5): 112-121.
- [258] 袁超. 郑洛地区龙山文化晚期至二里头文化早期陶器生产研究——以新砦和花地嘴遗址为中心[D]. 济南: 山东大学, 2023.
- [259] WANG W J, WU W H, YU H S, et al. What lies beyond rituals? Exploring the role of pottery in the chiefly polities of Lingjiatan[J]. Archaeological Research in Asia, 2024, 40.
- [260] 陆青玉. 鲁北地区大汶口中晚期-龙山文化时期陶器的生产、流通和社会复杂化[D]. 济南: 山东大学, 2019.
- [261] 陆青玉, 王芬, 栾丰实, 等. 丁公及周边遗址龙山文化白陶的岩相和化学成分分析[J]. 考古, 2019(10): 106-120.
- [262] DRUC I, UNDERHILL A, WANG F, et al. A preliminary assessment of the organization of ceramic production at Liangchengzhen, Rizhao, Shandong: perspectives from petrography[J]. Journal of Archaeological Science: Reports, 2018, 18: 222-238.
- [263] 李涛. 红山文化无底筒形器的“专业化”生产问题[J]. 北方文物, 2019(1): 22-31.
- [264] 李涛. 基于无损化学分析和家户尺度上的史前陶器网络研究[G]//西北大学文化遗产学院文物保护系. 文物保护实践、研究与教育: 西北大学文物保护技术专业创立三十周年论文集. 西安: 西北大学出版社, 2019: 152-158.
- [265] 李涛. 史前陶器的手持式X射线荧光光谱仪分析[J]. 南方文物, 2020(5): 263-271.
- [266] 崔剑锋, 吴小红, 杨颖亮. 四川茂县新石器遗址陶器的成分分析及来源初探[J]. 文物, 2011(2): 79-85.
- [267] 洪玲玉, 崔剑锋, 王辉, 等. 川西马家窑类型彩陶产源分析与探讨[G]//四川大学博物馆, 四川大学考古学系, 成都文物考古研究所. 南方民族考古: 第七辑. 北京: 科学出版社, 2011: 1-58.
- [268] 任瑞波, 陈苇, 任赞娟. 川西彩陶产地来源新说检讨[J]. 四川文物, 2013(2): 40-45.
- [269] 侯光良, 鄂崇毅, 杨阳, 等. 共存与交流——青藏高原东北部史前陶器来源地分析[J]. 地球环境学报, 2016, 7(6): 556-569.
- [270] 崔一付. 甘青地区新石器时代晚期陶器贸易及其影响因素初步研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2016.
- [271] 向金辉. 川西马家窑文化彩陶来源再检视——以陶器化学成分分析为中心[J]. 四川文物, 2018(4): 81-90.
- [272] 崔一付, 杨谊时, 张山佳, 等. 甘青地区马家窑文化彩陶贸易及其动力探讨[J]. 第四纪研究, 2020, 40(2): 538-546.
- [273] 洪玲玉, 崔剑锋, 陈洪海. 移民、贸易、仿制与创新——宗日遗址新石器时代晚期陶器分析[G]//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: 九. 北京: 科学出版社, 2012: 325-345.
- [274] 崔炜. 禹会遗址出土薄胎黑陶的工艺产地及相关问题分析[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2013.
- [275] 叶茂林, 王增林, 李晓东, 等. 青海喇家遗址新发现的白陶和初步研究[N]. 中国文物报, 2014-08-29(6).
- [276] 杨红艳. 三门峡盆地仰韶文化彩陶生产与聚落形态研究[D]. 郑州: 郑州大学, 2018.
- [277] 李宏飞, 李素婷, 崔剑锋, 等. 小双桥遗址岳石文化风格陶器成分分析[J]. 中原文物, 2015(3): 116-121.

- [278] 鲁晓珂, 徐娣松, 李伟东. 基于锶同位素和微量元素分析的白陶原料来源研究[J]. 华夏考古, 2019(6): 34-40.
- [279] 陈晖, 荆志淳. 盘龙城遗址出土陶器制作技术初步观察[J]. 江汉考古, 2020(6): 116-125.
- [280] 孙卓, 彭苇苇, 苏昕. 盘龙城遗址出土陶器的文化因素及其反映的生产背景[J]. 南方文物, 2024(3): 115-126.
- [281] 邓玲玲, 田苗, 陈国梁, 等. 偃师商城遗址大口尊的原料配方与生产消费[J]. 南方文物, 2021(6): 198-207.
- [282] 季丰收, 吴晓桐, 金正耀, 等. 日照苏家村遗址出土钱山漾文化陶鬲的产地研究[J]. 中国陶瓷, 2021, 57(1): 66-72.
- [283] 宋石玮, 李素婷, 宋国定. 试论小双桥遗址岳石风格陶器的制作工艺与产地[J]. 华夏考古, 2023(1): 147-156.
- [284] 袁超, 苑世领, 王芬. 红外光谱技术在陶器考古中的初步应用[G]//山东大学《东方考古》编辑部. 东方考古: 第19集. 北京: 科学出版社, 2022: 200-210.
- [285] 李蔓, 夏寅, 王丽琴. 偏光显微分析和拉曼光谱分析在彩绘颜料鉴定中的应用[J]. 光散射学报, 2013, 25(3): 268-275.
- [286] 郭梦, 傅家欣. 便携式X射线荧光光谱仪(pXRF)在古代陶器分析中的应用[J]. 西部考古, 2023(2): 351-360.
- [287] 吴卫红, 姚政权, 王京, 等. 凌家滩遗址出土陶器的LIBS-PCA分析[J]. 光谱学与光谱分析, 2020, 40(2): 628-631.
- [288] 陆青玉, 王琦, 王芬. 陶器岩相学及其在考古学中的应用[J]. 江汉考古, 2021(2): 109-115, 136.
- [289] 吴双, 陈淳. 陶瓷岩相分析与考古学信息提炼[G]//武仙竹. 科技考古与文物保护技术: 第一辑. 北京: 科学出版社, 2018: 77-86.
- [290] 李清临. 古陶产地研究的现状与展望[J]. 华夏考古, 2011(1): 146-152.
- [291] 郭明建. 古代陶器产地的理论探索与技术分析[G]//北京联合大学考古学研究中心. 早期中国研究: 第3辑. 北京: 文物出版社, 2018: 159-172.
- [292] 李涛. 史前陶器产地研究中的常用假设试析[J]. 南方文物, 2024(4): 109-120.
- [293] 苑世领, 王芬. 统计考古[M]. 北京: 科学出版社, 2024.
- [294] 吴隽. 陶瓷科技考古[M]. 北京: 高等教育出版社, 2012.
- [295] 秦小丽, 张萌. 陶器研究的理论与方法[M]. 上海: 复旦大学出版社, 2022.
- [296] 鲁晓珂, 李伟东, 罗宏杰, 等. 河南偃师二里头遗址特殊陶器的科技研究[G]//中国社会科学院考古研究所科技考古中心. 科技考古: 第三辑. 北京: 科学出版社, 2011: 213-221.
- [297] 许璐. 深圳咸头岭遗址出土白陶的科技研究[D]. 景德镇: 景德镇陶瓷学院, 2013.
- [298] 容波, 杨利平, 马明志, 等. 榆林横山大古界遗址出土仰韶晚期陶器的科学分析[J]. 文物保护与考古科学, 2013, 25(3): 82-87.
- [299] 岳占伟, 荆志淳, 岳洪彬, 等. 殷墟白陶的初步研究[J]. 南方文物, 2017(4): 64-74.
- [300] 刘文奇. 基于现代分析技术对河南淅川单岗陶器进行的研究[D]. 郑州: 郑州大学, 2017.
- [301] 徐文婷. 安徽郎溪磨盘山遗址出土陶器制作工艺与产地研究[D]. 南京: 南京大学, 2017.
- [302] 张贤蕊. 沟湾遗址出土史前陶器的制作工艺与产地研究[D]. 郑州: 郑州大学, 2018.
- [303] 崔天兴, 杨红艳, 张贤蕊, 等. 河南淅川沟湾遗址史前彩陶工艺研究[J]. 中原文物, 2019(4): 122-128.
- [304] 王恩元, 熊樱菲, 朱逸冰, 等. 广富林文化陶器的陶衣与掺合料研究[J]. 文博, 2019(6): 84-90.
- [305] 陈雪飞. 河南郛城皇寓遗址二里头文化陶器工艺及特征分析[J]. 中原文物, 2019(6): 67-75.
- [306] 吴晓聪. 巩义双槐树遗址制陶工艺研究[D]. 太原: 山西大学, 2020.
- [307] 许朝霞. 荥阳汪沟遗址制陶工艺研究[D]. 太原: 山西大学, 2021.
- [308] DRUC I, UNDERHILL A, WANG F, et al. Late Neolithic white wares from southeastern Shandong, China: the tricks to produce a white looking pot with not much Kaolin. Results from petrography, XRD and SEM-EDS analyses[J]. Journal of Archaeological Science: Reports, 2021, 35.
- [309] 邓玲玲, 鲍怡, 陈国梁, 等. 偃师商城遗址制陶作坊残次陶片的初步研究[J]. 中原文物, 2023(5): 71-78, 107.

- [310] 范宗祥, 周振宇, 刘思然, 等. 中国东南地区距今5000年的瓷石质高温硬陶技术——来自福建南山、岩仔洞遗址的证据[J]. 南方文物, 2024(4): 176-187.
- [311] 陆青玉, 王芬, 张小雷, 等. 安徽萧县金寨遗址陶器产地分析[J]. 考古, 2024(1): 102-113.
- [312] 郁永彬, 吴隽, 张茂林, 等. 南方地区若干典型遗址出土早期陶器工艺比较分析[J]. 文物保护与考古科学, 2011, 23(4): 97-103.
- [313] 申静怡. 东天山地区青铜至早期铁器时代遗址陶器制作工艺与产地的相关研究[D]. 西安: 西北大学, 2012.
- [314] 秦金娇. 淮河中下游地区距今7000—5000年出土陶器的科技研究[D]. 合肥: 安徽大学, 2018.
- [315] HEIN A, STILBORG O. Ceramic production in prehistoric Northwest China: preliminary findings of new analyses of old material from the Museum of Far Eastern Antiquities, Stockholm[J]. Journal of Archaeological Science: Reports, 2019, 23: 104-115.
- [316] 李文杰. 古代制陶所用黏土及屨和料——兼及印纹硬陶与原始瓷原料的区别[J]. 文物春秋, 2021(1): 39-46.
- [317] MA H J, HEIN A, HENDERSON J, et al. The geology of Tianshui-Qin'an area of the western Loess Plateau and the chemical characteristics of its Neolithic pottery[J]. Geoarchaeology, 2020, 35(5): 611-624.
- [318] 杨玉璋, 张茂林, 蒋乐平, 等. 浙江金衢盆地新石器时代早中期上山文化陶器科技分析[J]. 中国陶瓷, 2023, 59(2): 56-62.
- [319] 内蒙古自治区文物考古研究所, 吉林大学边疆考古研究中心. 赤峰上机房营子与西梁[M]. 北京: 科学出版社, 2012.
- [320] 湖南省文物考古研究所. 安乡汤家岗: 新石器时代遗址发掘报告[M]. 北京: 科学出版社, 2013.
- [321] 中国社会科学院考古研究所, 安徽省蚌埠市博物馆. 蚌埠禹会村[M]. 北京: 科学出版社, 2013.
- [322] 深圳市文物考古鉴定所. 深圳咸头岭: 2006年发掘报告[M]. 北京: 文物出版社, 2013.
- [323] 郑州大学历史文化遗产保护研究中心. 登封南洼: 2004—2006年田野考古报告[M]. 北京: 科学出版社, 2015.
- [324] 中国社会科学院考古研究所. 二里头: 1999—2006[M]. 北京: 文物出版社, 2014.
- [325] 东亚考古学会. 赤峰红山后: 热河省赤峰红山后史前遗迹[M]. 戴岳曦, 康英华, 译. 呼和浩特: 内蒙古大学出版社, 2015.
- [326] 江西省文物考古研究院, 西北大学文化遗产学院, 抚州市文物博物管理所, 等. 江西抚河流域先秦时期遗址考古调查报告 I: 乐安县、宜黄县[M]. 北京: 文物出版社, 2015.
- [327] 湖北省文物考古研究所, 天门市博物馆. 天门龙嘴[M]. 北京: 科学出版社, 2015.
- [328] 河南省文物考古研究院, 中国科学技术大学科技史与科技考古系. 舞阳贾湖: 二[M]. 北京: 科学出版社, 2015.
- [329] 中国社会科学院考古研究所, 山西省临汾市文物局. 襄汾陶寺: 1978—1985年考古发掘报告[M]. 北京: 文物出版社, 2015.
- [330] 南京博物院, 张家港市文管办, 张家港博物馆. 东山村: 新石器时代遗址发掘报告[M]. 北京: 文物出版社, 2016.
- [331] 甘肃省文物考古研究所, 北京大学考古文博学院. 酒泉干骨崖[M]. 北京: 文物出版社, 2016.
- [332] 栾丰实, 文德安, 于海广, 等. 两城镇: 1998—2001年发掘报告[M]. 北京: 文物出版社, 2016.
- [333] 江西省文物考古研究所, 西北大学文化遗产学院, 抚州市文物博物管理所, 等. 江西抚河流域先秦时期遗址考古调查报告 II: 金溪县[M]. 北京: 文物出版社, 2017.
- [334] 江西省文物考古研究院, 鹰潭市博物馆. 角山窑址: 1983—2007年考古发掘报告[M]. 北京: 文物出版社, 2017.
- [335] 西安市文物保护考古研究院. 西安鱼化寨[M]. 北京: 科学出版社, 2017.
- [336] 浙江省文物考古研究所, 桐庐博物馆. 小青龙[M]. 北京: 文物出版社, 2017.
- [337] 镇江博物馆. 镇江丁家村遗址[M]. 镇江: 江苏大学出版社, 2017.
- [338] 中国社会科学院考古研究所. 枝江关庙山[M]. 北京: 文物出版社, 2017.
- [339] 中国社会科学院考古研究所, 山东省文物考古研究院, 山东临朐山旺古生物化石博物馆. 临朐西

- 朱封: 山东龙山文化墓葬的发掘与研究[M]. 北京: 文物出版社, 2018.
- [340] 成都文物考古研究院, 阿坝藏族羌族自治州文物管理所, 茂县羌族博物馆. 茂县营盘山新石器时代遗址[M]. 北京: 文物出版社, 2019.
- [341] 南水北调中线干线工程建设管理局, 河北省南水北调工程建设领导小组办公室, 河北省文物局. 邯郸薛庄遗址考古发掘报告[M]. 北京: 科学出版社, 2019.
- [342] 浙江省文物考古研究所. 良渚古城综合研究报告[M]. 北京: 文物出版社, 2019.
- [343] 陕西省考古研究院. 华阴兴乐坊: 新石器时代遗址考古发掘报告[M]. 北京: 科学出版社, 2019.
- [344] 安徽省文物考古研究所. 定远侯家寨[M]. 北京: 科学出版社, 2023.
- [345] 长沙市文物考古研究所. 宁乡罗家冲[M]. 北京: 科学出版社, 2023.
- [346] 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 [M]. 北京: 科学出版社, 2024.
- [347] 邓玲玲, 曹慧奇, 田苗, 等. 陶器尺寸标准化程度的量化分析: 以偃师商城遗址的大口尊为例[J]. 中国国家博物馆馆刊, 2022(5): 124-133.

Technological research on pottery production from prehistoric times to the Xia and Shang dynasties

JIN Xiuyan

College of History, University of Chinese Academy of Social Sciences, Beijing 102488

Abstract Pottery production has always been an important topic in scientific and archaeological research from prehistoric period to Xia and Shang dynasties. From a historical perspective, related research has gone through three stages: start, initial development, rapid development. Its research objects have expanded from simple pottery shards to various types of remains related to pottery production, such as clay, temper, and pottery kilns. The research content has shifted from focusing on basic raw material composition, molding process, physical properties, and firing technology to addressing deep-seated issues such as the evolution of molding technology, production organization, and trade circulation. The research methods have evolved from relying on a single technological means to comprehensive studies of multiple technologies and disciplines. Some research paradigms have been proposed successively, providing new ideas and directions for the research of pottery production technology.

Keywords prehistoric period to Xia and Shang dynasties; pottery production; technological archaeology