

摄影测量技术在深海考古中的应用

李滨

线偏移、影像衔接中断和变形的情况。项目小组采用底部双相机和摄像设备组合的方式，扩大拍摄覆盖面积，提高影像重叠比例，切实解决数据不连贯等问题。长条状分散区域地势从西到东逐渐升高，文物大多半掩埋、分散分布。作业人员根据地形变化动态调整相机和海底的距离，结合实时水流速度优化测线间距，在复杂地形条件下始终保证影像数据的重叠率 and 采集精准度。

在拍摄规范上，项目设置了严格的参数标准。所有拍摄作业的快门拍摄速度设定在1/50秒以上，这样可以防止因为水下航行和设备晃动造成画面模糊。并且统一明确航向影像重叠率要达到80%，旁向重叠率要达到70%，这能为后面的图像拼接和三维建模提供良好基础。拍摄模式分为两种。底部的相机按照预先设定的航线进行垂直持续拍摄，这样可以完整地记录遗址的整体结构；采样篮相机和4K摄像设备配合，进行倾斜拍摄，主要针对船体侧面、文物堆积等细节区域进行拍摄。千米的深海是没有光的黑暗环境，人工光源是影响成像质量的重要因素，“深海勇士号”载人深潜团队设立了多种类型、多个视角的复合光源模式。模拟自然日光的光谱，能还原文物和船体的真实颜色，提高画面的清晰度和对比度。从布局情况来看，潜水器的前端安装两组近距离灯和两组长距离探照灯，在底部和尾部增加辅助照明灯具，通过从多个方向布光来消除因为文物堆积产生的阴影。对光源的角度和亮度进行动态调整，避免眩光和阴影产生干扰，最大程度优化水下的光照条件。

项目采集团队利用采集好的大量影像数据，按照定位校准、数据预处理、图像配准、点云处理、畸变矫正、三维建模、模型优化等完整流程，进行水下场景三维重建，每个步骤都针对深海数据的难点设计了解决方法。先进行地面控制点的设置和高精度定位工作，由于深海遗址没有绝对坐标，环形区域和条带区域的海底特征点数量少，容易出现模型比例失真、影像拼接错位的情况。“深海勇士号”载人深潜团队使用海底四边形固定基站布置长基线定位系统（LBL），4个锚点配有声呐发射器，通过融合母船差分GPS和潜水器组合导航技术，达到0.05米级的超高精度定位，且不受1500米水深的限制。在遗址核心区，使用1米长的标准尺来设定地面控制点，录入与标准距离相关的参数并添加尺寸约束，从根本上解决模型比例失真的问题，让三维模型能够准确还原遗址的实际尺寸和空间方位。

项目使用了横向与纵向梳形航线和环形航线结合的方案，航路规划和数据收集参数都进行了多次优化。横向航线稳定性强，采集开始时测线宽度设定为2米，后来调整成1米，这样可以进一步提高数据质量。纵向航线容易受到水流影响，作业人员会根据水流状况动态补拍，通过固定测线间隔来保证影像重叠。对于核心区大尺度地形的采集工作，会调整相机云台的拍摄角度，让它能适应潜水器10米转弯半径的设备特点。这两款相机都使用JPEG+RAW双格式存储方式，既可以保证成像效率，也能为后期处理留出空间。面对复杂的水流状况，团队会实时监测流速。当流速较小时，可以适当增加测线间隔，提高作业效率；当流速较大时，减小间隔来保证数据完整。同时通过多相机同步拍摄和定位监控，可以保证拍摄轨迹精确且能控制。

三维重建的主要环节包括数据的预处理和图像配准。在项目初期，因为长基线定位系统调试，环形地带航线发生偏移，数据有残缺，而且海底特征点比较少，这大大增加了图像拼

推动了中国完成农业化进程，形成文明发展的基本版图。区域文明中产生各具特色的专门手工业经济，通过对特殊资源技术的控制实现对权贵产品的集中生产和消费，从而体现社会分化和社会权力不同的生业经济策略，建构了史前社会复杂化进程区域性发展的底层逻辑。但不同生业模式都是以走向超稳定、抗风险的生业结构为目标。

在古国时代第二阶段以后，各主要史前文化区之间的交流日益密切和深入，彼此吸收各自的长处，这是各地区文明化进程加速的重要原因。从初级农、畜或渔猎产品到手工业产品消费的历史性发展，体现出获得跨区域社会资源的能力不断增强。

在古国时代第三阶段和王朝时代，对新兴物种、贵重资源、新兴技术的控制和本土化发展和权贵手工业经济产品的跨区域流通，更是文明化进程从区域走向广域的关键。陶器、二里头等重要都邑遗址中，出现了果实类经济作物，这与同时出现的牛羊类次级消费品如奶制品、毛织品等相对应，显示出中国早期文明发展进程中不同于西方文明的“二次产业革命”。以石峁遗址群为核心的北方长城地带，是以作物经济为基础的农业文明的一种区域性发展模式，在农业结构上仍以粟作为主，黍的比例略高，但并未出现小麦这样的外来品种。另一方面，从动物和食性研究看，当地畜牧业的发展仅初现端倪，完全没有成为这一地区主要经济成分。普通人群间殉人之间不存在饮食结构的差别，这反映了当时社会分化差异的表现形式不同。

至王朝时代，形成了以洛阳盆地二里头遗址为中心的政治经济发展格局，二里头成为跨区域资源技术的融汇中心，基于原有资源技术产生新的玉器、绿松石等手工业经济和权贵产品。对金

溯源金属物料产地，可复原中国先秦时期资源开发的 历史图景与文化互动关系，揭示早期国家形成、区域文化互动的历程，是中华文明探源研究的核心议题之一。然而，当前研究的理论基础尚不完善，溯源方法体系尚未系统构建，数据的集成度与可共享性较低，部分学术观点科学支撑较少，难以完整揭示中华文明起源发展全貌。由北京大学、北京科技大学、中国科学技术大学等10家单位承担的国家重点研发计划项目“中国古代金属物料产地溯源方法研究”（2022YFF0903700）围绕金属物料产地特征指标体系、金属遗存全生命周期中的溯源指标变化规律等关键科学问题开展研究，通过冶金过程模拟实验、微量元素分配行为计算等，建立溯源指标的定量变化模型和基于贝叶斯理论的混合金属物料端元解析方法；融合地质、考古数据建立溯源数据库；综合金属器物风格分布及溯源指标特征信息，构建中国古代金属物料产地溯源方法体系，并开展应用示范，取得多项原创成果。

构建铜物料溯源指标传递模型。研究构建了铜物料溯源指标传递模型，从古代冶金过程微量元素迁移与分配规律角度，阐明各类微量元素在铜冶金工艺流程中的赋存特征，明确了不同元素作为铜物料溯源判别指标的应用潜力。研究表明，银、铋、锑、砷等元素在金属铜中显著富集，可作为核心溯源指标；镉元素分配系数趋近于1，对冶炼氧化气氛变化敏感程度较低，在渣量较小的情况下，具备良好的矿源溯源指示价值；钴元素表现出极强的渣渣特性，不宜单独作为溯源指标。本研究还优化了基于激光剥蚀电感耦合等离子质谱技术的铜合金微量元素原位分析方法，有效提升了铜物料微量元素检测数据的精准度与可靠性，为溯源研究提供了技术保障。

阐明次级冶金过程对溯源指标的影响机制。系统揭示了次级冶金生产环节对铜物料溯源指标的扰动机制与演化规律。合金化之前的生产活动产生的纯铜遗存不受铅、锡等合金物料的影响，其地球化学特征保持了原始铜物料指纹信息。合金化之后的生产遗存，其原始铅同位素特征被外源铅组分覆盖，微量元素组成也发生显著变异，大幅改变了原始物料溯源标识。针对合金化之前的纯铜遗存，开发了基于光纤反射光谱分析和SaVaDe深度学习模型的筛选方法，可从铸铜作坊的海量微遗物中快速识别冶金遗存。开发了基于遗存铅含量的贝叶斯后验概率计算方法，建立将铅含量为250ppm作为纯铜遗存的科学判别标准。针对合金化之后产生的青铜合金，考察了铅、锡等合金物料向青铜中引入的微量元素类型，构建了基于微量元素进行青铜合金铜物料溯源的操作流程。

建立中国古代铜物料溯源方法体系。分别针对铜矿石遗存、纯铜遗存和青铜制品，规范了铜物料溯源的指标体系和适用范围，建立了铜物料溯源研究的方法流程。铜矿石遗存的可用溯源指标丰富、干扰因素少，溯源精准度最优。铸铜作坊出土的纯铜遗存未受后期合金工艺污染，能够真实反映作坊原料来源，但该类遗存多以微遗物形态存在，需依托高通量智能表征技术完成精准筛选识别。在铸铜作坊以外的下游消费端，需要依靠青铜制品的微量元素组成讨论其铜物料的来源。为获得可靠的微量元素溯源指标组合，首先通过理论计算和冶金模拟实验，筛选可用于溯源研究的微量元素类型。其次通过计算青铜器群与铜物料端元的马氏距离，结合贝叶斯分层异方差样条回归，考察铜物料端元对于各青铜器群物料贡献度的历时性变化趋势。该研究通过多个案例的实证研究，验证了该方法体系的有效性。

初步完成锡金属物料溯源方法，并构建了商周时期金属资源流通网络。针对古代锡料难以直接溯源的困境，系统整合铅锡同位素比值和锡石U-Pb定年分析方法，初步建立古代锡金属物料溯源方法体系，系统揭示了商周时期锡料来源的动态演变规律，并厘清其与早期国家资源调控、管理机制的内在联系。商代锡料资源网络的兴起与转变，实证“金道锡行”资源网络可能早至商中期已具雏形，大兴安岭地区锡资源的开发与利用，已纳入殷墟时期的青铜产业体系。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。长江中下游地区能够结合鄂东赣北所产铜料与湘南所产锡料，资源禀赋和流通优势突出，可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。总之，商代锡料资源的开发与利用与商文化的四方进退历程高度相关；商周时期锡料资源网络的形成、发展与动态变迁，集中反映了青铜时代早期国家对矿产资源的调配管控能力与资源治理水平。

发现高放射性成因铅的时空分布规律。项目组寻找到了高放射性成因铅的时空分布规律，根据对商时期中原与周边地区铅料资源的演变情况的初步梳理，发现商文化核心区、边缘区、外围区在高放射性成因铅资源的使用和变迁上基本保持同音共律的现象，暗示这一特殊资源有着共同来源。简单的中心—边缘模型无法解释商与远方青铜文明之间的复杂互动，似乎不存在一个仅受商文化核心区单一影响的模型。同时发现与之共存的普通铅的变化规律和高放射性成因铅的变化规律基本一致，这一点为今后通过普通铅作为线索寻找高放射性成因铅的矿源指明了方向。

构建混熔金属物料产源特征的解混方法和铝金属物料溯源方法体系。引入流形学习（UMAP）和贝叶斯建模方法，对已经发表的两周时期青铜器的铅同位素比值进行了解混处理。使用UMAP和层次聚类分析（HCA）方法对已经发表的中国主要矿山的铅同位素比值数据进行降维聚类处理，最终发现在两周时期至少有5种矿源被利用，每种矿源在不同时期被利用的情况并不相同。具体而言，通过开发一种创新的方法来分析青铜文物的铅同位素数据以解决混熔问题。通过结合UMAP和贝叶斯混合模型，定量重建了潜在金属端元对于古代青铜器的溯源贡献。该方法用于解析两周时期复杂的金属物料流通体系，揭示了中国华北、华中和华南等地金属资源利用的历时性变化。中国北方地区的金属资源主要用于西周早期，此后，长江流域和秦岭地区逐渐成为周人的主要金属来源地。春秋中期见证了这两类金属资源的重大转变。同时，整个两周时期都在开发利用华南地区的金属资源，这些资源可能与南岭地区的多金属矿床有关。这项研究揭示了中国两周时期金属资源开发和利用的不同模式，也展示了这种新方法在解决其他古代文明金属混合历史问题方面的巨大潜力。

建立中国古代金属物料产地溯源数据库（CHINALID）。该数据库以中国古代金属遗物和现代地质矿物的铅同位素数据为核心，整合先秦时期铜铅金属物料溯源数据5447条、中国地质矿物溯源数据5337条、微量元素等溯源指标数据1356条，总量超1.2万条。数据库实现数据标准化录入、筛选、分组、绘图及可视化功能，涵盖国内外已发表的上万条相关分析数据，为相关研究提供了可靠的数据共享平台。

完成重要遗址的金属物料溯源应用示范。通过殷墟、三星堆等6处遗址出土青铜器物料产地研究的应用示范，构建起融合考古学观察与现代科技分析的夏商周时期金属物料产地溯源方法体系。该体系先通过对青铜器形制、纹饰、铭文及铸造工艺痕迹的细致分析，推断其文化属性与生产背景；再结合铅同位素比值、微量元素分析等科技手段，获取物料来源的“地质指纹”信息；最终通过考古学背景与科技数据的双向印证，构建从矿石开采、资源流通到器物铸造的完整证据链，为探讨早期国家资源控制与社会复杂化进程提供了系统的方法论。

以上项目成果为揭示中国古代金属资源流通网络、阐释早期文明形成与发展机制提供了关键科技支撑，推动了科技考古领域的技术创新与学科交叉。

（作者单位：北京大学考古文博学院）

金道锡行：中国古代金属物料产地溯源研究新进展

陈建立

（上接5版）

中原和北方地区的社会后来居上，冶金术出现、暴力和战争成为社会冲突的常态，“金字塔”型的社会分层结构出现在不同地区、北方地区面貌共性强烈文明发展走出了自身独特的道路，是这一时期的四个突出特点。

黄牛、绵羊等外来资源成为北方和中原地区重要的新兴生业资源，饲养模式日趋本土化，消费以肉食为主，并发展了与之相关的骨器专门化手工业和祭祀仪式活动。跨区域互动成为这一阶段的时代特点，以玉器为代表的权贵产品体现出之前从未有过的流动性和普遍价值，玉器纹饰在陶礼器、石雕等不同资源技术体系中的转用成为共同信仰观念的基础。

进入距今3800年后，中华文明进入了王朝时代。二里头遗址都城内部存在多个方正、规模的街区网格，在遗址核心区以北的古城村发现了外围规模宏大结构复杂的墙壕体系，这是二里头考古的重大突破。严格、清晰、规整的规划布局，显示当时的社会功能、结构区分明显、等级有序，统治格局秩序井然，暗示成熟发达的统治模式，这是二里头进入王朝国家的最重要标志。

第四，对中华文明起源与早期发展关键阶段中的农业和手工业发展状况、经济和资源所发挥的作用得了新认识。

项目组认为，自距今7000年以来，生业经济反映出明显的区域差异，并在文明化进程中有不同的演进模式。不同地缘环境下的生业经济形态千差万别，在此基础上生发而出的文化体样态更为复杂。

在古国时代的第一、第二阶段，各区域逐步形成稳定的生业经济模式，粟黍和稻作传播

接的难度。针对这种情况，团队先对原始影像做了降噪、去模糊等清洁处理，通过图像软件进行照片配准。选取沉船边角、瓷器堆积这些稳定性好、辨识度高的特征作为控制点，保证每一张影像都能精确匹配。如果自动配准不起作用，就用手动添加控制点的方法，保证遗址各区域的数据衔接完整。配准完成后就进入点云处理环节，依次进行点云配准、噪声滤除、区域划分和模型建立。根据船板、舱舵、横梁、瓷器堆积、海底沉积物等类别，对点云数据进行归类，实现不同考古元素的单独建模。

深海存在高压环境、水体折射等要素，这些要素会造成相机成像出现畸变，直接影响模型精度，所以进行畸变矫正是很必要的。项目使用了4根1米的标准标定尺，从多个视角拍摄标定影像，通过专业算法解算出相机内部参数和畸变系数，然后把矫正参数批量应用到所有原始影像上，达到几何校正与平面投影转换的目的。完成矫正工作后，团队整合了多款软件，增添比例约束、清理数据，小幅度调整模型参数。并根据遗址的不同特性，灵活选取多种软件建模方式。对于船体残骸、流线型结构、瓷器堆积等复杂立体结构，分别采用多边形网格、流线型结构、曲面拟合、体素化等多种方法，实现多技术融合建模。通过纹理映射、色彩校准、网格优化等方式，提高模型视觉逼真度，结合声呐底图拼接算法、实地拍摄影像进行精度核查，消除几何差错，从而建立出细节多元、数据精确的一体化三维场景模型。面对海量数据的运算压力，该项目形成计算机集群模式，整合众多设备的计算资源，通过集群计算明显缩短了处理时间，同时保证了建模的精度和作业的效率。

摄影测量技术应用项目取得了丰富的实物成果、技术成果和经验成果。在数据采集方面，整个考古调查期间累计进行了23次摄影摄像潜次操作，平均每潜次下潜时长为7~8小时。一号沉船遗迹收集到了76758张有效数据照片，二号沉船遗迹收集到了2989张有效数据照片。这些大量的高清影像为遗迹的数字化保存和学术研究提供了完善的原始资料。同时，还推动声呐图自动拼接算法不断优化，形成了标准化、可以复制的深海影像采集与拼接作业流程，积累了载人潜器结合摄影测量开展深海考古的整套实际操作经验。在技术规范方面，项目小组根据多阶段实地作业的技术经验，编制的《基于载人潜水器的深海摄影拼接操作规范》从1.0版本更新到了4.0版本。

深海考古的摄影测量技术应用全程使用非接触式操作，不触、不干扰遗址和文物，高精度的三维模型能清晰地显示沉船构造、文物分布和海底地貌，支持多视角观测和精确测量，能仔细挖掘遗址的历史信息，完全符合《水下考古工作规程（2023年）》的保护规定，最大程度保护水下文化遗产的完整性。海洋科学与深海考古的交融与技术改革，意味着我国水下考古正式从浅海走向深远海，实现考古学、测绘学、计算机图形学、海洋工程等多学科的结合，形成具有中国特色的深海考古技术模式。深海考古摄影测量技术的应用拓宽了成果运用场景，三维数字化模型不仅能用于明代航海史、贸易史等学术研究，还能应用于文物修复模拟、虚拟数字展览、原址保护方案推演等工作，发挥更大的社会价值。

在南海西北陆坡沉船遗址进行的摄影测量技术应用实践，是科技助力文物考古的典型例子。这套完整的深海摄影测量技术实例，既解决了千米级深海考古探查的实际问题，又为之后的深远海考古工作打开了新途径。

（作者单位：国家文物局考古研究中心）

属资源和冶金技术的利用和本土化发展是中国文明化进程从多元走向一体的最高体现。

从经济角度看，稳定的农业生产经济是中国文明起源进程中的共同基础，文化样态也由多样逐步走向王朝阶段辐射万邦的渐近统一，这也是今天统一多民族国家版图、认同得以形成的史前基础。社会分化在中国文明起源进程中并非以日常获取生计资源的能力差异来体现，而是经由对权贵手工业产品的占有和消费，对特殊资源、技术的控制来实现。

第五，归纳出符合中国历史情况的文明形成的特征和文明起源的“中国方案”。

“多元一体”的区域文明最终走向超稳定农业基础之上的生业结构；“兼收并蓄”的“本土化”能力使生业经济稳步发展；“延绵不绝”的共同经济、信仰和社会发展追求，使不同区域文明的知识与技术财富能为其他文明体所传承；“自成一体”的中华文明，在意识形态和社会组织结构上造就了独特的宇宙观、淡化了神权和狭隘民族敌防，摒弃了西方民族国家越分越细的文明演进方式，国家范围如滚雪球般滚越大，这与其他原生古文明并不相同，构成了区别于其他文明的独特系统，在“多元”的地缘和文化体中形成并强化了“一统”的逻辑认知，走上了有中国特色的文明化道路。这样的中华文明，奠定了东方的世界体系，也是东方之所以是东方的最早的历史原因。

自2001年中华文明探源工程预研究立项以来，项目取得了巨大的成绩，为中外学者所认可。但也面临着不同学术观点的挑战甚至国外学者的质疑，也存在时间、空间上的研究空白和相关问题的细化研究。这都需要中国学者正本清源，在下一阶段进行扎实、长期地研究。

（执笔：常怀颖）