



中国科学院大学
University of Chinese Academy of Sciences

南海 I 号沉船铅珠的制作与产地研究： 基于中子成像与多技术分析



汇报人：罗武干 xiahua@ucas.ac.cn

陈典，李乃胜，李超，张基昊，武梅梅，王天韵，贺林峰

中国科学院大学人文学院考古学与人类学系

第九届CSNS反角白光中子源用户研讨会

目录

CONTENTS

01

问题引入

02

科学表征

03

工艺探讨

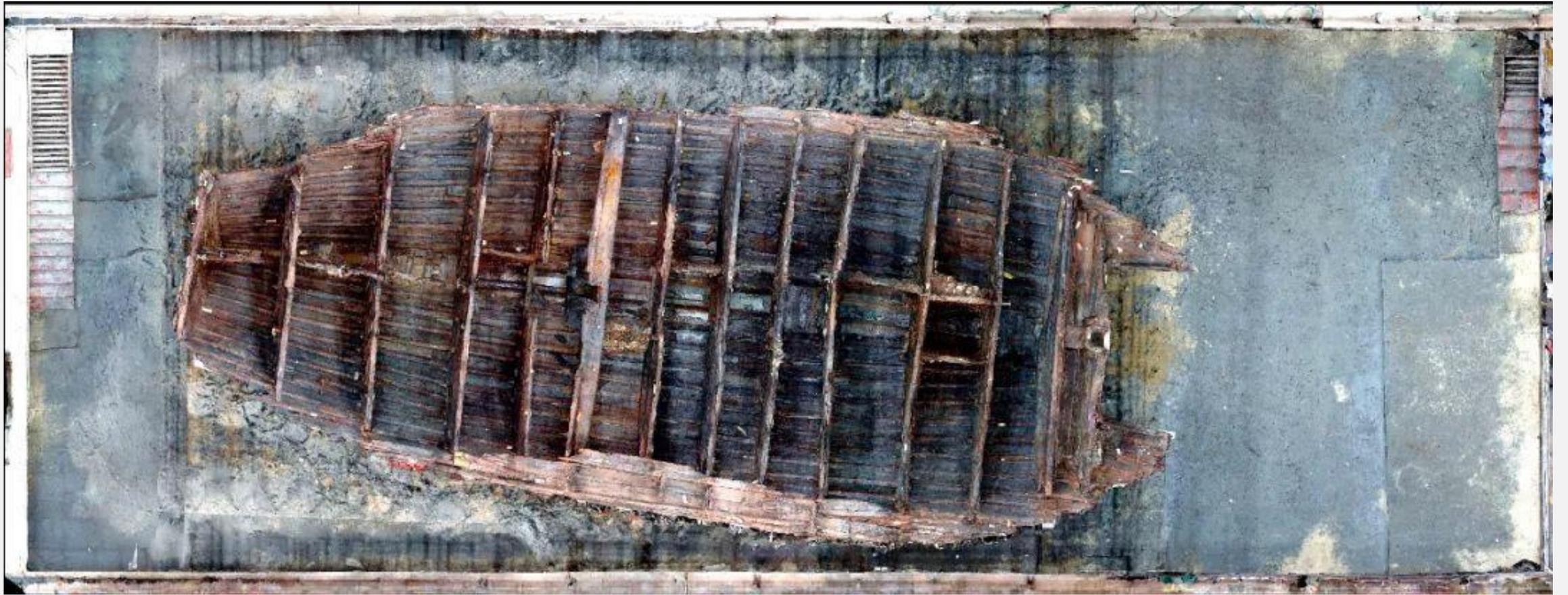
04

产地研究

05

结论展望

“南海I号”沉船



南海I号沉船于1987年发现，自2000年代初起开展发掘，是中国最重要的水下考古发现之一。该船位于广东省阳江市海域，年代可追溯至南宋时期，据信是在古代海上丝绸之路的商业航行途中沉没。作为目前中国海域出水保存最完整的南宋远洋商船，南海I号共出土约20万件文物，种类丰富，包括瓷器、漆器、竹木器、金属器、玉器和石器等。许多器物之所以保存状况极佳，主要得益于其长期埋藏于深海沉积物中。

出水金属珠饰

- 船体中部区域出土了大量金属珠饰。
- 简报记载：“在T0301北部舱室的一件破损陶罐中，发现了一团黑色为主的小锡珠。单颗珠子的直径在0.21至0.72厘米之间，重量为0.004至0.673克不等。另发现有少量红色和黄色珠子，其材质尚待确认”。
- 考古简报中所谓的“小锡珠”多数实为铅基合金珠，而非纯锡制品。



小型铅珠

- 在这些珠饰中，数量最多的是小型、扁平、圆形的珠子。它们的直径通常在**1至3毫米**之间，广泛散布于船体上层甲板表面，也嵌藏在货舱的淤泥层中。这类珠子常与玻璃珠混杂出土，进一步支持其作为装饰品使用的可能性。
- 尽管体积微小，这类珠子的孔径与整体尺寸却高度一致，显示出相当成熟的铸造工艺与技术控制力。此外，其数量庞大，以至于无法逐一计数，最终采用总重进行估算，重量达18544克。



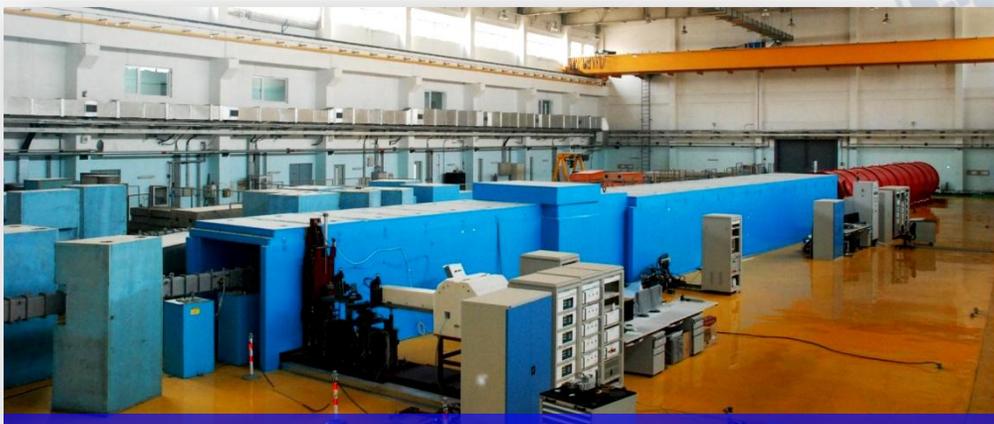
研究技术

- 中子成像： 制作工艺
- Raman : 腐蚀产物
- XRF: 元素分析
- SEM-EDS: 成分表征
- LA-ICP-MS: 同位素特征

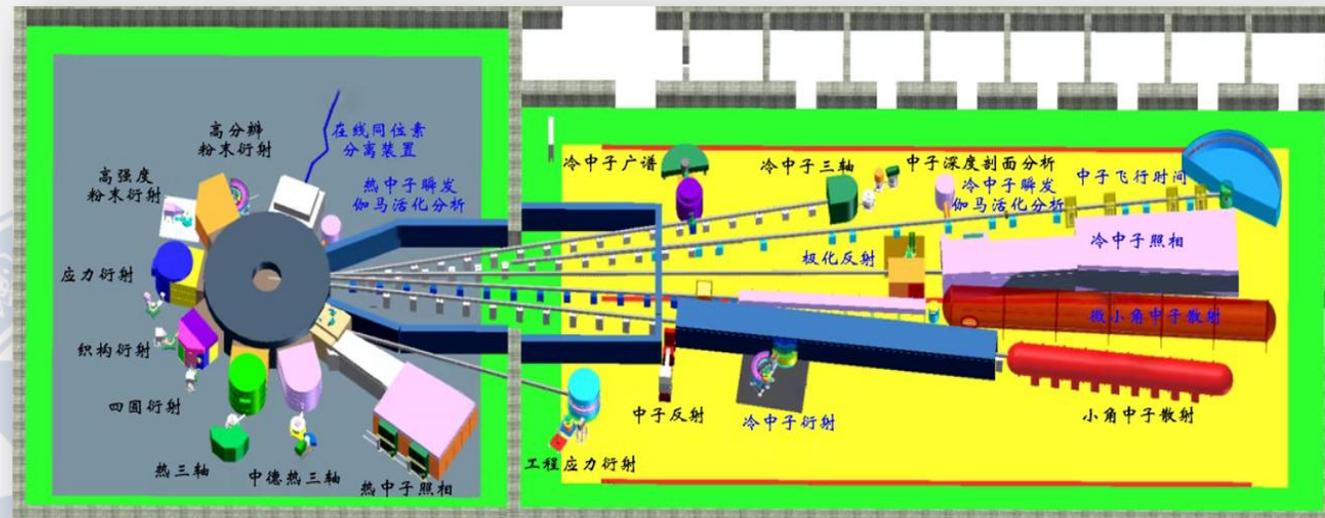
CARR中子科学平台



物理大厅



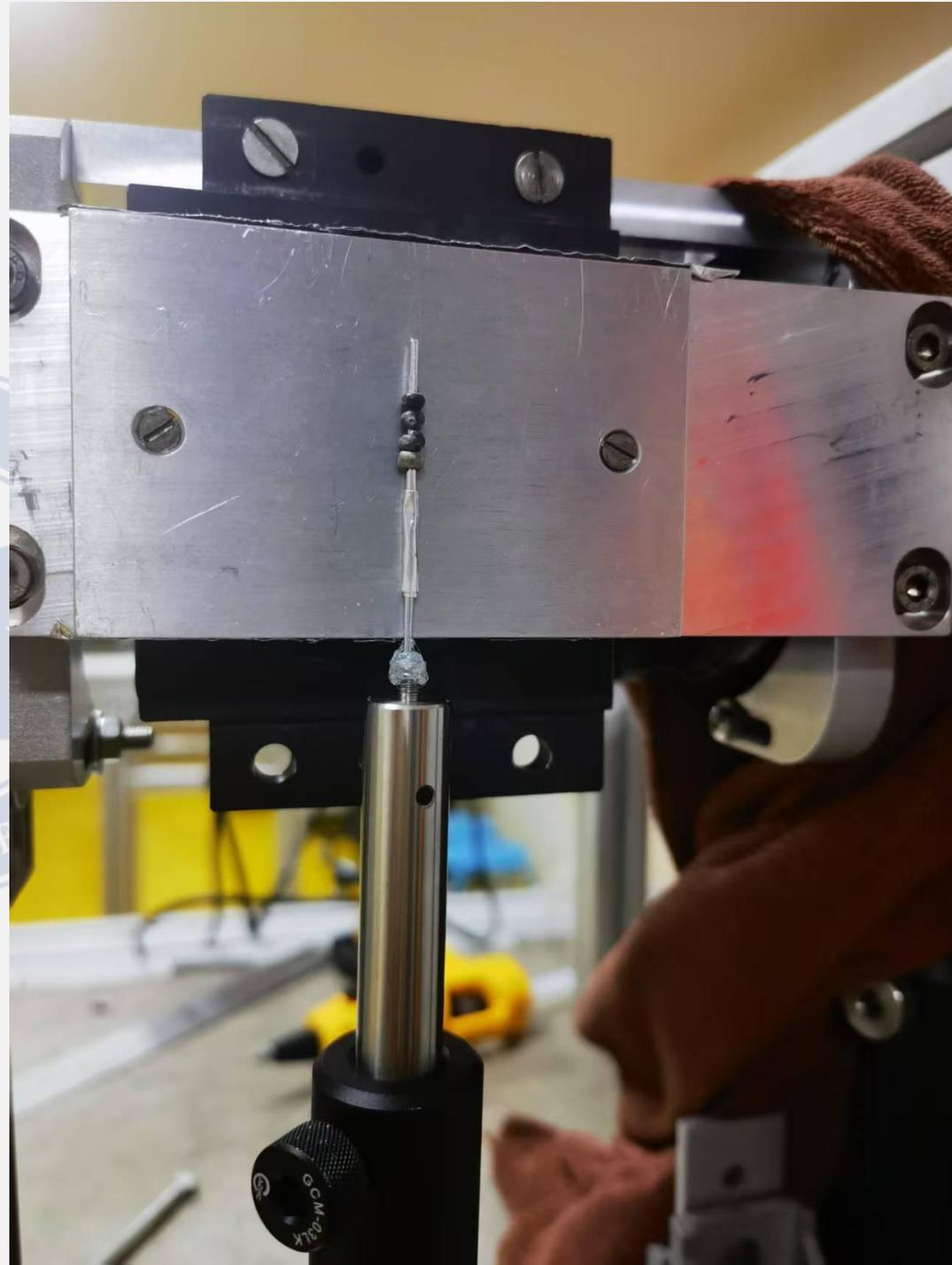
导管大厅



目前已建成中子谱仪**18台**，主要设备达到**整体国际先进、部分指标领先**的水平，可开展中子散射、中子成像和中子活化分析等研究工作，涵盖了**微观、介观到宏观**尺度结构研究。

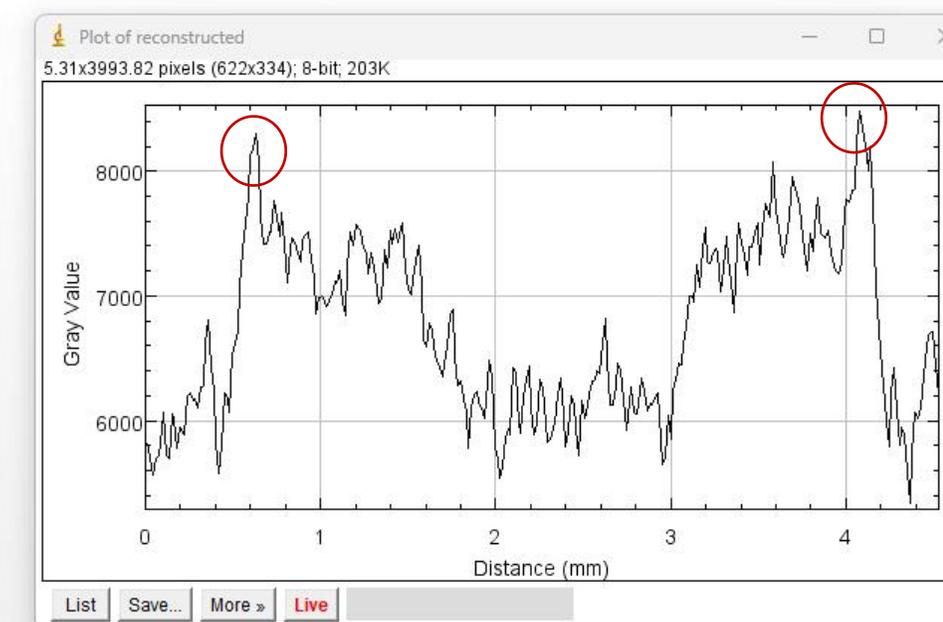
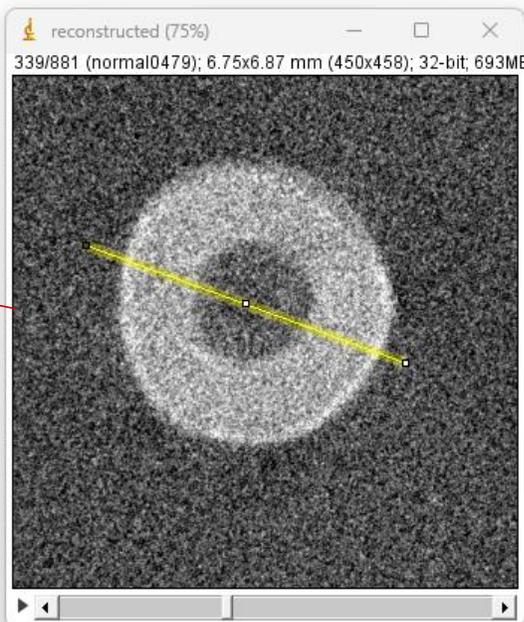
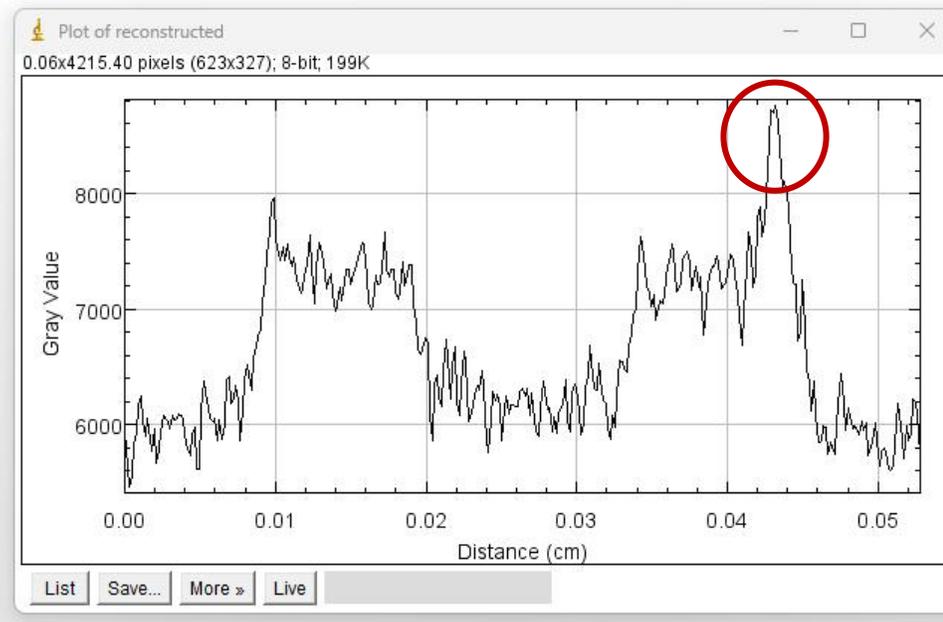
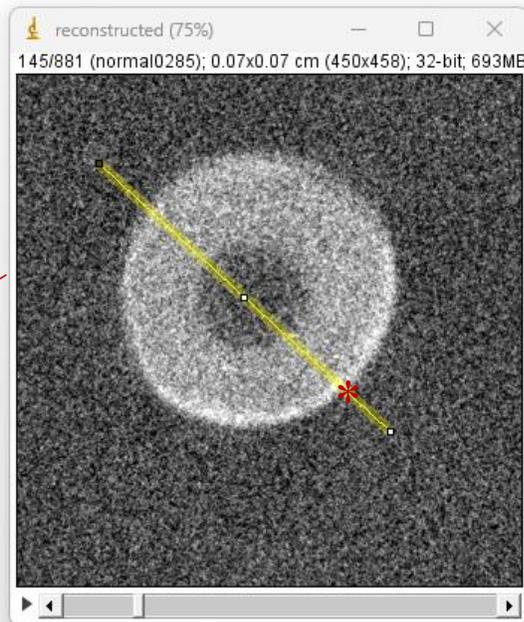
中子成像

- 三维中子成像实验利用冷中子成像测试装置开展测试，共记录了570个不同角度的透射投影图，**每张图像拍摄时间为30 s，空间分辨率约为50 μm 。**
- 实验过程中，同时获取明场图像（即中子束流中没有样品条件下的测量图像）和暗场图像（即关闭中子束流条件下的测量图像）用于图像的归一化校正。
- 使用ImageJ图像处理软件对所获取的中子成像图像进行归一化处理，可以去除中子束流/探测器响应不均匀等对实验结果的干扰。采用滤波反投影算法对归一化校正后的图像进行三维重建。



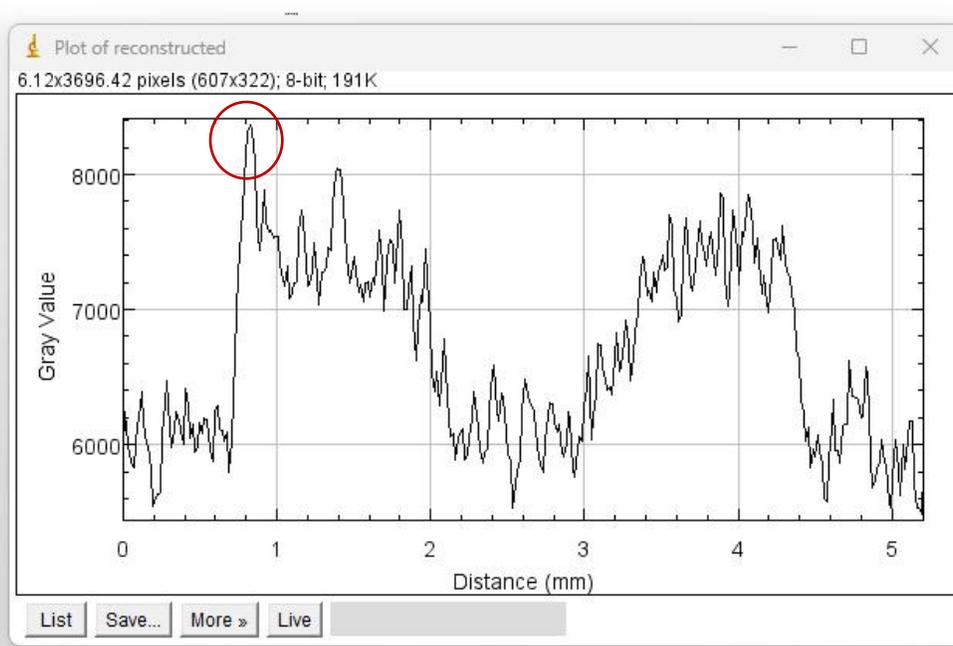
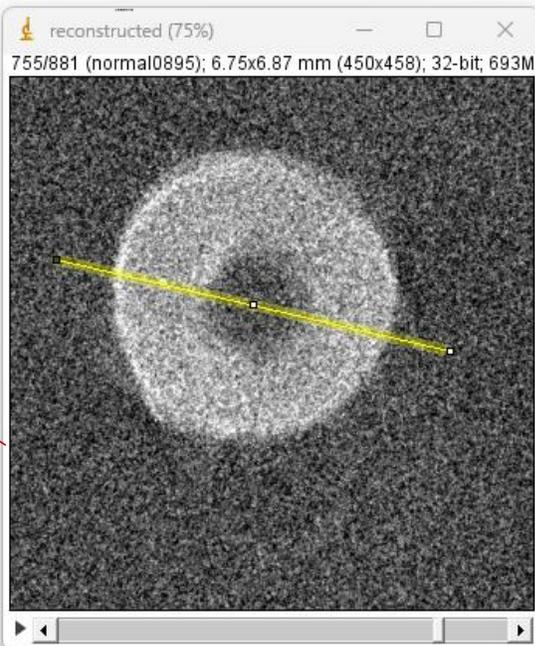
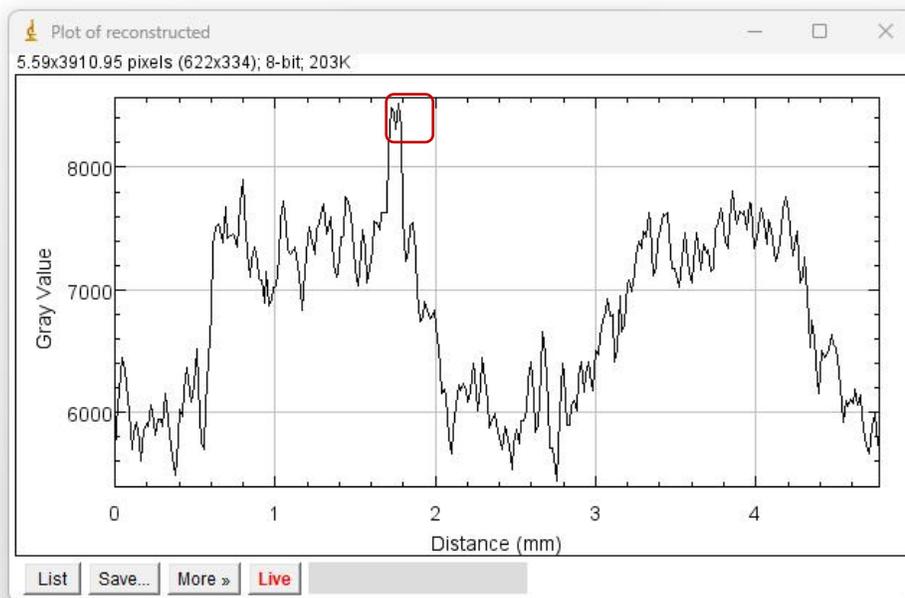
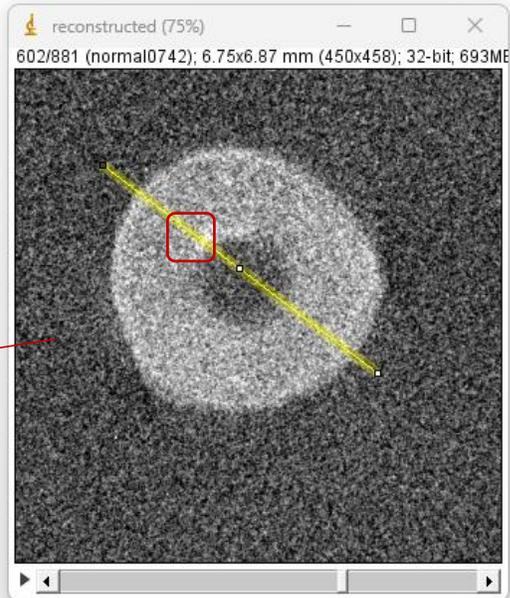
成像结果

铅珠不同区域的灰度值存在差异。较亮的区域表明存在有机物质（如碳、氢、氧）或其他具有较强中子衰减能力的成分。



成像结果

右侧图像显示了左图黄色线段（位置0位于左上角）上的灰度值分布。珠体内部的灰度值较为均匀，表明其内部成分较为均质；而表面某些区域灰度值升高，对应样品表面观测到的白色物质，提示表面覆盖物分布不均，局部堆积。如表面仅由铅或锡组成，在中子成像中不会呈现亮区，表明这些区域可能含腐蚀产物或其他中子衰减较强的化合物。



简单测量

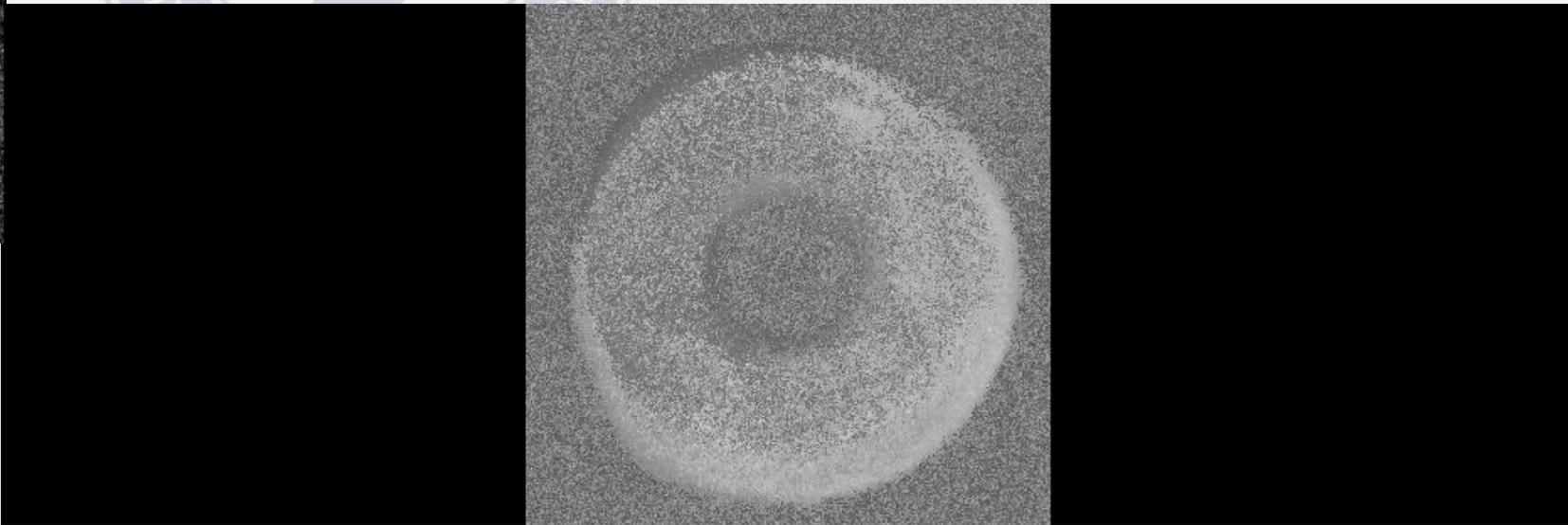
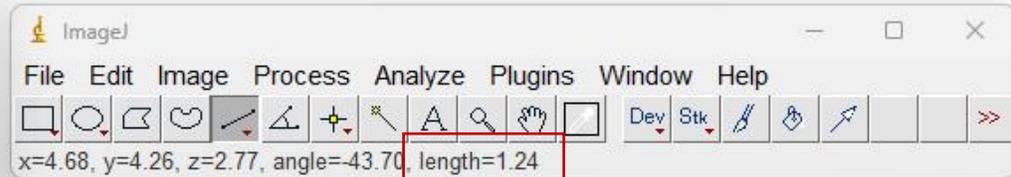
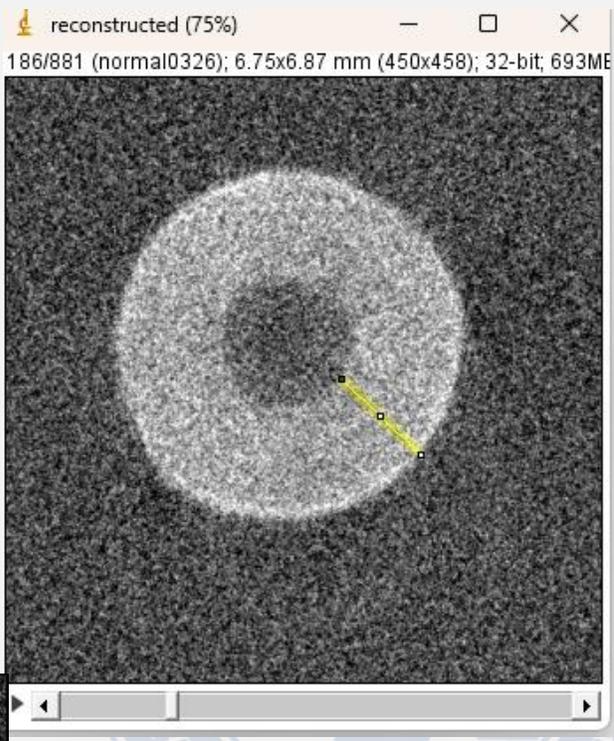
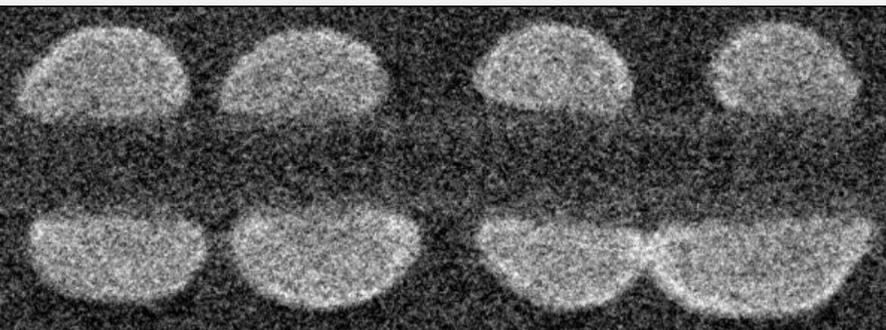
铅珠直径约3.8mm左右，

大小不等；

壁厚约1.24mm

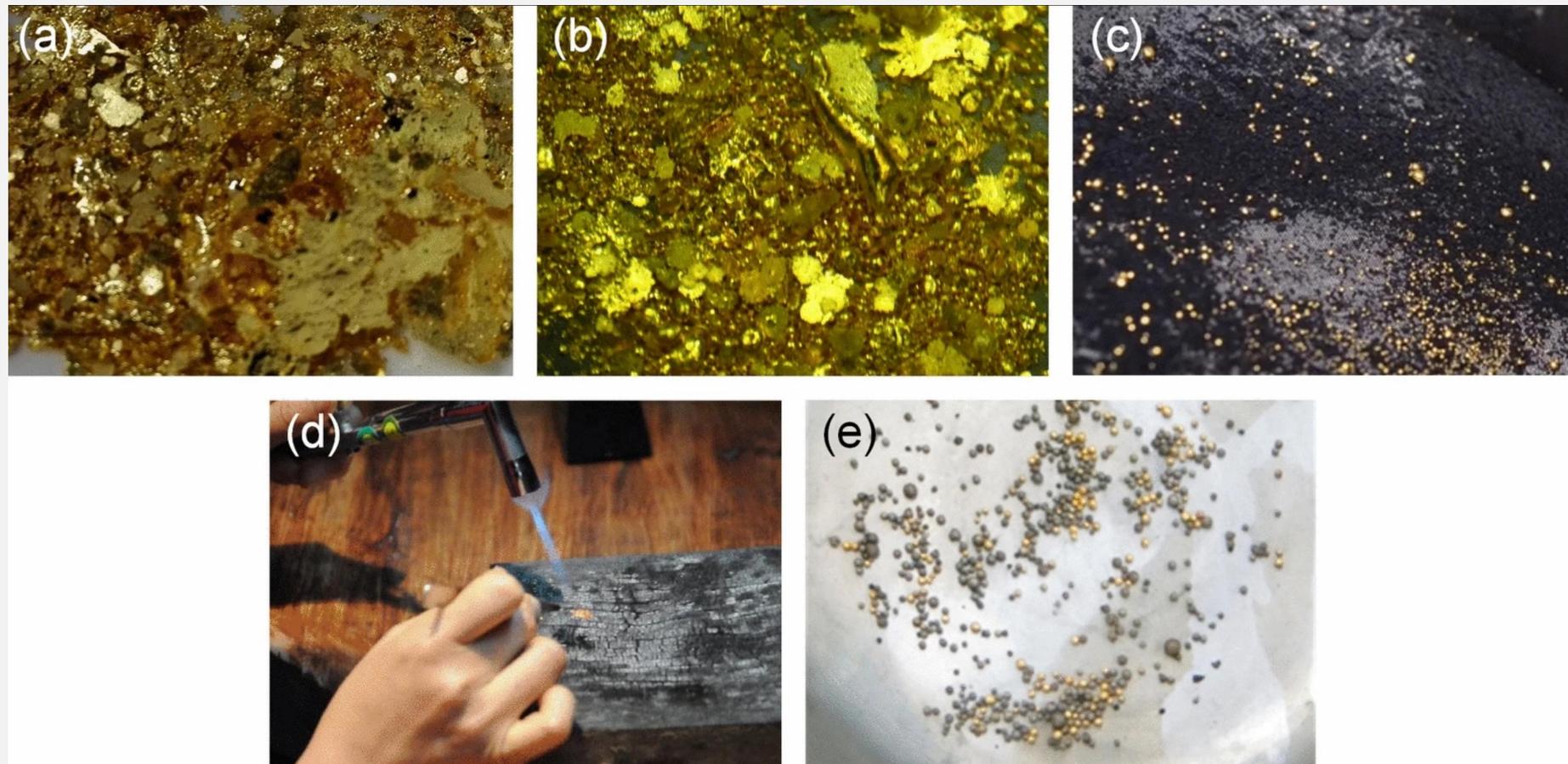
孔径1.3-1.5mm

白色层厚约0.1mm



工艺推测

- ✓ 铅珠内部未发现铸造孔隙、流线、分层结构或穿孔痕迹，显示制造过程控制较好。
- ✓ 鉴于壁厚调控及穿孔一致性难以通过浇注调节，直接将熔融金属滴入水中形成穿孔的“滴铸法”可能性较低。
- ✓ 南海I号铅珠形态稳定、结构规整，反映出作坊化生产的技术标准化水平，非家庭手工所能及，体现了成熟的工匠传统，面向贸易及船载交换的大规模制造。



炸珠工艺（滴铸）

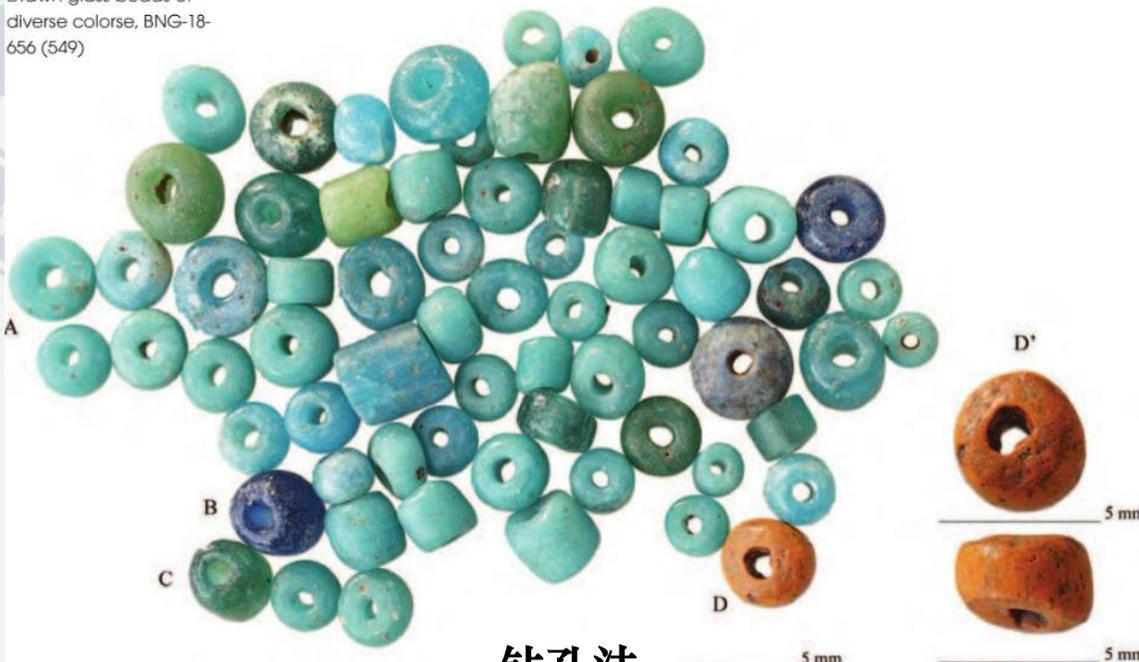
工艺推测

- 可借鉴古代玻璃珠的制作工艺类比。玻璃珠常见穿孔技术包括：
 - **棒芯绕制法**：熔融玻璃绕在涂覆耐火材料的金属棒芯上，冷却后拔除棒芯，留下居中且光滑的穿孔，偶见核心残留或绕制痕迹。
 - **钻孔法**：先成型珠体（手工或模压），后用硬石或金属钻孔，常致孔位偏心、不规则，伴随螺旋钻痕或入口处缺口。
 - **模具内置芯法**：铸模内置细芯（植物茎或金属丝），熔融材料围绕芯体，凝固后机械拔除或自然腐烂，形成穿孔，孔径较均匀，可能留有轻微变形或碳化痕迹。



棒芯绕制法

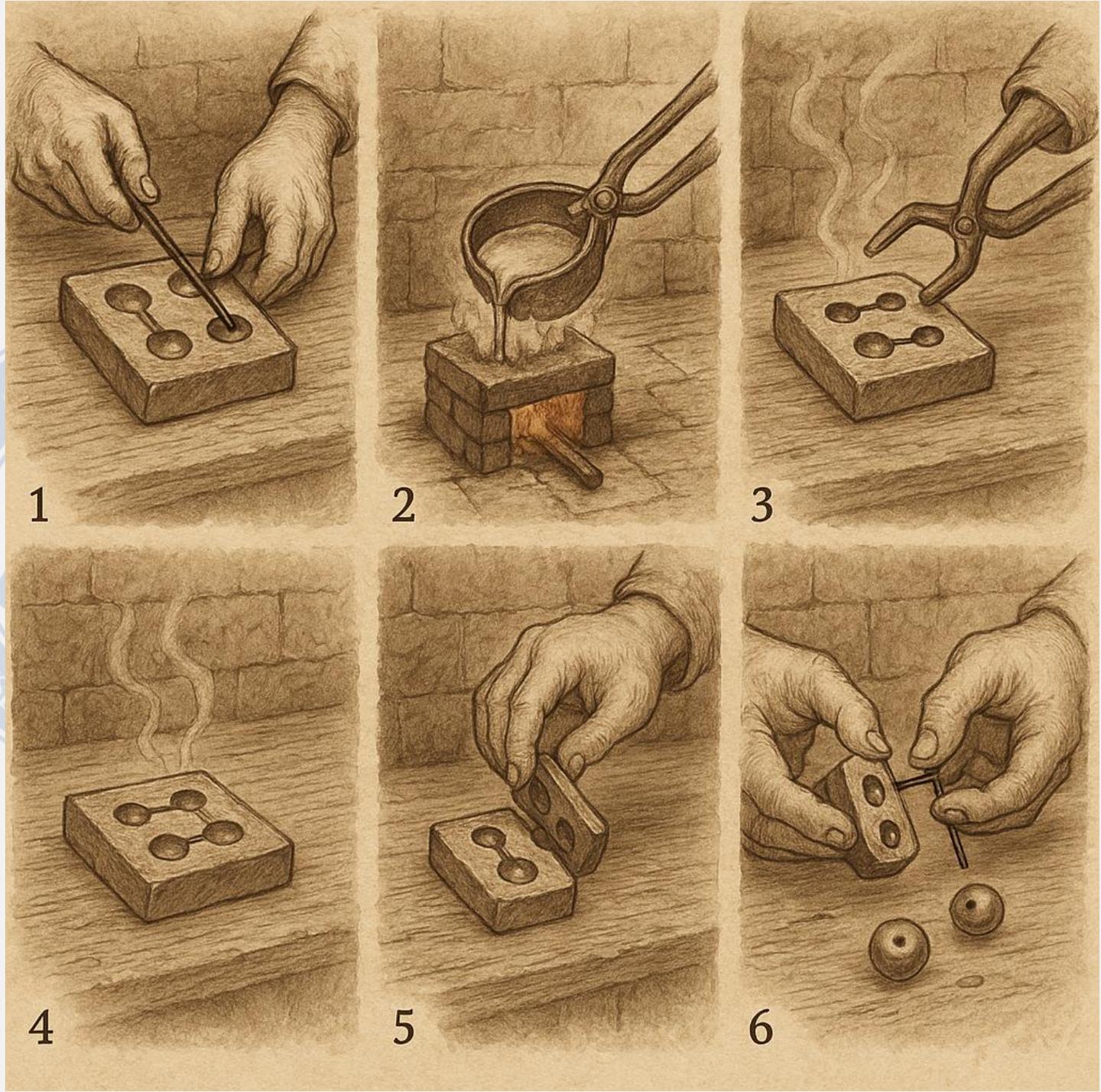
Fig. 10 (A-D)
Drawn glass beads of diverse colors, BNG-18-656 (549)



钻孔法

工艺推测

- ▶ 南海I号铅锡合金珠的小尺寸、穿孔一致且孔壁平滑对称，强烈排除铸后机械钻孔可能性。铅合金质软易变形、易堵钻孔的物理特性亦支持此观点。相反，证据指向穿孔与珠体铸造同步完成。
- ▶ 熔融铅及铅锡合金于熔点附近的动态粘度约为 $1.2\text{--}2.5\text{ mPa}\cdot\text{s}$ ，接近甚至低于室温下水的粘度；而典型钠钙玻璃熔体在工作温度下的粘度介于 $10^2\text{--}10^4\text{ Pa}\cdot\text{s}$ 。这一巨大差异解释了为何铅合金适合用内置芯精密铸造成形穿孔珠，而玻璃珠则多采用绕制或拉制等工艺。铅合金的优良流动性有助于精确控制微小空心形态，适合工坊标准化批量生产。
- ▶ 具体而言，珠子极可能铸造于内置有细长金属或有机针芯的模具中，凝固后拔除芯体，形成干净且居中的孔道。这与珠体内部无流线、缩孔及无二次加工痕迹相符。

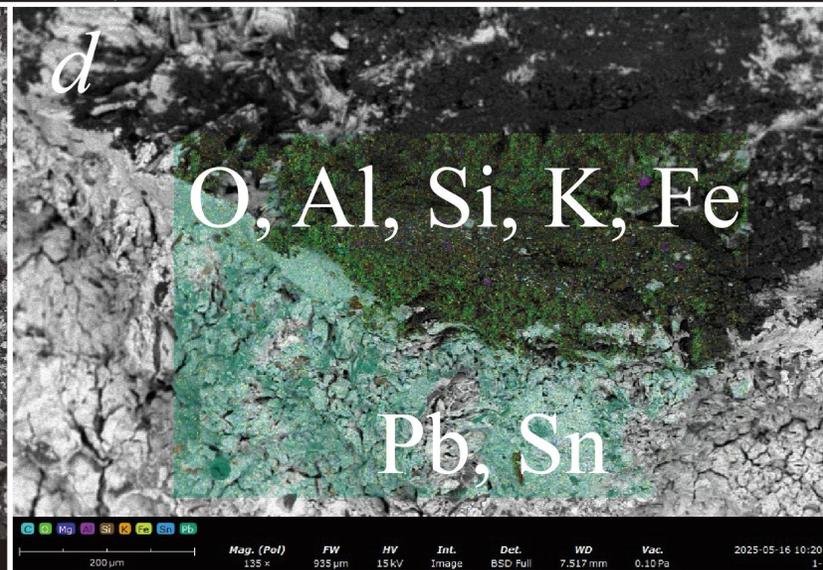
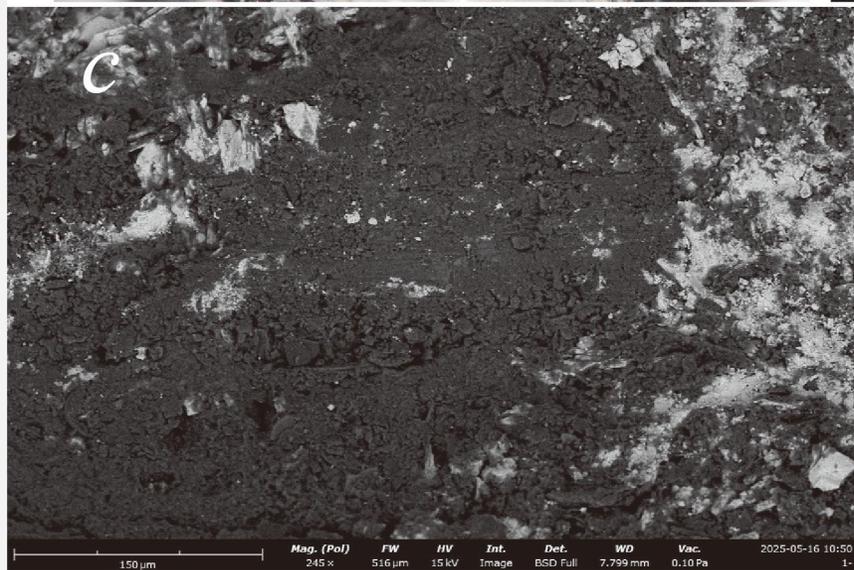
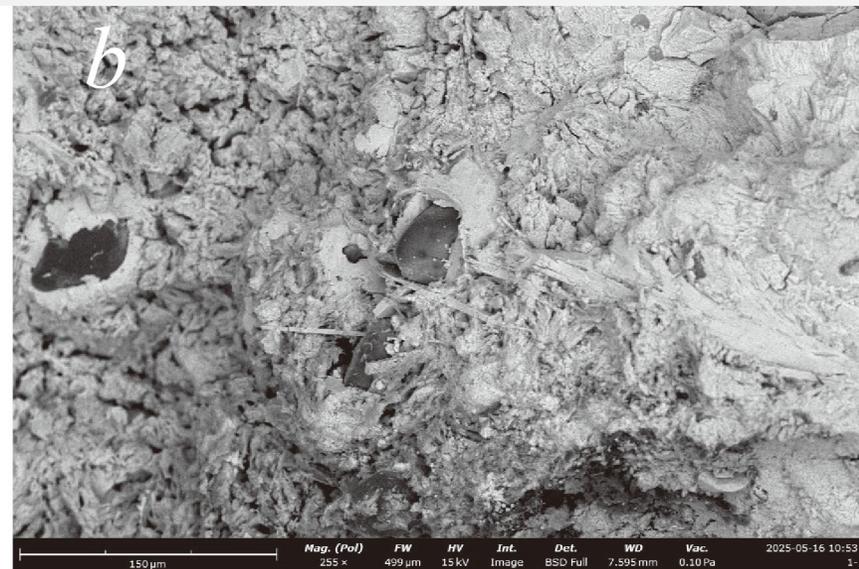


合金配比

| Lab No. | Cu(wt%) | Sn (wt%) | Pb (wt%) | Fe(wt%) |
|---------|---------|-----------------|-----------------|---------|
| NHLB1 | 0.14 | 6.10 | 92.53 | 1.24 |
| NHLB2 | 0.20 | 8.18 | 91.28 | 0.34 |
| NHLB3 | 0.09 | 5.61 | 93.10 | 1.20 |
| NHLB4 | 0.13 | 4.48 | 95.21 | 0.18 |
| NHLB5 | 0.11 | 3.69 | 96.01 | 0.18 |
| NHLB6 | 0.07 | 6.31 | 93.40 | 0.22 |
| NHLB7 | 0.08 | 3.95 | 95.13 | 0.84 |
| NHLB8 | 0.02 | 3.83 | 95.80 | 0.35 |
| NHLB9 | 0.07 | 3.30 | 95.98 | 0.65 |
| NHLB10 | 0.11 | 4.20 | 95.54 | 0.15 |
| NHLB11 | 0.07 | 3.64 | 95.83 | 0.46 |

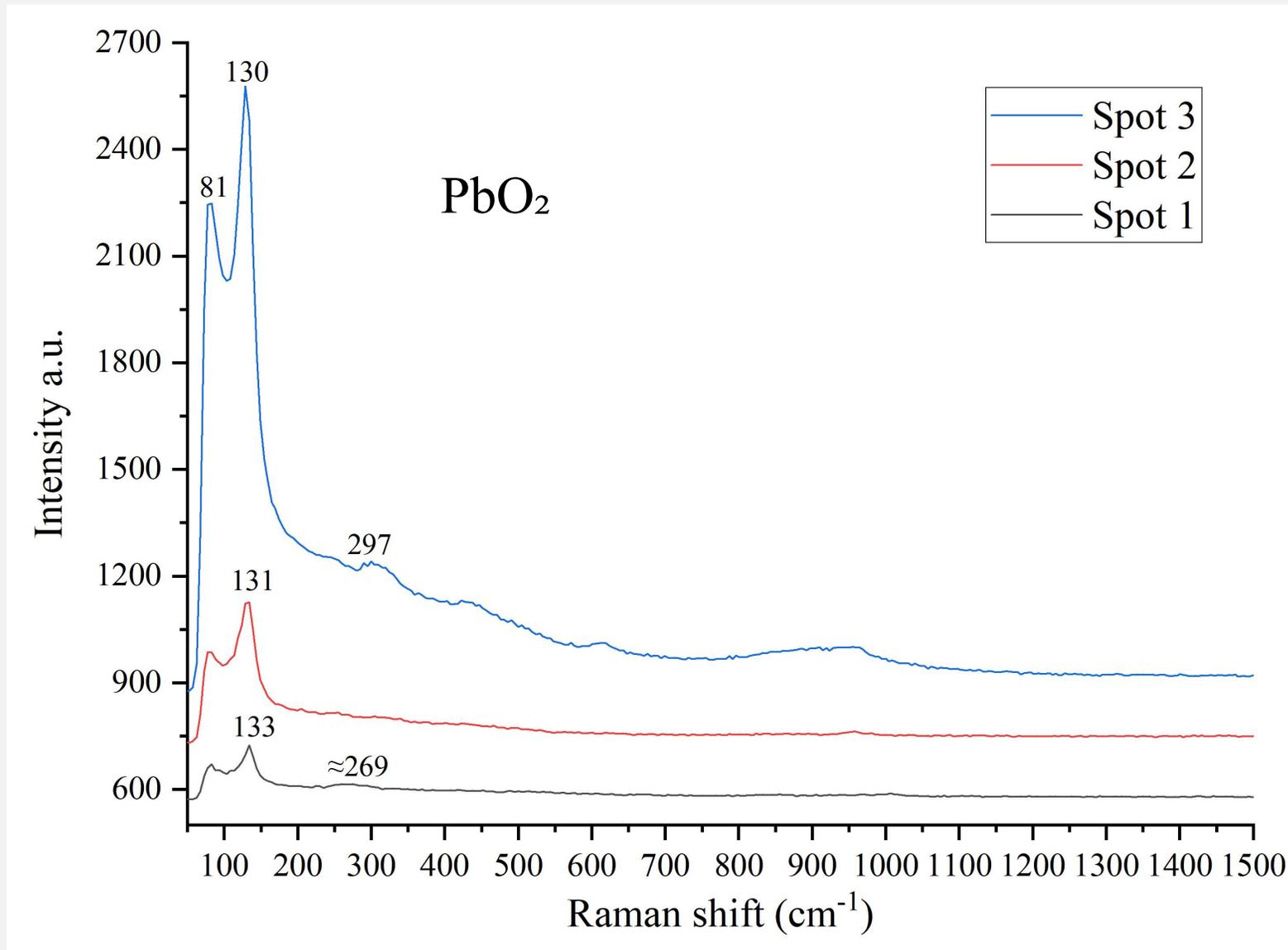
腐蚀产物

- 其中一件样品的表层意外剥落，暴露出其内部材质（图a）。该区域颜色较深，质地略显颗粒状。
- 在扫描电镜图像中，内外两部分呈现出明显差异：亮白区域为珠体内层材质（图b），暗色区域则为表层（图c）。
- 元素分布图显示二者成分差异显著（图d）：珠体内部富含Pb与Sn，而表层则含有较多的O、Al、Si、K与Fe，可能源自海底沉积物引发的腐蚀或污染。

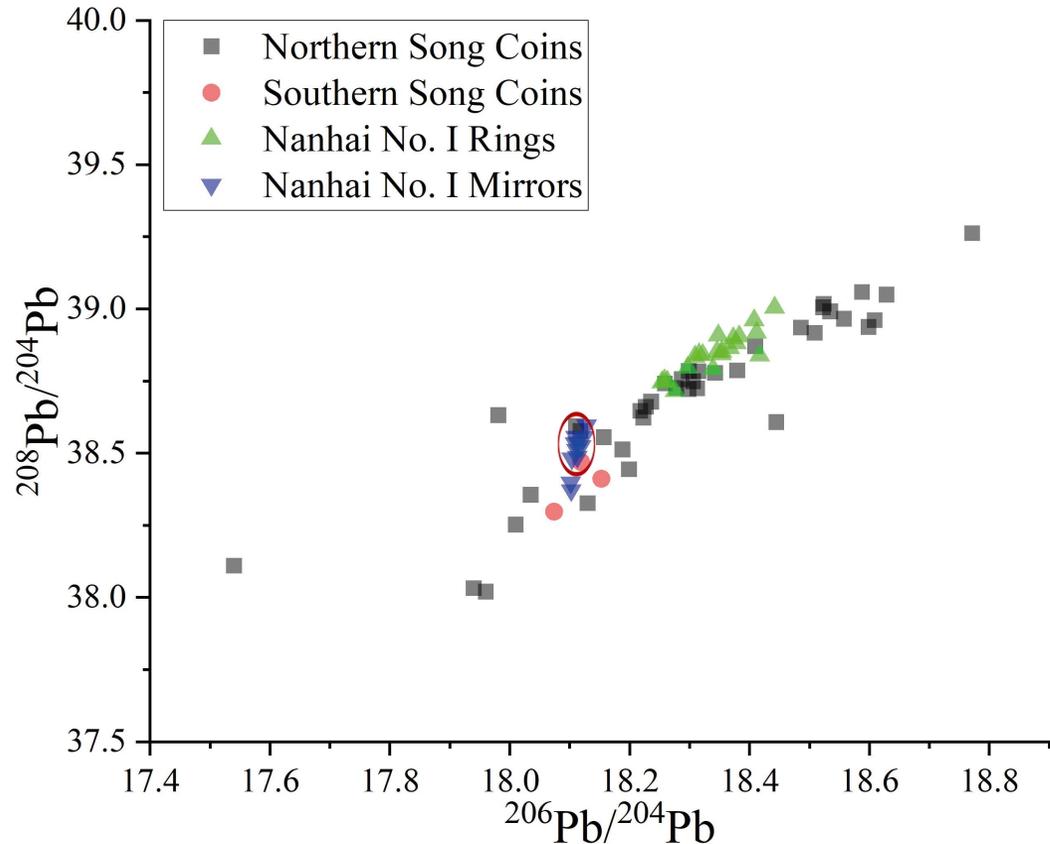
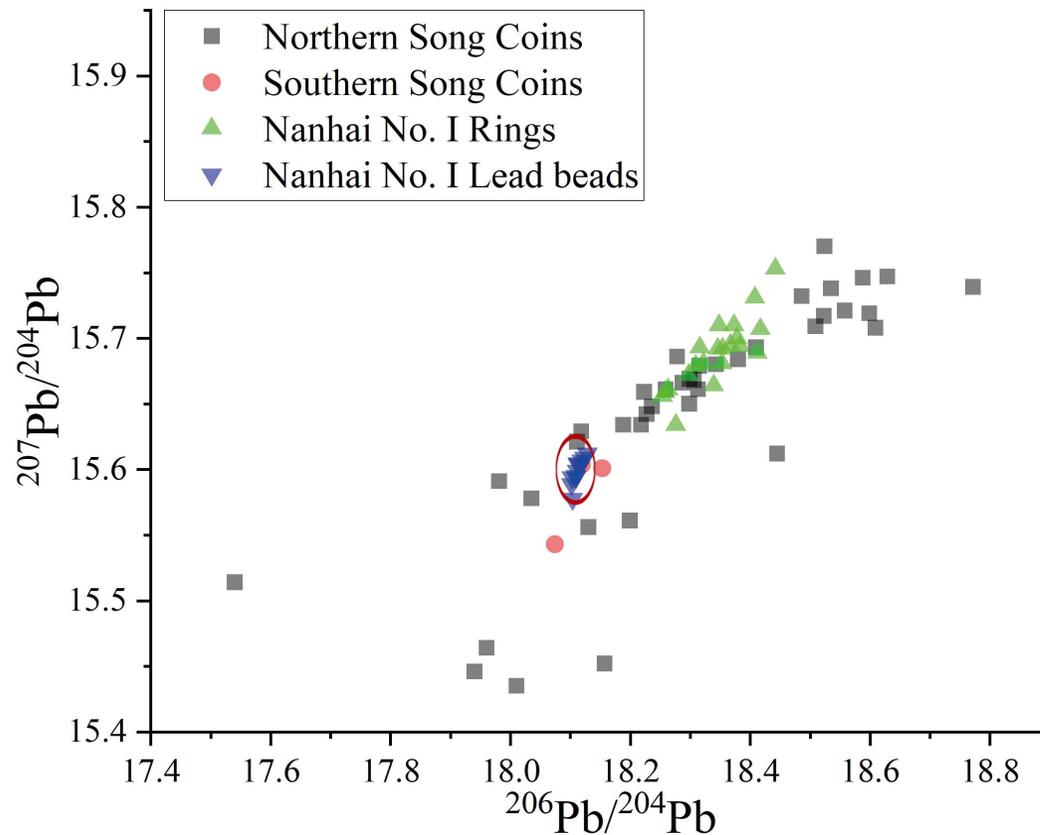


腐蚀产物

铅珠剥落内核所显示出的黑色颗粒状物质

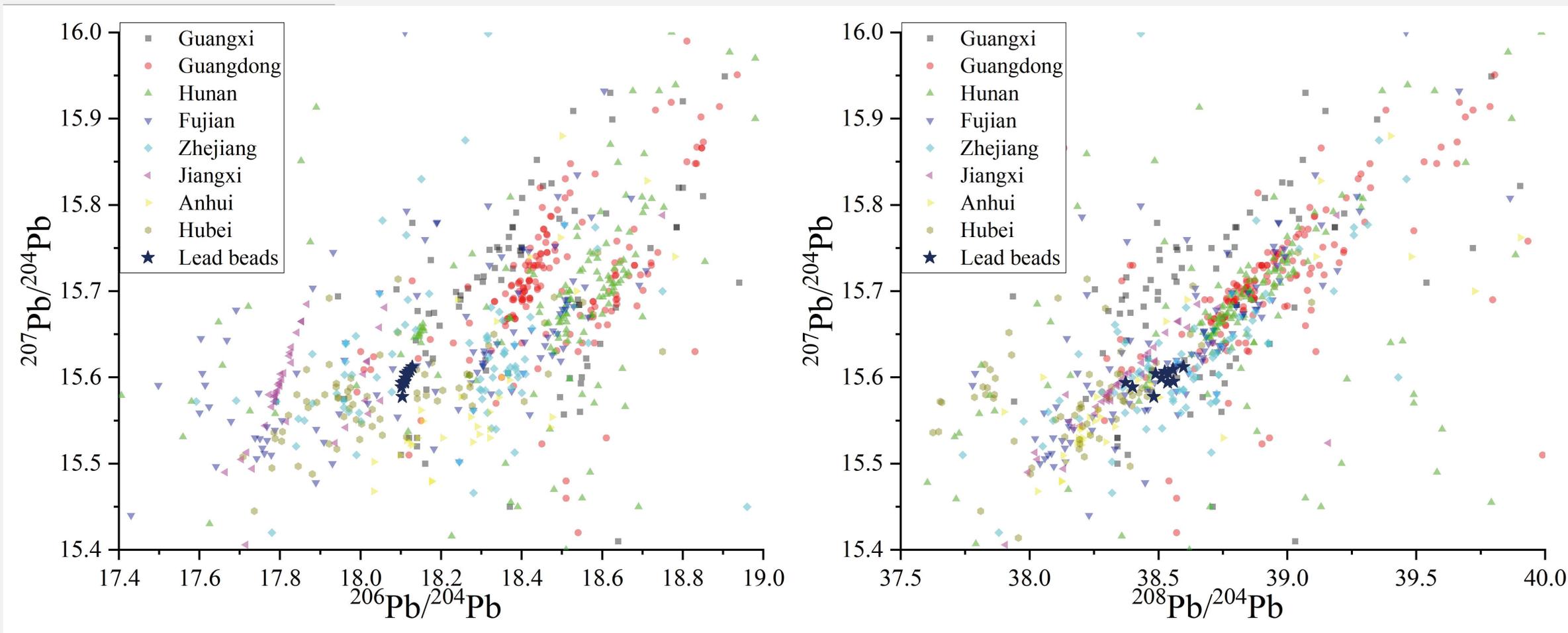


铅同位素分析



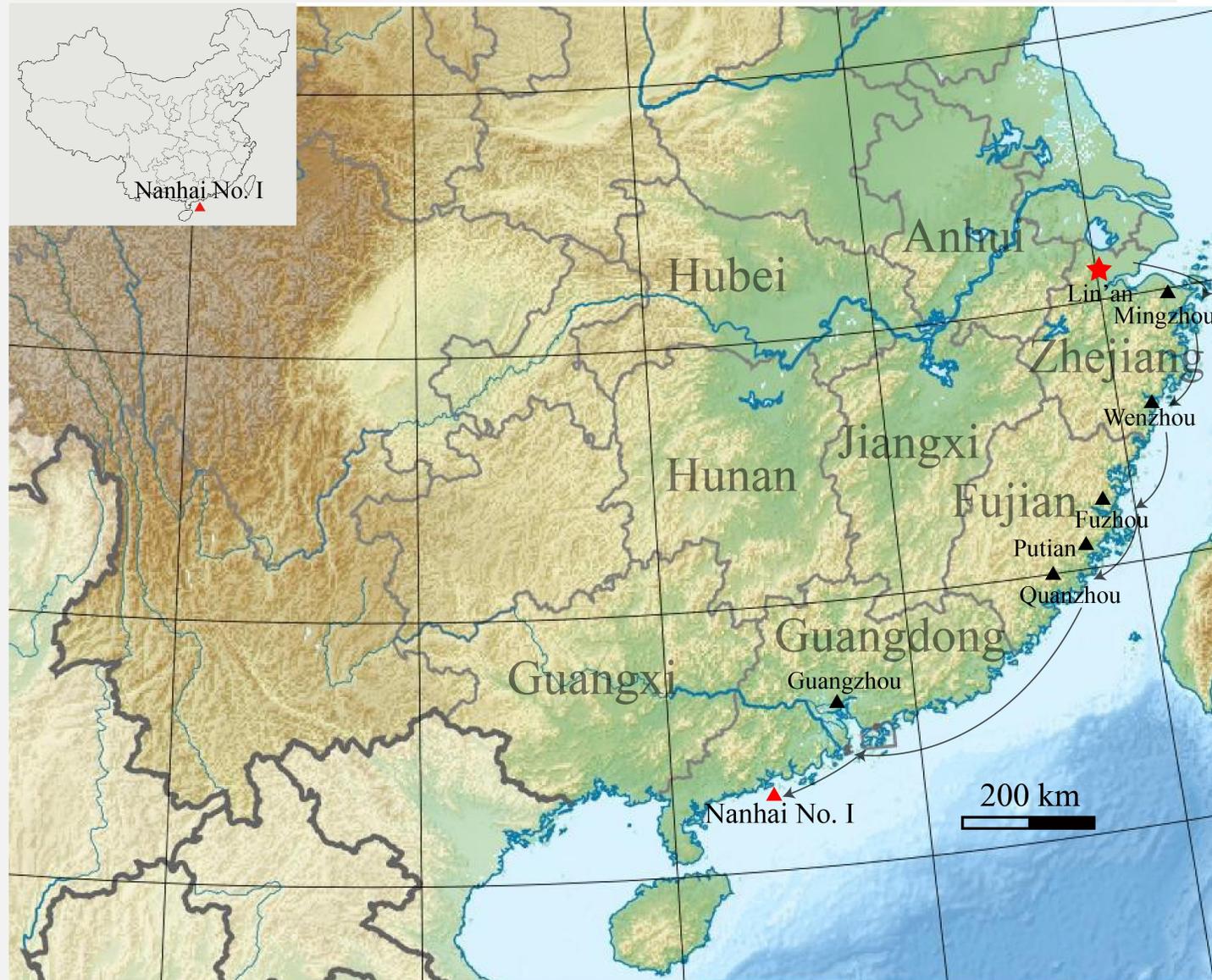
所有铅珠的同位素数据均落在宋代铜钱的变化范围内，且与同船出水铜环的同位素特征明显不同。其与部分铜钱的高度一致性表明，铅珠所用铅料是一种常见的可获得原料，并非来自稀有或特殊的来源。先前研究表明，铜环可能是在船只停靠广东某港口期间补给的，其铜和铅材料均为本地来源。相较之下，铅珠呈现出不同的铅同位素特征，暗示其原料产地并非广东，更可能是在船只抵达广东之前就已装船。

铅同位素分析



- 这些铅材料很可能并非来自广西、江西或安徽，与湖南和广东的铅矿源也仅表现出有限的相似性。
- 其同位素特征更接近于**浙江、福建和湖北**地区的矿源。

产地推断



- 出土刻有“临安作”字样的金叶、银锭，以及来自湖州的铜镜等，表明船只最初途经临安（今杭州）。
- 随后，它可能继续航行至明州（今宁波）与温州港口，在此装载龙泉青瓷和漆器。
- 继续沿海航行，船只只会经过闽江口、兴化湾和泉州湾，在福州、莆田和泉州等历史港口停靠。沉船中的货物亦支持这一路线推测：来自庄边、闽清、罗东、磁灶和德化等窑口的产品。
- 完成东南段装载后，船只可能继续西南航行至珠江口，在广州港停靠，并装载如佛山奇石窑的陶瓷罐等货物，再继续向西航行。
- 南宋时期，作为首都的临安所在地区及其毗邻的福建则贸易发达，开放程度高，设有多处国家主导的铅冶炼作坊。由于铅在当时并不属于严格管控的战略资源，因此**这些铅珠极有可能是在浙江或福州等沿海中心采购原料或直接制造完成的**。
- 这些港口很可能就地取材，大批量生产这类小型、结构简单的铅制品，从而显著降低运输与制造成本。这一现象表明，繁荣的海上贸易有效带动了沿海经济，也促进了相关产业的发展。这种模式与当代经济格局颇为相似：沿海地区往往率先形成技术精湛的手工业集群。

结论

- 中子成像在揭示铅珠内部结构方面尤为有效，尤其能够清晰显示穿孔通道等常规方法难以观测的细节。
- 采用成分稳定的铅-锡合金铸造，合金配比经过有意设计，以兼顾铸造效率与成本控制。
- 内部富含二氧化铅，外层则被碳酸铅包覆，此结构由长时间海洋埋藏环境中铅与锡腐蚀行为差异所致。
- 原料并非来自船上其他金属器物（如铜环）所用的同一来源，而更可能产自浙江或福建等沿海区域。

展望

- **拓展中子成像在复杂结构文物中的应用潜力**

本研究表明，中子成像在揭示铅珠等高衰减材料内部结构方面具有独特优势。未来，该技术可进一步应用于更多种类的文物材料，尤其是内部结构复杂、难以切割或不适合X射线成像的文物（如复合材料器物、封闭容器、金属-有机嵌套结构等），实现非破坏性地观察铸造工艺、装配方式及潜在修复痕迹，从而为研究文物的制造流程、使用方式及后期处理提供关键证据。

- **推动中子成像与多模态技术深度融合**

随着中子成像分辨率与探测灵敏度的提升，其与X射线CT、中子衍射、红外热成像等多种技术的协同应用前景广阔。未来可通过多模态成像对同一样品进行结构、物相组成与应力分布的综合分析，构建文物从宏观形态到微观结构的多层次认知体系，为跨材料、跨时期的工艺技术比较与演化路径研究提供更加精细化的数据支持。



中国科学院大学

University of Chinese Academy of Sciences

感谢垂听