第 62 卷　第 5 期
2026 年 9 月

南京大学学报(自然科学)
JOURNAL OF NANJING UNIVERSITY
(NATURAL SCIENCE)

Vol. 62, No. 5
Sept., 2026

DOI:10.13232/j.cnki.jnju.2026.05.001

陶器残留物见证珠江三角洲5000年前先民的食物加工和生存策略——以广东台山新村遗址为例

景俊贤[1,2],朱　柯[3],陈一鸣[1,2],陈明信[4],魏　峻[1,2*],胡耀武[1,2*]

(1.复旦大学文物与博物馆学系,上海,200433;2.复旦大学科技考古研究院,上海,200433;
3.广东省文物考古研究院,广州,510075;4.广东省江门市台山博物馆,江门,529200)

摘　要:珠江三角洲地区分布着大量新石器时代沙丘遗址(距今7000－3500年),其先民的生存策略对于揭示海洋资源的利用具有重要意义,然而,由于动植物遗存和人骨保存较差,先民的生存策略一直缺乏直接证据.陶器吸附的脂质残留物能够长期保存,为探讨先民食物加工与生存策略提供了有效途径.以广东台山新村遗址(约5000年前)出土的陶片为研究对象,采用GC-MS和GC-C-IRMS技术,分析了陶器残留物(2例可见残留物,58例吸附残留物)的脂质组成与脂肪酸单体碳同位素特征.结果表明,脂质普遍呈动植物混合来源特征,约87%样品的脂质来源于海洋动物(鱼类、贝类等),少量来源于陆生非反刍动物体脂.此外,在部分样品中还发现了可能来自谷物种子油的生物标记物.结合陶器类型的分析,陶釜与陶罐可能为炊煮器,圈足盘、陶钵及陶豆可能为盛食器.研究揭示,台山新村先民采取了以海洋渔猎为主,兼有狩猎采集的复合生存策略,体现了对海洋环境的高度适应,为早期海洋文化发展提供了物质基础.

关键词:珠江三角洲,沙丘遗址,生存策略,有机残留物,海洋文化

中图分类号:K876.3　　**文献标志码:**A

Residue analysis witnesses food processing and subsistence strategy (5000 a BP) in the Pearl River Delta: A case study at the Xincun Site, Taishan, Guangdong

Jing Junxian[1,2], Zhu Ke[3], Chen Yiming[1,2], Chen Mingxin[4], Wei Jun[1,2*], Hu Yaowu[1,2*]

(1. Department of Cultural Heritage and Museology, Fudan University, Shanghai, 200433, China;
2. Institute of Archaeological Science, Fudan University, Shanghai, 200433, China;
3. Guangdong Institute of Cultural Relics and Archaeology, Guangzhou, 510075, China;
4. The Taishan Museum, Jiangmen, Guangdong Province, 529200, China)

Abstract: The Pearl River Delta region is densely dotted with sand dune sites, whose subsistence economies hold significant importance for understanding the maritime adaptation and civilizational evolution of ancient populations in South China. However, direct evidence of marine resource utilization by ancient populations has long been scarce due to the poor preservation of faunal and floral remains. Lipid analysis of pottery effectively traces marine processing, yet this method has not been applied to such sites. In this study, we conducted lipid analysis for the first time on pottery shards (among them, 2 samples exhibited visible residues, and 58 samples showed adsorbed residues.) excavated from the Taishan XinCun site to reveal food processing practices and subsistence strategies. The GC-MS results indicate that residues exhibit characteristics of mixed animal and plant origins, with markers potentially derived from cereal seed oils detected in some samples. The GC-C-

基金项目:国家社会科学基金重点项目(22AKG002),全国考古人才振兴计划(2025-201)

收稿日期:2026－03－09

*通信联系人,E-mail:ywhu@fudan.edu.cn,fudanweijun@163.com

IRMS results revealed that lipids in approximately 87% of samples originated from marine animals (fish, shellfish, etc.), while a small number of samples derived from terrestrial non-ruminant animal fat. Combining lipid composition with pottery characteristics, pottery *Guan* and *Fu* likely served as cooking pottery for processing mixed marine and terrestrial resources, while other pottery, bowls etc. as serving pottery. Thus, around 5000 years ago, Xincun site had developed a mixed subsistence strategy dominated by marine fishing and hunting, supplemented by terrestrial hunting, plant gathering. This reflects a high degree of adaptation to the coastal environment and laid the foundation for the formation of early maritime culture in the region.

Keywords: Pearl River Delta, sand dune sites, subsistence strategies, organic residue analysis, maritime culture

珠江三角洲(含香港及周边岛屿)的史前文化遗存包括众多沙丘遗址和贝丘遗址(图 1a). 已有研究表明,该地区史前的生业经济形态整体上以渔猎采集经济为主,但由于遗址类型及其地理位置的不同,其资源获取方式存在一定差异[1]. 贝丘遗址多集中于珠江三角洲中北部,而沙丘遗址分布于沿海或岛屿沙滩、沙堤、沙洲上,为沙质为主的堆积遗址[2]. 目前,在珠江三角洲(含香港及周边岛屿)地区发现了大量的沙丘遗址,包括咸头岭、大黄沙、大湾、宝境湾和涌浪等[2−3](图 1b). 这些沙丘遗址的新石器时代文化遗存可分为早晚两期,早期约为距今 7000 至 5000 年,晚期约为距今 5000 至 3500 年[4]. 其分布特征表明,沙丘遗址先民的生业活动与海洋资源关系密切. 因此,了解沙丘遗址先民的生存策略,对于探讨珠江三角洲地区先民对海洋资源的利用、环境适应及史前海洋文明的形成具有重要意义[5].

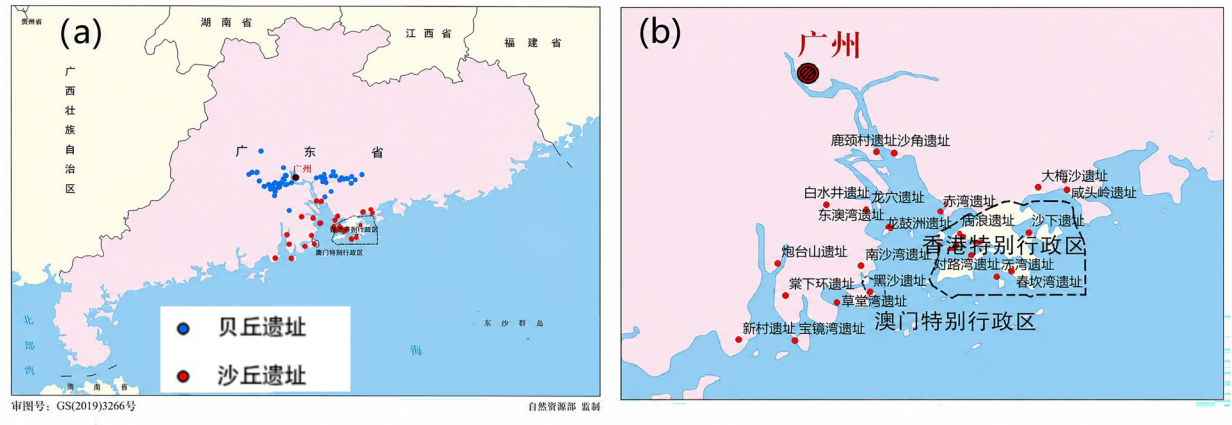


图 1 (a)珠江三角洲史前遗址分布图;(b)珠江三角洲新石器时代主要沙丘遗址分布图

Fig. 1 Maps of (a) major prehistoric sites and (b) major neolithic dune sites in the pearl river delta

目前,多种研究方法,如古环境分析、植物遗存分析、生产工具分析、稳定同位素分析等,已被用于探索沙丘遗址先民的生存策略. 例如,史红蔚等多位学者根据咸头岭遗址的地理位置(沙堤-潟湖)进行分析,认为先民应以海洋渔猎为主[6−8]. 台山新村遗址的植硅体分析结果显示,先民以采集陆生植物资源为主,棕榈植物在水稻出现之前是先民重要的食物来源[9−10]. 陈伟驹[11]指出,基于咸头岭、大黄沙等遗址的生产工具组合、古环境与植硅体,先民应以植物采集为主渔猎为辅,可能还包含水稻的采集或种植,距今 6500 年后才主要利用海洋资源. 深湾遗址人骨及东湾仔遗址约 13 例人骨的 C 稳定同位素分析结果表明,先民的生存策略距今约 5000 年前可能发生了从以陆生资源为主向以海洋资源为主的转变[12].

综上所述,可以看出,现有研究方法虽然从不同视角揭示了沙丘遗址先民的生业经济和食物来源,但由于沙丘遗址出土的动植物遗存或人骨均较少且保存较差,无法较为全面地反映先民对动植物资源的摄取情况,尤其是新石器时代晚期(距

今5000－3500年）的先民是否存在对海洋资源的摄取仍缺乏明确证据.

用于食物加工或存储的陶器，其内壁中会残留加工过程中渗透于陶胎中的食物，所以通过对陶器吸附的残留物分析，可以得到古代食物（动植物资源）加工的直接证据，进而揭示先民的生计策略[13－16]. 值得一提的是，残留物中脂肪酸单体C同位素比值可直接昭示海产品（海洋鱼类与贝类等）的存在[17]，成为探索先民对海洋资源进行加工和利用的分析“利器”. 上述方法已广泛运用于日本[18－19]、欧洲[20]、俄罗斯[21]以及波罗的海[22]等多个考古遗址出土遗存的分析，以探讨先民对海产品的利用[23－24]. 近年来，该方法也被广泛运用于我国的古食谱研究[25－34]，并已在江苏宜兴下湾遗址发现了先民摄取海洋资源的直接证据[26]. 但迄今为止，我国尚未见到将该方法运用于沙丘遗址的研究报道.

本研究以珠江三角洲台山新村沙丘遗址出土的陶器（60件）为研究对象，采用残留物分析方法，即气相色谱-质谱联用仪（GC-MS）及脂肪酸单体同位素分析（GC-C-IRMS），揭示陶器加工的食物类别，探讨先民对动植物资源（尤其是海洋资源）的利用，了解陶器类型与食物加工的相关性，重建该遗址先民的生计策略.

1　考古背景

台山新村沙丘遗址位于珠江三角洲西南缘的台山市赤溪镇腰古湾南侧古沙堤带（图2）. 2007年底，广东省文物考古研究所进行文物考古调查时发现了该遗址，并于2008－2009年进行了抢救性考古发掘. 遗址内发现生活区域、柱洞、各种类型的坑洞以及石器加工场等遗迹，出土的遗物主要包括砂质陶器、石器（如研磨器和杵）、凹槽砺石、网重物沉石或石锚以及用于捕鱼的石网坠[10]. 根据遗址内提取的木炭和陶器外壁烟炱的^{14}C测年结果，该遗址的使用时间约为公元前3500－2470年[9－10]. 遗址中发现的陶器组合以夹砂灰陶与灰褐陶质的绳纹釜、圜底钵为主，同时可见泥质灰白陶、灰黄陶的圈足罐、圈足盘等. 其中，釜和罐被认为是代表性的炊具[9－10].

迄今为止，本遗址仅开展过石器微体植物分析，探讨先民对植物资源的利用. 石器（n=12，包括研磨器、石杵和磨石等）表面共提取了454颗淀粉粒和1950颗植硅体. 淀粉粒组合中，棕榈科植物占比最高（34.55%），其他陆生植物（莲座蕨科、姜科以及橡子、薏苡属）次之（21.54%），芭蕉科植物再次之（3.74%）. 同时，还发现有淡水环境的块根块茎类植物（睡莲科、慈姑属与荸荠属等）. 植硅体组合以棕榈科占绝对优势（高达56%），并检测到少量稻属植硅体（约为1%）[9].

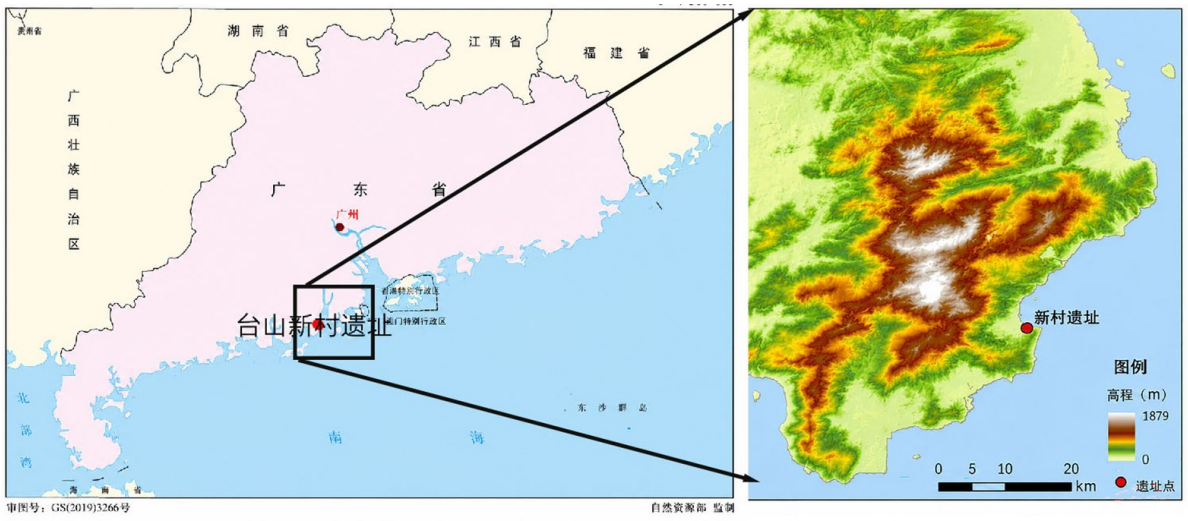


图2　台山新村遗址位置

Fig. 2　The location of the Taishan Xincun Site

2 材料与方法

2.1 研究材料 共选取台山新村遗址的60件样品,包括58件陶片及2件可见残留物(器物外壁附着炭化残留物).取样时尽量覆盖不同陶器器型,以炊煮器(罐、釜)为主,另包含少量陶钵、圈足盘与陶豆.陶片部位选择以口沿、底部为主.具体样品信息见文末的附图1~4和附表,可见残留物、陶罐及陶釜的部分样品照片见图3.



1与2分别为可见残留物样品TS01与TS02取样位置图;3~6为陶片样品图片,分别为TS34,TS22,TS10,TS12.

图3 可见残留物及部分陶片样品图片

Fig. 3 Photos of foodcrust and selected pottery sherds

对于2件陶器外壁可见的残留物,在文物标本库使用手术刀和镊子刮取陶器表面的黑色炭化残留物,收集样品200~500 mg,转移至离心管中避光保存,并带回实验室进行处理.

2.2 样品预处理与脂质提取 陶器的预处理及脂质提取均在复旦大学科技考古研究院稳定同位素考古实验室进行.对58件陶片的内外壁表层进行机械打磨,去除附着在陶片上的土壤及各种污染.收集陶片内部未受污染的陶粉(约2 g),密封于玻璃试管中并记录重量.

所有样品(包括58例陶粉和2例陶片外壁可见残留物)均采用硫酸-甲醇法进行脂质提取[35].向样品中加入5 mL 2% H_2SO_4-MeOH溶液(甲醇纯度≥99.7%,国药集团化学试剂有限公司;浓硫酸浓度为98%,国药集团化学试剂有限公司),置于恒温混匀仪(MTH-100,杭州米欧仪器有限公司)中,在70 ℃和800 r·min^{-1}下酯化4 h.反应液离心后,取上清液加入超纯水混匀,再用正己烷(纯度≥99.7%,国药集团化学试剂有限公司)萃取三次.合并有机相,用氮吹仪(CM200-1,北京成萌伟业科技有限公司)浓缩干燥后在−80 ℃保存.正式测试前向样品中加入40 μL三十四烷(纯度≥99.7%,上海麦克林生化科技有限公司)内标溶液(1 mg·mL^{-1})和500 μL正己烷,复溶并涡旋混匀后转移至进样瓶.实验全程设置空白对照,保证分析结果的可靠性.

脂质浓度计算采用内标法,通过GC-MS分析,分别获取目标化合物和内标的峰面积.根据目标化合物与内标(正三十四烷)的峰面积比值、已知内标浓度及样品质量计算得到脂质浓度[35].计算式如下:

$$\text{脂质浓度}\left(\mu g\cdot g^{-1}\right)=\frac{A_{\text{目标物}}}{A_{\text{内标}}}\times\frac{C_{\text{内标}}}{m_{\text{样品}}}$$

其中,$A_{\text{目标物}}$与$A_{\text{内标}}$分别为目标化合物和内标的色谱峰面积,$C_{\text{内标}}$为加入内标的浓度,$m_{\text{样品}}$为取样质量.

2.3 样品测试

2.3.1 GC-MS分析 样品的GC-MS测试在复旦大学放射医学研究所科研楼(1号楼)进行,使用Trace1300-ISQ7000气相色谱-质谱联用仪(Thermo Fisher Scientific,德国),配备TG-SQC色谱柱(15 m×0.25 mm×0.25 μm, Thermo Fisher Scientific,德国).采用不分流进样模式,载气为高纯氦气,柱流速为1.0 mL·min^{-1}.进样口温度保持280 ℃,接口温度设定为300 ℃,离子源为EI源,电子能量为70 eV,温度为280 ℃.气相色谱升温程序:初始温度为50 ℃,保持2 min,以10 ℃·min^{-1}的速度升至320 ℃,停留5 min,总运行时间为35 min.进样体积为1 μL,采用全扫描监测模式,扫描范围为m/z=50~500.检测结果使用脂肪酸甲酯标准品对照及NIST2020质谱数据库进行化合物检索,检索出的化合物种类见文末的附表.

2.3.2 GC-C-IRMS分析 样品的GC-C-IRMS测试在复旦大学科技考古研究院稳定同位素考古实验室进行.使用气相色谱分析仪(GC Trace 1310)联用稳定同位素质谱仪(Thermo Scientific™ 253Plus).系统配备GC IsoLink Ⅱ燃烧接

口,其反应管内部填充金属氧化物(氧化铜和氧化镍)作为催化剂,工作温度为1000 ℃. 气相色谱分离使用TG-5色谱柱(30 m×0.25 mm×0.25 μm, Thermo Fisher Scientific,德国),采用不分流模式进样,电离模式为电子轰击电离(EI),电子能量为80 eV. 气相色谱升温程序:初始温度为50 ℃,维持1 min;以15 ℃•min^{-1}的速率升至200 ℃,维持1 min;以3 ℃•min^{-1}的速率升至250 ℃,维持5 min;以25 ℃•min^{-1}的速率升至330 ℃,维持10 min.

使用脂肪酸甲酯混合标准品(编号F8-3,美国印第安纳大学生物地球化学实验室)对同位素比值进行校正,其中,棕榈酸甲酯$\delta^{13}C$标准值为(−29.90±0.03)‰,硬脂酸甲酯$\delta^{13}C$标准值为(−23.24±0.01)‰,测试误差控制在0.3‰以内. 考虑到脂肪酸在甲酯化过程中引入了甲醇的碳原子,因此测定了萃取步骤中使用的甲醇$\delta^{13}C$值,并据此通过质量平衡方程对测得的数值进行校正[36]. 计算式如下:

$$\delta^{13}C_{FA}=\frac{(n+1)\delta^{13}C_{FAME}-\delta^{13}C_{MeOH}}{n}$$

其中,$\delta^{13}C_{FA}$为脂肪酸的$\delta^{13}C$值,$\delta^{13}C_{FAME}$为脂肪酸甲酯的$\delta^{13}C$值,$\delta^{13}C_{MeOH}$为甲醇的$\delta^{13}C$值,n为脂肪酸的碳原子数量.

共46例样品(2例可见残留物及44例吸附残留物)获得了同位素数据,两种脂肪酸C同位素数据亦见文末附表.

3　实验结果

3.1　残留物的脂质浓度与分布

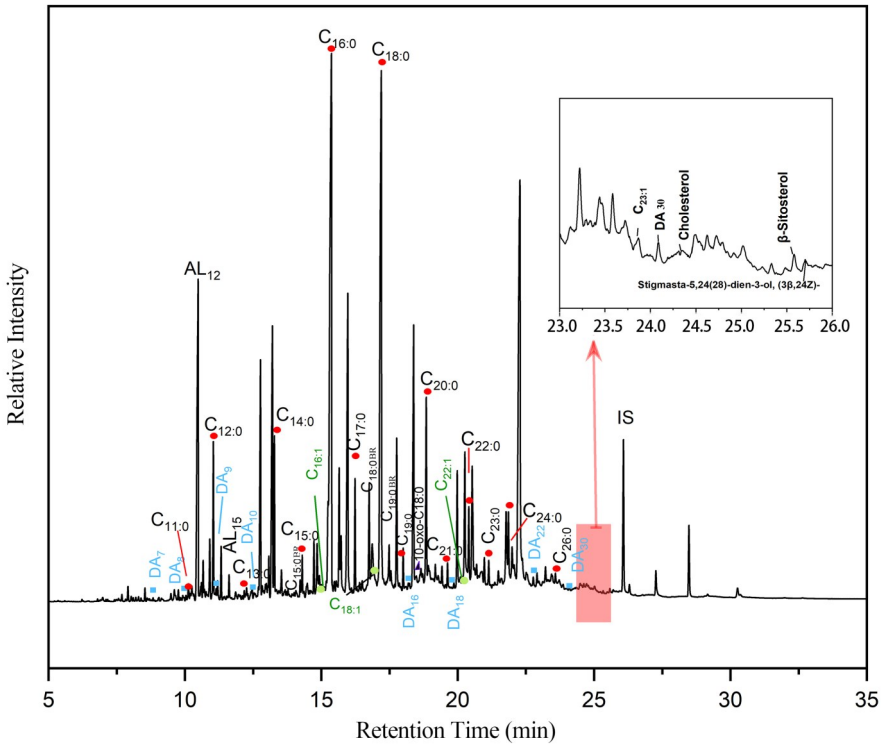
3.1.1　可见残留物　从两个可见残留物样品中均成功提取出脂质,浓度分别为404.73 μg•g^{-1}和1335.88 μg•g^{-1}. 较高浓度的脂质,表明其很可能直接源于陶器内加工的食物残留. 此外,这两个样品与其他58个吸附残留物的脂质类型和分布(文末附表)比较相似,并未发现其他类型的化合物(污染物). 最关键的是,脂质中的酮类化合物(10-酮硬脂酸,10-oxo-Octadecanoic acid)(文末附表)直接来源于二羧酸与脂肪酸在高温条件下发生的热脱羧反应[36],反映了食物中的油脂在高温加热下的反应过程. 基于以上多条证据,可以认为这些可见残留物主要来自先民加工过的食物残留,而非来自外界污染.

总体上,可见残留物中的脂肪酸以饱和直链脂肪酸($C_{11:0}$～$C_{26:0}$)为主,并含有支链脂肪酸($C_{13:0BR}$～$C_{19:0BR}$)及单不饱和脂肪酸($C_{16:1}$～$C_{23:1}$)(图4). 两个样品的棕榈酸和硬脂酸的比值(记为$P/S=C_{16:0}/C_{18:0}$)为1.07和1.19(文末附表),表明其来自动植物混合(P/S值为1～4)[38]. 此外,其他生物标记物也同样反映动植物资源的混合. 例如,植物甾醇(如β-谷甾醇、豆甾醇)、长链醇(AL_{12}～AL_{16})和苯甲酸衍生物皆来源于植物性食物[14,16,39-42],胆固醇(Cholesterol)来源于动物[14],不同碳链长度的二羧酸(DA_7～DA_{30})可能来源于植物、海洋及陆生动物等[37,43-46]. TS02样本中脂肪酸的分布比率为$(C_{15:0}+nC_{17:0})/C_{18:0}=0.15$, $C_{16:1}/C_{18:1}=0.05$, $C_{12:1}/C_{14:1}=0.88$,表明植物油脂可能指向发生降解的种子油或坚果油[47-49]. 此外,针对陶片内食物残留物的多项分析研究表明,豆甾醇、正十四烷、2,4-二叔丁基苯酚及2,6,10-三甲基十二烷等化学物质也被检出,推断其可能来源于谷物[39-42].

3.1.2　吸附残留物　其余58例陶片中提取出的吸附残留物也成功提取到脂类化合物. 其中,49例(84.48%)高于最低提取率(5 μg•g^{-1}),脂质浓度为11.13～1521.04 μg•g^{-1}[50]. 根据P/S值的分类标准[38],这些吸附残留物可分为两组:第一组共40例样品,P/S值为1～4,指示其来源为动植物混合;第二组共9例样品,P/S值小于1,指示其主要来源为动物.

第一组样品中的脂肪酸以饱和脂肪酸($C_{12:0}$～$C_{30:0}$)为主,也存在支链脂肪酸($C_{15:0BR}$～$C_{19:0BR}$)及单不饱和脂肪酸($C_{16:1}$～$C_{23:1}$)(图5). 此外,植物甾醇(β-谷甾醇、豆甾醇、(3β,24Z)-豆甾-5,24(28)-二烯-3-醇)及长链醇、不同碳链长度的二元羧酸(DA_7～DA_{30})、胆固醇及其衍生物(24-亚丙基胆甾-5-烯-3-醇,n=2)、酮类化合物(如10-酮硬脂酸)(图5)的存在,进一步显示其来源于动植物油脂.

第二组样品的脂肪酸以饱和直链脂肪酸($C_{12:0}$～$C_{28:0}$)为主,并含有支链脂肪酸($C_{15:0BR}$,



● Cx:y 碳链长度为x的直链饱和脂肪酸;● Cx:y 碳链长度为x,不饱和度为y的不饱和脂肪酸;
■ DA_X 碳链长度为X的二羧酸;● 其他;ALx 碳链长度为x的脂肪醇;BR 支链饱和脂肪酸;IS 内标 C_{34}.

图 4 样品 TS02 脂质提取物的 GC-MS 总离子流图

Fig. 4 Total ion chromatogram of sample TS02 by GC-MS

$C_{17:0BR}$, $C_{19:0BR}$)及单不饱和脂肪酸($C_{16:1}$~$C_{22:1}$)(图 6). 此外,还发现了二羧酸(DA_7~DA_{30})、胆固醇及其衍生物(一例)、植物甾醇(两例),皆反映了其来自于动植物的混合. 但鉴于植物甾醇含量显著较低且较低的 P/S 值,该组样品的脂质应主要来源于动物油脂.

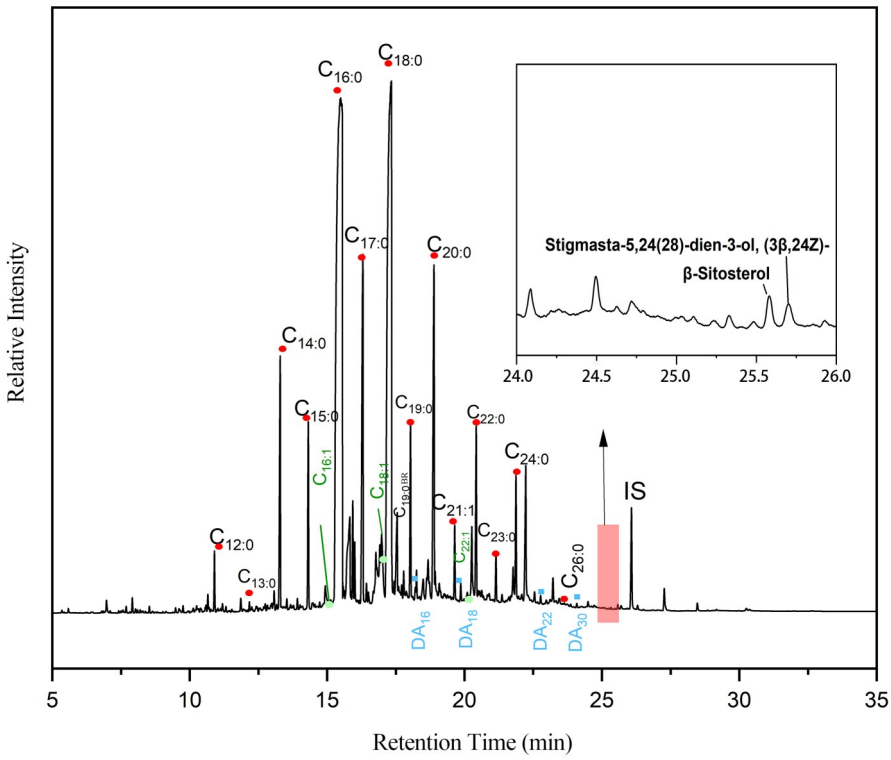
3.2 油脂来源 脂肪酸单体碳同位素分析,可以进一步界定动物油脂的来源[14]. 以 Cramp 等文献[16,19,51−54]为基础,绘制残留物 $\delta^{13}C_{16:0}$ 和 $\delta^{13}C_{18:0}$ 的散点图(图 7).

3.2.1 可见残留物 两例可见残留物的 $\delta^{13}C_{16:0}$ 值分别为 −25.2‰ 和 −25.9‰,$\delta^{13}C_{18:0}$ 值分别为 −24.6‰ 和 −25.0‰,皆表现出明显的 ^{13}C 富集. 海洋动物的脂肪中,其脂肪酸 $\delta^{13}C$ 值($\delta^{13}C_{16:0}$ 和 $\delta^{13}C_{18:0}$)通常高于 −26‰[55]. 以上这两个样品的脂肪酸 $\delta^{13}C$ 值皆高于 −26‰(图 7),表明其来自海洋产品.

3.2.2 吸附残留物 44 例样品(具有足量的 $C_{16:0}$ 与 $C_{18:0}$ 浓度)的 $\delta^{13}C_{16:0}$ 值为 −18.5‰~−29.0‰ ($\bar{x}=(-18.5\pm2.0)$‰),$\delta^{13}C_{18:0}$ 值为 −19.8‰~−29.0‰ ($\bar{x}=(-18.8\pm2.3)$‰). 由图 7 可以看出,大部分样品呈现显著的 ^{13}C 富集特征(脂肪酸 $\delta^{13}C$ 值高于 −26‰),位于海产品油脂范围内;少量样品(如 TS11, TS18, TS27, TS30, TS36, TS54),其脂肪酸 $\delta^{13}C$ 值位于陆生非反刍动物(如猪、狗等)体脂范围内. $\Delta^{13}C$ 值($\delta^{13}C_{18:0}-\delta^{13}C_{16:0}$)的计算结果显示,其数值分布于 −0.3‰~1.9‰(见文末附表),符合非反刍动物体脂的同位素特征($\Delta^{13}C\geqslant-0.3$‰)[39].

4 讨论

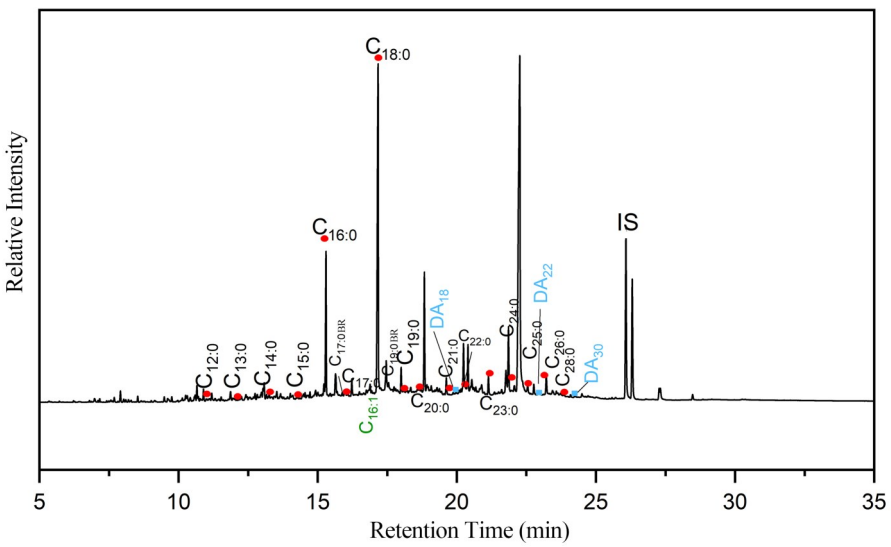
4.1 新村遗址先民对食物的选择与加工 无论是可见残留物抑或吸附残留物,其脂质类型与特征(文末附表),如脂肪酸分布、P/S 值、植物甾醇、动物固醇等,均表明先民的食物中包含了动植物资源. 然而,先民对食物的选择与加工,仍存在一



● Cx:y 碳链长度为x的直链饱和脂肪酸;● Cx:y 碳链长度为x,不饱和度为y的不饱和脂肪酸;
■ DA$_x$ 碳链长度为X的二羧酸;● 其他;ALx 碳链长度为x的脂肪醇;BR 支链饱和脂肪酸;IS 内标 C_{34}.

图5　样品TS34脂质提取物的GC-MS总离子流图

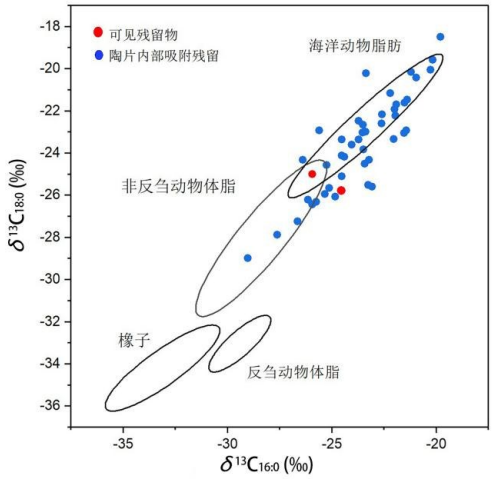
Fig. 5　Total ion chromatogram of sample TS34 by GC-MS



● Cx:y 碳链长度为x的直链饱和脂肪酸;● Cx:y 碳链长度为x,不饱和度为y的不饱和脂肪酸;
■ DA$_x$ 碳链长度为X的二羧酸;●其他;ALx 碳链长度为x的脂肪醇;BR 支链饱和脂肪酸;IS 内标 C_{34}.

图6　样品TS60脂质提取物的GC-MS总离子流图

Fig. 6　Total ion chromatogram of sample TS60 by GC-MS



黑色椭圆表示基于已发表文献数据绘制的不同食物来源脂肪酸 $\delta^{13}C$ 值参考范围,并以68%置信区间表示[16,19,51-54].

图7 陶器残留物脂肪酸 $\delta^{13}C_{18:0}$-$\delta^{13}C_{16:0}$ 散点图

Fig. 7 Scatter plot of $\delta^{13}C_{18:0}$-$\delta^{13}C_{16:0}$ in pottery residue fatty acids

定的差异. 部分先民主要摄取动物资源($P/S<1$,文末附表),部分先民倾向于加工植物的种子或谷物(如样品TS01,TS02等[56]).

通过残留物中的脂肪酸单体C同位素分析可进一步了解动物油脂的来源. 根据可见残留物和吸附残留物(共46例样品)的 $\delta^{13}C_{18:0}$ 和 $\delta^{13}C_{16:0}$ 同位素数据,约40例(占87%)中的油脂来自海洋动物油脂(鱼类、贝类等)(图7),充分表明新村遗址的先民大量利用了以贝类及鱼类为主的海洋资源. 此外,还有少数样品的 $\delta^{13}C$ 值落在陆生非反刍动物体脂范围内($\Delta^{13}C>-0.3‰$),表明这些样品(如TS11,TS18,TS27,TS30,TS36,TS54)来自陆生非反刍动物体脂,说明陆生动物资源也是先民的重要食物来源之一.

综上,新村先民食物中包含了丰富的陆生动植物资源和海洋资源,先民的食谱是多元化的,人群之间存在食物选择上的差异. 本研究首次将脂质分析方法应用于沙丘遗址,从分子层面揭示了新村遗址先民对食物的选择与加工行为,这为先民利用海洋资源提供了直接证据.

4.2 陶器功能与食物加工 台山新村遗址作为一处典型的沙丘遗址,出土了包括釜(炊煮器)、罐(炊煮器)、豆、钵、圈足盘在内的多种陶器. 对不同陶器的残留物进行比较分析,可揭示陶器功能与食物加工之间的相关性,理解在沙丘遗址特殊的生态环境下,陶器的使用是否呈现与食物类别对应的专门化趋势.

新村遗址出土的陶釜与陶罐,其制作工艺特征表明其可能主要用作炊煮器[29,57-58],两种器物外壁均可见烟炱或炭化痕迹,吸附残留物中普遍检测出指示高温烹煮的酮类化合物(文末附表)以及高脂质浓度(图8),皆显示它们可能主要用作炊煮. 对于釜,其吸附残留物包括饱和脂肪酸、支链脂肪酸和单不饱和脂肪酸、植物甾醇及长链醇、二羧酸、胆固醇衍生物等(图5和文末附表),表明釜是用于加工动植物资源的. 此外,大部分脂肪酸的 $\delta^{13}C$ 值较高($\delta^{13}C_{16:0}>-26.0‰$),表明加工的脂质主要来源于海洋资源,但也有少许脂肪酸 $\delta^{13}C$ 值位于非反刍动物的体脂范围内(图9). 这种情形也见于陶罐(图8、图9和文末附表). 因此,釜和罐极有可能作为烹饪或加工多种食物的器具.

与釜和罐相比,圈足盘的平均脂质浓度(209.5 μg·g^{-1},图8)和脂肪酸 $\delta^{13}C$ 值(图9)均较为相近,反映其也可能用于烹饪或加工多种食物. 但该器物质地细密、器壁较薄,不具备直接受热的工艺特征[59-60],外壁也没有发现加热的痕迹(如烟炱),最关键的是,脂质组成中没有发现高温加热的酮类化合物(文末附表). 综上,该类陶器可能没有用于烹饪食物,而可能是盛食器.

陶钵的吸附残留物主要来源于海产品(文末附表和图9),没有发现植物资源;陶豆的脂质组成则与圈足盘、罐、釜相似,均为动植物资源混合

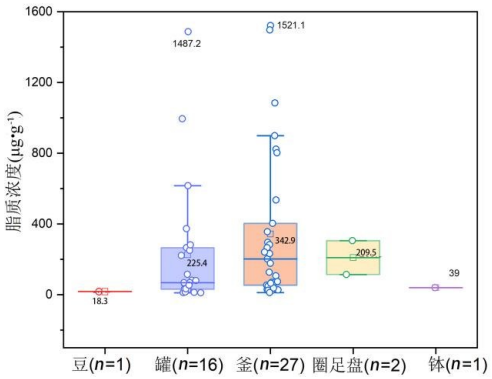


图8 不同陶器器型吸附的脂质浓度图

Fig. 8 Lipid concentration of different pottery types

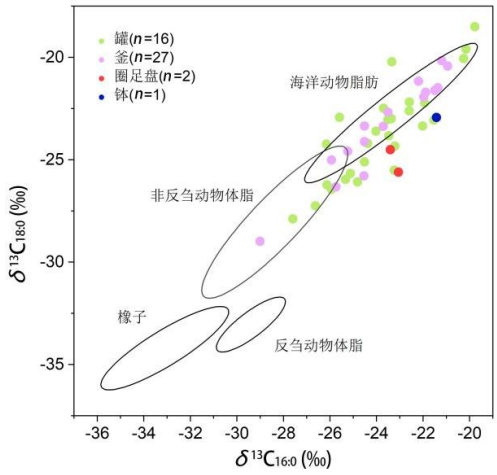


图9　不同陶器器型脂肪酸的 $\delta^{13}C_{18:0}$-$\delta^{13}C_{16:0}$ 散点图

Fig. 9　Scatter plot of $\delta^{13}C_{18:0}$ - $\delta^{13}C_{16:0}$ in different pottery types residue fatty acids

来源（文末附表）. 与圈足盘相似，这两种陶器残留物也没有发现酮类化合物，表明其可能也主要用作盛器. 然而，与以上陶器类型相比，陶钵与陶豆的脂质残留浓度显著偏低（分别为 39.29 μg•g^{-1} 和 18.26 μg•g^{-1}，图 8 和文末附表），表明其更可能作为临时性或辅助性的盛食器. 需要指出，因为此类样品数量过少，对其功能的探讨尚需加大样品量进行细致研究.

4.3　新村先民的生存策略　距今 22000—7500 年，南海海平面整体较低，珠江三角洲全境为陆地[61—62]. 距今 7500—5000 年发生第二次海侵，古海岸线至少推进至今日广州、佛山一带，溺谷湾深入至羚羊峡东口的广利附近[63]. 期间，河口淤积为近代三角洲平原的形成奠定了基础. 距今 5000—2500 年出现局部海退，西北江三角洲中、南部海域范围大幅缩小，东江三角洲由海湾演变为陆地[64—65]. 约一半的海侵区沉积了厚达 3～5 m 的砂质淤泥，推动三角洲整体向海扩展[63]. 几千年来，先民就在此古环境下生息和繁衍.

新村遗址陶器的脂质分析表明先民食谱极其多元化，包含陆生动植物资源及海洋资源（图 7），说明先民的生存策略应为狩猎采集兼海洋渔猎. 特别指出，约 87% 的陶片样品中检测到明确的海洋脂质信号（图 7），表明距今 5000 年左右该地区已存在较发达的海洋渔猎经济，反映了以新村为代表的沙丘先民对海洋资源的广泛开发和利用.

此外，脂质分析为新村先民是否消费水稻提供了重要线索. 水稻起源于长江中下游地区，约 5000 年前南传至华南地区[66]. 甘草岭、茶岭及陂头岭等遗址均出土水稻的大植物遗存[67—69]，沙丘遗址（如香港西贡沙下[70]、台山新村[9]）也发现少量稻作遗存，但沙丘先民摄取水稻仍缺乏明确直接证据. 新村遗址陶器脂质分析结果表明，先民的主要食物来自混合动植物资源（$1<P/S<4$，文末附表），表明植物资源仍是先民食物的重要来源. 尽管总体上水稻的特征生物标记物（如 γ-生育酚）在吸附残留物中并未发现（可能因其比重在食物中过低抑或在食品加工过程中大量降解），但在两例可见残留物（TS01 与 TS02）上检出了可能与谷物种子加工有关的化合物（豆甾醇、正十四烷、2,4-二叔丁基苯酚及 2,6,10-三甲基十二烷、脂肪酸为直接食物残留，故浓度高）. 鉴于新村遗址此前仅发现少量稻属植硅体而未见其他谷物遗存[9]，结合稻作农业在珠江三角洲地区发展的宏观背景[66]，这些谷物种子可能与水稻加工有关. 但这些有机残留物是否来自水稻仍需更多研究.

综上，在距今约 5000 年的珠江三角洲地区，以台山新村为代表的沙丘遗址发展出一种兼具海洋渔猎、陆生狩猎、植物采集的混合生存策略. 在此混合生存策略中，海洋渔猎占据主要地位，反映了先民对海岸带环境的高度适应能力，也成为沙丘遗址先民独具特色的海洋文化特征之一.

5　结论

本文对台山新村遗址出土陶片开展了有机残留物分析，并结合以往的研究，探讨了新村遗址食物的加工与生存策略. 研究结果如下.

（1）脂质组成中的脂肪酸，包括饱和直链脂肪酸（$C_{11:0}$～$C_{26:0}$）、支链脂肪酸（$C_{13:0BR}$～$C_{19:0BR}$）、单不饱和脂肪酸（$C_{16:1}$～$C_{23:1}$）及多种生物标记物表明先民进行了多种动植物资源的加工. 而谷物种子生物标记物可能与水稻存在关联，但该推测仍需更多证据支持. 脂肪酸单体 $\delta^{13}C$ 值（$\delta^{13}C_{16:0}$ 和 $\delta^{13}C_{18:0}$）进一步显示，绝大部分油脂来自于海洋动物油脂，少量源自陆生非反刍动物体脂.

（2）脂质组成、陶器性能等多种证据显示，陶

釜与陶罐可能主要作为炊煮器,圈足盘、陶钵及陶豆可能作为盛食器;陶钵与陶豆可能属于临时使用的器皿.

(3)距今约5000年前,以台山新村为代表的沙丘遗址先民采用海洋渔猎、陆生狩猎、植物采集的混合生存策略.发达的海洋渔猎经济,集中体现了史前先民对海洋资源的利用、开发和适应.

本研究仍存在不足.例如,因缺乏更明确的稻米生物标记物,对沙丘遗址稻作农业的讨论仍需更多证据;GC-MS未检出海洋油脂标记物(如ω-(邻烷基苯基)烷酸,APAAs),这可能与其特殊的加工方式有关.今后将深入开展谷物分子标志物、海洋油脂标志物在不同加工方式下的存留机制等方面研究,进一步探讨珠江三角洲地区沙丘遗址先民的食物加工方式以及相应的生存策略.

参考文献

[1] 邝桂荣.珠江三角洲的沙丘遗址与贝丘遗址.岭南文史,1998(3):29-31.

[2] 李海荣.珠江三角洲地区沙丘遗址地层的划分:以咸头岭遗址为例.南方文物,2011(4):125-143.

[3] 张弛,洪晓纯.中国华南及其邻近地区的新石器时代采集渔猎文化.考古学研究,2008(7):415-434.

[4] Underhill A P. A companion to Chinese archaeology. Hoboken:Wiley-Blackwell,2013:597-611.

[5] Bailey G. World prehistory from the margins: The role of coastlines in human evolution. Journal of Interdisciplinary Studies in History and Archaeology, 2004,1(1):39-50.

[6] 李果.论香港地区新石器时代沙丘遗址的两个特点:兼论环珠江口新石器时代特点的共同性.中原文物,1997(2):2-9.

[7] 萧一亭.澳门、珠海史前文化探索.文物,1999(11):57-66.

[8] 史红蔚.试论华南沿海新石器文化的几个问题.东南文化,1997(4):95-99.

[9] 杨晓燕,李昭,王维维,等.稻作南传:岭南稻作农业肇始的年代及人类社会的生计模式背景.文博学刊,2018(1):33-47.

[10] Yang X Y, Barton H J, Wan Z W, et al. Sago-type palms were an important plant food prior to rice in southern subtropical China. PLoS One, 2013, 8(5): e63148.

[11] 陈伟驹.咸头岭文化生计方式的探讨.考古,2017(8):70-79.

[12] 吕烈丹.香港史前的自然资源和经济形态.考古,2007(6):36-45.

[13] 黄嫣,胡耀武.陶器脂肪酸揭示古人类食谱的研究进展.人类学学报,2024,43(5):865-880.

[14] Evershed R P, Dudd S N, Lockheart M J, et al. Lipids in archaeology//Brothwel D R, Pollard A M. Handbook of Archaeological Sciences. Hoboken, NJ, USA:John Wiley & Sons Ltd.,2001:331-349.

[15] Vykukal R, Gabiger A, Cramp L J E, et al. Old food, new methods′: Recent developments in lipid analysis for ancient foodstuffs. TrAC Trends in Analytical Chemistry,2024,176:117668.

[16] Cramp L J E, Bull I D, Casanova E, et al. Lipids in archaeology//Pollard A M, Armitage R A, Makarewicz C A. Handbook of Archaeological Sciences. The 2nd Edition. Hoboken: John Wiley & Sons Ltd.,2023:529-556.

[17] Evershed R P, Copley M S, Dickson L, et al. Experimental evidence for the processing of marine animal products and other commodities containing polyunsaturated fatty acids in pottery vessels. Archaeometry,2008,50(1):101-113.

[18] Shoda S, Lucquin A, Ahn J H, et al. Pottery use by early Holocene hunter-gatherers of the Korean peninsula closely linked with the exploitation of marine resources. Quaternary Science Reviews, 2017,170:164-173.

[19] Craig O E, Saul H, Lucquin A, et al. Earliest evidence for the use of pottery. Nature, 2013, 496 (7445):351-354.

[20] Bondetti M, Chirkova S S, Lucquin A, et al. Fruits, fish and the introduction of pottery in the Eastern European plain: Lipid residue analysis of ceramic vessels from Zamostje 2. Quaternary International, 2020,541:104-114.

[21] Gibbs K, Isaksson S, Craig O E, et al. Exploring the emergence of an 'Aquatic' Neolithic in the Russian Far East: Organic residue analysis of early hunter-gatherer pottery from Sakhalin Island. Antiquity, 2017,91(360):1484-1500.

[22] Heron C, Craig O E, Luquin A, et al. Cooking fish and drinking milk? Patterns in pottery use in the

southeastern Baltic, 3300－2400 cal BC. Journal of Archaeological Science, 2015, 63: 33－43.

[23] Tarifa-Mateo N, Laborda R, Sierra A, et al. Milk production in pottery. Evidence for various exploited resources used by the first farmers in Central Pyrenees using the morphological, chemical and stable carbon isotopic composition of organic residues from ceramic vessels. Archaeological and Anthropological Sciences, 2024, 16(7): 101.

[24] Hammann S, Bishop R R, Copper M, et al. Neolithic culinary traditions revealed by cereal, milk and meat lipids in pottery from Scottish crannogs. Nature Communications, 2022, 13(1): 5045.

[25] Han B, Sun Z W, Chong J R, et al. Lipid residue analysis of ceramic vessels from the Liujiawa site of the Rui State (early Iron Age, North China). Journal of Quaternary Science, 2022, 37(1): 114－122.

[26] Lyu N N, Yan L, Wang T, et al. Characterization of pottery foodcrusts through lipid and proteomic analyses: A case study from the Xiawan site in Yixing city, East China. Journal of Archaeological Science, 2024, 161: 105902.

[27] Zhang Y, Gao Y, Yang J, et al. Patterns in pottery use reveal different adaptive strategies between lower and higher altitude regions on the Tibetan Plateau: Chemical evidence from pottery residues. Journal of Archaeological Science, 2022, 138: 105544.

[28] Liu X D, Ren M, Fu Y X, et al. New insights into the use of Neolithic pottery in Guangxi of South China: Organic residue analysis of experimental and archaeological pottery. Heritage Science, 2023, 11(1): 201.

[29] 吕楠宁，王涛，郁金城，等. 北京上宅遗址出土陶片的脂质分析与先民生计策略. 中国科学：地球科学，2023，53(8)：1808－1816.

[30] Han B, Lyu N, Yan L, et al. Rapid screening of pottery lipid residue profile via comprehensive two-dimensional gas chromatography. Analytica Chimica Acta, 2025, 1338: 343598.

[31] 邱振威，庄丽娜，饶慧芸，等. 8000多年前淮河流域的水稻栽培与驯化：来自江苏韩井遗址的证据. 中国科学：地球科学，2022，52(6)：1054－1064.

[32] 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. 考古，2023(7)：104－120.

[33] Zhang Y N, Gao Y, Yang J S, et al. The early milk consumption on the Tibetan Plateau. Science Bulletin, 2023, 68(4): 393－396.

[34] Wang L Y, Lin K C, Zhou Z. Preliminary insights into the use of pottery and culinary practices at Guijiabao site in southwest China. Journal of Archaeological Science: Reports, 2024, 57: 104598.

[35] Correa-Ascencio M, Evershed R P. High throughput screening of organic residues in archaeological potsherds using direct acidified methanol extraction. Analytical Methods, 2014, 6(5): 1330－1340.

[36] Regert M. Analytical strategies for discriminating archeological fatty substances from animal origin. Mass Spectrometry Reviews, 2011, 30(2): 177－220.

[37] Regert M, Bland H A, Dudd S N, et al. Free and bound fatty acid oxidation products in archaeological ceramic vessels. Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences, 1998, 265(1409): 2027－2032.

[38] Romanus K, Poblome J, Verbeke K, et al. An evaluation of analytical and interpretative methodologies for the extraction and identification of lipids associated with pottery sherds from the site of Sagalassos, Turkey. Archaeometry, 2007, 49(4): 729－747.

[39] Evershed R P. Biomolecular archaeology and lipids. World Archaeology, 1993, 25(1): 74－93.

[40] Ge W, Huang W J, Liu L, et al. Beyond rice: Preliminary investigation of encrusted organic residues in a pottery vessel reveals diverse food resources at the Neolithic Hemudu Settlement, China. Journal of Archaeological Science: Reports, 2024, 58: 104714.

[41] Li P L, Zhao W, Liu Y Y, et al. Precursors of volatile organics in foxtail millet (Setaria italica) porridge: The relationship between volatile compounds and five fatty acids upon cooking. Journal of Cereal Science, 2021, 100: 103253.

[42] Lu L, Wen R, Cui J J. Discrimination of cereal residue adsorbed by pottery based on metabolomics. Journal of Archaeological Method and Theory, 2024, 31(4): 2164－2187.

[43] Evershed R P. Organic residue analysis in archaeology: The archaeological biomarker revolution. Archaeometry, 2008, 50(6): 895－924.

[44] Evershed R P, Dudd S N, Copley M S, et al. Chemistry of archaeological animal fats. Accounts of Chemical Research, 2002, 35(8): 660－668.

[45] Matzke K, Riederer M. A comparative study into the chemical constitution of cutins and suberins from Picea abies (L.) Karst., Quercus robur L., and Fagus sylvatica L. Planta, 1991, 185(2): 233－245.

[46] Hansel F A, Evershed R P. Formation of dihydroxy acids from Z‐monounsaturated alkenoic acids and their use as biomarkers for the processing of marine commodities in archaeological pottery vessels. Tetrahedron Letters, 2009, 50(40): 5562－5564.

[47] Dudd S N, Evershed R P, Gibson A M. Evidence for varying patterns of exploitation of animal products in different prehistoric pottery traditions based on lipids preserved in surface and absorbed residues. Journal of Archaeological Science, 1999, 26(12): 1473－1482.

[48] Hjulström B, Isaksson S, Karlsson C. Prominent migration period building. Acta Archaeologica, 2008, 79: 62－78.

[49] Rosiak A, Kałużna‐Czaplińska J, Gątarek P. Analytical interpretation of organic residues from ceramics as a source of knowledge about our ancestors. Critical Reviews in Analytical Chemistry, 2020, 50(3): 189－195.

[50] Evershed R P. Experimental approaches to the interpretation of absorbed organic residues in archaeological ceramics. World Archaeology, 2008, 40(1): 26－47.

[51] Craig O E, Steele V J, Fischer A, et al. Ancient lipids reveal continuity in culinary practices across the transition to agriculture in Northern Europe. Proceedings of the National Academy of Sciences, 2011, 108(44): 17910－17915.

[52] Craig O E, Allen R B, Thompson A, et al. Distinguishing wild ruminant lipids by gas chromatography/combustion/isotope ratio mass spectrometry. Rapid Communications in Mass Spectrometry, 2012, 26(19): 2359－2364.

[53] Lucquin A, Gibbs K, Uchiyama J, et al. Ancient lipids document continuity in the use of early hunter‐gatherer pottery through 9000 years of Japanese prehistory. Proceedings of the National Academy of Sciences, 2016, 113(15): 3991－3996.

[54] Dudd S N. Molecular and isotopic characterisation of animal fats in archaeological pottery. Ph. D Dissertation. Bristol: University of Bristol, 1999.

[55] Craig O E, Forster M, Andersen S H, et al. Molecular and isotopic demonstration of the processing of aquatic products in northern European prehistoric pottery. Archaeometry, 2007, 49(1): 135－152.

[56] Shoda S, Lucquin A, Sou C I, et al. Molecular and isotopic evidence for the processing of starchy plants in Early Neolithic pottery from China. Scientific Reports, 2018, 8(1): 17044.

[57] 崔剑锋, 肖红艳, 刘国祥. 从烧烤到炖煮——兴隆沟遗址出土不同时代陶器的制作工艺与使用方式比较研究. 考古学研究, 2022(1): 683－694.

[58] 李文杰, 黄素英. 浅说大溪文化陶器的渗碳工艺. 江汉考古, 1985(4): 46－51.

[59] 张静怡. 岭南地区大湾文化圈足器研究. 硕士学位论文. 兰州: 兰州大学, 2022.

[60] 李仰松. 从瓦族制陶探讨古代陶器制作上的几个问题. 考古, 1959(5): 250－254.

[61] Hao X D, Li L X, Ouyang X H, et al. Coastal morphodynamics and holocene environmental changes in the Pearl River Delta, southern China: New evidence from palynological records. Geomorphology, 2021, 389: 107846.

[62] Xiong H X, Zong Y Q, Qian P, et al. Holocene sea‐level history of the northern coast of South China Sea. Quaternary Science Reviews, 2018, 194: 12－26.

[63] Zong Y Q, Zheng Z, Huang K Y, et al. Changes in sea level, water salinity and wetland habitat linked to the late agricultural development in the Pearl River delta plain of China. Quaternary Science Reviews, 2013, 70: 145－157.

[64] Tang Y J, Zheng Z, Huang K Y, et al. Holocene evolution of the pearl river delta: Mapping integral isobaths and delta progradation. Journal of Marine Science and Engineering, 1986, 11(10): 1986.

[65] 程玲. 珠江三角洲史前海洋聚落宏观形态的变迁. 南方文物, 2015(2): 94－98.

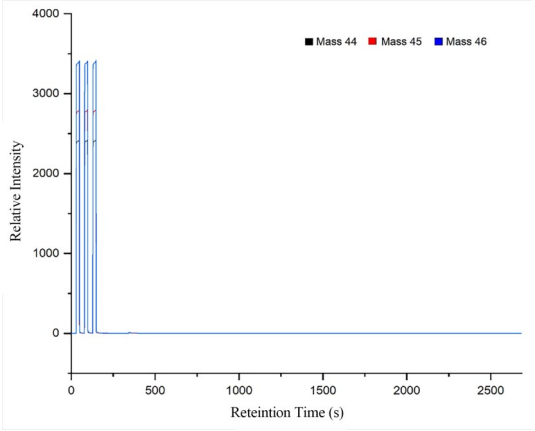
[66] 向安强. 广东史前稻作农业的考古学研究. 农业考古, 2005(1): 149－155.

[67] 夏秀敏, 张萍, 吴妍. 广东珠江三角洲地区茶岭遗址的水稻遗存分析. 第四纪研究, 2019, 39(1): 24－36.

[68] 刘焕，王慧，黄碧雄，等. 广州陂头岭与茶岭遗址浮选炭化植物遗存分析. 文博学刊，2024(2)：22－29.

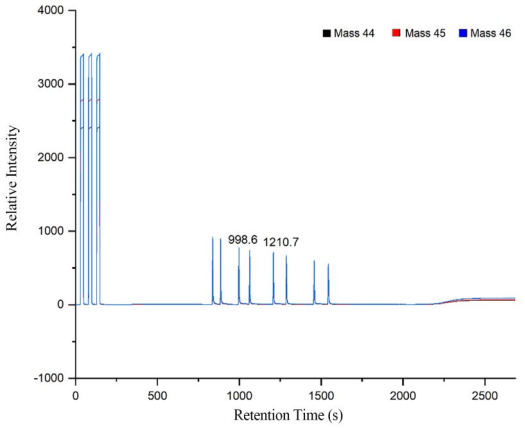
[69] Deng Z H, Huang B X, Zhang Q L, et al. First farmers in the South China coast: New evidence from the Gancaoling site of Guangdong Province. Frontiers in Earth Science, 2022, 10: 858492.

[70] 香港古物古迹办事处，河南省文物考古研究所. 2002年度香港西贡沙下遗址C02区和DⅡ02区考古发掘简报. 华夏考古，2004(4)：3－47，62.



附图1　空白样品的GC-C-IRMS色谱图

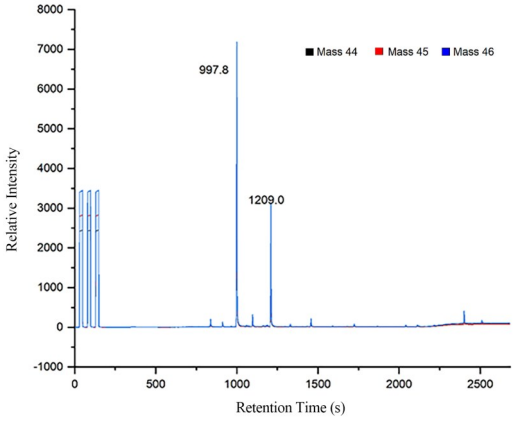
App. Fig. 1　GC - C - IRMS chromatogram of the blank sample



峰从左至右：$C_{14:0}$甲酯、$C_{14:0}$乙酯、$C_{16:0}$甲酯、$C_{16:0}$乙酯、$C_{18:0}$甲酯、$C_{18:0}$乙酯、$C_{20:0}$甲酯、$C_{20:0}$乙酯. 其中，保留时间998.6 s为$C_{16:0}$甲酯，保留时间1210.7 s为$C_{18:0}$甲酯.

附图2　F8-3标准品的GC-C-IRMS色谱图

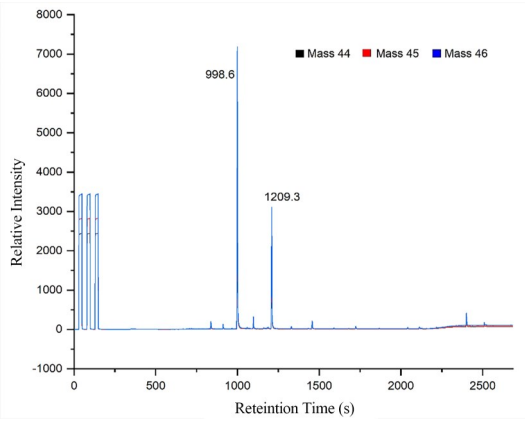
App. Fig. 2　GC-C-IRMS chromatogram of the F8-3



保留时间997.8 s为$C_{16:0}$甲酯，保留时间1209.0 s为$C_{18:0}$甲酯.

附图3　样品TS34的GC-C-IRMS色谱图

App. Fig. 3　GC-C-IRMS chromatogram of the TS34



保留时间998.6 s为$C_{16:0}$甲酯，保留时间1209.3 s为$C_{18:0}$甲酯.

附图4　样品TS02的GC-C-IRMS色谱图

App. Fig. 4　GC-C-IRMS chromatogram of the TS02

附表 台山新村遗址陶器残留物脂质组成及脂肪酸单体碳同位素分析结果

Supplementary table Lipid composition and compound-specific carbon isotope analysis of fatty acids in ceramic residues from the Taishan Xincun site

样品编号	出土位置	部位	器型	年代	$\delta^{13}C_{16:0}$	$\delta^{13}C_{18:0}$	$\Delta^{13}C$	P/S	脂质浓度($\mu g \cdot g^{-1}$)	脂质组成
TS01	TN68W15⑤下H53:1	可见残留物	罐	公元前3500—2470年	−25.9	−25.0	0.9	1.07	404.73	SFA (C_{11}～$C_{24,26}$); Br (15, 17) DA (C_7, C_9); UFA ($C_{22:1}$); Stigmasterol; β-Sitosterol; Stigmasta-5, 24 (28)-dien-3-ol, (3β, 24Z)-; Benzoic acid, 2-(1-oxopropyl)-, methyl ester; Tetradecane, 2, 6, 10-trimethyl-; 2, 4-Di-tert-butylphenol
TS02	08TXTN-13W5⑥:1	可见残留物	罐	公元前3500—2470年	−25.2	−24.6	0.7	1.19	1335.88	SFA (C_{11}～$C_{24,26}$); Br ($C_{13,15,16,18,19}$)DA ($C_{7-10,16,18,22,30}$); UFA ($C_{16:1}$, $C_{18:1}$, $C_{22:1}$, $C_{23:1}$); AL (12, 15—16); β-Sitosterol; Stigmasta-5, 24(28)-dien-3-ol, (3β, 24Z)-; Cholesterol (trace); 10-oxo-$C_{18:0}$; Benzoic acid, 2-(1-oxopropyl)-, methyl ester; Tetradecane, 2, 6, 10-trimethyl-; 2, 4-Di-tert-butylphenol
TS03	TN68W12④下C26	碎片	罐/釜	公元前3500—2470年	−24.5	−25.8	−1.2	1.39	1487.21	SFA(C_{12}～C_{26}); B ($C_{15,18,19}$) DA ($C_{16,18,22}$, C_{30}); UFA ($C_{18:1}$, $C_{20:1}$); Cholest-5-en-3-ol, 24-propylidene-, (3β)-; β-Sitosterol; 10-oxo-$C_{18:0}$; 17-oxo-$C_{18:0}$; 18-oxo-$C_{19:0}$
TS04	TN67W15③下C15	碎片	豆	公元前3500—2470年	−23.9	/	/	1.94	18.26	SFA (C_{12}～$C_{24,26}$); β-Sitosterol; Stigmasta-5, 24 (28)-dien-3-ol, (3β, 24Z)-
TS05	TN65W10⑤	碎片	釜	公元前3500—2470年	−23.3	−20.2	3.1	2.17	69.56	SFA (C_{12}～$C_{24,26}$); Br ($C_{15,17}$) DA ($C_{7,9,16}$); β-Sitosterol
TS06	TN65W10⑤	碎片	釜	公元前3500—2470年	−20.2	−19.6	0.6	1.09	53.25	SFA (C_{12}～$C_{24,26}$); Br (C_{17}); β-Sitosterol; Cholest-5-en-3-ol, 24-propylidene-, (3β)-
TS07	TN69W14⑤下C79:0135	口沿	罐	公元前3500—2470年	−25.7	−26.3	−0.6	1.30	81.45	SFA (C_{12}～$C_{24,26}$); Br (C_{17}); DA (C_{22}); β-Sitosterol; Stigmasta-5, 24 (28)-dien-3-ol, (3β, 24Z)-
TS08	TN70W14⑦	口沿	釜	公元前3500—2470年	−21.9	−22.2	−0.3	1.28	535.29	SFA (C_{12}—C_{26}, C_{28}—C_{30}); Br ($C_{17,19}$); DA ($C_{30,22,18,16}$); β-Sitosterol; 18-oxo-$C_{19:0}$
TS09	TN70W15⑦	碎片	釜	公元前3500—2470年	−23.5	−23.8	−0.4	1.11	1083.13	SFA (C_{12}～C_{24}, C_{26}); DA ($C_{16,18,22,30}$); Br ($C_{17,19}$); UFA ($C_{22:1}$, $C_{18:1}$, $C_{19:1}$)); β-Sitosterol
TS10	TN68W10④下C51	碎片	釜	公元前3500—2470年	−25.3	−26.0	−0.6	1.14	202.12	SFA (C_{12}～C_{26}, C_{28}～C_{30}); UFA($C_{22:1}$); Br(C_{17}); β-Sitosterol; Stigmasta-5, 24 (28)-dien-3-ol, (3β, 24Z)-
TS11	TN68W12④下C26	碎片	釜	公元前3500—2470年	−26.7	−27.0	−0.3	1.18	71.56	SFA (C_{12}～C_{24}, C_{26}, C_{28}～C_{30}); β-Sitosterol; UFA ($C_{22:1}$)
TS12	TN68W13④下C75	口沿	罐	公元前3500—2470年	−23.7	−23.4	0.3	0.69	994.19	SFA (C_{12}, C_{14}～C_{26}); DA ($C_{22,30,18}$); UFA ($C_{22:1}$, $C_{16:1}$, $C_{18:1}$, $C_{19:1}$); Br ($C_{15,17}$); β-Sitosterol; Stigmasta-5, 24(28)-dien-3-ol, (3β, 24Z)-
TS13	TN68W15③下C16:0163	底	圈足盘	公元前3500—2470年	−23.4	−24.5	−1.1	1.60	304.81	SFA (C_{12}～C_{24}, C_{26}); DA ($C_{16,10,9,7}$); UFA ($C_{18:1}$); Br ($C_{15,17}$); β-Sitosterol; Stigmasta-5, 24 (28)-dien-3-ol, (3β, 24Z)-
TS14	TN67W12③下C36	碎片	釜	公元前3500—2470年	−22.6	−22.6	0.0	1.28	355.75	SFA (C_{12}, C_{14}～C_{24}, C_{26}, C_{28}); DA(C_{18}); UFA ($C_{23:1}$, $C_{22:1}$); Br ($C_{19,17,15}$); β-Sitosterol; Stigmasta-5, 24 (28)-dien-3-ol, (3β, 24Z)-

续表

样品编号	出土位置	部位	器型	年代	$\delta^{13}C_{16:0}$	$\delta^{13}C_{18:0}$	$\Delta^{13}C$	P/S	脂质浓度($\mu g \cdot g^{-1}$)	脂质组成
TS15	TN67W12③下C36	碎片	釜	公元前3500—2470年	−25.59	−22.93	2.7	1.11	105.92	SFA (C_{12}~C_{24}, C_{26}); UFA ($C_{22:1}$); β-Sitosterol
TS16	TN67W12③下C36	碎片	釜	公元前3500—2470年	−23.5	−23.0	0.5	1.01	176.98	SFA (C_{12}~C_{24}, C_{26}); Br (C_{17}); β-Sitosterol; Stigmasta-5, 24 (28)-dien-3-ol, (3β, 24Z)-
TS17	TN67W14③下C19	口沿	釜	公元前3500—2470年	−25.12	−25.67	−0.6	1.21	253.17	SFA (C_{12}~C_{24}, C_{26}, C_{28}); UFA ($C_{22:1}$); Br (C_{17}); β-Sitosterol; Stigmasta-5, 24 (28)-dien-3-ol, (3β, 24Z)-;
TS18	TN68W13③下C18:0842	碎片	釜	公元前3500—2470年	−26.1	−26.2	−0.1	1.05	231.76	SFA (C_{12}, C_{14}~C_{26}, C_{28}); UFA ($C_{22:1}$, $C_{16:1}$); DA (C_{16}); Br ($C_{17,15}$); β-Sitosterol; Stigmasta-5, 24 (28)-dien-3-ol, (3β, 24Z)-
TS19	TN68W13④下C75:061	碎片	釜	公元前3500—2470年	−24.38	−24.2	0.2	1.57	402.58	SFA (C_{12}~C_{26}, C_{28}); DA ($C_{30,22,18,16}$); UFA ($C_{23:1}$, $C_{22:1}$); Br ($C_{19,17,15}$); β-Sitosterol; Stigmasta-5, 24 (28)-dien-3-ol, (3β, 24Z)-; 10-oxo-C18:0
TS20	TN67W16④下C56	碎片	釜	公元前3500—2470年	−23.7	−22.48	1.2	1.56	295.95	SFA (C_{12}, C_{14}~C_{26}, C_{28}); UFA ($C_{22:1}$); Br ($C_{19,17}$); β-Sitosterol; Stigmasta-5, 24 (28)-dien-3-ol, (3β, 24Z)-
TS21	TN68W14⑥下C85	碎片	釜	公元前3500—2470年	−22.0	−23.4	−1.3	1.23	822.16	SFA (C_{12}~C_{24}, C_{26}); DA ($C_{30,22,18,16,7-10}$); UFA ($C_{22:1}$); Br ($C_{19,15}$); Cholest-5-en-3-ol, 24-propylidene-, (3β)-; β-Sitosterol; 6-oxo-C18:0; 10-oxo-C18:0; 17-oxo-C18:0
TS22	TN66W14③下C17:0226	碎片	釜	公元前3500—2470年	−23.2	−24.3	−1.1	1.35	899.08	SFA (C_{12}~C_{26}, C_{28}); DA ($C_{30,22,9}$); UFA ($C_{22:1}$); Br ($C_{19,15,17}$); Stigmasta-5, 24 (28)-dien-3-ol, (3β, 24Z)-; 4-oxo-$C_{18:0}$
TS23	TN70W14⑦	口沿	罐	公元前3500—2470年	−24.5	−23.4	1.2	1.35	372.75	SFA (C_{12}, C_{14}~C_{26}, C_{28})
TS24	TN70W14⑦	腹	罐	公元前3500—2470年	−24.5	−24.1	0.4	0.89	220.99	SFA (C_{12}~C_{24}, C_{26}); β-Sitosterol; Stigmasta-5, 24 (28)-dien-3-ol, (3β, 24Z)-; DA ($C_{30,18}$); Br ($C_{19,17}$)
TS25	TN69W13③下C11:0792	底	釜	公元前3500—2470年	−24.0	−23.6	0.4	1.10	29.28	SFA (C_{12}~C_{24}, C_{26}); β-Sitosterol; Stigmasta-5, 24 (28)-dien-3-ol, (3β, 24Z)-; DA (C30, 22,); Br (C_{17}); AL (16)
TS26	TN67W15③下C15	口沿	罐	公元前3500—2470年	−21.2	−20.2	1.0	1.07	62.11	SFA (C_{12}~C_{24}, C_{26}); β-Sitosterol; Stigmasta-5, 24 (28)-dien-3-ol, (3β, 24Z)-
TS27	TN69W15③下C40:0331	腹	釜	公元前3500—2470年	−27.6	−27.89	−0.3	1.43	24.62	SFA (C_{12}~C_{24}, C_{26}); β-Sitosterol; Stigmasta-5, 24 (28)-dien-3-ol, (3β, 24Z)-
TS28	TN69W10③北部	口沿	罐	公元前3500—2470年	/	/	/	1.63	<5	SFA (C_{12}~$C_{16,18-20,23,24}$, C_{26}); β-Sitosterol; Stigmasta-5, 24 (28)-dien-3-ol, (3β, 24Z)-
TS29	TN69W10③北部	口沿	罐	公元前3500—2470年	/	/	/	1.17	<5	SFA (C_{12}~$C_{16,18-20,22-24}$, C_{26}); β-Sitosterol; Stigmasta-5, 24 (28)-dien-3-ol, (3β, 24Z)-
TS30	TN69W10③北部	口沿	罐	公元前3500—2470年	−29.0	−29.0	0.0	1.05	114.87	SFA (C_{12}~C_{24}, C_{26}); DA (C_{30}); β-Sitosterol
TS31	TN69W10③北部	口沿	罐	公元前3500—2470年	/	/	/	1.2	11.13	SFA (C_{12}~C_{24}, C_{26}); β-Sitosterol; Stigmasta-5, 24 (28)-dien-3-ol, (3β, 24Z)-

续表

样品编号	出土位置	部位	器型	年代	$\delta^{13}C_{16:0}$	$\delta^{13}C_{18:0}$	$\Delta^{13}C$	P/S	脂质浓度($\mu g \cdot g^{-1}$)	脂质组成
TS32	TN70W13③下C28	腹	釜	公元前3500—2470年	−21.5	−23.1	−1.5	1.90	47.69	SFA (C_{12}~C_{24}, C_{26}); β-Sitosterol; DA (C_{9}); Br (C_{17}); Stigmasta-5,24 (28)-dien-3-ol,(3β,24Z)-
TS33	TN70W13③下C28	腹	釜	公元前3500—2470年	−24.5	−25.1	−0.6	1.39	1521.04	SFA (C_{12}~C_{26}, C_{28}); DA ($C_{30,22,18,16,9,7}$); UFA ($C_{18:1}$, $C_{22:1}$, $C_{20:1}$, $C_{19:1}$); Br ($C_{19,15}$); Stigmasta-5,24 (28)-dien-3-ol,(3β,24Z)-; β-Sitosterol; 17-oxo-$C_{18:0}$; 14-oxo-$C_{15:0}$
TS34	TN70W13③下C28:0190	口沿	釜	公元前3500—2470年	−24.8	−26.1	−1.3	1.45	1496.85	SFA (C_{12}~C_{26}, C_{28}); β-Sitosterol; DA ($C_{30,22,18,16}$); UFA ($C_{16:1}$, $C_{18:1}$, $C_{19:1}$); Br ($C_{17,19}$); Stigmasta-5,24 (28)-dien-3-ol,(3β,24Z)-; 17-oxo-$C_{18:0}$; 14-oxo-$C_{15:0}$; 18-oxo-$C_{19:0}$
TS35	TN69W13③下C11	腹	罐	公元前3500—2470年	−21.5	−21.6	−0.1	1.31	616.19	SFA (C_{12}~C_{24}, C_{26}); DA ($C_{30,22,18,16}$); UFA ($C_{16:1}$, $C_{18:1}$); Br ($C_{19,17}$); β-Sitosterol; Stigmasterol; Stigmasta-5,24 (28)-dien-3-ol,(3β,24Z)-; 4-oxo-$C_{18:0}$; 6-oxo-$C_{18:0}$
TS36	TN67W10④下C55	口沿	釜	公元前3500—2470年	−25.9	−26.2	−0.3	1.50	26.77	SFA (C_{12}~C_{26}, C_{28}, C_{30}); β-Sitosterol; DA (C_{30}); UFA ($C_{23:1}$); Br (C_{17}); Stigmasta-5,24 (28)-dien-3-ol,(3β,24Z)-
TS37	TN67W10④下C55	腹	釜	公元前3500—2470年	−20.3	−20.1	0.2	0.80	126.39	SFA (C_{12}~C_{24}, C_{26}); DA ($C_{22,16,7}$); Br (C_{19})
TS38	TN65W15④C62	腹	罐	公元前3500—2470年	−21.9	−21.7	0.2	2.29	67.97	SFA (C_{12}~C_{24}, C_{26}); β-Sitosterol; DA ($C_{22,16}$); Br (C_{17}); Stigmasta-5,24 (28)-dien-3-ol,(3β,24Z)-
TS39	TN65W15④C62	腹	罐	公元前3500—2470年	−22.0	−21.9	0.0	1.34	265.12	SFA (C_{12}~C_{24}, C_{26}); β-Sitosterol; DA ($C_{22,18,16}$); Br ($C_{17,19}$); Stigmasta-5,24 (28)-dien-3-ol,(3β,24Z)-; 4-oxo-$C_{18:0}$
TS40	TN65W15④C62	口沿	罐	公元前3500—2470年	−21.4	−21.5	−0.1	1.79	79.37	SFA (C_{12}~C_{24}, C_{26}); β-Sitosterol; DA ($C_{22,18,16,7}$); Br ($C_{17,15}$); Stigmasta-5,24 (28)-dien-3-ol,(3β,24Z)-; 4-oxo-$C_{18:0}$
TS41	TN67W15④下C66:0127	碎片	罐	公元前3500—2470年	/	/	/	1.36	12.68	SFA (C_{12}~C_{24}, C_{26}); β-Sitosterol; Stigmasta-5,24 (28)-dien-3-ol,(3β,24Z)-
TS42	TN69W12⑤	碎片	釜	公元前3500—2470年	−23.24	−25.52	−2.3	1.29	802.40	SFA (C_{12}~C_{24}, C_{26}, C_{28}); UFA ($C_{18:1}$, $C_{19:1}$); DA ($C_{22,18,16}$); Br ($C_{17,15,19}$); 4-oxo-$C_{18:0}$; β-Sitosterol
TS43	TN69W12⑤	碎片	釜	公元前3500—2470年	−19.8	−18.5	1.3	1.21	282.52	SFA (C_{12}~C_{24}, C_{26}); β-Sitosterol; DA ($C_{22,18,16,7,9}$); UFA ($C_{22:1}$); Br ($C_{17,15}$); Stigmasta-5,24 (28)-dien-3-ol,(3β,24Z)-; 6-oxo-$C_{18:0}$
TS44	TN69W15⑤下C73	碎片	罐	公元前3500—2470年	−22.2	−21.2	1.0	2.40	31.18	SFA (C_{12}~C_{23}, C_{26}); DA ($C_{16,7-9}$); AL (16); Stigmasta-5,24 (28)-dien-3-ol,(3β,24Z)-
TS45	TN69W15⑤下C73	碎片	罐	公元前3500—2470年	−20.9	−20.4	0.5	1.74	250.04	SFA (C_{12}~C_{24}, C_{26}, C_{28}); DA ($C_{22,18,16}$); UFA ($C_{23:1}$); Br (C_{17}); Stigmasta-5,24 (28)-dien-3-ol,(3β,24Z)-; 4-oxo-$C_{18:0}$
TS46	TN68W10⑤	碎片	釜	公元前3500—2470年	−22.6	−22.2	0.4	1.18	23.95	SFA (C_{12}~C_{24}, C_{26}, C_{28}); DA (C_{30})
TS47	TN68W10⑤	碎片	釜	公元前3500—2470年	/	−20.8	/	0.39	37.48	SFA (C_{12}~C_{26}, C_{28}); AL (16); DA (C_{30})
TS48	TN68W10⑤	口沿	釜	公元前3500—2470年	/	/	/	1.92	<5	SFA (C_{12-16}, C_{18-24}, C_{26}); β-Sitosterol; Stigmasta-5,24 (28)-dien-3-ol,(3β,24Z)-

续表

样品编号	出土位置	部位	器型	年代	$\delta^{13}C_{16:0}$	$\delta^{13}C_{18:0}$	$\Delta^{13}C$	P/S	脂质浓度（$\mu g \cdot g^{-1}$）	脂质组成
TS49	TN68W11⑤下C23	碎片	罐	公元前3500—2470年	/	/	/	1.07	＜5	SFA (C_{14}～C_{24}, C_{26}); β-Sitosterol; AL (16); Stigmasta-5,24 (28)-dien-3-ol,(3β,24Z)-
TS50	TN65W10⑤	口沿	罐	公元前3500—2470年	/	/	/	1.05	＜5	SFA (C_{14}～C_{26})
TS51	TN69W14⑥下C90	腹	釜	公元前3500—2470年	/	/	/	1.39	＜5	SFA (C_{14}～C_{24}, C_{26}); Br (C_{17})
TS52	TN68W14⑥下C81	腹	釜	公元前3500—2470年	/	/	/	1.01	＜5	SFA (C_{14}～C_{24}, C_{26}); β-Sitosterol; Stigmasta-5,24 (28)-dien-3-ol,(3β,24Z)-
TS53	TN69W14⑥下C90	口沿	釜	公元前3500—2470年	/	/	/	1.07	＜5	SFA (C_{14}～C_{24}, C_{26}); β-Sitosterol; Br (C17); Stigmasta-5,24 (28)-dien-3-ol,(3β,24Z)-
TS54	TN69W14⑤下C90	腹	釜	公元前3500—2470年	−26.1	−24.2	1.9	1.15	63.95	SFA (C_{15}～C_{24}, C_{26}, C_{28}); β-Sitosterol; Br (C19,17); DA (C_{22}); Stigmasta-5,24 (28)-dien-3-ol,(3β,24Z)-
TS55	TN70W14⑦	碎片	罐	公元前3500—2470年	/	/	/	0.6	＜5	SFA (C_{15}～C_{24}, C_{26}); AL (16)
TS56	TN70W14⑦	碎片	罐	公元前3500—2470年	/	−23.7	/	0.26	30.69	SFA ($C_{12,14}$～C_{26}); DA (C_{22}); Br (C_{17})
TS57	TN66W15 H51⑦	碎片	釜	公元前3500—2470年	−23.4	−23.0	0.4	0.68	264.80	SFA ($C_{12,14}$—C_{26}, C_{28}); DA ($C_{30,22,18}$); Br ($C_{17,19}$); 4-oxo-$C_{18:0}$
TS58	TN66W10④下C100	底	罐？	公元前3500—2470年	−23.5	−22.7	0.8	0.80	67.68	SFA ($C_{12,14}$～C_{24}, C_{26}, C_{28}); DA ($C_{22,30}$); UFA ($C_{23:1}$); Br (C_{17}); AL (16); Oxidation products (1,2-OH-$C_{16:0}$; 2,3-OH-$C_{18:0}$); oxo-$C_{28:0}$
TS59	TN65W15④下C62	碎片	钵	公元前3500—2470年	−21.4	−22.9	−1.5	0.49	39.29	SFA (C_{12}～C_{26}, C_{28}); DA ($C_{22,30}$); UFA ($C_{16:1}$); Br (C_{17}); Cholest-5-en-3-ol,24-propylidene-,(3β)-
TS60	TN69W14⑤下C90	底	圈足盘	公元前3500—2470年	−23.1	−25.6	−2.5	0.33	114.23	SFA (C_{12}～C_{26}, C_{28}); DA ($C_{22,30,18}$); UFA ($C_{16:1}$); Br ($C_{19,17}$)

（责任编辑　杨贞）