



X射线CT扫描与三维重建技术在南海北部岩心Core 01中的应用及沉积环境初探

卢亚敏, 苏克凡, 付帆飞, 黄宝琦, 刘乐军, 王 娜

X-ray CT scanning technique and its application to the Core 01 in the northern South China Sea for sedimentary environment reconstruction

LU Yamin, SU Kefan, FU Fanfei, HUANG Baoqi, LIU Lejun, and WANG Na

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16562/j.cnki.0256-1492.2020110901>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

CT扫描方法在东海泥质沉积物孔隙度分析中的应用与对比

Application of X-ray computed tomography to porosity analysis of the along-shelf clinoform deposit in the East China Sea
海洋地质与第四纪地质. 2018, 38(2): 198

“点-线-面-体”三维等时融合技术刻画海底扇沉积微相

Three-dimensional isochronous integration technique for depicting microfacies of submarine fans
海洋地质与第四纪地质. 2020, 40(2): 183

海上X构造浅层“亮点”油气藏识别技术及应用

Recognition technique of “bright spot” and its application to shallow oil & gas accumulations offshore in Structure X
海洋地质与第四纪地质. 2019, 39(6): 207

南海北部陆坡神狐海域GMGS01区块细粒浊积体的识别特征及意义

FINE-GRAINED TURBIDITES IN GMGS01 OF THE SHENHU AREA, NORTHERN SOUTH CHINA SEA AND ITS SIGNIFICANCE
海洋地质与第四纪地质. 2017, 37(5): 131

高分辨率三维海洋反射地震P-cable系统应用进展

PROGRESS OF APPLICATION OF P-CABLE SYSTEM OF 3-D HIGH-RESOLUTION SEISMIC
海洋地质与第四纪地质. 2017, 37(4): 221

粒度端元法在东海内陆架古环境重建中的应用

THE APPLICATION OF GRAIN-SIZE END MEMBER ALGORITHM TO PALEOENVIRONMENTAL RECONSTRUCTION ON INNER SHELF OF EAST CHINA SEA
海洋地质与第四纪地质. 2017, 37(3): 187



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

DOI: 10.16562/j.cnki.0256-1492.2020110901

X 射线 CT 扫描与三维重建技术在南海北部岩心 Core 01 中的应用及沉积环境初探

卢亚敏¹, 苏克凡¹, 付帆飞², 黄宝琦¹, 刘乐军³, 王娜⁴

1. 北京大学地球与空间科学学院, 北京 100871

2. University of Tulsa, Tulsa 74104

3. 自然资源部第一海洋研究所, 青岛 266061

4. 北京大学深圳研究生院城市规划与设计学院, 深圳 518055

摘要: 随着技术的不断进步, X 射线 CT 扫描与三维重建技术在地质学研究中的应用越来越广泛, 但在深海岩心的分析中应用依然有限。对南海北部陆坡岩心柱 Core 01 进行全样岩心 X 射线 CT 扫描, 将扫描图像导入三维建模软件 Mimics, 进行岩心内部结构的三维重建, 恢复了该岩心中 0~1.0 m 的孔隙结构及 4.2 m 处的生物化石壳体的外部形态。重建结果表明 X 射线 CT 扫描在深海岩心的研究中具有可行性。此外, 结合浮游有孔虫 AMS ¹⁴C 测年、底栖有孔虫氧碳同位素结果以及此站位的地质背景, 推断该岩心中孔隙的形成可能与该区天然气水合物的释放有关。

关键词: X 射线; CT 扫描; 三维重建; 岩心

中图分类号: P736.2 **文献标识码:** A

X-ray CT scanning technique and its application to the Core 01 in the northern South China Sea for sedimentary environment reconstruction

LU Yamin¹, SU Kefan¹, FU Fanfei², HUANG Baoqi¹, LIU Lejun³, WANG Na⁴

1. School of Earth and Space Sciences, Peking University, Beijing 100871, China

2. University of Tulsa, Tulsa 74104, USA

3. The First Institute of Oceanography, Ministry of Natural Resources, Qingdao 266061, China

4. School of Urban Planning and Design, Peking University Shenzhen Graduate School, Shenzhen 518055, China

Abstract: X-ray CT scanning and three-dimension reconstruction techniques are widely used in geological research nowadays. However, their application to deep sea sediment cores remains rare. In this study, a deep-sea core labeled Core 01 taken from the northern South China Sea was subjected to a full core X-ray CT scan. The images were imputed into Mimics, a three-dimensional modeling software, to carry out 3D reconstruction of the internal structures of the core, which includes the pore structures at 0~1.0 m and the external shape of fossils at 4.2 m. The results confirmed that X-ray CT scan is feasible for study of deep sea sediment cores. In addition, in combination with the AMS ¹⁴C dating data of planktonic foraminifera, the oxygen carbon stable isotope results of benthic foraminifera, and the geological background of this region, it is inferred that the formation of pores in the sediment core may be related to the release of natural gas hydrates.

Key words: X-ray; CT scan; three-dimension reconstruction; sediment core

CT (computerized tomography), 即计算机断层成像, 指在不破坏物体结构的前提下, 根据物体周边所获取的某种物理量 (如波速、X 射线光强、电子束强等) 的投影数据, 运用一定的数学方法, 通过计算机处理重建物体特定层面上的二维图像, 以及依据一系列上述二维图像构成三维图像的技术。1969 年,

英国工程师 Hounfield 最早设计了电子计算机断层成像装置, 并于 1972 年将这一成果在放射学年会上公布, 从此带来了医学图像上的革命^[1]。X 射线 CT 扫描 (X-ray computerized tomography), 即 X 射线计算机断层扫描系统, 是计算机图像处理与 X 射线体层扫描技术相结合的产物, 其基本原理是当 X 射线

资助项目: 广东省基础与应用基础研究基金“晚上新世—早更新世亚南极太平洋海区古环流演化”(2019A1515110896)

作者简介: 卢亚敏 (1998—), 女, 硕士研究生, 主要从事古生物与地层学研究, E-mail: luyamin@pku.edu.cn

收稿日期: 2020-11-09; 改回日期: 2020-12-18. 蔡秋蓉编辑

穿过被探测物体时,对一定厚度的层面进行扫描,利用物体内部不同组分对X射线的吸收不同,将被测物体划分为众多的立方体小块(体素)。当X射线穿过选定层面时,沿该方向排列的各体素均在一定程度上吸收一部分X射线,比较入射前后X射线的强度变化可以获得截面上的所有体素沿该方向衰减值的总和。通过不同方向上的多次扫描可以检测不同方向穿过体层后具有不同衰减系数的X射线投影序列,再利用Radon变换,即已知所有入射角 θ 的投影函数 $u(P,\theta)$ 可以恢复唯一的图像函数 $f(x,y)$,进行重建便可得到原始投影数据的二维数据^[2]。

三维重建(three-dimension reconstruction),是指对三维物体建立适合计算机表示和处理的数学模型。目前,根据所使用硬件的不同,在计算机内生成物体三维模型的方法共有以下四种:①根据三维物体的断面所得的二维图像提取轮廓,然后根据一定的原则进行相邻两个轮廓的链接和三角化,从而得到物体表面形状。该类方法主要用于对物体内部结构进行拓扑可视化,比如医学影像的三维重建,深埋管道器件的外部检测等,而这也是本次研究进行三维重建的方法;②使用探针和激光读数器逐点获取数据,然后进行整体三角化。此类方法测量精确,但速度较慢,很难在较短时间内获得相对较多的数据,效率不高;③基于双目视觉进行重建,但深度数据计算精度较低,主要应用于机器人视觉领域;④应用硬件光学三维扫描仪主动获得物体的点云数据,然后进行重建获得物体的整体表面信息^[3]。

CT扫描与三维重建技术被广泛应用于生物学、材料科学、建筑学等研究领域,且于20世纪80年代首次被Conroy和Vannier用于古生物化石的研究^[4]。近30年来,CT扫描设备与三维重建技术发展迅猛,在地质体及古生物化石研究中的应用越来越广泛。如Zollikofer等^[5]用CT扫描了距今约30 ka的尼安德特人St. Ce'saire的头骨化石,复原出了较为完整的古人类头骨模型;牛永斌等^[6]利用3D Max和Cosmoworlds三维建模软件恢复了遗迹化石Chondrites的三维立体形态,并使用模型浏览器对完成的模型进行加载得到其三维图像,并为小尺度地质体三维建模研究提供了一种新的技术手段;星耀武等^[7]在中国古植物学研究中首次利用X射线CT扫描技术,并结合三维重建观察云南晚中新世松属球果化石的内部结构,证明了CT扫描技术可以在不破坏标本的前提下观察植物化石的内部结构,对于较珍贵的化石研究作用尤为明显;丁

奕等^[8]利用Mimics软件获得了遗迹化石Chondrites的三维视图,并对其进行了距离、角度等的测量,使内生遗迹化石三维形态的高精度重建成为可能。

在沉积环境的研究中,往往采用地震测井数据与沉积物取心相结合的方法,因此,岩心中包含的地下地层、含矿情况等信息至关重要。而以往岩石孔隙度测定所使用的水银置换法、液体饱和法等,都需要对岩心柱进行碎样或切割,不但破坏了岩心结构,而且可能遗漏了岩心中保留的其他重要信息。相较于其他方法,CT扫描对于建立岩石微观孔隙结构并进行定量研究具有极大的优越性,因此,该方法在石油工业及碳酸岩类岩心的试验中已有广泛应用^[9]。此外,徐宗恒等^[10]利用CT扫描对两个取自天然斜坡方形原状土柱进行扫描、分析、三维重建,研究了柱状样中大孔隙在空间分布的连通性、分支性和复杂性,为植被发育斜坡土体的渗流等物理特性研究提供了理论依据。王刚等^[11]通过CT扫描及三维重建技术,有效地研究了煤层的孔裂隙结构特征,提出了煤的孔裂隙结构定量表征的方法,并建立了煤的三维孔裂隙结构模型和具有拓补结构的孔隙网络简化模型。另外,CT扫描也为沉积孔隙中水合物微观分布的直接观测提供了可能途径,Jin等^[12]采用了微型X射线CT在-100℃条件下获取了沉积物中游离气、“水合物+冰”及沙粒的空间分布位置。胡高伟等^[13]在高分辨率工业型X射线层析扫描仪上研制了适用于沉积物中水合物微观赋存状态研究的CT原位探测装置,可通过模拟天然气水合物生成、分解过程,直接观测水合物在沉积孔隙中的微观分布特征。李成峰等^[14]通过X射线CT和SEM在线观测了水合物在有孔虫壳体内壁附着的模式生长这一特征,为南海水合物成藏机理和储层物性参数研究提供了依据。

由于取样技术及采样条件的限制,海洋沉积物的柱状样品更为宝贵。如果在进行沉积物物理、化学及生物学特征研究之前,能够利用X射线CT扫描技术对深海岩心的整体沉积结构及内部特征进行无创恢复,其结果将是沉积学及古环境学研究的重要补充。实际上在ODP(Ocean Drilling Program,大洋钻探计划)和IODP(International Ocean Discovery Program,国际大洋发现计划)中,X射线CT扫描已经是常规的岩心分析手段,但许多研究多将其作为一种成像工具,用于观察和描述岩心样品^[15-16],并提供相关物理性质的信息^[17]。Tanaka等^[18]通过质量体积法获得的堆积密度,与基于X射线CT扫描的线性衰减系数的估计密度进行比较,提出可通过

CT 数据深入了解岩心的密度变化。鲜有研究者通过此方法重建岩心的三维立体模型,以获得沉积结构等在岩心内部的空间展布情况。因此,本研究尝试利用 X 射线 CT 扫描技术,对南海北部岩心 Core 01 进行三维恢复,并结合 AMS ¹⁴C 测年数据及氧碳同位素数据分析其沉积环境。

1 材料与方法

本次研究的岩心 Core 01 为 2017 年 6 月国家海洋局“向阳红 01”号调查船海试期航次在南海北部陆坡利用重力柱取得。该站位于 17°25.8782'N、110°46.1711'E(图 1),水深 1 602 m,沉积物总长度 4.3 m。在山东大学齐鲁医院完成 X 射线 CT 扫描后,Core 01 柱状样运回到位于青岛的自然资源部第一海洋研究所,剖开后对沉积物剖面进行了详细的沉积学描述。

本次研究中扫描所用仪器为分辨率 1 mm 的双源 CT。在双源模式下,CT 仪器有两套数据采集与重建系统并行工作,独立发射、接收射线并完成图像处理,在重建图像时可选择得到两组独立图像或一组融合图像,前者与普通单源扫描无异,后者提高了时间分辨率,主要用于对时间分辨率要求较高的扫描工作。山东大学齐鲁医院用于 Core 01 扫描的仪器为德国西门子公司双源 CT 扫描仪(SOMATOM

DEFINATION),进行岩心扫描时设置扫描电流为 20 mAs,电压为 120 kV。设置完参数以后,将岩心柱顶部朝向 CT 扫描架的方向推入 X-射线管和探测器之间,启动扫描,扫描时长为 90~120 min。放射源发出的 X 射线穿透岩心柱以后,会引起放射线强度、速度和频率的改变。不同物质对 X 射线的吸收不同,因此,投影出来的亮度也不同。在 CT 切片中可以根据亮度(CT 值)将各物质区分开,物质的 CT 值越高,表征物质密度越高。X 射线数据的变化可通过探测器检测得到,并形成投影;经过旋转射线源,就可以得到一系列不同深度处的岩心柱 CT 切片,本次扫描每段岩心共得到 500 个切片图像。

利用三维重建软件,将得到的切片图像数据导入三维空间内,在空间里将每一个坐标点处用 X 射线 CT 扫描所记录到的数据进行填充,赋予颜色、透明度等信息就可以将岩心柱进行三维重建。本次研究中采用的三维重建软件为 Mimics 19.0。操作过程中,首先将扫描获得的 DICOM 格式图像文件导入至 Mimics 19.0 中进行可视化分析,重复导入操作后即可获得 Core 01 岩心的 CT 灰度图像(图 2b)。随后进行的重建工作包括阈值调整、区域增长、蒙版编辑、蒙版三维计算:

- (1)通过调整密度阈值选择处理目标范围,由于物体密度与 CT 图灰度正相关,即密度越大在 CT 灰度图中越明亮,可通过灰度差异区分出不同区域,同时可通过调整灰度对比度以突出区域间差异;
- (2)使用区域增长功能初步隔离出目标物体所对应的拥有特定密度的连续区域;
- (3)使用蒙版编辑功能对所选区域进行细调,获得目标区域;

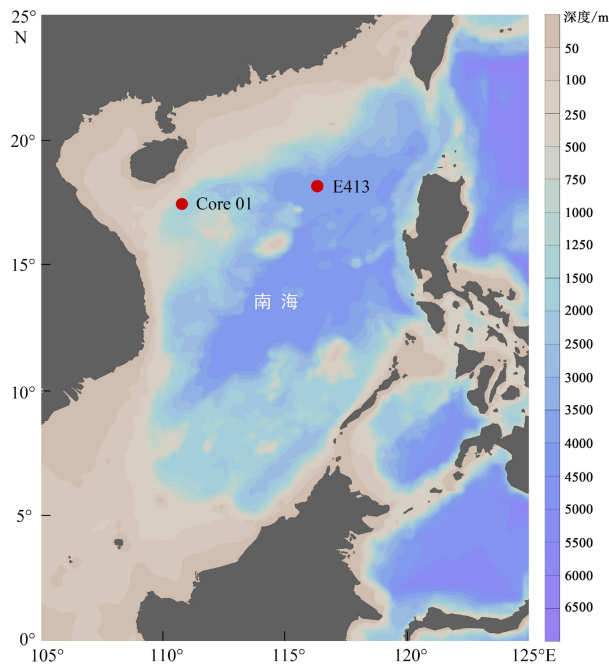


图 1 Core 01 采样位置及本文中涉及的站位 E413
Fig.1 Location of Core 01 and station E413 involved in this research

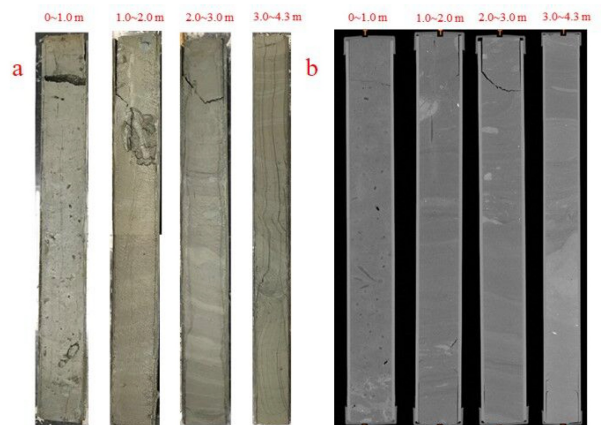


图 2 Core 01 岩心的剖面图及灰度示意图
a. 剖面图, b. CT 灰度示意图。

Fig.2 Profile and CT gray scale images of Core 01
a. profile, b. CT gray scale images.

(4)使用蒙版三维计算对目标区域进行三维重建,最终得到三维图像。

此外,为了更好地解读三维重建得到的沉积结构特征,根据岩心情况,本次研究还采集了沉积物样品,每个样品体积约为10 mL。样品均按照微体古生物学研究方法进行处理,对0.82、2.24、4.04 m的3个样品中的浮游有孔虫(*Globigerinoides ruber*及无袋型 *Trilobatus sacculifer*)进行了AMS ^{14}C 测年;在0.02和0.82 m两个样品中分别挑选足够量的底栖有孔虫表生种 *Cibicidoides wuellerstorfi*及内生种 *Uvigerina peregrina*进行稳定氧碳同位素测定。样品的冲洗工作在北京大学地球与空间科学学院第四纪实验室完成;有孔虫AMS ^{14}C 的测定由Beta实验室完成,得到的年龄数据利用Marine13进行校正;氧、碳稳定同位素测试在同济大学海洋地质国家重点实验室完成,所用仪器为MAT253,采用PDB标准,分析精度为0.1‰。

2 结果

Core 01岩心柱的剖面图如图2a所示,岩心柱总长4.3 m,直径约为10.5 cm,以粉砂为主,颜色呈浅灰绿色,含水量较高。其中0~1.0 m多处具有直径约0.3~0.5 cm孔隙,且可见贝壳残块;1.0~2.0 m及2.0~3.0 m可见致密的绿色团块及浅色条带,且2.0~3.0 m段出现灰绿色纹层及生物碎屑;3.0~4.3 m可见纹路扰动现象、倾斜纹层、棕褐色有机质颗粒及生物碎屑。获得的Core 01 CT灰度图像(图2b)为沿其横截面某一直径的纵剖面图,通过更改选择

的方向,可获得岩心柱不同角度纵剖面的灰度图。与剖开的岩心剖面对比,CT灰度图可以更加清楚地看到0~1.0 m中的孔隙及沉积层理、结构的变化。此外,在处理CT图像时,还发现岩心约4.2 m处出现灰度极高(近乎纯白)的区域,即代表此处密度极大,但这一特征并未在岩心剖面上显示。水的CT值为0 HU,空气的CT值为-1 000 HU。本次扫描岩心的CT值范围为-1 023~3 042 HU。其中0~1.0 m中孔隙的CT值范围为-1 023~148 HU,3.0~4.3 m中密度极大区域的CT值范围为1 708~3 042 HU。为探讨这两处结构形成的具体原因,本次研究尝试对该两处进行三维重建,以获得更加详细的沉积结构特征。

管状孔隙集中出现于Core 01岩心0~1.0 m段,在实际剖面上因被切割方位不同而呈椭圆形、近圆形及长条状,部分孔隙含水。CT灰度图中所显示孔隙形态与岩心实际观察结果基本吻合,同时CT值显示其具有极低密度。本文选取了Core 01岩心0.38~0.58 m段(图3a)进行三维重建,发现这一区域的孔隙呈无统一定向的长条管状,从不同角度观察,有些长管相互链接成枝状,与岩心剖面对比可更清楚地揭示孔隙在岩心内部的形状、延展及分布情况(图3b, c)。

Core 01约4.2 m深度处高密度区域三维重建结果显示,该实体整体呈扁锥状,表面粗糙不平,在其面积较小的两处端面可见似螺旋状结构(图4),据此推断为一枚生物壳体,可能为软体动物中的腹足类。由此可见,在CT扫描的三维重建中,可以恢复剖面上观察不到、但是存在于岩心内部的更多化石

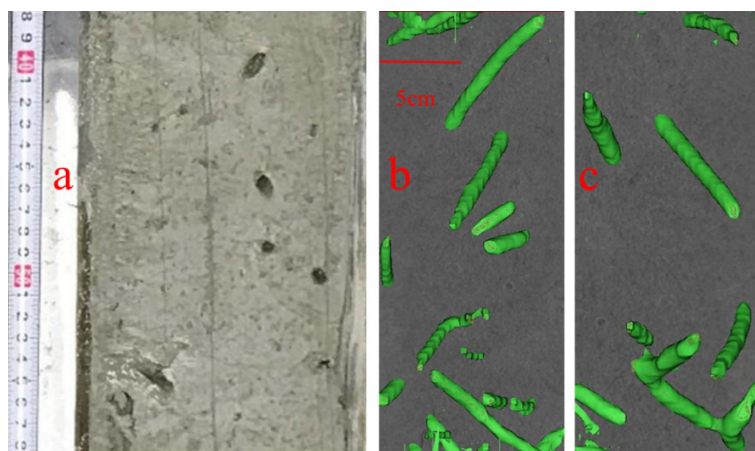


图3 Core 01岩心0.38~0.58 m段剖面图及孔隙的三维重建模型
a. 剖面图, b-c. 不同方位视角下的孔隙三维重建模型。

Fig.3 Profile and 3D model of pores in section 0.38~0.58 m, Core 01
a. profile, b-c. 3D model of pores from different perspectives.

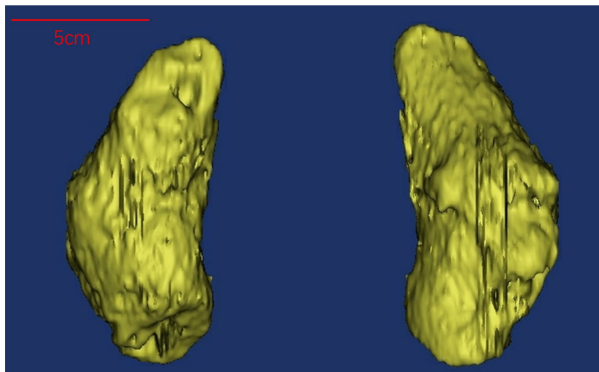


图 4 不同方位视角下 Core 01 岩心 4.2 m 处碳酸盐化石三维重建模型

Fig. 4 3D model of the carbonate fossil from different perspectives at 4.2 m, Core 01

及其他沉积特征,这也是三维重建的优势所在。

AMS ^{14}C 测年得到 0.82 m 处年龄为 6.920 ka, 2.24 m 处年龄为 15.320 ka, 该孔的底部(4.04 m)年龄大于 43.5 ka。0.02 和 0.82 m 底栖有孔虫表生种 *C. wuellerstorfi* 的氧同位素分别为 2.73‰、2.72‰, 碳同位素分别为 0.30‰、0.21‰; 底栖有孔虫内生种 *U. peregrina* 的氧同位素分别为 2.57‰、3.34‰, 碳同位素分别为 -2.75‰、-0.25‰。

3 讨论

3.1 Core 01 岩心 0~1.0 m 沉积环境的分析

在 Core 01 岩心 0~1.0 m 的三维恢复中,发现大量的枝状、长管状结构。尽管由于 CT 扫描分辨率的限制,看不到孔隙壁更加微细的结构,无法判断是否为生物钻孔,但在剖样时发现该段岩心含水量较高,未发现活体生物或者生物化石。根据该研究区的地震剖面,该柱状样位于一滑塌层上(图 5)。前人研究认为西沙海槽受断裂构造作用影响,海底发育张性断层,许多断层延伸至第四纪沉积的浅层地层^[19],具有良好的天然气水合物气源形成条件与排放通道。尹希杰等^[20]在南海北部西沙海槽探测到了明显的甲烷浓度异常,其中, E413 站位(18.00°N、116.49°E)(图 1)在水深 1 750、1 900 和 2 050 m 的底层水中出现甲烷异常。陈忠等^[21]在西沙海槽西北坡采集到作为甲烷冷泉活动证据的冷泉碳酸盐结壳颗粒,并结合地球物理数据等,认为甲烷流体的排溢与天然气水合物的分解有关,其地点位于 Core 01 北部约 800 m 处。基于前人的研究结果,结合 Core 01 站位的地质背景,该站位 0~1.0 m 中的长条管状、分枝状的孔隙可能与该区海底天然气水合

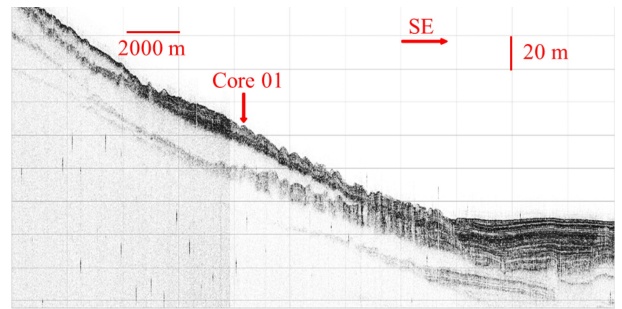


图 5 东南海域共享航次地震剖面图

Fig. 5 Seismic profile of the joint cruise in Qiongdongnan area.

物释放造成的甲烷渗漏有关。

甲烷渗漏中自生碳酸盐沉淀常见于全球海底,该过程涉及甲烷的厌氧氧化(AOM, anaerobic oxidation of methane)与硫酸盐还原(SR, sulfate reduction)。海底沉积物中甲烷释放使孔隙水碱度增加,有利于自生碳酸盐的沉淀,释放出的甲烷气体与孔隙水中的硫酸根发生反应^[22]:



甲烷中的碳同位素远远低于正常底层海水中溶解无机碳的碳同位素值,甲烷厌氧氧化与硫酸盐还原的过程会使洋底沉积物孔隙水乃至底层水中的溶解无机碳中的碳同位素偏负,这一影响会被生活在沉积物表面及浅层沉积物中的底栖有孔虫记录,表现为壳体 $\delta^{13}\text{C}$ 值较其正常值偏负。同时,水合物的分解会使周围水体富集 ^{18}O , 进而使底栖有孔虫壳体的 $\delta^{18}\text{O}$ 值偏正^[23-24]。

底栖有孔虫 *C. wuellerstorfi* 为表生种,其壳体氧碳同位素主要记录了底层海水的氧碳同位素值,而 *U. peregrina* 为内生种,其壳体同位素记录了孔隙水的氧碳同位素值。南海北部约 1 500 m 表层沉积物中底栖有孔虫 *C. wuellerstorfi* 的 $\delta^{18}\text{O}$ 值约为 2.37‰~2.62‰, $\delta^{13}\text{C}$ 值约为 0.18‰~0.27‰; *U. peregrina* 的 $\delta^{18}\text{O}$ 值约为 1.73‰~1.98‰, $\delta^{13}\text{C}$ 值约为 1.08‰~1.17‰^[25-26]。Core 01 岩心 0.02 与 0.82 m 处 *C. wuellerstorfi* 的 $\delta^{18}\text{O}$ 值分别为 2.73‰和 2.72‰,与南海相同水深该种的氧同位素值相比略偏正; $\delta^{13}\text{C}$ 值(0.30‰和 0.21‰)与南海相同水深该种的碳同位素值无明显差别。而 *U. peregrina* 的 $\delta^{18}\text{O}$ 值(2.57‰和 3.34‰)明显偏正; $\delta^{13}\text{C}$ 值(-2.75‰和 -0.25‰)明显偏负,这与前人研究认为的甲烷渗透背景下底栖有孔虫壳体 *U. peregrina* 碳同位素存在约 0~-6‰ 的负偏相一致^[27]。由此,我们推断 Core 01 岩心附近区域全新世以来可能存在水合物分解释放过程,进而形成了 0~1.0 m 沉积物中的长条管状、分枝状的孔隙。

3.2 X射线CT扫描及三维重建的意义

海洋沉积物保存了较长时间的连续沉积记录,蕴含着丰富的环境变化信息,但取样成本和技术要求较高,同时受到岩心直径的影响,沉积物体积有限,样品更显宝贵。对于深海岩心,往往需要将其纵向剖开后进行沉积物岩性、粒度、颜色、沉积结构、构造等描述,鲜有研究者使用X射线CT扫描及三维重建技术恢复沉积物内部结构特征。在一些特殊的沉积环境中,如果沉积物中含有大量孔隙,在剖开的过程中可能会使孔隙中的水分丢失或者气体释放,从而影响沉积特征。此外,在剖面中,观察者只能描述沉积结构的二维特征,无法判断该沉积结构在沉积物中的三维展布,对于未在剖面上显示的沉积特征更加无能为力,而X射线CT扫描及三维重建技术可以为此提供更多的沉积学信息。

Core 01 岩心 0~1.0 m 剖面中可见多孔隙分布,但这些孔隙三维形态及其在沉积物中的分布及其展布规律无法从剖面图中获得。通过对 0.38~0.58 m 沉积物 X 射线 CT 扫描图像的三维重建,发现剖面上显示的孔隙实际为无定向的长条管状结构,从不同角度观察,其中有些长管相互链接,呈枝状结构。三维重建的结果有助于对孔隙形成机制的讨论。此外本研究还对 Core 01 CT 灰度图中显示的 4.2 m 处密度异常高的部分进行了三维重建,发现此处的密度异常是由一个腹足类的化石造成,而该化石并未在剖面上出露。

总之,X射线CT扫描技术可以在不破坏岩心的前提下研究其内部结构,可以获得常规剖面描述中不能观察到的沉积结构和特征,具有较好的应用前景,为深海岩心的研究提供了新的思路与方法。另外,根据研究要求,可以选用不同分辨率的CT扫描仪器。在Core 01剖面上还可见多处沉积扰动现象,由于本次扫描分辨率的限制,我们无法恢复其三维展布情况。但显微X射线CT精度可达1微米级别^[28],理论上可以重建岩心内部更精细的结构特征。常规的医用及工业CT设备能提供的均为吸收衬度CT图像,即通过探测样品不同部分对X射线的吸收程度来反演其三维结构。因此只有具有不同物质组成的成像对象,对X射线吸收程度不同,才能获取有效的结构信息。且受低衬度与低信噪比的影响,实际获得图像的空间分辨率要低于探测器的理论值。而同步辐射X射线相位衬度显微镜断层成像技术其原理为相位衬度成像,使得密度相差较小的样品也能获得高精度的图像,可以为组成

较均一的岩心提供更好的三维无损成像解决方案^[29]。

4 结论

(1) X射线CT扫描及三维重建可以揭示出岩心内部的微细结构及沉积特征,为深海沉积学研究提供了新的方法和手段。

(2) 借助这一手段,本研究恢复了Core 01岩心柱0~1.0 m的孔隙三维结构及4.2 m处的生物化石壳体的外部形态,结合浮游有孔虫AMS ¹⁴C测年、底栖有孔虫氧碳同位素结果,以及该站位的地质背景,推断该岩心0~1.0 m孔隙的形成可能与该区天然气水合物的释放有关。

(3) 随着X射线CT扫描在地质学研究中得到更加广泛的应用,将会带来更为准确的沉积环境的恢复结果。

参考文献 (References)

- [1] 陈世杰, 赵淑萍, 马巍, 等. 利用CT扫描技术进行冻土研究的现状和展望[J]. *冰川冻土*, 2013, 35(1): 193-200. [CHEN Shijie, ZHAO Shuping, MA Wei, et al. Studying frozen soil with CT technology: Present studies and prospects [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2013, 35(1): 193-200.]
- [2] 李承峰, 胡高伟, 刘昌岭, 等. X射线计算机断层扫描在天然气水合物研究中的应用[J]. *热带海洋学报*, 2012, 31(5): 93-99. [LI Chengfeng, HU Gaowei, LIU Changling, et al. Application of X-Ray computed tomography in natural gas hydrate research [J]. *Journal of Tropical Oceanography*, 2012, 31(5): 93-99.]
- [3] 高剑. 三维重建应用系统研究[D]. 山东大学博士学位论文, 2009. [GAO Jian. Research on 3D reconstruction application system [D]. Doctor Dissertation of Shandong University, 2009.]
- [4] Conroy G C, Vannier M W. Noninvasive three-dimensional computer imaging of Matrix-Filled fossil skulls by high-resolution computed tomography [J]. *Science*, 1984, 226(4673): 456-458.
- [5] Zollikofer C P E, de León M S P, Vandermeersch B, et al. Evidence for interpersonal violence in the St. Césaire Neanderthal [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2002, 99(9): 6444-6448.
- [6] 牛永斌, 钟建华, 胡斌. 小尺度地质体三维建模研究——以遗迹化石 Chondrites和岩心三维建模为例[J]. *古地理学报*, 2008, 10(2): 207-214. [NIU Yongbin, ZHONG Jianhua, HU Bin. Research of 3D Modeling on small-scale geologic body - taking 3D modeling on trace fossil Chondrites and drilling core as an example [J]. *Journal of Palaeogeography*, 2008, 10(2): 207-214.]
- [7] 星耀武, 刘裕生, 苏涛, 等. X-射线CT扫描技术在中新世松属球果化石研究中的应用[J]. *古生物学报*, 2010, 49(1): 133-137. [XING Yaowu, LIU Yusheng, SU Tao, et al. Application of the X-ray CT scanning technique on a late Miocene pine cone from Yunnan,

- China [J]. *Acta Palaeontologica Sinica*, 2010, 49(1): 133-137.]
- [8] 丁奕, 时敏敏, 刘祎楠. 遗迹化石三维重建研究新进展[J]. 地层学杂志, 2016, 40(4): 401-410. [DING Yi, SHI Minmin, LIU Yinan. New advances in the three-dimensional reconstruction of trace fossils [J]. *Journal of Stratigraphy*, 2016, 40(4): 401-410.]
- [9] 潘汝江, 何翔, 肖维民, 等. CT扫描技术在岩心三维重建中的应用[J]. CT理论与应用研究, 2018, 27(3): 349-356. [Pan Rujing, He Xiang, XIAO Weimin, et al. Application of CT scanning technique in core 3D reconstruction [J]. *CT Theory and Applications*, 2018, 27(3): 349-356.]
- [10] 徐宗恒, 徐则民, 李凌旭. 基于CT扫描的斜坡非饱和和带土体大孔隙量化研究和三维重建[J]. 水土保持通报, 2015, 35(1): 133-138. [XU Zongheng, XU Zemin, LI Lingxu. Soil macropores quantification study and 3D reconstruction in Vadose Zones of hillslope based on X-ray computed tomography [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2015, 35(1): 133-138.]
- [11] 王刚, 沈俊男, 褚翔宇, 等. 基于CT三维重建的高阶煤孔隙裂隙结构综合表征和分析[J]. 煤炭学报, 2017, 42(8): 2074-2080. [WANG Gang, SHEN Junnan, CHU Xiangyu, et al. Characterization and analysis of pores and fissures of high-rank coal based on CT three-dimensional reconstruction [J]. *Journal of China Coal Society*, 2017, 42(8): 2074-2080.]
- [12] Jin S, Takeya S, Hayashi J, et al. Structure analyses of artificial methane hydrate sediments by microfocus X-ray computed tomography [J]. *Japanese Journal of Applied Physics*, 2004, 43(8R): 5673-5675.
- [13] 胡高伟, 李承峰, 业渝光, 等. 沉积物孔隙空间天然气水合物微观分布观测[J]. 地球物理学报, 2014, 57(5): 1675-1682. [HU Gaowei, LI Chengfeng, YE Yuguang, et al. Observation of gas hydrate distribution in sediment pore space [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2014, 57(5): 1675-1682.]
- [14] 李承峰, 胡高伟, 张巍, 等. 有孔虫对南海神狐海域细粒沉积层中天然气水合物形成及赋存特征的影响[J]. 中国科学: 地球科学, 2016, 59(11): 2223-2230. [LI Chengfeng, HU Gaowei, ZHANG Wei, et al. Influence of foraminifera on formation and occurrence characteristics of natural gas hydrates in fine-grained sediments from Shenhu area, South China Sea [J]. *Science China Earth Sciences*, 2016, 59(11): 2223-2230.]
- [15] Ashi J. Computed tomography scan image analysis of sediments[C]// *Proceeding of the Ocean Drilling Program. Scientific Results. College Station, TX: Ocean Drilling Program, 1997, 156: 151-159.*
- [16] Tanaka A, Nakano T. Data report: three-dimensional observation and quantification of internal structure of sediment core from Challenger Mound area in the Porcupine Seabight off western Ireland using a medical X-ray CT[C]// *Proceeding of IODP, 307. Washington, DC: Integrated Ocean Drilling Program Management International, Inc., 2009.*
- [17] Orsi T H, Edwards C M, Anderson A L. X-ray computed tomography: a nondestructive method for quantitative analysis of sediment cores [J]. *Journal of Sedimentary Research*, 1994, 64: 690-693.
- [18] Tanaka A, Nakano T, Ikehara K. X-ray computerized tomography analysis and density estimation using a sediment core from the Challenger Mound area in the Porcupine Seabight, off Western Ireland [J]. *Earth, Planets and Space*, 2011, 63(2): 103-110.
- [19] 王宏语, 孙春岩, 张洪波, 等. 西沙海槽潜在天然气水合物成因及形成地质模式[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2005, 25(4): 85-91. [WANG Hongyu, SUN Chunyan, ZHANG Hongbo, et al. Origin and genetic model of potential gas hydrates in Xisha trough, South China Sea [J]. *Marine Geology and Quaternary Geology*, 2005, 25(4): 85-91.]
- [20] 尹希杰, 周怀阳, 杨群慧, 等. 南海北部甲烷渗漏活动存在的证据: 近底层海水甲烷高浓度异常[J]. 海洋学报, 2008, 30(6): 69-75. [YIN Xijie, ZHOU Huaiyang, YANG Qunhui, et al. The evidence for the existence of methane seepages in the northern South China Sea: abnormal high methane concentration in bottom waters [J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2008, 30(6): 69-75.]
- [21] 陈忠, 黄奇瑞, 颜文, 等. 南海西沙海槽的碳酸盐结壳及其对甲烷冷泉活动的指示意义[J]. 热带海洋学报, 2007, 26(2): 26-33. [CHEN Zhong, HUANG Qiyu, YAN Wen, et al. Authigenic carbonates as evidence for seeping fluids in Xisha trough of South China Sea [J]. *Journal of Tropical Oceanography*, 2007, 26(2): 26-33.]
- [22] Yang K H, Chu F Y, Zhu Z M, et al. Formation of methane-derived carbonates during the last glacial period on the northern slope of the South China Sea [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2018, 168: 173-185.
- [23] Mackensen A, Wollenburg J, Licari L. Low $\delta^{13}\text{C}$ in tests of live epibenthic and endobenthic foraminifera at a site of active methane seepage [J]. *Paleoceanography*, 2006, 21: PA2022.
- [24] Martin R A, Nesbitt E A, Campbell K A. The effects of anaerobic methane oxidation on benthic foraminiferal assemblages and stable isotopes on the Hikurangi Margin of eastern New Zealand [J]. *Marine Geology*, 2010, 272(1-4): 270-284.
- [25] Cheng X R, Huang B Q, Jian Z M, et al. Foraminiferal isotopic evidence for monsoonal activity in the South China Sea: a present-LGM comparison [J]. *Marine Micropaleontology*, 2005, 54(1-2): 125-139.
- [26] Shackleton N J, Hall M A, Pate D. Pliocene stable isotope stratigraphy of Site 846[C]// *Proceeding of the Ocean Drilling Program, Scientific Results. College Station, TX: Ocean Drilling Program, 1995, 138: 337-355.*
- [27] Hill T M, Kennett J P, Valentine D L. Isotopic evidence for the incorporation of methane-derived carbon into foraminifera from modern methane seeps, Hydrate Ridge, Northeast Pacific [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2004, 68(22): 4619-4627.
- [28] Ketcham R A, Carlson W D. Acquisition, optimization and interpretation of X-ray computed tomographic imagery: applications to the geosciences [J]. *Computers and Geosciences*, 2001, 27(4): 381-400.
- [29] 殷宗军, 黎刚, 朱茂炎. 两种微体化石三维无损成像技术的对比[J]. 微体古生物学报, 2014, 31(4): 440-452. [YIN Zongjun, LI Gang, ZHU Maoyan. Three dimensional nondestructive imaging techniques for the microfossils: a comparison [J]. *Acta Micropalaeontologica Sinica*, 2014, 31(4): 440-452.]