

文章编号: 1000-0550(2013)02-0325-06

台湾峡谷 HD133 和 HD77 柱状样的沉积构成和发育背景^①

徐尚¹ 王英民¹ 彭学超² 卓海腾¹ 邱燕² 周伟¹

(1. 中国石油大学地球科学学院 北京 102249; 2. 国土资源部广州海洋地质调查局 广州 510760)

摘要 分别对南海东北部台湾峡谷内水深 3 280 m 的 HD133 和峡谷外水深 3 378 m 的 HD77 重力活塞柱状样进行了沉积物粒度、古生物和碳酸钙含量分析,利用 AMS¹⁴C 同位素测年和沉积速率初步认定是属于 MIS3a 以来的沉积。按沉积物粒度和碳酸钙含量可将两支柱状样划分为 3 套沉积层段:上部层段 1 和下部层段 3 均以粉砂质黏土为主,夹薄层粉砂,深水底栖有孔虫含量高,碳酸钙低于 10%,代表受重力流作用较弱的正常深海沉积;中部层段 2 发育一套以中—细粒为主的厚砂层,含大量浅水底栖有孔虫,碳酸钙含量可高达 60%,AMS¹⁴C 测年出现倒置现象,表明主要为浅水重力流沉积。柱状样的沉积构成响应同期海平面变化,特别表现在深水砂层沉积的两大控制因素:在时间上,低海平面时期大量浅水和陆源碎屑物质直接输送到陆坡之下的深水区,形成富砂的层段 2;在空间上,峡谷水道是重力流的物质输送通道,地形优势使得重力流携带物优先在水道中发生沉积,造成 HD133 柱的含砂量明显高于 HD77 柱状样。

关键词 南海东北部 深水沉积 重力流 海底峡谷

第一作者简介 徐尚 男 1985 年出生 硕士 沉积学、海洋地质学 E-mail: xushang0222@163.com

通讯作者 王英民 E-mail: wym3939@vip.sina.com

中图分类号 P512.2 **文献标志码** A

南海是全球最大的边缘海之一,研究区位于南海东北部的台湾浅滩陆坡深水区(图 1),毗邻台湾造山带,强烈的隆升和湍急的山间河流为深水区提供了丰富的碎屑物质,从而导致众多海底峡谷的发育。该区域又毗邻吕宋海峡,和西菲律宾海进行活跃的水团交换,拥有活跃的重力流和底流触发机制,发育有壮观的沉积物波域。在研究区及其西南方向,最早 Damuth^[1] 识别出了两万余平方千米的浊流沉积物波域。在研究区内,王海荣等人^[2] 基于沉积物波的地震反射特征,认为该沉积物波与台湾造山运动密切相关。随后,丁巍伟等人^[3] 认为峡谷东侧的沉积物波是由沿陆坡向下的重力流形成的,而峡谷西侧的沉积物波是由从峡谷转向处漫溢的浊流形成的。Gong 等^[4] 进一步基于高分辨地震资料及重力活塞样认为该沉积物波是在重力流和底流双重作用机制下,交互作用的产物。

前人研究表明,研究区内深水沉积作用机制复杂,但其深水沉积物物质组成、来源及其控制因素对认识该区域沉积作用具有同样重要的意义。深水沉积主要受到构造活动、气候变化、海平面升降、沉积物

供给、底流等因素综合作用的影响。本文基于台湾峡谷内、外两个重力活塞样,初步讨论其沉积构成和背景控制因素。

1 材料与方法

本次研究主要基于广州海洋地质调查局在研究区内获取的 HD133 和 HD77 重力活塞样(图 1),该样位于台湾峡谷水道内、外,水深分别为 3 280 m 和 3 378 m,距离现今海岸线约 360 km。与研究区其它主要以粉砂质黏土沉积的柱状样不同,该样中发育一套厚砂层和多个薄砂层。

对柱状样按 5~20 cm(平均 14 cm)的采样间隔取样,进行粒度分析、碳酸钙含量测试以及古生物种属鉴定(以上工作由广州海洋地质调查局完成)。其中,在粒度分析时,对砂级沉积物按粒级进一步细分,细粒沉积物直接用激光粒度分析仪测定,然后计算样品的平均粒径。本次研究与陈芳等人的粒度分析和李学杰等人的碳酸盐含量分析^[5,6] 源于同一批分析化验数据。此外,本次研究还包括了底栖和浮游有孔虫含量统计数据。

^①国家自然科学基金项目(批准号:40972077)、中国海及邻域地质地球物理及地球化学系列图集(GIH200900504)和国家重点基础研究发展计划项目(编号:2009CB219407)资助
收稿日期:2012-03-05; 收修改稿日期:2012-07-11

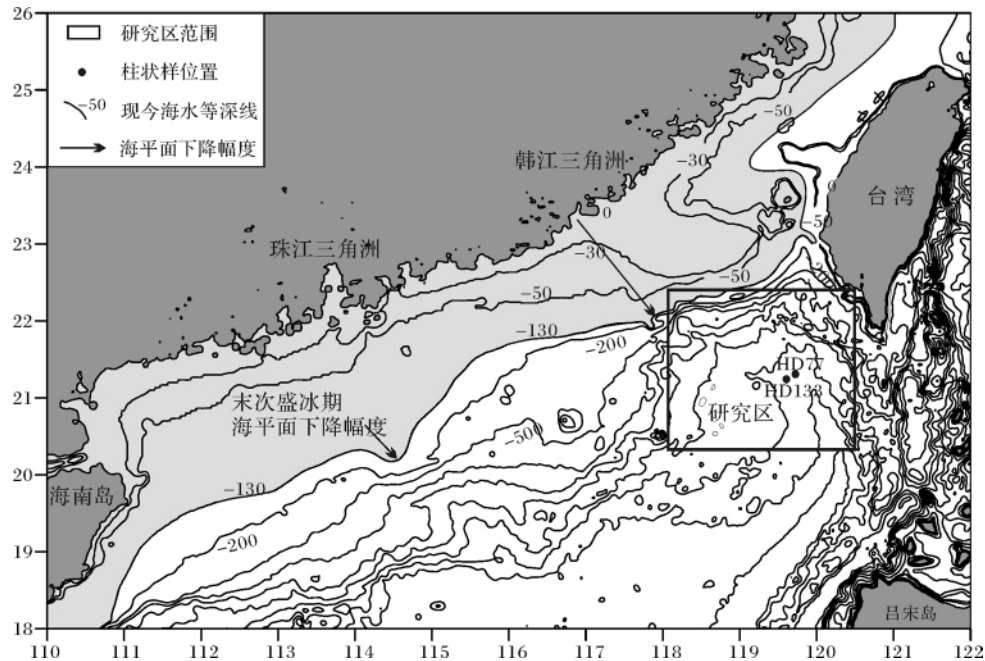


图1 南海北部陆架水深、末次盛冰期海平面下降幅度及柱状样位置

Fig. 1 Bathymetry, amplitude of sea-level fall at LGM and locations of the sediment cores on the northern South China Sea shelf

水深数据来源于 NGDC 的 ETOP-02v2 数据库, 该数据库包含了全球海洋和陆地的地形数据, 分辨率为 $2'$, 可以达到南海北部大范围研究的精度要求。

2 HD133 和 HD77 柱状样的沉积构成

2.1 柱状样沉积层段划分

按照沉积物粒度和碳酸钙含量, HD133 柱状样可以划分为三个层段(图2)。

层段 1: 0 ~ 180 cm 为粉砂、黏土薄互层沉积, 浮游有孔虫含量在 $10^3 \sim 10^4$ 个/克之间, 底栖有孔虫含量平均在 10^2 左右, 碳酸钙含量在 3% ~ 10% 范围内。

层段 2: 180 ~ 389 cm 为一套均匀厚砂层, 以中—细砂为主, 浮游和底栖有孔虫含量特别高, 浮游有孔虫含量最大可达 10^5 个/克, 底栖有孔虫可达 5×10^3 个/克, 且生物壳大量破碎, 碳酸钙含量可高达 60%。

层段 3: 400 ~ 699 cm 为细粒的粉砂质黏土沉积, 浮游和底栖有孔虫含量相对较低, 浮游有孔虫含量平均在 2×10^3 个/克左右, 底栖有孔虫含量平均为 10^2 个/克, 碳酸钙含量在 5% 左右。

同样, HD77 柱状样也可以划分为三个沉积层段(图2)。

层段 1: 0 ~ 280 cm 发育厚层的粉砂质黏土, 偶夹薄层粉砂, 浮游有孔虫含量在 $10^2 \sim 3 \times 10^3$ 个/克之间, 底栖有孔虫含量在 10 个/克左右, 碳酸钙含量低

于 5%。

层段 2: 280 ~ 540 cm 为粉砂质砂, 浮游和底栖有孔虫含量也很高, 浮游有孔虫含量最高可达 10^6 个/克, 底栖有孔虫含量在 $10^3 \sim 5 \times 10^3$ 个/克之间, 碳酸钙含量为 40% 左右。

层段 3: 540 ~ 690 cm 又以细粒的粉砂质黏土沉积为主, 夹薄层粉砂, 浮游有孔虫含量低于 10^2 个/克, 底栖有孔虫含量在 10 个/克左右, 碳酸钙含量低于 5%。

2.2 柱状样的沉积构成

HD133 和 HD77 柱状样的层段 2 均含有一套厚砂层, 这在深水沉积环境中并不多见。厚砂层底部与下覆细粒沉积呈突变接触, 含有大量的浅水底栖有孔虫(图2), 同时 HD77 柱状样的同位素测年出现倒置现象(图2), 可以认为它们是经重力流搬运而来的。但值得指出的是: 在深水环境下, 由于底流作用(包括等深流、潮汐底流等), 早期重力流沉积物会被改造成具有牵引沉积特征的底流改造沉积物(该部分内容在另文中有详细讨论)。

HD133 柱状样的沉积层段 1 为粉砂、粉砂质黏土薄互层, 比层段 2 粒度较细、厚度较薄, 底栖有孔虫含量明显减少, 碳酸钙含量小于 10%, 表明其成因与层段 2 有较大差异。该时期重力流物质供应不足, 以低密度浊流为主。层段 3 为粉砂质黏土沉积, 与层段

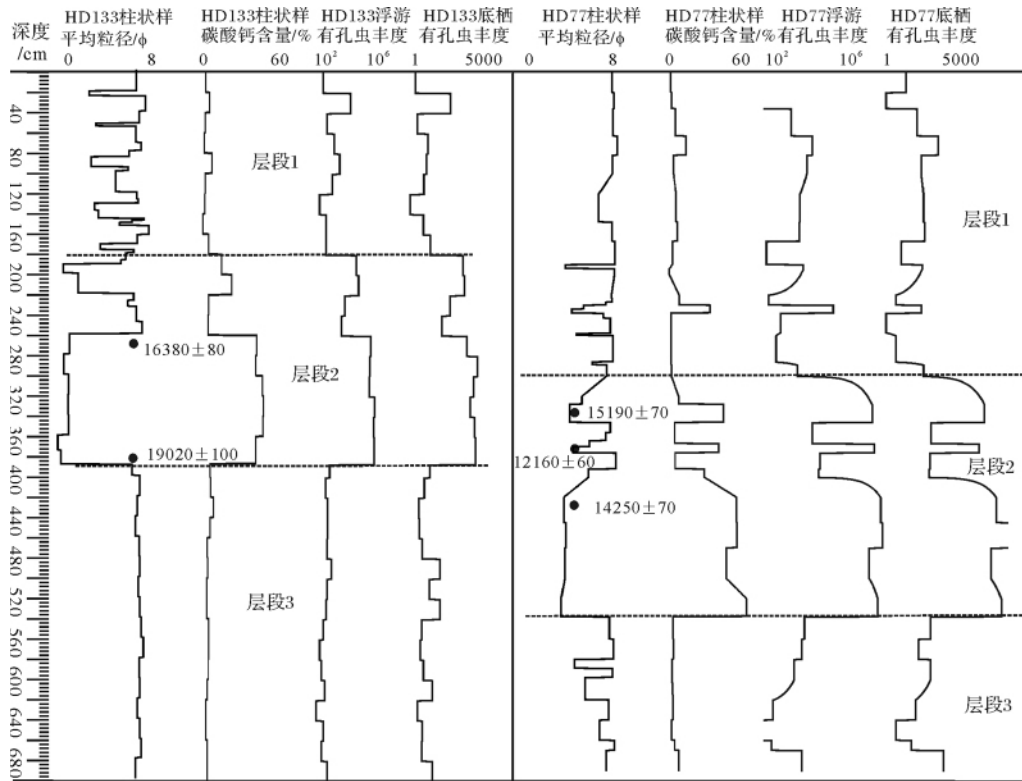


图 2 HD133 和 HD77 柱状样粒度曲线、碳酸钙含量、有孔虫丰度、AMS¹⁴C 同位素测年以及沉积层段划分对比

Fig. 2 Correlation and subdivision of grain size , content of CaCO₃ , foraminifera abundance , AMS¹⁴C isotope and sedimentary layers.

1、2 相比,重力流作用明显减弱。

HD77 柱状样沉积层段 1、3 均为粉砂质黏土,偶夹粉砂质薄层,粉砂厚度薄、出现频率低。其形成机制与 HD133 柱状样层段 1 类似,只是低密度浊流的作用不如 HD133 柱状样层段 1 强烈。

2.3 柱状样年代地层框架

通常碳酸钙含量可以用来划分海洋氧同位素期次,但其前提条件是不受重力流干扰。HD77 和 HD133 柱状样砂层中的碳酸钙含量偏高的原因在于浊流搬运作用使大量沉积在陆架、陆坡的有孔虫富集在这些层位^[5]。因此,虽然两个柱状样中的碳酸钙含量呈现明显的阶段性(图 2),但是不能作为划分该样氧同位素期次的依据。

李学杰等人(2008)在两个柱状样的砂层中,挑选浮游有孔虫 *Globigerinoides sacculifer* 个体,送德国基尔大学完成 AMS¹⁴C 同位素测年^[6](图 2)。结果表明砂层的年代处于 19020 ~ 12160 a. B. P 之间,介于末次盛冰期 MIS2(24.1 ~ 12.1 ka. B. P)^[7] 时间范围内。按照同位素测年可以认为两个柱状样的层段

2 对应于末次盛冰期(MIS2)时期,层段 1、3 分别对应于末次盛冰期前后的 MIS1 和 MIS3 时期。

然而,柱状样的砂层中含浅水底栖生物壳体^[5,6] 特别是在 HD77 柱状样的岩芯观察上,具有典型的浊流正粒序^[5]。同时,HD77 柱状样的三个同位素测年出现倒置现象(图 2),也进一步说明了砂层是经重力流搬运来的。那么,该砂层的同位素测年不一定代表其最终沉积时的年代。因此,能否仅凭沙层中的同位素测年来建立柱状样的年代地层框架还值得商榷。

陈芳等^[5]对东沙海域(与本次研究处于同一位置)大量沉积柱状样的研究表明,全新世沉积速率最高达 31.6 cm/ka。由于 HD133 柱状样层段 1 的粉砂、黏土质粉砂频繁互层,不利于用沉积速率计算地层年代;而 HD77 柱状样的层段 1 以黏土沉积为主,粉砂含量较少,可以利用沉积速率计算其地层年代范围。HD77 柱状样层段 1 的总厚度为 280 cm,计算得到层段 1 所经历的最短沉积时间为 8.86 ka,由此推测层段 2 厚砂层的沉积时间在 8.86 ka. B. P 之前。

3 HD133 和 HD77 柱状样的发育背景和控制因素讨论

3.1 海平面变化对沉积的控制

进入末次盛冰期(MIS2)以来,全球海平面急剧下降,下降幅度达120 m;末次盛冰期结束后进入全新世(MIS1),全球海平面持续上升,达到现今海平面位置^[8](图3a)。

受区域构造活动的影响,南海海平面变化相对于全球海平面变化存在一定的差异。姚衍桃等^[9]对南海东北部末次盛冰期以来的海平面做了详细研究:在20 ka. B. P时(a点)海平面下降幅度达150 m;从20~16 ka. B. P(a-b段)海平面缓慢上升;从16~12 ka. B. P(b-c段)海平面快速上升;从12~6 ka. B. P(c-d段)海平面上升速度减慢;从6 ka. B. P到现今,海平面维持在现今高度,几乎没有大幅度变化(如图3b)。姚衍桃等^[9]认为华南沿海末次盛冰期海平面下降达130~160 m的观点居多,本文基于最小下降幅度130 m初步划定了末次盛冰期南海北部海平面位置,如图1所示。

如前所述,HD77柱状样沉积层段1所经历的最短沉积时间为8.86 ka,此时的海平面在图3b中的e点附近。在层段1沉积过程中,海平面从-10 m上升至现今海平面高度,并维持稳定,有利于形成深海细粒沉积。

HD77柱状样沉积层段2形成于8.86 ka. B. P之前,如图3b,在该时期海平面下降幅度大,最大可达-150 m。由于南海北部陆架比较宽缓,在末次盛冰期,海平面下降达120~130 m时^[9,10],南海北部陆架

大多出露成陆地,韩江口海岸线前移了约180 km(图1),接近现今的陆架坡折处,河流携带的沉积物直接注入陆坡区。

HD77柱状样沉积层段3以细粒的黏土沉积为主,由于沉积水深在3200 m以上,受碳酸盐补偿深度的影响,暂无准确的测年资料。施雅风和于革^[11]通过对中国暖湿气候的研究,认为40~30 kaBP相当于末次冰期中的大间冰阶或海洋氧同位素MIS3a时期,南海北部出现重大海侵,当时海平面高度仅低于现代海平面8~10 m。这与沉积阶段3有很好的对应关系。

此外,从HD133柱状样垂向序列来看:从层段2到层段1,沉积物粒度减小、砂层厚度减薄、浅水底栖有孔虫含量降低,都表明重力流作用不断减弱。重力流作用在低海平面时期最为活跃,随着海平面升高,沉积物供应减少,重力流由高密度浊流转化为低密度浊流^[12]。

3.2 地形对沉积的控制

如图4所示,台湾浅滩陆坡较陡,广泛发育海底峡谷,其中以台湾峡谷最为壮观。HD133柱状样位于台湾峡谷水道内,HD77柱状样位于下游、紧靠峡谷水道的外侧(图4)。HD133柱状样的砂层主要源于水道内的重力流;而HD77柱状样的砂层可以源于沿台湾浅滩陆坡向下的重力流,也可以源于水道的溢岸流。

对比HD133和HD77柱状样,可以看出水道内砂层的平均粒径粗、厚度大、出现的频率高,且含浅水底栖有孔虫数量多,表明水道内的重力流较水道外侧活跃。并且在同一批采集的重力活塞样中,离峡谷水

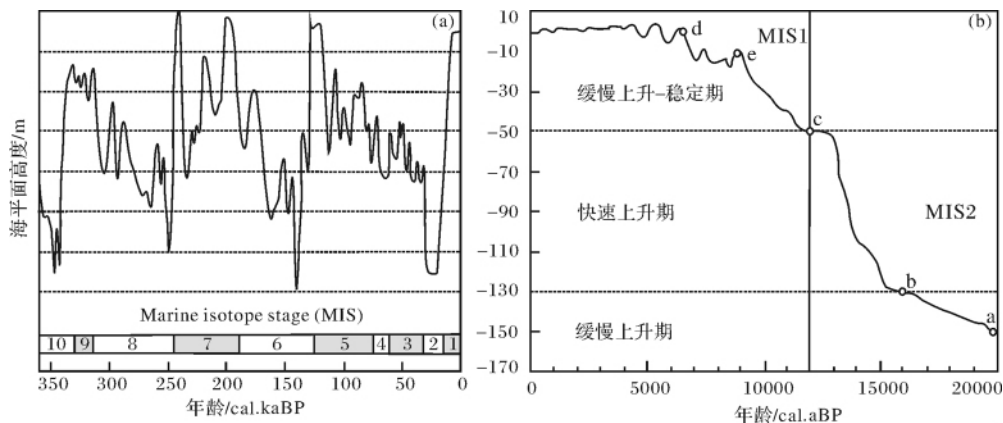


图3 a 400ka以来全球海平面变化曲线,据Abbey(2011)修改;

b 南海东北部20000 a以来海平面变化曲线,据姚衍桃(2009)修改

Fig. 3 (a) Global sea-level fluctuation since 400 ka, modified from Abbey (2011);

(b) Sea-level curve from 20 000a for the northern South China Sea, modified from Yao *et al.* (2009)

道稍远的柱状样均为黏土质粉砂沉积,且浅水底栖有孔虫含量低。

即使在全新世的高海平面时期,浊流也优先在峡谷中搬运和沉积。例如,HD133 柱状样的沉积层段 1 表现为频繁的粉砂、黏土薄互层;而水道外侧的 HD77 柱状样层段 1 的粉砂含量明显减少。

因此,海底峡谷的地形特征对深水重力流沉积起到明显的控制作用。海底峡谷是重力流的物质输送通道,沉积物经峡谷水道输送到深水环境后,优先在峡谷中沉积下来。

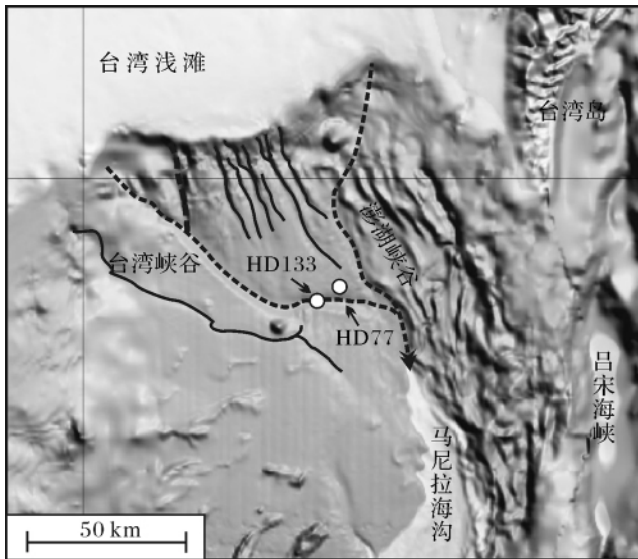


图4 台湾浅滩陆坡地貌及 HD133 和 HD77 柱状样位置示意图

Fig. 4 Map showing the location of HD133 and HD77 sediment core and morphology of Taiwan Shallow Slope

4 结论

(1) HD133 和 HD77 柱状样代表了 MIS3a 以来的沉积记录,且都可以划分为三个沉积阶段。其中层段 2 对应于 MIS2 的低海平面时期;层段 3 和层段 1 分别对应于末次盛冰期前后的高海平面时期。

(2) 深水砂层沉积的控制因素:在时间上,低海平面时期的重力流较为活跃,海平面升降是深水沉积的主要控制因素;在空间上,受地形地貌的影响,沉积物优先在峡谷(水道)中沉积。

致谢 感谢审稿专家提出的宝贵修改意见,对作者帮助极大!

参考文献 (References)

1 Damuth J E. Migrating sediment waves created by turbidity currents in

the northern South China Basin [J]. *Geology*, 1979, 7: 520-523

- 2 王海荣,王英民,邱燕,等. 南海东北部台湾浅滩陆坡的浊流沉积物波的发育及其成因的构造控制[J]. *沉积学报*, 2008, 26: 39-45 [Wang Hairong, Wang Yingmin, Qiu Yan, et al. Development and its tectonic activity's origin of turbidity current sediment wave in Manila Trench, the South China Sea [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2008, 26: 39-45]
- 3 丁巍伟,李家彪,韩喜球,等. 南海东北部海底沉积物波的形态、粒度特征及物源、成因分析[J]. *海洋学报*, 2010, 32: 96-105 [Ding Weiwei, Li Jiabiao, Han Xiqiu, et al. Geomorphology, grain size characteristics, matter source and forming mechanism of sediment waves on the ocean bottom of the northeast South China Sea [J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2010, 32: 96-105]
- 4 Gong C L, Wang Y M, Qiu Y, et al. Sediment waves on the South China Sea Slope off southwestern Taiwan: Implications for the intrusion of the Northern Pacific Deep Water into the South China Sea [J]. *Marine Petrology and Geology*, 2012, 32: 95-109
- 5 陈芳,苏新,Numberg D,等. 南海东沙海域末次冰期最盛期以来的沉积特征[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2006, 26(6): 9-17 [Chen Fang, Su Xin, Numberg D, et al. Lithologic features of sediments characterized by high sedimentation rates since the last glacial maximum from Dongsha area of the South China Sea [J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2006, 26(6): 9-17]
- 6 李学杰,刘坚,陈芳,等. 南海北部晚更新世以来的碳酸盐旋回[J]. *第四纪研究*, 2008, 28(3): 431-436 [Li Xuejie, Liu Jian, Chen Fang, et al. Carbonate cycles since late Pleistocene in the northern South China Sea [J]. *Quaternary Sciences*, 2008, 28(3): 431-436]
- 7 Martinson D G, Pisias N G, Hay J D, et al. Age dating and the orbital theory of the ice ages: development of a high-resolution 0 to 3000000 year chronostratigraphy [J]. *Quaternary Research*, 1987, 27(1): 1-29
- 8 Abbey E, Webster J M, Beaman R J. Geomorphology of submerged reefs on the shelf edge of the Great Barrier Reef: The influence of oscillating Pleistocene sea-levels [J]. *Marine Geology*, 2011, 288: 61-78
- 9 姚衍桃,Harff J, Meter M,等. 南海西北部末次盛冰期以来的古海岸线重建[J]. *中国科学: D 辑*, 2009, 39(6): 753-762 [Yao Yantao, Harff J, Meyer M, et al. Reconstruction of paleocoastlines for the northwestern South China Sea since the Last Glacial Maximum [J]. *Science China: Series D*, 2009, doi: 10.1007/s11430-009-0098-8]
- 10 贾国东,谢宏琴. 南海北部海水氧同位素剩余值在冰期-间冰期气候旋回中的变化及其古气候意义[J]. *地学前缘*, 2006, 13(1): 119-204 [Jia Guodong, Xie Hongqin. Surface water oxygen isotope residuals in northern South China Sea: Variations during glacial interglacial cycles and their paleoclimatic implications [J]. *Earth Science Frontiers*, 2006, 13(1): 199-204]
- 11 施雅风,于革. 40~30 kaBP 中国暖湿气候和海侵的特征与成因探讨[J]. *第四纪研究*, 2003, 23(1): 1-11 [Shi Yafeng, Yu Ge. Warm-humid climate and transgressions during 40-30 ka B. P. and their potential mechanisms [J]. *Quaternary Sciences*, 2003, 23(1): 1-11]

Depositional Elements and Settings of HD133 and HD77 Cores in the Taiwan Canyon

XU Shang¹ WANG Ying-min¹ PENG Xue-chao²
ZHUO Hai-teng¹ QIU Yan² ZHOU Wei¹

(1. College of Geosciences, China University of Petroleum, Beijing 102249;

2. Guangzhou Marine Geological Survey Bureau, Guangzhou 510760)

Abstract: Located within and outside the Taiwan Canyon in the northeastern South China Sea, with the water depths of 3 280 m and 3 378 m separately, two sediment cores HD133 and HD77 are carefully investigated through analysis of grain size, paleontology and calcium carbonate content. In combination with the sea level history during the LGM (Last Glacial Maximum), the sedimentary elements and responses are discussed. Based on sediment grain size and carbonate content, the two cores can be subdivided into three sediment layers. The layer 2 is consisted of medium to fine grained thick-bedded sands which is interpreted to be terrigenous gravity flow deposits, evidenced by the abundant shallow water benthic foraminifera, the carbonate content reaching 60% and the internal chaos of AMS¹⁴C isotope dating. Layers 1 and 3 are dominated by silt mud with silt interbeds, with few shallow water benthic foraminifera and carbonate content less than 10%, indicating a decrease of sediment gravity flows. The controlling factors for the deep-water sands within these two sediment cores are as the following: temporally, terrigenous sediments are directly delivered into the deep-water settings, forming sand-rich deposits layer 2; spatially, submarine canyons are the conduits for terrigenous gravity flow, making the deposition occur firstly within the canyon. Thus, HD133 is richer in sand than HD77.

Key words: northeastern South China Sea; deep-water sedimentation; gravity flow; submarine canyon