

# 南海北部陆坡神狐海域富有孔虫沉积层的特征及成因

李 牛<sup>1,2</sup>, 陈多福<sup>1\*</sup>

(1. 中国科学院 广州地球化学研究所 边缘海地质重点实验室, 广东 广州 510640; 2. 中国科学院大学, 北京 100049)

**摘要:** 浊流和碎屑流等粗粒沉积是深海油气和天然气水合物良好的储层, 它的发现和识别对于深海油气和天然气水合物的勘探具有重要意义。在南海北部陆坡神狐海域水深 1805 m 海底采集的长 5.5 m 柱状沉积物由 2 层富有孔虫层和 2 层深灰色泥质粉砂层相间组成, 其中深灰色泥质粉砂层(A<sub>1</sub> 和 A<sub>3</sub>)主要为黏土矿物、石英和长石组成, 粒径中值在 6~15 μm 之间, Ti/Al、K/Al 和 Fe/Al 比值类似于南海神狐海域表层半深海沉积特征, 而富有孔虫砂层(A<sub>2</sub> 和 A<sub>4</sub>)的粒度具有向上递减的特征, 形成由粗到细的正粒序构造, 粒径中值高, Ti/Al、K/Al 和 Fe/Al 比值较高, 与 A<sub>1</sub> 和 A<sub>3</sub> 灰色泥质粉砂层相比, 含有更多的粗粒陆源物, 推测可能是浊流经底流改造的碎屑流沉积。浮游有孔虫 <sup>14</sup>C 定年表明下部的 A<sub>4</sub> 层可能晚于 42.46~43.53 ka B P, A<sub>2</sub> 层晚于 15.1~15.3 ka B P。浊流从浅海搬运来的大量有孔虫在陆坡经碎屑流改造形成富集 CaCO<sub>3</sub> 的有孔虫富集层。

**关键词:** 南海北部; 有孔虫富集层; 浊流; <sup>14</sup>C 定年

中图分类号: P59; P67 文献标识码: A 文章编号: 0379-1726(2015)06-0564-07

## Characteristics and origin of the Foraminifera-rich sedimentary layers in Shenhu area on the northern continental slope of the South China Sea

LI Niu<sup>1,2</sup> and CHEN Duo-fu<sup>1\*</sup>

1. CAS Key Laboratory of Marginal Sea Geology, Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

**Abstract:** Deep-water turbidite and debris flow in submarine canyons can be reservoir favorable for marine gas hydrate and deep-water oil, so their discovery and identification could be significant for prospecting of marine gas hydrate and deep-sea oil. For sediments in gravity core DH-1 collected in Shenhu area on the northern continental slope of the South China Sea at water depth of 1805 m, they are composed of two Foraminifera-rich layers (A<sub>2</sub> and A<sub>4</sub>) and two dark-gray clay silt layers (A<sub>1</sub> and A<sub>3</sub>). Major element chemistry and grain size and minerals analysis suggest that these dark-gray clay silt layers represent background hemipelagic sediments. The intervening Foraminifera-rich layers (A<sub>2</sub> and A<sub>4</sub>), which exhibit a large median grain size range, are debris flow and turbidite resulted from bottom current reconstruction. Their relatively high Ti/Al, K/Al and Fe/Al ratios and carbonate contents as well as higher median grain size imply a more coarse detrital materials input. Radiocarbon dating of hemipelagic sediments indicates that the age of the turbidity in A<sub>2</sub> and A<sub>4</sub> could be later than 42.46~43.53 ka BP and 15.1~15.3 ka BP, respectively. These data indicate that the abundant Foraminiferal brought by turbidite from shallow-water and bottom current was reconstructed, and causes the enrichment of CaCO<sub>3</sub> in Foraminifera-rich layers.

**Key words:** Northern South China Sea; Foraminifera-rich; turbidites; <sup>14</sup>C age

收稿日期(Received): 2015-03-09; 改回日期(Revised): 2015-04-17; 接受日期(Accepted): 2015-05-21

基金项目: 国家自然科学基金(91228206)

作者简介: 李牛(1985-), 男, 博士研究生, 主要从事冷泉方面的研究。E-mail: liniu123@gig.ac.cn

\* 通讯作者(Corresponding author): CHEN Duo-fu, E-mail: cdf@gig.ac.cn, Tel: +86-20-85290286

## 0 引言

浊流活动是一种常见而具有重大破坏性的海底重力流活动,是陆源物质向深海搬运的主要方式反映<sup>[1]</sup>。浊流沉积对于海底扇、海底峡谷以及深海油气藏的形成以及古气候的变化记录具有重要的指示意义<sup>[2-5]</sup>。失稳沉积物的转换,河流、冰川边缘产生的高密度流,以及风暴、台风所产生的陆架边缘的沉积物再悬浮作用与浊流的形成密切相关<sup>[1,6]</sup>。而富有孔虫浊流的发育与低海平面和高的海水表层初级生产力有关<sup>[3]</sup>。此外,甲烷泄漏以及其所产生的边坡不稳定性也可能导致浊流的发生,地中海巨厚的浊积层被认为与冰期时海平面下降导致的水合物分解产生的甲烷泄漏有关<sup>[7]</sup>。

南海的浊流沉积,文献曾有许多报道。Damuth主要通过 3.5 Hz 浅地层剖面在 20 世纪 70 年代发现南海盆地北部马尼拉海沟邻海一边平缓倾斜壁上有大片浊流引起的沉积场<sup>[8]</sup>。随后在南海的北部陆坡、北部深海盆地、中沙群岛和南部陆坡都发现了浊流沉积<sup>[9]</sup>。由于神狐海域海底峡谷广泛发育,地形坡度起伏大,甲烷渗漏强烈,我国第一个水合物钻孔就位于该海域,因此具有发育浊流沉积良好的地质背景<sup>[10]</sup>。

而与海底峡谷相关的沉积建造如浊积砂体等内部由于发育孔隙度和渗透率较好的粗粒沉积物,可以作为深水油气、天然气水合物的良好储层,一些国家层面的水合物计划将水合物的钻探站位布置于海底峡谷发育的区域<sup>[11]</sup>。因此深海浊流的识别对于天然气水合物和深海油气勘探具有重要的意义。南海西沙海槽和南海北部陆坡珠江口盆地重力流及等深流沉积类型多样,包括峡谷、单向迁移水道、堤岸、朵叶及漂积体,是水合物的有利储集相带<sup>[12]</sup>。

本文对采集于水深 1805 m 的南海北部陆坡神狐海域 DH-1 柱样的沉积物粒度、矿物和常量元素进行了分析,结果显示沉积柱中发育的两层灰白色富有孔虫层为浊流沉积经底流改造后的碎屑流沉积。

## 1 样品采集与分析方法

研究的柱状样 DH-1 位于南海北部陆坡中段神狐海域,介于西沙海槽和东沙群岛之间(图 1)。从新近纪以来,该海域发育了大量的深水扇沉积体,其沉积速率相对较高,有机质丰富<sup>[10]</sup>。区内水深 300~3500 m,水深线与海岸线大致平行,地形由北西由南东倾斜,平均坡度为 13.6‰,平均坡角达 7°40',海底地形总体呈东北高、西南低的斜坡形态,是南海北部陆坡和中央海盆的过渡带<sup>[14]</sup>。区内沉积经历了河湖相-

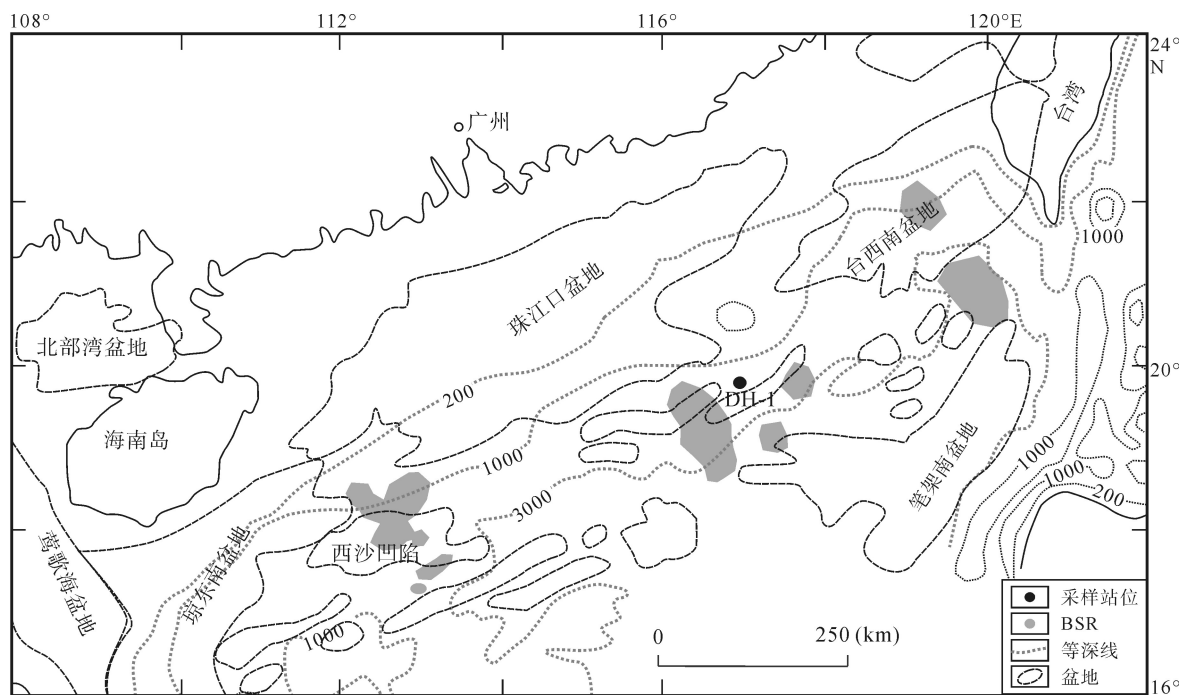


图 1 南海北部陆坡所采集的沉积柱 DH-1 的位置图(图片修改自佟宏鹏等<sup>[13]</sup>)

Fig.1 Map showing location of the sediment core DH-1 on the northern continental slope of the South China Sea

滨浅海-陆坡深海相的演化过程<sup>[15]</sup>,在早中新世-中中新世发育滨浅海三角洲砂岩,晚中新世以来受深部地幔作用,在裂陷期之后继续强烈热沉降<sup>[16]</sup>,沉积环境演变为陆坡深水环境,发育巨型的珠江深水扇系统<sup>[17]</sup>。末次冰期以来在南海北部陆坡,特别是珠江海底峡谷内发育了大量的浊流沉积,砂级组分中除含生源有孔虫外,还含不等量陆源长石、石英碎屑等<sup>[18]</sup>。而在台湾海峡全长 699 cm 的 HD133 柱状样中共识别出 1 个厚沙层(厚 127 cm)和 8 个薄沙层(单层厚度 8~15 cm),这些沙层中含大量浅水底栖有孔虫,推测沙层是重力流和底流交互作用的产物<sup>[19]</sup>。

DH-1 柱状沉积物柱样是 2012 年广州海洋地质调查局“海洋六号”调查船在南海北部神狐海域水深 1805 m 海底采集(19°48.7004'N、116°51.5624'E)(图 1)。采集的沉积物柱样长 548 cm,可分为 4 层:近海底的 A<sub>1</sub> 层(0~120 cm)由灰黑色黏土质粉砂组成,A<sub>2</sub> 层(120~245cm)由含贝壳碎片的粒度较粗的灰白色有孔虫砂组成,与上下层成突变接触,A<sub>3</sub> 层(245~345 cm)由灰黑色黏土质粉砂组成,A<sub>4a</sub> 层(345~470 cm)由灰黑色黏土质粉砂和灰白色有孔虫砂混合组成,与上下层成渐变接触,沉积物粒度由上向下越来越粗,底部的 A<sub>4b</sub> 层(470~548 cm)由含贝壳碎片的粒度较粗的灰白色有孔虫砂组成。整个沉积柱以 2 cm 间隔取样,约 100 g 样品冷冻干燥后,研磨致小于 200 目的粉末备后续分析。

全岩粉末样品物相分析(XRD)由中国科学院广州地球化学研究所的 Bruker X-射线衍射仪(D8 Advance)完成,工作参数为 Cu 靶 K $\alpha$  射线,石墨单色器,测试电压为 40 kV,电流为 40 mA,扫描角度为 5°~70°(2 $\theta$ ),步进扫描,步宽为 0.02°,发散狭缝为 0.5°,接受狭缝为 0.15 mm,防散射狭缝为 0.5°,矿物含量是依面积法进行半定量分析,结果由 SIROQUANT 程序完成<sup>[20]</sup>。

主元素分析在中国科学院地球化学研究所完成,取粉末样品 40 mg 放入特氟龙杯中并加入 1 mL HF 和 1 mL HNO<sub>3</sub>,把密封的特氟龙杯放入电烘箱中于 185 °C 下维持约 36 h。冷却后,特氟龙杯置于电热板上蒸干,最后加入 Rh 内标及稀硝酸,用 ICP-AES 测试主元素<sup>[21]</sup>。GSR-1、OU-6、1633-a、GXR-2、GXR-5 标样进行质量控制,主元素精度和准确度为优于 5%。

激光粒度分析样品为 10 cm 一个样品,共 54 个样品,在中国科学院南海海洋研究所的 Mastersizer

2000 激光粒度分析仪进行测试,分析范围为 0.02~2000  $\mu\text{m}$ ,重复测量的相对误差小于 2%。

年代测定选取关键层位 6~10 cm、130~134 cm、228~232 cm、352~356 cm、480~484 cm、544~548 cm 共 6 个样品,在双目镜下挑选出 *Globigerinoides ruber* 和 *Globigerinoides sacculifer* 浮游有孔虫混种 12 mg 进行 AMS <sup>14</sup>C 测年。挑出的浮游有孔虫用 15% H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 和水浴超声振荡,去除有孔虫的有机碳。<sup>14</sup>C 测年在美国迈阿密 Beta 分析公司采用 Accelerator Mass Spectrometry (AMS)方法完成,详细的分析步骤见 <http://www.radiocarbon.com/analytic.htm>。测定的年龄数据首先经  $\delta^{13}\text{C}$  同位素分馏校正,再进行树轮曲线 IntCal09 校正。

## 2 结 果

### 2.1 沉积物的粒度

激光粒度分析结果显示灰黑色黏土质粉砂层(A<sub>1</sub>和 A<sub>3</sub>)的中值粒径一般在 6~15  $\mu\text{m}$  之间,黏土(< 4  $\mu\text{m}$ )及粉砂(4~63  $\mu\text{m}$ )分别约为 16.7%~37.3% (平均 27%)和 48.9%~68.6% (平均 59%),砂级(> 63  $\mu\text{m}$ )沉积物含量小于 20% (图 2)。而在灰白色富有孔虫砂层(A<sub>2</sub>和 A<sub>4b</sub>)的中值粒径一般大于 250  $\mu\text{m}$ ,砂的含量可达到 39.6%~86.9% (平均 67%),黏土和粉砂含量则明显减少,分别为 4.9%~25.1% (平均 11.7%)和 7.8%~41.8% (平均 20.2%) (图 2)。灰黑色黏土质粉砂和灰白色有孔虫砂的混合层(A<sub>4a</sub>)具有典型的正粒序粒度特征,中值粒径从底向上逐渐变细,粉砂和黏土含量越来越高,砂含量越来越低,渐渐过渡到 A<sub>3</sub> 层。

### 2.2 矿物成分和陆源元素

DH-1 孔沉积物中的矿物成分主要为方解石、石英、长石、伊利石和绿泥石。方解石含量的变化与通过总 Ca 含量扣除陆源背景值计算:  $\text{CaCO}_3 = 2.5 [\text{Ca}_{\text{tot}} - (\text{Al}_{\text{tot}} \times \text{Ca}/\text{Al}_{\text{average shale}})]$ ,其中  $\text{Ca}/\text{Al}_{\text{average shale}}$  比值为 0.276<sup>[22]</sup>,得出的  $\text{CaCO}_3$  含量的趋势一致(图 2)。可以看出 A<sub>4b</sub> 层  $\text{CaCO}_3$  含量稳定在 80%左右,然后从 A<sub>4a</sub> 层底向上到顶递减到 20%左右,在 A<sub>3</sub> 层稳定在 20%左右,之后在 A<sub>2</sub> 层突增到 80%左右,最后在 A<sub>1</sub> 底部突降并稳定在 20%左右。而方解石含量的变化与陆源矿物伊利石 + 绿泥石 + 石英 + 长石呈镜像关系(图 2)。A<sub>2</sub> 和 A<sub>4b</sub> 层的长石、伊利石和绿泥石没有检出,主要矿物成分为方解石和石英。

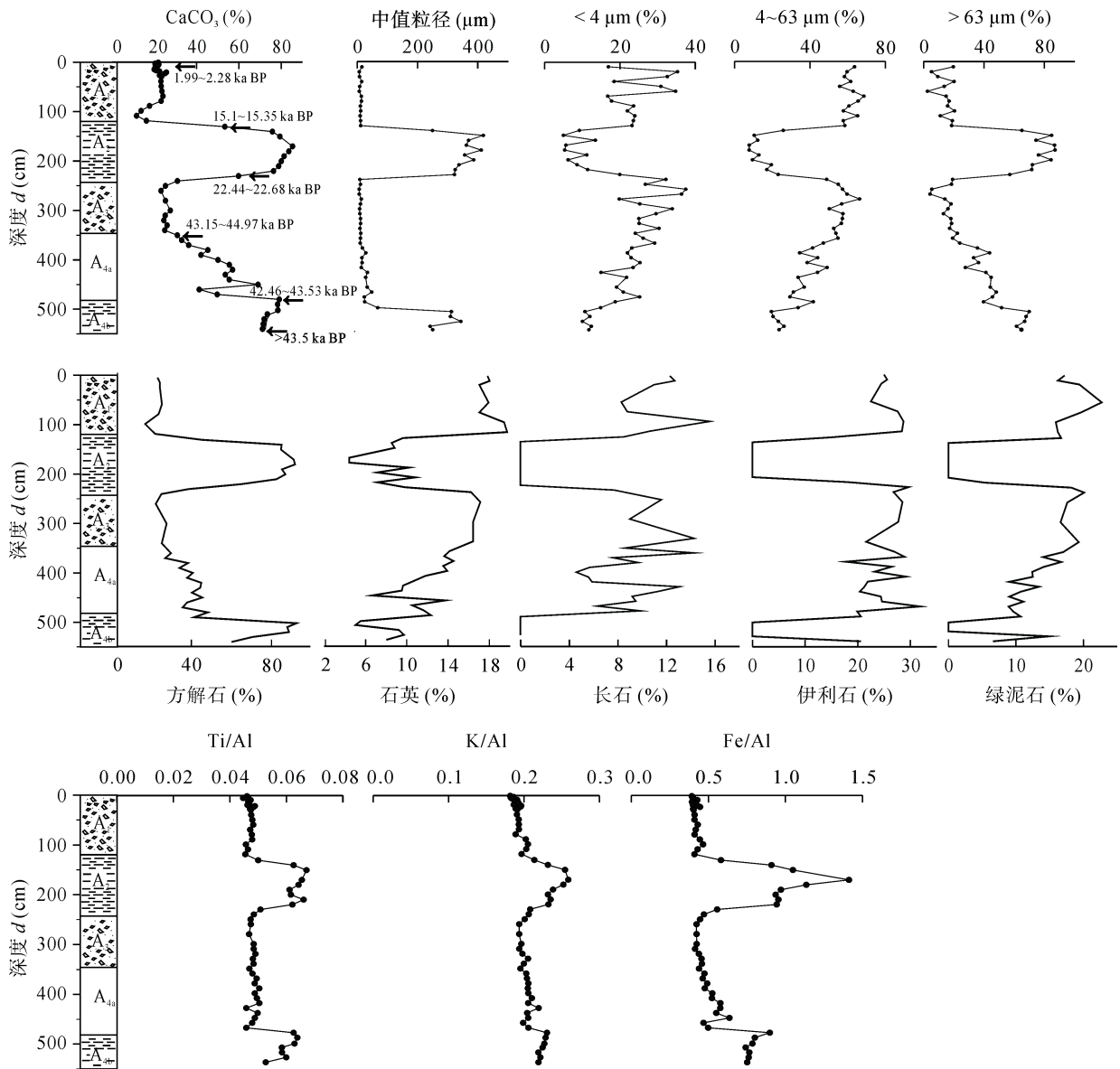


图 2 DH-1 孔沉积物粒径参数、 $\text{CaCO}_3$  含量、 $\text{Ti}/\text{Al}$ 、 $\text{K}/\text{Al}$ 、 $\text{Fe}/\text{Al}$  值、矿物成分和有孔虫 AMS- $^{14}\text{C}$  定年随深度变化图  
Fig.2 Depth profiles showing variation of  $\text{CaCO}_3$ ,  $\text{Ti}/\text{Al}$ ,  $\text{K}/\text{Al}$ ,  $\text{Fe}/\text{Al}$ ,  $\text{Zr}/\text{Al}$ , mineral composition, grain size and AMS- $^{14}\text{C}$  age with depth for core DH-1

$\text{Ti}/\text{Al}$ 、 $\text{K}/\text{Al}$  和  $\text{Fe}/\text{Al}$  比值在灰黑色黏土质粉砂层( $A_1$  和  $A_3$ )比较一致, 均值分别为 0.05、0.3、0.55 和 0.0016 (图 2)。而灰白色富有孔虫砂层( $A_2$  和  $A_{4b}$ )的  $\text{Ti}/\text{Al}$ 、 $\text{K}/\text{Al}$  和  $\text{Fe}/\text{Al}$  比值显著高于灰黑色黏土质粉砂层, 表明了陆源物质输入的变化。混合层( $A_{4a}$ )的  $\text{Ti}/\text{Al}$  比值类似于灰黑色黏土质粉砂层( $A_1$  和  $A_3$ ), 而  $\text{K}/\text{Al}$  和  $\text{Fe}/\text{Al}$  比值有从下向上递减的趋势, 最后降到  $A_3$  层的值。 $\text{K}/\text{Al}$ 、 $\text{Ti}/\text{Al}$  及  $\text{Fe}/\text{Al}$  比值在灰白色富有孔虫砂层中均表现出与中值粒径相似的变化规律, 在灰白色富有孔虫砂层( $A_2$  和  $A_{4b}$ )的元素比值迅速升高, 而在混合层( $A_{4a}$ ) $\text{K}/\text{Al}$  和  $\text{Fe}/\text{Al}$  随着粒度向上变细的同时, 元素比值也逐渐减小(图 2)。这反映

了 K、Ti、Fe 等元素在灰白色富有孔虫砂层相对富集, 且富集趋势与粒度变化紧密相关。

### 2.3 有孔虫 $^{14}\text{C}$ 定年

关键层位浮游有孔虫 *Globigerinoides ruber* 和 *Globigerinoides sacculifer* 的  $^{14}\text{C}$  定年结果显示近海底的  $A_1$  灰黑色黏土质粉砂层上部的年龄为 1985~2275 cal. a BP。灰白色富有孔虫砂  $A_2$  层上部为 15095~15345 cal. a BP, 下部为 22435~22680 cal. a BP。而混合层的  $A_{4a}$  层上部为 43150~44970 cal. a BP, 下部为 42455~43525 cal. a BP。沉积柱的最深部  $A_{4b}$  灰白色富有孔虫砂层下部年龄大于 43500 cal. a BP (表 1 和图 2)。

表 1 DH-1 孔浮游有孔虫的 AMS-<sup>14</sup>C 测年数据  
Table 1 AMS-<sup>14</sup>C data for Foraminifera in DH-1 core sediments

样品	样品深度(cm)	浮游有孔虫种类	<sup>14</sup> C 测试结果 (a BP)	<sup>13</sup> C 同位素分馏校正 (a BP ± 2σ)	<sup>14</sup> C 校正年代 <sup>[1]</sup> (cal a BP)
DH1-1	6~10	<i>Gruber+G.sacculifer</i>	2050±30	2480±30	1985~2275
DH1-2	130~134	<i>Gruber+G.sacculifer</i>	12770±50	13200±50	15095~15345
DH1-3	228~232	<i>Gruber+G.sacculifer</i>	18710±60	19130±60	22435~22680
DH1-4	352~356	<i>Gruber+G.sacculifer</i>	40520±510	40930±510	43150~44970
DH1-5	480~484	<i>Gruber+G.sacculifer</i>	39170±400	39590±400	42455~43525
DH1-6	544~548	<i>Gruber+G.sacculifer</i>	> 43500	> 43500	> 43500

注: (1) 修正的日历年龄使用 CALIB 6.1.0 程序<sup>[23]</sup>和 Marine 13 校正数据<sup>[24]</sup>。0 Cal. ka BP = 1950 AD。

### 3 讨论

灰黑色黏土质粉砂层(A<sub>1</sub>和A<sub>3</sub>)的沉积物 Ti/Al = 0.05、K/Al = 0.3、Fe/Al = 0.55 类似于神狐海域表层沉积物的值(Ti/Al = 0.05、K/Al = 0.3、Fe/Al = 0.52)<sup>[25]</sup>, 中值粒径一般在 6~15 μm 之间, 矿物组成以陆源长英质和黏土为主, 也显示神狐海域表层正常半深海沉积特征<sup>[26]</sup>。

灰白色富有孔虫砂层(A<sub>2</sub>和A<sub>4b</sub>)富含碳酸钙, 中值粒径大于 250 μm, 有孔虫砂含量高。Ti/Al、K/Al、Fe/Al 和 Zr/Al 比值高, 显示相对于 A<sub>1</sub> 层, 富有孔虫砂层(A<sub>2</sub>和A<sub>4b</sub>)的陆源粗颗粒碎屑物质含量相对黏土矿物的升高。混合层 A<sub>4a</sub> 层砂含量呈现向上逐渐降低, 粉砂和黏土含量向上逐渐增高, 碳酸钙含量依次递减, K/Al 和 Fe/Al 比值也依次递减, 显示富钾和铁等陆源粗颗粒碎屑物质相对于黏土矿物含量输入的降低, 形成典型的正粒序沉积层, 而且 A<sub>4a</sub> 层顶部和底部的年龄相差不大(43150~44970 a BP 和 42455~43525 a BP)。

此外, 富有孔虫砂层 A<sub>2</sub> 和 A<sub>4b</sub> 包含大量浮游有孔虫和浅水的生物碎屑(如珊瑚、珊瑚藻、贝类), 碳酸钙含量大于 80%(图 2), 同时含有末次冰期以前的有孔虫, 如 *Dentoglobigerina altispira altispira*、*Globoquadrina dehiscens*、*Globorotaliamulti camerata* 和 *Spaeroidinellopsis kochi*。南海西部深海平原和南海北部东沙海域也有相似的浊流搬运引起的碳酸钙富集现象<sup>[17,27]</sup>。

在粒度 CM 图中粒度分布分为 3 个部分: 富有孔虫砂层(A<sub>2</sub>和A<sub>4b</sub>)的 M 值小于 4, C 值在 0~1 之间; 灰黑色黏土质粉砂层(A<sub>1</sub>和A<sub>3</sub>)的 M 值在 6~8 之间, C 值在 0~4 之间; 混合层(A<sub>4a</sub>)在两者之间过渡(图 3)。这些特征表明 A<sub>2</sub> 和 A<sub>4</sub> 层为跳跃搬运的牵引流沉

积<sup>[28]</sup>。A<sub>2</sub> 和 A<sub>4</sub> 层中浅水有孔虫含量高, 表明这些沙质沉积物是由陆架或上陆坡搬运来的。而 A<sub>2</sub> 层与上下界面均为突变接触, 可能不是由单一的重力流形成的。大量的研究表明深水底流形成的沉积物具有顶部突变的特征, 在深水区由底流形成的牵引沉积比较普遍, 且形成向上突变的接触关系<sup>[17,29]</sup>。因此, A<sub>2</sub> 和 A<sub>4</sub> 富有孔虫层可能是浊流经底流改造后的碎屑流沉积, 其特征是缺乏泥质沉积, 是在底流的作用下泥质细颗粒物被淘洗(即再悬浮)后搬走, 留下了以细砂和少量粗砂为主的沉积物。台湾海峡也有类似的富有孔虫沉积, 碳酸钙含量大于 60%以上, 富含大量浅水底栖有孔虫, 为重力流和底流交互作用的产物<sup>[18]</sup>。

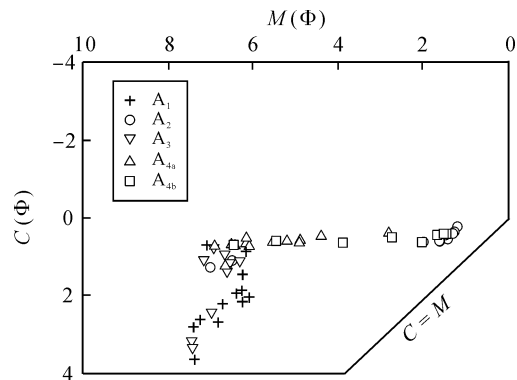


图 3 DH-1 孔的粒度 CM 图

Fig.3 Particle size CM diagram for the DH-1 core sediments, whereas C is the particle size for 1% content at cumulative curve, M is the particle size for 50% content at cumulative curve, i.e., the median particle size  
C 为累积曲线上颗粒含量 1% 处对应的粒径; M 值是累积曲线上 50% 处对应的粒径, 即粒度中值。

### 4 结论

南海北部神狐海域水深 1805 m 的陆坡区沉积柱样中发育了 2 层富有孔虫沉积, 其中的粗粒成分、

碳酸钙含量和 Ti/Al、K/Al 和 Fe/Al 比值比正常海相沉积物高。下部的 A<sub>4</sub> 层沉积发生在 42.46~43.53 ka BP 之后, 上部的 A<sub>2</sub> 层沉积发生在 15.1~15.3 ka BP 之后。浊流从浅海带来的大量有孔虫在陆坡沉积, 并经底流改造形成富有孔虫沉积层。

感谢中国科学院地球化学研究所漆亮研究员帮助完成了样品的主元素分析、中国科学院南海海洋研究所陈忠研究员在粒度分析中提供的帮助以及中国科学院广州地球化学研究所黄琦瑜教授和陈文煌博士对有孔虫鉴定的指导。特别感谢两位审稿人提出的宝贵修改意见, 对论文质量的提高具有非常大的帮助。

#### 参考文献(References):

- [1] Ducassou M, Migeon S, Mulder T, Murat A, Capotondi L, Bernasconi SM, Mascle J. Evolution of the Nile deep-sea turbidite system during the Late Quaternary: Influence of climate change on fan sedimentation [J]. *Sedimentology*, 2009, 56: 2061–2090.
- [2] Weaver P P E, Kuijpers A. Climatic control of turbidite deposition on the Madeira Abyssal Plain [J]. *Nature*, 1983, 306(5941): 360–363.
- [3] Gawenda P, Winkler W, Schmitz B, Adatte T. Climate and bioproductivity control on carbonate turbidite sedimentation (Paleocene to earliest Eocene, Gulf of Biscay, Zumaia, Spain) [J]. *J Sediment Res*, 1999, 69: 1253–1261.
- [4] Prins M A, Postma G. Effects of climate, sea level, and tectonics unraveled for last deglaciation turbidite records of the Arabian Sea [J]. *Geology*, 2000, 28(4): 375–378.
- [5] Shanmugam G. Ten turbidite myths [J]. *Earth Sci Rev*, 2002, 58: 311–341.
- [6] 郑旭峰, 李安春, 万世明, 于兆杰. 冲绳海槽中全新世的浊流沉积及其控制因素[J]. *第四纪研究*, 2014, 34(3): 579–589. Zheng Xu-feng, Li An-chun, Wan Shi-ming, Yu Zhao-jie. The turbidity events in Okinawa Trough during middle Holocene and its potential dominating mechanisms [J]. *Quatern Sci*, 2014, 34(3): 579–589 (in Chinese with English abstract).
- [7] Nisbet E G, Piper D J W. Giant submarine landslides [J]. *Nature*, 1998, 392(6674): 329–330.
- [8] Damuth J E. Migrating sediment waves created by turbidity currents in the northern South China Sea [J]. *Geology*, 1979, 7(11): 520–523.
- [9] 章伟艳, 张富元, 张霄宇. 南海东部海域柱状沉积物浊流沉积探讨[J]. *热带海洋学报*, 2003, 22(3): 36–43. Zhang Wei-yan, Zhang Fu-yuan, Zhang Xiao-yu. Characteristics of turbidity deposits from sediment cores in eastern South China Sea [J]. *J Trop Oceanogr*, 2003, 22(3): 36–43 (in Chinese with English abstract).
- [10] 吴能友, 张海敞, 杨胜雄, 梁金强, 王宏斌. 南海神狐海域天然气水合物成藏系统初探[J]. *天然气工业*, 2007, 27(9): 1–7. Wu Neng-you, Zhang Hai-qi, Yang Sheng-xiong, Liang Jin-qiang, Wang Hong-bin. Preliminary discussion on natural gas hydrate (NGH) reservoir system of Shenhu srea, north slope of South China Sea [J]. *Nat Gas Indus*, 2007, 27(9): 1–7 (in Chinese with English abstract).
- [11] Boswell R, Frye M, Shelander D, Shedd W, McConnell D R, Cook A. Architecture of gas-hydrate-bearing sands from Walker Ridge 313, Green Canyon 955, and Alaminos Canyon 21: Northern deepwater Gulf of Mexico [J]. *Mar Pet Geology*, 2012, 34(1): 134–149.
- [12] 李华, 王英民, 徐强, 卓海腾, 吴嘉鹏, 唐武, 李冬, 徐艳霞. 南海北部珠江口盆地重力流与等深流交互作用沉积特征、过程及沉积模式[J]. *地质学报*, 2014, 88(6): 1120–1129. Li Hua, Wang Ying-min, Xu Qiang, Zhuo Hai-teng, Wu Jia-peng, Tang Wu, Li Dong, Xu Yan-xia. Interactions between down-slope and along-slope processes on the northern slope of South China Sea: Products, processes, and depositional model [J]. *Acta Geol Sinica*, 2014, 88(6): 1120–1129.
- [13] 佟宏鹏, 冯东, 陈多福. 南海北部冷泉碳酸盐岩的矿物、岩石及地球化学研究进展[J]. *热带海洋学报*, 2012, 31(5): 45–56. Tong Hong-peng, Feng Dong, Chen Duo-fu. Progresses on petrology, mineralogy and geochemistry of cold seep carbonates in the northern South China Sea [J]. *J Trop Oceanogr*, 2012, 31(5): 45–56 (in Chinese with English abstract).
- [14] 陆红锋, 陈芳, 刘坚, 廖志良, 孙晓明, 苏新. 南海北部神狐海区的自生碳酸盐岩烟囱——海底富烃流体活动的记录[J]. *地质论评*, 2006, 52(3): 352–357. Lu Hong-feng, Chen Fang, Liu Jian, Liao Zhi-liang, Sun Xiao-ming, Su Xin. Characteristics of authigenic carbonate chimneys in Shenhu area, northern South China Sea: Record-ers of hydrocarbon-enriched fluid activity [J]. *Geol Rev*, 2006, 52(3): 352–357 (in Chinese with English abstract).
- [15] 黎明碧, 金翔龙, 李家彪, 初凤友, 方银霞, 唐勇. 南海中北部中新世陆坡凹陷沉积充填与古陆坡形态演变[J]. *海洋学报*, 2005, 27(3): 73–80. Li Ming-bi, Jin Xiang-long, Li Jia-biao, Chu Feng-you, Fang Yin-xia, Tang Yong. Miocene deposition and palaeo-slope evolution of the middle part of northern continental slope in the South China Sea [J]. *Acta Oceanol Sinica*, 2005, 27(3): 73–80 (in Chinese with English abstract).
- [16] 孙珍, 庞雄, 钟志洪, 周蒂, 陈长民, 郝沪军, 何敏, 黄春菊, 许鹤华. 珠江口盆地白云凹陷新生代构造演化动力学[J]. *地学前缘*, 2005, 12(4): 489–498. Sun Zhen, Pang Xiong, Zhong Zhi-hong, Zhou Di, Chen Chang-min, Hao Hu-jun, He Min, Huang Chun-ju, Xu He-hua. Dynamics of Tertiary tectonic evolution of the Baiyun sag in the pearl river mouth basin [J]. *Earth Sci Front*, 2005, 12(4): 489–498 (in Chinese with English abstract).
- [17] 庞雄, 陈长民, 朱明, 何敏, 申俊, 柳保军. 南海北部陆坡白云深水油气成藏条件探讨[J]. *中国海上油气*, 2006, 18(3): 145–149. Pang Xiong, Chen Chang-min, Zhu Ming, He Min, Shen Jun,

- Liu Bao-jun. A discussion about hydrocarbon accumulation conditions in Baiyun deep-water Area, the northern continental slope, South China Sea [J]. *China Offshore Oil Gas*, 2006, 18(3): 145–149 (in Chinese with English abstract).
- [18] Suess E. Documentation of sediment core SO177/2-133[Z]. 2007, doi:10.1594/PANGAEA.610197
- [19] 徐尚, 王英民, 彭学超, 邱燕, 李卫国. 台湾峡谷 HD133 柱状样中重力流、底流交互沉积的证据[J]. *地质学报*, 2012, 86(11): 1792–1798.  
Xu Shang, Wang Ying-min, Peng Xue-chao, Qiu Yan, Li Wei-guo. Evidence of the interactive deposition between gravity and bottom currents revealed by core HD133 from Taiwan canyon [J]. *Acta Geol Sinica*, 2012, 86(11): 1792–1798.
- [20] Taylor J C. Computer programs for standardless quantitative analysis of minerals using the full powder diffraction profile [J]. *Powder Diffraction*, 1991, 6(1): 2–9.
- [21] Qi L, Zhou M F, Malpas J, Sun M. Determination of rare earth elements and Y in ultramafic rocks by ICP-MS after preconcentration using Fe(OH)(3) and Mg(OH)(2) coprecipitation [J]. *Geostand Geoanal Res*, 2005, 29: 131–141.
- [22] Turekian K K, Wedepohl K H. Distribution of the elements in some major units of the earth's crust [J]. *Geol Soc Am Bull*, 1961, 72: 175–192.
- [23] Stuiver M, Reimer P J. Extended C-14 Data-Base and Revised Calib 3.0 C-14 Age Calibration Program [J]. *Radiocarbon*, 1993, 35: 215–230.
- [24] Reimer P J, Bard E, Bayliss A, Beck J W, Blackwell P G, Ramsey C B, Buck C E, Cheng H, Edwards R L, Friedrich M, Grootes P M, Guilderson T P, Hafflidason H, Hajdas I, Hatté C, Heaton T J, Hoffmann D L, Hogg A G, Hughen K A, Kaiser K F, Kromer B, Manning S W, Niu M, Reimer R W, Richards D A, Scott E M, Southon J R, Staff R A, Turney C S M, van der Plicht J. Intcal 13 and Marine 13 Radiocarbon Age Calibration Curves 0–50,000 Years Cal Bp [J]. *Radiocarbon*, 2013, 55: 1869–1887.
- [25] 赵青芳, 龚建明, 陈建文, 贺行良, 付少英. 南海神狐表层沉积物常量元素地球化学特征及其物源分析[J]. *海洋地质动态*, 2009, 25(9): 10–14.  
Zhao Qing-fang, Gong Jian-ming, Chen Jian-wen, He Xing-liang, Fu Shao-ying. Geochemical characteristics and provenance analysis of major elements of surface sediments in Shenhu sea area of South China Sea [J]. *Mar Geol Lett*, 2009, 25(9): 10–14 (in Chinese with English abstract).
- [26] Zhao Y L, Liu Z F, Colin C, Xie X, Wu Q. Turbidite deposition in the southern South China Sea during the last glacial: Evidence from grain-size and major elements records [J]. *Chinese Sci Bull*, 2011, 56(33): 3558–3565.
- [27] 陈芳, 李学杰, 刘坚, 陆红锋, 王金莲, 张欣, 廖志良, 陈超云. 南海西部深海平原 SA14-34 岩心浊流沉积特征[J]. *南海地质研究*, 2007 (00): 31–39.  
Chen Fang, Li Xue-jie, Liu Jian, Lu Hong-feng, Wang Jin-lian, Zhang Xin, Liao Zhi-liang, Chen Chao-yun. Characteristics of turbidity current deposit of core SA14-34 in deep sea basin of the western South China Sea [J]. *South China Sea Geol Res*, 2007 (00): 31–39 (in Chinese with English abstract).
- [28] Passega R. Grain size representation by CM pattern as a geological tool [J]. *J Sediment Res*, 1964, 34: 830–847.
- [29] 方爱民, 李继亮, 侯泉林. 浊流及相关重力流沉积研究综述[J]. *地质论评*, 1998, 44(3): 270–280.  
Fang Ai-min, Li Ji-liang, Hou Quan-lin. Sedimentation of turbidite currents and relative gravity flows: A review [J]. *Geol Rev*, 1998, 44(3): 270–280.