

DOI: 10.3724/SP.J.1140.2009.05001

# 南黄海中部泥质区 YE-2 孔 8.4 kaBP 来的沉积特征

王利波<sup>1,2</sup>, 杨作升<sup>1,2</sup>, 赵晓辉<sup>1,2</sup>, 邢磊<sup>3</sup>, 赵美训<sup>3</sup>, Yoshiki Saito<sup>4</sup>, 范德江<sup>1,2</sup>

(1 中国海洋大学 海洋地球科学学院, 青岛 266100;

2 中国海洋大学 海底科学与探测技术教育部重点实验室 青岛 266100;

3 中国海洋大学 海洋化学理论与工程技术教育部重点实验室及海洋有机地球化学研究所, 青岛 266100;

4 Geological Survey of Japan, AIST, Central 7, Higashi 1-1-1, Tsukuba Ibaraki 305-8567, Japan)

**摘要:** 对取自南黄海中部泥质区 YE-2 钻孔的 6.1 m 岩心进行了年代学、沉积学、微体古生物学和  $U_{37}^{K'}$  海表温度分析, 结果显示, 该孔沉积物基本类型为黏土质粉砂, 8.4 kaBP 来的沉积环境可分为 3 段: 8.4~6.9 kaBP 为砂含量达 13% 的滨岸浅水环境; 6.9~6.1 kaBP 为砂含量 8% 的滨岸浅水向稳定浅海过渡的环境; 6.1~0 kaBP 为基本不含砂的黏土质粉砂稳定浅海环境。表层海水温度(SST)在滨岸浅水阶段较低, 平均约 14.2 °C; 在第 2 阶段从 6.9 kaBP 开始增加, 最高达 18.1 °C, 指示了黄海暖流的入侵; 6.4 kaBP 增温结束后, 浅海阶段 SST 稳定在 15~16 °C 之间, 同时有 3 个 SST 平均为 13.9 °C 的短暂低温期, 大致为 5.7~5.2、3.7~3.2 和 2.3~1.8 kaBP。在稳定浅海环境的黏土质粉砂地层中发现了罕见的 3 个砂质粉砂质粗粒级夹层, 大致形成于 6.0、3.9 和 2.5 kaBP, 其粒度具有风暴沉积特征, 重矿物表现出变质岩特点,  $U_{37}^{K'}$ -SST 和黏土矿物指示其沉积环境的温度偏高。上述特征与岩心其他所有层位差异较大, 显示了异地搬运的特征, 可能为风暴沉积。根据 AMS  $^{14}C$  测年, 不考虑风暴沉积, YE-2 岩心的沉积速率在 50.7~75.6 cm/ka 之间。

**关键词:** 泥质沉积; 古环境;  $U_{37}^{K'}$  - SST; 粗粒级夹层; 南黄海

中图分类号: P736.21

文献标识码: A

文章编号: 0256-1492(2009)05-0001-11

黄海是一个镶嵌于中国大陆和朝鲜半岛之间的半封闭陆架浅海, 末次冰消期以来, 受全球海平面变化的影响黄海地区沉积环境发生剧烈变迁, 所接收的巨量陆源细颗粒物质在复杂的海洋动力系统的作用下形成了不同的泥质沉积区, 如北黄海泥质区、南黄海东部泥质区、南黄海中部泥质区(图 1)等。这些泥质沉积体是研究晚更新世以来黄海沉积环境的良好载体, 被广泛应用于该区古环境恢复和重建, 获得了丰富的信息<sup>[1-7]</sup>。

南黄海中部泥质区是黄海几处泥质沉积中分布最广的一个, 面积约 50 000 km<sup>2</sup>。沉积物以黏土为主(含量 > 70%), 中心区黏土组分最高含量达 82.4%, 向四周减少, 粉砂的含量相应增加<sup>[8]</sup>。该泥质沉积的厚度不均匀, 从 3~5 m<sup>[9]</sup> 到 16 m<sup>[10]</sup>, 沉积速率很小, 平均约 1 mm/a<sup>[11-13]</sup>。泥质沉积的结构均匀, 粒度组成在垂向上十分一致<sup>[14]</sup>, 泥质沉积含有丰富的自生黄铁矿<sup>[15-17]</sup>, 是在比较稳定的还原环境下形成的。

前人通过研究取自南黄海中部泥质区的岩心的底栖有孔虫组合更替及其氧碳同位素变化, 对于全新世以来南黄海海洋环境的演化有了一定认识。庄丽华等<sup>[18]</sup> 认为南黄海中部泥质区开始形成的时代约为 9.7 kaBP。Kim 等<sup>[1-2]</sup> 认为 8.47~6.63 kaBP 期间, 黄海的海洋环境逐渐转变为更加开放和高盐, 从而标志着现代黄海环流体系的建立。近期的研究将该区全新世南黄海古环境演化分为 3 个阶段: 8.4~6.9 kaBP 为低盐河口环境、6.9 至 6~5 kaBP 为低盐浅海环境、6~5 kaBP 至今为现代陆架海环境<sup>[7]</sup>。另外, 黄海暖流的入侵在全新世黄海海洋环境的演化过程中扮演着重要角色, 但对于黄海暖流的形成时代, 目前尚无统一的认识, 学者们根据有孔虫组合和氧碳同位素分析, 得到的黄海暖流形成时间大体为 7.5~4.3 kaBP<sup>[1, 3, 5, 6, 19]</sup>。

由于沉积环境基本稳定, 泥质沉积地层应该是连续的, 但是在取自南黄海中部泥质区的 YE-2 岩心中发现, 全新世泥质沉积中夹有 3 个粗粒级砂质粉砂层, 分别位于不同时段。3 个粗粒级夹层的厚度之和为 103 cm, 约占泥质沉积厚度的 1/3, 其中最厚的夹层达 57 cm。Xiang 等<sup>[7]</sup> 曾根据其底栖有孔虫组合和氧碳同位素分析, 将该岩心记录的全新世南黄海古环境演化分为 3 个阶段, 但对 3 个粗粒级夹层的成因分析不够充分。

基金项目: 国家自然科学基金项目(90211022, 40676032); 国家重点基础研究发展规划项目(2005CB422304)

作者简介: 王利波(1983—), 男, 硕士, 从事海洋沉积学研究,  
E-mail: wanglibowlb@gmail.com

收稿日期: 2009-02-26; 改回日期: 2009-05-04. 文凤英编辑

本文以 YE-2 钻孔 610 cm 以上(8 400 aBP)的全新世沉积为研究对象,通过粒度、有孔虫、黏土矿物、重矿物、碳酸盐和  $U^{K'}-SST$  分析,结合前人的研究结果,在分析本区域海洋环境演化的基础上,探讨不同阶段岩心的沉积特征,重点分析粗粒级夹层的沉积特点,探讨其成因和可能的物源。

## 1 样品与方法

本研究所用的样品 YE-2 钻孔(图 1)位于南黄海中部泥质区,地理坐标  $35^{\circ} 29' 99.59'' N$ 、 $123^{\circ} 19' 99.76'' E$ ,水深 75 m。该岩心由勘 407 号钻探船于 2003 年 8 月 12 日采用锤击方式取得,取心率在 90% 以上,完井深度 18 m。所取岩心经蜡封保存后运往中国海洋大学室内实验室进行详细描述和 2 cm 间隔分样。由于岩心下部缺乏测年数据,本文仅讨论岩心上部 610 cm,下文提到的 YE-2 岩心均指 610 cm 以上沉积物。

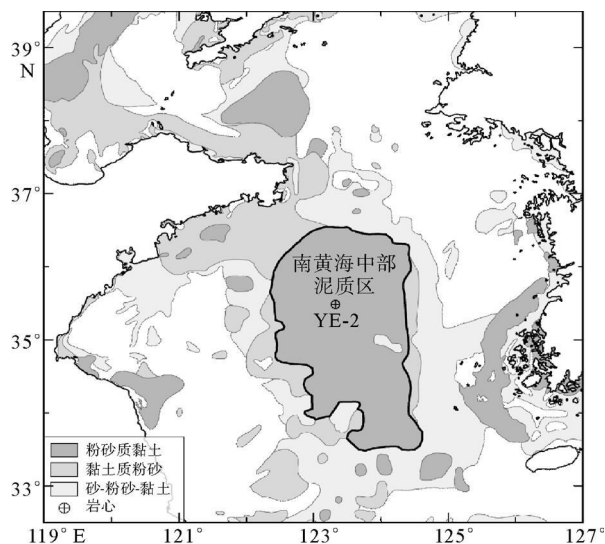


图 1 黄海底质分布(改绘自李广雪等<sup>[20]</sup>),  
南黄海中部泥质区及取样位置

Fig. 1 Sediment distribution in the Yellow Sea  
(modified after LI Guangxue et al. <sup>[20]</sup>),  
the central mud area in the South Yellow Sea  
and location of core YE-2

粒度测试在中国海洋大学海洋地球科学学院完成,每 2 cm 间隔测试一个样品,使用的仪器为英国 Malvern 公司生产的 Mastersizer 2000 型激光粒度仪。仪器测量范围为  $0.02 \sim 2\,000\ \mu m$ ,粒级分辨率为  $0.01\phi$ ,重复测量的相对误差  $< 3\%$ 。测试前只将样品用 20 mL 10% 的  $H_2O_2$  浸泡 24 h 以除去有机质,而并未用酸处理以保留碳酸盐组分,然后用超声

波震荡 30 s 后立刻测量,以保证测量时颗粒充分分散,每份样品连续测量两次,若两次所得粒度频率分布曲线不重合,则需将该份样品重新测试。本文所用粒度参数均根据福克-沃德公式计算得出。

选 6 个层位的样品进行有孔虫鉴定,每份样品以 50 g 干样为定量统计单位,用 250 目(0.063 mm)孔径的标准铜筛冲洗并烘干,然后用  $CCl_4$  浮选,以富集样品中的有孔虫。对浮选样和余样中的有孔虫、介形类挑出进行鉴定统计;对有孔虫、介形类含量多的样品,缩分为 1/2、1/4、1/8……后再鉴定统计;对不足 50 g 的样品,核算为全样的含量统计。

样品用筛分法分离后,选取 0.063 ~ 0.125 mm 粒级的细粉砂组分样品用重液分离法再次进行分离,分离使用的重液为三溴甲烷,密度 2.80,分离后分别计算轻重矿物的百分比,然后在实体显微镜下鉴定重矿物,计算颗粒百分含量。由于岩心 468 cm 以上黏土质粉砂沉积物砂含量少,无法分离出足够量的重矿物,故本文只对粗粒级夹层和 468 cm 以下沉积物共 7 个样品进行重矿物分析。

选取 22 个层位的样品,按斯托克斯沉降定律,提取小于  $2\ \mu m$  的沉积物进行黏土矿物分析,采用黏土矿物常规 X 射线衍射分析方法:自然风干定向样品(N 片)分析和乙二醇饱和处理定向样品(EG 片)分析。所用仪器为日本理学 D/max-rA 型高功率转靶 X 射线衍射仪。测试条件设置:铜靶  $K\alpha$  射线,配用石墨弯晶单色器,电压/电流为 40 kV/100 mA,步进扫描,步进长度  $0.02^{\circ}$  ( $2\theta$ ),预置时间为 0.2 s,扫描速度为  $2^{\circ}/min$ ,扫描范围为  $2.5 \sim 35^{\circ}$  ( $2\theta$ ),狭缝系统 DS(入射狭缝)=SS(防散射狭缝)= $1^{\circ}$ ,RS(接收狭缝光阑)为 0.3 mm。测试在青岛海洋地质研究所 X 射线衍射分析实验室完成。根据乙二醇饱和和定向片的分析结果,对 4 类主要黏土矿物作半定量计算。蒙皂石、伊利石、绿泥石和高岭石的峰位分别采用  $17\text{\AA}$ 、 $10\text{\AA}$ 、 $3.57\text{\AA}$  和  $3.54\text{\AA}$ 。进行黏土矿物含量估算时所用强度因子蒙皂石为 1,伊利石为 4,绿泥石和高岭石为 2<sup>[21-22]</sup>。

剔除掉较大贝壳碎片后,按照海洋地质地球物理调查规范(容量法)进行全样碳酸盐含量测定。共测定 242 个样品,每个样品做 3 个平行样,取其平均值作为实测值。

沉积物被冷冻干燥后,加入二氯甲烷和甲醇(3:1)萃取液以及 24 氘烷和 19 醇组成的内标,超声萃取 4 次,萃取液经 KOH 甲醇溶液水解后,过硅胶柱分离。含有生物标志物的中性组分(长链正构醇类和长链烯酮)经氮吹富集、衍生化处理后上机分析。

对处理好的样品用气相色谱质谱仪 (Thermo) 定性分析, 用气相色谱定量分析 (Agilent 6890N)。所用色谱柱为 HP-1 (50 m), 所用载气为氦气, 流速 1.2 mL/min。生物标志物含量通过其色谱峰与内标峰对比计算得到。该测试在同济大学海洋地质国家重点实验室完成, 样品层位间隔为 4 cm。

挑选 7 个层位的底栖有孔虫混合样品和 1 个层位的 (*Ammonia aomoriensis*) 样品送往美国 Beta Analyses 公司完成年代测试。将所得 8 个 AMS  $^{14}\text{C}$  年龄数据应用 Calib 5.0.2 软件<sup>[23]</sup> 转换为日历年龄 (表 1)。年龄转换时采用 Marine04 曲线<sup>[24]</sup>, 由于缺乏区域碳储库年龄数据, 考虑到西北太平洋区域碳储库年龄只有  $(7.6 \pm 4.1) \text{ a}^{[25]}$ , 故参照 Kong 等<sup>[19]</sup> 的方法将区域碳储库年龄设为 0。本文所使用的年龄均为日历年龄。

表 1 南黄海中部泥质区 YE-2 岩心 AMS  $^{14}\text{C}$  测年数据  
Table 1 AMS  $^{14}\text{C}$  data of core YE-2 in the central mud area of the South Yellow Sea

深度 / cm	测试材料	$^{14}\text{C}$ 年龄 / aBP	日历年龄 / aBP	日历年龄范围 (2 $\sigma$ ) / aBP
71	混合种底栖有孔虫	1 730 $\pm$ 40	1 283	1 189~1 365
96	混合种底栖有孔虫	2 060 $\pm$ 40	1 631	1 518~1 743
150	混合种底栖有孔虫	3 430 $\pm$ 40	3 309	3 198~3 407
194	混合种底栖有孔虫	3 390 $\pm$ 40	3 267	3 147~3 365
358	混合种底栖有孔虫	4 530 $\pm$ 40	4 735	4 600~4 831
457	混合种底栖有孔虫	4 740 $\pm$ 40	4 977	4 842~5 172
492	混合种底栖有孔虫	6 090 $\pm$ 40	6 517	6 409~6 626
589	<i>Ammonia aomoriensis</i>	7 570 $\pm$ 40	8 027	7 941~8 137

2 结果

2.1 岩心岩性和粒度

根据岩心岩性 (图 2)、粒度参数剖面 (图 3)、粒度频率曲线 (图 3), YE-2 岩心上部 610 cm 可分为 3 段:

下段: 610~515 cm (8.4~6.9 kaBP), 以橄榄灰色黏土质粉砂为主, 具有不连续波状层理, 含贝壳碎片, 偶见虫孔、植物根系和褐色团粒。相邻层位粒度参数波动较大, 砂含量总体介于 10%~16% 之间。平均粒径介于 5.8~6.3  $\Phi$  之间, 平均 6.0  $\Phi$ ; 分选系数介于 1.83~2.11 之间, 平均 1.96; 偏态介于 0.08~0.40 之间, 平均 0.25; 峰度介于 0.85~

1.11 之间, 平均 0.95。粒度频率曲线呈单峰分布, 峰值位于 5  $\Phi$  左右。

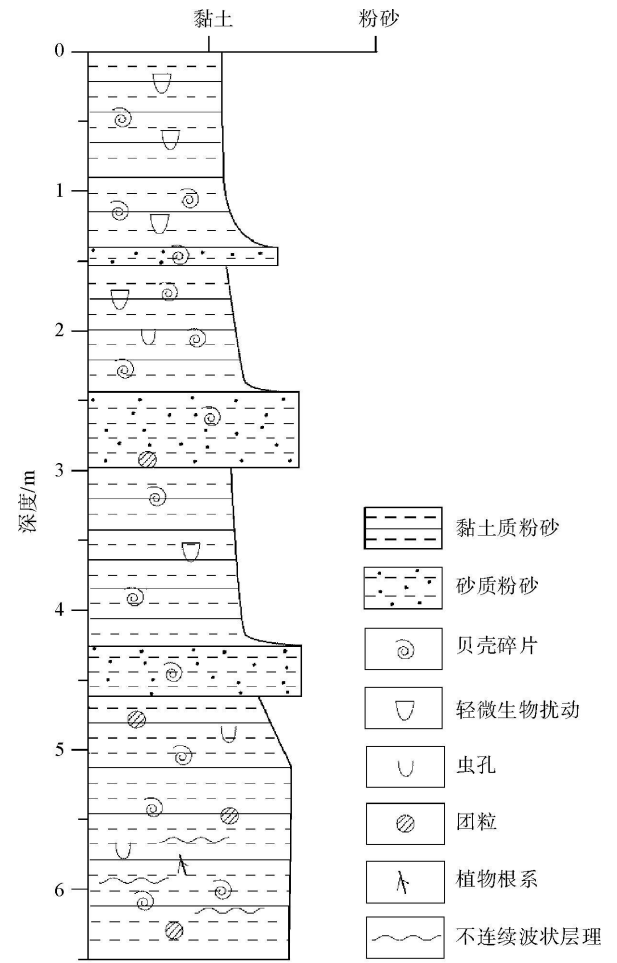


图 2 南黄海中部 YE-2 孔岩心地层柱状图  
Fig. 2 Sedimentary column of core YE-2

中段: 515~468 cm (6.9~6.1 kaBP), 以黏土质粉砂为主, 深褐色与灰色互层, 互层界面不规则, 偶见贝壳碎片、虫孔和暗褐色团粒; 与下段地层界面渐变。相邻层位粒度参数波动较小, 砂含量总体介于 6%~10% 之间。平均粒径介于 5.9~6.8  $\Phi$  之间, 平均 6.4  $\Phi$ ; 分选系数介于 1.53~2.01 之间, 平均 1.77; 偏态介于 0.08~0.28 之间, 平均 0.14; 峰度介于 0.91~1.05 之间, 平均 0.97。粒度频率曲线呈单峰分布, 峰值位于 6.2  $\Phi$  左右。

上段: 468~0 cm (6.1~0 kaBP), 以灰色黏土质粉砂为主, 并夹 3 个砂质粉砂层。除 3 个粗粒级夹层外, 黏土质粉砂无层理, 呈块状构造, 有轻微的生物扰动, 含贝壳碎片, 偶见虫孔。从 89 cm 向上, 沉积物由灰色逐渐过渡为橄榄灰色、流塑状态。相邻层位粒度参数波动很小, 砂含量 < 1%, 在整个岩心中最低。平均粒径介于 7.1~7.9  $\Phi$  之间, 平均

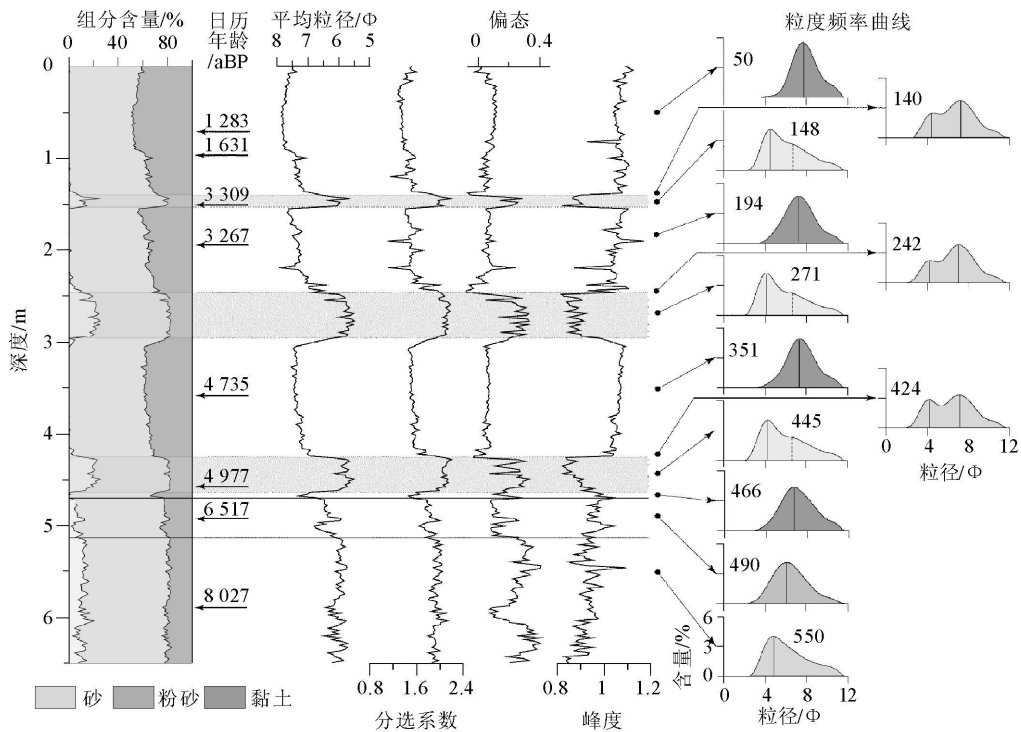


图3 南黄海中部 YE-2 孔粒度参数变化和特征层位的粒度频率分布曲线

Fig. 3 Variations of the grain-size parameters and frequency distribution curves for representative layers in core YE-2

7.5  $\Phi$ ; 分选系数介于 1.15~1.65 之间, 平均 1.47; 偏态介于 -0.05~0.11 之间, 平均 0.06; 峰度介于 0.95~1.12 之间, 平均 1.07。粒度频率曲线呈单峰分布, 峰值位于 7.6  $\Phi$  左右。

本段 3 个粗粒级夹层分别出现在 463~426 (约 6.0 kaBP)、297~244 (约 3.9 kaBP) 和 155~142 cm (约 2.5 kaBP) 处, 以褐灰色砂质粉砂为主。夹层的岩性特征一致, 但与相邻的黏土质粉砂差别较大, 与下伏地层界面侵蚀突变, 与上覆地层渐变过渡, 相邻层位粒度参数波动很大, 砂含量最高可达 24%~29%。平均粒径为 5.5~6.5  $\Phi$ , 平均 5.8  $\Phi$ ; 分选系数为 1.95~2.19, 平均 2.08; 偏态为 0.07~0.33, 平均 0.23; 峰度为 0.83~0.96, 平均 0.89。粒度频率曲线近似呈双峰分布, 主峰位于 4.2  $\Phi$  处, 次峰不明显, 位于 6.8  $\Phi$  左右。

2.2 有孔虫

YE-2 孔岩心共选取了 6 个层位进行有孔虫分析 (图 4)。6 个样品中的介形类和浮游有孔虫丰度都极低, 均不超过 10 枚, 个别层位缺失。底栖有孔虫简单分异度最低为 14 种, 最高为 23 种, 丰度最低为 1350 枚/50g, 最高为 8912 枚/50g。简单分异度和丰度的低值都出现在底部两个层位, 高值都出现在顶部 4 个层位。

496 cm 处的有孔虫组合以广盐性浅水种 *Ammonia beccarii* (Linné) varsi 和 *Elphidium magellanicum* (Heron-Allen et Earland) 为主, 其中 *A. beccarii* 的百分含量最高, 为 49%, 浅海冷水种 *Buccella frigida* (Cushman) 和 *Protelphidium tuberculatum* (d'Orbigny) 的含量相对其他层位也较高, 介形类只见 2 枚 *S. impressa* 和 1 枚 *C. albicans* (广盐性陆相介形类)。据 Xiang 等<sup>[7]</sup> 的研究, 在夹层顶部位置有孔虫缺失, 本文的碳酸盐数据也表明在夹层顶部附近碳酸盐含

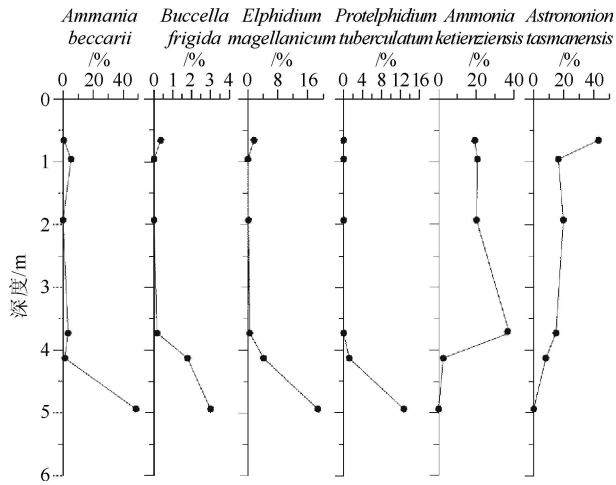


图4 南黄海中部 YE-2 孔有孔虫标志种含量变化

Fig. 4 Variations of percentage of indicative foraminiferal species in core YE-2

量最低, 418 cm 位于其中一个砂质粉砂夹层的顶部, 该位置的底栖有孔虫丰度最低, 这与上述结果相对应。顶部 4 个层位的底栖有孔虫以大于 50 m 的浅海种 *Ammonia ketienziensis*(Ishizaki)和 *Astronion tasmanensis* (Carter)的含量最高, 两者之和平均为 48%, 介形类出现的属种也均为主要生活在 50 m 以深浅海中的常见种。

2.3 黏土矿物

如图 5 所示, 岩心沉积物黏土矿物以伊利石+绿泥石+高岭石+蒙皂石组合为主, 前三者含量稳定, 蒙皂石含量不稳定。伊利石含量在整个岩心中最高, 变化范围为 49%~67%, 平均含量为 58%; 绿泥石和高岭石含量次之, 变化范围分别为 12%~20%和 9%~15%, 平均值分别为 16%和 12%。蒙皂石含量变化范围为 3%~21%, 平均值为 14%。黏土矿物含量和伊利石/高岭石比值在垂向上无阶段性变化, 但在 3 个粗粒级夹层中, 伊利石/高岭石比值明显降低。

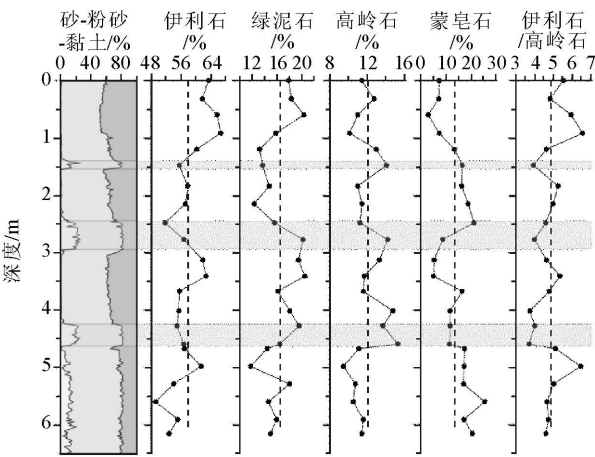


图 5 南黄海中部 YE-2 孔黏土矿物含量变化  
Fig. 5 Variations of percentage of clay minerals in core YE-2

2.4 粗粒级夹层重矿物

3 个粗粒级夹层重矿物含量相近, 平均 95%, 岩心下段黏土质粉砂层重矿物含量稍低, 为 68%, 7 个样品共鉴定出 21 种重矿物(图 6)。

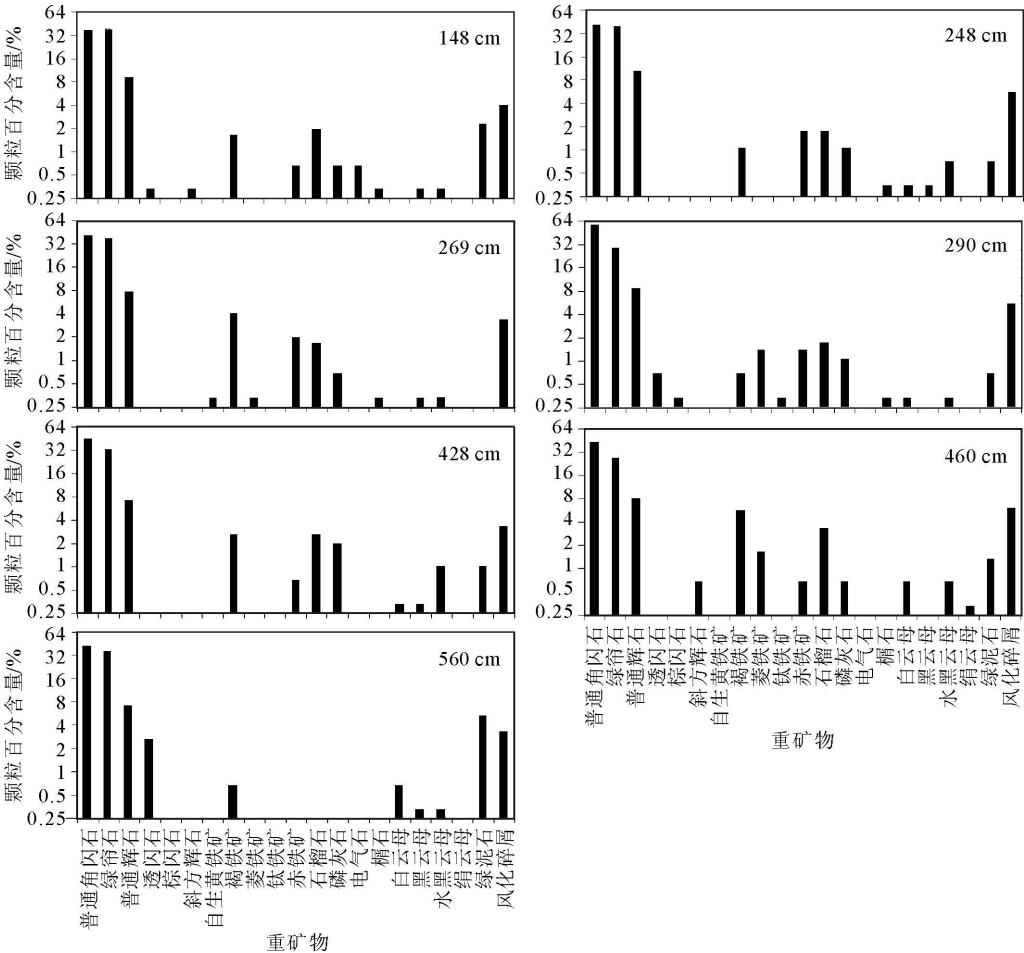


图 6 南黄海中部 YE-2 孔粗粒级夹层重矿物特征

Fig. 6 Characteristics of heavy minerals in the coarse grain layers

3 个粗粒级夹层的重矿物组合基本相同, 普通角闪石、绿帘石、普通辉石含量高, 3 种矿物含量之和为平均 85%, 不透明金属矿物包括褐铁矿、赤铁矿、菱铁矿、钛铁矿、自生黄铁矿, 其含量之和平均 4.4%, 石榴石含量平均 2%, 磷灰石含量平均 1%, 云母类矿物包括白云母、黑云母、水黑云母和绢云母, 其含量之和平均 1.1%, 绿泥石含量 1%, 风化碎屑含量平均 4.5%, 另外, 个别层位还发现透闪石、棕闪石、斜方辉石、电气石、榍石, 但含量均 < 1%。下段黏土质粉砂层重矿物也以普通角闪石、绿帘石、普通辉石为主, 3 种矿物含量之和为 86.7%, 但与砂质粉砂夹层相比, 透闪石、绿泥石含量高, 褐铁矿含量低, 并且未发现在砂质粉砂层中普遍存在且含量较高的赤铁矿、石榴石和磷灰石等矿物。

## 2.5 碳酸盐

如图 7 所示, 岩心前 5 m 的碳酸盐含量波动范围在 0.4%~7.5% 之间, 平均 3.0%。500~468 cm 的碳酸盐含量相对较低, 平均 2.7%, 而且相邻层位间波动很大。468~0 cm 段除 3 个夹层外的层位碳酸盐含量相对较高, 平均 3.3%, 其中 102~12 cm (1.7~0.2 kaBP) 段碳酸盐含量最高, 平均 4.5%。3 个粗粒级夹层碳酸盐含量低, 平均 2.2%, 并且在每个夹层内都表现出由底到顶逐渐降低的相同趋势。在 3 个夹层顶部向正常泥质沉积过渡的部位, 碳酸盐含量最低。由粗粒级夹层过渡到夹层上部的泥质沉积后, 碳酸盐含量又逐渐升高。

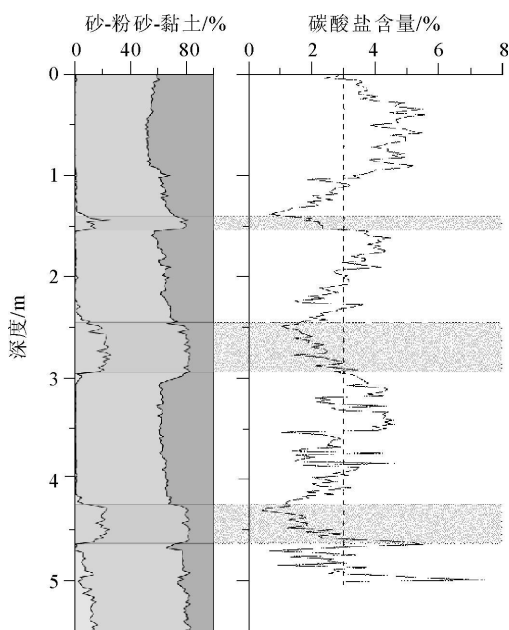


图 7 南黄海中部 YE-2 孔碳酸盐含量变化

Fig. 7 Variation of percentage of carbonate in core YE-2

## 2.6 $U_{37}^{K'}$ -SST 古温度

岩心烯酮含量在 468 cm 以下 (6.1 kaBP 以前) 的黏土质粉砂和 3 个粗粒级夹层中较低 (图 8 中), 前者介于 30.6~127.8 ng/g 之间, 平均 59.7 ng/g, 后者介于 19.5~206.5 ng/g 之间, 平均 69.5 ng/g。468 cm 以上 (6.1 kaBP 以来) 的黏土质粉砂中烯酮含量较高, 为 179.6~1063.4 ng/g, 平均 485.1 ng/g。

岩心  $U_{37}^{K'}$ -SST 的垂向变化 (图 8 右) 可分为 3 段: 596~515 cm (8.1~6.9 kaBP) 表层海水温度 (SST) 整体较低, 相邻层位波动很大, 介于 13.1~17.4 °C 之间, 平均 14.2 °C。515~484 cm (6.9~6.4 kaBP) 是表层海水温度 (SST) 持续升高的阶段。484~0 cm (6.4~0 kaBP) 表层海水温度 (SST) 总体稳定, 但有 3 个高值区间和 3 个低值区间。3 个高值区间与 3 个粗粒级夹层相对应, 表层海水温度 (SST) 波动大, 介于 15.7~22.8 °C 之间, 平均 19.0 °C; 3 个低值区间位于 409~385、226~190、129~109 cm, 表层海水温度 (SST) 介于 12.8~15.1 °C 之间, 平均 13.9 °C。由于 3 个粗粒级夹层隔断了地层的连续性, 其时段只能大概地对应于 5.7~5.2、3.7~3.2、2.3~1.8 kaBP。除高值区间和低值区间外的其他层位表层海水温度 (SST) 稳定, 总体呈先波动式降温, 到 105 cm (1.7 kaBP) 又开始波动式升温的趋势, 相邻层位温度波动很小, 介于 15.1~17.4 °C, 平均 16.1 °C。3 个低温区间比正常情况下表层海水温度平均低 2 °C 左右, 其中最低值比正常值低 3.3 °C; 3 个高温区间比正常情况下表层海水温度 (SST) 平均高 3 °C 左右, 其中最高值比正常值高 6.7 °C。

## 3 讨论

### 3.1 沉积环境演化

根据 Liu 等<sup>[26]</sup> 的研究结果, 15~7 kaBP 之间黄海的海平面快速上升, 到 9.2 kaBP 左右已上升至 -25 m 处, 此时中国东部陆架大部分区域已被海水覆盖, 因此, YE-2 孔岩心 8400 aBP 来的沉积物是在海洋环境下形成的。浅海 (潮坪和陆架) 沉积环境下沉积物分选差, 偏态系数 < 1, 在滨外陆架, 砂级组分几乎阙如<sup>[27]</sup>, 岩心粒度参数与上述特征相符, 表明是在浅海环境下形成的, 不同阶段粒度参数的差异, 是由当时所处的亚环境决定的。610~515 cm (8.4~6.9 kaBP) 与上面两段相比, 平均粒径较粗, 相邻层

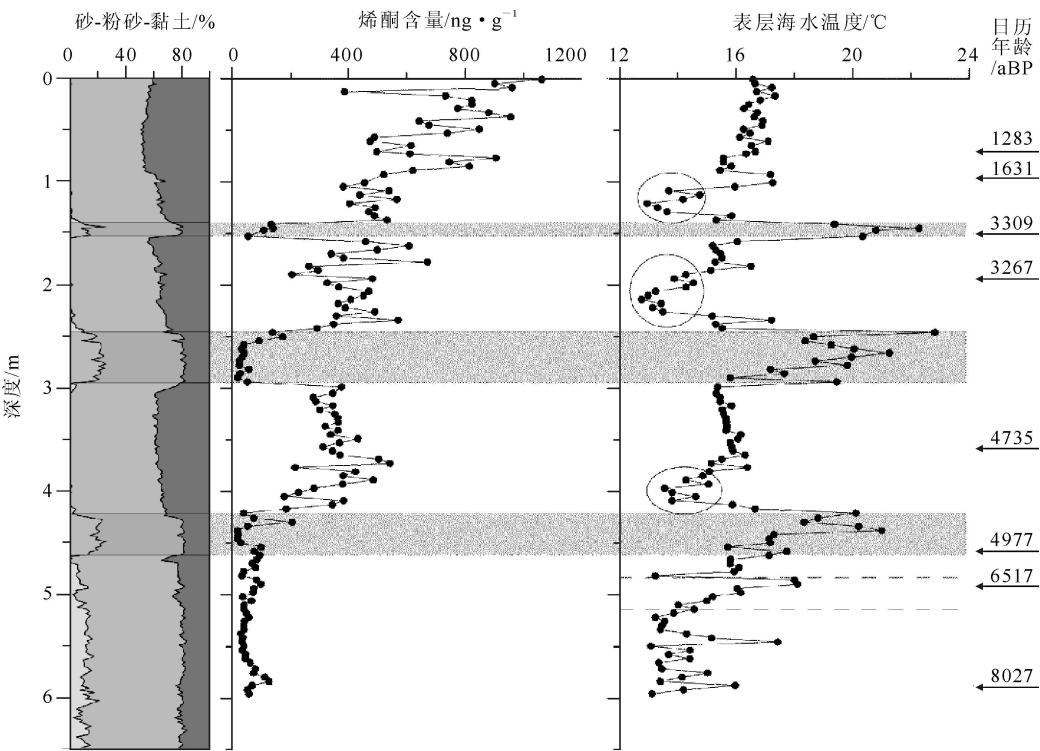


图 8 南黄海中部 YE-2 孔  $U_{37}^{K'}$ -SST 古温度变化

Fig. 8  $U_{37}^{K'}$ -SST variations in core YE-2

位间各粒度参数波动较大, 说明该段水动力条件较强, 沉积环境不稳定, 根据前人研究<sup>[7]</sup>, 该段底栖有孔虫以广盐性种 *A. amoriensis* 和 *Elphidium magellanicum* (Heron-Allen et Earland) 为主, 因此, 认为该段为滨岸浅水环境。468 ~ 0 cm (6.1 ~ 0 kaBP) 砂含量 < 1%, 平均粒径细, 相邻层位间各粒度参数波动小, 说明该段水动力条件较弱, 沉积环境稳定, 4 个层位的底栖有孔虫和介形类都以水深大于 50 m 的种属常见, 指示该段为稳定陆架浅海环境。515 ~ 468 cm (6.9 ~ 6.1 kaBP) 平均粒径粗细和各粒度参数波动情况居中, 底栖有孔虫组合以广盐性浅水种为主, 浅海冷水种的含量也较上部层位高, 所以, 认为该段是由滨岸浅水环境向稳定浅海环境过渡的阶段, 另外, 冷水种含量较高, 与  $U_{37}^{K'}$ -SST 在该段整体含量较低的结果相对应。

3.2 古温度变化

岩心  $U_{37}^{K'}$ -SST 的变化表现出表层海水温度由低升高、由不稳定到稳定的过程。8.4 ~ 6.9 kaBP 的滨岸浅水动荡的沉积环境可能是导致相邻层位表层海水温度剧烈波动的原因, 在该阶段表层海水温度较低 (SST), 平均 14.2 °C。

相对高温高盐的黄海暖流水体进入黄海地区必然会导致黄海水温和盐度的增加, 该岩心 6.9 ~ 6.1

kaBP 时间段内, 表层海水温度 (SST) 持续增加的现象, 可能与黄海暖流的入侵有关。关于黄海暖流的形成时代目前尚无统一的结论, 刘健等<sup>[3]</sup> 认为黄海暖流形成于 6 kaBP 左右, 李铁刚等<sup>[5-9]</sup> 将黄海暖流形成时间进一步确定在 6.4 kaBP, 而 Kong 等<sup>[19]</sup> 的研究与前者差别较大, 认为在 4.3 kaBP 开始形成, 从本文  $U_{37}^{K'}$ -SST 看, 表层海水温度在 6.9 kaBP 左右开始增加, 到 6.5 kaBP 左右增温过程结束, 因此, 本文认为黄海暖流可能形成于 6.5 kaBP 左右。黄海暖流形成后, 南黄海中部表层海水温度平均高了 2 °C 左右。

6.1 kaBP 以来, 除粗粒级夹层和 3 个低值区外的大部分时间, 表层海水温度 (SST) 稳定在 16.1 °C 左右。由于 3 个粗粒级夹层隔断了地层的连续性, 只能大概推测 3 个低温区分别对应于 5.7 ~ 5.2、3.7 ~ 3.2、2.3 ~ 1.8 kaBP。根据红原泥炭<sup>[28]</sup>、金川泥炭<sup>[29]</sup> 和敦德冰心<sup>[30]</sup> 的研究, 在上述时段内均有显著的降温事件, 另外, 董哥洞石笋<sup>[31]</sup> 也在上述时间段附近记录了夏季风减弱事件, 因此, 推测 3 个短暂的表层海水温度低值期可能与气候事件有关。

3.3 粗粒级夹层

对陆架风暴作用成因沉积物的研究始于 20 世纪 70 年代, 研究认为, 风暴作用初始期不易留下沉

积记录, 因为此阶段的沉积会被紧随其后的风暴高峰期改造; 在风暴作用的高峰期, 水体中挟带大量泥沙随风暴潮退潮向海外输送, 强烈冲刷底面, 明显地与风暴作用前好天气条件下的沉积层分开; 风暴高峰期之后, 能量迅速衰退, 水体中挟带的物质发生大量堆积; 风暴开始平息时, 细粒沉积物再度在正常浪基面下沉积, 平息后又沉积最细悬浮物, 构成无风暴浪影响的“背景沉积物”<sup>[32-33]</sup>。

3 个夹层粒度频率曲线极为相似, 说明它们形成于相近的水动力条件下, 但 3 个夹层相邻层位粒度参数和表层海水温度波动很大, 说明夹层形成时的水动力条件很不稳定, 这与上段 6.1 kaBP 以来稳定浅海环境有很大的不同。与上段细粒沉积物相比, 夹层的粒度分布特征(图 3)在 4.2  $\Phi$  处多一个峰, 且该峰为主峰, 说明 3 个夹层形成时水动力条件比稳定浅海环境多了一个控制 4.2  $\Phi$  处的主峰形成的强水动力因子, 且该因子占主导地位, 本文认为该因子为风暴动力因子。在 3 个砂质粉砂夹层顶部向正常黏土质粉砂过渡的层位, 粒度频率曲线呈负偏态、双峰分布, 与夹层相比, 4.2  $\Phi$  处的峰逐渐减弱, 6.8  $\Phi$  处的峰逐渐增强, 即风暴动力因子逐渐减弱, 稳定浅海动力因子重新恢复优势, 表现出向上段细粒沉积逐渐过渡的性质, 而粗粒级夹层底部界面却是侵蚀突变性质, 这一点与风暴沉积顶渐变、底突变的特征相同。

3 个夹层的表层海水温度最多高出稳定浅海沉积 6.7  $^{\circ}\text{C}$ , 如此高的温度差异不可能只是本地气候变化的结果, 有研究表明盐度变化会影响  $U_{37}^{K'}$  与 SST 的线性方程<sup>[34-35]</sup>而导致计算出的 SST 出现偏差, 因此, 本文推测风暴层中的长链烯酮化合物可能是从低盐度的浅海搬运而来。高岭石多为长石风化的产物, 海洋中高岭石的含量反映了物源区风化作用的强度<sup>[36]</sup>。3 个粗粒级夹层黏土矿物伊利石/高岭石比值较其他层位明显降低, 表明夹层源区风化作用较强, 处于温暖湿润的气候中, 也反应了夹层与岩心其他层位的物源不同。3 个粗粒级夹层重矿物含量和组合特征相似, 显示出变质岩特点, 说明 3 个夹层可能有着相同的物源; 但夹层重矿物特征与下部层位不同, 而与南黄海北部矿物区西侧亚区的砂质沉积物<sup>[37]</sup>相似, 说明粗粒级夹层非原地再悬浮沉积, 而是从异地搬运而来。碳酸盐在夹层中的含量和变化趋势一致, 而其他层位不同, 也说明了 3 个夹层的物源和形成机制可能相同, 但与其他层位的不同。在夹层顶部位置, 碳酸盐含量最低, 这与相同位置处有孔虫缺失的现象<sup>[7]</sup>对应, 但要弄清发生该

现象的原因, 需作进一步研究。

综上所述, 3 个粗粒级夹层为 3 个事件沉积, 本文推测其为风暴沉积, 但要得到确切的结论尚须进一步研究。稳定浅海环境下形成的细粒黏土质粉砂沉积中夹粗粒级砂质粉砂层的现象, 不仅出现在南黄海中部泥质区, 而且在济州岛西南泥质区 B2 孔<sup>[38]</sup>中 2000 年左右也有发现, 此类事件是否在中国东部陆架泥质沉积中广泛存在, 值得在今后工作中进一步研究。

### 3.4 沉积速率

由于泥质沉积物粒度细, 难以挑选足够量的有孔虫做 AMS  $^{14}\text{C}$  测年, 所以, 对南黄海中部泥质区沉积速率的研究很少, Kim 等<sup>[2]</sup>对取自南黄海中部泥质区东侧的 CC02 孔的 AMS  $^{14}\text{C}$  测年研究, 得出该孔附近 10.6 ka 以来的沉积速率在 11.1 ~ 19.1 cm/ka 之间。本文研究的 YE-2 孔有 3 个风暴沉积夹层, 它们是在较短的时间内快速沉积形成的, 计算沉积速率时如果将 3 个夹层的厚度考虑在内, 得出岩心的沉积速率在 22.7 ~ 409.1 cm/ka 之间(图 9 中); 如果不考虑 3 个风暴层的厚度, 即假定夹层沉积下来所用的时间为 0, 得出岩心的沉积速率在 50.7 ~ 75.6 cm/ka 之间(图 9 右)。虽然第一种方法反映了岩心真实的沉积速率, 但第二种方法计算的是稳定浅海环境下形成的细粒沉积物的沉积速率, 更能反映在没有风暴作用下的南黄海中部泥质区的沉积速率。

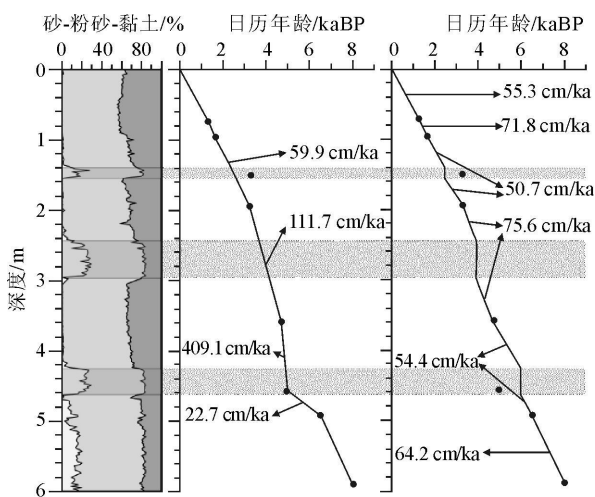


图9 南黄海中部 YE-2 孔沉积速率  
Fig. 9 Sedimentation rates of core YE-2

## 4 结论

(1) 利用  $U_{37}^{K'}$  首次获得了研究区 8.1 ka 以来比



较系统的表层海水温度(SST)数据。得出黄海暖流入侵开始于 6 9 kaBP, 受其影响, 表层海水温度持续升高, 到 6. 4 kaBP 下降, 以后基本稳定, 但有 3 个短暂的低温期, 大概对应于 5. 7~5 2、3 7~3. 2、2 3~1. 8 kaBP, 除低温期外的正常水温总体呈现出先是略有下降, 到 1. 7 kaBP 左右又逐渐升高的趋势。上述有关黄海暖流入侵时间及水温变化等结论与该区有关气候和环境文献的报道相似<sup>[3, 5-6, 28-31]</sup>。

(2)根据粒度、有孔虫分析, 结合  $U_{37}^{K'}$ -SST 的资料, 研究海区自 8. 4 kaBP 以来经历了 6. 9 kaBP 以前的滨岸浅水环境、6 9~6. 1 kaBP 黄海暖流入侵、海平面变动上升环境和 6. 1 kaBP 以后的稳定浅海环境 3 个阶段。这一结论与前人的结果基本一致<sup>[7]</sup>。在不考虑 3 个风暴层的情况下, 8 000 aBP 以来岩心的沉积速率为 50 7~75. 6 cm/ka。

(3)稳定浅海环境黏土质粉砂地层中的 3 个砂质粉砂夹层, 根据稳定浅海沉积速率推算其形成年代大致为 6 0、3 9、2 5 kaBP。夹层底界侵蚀突变、顶界渐变, 具有风暴沉积的特征; 黏土矿物指示其源区风化作用较强, 重矿物表现出变质岩特点,  $U_{37}^{K'}$ -SST 显示其沉积环境的温度较高, 上述特征与岩心其他所有层位不同, 具有异地搬运沉积物的特点, 可能为异地搬运的风暴沉积。

(4)3 个粗粒级夹层使连续的表层海水温度记录出现部分中断, 今后有待于连续岩心的进一步工作。

致谢: 感谢国家海洋局第一海洋研究所王昆山博士在重矿物鉴定方面的帮助。

参考文献 (References)

[ 1 ] Kim J M, Kennett J P. Paleoenvironmental changes associated with the Holocene marine transgression, Yellow Sea (Hwanghae) [ J ]. Marine Micropaleontology, 1998, 34 (1-2): 71-89.

[ 2 ] Kim J M, Kucera Michal. Benthic foraminifer record of environmental changes in the Yellow Sea (Hwanghae) during the last 15 000 years [ J ]. Quaternary Science Reviews, 2000, 19 (11): 1067-1085.

[ 3 ] 刘健, 李绍全, 王圣洁, 等. 末次冰消期以来黄海海平面变化与黄海暖流的形成 [ J ]. 海洋地质与第四纪地质, 1999, 19 (1): 13-24. [ LIU Jian, LI Shaoquan, WANG Shengjie, et al. Sea level changes of the Yellow Sea and formation of the Yellow Sea warm current since the last deglaciation [ J ]. Marine Geology and Quaternary Geology, 1999, 19 (1): 13-24.]

[ 4 ] Liu Jian, Saito Y, Wang Hong, et al. Sedimentary evolution of the Holocene subaqueous clinoform off the Shandong Peninsula in the Yellow Sea [ J ]. Marine Geology, 2007, 236 (3-4):

165-187.

[ 5 ] 李铁刚, 李绍全, 苍树溪, 等. YSDP102 钻孔有孔虫动物群与南黄海东南部古水文重建 [ J ]. 海洋与湖沼, 2000, 31(6): 588-595. [ LI Tiegang, LI Shaoquan, CANG Shuxi, et al. Paleohydrological reconstruction of the southern Yellow Sea inferred from foraminiferal fauna in core YSDP102 [ J ]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 2000, 31(6): 588-595.]

[ 6 ] 李铁刚, 江波, 孙荣涛, 等. 末次冰消期以来东黄海暖流系统的演化 [ J ]. 第四纪研究, 2007, 27(6): 945-954. [ LI Tiegang, JIANG Bo, SUN Rongtao, et al. Evolution pattern of warm current system of the East China Sea and the Yellow Sea since the last deglaciation [ J ]. Quaternary Sciences, 2007, 27 (6): 945-954.]

[ 7 ] Xiang Rong, Yang Zuosheng, Saito Y, et al. Paleoenvironmental changes during the last 8 400 years in the southern Yellow Sea: Benthic foraminiferal and stable isotopic evidence [ J ]. Marine Micropaleontology, 2008, 67(1-2): 104-119.

[ 8 ] 申顺喜, 李安春, 袁巍. 南黄海中部的低能沉积环境 [ J ]. 海洋与湖沼, 1996, 27(5): 518-523. [ SHEN Shunxi, LI Anchun, YUAN Wei. Low energy environment of the central south Yellow Sea [ J ]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 1996, 27(5): 518-523.]

[ 9 ] 秦蕴珊, 赵一阳, 陈丽蓉, 等. 黄海地质 [ M ]. 北京: 海洋出版社, 1989. [ QIN Yunshan, ZHAO Yiyang, CHEN Lirong, et al. Geology of the Yellow Sea [ M ]. Beijing: China Ocean Press, 1989.]

[ 10 ] 赵一阳, 朴龙安, 秦蕴珊, 等. 南黄海沉积学研究新进展——中韩联合调查 [ J ]. 海洋科学, 1998(1): 34-37. [ ZHAO Yiyang, Park Y, QIN Yunshan, et al. Recent development in the southern Yellow Sea sedimentology — The China-Korea Joint Investigation [ R ]. Marine Sciences, 1998 (1): 34-37.]

[ 11 ] 赵一阳, 李凤业, DeMaster D J, 等. 南黄海沉积速率和沉积通量的初步研究 [ J ]. 海洋与湖沼, 1991, 22 (1): 38-43. [ ZHAO Yiyang, LI Fengye, DeMaster D J, et al. Preliminary studies on sedimentation rate and sediment flux of the south Huanghai Sea [ J ]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 1991, 22 (1): 38-43.]

[ 12 ] Alexander C R, DeMaster D J, Nittrouer C A. Sediment accumulation in a modern epicontinental-shelf setting: The Yellow Sea [ J ]. Marine Geology, 1991, 98 (1): 51-72.

[ 13 ] 李凤业, 高抒, 贾建军, 等. 黄渤海泥质沉积区现代沉积速率 [ J ]. 海洋与湖沼, 2002, 33 (4): 364-369. [ LI Fengye, GAO Shu, JIA Jianjun, et al. Contemporary deposition rates of fine-grained sediment in the Bohai and Yellow Seas [ J ]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 2002, 33 (4): 364-369.]

[ 14 ] Cheng Peng, Gao Shu, Park Y A, et al. Grain size characteristics of the central Yellow Sea mud deposits [ J ]. The Yellow Sea, 1999, 5: 1-7.

[ 15 ] 王琦, 杨作升. 黄海南部表层沉积中的自生黄铁矿 [ J ]. 海洋与湖沼, 1981, 12 (1): 25-32. [ WANG Qi, YANG Zuosheng. Authigenic pyrite in the surface sediments of the southern Huanghai Sea [ J ]. Oceanologia et Limnologia Sinica,

- ca, 1981, 12(1): 25-32.]
- [16] 陈庆. 南海沉积物中自生黄铁矿研究 [J]. 地质学报, 1981, 55(3): 56-61. [CHEN Qing. Study on authigenic pyrites in sediments of the south Huanghai Sea [J]. Acta Geologica Sinica, 1981, 55(3): 56-61.]
- [17] 李安春, 陈丽蓉, 申顺喜. 南黄海 H-106 岩柱中自生黄铁矿的硫同位素研究 [J]. 科学通报, 1991, 36(12): 928-930. [LI Anchun, CHEN Lirong, SHEN Shunxi. The sulfur isotopes in authigenic pyrite from the south Huanghai Sea [J]. Chinese Science Bulletin, 1991, 36(18): 1549-1552.]
- [18] 庄丽华, 常凤鸣, 李铁刚, 等. 南黄海 EY02-2 孔底栖有孔虫群落特征与全新世沉积速率 [J]. 海洋地质与第四纪地质, 2002, 22(4): 7-14. [ZHUANG Lihua, CHANG Fengming, LI Tiegang, et al. Foraminiferal faunas and Holocene sedimentation rates of core EY02-2 in the South Yellow Sea [J]. Marine Geology and Quaternary Geology, 2002, 22(4): 7-14.]
- [19] Kong G S, Park S C, Han H C, et al. Late Quaternary paleoenvironmental changes in the southeastern Yellow Sea, Korea [J]. Quaternary International, 2006, 144(1): 38-52.
- [20] 李广雪, 杨子庚, 刘勇. 中国东部海域海底沉积物类型图 [Z]. 北京: 科学出版社, 2005. [LI Guangxue, YANG Zigeng, LIU Yong. Sediment Distribution Map of the East China Seas [Z]. Beijing: Science Press, 2005.]
- [21] Biscaye P E. Mineralogy and sedimentation of recent deep-sea clay in the Atlantic Ocean and adjacent seas and oceans [J]. Bulletin of the Geological Society of America, 1965, 76(7): 803-831.
- [22] Petschick R, Kuhn G, Gingele F. Clay mineral distribution in surface sediments of the South Atlantic; sources, transport, and relation to oceanography [J]. Marine Geology, 1996, 130(3): 203-229.
- [23] Stuiver M, Reimer P J. Extended  $^{14}\text{C}$  database and revised CALIB radiocarbon calibration program [J]. Radiocarbon, 1993, 35(1): 215-230.
- [24] Hughen K A, Baillie M G L, Bard E, et al. Marine radiocarbon age calibration, 0 ~ 26 cal. kyrBP [J]. Radiocarbon, 2004, 46(3): 1059-1086.
- [25] Schöne B R, Oschmann W, Tanabe K, et al. Holocene seasonal environmental trends at Tokyo Bay, Japan, reconstructed from bivalve mollusk shells; implications for changes in the East Asian monsoon and latitudinal shifts of the Polar Front [J]. Quaternary Science Reviews, 2004, 23(9-10): 1137-1150.
- [26] LIU Jingpu, Milliman J D, GAO Shu, et al. Holocene development of the Yellow River's subaqueous delta, North Yellow Sea [J]. Marine Geology, 2004, 209(1-4): 45-67.
- [27] Füchtbauer H, Müller G. Sedimente und Sedimentgesteine. Sediment-Petrologie Teil II [M]. Stuttgart: Schweizerbart'sche Verlagsbuch-handlung, 1988: 129-139.
- [28] 徐海, 洪业汤, 林庆华, 等. 红原泥炭纤维素氧同位素指示的距今 6 ka 温度变化 [J]. 科学通报, 2002, 47(15): 1181-1186. [XU Hai, HONG Yetang, LIN Qinghua, et al. Temperature variations in the past 6 000 years inferred from  $\delta^{18}\text{O}$  of peat cellulose from Hongyuan, China [J]. Chinese Science Bulletin, 2002, 47(18): 1578-1584.]
- [29] 洪业汤, 姜洪波, 陶发祥, 等. 近 5 ka 温度的金川泥炭  $\delta^{18}\text{O}$  记录 [J]. 中国科学 D 辑, 1997, 27(6): 525-530. [HONG Yetang, JIANG Hongbo, TAO Faxiang, et al. Temperature variations in the past 5 000 years inferred from  $\delta^{18}\text{O}$  of peat cellulose from Jinchuan, China [J]. Science in China (Ser. D), 1997, 27(6): 520-524.]
- [30] 姚檀栋, Thompson L G. 敦德冰心记录与过去 5 ka 温度变化 [J]. 中国科学 B 辑, 1992, 10: 1089-1093. [YAO Tandong, Thompson L G. The past 5 ka years temperature variation in Dunde ice core [J]. Science in China (Ser. B), 1992, 10: 1089-1093.]
- [31] Wang Yongji, Cheng Hai, Edwards R L, et al. The Holocene Asian monsoon; links to solar changes and North Atlantic climate [J]. Science, 2005, 308: 854-857.
- [32] Kreisa R D. Storm-generated sedimentary structures in subtidal marine facies with examples from the Middle and Upper Ordovician of southwestern Virginia [J]. Journal of Sedimentary Research, 1981, 51(3): 823-848.
- [33] 严钦尚. 论滨岸浅海的风暴沉积 [J]. 海洋与湖沼, 1984, 15(1): 14-19. [YAN Qinshang. Overview of the storm-generated deposits on near shore zone and open shelf [J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 1984, 15(1): 14-19.]
- [34] Schulz H M, Schoner A, Emeis K C. Long-chain alkenone patterns in the Baltic Sea: an ocean-freshwater transition [J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 2000, 64(3): 469-477.
- [35] CHU Guoqiang, SUN Qing, LI Shengqiang, et al. Long-chain alkenone distributions and temperature dependence in lacustrine surface sediments from China [J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 2005, 69(21): 4985-5003.
- [36] 杨作升, 黄河、长江、珠江沉积物中黏土的矿物组合、化学特征及其与物源区气候环境的关系 [J]. 海洋与湖沼, 1988, 19(4): 336-346. [YANG Zuosheng. Mineralogical assemblages and chemical characteristics of clays from sediments of the Huanghe, Changjiang, Zhujiang rivers and their relationship to the climate environment in their sediment source areas [J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 1988, 19(4): 336-346.]
- [37] 王昆山, 石学法, 林振宏. 南黄海和东北北部陆架重矿物组合分区及来源 [J]. 海洋科学进展, 2003, 21(1): 31-40. [WANG Kunshan, SHI Xuefa, LIN Zhenhong. Assemblages, provinces and provenances of heavy minerals on the shelf of the southern Yellow Sea and northern East China Sea [J]. Advances in Marine Science, 2003, 21(1): 31-40.]
- [38] 向荣, 杨作升, Saito Y, 等. 济州岛西南泥质区近 2 300 a 来环境敏感粒度组分记录的东亚冬季风变化 [J]. 中国科学 D 辑, 2006, 36(7): 654-662. [XIANG Rong, YANG Zuosheng, Saito Y, et al. East Asia Winter Monsoon changes inferred from environmentally sensitive grain-size component records during the last 2 300 years in mud area southwest off Cheju Island ECS [J]. Science in China (Ser. D), 2006, 49(6): 604-614.]

## SEDIMENTARY CHARACTERISTICS OF CORE YE-2 FROM THE CENTRAL MUD AREA IN THE SOUTH YELLOW SEA DURING LAST 8 400 YEARS AND ITS INTERSPACE COARSE LAYERS

WANG Libo<sup>1,2</sup>, YANG Zuosheng<sup>1,2</sup>, ZHAO Xiaohui<sup>1,2</sup>, XING Lei<sup>3</sup>,  
ZHAO Meixun<sup>3</sup>, Yoshiki Saito<sup>4</sup>, FAN Dejiang<sup>1,2</sup>

(1 College of Marine Geosciences, Ocean University of China, Qingdao 266100, China;

2 Key Lab of Submarine Geosciences and Prospecting Techniques, Ministry of Education, Ocean University of China, Qingdao 266100, China;

3 Key Laboratory of Marine Chemistry Theory and Technology, Ministry of Education, Institute of Organic Chemistry,  
Ocean University of China, Qingdao 266100, China;

4 Geological Survey of Japan, AIST, Central 7, Higashi 1-1-1, Tsukuba, Ibaraki 305-8567, Japan)

**Abstract:** Based on chronological, sedimentological, micropaleontological and  $U_{37}^{K'}$ -sea surface temperature data of core YE-2 from the central mud area of the South Yellow Sea, evolution of the marine environment in the past 8 400 years and three interspace sandy layers in the core were studied. The core is mainly composed of clayey silt, and evolution of marine environment during the last 8 400 years experienced three phases: (1) Near-shore shallow water environment with sand content of 13% at about 8 4~6 9 kaBP; (2) Transitional marine environment from near-shore shallow water to stable shallow sea with sand content of 8% at about 6 9~6.1 kaBP; (3) Stable shallow sea environment with sediment without sand at about 6.1~0 kaBP. Sea surface temperature (SST) was low in the near-shore shallow water phase, about 14.2°C on average. And the SST began to increase at the beginning of the second phase, about 6.9 kaBP, indicating intrusion of the Yellow Sea Warm Current with the highest SST up to 18.1°C. The SST stopped increasing at 6.4 kaBP. After that the SST was stable from 15°C to 16°C with some fluctuations in the shallow sea phase, excluding three low temperature periods at about 5.7~5.2, 3.7~3.2 and 2.3~1.8 kaBP respectively, whose temperature was about 13.9°C on average. Three abnormal sandy silt coarse interlayers deposited in stable shallow sea environment, were speculated to have formed in 6.0, 3.9 and 2.5 kaBP respectively. Grain-sizes of the sandy layers show characteristics of storm deposition. Heavy mineral compositions of the sandy layers show characteristics of the origin of metamorphic rocks.  $U_{37}^{K'}$ -SST and clay mineral compositions of the sandy layers indicate a sedimentary environment with higher temperature than that in shallow sea. These characteristics of sandy layers are different from other sediment in the core, indicating great difference between the sandy layer and other strata in provenance. Therefore, the three coarse layers are speculated to be the storm deposition. Without consideration of three storm depositions, the sedimentation rates in core YE-2 range from 50.7 to 75.6 cm/ka, based on AMS  $^{14}C$  data.

**Key words:** central mud; paleoenvironment;  $U_{37}^{K'}$ -SST; coarse interspace layer; South Yellow Sea