

文章编号: 1000-0550(2009) 01-0118-10

末次冰消期以来东海内陆架古环境演化¹

徐方建^{1,2} 李安春¹ 肖尚斌³ 万世明¹ 刘建国⁴ 张永超⁵

(1 中国科学院海洋研究所 海洋地质与环境重点实验室 山东青岛 266071

2 中国科学院 研究生院 北京 100049 3 三峡大学 土木水电学院 湖北宜昌 443002

4 中国科学院南海海洋研究所 边缘海地质重点实验室 广州 510301 5 中国石油冀东油田分公司勘探开发研究院 河北唐山 063004)

摘要 通过对位于浙—闽沿岸泥质带的 EC2005 孔岩性、粒度以及 AMS¹⁴C 年代分析,探讨了研究区自末次冰消期以来的古沉积环境演化,认为是湖水或海水深度、气候变化等综合影响的结果。岩芯底部 60.20~41.00 m (17.3~13.1 ka BP) 为湖泊三角洲沉积序列,可划分为前三角洲—三角洲前缘—三角洲平原三个沉积亚相,物质来源主要是湖盆流域物质的输入。随着海平面的逐渐上升,海水自 13.1 ka BP 开始侵入研究区,形成了 41.00 m 的海相沉积地层,可划分为前滨—近滨—浅海三个沉积亚相,与海平面变化曲线具有良好的对应。自 12.3 ka BP 开始,研究区受到沿岸流影响,长江物质开始影响研究区,7.3 ka BP 以来主要是来自长江的悬浮体在沿岸流作用下输送沉积而形成,稳定的泥质沉积物开始形成。全球性重要气候事件如新仙女木事件、8.2 ka 冷事件在东海内陆架沉积物中也得到了良好揭示。

关键词 古环境 末次冰消期 粒度 东海内陆架 EC2005 孔

第一作者简介 徐方建 男 1982 年出生 博士研究生 海洋沉积与矿物学 E-mail xufangjiang@163.com

通讯作者 李安春 E-mail acli@ms.qd.cn

中图分类号 P534.63 **文献标识码** A

陆架海平面的升降会改变陆源物质向海洋运输的通量和方式,所以陆架海对全球环境变化十分敏感。陆架沉积物记录了海陆变迁、海平面变化、河流入海和气候变化等地质信息,近年来陆架沉积研究,尤其是内陆架泥质沉积研究倍受关注,并得到较大发展^[1~5]。

东海陆架是最宽广、平坦的大陆架之一,在全球变化研究中占有重要的地位。对长江口和东海内陆架区域的地质研究表明,长江来源泥质沉积的相当部分沉积在东海内陆架^[6~8]。关于中陆架和外陆架以及冲绳海槽的研究,包括岩芯、地球化学分析等也表明,从河口向南沿岸沉积物的扩散大多数被限制在内陆架^[9~11]。最近,通过高分辨率的声学剖面 and 沉积物岩芯研究了长江口泥质带和浙—闽沿岸泥质带的范围和沉积历史^[4,5]。近年来对东海陆架特别是内陆架泥质沉积物记录的古气候变化研究取得了很大进展,重建了全新世不同时段高分辨率的东亚冬季风演化历史^[12~15]。

然而受样品时间跨度的限制,对于东海内陆架泥质区具体何时形成,在形成过程中的变化如何,变化

的起因是什么,形成之前的古环境如何,却所知甚少。本文以位于浙—闽沿岸泥质带的 EC2005 孔作为研究对象,对末次冰消期以来东海内陆架古沉积环境演化进行了恢复。

1 材料与方法

研究所用岩芯样品为上海海洋石油局第一海洋地质调查大队勘 407 轮于 2005 年 11 月在东海内陆架钻探获取 (121°20.0036'E, 27°25.0036'N, 水深 36 m), 长 60.20 m, 取芯率 94.4%, 站号 EC2005 (见图 1), 在室内对该岩芯进行了详细描述和分样。

粒度分析在 42.36~46.00 m 段取样间隔为 1 cm, 其它深度段采样间隔 2 cm。样品经显微镜下鉴定, 方解石、贝壳等含量很低 (小于 1%), 所以只用 10% 的双氧水去除有机质。处理后的样品在中国科学院海洋研究所用法国产 Cilas 940L 激光粒度分析仪进行了粒度测量, 测量范围为 0.5~2 000 μm, 重复测量的相对误差小于 2%。

在对沉积物进行系统观察和描述并完成粒度分析的基础上, 在主要沉积界线细粒沉积物中选取混合

¹ 国家自然科学基金项目 (批准号: 40576032, 40776030) 资助。
收稿日期: 2007-12-26 收修改稿日期: 2008-04-29

种底栖有孔虫或是炭屑样品送美国 Woods Hole 海洋研究所 AMS¹⁴C 实验室完成年代测定, 原始测年数据利用 CALIB 5.0.1 软件^[16-17]进行日历年龄校正(表 1), 其它深度年代数据通过内插或是外推获得(本文所指的年龄均为日历年龄)。

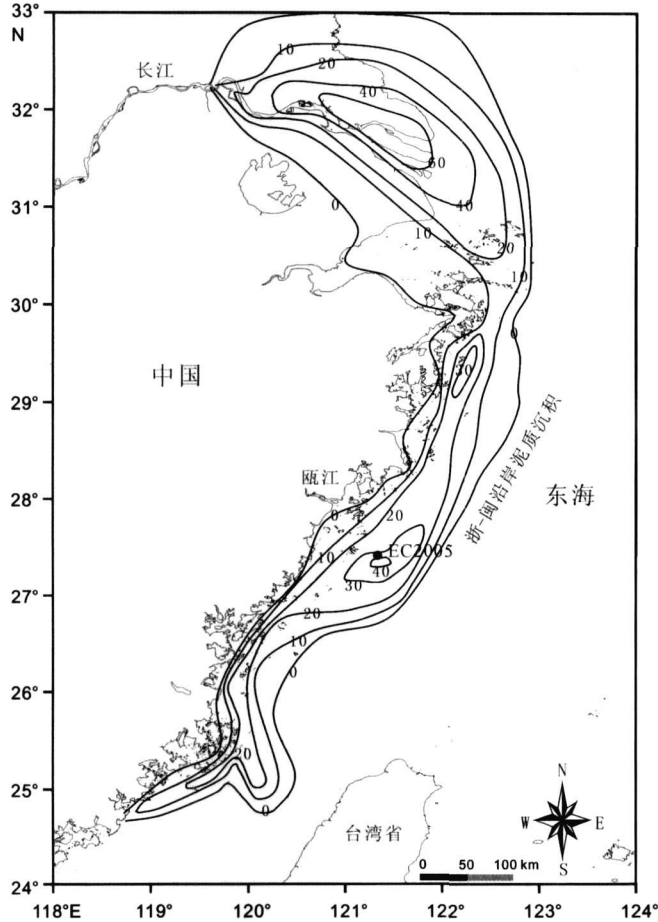


图 1 研究区沉积物分布和站位图

(重绘自 Liu 等^[5], 图中数字代表近 7 ka 以来长江物质在浙-闽沿岸的沉积厚度, 单位: m)

Fig 1 Sediment distribution in the study area and site of Core EC2005

表 1 东海内陆架 EC2005 岩芯 AMS¹⁴C 年代数据

Table 1 AMS¹⁴C data of Core EC2005 in the inner shelf of the East China Sea

深度 /m	测试材料	¹⁴ C 年龄 /a BP	日历年龄 /a BP (1σ)
896~ 898		4260±40	4360(4298 ~ 4423)
1232~ 1234		4870±45	5193(5114 ~ 5272)
2804~ 2806	混合种底栖有孔虫	6750±40	7280(7233 ~ 7326)
3308~ 3310		10700±90	12100(11917 ~ 12283)
3676~ 3678		10800±40	12262(12175 ~ 12349)
4100~ 4102		11200±210	13087(12924 ~ 13250)
5084~ 5086	炭屑	13000±85	15346(15176 ~ 15516)
5572~ 5574		13750±65	16368(16165 ~ 16571)

2 分析结果

2.1 粒度参数与频率分布曲线

运用矩法^[18]计算出沉积物平均粒径、标准偏差、偏度和峰度。可以看出, 四种粒度参数具有较好的对应关系, 根据其变化趋势, 可大致分为六个阶段(自底部向上分别为阶段 1、2、3、4、5、6a 和 6b 见图 2、表 2)。计算了各阶段平均粒径的均值和标准偏差, 均值为该阶段的平均值, 其值大小反映了水动力条件相对其它阶段的强弱变化, 而标准偏差则表示平均粒径在阶段内的波动情况, 反映了阶段内部水动力条件的稳定性, 结果见表 2。频率分布曲线能够显示出粒度变化和各粒径的百分含量, 出现极高频率时的粒度值即为众数值, 对于沉积环境研究同样具有十分重要的意义^[19]。

自岩芯底部至 41.00 m, 沉积环境在此阶段发生了 3 次大的变化(划分依据详见下文)。

阶段 1 平均粒径、标准偏差较小而且变化相对稳定, 反映了沉积物分选较好, 粒径分布为不对称正偏态、峰度较低, 频率分布主要为单峰分布, 众数值为 4~4.6 φ, 少数层位为双峰分布, 众数值为 9.1 φ 和 6.4 φ, 反映了相对较弱的水动力条件和相对稳定的沉积环境。

各粒度参数在阶段 2 均达到了最大, 频率分布变化也最大, 主要为单峰和双峰分布, 众数值主要为 4~4.6 φ, 2.9 φ, 而且出现了 0.8 φ 的极高值, 少数层位存在众数值为 9.1 φ 和 6.4 φ 左右的双峰分布, 说明了水动力条件在阶段 2 达到了最强而且最不稳定, 指示了最不稳定的沉积环境。值得注意的是, 52.80~52.22 m 平均粒径达到了最粗, 且分选良好, 呈现出极高的正偏度和峰度, 说明水动力条件达到了最强, 沉积物受到多次的搬运或是分选所致。

各参数在阶段 3 减小, 但是呈现出一定的波动, 频率分布为双峰和三峰分布, 众数值为 9.1 φ, 6.4 φ 和 4~4.6 φ, 而 2.9 φ 和 0.8 φ 的众数值消失, 较低的标准偏差反映了较好的分选, 呈现出的正偏反映出沉积物中仍然具有较多粗颗粒物质, 此阶段水动力条件减弱, 沉积环境较为稳定, 可能说明研究区水深有所增加。

总体而言, 此三个阶段水动力条件呈现出较弱—最强—最弱的变化趋势, 沉积环境稳定性则表现出相反的趋势。

自 41.00 m 至顶部, 沉积环境在此阶段也发生了

3 次大的变化。

各粒度参数在阶段 4 均达到了最大, 频率分布以单峰和三峰分布为主, 众数值主要为 4~4.6 ϕ , 存在

9.1 ϕ 和 6.4 ϕ 的峰值, 分选较差而且粗颗粒物质相对增多, 水动力条件较前一阶段增强, 沉积环境的稳定性有所减弱。

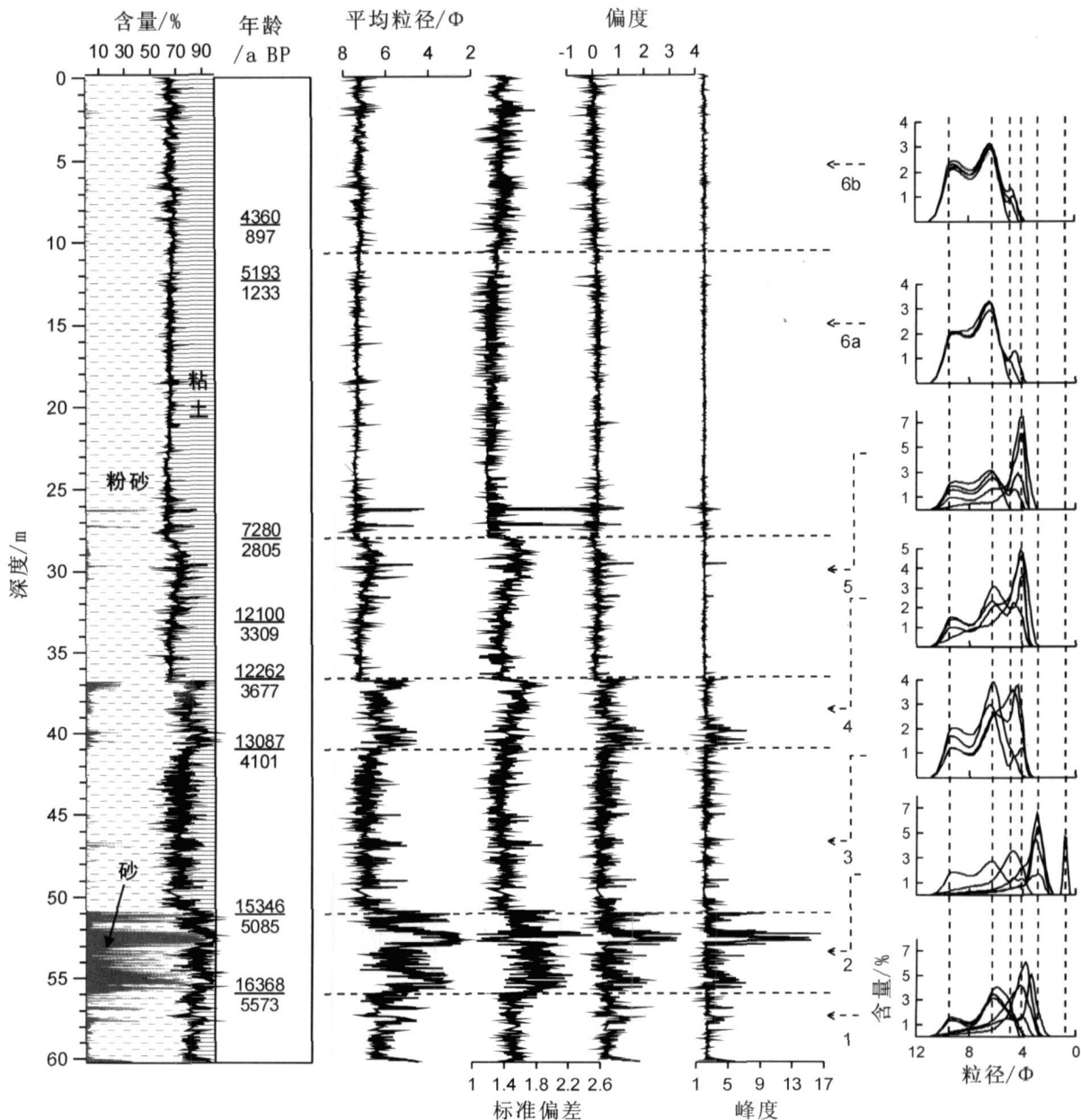


图 2 东海内陆架 EC2005 孔年代、粒度参数与频率分布曲线

Fig 2 Chronology, grain size parameters and frequency distributions of Core EC2005 in the inner shelf of East China Sea

表 2 EC2005 孔各阶段粒度参数、组成统计

Table 2 Statistic analysis of grain-size parameters and compositions at different stages of Core EC2005

层位 /m	阶段	均值平均粒径 / ϕ	标准偏差平均粒径	粘土	细粉砂	粗粉砂	极细砂	细砂	中砂	粗砂	极粗砂
0~10.74	6b	7.22	0.12	33.9	47.4	18.5	0.2	0	0	0	0
10.74~28.06	6a	7.37	0.08	35.4	51.7	12.9	0.0	0	0	0	0
28.06~36.80	5	7.07	0.32	31.7	44.8	23.1	0.4	0	0	0	0
36.80~41.00	4	6.13	0.55	17.9	30.9	46.9	4.3	0	0	0	0
41.00~50.94	3	6.92	0.40	27.3	45.6	26.6	0.4	0.1	0	0	0
51.00~55.90	2	4.83	1.26	10.7	20.1	27.3	19.0	19.3	0.5	0.03	0.30
56.00~60.20	1	6.13	0.62	17.2	33.1	43.9	5.5	0.3	0	0	0

平均粒径和标准偏差在 $36\ 80\ \mu\text{m}$ 以上发生了突变, 峰度和峰度自此也开始较为稳定, 说明水动力条件发生了重大变化。阶段 5 主要为双峰和三峰分布, 存在少数单峰分布, 众数值主要为 $9\ 1\ \phi$ 、 $6\ 4\ \phi$ 和 $4\ \sim\ 4\ 6\ \phi$, 底部平均粒径较小而且变化较小, 至上部先逐渐增加后迅速降低, 说明水动力条件曾经较弱, 而且比较稳定, 之后水动力条件逐渐增强后迅速降低, 标准偏差也表现出相同的趋势, 说明随着水动力条件的变化分选也相应的变化, 此阶段水动力条件越强, 沉积环境越不稳定。

28 06 m 至顶部各粒度参数相对较小而且比较稳定, 只是 10 74 m 以上层位各参数波动稍大, 据此可以划分出阶段 6a 和阶段 6b。阶段 6a 主要为双峰分布, 众数值主要为 $9\ 1\ \phi$ 、 $6\ 4\ \phi$, 少数层位出现 $4\ \sim\ 4\ 6\ \phi$ 峰值的三峰分布, 反映了水动力条件最弱; 阶段 6b 多数层位呈现出三峰分布, 少数为双峰分布, 众数值为 $9\ 1\ \phi$ 、 $6\ 4\ \phi$ 、 $4\ \sim\ 4\ 6\ \phi$, 水动力条件较前一阶段又有所增强, 标准偏差变化较大反映出分选稍差, 沉积环境较阶段 6a 不稳定, 但阶段 6 总体表现为最弱的水动力条件和最强的稳定性。

此三个阶段水动力条件总体上呈现出逐渐减弱的趋势, 沉积环境的稳定性则逐渐增强。

2 2 粒度组成

根据 Udden-Wentworth 标准, 将沉积物大致划分为粘土 ($> 8\ \phi$)、细粉砂 ($6\ \sim\ 8\ \phi$)、粗粉砂 ($4\ \sim\ 6\ \phi$)、极细砂 ($3\ \sim\ 4\ \phi$)、细砂 ($2\ \sim\ 3\ \phi$)、中砂 ($1\ \sim\ 2\ \phi$)、粗砂 ($0\ \sim\ 1\ \phi$)、极粗砂 ($-1\ \sim\ 0\ \phi$) 组分。计算了各阶段各粒度组分的平均值 (表 2), 一般来讲, 水体中粗粒组分的高含量代表水动力条件较强, 细粒组分的高含量则代表水动力条件较弱。

阶段 1, 极细砂以上组分占 58%, 粉砂含量很高, 可高达 77%, 粘土含量较少, 仅为 17.2%; 阶段 2 与其它阶段形成了鲜明的对比, 具有极高的粗颗粒含量, 极细砂以上组分占 39.1%, 粉砂含量约为 47%, 粘土组分则为岩芯最低, 仅为 10.7%; 阶段 3 与阶段 1 和 2 相比粗颗粒组分减少, 极细砂以上组分仅占 0.3%, 粉砂含量约为 72%, 粘土组分则达到了三个阶段的最高, 为 27.3%; 阶段 4 极细砂组分又有所增加, 可达 4.3%, 粉砂含量约为 78%, 粘土组分含量则下降至 17.9%; 自阶段 5 开始, 粘土组分迅速增加, 而极细砂以上组分则较少, 粉砂含量低于 70%, 各组分含量变化较之其它阶段也较小, 阶段 6 相对阶段 5 具有更高的粘土组分含量和更低的极细砂以上组分。

统计结果与前文粒度参数结果一致。

2 3 概率累积曲线

从图 3 可以看出, EC2005 孔沉积物概率累积曲线一般都为两段式, 主要由悬浮组分和跳跃组分构成, 只是在阶段 2 部分层位出现牵引组分。阶段 1 跳跃组分含量为 10% ~ 80%, 跳跃组分和悬浮组分的分界点大约为 $3\ \sim\ 5\ \phi$, 阶段 2 跳跃组分则最高可达 90%, 悬浮组分相对较少, 二者分界点大约为 $3\ \sim\ 4\ \phi$, 沉积物概率累积曲线变化较大, 各组分的分选系数也变化较大, 说明阶段 2 相对阶段 1 水动力条件较强, 而且变化较大, 反映了沉积环境的多变性。阶段 3 跳跃组分明显减少, 含量小于 30%, 与悬浮组分的分界点大约为 $4\ \sim\ 5\ \phi$, 各组分分选系数变化较小, 反映了水动力条件较弱, 沉积环境相对阶段 2 较为稳定。阶段 4 跳跃组分含量略有增加, 含量为 10% ~ 60%, 与悬浮组分的分界点大约为 $4\ \sim\ 5\ \phi$, 各组分分选系数变化较小, 水动力条件有所增强, 沉积环境较为稳定。阶段 5 跳跃组分含量为 10% ~ 80%, 与悬浮组分的分界点大约为 $4\ \sim\ 6\ \phi$, 各组分分选系数变化较大, 反映出在此阶段水动力条件变化较大, 沉积环境较不稳定。阶段 6 (6a 6b) 跳跃组分含量较少, 小于 10%, 与悬浮组分的分界点大约为 $4\ 5\ \sim\ 6\ \phi$, 各组分特别是悬浮组分的分选系数基本一致, 反映了水动力条件最弱, 而且沉积环境最为稳定。

各个阶段概率累积曲线均呈现出在 $9\ \phi$ 左右出现一个次总体, 即粘土组分, 表现出无论在何种沉积环境下该总体始终存在, 而且分选系数变化不大, 这可能是由于粘土粒级的起动力较弱, 受其它因素影响较小所致^[20 21]。经典的 Visher 概率累积曲线^[22]使用的粒度计量下限为 $4\ 5\ \phi$ ($44\ \mu\text{m}$), 使得其概率累积曲线中缺少细粒组分 ($> 4\ 5\ \phi$ 或 $< 44\ \mu\text{m}$), 而沉积物中的细粒组分含量是明显不可忽视的, 这就造成了原始概率累积曲线的不完整性^[23], 随着分析技术的发展、测试精度的提高, 这种不足有待修正, 概率累积曲线上粘土组分的指示意义也有待于进一步研究。

2 4 C—M 图

C—M 图是 Passaga 在研究了搬运营力的最大动能与平均动能关系后制作的图形, 与搬运用力密切相关, 可以用来分析沉积物的水动力状况, 其中 C 为百分之一含量的最粗粒径值, 代表水动力搅动开始搬运的最大能量; M 为中值粒径, 代表水动力的平均能量, C 和 M 以微米为单位在双对数坐标纸上投点^[19]。

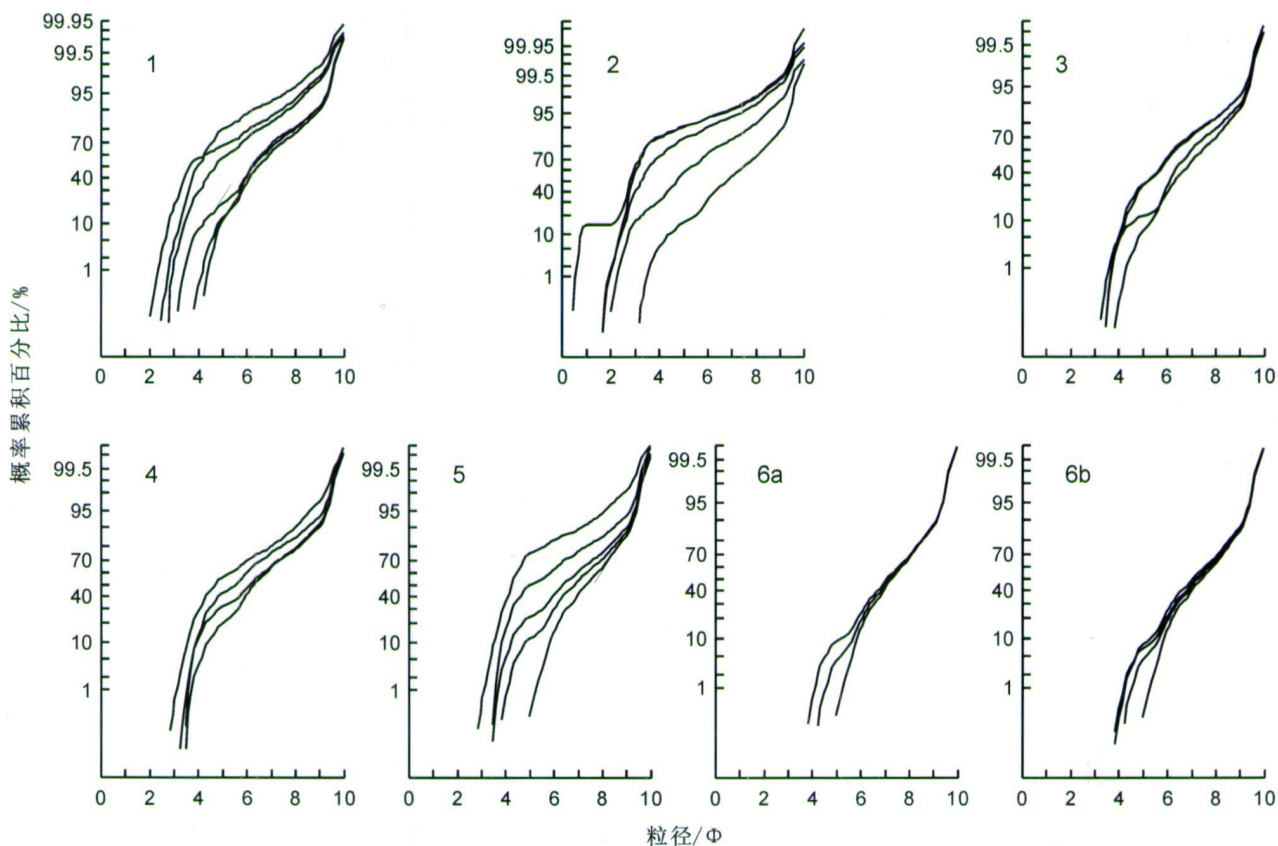


图 3 东海内陆架 EC2005 孔不同沉积阶段粒度概率累积曲线

Fig. 3 Probability accumulation curves at different stages of Core EC2005 in the inner shelf of East China Sea

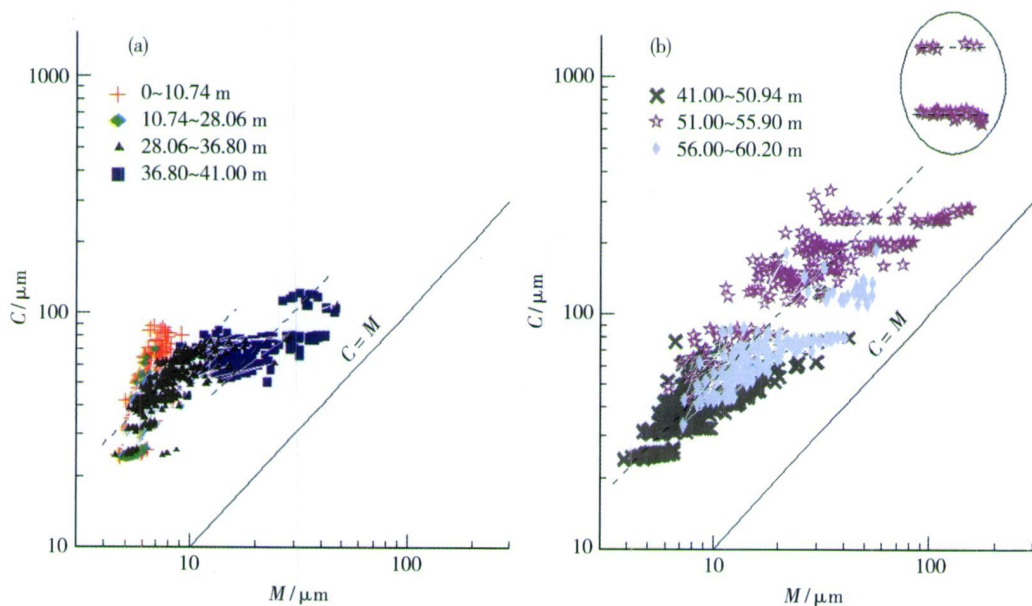


图 4 东海内陆架 EC2005 孔不同沉积阶段 C—M 图

Fig. 4 C—M plot at different stages of Core EC2005 in the inner shelf of East China Sea

在 C—M 图上(图 4) EC2005 孔 41.00 m 以下沉积物,特别是阶段 2 的 C 值和 M 值基本成比例的增

加,与 C=M 直线平行,具有递变悬浮特点。阶段 2 部分层位投点平行于 M 轴,即 C 值不变,而 M 值发

生变化, 具有滚动和悬浮特点, 可能是由于滚动组分中含有不同比例的悬浮物质, 从而使得 M 值有明显的变化。阶段 2 的水动力条件达到了最强, 而且变化较大, 阶段 1 较阶段 3 其 C 值和 M 值均有所偏大, 说明阶段 1 的水动力条件较强, 阶段 3 则较弱, 而且变化较小。

EC2005 孔 41.00 m 以上沉积物与下部明显不同, 阶段 4 和阶段 5 多数层位表现出递变悬浮特点, 阶段 6 则表现为均匀悬浮特点。阶段 4 与阶段 3 相比具有较高的 C 值和 M 值, 表明阶段 4 相对阶段 3 水动力条件增强。阶段 4 和阶段 5 虽然都呈现出递变悬浮特点, 但是阶段 4 却具有明显高的 C 、 M 值, 表明前者具有较高的水动力条件。阶段 6a 与 6b 基本重合, M 值变化不大, 只是后者 C 值略高, 阶段 6 总体上表现出具有最弱而且最为稳定的水动力条件。

3 沉积环境分析

年代数据显示, EC2005 孔底部年龄为 17.3 ka BP, 研究表明, 此时海平面低于现代海平面约 130 m^[6, 24], EC2005 孔底部沉积比当时海平面高出 30 m 左右, 此时海水对研究区没有影响。EC2005 孔自 41.00 m 至底部未见有孔虫, 含有大量的炭屑而且总体上呈现细密纹层, 水平、平行层理、波状层理, 中间含多层砂层, 并常见粉砂质透镜体, 与上部形成了截然的对比, 据此判断, 自 41.00 m 至底部为湖泊沉积环境。根据 41.00 m 以上层位有孔虫的出现以及岩性的突然变化, 结合海平面变化曲线^[24], 可以推断随着海平面的上升, 海水已经影响到研究区, 导致该段沉积环境发生了重大变化, 41.00 m 以上为海洋沉积环境。

根据沉积物的颜色、颗粒粗细、沉积构造以及垂向上的叠加方式等特征, 结合年代数据与海平面变化曲线^[24, 25], 该孔也可以分为 6 段:

(1) 60.20~56.00 m (17.3~16.4 ka BP)

青灰色极细密纹层, 为粉砂质粘土与粘土质粉砂互层形成的水平层理, 含少量砂质粉砂层, 见图 5(1a, 1b);

(2) 55.90~52.22 m (16.4~15.6 ka BP)

灰褐色、青灰色砂层、粉砂层以及粘土质粉砂层互层, 平行层理、波状层理, 常见粉砂质透镜体, 以砂层和粉砂质砂层为主, 含少量砂质粉砂、粉砂和粘土质粉砂层, 55.20~55.12 m 含大量云母; 52.80~

52.22 m 为均一的青灰色砂层, 偶见青灰色粘土质粉砂透镜体, 见图 5(2a, 2b);

(3) 52.22~41.00 m (15.6~13.1 ka BP)

青灰、灰褐色粉砂和粘土质粉砂互层, 含少量砂质粉砂层, 平行层理、波状层理, 常见粉砂质透镜体, 下部以粉砂层为主, 上部则以粘土质粉砂层为主, 单个纹层在下部较上部厚度大, 纹层密度上部较下部大, 见图 5(3a, 3b)。

结合前文粒度资料, 岩芯自底部至 41.00 m 粒度为细—粗—细的变化趋势。在剖面上表现为粗的相带覆盖在细的相带之上, 即垂向层序自下而上呈现明显的反旋回序列, 至 52.80~52.22 m 粒度达到了最粗且分选良好, 自此又表现出向上变细的正粒序, 可以判断该段为典型的三角洲沉积相, 以上三段分别对应了前三角洲—三角洲前缘—三角洲平原亚相, 52.80~52.22 m 为向上变粗的三角洲前缘亚相和向上变细的三角洲平原亚相的分界面。三角洲前缘亚相和三角洲平原亚相又可见多个正粒序(图 6)。

根据粒度参数划分的阶段 2 包含了三角洲前缘和三角洲平原的底部, 平均粒径最大, 水动力条件最强。阶段 1 平均粒径要略高于阶段 3, 可能是由于阶段 1 处于末次冰消期初期, 气候相对寒冷, 湖水深度较浅, 至阶段 3 则处于冰消期末期, 可能是由于温度的升高, 冰川融水或是增强的降水致使湖水水位有所上升^[26~28], 形成较弱的水动力条件, 暗示湖水深度有所增加。该段湖泊三角洲沉积可能主要是湖盆流域物质在地表径流作用下携带至研究区沉积所致。

(4) 41.00~36.80 m (13.1~12.3 ka BP)

自 41.00 m 开始沉积物中可见有孔虫。其中, 41.00~39.00 m 底部为青灰色、褐黄色粉砂层、粘土质粉砂层互层, 平行层理, 见多层较厚粉砂层以及粉砂质透镜体, 至上部粉砂与下伏粘土质粉砂层多表现为侵蚀结构, 见图 5(4a, 4b), 自下而上岩性总体上表现为变细。结合海平面变化曲线^[24](图 6), 海平面自海侵到达研究区开始缓慢上升, 随着海水深度的增加, 水动力条件逐渐减弱, 导致粗颗粒物相对减少, 形成了向上变细的正粒序。37.30~36.80 m (12.4~12.3 ka BP) 岩性突然变粗, 历时约 100 a 可能对应了新仙女木事件^[29, 30]。该段所处水深较浅, 受到波浪、潮汐等较强水动力条件影响, 对应了滨岸沉积前滨亚相, 可能主要是研究区邻近区域物质的输入或是(以及)对先前沉积物的改造所形成的。

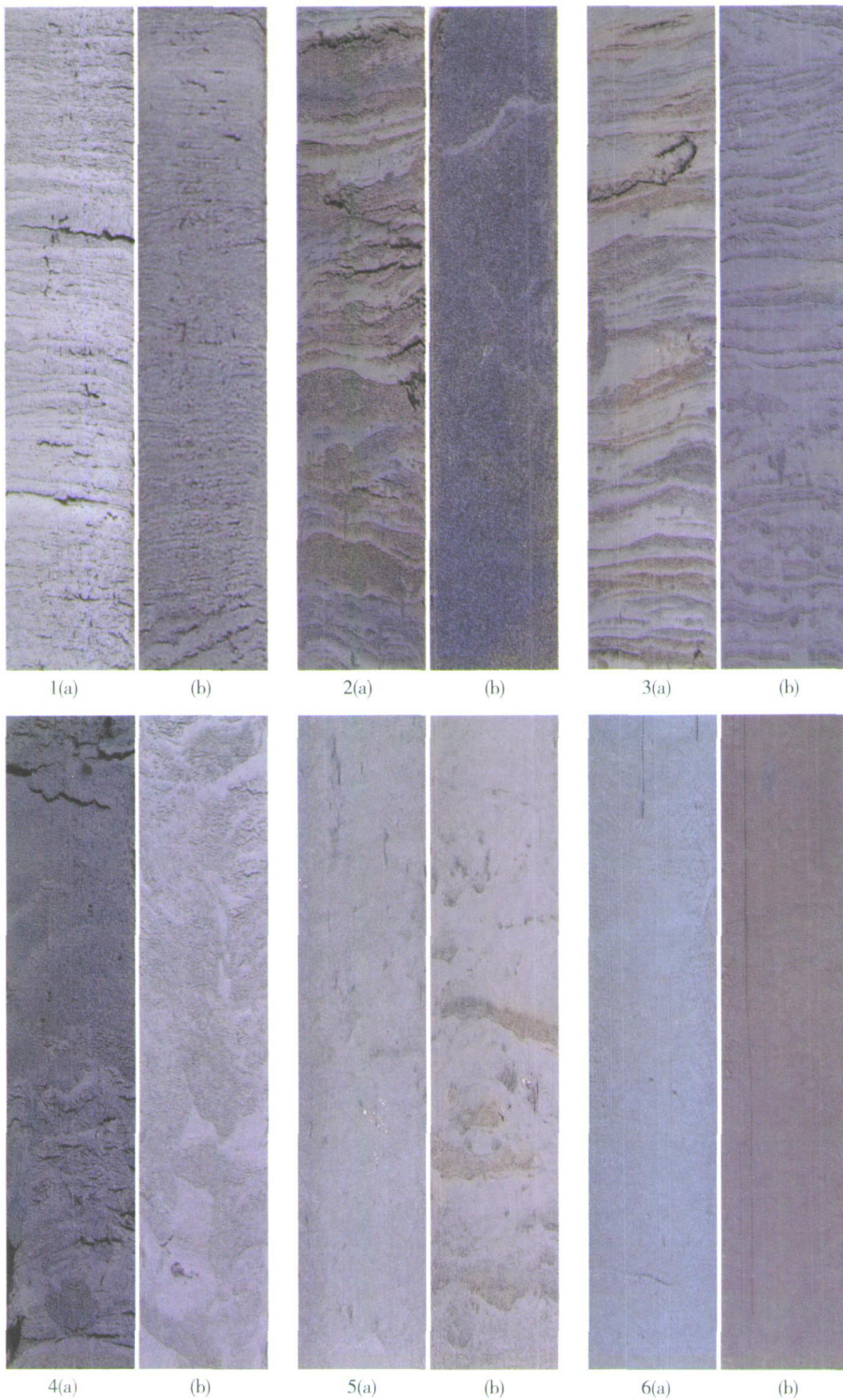


图 5 东海内陆架 EC2005 孔不同沉积环境典型岩芯照片

Fig 5 Photographs of typical facies (sedimentary environment) of Core EC2005 in the inner shelf of the East China Sea

- 1 前三角洲亚相, (a) 58.60~58.80 m, (b) 56.40~56.60 m; 2 三角洲前缘亚相, (a) 53.50~53.70 m, (b) 52.40~52.60 m, 为三角洲前缘和三角洲平原的分界面; 3 三角洲平原亚相, (a) 47.70~47.90 m, (b) 41.80~42.00 m; 4 前滨亚相, (a) 40.40~40.60 m, (b) 37.50~37.70 m; 5 近滨亚相, (a) 35.30~35.50 m, (b) 31.50~31.70 m; 6 浅海相, (a) 22.30~22.50 m, (b) 0.90~1.10 m

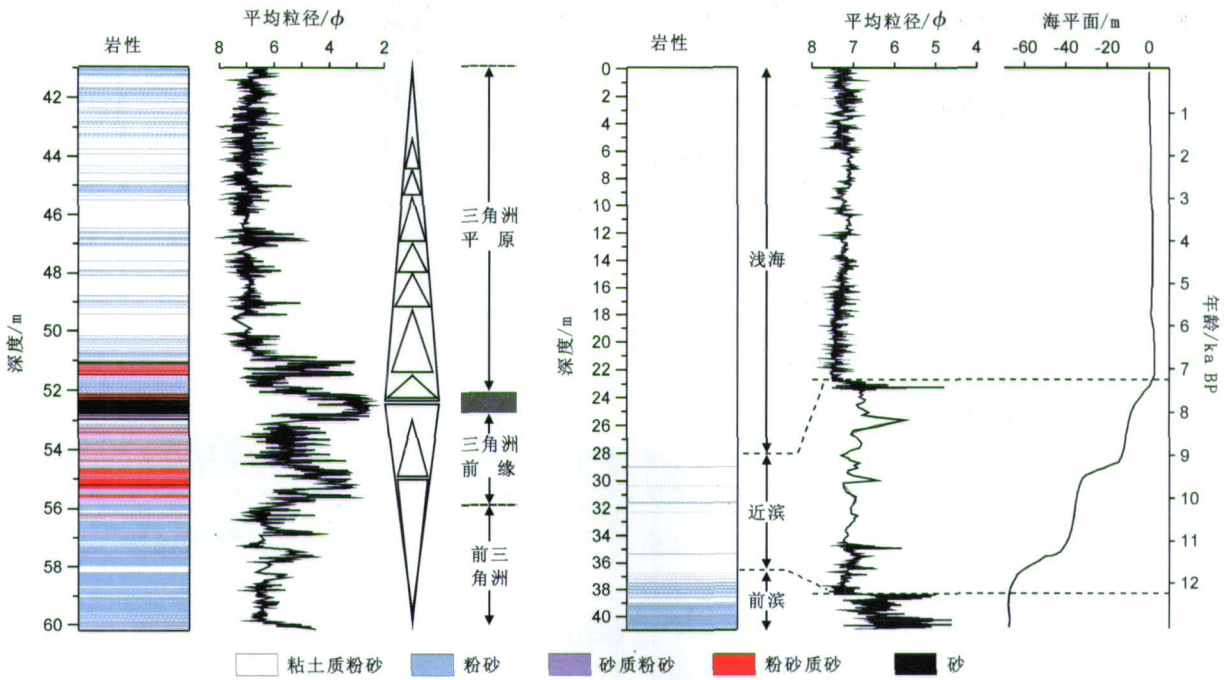


图 6 东海内陆架 EC2005孔沉积环境演化(海平面曲线据 Liu等^[24], Zong^[25])

Fig 6 Sedimentary environment evolution of Core EC2005 in the inner shelf of the East China Sea

(5) 36.80~28.06 m (12.3~7.3 ka BP)

以青灰色粘土质粉砂为主, 含少量青灰色、黄褐色粉砂透镜体, 含有孔虫, 局部见贝壳, 见图 5(5a 5b)。粉砂含量明显较下段少, 但高于上段。海平面变化在经历了前期缓慢上升期后开始快速上升, 海水深度加大, 波浪和潮汐的动力相应减弱, 而沿岸流的地位开始突出, 形成各粒度参数的突变。这与秦蕴珊等^[6]研究认为, 自冰后期开始长江物质逐渐影响到现代长江三角洲地区, 并同时产生顺岸泥质沉积物流是一致的。该段后期岩性的变粗对应的水动力增强, 可能对应了“8.2 ka冷事件”^[29, 31], 由于海平面下降或是增强的东亚冬季风影响所致。该段海水深度增加, 主要水动力条件为沿岸流、波浪以及潮汐等, 对应了近滨亚相, 可能主要是研究区邻近区域物质的输入和长江以及沿途其它较小河流物质在沿岸流作用下搬运至研究区沉积而成。

(6) 28.06~0 m (7.3~0 ka BP)

黄褐色、青灰色粘土质粉砂为主, 岩性较均一, 含有孔虫, 局部见褐灰色团块、斑点及贝壳、螺, 见图 5(6a 6b), 26.36~26.24 m 和 27.26~27.16 m 两层为有孔虫砂层, 可能为风暴潮沉积。由于近 7.3 ka BP 以来, 海平面变化不大, 其对应的沉积动力条件与沉积环境应该与现今基本一致, 即本段为海侵结束后高海平面以来主要受沿岸流控制的浅海沉积。这与

Xiao等^[15]认为稳定的泥质沉积带开始形成于 7.6 ka BP, Liu等^[5]认为开始形成于大约 7.0 ka BP 是一致的, 主要是来自长江的悬浮体由冬季沿岸流以悬移方式输送沉积而成, 其它小的河流可能也有较少的贡献^[5, 15]。其后期各粒度参数的波动可能对应了中一晚全新世海平面的下降以及气候的变化, 人类活动的增强也有可能对此形成影响^[5, 32]。

4 结论

岩芯自底部至 41.00 m (17.3~13.1 ka BP) 为末次冰消期以来的湖泊三角洲沉积序列, 可进一步划分为前三角洲—三角洲前缘—三角洲平原亚相。末次冰消期初期气候较为寒冷, 湖水深度较浅, 随着温度开始升高, 冰川融水或增强的降水使得径流携带能力增加, 水动力条件达到最强, 至冰消期末期湖水深度有所增加, 物质来源主要是湖盆流域物质的输入。

随着海平面逐渐上升, 海水自 13.1 ka BP 开始侵入研究区, 形成了全新世初期海侵滨岸沉积(前滨亚相), 主要是受到研究区邻近区域物质的输入或是(以及)对先前沉积物的改造而成。自 12.3 ka BP 开始海水深度加大, 沿岸流的地位开始突出, 形成了近滨沉积, 主要是研究区邻近区域物质的输入和长江以及沿途其它较小河流物质在沿岸流作用下搬运至研究区沉积而成。7.3 ka BP 以来, 海平面变化不大, 形

成了高海平面以来主要受沿岸流控制的浅海沉积,其物质来源主要为长江物质,稳定的泥质沉积物自此开始形成,其后期各粒度参数的波动可能对应了中一晚全新世海平面的下降以及气候的变化,人类活动的增强也有可能对此形成影响。世界范围内广泛存在的新仙女木事件、8.2 ka冷事件在本孔中清楚地揭示,显示出全球性重要气候事件的区域性响应,也表明了对陆架区沉积记录研究的重要性。

致谢 感谢上海海洋石油局第一海洋地质调查大队勘407轮全体船员、中国科学院海洋研究所黄朋博士、李传顺博士在 EC2005 钻探中的大力配合;感谢中国科学院海洋研究所董太禄研究员、李静女士等参与 EC2005 孔分样的全体人员,王红莉女士在粒度分析中给予了大力帮助;年代测试由美国 Woods Hole 海洋研究所 AMS¹⁴C 实验室完成;几位审稿专家提供的宝贵意见和建议使本文得以很大提高,谨致谢忱。

参考文献 (References)

- Diaz J, Pálanques A, Nelson CH, *et al*. Morpho-structure and sedimentology of the Holocene Ebro prodelta mud belt (northwestern Mediterranean Sea) [J]. *Continental Shelf Research*, 1996, 16: 435-456
- Allison M A, Lee M T, Ogston A S, *et al*. Origin of Amazon mudbanks along the northeastern coast of South America [J]. *Marine Geology*, 2000, 163: 241-256
- Nedjoroda A W, Reed C W, Das H, *et al*. Analyses of a large-scale depositional clinoform wedge along the Italian Adriatic coast [J]. *Marine Geology*, 2005, 222-223: 179-192
- Liu J P, Li A C, Xu K H, *et al*. Sedimentary features of the Yangtze River-derived along-shelf clinoform deposit in the East China Sea [J]. *Continental Shelf Research*, 2006, 26: 2141-2156
- Liu J P, Xu K H, Li A C, *et al*. Flux and fate of Yangtze River sediment delivered to the East China Sea [J]. *Geomorphology*, 2007, 85: 208-224
- 秦蕴珊, 赵一阳, 陈丽蓉, 等. 东海地质 [M]. 北京: 科学出版社, 1987: 1-290 [Qin Yunshan, Zhao Yiyang, Chen Liorong *et al*. *Geology of the East China Sea* [M]. Beijing: Science Press, 1987: 1-290]
- Chen Z, Song B, Wang Z, *et al*. Late Quaternary evolution of the subaqueous Yangtze Delta, China: sedimentation, stratigraphy, palynology, and deformation [J]. *Marine Geology*, 2000, 162: 423-441
- Hori K, Saito Y, Zhao Q, *et al*. Architecture and evolution of the tide-dominated Changjiang (Yangtze) River delta, China [J]. *Sedimentary Geology*, 2002, 146: 249-264
- Huh C-A, Su C-C. Sedimentation dynamics in the East China Sea elucidated from ²¹⁰Pb, ¹³⁷Cs and ^{239,240}Pu [J]. *Marine Geology*, 1999, 160: 183-196
- Lin S Hsieh I J, Huang K-M, *et al*. Influence of the Yangtze River and grain size on the spatial variations of heavy metals and organic carbon in the East China Sea continental shelf sediments [J]. *Chemical Geology*, 2002, 182: 377-394
- Su C-C, Huh C-A. ²¹⁰Pb, ¹³⁷Cs and ^{239,240}Pu in East China Sea sediments: Sources, pathways and budgets of sediments and radionuclides [J]. *Marine Geology*, 2002, 183: 163-178
- 肖尚斌, 李安春, 蒋富清, 等. 近 2ka 来东海内陆架的泥质沉积记录及其气候意义 [J]. *科学通报*, 2004, 49(21): 2233-2238 [Xiao Shangbin, Li Anchun, Jiang Fuqing *et al*. Recent 2000-year geological records of mud in the inner shelf of the East China Sea and their climatic implications [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2005, 50(5): 466-471]
- 肖尚斌, 李安春, 陈木宏, 等. 近 8ka 东亚冬季风变化的东海内陆架泥质沉积记录 [J]. *地球科学—中国地质大学学报*, 2005, 30(5): 573-581 [Xiao Shangbin, Li Anchun, Chen Mubong *et al*. Recent 8 ka mud records of the East Asian Winter Monsoon from the inner shelf of the East China Sea [J]. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 2005, 30(5): 573-581]
- 向荣, 杨作升, Saito Y, 等. 济州岛西南泥质区近 2300 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)*, *地球科学*, 2006, 36(7): 654-662 [Xiang Rong, Yang Zuosheng, Saito Y, *et al*. East Asian Winter Monsoon changes inferred from environmentally sensitive grain-size component records during the last 2300 years in mud area southwest off Cheju Island, ECS [J]. *Science in China (Series D)*, 2006, 49(6): 604-614]
- Xiao S, Li A, Liu J P, *et al*. Coherence between solar activity and the East Asian winter monsoon variability in the past 8000 years from Yangtze River-derived mud in the East China Sea [J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2006, 237: 293-304
- Hughen K A, Baillie M G, Bard E, *et al*. Marine 0-4M marine radiocarbon age calibration 0-26 cal kyr BP [J]. *Radiocarbon*, 2004, 46(3): 1059-1086
- Reimer P J, Baillie M G L, Bard E, *et al*. IntCal04 terrestrial radiocarbon age calibration 0-26 cal kyr BP [J]. *Radiocarbon*, 2004, 46(3): 1029-1058
- McManus J. Grain Size Determination and Interpretation [M]. Oxford: Blackwell, 1988: 63-85
- 成都地质学院陕北队. 沉积岩 (物) 粒度分析及其应用 [M]. 北京: 地质出版社, 1978: 44-70 [Shanbei Group, Chengdu College of Geosciences. *Grain-size Analysis and Application of Sedimentary Rocks (sediments)* [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1978: 44-70]
- 向荣, 杨作升, 郭志刚, 等. 济州岛西南泥质区粒度组分变化的古环境应用 [J]. *地球科学—中国地质大学学报*, 2005, 30(5): 582-588 [Xiang Rong, Yang Zuosheng, Guo Zhigang *et al*. Paleoenvironmental implications of grain-size component variations in the mud area southwest off Cheju Island, ECS [J]. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 2005, 30(5): 582-588]
- 徐方建, 李安春, 刘建国, 等. 东海内陆架泥质沉积中心的环境敏感粒度组分 [J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2007, 27(增刊): 16-20 [Xu Fangjian, Li Anchun, Liu Jianguo *et al*. Environmentally sensitive grain-size population at deposit centre on the inner shelf of

- the East China Sea [J]. *Marine Geology & Quaternary Geology* 2007, 27(Suppl): 16-20]
- 22 Visher G S. Grain size distributions and depositional processes[J]. *Journal of Sedimentary Petrology*, 1969, 39(3): 1074-1106
- 23 李军. 冲绳海槽晚更新世以来的沉积过程与记录 [D]. 山东青岛: 中国科学院海洋研究所, 2003 [Li Jun. Sedimentary processes and records in the Okinawa Trough since the late Pleistocene [D]. Qingdao Shandong Institute of Oceanology Chinese Academy of Sciences 2003]
- 24 Liu J P, Milliman J D, Gao S, *et al*. Holocene development of the Yellow River's subaqueous delta, North Yellow Sea[J]. *Marine Geology*, 2004, 209: 45-67
- 25 Zong Y. MidHolocene sea-level highstand along the Southeast Coast of China[J]. *Quaternary International* 2004, 117: 55-67
- 26 刘兴起, 王苏民, 沈吉. 青海湖 QH-2000 钻孔沉积物粒度组成的古气候古环境意义 [J]. *湖泊科学*, 2003, 15(2): 112-117 [Liu Xingqi, Wang Sumin, Shen Ji. The grain size of the Core QH-2000 in Qinghai Lake and its implication for paleoclimate and paleoenvironment [J]. *Journal of Lake Sciences* 2003, 15(2): 112-117]
- 27 Shen J, Liu X, Wang S, *et al*. Palaeoclimatic changes in the Qinghai Lake area during the last 18 000 years[J]. *Quaternary International* 2005, 136: 131-140
- 28 Dieffenhofer A F, Patterson W P, Mullins H T, *et al*. Evidence for high-frequency late Glacial to mid-Holocene (16 800 to 5 500 cal yr B. P.) climate variability from oxygen isotope values of Lough Iniquin, Ireland[J]. *Quaternary Research* 2006, 65: 78-86
- 29 Stuiver M, Grootes P M, Braziunas T F. The GISP2 $\delta^{18}O$ climate record of the past 16 500 years and the role of the sun, ocean and volcanoes[J]. *Quaternary Research* 1995, 44: 341-354
- 30 Johnson T C, Brown E T, Mamanus J, *et al*. A high-resolution paleoclimate record spanning the past 25, 000 Years in Southern East Africa[J]. *Science*, 2000, 289: 1916-1919
- 31 Thomas E R, Wolff E W, Mubvaney R, *et al*. The 8.2 ka event from Greenland ice cores[J]. *Quaternary Science Reviews* 2007, 26: 70-81
- 32 Saito Y, Yang Z, Hori K. The Huanghe (Yellow River) and Changjiang (Yangtze River) deltas: a review on their characteristics, evolution and sediment discharge during the Holocene[J]. *Geomorphology*, 2001, 41: 219-231

Paleoenvironmental Evolution in the Inner Shelf of the East China Sea Since the Last Deglaciation

XU Fang-jian^{1, 2} LI An-chun¹ XIAO Shang-bin³
WAN Shiming¹ LIU Jian-guo⁴ ZHANG Yong-chao⁵

(1 Key Laboratory of Marine Geology and Environment, Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Qingdao Shandong 266074;

2 Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049;

3 College of Civil & Hydroelectric Engineering, China Three Gorges University, Yichang Hubei 443002;

4 Key Laboratory of Marginal Sea Geology, South China Sea Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510304;

5 Research Institute for Exploration & Development, Petrochina Jidong Oilfield, Tangshan Hebei 063004)

Abstract Based upon analysis of lithology, grain-size and AMS¹⁴C dating for Core EC2005 located in the mud area off the Zhejiang-Fujian coast in the inner shelf of the East China Sea, the paleoenvironmental evolution can be ascertained. The hydrodynamic conditions and sedimentary environment changed greatly which could have been an integrated result of the varieties of lacustrine water depth, sea-level and climatic changes. From the bottom 60.20 m to 41.00 m (17.3~13.1 ka BP), a lacustrine delta developed, which can be divided into three facies: prodelta, delta front and delta plain. The delta sediments are deduced to mainly from the local drainage area. The sea water arrived at the study area at 13.1 ka BP and a 41 m thick sediment formed from then on, which can be divided into three facies: foreshore, nearshore and shallow sea. The facies evolution was well corresponding to the sea level changes, the hydrodynamic conditions changed greatly also during this period. From 12.3 ka BP, the study area was influenced by Zhejiang-Fujian Coastal Current (ZFCC), and Yangtze-derived materials had been transported southward from that time. Since 7.3 ka BP, the sedimentary environment is dominated by the ZFCC, and the homogeneous mud sedimentation began to form. The worldwide climatic events such as the Younger Dryas episode and the 8.2 ka event were well recorded in the core.

Key words paleoenvironment, Last Deglaciation, grain-size, inner shelf of the East China Sea, Core EC2005