

末次冰期以来东海内陆架沉积反映的海平面变化

郑妍¹, 郑洪波², 王可¹

(1. 同济大学 海洋地质国家重点实验室, 上海 200092; 2. 南京大学 地球科学与工程学院, 江苏 南京 210093)

摘要: 对东海内陆架泥质沉积区 MD06-3042 孔(27°05.4'N, 121°24.1'E, 水深 62 m, 岩芯长 34.1 m)样品进行了高分辨率的粒度分析和¹⁴C 年代测试, 重建了末次冰期以来东海内陆架区的海平面及沉积环境的变化. 14.0 ka 左右, 海平面已经到达现今海平面下 62 m 等深线的位置, 大量沉积物在此沉积. 13.0~4.2 ka 之间, 受海流等多种因素影响, 少量沉积物在此沉积. 4.2~3.2 ka 之间, 现代东海内陆架的泥质沉积主体在该岩芯附近快速堆积. 东海内陆架的泥质沉积体由北向南, 由内向外逐渐形成, 具有阶段性.

关键词: 粒度特征; 东海内陆架; 海平面变化; 长江; 末次冰期

中图分类号: P 53

文献标识码: A

History of Sea Level Change Since Last Glacial: Reflected by Sedimentology of Core from East China Sea Inner Shelf

ZHENG Yan¹, ZHENG Hongbo², WANG Ke¹

(1. State Key Laboratory of Marine Geology, School of Ocean and Earth Science, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. School of Earth Science and Engineering, Nanjing University, Nanjing 210093, China)

Abstract: High resolution grain size analysis and ¹⁴C dating were carried on the sedimentary core MD06-3042 (27°05.4'N, 121°24.1'E, water depth: 62 m, length: 34.1 m) which is from East China Sea (ECS) inner shelf, a reconstruction was done on the history of the post last glacial sea level change and sedimentary change. Since 14.0 ka, the core site at 62 m was in the marine environment, and lots of Yangtze sediment had been delivered here. However, during 13.2~4.2 ka, there was low sedimentation rate here, and the main part of the modern East China Sea mud section at the site was formed between 4.2~3.2 ka. The ECS mud area should be formed step by step from north to south and from inner to the outer shelf.

Key words: grain size; inner shelf of the East China Sea; sea level change; the Yangtze River; Last Glacial

末次冰期以来, 东海大陆架经历了大规模的海进, 导致陆架区的沉积环境、大洋环流等发生重大改变^[1-2], 从而影响陆源(主要来自于长江)沉积物在陆架区的搬运和堆积. 现代东海内陆架的泥质沉积和外陆架的砂质沉积是大洋环流等因素影响的结果^[3-4]. 沉积物的粒度特征可以反映搬运介质、搬运方式以及沉积环境等^[5-6]. 因此, 陆架区的高质量长岩芯的粒度特征在研究沉积物搬运和沉积环境的变化时具有重要意义. 目前, 根据古海岸线和古贝壳堤等标志已获得了东海海平面整体的变化趋势^[7-8]. MD06-3042 岩芯位于现今海平面下 62 m 等深线处, 记录了海平面上升过程中不同时期沉积物的搬运和沉积的特征. 本文通过对东海内陆架泥质沉积区东南缘的 MD06-3042 孔进行高分辨率的粒度和测年工作, 获得了末次冰期以来东海内陆架地区陆源沉积物的输入和海平面变化的特征.

1 材料和方法

样品 MD06-3042 岩芯来自法国 Marion Dufresne 科考船于 2006 年执行中法(同济大学和法国极地研究所 IPEV)合作 MARCO POLO-2 航次中所取得的 Calypso 柱状样. 该钻孔位于浙江岸外的东海内陆架泥质沉积区南部的边缘(27°05.4'N, 121°24.1'E, 水深 62 m)(图 1, 图中斜线的阴影部分为东海泥质沉积区^[3]). 该钻孔附近的地震剖面在水下 20 m 和 30 m 左右存在两个明显的沉积不整合界面(图 2, 图中岩性柱中的贝壳代表进行¹⁴C 定年的贝壳深度), 沉积物的密度和孔隙度等物理参数结果在 20 m 和 30 m 两个界面也有明显改变(图 3, 图中虚线代表岩芯接缝处)^[9]. 岩芯全长 34.1 m, 顶部 15 cm 缺失. 按岩性特征可将岩芯由下至上大致分为 4 部分(图 2): 1 段(34.1~30.9 m)沉积物多为粉砂和泥质沉积互层, 沉积物粒度偏粗, 含砂量高, 顶部 31.1~

收稿日期: 2009-05-25

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(40676033, 40830107, 40621063); 上海市科委科研计划资助项目(07DZ14003)

作者简介: 郑妍(1981—), 女, 理学博士, 主要研究方向为海洋地质与第四纪地质. E-mail: zy99413@gmail.com

郑洪波(1965—), 男, 教授, 博士生导师, 理学博士, 主要研究方向为海洋地质与第四纪地质. E-mail: zhenghb@nju.edu.cn

30.9 m 为粗沙层. 2 段(30.9~21.6 m)沉积物致密, 沉积物粒度比 1 段和 3 段的沉积物偏细, 顶部 22.4~21.6 m 为粗沙层. 3 段(21.6~18.0 m)底部为厚约 30 cm 的泥质沉积, 其上沉积物突然变粗, 而后含砂量逐渐减少, 粒度渐细. 4 段(18.0~0.15 m)沉积物致密, 岩性均一, 顶部 1.5 m 沉积物呈土黄色, 随深度增加颜色渐变为灰绿色(1.5~18.0 m). 顶部 3.0 m 及底部泥沙互层部分(2 段和 4 段)以 5 cm 间隔取样, 其余部分以 10 cm 的间隔选取子样, 共获得 426 个子样, 用于沉积物粒度测定.

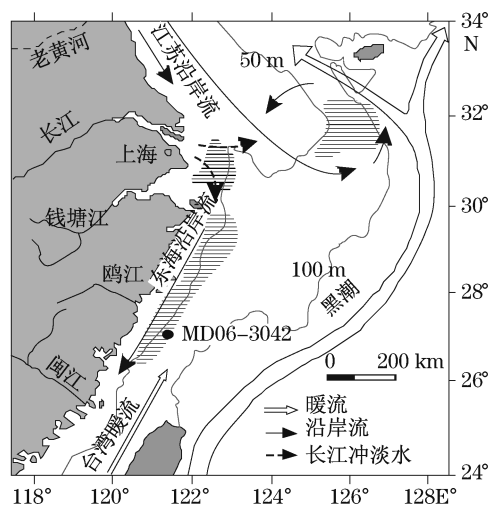


图1 MD06-3042 孔站位及东海环流示意图

Fig.1 Location of the core MD06-3042 and regional circulation pattern in ECS

利用双氧水和稀盐酸去除样品中的有机质和碳酸盐后进行粒度测试. 样品预处理具体步骤如下: 取样品 0.15 g(含砂量较高的样品约 0.50 g)放入 150 mL 烧杯中, 加入 10 mL 质量分数为 30% 的 H_2O_2 , 水浴 8~10 h, 去除有机质; 然后加入 10 mL $1 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 的稀盐酸去除碳酸盐, 在 65°C 水浴中反应 3 h, 冷却. 将烧杯注满去离子水, 静置 24 h 后移去清液, 加入 10 mg $(\text{NaPO}_3)_6$ 分散剂超声振荡 3~5 min 后, 在同济大学海洋地质国家重点实验室利用美国 Beckman Coulter LS230 型全自动激光粒度仪完成粒度测试, 仪器的测量范围为 $0.04 \sim 2000 \mu\text{m}$, 重复测量的相对误差小于 1%.

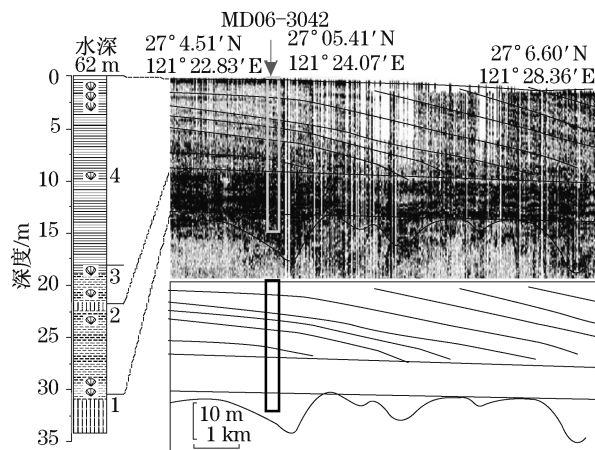


图2 MD06-3042 的岩性特征及地震剖面特征^[9]

Fig.2 Lithology of MD06-3042 and seismic profile^[9]

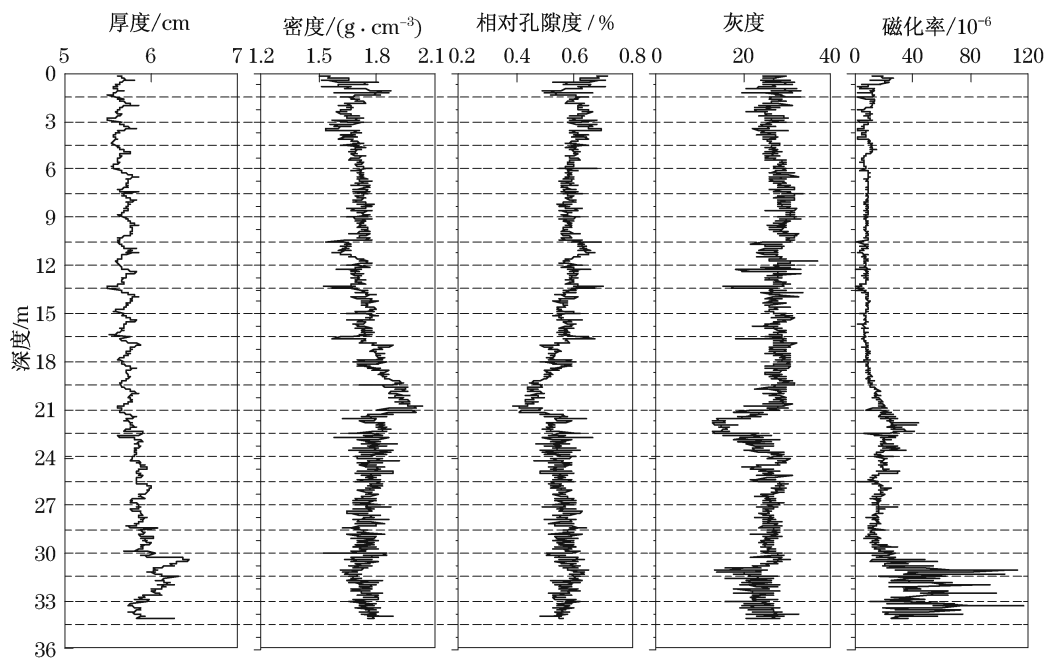


图3 船测 MD06-3042 的物理参数随深度的变化趋势^[9]

Fig.3 Depth profiles of physical parameters measured on board of MD06-3042^[9]

选取岩芯中保存完整的贝壳用于 ^{14}C 测年,贝壳经中国科学院广州地球化学研究所制样后,送至北京大学核物理与核技术国家重点实验室利用加速器质量光谱仪(AMS)完成年代测试. MD06-3042的年代框架依据9个完整贝壳的 ^{14}C 测年数据建立. 利用Calib 5.0软件^[10]中的Marine04数据库^[11]将 ^{14}C 年龄校正为日历年龄,并采用全球平均碳储库年龄400 a为该地区的碳储库年龄(图4). 根据 ^{14}C 结果得出沉积速率见图4.

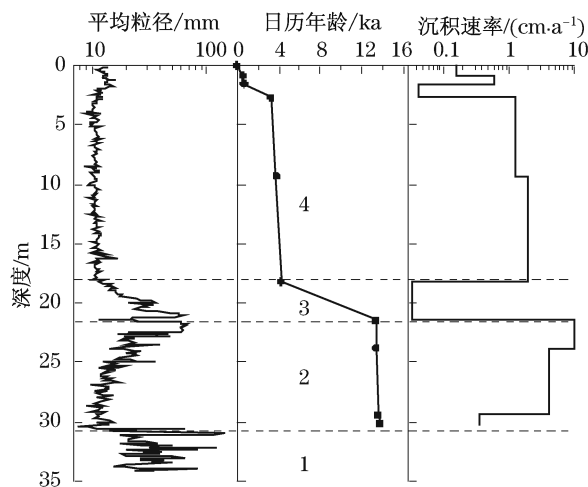


图4 MD06-3042岩芯的平均粒径、年龄和沉积速率

Fig.4 Mean grain size distribution and age-depth model for core MD06-3042

2 结果与讨论

目前,沉积物的粒度结果表示方法包括参数法和图解法等. 参数法是通过计算各种粒度参数(包括中值粒径、标准偏差等)进行沉积环境的解译,提供剖面整体的变化信息. 图解法是将粒度分析结果用频率(沉积物在不同粒径区间的分布特征)或 ϕ 值($=\log_2(\text{沉积物粒径}/\text{mm})$)的概率曲线表达出来,更直观地反映每一点的粒度组分分布的信息. 本文采取参数法和图解法来展示沉积物粒度的变化. 沉积物由下至上经历了两个较大的由粗变细的沉积旋回:粗(1)—细(2)—粗(3)—细(4)(图5,图中星号代表年龄控制点),通过结合沉积物的年龄结果来讨论末次冰期以来东海内陆架区的沉积物的搬运和堆积特征.

2.1 阶段1(34.1~30.9 m)

阶段1为泥沙互层的沉积,频率分布曲线呈双峰(峰值区间分别为 $10\sim 20\ \mu\text{m}$, $100\sim 160\ \mu\text{m}$)或者

单峰(峰值区间为 $130\sim 160\ \mu\text{m}$). 概率累积曲线多呈两段型,截点所对应的粒径约 3ϕ ,反映了粗颗粒的特征. 阶段1顶部存在厚约30 cm的粗砂层,含砂量高达80%,分选好,几乎没有粘土粒级的颗粒.

地震剖面在30 m左右存在明显的分界面,因此推测这段粗砂层可能是海平面降低后,沉积物经受长期剥蚀所形成的分选好的陆架上的残留沙沉积. 海平面在16.0 ka左右已经降低到150~160 m等深线处^[3,7],由于阶段1中没有发现完整贝壳,所以推测阶段1顶部粗砂层的年龄应该早于16.0 ka.

2.2 阶段2(30.9~21.6 m)

阶段2的沉积物粒度呈由细到粗的变化. 30.9~25.0 m之间,沉积物粒度比较细,概率分布曲线形状几乎一致,呈单峰,峰值区间为 $10\sim 15\ \mu\text{m}$,概率累积曲线表现为单段型;25.0~22.4 m,沉积物的含砂量呈升高趋势,由 $<1\%$ 增至约20%,概率分布曲线仍以单峰为主,峰值为 $15\sim 22\ \mu\text{m}$;22.4~21.6 m为厚约80 cm的粗砂层,粒度分布特征一致,粉砂含量约50%,频率曲线为单峰,峰值为 $70\ \mu\text{m}$,概率累积曲线呈三段形,泥质沉积的含量较低.

阶段2底部细粒沉积直接覆盖在阶段1的粗砂层上,沉积物平均粒度向顶部逐渐变粗,粗颗粒组分增加,并且出现泥沙互层的序列,推测可能是海平面上下波动的结果. 该阶段底部年龄为14.0 ka,顶部年龄约为13.3 ka,沉积速率高达 $4\sim 9\ \text{cm}\cdot\text{a}^{-1}$,是快速堆积体. 末次冰期后,冰期时所形成的冰快速消融,河流径流量增加,从而携带大量的陆源碎屑入海,冰川融化同时也导致了海平面快速上升^[7],河口快速向陆地回缩,河流入海的方向曾发生多次改变^[12]. 李广雪等^[12]和Liu等^[13]的研究也表明,在14.0~12.0 ka左右,长江的入海口朝向东南,台湾岛北部1202B孔粘土矿物结果与长江沉积物类似^[14],因此推测阶段2的沉积物可能来自于长江.

阶段2顶部的沉积物粒度较粗,分选好,不可能是长距离搬运的结果,推测该粗沙沉积可能是海平面上升后,海水将靠岸一侧分选好的粗沙搬运到此处所形成. 从另一角度来说,陆架区沉积作用通常受堆积和侵蚀两种作用力控制. 潮汐和波浪等侵蚀作用会将细粒的沉积物向外陆架和冲绳海槽地区搬运,推测阶段2顶部的粗砂层可能是潮汐和波浪共同作用的结果. 综合以上结果,推测海平面在14.0 ka左右已经到达该钻孔附近.

2.3 阶段3(21.6~18.0 m)

阶段3底部为厚约30 cm(21.6~21.3 m)的泥

质层,几乎不含粗颗粒,频率曲线峰值为 $10\ \mu\text{m}$,概率累积曲线为单段形.21.3 m处,粗颗粒组分再次突然增加至45%,而后向上逐渐变细.概率曲线多为

两段形,粗颗粒组分斜率较大,截点所对应的粒径约为 4ϕ .频率分布曲线由底部的单峰逐渐转为双峰再转为单峰(阶段3顶部).

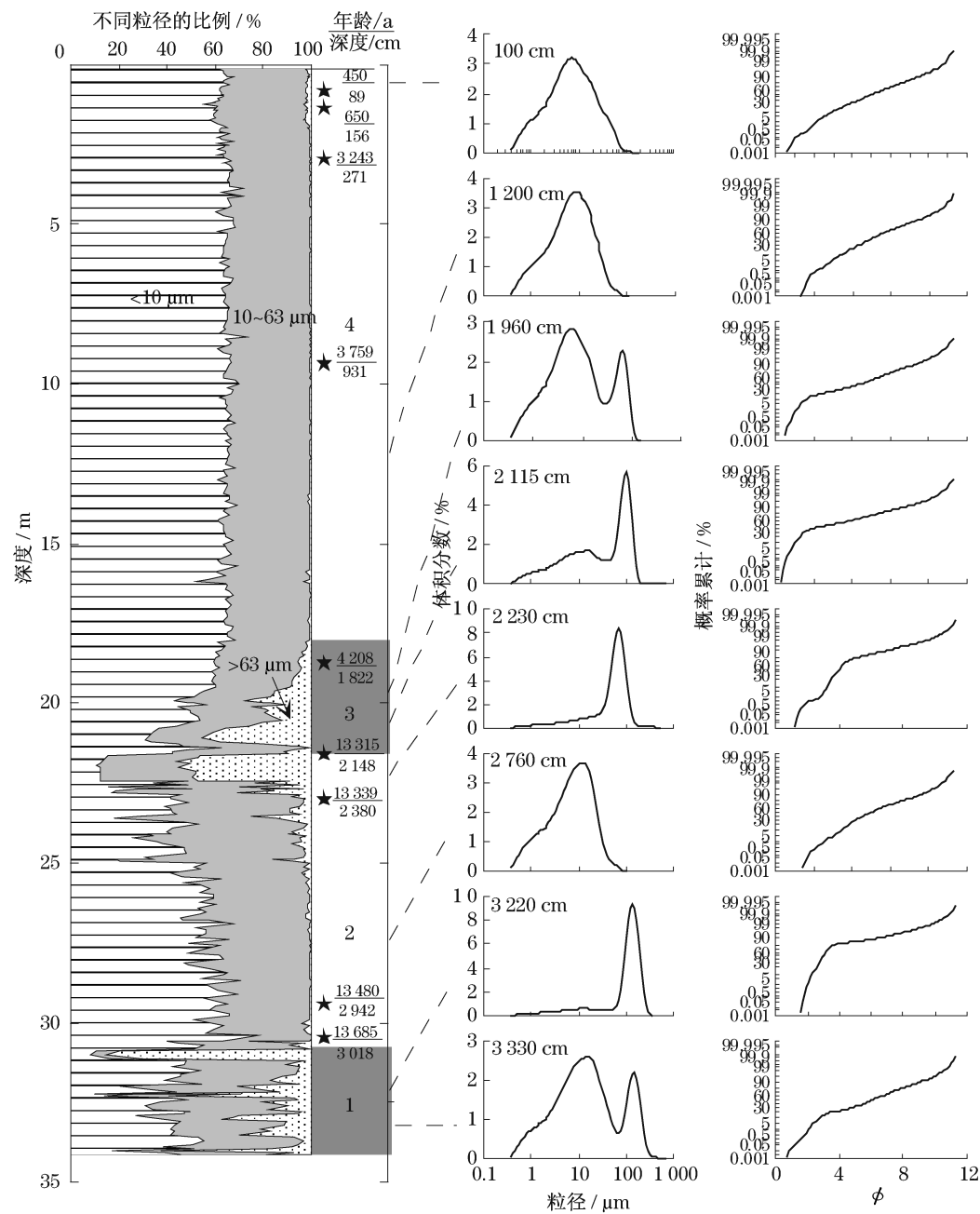


图5 MD06-3042不同粒度组分分布及各个阶段典型的频率分布曲线和概率累积曲线示意图

Fig.5 Percentage of clay, silt and sand of MD06-3042, representative frequency distributions and probability accumulation curves

地震剖面反映出阶段3和4的沉积物呈斜层理,底部与阶段2呈角度不整合.阶段3顶部的年龄约为4.2 ka,阶段2顶部的年龄约为13.3 ka,说明在阶段3的沉积速率极低,其间可能存在沉积间断.这可能是海平面突然升高后,大量长江的沉积物在

河口地区沉积,导致向陆架区搬运的沉积物较少的结果.前人研究认为,东海内陆架的泥质沉积体大约从7 ka左右开始形成,沉积物经沿岸流由北向南搬运所形成^[3,13].由于21.6~18.0 m之间没有¹⁴C年龄数据,很难判断该段沉积物开始堆积的具体沉积

时间,可能在 7.0 ka 左右,就有少量的沉积物在此沉积,自 4.2 ka 开始,大量陆源物质在此快速堆积.

2.4 阶段 4 (18.0~0.15 m)

阶段 4 的频率分布曲线呈正态分布,峰值分布范围为 7~8 μm ,沉积物的概率累积曲线呈两段形,粘土和粉砂占主要部分.2~18 m 粒度偏细,粒度特征均一,沉积速率约 1.2~2.0 $\text{cm} \cdot \text{a}^{-1}$,0.15~1.50 m 沉积物中含少量的粗颗粒(>63 μm)沉积物,沉积速率较低(0.04~0.60 $\text{cm} \cdot \text{a}^{-1}$).

4.2~3.2 ka 之间,沉积速率较高,说明来自于长江的泥质沉积在这段时间快速堆积.3.2 ka 之后,沉积速率低于 0.1 $\text{cm} \cdot \text{a}^{-1}$,说明仅有少量的沉积物在此沉降,可能是沉积物向南或向东搬运所致.大约 650 a 至今(1.9 m),沉积速率增大,沉积物粒度突然变粗,后又逐渐变细,可能由于长江中下游地区人类活动日益增多的结果.

2.5 东海内陆架泥质条带的沉积特征

目前对东海内陆架的泥质沉积体已经开展了等厚图^[2]和现代表层沉积物沉积速率^[15]的研究,但对于该泥质条带形成过程的研究相对贫乏.图 6 为 MD06-3042 与泥质沉积体北部的 DD2^[16]和 PC6^[17],泥质沉积体中部的 MD06-3040^[18]以及该钻孔附近的 EC2005^[19-20]几个岩芯的年龄和沉积速率图.泥质沉积区北部的 2 根岩芯(DD2 和 PC6)比较短,沉积速率较低.沉积体南部的 3 个岩芯较长,其中 MD06-3040 覆盖了全新世以来的沉积,泥质沉积体中部,年龄点趋于一条直线,说明沉积物的沉降速度比较均一,平均沉积速率大约为 2.0 $\text{mm} \cdot \text{a}^{-1}$. EC2005 与 MD06-3042 相距约 7 km,都记录了末次冰期以来的沉积序列,并且粒度变化都反映了粗—细—粗—细的特征,但是二者的年代框架有很大差别. MD06-3042 的沉积速率变化较大,结合各种物理参数结果(图 2,3 和 5)得出 MD06-3042 可能记录了两次沉积间断.在 10.0~4.0 ka 之间沉积速率极低,可能存在沉积间断. EC2005 在 10.0~7.0 ka 之间,沉积速率与 MD06-3040 接近,7.0~6.0 ka 之间,沉积速率增加,高于 MD06-3040,说明在 7.0~6.0 ka 之间,沉积物在 EC2005 钻孔附近快速堆积. 4.0~3.0 ka 之间,MD06-3042 的沉积速率快速增加,表明在 4.0 ka 左右,东海泥质沉积的主体在 MD06-3042 钻孔附近开始堆积.3.0 ka 以来,MD06-3042 的沉积速率低于 MD06-3040 和 EC2005,说明在 3.0 ka 以后,泥质沉积快速沉降的主体向南转移.

根据东海泥质区的几根岩芯的年龄和沉积速率结果,推知东海的泥质沉积体由北向南不断堆积,全新世中晚期,北部的沉积物堆积速率低于南部.这与长江三角洲附近江心岛的形成呈现类似的规律^[21].

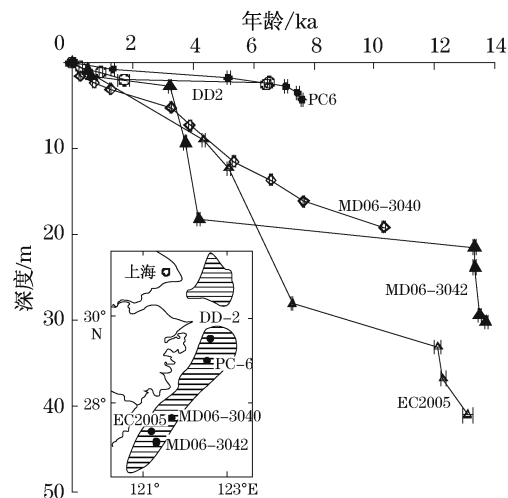


图 6 岩芯的年代框架和沉积速率对比图

Fig. 6 Comparison of age/depth model and sedimentation rate among cores on ECS mud area

3 结论

海平面升降对东海陆架区的沉积环境,包括沉积物搬运、环流特征等,均有重大影响.东海内陆架泥质沉积区 MD06-3042 岩芯的年代结果和高分辨率的粒度结果,重建了末次冰期以来东海内陆架区的海平面及沉积环境的变化.粒度特征由下至上可以分为 4 段,沉积物的粒度呈粗—细—粗—细的变化.阶段 1 和 2 顶部为两个沉积间断:大约 16.0~14.0 ka 和 13.3 ka 之后.14.0 ka 左右,海平面已经到达该钻孔所在位置,并有大量长江沉积物在此堆积.该钻孔所处的 62 m 等深线附近的全新世泥质沉积的主体在 4.2~3.2 ka 之间快速堆积.东海泥质沉积体的不同地区的沉积特征有很大差别,泥质条带并非同时形成,而是沉积物由长江口向南不断搬运的结果.

参考文献:

- [1] Uehara K, Saito Y. Late quaternary evolution of the Yellow/East China Sea tidal regime and its impacts on sediments dispersal and seafloor morphology[J]. Sedimentary Geology, 2002, 162: 25.
- [2] 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.
- [3] 秦蕴珊,赵一阳,陈丽蓉,等.东海地质[M].北京:科学出版社,1987.
- QIN Yunshan, ZHAO Yiyang, CHEN Lirong, et al. Geology of the East China Sea[M]. Beijing: Science Press, 1987.
- [4] 金翔龙.东海海洋地质[M].北京:海洋出版社,1992.
- JIN Xianglong. Marine geology of the East China Sea [M]. Beijing: Marine Press, 1992.
- [5] 孙有斌,高抒,李军.边缘海陆源物质中环境敏感粒度组分的初步分析[J].科学通报,2003,48:83.
- SUN Youbin, GAO Shu, LI Jun. Preliminary analysis of grain size populations with environmentally sensitive terrigenous in marginal sea setting [J]. Chinese Science Bulletin, 2003, 48:184.
- [6] 陈国成,郑洪波,李建如,等.南海西部陆源沉积粒度组成的控制动力及其反映的东亚季风演化[J].科学通报,2007,52:2768.
- CHEN Guocheng, ZHENG Hongbo, LI Jianru et al. Dynamic control on grain size distribution of terrigenous sediments in the western South China Sea; implication for East Asian monsoon evolution [J]. Chinese Science Bulletin, 2008, 53:1533.
- [7] 赵希涛,杨达源.全球海面变化[M].北京:科学出版社,1992.
- ZHAO Xitao, YANG Dayuan. Global sea level change [M]. Beijing: Science Press, 1992.
- [8] Liu J P, Milliman J D, Gao S, et al. Holocene development of the Yellow River's subaqueous delta[J]. North Yellow Sea Marine Geology, 2004, 209:45.
- [9] Laj C. MD155-Marco Polo 2 IMAGES XIV cruise report[R]. Paris: Laboratoire des Sciences du Climat et de l'Environnement/IPSL, CNRS, 2006.
- [10] Stuiver M, Reimer P J. Extended ^{14}C database and revised CALIB radiocarbon calibration program [J]. Radiocarbon, 1993, 35:215.
- [11] Hughen K A, Baillie M G L, Bard E, et al. Marine 04: Marine radiocarbon age calibration, 26 ~ 0 ka BP [J]. Radiocarbon, 2004, 46:105.
- [12] 李广雪,刘勇,杨子赓,等.末次冰期东海陆架平原上的长江古河道[J].中国科学:D辑,2004,35:284.
- LI Guangxue, LIU Yong, YANG Zigeng, et al. The old river bank on the East China Sea Shelf during the last glacial [J]. Science in China—D series, 2004, 35:284.
- [13] 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.
- [14] Diekmann B, Hofmann J, Henrich R, et al. Detrital sediment supply in the southern Okinawa Trough and its relation to sea-level and Kuroshio dynamics during the late Quaternary [J]. Marine Geology, 2008, 255:83.
- [15] Lim D I, Choi J Y, Jung H S, et al. Recent sediment accumulation and origin of shelf mud deposits in the Yellow and East China Seas[J]. Progress in Oceanography, 2007, 73: 145.
- [16] 肖尚斌,李安春.东海内陆架泥区沉积物的环境敏感粒度组分[J].沉积学报,2005,23:122.
- XIAO Shangbin, LI Anchun. A study on environmentally sensitive grain-size population in inner shelf of the East China Sea[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2005, 23:122.
- [17] Xiao S B, Li A C, 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.
- [18] 王可,郑洪波,Prins M,等.东海内陆架泥质沉积反映的古环境演化[J].海洋地质与第四纪地质,2008,28:1.
- WANG Ke, ZHENG Hongbo, Prins M, et al. High resolution paleoenvironmental record of the mud sediments of the East China Sea inner shelf [J]. Marine Geology and Quaternary Geology, 2008, 28:1.
- [19] 徐方建,万世明,李安春,等.中国边缘海陆源沉积物粒度与矿物组成的关系[J].自然科学进展,2008,18:1271.
- XU Fangjian, WAN Shiming, LI Anchun, et al. Relations between grain size and mineral composition of Chinese marginal sea[J]. Progress in natural science, 2008, 18:1271.
- [20] 徐方建,李安春,肖尚斌,等.末次冰期以来东海内陆架古环境演化[J].沉积学报,2009,27:118.
- XU Fangjian, LI Anchun, XIAO Shangbin, et al. Paleoenvironmental evolution in the inner shelf of the East China Sea since the Last deglaciation[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2009, 27:118.
- [21] Saito Y, Yang Z S, 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.