

文章编号: 1009-3850(2016)03-0037-10

长江三角洲 ZK01 孔末次盛冰期以来沉积物 粒度特征及环境演化

邓程文¹, 张霞¹, 林春明¹, 徐振宇², 于进¹

(1. 内生金属矿床成矿机制研究国家重点实验室, 南京大学地球科学与工程学院, 江苏 南京 210046; 2. 中国地质调查局南京地质调查中心, 江苏 南京 210016)

摘要: 根据长江三角洲 ZK01 孔的粒度资料, 从粒度参数、斜体图、概率累积曲线和频率分布曲线等对末次盛冰期以来的沉积物粒度特征进行了详细分析, 并结合沉积物的岩性、沉积构造和有孔虫的分布特点, 探讨了该区末次盛冰期以来的沉积环境演化。分析表明 ZK01 孔末次盛冰期以来, 沉积物自下而上可分为 5 段: 河床沉积物以砂和砾质砂为主, 粒度概率累积曲线为以跳跃总体为主的两段式; 河漫滩相为砂质和黏土互层, 概率累积曲线呈以悬浮总体为主的具过渡的两段式, 频率分布曲线为双峰或多峰式; 河口湾沉积物的粒度参数变化显著, 在 *C-M* 图上表现为粗细分异明显的两类, 对应两种两段式累积曲线, 频率分布曲线亦有单峰和双峰式两类; 浅海相主要为淤泥质黏土, 粒度参数较稳定, 概率累积曲线为一段式, 几乎均为悬浮总体; 三角洲沉积物以细砂和粉砂为主, 概率累积曲线为以跳跃总体为主的具过渡的两段式。研究区该时期依次经历了河床、河漫滩、河口湾、浅海和三角洲等 5 种沉积环境。

关键词: 长江三角洲; 末次盛冰期; 粒度特征; 环境演化

中图分类号: P534.63

文献标识码: A

前人对长江三角洲的研究已历时一百多年, 目前已有大量的钻孔资料, 在地层学^[1-2]、古生物学^[3-4]、沉积学^[5-6]等方面也取得了丰富成果。但在长江三角洲沉积物粒度研究方面, 早期的研究程度尚且有限。近年来对上海浦东、崇明岛、如东等地区的沉积物粒度特征与沉积环境及演化关系有一些比较系统、深入的研究^[7-9]。

粒度作为沉积物最基本和最主要的结构特征, 决定了沉积物的类型和性质, 可以衡量沉积介质能量的大小, 判别沉积时水动力条件和自然地理环境。因此, 分析沉积物的粒度特征对认识沉积时的水动力条件、识别沉积物的搬运方式、判别最原始的沉积环境具有重要的参考价值。近年来, 作为沉

积物粒度测试的重要方法, 依托计算机技术的激光粒度分析法因其测试结果快速精准、重现性高的特点^[10], 可以通过粒度手段解译出大量高分辨率的古环境信息, 使得粒度分析在恢复沉积环境^[11-12]、指示古气候特征和古水流方向^[13-14]、反映沉积水动力条件^[15-17]等研究方面的应用愈加广泛。本文以长江三角洲启东地区 ZK01 孔沉积物为研究对象, 根据该孔的沉积物粒度测试结果, 结合沉积结构、构造和有孔虫特征, 对研究区末次盛冰期以来的沉积环境进行详细分析。该研究在一定程度上丰富了研究区的基础地质工作, 为其它地区粒度特征和沉积环境研究提供参考资料。

收稿日期: 2015-07-26; 改回日期: 2015-10-07

作者简介: 邓程文(1991-), 男, 硕士研究生, 主要从事沉积学研究。E-mail: xiaoyu2391@126.com

通讯作者: 林春明(1964-), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事沉积学和石油地质学教学与研究。

E-mail: cmlin@nju.edu.cn

资助项目: 国家自然科学基金(41402092、41572112)、江苏省自然科学基金项目(BK20140604)联合资助

1 研究区概况

长江三角洲地区为广阔的冲积平原,地形总趋势为西高东低,原始坡降约万分之一^[18]。该区处于构造沉降带,其西部为山地丘陵。新构造运动表现为局部上升,沿海平原区表现为缓慢沉降,年沉降率以1~2 mm居多,两者的过渡带大致在镇江、扬州一带。长江三角洲可分为主体和南、北两翼(图1),主体区域的南界大致在镇江、江阴、福山及沿长江南岸一线,北界大致沿扬州、泰州、曲塘、吕四一线。主体区域相当于末次盛冰期以来形成的长江下切河谷发育地带,其下切河谷层序以不同的沉积相组合被较完整地保存了下来。此区曾为长江口摆动的地带,现存多期河口坝,有的在地形上可以显示出来,黄桥高亢的沙地尤为突出^[19-20]。

启东地区位于121°25′~121°55′E,31°41′~31°17′N,属长江三角洲主体区域^[18](图1),南濒长江入海口北支,东、北濒临黄海,西与海门市毗邻。地处东南季风的的活动带,气候温和湿润,四季分明,为典型的亚热带季风气候。区内地势沿海低平,地形略有起伏,地面高程在2.00~3.14 m之间,大部分为第四系地层所覆盖。

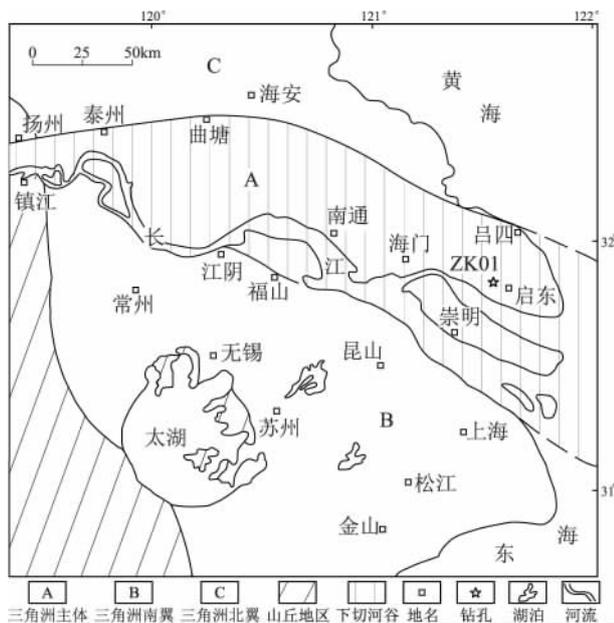


图1 长江三角洲分区图^[18]

Fig. 1 Division of the Changjiang delta (modified from Li Congxian et al., 1998)

2 样品采集与分析方法

ZK01孔位于长江口北岸启东市北新镇民新村

(121°33′24.08″E, 31°50′26.74″N, 图1), 孔口标高2.05 m, 孔深112.00 m, 顶部0.50 m为耕作层。因本次研究层位为末次盛冰期以来的沉积地层, 故仅对83.40 m以浅的岩心进行取样, 取样间隔为0.50~2.00 m不等, 共采集粒度样品70个。

沉积物粒度测试在南京大学海岸与海岛开发教育部重点实验室完成。测试仪器为英国Malvern公司生产的Mastersizer 2000型激光粒度仪, 该仪器粒径分析范围为0.02~2000 μm, 重复测量误差不超过1%。因ZK01孔沉积物的部分样品中生物壳体碎屑较为丰富, 有少量的钙质胶结物, 有机质含量较低, 故在上机测试前对待测样品进行如下流程的预处理: (1) 取3~5 g样品放入烧杯中, 为除去碳酸盐, 在烧杯中加入适量浓度为0.1 mol/L的盐酸, 浸泡至不产生气泡为止; (2) 去除上层反应废液, 给烧杯中加满蒸馏水, 静置24 h, 直至所有颗粒沉降下来、溶液清亮为止; (3) 去除上层清液, 加入0.5 mol/L的六偏磷酸钠溶液浸泡24 h, 使样品颗粒彼此分散。对同一样品进行多次测量, 挑选重合度最高的曲线以0.25 Φ的粒径间距输出0.02~2000 μm粒径区间的沉积物百分数含量, 依据矩算法数学公式^[21]计算出样品的平均粒径、分选系数、偏态、峰态等4个粒度参数。

3 结果分析

3.1 岩性与粒度特征

沉积物粒度组成和结构构造是判别其沉积环境的重要指标, 在作为追溯沉积物形成的力学性质、物质来源、输送介质的依据的同时, 也是沉积物命名的定量依据^[22]。根据Udden-Wentworth分级标准, 将粒度类型分为: 砾(<4Φ)、砂(4~8Φ)、粉砂(8~16Φ)和黏土(>16Φ)。本文对ZK01孔末次盛冰期以来沉积物的颜色、岩性、沉积结构构造等特征进行了详细观察(表1), 并从粒度参数、C-M图、概率累积曲线和频率分布曲线等方面对其粒度特征进行了分析, 将其自下而上划分为5段16层(图2)。

3.1.1 V段

位于孔深83.40~70.40 m, 相当于第1~3层。该段沉积物颗粒具下粗上细的正粒序特点。下部(83.40~75.60 m)沉积物主要为砾质粗砂、含砾粉砂质砂和砾石层, 夹少量细砂薄层。砾石粒径多在-1.00~-3.50Φ之间, 沉积物大小混杂, 分选性差; 上部(75.60~70.40 m)沉积物不含砾石, 以砂质沉

积物为主,砂组分含量约 17.60% ~ 93.37%,平均为 67.89%。粉砂和黏土平均含量分别为 25.66% 和 6.45% (图 2 和表 2)。平均粒径为 2.77 ~ 6.29 Φ ,但大多数分布在 3 ~ 4 Φ 之间,平均值为 3.79 Φ 。分选系数为 1.15 ~ 2.37,平均 1.83,说明沉积物分选性较好。偏态变化较大,多为正偏,主要在 1.50 ~ 2.50 之间,平均值为 1.54,表明沉积物粒度分布的尾端组分以粗组分为主。峰态值为 2.14 ~ 3.17,平均可达 2.71,说明颗粒粒级较集中。上部砂质沉积物的粒度概率累积曲线主要有 2 种类型:(1)以跳跃总体为主的两段式(图 3A),跳跃总体含量一般在 90% 以上,最少为 70%,对应直线段倾角约为 65° ~ 75°,分选较好。悬浮总体很少,包

含多个粒度次总体组成,直线段倾角约 25° ~ 30°。跳跃总体的细截点在 4 Φ 左右,相应的频率分布曲线主要为单峰式(图 3B),主峰众数值分布在 3 Φ 左右;(2)悬浮总体居多的两段式,悬浮总体含量约 40% ~ 70%,一般由多个悬浮次总体组成,对应直线段倾角约 25° ~ 30°,分选性较差。跳跃总体含量为 30% ~ 60%,有时包含两个跳跃次总体,直线段倾角为 50° ~ 70°,跳跃和悬浮总体的截点在 1 ~ 2 Φ 之间。频率分布曲线具双峰特征,主峰众数值为 2 ~ 3 Φ ,次峰众数值约为 6 ~ 7 Φ 。整体上,本段沉积物粒度较大,主要为细砂和砾石,以跳跃搬运为主,分选性变化较大,反映出沉积期的水动力条件较强,搬运介质扰动强度较大。

表 1 南通市启东地区 ZK01 孔末次盛冰期以来沉积物特征描述

Table 1 Description of the sediments characteristics indicated by the ZK01 borehole samples from the Changjiang delta since the latest glacial maximum

层号	深度(m)	沉积物特征	段号	
16	0.00 ~ 0.50	棕黄色耕作土,见少量植物根系	I	
15	0.50 ~ 1.75	棕黄色含粉砂黏土,块状构造,顶部见黄褐色铁锰浸染斑点		
14	1.75 ~ 8.20	青灰色粉砂质细砂偶夹灰黄色黏土薄层,局部层段为青灰色粉砂质细砂与灰黄色黏土薄互层,发育平行层理,见贝壳碎片		
13	8.20 ~ 10.00	上部 1.30m 为青灰色粉砂质细砂与褐色黏土不等厚互层;下部 0.50m 为黄灰色粉砂质细砂与青灰色黏土薄互层		
12	10.00 ~ 12.00	青灰色、灰黄色粉砂质细砂,偶夹粉砂质黏土,见平行层理		
11	12.00 ~ 16.00	黄灰色粉砂质细砂夹青灰色黏土层,局部为黄灰色粉砂质细砂与灰黄色黏土层薄互层,平行层理、交错层理发育		
10	16.00 ~ 19.40	青灰色粉砂质细砂与灰黄色黏土层薄互层,局部夹泥质团块,发育平行层理、千层饼构造,见白云母和破碎贝壳,与下伏地层呈渐变接触		
9	19.40 ~ 48.00	深灰色淤泥质黏土,夹细砂、粉砂薄层,富含有机质,具轻微臭味,水平层理、块状层理、透镜状层理发育,见贝壳碎片、生物扰动和虫孔构造		II
8	48.00 ~ 52.00	灰色淤泥质黏土与细砂互层,局部见粉砂质细砂薄层,块状层理、千层饼构造发育		
7	52.00 ~ 58.00	块状深灰色淤泥质黏土,夹细砂、粉砂薄层和团块,与下伏地层界线明显		
6	58.00 ~ 61.65	上部 0.80m 为青灰色粉砂质细砂,夹黏土质条带,底部见冲刷面;下部 2.85m 为灰色块状黏土与砂质粉砂不等厚互层,发育水平层理、平行层理和千层饼构造	III	
5	61.65 ~ 68.10	灰色块状黏土,夹灰白色薄层细砂、粉砂条带及团块,局部层段夹中层灰色砂质粉砂,水平层理发育,粉砂层中偶见极破碎贝壳		
4	68.10 ~ 70.40	灰色黏土与中层灰色、青灰色粉砂质砂、粉砂不等厚互层。68.90 ~ 68.60m 为杂色砾质粗砂,见少量螺和牡蛎壳体,砾石含量约占 5 ~ 10%,粒径约 2 ~ 5mm,次圆状。水平层理发育,与下伏地层呈突变接触	IV	
3	70.40 ~ 73.00	上部 1.60m 为灰色、青灰色中层粉砂质砂,其中砂主要由细砂和中砂组成,块状层理发育;下部 1.00m 为灰黄色粉砂质细砂与灰色黏土薄互层	V	
2	73.00 ~ 75.60	上部 0.45m 为灰色粉砂质细砂;下部 2.15m 为灰色粉砂质砂,局部可见较完整的螺壳体,底部有约 10cm 厚的炭屑薄层		
1	75.60 ~ 83.40	灰、灰黄色砾质或含砾粗砂,砾石粒径 2 ~ 15mm 不等,次圆状-次棱角状,砾石含量和粒径大小向下递增,局部夹棕黄色黏土和砾石层,底部见冲刷面		

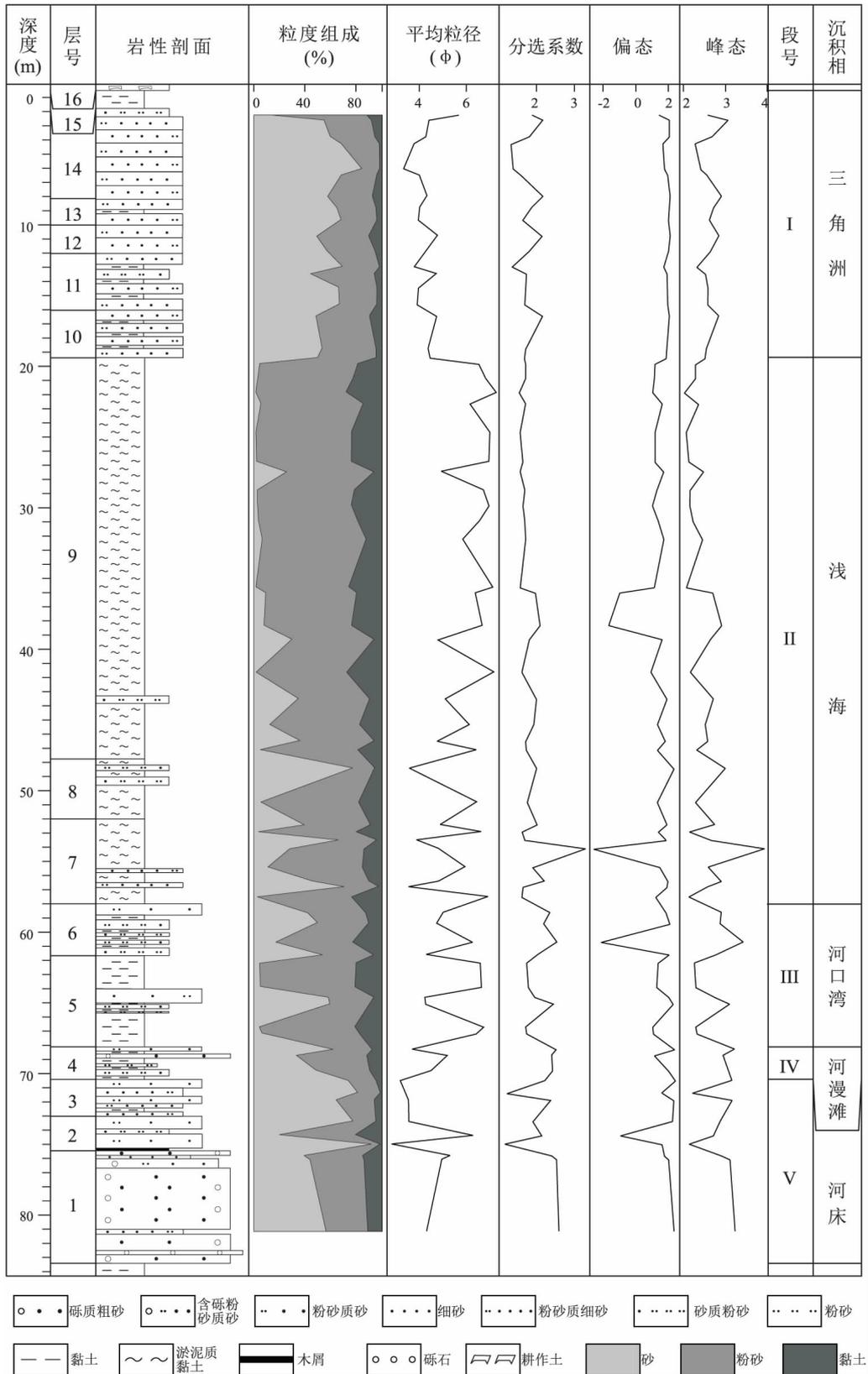


图2 长江三角洲 ZK01 孔末次盛冰期以来沉积物综合柱状图

Fig. 2 Generalized column of the sedimentary strata through the ZK01 borehole in the Changjiang delta since the latest glacial maximum

表2 长江三角洲 ZK01 孔末次盛冰期以来沉积物粒度参数

Table 2 Grain size parameters for the ZK01 borehole samples from the Changjiang delta since the latest glacial maximum

段号	深度(m)	平均含量(%)			平均粒径(Φ)	分选系数	偏态	峰态
		砂	粉砂	黏土				
I	0.50 ~ 19.40	58.06	36.31	5.63	3.3 ~ 5.61 / 4.25(18)	1.33 ~ 2.17 / 1.77	1.46 ~ 2.12 / 1.92	2.29 ~ 3.05 / 2.62
II	19.40 ~ 58.00	18.24	65.36	16.4	3.51 ~ 7.23 / 5.91(30)	1.54 ~ 3.31 / 1.82	-2.62 ~ 2.37 / 1.16	2.02 ~ 3.95 / 2.47
III	58.00 ~ 68.10	29.98	55.22	14.8	4.23 ~ 6.73 / 5.51(10)	1.72 ~ 2.55 / 2.05	-2.18 ~ 2.31 / 1.29	2.25 ~ 3.43 / 2.7
IV	68.10 ~ 70.04	47.79	42.6	9.61	3.64 ~ 5.17 / 4.43(3)	2.4 ~ 2.52 / 2.45	1.13 ~ 2.41 / 1.85	2.95 ~ 3.24 / 3.08
V	70.04 ~ 75.60	67.89	25.66	6.45	2.77 ~ 6.29 / 3.79(6)	1.15 ~ 2.37 / 1.83	-0.99 ~ 2.44 / 1.54	2.14 ~ 3.17 / 2.71

注:3.3 ~ 5.61 / 4.25(18) 表示最小值 ~ 最大值 / 平均值(样品数)

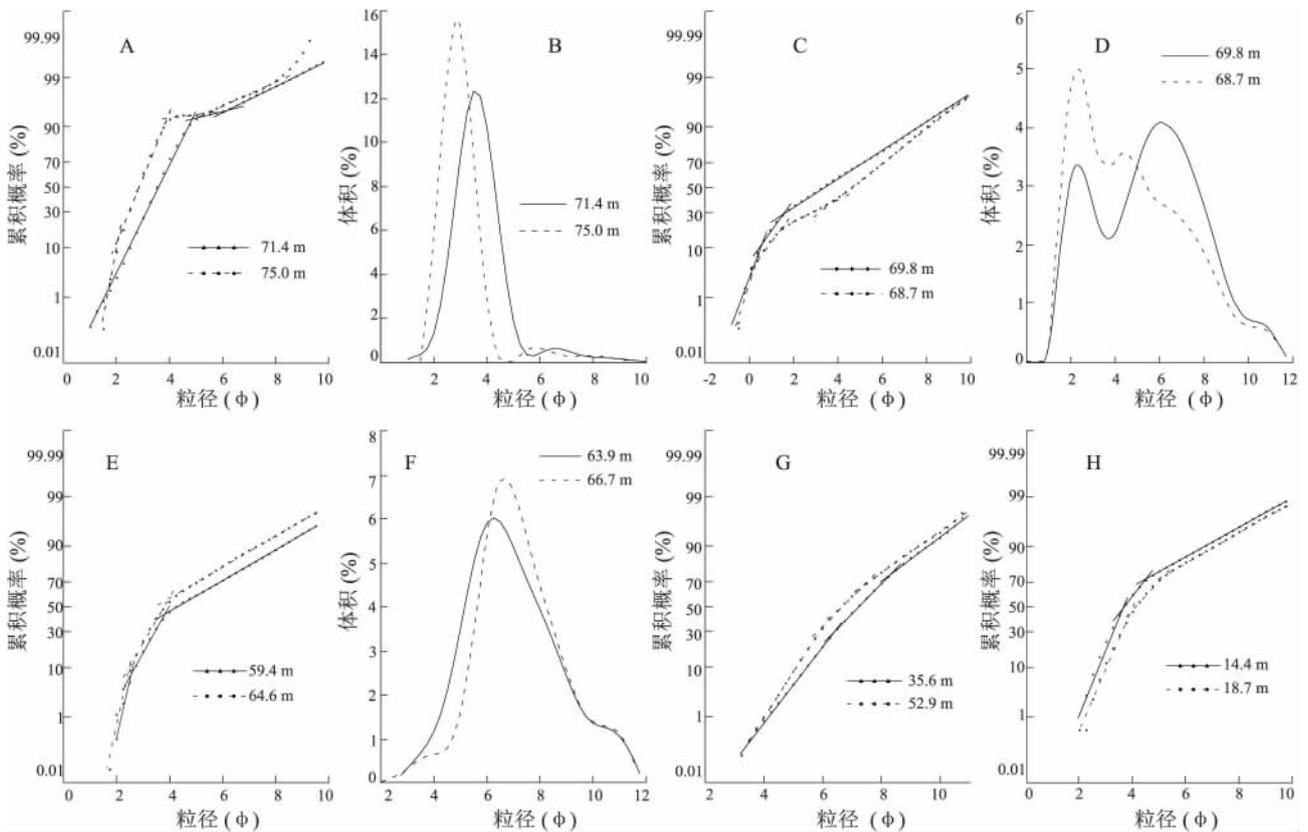


图3 长江三角洲 ZK01 孔沉积物概率累积曲线与频率分布曲线

Fig. 3 Grain size probability accumulation curves and frequency distribution curves for the ZK01 borehole samples from the Changjiang delta since the latest glacial maximum

3.1.2 IV段

位于孔深 70.40 ~ 68.10 m, 相当于第 4 层。仅 68.90 ~ 68.60 m 为砾质粗砂, 砾石含量约 10%, 粒径约 -1.00 ~ -2.32 Φ , 其余为砂质沉积。砂质沉积物主要为砂和粉砂组分, 其中, 砂含量在 32.60% ~ 62.49% 之间, 平均值为 47.79%; 粉砂含量在

30.30% ~ 55.36% 之间, 平均为 42.6%; 黏土平均含量为 9.61%。粒径分布在 3.64 ~ 5.17 Φ 之间, 平均值为 4.47 Φ (图 2 和表 2)。分选系数为 2.4 ~ 2.52, 平均 2.45, 值较大且波动较小。偏态为 1.13 ~ 2.41, 均为正偏, 平均值为 1.85。峰态在 2.95 ~ 3.24 之间, 平均值为 3.08。概率累积曲线为具过渡

段的两段式(图3C),以悬浮总体为主,含量为50%~80%,由多个粒度次总体组成,直线段倾角在25°~35°之间,分选较差。跳跃总体含量约为10%~30%,直线段倾角70°左右,过渡段与跳跃总体的截点在0~1 Φ 之间,与悬浮总体的截点处于1~2 Φ 之间。粒度频率呈显著的不对称双峰或多峰式分布,主峰众数值为2~3 Φ ,次峰众数值大致为4~6 Φ 。相比于V段,本段沉积物砂含量减少,粉砂和黏土含量增加,颗粒平均粒径变小,主要为中细砂。以悬浮搬运为主,分选性变差,说明本时期水动力条件有所减弱,搬运介质的扰动强度相对较小,沉积环境相对稳定。

3.1.3 III段

位于孔深68.10~58.00 m,相当于第5~6层。沉积物主要组分为粉砂,含量在31.51%~76.55%之间,平均值为55.22%。砂和黏土平均含量分别为29.98%和14.8%。粒径分布在4.23~6.73 Φ 之间,平均5.51 Φ (图2和表2)。分选系数为1.72~2.55,平均值为2.05,分选性变化较多。偏态在-2.18~2.31之间,平均值为1.29,正偏态居多,表明沉积物主要组分出现粗、细两类。峰态为2.25~3.43,平均2.70。在C-M图上,该段沉积物主要分布在水动力条件较弱的VI、VII区和水动力更弱的VII区(图4)。概率累积曲线可分为2种类型:(1)以跳跃总体为主的两段式(图3E),跳跃总体含量约50%~60%,由2个跳跃次总体组成,直线段倾角为75°~80°,分选性较好。悬浮总体含量为40%~50%,直线段倾角35°~45°,两个粒度总体的截点在2~4 Φ 之间。粒度频率分布曲线一般为双峰式,有时可呈单峰式,主峰众数值为3 Φ 左右,次峰众数值约6~7 Φ ;(2)以悬浮总体为主的两段式,悬浮总体含量一般大于95%,由多个粒度次总体组成,粒度主要分布在4~10 Φ 之间,直线段倾角在55°~65°之间,分选性差,跳跃总体含量极低。频率分布曲线呈单峰式(图3F),主峰众数值在6~7 Φ 之间。本段沉积物主要为粉砂,次为细砂,与V、IV段相比,沉积物粒度更小,偏态波动更大。C-M图显示出粒度粗细分异明显的两类沉积物,主要搬运方式有悬浮和跳跃两种,总体分选较差,表明沉积期水动力条件整体相对较弱。粗细颗粒组分交替沉积,这可能是沉积物在规律性增强和减弱的水动力条件影响下搬运和分选所致^[23]。

3.1.4 II段

位于孔深58.00~19.40 m,相当于第7~9层。

沉积物以粉砂为主,该组分含量在17.29%~80.43%之间,平均为65.36%,砂和黏土平均含量分别为18.24%和16.4%。平均粒径分布在3.51~7.23 Φ 之间,平均值为5.91 Φ (图2和表2)。分选系数为1.54~3.31,平均值为1.82。偏态为-2.62~2.37,以正偏态为主,主要在1~2之间,平均值为1.16。峰态为2.02~3.95,平均2.47。C-M图显示沉积物主要分布在水动力条件很弱的VIII区(图4),部分处于水动力强度极低的静水悬浮沉积区域。概率累积曲线为一段式(图3G),呈略向上拱起的弧形,几乎全为悬浮总体,由3~4个粒度次总体组成,粒径主要分布在5~10 Φ 之间,直线段倾角为55°~65°。粒度频率呈单峰式分布,主峰众数值一般在6~8 Φ 之间。相比于其他层段,该段整体粒度明显减小,主要为粉砂和黏土,偏态、峰态均较低,分选性差。C-M图显示出悬浮沉积特征,这表明本段沉积物沉积期的水动力条件弱且较为稳定,可能是该时期的水深增加所致。

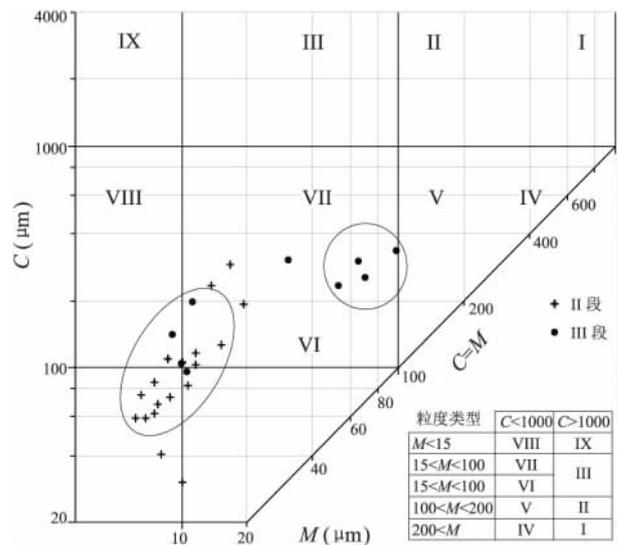


图4 长江三角洲ZK01孔II和III段沉积物C-M图

Fig. 4 C-M patterns for the sediments from II and III segments of the ZK01 borehole in the Changjiang delta

3.1.5 I段

位于孔深19.40~0.50 m,相当于第10~16层。沉积物以砂为主,粉砂次之,砂组分含量在15.18%~84.53%之间,平均值为58.06%。粉砂含量在13.61%~71.60%之间,平均值为36.31%。黏土平均含量为5.63%。沉积物平均粒径分布在3.30~5.61 Φ 之间,平均4.25 Φ (图2和表2)。分选系数为1.33~2.17,平均值为1.77,较其他段分选性相对较好。偏态变化较小,集中分布在1.46~

2.12 之间,平均 1.92 为正偏,表明沉积物粒度分布的尾端组分以粗颗粒组分为主。峰态为 2.29 ~ 3.05,平均值为 2.62。概率累积曲线为具过渡段的两段式(图 3H),以跳跃总体为主,含量约 50% ~ 70%,最高可达 90%,对应直线段倾角为 65° ~ 75°。分选性较好,悬浮总体含量约 30%,直线段倾角约 20° ~ 35°,过渡段与跳跃总体的截点在 4 Φ 左右,与悬浮总体的截点在 5 Φ 之间。频率分布曲线一般为单峰式,有时可呈双峰,主峰众数值一般在 4 Φ 左右。本段沉积物颗粒级较 II 段变粗,分选性变好,主要为细砂和粗粉砂,以跳跃搬运为主,表明该沉积期的水动力条件较强。

3.2 沉积相分析

全球性的海平面变化控制了地层沉积的发展,末次盛冰期以来东海海平面经历了末次盛冰期低海平面—冰后期早期快速海侵—冰后期中期晚期高海平面 3 次大的变化,整体上为一个海平面逐渐升高并趋于稳定的过程^[24]。在 ZK01 孔沉积物岩性特征、沉积构造和粒度特征分析的基础上,结合有孔虫分布特征,可以判别出河床、河漫滩、河口湾、浅海和三角洲相等 5 种沉积相(图 2)。

3.2.1 V 段(83.40 ~ 70.40 m)

与下伏地层以冲刷面接触,沉积物主要为砾质或含砾粗砂、粉砂质砂、粉砂质细砂(图 5A),粒度总体上表现出下粗上细的正粒序。砾石成分复杂,主要为石英岩、石英砂岩等,磨圆较差,呈次圆—次棱角状,类似于短源搬运的河床相砾石。但与河床滞留沉积形成的砾石不同的是,砾石层厚度较大,自下而上砾石的粒径逐渐减小。砂质沉积物的分选系数反映分选性较好,概率累积曲线显示沉积物主要为跳跃搬运,频率分布曲线多为双峰分布,主峰众数值代表的粒径大,这表明本段沉积物沉积时的水动力强度较大。此外,该段发育块状层理,缺乏潮汐影响所形成的如砂泥互层等典型沉积构造,表明当时的沉积动力环境已经超出了潮流作用的范围^[25-26]。沉积物中未见有孔虫壳体^[20],偶见炭屑薄层(图 5F)和贝壳壳体。根据沉积物粒度向上变细、强水动力条件和有无有孔虫壳体等特征,推测该段地层沉积物形成环境基本未受海洋环境影响,可能是冰后期因海平面迅速上升,之前形成的下切河谷的河口地区发生回水,致使河流的纵比降减小,流速降低,砾、砂、粉砂沉积物溯源堆积依次上移、叠置,形成粒度向上变细的河床相沉积物^[19,27]。

3.2.2 IV 段(70.40 ~ 68.10 m)

沉积物主要为灰色黏土与灰、青灰色粉砂质砂

和粉砂不等厚互层(图 5B),局部为砾质粗砂,其内见少量螺(图 5G)和牡蛎壳体,广泛发育水平层理。与 V 段沉积物相比,粉砂和黏土含量有所增加,分选系数值较大但分布集中,反映出沉积水动力较 V 段变小且稳定。沉积物以悬浮搬运为主,粒度频率显示双峰或多峰式分布特点。偶见极少量底栖有孔虫化石,丰度为 8 枚/50 g 干样,其种数和丰度极低,几乎可以忽略不计,种属主要为 *Ammonia beccarii* vars. 和 *Florilus decorus*^[20]。综上所述,认为该段地层沉积时水动力较弱,推测为随着海平面上升,海洋因素的影响逐渐向陆延伸,河水漫出河床,在河谷中形成的河漫滩相沉积,并受涨潮流的影响,出现少量海相微体化石^[19]。

3.2.3 III 段(68.10 ~ 58.00 m)

本段主要为灰色块状黏土和粉砂、砂质层沉积物(图 5C),水平层理和平行层理发育,底部见冲刷面。块状黏土具轻微臭味,富含有机质,常夹砂质薄层,见极破碎白云母和贝壳碎片。平均粒径、偏态等粒度参数出现明显反复波动。概率累积曲线有以跳跃总体为主的两段式和悬浮总体居多的两段式两种,其中以跳跃总体为主的两段式的跳跃总体由两个粒度次总体组成,这可能与波浪的冲流和回流作用有关,说明尽管水动力减弱但沉积环境仍较动荡,水动力条件有周期性的强弱变化特征。该段沉积物中有孔虫丰富,底栖有孔虫主要为瓷质壳和玻璃壳,以 *Ammonia beccarii* vars.、*Florilus decorus*、*Quinqueloculina* spp. 和 *Elphidium magellanicum* 等广盐性种属为优势种^[20]。浮游有孔虫的丰度和含量也比较大,有孔虫群落特征显示此阶段沉积环境受海水影响明显。据上述分析,推测此段受潮流作用的影响较强^[26],系因海平面继续上升,海水漫出古河谷,由河漫滩沉积转化所形成的河口湾相沉积^[19]。

3.2.4 II 段(58.00 ~ 19.40 m)

沉积物以深灰色淤泥质黏土为主,夹灰色细砂、粉砂条带和团块(图 5D)。本段下部为淤泥质黏土与细砂、粉砂互层形成千层饼构造(图 5H),淤泥质黏土富含有机质,有轻微臭味;上部为块状淤泥质黏土夹少量细砂、粉砂薄层和团块,粉砂薄层单层厚度在 1 ~ 20 mm 之间,局部可达 10 ~ 30 mm。水平层理、块状层理、透镜状层理普遍发育,砂质团块中偶见平行层理(图 5I),贝壳碎片、生物扰动和虫孔构造常见。概率累积曲线为一段式,以黏土为主的悬浮总体含量最高,粒度频率分布范围宽广。

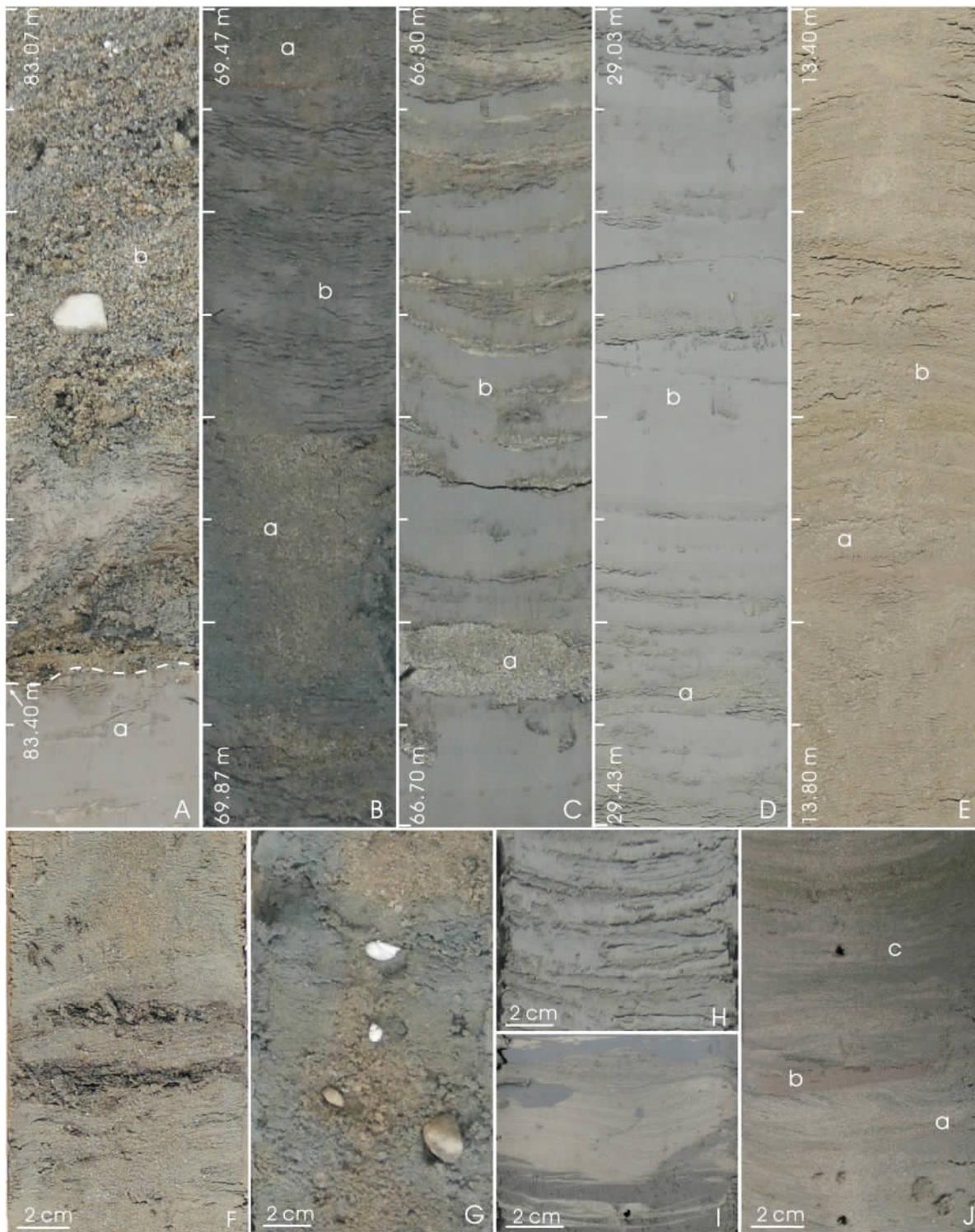


图5 长江三角洲 ZK01 孔末次盛冰期以来沉积相典型特征

A. 河流冲刷面(83.40 m): a. 末次盛冰期河漫滩相淡褐色黏土; b. 末次盛冰期以后河床相灰黄色砾质粗砂; B. 河漫滩相: a. 青灰色粉砂质砂; b. 灰色黏土; C. 河口湾相: a. 灰白色细砂; b. 灰色黏土; D. 浅海相: a. 灰色粉砂; b. 深灰色淤泥质黏土; E. 三角洲相: a. 青灰色粉砂质细砂; b. 灰黄色黏土薄层; F. 河床相炭屑层 75.40 m; G. 河漫滩相沉积物中的螺贝壳和砾石 68.70 m; H. 浅海相发育千层饼构造 45.10 m; I. 浅海相细砂团块中见平行层理 38.40 m; J. 三角洲相粉砂质细砂夹泥质条带 12.60m: a. 交错层理; b. 泥质条带; c. 平行层理

Fig. 5 Typical characteristics of individual sedimentary facies indicated by the ZK01 borehole samples from the Changjiang delta since the latest glacial maximum

本段沉积物中底栖有孔虫丰富,以 *Ammonia beccarii* vars.、*Elphidium magellanicum*、*Cribronion vitreum* Wang、*Florilus decorus*、*Quinqueloculina* spp. 和 *Protelphidium tuberculatum* (d'Orbigny) 等广盐性种属为主^[20],与现代东海、黄海、杭州湾和渤海湾地区浅海相有孔虫群落相似^[26,28-29],故可知该段沉积期受海水影响程度较强,海水相对较深、较暖。根据岩性、粒度、沉积构造和有孔虫特征,推测此段地层是在高海平面背景下,水深进一步增加,在较稳定环境中形成的以淤泥质黏土为主的浅海相沉积。

3.2.5 I段(19.40~0.50m)

本段沉积物主要为灰黄、青灰色粉砂质细砂,常与黏土不等厚互层或夹黏土薄层(图5E),岩性总体上表现为下细上粗的反粒序。沉积构造多样,发育平行层理、块状层理、交错层理(图5J)、包卷层理等,上部见铁锰浸染现象,局部见贝壳和白云母碎片。平均粒径、分选系数和偏态等粒度参数较稳定,概率累积曲线为以跳跃总体为主的具过渡的两段式。在 ZK01 孔 5 段沉积层中,本段有孔虫丰度最高,仍主要为广盐性底栖种,丰度为 21~42688 枚/50g 干样,但种数和复合分异度降低,优势种以 *Ammonia beccarii* vars.、*Elphidium naraensis*、*Florilus decorus*、*Protelphidium tuberculatum* (d'Orbigny) 和 *Elphidium magellanicum* 为主^[20]。根据以上分析,认为在此阶段水动力条件较 II 段加强,推测其为海平面上升速率减小、河口沉积速率超过海平面上升速率的条件下形成的三角洲相沉积^[19]。

4 结论

(1) ZK01 孔末次盛冰期以来的地层自下而上分别为河床、河漫滩、河口湾、浅海和三角洲相。河床沉积物由砾石、砂和粉砂组成,概率累积曲线呈以跳跃总体为主的两段式,频率分布曲线为双峰或单峰式,沉积期水动力强度较大;河漫滩相以中细砂和黏土为主,分选性较差,主要为悬浮总体,粒度频率显示不对称双峰或多峰式分布特征,水动力较河床相小且稳定;河口湾相主要为黏土和粉砂,粒度参数出现明显的波动变化,粗细组分分别集中分布在 C-M 图上的两个区域,可对应于分别以跳跃和悬浮总体为主的两类两段式概率累积曲线,相应的频率分布曲线为双峰式和单峰式,水动力条件减弱但较动荡;浅海沉积物主要为淤泥质黏土,在 C-M 图上分布于弱水动力区,概率累积曲线呈一段式,分选性很差,几乎全为悬浮总体,粒度频率分布呈

单峰式;三角洲沉积物以细砂和粉砂为主,概率累积曲线为具过渡段的两段式,分选相对较好,跳跃总体为主,频率分布曲线主要为单峰式,水动力条件较强。

(2) 末次盛冰期时,气候寒冷,海平面下降,研究区河流下蚀切割老地层形成下切河谷。末次盛冰期以后气候回暖,海平面上升使得侵蚀基准面被抬高,海水沿下切河谷内侵,河流携带的砂砾沉积物溯源堆积,依次上移、叠置,致使河谷被充填形成河床相沉积序列。海平面继续上升,海洋因素的影响逐渐向陆延伸,形成可受涨潮流影响的河漫滩相沉积序列。随着海侵发展,河漫滩相沉积向上转化为河口湾相沉积序列。海侵达到鼎盛时,本区水深达到最大,形成浅海相沉积序列。及至海平面趋于稳定,河口沉积速率超过海平面上升速率,沉积物向海方向推进,形成三角洲相沉积序列。

致谢:在此衷心地感谢袁静、范代读老师和刘世昊、王涛工程师等人对本研究工作给予的热忱指导,感谢冯振兴同学在粒度测试实验中给予的帮助。

参考文献:

- [1] 李从先,张桂甲. 晚第四纪长江三角洲高分辨率层序地层学的初步研究 [J]. 海洋地质与第四纪地质, 1996, 16(3): 13-24.
- [2] 张家强,张桂甲. 长江三角洲晚第四纪地层层序特征 [J]. 同济大学学报:自然科学版, 1998, (4): 438-442.
- [3] 刘金陵. 根据孢粉资料推论长江三角洲地区 1200 年以来的环境变迁 [J]. 古生物学报, 1996, (2): 136-154.
- [4] 覃军干,吴国璋,郑洪波,等. 长江三角洲及邻近海域第一硬质黏土层的生物化石标志 [J]. 海洋地质与第四纪地质, 2004, 24(3): 11-18.
- [5] 李从先,郭蓄民,许世远,等. 全新世长江三角洲地区砂体的特征和分布 [J]. 海洋学报, 1979, 1(2): 252-268.
- [6] 王国庆,石学法,李从先. 长江三角洲晚第四纪沉积地质学研究述评 [J]. 海洋地质与第四纪地质, 2006, 26(6): 131-137.
- [7] 魏子新. 长江三角洲东部第四纪沉积环境演化:新构造运动、古气候与海平面变化的耦合作用 [D]. 上海:华东师范大学, 2003.
- [8] 战庆,王张华,王昕,等. 长江口区晚新生代沉积物粒度特征和沉积地貌环境演变 [J]. 沉积学报, 2009, 27(4): 674-683.
- [9] 王涛,沈吉. 长江三角洲北翼如东县兵房钻孔粒度特征与沉积环境——缅怀恩师施雅风院士 [J]. 第四纪研究, 2012, 32(1): 132-141.
- [10] 冉敬,杜谷,潘忠习. 沉积物粒度分析方法的比较 [J]. 岩矿测试, 2011, 30(6): 669-676.
- [11] 操应长,金杰华,王艳忠,等. 东营凹陷北带古近系沙四段砂砾岩体沉积特征及沉积模式 [J]. 沉积与特提斯地质,

- 2014, 34(4):13-23.
- [12] 刘世昊, 丰爱平, 李培英, 等. 现代黄河三角洲地区晚更新世以来高分辨率沉积粒度特征及动力沉积环境演化 [J]. 第四纪研究, 2015, 35(2):291-306.
- [13] 伍皓, 崔晓庄, 熊国庆, 等. 云南丽江古近纪风成沉积的发现及其气候意义 [J]. 沉积与特提斯地质, 2011, 31(1):13-18.
- [14] 高抒. 沉积物粒径趋势分析:原理与应用条件 [J]. 沉积学报, 2009, 27(5):26-836.
- [15] 袁静, 杨学君, 路智勇, 等. 东营凹陷盐 22 块沙四上亚段砂砾岩粒度概率累积曲线特征 [J]. 沉积学报, 2011, 29(5):815-824.
- [16] 范代读, 蔡国富, 尚帅, 等. 钱塘江河口北边滩涌潮沉积作用与特征 [J]. 科学通报, 2012, 57(13):1157-1167.
- [17] 李健, 张霞, 刘招君. 孙吴-嘉荫盆地白垩系淘漠河组水下重力流沉积特征 [J]. 沉积与特提斯地质, 2013, 33(4):22-32.
- [18] 李从先, 汪品先. 长江晚第四纪河口地层学研究 [M]. 北京:科学出版社, 1998.
- [19] 李从先, 陈庆强, 范代读, 等. 末次盛冰期以来长江三角洲地区的沉积相和古地理 [J]. 古地理学报, 1999, 1(4):12-25.
- [20] 林春明, 张霞, 徐振宇, 等. 长江三角洲晚第四纪地层沉积特征与生物气成藏条件分析 [J]. 地球科学进展, 2015, 30(5):589-601.
- [21] BLOT J S, PYE K. Graidstat: a grain size distribution and statistics package for the analysis of unconsolidated sediments [J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2001, 26(11):1237-1248.
- [22] DOEGLAS D T. Grain-size indices, classifications and environment [J]. *Sedimentology*, 1968, 10(2):83-100.
- [23] 潘峰, 林春明, 李艳丽, 等. 钱塘江南岸 SE2 孔晚第四纪以来沉积物粒度特征及环境演化 [J]. 古地理学报, 2011, 13(2):236-244.
- [24] 耿秀山. 中国东部晚更新世以来的海水进退 [J]. 海洋学报, 1981, 3(1):114-130.
- [25] 李艳丽, 林春明, 张霞, 等. 钱塘江河口区晚第四纪古环境演化及其元素地球化学特征 [J]. 第四纪研究, 2011, 31(5):822-836.
- [26] 张霞, 林春明, 高抒, 等. 钱塘江下切河谷充填物沉积序列和分布模式 [J]. 古地理学报, 2013, 15(6):839-852.
- [27] 林春明, 黄志城, 朱嗣昭, 等. 杭州湾沿岸平原晚第四纪沉积特征和沉积过程 [J]. 地质学报, 1999, 73(2):120-130.
- [28] 汪品先, 闵秋宝, 卞云华, 等. 我国东部第四纪海侵地层的初步研究 [J]. 地质学报, 1981, 1(1):1-12.
- [29] LI CONGXIAN, CHEN QINGQIANG, ZHANG JIAQIANG, et al. Stratigraphy and paleoenvironmental changes in the Yangtze Delta during the Late Quaternary. [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2000, 18(4):453-469.

Grain size analysis and environmental evolution indicated by the ZK01 borehole samples in the Changjiang delta since the latest glacial maximum

DENG Cheng-wen¹, ZHANG Xia¹, LIN Chun-ming¹, XU Zhen-yu², YU Jin¹

(1. State Key Laboratory for Mineral Deposits Research, School of Earth Sciences and Engineering, Nanjing University, Nanjing 210046, Jiangsu, China; 2. Nanjing Center, China Geological Survey, Nanjing 210016, Jiangsu, China)

Abstract: The present paper gives a detailed description of grain size analysis on the basis of grain size parameters, *C-M* patterns, grain size probability accumulation curves and frequency distribution, and the environmental evolution according to lithology, sedimentary structures and foraminifera distribution in the Changjiang delta since the latest glacial maximum. The sediments herein can be divided into five segments from bottom to top. The riverbed deposits consist of sand and gravelly sand, and display the two-part grain size probability accumulation curves dominated by saltation populations. The floodplain deposits are made up of the interbeds of sand and clay, and display the two-part grain size probability accumulation curves represented by the suspension-dominated populations, and the bimodal or multimodal frequency distribution curves. The estuarine deposits display sharp changes of grain size parameters and *C-M* patterns, two-part grain size probability accumulation curves and unimodal or bimodal frequency distribution curves. The neritic deposits comprise muddy clay, and display one-part grain size probability accumulation curves represented by suspension populations. The delta deposits are significantly made up of fine sand and silt, and display the two-part grain size probability accumulation curves represented by saltation populations. The study area once underwent the evolution of river bed, floodplain, estuary, shallow sea and delta sedimentary environments during the latest glacial maximum.

Key words: Changjiang delta; latest glacial maximum; grain size; environmental evolution