



## 江苏南通近岸区晚第四纪沉积序列的沉积相特征与定年

刘健, 张欣, 丁璇, 仇建东, 王红, 安郁辉

### Sedimentary facies characteristics and dating of the late Quaternary sedimentary sequence in the nearshore coastal area of Nantong, Jiangsu Province, China

LIU Jian, ZHANG Xin, DING Xuan, QIU Jiandong, WANG Hong, and AN Yuhui

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16562/j.cnki.0256-1492.2023051501>

#### 您可能感兴趣的其他文章

##### Articles you may be interested in

#### 南黄海中部隆起晚新近纪—第四纪沉积序列的地层划分与沉积演化

Stratigraphic classification and sedimentary evolution of the late Neogene to Quaternary sequence on the Central Uplift of the South Yellow Sea

海洋地质与第四纪地质. 2021, 41(5): 25

#### 江苏中部海岸晚第四纪沉积物的粒度与磁化率特征及其古环境意义

Characteristics of grain size and magnetic susceptibility of the Late Quaternary sediments from core 07SR01 in the middle Jiangsu coast and their paleoenvironmental significances

海洋地质与第四纪地质. 2021, 41(5): 210

#### 西沙群岛宣德环礁晚第四纪灰砂岛沉积地层

The Late Quaternary Carbonate sand deposits at the Xuande Atoll

海洋地质与第四纪地质. 2018, 38(6): 37

#### 辽东湾晚第四纪层序地层

Sequence stratigraphy of the Late Quaternary in Liaodong Bay

海洋地质与第四纪地质. 2020, 40(2): 37

#### 长江口外扬子浅滩YZ05孔沉积序列及晚更新世以来的环境演化

Sedimentary facies and environmental evolution of the Yangtze shoal, eastern China Sea shelf since Late Pleistocene: Evidence from core YZ05

海洋地质与第四纪地质. 2020, 40(6): 22

#### 洞庭湖赤山凸起第四纪构造沉积演变特性

Quaternary tectono-sedimentary evolution of Chishan Uplift in the Dongting Lake

海洋地质与第四纪地质. 2020, 40(5): 160



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

刘健, 张欣, 丁璇, 等. 江苏南通近岸区晚第四纪沉积序列的沉积相特征与定年 [J]. 海洋地质与第四纪地质, 2023, 43(3): 35-48.  
LIU Jian, ZHANG Xin, DING Xuan, et al. Sedimentary facies characteristics and dating of the late Quaternary sedimentary sequence in the nearshore coastal area of Nantong, Jiangsu Province, China[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2023, 43(3): 35-48.

# 江苏南通近岸区晚第四纪沉积序列的沉积相特征与定年

刘健<sup>1,2</sup>, 张欣<sup>1</sup>, 丁璇<sup>3</sup>, 仇建东<sup>1</sup>, 王红<sup>1</sup>, 安郁辉<sup>4</sup>

1. 中国地质调查局青岛海洋地质研究所, 青岛 266237
2. 崂山实验室海洋地质过程与环境功能实验室, 青岛 266237
3. 中国地质大学(北京)海洋学院, 北京 100083
4. 中国海洋大学海洋地球科学学院, 青岛 266100

**摘要:**近三十多年来长江三角洲地区晚第四纪 3 期下切河谷的形成与演化得到了学术界的关注,但以往对晚第四纪早期和中期中下切河谷充填层序年龄的限制还很欠缺。为了探讨这些下切河谷及其沉积充填的形成时间以及下切河谷形成与全球海平面变化的关系,对江苏南通近岸区孔深 79 m 的全取芯钻孔 (JC-1205) 岩芯开展了综合测试 (沉积物粒度、底栖有孔虫、光释光 (OSL) 测年和 AMS <sup>14</sup>C 测年) 和沉积相分析。结果表明,该孔所揭示的晚第四纪沉积序列可划分为 4 个沉积单元 (从下至上为 DU 4—DU 1), 中—下部 3 个沉积单元 (DU 4—DU 2) 为 3 期直接接触的河流沉积, 上部 DU 1 为近岸海洋沉积 (从下至上包括潮道沉积、浅水潮下带—内陆架沉积和潮坪沉积)。晚第四纪海平面变化是控制钻孔位置附近区沉积序列形成的主要因素, 晚第四纪早期和中期的下切河谷及其充填沉积 (DU 4 和 DU 3) 分别形成于 MIS 6 和 MIS 4, 而与晚期下切谷相关的河间地的洪泛平原沉积 (DU 2) 形成于 MIS 2; MIS 4 时期下切谷的发育使得其下伏的 MIS 5 海洋沉积被侵蚀殆尽, 而 MIS 3 时期相对较高的地势导致了沉积间断的出现。DU 1 形成于 MIS 1 晚期, 其底部的潮道沉积在其发育过程中对其下伏沉积物 (可能形成于 MIS 2 晚期—MIS 1 中期) 的侵蚀造成了 DU 1 和 DU 2 之间超过 10 kyr 的沉积缺失。本文的研究成果为长江三角洲地区晚第四纪下切河谷的形成演化提供了重要的时间约束。

**关键词:**下切河谷; 沉积序列; 沉积相; 光释光测年; 晚第四纪; 江苏南通

中图分类号: P736.2 文献标识码: A DOI: 10.16562/j.cnki.0256-1492.2023051501

## Sedimentary facies characteristics and dating of the late Quaternary sedimentary sequence in the nearshore coastal area of Nantong, Jiangsu Province, China

LIU Jian<sup>1,2</sup>, ZHANG Xin<sup>1</sup>, DING Xuan<sup>3</sup>, QIU Jiandong<sup>1</sup>, WANG Hong<sup>1</sup>, AN Yuhui<sup>4</sup>

1. Qingdao Institute of Marine Geology, China Geological Survey, Qingdao 266237, China
2. Laboratory for Marine Geology, Laoshan Laboratory, Qingdao 266237, China
3. School of Marine Sciences, China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China
4. College of Marine Geoscience, Ocean University of China, Qingdao, 266100, China

**Abstract:** The formation and evolution of three-stage incised valleys in the Yangtze River delta during the late Quaternary have attracted much research attention. However, age constraints on the infilling sequence for the early and middle stages of incised valley formation are lacking. In this study, a 79-m-long sediment core (JC-1205) obtained from the nearshore coastal area in Nantong (Jiangsu Province) was analyzed, including measurements of down-core changes in grain size and benthic foraminiferal assemblages, optically stimulated luminescence and AMS <sup>14</sup>C dating, and sedimentary-facies characterization, to determine the ages of valley incision and infilling and the responses of these processes to global sea-level variation. The sedimentary succession in core JC-1205 can be divided into four depositional units (DU 4 to DU 1) from bottom to top. Units DU 4 to DU 2 in the lower to middle parts of the core are interpreted as fluvial deposits with distinct contacts between vertically

资助项目: 中国地质调查局项目 (DD20160147)

作者简介: 刘健 (1965—), 男, 博士, 研究员, 从事海洋地质与第四纪地质调查与研究, E-mail: liujian0550@vip.sina.com

通讯作者: 刘健 (1965—), 男, 博士, 研究员, 从事海洋地质与第四纪地质调查与研究, E-mail: liujian0550@vip.sina.com

张欣 (1990—), 男, 博士, 从事沉积物光释光测年和海洋地质研究, E-mail: qdxx1990@163.com

收稿日期: 2023-05-15; 改回日期: 2023-06-05. 周立君编辑

adjacent units. The uppermost unit DU 1 is interpreted as having been deposited in a nearshore shallow-marine environment and consists of tidal-channel, shallow-subtidal, and tidal-flat deposits from bottom to top. Late Quaternary sea-level variations are considered to have been a key control on the late Quaternary sequence at and around the core site. The early- and middle-stage valley incisions and corresponding infilling sequences (DU 4 and DU 3) were formed during the lower sea-level periods of MIS 6 and MIS 4, respectively, and the flood-plain deposit (DU 2) in the interfluvial area, which is genetically linked to the late-stage valley incision, was formed during MIS 2. Fluvial incision during MIS 4 is interpreted to have eroded the underlying marine sediments that were deposited during MIS 5, and the development of relatively high terrain during MIS 3 resulted in a hiatus between DU 2 and DU 3. There is an unconformity corresponding to a hiatus of >10 kyr between DU 2 and DU 1, which was deposited during late MIS 1. This hiatus is attributed to the occurrence of tidal-channel scour, as evidenced at the bottom of DU 1, which is interpreted to have eroded the underlying deposits that presumably formed from late MIS 2 to middle MIS 1. This study provides important temporal constraints on the formation and evolution of late Quaternary incised valleys in the Yangtze River delta.

**Key words:** incised valley; sedimentary sequence; sedimentary facies; OSL dating; Late Quaternary; Nantong, Jiangsu province

20世纪90年代以来,下切河谷(Incised valley)及其沉积充填层序的研究颇受关注<sup>[1-3]</sup>,这是由于其是油气资源的勘探目标、蕴含丰富的地层演化和古环境变化信息。晚第四纪海平面经历了大幅升降变化,在全球海岸带和陆架发育了多期规模较大的下切河谷,其充填地层保存相对完整,已经成为层序地层学、古气候-海平面变化研究的热点<sup>[4-7]</sup>。

近三十多年来长江三角洲地区晚第四纪下切河谷的形成与演化得到了学术界的重视<sup>[8-10]</sup>。晚第四纪以来长江三角洲地区的下切河谷可分为三期(早期、中期和晚期),其分布范围有所差别<sup>[11]</sup>(图1),推测其沉积充填层序的形成时间分别对应于125~60 ka(日历年龄)、60~25 ka和25 ka以来的时期<sup>[12]</sup>。然而,对于晚第四纪早期和中期下切谷充填层序年龄的研究尚不多见<sup>[13-14]</sup>。

2012年我们在实施江苏海岸带地质调查时在江苏南通近岸区施工了一个全取芯钻孔,该孔钻取了晚第四纪地层。本文基于该孔岩芯的综合测试分析,确定该地层的沉积相变化特征和年龄,并在此基础上探讨晚第四纪下切谷及其沉积充填序列的形成与海平面变化的关系。

## 1 研究区地质概况

长江三角洲是中全新世以来长江泥沙堆积形成的以镇江-扬州为顶点、杭州湾北岸为南界、大致以琼港辐射沙洲的陆上延续部分为北界的三角洲沉积体系<sup>[11,15]</sup>(图1),在地理上包括江苏省南部、上海市和浙江省杭嘉湖地区。该地区为地势平缓的广阔平原,海拔高度一般为3~5 m,总趋势为西高东低。三角洲可分为主体和南、北两翼<sup>[11]</sup>;主体部分大致与末次冰期(晚第四纪晚期)古河谷位置相当,以存在不同时期雁行排列的河口坝为特征,曾为长江口摆动的地带;两翼部分大致与末次冰期古

河间地分布区相当。

长江三角洲地处扬子陆块下扬子地块东段,自元古代以来区域经历了复杂的构造运动,形成了丰富多样的构造样式,其中燕山期火山活动较为强烈,是中国东部火山岩浆活动带的重要组成部分。新近纪以来,由于喜马拉雅运动的影响,中国东部盆地强烈沉降。研究表明,长江三角洲地区的松散沉积物之下是扬子板块元古宙变质岩系与古生代、中生代和新生代岩浆岩和沉积岩;基岩之上的松散沉积物总体上西薄东厚,主要为第四纪堆积物(厚度50~450 m),下部见新近纪沉积物(厚度20~100 m,局部缺失)<sup>[16-17]</sup>。自上新世以来长江三角洲表现为“间歇式”的沉降,沉降速率主要为1~3 mm/a<sup>[17]</sup>。新近纪以来该区经历了山间盆地冲积环境(新近纪—早更新世)、辫状河和曲流河环境(早更新世晚期—中更新世)、滨海-浅海-三角洲环境(晚更新世以来)<sup>[18]</sup>。

晚第四纪全球海平面在冰期-间冰期气候轮回下经历了大幅波动,在长江三角洲地区发育了3期下切河谷<sup>[11-12]</sup>(图1),不同期次的河谷在分布范围上呈现部分叠置的现象,造成早期和中期的河谷充填沉积物被部分侵蚀<sup>[12]</sup>。末次盛冰期,海平面下降幅度超过120 m<sup>[19]</sup>,现今的长江三角洲地区发育古长江的下切河谷及其南北两侧的古河间地(图1),而该下切谷一直延伸至东海外陆架<sup>[20-21]</sup>。冰后期海平面快速上升,下切河谷逐渐被海侵成为河口湾;至8.0 ka,研究区形成以镇江-扬州为顶点的巨型古河口湾;此后海平面上升趋缓并在约7 ka达到最高水位后保持相对稳定,长江三角洲自约8.0 ka开始发育并逐渐向海推进直至岸线达到现今位置<sup>[15]</sup>。

## 2 材料与方法

2012年9月,青岛海洋地质研究所在江苏省南

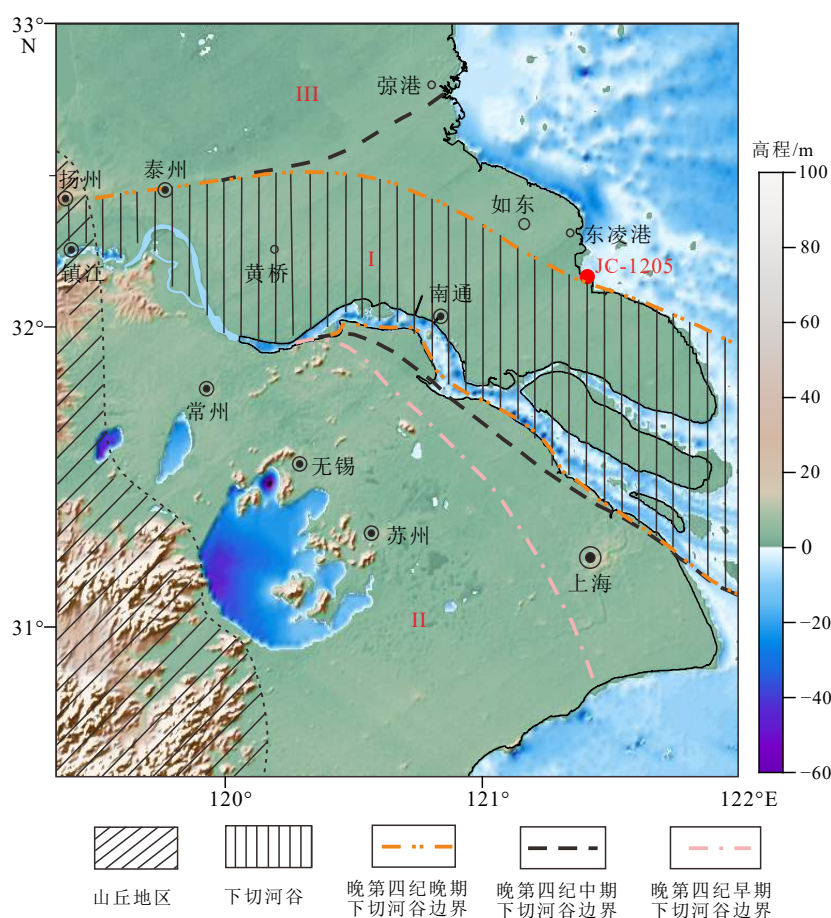


图 1 长江三角洲和晚第四纪下切河谷分布图<sup>[11]</sup>以及本文研究的 JC-1205 孔位置

I. 三角洲主体, II. 三角洲南翼, III. 三角洲北翼; 高程为相对于现今海平面的高程; 晚第四纪早期下切河谷的北界尚未确定, 未标出。

Fig.1 Schematic map showing the distribution of the Yangtze River delta and locations of late Quaternary incised valleys<sup>[11]</sup>, as well as the location of core JC-1205 investigated in this study

The main body (I), southern (II) and northern (III) flanks of the delta are also shown.

南通市如东县东凌港镇近岸区完成一口全取芯钻孔 JC-1205 孔的施工, 钻孔坐标  $32^{\circ}10'47.436''\text{N}$ 、 $121^{\circ}24'40.207''\text{E}$  (图 1)。在去掉钻孔最顶部的人工填土之后, 该孔的高程是 +1.30 m, 进尺 79 m。钻探施工使用 GXY-1A 型岩芯钻机, 采用液压回转钻进工艺, 取芯管直径为 110 mm, 所取样品直径为 96 mm。钻孔泥质沉积物的取芯率大于 85%, 砂质沉积物的取芯率大于 60%。

在室内首先对岩芯对半分, 然后进行沉积特征描述、拍照并采取沉积物粒度、有孔虫鉴定、AMS  $^{14}\text{C}$  测年和光释光 (OSL) 测年等实验样品。按 0.10~0.25 m 间距, 采取粒度样品 596 个; 按 0.10~0.20 m 间距, 采取有孔虫鉴定样品 567 个; 在 0~68 m 岩芯中, 挑选了 13 个腹足类和双壳类的壳体样品和 1 个有孔虫样品开展  $^{14}\text{C}$  测年; 在 22~79 m 岩芯中, 挑选 11 了个样品开展 OSL 测年。

沉积物样品的粒度分析在青岛海洋地质研究

所实验检测中心完成。对于含砾石的较粗粒样品, 采用筛析法计算其粒度组分。对于不含砾石组分的样品, 选取沉积物样品 10~20 g, 经双氧水和稀盐酸浸泡处理, 除掉有机质和碳酸盐, 然后洗盐, 用六偏磷酸钠溶液经超声波分散后, 用英国马尔文 (MALVERN) 公司生产的 Mastersizer-2000 型激光粒度分析仪进行粒度测试。仪器测量范围为 0.02~2000  $\mu\text{m}$ , 粒级分辨率为 0.01  $\Phi$ , 重复测量的相对误差 < 2%。沉积物命名和粒度参数分别采用文献 [22] 和 [23] 提供的方案。

底栖有孔虫样品的鉴定: 称 50 g 干样加入清水与双氧水 ( $\text{H}_2\text{O}_2$ ) 浸泡分散, 经用 250 目 ( $\Phi=0.063\text{ mm}$ ) 分析筛淘洗, 筛上颗粒烘干后, 视样品量及有孔虫丰度将其缩分至 1/2、1/4、1/8……后, 在双目实体显微镜下挑选标本, 进行鉴定与数量统计。一般统计个体数在 100 枚以上, 不足 100 枚的做全部样本统计。底栖有孔虫的丰度表示每 50 g 干样中有孔



虫个体数,简单分异度表示所有属种的种数,重要属种的百分含量按其个体数占底栖有孔虫全群个体总数的百分含量来表示。

样品的 AMS  $^{14}\text{C}$  测年由美国 Beta 分析有限公司承担,主要测年物质包括:有孔虫壳体、双壳类和腹足类壳体等。直接测定年龄是以 5568 年为半衰期,同时测量样品的  $\delta^{13}\text{C}$  值,并根据分馏效应进行校正,即获得惯用年龄。日历年龄是惯用年龄经过校正程序 Calib Rev 8<sup>[24]</sup> 校正所得(表 1)。CALIB Rev 8 没有提供研究区的海洋储库校正值( $\Delta R$ ),对于海洋生物样品日历年龄的校正,本文根据 CALIB Rev 8 提供的 3 个黄海地区(包括 1 个青岛近岸海区和 2 个韩国西南海岸区)和 6 个台湾北部近岸样品的  $\Delta R$  值,利用 CALIB Rev 8 计算得到  $\Delta R$  值为  $-128 \pm 104$  yr。本文所用的  $^{14}\text{C}$  日历年龄都是从公元 1950 向前起算的,以“cal yr BP”表示,或用“ka”来代替“cal kyr BP”。本文或前人没有经过日历年龄校正的年龄以  $^{14}\text{C}$  年龄表示( $^{14}\text{C}$  yr BP)。

样品的 OSL 测年是在中国科学院青海盐湖研究所光释光实验室完成(表 2),样品的前处理和测试方法详见过去的文献<sup>[25-26]</sup>。从样品中提取 38~63  $\mu\text{m}$  的石英颗粒来进行测试,测试仪器为 Risø TL/OSL DA-20,等效剂量( $D_e$ )测试采用单片再生剂量法与标准生长曲线法相结合的方法<sup>[27-28]</sup>。每个样

品共获得 18 个等效剂量值,采用最小年代模型(MAM)计算样品的最终等效剂量。

### 3 结果

#### 3.1 地层序列和沉积相

根据沉积特征和底栖有孔虫分布特征,JC-1205 孔岩芯沉积物可以划分为 4 个沉积单元,从上至下编号为 DU 1—DU 4(图 2)。

##### 3.1.1 DU 4 (79.00~68.32 m)

DU 4 主要由深灰色黏土质粉砂夹粉砂质线理-透镜体、粉砂夹黏土质线理、粉砂与黏土质条带密集互层(毫米至厘米级)组成(图 3a, 3b),生物扰动中等,含少量钙质结核,偶见贝壳碎片及碳质斑点。本单元不含有孔虫(图 4),中部(73.5~75.3 m)含较多淡水腹足类(*Angulyaga* sp.)。

粒度分析结果显示(图 5),DU 4 沉积物以粉砂为主,黏土和和砂次之,平均粒径主要为 5~7  $\Phi$ ,平均值为 6.2;分选系数为 1.3~1.9(平均为 1.66),分选较差;偏态主要为 0.1~0.3(平均 0.24),为正偏;峰度主要为 0.9~1.1(平均 1.03),峰度较扁平。

综上所述,DU 4 被解释为河流环境之下的洪泛平原沉积。

表 1 JC-1205 孔 AMS  $^{14}\text{C}$  测年结果  
Table 1 AMS  $^{14}\text{C}$  dating results for core JC-1205

深度/m	测年材料	$\delta^{13}\text{C}/\text{‰}$	惯用年龄/ $^{14}\text{C}$ yr BP	日历年龄/cal yr BP		Beta 编号
				中值	范围(1 $\sigma$ )	
0.29	腹足类( <i>Semisulcospira gredleri</i> )	-2.7	102.3 $\pm$ 0.3	-	-	371210
0.55	腹足类( <i>Semisulcospira gredleri</i> )	-3	100.1 $\pm$ 0.4	-	-	371211
13.01	腹足类	-0.6	1010 $\pm$ 30 BP	561	463~663	468133
21.42	底栖有孔虫	-2.1	3790 $\pm$ 30 BP	3724	3562~3876	468132
60.25	腹足类( <i>Angulyagra</i> sp.)	-2.6	>43500 BP	-	-	371221
64.15	腹足类( <i>Angulyagra</i> sp.)	-5.2	39110 $\pm$ 550 BP	42703	42432~42917	371212
64.71	双壳类和腹足类碎片	-8.6	>43500 BP	-	-	371213
65.56	腹足类( <i>Angulyagra</i> sp.)	-8.6	37770 $\pm$ 470 BP	42165	41983~42377	371214
65.8	腹足类( <i>Angulyagra</i> sp.)	-5.8	>43500 BP	-	-	371215
65.96	腹足类( <i>Angulyaga</i> sp.)	-4.7	>43500 BP	-	-	371216
66.51	腹足类( <i>Angulyaga</i> sp.)	-9.5	>43500 BP	-	-	371217
67.05	腹足类( <i>Angulyaga</i> sp.)	-7.6	39350 $\pm$ 500 BP	42805	42519~43016	371218
67.47	腹足类( <i>Angulyaga</i> sp.)	-5.6	>42000 BP	-	-	371219
67.63	腹足类( <i>Angulyaga</i> sp.)	-7.8	>43500 BP	-	-	371220

表 2 JC-1205 孔光释光测年结果  
Table 2 OSL dating results for core JC-1205

孔深/m	粒径/ $\mu\text{m}$	U/ $10^{-6}$	Th/ $10^{-6}$	K/ $10^{-6}$	含水率/%	离散值	等效剂量/Gy	剂量率/(Gy/ka)	年代/ka
22.74	38~63	1.36±0.2	8.06±0.5	1.72±0.03	23±5	0.08±0.01	2.53±0.08	2.13±0.09	1.2±0.1
24.4	38~63	1.12±0.2	6.84±0.4	1.34±0.03	18±5	0.09±0.02	7.15±0.25	1.79±0.08	4.0±0.2
31.37	38~63	1.82±0.3	10.04±0.6	1.47±0.03	21±5	0.16±0.03	133.1±10.7	2.16±0.10	61.5±5.7
35.74	38~63	1.71±0.3	9.09±0.5	1.46±0.03	23±5	0.15±0.03	131.3±10.2	2.04±0.09	64.5±5.9
37.56	38~63	1.34±0.2	8.08±0.5	1.41±0.03	14±5	0.13±0.02	138.2±7.3	2.04±0.09	67.7±4.8
41.67	38~63	1.44±0.2	8.07±0.5	1.58±0.03	15±5	0.24±0.04	116.1±15.3	2.18±0.10	53.2±7.4
47.31	38~63	1.07±0.2	5.83±0.4	1.37±0.03	17±5	0.24±0.04	84.4±12.1	1.75±0.08	48.3±7.3
49.78	38~63	1.04±0.2	5.55±0.4	1.74±0.03	20±5	0.20±0.03	125.3±11.7	1.98±0.09	63.3±6.6
68.52	38~63	2.03±0.3	11.32±0.6	1.61±0.03	21±5	—	339±30	2.38±0.11	143±14*
73.11	38~63	1.87±0.3	10.43±0.6	1.75±0.03	22±5	—	357±31	2.39±0.11	149±15*
78.94	38~63	1.78±0.3	10.56±0.6	1.27±0.03	18±5	—	330±42	2.07±0.10	160±22*

注: \*测年结果超出了石英颗粒OSL测年的上限, 仅供参考。

### 3.1.2 DU 3 (68.32~29.25 m)

根据岩性特征, DU 3 可划分为两段: 下段 (68.32~35.40 m) 和上段 (35.40~29.25 m)。DU 3 与下伏 DU 4 之间为侵蚀接触。

下段总体上显示正粒序 (图 2, 5), 底部 0.64 m (67.69~68.32 m) 为灰-深灰色砾石层, 含中-粗砂及粉砂质条带, 含较多贝壳碎片, 砾石直径可达 2~3 cm, 有磨蚀, 以次棱角状为主; 下部 (56.2~67.69 m) 为深灰-深灰黄色细砂质中砂 (含粗砂, 底部偶见细砾) (图 3c), 向上渐变为深灰色极细砂-粉砂质细砂 (含中砂), 顶部 0.8 m 为深灰色极细砂质粉砂。分选一般—较差, 板状/槽状交错层理发育, 偶夹少量碳质线理、碳屑和贝壳碎片; 下段沉积物不含底栖有孔虫 (图 4), 60.0 m 以下局部见较多的淡水腹足类 (*Angulyaga* sp.)。

下段沉积物的粒度分析结果 (图 5) 显示, 下段沉积物以砂为主, 粉砂和黏土次之, 平均粒径从底部的 1.6  $\Phi$  左右向上逐渐波动变化至 4.5  $\Phi$  左右, 正粒序明显, 平均值 3.2  $\Phi$ ; 分选系数大多变化于 0.5~2.2 (平均 1.6), 分选较好—较差; 偏态主要变化于 -0.50~0.75 (平均 0.42), 以正偏为主; 峰度主要变化于 0.5~3.0 (平均 1.42), 下段中下部沉积物的峰度以尖锐为主, 上部沉积物以较扁平—扁平为主。

上段为深灰色粉砂-黏土质粉砂、粉砂与黏土质粉砂密集互层 (毫米级) 夹少量细砂条带 (<1 cm) (图 3d), 生物扰动较弱; 在中部 (32.54~34.2 m) 夹少量碳屑线理 (3~4 mm)。上段沉积物不含底栖有孔虫 (图 4)。

上段沉积物的粒度分析结果 (图 5) 显示, 沉积物以粉砂为主, 砂和黏土次之, 平均粒径主要变化于 4~6.5  $\Phi$ , 平均值 5.43  $\Phi$ ; 分选系数主要变化于 1.5~2.5, 有向上变大 (即分选性变差) 的趋势 (平均 1.86), 分选较差—差; 偏态主要变化于 0.1~0.5 (平均 0.31), 有向上变小的趋势, 为正偏—极正偏; 峰度主要变化于 0.9~1.5 (平均 1.11), 没有明显的趋势, 为较扁平—尖锐。

综上所述, DU 3 被解释为河流沉积, 其中下段为河床-点坝沉积, 上段为洪泛平原沉积。

### 3.1.3 DU 2 (29.25~25.93 m)

DU 2 与下伏 DU 3 之间为突变接触, 该单元以棕色 (混杂灰绿色) 黏土质粉砂和粉砂为主 (图 3e), 比较致密, 偶见钙质结核, 生物扰动较强。下部 (28.19~28.60 m) 夹深灰色粉砂质细砂薄层, 分选一般, 见板状/槽状交错层理, 偶见贝壳碎片, 其底部为侵蚀面与下伏细粒沉积物分隔。本单元不含底栖有孔虫 (图 4)。

粒度分析结果 (图 5) 显示, DU 2 沉积物以粉砂为主, 黏土次之, 砂又次之 (仅在下部的薄夹层 (28.19~28.60 m) 为主); 除去下部的粉砂质细砂薄层, 平均粒径为 5.0~7.2  $\Phi$ , 平均值 5.49  $\Phi$ , 细砂层的平均粒径则为 3.4~4.3  $\Phi$  (平均值 3.65  $\Phi$ ); 分选系数为 1.1~2.5 (平均值 1.72), 分选较差—差; 偏态主要变化于 0.10~0.37 (平均值 0.18), 以正偏为主; 峰度主要变化于 0.9~1.4 (平均值 0.81), 为较扁平—尖锐。

从岩性来看, DU 2 沉积物可与长江三角洲地区

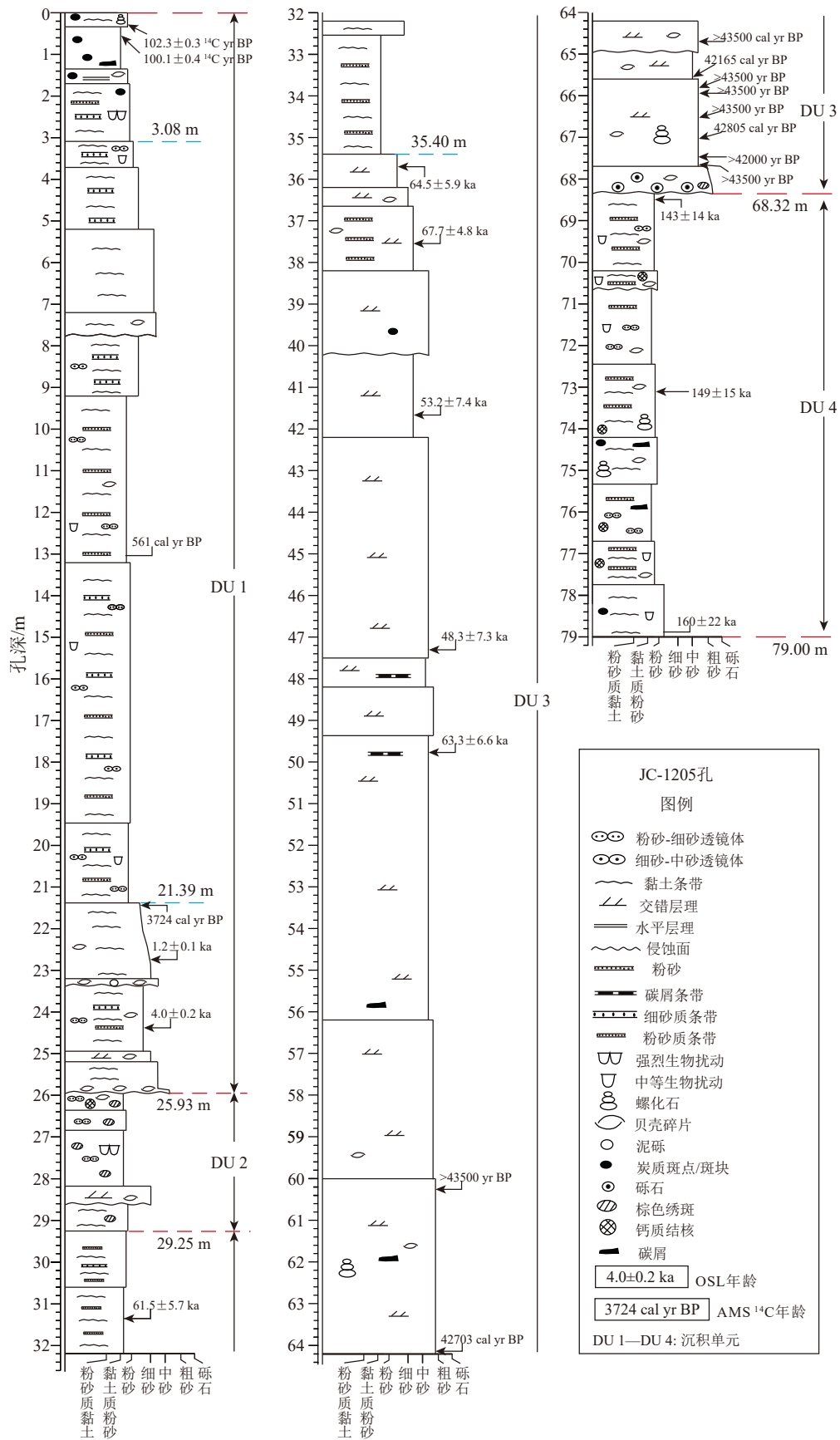


图2 JC-1205孔岩芯岩性柱状图  
附加 AMS <sup>14</sup>C 和 OSL 测年结果。

Fig.2 Lithologic log of core JC-1205, showing calibrated <sup>14</sup>C and OSL ages

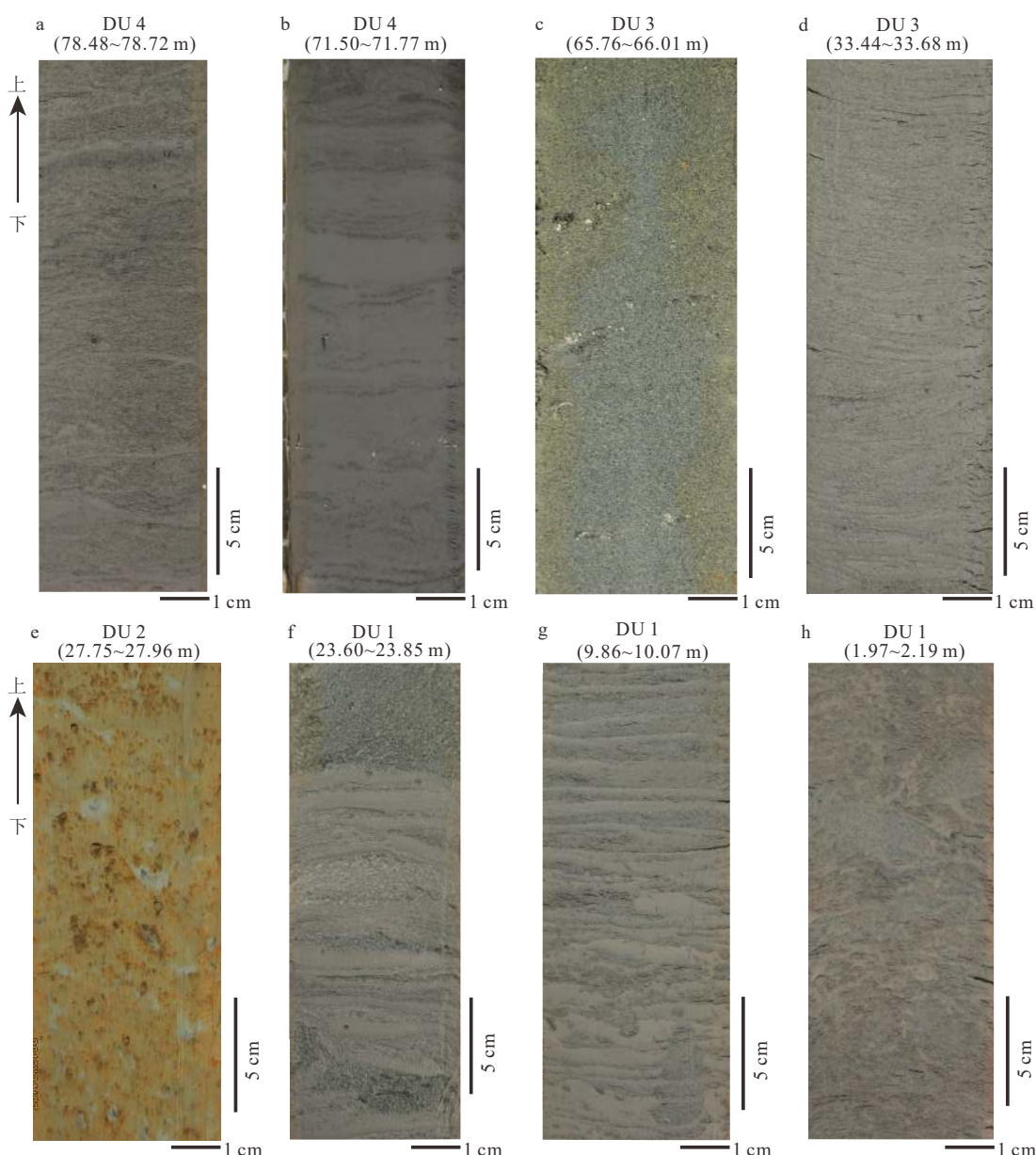


图 3 JC-1205 孔典型岩芯的照片

a. DU 4 底部(78.48~78.72 m), 深灰色粉砂夹较多黏土质线理(毫米级), 生物扰动中等; b. DU 4 上部(71.50~71.77 m), 深灰色黏土质粉砂夹较多粉砂质线理(毫米级)和透镜体, 生物扰动中等; c. DU 3 下段下部(65.76~66.01 m), 深绿灰-灰黄色细砂质中砂(含粗砂, 偶见细砾), 分选较差, 含少量贝壳碎片; d. DU 3 上段中部(33.44~33.68 m), 深灰黏土质粉砂与粉砂密集互层(毫米级), 生物扰动较弱; e. DU 2 中部(27.75~27.96 m), 棕色斑杂灰绿色黏土质粉砂, 含少量粉砂-砂质斑点, 生物扰动较强; f. DU 1 下段中部(23.60~23.85 m), 深黄灰色含细砂-黏土质粉砂, 夹较多深灰色黏土质条带以及较多粉砂-细砂线理、透镜体, 生物扰动中等—较弱; g. DU 1 中段上部(9.86~10.07 m), 深黄灰色黏土质粉砂与深灰色粉砂密集互层(毫米级), 潮汐层理发育, 生物扰动中等—较弱; h. DU 1 上段中部(1.97~2.19 m), 深灰黄色黏土质条带夹粉砂-细砂质粉砂薄层(毫米至厘米级), 生物扰动强烈。箭头指示岩芯的上方。

Fig.3 Photographs of representative sedimentary facies in core JC-1205

“杂色硬黏土层”<sup>[29]</sup>对比, 可解释为末次盛冰期下切河谷间地上的洪泛平原沉积, 且受到了成岩改造; 其中的细砂薄层被解释为洪泛平原上的决口扇沉积<sup>[30]</sup>。

### 3.1.4 DU 1 (25.93~0 m)

DU 1 与下伏 DU 2 之间为侵蚀接触, 根据岩性

本单元可划分为 3 段: 下段(25.93~21.39 m)、中段(21.39~3.08 m)和上段(3.08~0 m)。

下段(25.93~21.39 m): 由两个显示正粒序的旋回构成, 两个旋回以 23.37 m 为界(图 2)。下旋回(25.93~23.37 m)与下伏地层侵蚀接触, 包括: 最底部 6 cm 厚的深黄灰色中砂, 含细砂和粗砂, 分选



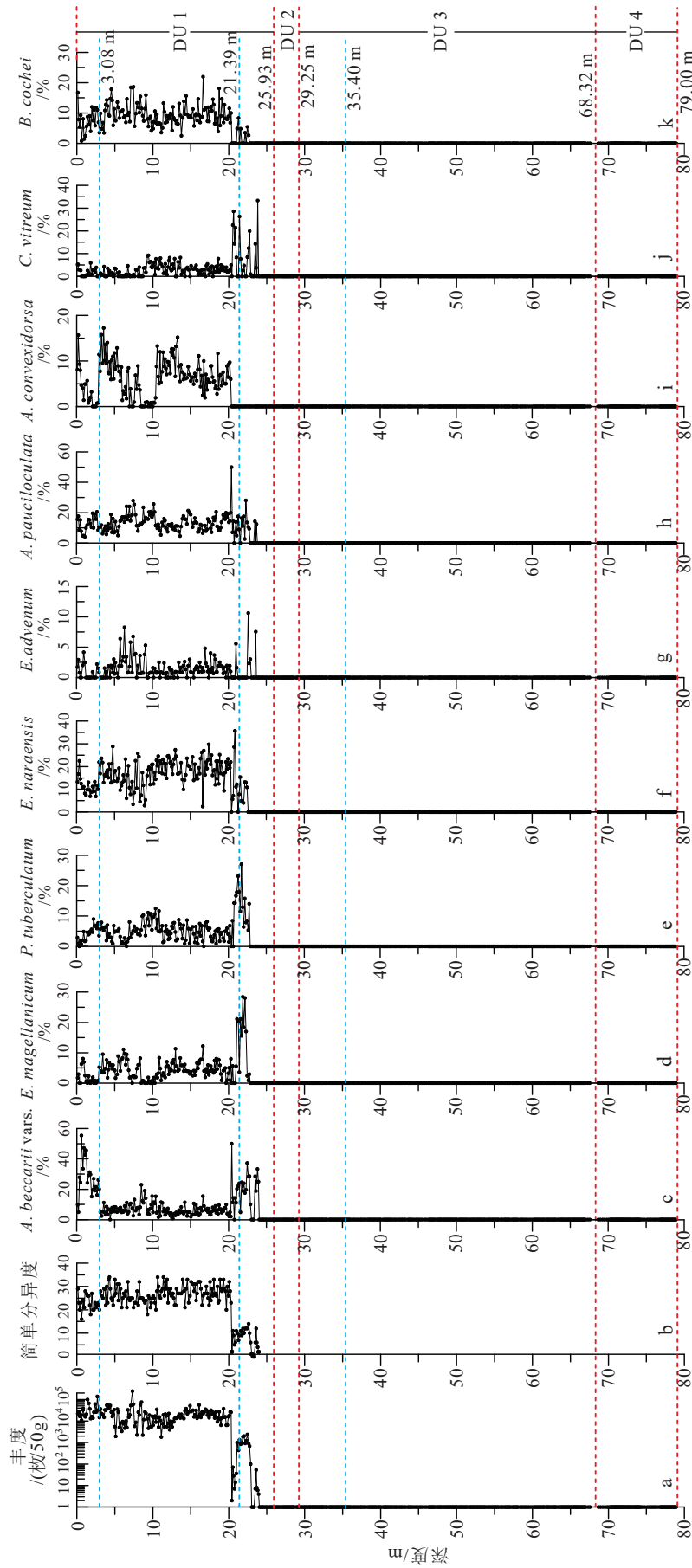


图4 JC-1205 孔岩芯中底栖有孔虫丰度 (a)、简单分异度 (b) 和主要属种含量 (c-k) 垂向分布特征  
Fig.4 Down-core variations in (a) benthic foraminiferal abundance, (b) simple diversity, and (c-k) relative abundance of the main foraminiferal species in core JC-1205

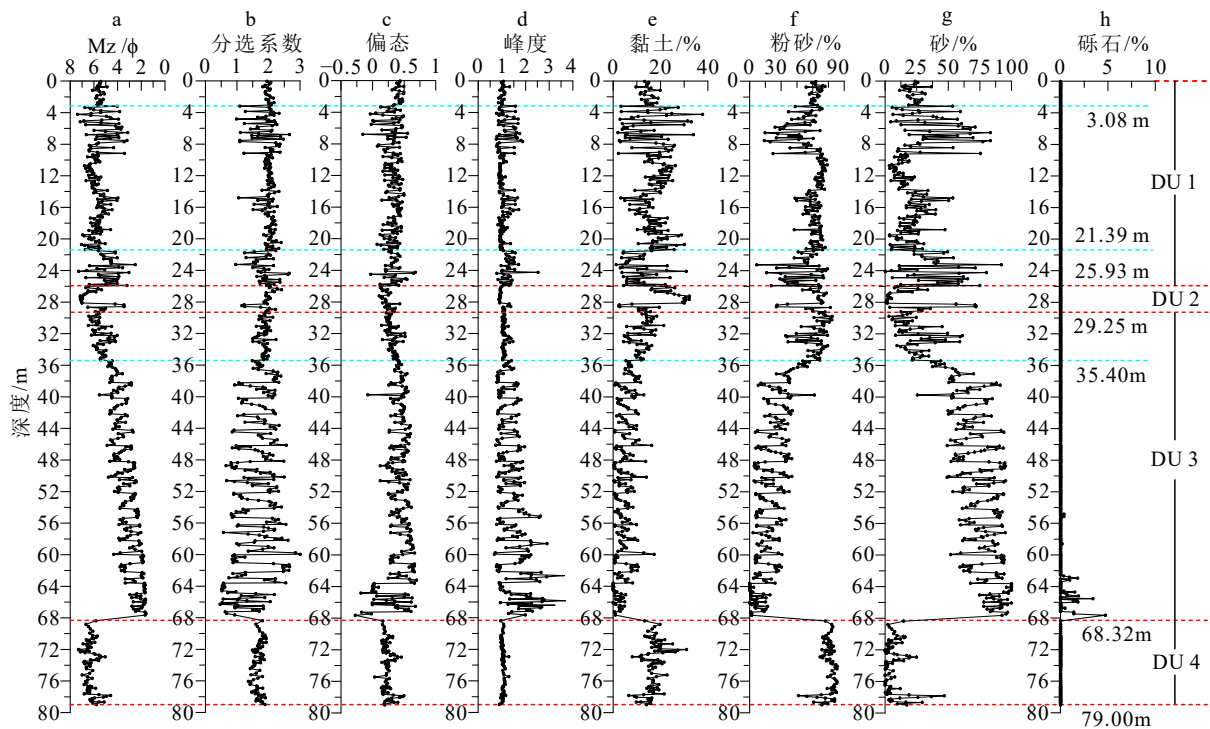


图 5 JC-1205 孔岩芯沉积物的粒度参数 (a-d) 和粒度组分含量 (e-h) 垂向分布特征

Fig.5 Down-core variations in grain-size parameters (a-d) and grain-size compositions (e-h) in core JC-1205

差, 含较多贝壳碎片, 向上变为深灰色细砂 (含中砂) 夹较多深灰色黏土质条带 (厚 5~15 mm) (图 3f)、深灰-深黄灰色细砂薄层 (厚 0.15~0.26 m) 与深灰黏土质条带夹细砂-粉砂线理-透镜体的薄层 (厚 0.15~0.50 m) 相交替, 潮汐层理发育, 细砂层分选一般且显示板状/槽状交错层理, 贝壳碎片零星分布, 生物扰动较弱。上旋回 (23.37~21.39 m) 与下伏旋回之间为侵蚀接触, 其底部为 0.17 m 厚的深灰色中砂 (含细砂), 分选一般, 含大量贝壳碎片及较多泥砾; 向上变为深灰色细砂夹黏土质条带 (3~6 mm) (显示正粒序), 细砂分选一般, 潮汐层理发育, 偶见贝壳碎片。

下段的底部缺失底栖有孔虫, 中上部含少量底栖有孔虫, 其丰度和简单分异度都较低, 其平均值分别为 942 枚/50g 和 8.4 种。底栖有孔虫的优势种是滨岸种 *Ammonia beccarii* (Linné) vars.、滨岸-内陆架种 *Elphidium magellanicum* Heron-Allen et Earland 和冷水种 *Protelphidium tuberculatum* (d'Orbigny), 次要种主要包括近岸陆架种 *Epistominella naraensis* (Kuwanon)、内陆架常见种 *Elphidium advenum* (Cushman)、近岸低氧种 *Ammonia pauciloculata* (Phleger et Parker) 和沿岸低盐水种 *Cribronion vitreum* Wang。

中段 (21.39~3.08 m): 与下段突变接触, 9.20 m

以下以深灰色黏土质粉砂与细砂-粉砂密集互层 (毫米至厘米级) 为主 (图 3g), 潮汐层理发育, 生物扰动中等, 偶见贝壳碎片; 9.20~3.08 m 粒度有所变粗, 以深灰色黏土质粉砂与细砂密集互层 (毫米至厘米级) 为主, 其中 7.74~5.20 m 为深灰色细砂夹少量 (下部) —较多 (上部) 黏土质条带 (毫米级) (与下伏沉积物为侵蚀接触)。生物扰动弱—中等。

中段底栖有孔虫的丰度和简单分异度都比下段有明显增加, 其平均值分别为 20606 枚/50g 和 25.8 种; 优势种是近岸陆架种 *E. naraensis* 和近岸低氧种 *A. pauciloculata*, 次要种主要包括近岸低氧种 *Ammonia convexidorsa* Zheng 和 *Bolivina cochei* Cushman et Adams、滨岸种 *A. beccarii* vars., 滨岸-内陆架种 *E. magellanicum*、冷水种 *P. tuberculatum*、内陆架常见种 *E. advenum* 和沿岸低盐水种 *C. vitreum*。

上段 (3.08~0 m): 从底部的深灰黄色黏土质粉砂夹较多粉砂-细砂条带 (厘米级)、粉砂, 向上渐变为深灰-深黄灰色的黏土质粉砂, 中上部含较多碳质斑点和少量碳屑, 潮汐层理发育, 生物扰动中等—强烈。

上段有孔虫的丰度和简单分异度的平均值分别为 34934 枚/50g 和 22.8 种; 优势种是滨岸种 *A. beccarii* vars., 次要种主要包括近岸低氧种 *A. pauciloculata* 和 *B. cochei* 以及 *A. convexidorsa*、近岸

陆架种 *E. naraensis*。

综上, DU 1 下段被解释为近岸潮道沉积<sup>[31]</sup>; 中段被解释为浅水潮下带-内陆架沉积, 其中上部(7.74~5.20 m)的细砂层为潮道沉积; 上段为潮坪沉积。

### 3.2 测年结果

#### 3.2.1 OSL 测年数据可靠性分析

以分别位于 JC-1205 孔 31.37 m 和 41.67 m 的两个代表性样品为例, 其 OSL 信号生长曲线(Growth curve)和衰减曲线(Decay curve)如图 6 所示, 两个样品的 OSL 信号均衰减较快, 大约在 2 s 内衰减到本底值, 表明其 OSL 信号以快组分为主。此外, 沉积物样品 OSL 年龄的可靠性还与其晒退情况密切相关。前人研究表明, 搬运距离短、沉积过程快以及水体浑浊度高等因素限制了河流和三角洲等水成沉积物的曝光时间和几率<sup>[32-33]</sup>, 可能导致样品中只有部分颗粒的释光信号被归零或降低至可忽略水平<sup>[34]</sup>。该现象在海岸带-陆架区的沉积物(尤其是水成沉积物)光释光测年中尤为显著: 样品中若混入了未完全晒退的矿物颗粒, 获得的  $D_e$  值将会由于残余剂量的影响而导致高估。图 7 显示了上述两个样品  $D_e$  值分布的放射图(Radial Plot), 较高的离散度(OD)表明样品存在不完全晒退现象, 通过中值年代模型(Central age model, CAM)和最小年代模型(Minimum age mode, MAM)分别计算得到的  $D_e$  值是有所差别的。本文采用 MAM 模式得到的  $D_e$  值, 最有可能代表其真实值<sup>[35-36]</sup>。

所测矿物的饱和剂量及其剂量率共同限定了 OSL 测年的年龄上限。对石英颗粒而言, 其饱和剂量在 200 Gy 左右<sup>[37-38]</sup>, 以 2~3 Gy/ka 的剂量率估算,

其年龄上限约为 60~100 ka。DU 3 的 OSL 测年样品, 其  $D_e$  在 84.4~138.2 Gy 之间, 并未超出石英的饱和剂量, 且样品的剂量率较低(约 2 Gy/ka), 因此我们认为在 DU 3 测年样品中所得到的大约 60~70 ka 的年龄并未超出 OSL 年龄上限。

#### 3.2.2 OSL 测年结果

如表 2 和图 2 所示, 11 个 OSL 测年数据分布在 DU 4(3 个)和 DU 3(6 个)和 DU 1(2 个)。DU 4 中的 3 个 OSL 年龄分布在单元的顶部、中部和下部, 从上至下显示递增的年龄序列, 年龄范围为  $143 \pm 14 \sim 160 \pm 22$  ka。考虑到石英颗粒 OSL 测年的上限是约 80 ka<sup>[37]</sup>, 这 3 个年龄数据供参考。

DU 3 中的 6 个 OSL 年龄数据分布在单元的中部至上部, 除了中上部的 2 个年龄数据( $53.2 \pm 7.4$  ka 和  $48.3 \pm 7.3$  ka)较低之外, 其余 4 个年龄数据介于  $61.5 \pm 5.7 \sim 67.7 \pm 4.8$  ka。

DU 1 中的 2 个 OSL 测年数据分布在下段的中部和上部, 分别为  $4.0 \pm 0.2$  ka 和  $1.2 \pm 0.1$  ka。

#### 3.2.3 AMS $^{14}\text{C}$ 测年结果

在全部 14 个 AMS  $^{14}\text{C}$  测年数据中, 10 个年龄数据位于 DU 3 的底部(孔深 60 m 以下)(表 2 和图 2), 它们主要是利用淡水腹足类(*Angulyagra* sp.) 的壳体所测定的, 其中 7 个年龄数据超越了 AMS  $^{14}\text{C}$  测年的上限( $> 43\,500$  yr BP), 另外 3 个年龄数据为 42.1~42.8 ka。考虑到本单元 OSL 的测年结果总体上  $> 60$  ka, 这 3 个较年轻的 AMS  $^{14}\text{C}$  年龄数据被解释为测年样品在沉积或埋藏过程中受到了轻碳的污染而致使年龄变得显著年轻<sup>[39]</sup>。

另外 4 个 AMS  $^{14}\text{C}$  测年数据位于 DU 1, 其中 2 个位于上段的顶部、1 个位于中段的中部、1 个位

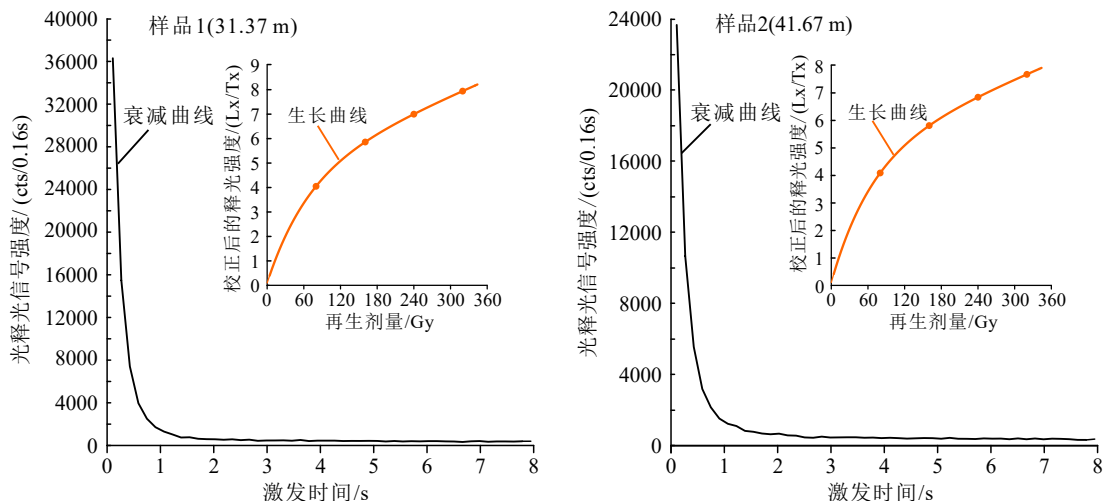
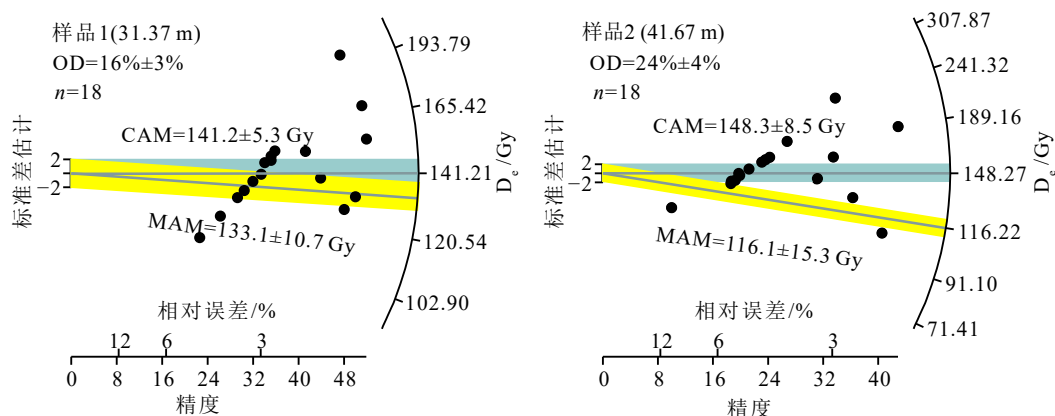


图 6 代表性样品 1(31.37 m) 和样品 2(41.67 m) 的光释光信号衰减曲线和生长曲线

Fig.6 The decay curves and growth curves of the representative sample 1 (31.37 m) and sample 2 (41.67 m)

图 7 代表性样品 1(31.37 m) 和样品 2(41.67 m)  $D_e$  值分布的放射图

OD: 离散度, CAM: 中值年代模型, MAM: 最小年龄模型。

Fig.7 Radial plots of  $D_e$  values for the representative sample 1 (31.37 m) and sample 2 (41.67 m)

OD: over-dispersion, CAM: central age model, MAM: minimum age model.

于下段的上部; 最下部的年龄约为 3.7 ka, 上面几个年龄基本上是向上递减的。

## 4 讨论

由上述的沉积相分析可知, JC-1205 孔地层序列中除了最上部的 DU 1 单元之外, 其余沉积单元 (DU 2—DU 4) 都是河流沉积, 它们的成因显然与海平面的变化密切相关。晚第四纪时期, 入海河流的侵蚀基准面—海平面经历了多次大幅度 (>100 m) 的升降变化<sup>[40]</sup>, 因此在海岸带地区发育的大型河流体系也伴随着海平面波动而经历了多次下切的过程, 发育了多期深切河谷及其充填沉积序列<sup>[30, 41]</sup>。依据 JC-1205 孔地层序列的测年结果, 结合晚第四纪全球海平面变化特征 (图 8), 对该孔所揭示的沉积序列开展地层划分, 探讨各沉积单元的形成时代。

MIS 6 (191~130 ka)<sup>[43]</sup> 时期是中更新世以来大陆冰盖范围仅次于末次冰期最盛期 (LGM) (26.0~19.5 ka)<sup>[44]</sup> 的一个大冰期, 期间最低海平面出现在 MIS 6 晚期 (约 140~135 ka), 达到约 125 m bpsl (现今海平面之下)<sup>[45]</sup>。DU 4 沉积地层的 OSL 年龄数据位于 MIS 6 时期, 但其超过了石英颗粒 OSL 测年的上限, 可视为该单元沉积物形成时代的下限。由于 MIS 6 时期中国东部海岸带和大部分陆架区出露地表, 且海平面的大幅度下降势必引起该区域河流体系的强烈下切, 加之 MIS 6 之后为 MIS 5e (约 130~116 ka) 高海平面时期 (高于现今海平面 6~9 m)<sup>[46]</sup>, 比较有利于 MIS 6 河流沉积物的保存。因此, 河流沉积 DU 4 被解释为形成于 MIS 6。由于孔深的限

制, JC-1205 孔只揭露了 MIS 6 时期的洪泛平原沉积, 而没有揭露同期的河床沉积。根据以往的研究, 位于琼港南侧 (JC-1205 孔西北方向) 的钻孔揭示了晚第四纪早期的下切谷<sup>[47]</sup>, 推测 DU 4 (洪泛平原沉积) 与该下切谷的河床沉积是成因上相关联的同期河流沉积。

全球海平面在 MIS 5e 之后呈波动下降, 至 MIS 4 (约 71.0~60.0 ka) 海平面高程显著降低至约 80~100 m bpsl<sup>[45, 48]</sup>; 进入 MIS 3 (约 60.0~30.0 ka)<sup>[49-50]</sup> 的早期后海平面明显上升, 在中国东部可以达到约 20~30 m bpsl<sup>[26, 51]</sup>, 然后海平面波动下降至 MIS 3 末期的 80~90 m bpsl<sup>[46, 52]</sup>。除去 DU 3 中部 2 个明显不可靠的年轻 OSL 年龄数据, DU 3 上部和中部的其他 OSL 年龄数据主要为 60~70 ka。考虑到 DU 3 顶界面和底界面的高程分别为约 28 m bpsl 和约 67 m bpsl, 加之晚第四纪以来研究区沉降缓慢, 晚第四纪中期下切河谷及其河流沉积 DU 3 可以合理地解释为形成于 MIS 4。

MIS 2 (约 30.0~14.0 ka) 全球海平面再进一步下降, 在 LGM (26.0~19.5 ka)<sup>[44]</sup> 海平面可达 ~125 m bpsl<sup>[19]</sup>; MIS 2 期间研究区发育下切河谷。如前所述, DU 2 洪泛平原沉积可与长江三角洲地区广泛发育的“杂色硬黏土层”<sup>[29]</sup> 对比。因此河流沉积 DU 2 被解释为形成于 MIS 2, 此时钻孔位于 MIS 2 下切河谷北侧的河间地, 下切河谷位于钻孔以南几千米之远 (图 1)。

自 MIS 1 (14 ka 以来) 的早期开始, 南黄海西部陆架逐渐被冰后期海侵所覆盖。DU 1 的中段和上段为浅水潮下带-内陆架沉积和潮坪沉积, 其下段为



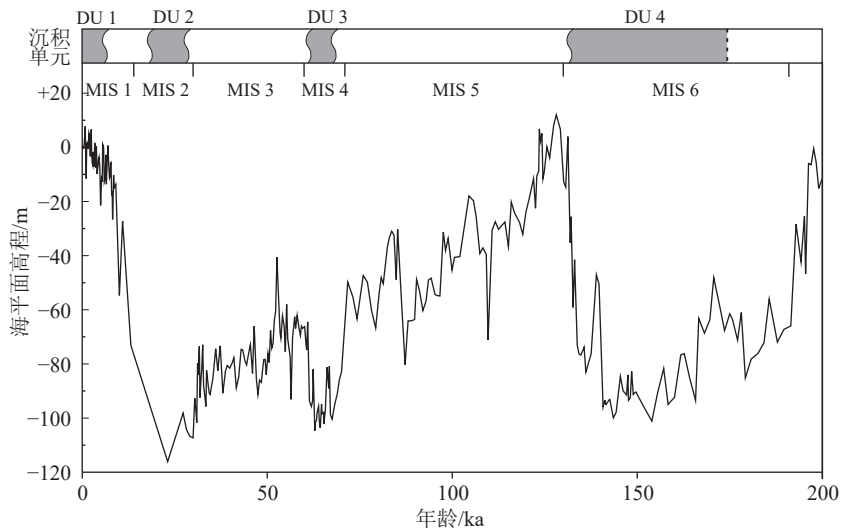


图8 过去200 kyr全球海平面变化曲线<sup>[40]</sup>和JC-1205孔沉积单元(DU 4—DU 1)之间的对应关系

Fig.8 Correlation between the sea-level change over the past 20 kyr<sup>[42]</sup> and the depositional units (DU 4—DU 1) of core JC-1205

近岸潮道沉积,其年龄数据表明DU 1形成于约4.0 ka以来近岸海洋环境。我们推测,DU 1在约4.0 ka开始发育的潮道沉积侵蚀了下伏MIS 1早—中期的海洋沉积和部分MIS 2晚期的河流沉积,从而造成了DU 1和DU 2之间超过10 kyr左右的沉积间断;该潮道向下侵入到下伏LGM河流沉积,加之潮道沉积期间较强的水动力条件,导致该潮道沉积(DU 1下段)的底部缺少底栖有孔虫、中上部底栖有孔虫的丰度和简单分异度也比其上的DU 1中段(浅水潮下带-内陆架沉积)和DU 1上段(潮坪沉积)显著降低。

从以上分析可知,在DU 4和DU 3之间缺失了MIS 5时期的沉积物,而在DU 3和DU 2之间缺失了MIS 3时期的沉积物(图8)。DU 3的沉积相特征表明,MIS 4时期JC-1205孔正好位于下切谷之中,这也得到了以往研究的印证(图1);DU 3和DU 4之间MIS 5海洋沉积的缺失应是该下切谷发育过程中对下伏沉积物的侵蚀所致。DU 2发育于MIS 2河间地的泛滥平原环境,DU 2底界面的高程为约28 m bpsl,如果考虑到晚第四纪研究区一直经历缓慢沉降,推测DU 3形成之后钻孔位置附近因地势较高而缺失了MIS 3的近岸海洋沉积,即钻孔位置附近在MIS 3期间出现了沉积间断。

晚第四纪长江三角洲地区沉降速率较小,下切谷的发育主要受控于海平面变化。在MIS 6、MIS 4和MIS 2低海平面时期,钻孔位置附近区发育河流下切河谷或河间地,后期的下切谷(如MIS 4时期)对前期的下切河谷沉积充填形成了破坏,使得它们之间相对高海平面时期(如MIS 5)的近岸海洋

沉积物被侵蚀殆尽,或者因地势较高而产生了沉积间断(如MIS 3),导致这3期河流沉积物直接叠置(图8)。这与以前的研究报道<sup>[11-12]</sup>是一致的。如果考虑到MIS 1晚期近岸海洋沉积(DU 1)与其下伏河流沉积(DU 2)之间也存在超过10 kyr的沉积间断,研究区晚第四纪沉积序列的4个沉积单元之间都存在重要的沉积缺失。

## 5 结论

(1)江苏南通近岸区JC-1205孔揭示了该区晚第四纪沉积序列可划分为4个沉积单元(从下至上DU 4—DU 1):中—下部3个沉积单元(DU 4—DU 2)为3期直接接触的河流沉积,上部DU 1为近岸海洋沉积(从下至上包括潮道沉积、浅水潮下带-内陆架沉积和潮坪沉积)。

(2)晚第四纪海平面变化是控制钻孔位置附近沉积序列形成的主要因素。晚第四纪早期和中期的下切河谷及其充填沉积(DU 4和DU 3)分别形成于MIS 6和MIS 4,而与晚期下切谷相关的河间地的洪泛平原沉积(DU 2)形成于MIS 2;MIS 4时期下切谷的发育使得其下伏的MIS 5海洋沉积被侵蚀殆尽,而MIS 3时期相对较高的地势导致了沉积间断的出现。

(3)DU 1形成于MIS 1晚期,其底部的潮道沉积在其发育过程中对下伏沉积物的侵蚀作用形成了DU 1和DU 2之间超过10 kyr的沉积缺失。

致谢: 本文作者多年来在开展海岸带地质调

查和海洋沉积学研究过程中得到了青岛海洋地质研究所何起祥先生的悉心指导和无私帮助,谨以此文纪念何起祥先生!

### 参考文献 (References)

- [1] Zaitlin B A, Dalrymple R W, Boyd R. The stratigraphic organization of incised-valley systems associated with relative sea-level change[M]// Dalrymple R W, Boyd R, Zaitlin B A. Incised-Valley Systems: Origin and Sedimentary Sequences. Tulsa: SEPM Society for Sedimentary Geology, 1994: 45-62.
- [2] Lericolais G, Berné S, Féliès H. Seaward pinching out and internal stratigraphy of the Gironde incised valley on the shelf (Bay of Biscay) [J]. *Marine Geology*, 2001, 175 (1-4): 183-197.
- [3] Nordfjord S, Goff J A, Austin J A, et al. Seismic facies of incised-valley fills, New Jersey continental shelf: implications for erosion and preservation processes acting during latest Pleistocene-Holocene transgression [J]. *Journal of Sedimentary Research*, 2006, 76 (12): 1284-1303.
- [4] Allen G P, Posamentier H W. Sequence stratigraphy and facies model of an incised valley fill: the Gironde estuary, France [J]. *Journal of Sedimentary Research*, 1993, 63 (3): 378-391.
- [5] Weber N, Chaumillon E, Tesson M, et al. Architecture and morphology of the outer segment of a mixed tide and wave-dominated-incised valley, revealed by HR seismic reflection profiling: the paleo-Charente River, France [J]. *Marine Geology*, 2004, 207 (1-4): 17-38.
- [6] Breda A, Mellere D, Massari F. Facies and processes in a Gilbert-delta-filled incised valley (Pliocene of Ventimiglia, NW Italy) [J]. *Sedimentary Geology*, 2007, 200 (1-2): 31-55.
- [7] Lin C M, Zhuo H C, Gao S. Sedimentary facies and evolution in the Qiantang River incised valley, Eastern China [J]. *Marine Geology*, 2005, 219 (4): 235-259.
- [8] 张家强, 张桂甲, 李从先. 长江三角洲晚第四纪地层层序特征[J]. 同济大学学报, 1998, 26 (4): 438-442. [ZHANG Jiaqiang, ZHANG Guijia, LI Congxian, et al. Characteristics of the Late Quaternary stratigraphic sequence in the Changjiang River Delta area [J]. *Journal of Tongji University*, 1998, 26 (4): 438-442.]
- [9] 李从先, 范代读, 杨守业, 等. 中国河口三角洲地区晚第四纪下切河谷层序特征和形成[J]. 古地理学报, 2008, 10 (1): 87-97. [LI Congxian, FAN Daidu, YANG Shouye, et al. Characteristics and formation of the Late Quaternary incised-valley sequences in estuary and delta areas in China [J]. *Journal of Palaeogeography*, 2008, 10 (1): 87-97.]
- [10] Li C X, Wang P, Sun H P, et al. Late Quaternary incised-valley fill of the Yangtze delta (China): its stratigraphic framework and evolution [J]. *Sedimentary Geology*, 2002, 152 (1-2): 133-158.
- [11] 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: 1-222. [LI Congxian, WANG Pinxian. *Researches on Stratigraphy of the Late Quaternary Period in Yangtze River Mouth*[M]. Beijing: Science Press, 1998: 1-222.]
- [12] 林春明, 张霞, 邓程文, 等. 江苏南通地区晚第四纪下切河谷沉积与环境演变[J]. *沉积学报*, 2016, 34 (2): 268-280. [LIN Chunming, ZHANG Xia, DENG Chengwen, et al. Sedimentary characteristics and environmental evolution of the Late Quaternary incised-valley fills in the Nantong area of Jiangsu Province, China [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2016, 34 (2): 268-280.]
- [13] Gao L, Long H, Hou Y D, et al. Chronology constraints on the complex sedimentary stratigraphy of the paleo-Yangtze incised valley in China [J]. *Quaternary Science Reviews*, 2022, 287: 107573.
- [14] 高磊, 隆浩. MIS 5以来长江三角洲地区沉积环境演变的光释光年代证据[J]. *第四纪研究*, 2023, 43 (1): 33-45. [GAO Lei, LONG Hao. Luminescence chronology constraints on the sedimentary stratigraphy of the Yangtze River delta since the last interglacial [J]. *Quaternary Sciences*, 2023, 43 (1): 33-45.]
- [15] Song B, Li Z, Saito Y, et al. Initiation of the Changjiang (Yangtze) delta and its response to the mid-Holocene Sea level change [J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2013, 388: 81-97.
- [16] Chen Z Y, Stanley D. Quaternary subsidence and river channel migration in the Yangtze Delta Plain, Eastern China [J]. *Journal of Coastal Research*, 1995, 11 (3): 927-945.
- [17] 顾家伟. 上新世以来苏北盆地与长江三角洲构造沉降史分析[J]. 地质科技情报, 2015, 34 (1): 95-99,106. [GU Jiawei. Tectonic subsidence analysis of Subei Basin and Yangtze delta from the Pliocene [J]. *Geological Science and Technology Information*, 2015, 34 (1): 95-99,106.]
- [18] 王张娟, 陈中原, 魏子新, 等. 长江口第四纪沉积物中构造与古气候耦合作用的探讨[J]. *科学通报*, 2005, 50 (14): 1503-1511. [WANG Zhangqiao, CHEN Zhongyuan, WEI Zixin, et al. Investigations on coupling effects between tectonic and paleo-climate through research on Quaternary sediments from Yangtze estuary [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2005, 50 (14): 1503-1511.]
- [19] Lambeck K, Rouby H, Purcell A, et al. Sea level and global ice volumes from the last glacial maximum to the Holocene [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2014, 111 (43): 15296-15303.
- [20] Wellner R W, Bartek L R. The effect of sea level, climate, and shelf physiography on the development of incised-valley complexes: a modern example from the East China Sea [J]. *Journal Sedimentary Research*, 2003, 73 (6): 926-940.
- [21] Li G X, Liu Y, Yang Z G, et al. Ancient Changjiang channel system in the East China Sea continental shelf during the last glaciation [J]. *Science in China Series D:Earth Sciences*, 2005, 48 (11): 1972-1978.
- [22] Shepard F P. Nomenclature based on sand-silt-clay ratios [J]. *Journal of Sedimentary Research*, 1954, 24 (3): 151-158.
- [23] Folk R L, Ward W C. Brazos River bar: a study in the significance of grain size parameters [J]. *Journal of Sedimentary Research*, 1957, 27 (1): 3-26.
- [24] Stuiver M, Reimer P J, Reimer R. CALIB 8.2[EB/OL]. [2023-04-25]. <http://calib.org>.
- [25] 刘健, 段宗奇, 梅西, 等. 南黄海中部隆起晚新近纪—第四纪沉积序列的地层划分与沉积演化[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2021, 41 (5): 25-43. [LIU Jian, DUAN Zongqi, MEI Xi, et al. Stratigraphic classification and sedimentary evolution of the Late Neogene to Qua-

- ternary sequence on the central uplift of the South Yellow Sea [J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2021, 41 (5): 25-43.]
- [26] Zhang X, Liu J, Wang Y X, et al. Timing of sedimentary evolution and transgressions in the Bohai Sea during the last ~200 ka: constraints from luminescence dating of a core from the Yellow River Delta [J]. *Frontiers in Earth Science*, 2022, 10: 865761.
- [27] Roberts H M, Duller G A T. Standardised growth curves for optical dating of sediment using multiple-grain aliquots [J]. *Radiation Measurements*, 2004, 38 (2): 241-252.
- [28] Lai Z P. Testing the use of an OSL standardised growth curve (SGC) for  $D_e$  determination on quartz from the Chinese Loess Plateau [J]. *Radiation Measurements*, 2006, 41 (1): 9-16.
- [29] 朱锦旗, 龚绪龙, 苟富刚, 等. 长江三角洲北翼第一硬土层理化特征及其地质成因[J/OL]. 地质通报, 2023. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.4648.P.20230113.1825.003.html>. [ZHU Jinqi, GONG Xulong, GOU Fugang, et al. Physicochemical characteristics and geological formation of the first hard soil layer of the north wing of the Yangtze River delta[J/OL]. *Geological Bulletin of China*, 2023. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.4648.P.20230113.1825.003.html>.]
- [30] Amorosi A, Pavesi M, Lucchi M R, et al. Climatic signature of cyclic fluvial architecture from the Quaternary of the central Po Plain, Italy [J]. *Sedimentary Geology*, 2008, 209(1-4): 58-68.
- [31] 何起祥. 中国海洋沉积地质学[M]. 北京: 海洋出版社, 2006: 348-352. [HE Qixiang. *Marine Sedimentary Geology of China*[M]. Beijing: China Ocean Press, 2006: 348-352.]
- [32] Zhang J F, Qiu W L, Wang X Q, et al. Optical dating of a hyperconcentrated flow deposit on a Yellow River terrace in Hukou, Shaanxi, China [J]. *Quaternary Geochronology*, 2010, 5(2-3): 194-199.
- [33] Zhao H, Liu Z, Song L, et al. OSL dating of flood sediments in the North China Plain [J]. *Quaternary Geochronology*, 2019, 49: 101-107.
- [34] Smedley R K, Skirrow G K A. Luminescence dating in fluvial settings: overcoming the challenge of partial bleaching[M]//Herget J, Fontana A. *Palaeohydrology*. Cham: Springer, 2020: 155-168.
- [35] Olley J, Caitcheon G, Murray A. The distribution of apparent dose as determined by optically stimulated luminescence in small aliquots of fluvial quartz: implications for dating young sediments [J]. *Quaternary Science Reviews*, 1998, 17(11): 1033-1040.
- [36] Liu J, Qiu J D, Saito Y, et al. Formation of the Yangtze shoal in response to the post-glacial transgression of the paleo-Yangtze (Changjiang) estuary, China [J]. *Marine Geology*, 2020, 423: 106080.
- [37] Lai Z P. Chronology and the upper dating limit for loess samples from Luochuan section in the Chinese Loess Plateau using quartz OSL SAR protocol [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2010, 37(2): 176-185.
- [38] Murray A, Arnold L J, Buylaert J -P, et al. Optically stimulated luminescence dating using quartz. *Nature Reviews Methods Primers*, 2021, 1: 72,doi: 10.1038/s43586-021-00068-5.
- [39] Pigati J S, Quade J, Wilson J, et al. Development of low-background vacuum extraction and graphitization systems for  $^{14}\text{C}$  dating of old (40-60 ka) samples [J]. *Quaternary International*, 2007, 166(1): 4-14.
- [40] Rohling E J, Foster G L, Grant K M, et al. Sea-level and deep-sea-temperature variability over the past 5.3 million years [J]. *Nature*, 2014, 508(7497): 477-482.
- [41] Campo B, Amorosi A, Vaiani S C. Sequence stratigraphy and Late Quaternary paleoenvironmental evolution of the northern Adriatic coastal plain (Italy) [J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2017, 466: 265-278.
- [42] Grant K M, Rohling E J, Ramsey C B, et al. Sea-level variability over five glacial cycles [J]. *Nature Communications*, 2014, 5: 5076.
- [43] Lisiecki L E, Raymo M E. A Pliocene-Pleistocene stack of 57 globally distributed benthic  $\delta^{18}\text{O}$  records [J]. *Paleoceanography*, 2005, 20(1): PA1003.
- [44] Clark P U, Dyke A S, Shakun J D, et al. The last glacial maximum [J]. *Science*, 2009, 325(5941): 710-714.
- [45] Spratt R M, Lisiecki L E. A Late Pleistocene sea level stack [J]. *Climate of the Past*, 2016, 12(4): 1079-1092.
- [46] Dutton A, Lambeck K. Ice volume and sea level during the last interglacial [J]. *Science*, 2012, 337(6091): 216-219.
- [47] 林春明, 张霞, 黄舒雅. 晚第四纪下切河谷体系研究综述[J]. 地质论评, 2022, (2): 627-647. [LIN Chunming, ZHANG Xia, HUANG Shuya. Review of Late Quaternary incised valley system. *Geological Review*, 2022, (2): 627-647.]
- [48] Grant K M, Rohling E J, Bar-Matthews M, et al. Rapid coupling between ice volume and polar temperature over the past 150, 000 years [J]. *Nature*, 2012, 491(7426): 744-747.
- [49] Rasmussen S O, Bigler M, Blockley S P, et al. A stratigraphic framework for abrupt climatic changes during the Last Glacial period based on three synchronized Greenland ice-core records: refining and extending the INTIMATE event stratigraphy [J]. *Quaternary Science Reviews*, 2014, 106: 14-28.
- [50] Waelbroeck C, Lougheed B C, Vazquez Riveiros N, et al. Consistently dated Atlantic sediment cores over the last 40 thousand years [J]. *Scientific Data*, 2019, 6(1): 165.
- [51] Liu J, Saito Y, Kong X H, et al. Delta development and channel incision during marine isotope stages 3 and 2 in the western South Yellow Sea [J]. *Marine Geology*, 2010, 278(1-4): 54-76.
- [52] Siddall M, Rohling E J, Thompson W G, et al. Marine isotope stage 3 sea level fluctuations: data synthesis and new outlook [J]. *Reviews of Geophysics*, 2008, 46(4): RG4003.