



长江三角洲下切河谷全新世以来千年尺度海岸线变迁及沉积环境演化

程 瑜, 郝社锋, 邹欣庆, 骆 丁, 高丙飞, 袁 峰, 徐 扛

Millennium-scale coastline changes and sedimentary environment evolution in the incised valley of the Yangtze River Delta since the Holocene

CHENG Yu, HAO Shefeng, ZOU Xinqing, LUO Ding, GAO Bingfei, YUAN Feng, and XU Kang

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16562/j.cnki.0256-1492.2024040701>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

全新世中国大河三角洲沉积演化模式转化及其对人类活动的响应

Changes of evolution models of China's large river deltas since Holocene and their responses to anthropogenic activities

海洋地质与第四纪地质. 2021, 41(5): 77-89

珠江三角洲全新世海-陆沉积模式转换及其年代

Holocene sedimentary environment transform and onset time of Pearl River Delta progradation

海洋地质与第四纪地质. 2020, 40(5): 107-117

江苏南通近岸区晚第四纪沉积序列的沉积相特征与定年

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

海洋地质与第四纪地质. 2023, 43(3): 35-48

渤海湾西岸全新世以来沉积物地球化学与黏土矿物特征及其对环境和气候的响应

Geochemical and clay mineral characteristics of the Holocene sediments on the west coast of Bohai Bay and their implications for environmental and climatic changes

海洋地质与第四纪地质. 2021, 41(2): 75-87

珠江三角洲晚第四纪沉积序列及其对海侵过程的响应

Sedimentary sequences in response to marine transgression during the late Quaternary, Pearl River delta

海洋地质与第四纪地质. 2023, 43(2): 18-30

苏北-南黄海西部第四纪长江埋藏古河道分布研究进展

Research progress on distribution of Quaternary buried paleo-Yangtze River channels in the North Jiangsu-western South Yellow Sea

海洋地质与第四纪地质. 2020, 40(4): 40-54



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

程瑜, 郝社锋, 邹欣庆, 等. 长江三角洲下切河谷全新世以来千年尺度海岸线变迁及沉积环境演化 [J]. 海洋地质与第四纪地质, 2025, 45(3): 26-39.
CHENG Yu, HAO Shefeng, ZOU Xinqing, et al. Millennium-scale coastline changes and sedimentary environment evolution in the incised valley of the Yangtze River Delta since the Holocene[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2025, 45(3): 26-39.

长江三角洲下切河谷全新世以来千年尺度海岸线变迁及沉积环境演化

程瑜^{1,2}, 郝社锋¹, 邹欣庆³, 骆丁¹, 高丙飞¹, 袁峰³, 徐扛⁴

1. 江苏省地质调查研究院, 南京 210018
2. 河海大学地球科学与工程学院, 南京 211100
3. 南京大学地理与海洋科学学院, 南京 210023
4. 平顶山学院旅游与规划学院, 平顶山 467000

摘要:长江三角洲地区具有低海拔、沉积速率大、人口密度高、人地关系矛盾突出等特点,也是受全球气候变暖、海平面上升影响最大的区域之一。恢复长江三角洲全新世以来的区域海岸线变迁,有助于理解该地区对未来海平面上升的响应。本研究以长江三角洲下切河谷顶端 YZSW4 孔为研究对象,建立全新世以来高分辨率的地层序列,并结合已发表的钻孔,建立高程-年龄-沉积相等基本属性数据集,恢复长江三角洲古地形地貌,并探讨三角洲的演变过程和影响因素。结果表明:红桥亚三角洲和黄桥亚三角洲在 11.0~9.0、9.0~7.0、7.0~4.0、4.0~0 kaBP 4 个阶段的沉积环境分别为潮汐河道、河口湾、三角洲前缘、三角洲平原,沉积速率呈现高-低-高-低的特征,红桥、黄桥沙坝并不是按照形成的先后相互衔接的,而是具有同期性,形成时间为 7.6~4.0 ka。全新世以来,长江三角洲的堆积作用受控于古河口的位置、轮廓形状及海平面变化,11.0~9.0 ka,海平面快速上升,大量沉积物在古河口附近堆积下来;9.0~7.0 ka,为强潮型的河口湾,沉积物在远离湾顶的区域堆积;7.0 ka 以来,海平面趋于稳定,在古河口附近堆积。

关键词:下切河谷;海岸线变迁;全新世;沉积环境;长江三角洲

中图分类号:P736 文献标识码:A DOI: 10.16562/j.cnki.0256-1492.2024040701

Millennium-scale coastline changes and sedimentary environment evolution in the incised valley of the Yangtze River Delta since the Holocene

CHENG Yu^{1,2}, HAO Shefeng¹, ZOU Xinqing³, LUO Ding¹, GAO Bingfei¹, YUAN Feng³, XU Kang⁴

1. Geological Survey of Jiangsu Province, Nanjing 210018, China
2. School of Earth Sciences and Engineering, Hohai University, Nanjing 211100, China
3. School of Geography and Ocean Science, Nanjing University, Nanjing 210023, China
4. School of tourism and planning, Pingdingshan University, Pingdingshan 467000, China

Abstract: The Yangtze River Delta region is characterized by low altitude, rapid sedimentation rate, high population density, and high demographic conflict, making it one of the regions most affected by global warming and sea level rise in China. The reconversion of regional coastline changes since the Holocene is helping to understand the region's response to future sea-level rise. In this study, the lithology, radiocarbon ages, sediment grain size of the YZSW4 core, located in the incised-valley fills beneath the westernmost part of the Yangtze River Delta, were analyzed. By integrating this data with the previously published ones of drilling cores, a dataset on elevation-age-sediment facies was established, allowing us for the reconstruction of the millennium-scale coastline and sedimentary environment. Results indicate that the sedimentary environments of the Hongqiao subdelta and Huangqiao subdelta in the four stages of 11.0~9.0, 9.0~7.0, 7.0~4.0, and 4.0~0 ka were characterized by tidal channels, estuaries, delta fronts, and delta plains, respectively. The sedimentation rates exhibited a pattern of high-

资助项目:国家自然科学基金项目“苏北平原中-晚全新世百年尺度海平面变化特征及其对 4.2 ka 气候事件的响应”(42007402);江苏省地质勘查基金项目“扬州城市地质调查”([2016] 13);江苏省自然科学基金面上项目“长江三角洲地区晚新生代沉积物多重地层对比及其意义”(BK20231365)

作者简介:程瑜(1989—),女,高级工程师,从事海洋地质、环境考古学研究, E-mail: fchengyu@msn.com

通讯作者:郝社锋(1977—),男,正高级工程师,从事地质资源与地质工程研究, E-mail: jsgszk@163.com

收稿日期:2024-04-07; **改回日期:**2024-09-02. 文凤英编辑

low-high-low on average of 4.21 mm/a, 1.98 mm/a, 4.04 mm/a, 1.80 mm/a, respectively. The Hongqiao and Huangqiao sand bars were found to have formed simultaneously rather than in sequence, with both being tidal sands mainly formed between 7.6~4.0 ka. Since the Holocene, the accumulation of the Yangtze River Delta was controlled by the sea-level change, as well as the position and shape of the paleo-estuary. From 11.0 to 9.0 ka, there was a rapid sea level rise, leading to significant sediment deposition near the paleo-estuary. Between 9.0~7.0 ka, a strong tidal estuary developed, resulting in sediment accumulation further away from estuary area. After 7.0 ka, the sea level stabilized, and sediment began accumulating near the paleo-estuary.

Key words: incised valley; coastline changes; Holocene; sedimentary environment; Yangtze River Delta

相比于 1995—2014 年基准期, 在中排放情景下, 全球海平面在 2030—2100 年间将上升 0.44~0.76 m^[1], 沿河灌溉系统和大坝的修建会导致河流下游的输沙量减少。海平面长期上升和输沙量急剧降低导致了世界上众多河口及水下三角洲发生明显的侵蚀作用, 如尼罗河^[2]、密西西比河^[3]、黄河^[4]等, 威胁着沿海人民和三角洲地区的生存发展。

长江三角洲作为中国东部滨海平原的重要组成部分, 是连接海洋与内陆的关键地段。早一中全新世海平面的快速上升^[5], 长江三角洲的海岸线自东向西逐渐迁移; 中一晚全新世海平面在大尺度上趋于稳定^[6], 在径流、海洋的相互作用下, 海岸线自西向东迁移。因此, 海平面的相对变化控制着三角洲的地貌演化^[7]。基于多个钻孔及沉积物¹⁴C 测年, 学者绘制了长江三角洲下切河谷 7.5、6.0、4.0、2.0、1.2、0.2 kaBP 的海岸线变迁图^[8]。张忍顺^[9]根据对苏北沿海古墩台及地名进行现场考察和历史典籍考证, 研究了新石器时期、2.0 kaBP 以来历史海岸线的变迁。杨怀仁和陈西庆^[10]根据苏北贝壳堤的分布特征和测试数据, 明确了 7.2、6.32、3.7 kaBP 海岸线的位置, 朱诚等^[7]在此基础上, 结合新石器文明遗址分布规律, 进一步明确了 7.0~3.2 ka 4 期 (7.0~6.5、6.0~5.2、4.5~4.0、3.8~3.2 ¹⁴C kaBP) 海岸线的位置, 但遗址点的发现存在偶然性, 反映的海岸线位置存在较大的误差。

随着全新世沉积物测年精度的增加, 学者在长江三角洲实施多个高分辨率钻孔^[11-21], 通过区域内大量钻孔滨海地层的横纵向分布特征, 可获取准确海岸线位置和古地形地貌^[22]。但大量已发表的钻孔位于南通一带及水下三角洲, 长江三角洲顶端的钻孔相对较少, 难以精确刻画该区域海进、海退历史。因此, 本研究在长江三角洲顶端施工一个钻孔, 建立全新世以来高分辨率的地层序列, 并结合已发表的高分辨率钻孔, 建立高程-年龄-沉积相等基本属性的数据集, 揭示长江三角洲下切河谷海岸线变迁及沉积环境演化过程, 并探讨三角洲的演变过程和影响因素。

1 区域地质概况

长江三角洲地处扬子陆块东段, 西部为郯庐断裂带、北部为苏鲁造山带。自元古代以来, 区域经历了复杂的构造运动, 产生了丰富多样的构造样式。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。长江贯通以后, 携带了大量物质在长江三角洲地区迅速淤积, 第四纪地层厚度为 80~300 m, 自西向东逐渐加深^[23]。

在末次冰期最盛期 (LGM), 中国东部海平面下降至现今的 -130~-140 m^[24], 由于河流的下蚀作用, 长江三角洲发育下切河谷。全新世以来, 在海洋和径流的共同作用下, 形成厚 50~70 m 的沉积地层, 苏北平原和太湖平原位于下切河谷的两侧, 湖相、漫滩相、海侵地层与“第一硬黏土层”呈不整合接触^[25]。全新世最大海侵时期 (8~7 kaBP), 长江三角洲形成以扬州-镇江为顶点的漏斗状海湾, 长江携带的大量泥沙在河口附近堆积, 形成了红桥、黄桥、金沙、海门、崇明和长兴 6 个亚三角洲^[8]。

与目前杭州湾的强潮区类似, 三角洲顶部的红桥和黄桥砂体为潮成沙坝^[26]。红桥和黄桥砂体顶部的高程为 1~7 m。末次冰期以来经历了陆相河流、潮汐河流、河口湾、三角洲沉积体系的更迭, 沉积环境依次为陆相、陆相向海相转变、海相、海相向陆相转变 (图 1c)^[5]。

2 材料与方法

YZSW4 孔 (32°15'27"N、119°22'31"E, 85 黄海高程: 6.691 m) 位于长江三角洲下切河谷的顶端 (图 1a), 江苏省地质调查研究院于 2020 年施工, 钻进深度 83.3 m, 岩芯长 73.64 m, 采取率为 88.4%。

2.1 AMS¹⁴C 年代测定

AMS¹⁴C 年代测定是全新世地层对比和沉积演化分析的基础。共有 10 件样品进行了 AMS¹⁴C 测

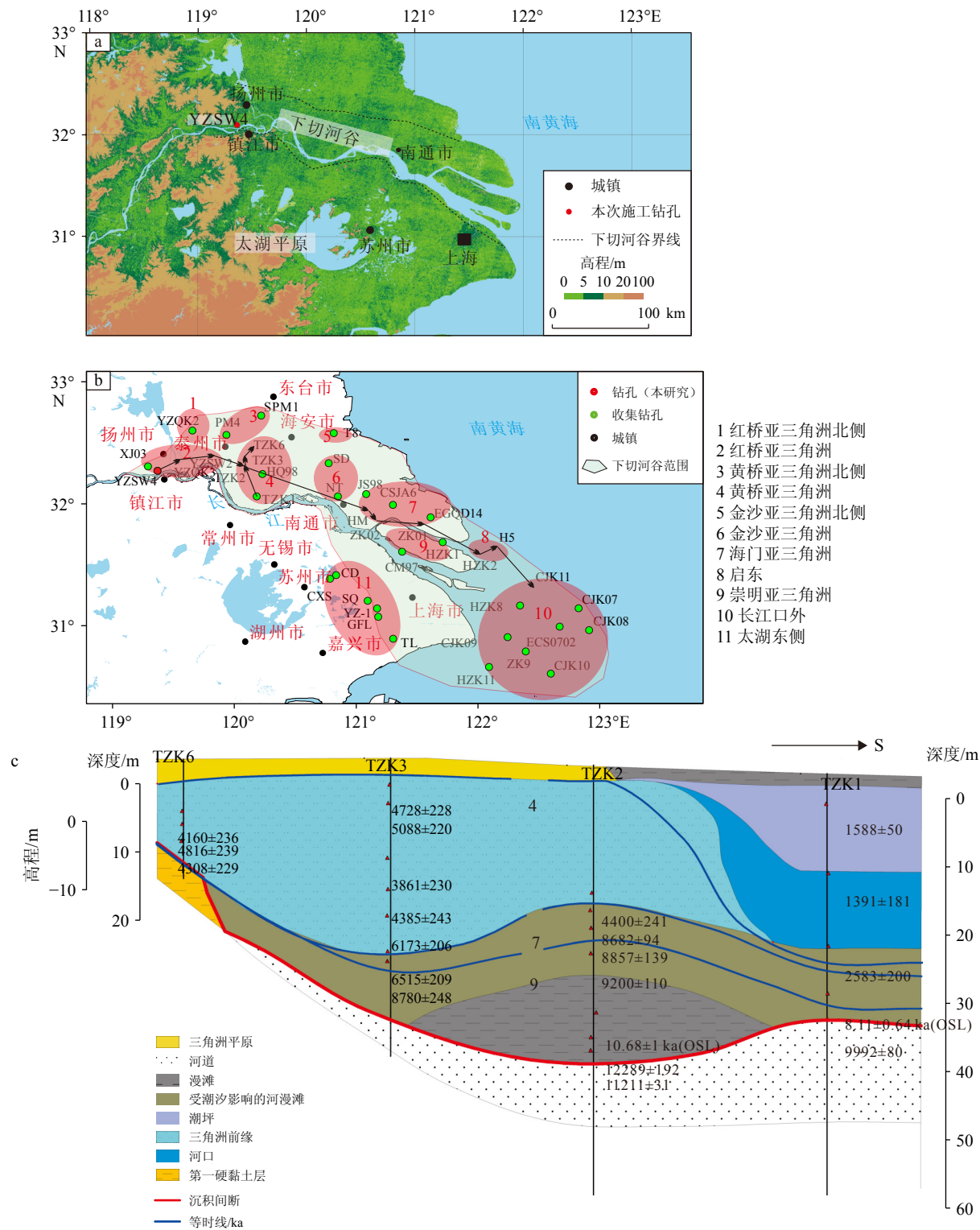


图 1 长江三角洲下切河谷钻孔位置及联合剖面 (N-S)

a: 长江三角洲下切河谷地形图, b: 钻孔分布图, c: 北南向 (N-S) 联合剖面图。图中数据为年龄, 单位为 cal.aBP。

Fig.1 The location of cores in the incised valley of the Yangtze River Delta

a: Topographic map of the incised valley zone of the Yangtze River Delta, b: the locations of the cores distributed in the incised valley of the Yangtze River Delta, c: the north-south (N-S) inter-well joint section along the incised-valley axis. The data in the figure represents age, the unit of age is cal.aBP.

试, 将沉积物用超纯水溶解打散, 过 40 目筛, 烘干后选取直径较大的植物碎片、贝壳送往波兰 AMS¹⁴C 实验室进行测年(表 1)。常规放射性年龄

使用 1 sigma 的概率, 对海相贝壳和植物碎片分别使用 Marine 20 和 Intcal 20 校正数据集进行日历年龄的校正^[27]。海洋“碳库效应”校正(△)参考台湾

表 1 YZSW4 孔 AMS ¹⁴C 年龄
Table 1 The AMS ¹⁴C ages dated from core YZSW4

样品编号	深度/m	高程/m	测年材料	AMS ¹⁴ C (1σ)/a BP	日历校正年龄/cal.aBP	
					2σ 范围	中间值
YZSW4-1	7.04	-0.35	植物碎片	2835±30	3008~2858	2933
YZSW4-2	14.32	-7.63	植物碎片	3085±30	3372~3216	3294
YZSW4-3	24.85	-18.16	植物碎片	2900±30	3160~2955	3058
YZSW4-4	25.45	-18.76	贝壳	5250±30	5767~5011	5389
YZSW4-5	27.05	-20.36	贝壳	4555±35	4956~4143	4550
YZSW4-6	27.25	-20.56	贝壳	4360±35	4731~3889	4310
YZSW4-7	28.83	-22.14	贝壳	4915±35	5420~4630	5025
YZSW4-8	35.34	-28.65	植物碎片	8670±50	9771~9537	9654
YZSW4-9	37	-30.31	植物碎片	8050±50	9033~8722	8878
YZSW4-10	46.2	-39.51	植物碎片	9420±50	10774~10506	10640

和青岛的加权平均值 $-85\pm58^{[28-29]}$ 。研究中,所有年代的校正结果,采用中位数及 2σ 区间表示,BP的现代时间起算点为1950 AD。

由于三角洲下切河谷地区受到潮流和径流的共同影响,水动力强,单个钻孔的沉积地层往往不连续,测年材料(贝壳、植物碎片)容易发生侵蚀再沉积,导致钻孔 YZSW4 的¹⁴C 年龄局部存在倒转现象。使用线性内插计算沉积物年龄时,去除¹⁴C 年龄为 2900 ± 30 BP、 5250 ± 30 BP、 4555 ± 35 BP、 8670 ± 50 BP 的数据。

2.2 粒度分析

粒度是沉积物的属性之一,记录了水动力条件与沉积环境等综合信息。粒度分析采用 Mastersizer 2000 激光粒度仪,测试在南京大学海岸与海岛开发实验室完成。共有 54 件样品进行了粒度分析。粒度样品前处理方法的步骤:根据样品的成分及粒径,称取 0.1~0.3 g 样品放入离心管,先使用 10% 的双氧水去除有机质组分,再加入适量浓度为 10% 的盐酸除去样品中的碳酸盐组分,给离心管注满蒸馏水并离心抽去蒸馏水,将溶液洗至中性,加入 10 mL 浓度 0.05 mol/L 的六偏磷酸钠,并用超声波清洗机振荡 10 min 后上机测试,最后计算黏土($<4\ \mu\text{m}$)、粉砂($4\sim63\ \mu\text{m}$)和砂质($>63\ \mu\text{m}$)的含量。

2.3 海岸线和古高程图绘制

利用本次钻孔的分析测试结果,并结合收集钻孔、剖面的位置、高程、年代等基本信息(图 1b,表 2),

建立高程-年龄-沉积相等基本属性的数据集,所有钻孔均有较详细的测年信息,将收集的 AMS¹⁴C 年龄用同样的方法进行日历年龄的校正,收集钻孔的光释光年龄使用来源文献中的年龄。将收集的高程均校正为 1985 国家高程基准,收集钻孔的高程使用文献中的精度。全新世以来,长江三角洲的新构造运动升降幅度尚未有精确的数据,此次研究不考虑新构造运动的影响。古高程的计算方法如下:根据测试年龄的线性内插计算出每个钻孔在 11.0、10.0、9.0、8.0、7.0、6.0、5.0、4.0、3.0、2.0、1.0 ka 的高程,再减去长江三角洲的古海平面高度^[5],其中 11.0、10.0、9.0、8.0、7.0 ka 的古海平面高度分别为 -38 、 -29 、 -22 、 -6 、 $0\ \text{m}$,由于 7.0 ka 以后海平面的高度变化幅度较小且难以准确量化,本研究中将其 7.0 ka 及以后的古海平面设为 $0\ \text{m}$ 。根据 arcgis 中的反距离权重法获得各个时期的古高程变化图,考虑到古地形的影响,在 Corldraw 软件中对局部区域的古高程变化进行修正,绘制 11.0 ka 以来千年尺度的古地图以及海岸线变迁图。

全新世以来太湖平原的大部分区域以湖沼相沉积为主,仅太湖平原的北部和东部遭受了海侵,其物源来自长江。在绘制古地图时,参考陈艇^[30]文章中 7 500 a 海岸线的位置,将 CD、CXS、SQ 的东侧,GFL、TL 的西侧作为长江三角洲下切河谷的南边界。苏北平原的海岸线参考贝壳堤的位置和年龄^[7,31]。根据钻孔的地理位置和沉积特征,在讨论时将钻孔自西向东分为红桥亚三角洲北侧、红桥亚三角洲、黄桥亚三角洲北侧、黄桥亚三角洲、金沙

表 2 长江三角洲下切河谷钻孔基本信息

Table 2 The basic information of cores in the incised valley of the Yangtze River delta

钻孔号	位置	高程/m	资料来源	钻孔号	位置	高程/m	资料来源
YZSW4	32.2575°N、119.3752°E	6.691	本研究	CJK09	30.91°N、122.25°E	-11	
YZQK2	32.6089°N、119.6606°E	3.32		CJK11	31.33°N、122.45°E	-21	[14]
YZQK3	32.3717°N、119.5511°E	4.58	[5]	CJK10	30.61°N、122.6°E	-25.3	
YZSW2	32.4047°N、119.8214°E	9.91		H5	31.6567°N、122.15°E	-6.11	[16]
TZK6	32.45°N、120.1333°E	5.531		ECS0702	31°N、122.67°E	-22	[13]
TZK2	32.3167°N、120.0833°E	4.63	[21]	CSJA6	32°N、120.3°E	5	[37]
TZK1	32.0667°N、120.1833°E	3.349		HZK2	31.6236°N、122.007°E	-5	[38]
SPM1	32.7275°N、120.2197°E	5.535	[6]	HZK8	31.1728°N、122.348°E	-5	
PM4	32.5667°N、119.9333°E	1.758	[32]	HZK11	30.6667°N、122.095°E	-11	[22]
TZK3	32.3833°N、120.0833°E	5.687	[33]	EGQD14	31.8932°N、121.617°E	3	[19]
XJ03	32.3097°N、119.29556°E	4.8	[34]	NT	32.0657°N、120.8567°E	3.99	
HQ98	32.25°N、120.2333°E	5.91		HZK1	31.6906°N、121.7134°E	-5	[39]
CM97	31.6167°N、121.3833°E	2.48	[11]	HM	31.957°N、121.0928°E	3.36	[17]
JS98	32.0833°N、121.0833°E	4.2		CD	31.4044°N、120.844°E	2	
ZK01	31.8406°N、121.5567°E	2.05		CXS	31.3789°N、120.792°E	2	[40]
ZK02	31.8797°N、121.1583°E	2.33	[15]	SQ	31.1972°N、121.107°E	2	[41]
SD	32.3383°N、120.7792°E	4.87	[18]	GFL	31.0644°N、121.192°E	1.4	[42]
CJK07	31.15°N、122.4°E	-45.4	[14]	TL	30.8867°N、121.312°E	2	[41]
CJK08	30.97°N、122.92°E	-41	[35]	YZ-1	31.13361°N、121.1839°E	0.717	[43]
ZK9	30.8°N、122.4°E	-12.5	[36]	T8	32.5833°N、120.817°E	6.5	[44]

亚三角洲北侧、金沙亚三角洲、海门亚三角洲、崇明亚三角洲、启东、长江口外、太湖东侧等 11 个地理区。

3 结果与讨论

3.1 YZSW4 沉积相划分

根据沉积特征、AMS¹⁴C 年龄、粒度的分布特征, YZSW4 孔的沉积特征自下而上可分为以下 4 个沉积单元(图 2、图 3):

83.3~73.48 m: 紫色中细粒砂岩(图 2l), 为白垩纪赤山组^[23]。

73.48~34.8 m(?~9.3 ka): 以灰色细砂、中砂为主, 含有少量砾石(图 2g-k), 砾石粒径以 2~4 mm 为主, 局部段见 1~3 cm 的砾石, 表明该时期水动力较强, 自下而上中值粒径、黏土含量、粉砂含量、砂质含量的变化范围较大, 分别为 72.3~277.0 μm、

1.4%~10.3%、10.1%~34.9%、55.9%~88.5%。46.2 m 的日历校正年龄为 10640 ± 134 cal.aBP, 该段沉积物的形成时间为末次冰期至全新世早期, 为河床相沉积。

34.8~16.3 m(9.3~3.0 ka): 以灰色粉砂、细砂为主(图 2d-f), 质纯, 含大量云母碎片, 自下而上中值粒径、黏土含量、粉砂含量、砂质含量的变化范围较大, 分别为 67.0~228.8 μm、1.0%~7.3%、10.6%~38.6%、56.2%~87.7%。25.45、27.05、27.25、28.83 m 处贝壳的日历校正年龄分别为 5389±378、4550±406、4310±421、5025±395 cal.aBP, 表明该时期为快速堆积期, 水动力较强, 为三角洲前缘相。

16.3~0 m(3.0~0 ka): 以灰色黏土与粉砂互层为主(图 2a-c), 潮汐层理发育, 中值粒径、砂质含量自下而上逐渐下降, 变化范围分别为 105.7~10.9 μm、78.9%~1.7%, 黏土含量、粉砂含量自下而上逐渐增加, 变化范围为 3.3%~18.7%、17.7%~80.7%, 表明水动力逐渐减弱。7.04 m 和 14.32 m 的日历校正年

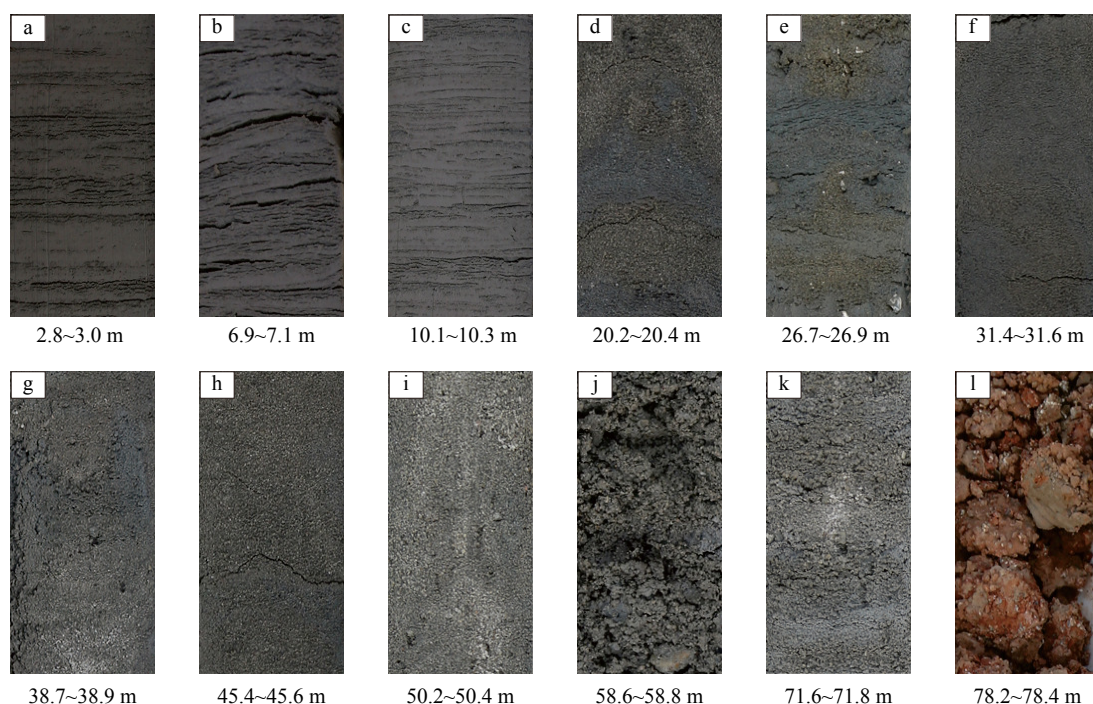


图 2 钻孔 YZSW4 典型沉积相照片

a: 灰黑色黏土与粉砂互层,发育潮汐层理,呈“千层饼”构造;b: 灰色黏土与粉砂互层,发育潮汐层理,呈“千层饼”构造;c: 灰色黏土与粉砂互层,发育潮汐层理,呈“千层饼”构造;d: 灰色细砂;e: 灰色细砂,含大量贝壳;f: 灰色细砂;g: 灰色中粗砂;h: 灰色粗砂;i: 灰色砂砾层;j: 灰色砂砾层;k: 灰色砂砾层;l: 紫色中细粒砂岩。

Fig.2 Photographs of representative sedimentary facies of core YZSW4

a: Grayish-black silt and clay interbedded, characterized by parallel bedding, bedding together with clay-silt couplets; b: gray silt and clay interbedded, characterized by parallel bedding, bedding together with clay-silt couplets; c: gray silt and clay, characterized by parallel bedding, bedding together with clay-silt couplets; d: gray fine-grained sand; e: gray fine-grained sand, consisting of a large number of shells; f: gray fine-grained sand; g: gray medium-coarse-grained sand; h: gray coarse-grained sand; i: gray sandy gravel; j: gray sandy gravel; k: gray sandy gravel; l: purple medium fine-grained sandstone.

龄分别为 $2933 \pm 75 \text{ cal.aBP}$ 和 $3294 \pm 78 \text{ cal.aBP}$, 该钻孔位于长江沿江一带,在全新世晚期受到潮汐作用的影响,为潮坪相,与泰州沿江一带 TZK1 孔在该时期的沉积环境一致^[21]。

3.2 全新世以来红桥、黄桥亚三角洲的沉积速率

全新世以来,红桥亚三角洲和黄桥亚三角洲的沉积速率呈现高-低-高-低的特征(图 4、图 5,表 3)。

11.0~9.0 ka,红桥亚三角洲和黄桥亚三角洲北侧的沉积环境为陆相,沉积速率为 $0.30 \sim 1.20 \text{ mm/a}$,沙坝主体沉积环境为河流及潮汐河流,平均沉积速率为 5.4 mm/a ,位于红桥亚三角洲的 YZSW4、YZQK3、YZSW2、XJ03 钻孔沉积速率较高,分别为 5.2、3.3、13.2、4.0 mm/a,黄桥亚三角洲 TZK2、TZK3、HQ98 的沉积速率分别为 8.2、4.1、7.5 mm/a。

9.0~7.0 ka,红桥亚三角洲和黄桥亚三角洲北侧的沉积环境为盐沼和湖相,沉积速率为 $0.4 \sim 5.1 \text{ mm/a}$ 。沙坝主体沉积环境为河口湾,遭受了强烈的侵蚀作用,沉积速率较低,红桥和黄桥的平均

沉积速率分别 2.2 、 1.7 mm/a 。红桥沙坝 XJ03 (19.2 m)、黄桥砂坝的 TZK2 (20.8 m)、HQ98 (29 m) 孔均发育侵蚀面,分别缺失 $8.7 \sim 7.3 \text{ ka}$ 、 $8.7 \sim 4.4 \text{ ka}$ 、 $8.9 \sim 7.5 \text{ ka}$ 的地层,上覆地层为分选较好的砂层,含有大量有孔虫,为三角洲前缘相。YZQK3 孔、YZSW2、TZK3、YZSW4 孔虽无明显的侵蚀面,但分别在 $10.8 \sim 7.1$ 、 $8.0 \sim 4.2$ 、 $8.8 \sim 6.6$ 、 $9.6 \sim 5.0 \text{ ka}$ 的沉积速率均较低,分别为 $1.6 \sim 1.8$ 、 $1.6 \sim 1.8$ 、 1.3 、 1.4 mm/a 。

7.0~4.0 ka,亚三角洲北侧的沉积环境为湖相、盐沼、潮上带,沉积速率为 $0.3 \sim 0.6 \text{ mm/a}$,亚三角洲主体沉积环境为三角洲前缘,该时期为黄桥砂体和红桥砂体的主要形成时期,沉积速率较高,平均为 5.5 mm/a 。

4.0~0 ka,黄桥和红桥亚三角洲北侧的沉积环境为陆相、潟湖,沉积速率为 $0.3 \sim 0.6 \text{ mm/a}$,亚三角洲的主体出露地表,发育三角洲平原。沿江一带(YZSW4 和 TZK1)的沉积速率较高,分别为 5.6 和 6.8 mm/a 。

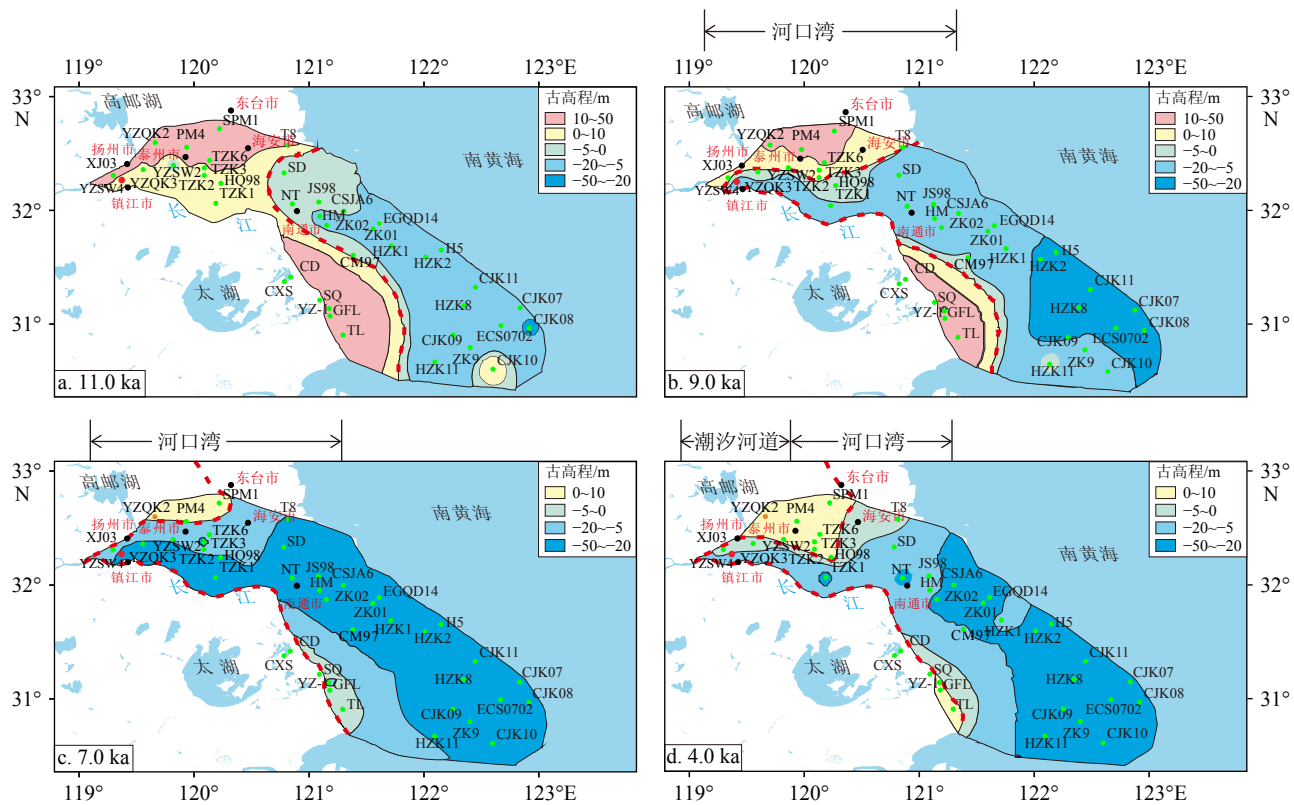


图 5 长江三角洲下切河谷 11.0、9.0、7.0、4.0 ka 古地理图
红色虚线为海岸线。

Fig.5 The paleotopography of the Yangtze River Delta in 11.0, 9.0, 7.0, 4.0 ka
Red dashed line represent the coastline.

表 3 黄桥亚三角洲、红桥亚三角洲全新世以来的沉积环境和沉积速率

Table 3 Sedimentary environment and sedimentation rate of Huangqiao body and Hongqiao body since the Holocene

位置	钻孔号	11.0~9.0 ka		9~7 ka		7~4 ka		4~0 ka	
		沉积速率	沉积环境	沉积速率	沉积环境	沉积速率	沉积环境	沉积速率	沉积环境
红桥亚三角洲	YZQK2	0.50	陆相	5.10	盐沼	0.30	陆相	0.30	陆相
	YZSW4	5.20	河床相	2.30	河口湾	3.60	三角洲前缘	5.60	三角洲平原
	YZQK3	3.30	盐沼	1.70	河口湾	7.30	三角洲前缘	1.70	三角洲平原
	YZSW2	13.20	潮汐河道	3.00	河口湾	6.40	三角洲前缘	1.20	三角洲平原
黄桥亚三角洲北侧	XJ03	4.00	河漫滩、潮汐河道	1.90	河口湾	3.70	三角洲前缘	1.80	三角洲平原
	SPM1	1.20	陆相	1.20	湖相	0.60	湖相、盐沼、潮上带	0.60	泻湖、湖相
黄桥亚三角洲主体	PM4	0.30	陆相	0.30	湖相	0.40	盐沼、湖相	0.20	潮上带、河漫滩、湖相
	TZK6	0.30	河漫滩	0.30	河漫滩	2.40	三角洲前缘	1.00	三角洲平原
	TZK2	8.20	河漫滩、潮汐河道	2.50	河口湾	6.00	三角洲前缘	0.70	三角洲平原
	HQ98	7.50	河漫滩、潮汐河道	2.00	河口湾	7.50	三角洲前缘	1.05	三角洲平原
	TZK3	4.10	河床相、潮汐河道	1.60	河口湾	9.00	三角洲前缘	0.70	三角洲平原
沿江	TZK1	2.70	河床、潮汐河道	1.90	河口湾	1.30	河口湾	6.80	潮汐河道
亚三角洲主体及沿江平均值		4.21		1.98		4.04		1.80	

注: 沉积速率单位为mm/a。

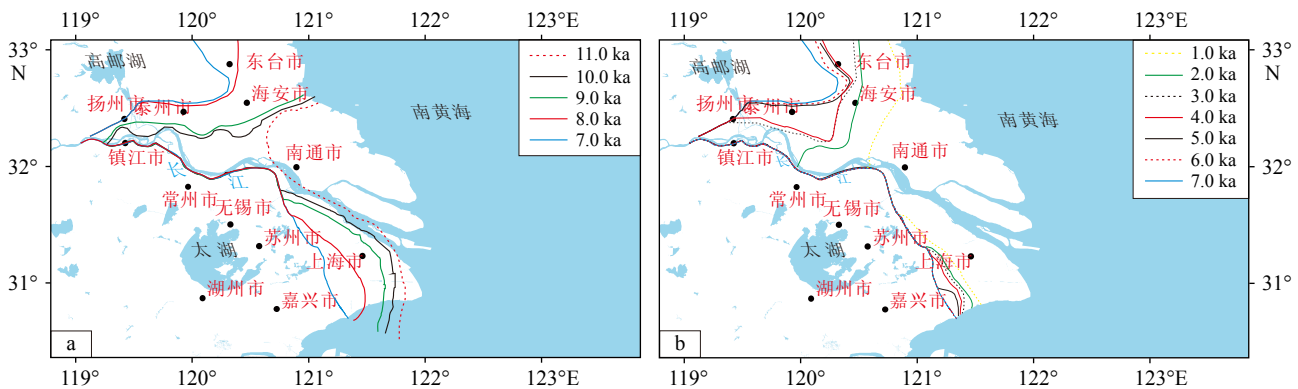


图6 长江三角洲全新世以来千年尺度海岸线变化

Fig.6 The coastline change in Yangtze River Delta since 11.0 ka (transgression)

粉砂质泥互层,有孔虫组合为沿岸浅水种^[17],启东HZK2、H5,海门亚三角洲ZK01、ZK02,长江口外CJK09、ZK9、CJK11、ECS0702在该时期为河口湾^[13-15,35-36],长江口外CJK10受古地貌的影响,在该时期的沉积相为河漫滩相,古高程为5.5 m;太湖东侧该时期均为陆相沉积,古高程为24.3~39.3 m。

至9.0 ka时,长江三角洲的海平面高度约为-22 m^[5],海岸线向西向北迁移,海侵范围进一步扩大,形成以扬州-镇江为顶点的河口湾(图5b、图6)。扬州-泰州-海安北部(YZQK2、PM4、SPM1、TZK6)的古高程大于10 m,最大达21.2 m。向南部的古高程逐渐降低,红桥沙坝的XJ03、YZSW2的古高程分别为4.9和2.1 m,其他区域均受到海洋不同程度的影响,海水深度向南向东逐渐增加。黄桥亚三角洲和金沙亚三角洲地区的海水深度为5~20 m,现代长江河口大部分区域的海水深度为20~50 m。太湖东侧该时期均为陆相沉积,古高程为8.6~23.3 m。9.0 ka,长江口位于扬州-镇江一带,在平面上呈喇叭形,外宽内窄,从湾外向湾顶高潮位抬高,低潮位下降,潮差逐渐增加,湾顶的潮差最强,类似现今的杭州湾^[45]。9.0~7.0 ka,由于南部镇江基岩、扬州西部丘陵岗地的束缚,海岸线难以向西迁移,缓慢地向北移动,平均潮差与平均海平面呈正相关关系^[46],海平面快速上升,平均潮差也逐渐增加,形成强潮型的河口湾,湾顶区沉积速率较低、部分区域较老的沉积物被强烈的潮流作用所侵蚀,形成侵蚀面,潮汐流将细颗粒带到远离湾顶的海安一带,形成潮流沙脊(JS98、SD、HM)、河口湾和前三三角洲沉积(CJK11、CJK07、CJK08)。

7.0 ka时,为长江三角洲最大海泛面时期(图5c、图6a),其后,海平面逐渐趋于稳定,落潮流速大于涨潮流速,涨潮时主流偏南,落潮时主流偏北,有利于泥砂在中间缓流区淤积。在长江径流和落潮流

的共同作用下,红桥沙坝和黄桥沙坝逐渐开始形成。红桥沙坝的YZSW4、YZQK3、YZSW2、XJ03孔分别于9.3、6.0、5.5、7.4 ka发育三角洲前缘相,黄桥沙坝的TZK3、HQ98、TZK2分别于6.9、7.5、4.3 ka发育三角洲前缘相,于4.3 ka扩张至最北端的TZK6孔,河口和浅滩沉积的泥砂厚度逐渐增加,黄桥砂体和红桥砂体在7.6~4.0 ka快速堆积,海水逐渐变浅,砂体于4.0 ka左右逐渐出露地表(图5d、图6b)。表明红桥沙坝和黄桥沙坝是同时形成的,而不是相互衔接,性质为潮成沙坝^[21,33],形成时间约为7.6~4.0 ka。

3.4 全新世以来长江三角洲的演化及控制因素

综合多个钻孔的AMS¹⁴C、OSL、岩性、沉积构造、有孔虫等特征,长江三角洲下切河谷的演化可分为5个阶段,分别为11.0~9.0、9.0~7.0、7.0~4.0、4.0~2.0、2.0~0 ka(图7、图8、表4)。

11.0~9.0 ka,海平面从-38 m上升至-22 m,平均上升速率为9 mm/a,11.0 ka海岸线位于南通—海安一带,此后海岸线逐渐向西迁移,下覆地层为末次冰期河床相的砂砾层。至10.0 ka,海水沿着下切河谷影响到扬州-泰州一带,形成潮汐河道,在沿江一带形成灰色黏土、黏土与黏土质粉砂的受潮汐影响的河漫滩和盐沼沉积(YZSW2、YZQK3、TZK1),古地势较高的地区则发育河漫滩沉积(XJ03、HQ98、TZK3、TZK6)。海安—南通一带在该时期为受潮汐影响的河漫滩、河口湾,HM孔岩性为泥砂互层,见贝壳碎屑与完整螺壳,开始出现有孔虫,属种单一且丰度低,以沿岸低盐浅水种为主^[17],HM南侧的ZK02孔,该时期岩性为砾质粗砂和青灰色细砂质中砂、粉砂质砂,ZK01为黏土夹砂质粉砂、粉砂质细砂^[47],发育潮汐层理。长兴岛上的CX03孔在该时期为潮坪相、河口湾相^[48];长江口外的CJK11、

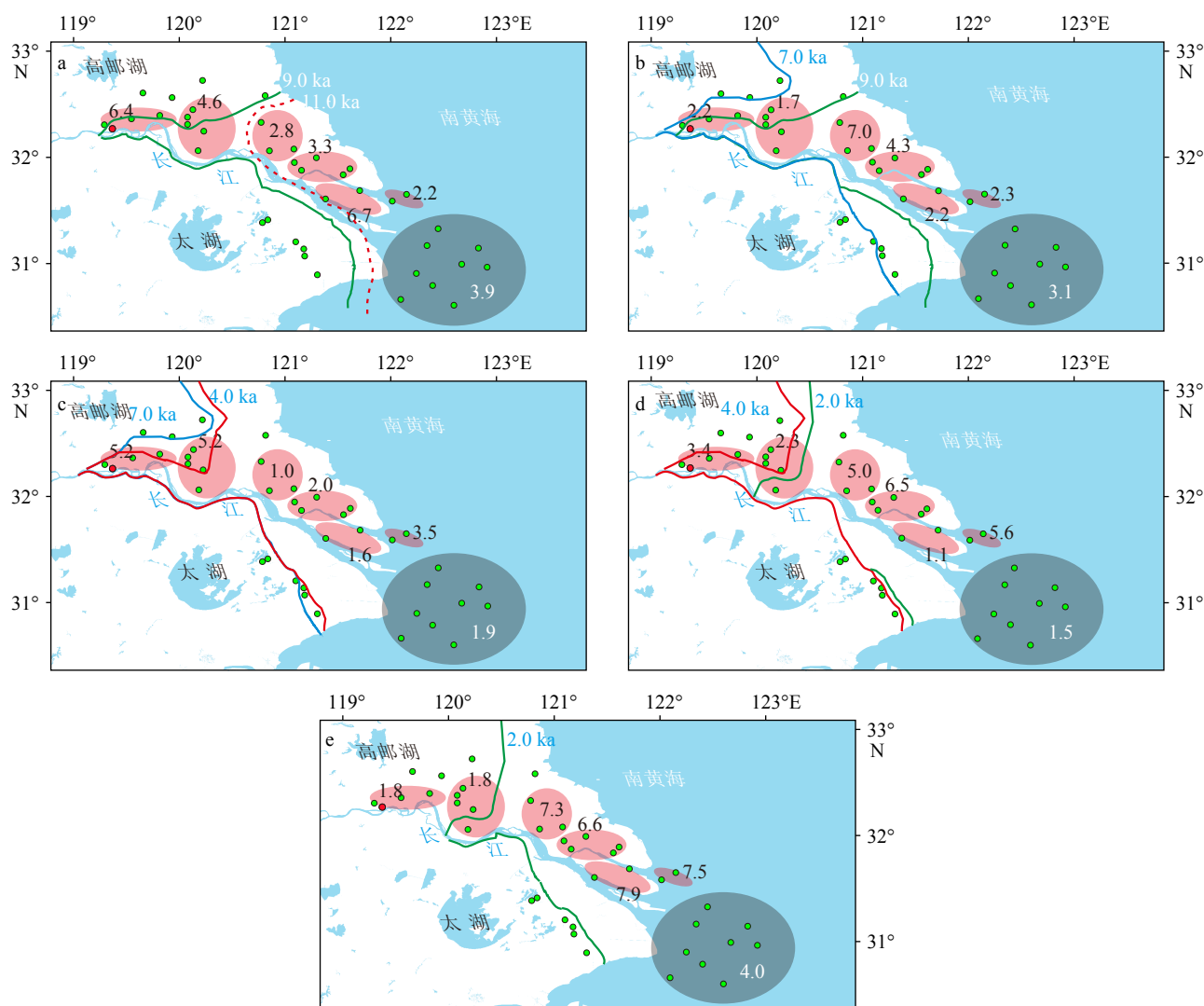


图 7 全新世以来长江三角洲不同区域的平均沉积速率和岸线变迁

a、b、c、d、e 分别显示 11.0~9.0、9.0~7.0、7.0~4.0、4.0~2.0 和 2.0~0 ka 的沉积速率及岸线。沉积速率单位为 mm/a。

Fig.7 Average sedimentation rate and shoreline changes in different regions of the Yangtze River Delta

a, b, c, d, e show sedimentation rate and shoreline of 11.0~9.0, 9.0~7.0, 7.0~4.0, 4.0~2.0, and 2.0~0 ka, respectively.

The unit of sedimentation rate is mm/a.

ECS0702、CJK08、CJK09、ZK9 在该时期以黏土、粉砂互层的潮坪为主, 夹潮下带、潮道砂质沉积。自口外至湾顶总能量先增加后降低, 沉积物呈现细-粗-细的分布模式。大量沉积物在古河口附近堆积下来, 口外至湾顶的沉积速率呈现低-高-低-高的变化特征(图 7a)。

9.0~7.0 ka, 海平面从-22 m 上升至现今高度, 海平面上升速率达 11 mm/a, 至 9.0 ka, 就形成了以扬州-镇江为顶点的古河口湾, 由于过水断面面积较小, 地形对潮流的束狭作用, 潮差在湾内达到最大值, 沉积物难以保存下来, 扬州-泰州一带的沉积速率低。海安-南通一带在该时期为潮流沙脊、河口湾, 金沙的 SD 孔发育潮流沙脊, 海门期 HM 孔岩

性为灰色砂泥, 见贝壳碎屑, 少见有孔虫, Sr/Ba 值却达到全孔最高, 海侵程度最强, 为潮流沙脊^[17]; HM 南侧的 ZK02 孔, 该时期岩性为灰色粉砂质砂与黏土, ZK01 为黏土夹砂质粉砂、粉砂质细砂^[14], 为河口湾相。长兴岛上的 CX03 孔在该时期为河口湾、浅海相^[48]; 长江口外 CJK11、ECS0702、CJK07、CJK08、CJK09、ZK9 在该时期为黏土夹较多的粉砂薄层, 为河口湾相^[14]。自口外至湾顶总能量先增加后降低, 沉积物呈现细-粗-细的分布模式, CJK07、CJK08、CRE-1402 缺失 7.5、6.7、6.7 ka 以后的地层。沉积物主要在远离湾顶区南通一带堆积, 口外至湾顶的沉积速率呈现低-高-低的变化特征(图 7b)。

7.6~4.0 ka, 海平面在宏观上保持稳定, 在扬

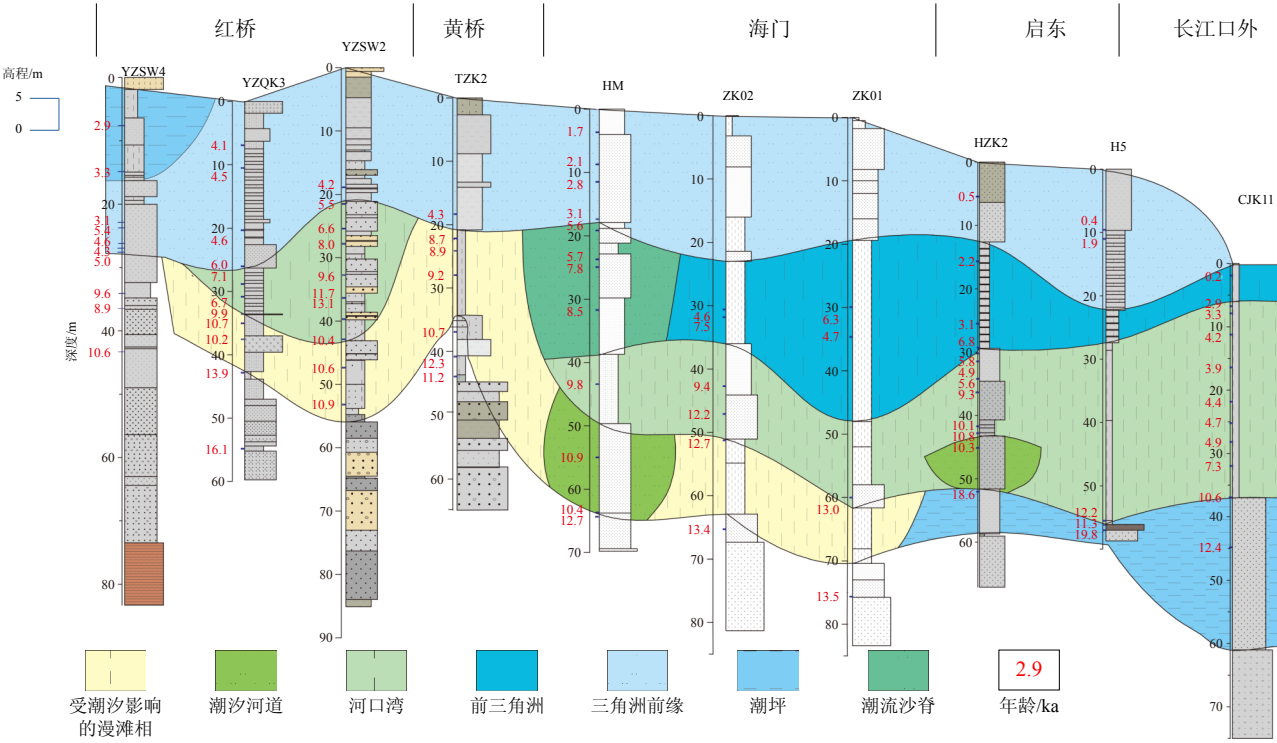


图 8 长江三角洲东西向联合剖面
钻孔位置图见图 1b。

Fig.8 West-east inter-well stratigraphic sections showing lithology, sedimentary facies, and age distribution in the Yangtze River Delta
See Fig.1b for the location of the boreholes.

表 4 长江三角洲不同区域的平均沉积速率

Table 4 Average sedimentation rate in different regions of the Yangtze River Delta

位置	年代/ka				
	11.0~9.0	9.0~7.0	7.0~4.0	4.0~2.0	2.0~0
红桥三角洲	6.4	2.2	5.2	3.4	1.8
黄桥三角洲	4.6	1.7	5.2	2.3	1.8
金沙三角洲	2.8	7.0	1.0	5.0	7.3
海门三角洲	3.3	4.3	2.0	6.5	6.6
崇明三角洲	6.7	2.2	1.6	1.1	7.9
启东	2.2	2.3	3.5	5.6	7.5
长江口外	3.9	3.1	1.9	1.5	4.0
太湖东侧	0.0	0.6	0.3	0.4	0.3

州、泰兴地区沉积细砂 (YZQK3、YZSW2、XJ03、TZK2、TZK3、HQ98)，形成黄桥沙坝和红桥沙坝，HM 孔为潮流沙脊；HM 南侧的 ZK02 孔，发育黏土与粉砂不等厚互层，局部夹细砂，“千层饼”构造，ZK01 泥质黏土夹细砂、粉砂薄层和团，该时期为浅海相，长兴岛上的 CX03 孔在该时期为浅海相^[48]；长江口外 CJK11、ECS0702、CJK09、ZK9 在该时期为

黏土夹较多的粉砂薄层，为河口湾相^[14]，自口外至湾顶总能量增加，沉积物呈现细-粗的分布模式。大量沉积物在古河口附近堆积下来，口外至湾顶的沉积速率呈现低-高的变化特征 (图 7c)。

4.0~2.0 ka，黄桥沙坝和红桥沙坝逐渐出露地表，长江古河口退至泰州东侧，黄桥沙坝、红桥沙坝南侧为潮汐河流，发育粉砂与黏土互层的潮坪相沉积 (TZK1、YZSW4)。金沙以南-长江口地区，在前三三角洲泥质沉积之上开始发育砂质均匀的三角洲前缘相，在金沙-海门一带形成河口沙坝，金沙 SD 在 1.6 ka、NT 在 1.4 ka、JS98 在 2.8 ka、海门 HM 在 3.1 ka、启东 HZK2 在 2.2 ka、崇明 CM97 在 1.8 ka 开始发育三角洲前缘相，长兴岛上的 CX03 孔在该时期为河口沙坝^[48]；长江口外 HZK2、H5、CJK11、ECS0702、CJK09、ZK9 在该时期为黏土夹较多的粉砂薄层，为河口湾相，自口外至湾顶总能量增加，沉积物呈现细-粗的分布模式。金沙期、海门期、崇明期、长兴期的沙坝并不是先后形成、依次排列的，长兴期在 4.6 ka 以后开始发育，金沙期、海门期在 3.1 ka 以后开始形成，于 1.0 ka 逐渐出露地表，崇明在 1.8 ka 以后开始发育^[48]。大量沉积物在古河口附近堆积下来，口外至湾顶的沉积速率呈现高-低的

变化特征。

4 结论

(1) 长江三角洲顶端 YZSW4 孔全新世以来自下而上的沉积环境分别为河床相($? \sim 9.3$ ka)、三角洲前缘相($9.3 \sim 3.0$ ka)、潮坪相($3.0 \sim 0$ ka)。

(2) 红桥亚三角洲和黄桥亚三角洲在 $11.0 \sim 9.0$ 、 $9.0 \sim 7.0$ 、 $7.0 \sim 4.0$ 、 $4.0 \sim 0$ ka 4 个阶段的沉积环境为潮汐河道、河口湾、三角洲前缘、三角洲平原, 沉积速率呈现高-低-高-低的特征, 平均沉积速率分别为 4.21、1.98、4.04、1.80 mm/a。红桥、黄桥沙坝并不是按照形成的先后相互衔接的, 而是同时形成的, 主体形成时间为 $7.6 \sim 4.0$ ka。

(3) 长江三角洲的演化可分为 5 个阶段: $11.0 \sim 9.0$ ka, 自口外至湾顶总能量先增加后降低, 沉积物呈现细-粗-细的分布模式, 口外至湾顶的沉积速率呈现低-高-低-高的变化特征; $9.0 \sim 7.0$ ka, 自口外至湾顶总能量先增加后降低, 沉积物呈现细-粗-细的分布模式, 口外至湾顶的沉积速率呈现低-高-低-高的变化特征; $7.0 \sim 4.0$ ka, 自口外至湾顶总能量增加, 沉积物呈现细-粗的分布模式, 口外至湾顶的沉积速率呈现低-高的变化特征; $4.0 \sim 2.0$ ka, 自口外至湾顶总能量增加, 沉积物呈现细-粗的分布模式, 口外至湾顶的沉积速率呈现低-高-低-高的变化特征; $2.0 \sim 0$ ka, 口外至湾顶的沉积速率呈现高-低-高的变化特征。

(4) 全新世以来, 长江三角洲的堆积作用受控于古河口的位置、轮廓形状及海平面变化, $11.0 \sim 9.0$ ka, 海平面快速上升, 大量沉积物在古河口附近堆积下来; $9.0 \sim 7.0$ ka, 为强潮型的河口湾, 沉积物在远离湾顶的南通一带堆积; 7.0 ka 以后, 海平面趋于稳定, 在古河口附近堆积。

参考文献 (References)

- [1] Fox-Kemper B, Hewitt H T, Xiao C D, et al. Ocean, cryosphere and sea level change[R]. Cambridge: Cambridge University Press, 2023: 1211-1362.
- [2] Stanley D J, Warne A G. Nile delta in its destruction phase[J]. Journal of Coastal Research, 1998, 14(3): 794-825.
- [3] Coleman J M, Roberts H H, Stone G W. Mississippi river delta: an overview[J]. Journal of Coastal Research, 1998, 14(3): 698-716.
- [4] Chu Z X, Sun X G, Zhai S K, et al. Changing pattern of accretion/erosion of the modern Yellow River (Huanghe) subaerial delta, China: based on remote sensing images[J]. Marine Geology, 2006, 227(1-2): 13-30.
- [5] Cheng Y, Xu S Y, Luo D, et al. Early-mid Holocene relative sea-level rise in the Yangtze River Delta, China[J]. Marine Geology, 2023, 465: 107170.
- [6] Cheng Y, Shu J W, Hao S F, et al. Mid- to late Holocene vegetation response to relative sea-level fluctuations recorded by multi-proxy evidence in the Subei Plain, eastern China[J]. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 2023, 610: 111327.
- [7] 朱诚, 程鹏, 卢春成, 等. 长江三角洲及苏北沿海地区 7000 年以来海岸线演变规律分析 [J]. 地理科学, 1996, 16(3): 207-213. [ZHU Cheng, CHENG Peng, LU Chunheng, et al. Analysis on the evolution of coastline in the Yangtze River Delta and northern Jiangsu plain since 7000 years[J]. Scientia Geographica Sinica, 1996, 16(3): 207-213.]
- [8] 同济大学海洋地质系三角洲科研组. 全新世长江三角洲的形成和发育 [J]. 科学通报, 1978, 23(5): 310-313. [Delta Research Group, Department of Marine Geology, Tongji University. Holocene formation and development of the Yangtze Delta[J]. Chinese Science Bulletin, 1978, 23(5): 310-313.]
- [9] 张忍顺. 苏北黄河三角洲及滨海平原的成陆过程 [J]. 地理学报, 1984, 39(2): 173-184. [ZHANG Renshun. Land-forming history of the Huanghe river delta and coastal plain of north Jiangsu[J]. Acta Geographica Sinica, 1984, 39(2): 173-184.]
- [10] 杨怀仁, 陈西庆. 中国东部第四纪海面升降、海侵海退与岸线变迁 [J]. 海洋地质与第四纪地质, 1985, 5(4): 59-79. [YANG Huairan, CHEN Xiqing. Quaternary transgressions, eustatic changes and shifting of shoreline in East China[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 1985, 5(4): 59-79.]
- [11] Hori K, Saito Y, Zhao Q H, et al. Sedimentary facies and Holocene progradation rates of the Changjiang (Yangtze) delta, China[J]. Geomorphology, 2001, 41: 233-248.
- [12] 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: 166080.
- [13] Liu J, Saito Y, Kong X H, et al. Sedimentary record of environmental evolution off the Yangtze River estuary, East China Sea, during the last-13,000 years, with special reference to the influence of the Yellow River on the Yangtze River delta during the last 600 years[J]. Quaternary Science Reviews, 2010, 29(17-18): 2424-2438.
- [14] Xu T Y, Wang G Q, Shi X F, et al. Sequence stratigraphy of the subaqueous Changjiang (Yangtze River) delta since the Last Glacial Maximum[J]. Sedimentary Geology, 2016, 331: 132-147.
- [15] Zhang X, Dalrymple R W, Lin C M. Facies and stratigraphic architecture of the late Pleistocene to early Holocene tide-dominated paleo-Changjiang (Yangtze River) delta[J]. GSA Bulletin, 2018, 130(3-4): 455-483.
- [16] Zhao B C, Yan X X, Wang Z H, et al. Sedimentary evolution of the Yangtze River mouth (East China Sea) over the past 19 000 years, with emphasis on the Holocene variations in coastal currents[J]. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 2018, 490: 431-449.
- [17] Jiang F, Wang Y N, Zhao X S, et al. Reconstruction of the Holocene sedimentary-ecological complex in the incised valley of the Yangtze

- Delta, China[J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2021, 571: 110387.
- [18] Nian X M, Zhang W G, Wang Z H, et al. Optical dating of Holocene sediments from the Yangtze River (Changjiang) Delta, China[J]. *Quaternary International*, 2018, 467: 251-263.
- [19] Gao L, Long H, Zhang P, et al. The sedimentary evolution of Yangtze River delta since MIS3: a new chronology evidence revealed by OSL dating[J]. *Quaternary Geochronology*, 2019, 49: 153-158.
- [20] Su J F, Fan D D, Liu J P, et al. Anatomy of the transgressive depositional system in a sediment-rich tide-dominated estuary: the paleo-Yangtze estuary, China[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2020, 121: 104588.
- [21] Cheng Y, Zou X Q, Li X Q, et al. Sedimentary characteristics and evolution process of the Huangqiao sand body in the Yangtze River Delta, China[J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2021, 254: 107330.
- [22] Wang Z H, Saito Y, Zhan Q, et al. Three-dimensional evolution of the Yangtze River mouth, China during the Holocene: impacts of sea level, climate and human activity[J]. *Earth-Science Reviews*, 2018, 185: 938-955.
- [23] 江苏省地质矿产局. 江苏省及上海市区域地质志 [M]. 北京: 地质出版社, 1984. [Jiangsu Geology & Mineral Exploration Bureau. Jiangsu Province and Shanghai Regional Geology[M]. Beijing: Geological Press, 1984.]
- [24] 朱永其, 李承伊, 曾成开, 等. 关于东海大陆架晚更新世最低海面 [J]. *科学通报*, 1979, 24(7): 317-320. [ZHU Yongqi, LI Chengyi, ZENG Chengkai, et al. On the lowest sea-level in the East China Sea during the Late Pleistocene[J]. *Chinese Science Bulletin*, 1979, 24(7): 317-320.]
- [25] 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. [LI Congxian, CHEN Qingqiang, FAN Daidu, et al. Palaeogeography and palaeoenvironment in Changjiang delta since last glaciation[J]. *Journal of Palaeogeography*, 1999, 1(4): 12-25.]
- [26] 李保华, 王强, 李从先. 长江三角洲亚三角洲地层结构对比 [J]. *古地理论*, 2010, 12(6): 685-698. [LI Baohua, WANG Qiang, LI Congxian. Correlation of stratigraphic architecture of sub-deltas of Changjiang River delta[J]. *Journal of Palaeogeography*, 2010, 12(6): 685-698.]
- [27] Reimer P J, Austin W E N, Bard E, et al. The IntCal20 northern hemisphere radiocarbon age calibration curve (0-55 cal kBP)[J]. *Radiocarbon*, 2020, 62(4): 725-757.
- [28] Southon J, Kashgarian M, Fontugne M, et al. Marine reservoir corrections for the Indian Ocean and Southeast Asia[J]. *Radiocarbon*, 2002, 44(1): 167-180.
- [29] Yoneda M, Uno H, Shibata Y, et al. Radiocarbon marine reservoir ages in the western Pacific estimated by pre-bomb molluscan shells[J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*, 2007, 259(1): 432-437.
- [30] 陈艇. 中晚全新世太湖平原南部水文环境变化及其对新石器文明发展的影响 [D]. 华东师范大学博士学位论文, 2017. [CHEN Ting. Mid- to late Holocene hydrology changes in the South Taihu area of the Yangtze delta plain, China, and its relationship to the development of Neolithic cultures[D]. Doctor Dissertation of East Normal University, 2017.]
- [31] Shu Q, Zhao Y F, Hu Z, et al. Multi-proxy reconstruction of the Holocene transition from a transgressive to regressive coastal evolution in the northern Jiangsu Plain, East China[J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2021, 572: 110405.
- [32] 程瑜, 李向前, 乔彦松, 等. 苏北平原沉积孢粉组合记录的全新世气候突变 [J]. *第四纪研究*, 2019, 39(3): 655-664. [CHENG Yu, LI Xiangqian, QIAO Yansong, et al. Abrupt climate changes recorded by palynological evidence in Subei Plain during the Holocene[J]. *Quaternary Sciences*, 2019, 39(3): 655-664.]
- [33] 程瑜, 李向前, 舒军武, 等. 末次冰期以来长江三角洲的沉积特征和环境演化 [J]. *第四纪研究*, 2018, 38(3): 746-755. [CHENG Yu, LI Xiangqian, SHU Junwu, et al. The formation and evolution of the Changjiang River delta since last Glacial[J]. *Quaternary Science*, 2018, 38(3): 746-755.]
- [34] 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.
- [35] Wang Z H, Li M T, Zhang R H, et al. Impacts of human activity on the late-Holocene development of the subaqueous Yangtze delta, China, as shown by magnetic properties and sediment accumulation rates[J]. *The Holocene*, 2011, 21(3): 393-407.
- [36] Wang Z H, Xu H, Zhan Q, et al. Lithological and palynological evidence of late Quaternary depositional environments in the subaqueous Yangtze delta, China[J]. *Quaternary Research*, 2010, 73(3): 550-562.
- [37] 于俊杰, 胡飞, 杨祝良, 等. 江苏南通市四甲镇全新世以来有孔虫动物群的发现及其地质意义 [J]. *地质通报*, 2014, 33(10): 1609-1620. [YU Junjie, HU Fei, YANG Zhuliang, et al. Identification of Holocene foraminifera assemblages in Sijia Town of Nantong City, Jiangsu Province, and its geological significance[J]. *Geological Bulletin of China*, 2014, 33(10): 1609-1620.]
- [38] 战庆, 王张华, 赵宝成, 等. 末次冰消期以来长江口沉积环境演化及沿岸流变化 [J]. *地球科学*, 2020, 45(7): 2697-2708. [ZHAN Qing, WANG Zhanghua, ZHAO Baocheng, et al. Sedimentary evolution and coastal currents variations of the Yangtze River mouth (East China Sea) since last Deglaciation[J]. *Earth Science*, 2020, 45(7): 2697-2708.]
- [39] 潘大东. 全新世长江口沉积记录中的陆海相互作用界面—河口锋的位置迁移及机制分析 [D]. 华东师范大学博士学位论文, 2017. [PAN Dadong. Migration of land-ocean interaction interface-estuarine front in Holocene sedimentary record of the Yangtze River mouth and its mechanism[D]. Doctor Dissertation of East Normal University, 2017.]
- [40] Zong Y Q, Wang Z H, Innes J B, et al. Holocene environmental change and Neolithic rice agriculture in the lower Yangtze region of China: a review[J]. *The Holocene*, 2012, 22(6): 623-635.
- [41] Zong Y Q, Innes J B, Wang Z H, et al. Mid-Holocene coastal hydrology and salinity changes in the East Taihu area of the lower Yangtze wetlands, China[J]. *Quaternary Research*, 2011, 76(1): 69-82.
- [42] Atahan P, Itzstein-Davey F, Taylor D, et al. Holocene-aged sedimentary records of environmental changes and early agriculture in the lower Yangtze, China[J]. *Quaternary Science Reviews*, 2008, 27(5-6): 556-

- 570.
- [43] Stanley D J, Warne A G. Sea level and initiation of Predynastic culture in the Nile delta[J]. *Nature*, 1993, 363(6428): 435-438.
- [44] 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: 29-66. [LI Congxian, WANG Pinxian. Late Quaternary Stratigraphy of Changjiang Delta[M]. Beijing: Science Press, 1998: 29-66.]
- [45] 潘存鸿, 郑君, 曾剑, 等. 杭州湾年最大潮差分析 [J]. 水动力学研究与进展, 2021, 36(2): 201-209. [PAN Cunhong, ZHENG Jun, ZENG Jian, et al. Analysis of annual maximum tidal range in Hangzhou Bay[J]. *Chinese Journal of Hydrodynamics*, 2021, 36(2): 201-209.]
- [46] 陈美榕, 吕忻, 肖文军. 上海沿海潮汐特征响应海平面上升关系研究 [J]. 海洋预报, 2014, 31(1): 42-48. [CHEN Meirong, LV Xin, XIAO Wenjun. Study on the response of tidal characteristics to MSL Rise in Shanghai coastal area[J]. *Marine Forecasts*, 2014, 31(1): 42-48.]
- [47] 邓成文. 末次盛冰期以来长江下切河谷充填物沉积特征和环境演化 [D]. 南京大学硕士学位论文, 2017. [DENG Chengwen. Characteristics of fill and environment evolution since the Last Glacial Maximum in the Yangtze River incised valley area[D]. Master Dissertation of Nanjing University, 2017.]
- [48] 苏建锋, 范代读, 冷伟, 等. 冰后期以来长江水下三角洲层序地层特征及沉积环境演化 [J]. 古地理学报, 2017, 19(3): 541-556. [SU Jianfeng, FAN Daidu, LENG Feng, et al. Postglacial sequence stratigraphy and sedimentary environment evolution of the Yangtze River subaqueous delta[J]. *Journal of Palaeogeography*, 2017, 19(3): 541-556.]