



涌潮沉积揭示长江河口湾全新世最高海面

刘雨佳, 韩志勇, 李徐生, 泮燕红, 杨倩倩, 周玉文

The sea-level highstand of the Changjiang River estuary in the Holocene revealed from tidal bore deposits

LIU Yujia, HAN Zhiyong, LI Xusheng, PAN Yanhong, YANG Qianqian, and ZHOU Yuwen

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16562/j.cnki.0256-1492.2022030601>

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

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

渤海湾西岸晚更新世以来的沉积环境演化及碳埋藏评价

Environmental evolution and carbon burial assessment of the west coast of Bohai Bay since Late Pleistocene

海洋地质与第四纪地质. 2021, 41(6): 194

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

珠江口内伶仃洋晚第四纪黏土矿物组成特征及对源区气候变化的指示

Late Quaternary clay minerals in the inner Lingdingyang of the Pearl River Estuary, southern China: Implications for paleoclimate changes at the provenance

海洋地质与第四纪地质. 2021, 41(5): 202

南海北部神狐海域SH37岩芯浊流沉积及其物源分析

Turbidity deposits and their provenance: evidence from core SH37 in Shenhu area of the South China Sea

海洋地质与第四纪地质. 2021, 41(5): 101



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

刘雨佳, 韩志勇, 李徐生, 等. 涌潮沉积揭示长江河口湾全新世最高海面 [J]. 海洋地质与第四纪地质, 2022, 42(3): 160-169.

LIU Yujia, HAN Zhiyong, LI Xusheng, et al. The sea-level highstand of the Changjiang River estuary in the Holocene revealed from tidal bore deposits[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2022, 42(3): 160-169.

涌潮沉积揭示长江河口湾全新世最高海面

刘雨佳¹, 韩志勇¹, 李徐生¹, 泮燕红², 杨倩倩¹, 周玉文¹

1. 南京大学地理与海洋科学学院, 南京 210023

2. 南京大学地球科学与工程学院, 南京 210023

摘要:海面变化对沿海地区的自然环境和社会经济有着重要影响,了解过去海面变化规律可以为预测未来海面上升情景提供参考依据。以长江古河口湾湾顶附近的扬州市昌建广场建筑工地所揭示的自然沉积剖面(CJGC剖面)为研究对象,通过详细调研,在剖面下部发现了保存有海相贝壳的涌潮沉积,为研究全新世最高海面和最大海侵提供了绝佳的地质材料。通过系统的沉积相与光释光(OSL)年代学研究,重建了古河口湾中全新世以来沉积环境的变化过程。结果表明,该地点中全新世以来经历了从陆相→潮滩→河口沙坝→河漫滩的沉积环境变迁,清晰显示了由海侵到海退的变化过程。OSL测年数据表明长江河口全新世最高海面和河口湾湾顶最大海侵出现的年代约为5.6 ka,当时对应的海面高度不低于海拔1.3 m,这一时期的高海面在世界多地均有记录。

关键词:河口湾;海面变化;OSL;涌潮沉积;长江三角洲

中图分类号:P736.2

文献标识码:A

DOI: 10.16562/j.cnki.0256-1492.2022030601

The sea-level highstand of the Changjiang River estuary in the Holocene revealed from tidal bore deposits

LIU Yujia¹, HAN Zhiyong¹, LI Xusheng¹, PAN Yanhong², YANG Qianqian¹, ZHOU Yuwen¹

1. School of Geography and Ocean Science, Nanjing University, Nanjing 210023, China

2. School of Earth Sciences and Engineering, Nanjing University, Nanjing 210023, China

Abstract: Sea level changes have an important impact on the natural environment and community economy of coastal areas. Understanding the evolution of sea level in the past could help predict the future sea level rising. In this study, a natural Holocene soil outcrop (CJGC profile) was scrutinized. The profile was located in a construction site of Changjian Square in Yangzhou City, east Jiangsu Province in ancient estuary of the Yangtze River. The tidal bore deposits contain euryhaline mollusc shells in the lower part of the profile, which provides excellent geological materials for studying the sea-level highstand and the maximum transgression in the Holocene. In addition, we studied the sedimentary facies and conducted optically stimulated luminescence (OSL) dating, from which the evolution of sedimentary environment in the study area since the middle Holocene was reconstructed. Results show that this site has undergone sedimentary environmental changes of land →tidal beach→river mouth bar→floodplain, which clearly shows a change from transgression to regression. The OSL ages show that the sea-level highstand and the maximum transgression of ancient Changjiang River estuary in the Holocene appeared at ~5.6 ka in elevation no less than 1.3 m above sea level, which is consistent with the sea-level highstand of the same period found elsewhere in many places of the world.

Key words: estuary; sea level change; OSL; tidal bore deposit; Yangtze River Delta

海面变化是具有深刻时空跨度内涵的多尺度自然过程,与人类生产和生活密切相关,在全球变化背景下海面变化研究已成为热点之一^[1]。关于未来气候变暖、海面上升对沿海地区的影响研究,也早已成为中国国家战略层面的重要课题。地质历史时期的海面变化引起了海陆的巨大变迁,海岸的

试点研究也表明,海面上升将引起海岸地区水动力条件变化,从而加剧海滩侵蚀与岸线后退,使得其沉积环境和生态环境发生变化,并加重风暴潮、咸水内侵、洪涝等灾害^[2-3]。因此,研究海面变化的历史和规律,并据此预测未来的发展趋势,对于人口密集的沿海地区有着极其重要的现实意义^[4]。

资助项目:国家重点研发计划项目“过去气候变化定量重建方法和我国区域气候重建”(2016YFA0600500)

作者简介:刘雨佳(1997—),女,硕士研究生,主要从事地貌与古气候研究, E-mail: 975914232@qq.com

通讯作者:韩志勇(1968—),男,副教授,主要从事地貌与古气候研究, E-mail: zyhan@nju.edu.cn

收稿日期:2022-03-06; 改回日期:2022-04-18. 文凤英编辑

从 20 世纪 50 年代至今, 学术界通过大量实地调查对过去海面变化开展了广泛深入的研究, 通过确立海面标志物来指示古海面, 进而恢复海面变化和海岸演变的历史过程^[5-8]。通常采用可定量反映古海面的判别标志主要包括地貌、沉积和生物标志, 如海成阶地、海相与海陆过渡相地层、贝壳沙堤与珊瑚礁等^[9], 此外也有学者寻找海底陆生哺乳动物化石和古土壤层以及古遗址分布来进行研究^[2,10]。通过测量标志物的保存部位和海拔高度, 测定其沉积年代并考虑不同地区的地壳运动, 经过校正后就可以总结出海面变化曲线, 这也是全新世海面研究的基本方法。

在重建我国海面变化历史的研究中, 长江三角洲地区是热点也是重点地区之一, 近几十年来众多学者对此进行了探索。研究普遍显示, 与古气候变化相对应, 第四纪以来发生过多次大规模海侵海退, 对长江三角洲地区地貌和古环境演变产生了重要影响^[11], 但关于全新世高海面则存在较多争议。影响较大的一个观点认为全新世 8~7 ka 海面上升到高水位阶段, 7 ka 前后海侵范围达到最大, 长江口退缩到现代江苏镇江-扬州一线以西的仪征附近, 形成以镇江、扬州为顶点的古河口湾, 两翼岸线后退止于南北冈身附近^[12-15]; 而李从先等^[16]则提出长江下游全新世最高海面出现在 6.5~6.3 ka 期间; 勾韵娴等^[17]曾通过对苏北地区多个剖面的沉积地层有孔虫进行研究, 提出在 7 ka 左右建湖-阜宁一带发生全新世第一次海侵, 6.5~5.4 ka 海侵范围更加扩大, 为最高海面期; Shu 等^[18]在同一地区的最新研究中进一步指出最高水位出现在 6.57~6.26 ka, 晚全新世逐渐海退。也有学者对上述观点持否定态度, 如朱诚等^[10]通过对长江三角洲和宁绍平原的新石器时代遗址的时空分布和有孔虫的研究分析, 认为该区全新世最大海侵发生在 10~7 ka, 否定了 7~5 ka 的高海面; 夏东兴^[19]认为, 全新世海面是连续上升的, 否认任何高海面的存在。

综上所述, 前人已对长江三角洲地区全新世海面变化做过大量研究并取得了一定的认识, 但关于海面变化和海岸变迁过程始终未达成共识。产生争议的原因一方面是受测年材料限制, 以往研究多以¹⁴C 测年为主, 可能会存在误差^[20]; 另一方面是最大海侵与最高海面的意义不同, 如有研究指出全新世海侵最大时海面同时达到最大高度^[21], 也有研究认为最大海侵与最高海面并不同步, 7 ka 之后海面仍在上升, 但上升速度低于沉积速率, 表现为岸线东撤^[22]。为解决上述争议, 本文选择长江古河口湾

湾顶地区的沉积剖面, 通过对剖面沉积相与沉积环境的解译, 结合光释光年代数据, 探讨该地区全新世的海面变化和海侵过程, 为长江三角洲高海面的确定提供新的证据。

1 研究区概况

长江是我国第一大河, 全长 6380 km, 流域面积 $180 \times 10^4 \text{ km}^2$, 年平均径流量 $9323 \times 10^8 \text{ m}^3$, 年平均输沙量 $4.8 \times 10^8 \text{ t}$ ^[23]。长江搬运的泥沙在河口区大量沉积形成三角洲, 面积达 $5.18 \times 10^4 \text{ km}^2$, 其中陆上部分为 $2.28 \times 10^4 \text{ km}^2$, 水下部分 $2.90 \times 10^4 \text{ km}^2$ ^[24], 主要包括以镇江、扬州为顶点, 茅山以东、通扬运河以南、杭州湾以北的区域。根据 2002—2014 年镇江潮位站资料, 该站点最大潮位 5.37 m, 最小潮位 0.25 m, 最大潮差 1.36 m, 最小潮差 0.52 m^[25]。

长江三角洲处在构造沉降带, 年沉降率约为 1~2 mm, 持续的构造沉降使之接收大量的河流沉积物, 形成厚 200~300 m 的第四纪松散沉积层^[26]。长江三角洲平原地势平坦, 海拔<7 m, 河流纵横交错, 分布较多大小不等的湖泊。三角洲西南面为低山丘陵, 东面为南黄海, 北面为黄淮冲积平原, 区域地形整体为西南高北东低。本区地处亚热带和暖温带过渡带, 受东亚季风影响降水丰富, 因此发育了发达的网状水系。

在全新世最大海侵时, 现今长江三角洲地区是一个巨大的喇叭形河口湾(图 1), 湾顶在镇江-扬州一带^[27-33], 海面上升使两翼海岸线后退但仍受长江谷地控制, 北部被丘陵岗地束缚, 退至蜀岗之下扬州-泰州-海安一线, 南翼受宁镇山脉阻挡, 退至江阴-沙洲-浅冈-沙岗一线^[28]。现今所见的长江三角洲堆积平原是河口湾经历了多个河口沙坝发育期逐步充填而形成^[12,29]。

2 剖面与方法

本文所研究的昌建广场剖面(CJGC 剖面, $32^\circ 23' 7.12'' \text{N}$ 、 $119^\circ 21' 45.67'' \text{E}$)位于江苏省扬州市西北部的昌建广场建筑工地基坑内, 剖面顶部海拔 6.5 m(1985 国家高程基准), 总厚度超过 7 m。在基坑西侧的剖面较为完整但外露不佳, 基坑北侧剖面分为上、下两段, 地层出露良好(图 2)。CJGC 剖面的西北为下蜀黄土构成的岗地(蜀冈), 蜀冈海拔>20 m, 岗地顶面有明显的起伏。岗地的前缘坡度较大, 推测为古河口湾的岸坡。岗地之下是三角洲

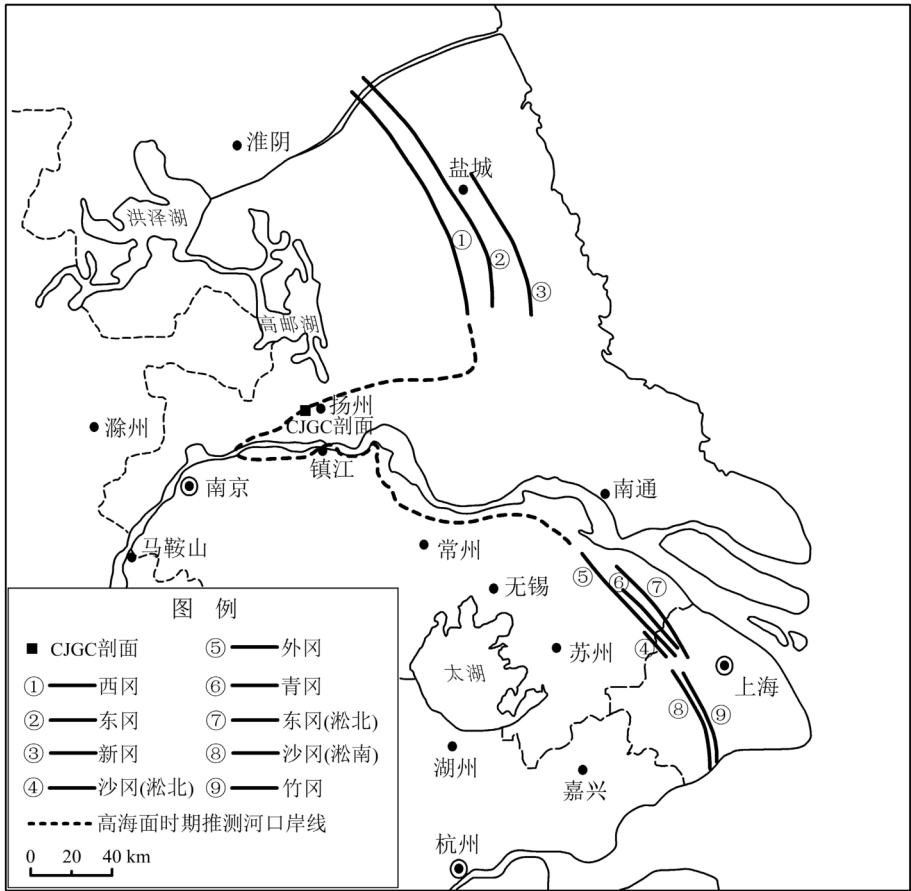


图 1 CJGC 剖面 and 贝壳沙堤的位置以及推测的古河口湾岸线

贝壳沙堤(冈身)①②③据虞志英等^[34]改绘, ④⑤⑥⑦⑧⑨据刘苍字等^[35]改绘。

Fig.1 The location of the profile CJGC, shell beach ridges, and the inferred shoreline of ancient estuary

Shell beach ridges ①,②,③ according to Yu Zhiying et al.^[34], and shell beach ridges ④,⑤,⑥,⑦,⑧,⑨ according to Liu Cangzi et al^[35].



图 2 CJGC 剖面及其沉积单元划分

虚线为沉积单元的界线, 数字为层号; 右侧 3 张照片为不同角度近距离拍摄。

Fig.2 CJGC profile and division of the sedimentary unit

The dotted line represents the boundary of depositional units that are numbered; The three photos on the right were taken at different angles.

的河漫滩, 地形平缓, 海拔 3~12 m。CJGC 剖面就位于河漫滩之上, 接近古河口湾的岸坡, 直线距离约 600 m, 属于长江古河口湾的湾顶地区(图 1)。

对 CJGC 剖面的沉积结构、沉积构造进行了详细的野外观察和判定, 依据沉积相划分出 6 个沉积单元(U1—U6)以及两个基底的地层单元(U7—U8); 并从沉积地层中寻找到了贝壳进行了种属鉴定, 判断其主要生境, 结合贝壳鉴定以及沉积相解译了剖面的沉积环境。

为确定各地层单元的沉积年代, 在剖面不同层位共采集了 11 个样品用于光释光(OSL)测年(表 1 和图 3)。OSL 年龄测试在南京大学光释光年代实验室进行。整个实验过程都在弱红光条件下完成, 样品前处理和上机测试参考 Jiang 等^[36]所采用的步骤与方法。首先, 从样品中提取纯净的石英颗粒, 用 IR test 检测石英纯度^[37], 通过检测的样品方可测定等效剂量。等效剂量采用石英单片再生剂量法(SAR)测量^[38], 根据 preheat test 的结果, 预热温度选

择 260℃。使用的仪器是 Risø TL/OSL DA-20 C/D 全自动释光仪, 配有蓝光激发光源($\lambda=470\text{ nm}$; $\sim 80\text{ mW/cm}^2$)和红外激发光源($\lambda=870\text{ nm}$, $\sim 135\text{ mW/cm}^2$), 使用 $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ 源进行辐照, 剂量率为 0.12 Gy/s 。测定完成后, 用等效剂量除以由样品中 U、Th、K 放射性元素的浓度计算得出的环境剂量率就可获得样品的沉积年龄。

3 结果

CJGC 剖面样品 OSL 年龄测定结果如表 1 所示。基底的地层单元 U8 为风化的紫红色砂岩, 顶面大致平整(海拔-0.7 m)。其中发育了灰白色的网纹, 网纹的密度向上变大, 局部可能受还原作用而呈土黄色。U8 之上覆盖了地层单元 U7, 为厚度不等的次生黄土, 其中含有 1~3 cm 的砾石, 次生黄土的顶面较为平整, 推测为侵蚀面(海拔 0.2 m)。其中样品 CJGC-6.5m 的 OSL 年龄已饱和($>82\text{ ka}$)。

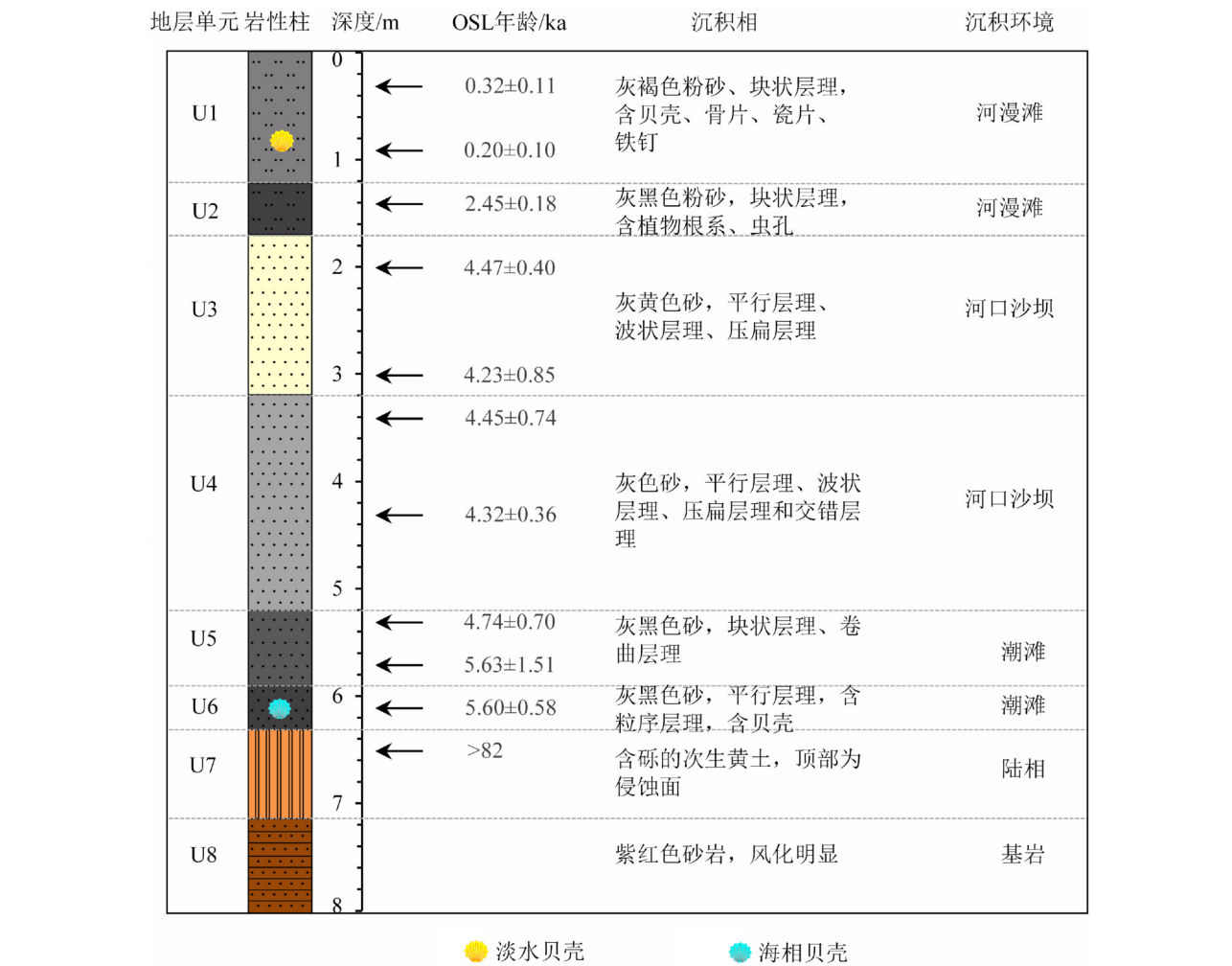


图 3 CJGC 剖面的 OSL 年龄、沉积相以及解译的沉积环境

Fig.3 OSL dating results, sedimentary facies, and the interpreted depositional environment of CJGC profile

表 1 CJGC 剖面光释光样品测年结果
Table 1 OSL dating results of the samples from CJGC profile

样品号	埋深/cm	U/ 10^{-6}	Th/ 10^{-6}	K/%	总剂量/Gy	剂量率/(Gy/ka)	年龄/ka
CJGC-0.3m	30	2.56	15.28	1.90	1.19 ± 0.39	3.69 ± 0.11	0.32 ± 0.11
CJGC-0.9m	90	2.17	13.21	1.83	0.69 ± 0.33	3.49 ± 0.09	0.20 ± 0.10
CJGC-1.4m	140	2.30	13.29	1.86	7.97 ± 0.50	3.26 ± 0.12	2.45 ± 0.18
CJGC-2.0m	200	2.13	11.53	1.60	13.18 ± 1.11	2.95 ± 0.09	4.47 ± 0.40
CJGC-3.0m	300	1.81	11.04	1.66	12.48 ± 2.50	2.95 ± 0.08	4.23 ± 0.85
CJGC-3.4m	340	1.73	9.29	1.62	12.11 ± 2.00	2.72 ± 0.08	4.45 ± 0.74
CJGC-4.3m	430	1.80	10.89	1.61	12.31 ± 0.98	2.85 ± 0.08	4.32 ± 0.36
CJGC-5.3m	530	2.15	12.23	1.60	13.47 ± 1.93	2.84 ± 0.10	4.74 ± 0.70
CJGC-5.7m	570	2.21	13.18	1.61	16.53 ± 4.39	2.94 ± 0.10	5.63 ± 1.51
CJGC-6.1m	610	2.61	14.83	1.53	17.26 ± 1.69	3.08 ± 0.10	5.60 ± 0.58
CJGC-6.5m	650	1.84	12.50	1.10	>191.94	2.34 ± 0.08	>82

单元 U7 代表了陆地的环境,其顶部的侵蚀面可能是海侵时形成(图 4a)。沉积单元 U1—U6 的沉积年龄约为 0.2~5.6 ka,代表了中、晚全新世的沉积,各单元沉积特征如下(图 4):

U1(0~1.2 m): 顶面海拔高度为 6.5 m。沉积物为灰褐色粉砂,见有灰黄色粉砂团块,质地坚硬,发育块状层理(图 4b)。其中含淡水腹足动物 *Sinotaia* 的贝壳(图 5a),此外还有铁钉、瓷片、骨片等物体(图 4c),有明显人类扰动的痕迹。该层埋深 0.3 和 0.9 m 处的 OSL 年龄为 0.32 ± 0.11 ka 和 0.20 ± 0.10 ka。判断为河漫滩沉积。

U2(1.2~1.7 m): 顶面海拔高度为 5.3 m。沉积物为灰黑色粉砂,干燥后质地坚硬,发育块状层理,含有丰富的植物根系和虫孔(图 4d)。在埋深 1.4 m 处 OSL 年龄为 2.45 ± 0.18 ka。判断为河漫滩沉积。

U3(1.7~3.2 m): 顶面海拔高度为 4.8 m。沉积物为分选良好的灰黄色砂,粒度有向上变细趋势,发育平行层理、波状层理和压扁层理。上部颜色变淡,呈灰色,含少量粉砂团块;下部见灰褐色的根痕切穿平行层理(图 4e),埋深 2.0 和 3.0 m 处的 OSL 年龄分别为 4.47 ± 0.40 ka 和 4.23 ± 0.85 ka。判断为受潮汐影响的河口沙坝沉积,水深较小。

U4(3.2~5.2 m): 顶面海拔高度为 3.3 m。沉积物为分选较好的灰色砂。与 U3 类似,发育平行层理、波状层理、压扁层理和交错层理(图 4f)。埋深 3.4 和 4.3 m 处的 OSL 年龄分别为 4.45 ± 0.74 ka 和 4.32 ± 0.36 ka。判断为受潮汐影响的河口沙坝沉积。

U5(5.2~5.9 m): 顶面海拔高度为 1.3 m。沉积

物为灰黑色含泥的砂,质地均一,夹有弯曲的褐色泥质条带构成的卷曲层理,此外还发育粒序层理、块状层理(图 4g)。该单元与上、下单元均呈渐变接触,埋深 5.3 和 5.7 m 处的 OSL 年龄分别为 4.74 ± 0.70 ka 和 5.63 ± 1.51 ka,其中 4.74 ± 0.70 ka 可能是 U5 逐渐向 U4 过渡带的年龄, 5.63 ± 1.51 ka 才是 U5 的沉积年龄。判断为涌潮沉积。

U6(5.9~6.3 m): 顶面海拔高度为 0.7 m。沉积物为灰黑色含泥砂,颜色相比 U5 更深。下部含有多层贝壳(图 4h),每层厚 5~20 cm,贝壳层内偶见细砾,推断源自基底的风化砂岩,另外含红烧土的砾(0.5~5 cm),具有滞留沉积的特点(图 4i)。发育平行层理和正粒序层理以及灰色泥质条带构成的卷曲层理。贝壳的种类主要有 *Hiatella* cf. *orientalis* (Yokoyama), 1920, *Corbicula leana* Prime, 1864 和 *Melania*, 为淡水—半咸水的生物(图 5b—d),常见于河口、潮滩地带。偶见 *Hiatella* cf. *orientalis* (Yokoyama), 1920, 为海洋环境生物。埋深 6.1 m 处 OSL 年龄为 5.6 ± 0.58 ka。判断为河口湾涌潮沉积。

4 讨论

4.1 涌潮沉积指示的古海面

据观察,CJGC 剖面 U5、U6 具有类似浊流沉积物的特征,沉积物分选较差,由砂、泥、砾组成。其中典型的沉积构造包括侵蚀面、正粒序层理、块状层理、卷曲层理、泥质条带(黏土层)、贝壳层,这些

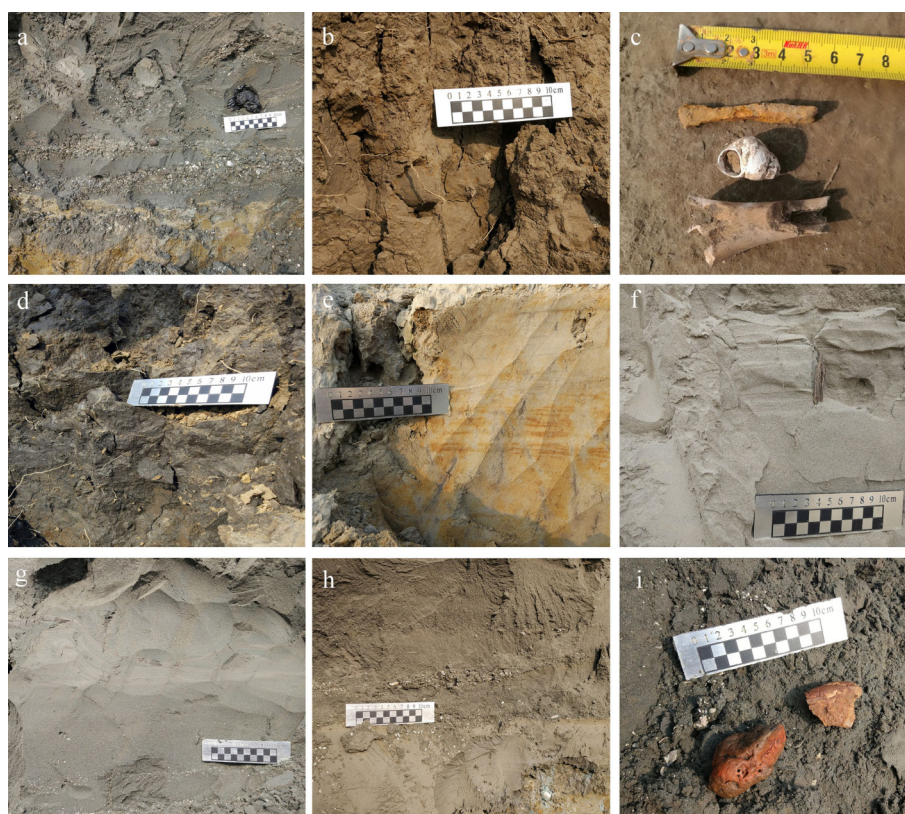


图 4 CJGC 剖面各沉积单元的沉积特征

a. 基底地层单元 U7 与沉积单元 U6 之间的侵蚀面, b. U1 中的块状层理, c. U1 中的铁钉、贝壳和骨片, d. U2 中的块状层理, e. U3 中的根痕, f. U4 中的交错层理, g. U5 中的卷曲层理, h. U6 中的贝壳层, i. U6 中滞留沉积的砾石。

Fig.4 Sedimentary characteristics of each depositional units of CJGC profile

a. The erosion surface between the basement unit U7 and the depositional unit U6, b. massive bedding in U1, c. nail, shell and bone in U1, d. massive bedding in U2, e. root marks in U3, f. cross-bedding in U4, g. convolute bedding in U5, h. shells in U6, i. lag gravels in U6.

特征表明其与正常的潮汐沉积有显著的差异。现代钱塘江的河口湾, 在涌潮作用下会在中、低潮滩形成特殊的涌潮沉积 (tidal bore deposit, TBD)。中潮滩位于平均小潮高水位 (Mean High Water Neaps, MHWN) 和平均小潮低潮位 (Mean Low Water Neaps, MLWN) 之间, 大致对应平均海平面 (Mean Sea Level, MSL)。因此, 涌潮沉积一般出现在平均海平面之下。涌潮是在涨潮过程中形成的一种水跃现象, 主要发生在潮差大 ($>4\text{ m}$)、平面上呈喇叭状或有水下沙坎的河口或海湾地区^[39-40]。涌潮产生的急流易使底床发生冲刷, 泥沙在紊流作用下悬浮搬运, 当流速减低后, 悬浮的泥沙发生快速沉降, 在此过程中较粗颗粒先快速沉积下来, 常形成块状层理、粒序层理, 向上过渡为正常的潮汐沉积, 涌潮也可使新鲜的沉积物发生液化、变形, 进而产生卷曲层理^[39,41]。

CJGC 剖面 U5、U6 沉积物与现代钱塘江河口湾的涌潮沉积非常相似。以往的研究表明, 全新世长江河口湾内也存在巨大的涌潮作用形成的沙体,

由分选良好的粉细砂组成, 块状层理, 常见冲刷面^[32,39,42]。在此形成涌潮的原因与当时特殊的地理环境有关。中全新世高海面期间长江口形成了巨大的、呈喇叭形的河口湾, 河口湾的顶点位于仪征附近, 北界在仪征-扬州的蜀岗南缘, CJGC 剖面距离蜀岗南缘仅约 600 m。最大海侵时的长江古河口湾类似于现今的钱塘江河口湾, 最大潮差则出现在古河口湾的顶部地区, 据推算当时的潮流流速在 3 m/s 以上, 沉积学和地貌学的特征证实当时长江古河口湾曾为强潮型河口, 与历史上广陵观潮的记载相互印证^[32]。综合以上分析, CJGC 剖面中 U5、U6 沉积物可以判定为涌潮沉积, 这为我们探讨全新世长江河口湾最高海面和最大海侵提供了绝佳的材料。由于涌潮沉积形成于中、低潮滩^[39], 所以其位置具有指示海面的作用, 即平均海面一般不低于涌潮沉积。以 U5 顶面的海拔 1.3 m 计, 约 5.6 ka 时海面不低于 1.3 m。由于 U5、U6 之上及之下未发现海相沉积, 因此, U5、U6 的涌潮沉积可能是古河口湾湾顶地区最大海侵的产物, 同时指示了全新世

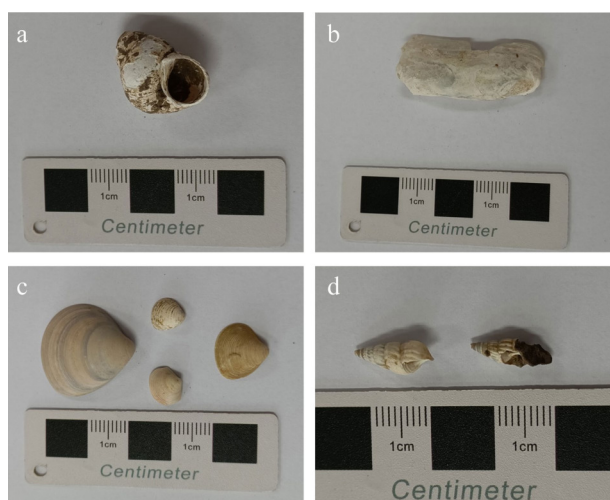


图5 CJGC剖面中的贝壳

a. U1 中的 *Sinotaia*, 淡水环境; b. U6 中的 *Hiatella cf. orientalis* (Yokoyama), 1920, 海洋环境; c. U6 中的 *Corbicula leana* Prime, 1864, 淡水-半咸水环境; d. U6 中的 *Melania*, 淡水-半咸水环境。

Fig.5 Shells in profile CJGC

a. *Sinotaia* in U1, freshwater environment; b. *Hiatella cf. orientalis* (Yokoyama), 1920 in U6, marine environment; c. *Corbicula leana* Prime, 1864 in U6, freshwater-brackish environment; d. *Melania* in U6, freshwater-brackish environment.

的最高海面。

4.2 与其他海面记录的对比

5~6 ka 的高海面在世界各地被许多研究所证实,例如,马来半岛 5 ka 时的高海面比现今高约 3.3 ± 0.2 m^[43]。Malay-Thailand 的数据显示 7~8 ka 海面上升减缓,6~4 ka 出现 2~4 m 的高海面,此后海面逐渐下降,1 ka 时降到目前的位置^[44]。

依据莱州湾南岸 8 个钻孔的岩性及有孔虫特征识别沉积相,利用其与平均古海面之间在高度上具有固定关系,重建了全新世相对海面变化历史,结果发现 6 ka 前后海面高于现今,其中 5.5 ka 的海面高度为 1.2 ± 0.8 m^[45],这与本文的结果基本一致。基于珊瑚、牡蛎等数据集成的南海海面变化曲线显示 5.6 ka 的海面比目前高约 2 m^[46]。福建与台湾海峡地区的集成数据表明,早全新世的快速上升持续到 6 cal. kaBP, 5 cal. kaBP 的海面升至最高,约为 2.0 m,此后缓慢降至今为止^[47]。

苏沪地区发育了许多贝壳沙堤(冈身)。苏北中部自西向东发育了西冈、东冈、新冈(图 1),向海方向沙堤逐渐变年轻,反映了逐步海退的过程。其中代表海侵最大的西冈,其下部年龄为 6.5 ka,中部年龄为 5.6 ka^[34]。上海地区代表海侵最大的淞南沙冈与淞南沙冈,上部的沉积年龄分别为 5.1 ka 和

6.08 ka^[35],如果年龄属实,则表明在沙堤堆积的过程中,高海面的确出现于 5.6 ka 前后。5~6 ka 的高海面在我国沿海及世界各地普遍出现,应该是全球海面变化的结果。

而长三角地区集成的海面变化曲线显示,早全新世至 8 ka 海面即上升到 -5 m, 8~3 ka 缓慢上升至目前的水平^[47]。渤海湾滨海平原多个钻孔的研究显示, 10~5 ka 期间,海面从 -17 m 快速上升到 -4 m, 5~2 ka 期间,海面从 -3.58 m 缓慢上升到 -2.15 m^[48]。这些地区未能记录到 5~6 ka 的高海面,推测可能与构造沉降及沉积物压实有关。之所以 CJGC 剖面能记录到约 5.6 ka 的高海面,原因在于涌潮沉积直接覆盖在基岩之上,不存在沉积物压实的可能,且该地点的构造沉降可能并不显著。

4.3 与古人类遗址的对比

苏北东台陶庄遗址、苏南太湖西部宜兴骆驼墩遗址,全新世初至 9.2 ka 出现了以有孔虫为标志的海相沉积地层,海拔分别为 0.97~0.23 m 与 1.08~0.84 m^[49]。全球海面变化曲线显示,冰消期海面快速上升直至 7 ka,此后上升速率减缓,9 ka 时海面仍比目前低约 20 m^[50],因此,9.2 ka 之前出现比现今还高的海面几乎是不可能,除非 9.2 ka 以来苏南、苏北的地面因新构造运动大幅抬升,然而目前没有相关的证据。CJGC 剖面底部的陆相沉积顶面海拔为 0.2 m,如果早全新世出现海拔 1 m 的高海面,应该在剖面底部留下相应的海相沉积。目前仅发现~5.6 ka 的海相沉积,说明之前并没有出现高海面。

对灰坑和水井的测量表明,江苏苏州地区在 5.8 ka 直至宋代的大部分时间段为低海面时期^[49],考古地层学也认为宁绍平原 7~5 ka 为低海面^[51]。本文的研究结果也不支持上述结论。考虑到可能的测年误差,该时期基本对应 CJGC 剖面指示的~5.6 ka 的高海面。产生这一差异的原因可能有两个,一是灰坑和水井不一定能直接指示海面高度,二是灰坑和水井分布的地区地面发生过沉降,具体情况有待今后查明。

据统计,长江三角洲地区不同年代的新石器遗址分布存在一定的规律,马家浜文化时期(7~5.8 ka), 34 个遗址中有 11 个(32%)分布于海拔 0~2 m 的地区,崧泽文化时期(5.8~5 ka), 47 个遗址中有 12 个(26%)分布于海拔 0~2 m 的地区,良渚文化(5~4 ka)时期, 121 个遗址中有 30 个(25%)分布于海拔 0~2 m 的地区^[51]。由此可见,5.8 ka 之后,分

布在0~2 m的低海拔地区的遗址所占的比例降低,可能与该时期出现的高海面(≥ 1.3 m)有关。海面的上升导致长江三角洲地区河、湖的水面也相应上升,进而淹没低洼地区,迫使人类向更高的位置迁移。

5 结论

(1) CJGC剖面由6个沉积单元(U1—U6)以及两个基底的地层单元(U7—U8)共同构成。其中,基底地层(U7—U8)沉积年龄 >82 ka;沉积单元(U1—U6)的沉积年龄为0.2~5.6 ka,为中、晚全新世的沉积。

(2)沉积相分析表明U8为基岩,U7为次生黄土沉积,U6—U5为河口湾的涌潮沉积,U4—U3为河口沙坝沉积,U2—U1为河漫滩沉积。沉积相变化反映该地点中全新世以来经历了从陆相→潮滩→河口沙坝→河漫滩的沉积环境变迁,清晰显示了由海侵到海退的变化过程。

(3)保存有海相贝壳的U6及其上覆的U5沉积单元被判定为涌潮沉积,这为解决长江三角洲高海面问题提供了新的证据。涌潮沉积的产生是潮流受古长江喇叭形河口湾地形的影响,潮幅增大所致。涌潮沉积揭示长江河口全新世最高海面和河口湾湾顶最大海侵出现的年代为 ~ 5.6 ka,当时对应的海面高度不低于海拔1.3 m。

(4)约5.6 ka的高海面在我国沿海及世界其他地点均有记录,是全球海面变化的体现。高海面时长江三角洲河、湖水面上涨,迫使古人类向高处迁移。

致谢: 扬州昌建尊源置业有限公司吴军在野外踏勘、样品采集和相关资料收集过程中提供了重要帮助;吕存娟、蒋梦瑶、任翌成等参与了野外样品采集工作。

参考文献 (References)

- [1] Chen Z Y, Stanley D J. Sea-level rise on Eastern China's Yangtze delta [J]. *Journal of Coastal Research*, 1998, 14 (1): 360-366.
- [2] 赵希涛. 海面变化研究的回顾与展望[J]. *地球科学信息*, 1988 (1): 36-40. [ZHAO Xitao. Review and prospect of sea level change research [J]. *Advances in Earth Science*, 1988 (1): 36-40.]
- [3] 陈梦熊. 关于海平面上升及其环境效应[J]. *地学前缘*, 1996 (2): 133-140. [CHEN Mengxiong. The rise of sea level and its environmental effects [J]. *Earth Science Frontiers*, 1996 (2): 133-140.]
- [4] 谢志仁, 袁林旺. 略论全新世海面变化的波动性及其环境意义[J]. *第四纪研究*, 2012, 32 (6): 1065-1077. [XIE Zhiren, YUAN Linwang. Fluctuation Characteristics of Holocene sea-level change and its environmental implications [J]. *Quaternary Sciences*, 2012, 32 (6): 1065-1077.]
- [5] 任美镔. 第四纪海面变化及其在海岸地貌上的反映[J]. *海洋与湖沼*, 1965 (3): 295-305. [REN Meie. Quaternary changes in sea-level and their effects on coastal morphology [J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 1965 (3): 295-305.]
- [6] Scott D B, Medioli F S. Foraminifera as sea-level indicators[M]//Van De Plassche O. *Sea-Level Research*. Dordrecht: Springer, 1986: 435-456.
- [7] Zhao X T. Cheniers in China: An overview [J]. *Marine Geology*, 1989, 90 (4): 311-320.
- [8] 施雅风. 中国气候与海面变化及其趋势和影响2: 中国海面变化[M]. 济南: 山东科技出版社, 1996. [SHI Yafeng. *Climate and Sea-Level Change and Its Trends and Impacts in China 2: Sea-Level Change in China* [M]. Ji'nan: Shandong Science and Technology Press, 1996.]
- [9] 李恒鹏, 杨桂山. 海平面上升的海岸形态响应研究方法进展[J]. *地球科学进展*, 2000, 15 (5): 598-603. [LI Hengpeng, YANG Guishan. Response of coast to sea-level rise: A review of study methods [J]. *Advances in Earth Sciences*, 2000, 15 (5): 598-603.]
- [10] 朱诚, 张强, 张芸, 等. 长江三角洲长江以北地区全新世以来人地关系的环境考古研究[J]. *地理科学*, 2003, 23 (6): 705-712. [ZHU Cheng, ZHANG Qiang, ZHANG Yun et al. Relationship between human and nature in the north part of the Yangtze delta since the Holocene [J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2003, 23 (6): 705-712.]
- [11] 李从先, 许世远. 河流三角洲沉积的基本特征[J]. *自然杂志*, 1978 (3): 45-49. [LI Congxian, XU Shiyuan. Basic characteristics of river delta deposition [J]. *Chinese Journal of Nature*, 1978 (3): 45-49.]
- [12] 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 Scientific Research Group, Department of Marine Geology, Tongji University. The formation and development of the Holocene Yangtze River delta [J]. *Chinese Science Bulletin*, 1978, 23 (5): 310-313.]
- [13] 王靖泰, 汪品先. 中国东部晚更新世以来海面升降与气候变化的关系[J]. *地理学报*, 1980, 35 (4): 299-312. [WANG Jingtai, WANG Pinxian. Relationship between sea-level changes and climatic fluctuations in East Chinasince late Pleistocene [J]. *Acta Geographica Sinica*, 1980, 35 (4): 299-312.]
- [14] 严钦尚, 洪雪晴. 长江三角洲南部平原全新世海侵问题[J]. *海洋学报*, 1987, 9 (6): 744-752. [YAN Qinshang, HONG Xueqing. The Holocene transgression problem in the southern plain of the Yangtze River Delta [J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 1987, 9 (6): 744-752.]
- [15] Hori K, Saito Y. An early Holocene sea-level jump and delta initiation [J]. *Geophysical Research Letters*, 2007, 34 (18): L18401.
- [16] 李从先, 闵秋宝. 全新世长江三角洲顶部的海进时间和海面位置[J]. *同济大学学报*, 1981 (3): 104-108. [LI Congxian, MIN Qiubao. The time of Holocene transgression and sea level changes in apical area of Yangtze delta [J]. *Journal of Tongji University*, 1981 (3): 104-108.]
- [17] 勾韵娴, 唐领余, 孙息春, 等. 江苏建湖地区全新世生物群和古环境[J]. *第四纪研究*, 1992, 12 (3): 203-215. [GOU Yunxian, TANG Lingyu, SUN Xichun et al. Holocene biota and palaeoenvironment in

- Jianhu, Jiangsu [J]. *Quaternary Sciences*, 1992, 12(3): 203-215.]
- [18] 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.
- [19] 夏东兴. 全新世高海面何在[J]. 海洋学报, 1981, 3(4): 601-609. [XIA Dongxing. Whence comes the high sea-level during the Holocene? [J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 1981, 3(4): 601-609.]
- [20] 薛春汀. 对我国沿海全新世海面变化研究的讨论[J]. 海洋学报, 2002, 24(4): 58-67. [XUE Chunting. Holocene sea-level change along China coast [J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2002, 24(4): 58-67.]
- [21] 徐映深, 季幼庭, 高中和, 等. 下扬子地区全新世海平面变化特征的初步研究[J]. 地震学刊, 1989(3): 41-47. [XU Yingshen, JI Youting, GAO Zhonghe et al. Preliminary study on the characteristics of the changing Holocene Sea level in lower Yangtze region [J]. *Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering*, 1989(3): 41-47.]
- [22] 郑洪波, 周友胜, 杨青, 等. 中国东部滨海平原新石器遗址的时空分布格局: 海平面变化控制下的地貌演化与人地关系[J]. *中国科学: 地球科学*, 2018, 61(2): 123-133. [ZHENG Hongbo, ZHOU Yousheng, YANG Qing et al. Spatial and temporal distribution of Neolithic sites in coastal China: Sea level changes, geomorphic evolution and human adaption [J]. *Science China Earth Sciences*, 2018, 61(2): 123-133.]
- [23] 李保华, 李从先, 沈焕庭. 冰后期长江三角洲沉积通量的初步研究[J]. *中国科学(D辑)*, 2003, 46(7): 743-752. [LI Baohua, LI Congxian, SHEN Huanting. A preliminary study on sediment flux in the Changjiang Delta during the postglacial period [J]. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 2003, 46(7): 743-752.]
- [24] 李从先, 王靖泰, 许世远, 等. 全新世长江三角洲地区的海进海退层序[J]. 地质科学, 1980, 15(4): 322-330. [LI Congxian, WANG Jingtai, XU Shiyuan et al. Holocene transgressive-regressive sequence in Yangtze delta area [J]. *Chinese Journal of Geology*, 1980, 15(4): 322-330.]
- [25] 黄竞争, 张先毅, 吴峥, 等. 长江感潮河段潮波传播变化特征及影响因素分析[J]. 海洋学报, 2020, 42(3): 25-35. [HUANG Jingzheng, ZHANG Xianyi, WU Zheng et al. Investigation into the spatial and temporal tide-river dynamics and the underlying controlled factors along the tidal reach of the Changjiang River [J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2020, 42(3): 25-35.]
- [26] 吴标云, 李从先. 长江三角洲第四纪地质[M]. 北京: 海洋出版社, 1987 [WU Biaoyun, LI Congxian. *Quaternary Geology of the Yangtze River Delta*[M]. Beijing: China Ocean Press, 1987.]
- [27] 陈吉余. 长江河口动力过程和地貌演变[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1988 [CHEN Jiyu. *Dynamic Process and Geomorphological Evolution of the Yangtze River Estuary*[M]. Shanghai: Shanghai Scientific & Technical Publishers, 1988.]
- [28] 曹光杰, 王建, 屈贵贤. 全新世以来长江河口段河道的演变[J]. *人民长江*, 2006, 37(2): 25-27, 36. [CAO Guangjie, WANG Jian, QU Guixian. River channel evolution of the Yangtze river estuary since Holocene epoch [J]. *Yangtze River*, 2006, 37(2): 25-27, 36.]
- [29] 王靖泰, 郭蕃民, 许世远, 等. 全新世长江三角洲的发育[J]. 地质学报, 1981(1): 67-81. [WANG Jingtai, GUO Xumin, XU Shiyuan et al. Evolution of the Holocene Changjiang delta [J]. *Acta Geologica Sinica*, 1981(1): 67-81.]
- [30] 陈吉余, 沈焕庭. 我国河口基本水文特征分析[J]. 水文, 1987(3): 1-8. [CHEN Jiyu, SHEN Huanting. Analysis of basic hydrological characteristics of estuaries in China [J]. *Journal of China Hydrology*, 1987(3): 1-8.]
- [31] 朱玉荣. 冰后期最大海侵以来长江口潮波特性的变化[J]. *海洋科学*, 2000, 24(5): 34-36. [ZHU Yurong. The change of characteristics of tidal wave in the Changjiang River mouth area since the post-Glacial transgression Maximum [J]. *Marine Sciences*, 2000, 24(5): 34-36.]
- [32] 李从先, 范代读. 全新世长江三角洲的发育及其对相邻海岸沉积体系的影响[J]. 古地学报, 2009, 11(1): 115-122. [LI Congxian, FAN Daidu. Development of the Holocene Changjiang delta and its influence on adjacent coastal sedimentary systems [J]. *Journal of Palaeogeography*, 2009, 11(1): 115-122.]
- [33] 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 Chuncheng et al. Analysis on the evolution law of coastline in the Yangtze River Delta and the coastal area of Northern Jiangsu since 7000 a B. P. [J]. *Scientia Geographica Sinica*, 1996, 16(3): 207-213.]
- [34] 虞志英, 陈德昌, 唐寅德. 关于苏北中部平原海岸古砂堤形成年代的认识[J]. 海洋科学, 1982, 6(4): 11-14. [YU Zhiying, CHEN Dechang, TANG Yinde. On the formation of fossil barriers in the middle flat of Jiangsu northern part [J]. *Ocean Science*, 1982, 6(4): 11-14.]
- [35] 刘苍宇, 吴立成, 曹敏. 长江三角洲南部古沙堤(冈身)的沉积特征、成因及年代[J]. 海洋学报, 1985, 7(1): 55-66. [LIU Cangzi, WU Licheng, CAO Min. Features, formation and age of the shell beach ridges in the south Yangtze Delta [J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 1985, 7(1): 55-66.]
- [36] Jiang M Y, Han Z Y, Li X S et al. Beach ridges of Dali Lake in Inner Mongolia reveal precipitation variation during the Holocene [J]. *Journal of Quaternary Science*, 2020, 35(5): 716-725.
- [37] Duller G A T. Distinguishing quartz and feldspar in single grain luminescence measurements [J]. *Radiation Measurements*, 2003, 37(2): 161-165.
- [38] Wintle A G, Murray A S. A review of quartz optically stimulated luminescence characteristics and their relevance in single-aliquot regeneration dating protocols [J]. *Radiation Measurements*, 2006, 41(4): 369-391.
- [39] 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): 1578-1589. [FAN Daidu, CAI Guofu, SHANG Shuai et al. Sedimentation processes and sedimentary characteristics of tidal bores along the north bank of the Qiantang Estuary [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2012, 57(13): 1578-1589.]
- [40] 刘江艳, 张昌民, 尹太举, 等. 涌潮沉积研究现状及进展[J]. *地球科学进展*, 2018, 33(1): 66-74. [LIU Jiangyan, ZHANG Changmin, YIN Taiju et al. Current status and advance of tidal-bore deposit study [J]. *Advances in Earth Science*, 2018, 33(1): 66-74.]
- [41] Fan D D, Tu J B, Shang S et al. Characteristics of tidal-bore deposits and facies associations in the Qiantang Estuary, China [J]. *Marine*

- Geology*, 2014, 348: 1-14.
- [42] 李保华, 王强, 李从先. 长江三角洲亚三角洲地层结构对比[J]. *古地理学报*, 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.]
- [43] Tam C Y, Zong Y Q, Bin Hassan K et al. A below-the-present late Holocene relative sea level and the glacial isostatic adjustment during the Holocene in the Malay Peninsula [J]. *Quaternary Science Reviews*, 2018, 201: 206-222.
- [44] Bradley S L, Milne G A, Horton B P et al. Modelling sea level data from China and Malay-Thailand to estimate Holocene ice-volume equivalent sea level change [J]. *Quaternary Science Reviews*, 2016, 137: 54-68.
- [45] 田立柱, 陶有兵, 姜兴钰, 等. 莱州湾南岸全新世相对海平面变化重建[J]. *地质通报*, 2016, 35(10): 1679-1691. [TIAN Lizhu, TAO Youbing, JIANG Xingyu et al. Reconstruction of the Holocene relative sea level change for the south coast of Laizhou Bay [J]. *Geological Bulletin of China*, 2016, 35(10): 1679-1691.]
- [46] Yan S, Zhao J X, Lau A Y A et al. Episodic reef growth in the Northern South China Sea linked to warm climate during the past 7, 000 years: potential for future coral refugia [J]. *Journal of Geophysical Research:Biogeosciences*, 2019, 124(4): 1032-1043.
- [47] Zong Y Q. Mid-Holocene sea-level highstand along the Southeast Coast of China [J]. *Quaternary International*, 2004, 117(1): 55-67.
- [48] Wang F, Zong Y Q, Mauz B et al. Holocene sea-level change on the central coast of Bohai Bay, China [J]. *Earth Surface Dynamics*, 2020, 8(3): 679-693.
- [49] 朱诚, 吴立, 李兰, 等. 对江苏新石器时代海面变化问题的再认识[J]. *科学通报*, 2016, 61(3): 374-387. [ZHU Cheng, WU Li, LI Lan et al. Recognition of sea-level change during the Neolithic period in the Jiangsu Area, East China [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2016, 61(3): 374-387.]
- [50] Fleming K, Johnston P, Zwart D et al. Refining the eustatic sea-level curve since the Last Glacial Maximum using far-and intermediate-field sites [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1998, 163(1-4): 327-342.
- [51] 朱诚, 郑朝贵, 马春梅, 等. 对长江三角洲和宁绍平原一万年来高海面问题的新认识[J]. *科学通报*, 2003, 48(24): 2672-2683. [ZHU Cheng, ZHENG Chaogui, MA Chunmei et al. On the Holocene sea-level highstand along the Yangtze Delta and Ningshao Plain, East China [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2003, 48(24): 2672-2683.]