

doi: 10.12097/gbc.2022.03.042

杭州湾北岸现代潮滩沉积物粒度特征及其对古海平面的指示意义

战庆^{1,2,3}, 赵宝成^{1,2,3}, 陈昆钰⁴, 史玉金^{1,2,3}, 王寒梅^{1,2,3}
ZHAN Qing^{1,2,3}, ZHAO Baocheng^{1,2,3}, CHEN Kunyu⁴, SHI Yujin^{1,2,3}, WANG Hanmei^{1,2,3}

1. 上海市地质调查研究院, 上海 200072;
 2. 自然资源部地面沉降监测与防治重点实验室, 上海 200072;
 3. 上海地面沉降控制工程技术研究中心, 上海 200072;
 4. 上海中学国际部, 上海 200231
1. Shanghai Institute of Geological Survey, Shanghai 200072, China;
2. Key Laboratory of Land Subsidence Monitoring and Prevention, Ministry of Natural Resources, Shanghai 200072, China;
3. Shanghai Engineering Research Center of Land Subsidence, Shanghai 200072, China;
4. Shanghai High School International Division, Shanghai 200231, China

摘要: 对杭州湾北岸 3 处现代潮滩沉积物进行高精度粒度分析, 查找研究区潮滩不同微相的粒度特征和差异, 提取基于粒度分析的潮滩微相识别敏感指标, 并将其应用到该区域的全新世钻孔潮滩沉积物中, 识别钻孔潮滩沉积微相, 据此建立研究区全新世早期的海平面曲线。研究表明: 杭州湾北岸现代高潮滩盐沼沉积物粘土含量明显高于高潮滩下部和中潮滩, 而砂含量与之相反; 高潮滩盐沼平均粒径等粒度参数明显小于中、高潮滩的粒度参数; 盐沼沉积物粒度频率曲线峰态宽缓, 明显区别于高潮滩下部和中潮滩。上述现代潮滩微相粒度敏感指标可成功应用到钻孔潮滩沉积微相划分中, 并建立了该区域全新世早期海平面曲线。曲线显示, 9700~8700 cal a BP 期间海平面上升约 11.6 m, 海平面上升速率可达 1.2 cm/a。现代潮滩不同位置沉积物粒度参数的规律性差异可作为潮滩微相识别的有效指标, 为古潮滩沉积微相识别和古海平面重建提供参考依据。

关键词: 粒度分析; 敏感指标; 潮滩微相; 海平面; 杭州湾北岸

中图分类号: P53; P736.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-2552(2024)04-0516-11

Zhan Q, Zhao B C, Chen K Y, Shi Y J, Wang H M. Grain size features of the modern tidal-flat sediment on the north bank of Hangzhou Bay and the implication of sea-level reconstruction. *Geological Bulletin of China*, 2024, 43(4): 516-526

Abstract: In this paper we take detail analyses on the sediment grain size for three tidal flat sections to set up the diagnostic indexes for recognition of tidal flat facies along the north bank of the Hangzhou Bay. The study also examined the application of the diagnostic indexes for distinguishing salt marsh, upper and lower tidal flats in a Holocene sediment core HZK11. The results show that clay and sand components could be the diagnostic indexes for distinguishing salt marsh, upper and lower tidal flats. Salt marsh volume curves are different from the upper and lower tidal flat. The parameters (Mode, Median and Mode) are effective indexes to identify salt marsh upper and lower tidal flat sediments. Above diagnostic sediment components, grain size parameters and volume curves are applied successfully to identify the exact tidal flat facies in boreholes and can be used to reconstruct relative sea-level which demonstrates sea-level rise of around 1.2 cm/a from 9700 cal a BP to 8700 cal a BP.

Key words: grain size analysis; diagnostic indexes; tidal flat facies; sea-level; Hangzhou Bay

收稿日期: 2022-03-23; 修订日期: 2022-06-23

资助项目: 国家自然科学基金项目《杭州湾北岸全新世早期 (10-9 cal ka BP) 高精度海平面重建及沉积环境响应》(批准号: 41706098)、《基于微体化石识别全新世高海面阶段长江口外水团相互作用及调控机制》(批准号: 42076081)

作者简介: 战庆 (1983-), 男, 博士, 高级工程师, 从事长江三角洲地质环境演化研究。E-mail: zhanqing5203893@163.com

联合国政府间气候变化专门委员会(IPCC)第六次评估报告预测,到 21 世纪 30 年代全球升温预计达到 1.5℃,到 2100 年,全球海平面上升平均值可达 2 m,2020 年《长江泥沙公报》显示,近 10 a 长江入海泥沙量减少到 $1.19 \times 10^8 \text{ t}$ (水利部长江水利委员会, 2021),而 1950—1980 年代长江的多年平均入海泥沙量可达 $4.86 \times 10^8 \text{ t}$ (Yang et al., 2011)。因此,在全球变暖、海平面加速上升和长江入海泥沙锐减的背景下,位于中国东部沿海的低海拔城市将面临严峻的城市安全危机。全新世是距离现在最近的一次气候-海平面转型期,地质记录保存完好,重建全新世海平面是揭示过去全球变化中河口海岸地区沉积环境响应过程的重要基础,也是预测未来海平面变化的重要依据。

理论上,凡是可以指示古海岸线和古海平面位置的指标都可以用于全新世海平面重建。研究者利用珊瑚礁、基底泥炭、潟湖-砂坝沉积等各种古海岸线标志和微体古生物转换函数的方法,重建了世界各地的相对海平面曲线 (Shennan et al., 1986; Fairbanks et al., 1989; Chappell et al., 1991; Bard et al., 1996; Yu et al., 2007; Bird et al., 2010)。在中国长江三角洲及杭州湾地区,前人利用基底泥炭、海相地层学、微体古生物转换函数等指标建立了数条全新世海平面曲线 (Chen et al., 1998; Saito et al., 1998; Liu et al., 2004; Zong et al., 2004; Wang et al., 2012, 2013)。总结前人的研究发现,在长江三角洲地区古环境演化和海平面重建过程中,潮滩沉积微相识别一直是关键和难点问题。长江三角洲潮滩相地层往往较厚,最大厚度可以达到十几米 (Zhan et al., 2012; 赵亚楠等, 2015; Wang et al., 2018),因此在海平面重建研究中,需对潮滩沉积进行沉积微相划分,建立更高精度的海平面曲线。潮滩相沉积的岩性和沉积微构造较相似,有孔虫等微体化石由于受潮流搬运异地分子的干扰、潮滩属种的指示范围广等因素影响,难于进一步划分潮滩微相 (汪品先等, 1988),而对潮滩盐沼有明确指示意义的胶结质有孔虫难于在地层中保存 (战庆等, 2014)。

沉积物的粒度组分特征是对沉积环境和动力最直接的表现。本次研究以杭州湾北岸 3 处现代潮滩为研究对象,通过对潮滩不同位置沉积物的高分辨率粒度分析,揭示潮滩微相沉积物颗粒组成特征与差异,提取识别潮滩沉积微相的敏感指标,并将其应用于 HZK11 孔潮滩沉积微相划分中,建立该孔全新世早期海平面曲线,为粒度指标在古潮滩沉积微相

的识别和海平面重建提供科学依据。

1 样品来源及方法

1.1 样品来源

选取杭州湾北岸 3 处自然发育潮滩 (LC01~LC03),沿垂直海岸线方向布设采样剖面 (图 1)。用宽 10 cm 的取样铲在潮滩不同位置水平铲取 200 mL 体积 ($10 \text{ cm} \times 10 \text{ cm} \times 2 \text{ cm}$) 的沉积物样品用于粒度测试,共采取样品 47 件,采样过程中用水准仪同步测量采样点的高程和坐标。

根据金山验潮站数据和 LC01、02 剖面采样点高程,可知 LC01 剖面 1~4 号点和 LC02 剖面 1 号点位于中潮滩,LC01 剖面 5~10 号点和 LC02 剖面 2~7 号点位于高潮滩下部,LC01 剖面 11~18 号点和 LC02 剖面 8~11 号点位于高潮滩盐沼;而位于 LC03 附近的芦潮港验潮站数据显示,LC03 剖面 1~3 号点、4~16 号点、17~18 号点分别位于中潮滩、高潮滩下部和高潮滩盐沼 (图 1、图 2)。

HZK11 孔位于杭州湾北岸水深 10.8 m 海域,钻孔坐标北纬 $30^{\circ}41'0.06''$ 、东经 $122^{\circ}04'0.03''$,孔深 60.8 m (图 1)。根据笔者之前的研究,HZK11 孔钻深 22.45~24.85 m 处的沉积物以杂色硬粘土为主,是形成于末次盛冰期的古土壤,10.6~22.45 m 的沉积物岩性以灰色泥和泥质粉砂为主,富含植物和贝壳碎屑,局部为泥质粉砂和粉砂质泥互层,沉积环境为淤泥质潮滩,0~10.6 m 为灰黄色粉砂质泥,为浅海陆架或前三角洲沉积 (Wang et al., 2018)。本次研究选取孔深 10.6~22.45 m 的淤泥质潮滩沉积物作为研究对象进行粒度分析,粒度样品采样间隔为 20 cm,共采集粒度样品 57 件,为建立年代框架,在孔深 10.6~22.45 m 处共采集 9 个 AMS¹⁴C 样品送至美国 BETA 实验室进行年龄测试,并用 Calib 7.1 程序校正了所有¹⁴C 数据 (表 1; 图 3)。

1.2 研究方法

粒度分析在华东师范大学河口海岸国家重点实验室,采用美国 Beckman Coulter 公司型号为 LS13320 的激光粒度仪测试完成。该仪器粒级测试范围在 0.04~2000 μm 之间,本次分析样品粒径均在仪器测试范围内,试验方法如下。

(1)使用强制对流型烘箱用低于 40℃ 的温度烘干样本,将烘干的样品取约 0.2 g,置于 50 mL 烧杯中,分别加入 10 mL 10% 的 H_2O_2 和 10 mL 的 10% 的 HCl,

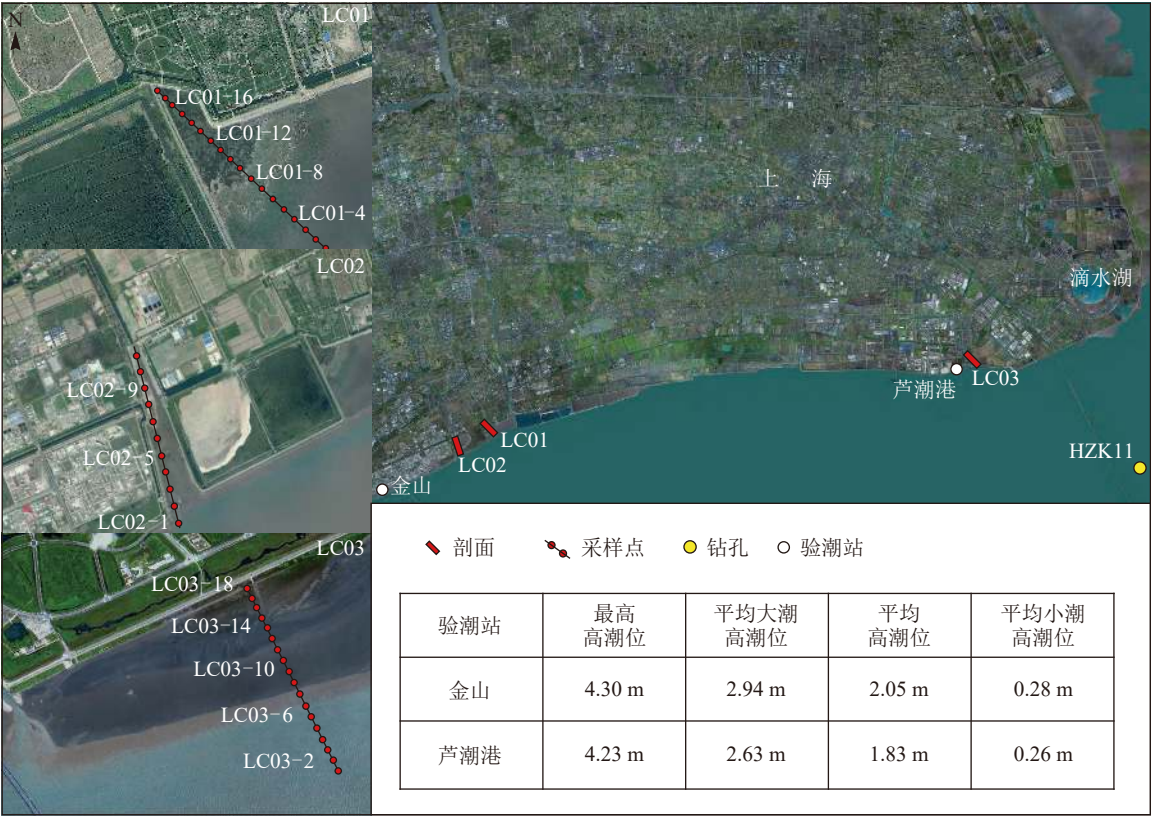


图 1 研究区、剖面、钻孔位置及验潮站数据(黄海高程)

Fig. 1 Location of the study area, core LC01~LC03, and tidal gauge

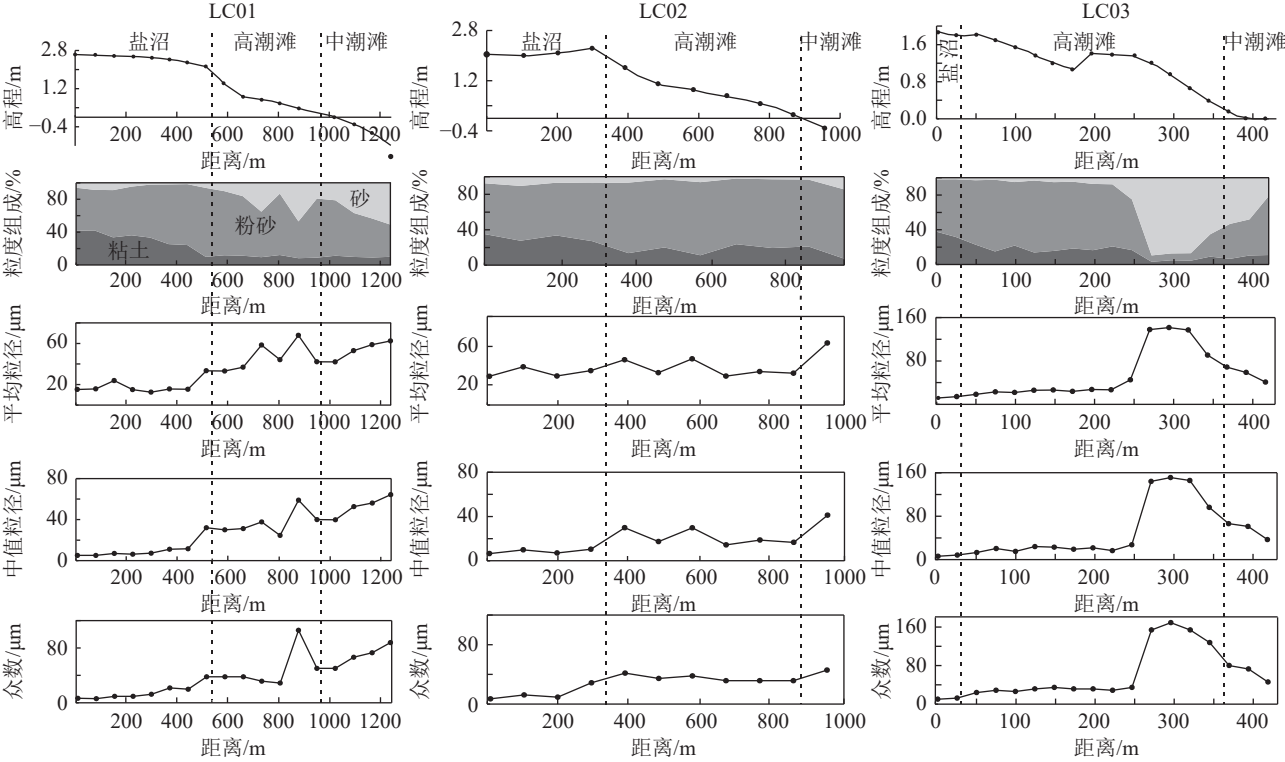


图 2 LC01~LC03 潮滩沉积物粒度参数分布特征

Fig. 2 Distribution of sediment composition and grain size parameters of LC01~LC03

表 1 LC01 ~ LC03 潮滩沉积物粒度参数

Table 1 Grain size distribution of tidal-flat sediments in LC01 ~ LC03

沉积相	剖面	粘土/%		粉砂/%		砂/%		平均粒径/ μm		中值粒径/ μm		众数/ μm	
		极值	均值	极值	均值	极值	均值	极值	均值	极值	均值	极值	均值
盐沼	LC01	9.9~42.1	30.8	49.4~83.9	64.2	1.6~8.9	5.0	12.6~33.4	18.3	5.1~32.1	10.7	5.9~38.0	15.4
	LC02	27.1~35.3	30.9	57.2~65.7	61.1	6.9~10.4	8.0	19.4~25.9	22	6.6~10.5	8.5	7.1~28.7	14.4
	LC03	31.7~37.9	34.8	60.2~66.5	63.4	1.8~1.9	1.9	11.7~14.3	13	6.2~8.5	7.4	10.3~12.4	11.3
高潮滩	LC01	8.3~12.1	10.3	44.8~78.1	66.3	10.1~47	23.4	33.1~67.9	47.1	24.6~59	37.1	28.7~105.9	48.7
	LC02	11.3~23.7	18.2	74.1~82.5	77.7	2.2~6.8	4.1	19.6~31.3	24.4	14.4~29.9	21.2	31.5~41.7	34.8
	LC03	3~22.8	14.1	7.5~82.8	55.8	2.4~89.5	30.2	18.4~141	57.4	13.1~151	55.3	23.8~168.9	67.3
中潮滩	LC01	9.1~11.2	10	38.9~67.5	51.8	21.3~51.1	38.2	42~62.4	54	39.8~64.3	53.2	50.2~87.9	69.4
	LC02	7.4	7.4	78.2	78.2	14.4	14.2	42	42	41.2	41.2	45.8	45.8
	LC03	6.5~10.9	9.2	40.3~68.4	50.1	20.7~53.2	40.6	41~68.6	56.1	37.1~66.4	54.9	45.8~80.1	66.3

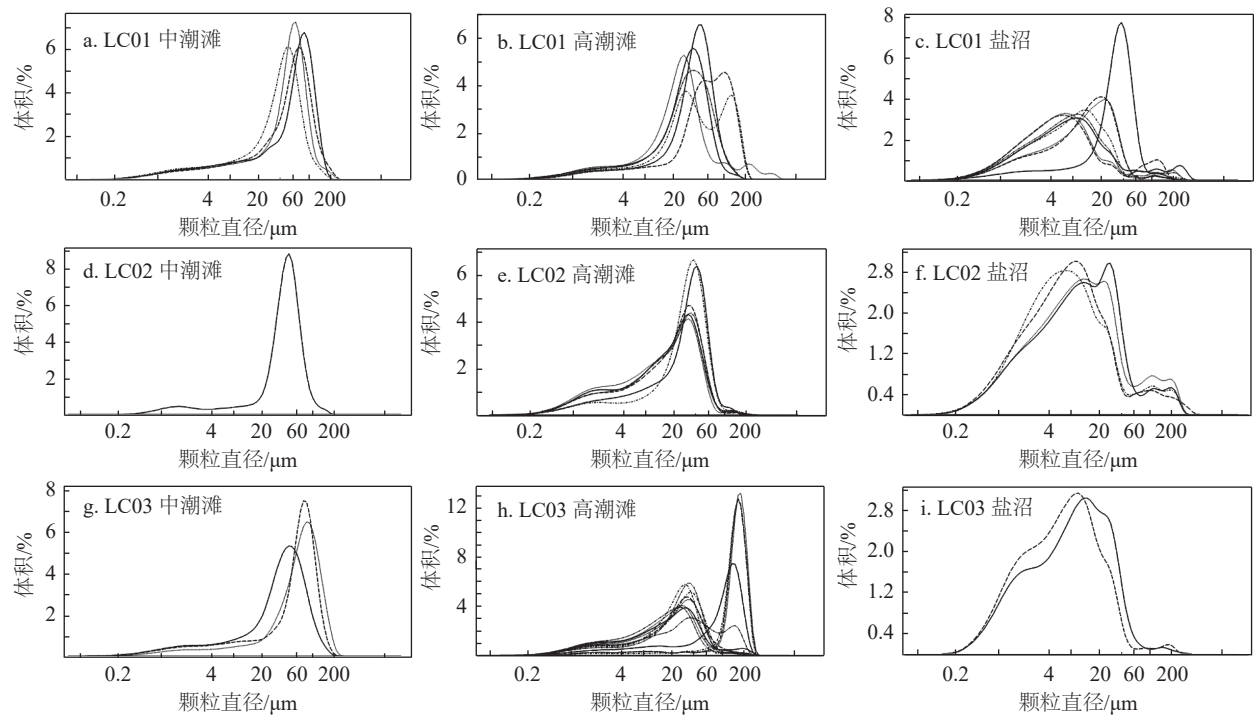


图 3 杭州湾北岸现代潮滩沉积物粒度分布曲线

Fig. 3 Differential grain size curves of the modern tidal-flat sediments on the north bank of Hangzhou Bay

分别去除有机质和 CaCO_3 。

(2)加入蒸馏水,静置 12 h 让样本沉淀,然后倒去上浮清液,重复此步骤直至上层清液的 pH 值呈中性为止;加入 1~2 滴浓度为 5% 的六偏磷酸钠分散剂,搅拌均匀,用超声波清洗器分散约 20 min,使沉积物颗粒充分分散,然后上机测试。

(3)将测试结果经激光粒度仪自带分析软件进行分析,得到所有样品的粒度频率曲线,并计算出平均粒径、中值粒径、众数等粒度参数,以及粘土 ($<4\mu\text{m}$)、

粉砂 ($4\sim63\mu\text{m}$)、砂 ($>63\mu\text{m}$) 等粒级的体积百分比。

2 研究结果

2.1 现代潮滩沉积物粒度特征

2.1.1 LC01 粒度特征

LC01 剖面中潮滩沉积物岩性为砂质粉砂,高潮滩下部沉积物以粉砂为主,高潮滩盐沼沉积物岩性为粘土质粉砂(图 2)。中潮滩和高潮滩下部沉积物各粒级组成较相似,中潮滩沉积物粘土含量在

9.1%~11.2% 之间, 平均 10.0%, 高潮滩下部沉积物粘土含量在 8.3%~12.1% 之间, 平均 10.3%(表 1; 图 2)。与之形成鲜明对比的是, 高潮滩盐沼沉积物粘土百分含量平均可达 30.8%, 绝大多数粘土含量在 25.3%~42.1% 之间。剖面不同, 沉积相砂的百分含量也不同, 表现出随高程上升而下降的趋势, 其中, 中潮滩沉积物砂含量在 21.3%~51.1% 之间, 平均 38.2%, 高潮滩下部沉积物砂含量在 10.1%~47.0% 之间, 平均 23.4%, 而高潮滩盐沼砂的含量明显降低, 含量在 1.6%~8.9% 之间, 平均为 5.0%。另外, 中潮滩沉积物粉砂的含量在 38.9%~67.5% 之间(平均 51.8%), 而高潮滩下部沉积物粉砂含量波动较大, 含量在 44.8%~78.1% 之间(平均 66.3%), 高潮滩盐沼沉积物粉砂含量在 49.4%~83.9% 之间, 平均 64.2%。

沉积物粒度参数是研究沉积特征及鉴别沉积环境的重要方法。LC01 潮滩不同位置的沉积物粒度参数也明显不同, 中潮滩平均粒径、中值粒径和众数平均值分别为 54.0 μm 、53.2 μm 和 69.4 μm (表 1; 图 2), 高潮滩下部平均粒径、中值粒径和众数呈递减趋势, 平均值分别为 47.1 μm 、37.1 μm 和 48.7 μm ; 而高潮滩盐沼各粒度参数分别锐减到 18.3 μm 、10.7 μm 和 15.4 μm 。

粒度频率曲线可以反映沉积物的粒度分布情况, 不同沉积环境形成的粒度频率曲线形态不同。曲线的峰态、峰值和偏态能够反映沉积过程中能量的变化。LC01 剖面中潮滩粒度曲线均为典型的陡峭单峰曲线, 峰值右偏, 峰值大多出现在 60 μm 附近(图 3-a)。高潮滩下部沉积物粒度曲线主要呈单峰或双峰 2 种形态, 单峰峰值出现在 20~60 μm 附近, 双峰峰值则分别出现在 20~40 μm 和 120 μm 附近(图 3-b); 高潮滩盐沼粒度曲线呈现宽缓的双峰型, 主峰出现在 6~20 μm 附近, 尾峰出现在 100~200 μm 之间(图 3-c)。

2.1.2 LC02 粒度特征

LC02 剖面中潮滩沉积物以粉砂为主, 高潮滩下部以粉砂和粘土质粉砂为主, 盐沼沉积物岩性为粘土质粉砂。沉积物粘土含量随高程升高而逐渐增加, 具体表现为: 中潮滩粘土含量为 7.4%; 高潮滩下部粘土含量在 11.3%~23.7% 之间, 平均 18.2%; 盐沼粘土含量在 27.1%~35.3% 之间, 平均 30.9%。而粉砂含量呈现与之相反的规律。

LC02 剖面沉积物粒度参数变化虽没有 LC01 明

显, 但其平均粒径、中值粒径与众数仍表现出随高程变高而减小的趋势, 表现最明显的是中值粒径和众数, 中潮滩和高潮滩下部沉积物中值粒径和众数分别在 14.4~29.9 μm 和 31.5~41.7 μm 之间, 平均值分别为 21.2 μm 和 34.8 μm , 而盐沼沉积物中值粒径和众数明显下降, 分别在 6.6~10.5 μm 和 7.1~25.928.7 μm 之间, 平均值分别为 8.5 μm 和 14.4 μm 。

LC02 中潮滩和高潮滩下部粒度频率曲线均为狭窄单峰, 峰值分别出现在 60 μm 和 30~40 μm 附近(图 3-d,e), 盐沼粒度分布曲线呈宽缓多峰形态, 其主峰出现在 8 μm 左右, 次峰出现在 100~200 μm 之间(图 3-f)。

2.1.3 LC03 粒度特征

LC03 中潮滩沉积物以粉砂质为主, 高潮滩下部则以细砂为主, 盐沼为粘土质粉砂。LC03 潮滩沉积物粘土含量随高程变高而增加, 中潮滩粘土含量在 6.5%~10.9% 之间, 平均 9.2%。高潮滩粘土平均含量上升到 14.1%, 而盐沼粘土平均含量高达 34.8%。中潮滩、高潮滩下部和盐沼粉砂平均含量分别为 50.1%、55.8% 和 63.4%, 含量呈现逐步上升的趋势。而砂的含量与粉砂呈相反趋势。

LC03 潮滩粒度参数总体呈现先增后减的趋势, 中潮滩平均粒径、中值粒径和众数平均值分别为 56.1 μm 、54.9 μm 和 66.3 μm , 而高潮滩沉积物粒度参数与中潮滩相当。高潮滩盐沼粒度参数进一步降低, 平均粒径、中值粒径和众数平均值分别降至 13 μm 、7.4 μm 和 11.3 μm 。

LC03 中潮滩粒度频率曲线以单峰为主, 峰值出现在 60~100 μm 附近(图 3-g), 高潮滩下部则存在 2 种类型的曲线, 其中高潮滩下部靠近中潮滩的 4 个点位曲线呈尖锐单峰曲线, 峰值出现在 150 μm 附近, 其他点位为较宽缓单峰, 峰值大多在 30 μm 附近(图 3-h)。盐沼呈现宽缓多峰状态, 其中主峰出现在 8~20 μm 附近, 前后叠加了 2 个次峰, 波峰分别出现在 0.8~4 μm 和 100~200 μm 附近(图 3-i)。

2.2 HZK11 孔潮滩沉积物粒度特征

HZK11 孔孔深 10.6~22.45 m 为淤泥质潮滩沉积环境(Wang et al., 2018)(图 4), 但缺乏进一步的证据对约 10 m 厚潮滩沉积物做更精细的沉积微相划分, 尤其是无法确定对海平面波动最敏感的盐沼环境的位置。因此, 笔者通过高分辨率粒度指标分析, 查找 HZK11 孔潮滩沉积物垂向上的差异, 为潮滩微相的

划分提供依据。

层 I 10.6~15.2 m, 灰色均质泥含大量灰白色泥粒和平躺植物茎干, 局部见直立根茎, 见较多贝壳碎片和不完整螺壳。本段沉积物粘土和粉砂含量较高, 平均含量分别为 23.7% 和 71.9%(表 2; 图 4), 砂平均含量为 4.4%。平均粒径、中值粒径和众数平均值分别为 18.9 μm 、12.3 μm 、21.9 μm (表 2)。粒度频率曲线呈现较宽缓双峰, 峰态右偏, 主峰位于 20 μm ,

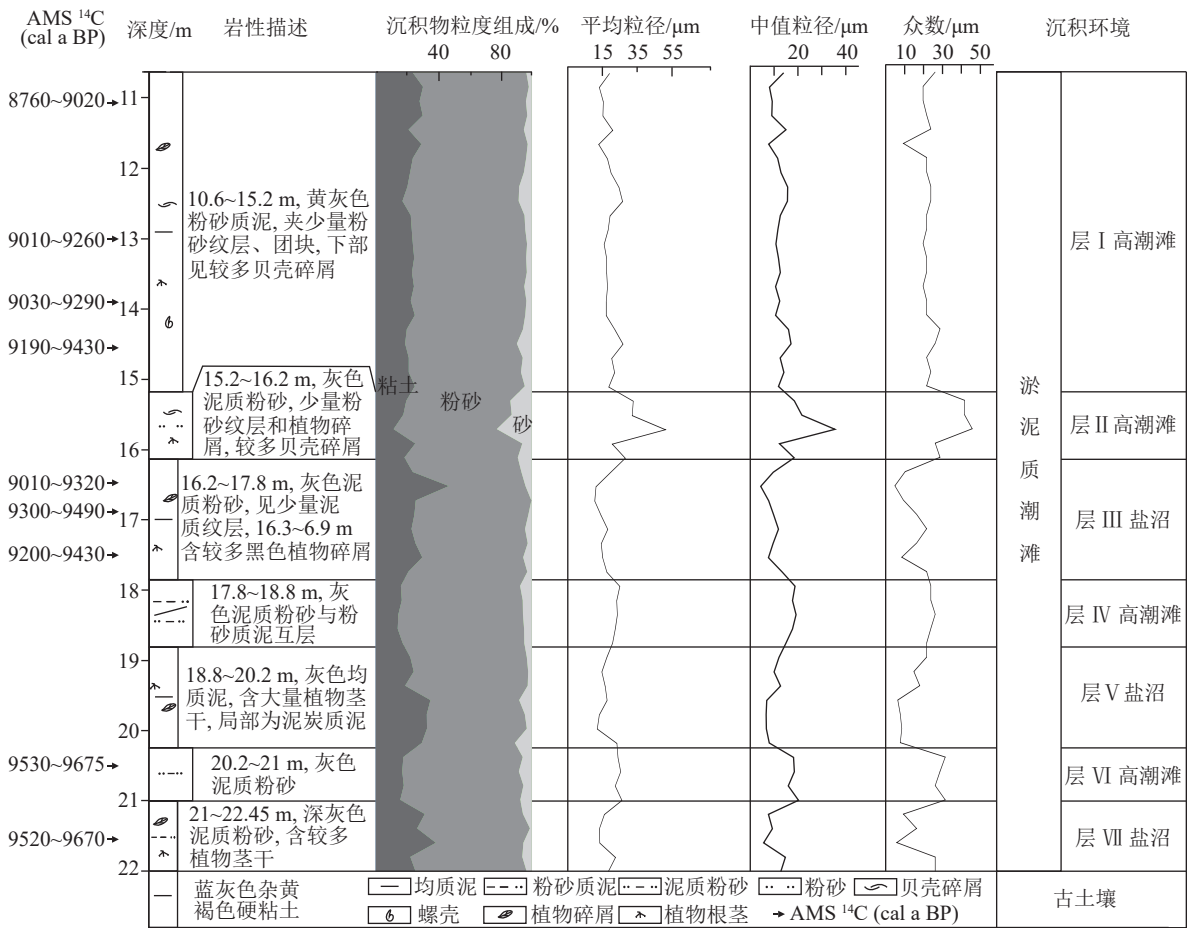


图 4 HZK11 孔 AMS ¹⁴C 测年、岩性、粒度和沉积环境

Fig. 4 Comprehensive profile of core HZK11 including calibrated AMS ¹⁴C age, lithology, grain size and interpretation of sedimentary environment

表 2 HZK11 孔沉积物粒度参数

分层	粘土/%		粉砂/%		砂/%		平均粒径/ μm		中值粒径/ μm		众数/ μm	
	极值	均值	极值	均值	极值	均值	极值	均值	极值	均值	极值	均值
层 I	17.3~30.5	23.7	67.2~74.7	71.9	1.6~9.2	4.4	12.8~26.8	18.9	7.8~17.1	12.3	9.4~28.7	21.9
层 II	11.6~25.5	18.7	66.3~72.7	68.8	5.8~22.1	12.5	20.7~51.2	32.9	12.3~35.5	21.3	26.1~45.8	36.8
层 III	21~47.2	27.7	49.1~76.5	69	0~6.3	3.2	10.5~19.5	15.1	4.4~13.4	9.3	4.9~21.7	13.7
层 IV	14.3~17.4	15.9	76.5~81.1	78.7	4.4~7.2	5.4	20.8~24.9	22.9	14.9~19.2	17.7	21.7~26.1	23.9
层 V	19.1~35.3	28.2	56.9~78.7	67.2	2~10.6	4.6	12~23.3	16.4	6.7~12.7	9	6.5~21.7	12.2
层 VI	15.9~18.2	17.3	74.9~77.1	76.4	5~7.9	6.4	22.3~26.2	24.5	16~20.2	18.2	26.1~31.5	29.5
层 VII	22.4~38.7	29	56.3~72.5	67	0.8~5.7	4	13.2~22.5	16.7	5.6~14.7	10	5.9~26.1	16.8

次峰位于 $100\ \mu\text{m}$ (图 5-a)。

层 II $15.2\sim 16.2\ \text{m}$, 灰色泥质粉砂, 夹少量泥质纹层和植物碎屑, 含较多贝壳碎屑。沉积物砂含量在 $5.8\%\sim 22.1\%$ 之间, 平均含量为 12.5% , 为全孔最高, 粘土和粉砂平均含量变小, 分别为 18.7% 和 68.8% (表 2; 图 4)。平均粒径、中值粒径和众数平均值分别为 $32.9\ \mu\text{m}$ 、 $21.3\ \mu\text{m}$ 和 $36.8\ \mu\text{m}$, 均为全孔最高(表 2; 图 4)。粒度频率曲线呈双峰曲线, 主峰较窄, 峰值位于 $40\sim 60\ \mu\text{m}$ 之间, 次峰峰值位于 $300\sim 400\ \mu\text{m}$ (图 5-b)。

层 III $16.2\sim 17.8\ \text{m}$, 灰色泥质粉砂, 见少量泥质纹层, $16.3\sim 16.9\ \text{m}$ 含较多黑色植物碎屑。本段沉积物

较层 II 明显变细, 粘土平均含量可达 27.7% , 砂平均含量仅为 3.2% , 为全孔最低(表 2; 图 4)。平均粒径仅为 $15.1\ \mu\text{m}$, 为全孔最低值, 中值粒径和众数平均值分别为 $9.3\ \mu\text{m}$ 和 $13.7\ \mu\text{m}$, 为全孔次低(表 2; 图 4)。本段沉积物粒度频率曲线为宽缓双峰, 主峰大都位于 $4\sim 8\ \mu\text{m}$ 之间(图 5-c)。

层 IV $17.8\sim 18.8\ \text{m}$, 灰色泥质粉砂与粉砂质泥互层。沉积物粉砂含量在 $76.5\%\sim 81.1\%$ 之间, 平均含量高达 78.7% , 粘土含量明显降低, 含量在 $14.3\%\sim 17.4\%$ 之间, 砂含量略有增加, 平均值为 5.4% (表 2; 图 4)。平均粒径、中值粒径和众数较层 III 明显变大, 平均值分别为 $22.9\ \mu\text{m}$ 、 $17.7\ \mu\text{m}$ 和 $23.9\ \mu\text{m}$ (表 2;

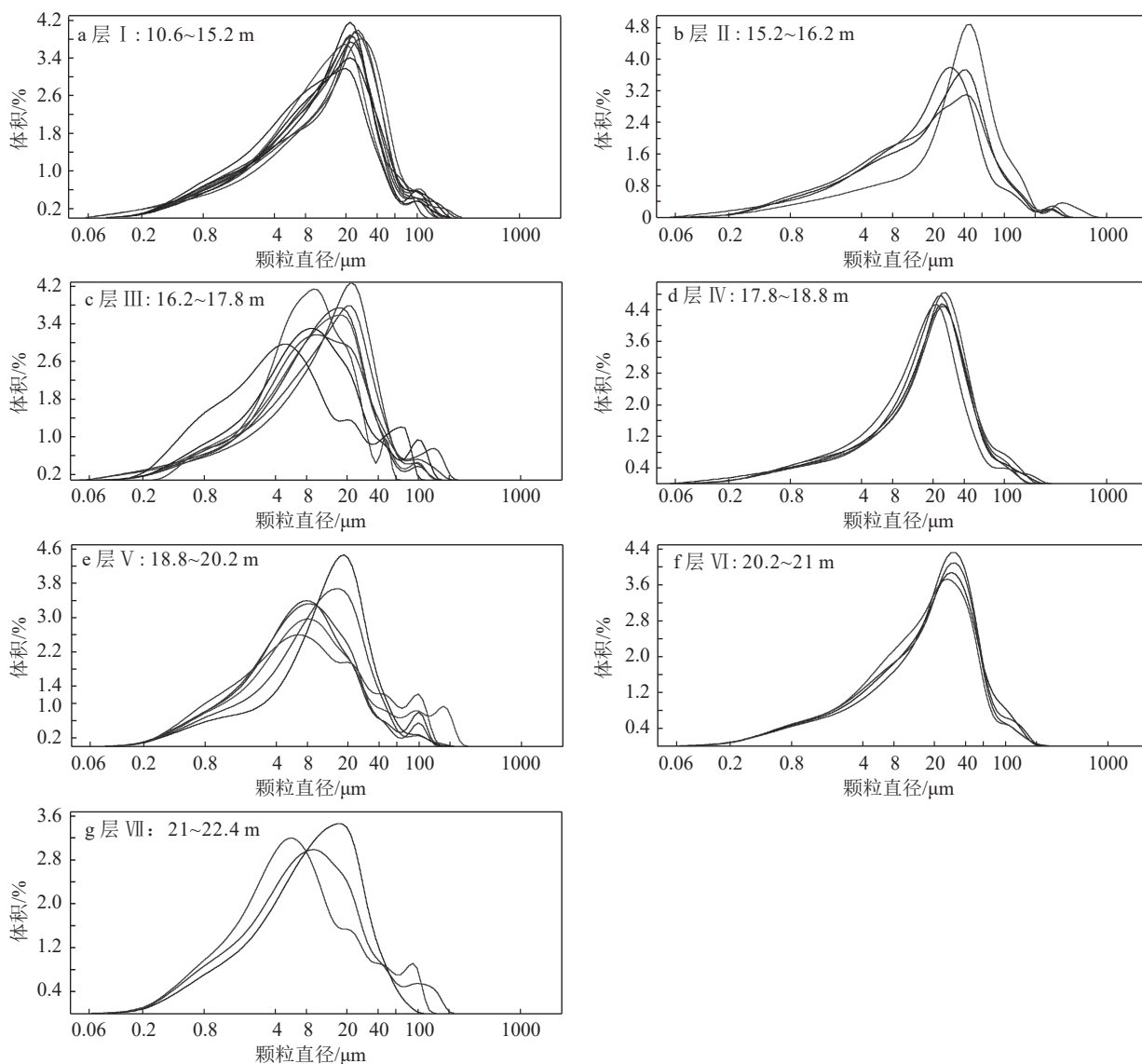


图 5 HZK11 孔潮滩沉积物粒度频率曲线

Fig. 5 Differential volume curves of grain size of tidal-flat sediments from core HZK11

图 4)。该段沉积物粒度频率曲线为尖锐单峰, 峰值位于 20~40 μm 之间(图 5-d)。

层 V 18.8~20.2 m, 灰色深灰色均质泥, 含大量中空植物茎干, 水平分布, 少量植物根茎, 局部为泥炭质泥。本段沉积物粘土含量全孔次高, 平均含量为 28.2%, 粉砂含量减少至 67.2%, 而砂的平均含量为 4.6%(表 2; 图 4)。平均粒径减小至 16.4 μm , 而中值粒径和众数则为全孔最低, 平均值分别为 9 μm 和 12.2 μm (表 2; 图 4)。沉积物粒度频率曲线与层 III 类似, 主峰峰值大都位于 4~8 μm , 次峰位于 100 μm (图 5-e)。

层 VI 20.2~21 m, 灰色泥质粉砂, 本段沉积物粘土含量再次下降, 平均含量为 17.3%, 为全孔次低, 粉砂和砂平均含量分别增至 76.4% 和 6.4%(表 2; 图 4)。平均粒径、中值粒径和众数分别增加至 24.5 μm 、18.2 μm 和 29.5 μm (表 2; 图 4)。粒度频率曲线形态与层 IV 基本一致, 为尖锐单峰, 峰值位于 20~40 μm 之间(图 5-f)。

层 VII 21~22.45 m, 灰色、深灰色泥质粉砂, 21.2 m 以下含较多植物茎干, 21.64 m 见厚约 1 cm 植物碎屑层。该段沉积物粘土含量增至 29%, 为全孔最高, 而粉砂和砂平均量则分别减少至 67% 和 4%(表 2; 图 4)。平均粒径、中值粒径和众数分别减少至 16.7 μm 、10 μm 、16.8 μm (表 2; 图 4)。粒度频率曲线较

宽缓, 主峰值位于 4~20 μm 之间(图 5-g)。

3 讨 论

3.1 杭州湾北岸现代潮滩微相沉积物粒度特征指标

从 3 条现代潮滩剖面沉积物粒度的分析结果可以看出, 杭州湾北岸中潮滩、高潮滩及高潮滩盐沼沉积物无论在粒度组成、粒度参数, 还是粒度频率曲线都表现出明显的规律特征。杭州湾潮滩沉积物总体以粉砂为主, 粉砂平均含量均超过 60%, 同时粘土含量随高程变高而明显增加, 即盐沼沉积物粘土平均含量均大于 30%, 明显高于高潮滩下部及中潮滩, 而砂的含量则表现出与粘土相反的规律(图 6)。

粒度参数在潮滩不同位置也表现出明显的差异, 总体表现为随高程增高, 粒度参数逐渐降低。盐沼沉积物平均粒径、中值粒径和众数均值(17.8 μm 、8.9 μm 、13.7 μm)明显小于高潮滩下部和中潮滩, 而高潮滩下部粒度参数(43 μm 、37.9 μm 、50.3 μm)则略小于中潮滩(50.7 μm 、49.8 μm 、60.5 μm)(图 6)。

粒度频率曲线差异主要体现在峰态和峰值, 盐沼粒度曲线呈现出宽缓多峰型, 主峰峰值位于 4~8 μm 或 20 μm 附近, 高潮滩下部粒度曲线总体以较宽缓单峰为主, 峰值位于 20~40 μm 附近, 中潮滩沉积物粒度曲线以窄单峰为主, 峰值大都位于 40~100 μm

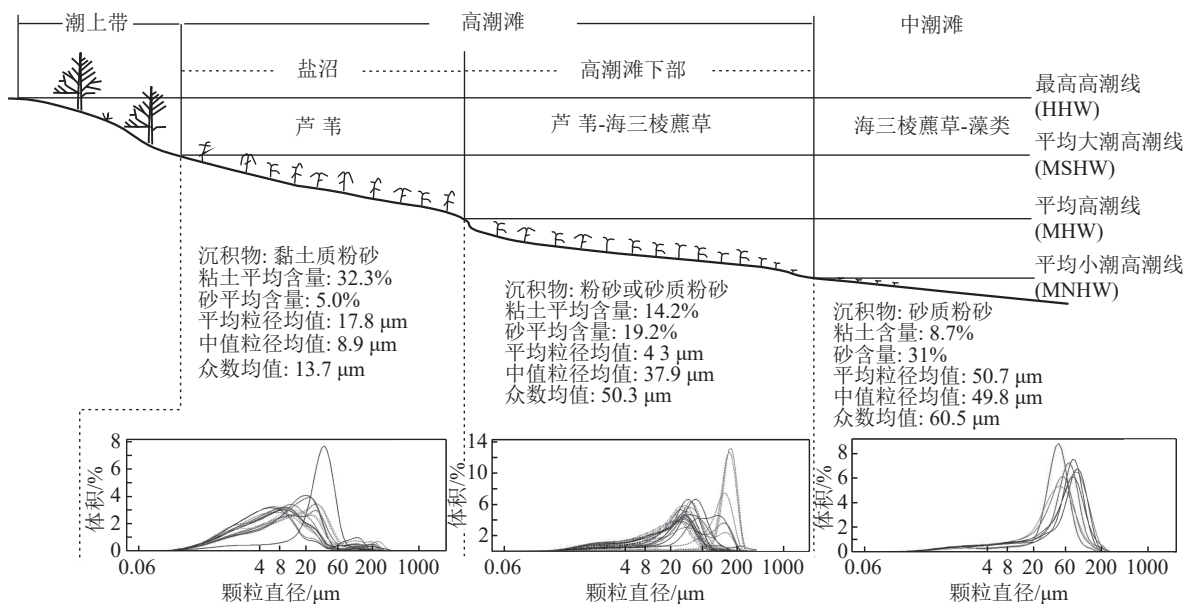


图 6 杭州湾北岸潮滩沉积微相划分及粒度特征指标差异

Fig. 6 Schematic profile of the north bank of Hangzhou Bay including clay and sand content, mean, median and mode, and volume curves of grain size

之间(图 6)。

综上所述,杭州湾北岸现代高潮滩盐沼沉积物粘土含量明显高于高潮滩下部和中潮滩,而砂含量则相反;盐沼沉积物平均粒径、中值粒径和众数均值(17.8 μm、8.9 μm、13.7 μm)明显小于高潮滩下部和中潮滩;盐沼沉积物粒度频率曲线峰态宽缓,峰值位于 4~20 μm 之间,明显区别于高潮滩下部和中潮滩。以上可作为潮滩微相识别的有效指标。

3.2 HZK11 孔潮滩沉积微相划分

HZK11 孔层Ⅲ、Ⅴ和Ⅶ沉积物中粘土含量分别为 27.7%、28.2%、29%,接近现代盐沼的 32.3%,砂含量均不足 5%,与现代潮滩盐沼沉积物相似;平均粒径在 15.1~16.7 μm 之间,略小于盐沼的 17.8 μm,中值粒径和众数分别在 9~10 μm 和 12.2~16.8 μm 之间,均与盐沼相当(表 1、表 2;图 6)。在粒度频率曲线上,层Ⅲ、Ⅴ和Ⅶ均以宽缓峰形为主,也与现代高潮滩盐沼沉积物的粒度频率曲线相似,且主峰值均位于 4~20 μm 之间。以上证据表明层Ⅲ、Ⅴ和Ⅶ的沉积物组分含量、粒度参数和频率曲线形态与现代高潮滩盐沼相似,但与现代高潮滩下部和中潮滩相差较大。因此可以推测,HZK11 孔层Ⅲ、Ⅴ和Ⅶ属于高潮滩盐沼沉积。

层Ⅰ、Ⅱ、Ⅳ、Ⅵ沉积物粒度组成与现代中潮滩和高潮滩盐沼相差较大,但与现代高潮滩下部接近(表 1、表 2;图 6),平均粒径、中值粒径和众数平均值分别在 18.9~32.9 μm、12.3~21.3 μm 和 21.9~36.8 μm 之间,与高潮滩下部更接近,粒度频率曲线的峰型、峰态和峰值均与现代高潮滩相似。因此推断,层Ⅰ、

Ⅱ、Ⅳ、Ⅵ为高潮滩下部沉积。

3.3 HZK11 孔全新世早期海平面重建

利用钻孔沉积物反演古海平面的关键是找到确
信可靠的海平面指示物,例如基底泥炭已被证明是
重建高精度海平面的有效指标 (Gehrels et al., 1999;
Törnqvist et al., 2004; Bird et al., 2009, 2010)。但笔者
之前的研究发现,长江三角洲地区基底泥炭的发育
十分有限 (Wang et al., 2012, 2013; 战庆等, 2014),高
输沙量和高沉积速率可能是导致基底泥炭不发育的
主要原因。因此,除基底泥炭外,如何找到其他可靠
的指示海平面的标志性沉积物,以及如何确定它们
和海平面之间的定量关系,是长江三角洲海平面研
究的关键问题 (高晓琴等, 2012; Wang et al., 2013; 李
琳等, 2013)。

潮滩相沉积物的沉积环境相对稳定,沉积物中
富含芦苇、海三棱藨草等原生测年材料,且受沉积物
压实作用影响小。因此认为,发育在第一硬土层之
上的潮滩相沉积是海平面重建的有效指标。但
HZK11 孔潮滩沉积的厚度较大,需要对潮滩沉积相
进行更加精细的沉积微相划分,从而提高海平面曲
线的精度。选取位于杭州湾南岸南汇、吴淞和外高
桥 3 个验潮站潮位平均值计算古海平面位置 (Wang
et al., 2012, 2013),综合参考海平面标志性沉积物
的高程和验潮站潮位数据,根据公式 $SL=H-I$ 推算古海
平面位置,结合泥炭的年龄重建了研究区全新世中
期相对海平面曲线(表 3;图 6)。

本次研究重建的全新世早期相对海平面曲线
(图 7)显示,9700~8700 cal a BP 约 1000 a 的时间,海

表 3 HZK11 孔沉积物对古海平面的指示意义和古海平面位置

Table 3 Relative sea-level reconstructed using sea-level indicators of core HZK11

实验室编号	标高H/m	测年材料	沉积环境	测试年龄		校正年龄 (2σ)		指示意义		古海平面(SL)	
				a BP	误差	cal a BP	可信度	指示位置	标高/m	标高/m	误差
β-345615	-22.93	植物碎屑	高潮滩下部	8080	40	8760~9020	0.99	MNHW-MHW	1.07±0.6	-24.0	0.60
β-345617	-24.86	植物碎屑	高潮滩下部	8180	40	9010~9160	0.72	MNHW-MHW	1.07±0.6	-25.93	0.60
β-345618	-25.76	植物碎屑	高潮滩下部	8250	40	9030~9290	1	MNHW-MHW	1.07±0.6	-26.83	0.60
β-345619	-26.41	植物碎屑	高潮滩下部	8320	40	9190~9430	0.88	MNHW-MHW	1.07±0.6	-27.48	0.60
β-345620	-28.21	植物碎屑	盐沼	8240	60	9010~9320	0.96	MHW-MSHW	2.12±0.45	-30.33	0.45
β-345621	-28.74	植物碎屑	盐沼	8430	40	9300~9490	1	MHW-MSHW	2.12±0.45	-30.86	0.45
β-345622	-29.36	植物碎屑	盐沼	8330	40	9200~9430	0.92	MHW-MSHW	2.12±0.45	-31.48	0.45
β-345623	-32.33	植物碎屑	高潮滩下部	8670	40	9530~9680	1	MNHW-MHW	1.07±0.6	-33.40	0.60
β-345624	-33.47	植物碎屑	盐沼	8640	40	9520~9670	0.99	MHW-MSHW	2.12±0.45	-35.59	0.45

注: MHW—平均高潮位; MNHW—平均小潮高潮位; MSHW—平均大潮高潮位

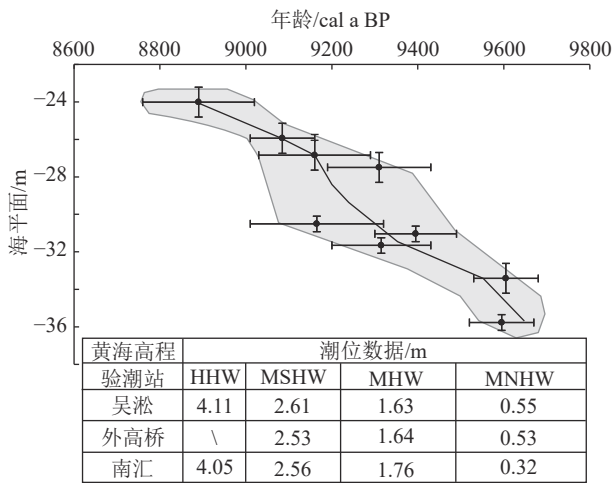


图 7 HZK11 孔全新世早期相对海平面曲线

Fig. 7 Reconstructed relative sea-level curve during the early Holocene with data of core HZK11

平面上升了约 11.6 m, 海平面上升速率达 1.2 cm/a, 处于快速上升阶段。这与 Wang et al. (2012) 8600~8500 cal a BP 和 7400~7200 cal a BP 长江三角洲南部相对海平面上升速率 1~2 cm/a 的结论一致。笔者在长江三角洲南部松江奉贤区域重建的相对海平面曲线也显示, 8500~8000 cal a BP 海平面快速上升了约 9 m, 上升速率达 1.8 cm/a (Wang et al., 2013)。综合前人研究发现, 全新世早期 (10000~8000 cal a BP) 长江三角洲南部相对海平面处于快速上升时期, 海平面上升速率均超过 1 cm/a, 明显高于中国 1980—2021 年海平面 3.4 cm/a 的上升速率 (国家海洋局, 2012)。全新世早期海平面快速上升事件在全球各地均有报道 (Bird et al., 2007; Tamura et al., 2009; Hijma et al., 2010)。Tamura et al. (2009) 利用柬埔寨湄公河低地的 3 个钻孔计算得出, 在 8500~8400 cal a BP 期间, 海平面上升速率高达 5 cm/a (Tamura et al., 2009)。Bird et al. (2007) 利用 50 个潮间带的红树林泥炭数据, 重建了新加坡 6500~9500 cal a BP 的海平面曲线, 研究显示, 海平面在 9500~8000 cal a BP 期间快速上升了 14 m (Bird et al., 2007)。Hijma et al. (2010) 在欧洲的研究也显示, 该区域海平面在 8500~8300 cal a BP 期间快速上升了约 3 m。

4 结 论

(1) 杭州湾北岸现代高潮滩盐沼沉积物粘土含量明显高于高潮滩下部和潮中滩, 而砂含量、平均粒径、中值粒径和众数相反, 盐沼沉积物粒度频率曲线

峰态宽缓, 峰值位于 4~20 μm 之间, 明显区别于高潮滩下部和潮中滩, 可作为潮滩微相识别的特征指标。

(2) 钻孔潮滩相的沉积物组成、粒度参数和粒度频率曲线表现出与现代潮滩高度相似的规律, 因此通过高分辨率的粒度分析有助于钻孔潮滩沉积序列的精细划分。

(3) 重建的全新世早期相对海平面曲线显示, 9700~8700 cal a BP 期间海平面上升约 11.6 m, 海平面上升速率可达 1.2 cm/a。

(4) 基于粒度分析的古潮滩微相划分是重建古海平面的有效指标, 但仍需佐以微体古生物化石、TOC/TN、TOC/TS 和自生铁硫化物等指标, 从而提高古潮滩微相划分的可靠性。

参考文献

- Bard E, Hamelin B, Arnold M, et al. 1996. Deglacial sea-level record from Tahiti corals and the timing of global meltwater discharge[J]. *Nature*, 382: 241-244.
- Bird M I, Fifield L K, Teh T S, et al. 2007. An inflection in the rate of early mid-Holocene eustatic sea-level rise: A new sea-level curve from Singapore[J]. *Estuarine Coastal & Shelf Science*, 71(3/4): 523-536.
- Bird M I, Fifield L K, Teh T S, et al. 2009. An inflection in the rate of early mid-Holocene eustatic sea-level rise: a new sea-level curve from Singapore[J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 71: 523-536.
- Bird M, Austin W E N, Wurster C M, et al. 2010. Punctuated eustatic sea-level rise in the early mid-Holocene[J]. *Geology*, 38: 803-806.
- Chappell J, Polach H. 1991. Post-glacial sea-level rise from a coral record at Huon Peninsula, Papua New Guinea[J]. *Nature*, 349: 147-149.
- Chen Z, Stanley D J. 1998. Rising sea level on eastern China's Yangtze Delta[J]. *Journal of Coastal Research*, 14: 360-366.
- Fairbanks R G. 1989. A 17000-year glacio-eustatic sea level record: influence of glacial melting rates on the Younger Dryas event and deep-ocean circulation[J]. *Nature*, 342: 637-642.
- Gehrels W R. 1999. Middle and Late Holocene sea-level changes in eastern Maine reconstructed from foraminiferal saltmarsh stratigraphy and AMS ^{14}C dates on basal peat[J]. *Quaternary Research*, 52: 350-359.
- Hijma M P, Cohen K M. 2010. Timing and magnitude of the sea-level jump prelude the 8200 yr event[J]. *Geology*, 38(3): 275-278.
- Liu J P, Milliman J D, Gao S. 2004. Holocene development of the Yeeow River's sub-aqueous delta, North Yellow Sea[J]. *Marine Geology*, 209: 45-67.
- Saito Y. 1998. Sea levels of the last glacial in the East China Sea continental shelf[J]. *Quaternary Research*, 37: 235-242.

- Shennan I. 1986. Flandrian sea-level changes in the Fenland II: Tendencies of sea-level movement, altitudinal changes, and local and regional factors[J]. *Journal of Quaternary Science*, 1: 155–179.
- Tamura T, Saito Y, Sieng S, et al. 2009. Initiation of the Mekong River delta at 8 ka: evidence from the sedimentary succession in the Cambodian lowland[J]. *Quaternary Science Reviews*, 28(3/4): 327–344.
- Törnqvist T E. 2004. Deciphering Holocene sea-level history on the U. S. Gulf Coast: A high-resolution record from the Mississippi Delta[J]. *Geological Society of America*, 116: 1026–1039.
- Wang Z H, Saito Y, Zhan Q, et al. 2018. Three - Di- mensional Evolution of the Yangtze River Mouth, China during the Holocene: Impacts of Sea Level, Climate and Human Activity[J]. *Earth-Science Reviews*, 185: 938–955.
- Wang Z, Zhan Q, Long H, et al. 2013. Early to mid-Holocene rapid sea-level rise and coastal response on the southern Yangtze delta plain, Chinae[J]. *Journal of Quaternary Scienc*, 28(7): 659–672.
- Wang Z, Zhuang C, Saito Y, et al. 2012. Early mid-Holocene sea-level change and coastal environmental response of the southern Yangtze delta plain, China: implications for the rise of Neolithic culture[J]. *Quaternary Science Review*, 35: 51–62.
- Yang S, Milliman J, Li P, et al. 2011. 50000 dams later: erosion of the Yangtze River and its delta[J]. *Global and Planetary Change*, 75(1): 14–20.
- Yu S Y, Berglund B E, Sandgren P. 2007. Evidence for a rapid sea-level rise 7600 yr ago[J]. *Geology*, 35: 891–894.
- Zhan Q, Wang Z H, Xie Y, et al. 2012. Assessing C/N and $\Delta^{13}\text{C}$ as Indicators of Holocene Sea Level and Freshwater Discharge Changes in the Subaqueous Yangtze Delta, China[J]. *The Holocene*, 22(6): 697–704.
- Zong Y. 2004. Mid-Holocene sea-level highstand along the Southeast Coast of Chinal[J]. *Quaternary Internationa*, 117: 55–67.
- 高晓琴, 王张华, 李琳, 等. 2012. 长江口现代潮滩表层沉积物磁性特征和铁硫化物在潮滩微相的分布[J]. *古地理学报*, 14(5): 673–684.
- 国家海洋局. 2012. 2011 年中国海平面公报[R]. 北京: 国家海洋局.
- 李琳, 王张华, 吴绪旭, 等. 2013. 长江口北支潮滩不同沉积微相有机地球化学元素分布[J]. *古地理学报*, 15(1): 95–104.
- 水利部长江水利委员会. 2021. 长江泥沙公报[M]. 武汉: 长江出版社.
- 汪品先, 章纪军, 赵泉鸿, 等. 1988. 东海底质中的有孔虫和介形虫[M]. 北京: 海洋出版社.
- 战庆, 王张华. 2014. 利用盐沼泥炭重建长江三角洲北部全新世中期海平面[J]. *古地理学报*, 16(4): 548–556.
- 赵亚楠, 王张华, 吴绪旭, 等. 2015. 长江口现代潮滩沉积物粒度特征及其在沉积相识别中的应用[J]. *古地理学报*, 17(3): 405–416.