



2020年特大洪水期间长江水下三角洲沉积物沉积特征

李明宸, 闫 粟, 公力维, 王雪晨, 耿润玉, 徐润, 周 亮, 汪亚平, 沈治雄

Depositional characteristics of sediments in the Changjiang River subaqueous delta during the catastrophic flood in 2020

LI Mingchen, YAN Su, GONG Liwei, WANG Xuechen, GENG Runyu, XU Runzhe, ZHOU Liang, WANG Yaping, and SHEN Zhixiong

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16562/j.cnki.0256-1492.2024022902>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

黄河口水下三角洲刁口叶瓣的核素分布与沉积特征

Nuclides distribution and sedimentary characteristics of the Diaokou course in Yellow River subaqueous delta

海洋地质与第四纪地质. 2020, 40(3): 43–50

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

河流三角洲沉积体系再析

Revisiting the concept of river delta sedimentary systems

海洋地质与第四纪地质. 2023, 43(3): 1–13

基于地统计学的粒径输运趋势分析在滦河水下三角洲的应用

Application of geostatistical grain size trend analysis in the Luanhe River Subaqueous Delta

海洋地质与第四纪地质. 2020, 40(4): 204–213

黄河三角洲周边海域表层沉积物地球化学特征分布及影响因素

Controlling factors and distribution of geochemical characteristics of the surface sediments in the Yellow River Delta

海洋地质与第四纪地质. 2022, 42(6): 104–118

长江远端三角洲表层沉积物中底栖有孔虫分布及其对环境的指示

Distribution of benthic foraminifera in the surficial sediments of Changjiang distal delta and its environmental implications

海洋地质与第四纪地质. 2020, 40(4): 127–138



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

李明宸, 闫粟, 公力维, 等. 2020 年特大洪水期间长江水下三角洲沉积物沉积特征 [J]. 海洋地质与第四纪地质, 2025, 45(2): 31-42.

LI Mingchen, YAN Su, GONG Liwei, et al. Depositional characteristics of sediments in the Changjiang River subaqueous delta during the catastrophic flood in 2020[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2025, 45(2): 31-42.

2020 年特大洪水期间长江水下三角洲沉积物沉积特征

李明宸¹, 闫粟¹, 公力维¹, 王雪晨¹, 耿润玉¹, 徐润喆¹, 周亮¹, 汪亚平², 沈治雄¹

1. 江苏师范大学地理测绘与城乡规划学院, 徐州 221116

2. 华东师范大学河口海岸学国家重点实验室, 上海 200241

摘要:大河特大洪水会对河口地区沉积环境产生显著影响, 然而当前有关河口三角洲古洪水沉积特征的认识存在较大争议, 有待通过现代洪水沉积研究深入揭示河口三角洲洪水沉积特征。本文于 2020 年长江流域性特大洪水发生期间, 在长江水下三角洲采集了 16 根短柱样, 在实验室进行了粒度和有机地球化学指标 (TOC、TN) 分析。结果表明短柱中洪水期间产生的沉积层厚度为 3~21 cm, 上部洪水沉积层 TOC 含量平均值为 0.59%, TN 含量平均值为 0.077%, 与下部常态沉积层相比均有所增加。洪水层沉积物的平均粒径 (13.23 μm) 比其下部常态沉积物平均粒径 (13.87 μm) 略微偏细。代表洪水事件沉积的粒度端元组分 EM1 和研究区以往钻孔中洪水沉积粒度结果的对比表明, 2020 年长江口洪水沉积相对底部常态沉积粒度偏细, 但比以往研究区钻孔中的洪水沉积粒径偏粗, 这与传统古洪水沉积以粗颗粒组分为主的认识存在不同, 这应该是流域内大坝建设对沉积物的围闭作用、中下游河道侵蚀作用和水下三角洲受海洋动力侵蚀作用共同导致。该研究对于河口地区长时间尺度古洪水事件序列的重建以及极端水文事件沉积记录解译具有重要的科学意义。

关键词:特大洪水; 沉积特征; 人类活动; 长江水下三角洲

中图分类号: P736

文献标识码: A

DOI: [10.16562/j.cnki.0256-1492.2024022902](https://doi.org/10.16562/j.cnki.0256-1492.2024022902)

Depositional characteristics of sediments in the Changjiang River subaqueous delta during the catastrophic flood in 2020

LI Mingchen¹, YAN Su¹, GONG Liwei¹, WANG Xuechen¹, GENG Runyu¹, XU Runzhe¹, ZHOU Liang¹, WANG Yaping², SHEN Zhixiong¹

1. School of Geography, Geomatics and Planning, Jiangsu Normal University, Xuzhou 221116, China

2. State Key Laboratory of Estuarine and Coastal Research, East China Normal University, Shanghai 200241, China

Abstract: Catastrophic floods in large rivers exert significant influences on the sedimentary environment in the estuarine region. However, viewpoints of sedimentary characteristics of the paleoflood in the estuarine delta is controversial. Therefore, it is necessary to understand the sedimentary characteristics of modern flood. The whole Changjiang River basin suffered from a catastrophic flood in 2020. Sixteen sediment cores in the Changjiang subaqueous delta were collected during the flood period. Grain size and organic index (TOC, TN) were measured. The result indicates that the flood layers is 3~21 cm thick, the average TOC and TN is 0.59% and 0.077%, respectively, which is higher than that of lower part deposit. The mean grain size of the flood layers (13.23 μm) is finer than that of the lower part deposits (13.87 μm). The end-member modelling analysis indicated that the finest populations (EM1) were originated from the 2020 flooding. Comparing the EMs of 2020 flood deposits with grain size characteristics of flood deposits in previous studies, we found that the 2020 flood sediments were finer than the lower part non-flood deposits, but coarser than the previous flood sediments, which is different from the common view that the paleoflood deposits are characterized by coarser sediments. We believed that this difference was due to (1) human activities (e.g. dam construction) in the river basin, by which more coarse sediment were trapped within the dam; (2) the weakened erosion in middle and lower reaches of river channels; and (3) the

资助项目:国家自然科学基金项目“海南岛南部海岸风暴巨砾沉积揭示的风暴强度”(41706096), “长江流域两千年以来入海水沙通量变化及其对河口-陆架泥质沉积体系发育和演化的影响”(41776048), “海岸风暴频率-强度关系的沉积记录分析”(41530962), “The magnitude and frequency of extreme late Holocene flooding in the middle Yangtze River and their climatic and anthropogenic forcing”(42250610211); 上海市教育委员会科研创新项目“长江三角洲蓝图重绘的基础科学问题研究”(2019-01-07-00-05-E00027); 江苏省研究生科研与实践创新计划项目“长江口历史水道变迁和特大洪水事件的沉积记录”(KYCX22_2787); 江苏省高等学校大学生创新创业训练计划“长江水下三角洲历史特大水文事件沉积的识别”(202110320121Y)

作者简介:李明宸(1999—), 男, 硕士研究生, 主要从事河口沉积过程方面研究, E-mail: limingchenmy@163.com

通讯作者:周亮(1986—), 男, 副教授, 主要从事古洪水水文学和古风暴学研究, E-mail: geozhouliang@126.com

收稿日期:2024-02-29; **改回日期:**2024-05-07. 文凤英编辑

subaqueous delta by ocean dynamic erosion. This study is beneficial for the reconstruction of long-term paleoflood events sequences and the interpretation of extreme event deposition in the estuarine region.

Key words: extreme flood; sedimentary characteristic; human activities; Changjiang River subaqueous delta

河口三角洲具有重要的生态与社会经济意义,其形成发育受到河流与海洋的双重作用影响^[1-2]。近年来在全球环境变化与人类活动的双重影响下,大河三角洲面临着严重洪水灾害的威胁^[3-5]。水下三角洲是三角洲沉积体系的重要组成部分,其沉积环境较为稳定,能够记录丰富的陆地和海洋环境变化信息(河道变迁、洪水、风暴等)^[6-8]。因此,研究水下三角洲极端水文事件影响下的沉积特征,对于重建古洪水事件序列和未来河口地区科学规划治理具有重要的现实借鉴意义。

长江作为亚洲第一长河,巨量的泥沙输入在河口形成了规模巨大的水下三角洲^[9-10]。长江也是世界上洪水最多、频率最高的河流之一^[11-13]。据统计,两千年来长江中下游地区的洪水频次达 0.5 次/a^[14]。为更好地应对未来长江流域的洪水灾害,当前多位学者基于长江水下三角洲的沉积记录重建了多个古洪水沉积序列,多数研究认为特大洪水会在水下三角洲形成粗颗粒沉积单元^[7,15-19]。然而 Fan 等^[20]基于年际分辨率的沉积物分析,认为长江口洪季沉积物以细颗粒沉积为主。可以发现,当前学界对长江水下三角洲洪水沉积特征尚未有较为统一的认识,有待于进一步深入分析。同时随着流域内大规模的大坝建设,长江入海泥沙通量锐减,给水下三角洲沉积、生态和环境带来了显著影响^[21-23],但是大坝建设对洪水沉积的识别是否产生了显著影响,目前也缺乏明确的认识。

粒度是识别洪水沉积物最基本的指标之一。不同来源的沉积物在不同的动力搬运和沉积过程中,粒度性质均会发生改变^[24-26]。长江河口动力条件复杂,径流、沿岸流、潮汐以及风暴潮等多种因素相互作用,使得水下三角洲的沉积物粒度特征表现更为复杂^[27]。近年来,粒度端元分析法已被广泛应用于海洋沉积记录的解译研究^[28-31],它通过数学模型分解粒度数据,分离出不同物源或运输方式所形成的粒度组分,进而对每一个组分进行解释以理解沉积物堆积时的沉积环境^[32-33],可为识别古洪水沉积提供有力技术支持。

2020 年长江发生流域性特大洪水事件,本文基于洪水期间采集的长江水下三角洲沉积物短柱样(图 1),进行粒度、有机地球化学指标(TOC、TN)分析,揭示现代特大洪水事件影响下水下三角洲沉积

物的沉积特征。同时利用粒度端元分析结果,将其与前人建立的洪水序列对比,探讨大坝建设是否和如何影响水下三角洲洪水沉积识别和序列重建。

1 研究区概况

长江口呈“三级分汊,四口入海”的格局,约 99% 的长江径流经南支入海^[34]。长江水下三角洲面积达 $2.9 \times 10^4 \text{ km}^2$,沉积物颗粒从拦门沙向三角洲前缘逐渐变细,然后向陆架方向变粗^[9,35]。长江河口属中等强度潮汐河口,平均潮差约 2.7 m,平均浪高约 1 m。长江口海域的海流由苏北沿岸流、台湾暖流以及长江冲淡水组成,其中长江冲淡水夏季向东北偏转^[36]。该区域沉积的季节效应明显,夏季沉积作用强,冬季较弱^[37]。历史上长江口附近发生过的有记录的最大洪水出现在 1954 年,最大径流量达 $92600 \text{ m}^3/\text{s}$ (大通站),其次是 1998 年特大洪水,最大径流为 $82300 \text{ m}^3/\text{s}$ ^[38]。

2020 年夏季长江流域遭遇连续特大暴雨。7 月初长江下游地区降雨量累计达到 265 mm,致使宜昌到南京的水位几乎同时超过预警值,形成特大洪水^[39]。大通站在 7 月 9 日到 8 月 3 日期间流量超过 $70000 \text{ m}^3/\text{s}$,其中在 7 月 12 日达到最高水位(16.21 m)和最大径流量($84600 \text{ m}^3/\text{s}$)^[39]。7、8 两月入海径流总量和泥沙总通量分别为 $3.5 \times 10^{11} \text{ m}^3$ 和 $8.0 \times 10^7 \text{ t}$ 。该次洪水给沿江地区造成较为严重的人员安全威胁和社会经济损失。

2 材料与方法

2.1 样品采集

2020 年 7 月长江洪峰到达河口之后,在长江水下三角洲区域,使用箱式取样器采集底质沉积物。每个站位将底质沉积物从水下采集上来后,首先在采样箱内将 50 cm 长的透明塑料管垂直插入采样箱内,每根塑料管取上部 15~30 cm 长度的沉积物短柱岩芯。采样站位的经纬度位置使用手持 GPS 测定。采集完成后所有短柱样运回实验室在 4℃ 冰箱内冷藏保存。本次在长江水下三角洲区域共采集 16 个站点的底质样品(图 1)。

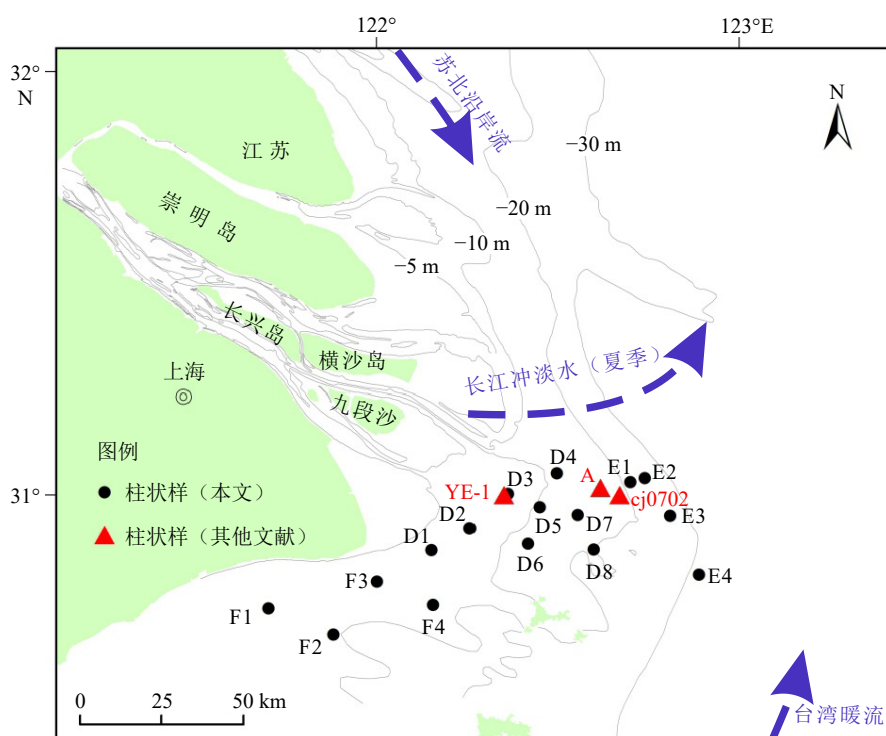


图 1 研究区概况及柱状样站位

Fig.1 The study area and the sampling sites

2.2 沉积物粒度

对短柱沉积物以 1 cm 为间隔进行连续取样后,在测试前将样品分别加入 10 mL 双氧水(浓度 30%)和 5 mL 盐酸(浓度 30%),去除其中的有机质和碳酸盐,随后加入六偏磷酸钠使样品充分分散,使用 Malvern Mastersizer 3000 型激光衍射粒度分析仪测量,每个样品至少测量 3 次,测量误差小于 3%。

2.3 沉积物有机地球化学指标 (TOC、TN)

从挑选的短柱中分出适量样品烘干后研磨,然后过 200 目网筛,放入离心管并加入 2 mL 盐酸以去除样品中的碳酸盐,接着加入蒸馏水并使用离心机中和 pH 值到中性。随后将处理好的样品再次烘干,取 20~30 mg 样品用锡杯包裹后放入 Thermo 公司生产的 EA3000 型元素分析仪测量总有机碳(TOC)和总氮(TN)含量。

2.4 统计计算方法

沉积物粒度参数的计算使用 GRADISTAT 程序^[40],选择 Folk 和 Ward 方法^[41]计算得到平均粒径、峰态、偏度、分选系数等参数结果。

粒度端元模型使用 AnalySize, 该程序在 Matlab

中运行^[42]。选择的数学模型为 Non-Parametric 方法。在端元数量的选择上,以线性相关大于 0.9 且角度偏差小于 5 为前提,选择最少的端元数作为最终的样品粒度端元数量^[43-44]。

3 结果与讨论

3.1 2020 年特大洪水事件沉积层的确定

利用宏观特征进行洪水沉积物的识别是最为直接和有效的方式之一^[45-46]。本文对 2020 年特大洪水沉积层的识别首先根据柱样沉积物颜色进行划分(图 2)。

根据获取的 16 根短柱的沉积物颜色由灰黄色到黄褐色的转变界线位置(图 2),对洪水沉积层位深度进行判别划分,其中洪水层的深度范围 D1 为 0~21 cm, D2 为 0~4 cm, D3 为 0~6 cm; D4 为 0~6 cm, D7 为 0~7 cm, E1 为 0~16 cm, E2 为 0~4 cm, E3 为 0~5 cm, E4 为 0~3 cm, F1 为 0~9 cm, F2 为 0~6 cm, F3 为 0~7 cm, F4 为 0~12 cm。

短柱 D5、D6 和 D8 因无法通过柱样外层直接观测识别出明显的分界,切开柱状样可见深、浅两种颜色的混合沉积物,推测是洪水沉积过程中这些地点的常态沉积物受到扰动被再悬浮并与洪水沉

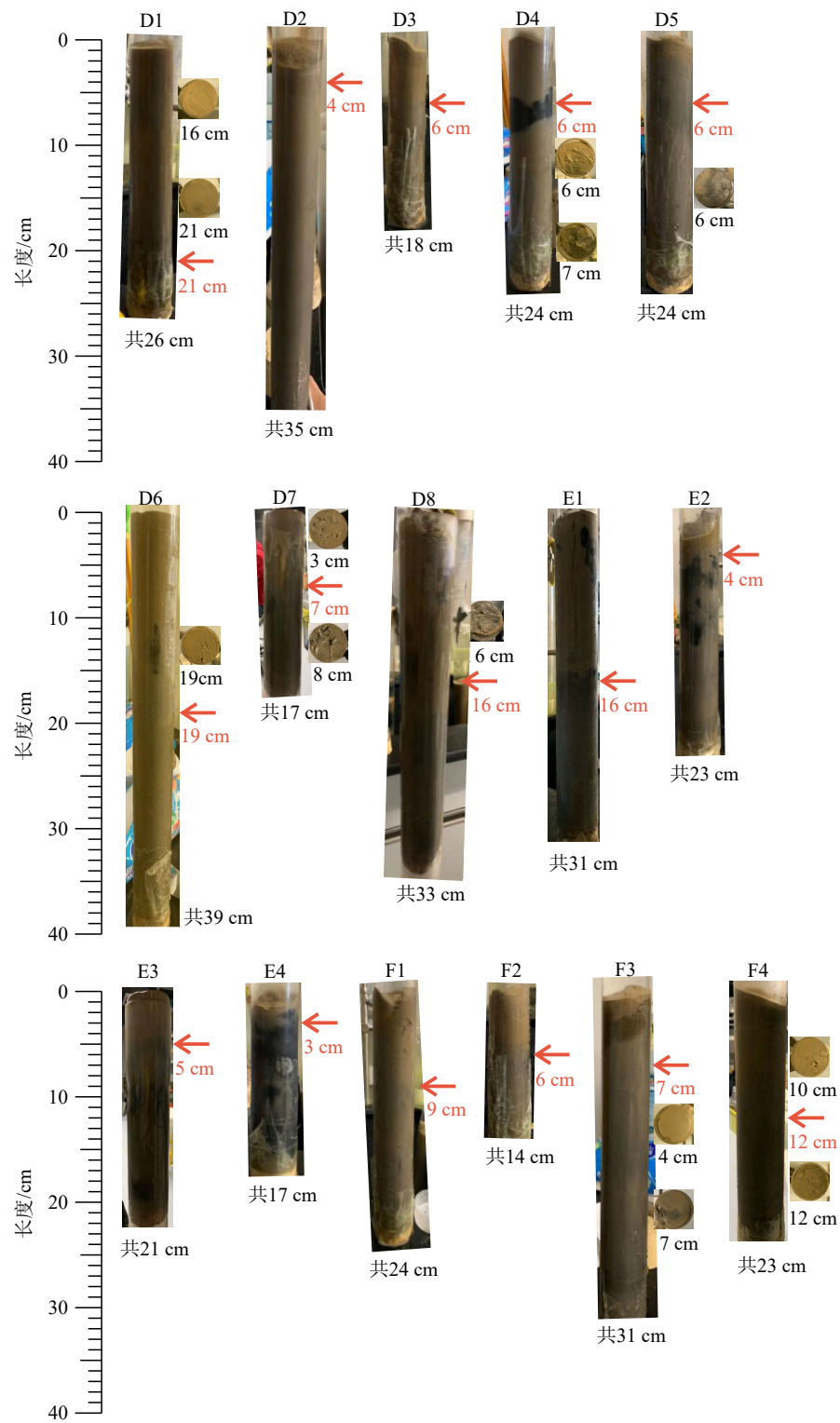


图 2 短柱样照片
红色箭头表示洪水沉积层的底部。

Fig.2 Photographs of the cores
The red arrows indicate the bottom of the flood deposit.

积物混合所致。短柱 D5 和 D8 通体均为黄褐色与黑褐色沉积物混合,但两个短柱的黄褐色沉积物分别在 6 cm 和 16 cm 处出现急剧减少,因此将 D5 和

D8 的洪水沉积层的深度分别确定为 6 cm 和 16 cm;短柱 D6 在 19 cm 处发现黄褐色沉积物显著减少,因此将短柱 D6 的洪水沉积层深度定为 19 cm。

3.2 2020年特大洪水事件沉积层的沉积指标特征

3.2.1 粒度组分与粒度参数

图3展示了各短柱样粒度组分与粒度参数垂向变化。整体来看,所有短柱样的沉积物类型均以粉砂为主,黏土次之,砂含量最低。所有柱样洪水沉积层粉砂、黏土和砂含量平均值分别为79.16%、14.77%和6.08%;柱样下部沉积层同样以粉砂为主,其粉砂、黏土和砂含量平均值分别为78.86%、14.63%和6.51%。洪水沉积层平均粒径的变化范围为9.49~22.69 μm ,平均为13.23 μm ,其中短柱F3的洪水沉积层平均粒径最粗(平均为22.69 μm),D2的洪水沉积层粒径最细(平均为9.49 μm);下部沉积层平均粒径变化范围为9.71~20.32 μm ,平均为13.87 μm 。洪水沉积层的分选系数平均为3.01,分选均较差;偏度平均为-0.07,负偏;峰态平均为1.04,正常峰态; D_{90} 平均为67.52 μm 。而下部沉积层的分选系数均值为2.98,分选较差;偏度平均为-0.083,负偏;峰态平均为1.07,正常峰态; D_{90} 平均为60.44 μm 。

观察发现部分短柱洪水沉积层内的平均粒径波动变化较大(D1、D2、D6、D8、F3和F4),这些短柱集中分布在研究区域的中南部,而其余短柱洪水沉积层的平均粒径波动较小,较为稳定。该分布格局表明洪水期间中南部区域受水动力影响更为复杂,不断扰动洪水沉积层,而其余短柱可能主要受长江冲淡水的单一动力影响。

纵向整体观察短柱样粒度的变化趋势可以发现(图3),大部分沉积物从短柱下部进入洪水沉积层后平均粒径呈现了由粗到细的转变(D2、D3、D4、D5、D7、E1、E3、F1和F4),少部分呈现粗化(D6、E2、E4和F3)或无明显变化(D1、D8和F2),表明2020年洪水期间的沉积物相对下部沉积粒径整体偏细。

为更好地分析短柱洪水层中粒径的变化趋势特征,以平均粒径变化为依据,大致将16根短柱分为三类:一类是以短柱D7为代表,粒径由下至上逐渐变细;第二类以短柱F3为代表,粒径呈现粗化转变;第三类以D8为代表,粒径变化不大,上下两层较为一致。

短柱D7洪水沉积层的粒度指标相对下部沉积层呈现明显的二段式结构(图3)。大致以7 cm处为界,上部为洪水沉积层,下部为常态沉积。洪水沉积层黏土、粉砂和砂含量平均值分别为16.65%、81.26%和2.09%,而下部沉积层的黏土、粉砂和砂

含量平均值分别为11.87%、83.62%和4.51%。洪水沉积层平均粒径的均值为11.16 μm ,下部沉积层平均粒径的平均值为15.82 μm ,洪水沉积层平均粒径低于下部沉积;洪水沉积层的分选系数平均为2.75,略高于下部(分选系数2.69),分选较差;洪水沉积层的偏度平均为-0.13,明显高于下部(偏度-0.21);洪水沉积层的峰态系数平均为0.93,低于下部(峰态系数1.04),属于正常峰态;洪水沉积层的 D_{90} 平均值为37.59 μm ,低于下部沉积层的 D_{90} 平均值(48.01 μm)。

短柱F3的平均粒径、分选系数和 D_{90} 的变化趋势较为相似。7 cm以上为洪水沉积层,7 cm以下为常态沉积(图3)。洪水沉积层黏土、粉砂和砂含量的平均值分别为10.75%、68.68%和20.57%;下部沉积层的黏土、粉砂和砂含量的平均值分别为11.11%、74.52%和14.37%。洪水沉积层的平均粒径在全柱中处于高值,平均值为22.69 μm ;下部沉积层平均粒径的均值为19.16 μm 。洪水沉积层的分选系数平均为4.41,下部沉积层的分选系数平均为3.92,上下部沉积分选均较差。洪水沉积层的偏度平均为0.11,正偏,下部沉积层的偏度平均为0.09,正偏。洪水沉积层的峰态平均为1.31,粗峰态,下部沉积层的峰态平均为1.48,粗峰态。洪水沉积层的 D_{90} 在全柱中处于高值,平均为245.83 μm ;下部沉积层的 D_{90} 平均为195.24 μm 。

短柱D8整体的粒度指标除个别层位出现高值外,其余层位无较大波动。大致以16 cm处为界,上部为洪水沉积层,下部为常态沉积层。洪水沉积层黏土、粉砂和砂含量的平均值分别为16.87%、80.78%和2.35%;下部沉积层的黏土、粉砂和砂含量的平均值分别为17.87%、80.03%和2.1%。洪水沉积层平均粒径的均值为10.82 μm ,并在7、10和15 cm处显著增加;下部沉积层的平均粒径较小,均值为10.46 μm 。洪水沉积层的分选系数无较大波动,仅7 cm处有一高值,平均为2.81,下部沉积层分选系数平均为2.8,上下部沉积层分选均较差。洪水沉积层的偏度与下部沉积层在数值上几乎一致,平均值分别为-0.15和-0.14,均为负偏。洪水沉积层峰态系数与下部沉积层也几乎一致,平均值分别为0.98和0.97,均为正常峰态。洪水沉积层和下部沉积层 D_{90} 值非常接近,平均值分别为36.5、35.27 μm 。

3.2.2 有机地球化学指标(TOC、TN)

有机地球化学指标是河口地区识别洪水沉积的主要指标之一。本文在水下三角洲不同的区域选择6根代表性短柱,分析洪水层沉积物的有机地

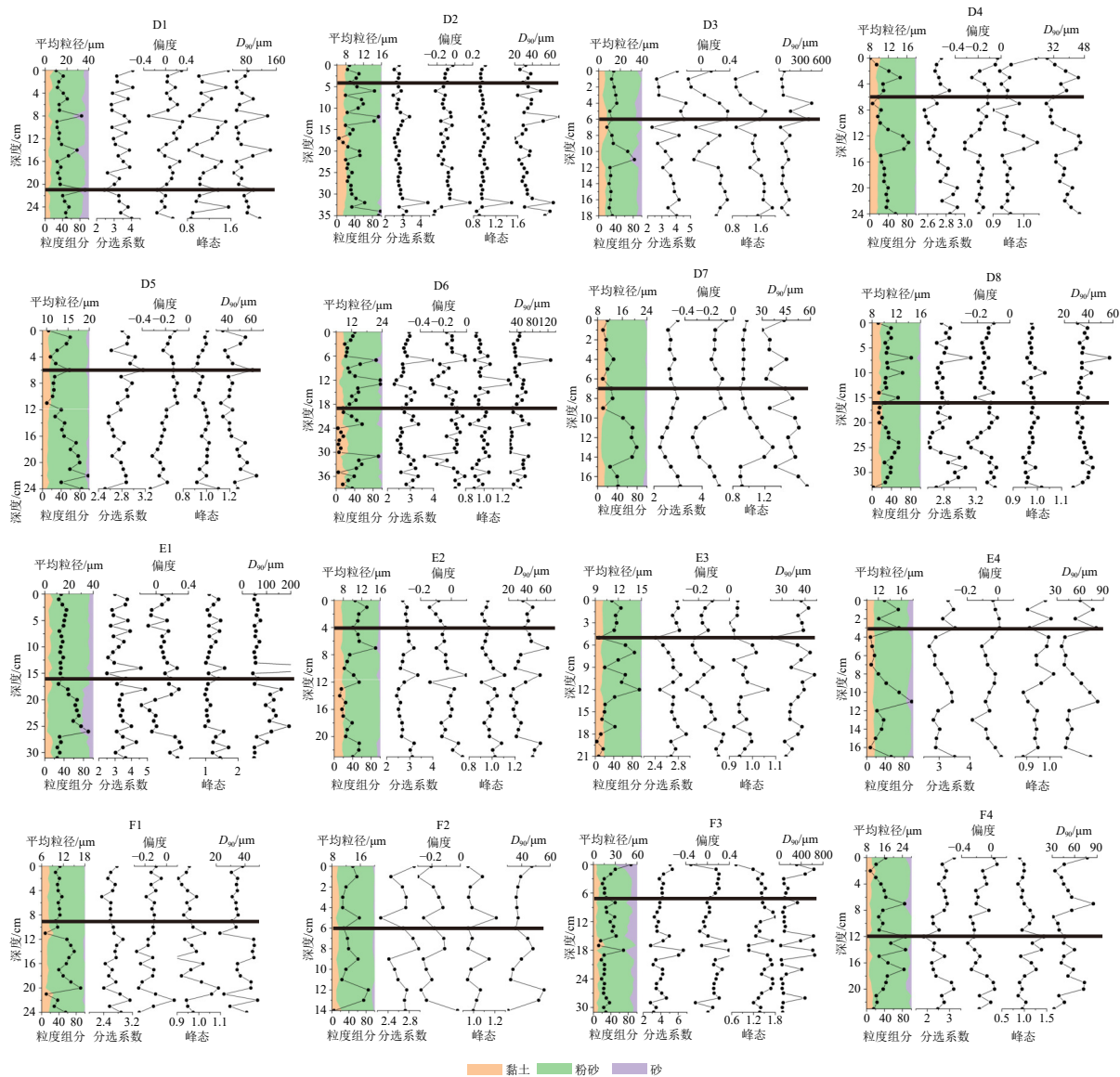


图3 粒度组分及粒度参数垂向变化

黑色横线以上表示洪水沉积层。

Fig.3 Vertical distribution of grain size composition and parameters

Black horizontal lines indicates the flood layer bottom.

球化学指标特征。图4展示了短柱D1、D3、E1、E4、F1和F3的TOC和TN垂向变化。6根短柱洪水沉积层的TOC平均值为0.59%，TN平均值为0.077%，而下部沉积层的TOC平均值为0.53%，TN平均值为0.067%，说明短柱洪水沉积层的TOC平均值和TN平均值均略高于下部沉积层。然而E4洪水沉积层TOC和TN含量均低于其下部沉积层，这可能是由于E4所处位置距离河口最远，水动力较强，沉积物中易于吸附有机质的细颗粒物含量较低。

3.3 短柱样粒度敏感组分及其指示意义

长江口及其附近海域动力条件非常复杂。观

测数据显示，2020年洪水期间，长江口南槽底层水沙运动随着大潮出现了向陆输送的方向变化^[38]。这表明洪水期水下三角洲的沉积物除了来自长江径流外，还有潮汐等动力作用下的海洋沉积。为更好地揭示洪水沉积物的沉积特征，本研究使用粒度端元模型分离出柱状样中代表不同动力沉积的粒度组分，分析不同组分形成的动力机制，以便揭示代表洪水沉积物的最优粒度组分。

从AnalySize程序分析的各短柱端元频率曲线和端元垂向分布结果来看(图5和6)，短柱D4、D5、D7、D8、E2、E3、E4和F1各分离出2个粒度端元；短柱D2、D6、F2和F4各分离出3个粒度端元；短柱D1、D3和E1的端元数量分别为4个；短柱

F3 的端元数量为 5 个。

首先对洪水粒度端元组分进行识别。前人通过测量 2020 年 7 月长江口浑浊带的悬沙粒径, 发现南港口外站位的悬沙中值粒径为 $7.2\ \mu\text{m}$ ^[47]。由于该站位靠近河口, 其悬沙粒径可作为洪水沉积物粒度组分的有力参考值, 本文假定洪水沉积层中越接近这个参考值的粒度组分越能够代表长江洪水沉积。如图 5 和图 6 所示, 在距离河口较近的几根短柱中, 短柱 D2 的 EM1 ($6.72\ \mu\text{m}$) 最接近参考粒径, 在洪水层内的含量为 35.75%; D4 的 EM1 ($9.86\ \mu\text{m}$) 最接近参考粒径, 并且在洪水层内的含量达 62.33%; D5 的 EM1 ($12.7\ \mu\text{m}$) 最接近参考粒径, 在洪水层内的含量达 62.09%; D6 的 EM1 ($7.64\ \mu\text{m}$) 最接近参考粒径, 在洪水层内的含量为 45.44%; D7 的 EM1 ($11.2\ \mu\text{m}$) 最接近参考粒径, 在洪水层内含量达 83.29%。可以发现, 短柱 D2、D4、D5、D6 和 D7 中粒径最细的组分 EM1 与洪水期间南港口外的悬沙中值粒径接近, 并且这些短柱的 EM1 在洪水层内含量较高, 应该最能代表长江洪水沉积。以短柱 D2、D4、D5、D6 和 D7 的洪水沉积端元特征为参考, 短

柱 D8、E2、E3、F1 和 F2 的 EM1 峰值粒径为 $6.72\sim 9.86\ \mu\text{m}$, 也代表了长江洪水沉积组分。

以上这些短柱中较粗的粒径组分 EM2 ($16.4\sim 27.4\ \mu\text{m}$) 大多在 2020 年洪水沉积形成前出现较高含量(图 6), 可能是水下三角洲的常态沉积或是冬半年强波浪动力作用下泥沙再悬浮后的沉积产物^[20]。组分 EM3 在短柱 D2、D6 和 F2 中粒径更粗(峰值粒径可达 $40.1\ \mu\text{m}$, D6 站点), 在这 3 根短柱中含量最低并且在个别层位呈现显著峰值, 由此推断 EM3 组分应该是风暴等极端事件的沉积产物。

此外, 距离河口较远的短柱 F4 的 EM3 为双峰结构, 有 $6.72\ \mu\text{m}$ 和 $40.1\ \mu\text{m}$ 两个峰值, 推测是风暴事件引起了 2020 年洪水沉积物再悬浮, 与粗颗粒混合所致; F4 中 EM1 的含量达 45.19%, EM1 峰值粒径 ($12.7\ \mu\text{m}$) 比短柱 D2 的洪水沉积组分 ($6.72\ \mu\text{m}$) 略粗, 可能与该站点水动力较强有关。短柱 E4 的细颗粒组分(EM1)峰值粒径 ($14.5\ \mu\text{m}$) 较其他短柱的 EM1 粗, 可能是由于 E4 距离河口最远, 洪水沉积组分占比较低, 形成时受再悬浮沉积物的混合所致。短柱 F4 和 E4 的 EM2 ($21.2\sim 27.4\ \mu\text{m}$) 则可能为

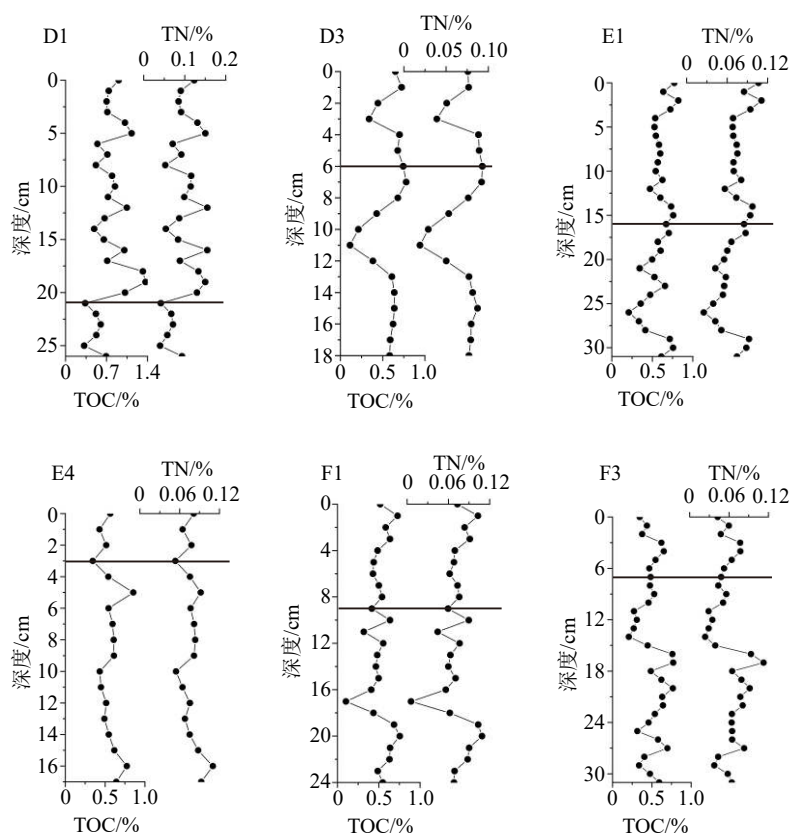


图 4 TOC 和 TN 垂向变化

黑色横线以上表示洪水沉积层。

Fig.4 Vertical distribution of TOC and TN

Black horizontal line indicates the flood layer bottom.

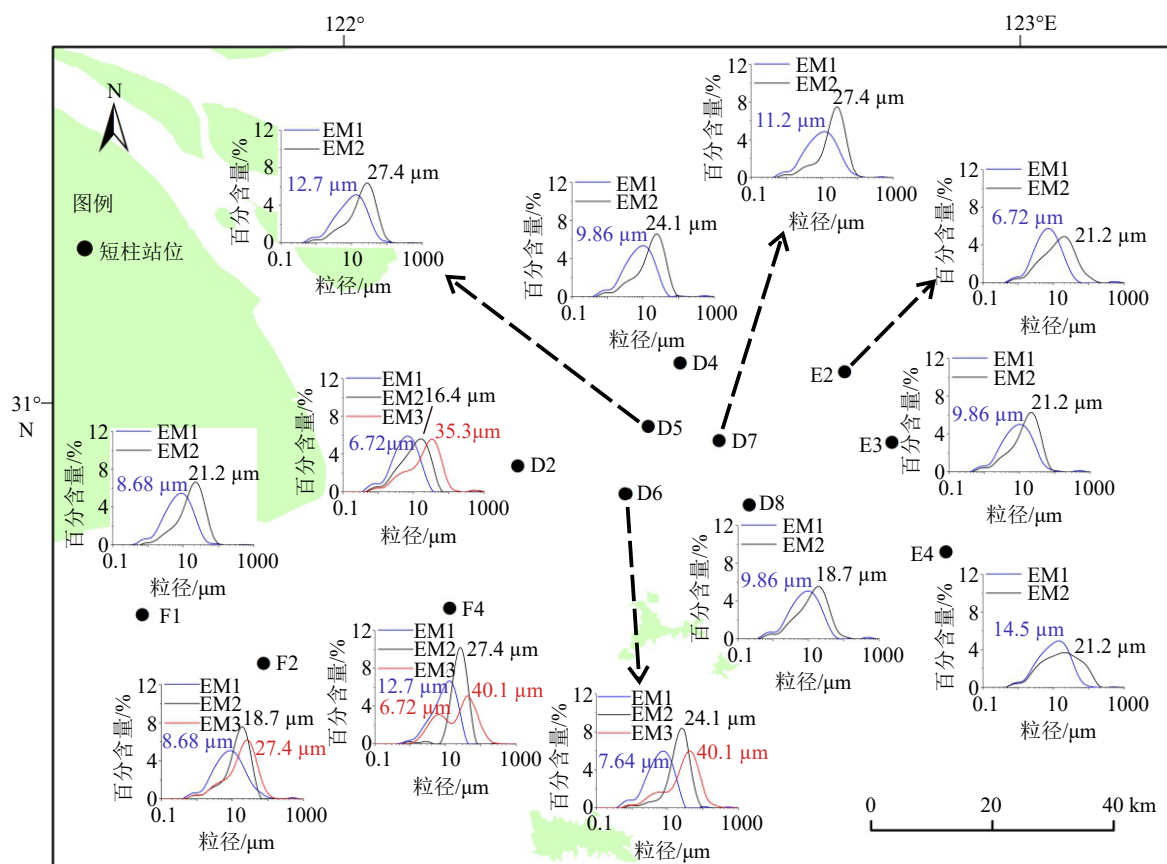


图 5 短柱样各粒度端元频率曲线

Fig.5 Frequency distribution curves of end-members in the cores

常态沉积或枯季强波浪再悬浮之后的沉积产物。短柱 D1、D3、E1 和 F3 的端元数量超过 3 个, 其 EM4 和 EM5 组分可能跟这些地点的物源和动力更为复杂有关。

3.4 大坝建设对洪水沉积识别的影响

已有研究显示长江流域内大量的大坝建设(尤其是三峡大坝)造成长江入海泥沙通量锐减, 对三角洲沉积环境造成了极大的影响^[21,48-49]。那么大坝建设是否会造成洪水沉积物粒度的变化? 以及是否会影响古洪水研究中洪水事件的识别? 前人基于水下三角洲的钻孔重建了多个长江洪水事件沉积序列, 这为我们对比 2002 年三峡大坝建成前后长江水下三角洲洪水沉积物的粒度变化提供了可能。

钻孔 YE-1^[50] 记录了 1954—1998 年间的若干洪水事件和 2010 年的一次洪水事件(图 7b)。钻孔 YE-1 显示, 1954—1998 年间的洪水层平均粒径为 5.79~8.69 μm , 平均 7.47 μm , 2010 年的洪水层平均粒径为 4.57 μm (图 7b)。而距离钻孔 YE-1 最近的短柱 D3 所记录的 2020 年洪水沉积层平均粒径为

13.5 μm , 这说明近期洪水沉积物与三峡大坝建设前的洪水沉积物粒径相比有所变粗。同样, 钻孔 cj0702^[18] 记录了 1890—2000 年间的若干洪水事件和 2006 年的一次洪水事件, 该钻孔显示, 1890—2000 年间的洪水层平均粒径为 6.23~12.53 μm , 平均值为 7.81 μm , 2006 年的洪水层平均粒径为 8.39 μm (图 7a)。此外, 钻孔 A^[20] 记录了 1998 年洪水事件, 平均粒径为 9.01 μm 。本研究中短柱 D4、D7 和 E1 距离钻孔 A 和 cj0702 较近, 这 3 根短柱中 2020 年洪水沉积层的平均粒径分别为 10.84、11.16 和 14.27 μm , 均大于历史时期洪水沉积的平均粒径, 同样表明三峡大坝建成后该区域的洪水沉积物粒径有所增加。

三峡大坝建成后水下三角洲洪水沉积物的粗化, 原因可能是大量泥沙被拦蓄在库区中, 入海泥沙通量显著减少, 但径流量并无明显下降(图 7c), 从而侵蚀大坝下游河道粗颗粒物, 导致洪季输运到水下三角洲的沉积物粒径整体有所变粗^[23]。

然而, 本研究中绝大部分短柱的洪水沉积层与下部沉积层相比, 沉积物粒径呈现偏细现象(图 3)。同样有机地球化学指标也显示短柱上部洪水沉积

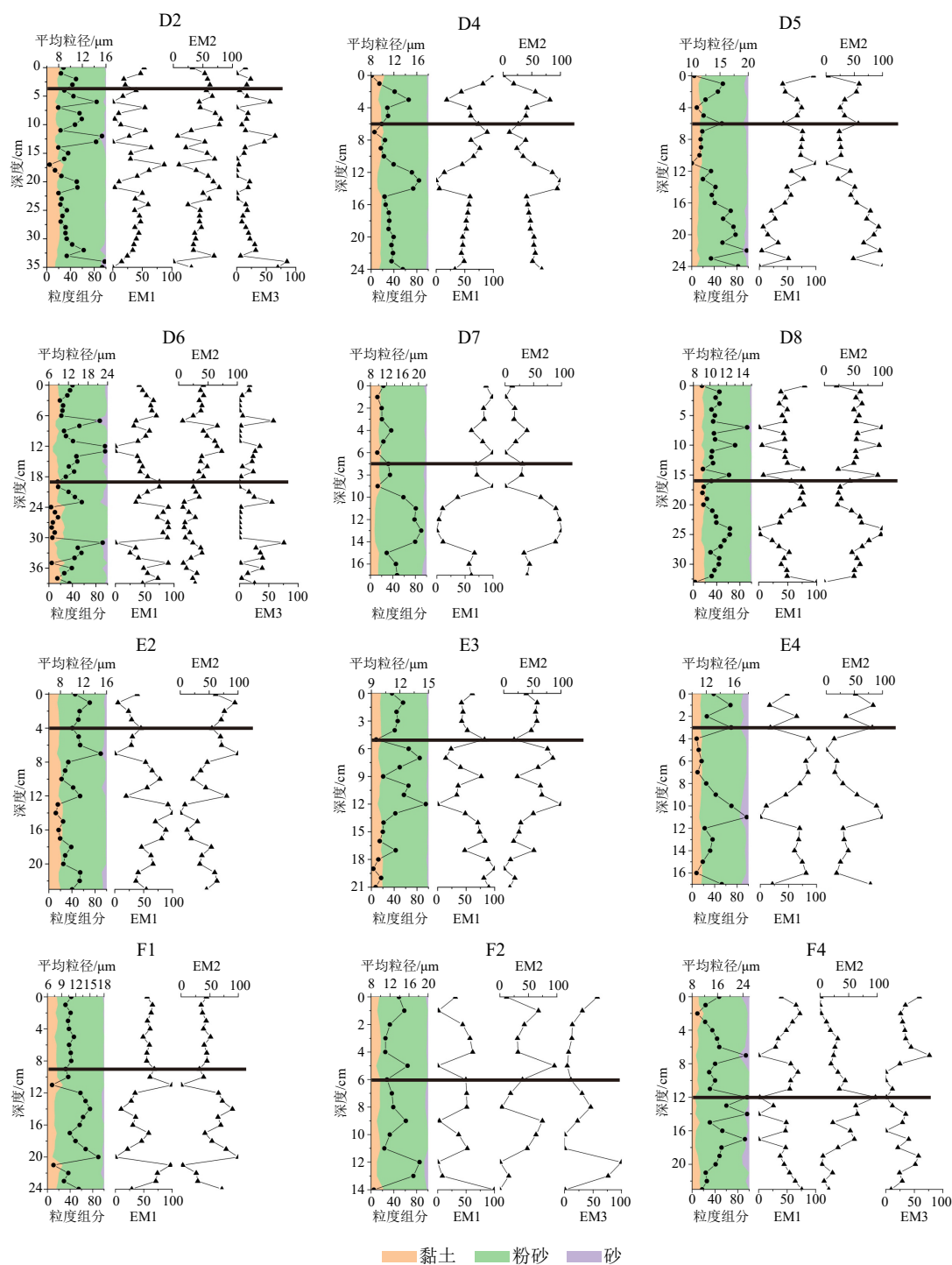


图 6 短柱样粒度组分、平均粒径及各端元含量垂向变化
黑色横线以上表示洪水沉积层。

Fig.6 Vertical distribution of grain size components, mean grain size, and end-members of the cores

Black horizontal lines indicate the flood layer bottom.

层中 TN 和 TOC 含量比下部更高(图 4), 而 TN 和 TOC 含量往往与粒径呈负相关关系, 这也暗示洪水沉积物颗粒的“细化”。究其原因, 应该是大坝建设后入海泥沙通量减少, 水下三角洲的沉积物在波浪动力作用下发生再悬浮, 细颗粒组分被更多地输运

到东海泥质区等区域, 导致长江水下三角洲由原本沉积物的“汇区”变成“源区”, 造成常态底质沉积物显著粗化, 长江河口感潮河段的最大淤积区向上游移动^[51], 水下三角洲侵蚀加剧^[52-53]。尽管热带气旋降水能够一定程度缓解大型三角洲的侵蚀状况^[54],

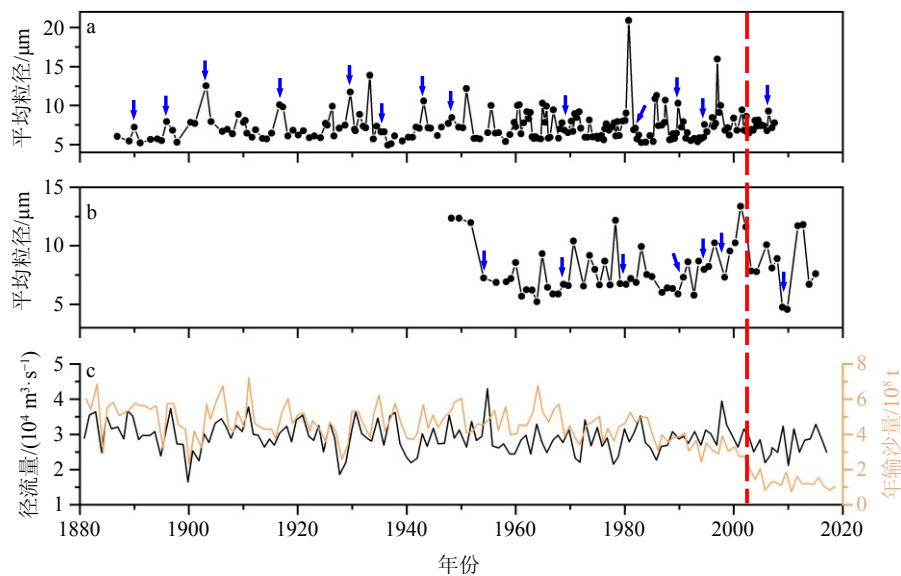


图 7 长江口水下三角洲钻孔 cj0702^[18] (a) 和 YE-1^[50] (b) 的平均粒径与 1880-2020 年大通站水沙通量^[49,52] (c) 比较

蓝色箭头表示钻孔内识别出的洪水层, 红色虚线表示三峡大坝建成的 2003 年。

Fig. 7 Comparison in the mean grain size of sedimentary cores cj0702^[18], YE-1^[50], and river discharge, sediment discharge at the Datong Hydrological Station from 1880 to 2020

Blue arrows mark flood events, and red dash line indicates year 2003 when the Three Gorges Dam was completed.

但是热带气旋过境期间的强动力过程对水下三角洲也会产生强烈再悬浮, 致使热带气旋活动对缓解水下三角洲侵蚀现状有限。这最终导致即便是长江特大洪水期间强径流动力影响下的沉积过程, 沉积物的颗粒也显得相对偏细。

在重建长江古洪水序列的工作中, 前人通常结合元素指标和粒度敏感组分识别洪水沉积事件, 将粗颗粒组分作为判别洪水事件的基础^[7,18]。然而随着未来入海泥沙持续减少, 洪水沉积物相对常态沉积物的粒径可能会更加偏细。因此在未来洪水沉积序列重建的工作中, 使用分离粒度敏感组分的方法识别长江水下三角洲地区洪水沉积时, 细颗粒组分可能更代表洪水事件沉积。在古洪水沉积序列重建中应注意钻孔内常态背景沉积物特征转变和沉积环境转变等影响因素。

4 结论

(1) 2020 年长江水下三角洲洪水沉积层厚度为 3~21 cm, 平均厚度 9.2 cm。

(2) 洪水沉积层以粉砂为主, 平均粒径 13.23 μm , 分选较差, 偏度为正偏, 峰态属于正常峰态, 相比其下部常态沉积粒径有所偏细。有机地球化学指标显示, 洪水沉积层的 TOC 平均值为 0.59%, TN 平均值为 0.077%, 相比其下部常态沉积含量有所增加。

(3) 短柱样的粒度敏感组分 EM1 更能代表长江洪水沉积, EM2 应该代表长江水下三角洲的常态沉积或冬半年强波浪动力作用下泥沙再悬浮沉积, 而 EM3 则可能代表了风暴等极端事件沉积。

(4) 流域内大坝建设等因素导致的水下三角洲常态底质粒度粗化, 使得洪水沉积相对常态沉积呈现细化的转变, 大坝建设后细颗粒组分更有可能代表洪水事件沉积。因此在古洪水沉积序列的重建中使用分离粒度敏感组分的方式识别洪水沉积时, 应注意钻孔内背景沉积物的特征转变和沉积环境转变等影响因素。

致谢: 特别感谢华东师范大学河口海岸学国家重点实验室研究生刘桢屹和冯威同学参与本研究样品的野外采集、实验室室内岩芯分样和拍照工作。

参考文献 (References)

- [1] Stanley D J, Warne A G. Worldwide initiation of holocene marine deltas by deceleration of sea-level rise[J]. *Science*, 1994, 265(5169): 228-231.
- [2] Wright L D. Sediment transport and deposition at river mouths: a synthesis[J]. *GSA Bulletin*, 1977, 88(6): 857-868.
- [3] Hirabayashi Y, Mahendran R, Koirala S, et al. Global flood risk under climate change[J]. *Nature Climate Change*, 2013, 3(9): 816-821.
- [4] Tessler Z D, Vörösmarty C J, Grossberg M, et al. Profiling risk and

- sustainability in coastal deltas of the world[J]. *Science*, 2015, 349(6248): 638-643.
- [5] Yin H F, Li C G. Human impact on floods and flood disasters on the Yangtze River[J]. *Geomorphology*, 2001, 41(2-3): 105-109.
- [6] Wu X, Bi N S, Kanai Y, et al. Sedimentary records off the modern Huanghe (Yellow River) delta and their response to deltaic river channel shifts over the last 200 years[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2015, 108: 68-80.
- [7] Zhou L, Shi Y, Zhao Y Q, et al. Extreme floods of the Changjiang River over the past two millennia: contributions of climate change and human activity[J]. *Marine Geology*, 2021, 433: 106418.
- [8] Allison M A, Sheremet A, Goñi M A, et al. Storm layer deposition on the Mississippi-Atchafalaya subaqueous delta generated by Hurricane Lili in 2002[J]. *Continental Shelf Research*, 2005, 25(18): 2213-2232.
- [9] Chen Z Y, Song B P, Wang Z H, et al. Late Quaternary evolution of the sub-aqueous Yangtze Delta, China: sedimentation, stratigraphy, palynology, and deformation[J]. *Marine Geology*, 2000, 162(2-4): 423-441.
- [10] Liu J P, Xu K H, Li A C, et al. Flux and fate of Yangtze River sediment delivered to the East China Sea[J]. *Geomorphology*, 2007, 85(3-4): 208-224.
- [11] 施雅风, 姜彤, 苏布达, 等. 1840 年以来长江大洪水演变与气候变化关系初探 [J]. *湖泊科学*, 2004, 16(4): 289-297. [SHI Yafeng, JIANG Tong, SU Buda, et al. Preliminary analysis on the relation between the evolution of heavy floods in the Yangtze River catchment and the climate changes since 1840[J]. *Journal of Lake Sciences*, 2004, 16(4): 289-297.]
- [12] Yu F L, Chen Z Y, Ren X Y, et al. Analysis of historical floods on the Yangtze River, China: characteristics and explanations[J]. *Geomorphology*, 2009, 113(3-4): 210-216.
- [13] Jiang T, Zhang Q, Blender R, et al. Yangtze Delta floods and droughts of the last millennium: abrupt changes and long term memory[J]. *Theoretical and Applied Climatology*, 2005, 82(3-4): 131-141.
- [14] 李雨凡, 周亮, 于世永, 等. 过去两千年长江干流历史洪水事件的时空变化研究 [J]. *地球与环境*, 2022, 50(2): 241-251. [LI Yufan, ZHOU Liang, YU Shiyong, et al. Temporal and spatial variations of flood events of the Yangtze River over the past 2000 years[J]. *Earth and Environment*, 2022, 50(2): 241-251.]
- [15] Zhan W, Yang S Y, Liu X L, et al. Reconstruction of flood events over the last 150 years in the lower reaches of the Changjiang River[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2010, 55(21): 2268-2274.
- [16] 盛琛, 陈彬, 安郁辉, 等. 长江口泥质区 24Z 孔沉积物粒度特征及对洪水事件的沉积响应 [J]. *海洋科学*, 2020, 44(3): 74-84. [SHENG Chen, CHEN Bin, AN Yuhui, et al. Grain-size characteristics of sediments and sedimentary response to flood events from hole 24Z in muddy areas of the Yangtze Estuary[J]. *Marine Sciences*, 2020, 44(3): 74-84.]
- [17] 韦璐, 范代读, 吴伊婧, 等. 近百年来长江水下三角洲高分辨率洪水沉积记录及其控制机制 [J]. *地质通报*, 2021, 40(5): 707-720. [WEI Lu, FAN Daidu, WU Yijing, et al. High resolution flood records in the Yangtze subaqueous delta during the past century and control mechanism[J]. *Geological Bulletin of China*, 2021, 40(5): 707-720.]
- [18] Hu G, Li A C, Liu J, et al. High resolution records of flood deposition in the mud area off the Changjiang River mouth during the past century[J]. *Chinese Journal of Oceanology and Limnology*, 2014, 32(4): 909-920.
- [19] Wang M J, Zheng H B, Xie X, et al. A 600-year flood history in the Yangtze River drainage: comparison between a subaqueous delta and historical records[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2011, 56(2): 188-195.
- [20] Fan D J, Qi H Y, Sun X X, et al. Annual lamination and its sedimentary implications in the Yangtze River delta inferred from High-resolution biogenic silica and sensitive grain-size records[J]. *Continental Shelf Research*, 2011, 31(2): 129-137.
- [21] Yang S L, Belkin I M, Belkina A I, et al. Delta response to decline in sediment supply from the Yangtze River: evidence of the recent four decades and expectations for the next half-century[J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2003, 57(4): 689-699.
- [22] Yang S L, Milliman J D, Li P, et al. 50, 000 dams later: erosion of the Yangtze River and its delta[J]. *Global and Planetary Change*, 2011, 75(1-2): 14-20.
- [23] Yang S L, Milliman J D, Xu K H, et al. Downstream sedimentary and geomorphic impacts of the Three Gorges Dam on the Yangtze River[J]. *Earth-Science Reviews*, 2014, 138: 469-486.
- [24] Flemming B W. The influence of grain-size analysis methods and sediment mixing on curve shapes and textural parameters: Implications for sediment trend analysis[J]. *Sedimentary Geology*, 2007, 202(3): 425-435.
- [25] 高抒. 沉积物粒径趋势分析: 原理与应用条件 [J]. *沉积学报*, 2009, 27(5): 826-836. [GAO Shu. Grain size trend analysis: principle and applicability[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2009, 27(5): 826-836.]
- [26] McCave I N. Grain-size trends and transport along beaches: example from eastern England[J]. *Marine Geology*, 1978, 28(1-2): M43-M51.
- [27] 张瑞, 汪亚平, 高建华, 等. 长江口泥质区垂向沉积结构及其环境指示意义 [J]. *海洋学报*, 2008, 30(2): 80-91. [ZHANG Rui, WANG Yaping, GAO Jianhua, et al. The vertical sedimentary structure and its implications for environmental evolutions in the Changjiang Estuary in China[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2008, 30(2): 80-91.]
- [28] Zhang X D, Ji Y, Yang Z S, et al. End member inversion of surface sediment grain size in the South Yellow Sea and its implications for dynamic sedimentary environments[J]. *Science China Earth Sciences*, 2016, 59(2): 258-267.
- [29] Zhang X D, Wang H M, Xu S M, et al. A basic end-member model algorithm for grain-size data of marine sediments[J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2020, 236: 106656.
- [30] 张晓东, 翟世奎, 许淑梅. 端元分析模型在长江口邻近海域沉积物粒度数据反演方面的应用 [J]. *海洋学报*, 2006, 28(4): 159-166. [ZHANG Xiaodong, ZHAI Shikui, XU Shumei. The application of grain-size end-member modeling to the shelf near the estuary of Changjiang River in China[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2006, 28(4): 159-166.]
- [31] 赵松, 常凤鸣, 李铁刚, 等. 粒度端元法在东海内陆架古环境重建中的应用 [J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2017, 37(3): 187-196. [ZHAO Song, CHANG Fengming, LI Tiegang, et al. The application of grain-size end member algorithm to paleoenvironmental reconstruction on

- inner shelf of East China Sea[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2017, 37(3): 187-196.]
- [32] Weltje G J. End-member modeling of compositional data: numerical-statistical algorithms for solving the explicit mixing problem[J]. *Mathematical Geology*, 1997, 29(4): 503-549.
- [33] 张晓东, 许淑梅, 翟世奎, 等. 东海内陆架沉积气候信息的端元分析模型反演[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2006, 26(2): 25-32. [ZHANG Xiaodong, XU shumei, ZHAI Shikui, et al. The inversion of climate information from the sediment of inner shelf of East China Sea using end-member model[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2006, 26(2): 25-32.]
- [34] 朱林, 陈晓红, 郭兴杰, 等. 近十年来长江口北支动力地貌演化过程[J]. *上海国土资源*, 2022, 43(2): 78-83. [ZHU Lin, CHEN Xiaohong, GUO Xingjie, et al. Dynamic geomorphology evolution of the North Branch of the Yangtze River Estuary in recent ten years[J]. *Shanghai Land & Resources*, 2022, 43(2): 78-83.]
- [35] Zhan Q, Li M T, Liu X Q, et al. Sedimentary transition of the Yangtze subaqueous delta during the past century: inspiration for delta response to future decline of sediment supply[J]. *Marine Geology*, 2020, 428: 106279.
- [36] 苏纪兰. 中国近海的环流动力机制研究[J]. *海洋学报*, 2001, 23(4): 1-16. [SU Jilan. A review of circulation dynamics of the coastal oceans near China[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2001, 23(4): 1-16.]
- [37] 郭志刚, 杨作升, 范德江, 等. 长江口泥质区的季节性沉积效应[J]. *地理学报*, 2003, 58(4): 591-597. [GUO Zhigang, YANG Zuosheng, FAN Dejiang, et al. Seasonal sedimentary effect on the Changjiang Estuary mud area[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2003, 58(4): 591-597.]
- [38] 吴增斌, 郭磊城, 吴雪枫, 等. 2020 年特大洪水作用下长江口南槽水沙输移特征[J]. *海洋与湖沼*, 2022, 53(2): 295-304. [WU Zengbin, GUO Leicheng, WU Xuefeng, et al. A field study of hydrodynamics and sediment transport in the south passage of the Changjiang River estuary during big river flood in July 2020[J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 2022, 53(2): 295-304.]
- [39] Tang R N, Dai Z J, Mei X F, et al. Joint impacts of dams and floodplain on the rainfall-induced extreme flood in the Changjiang (Yangtze) River[J]. *Journal of Hydrology*, 2023, 627: 130428.
- [40] Blott S J, Pye K. GRADISTAT: a grain size distribution and statistics package for the analysis of unconsolidated sediments[J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2001, 26(11): 1237-1248.
- [41] 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.
- [42] Paterson G A, Heslop D. New methods for unmixing sediment grain size data[J]. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 2015, 16(12): 4494-4506.
- [43] 王兆夺, 于东生. 泉州湾表层沉积物粒度特征分析[J]. *应用海洋学报*, 2015, 34(3): 326-333. [WANG Zhaoduo, YU Dongsheng. Characteristics of grain sizes in surface sediments of Quanzhou Bay[J]. *Journal of Applied Oceanography*, 2015, 34(3): 326-333.]
- [44] 薛成凤, 贾建军, 高抒, 等. 中小河流对长江水下三角洲远端泥沉积的贡献: 以椒江和瓯江为例[J]. *海洋学报*, 2018, 40(5): 75-89. [XUE Chengfeng, JIA Jianjun, GAO Shu, et al. The contribution of middle and small rivers to the distal mud of subaqueous Changjiang Delta: results from Jiaojiang River and Oujiang River[J]. *Haiyang Xuebao*, 2018, 40(5): 75-89.]
- [45] Khan N S, Horton B P, McKee K L, et al. Tracking sedimentation from the historic A. D. 2011 Mississippi River flood in the deltaic wetlands of Louisiana, USA[J]. *Geology*, 2013, 41(4): 391-394.
- [46] 李华勇, 袁俊英, 杨艺萍, 等. 山东弥河流域现代洪水沉积特征与水动力过程反演[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2022, 42(2): 178-189. [LI Huayong, YUAN Junying, YANG Yiping, et al. Characteristics of modern flood deposits in the Drainage basin of Mi River, Shandong Province and the reconstruction of hydrodynamic processes[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2022, 42(2): 178-189.]
- [47] 董坚, 何青, 林建良, 等. 长江口特大洪水浑浊带悬沙粒度分布特征[J]. *海洋通报*, 2023, 42(1): 48-58. [DONG Jian, HE Qing, LIN Jianliang, et al. The distribution of suspended sediment grain size in Changjiang Estuary turbidity maximum zone during the extreme flood[J]. *Marine Science Bulletin*, 2023, 42(1): 48-58.]
- [48] Yang H F, Yang S L, Meng Y, et al. Recent coarsening of sediments on the southern Yangtze subaqueous delta front: a response to river damming[J]. *Continental Shelf Research*, 2018, 155: 45-51.
- [49] Wang Y H, Dong P, Oguchi T, et al. Long-term (1842-2006) morphological change and equilibrium state of the Changjiang (Yangtze) Estuary, China[J]. *Continental Shelf Research*, 2013, 56: 71-81.
- [50] Zhang R, Li T G, Russell J, et al. High-resolution reconstruction of historical flood events in the Changjiang River catchment based on geochemical and biomarker records[J]. *Chemical Geology*, 2018, 499: 58-70.
- [51] Mei X F, Dai Z J, Darby S E, et al. Landward shifts of the maximum accretion zone in the tidal reach of the Changjiang estuary following construction of the Three Gorges Dam[J]. *Journal of Hydrology*, 2021, 592: 125789.
- [52] 陆子寒, 张国安, 张卫国, 等. 泥沙来源减少后长江口最大浑浊带变化研究[J]. *泥沙研究*, 2022, 47(3): 67-72. [LU Ziqian, ZHANG Guoan, ZHANG Weiguo, et al. Processes of the maximum turbidity zone of the Yangtze Estuary under the background of reduced sediment sources[J]. *Journal of Sediment Research*, 2022, 47(3): 67-72.]
- [53] 陈雅望, 盛辉, 许庆华, 等. 近 40 年来长江口沉积物粒度变化及其对底床冲淤的响应[J]. *水利水电工程学报*, 2021, (5): 8-18. [CHEN Yawang, SHENG Hui, XU Qinghua, et al. Analysis of sediment grain size change and its response to erosion and deposition pattern within the Yangtze River Estuary for the past 40 years[J]. *Hydro-Science and Engineering*, 2021, (5): 8-18.]
- [54] Wang J, Dai Z J, Mei X F, et al. Tropical cyclones significantly alleviate mega-deltaic erosion induced by high riverine flow[J]. *Geophysical Research Letters*, 2020, 47(19): e2020GL089065.