



海洋地质与第四纪地质

MARINE GEOLOGY & QUATERNARY GEOLOGY

长江口新桥水道表层沉积物分布格局及其影响因素

陈云, 戴志军, 胡高建, 梅雪菲, 顾清华

Surface sediment distribution pattern of the Xinqiao Channel of Changjiang Estuary and its controlling factors

CHEN Yun, DAI Zhijun, HU Gaojian, MEI Xuefei, and GU Jinghua

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16562/j.cnki.0256-1492.2021061503>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

莱州湾表层沉积物重金属分布特征、污染评价与来源分析

Spatial distribution of heavy metals in the surface sediments of Laizhou Bay and their sources and pollution assessment

海洋地质与第四纪地质. 2021, 41(6): 67

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

南海北部陆坡神狐海域SH-CL38站位的粒度特征及沉积记录

Sediment grain size characteristics of the Core SH-CL38 in the Shenu area on the northern continental slope of the South China Sea

海洋地质与第四纪地质. 2021, 41(5): 90

南海南部浅表层柱状沉积物孔隙水地球化学特征对甲烷渗漏活动的指示

Pore water geochemistry of shallow surface sediments in the southern South China Sea and its implications for methane seepage activities

海洋地质与第四纪地质. 2021, 41(5): 112

福宁湾海域夏季大潮期悬浮泥沙输运特征及控制因素

Characteristics and controlling factors of suspended sediment transportation in summer spring tide in Funing Bay

海洋地质与第四纪地质. 2021, 41(6): 53

冲绳海槽西部陆坡泥底辟和泥火山特征及其形成动力机制

Characteristics and genetic dynamics of mud diapirs and mud volcanoes on the western slope of Okinawa Trough schematic geographic map of studied area mud diapirs with different morphology in multi-channel seismic section

海洋地质与第四纪地质. 2021, 41(6): 91



关注微信公众号，获得更多资讯信息

陈云,戴志军,胡高建,等.长江口新桥水道表层沉积物分布格局及其影响因素[J].海洋地质与第四纪地质,2022,42(2): 59-69.
CHEN Yun, DAI Zhijun, HU Gaojian, et al. Surface sediment distribution pattern of the Xinqiao Channel of Changjiang Estuary and its controlling factors[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2022, 42(2): 59-69.

长江口新桥水道表层沉积物分布格局及其影响因素

陈云¹, 戴志军¹, 胡高建², 梅雪菲¹, 顾靖华¹

1. 华东师范大学 河口海岸学国家重点实验室, 上海 200241

2. 上海勘测设计研究院有限公司, 上海 200335

摘要:涨潮槽是全球河口普遍存在的地貌单元,其动力沉积过程直接关乎河口涨潮槽冲淤稳定。但因径、潮流耦合及高强度人类活动,当前世界大部分河口涨潮槽动力沉积已发生迅速变化,进而引起河槽萎缩。基于此,以2020年6月在长江口南支最大的涨潮槽——新桥水道采集的大范围表层沉积物样品为基础,利用样品的粒径数据并借助经验正交函数(EOF)开展新桥水道表层沉积物分布格局及其影响因素研究。结果表明:新桥水道可分为3个沉积区,其中新桥水道上游河段沉积物主要由粉砂质砂和黏土质粉砂组成,沉积物分选较差;新桥水道中游河段沉积物由砂组成,沉积物分选较好;新桥水道下游河段沉积物分选性差,主要由砂、粉砂质砂、砂质粉砂以及黏土质粉砂组成。新桥水道沉积动力特征可以分为3种模式,其中主要模式为径流和潮流共同作用下,新桥水道上游及下游局部河道形成以砂质粉砂与黏土质粉砂为主的沉积格局;次要模式为局部河势影响下,新桥水道中、下游局部河段形成以粉砂质砂为主的沉积格局;第三模式为洪季径流影响下以砂为主的沉积格局。扁担沙沙尾下移导致进入新桥水道径流增强引起表层沉积物变粗。东风西沙水库的构建诱发新桥水道上段尖端沉积物变细。

关键词:粒度特征;涨潮槽;沉积模式;EOF分析;长江口

中图分类号:P736.21

文献标识码:A

DOI: 10.16562/j.cnki.0256-1492.2021061503

Surface sediment distribution pattern of the Xinqiao Channel of Changjiang Estuary and its controlling factors

CHEN Yun¹, DAI Zhijun¹, HU Gaojian², MEI Xuefei¹, GU Jinghua¹

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

2. Shanghai Investigation, Design & Research Institute Co., Ltd., Shanghai 200335, China

Abstract: Flood-dominated channel is an important geomorphic unit in estuaries. Its dynamic sedimentation process is directly related to the dynamics of erosion-deposition system of the channel. However, due to the runoff-tide interaction and intensive human activities, the dynamics of sedimentation process for most of estuarine flood channels in the world is rapidly changing, led to channel shrinkage. Based on the grain-size parameters of the surface sediments collected along the Xinqiao Channel, the largest flooding channel in the South Branch of Changjiang Estuary, the distribution pattern of the surface sediments in the Xinqiao Channel and its influencing factors are carefully studied in this paper with the method of empirical orthogonal function (EOF). The Xinqiao Channel can be divided into three depositional zones. The upstream of the channel is mainly composed of silty sand and clayey silty sand which are poor in sorting and the middle of the channel is characterized by well sorted sands, while in the downstream of the channel, the sediments are mainly composed of sand, silty sand, sandy silt and clayey silty sand, which are poorly sorted. From the viewpoint of sedimentary dynamics, the surface sediments in the Xinqiao Channel can be classified into three modes. The major mode is dominated by sandy silt and clayey silt prevailed in the upstream and part of the downstream, deposited under the control of the joint action of runoff and tide. The secondary mode is dominated by silty sand in the middle and part of the downstream, under the control of local fluvial regime. The third mode, characterized by sandy deposits, is formed by runoff in flooding seasons. In addition, the downward movement of the tail of Biandan Shoal has enhanced the runoff entering the Xinqiao Channel, that results in the coarsening of surface sediment. The construction of the Dongfengisha Reservoir caused to the fining up of surface sediment at the tip of upper Xinqiao Channel.

资助项目:国家自然科学基金委-中华人民共和国水利部-中国长江三峡集团有限公司长江水科学研究联合基金“长江口潮滩湿地动力地貌演变过程及其受损生态修复研究”(U2040202);上海市国际科技合作基金项目“长江口崇明生态岛滩涂消能机制及其生态堤防安全研究”(19230712400);国家自然科学基金面上项目“长江河口新桥水道动力地貌变化及其对人类活动干扰的响应研究”(42076174)

作者简介:陈云(1997—),男,硕士研究生,主要从事河口海岸动力沉积方面的研究, E-mail: 51193904003@stu.ecnu.edu.cn

通讯作者:戴志军(1973—),男,教授,博导,主要从事陆海相互作用、河口海岸动力沉积与动力地貌研究, E-mail: zjdai@sklec.ecnu.edu.cn

顾靖华(1978—),男,工程师,主要从事河口海岸动力沉积方面的研究, E-mail: jhgu@sklec.ecnu.edu.cn

收稿日期:2021-06-15; **改回日期:**2021-10-24. 文凤英编辑

Key words: grain size characteristics; flood channel; sedimentation models; EOF analysis; Changjiang Estuary

涨潮槽是全球河口普遍存在的地貌单元^[1], 其动力沉积过程直接关乎河口涨潮槽冲淤稳定与航运资源利用^[2], 亦可反映槽内径、潮流动力格局^[3-4]。然而, 近期高强度的流域-河口人类活动和由此叠加径、潮流动力转换, 当前大部分河口的涨潮槽动力沉积已发生明显改变^[5-7], 进而引发河槽萎缩^[8-10]。显然, 开展涨潮槽动力沉积的研究对于维持河势稳定与保障航槽安全具有重要现实意义, 并可为涨潮槽对于径、潮流动力转换响应的研究提供科学理论认识。

近年来, 国内不少学者对于涨潮槽表层沉积物粒度特征^[11], 沉积物输移趋势^[12-14]、悬、底沙输移机制^[15-16]及河槽内的沉积环境演变^[17-19]等做了较多研究。然而, 这些研究更多聚焦于自然驱动下的涨潮槽动力沉积过程。此外, 亦有一些学者已经对自然与人类活动耦合作用下的涨潮槽表层沉积物的粒度特征和输移趋势进行了研究^[14,20], 但较少研究涉及大型河口涨潮槽在径、潮流转换下的动力沉积过程, 尤其是长江口新桥水道的动力沉积过程。

长江口一级分汊南支河段因扁担沙横亘其间而形成南支主槽和新桥水道。新桥水道位于崇明岛南侧, 一般指扁担沙北侧上至庙港, 下至堡镇港接北港的区域, 其长度大约为 40 km, 平均宽度约为 1~2 km^[21]。已有研究表明, 无论是洪季或枯季, 新桥水道内整体展现涨潮流速、涨潮量大于落潮, 呈涨潮流优势, 且落潮转涨潮后流速迅速增加, 这对于新桥水道内泥沙特性与运动可能具有重要影响^[15]。在当前长江入海泥沙急剧减少、崇明岛南岸港工建设以及环崇明岛绿色海堤构建与河口涨潮动力有所增强的情景下^[22], 新桥水道的沉积环境可能会发生较大程度改变。基于此, 本文以新桥水道近期采集的表层沉积物资料为基础, 利用经验正交函数(EOF)分析研究新桥水道表层沉积物分布格局及其影响因素, 为新桥水道开发与治理提供科学依据。

1 数据来源与研究方法

1.1 数据收集与处理

为较全面和系统研究新桥水道动力沉积特征, 课题组于 2020 年 6 月 13—14 日在新桥水道区域内进行表层沉积物采集(图 1C), 布点范围覆盖整个新桥水道, 共计采集 34 个河床表层沉积物样品, 采样

期间潮汛为小潮。沉积物采用蚌式采泥器进行采集, 采样的深度约为河床表层垂向向下 5~10 cm。所采集的沉积物样品在实验室内均匀取 0.5~1 g 左右放入 50 mL 离心管中, 加 6~7 mL 浓度 30% 的双氧水去除有机质并静置 24 h。随后, 加入 10 mL 36%~38% 的浓盐酸去除碳酸钙物质并用玻璃棒搅拌使其充分反应。之后, 再加蒸馏水静置 24 h 后, 经离心机离心后, 再吸去上层清液并重复该步骤使其 pH 值降至 6~7。再加入 10 mL 偏磷酸钠溶液, 经超声波震荡 10~15 min 使样品充分分散后, 采用 LS13320 激光粒度仪进行测试。根据美国地球物理学会(AGU)泥沙分类标准对沉积物进行粒度分类^[23]。对所有样品均采用矩值法^[24]计算其平均粒径(Mz)、分选系数(σ)、偏态(Sk)和峰态(Kg)4 种粒度参数, 并依据 McManus^[25]对沉积物的粒度参数进行分类分级, 分析沉积物的总体特征。同时, 依据 Shepard 分类方法对沉积物进行命名与分类^[26]。此外, 还收集了 2020 年的新桥水道海图(比例尺为 1:50 000)与南门潮位站、堡镇潮位站的逐小时实测潮位数据(2019 年 1 月至 2021 年 1 月)。其中, 海图来源为中华人民共和国海事局, 潮位数据来源于上海市水文总站。

1.2 经验正交函数分析(EOF)

经验正交函数分析方法, 也称特征向量分析, 其主要原理是分析矩阵数据中的结构特征, 提取主要数据特征量。Lorenz^[27]在 1950s 首次将其引入大气科学研究, 至今已广泛应用于气象学、地理学与海洋学等^[28-29]。任何复杂的原始数据都可借由 EOF 分解成一系列的时间和空间模态的线性组合。模态之间相互正交, 并能够简洁巧妙地揭示一定的物理内涵, 且通常前几个模态即可揭示原始场的主要信息。除此以外, 它还不受空间站点、地理位置、区域范围限制, 并且具有收敛快、效率高的优势。本文中 EOF 分析具体计算步骤如下:

设有实测粒度分布数据序列 P_{ij} ($i = 1, 2, 3, \dots, m; j = 1, 2, 3, \dots, n$) ; m 为空间采样点数, n 是粒度分级序列的长度。

(1) 对原始数据进行距平处理并整理成二维矩阵的形式, 即 $X_{m \times n}$;

(2) 基于 X 计算其相关系数矩阵:

$$C_{m \times n} = \frac{1}{n} X \times X^T \quad (1)$$

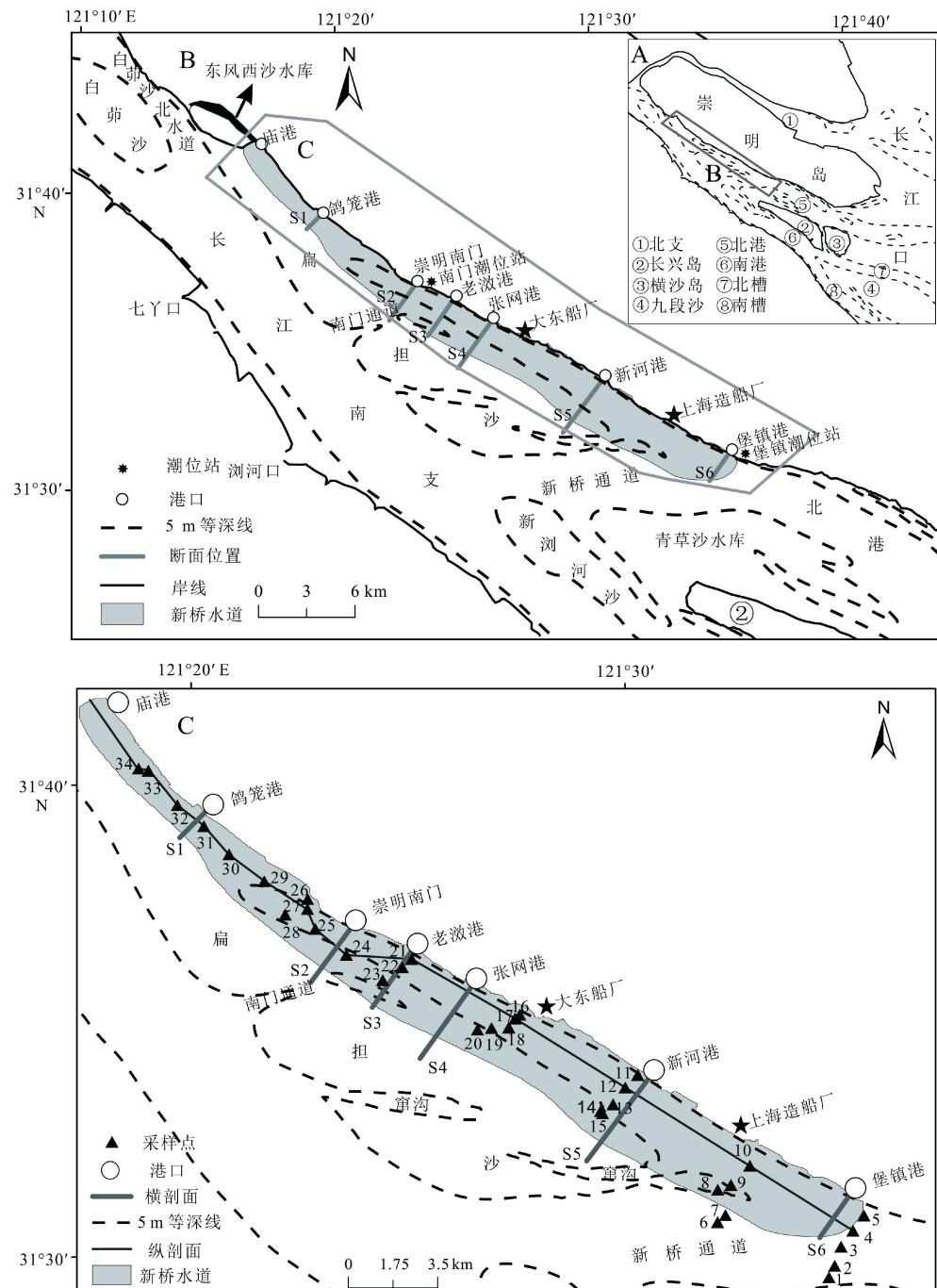


图 1 研究区域 (A, B) 和采样点位置 (C)

Fig.1 Study area (A, B) and sampling sites (C)

(3) 利用雅可比方法求解计算矩阵 $C_{m \times n}$ 特征根 λ_i 和空间特征向量 $V_{m \times n}$ ^[29]。一般将特征根 λ 按从大到小顺序排列, 即 $\lambda_1 > \lambda_2 > \lambda_3 > \dots > \lambda_m \geq 0$ 。每一个特征根对应一组空间特征向量值, 也称 EOF 模态。

(4) 依据 $T_{m \times n} = V_{m \times n}^T \times X_{m \times n}$, 求取特征权重 $T_{m \times n}$ 。

(5) 求取各模态对原始场的相对贡献率:

$$a_k = \frac{\lambda_k}{\sum_{i=1}^m \lambda_i} \times 100\% \quad (2)$$

(6) 求取其累积贡献率, 即,

$$\beta_k = \sum_{i=1}^k a_k \quad (3)$$

若前 k 个模态的累计贡献率 β_k 超过了 75%, 那么这前 k 个模态便能反映原始场的主要信息^[29]。本次研究中, 将 34 个沉积物样品粒径数据构成 34×13 的矩阵^[29], 其中 34 为沉积物样品数量, 13 为样品中自极细黏土至极粗砂不同粒级百分比含量的级数。

1.3 潮汐不对称的表征与计算

新桥水道主要受控于径、潮流相互作用^[30], 上溯潮流由于径流顶托作用与地形效应造成潮波变形^[31], 从而引发潮汐不对称(TA), 这对泥沙净输运和沉积过程有显著影响^[32]。潮汐不对称(TA)与潮差以及河槽断面深度密切相关^[33], 即 $TA \sim \frac{a}{h}$, 其中, a 是潮差的一半, h 是河槽断面平均深度, 当 $a/h > 0.3$ 时, 该河道为涨潮优势; 当 $a/h < 0.2$ 时, 该河道为落潮优势; 当 a/h 处于 $0.2 \sim 0.3$ 范围内时, 取决于浅滩在高低潮位的体积差值与河道体积之比。在本文中, a 的计算基于潮位站的逐时潮位数据。具体而言, 先对水位进行 5 min 插值, 然后采取 27 h 的时间窗口逐时取水位最高和最低值, 两者的差值即为日均潮差, 详细计算方法见 Matte 等^[34]。为避免台风、风暴潮等对潮差的影响, 本文对得到的日均潮差进行年平均, 进而得到年均潮差。河槽断面平均深度 h 通过数字高程模型(DEM)获得, 即在 ArcGIS 平台将 2020 年的水深数据校正至高斯克吕格投影下北京 1954 坐标系和理论深度基准面上, 并利用 Kriging 方法对水深点进行插值, 进而提取断面平均深度 h 。根据上述获得的 a 和 h , 按照公式 $\frac{a}{h}$ 可表征新桥水道潮汐不对称。本文自新桥水道上游至下游共选取 6 个断面, 其中计算 S1、S2、S3 剖面潮汐不对称性时 a 采用南门站潮位数据, 而 S4、S5、S6 剖面 a 采用堡镇站潮位数据。

2 结果分析

2.1 河槽沉积物类型

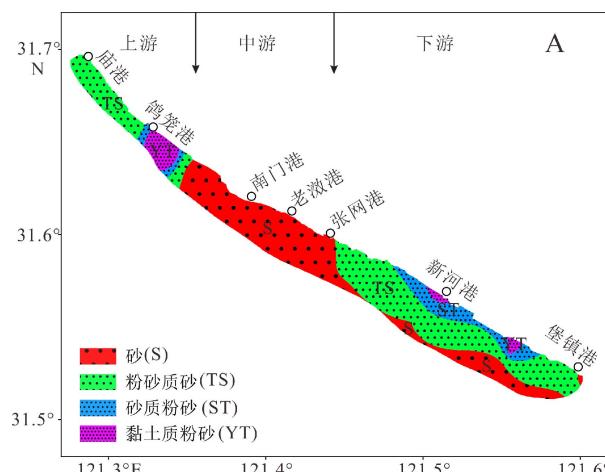


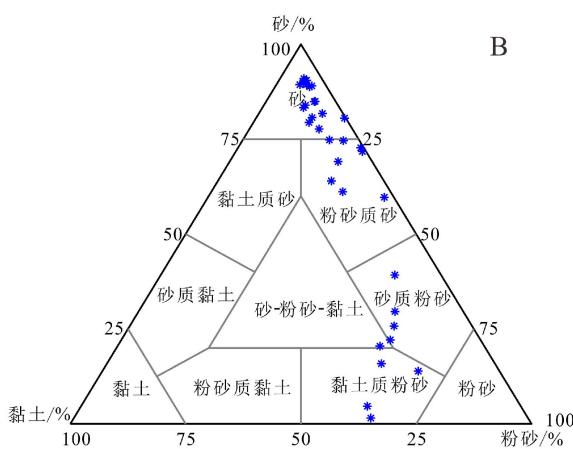
图 2 新桥水道表层沉积物类型分布及 Shepard 三角分类

Fig.2 Sediments distribution map of the Xinqiao Channel based on Shepard classification

沉积物类型及其区域分异反映水动力条件、物质来源及地貌类型等对于动力沉积过程的影响, 并能在较大程度上反映河槽河床沉积变化特征^[35-36]。基于粒度分析结果, 绘成新桥水道河槽表层沉积物类型分布和谢帕德三角图(图 2)。新桥水道沉积物主要类型共 4 种, 砂占 50%, 其次是粉砂质砂占 24%, 剩余为砂质粉砂和黏土质粉砂, 分别占 14% 和 12%。根据沉积物类型分布特征与地形地貌可以将新桥水道分为上、中及下游 3 个沉积区: 新桥水道上游河段, 位于庙港至鸽笼港下游部分河段, 沉积物主要为粉砂质砂与黏土质粉砂。新桥水道中游河段, 位于南门港上游部分河段至张网港, 沉积物全为砂。新桥水道下游河段, 位于张网港至堡镇港河段, 沉积物主要为砂、粉砂质砂及砂质粉砂。整体上, 新桥水道表层沉积物分布在纵向上呈现“细-粗-细”的模式。

2.2 河槽沉积物粒度参数

表层沉积物粒度特征是反映水动力和沉积环境变迁的重要指标^[37]。将新桥水道河槽表层沉积物的 4 种粒度参数绘制成图 3。新桥水道表层沉积物的平均粒径为 $3 \sim 7\Phi$, 平均值为 $4.32\Phi(0.05 \text{ mm})$, 总体上泥沙颗粒较粗(图 3A)。新桥水道内, 沉积物平均粒径存在明显区别: 新桥水道下游近岸侧与新桥水道上游鸽笼港附近河段的沉积物粒径较其余河段要细, 这和沉积物类型分布结果一致(图 2 A)。沉积物分选系数为 $1 \sim 2.5$, 其中约有 41% 的样品分选性较差, 分选系数为 $1 \sim 2$, 其主要分布在新桥水道上游与新桥水道下游的近岸一侧, 其余区域的分选系数为 $2 \sim 2.5$, 分选性差(图 3B)。此外, 所有样品偏态值均为正值, 表明整个区域呈现正



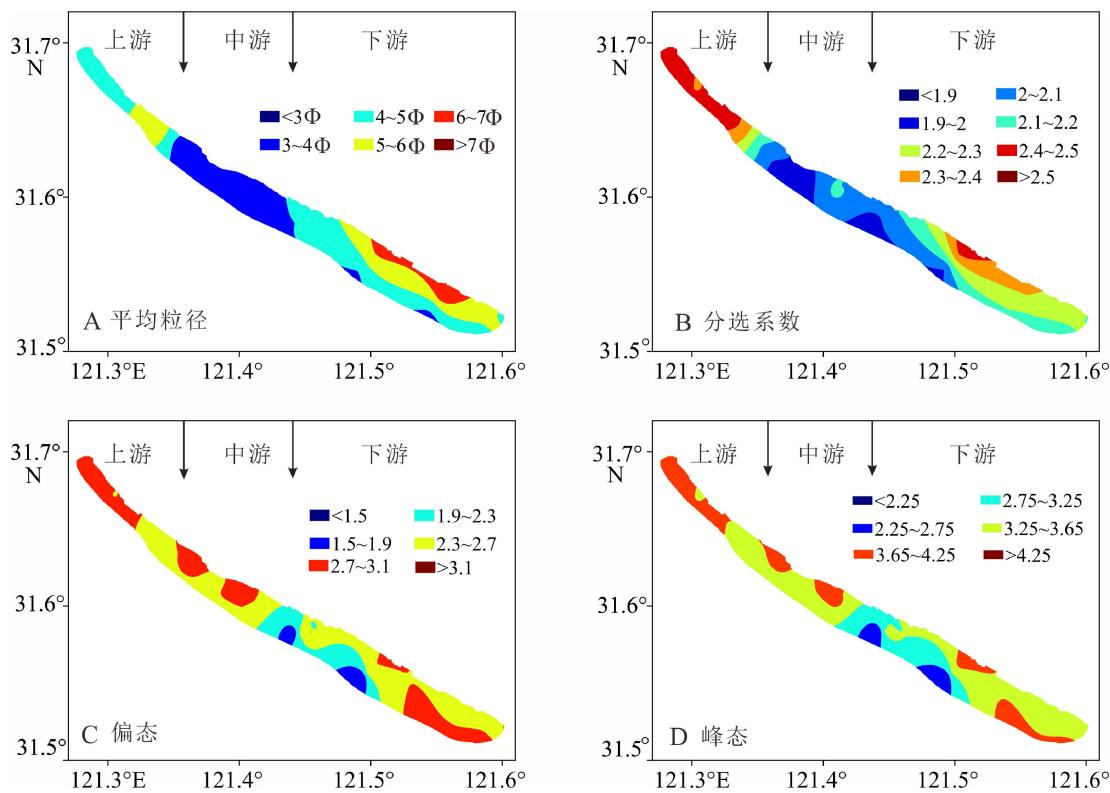


图 3 新桥水道表层沉积物粒度主要参数

Fig.3 Characteristics of grain-size parameters of the sediments from Xinqiao Channel

偏, 说明沉积物中相对于平均粒径的较粗组分含量居多(图 3C)。研究区域峰态值集中于 2.25~4.25, 属于宽峰型(图 3D)。

2.3 沉积物搬运方式

概率累积曲线可较直观地辨别沉积物的搬运方式, 反映沉积物与搬运能力的关系^[38]。进一步绘制新桥水道沿程沉积物概率累积分布曲线(图 4), 发现新桥水道沉积物主要存在滚动、跃移、悬浮 3 种运动方式。新桥水道上游河段内, 以站位 33 的沉积物概率累积曲线最为典型, 表现出滚动组分缺失, 存在双跃移组分, 粗跃移组分含量多于细跃移组分, 双跃移组分约占总含量的 95% 及以上, 细跃移组分含量向下游先减少后增加, 悬浮组分含量则相反。新桥水道中游河段内, 以站位 24 沉积物的概率累积曲线为代表, 滚动组分同样缺失, 存在双跃移组分, 粗跃移组分含量远高于细跃移组分含量, 粗跃移组分含量向下游先增加后减小, 细跃移组分含量向下游则相反; 同时悬浮组分极少, 不超过 2%。新桥水道下游河段内, 分别以站位 12 和站位 4 代表上下游不同的概率累积曲线, 上游沉积物中含有少许滚动组分, 滚动组分含量不超过 1%, 亦存在双跃移组分, 滚动组分和跃移组分的截点在

1~2Φ。新桥水道下游河段自上游到下游, 细跃移和悬浮组分含量增加, 并且下游细跃移组分含量超过粗跃移组分含量, 约占总含量的 60%。

2.4 新桥水道沉积格局

新桥水道表层沉积物样品粒径资料标准化处理后的 34×13 矩阵, 经 EOF 分析, 将其前 3 个特征值的贡献率绘制形成表 1。如表 1 所示, 前 3 个模态累计贡献率已经达到 80%, 超过 75%。因此, 前 3 个模态基本涵盖了新桥水道河槽表层沉积物变化的主要信息, 由此绘制特征权重和空间特征向量分布图(图 5)。

据表 1, 第一模态贡献率为 59%, 表征新桥水道主要沉积特征。由图 5A 可知, 极细黏土至粗粉砂范围的特征权重为正值, 极细砂至极粗砂为负值, 其中极细黏土至中粉砂权重最大, 为 4~6, 极细砂至细砂权重最小, 小于 -4。相应第一模态的空间特征向量分布(图 5B)显示, 正值区域主要分布在新桥水道上游河段与新桥水道下游近岸侧, 负值区域则主要分布在新桥水道中游河段。将图 5B 空间特征向量与图 5A 权重值相乘, 结果表明正值区域沿新桥水道上中下游均有分布, 其中上游和下游局部河段泥沙颗粒较细, 而中游河段泥沙较粗, 这与平

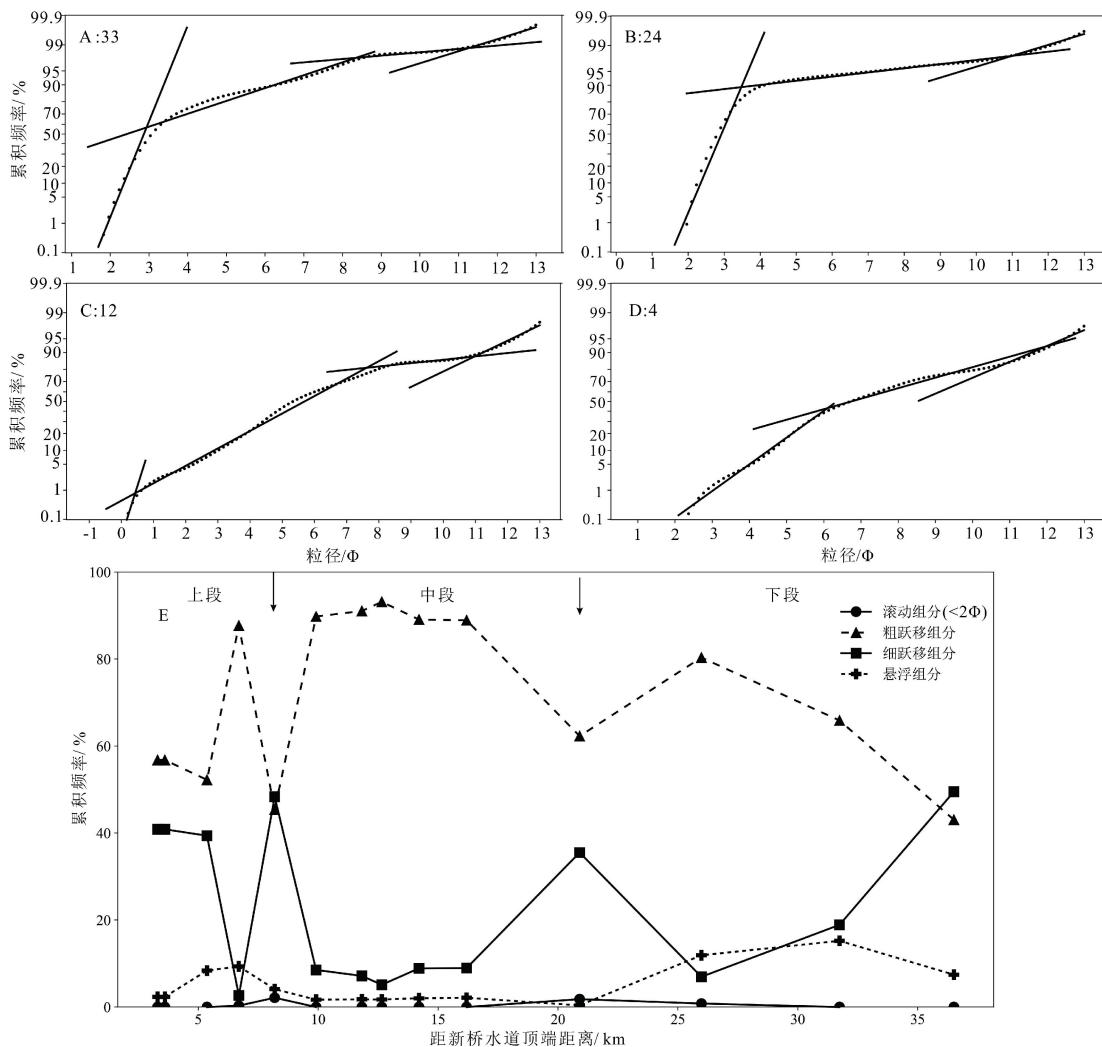


图4 新桥水道沿程沉积物概率累积曲线

Fig.4 The probability cumulative frequency curves of the sediments from the Xinjiao Channel

表1 EOF分析的前3个模态贡献率及其累计贡献率

Table 1 The cumulative contributions of the first three modes by EOF analysis

标准化矩阵	贡献率/%	累计贡献率/%
第一模态	59%	59%
第二模态	11%	70%
第三模态	10%	80%

均粒径分布图相一致(图3A)。同时,结合沉积物类型分布图(图2A)可知该模态主要表征以砂质粉砂与黏土质粉砂为主的新桥水道上游及下游局部河段沉积模式和以砂为主的新桥水道中游沉积模式。

第二模态的贡献率为11%,表征新桥水道的次要沉积特征。据图5C,特征权重曲线上有一个正的峰值,主要表现为:极细粉砂至极细砂、极粗砂为正值,粗粉砂的权重值最大,接近4,其余均为负值,细

砂的权重值最小,小于-3。相应第二模态的空间特征向量分布(图5D)显示,正值区域主要分布在老滧港至新河港河段,负值区域主要分布在新桥水道下游的新河港至堡镇港河段。将图5D空间特征向量与图5C权重值相乘,结果发现正值区域主要分布在新桥水道中、下游局部河段;同时,相较粗粉砂与极细砂,其余组分与空间向量相乘后均较小,因此正值区域主要为粉砂质砂区域。同时,在新桥水道中、下游河段内主要以粉砂质砂为主(图2A)。故该模式主要表明以粉砂质砂为主的新桥水道中、下游局部河段沉积模式。

第三模态的贡献率为10%,由图5E可知,特征权重曲线上有两个正的峰值,主要表现为极细黏土至粗黏土、极细砂至细砂的范围为正且值偏小,其余粒径组分为负值且粗砂的权重值最小,小于-4。对应的空间特征向量分布(图5F)显示,正值区域仅分布在新桥水道下游的新河港至堡镇港河段,除此

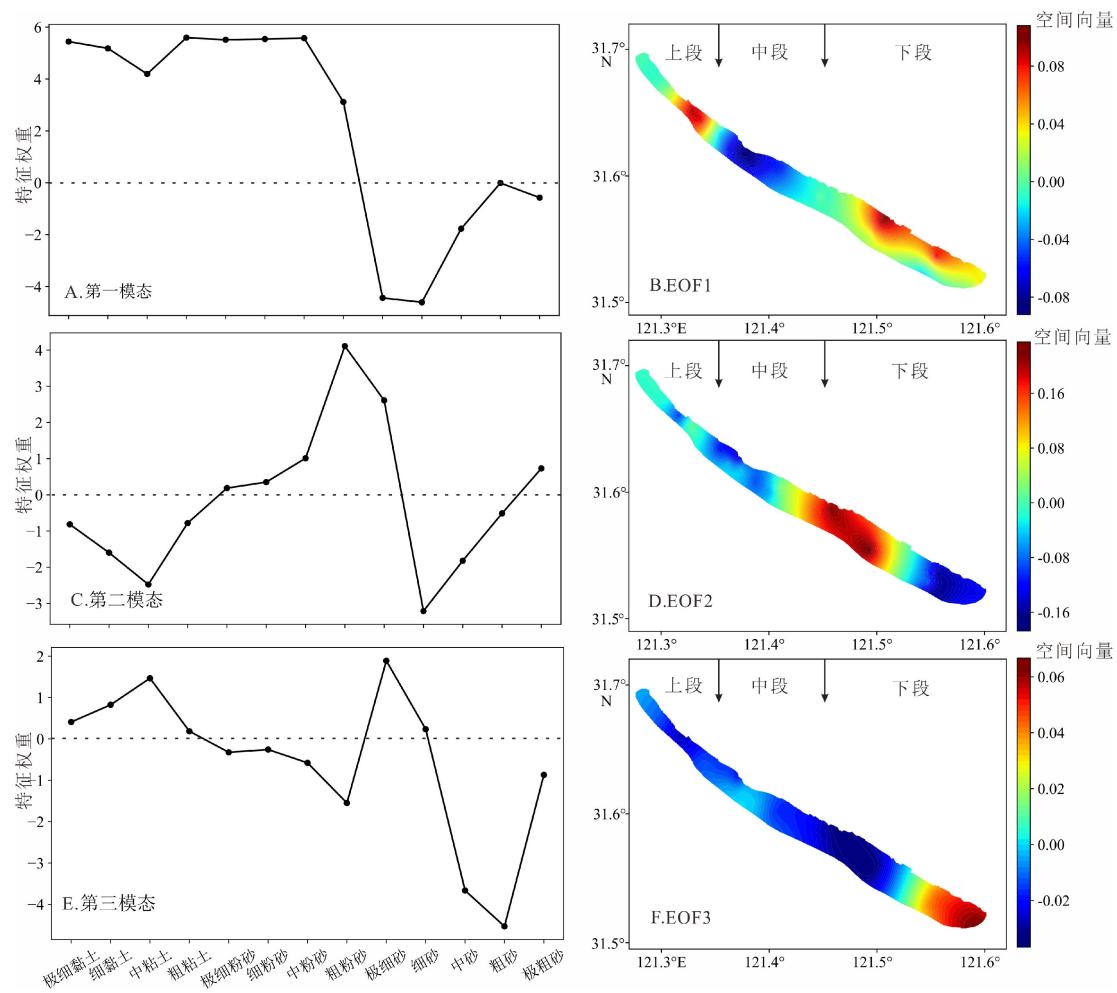


图 5 新桥水道表层沉积物粒度的前 3 个模态的特征权重与空间特征向量

Fig.5 Eigenweightings and eigenvectors of the first three modes of surface sediments of Xinqiao Channel

区域外, 其余区域空间特征向量均为负值。将图 5E 空间特征向量与图 5E 权重值相乘, 结果表明新桥水道上游、中游及下游上段主要是粗颗粒的砂沉积, 而下游下段则是细、粗泥沙混合沉积, 这与平均粒径分布图相一致(图 3A)。故该模式主要表征以砂为主的新桥水道上、中及下游上段沉积模式与以粉砂质砂为主的新桥水道下游下段沉积模式。

3 讨论

3.1 径、潮流作用的影响

新桥水道作为长江口南支最大的涨潮槽^[39], 主要受到径流和潮流的共同作用。在新桥水道区域内, 北港上溯的潮流由于径流的顶托作用与地形效应造成潮波变形, 引起强烈的潮汐不对称性, 从而对泥沙净输运产生重要影响^[32], 进而影响沉积物的分布。新桥水道的泥沙主要来自于随涨潮上溯所

带来的细颗粒泥沙与长江下泄径流所携带的粗颗粒泥沙^[21]。同时, 可通过沉积物的概率累积曲线去印证宏观上沉积物粒径的变化^[40-42]。新桥水道自下段到上段, 涨潮优势不断增强, 落潮优势不断减弱(图 6)。向上游不断增强的涨潮优势有利于海域细颗粒泥沙向陆的净输运^[43-44], 同时由于涨潮流速受涨潮槽上游两侧地形束窄影响而减小^[16], 从而使其携带的细颗粒泥沙在新桥水道上游沉积下来, 引起

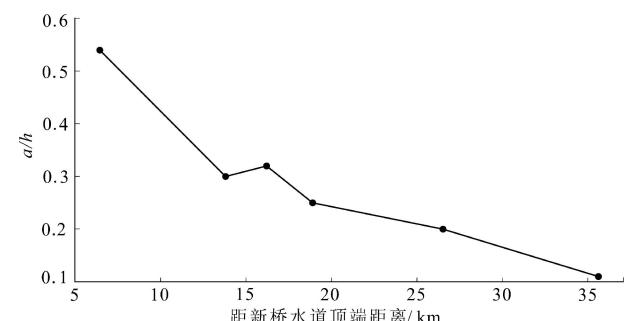


图 6 新桥水道沿程潮汐不对称

Fig.6 Tidal asymmetry along the Xinqiao Channel

新桥水道上游河段内悬浮组分和细跃动组分呈现出向下游微弱地增加(图 4E),并形成以砂质粉砂与黏土质粉砂为主的沉积格局(图 2A),前述通过 EOF 分解得到的新桥水道上游河段沉积第一模态亦反映了此特征。显然,该模式明显受控于河槽径与潮流共同作用。

新桥水道中游河段内因南支主槽径流从南门通道进入新桥水道,引起涨潮优势减弱(图 6)。同时,加之南门通道地形束狭致使出流效应明显,流速加快,动力作用增强,细颗粒泥沙起动向下游输运。因此,中游床面沉积物变粗且形成分选相对较好并以砂为主的局部沉积区(图 2A, 图 3B)。而 EOF 分解得到的新桥水道中游河段第一模态中亦是以砂为主的沉积区(图 5B),也就进一步揭示了第一模态主要由径、潮流共同作用而形成。

新桥水道下游河段内,由于径流进一步通过下扁担沙窜沟进入新桥水道致使涨潮优势进一步减弱(图 6),这就导致新桥水道下游河段上端沉积物出现滚动组分(图 4E)。但流域来沙量减少^[21]与三峡水库调控^[45]引起海域泥沙向陆净输运的增加^[22],导致沉积物搬运中细跃移组分和悬浮组分含量占比向下游不断上升;同时,细颗粒泥沙再悬浮的比例增大,容易在归槽流作用^[46]进入河道下游河段北侧近岸区域沉积。故在新桥水道下游区域近岸侧河段形成以砂质粉砂与黏土质粉砂为主的沉积格局(图 2A)。这也验证了根据 EOF 分析方法分解得到的第一模态中所表明的新桥水道下游近岸侧河段沉积格局(图 5B)。此外,受流域来沙减少影响,进入河槽的水体相对挟沙能力得到增强^[47],尤其是洪季时,大量径流进入新桥水道引发床面细颗粒泥沙难以长时间停留而再悬浮,随后进入水流中并向下游输运,床面沉积物因细颗粒物质悬浮输移而粒

径变粗,因此 EOF 第三模态很可能表征了新桥水道在洪季径流影响的沉积格局(图 5E—F)。

3.2 扁担沙浅滩的影响

扁担沙浅滩位于南支主槽和新桥水道之间,5 m 等深线包络的区域,两者共同组成长江口典型的河道-浅滩系统^[21]。受上游径流作用引起扁担沙沙体持续向下游迁移^[48],从而束窄新桥通道引起新桥通道下泄径流动力增强,导致新桥水道下游下段表层沉积物中出现细跃移组分增多。同时,受洪水影响扁担沙发生冲刷并在滩面上形成窜沟与潮汐通道^[48],为水流进入新桥水道提供了有利条件。加之,受滩-槽侧向环流影响,落潮时出现由滩至槽的泥沙净输运^[49],因此新桥水道下游河段近扁担沙侧出现以砂为主的沉积。此外,南支过滩水流掏蚀扁担沙,新桥水道中游下段与下游河段中央从而出现粗粉砂与细砂的混合沉积,这和 EOF 分解表征的第二模态一致(图 5D),即该模态反映了新桥水道下游在局部河势影响下的混合沉积模式。

3.3 人类活动的影响

近几十年来,因围垦^[10]、大坝建设^[50]以及航道工程^[51]等对长江口的沉积过程造成重大影响。故新桥水道的沉积过程不仅受控于自然驱动,而且也受到近期东风西沙水库构建的作用。水库修建于长江口南支上段北侧,新桥水道上段庙港附近河段(图 1),其总有效库容达到 $890 \times 10^3 \text{ m}^3$,在 2014 年投入使用^[52]。东风西沙水库投入使用后拦截原本由东风西沙北侧潮汐汊道进入新桥水道的径流;同时,水库构建后也引起东风西沙和扁担沙之间的汊道不断淤浅(图 7,影像资料来源为 Maxar 高分辨率影像,崇明南门港潮位站参考水位为 0.5~1 m,水

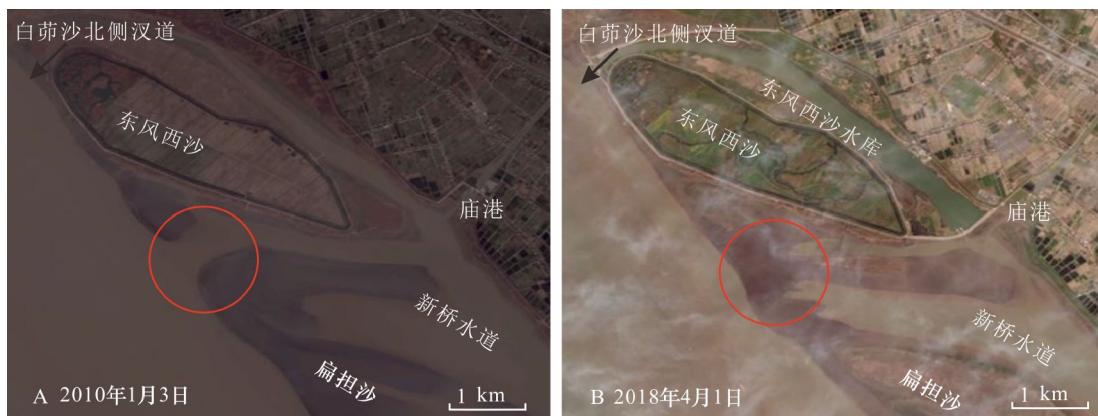


图 7 东风西沙水库构建前后扁担沙-新桥水道 Maxar 高分辨率遥感影像对比

Fig.7 Pictures from Maxar remote sensing images showing the construction of Dongfeng Xisha Reservoir

位参考基面为上海吴淞城建基面), 进一步减少径流进入新桥水道, 因此造成新桥水道上段顶端沉积物较修建前变细^[36]。此外, 由于崇明南岸港工建设, 如上海造船厂移建、华润大东船厂修建等已经对新桥水道沿岸动力沉积过程造成了一定的影响, 促使新桥水道下游河段近岸侧形成平均粒径较细并以黏土质粉砂为主的沉积格局(图 2A, 图 3A)。

4 结论

(1) 新桥水道可分为 3 个沉积区, 新桥水道上游河段, 沉积物主要为粉砂质砂与黏土质粉砂, 分选差; 新桥水道中游河段沉积物由砂组成, 分选较好; 新桥水道下游河段沉积物主要为砂、粉砂质砂、砂质粉砂及黏土质粉砂, 分选差。

(2) 新桥水道的沉积模式主要体现为: 第一模式是在径流和潮流共同作用下, 新桥水道上游及下游近岸侧河段形成以砂质粉砂与黏土质粉砂为主的沉积格局, 并在新桥中游形成以砂为主的沉积格局; 第二模式是受局部河势影响, 新桥水道中、下游局部河段形成以粉砂质砂为主的沉积格局; 第三模式是在洪季径流影响下, 新桥水道形成以砂为主的沉积格局。

(3) 新桥水道的动力沉积过程还经受扁担沙迁移和东风西沙水库构建的影响。扁担沙沙尾下移导致进入新桥水道径流增强引起表层沉积物变粗。东风西沙水库的建立拦蓄部分原本进入新桥水道的水体, 进而导致新桥水道上段尖端动力减弱而沉积物变细。

参考文献 (References)

- [1] Barua D K. Suspended sediment movement in the estuary of the Ganges-Brahmaputra-Meghna river system [J]. *Marine Geology*, 1990, 91 (3): 243-253.
- [2] Mitchell S B, Uncles R J. Estuarine sediments in macrotidal estuaries: future research requirements and management challenges [J]. *Ocean & Coastal Management*, 2013, 79: 97-100.
- [3] Green M O, Bell R G, Dolphin T J, et al. Silt and sand transport in a deep tidal channel of a large estuary (Manukau Harbour, New Zealand) [J]. *Marine Geology*, 2000, 163 (1-4): 217-240.
- [4] Gong W P, Jia L W, Shen J, et al. Sediment transport in response to changes in river discharge and tidal mixing in a funnel-shaped microtidal estuary [J]. *Continental Shelf Research*, 2014, 76: 89-107.
- [5] 张云峰, 张振克, 刘玉卿, 等. 长江口北支沉积动力变化及对人类活动的响应[J]. 人民长江, 2019, 50(9): 24-29. [ZHANG Yunfeng, ZHANG Zhenke, LIU Yuqing, et al. Sediment dynamic processes in North Branch of Yangtze River Estuary and response to human activities [J]. *Yangtze River*, 2019, 50 (9): 24-29.]
- [6] 时翠, 甘华阳, 夏真, 等. 珠江口内伶仃洋表层沉积物粒度特征及其运移趋势 [J]. 海洋地质与第四纪地质, 2015, 35 (1): 13-20. [SHI Cui, GAN Huayang, XIA Zhen, et al. Characteristics and transport trend of surface sediments in inner Lingdingyang firth of the Pearl River Estuary [J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2015, 35 (1): 13-20.]
- [7] Cheng Z X, Wang X H, Jalón-Rojas I, et al. Reconstruction of sedimentation changes under anthropogenic influence in a medium-scale estuary based on a decadal chronological framework [J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2019, 227: 106295.
- [8] Kim T I, Choi B H, Lee S W. Hydrodynamics and sedimentation induced by large-scale coastal developments in the Keum River Estuary, Korea [J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2006, 68 (3-4): 515-528.
- [9] Dai Z J, Fagherazzi S, Mei X F, et al. Linking the infilling of the North Branch in the Changjiang (Yangtze) Estuary to anthropogenic activities from 1958 to 2013 [J]. *Marine Geology*, 2016, 379: 1-12.
- [10] Lesourd S, Lesueur P, Fisson C, et al. Sediment evolution in the mouth of the Seine Estuary (France): a long-term monitoring during the last 150 years [J]. *Comptes Rendus Geoscience*, 2016, 348 (6): 442-450.
- [11] 王永红, 沈焕庭, 李九发, 等. 长江河口涨落潮槽沉积物特征及其动力响应 [J]. 沉积学报, 2009, 27 (3): 511-517. [WANG Yonghong, SHEN Huanting, LI Jiufa, et al. Sedimentary features of sediment and their responses to dynamics in the flood and ebb channel of the Changjiang Estuary [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2009, 27 (3): 511-517.]
- [12] 闵凤阳, 汪亚平, 高建华, 等. 长江口北支的沉积物输运趋势 [J]. *海洋通报*, 2010, 29 (3): 264-270. [MIN Fengyang, WANG Yaping, GAO Jianhua, et al. Sediment transport pathway within the North Branch, Changjiang Estuary [J]. *Marine Science Bulletin*, 2010, 29 (3): 264-270.]
- [13] 刘高峰, 沈焕庭, 王永红, 等. 长江口涨、落潮槽底沙输移趋势探讨 [J]. *海洋通报*, 2003, 22 (4): 1-7. [LIU Gaofeng, SHEN Huanting, WANG Yonghong, et al. Bottom sediment transport in the flood and ebb channels of the Changjiang Estuary [J]. *Marine Science Bulletin*, 2003, 22 (4): 1-7.]
- [14] Zhang W, Zheng J H, Ji X M, et al. Surficial sediment distribution and the associated net sediment transport pattern retain->in the Pearl River Estuary, South China [J]. *Continental Shelf Research*, 2013, 61-62: 41-51.
- [15] 刘高峰, 朱建荣, 沈焕庭, 等. 河口涨落潮槽水沙输运机制研究 [J]. *泥沙研究*, 2005 (5): 51-57. [LIU Gaofeng, ZHU Jianrong, SHEN Huanting, et al. Study on mechanism of water and suspended sediment transport in flood and ebb channels [J]. *Journal of Sediment Research*, 2005 (5): 51-57.]
- [16] 李九发, 沈焕庭, 万新宁, 等. 长江河口涨潮槽泥沙运动规律 [J]. *泥沙研究*, 2004 (5): 34-40. [LI Jiufa, SHEN Huanting, WAN Xinning, et al. Sediment transport in flood channels of the Changjiang Estuary [J]. *Journal of Sediment Research*, 2004 (5): 34-40.]
- [17] 刘苍宇, 贾海林, 陈祥锋. 闽江河口沉积结构与沉积作用 [J]. *海洋与*

- 湖沼, 2001, 32(2): 177-184. [LIU Cangzi, JIA Hailin, CHEN Xiangfeng. Sedimentary texture and sedimentation in the Minjiang River Estuary [J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 2001, 32(2): 177-184.]
- [18] 冉隆江. 鸭绿江河口沉积物粒度分布特征及其对流域变化的响应 [D]. 南京: 南京大学, 2012 [RAN Longjiang. The gran size distribution characteristics of Yalu Estuary and its response to the change of the catchment [D]. Nanjing: Nanjing University, 2012.]
- [19] Cheng Z X, Jalon-Rojas I, Wang X H, et al. Impacts of land reclamation on sediment transport and sedimentary environment in a macrotidal estuary [J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2020, 242: 106861.
- [20] 游博文, 张国安, 李一鸣, 等. 近30年来长江口北支及口外沉积特征及输移趋势 [J]. 长江流域资源与环境, 2018, 27(10): 2328-2338. [YOU Bowen, ZHANG Guoan, LI Yiming, et al. Sediment characteristics and transport trend in north branch and offshore area of Yangtze Estuary in the last 30 years [J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2018, 27(10): 2328-2338.]
- [21] Lou Y Y, Dai Z J, He Y Y, et al. Morphodynamic couplings between the Biandan Shoal and Xinqiao Channel, Changjiang (Yangtze) Estuary [J]. *Ocean & Coastal Management*, 2020, 183: 105036.
- [22] Dai Z J, Mei X F, Darby S E, et al. Fluvial sediment transfer in the Changjiang (Yangtze) river-estuary depositional system [J]. *Journal of Hydrology*, 2018, 566: 719-734.
- [23] Lane E W. Report of the subcommittee on sediment terminology [J]. *Eos, Transactions American Geophysical Union*, 1947, 28(6): 936-938.
- [24] 马菲, 汪亚平, 李炎, 等. 地统计法支持的北部湾东部海域沉积物粒径趋势分析 [J]. *地理学报*, 2008, 63(11): 1207-1217. [MA Fei, WANG Yaping, LI Yan, et al. The application of geostatistics to analysis of grain size trend in the Eastern Beibu Gulf [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2008, 63(11): 1207-1217.]
- [25] McManus J. Grain size determination and interpretation [M]//Tucker M E. Techniques in Sedimentology. Oxford: Blackwell Scientific Publications, 1988: 63-85.
- [26] Shepard F P. Nomenclature based on sand-silt-clay ratios [J]. *Journal of sedimentary Research (SEPM)*, 1954, 24(3): 151-158.
- [27] Lorenz E N. Empirical orthogonal functions and statistical weather prediction [R]. Bedford, MA: Massachusetts Institute of Technology, 1956: 49-50.
- [28] 夏非, 张永战, 吴蔚. EOF分析在海岸地貌与沉积学研究中的应用进展 [J]. *地理科学进展*, 2009, 28(2): 174-186. [XIA Fei, ZHANG Yongzhan, WU Wei. Progress in applications of the EOF analysis in the research of coastal geomorphology and sedimentology [J]. *Progress in Geography*, 2009, 28(2): 174-186.]
- [29] 林益帆, 戴志军, 谢华亮, 等. 长江河口近底层悬沙和沉积物的交换过程研究 [J]. *海洋学报*, 2014, 36(7): 99-110. [LIN Yifan, DAI Zhijun, XIE Hualiang, et al. The research of exchange processes between the suspended sediment near the bottom and the depositions in the Changjiang (Yangtze) Estuary [J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2014, 36(7): 99-110.]
- [30] 王永红. 长江河口涨潮槽的形成机理与动力沉积特征 [D]. 上海: 华东师范大学, 2003 [WANG Yonghong. Reformation mechanism and features of dynamic sediment in flood channels of the Changjiang Estuary [D]. Shanghai: East China Normal University, 2003.]
- [31] 沈焕庭, 潘定安. 长江河口潮流特性及其对河槽演变的影响 [J]. 华东师范大学学报: 自然科学版, 1979(1): 131-144. [SHEN Huanting, PAN Dingan. The tidal wave propagation and its effect on the channel evolution in the Changjiang Estuary [J]. *Journal of East China Normal University: Natural Science*, 1979(1): 131-144.]
- [32] Dronkers J. Tidal asymmetry and estuarine morphology [J]. *Netherlands Journal of Sea Research*, 1986, 20(2-3): 117-131.
- [33] Zhou Z, Coco G, Townend I, et al. On the stability relationships between tidal asymmetry and morphologies of tidal basins and estuaries [J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2018, 43(9): 1943-1959.
- [34] Matte P, Jay D A, Zaron E D. Adaptation of classical tidal harmonic analysis to nonstationary tides, with application to river tides [J]. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 2013, 30(3): 569-589.
- [35] 谢华亮, 戴志军, 吴莹, 等. 海南岛南渡江河口动力沉积模式 [J]. *沉积学报*, 2014, 32(5): 884-892. [XIE Hualiang, DAI Zhijun, WU Ying, et al. Sedimentation dynamic modes of the Nandujiang Estuary, Hainan island [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2014, 32(5): 884-892.]
- [36] 陈沈良, 严肃庄, 李玉中. 长江口及其邻近海域表层沉积物分布特征 [J]. *长江流域资源与环境*, 2009, 18(2): 152-156. [CHEN Shenliang, YAN Suzhuang, LI Yuzhong. Characteristics of surface sediment distribution in the Yangtze Estuary and its adjacent waters [J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2009, 18(2): 152-156.]
- [37] 赵建春, 戴志军, 李九发, 等. 强潮海湾近岸表层沉积物时空分布特征及水动力响应: 以杭州湾北岸为例 [J]. *沉积学报*, 2008, 26(6): 1043-1051. [ZHAO Jianchun, DAI Zhijun, LI Jiufa, et al. Study on the characteristics of temporal and spatial changes in properties of surface sediment on near-shore seabed of strong-tide bay: a case from the north bank of Hangzhou Bay in Shanghai [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2008, 26(6): 1043-1051.]
- [38] 黎树式, 戴志军, 葛振鹏, 等. 强潮海滩响应咸马逊台风作用动力沉积过程研究: 以北海银滩为例 [J]. *海洋工程*, 2017, 35(3): 89-98. [LI Shushi, DAI Zhijun, GE Zhenpeng, et al. Sediment dynamic processes of macro tidal beach in response to Typhoon Rammasun action: a case study of Yintan, Beihai [J]. *The Ocean Engineering*, 2017, 35(3): 89-98.]
- [39] 沈焕庭, 李九发, 金元欢. 河口涨潮槽的演变及治理 [J]. *海洋与湖沼*, 1995, 26(1): 83-89. [SHEN Huanting, LI Jiufa, JIN Yuanhuan. Evolution and regulation of flood channels in estuaries [J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 1995, 26(1): 83-89.]
- [40] Zhang K D, Li A C, Huang P, et al. Sedimentary responses to the cross-shelf transport of terrigenous material on the East China Sea continental shelf [J]. *Sedimentary geology*, 2019, 384: 50-59.
- [41] Li J C, Yao Q, Wang Y, et al. Grain-size characteristics of surface sediments of nebkhas at the southern margin of the Mu Us dune field, China [J]. *Catena*, 2019, 183: 104210.
- [42] Khiari N, Atoui A, Khalil N, et al. Dynamics of sediments along with

- their core properties in the Monastir-Bekalta coastline (Tunisia, Central Mediterranean) [J]. *Journal of African Earth Sciences*, 2017, 134: 320-331.
- [43] Chu A, Wang Z B, De Vriend H J. Analysis on residual coarse sediment transport in estuaries [J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2015, 163: 194-205.
- [44] Brown J M, Davies A G. Flood/ebb tidal asymmetry in a shallow sandy estuary and the impact on net sand transport [J]. *Geomorphology*, 2010, 114 (3): 431-439.
- [45] Mei X F, Dai Z J, Wei W, et al. Secular bathymetric variations of the North Channel in the Changjiang (Yangtze) Estuary, China, 1880–2013: causes and effects [J]. *Geomorphology*, 2018, 303: 30-40.
- [46] 姚弘毅. 近期长江口典型河道悬沙输运及其与底沙交换过程[D]. 上海: 华东师范大学, 2018 [YAO Hongyi. Recent exchange between suspended sediment and bedload and sediment transport in typical branches of Yangtze Estuary[D]. Shanghai: East China Normal University, 2018.]
- [47] 高敏, 李九发, 李占海, 等. 近期长江口南支河道洪季含沙量时间变化及床沙再悬浮研究[J]. *长江流域资源与环境*, 2015, 24(1): 30-38. [GAO Min, LI Jiufa, LI Zhanhai, et al. Characteristics of temporal change of suspended sediment and bed load resuspension during flood season in the south branch of Changjiang Estuary [J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2015, 24(1): 30-38.]
- [48] 何钰滢, 戴志军, 楼亚颖, 等. 长江口扁担沙动力地貌变化过程研究 [J]. *海洋学报*, 2020, 42 (5): 104-116. [HE Yuying, DAI Zhijun, LOU Yaying, et al. Morphodynamic evolution of the Biandan Shoal in the Changjiang River Estuary [J]. *Haiyang Xuebao*, 2020, 42 (5): 104-116.]
- [49] Mariotti G, Fagherazzi S. Channels-tidal flat sediment exchange: the channel spillover mechanism [J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2012, 117(C3), doi: 10.1029/2011JC007378.
- [50] Luo X X, Yang S L, Zhang J. The impact of the Three Gorges Dam on the downstream distribution and texture of sediments along the middle and lower Yangtze River (Changjiang) and its estuary, and subsequent sediment dispersal in the East China Sea [J]. *Geomorphology*, 2012, 179: 126-140.
- [51] Luan H L, Ding P X, Wang Z B, et al. Decadal morphological evolution of the Yangtze Estuary in response to river input changes and estuarine engineering projects [J]. *Geomorphology*, 2016, 265: 12-23.
- [52] 关许为, 刘晓敏. 东风西沙水库工程施工期主要风险因素及对策探析 [J]. *水利科技*, 2012 (4): 30-33. [GUAN Xuwei, LIU Xiaomin. Analysis of main risk factors and countermeasures during construction of Dongfengxisha Reservoir [J]. *Hydraulic Science and Technology*, 2012 (4): 30-33.]