



港珠澳大桥海域表层沉积物粒度端元解析与运移趋势分析

曾维主, 郑兆勇, 黄志雄, 黄 龙

Grain-size endmember and transport trends of surface sediment near the Hong Kong-Zhuhai -Macao Bridge

ZENG Weizhu, ZHENG Zhaoyong, HUANG Zhixiong, and HUANG Long

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16562/j.cnki.0256-1492.2024041002>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

南海中沙群岛海域表层沉积物粒度特征及其输运趋势

Grain size distribution pattern of surface sediments and its implications for transportation trend: A case from the waters off Zhongsha Islands, the South China Sea

海洋地质与第四纪地质. 2022, 42(2): 15-27

渤海湾唐山港海域表层沉积物粒度和黏土矿物分布特征及其物源指示

Characteristics of grain size and clay mineral distribution of surface sediments and their provenance implication in Tangshan Harbor, Bohai Bay

海洋地质与第四纪地质. 2023, 43(5): 136-147

海南岛东南浅海表层沉积物粒度特征及沉积环境

Grain size distribution of surface sediments in the area off southeast Hainan Island and its implications for environmental interpretation

海洋地质与第四纪地质. 2021, 41(2): 64-74

临汾盆地黄土粒度分布的端元模型研究

End member model analysis of grain size for the loess in Linfen Basin, China

海洋地质与第四纪地质. 2021, 41(2): 192-200

庙岛海峡周边海域表层沉积物再悬浮及悬浮泥沙输运机制

Surface sediment resuspension and suspended sediment transportation mechanism in the waters around Miaodao Strait

海洋地质与第四纪地质. 2022, 42(3): 9-24

赣中玉华山泥炭地沉积来源的粒度端元法分析与2 000 aBP以来气候环境重建

Climatic and environmental changes since 2 kaBP by End Member Modeling analysis on grain size data from a peat core of Yuhua Mountain, Jiangxi Province

海洋地质与第四纪地质. 2020, 40(2): 165-173



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

曾维主, 郑兆勇, 黄志雄, 等. 港珠澳大桥海域表层沉积物粒度端元解析与运移趋势分析[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2025, 45(3): 40-49.
ZENG Weizhu, ZHENG Zhaoyong, HUANG Zhixiong, et al. Grain-size endmember and transport trends of surface sediment near the Hong Kong-Zhuhai -Macao Bridge[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2025, 45(3): 40-49.

港珠澳大桥海域表层沉积物粒度端元解析与运移趋势分析

曾维主^{1,2}, 郑兆勇³, 黄志雄⁴, 黄龙⁵

1. 岭南师范学院生命科学与技术学院, 湛江 524048
2. 广东省粤西蓝碳资源开发与利用工程技术研究中心, 湛江 524048
3. 自然资源部南海发展研究院, 广州 510310
4. 港珠澳大桥管理局, 珠海 519060
5. 岭南师范学院地理科学学院, 湛江 524048

摘要: 对港珠澳大桥海域 2021 年 5 月采集的 57 个表层沉积物样品进行了粒度分析, 联合粒度端元解析和粒径趋势分析技术, 探讨了各端元组成的来源和控制因素。结果表明, 表层沉积物的平均粒径为 1.95~7.45 Φ , 以泥质粉砂和砂质粉砂类型为主, 可划分为 3 个粒度端元: 泥质端元 1 和细粉砂端元 2 主要分布于大桥西北部, 端元 1 呈现向西南运移趋势; 粗粉砂或细砂端元 3 主要分布于大桥东南部, 呈现向西北运移趋势。端元 1 和端元 2 分布和运移趋势与悬浮物基本一致, 主要受径流泥沙输入影响; 端元 3 主要分布于悬浮物浓度低值区, 受潮流动力影响较大; 大桥建设前后表层沉积物呈现明显的粗化趋势, 可能主要与近年来伶仃洋径流泥沙输入量降低和潮流动力增强有关。

关键词: 表层沉积物; 粒度端元; 粒径趋势; 悬浮物; 港珠澳大桥

中图分类号: P736

文献标识码: A

DOI: 10.16562/j.cnki.0256-1492.2024041002

Grain-size endmember and transport trends of surface sediment near the Hong Kong-Zhuhai -Macao Bridge

ZENG Weizhu^{1,2}, ZHENG Zhaoyong³, HUANG Zhixiong⁴, HUANG Long⁵

1. Life Science and Technology School, Lingnan Normal University, Zhanjiang 524048, China
2. Engineering Technology Research Center for Development and Utilization of Blue Carbon Resources in Western Guangdong Province, Zhanjiang 524048, China
3. South China Sea Development Research Institute, MNR, Guangzhou 510310, China
4. Hong Kong Zhuhai Macao Bridge Authority, Zhuhai 519060, China
5. School of Geographical Sciences, Lingnan Normal University, Zhanjiang 524048, China

Abstract: Grain size analysis was conducted on 57 surface sediment samples collected in the waters of the Hong Kong-Zhuhai-Macao Bridge in May 2021. The sources and controlling factors of each end-member composition were discussed by combining grain size end-member analysis and grain size trend analysis techniques. Results show that the average particle size of the surface sediments was 1.95~7.45 Φ , mainly muddy silt and sandy silt types, and could be divided into three particle size end-members: muddy end-member (M1), fine silt end-member (M2), and coarse silt or fine sand end-member (M3). M2 and M3 were mainly distributed in the northwest of the bridge, and M1 showed a trend of migrating to the southwest. M3 was mainly distributed in the southeast of the bridge, showing a trend of migrating to the northwest. The distribution and migration trends of M1 and M2 are mostly consistent with those of suspended matter, being mainly affected by runoff sediment input. M3 is mainly distributed in low suspended-matter concentration area and was greatly affected by tidal dynamics. The surface sediments before and after the construction of the bridge showed an obvious coarsening trend, which may be mainly related to the reduction of runoff sediment input and the enhancement of tidal dynamics in the Lingding Yang (Bay) in recent years.

Key words: surface sediment; grain-size end member; grain-size trend; suspended sediment; Hong Kong-Zhuhai -Macao Bridge

资助项目: 广东省海洋经济发展重点项目(GDNRC[2020]050); 广东省人才发展战略专项资金(粤东粤西粤北地区人才发展帮扶计划)

作者简介: 曾维主(1989—), 男, 博士, 从事海洋沉积环境研究, E-mail: zengweizhu@lingnan.edu.cn

通讯作者: 郑兆勇(1979—), 男, 正高级工程师, 主要从事海洋资源和环境评价研究, E-mail: 49169896@qq.com

收稿日期: 2024-04-10; 改回日期: 2024-06-18. 周立君编辑

港珠澳大桥重大工程的实施对粤港澳大湾区发展意义重大, 大桥建成对伶仃洋沉积环境产生的影响受到社会各界广泛关注。前人研究认为大桥对整个伶仃洋沉积环境的影响不大, 主要限制在局部海域。比如, 物理模型研究表明大桥建成对伶仃洋潮流动力和泥沙冲淤影响限制在上下游 5 km 海域^[1]; 遥感数据分析表明大桥对悬浮泥沙向海输运有比较明显的阻滞作用, 大桥北侧悬浮物平均浓度比南侧高约 7 mg/L^[2]; 不同年份遥感数据反演表明大桥海域悬浮物浓度整体呈下降趋势, 但由于大桥阻滞作用使得西北部 2 km 海域悬浮物浓度呈增大趋势^[3]。表层沉积物受到悬浮泥沙和水动力环境等方面的综合影响, 是海洋环境研究的良好载体^[4]。然而, 目前没有对该海域表层沉积物开展详细研究, 这对于伶仃洋沉积环境研究以及准确评估大桥对海域环境产生的影响具有重要的科学和工程意义。

表层沉积物粒度特征是沉积物来源、搬运和沉降过程的综合结果, 特别是对于河口地区物源和沉积动力过程复杂的情况, 平均粒径和分选系数等参数只能近似反映沉积环境, 而粒度端元解析和粒径趋势分析技术可作为河口沉积环境研究的有效手段。河口沉积物中不同端元组成分别指示不同的物源和沉积环境, 受径流和潮流作用的共同控制^[5]。

粒度端元解析通常有两种不同的方法: 一种是假设粒度端元不变, 对所有样品粒度进行整体解析, 以反映沉积物物源信息^[6]; 另一种是考虑粒度端元的差异性, 对单个样品进行粒径解析, 同一端元空间分布差异可以反映其运移过程^[7]。粒径趋势分析能够定性获取沉积物的运移信息^[8], 然而以往学者通常仅以沉积物平均粒度参数进行分析, 大多忽略了不同端元、多物源混合对沉积物运移趋势分析的影响。因此, 为充分挖掘出沉积物粒度数据所蕴含的沉积环境信息, 本文将联合利用粒度端元解析和粒径趋势分析技术, 首先对港珠澳大桥海域表层沉积物进行粒度端元解析, 然后分析不同端元沉积物的粒径趋势, 以揭示各端元沉积物与悬浮物分布、水动力条件等的对应关系, 评估各种因素对表层沉积物分布的影响。

1 研究区概况

珠江口伶仃洋水下地貌总体上呈“三滩两槽”格局, 自西到东依次为西滩、西槽(伶仃水道)、中滩、东槽(矾石水道)和东滩(图 1)。径流泥沙自虎门、蕉门、洪奇门和横门输入, 年均径流量为 $1.79 \times 10^{11} \text{ m}^3/\text{a}$, 约占整个珠江的 63.5%, 年均泥沙输入量为 $3.80 \times 10^7 \text{ t/a}$, 约占整个珠江的 56.8%^[9]。潮汐

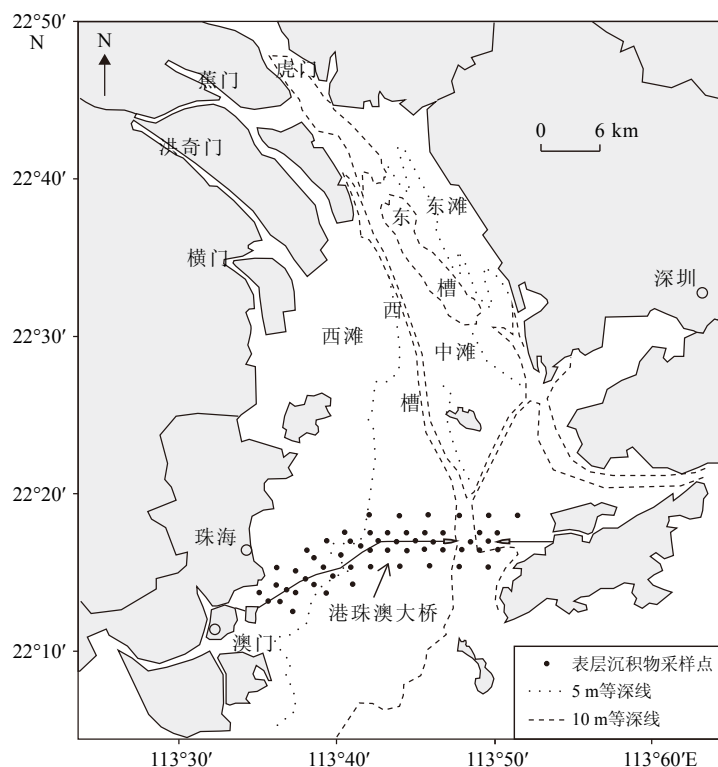


图 1 伶仃洋水下地貌与表层沉积物采样位置

Fig.1 The topography of LDB and surface sediment sampling stations

类型为不规则半日潮,平均潮差为0.9~1.6 m,虎门属于潮控型河口,潮差较大,径流输入较小,其他三个属于河控型河口,潮差较小,径流输入量较大^[10]。近年来,随着人为活动的增强,包括上游筑坝和航道疏浚等,伶仃洋表层沉积物粒度变化显著,1975年和2004年以粉砂和泥质沉积物为主,广泛分布在中部和西南部海域,砂质沉积物主要分布在北部口门附近和东南部海域,而2016年和2017年的粒度数据显示北部口门附近沉积物的砂含量减小,而砂质沉积物多以孤立块状分布在伶仃航道附近,整体上呈现明显的粗化趋势^[11-12]。港珠澳大桥位于外伶仃洋海域(淇澳岛和内伶仃岛以南),连接香港、澳门和珠海,大桥主体由桥梁、人工岛和海底隧道(桥岛隧)组成,海底隧道跨越大桥东部伶仃水道,大桥于2009年动工建设,于2018年完成主体工程。

2 材料与方法

港珠澳大桥海域57个表层沉积物采样位置见图1,均匀分布在大桥上下游2 km海域范围,调查时间为2021年5月,采样站位水深为1~20 m。海洋沉积物冷冻干燥,混合均匀后,取约0.1 g做粒度分析,仪器为马尔文3000型激光粒度仪,分析前对样品进行六偏磷酸钠浸泡和超声分散处理,沉积物粒度组分可划分为泥(<4 μm)、粉砂(4~63 μm)和砂(63~2000 μm),平均粒径(Mz)和分选系数(σi)按照福克和沃德公式计算得到,具体实验步骤和数据处理方法按照海洋调查规范 GB/T12763.8-2007 国家标准执行。

表层沉积物粒度端元解析在QGrain软件平台上完成^[6],选择单样品端元解析模式,分别计算得到每个样品各端元组成的平均粒径、分选系数等参数,以进一步分析不同端元组成在平面上的粒径趋势。端元粒径分布服从韦伯分布,拟合偏差以均方误差MSE表示,该值越小表明拟合效果越好,端元数选取的原则为以最小的端元数达到较好的拟合效果,同时为满足端元组成粒径趋势分析,所有样品的端元数需一致,且各端元均具有可比性或相似物源。

不同端元沉积物粒径趋势利用GSTA程序进行分析^[13],该方法假设“沉积物在运移方向上分选变好、粒径变细且更加负偏”或“沉积物在运移方向上分选变好、粒径变粗且更加正偏”。本文采样站位基本上按网格布局,相邻站位之间的距离为1~2 km,为满足各站位的相邻点统计要求和分析结果的有效性,本文特征距离Dcr设置为2 km。将各端

元组成的平均粒径、分选系数、偏态系数等参数输入GSTA模型,便可分析得到不同端元组成的粒径趋势和运移模式。为验证此方法的可行性,本文采用的是先提出假说、后验证的逻辑思路。首先假设沉积物中不同端元组成具有不同的来源,受不同水动力环境控制,对于计算结果后文进一步分析各端元粒径趋势与悬浮物分布和水动力条件的对应关系,以明确沉积物粒度端元的多物源属性。

3 结果

3.1 沉积物类型和粒度分布特征

表层沉积物的泥-粉砂-砂三角分类图^[14]显示研究区大部分样品属于泥质粉砂类型(图2),其泥含量为12%~35%,粉砂含量为41%~72%,砂含量为1%~25%,平均粒径Mz值大于6 Φ,在大桥海域广泛分布(图3a-d, f)。少数样品属于砂质粉砂和粉砂质砂,其泥含量小于12%,而砂含量大于25%,平均粒径小于6 Φ,主要呈斑块状分布在东部海底隧道和中西部局部位(图3f)。分选系数为0.9~3.5,81%的样品集中于1.5~2.0,分选性中等偏差,整体上西部海域分选性要好于中东部(图3e)。

3.2 表层沉积物粒度端元解析与平面分布

图4a为典型样品的均方误差MSE随端元数的变化,可以看出三端元解析模拟与实测值之间拟合较好,满足端元数最少、拟合效果较好、各端元具有可比性的基本要求,能够用于接下来的端元沉积物粒径趋势分析。典型样品的端元解析结果见图4b-d,端元1平均粒径为0.26~1.84 μm,属于泥质组分;端元2平均粒径为5.29~9.02 μm,属于细粉砂组分;端元3平均粒径为18~130 μm,属于粗粉砂或细砂组分。较细沉积物G1(d_{50} 为8 μm)以端元2组分为主,而较粗沉积物G17(d_{50} 为12 μm)的端元3含量较高。研究区表层沉积物以端元2组成为主,端元1含量较低,端元3含量变化较大。

相对于泥-粉砂-砂粒级分布,各端元含量的平面分布规律更明显(图5a-c)。端元1含量低于9%,含量等值线不规则,含量高值区主要分布在大桥西部北侧和中部南侧海域。端元2含量为28%~80%,其平面分布与端元1相似,但变化规律更明显,含量等值线呈东北-西南走向,含量高值区主要分布在大桥西北部和中部南侧海域。端元3含量为10%~80%,其平面分布与端元2基本相反,含量

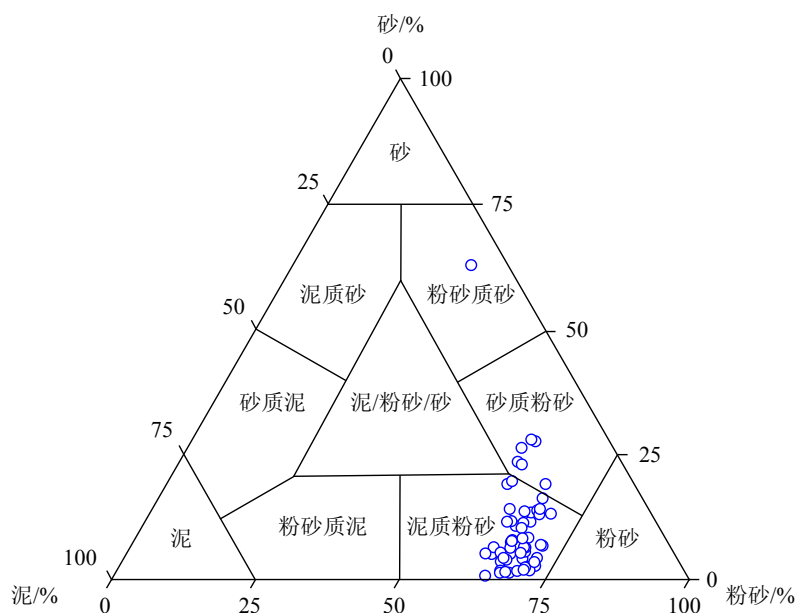


图 2 研究区表层沉积物的泥-粉砂-砂三角分类图

Fig.2 Clay-silt-sand endmember ternary discrimination of surface sediments in the study area

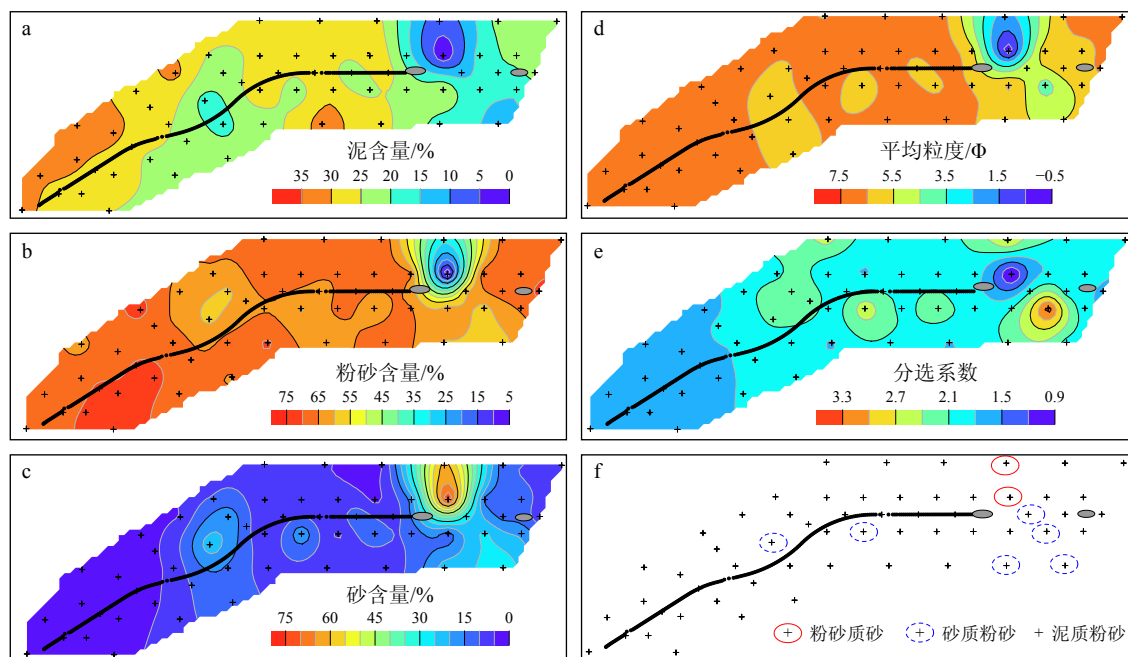


图 3 研究区表层沉积物粒度 (a-d) 及分选系数和类型分布图 (e-f)

Fig.3 Distributions of grain size parameters and types of surface sediments in the study area

高值区主要位于东部伶仃航道和西部南侧海域。若忽略大桥中部南侧局部海域, 整个研究区东南部粒度较粗, 以端元 3 组成为主; 而西北部粒度较细, 以端元 2 和端元 1 组成为主。

3.3 不同端元沉积物粒径趋势分析

粒径趋势分析结果显示, 不同端元沉积物的运移模式明显不同(图 5d-f)。端元 1 在大桥东部向西

运移, 在大桥中部向北运移, 而在大桥西部向西南运移。端元 2 运移趋势不明显, 仅在中部具有向北运移的趋势。与端元 1 和端元 2 相比, 端元 3 向西北运移的趋势更明显, 特别是对于大桥中部海域。总体上看, 端元 1 呈现向西南运移的趋势, 端元 2 的运移趋势不明显, 而端元 3 呈现较明显的向西北运移的趋势。

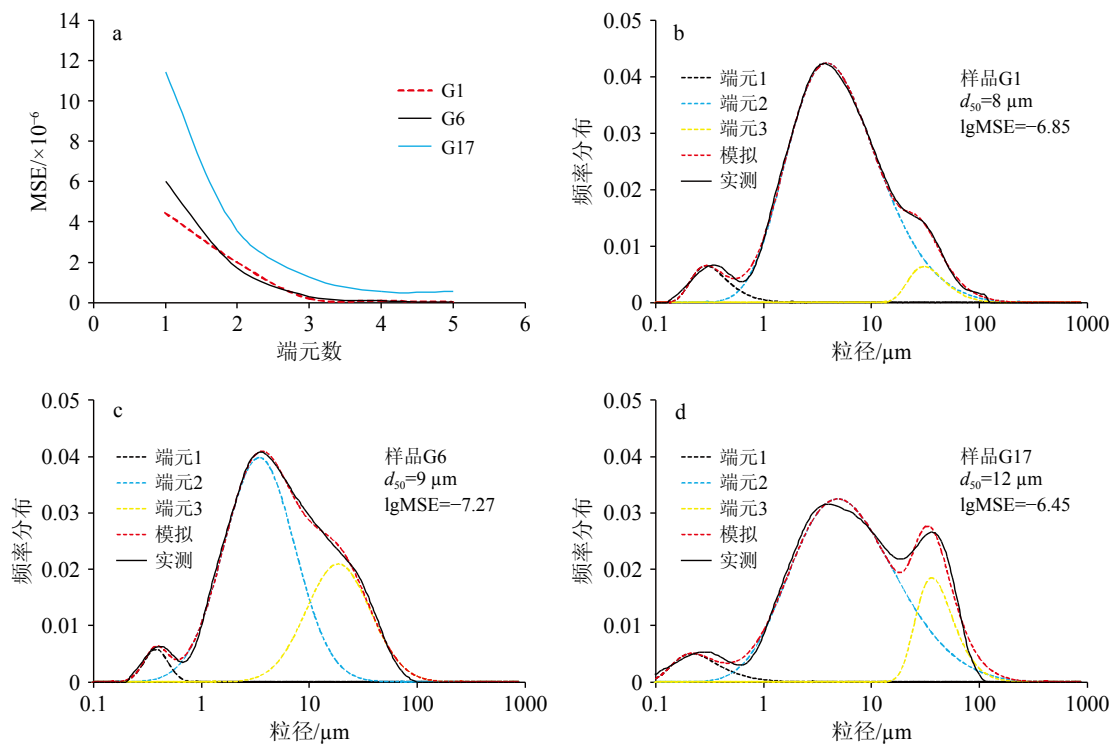


图4 典型沉积物样品粒度端元解析

a: 均方误差 MSE 随端元数的变化, b-d: 三端元粒径分布。

Fig.4 Gran-size endmember modeling results of typical surface sediments

a: Change of mean square error (MSE) with the endmember numbers, b-d: grain-size distribution of the three endmembers.

4 讨论

4.1 悬浮物分布对沉积物粒度的影响

大桥海域悬浮物分布引用刘大召等^[2]利用GF1号卫星数据反演得到的结果(图6), 时间是2019年10月2日(旱季), 总体上悬浮物浓度高值区主要分布在大桥西北部, 低值区分布在东南部海域, 这与2003—2015年7月(洪季)平均悬浮物浓度分布模式基本一致^[12], 主要受西侧蕉门、洪奇门和横门径流泥沙输入的控制^[15]。另外大桥南北两侧悬浮物存在明显浓度差异, 大桥北侧悬浮物平均浓度比南侧高约7 mg/L^[2], 1987—2018年悬浮物数据也显示大桥建设后西北部2 km海域的悬浮物浓度呈增大趋势^[3], 悬浮泥沙滞留在大桥北侧, 表明大桥对悬浮泥沙向海运输存在明显的阻流作用。

前人研究表明伶仃洋浅滩水动力条件不足以产生明显的侵蚀现象, 仍然以淤积过程为主^[16], 因此悬浮物与沉积物分布存在对应关系。表层沉积物中端元1和端元2分布与悬浮物浓度分布较为一致, 都主要分布在大桥西北部, 表明二者之间存在

关联性。伶仃洋悬浮物以泥和粉砂组成为主^[17], 与端元1、端元2沉积物相似, 从粒度特征上看具有成因联系, 前人利用矿物组成和有机碳同位素指标分析, 认为这些细粒沉积物主要来源于径流泥沙输入^[18-19]。泥质沉积物通常以絮凝方式沉降, 主要受悬浮物浓度控制, 悬浮物浓度越高, 泥质组成沉降速率越大^[17], 因此, 端元1主要分布在大桥西部北侧, 受大桥对悬浮物的阻流作用影响明显。与端元1不同, 大桥西部端元2分布没有明显的南北两侧差异, 表明大桥对端元2纵向分布影响较弱, 虽然大桥对悬浮物向海运输存在阻流作用, 但仍有大量悬浮物越过大桥位线向南运输, 随着悬浮物浓度的降低, 平均粒径越大, 粉砂含量越高^[17], 这部分悬浮物能为端元2沉积提供充足物源。大桥中部南侧端元1和端元2含量较高, 与悬浮物浓度分布一致, 这可能与青州水道为西侧口门径流泥沙向海运输的主要通道有关^[15]。

粗粒组成端元3沉积物主要分布在悬浮物浓度较低的东南部海域, 表明其与端元1和端元2具有不同的沉积形成过程或物源。前人调查数据表明伶仃洋水体中悬浮物的粒度随着浓度的降低而增大^[17], 这与一般的重力分选沉降过程不同, 通常认

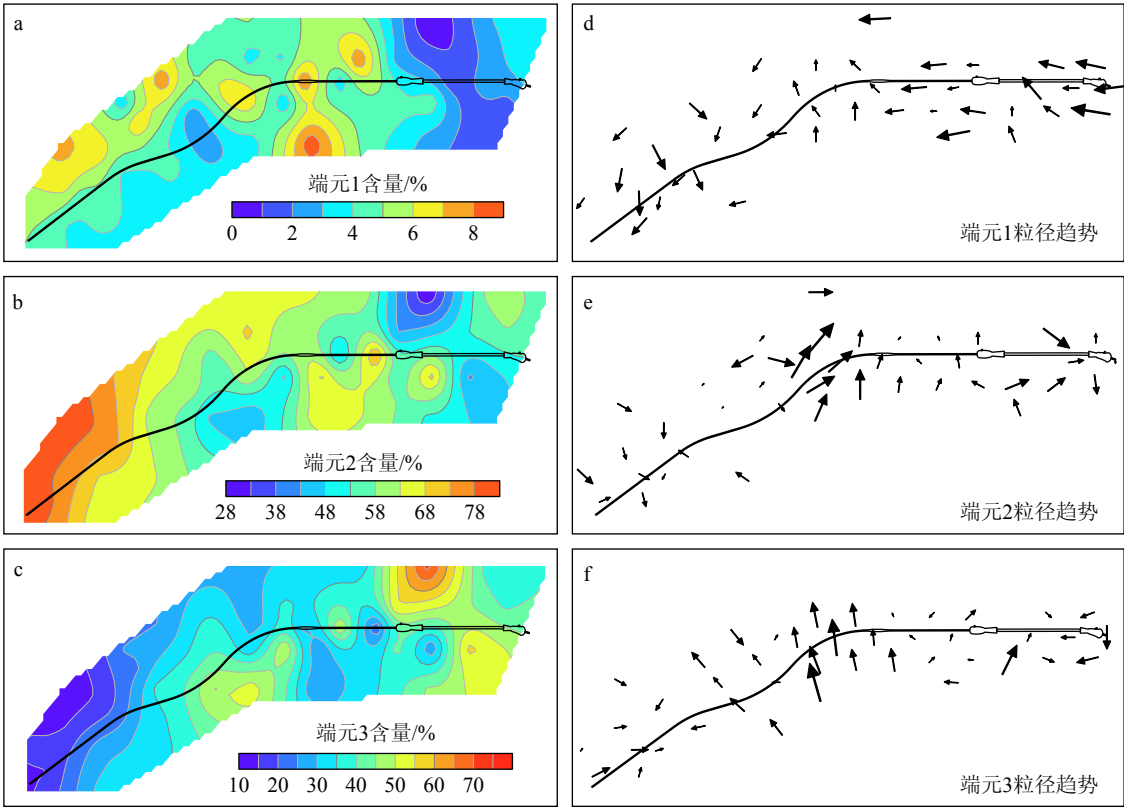


图 5 表层沉积物各粒度端元平面分布特征及粒径趋势分析
a-c: 各端元含量平面分布, d-f: 各端元粒径趋势。

Fig.5 Distribution patterns of endmembers and its grain-size trend of the surface sediments
a-c: endmembers content distributions, d-f: grain-size trends for three endmembers.

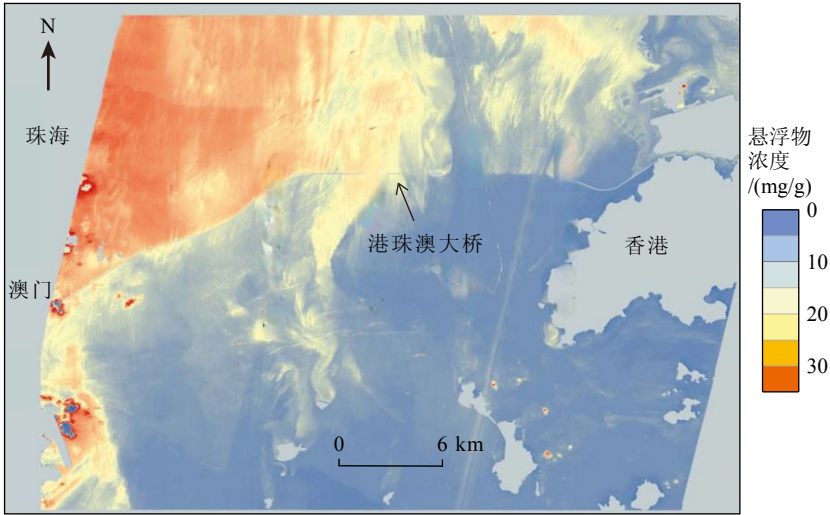


图 6 2019 年 10 月 2 日大桥附近悬浮物浓度平面分布^[2]

Fig.6 Suspended sediment distribution in the areas of the bridge on October 2, 2019

为在同一物源条件下,随着水动力减小,悬沙物中较粗的颗粒先沉降,悬浮物粒径将随着浓度降低而逐渐减小。不同的原因可能有两方面,一是由于研究区悬浮物主要以细粒组成为主,容易发生絮凝沉降,导致悬浮物粒径会随着这些细颗粒的沉降而增大^[20];二是端元 3 具有不同的物源,若是来源于径流

泥沙输入,粗粒组成应优先沉积在四大口门附近,而不是分布在远离口门的东南海域,前人研究认为这些砂质沉积物与航道疏浚、倾倒和采砂活动有关^[11]。需要说明的是,由于表层沉积物粒度主要反映的是沉积环境的年度或季节变化,本文暂未考虑潮流周期内悬浮物的变化对沉积物产生的影响。

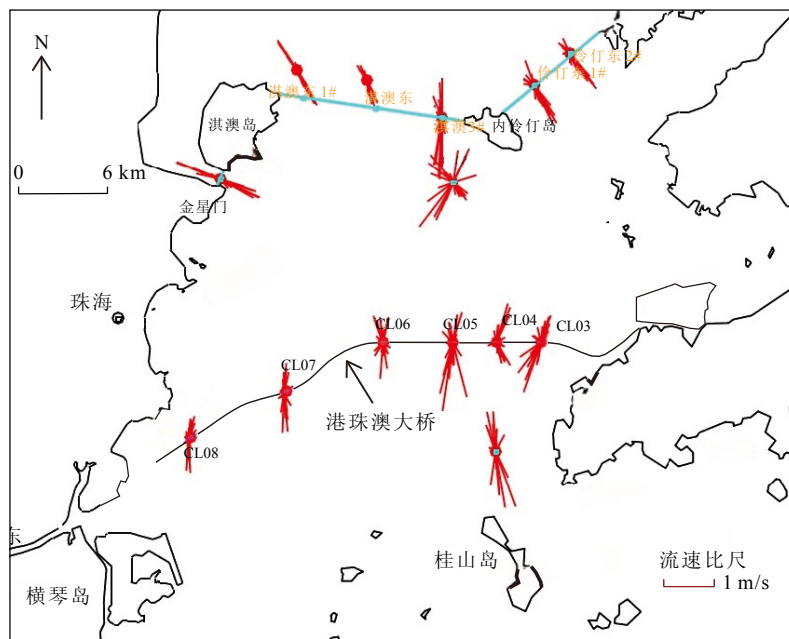


图 7 外伶仃洋及研究区 2019 年 7 月 16—17 日流速矢量图

Fig.7 Velocity vector of tidal current in the Lingding Yang (Bay) and the bridge areas on July 16-17, 2019

4.2 水动力环境对沉积物粒度分布的影响

水动力环境数据引自《港珠澳大桥主体工程建设期防洪影响后评估水文测验报告》(珠江水利委员会珠江水利科学研究院, 2021 年 3 月)。从 2019 年 7 月 16—17 日大桥海域实测流速流向数据来看(图 7), 大桥沿线及南部各站涨落潮流均呈南北往复运动, 大桥东部站点流速较大, 中西部站点较小, 大桥北侧站点 CL02 受到香港暗士顿水道潮流作用影响流向偏西。多数站点落潮平均流速大于涨潮, 余流指向南, 大桥西部和南部站点余流流速较小, 临近西人工岛东侧站点 CL04 的余流指向北, 表明涨潮流作用较强。

大桥海域细粒端元沉积物总体上呈现向西南运移的趋势, 特别是端元 1 组成, 指向悬浮物浓度高值区, 图 7 和前人模拟结果^[21]均显示该区域水动力条件较弱, 自西侧三大口门径流输入的悬浮泥沙主要聚集于此, 细粒悬浮物一旦发生絮凝沉降, 由于其吸附性较强, 当前水动力条件下很难再次悬浮搬运^[20], 形成外伶仃洋西滩沉降中心^[12]。

端元 3 的粒径趋势整体上呈现向北运移趋势, 与图 7 涨潮流和底层余流方向基本一致^[22], 并且表明其受涨潮流作用影响明显, 指示与细粒沉积物不同的物源。外伶仃洋在 20 世纪 90 年代之前, 表层沉积物以泥和粉砂为主, 为径流泥沙淤积阶段^[12,23]。近年来受强烈人为活动干扰, 伶仃洋沉积环境发生明显变化: 一是 90 年代之前珠江流域大规模水库

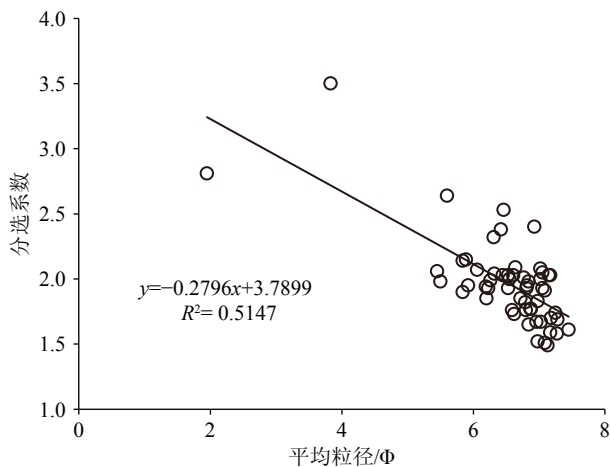


图 8 表层沉积物样品平均粒径与分选系数之间的相关关系

Fig.8 Correlation between average grain-size and sorting coefficient of the surface sediments

修建导致径流泥沙输入量大幅下降^[11]; 二是受径流作用减弱和航道疏浚等影响, 伶仃洋潮流动力近年来呈明显增强趋势^[10,24], 东南部伶仃水道发生一定的侵蚀现象^[16]。不断增强的潮流动力能够将陆架区的更新世陆相砂质沉积物搬运至大桥海域^[22,25]。研究区表层沉积物的分选系数与平均粒径之间呈现一定的负相关关系(图 8), 表明砂质组分的加入使得沉积物的分选性变差。

大桥西人工岛北侧伶仃航道内砂质沉积物的来源可能有两方面, 一是大桥海底隧道基坑^[26]或伶

汀航道疏浚^[1]暴露出第四纪河流相沉积物;二是中滩大规模采砂活动导致水体悬沙含量增大,在强潮流作用下能够被搬运至大桥海底隧道附近^[27]。另外,大桥中部桥墩附近出现一些孤立分布的砂质沉积体,这可能与大桥施工有关。

4.3 大桥建设前后表层沉积物粒度变化

大桥建设前外伶仃洋 98 个站位的表层沉积物粒度数据引自国家海洋局第二海洋研究所 2008 年的调查数据。这些采样点覆盖整个外伶仃洋海域,最北可达内伶仃岛和淇澳岛,最南可达桂山岛和澳门海域。在大桥上下游 2 km 海域,采样点密度较高,大部分采样点与 2021 年采样点重合(图 9a 中虚线框范围)。大桥建设前表层沉积物以粉砂和泥为主,均不含砂质组分。泥含量为 20%~47%,平均为 39%。粉砂含量为 53%~80%,平均为 61%。鉴于泥与粉砂含量为互补关系,图 9a 仅呈现泥含量的平面分布。

泥含量高值区主要分布于研究区西部、中部南侧以及东北部海域;泥含量低值区主要分布在研究区东部伶仃水道和中西部局部海域,这与大桥建成后 2021 年的泥含量分布格局基本一致(图 3)。通

过 2021 年与 2008 年的平均粒径作比值,图 9b 显示大桥建设后表层沉积物呈现明显的粗化趋势,粗化最明显的区域位于东部伶仃航道,特别是西人工岛北侧海域,平均粒径增大 5 倍以上;其次是大桥中西部局部,平均粒径增大约 2 倍。这两处最明显的粗化区域分别与大桥建设前后的粒度最粗分布区域一致(图 3),表明这两处存在粗化加强的现象。粗化较弱的区域主要分布在大桥西部、中部南侧以及东人工岛北侧海域,这一分布模式与大桥建设前细粒沉积物分布区域一致,为研究区主要细粒沉积物分布区。

大桥建设前后表层沉积物平均粒径与水深之间的相关关系明显不同(图 10),表明大桥海域近 20 年来的水动力和沉积环境发生了明显变化,具体表现为“浅滩淤积,深槽冲刷”趋势更加明显^[28]。大桥建设前 2008 年的表层沉积物平均粒度与水深之间无明显相关关系,无论是西滩、西槽或是中滩,均以泥质粉砂沉积物为主,为泥沙淤积阶段。大桥建成后 2021 年的表层沉积物平均粒径与水深之间呈现明显的负相关关系,大桥东部水深较大,沉积物粒度较粗,大桥西部水深较浅,沉积物粒度较细,这可能与两方面的沉积环境变化有关:一是这期间珠

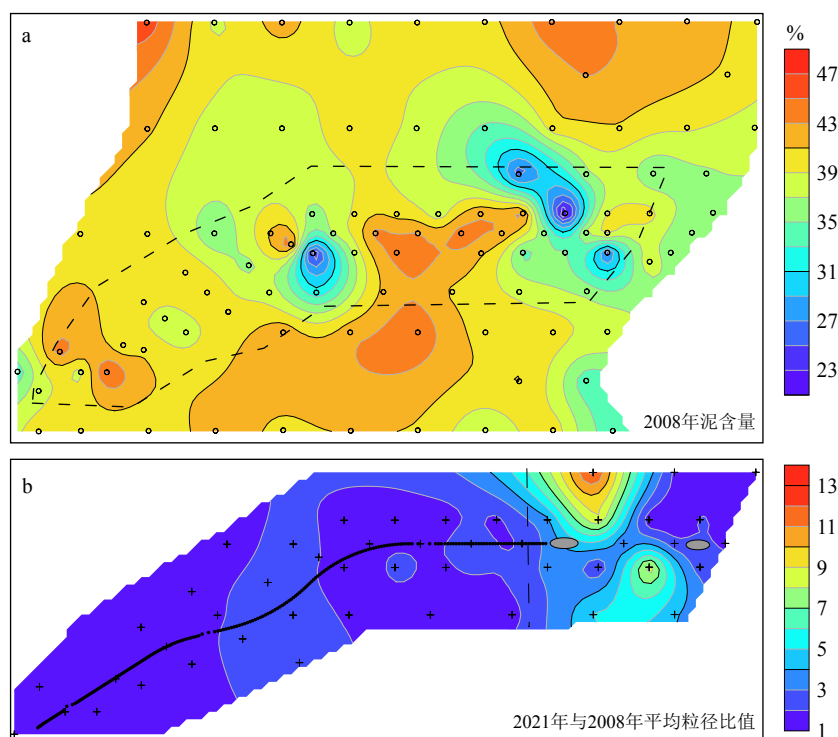


图 9 大桥建设前后表层沉积物粒度变化

a: 建桥前 2008 年外伶仃洋表层沉积物中泥含量分布, b: 2021 年/2008 年平均粒径 (M_z) 比值图。

Fig.9 Grain size change of the surface sediment before and after the bridge construction

a: Clay content distribution of sediment in outer Lingding Yang (Bay) in 2008, b: ratio of average grain size (M_z) between 2021 and 2008.

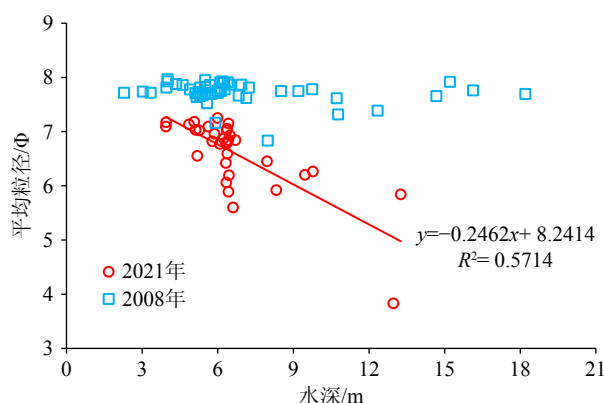


图10 港珠澳大桥海域表层沉积物粒度与水深的关系
Fig.10 Correlation between water depth and grain size of surface sediment in the bridge region

江径流泥沙输入量显著下降,从2000年的约60 Mt/a下降至2020年的约20 Mt/a^[11],径流泥沙输入的淤积作用减弱;二是该期间伶仃洋潮流动力的增强,横门站平均潮差从2000年的1.0 m增大至2020年的1.3 m^[10],潮流动力侵蚀增强。伶仃洋的潮流动力随着水深的增加而增大,东部深槽区潮流动力较强,为潮流主要通道,西部浅滩区潮流动力较弱^[16]。因此相比于浅滩区,深槽区随着泥沙输入量的降低,潮流动力增强,呈现明显的粗化现象。另外,本人前期研究结果表明,大桥东部柱状沉积物粒度在近30年以来呈现明显的粗化趋势,与这段时期内径流泥沙输入量降低和潮流动力增强趋势一致,进一步说明了大桥东南海域沉积物对伶仃洋沉积环境变化的响应^[29]。

总体来看,大桥建设期间表层沉积物存在明显的粗化现象。虽然大桥对悬浮物向海运输存在明显阻滞作用,导致大桥北侧端元1含量较高,但对端元2和3分布影响不明显。由于大桥建设和其他因素导致的伶仃洋环境变化基本处于同一时期,调查数据很难区分它们对水动力和沉积物分布产生的影响,因此初步认为表层沉积物粗化可能受伶仃洋整个沉积环境变化影响。大桥局部冲淤变化可能对表层沉积物产生一定影响,接下来需要加强对人工岛、海底隧道和桥墩附近的采样,或利用数字模拟技术,以研究大桥冲淤变化对沉积物分布的影响。

5 结论

(1)港珠澳大桥海域表层沉积物以泥质粉砂和砂质粉砂类型为主,整体上以粉砂为主,泥和砂含量空间变化较大。沉积物平均粒径为1.95~7.45φ,

分选系数为1.49~3.50,二者之间呈现明显的负相关关系。

(2)联合粒度端元解析和粒径趋势分析结果表明,沉积物可划分为3个粒度端元,泥质端元1和细粉砂端元2主要分布于大桥西北部和中南部,端元1呈现向西南运移趋势,端元2的运移趋势不明显;粗粉砂或细砂端元3主要分布于大桥东部伶仃水道内和西部南侧,呈现向北(陆)运移趋势。

(3)结合区域水动力条件和悬浮物平面特征分析认为:端元1和2沉积受伶仃洋悬浮物分布控制,主要来自径流泥沙输入;端元3沉积受潮流动力影响明显,可能主要来自陆架砂质沉积物。大桥对悬浮物向海运输存在明显阻流作用,对端元1分布影响明显。大桥建设前后表层沉积物呈现明显的粗化趋势,可能主要与近年来伶仃洋径流泥沙输入量降低和潮流动力增强有关。

参考文献 (References)

- [1] Li M G, Yan Y, Han X J, et al. Physical model study for effects of the Hong Kong-Zhuhai-Macao Bridge on harbors and channels in Lingdingyang Bay of the Pearl River Estuary[J]. *Ocean and Coastal Management*, 2019, 177: 76-86.
- [2] 刘大召, 李卓, 陈仔豪, 等. 基于高分1号遥感数据港珠澳大桥对珠江口海域悬浮泥沙分布的影响[J]. *广东海洋大学学报*, 2020, 40: 89-95. [LIU Dazhao, LI Zhuo, CHEN Zihao, et al. Influence of Hong Kong-Zhuhai-Macao Bridge on the Distribution of Suspended Sediment in the Pearl River Estuary[J]. *Journal of Guangdong Ocean University*, 2020, 40: 89-95.]
- [3] Guo J, Ma C L, Ai B, et al. Assessing the Effects of the Hong Kong-Zhuhai-Macao Bridge on the Total Suspended Solids in the Pearl River Estuary Based on Landsat Time Series[J]. *Journal of Geophysical Research-Oceans*, 2020, 125(8): e2020JC016202.
- [4] 杨娅敏, 张礼中, 沈睿文, 等. 渤海湾唐山港海域表层沉积物粒度和黏土矿物分布特征及其物源指示[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2023, 43(5): 136-147. [YANG Yamin, ZHANG Lizhong, SHEN Ruiwen, et al. Characteristics of grain size and clay mineral distribution of surface sediments and their provenance implication in Tangshan Harbor, Bohai Bay[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2023, 43(5): 136-147.]
- [5] Li T, Li T J. Sediment transport processes in the Pearl River Estuary as revealed by grain-size end-member modeling and sediment trend analysis[J]. *Geo-Marine Letters*, 2017, 38: 167-178.
- [6] Liu Y M, Liu X X, Sun Y B. QGrain: An open-source and easy-to-use software for the comprehensive analysis of grain size distributions[J]. *Sedimentary Geology*, 2021, 423: 105980.
- [7] Sun D H, Blomendal J, Rea D K, et al. Grain-size distribution function of polymodal sediments in hydraulic and aeolian environments, and numerical partitioning of the sedimentary components[J]. *Sedimentary*

- Geology*, 2002, 152: 263-277.
- [8] 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: 826-836. [GAO Shu. Grain size trend analysis: principle and applicability [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2009, 27: 826-836.]
- [9] 黄镇国, 张伟强. 珠江三角洲河道近期冲淤特征初步分析 [J]. 台湾海峡, 2005(4): 417-425. [HUANG Zhenguo, ZHANG Weiqiang. Preliminary study on the characteristics of scouring and sedimentation of river channels in recent decades in the Zhujiang Delta [J]. *Journal of Oceanography in Taiwan Strait*, 2005(4): 417-445.]
- [10] Chen K, Dong H, Jia L, et al. , Depocentre transfer in the Lingdingyang estuary: interferences from natural and anthropogenic forcings[J]. *Ocean and Coastal Management*, 2020, 185: 105064.
- [11] Yuan X, Yang Q, Luo X, et al. , Distribution of grain size and organic elemental composition of the surficial sediments in Lingding Bay in the Pearl River Delta, China: a record of recent human activity[J]. *Ocean and Coastal Management*, 2019, 178: 104849.
- [12] Wei X, Cai S Q, Zhan W K, et al. Changes in the distribution of surface sediment in Pearl River Estuary, 1975–2017, largely due to human activity[J]. *Continental Shelf Research*, 2021, 228: 104-538.
- [13] Gao S. A Fortran program for grain-size trend analysis to define net sediment transport pathways[J]. *Computers & Geosciences*, 1996, 22: 449-452.
- [14] Shepard F. Nomenclature based on sand-silt-clay Ratios[J]. *Journal of Sedimentary Research*, 1954, 24: 151-158.
- [15] Zhang G, Cheng W C, Chen L H, et al. Transport of riverine sediment from different outlets in the Pearl River Estuary during the wet season[J]. *Marine Geology*, 2019, 415: 105957.
- [16] Heise B, Harff J, Ren J, et al. Patterns of potential sediment erosion in the Pearl River Estuary[J]. *Journal of Marine Systems*, 2010, 82: S62-S82.
- [17] Xia X M, Li Y, Yang H, et al. Observations on the size and settling velocity distributions of suspended sediment in the Pearl River Estuary, China[J]. *Continental Shelf Research*, 2004, 24: 1809-1826.
- [18] 商博文, 吴云超, 江志坚, 等. 珠江口沉积物有机质特征、来源及其对碳存储的意义 [J]. 热带海洋学报, 2022, 41(3): 16-28. [SHANG Bowen, WU Yunchao, JIANG Zhijian, et al. Characteristics and sources of organic matter in sediments of the Pearl River Estuary: Carbon storage implications[J]. *Journal of Tropical Oceanography*, 2022, 41(3): 16-28.]
- [19] 吴文中, 赵焕庭. 从沉积物的矿物分析论珠江河口湾伶仃洋的泥沙来源 [J]. 热带海洋, 1982(2): 97-110. [WU Wenzhong, ZHAO Huanting. On silt sources of Lingdingyang of the Zhujiang (Pearl River) estuary by means of mineralogical analysis of the sediments[J]. *Tropic oceanology*, 1982(2): 97-110.]
- [20] 毕云天, 胡日军, 陈娟娟, 等. 福宁湾及附近海域悬沙粒度与影响因素 [J]. 海洋地质与第四纪地质, 2024, 44(1): 15-29. [BI Yuntian, HU Rijun, CHEN Juanjuan, et al. Suspended sediment grain size and influencing factors in Funing Bay and its nearby sea areas[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2024, 44(1): 15-29.]
- [21] Cai L N, Zhou M R, Yan X J, et al. HY-1C Coastal Zone Imager observations of the suspended sediment content distribution details in the sea area near Hong Kong-Zhuhai-Macao Bridge in China[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2022, 41: 126-138.
- [22] Zhang W, Zheng J H, Ji X M, et al. Surficial sediment distribution and the associated net sediment transport pattern in the Pearl River Estuary, South China[J]. *Continental Shelf Research*, 2013, 61: 41-51.
- [23] 唐诚, 赵燕, 张华, 等. 珠江口近 30 年海底表层沉积物粒度分布及其环境变化 [J]. 海洋科学, 2013, 37: 61-70. [TANG Chen, ZHAO Yan, ZHANG Hua, et al. The changes of sea surface grain size distribution and its sedimentary environment during the last 30 years in the Zhu-jiang River Estuary[J]. *Marine Sciences*, 2013, 37: 61-70.]
- [24] Zhang P, Yang Q S, Wang H, et al. Stepwise alterations in tidal hydrodynamics in a highly human-modified estuary: The roles of channel deepening and narrowing[J]. *Journal of Hydrology*, 2021, 597: 126153.
- [25] 江四义, 郑兆勇. 从珠江口沉积物粒度参数特征分析泥沙来源及其运移趋势 [J]. 中山大学学报: 自然科学版, 2008, 47: 126-129. [JI-ANG Siyi, ZHENG Zhaoyong. Sediment sources and transport tendency based on grain-size parameters in estuary of the Pear River [J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni*, 2008, 47: 126-129.]
- [26] Yue X B, Xie Y L, Zhang H G, et al. Study on geotechnical characteristics of marine soil at Hong Kong-Zhuhai-Macao tunnel[J]. *Marine Georesources & Geotechnology*, 2019, 38(6): 647-658.
- [27] 何杰, 辛文杰. 港珠澳大桥沉管隧道基槽异常回淤分析与数值模拟 [J]. 水科学进展, 2019, 30: 823-833. [HE Jie, XIN Wenjie. Analysis and numerical simulation of abnormal siltation in foundation trench of immersed tube tunnel of Hongkong-Zhuhai-Macao Bridge[J]. *Advances in Water Science*, 2019, 30: 823-833.]
- [28] Wu Z, Milliman J D, Zhao D, et al. Geomorphologic changes in the lower Pearl River Delta, 1850-2015, largely due to human activity[J]. *Geomorphology*, 2018, 314: 42-54.
- [29] Zeng W Z, Zheng Z Y, Zhang C P, et al. Sedimentary Records of the Dramatic Environmental Changes in the Lingdingyang Bay of the Pearl River Estuary in Southern China[J]. *Ocean Science Journal*, 2023, 58: 12.