DOI: 10.3724/j.1007-6336.2025-0082

珠海香洲湾海域表层沉积物分布运移特征研究

林纪江[1]， 胡日军[2]， 张晓辉[3]， 刘 根[4]， 温玉波[1]，
董 振[5]， 唐 灵[1]， 赵明利[6]

（1.自然资源部南海海域海岛中心，自然资源部海洋环境探测技术与应用重点实验室，广东 广州 510310；2.中国海洋大学 海洋地球科学学院，山东 青岛 266100；3.自然资源部珠海海洋中心，广东 珠海 519015；4.自然资源部第三海洋研究所，福建 厦门 361005；5.自然资源部南海调查中心，广东 广州 510275；6.自然资源部南海发展研究院，广东 广州 510310）

摘 要：香洲湾地处河口、海岛、岬角交汇区，其沉积环境的演化对海岸带可持续发展至关重要。本研究旨在揭示香洲湾海域表层沉积物的分布与输运规律，通过实测数据和粒径趋势分析，首次计算了该海域泥沙起动流速、再悬浮与输运通量，并分析了控制因素。研究发现，香洲湾表层沉积物粉砂和黏土占比超 82%，整体以细颗粒为主，局部粗颗粒点缀，分选性极好。泥沙起动流速为 32～57 cm/s，潮流易致泥沙再悬浮，日再悬浮量为 58.72～151.87 kg/m^2。香洲湾海域表层沉积物的日净输运通量为东北侧高于东南侧，分别呈现落潮和涨潮的输沙趋势，野狸岛东南为泥沙汇聚中心，沉积动力环境复杂。研究表明，珠江径流、伶仃洋底质再悬浮及海洋工程是泥沙的主要来源，其输运受潮流、波浪、径流及人类活动的影响。

关键词：再悬浮特征；输运通量；运移趋势；香洲湾；沉积动力分区
中图分类号：P736.21 **文献标识码：**A **文章编号：**1007-6336(2026)02-0215-11

Sediment distribution and transport dynamics in Xiangzhou Bay, Zhuhai

Lin Jijiang[1], Hu Rijun[2], Zhang Xiaohui[3], Liu Gen[4], Wen Yubo[1],
Dong Zhen[5], Tang Ling[1], Zhao Mingli[6]

(1.South China Sea Sea Area and Island Center, Ministry of Natural Resources, Key Laboratory of Marine Environmental Detection Technology and Application, Ministry of Natural Resources, Guangzhou 510310, China; 2.College of Marine Geosciences, Ocean University of China, Qingdao 266100, China; 3.Zhuhai Marine Center, Ministry of Natural Resources, Zhuhai 519015, China; 4.Third Institute of Oceanography, Ministry of Natural Resources, Xiamen 361005, China; 5.South China Sea Marine Survey Center, Ministry of Natural Resources, Guangzhou 510275, China; 6.South China Sea Development Research Institute, Ministry of Natural Resources, Guangzhou 510310, China)

Abstract: Located at the confluence of an estuary, islands, and headlands, the sedimentary environment of Xiangzhou Bay is critical for coastal sustainability. This study aims to elucidate the distribution and transport patterns of surface sediments in Xiangzhou Bay. Based on in-situ data and grain-size trend analysis, we calculated, for the first time, the sediment starting velocity, resuspension flux, and transport flux in the area, and analyzed the controlling factors. The results show that silt and clay dominate the surface sediments (over 82%),

收稿日期：2025-05-12，**修订日期：**2025-09-26
基金项目：科技基础资源调查专项（2022FY202403）；国家重点研发计划项目（2022YFC3106203）；广东省科技计划项目（2024B1212080006）
作者简介：林纪江 (1990—)，男，山东东明人，工程师，硕士，主要从事海洋沉积动力与资源环境研究，E-mail: 1025862976@qq.com
通信作者：赵明利 (1978—)，男，山东肥城人，正高级工程师，博士，主要从事海洋灾害风险评估研究，E-mail: 150980273@qq.com

exhibiting an overall fine-grained composition with localized coarser patches, and excellent sorting. The sediment starting velocity ranges from 32 cm/s to 57 cm/s, indicating that tidal currents readily induce sediment resuspension, with a daily resuspension flux from 58.72 kg/m^2 to 151.87 kg/m^2. The daily net transport flux of surface sediments in Xiangzhou Bay is higher on the northeast side than on the southeast side., exhibiting ebb- and flood-dominated transport trends, respectively, with a sediment convergence zone forming southeast of Yeli Island. The sedimentary dynamic environment is complex. This study suggests that sediment sources are primarily from the Pearl River, resuspension of sediments from the bottom of Lingdingyang Bay, and coastal engineering activities. Sediment transport is influenced by tides, waves, river runoff, and human activities.

Key words: resuspension; transport flux; transport trend; Xiangzhou Bay; sedimentary dynamic zones

近浅海表层沉积物的分布运移对海岸带沉积演化与生态系统可持续发展具有重要意义，表层沉积物携带营养物质与污染物质，在浪、流的周期扰动与风暴潮、人类活动的偶然干扰下进行物质循环，分析表层沉积物的起动、再悬浮及其输运特征，探讨特定海域沉积动力环境分区与泥沙输运控制因素是研究近浅海沉积动力的主要内容之一，有助于科学系统认知海岸带沉积演变[1-2]。受水深地形、搬运介质、水动力强弱等多因素差异的影响，表层沉积物类型及其特征指标（粒级组分、粒度参数）的空间分布表现出不同特征[3-4]。相关学者基于实测资料，运用不同的数理公式和定性方法探讨了入海河口区域[5-7]、群岛附近海域[8-10]、近岸海域[11-14]、中国东部陆架[15] 以及峡道海域[16] 等典型海域的表层沉积物分布运移及其再悬浮供沙特征。

香洲湾位于伶仃洋“三滩两槽”中西侧浅滩，水深较浅，中部有野狸岛，南侧为横山洲岛和九洲列岛，是一个开放的弧形海湾。河口、海岛、岬角的特殊地形地貌单元之间相互作用，影响香洲湾海域的海洋动力过程，制约表层沉积物的输运与分布。受调查资料所限，针对此区域的研究主要有如下几个方面，例如，基于数学模型探讨半封闭式港湾不同型式防波堤对香洲湾内水体交换条件及污染物输移扩散规律的影响差异[17] 以及对水体交换和泄洪纳潮的不同影响[18-19]；针对野狸岛独特的滩涂和地形自然条件分析红树林种植试点工程的技术措施[20]。但是，目前关于泥沙输运动力方面的研究较少，尚缺乏系统的沉积物类型、粒度参数的分布特征以及沉积物的起动、再悬浮及输运特征等沉积环境方面的研究。

本文依据实测的水文泥沙数据，综合利用数理公式与 Gao-Collins 粒径趋势分析法，首次计算了香洲湾海域泥沙起动流速、表层沉积物再悬浮通量与输运通量，系统研究了香洲湾表层沉积物分布特征与泥沙输运格局，并初步分析了研究区泥沙输运控制因素。研究成果有助于加深对香洲湾海域沉积动力过程和海岸带更替演变趋势的科学认识，进一步为香洲湾滨海沙滩保护、岸滩整治修复工作提供参考。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于伶仃洋西滩，北起银坑角、南至横山洲岛，水深在 6 m 以浅（图 1），水下地形较为平坦，底质以泥沙为主。珠海海洋环境监测站的监测结果显示，研究区多年平均潮差为 120 cm，潮差较小，属弱潮型，潮汐属不规则半日潮，出现潮汐不等现象。常年均有风浪和涌浪，风浪多出现 N-NNE 向和 SE 向，涌浪多出现 NE-SE 向，年平均波高约为 0.6 m，历年最大波高范围为 2.0 ~ 5.3 m，季风和台风对香洲湾波浪的影响显著。历史实测资料显示，香洲湾内海流流速涨潮期小于落潮期、大潮期大于小潮期，平均流速较小[18-19]。香洲湾属亚热带海洋性季风气候，年平均气温较高，夏季气候潮热、高温多雨，表层海水多年平均温度为 23.9 ℃、年平均最高温度为 24.4 ℃。

1.2 资料来源与处理

随着香洲港码头以及沿岸大规模修复工程实施完成，研究区自 2014 年以来地形地貌基本未发生变化，本文资料具有一定的代表性，2014 年 9 月在香洲湾海域布设 114 个底质取样

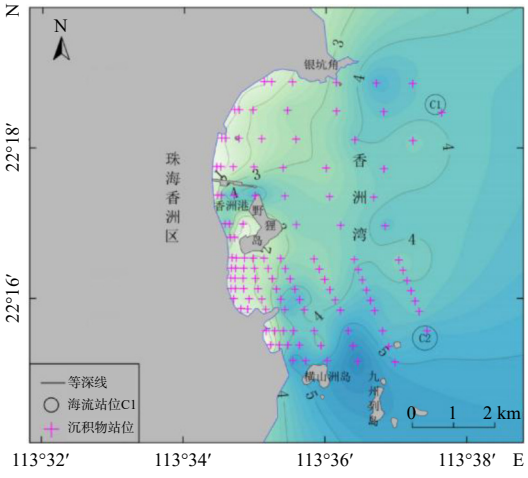


图 1　研究区调查站位分布

Fig. 1　Distribution map of survey stations in the study area

站位(图 1)，采样间距为 0.1 ~ 1.4 km，用 QNC7-1 型采泥器取 0 ~ 5 cm 的表层样品，现场密封保存后带回实验室，用 MS3000+ EV 型激光粒度分析仪测试粒度，检出限为 0.01 μm。

2014 年 9 月在香洲湾近岸海域布设 2 个海流站位，仪器设备为 SLC9-2 直读式海流计，测量范围与准确度分别为：流向 0° ~ 360°，≤±4°；流速 3 ~ 350 cm/s，≤±1.5%。按三点法(表层、中层、底层)对海流进行连续整点观测 26 h。

1.3　研究方法与计算公式

1.3.1　*研究方法*

本文表层沉积物粒度参数的计算和沉积物命名分别采用 Folk 等[21]的公式与 Folk 等[22]分类命名方法，粒度参数分级定性描述采用贾建军等[23]的描述，沉积物净输运趋势定性分析与沉积动力环境分区综合研究分别采用 Gao-Collins 粒径趋势分析法[24]与 Flemming 三角图示法[25]。

1.3.2　*泥沙起动流速*

为分析研究区表层泥沙的起动情况，本文采用窦国仁[26]1999 年提出的泥沙起动流速公式计算研究区表层沉积物的起动流速，计算公式如下：

$$U_c = k'\left(\ln 11\frac{h}{\Delta}\right)\left(\frac{d'}{d_*}\right)^{\frac{1}{6}}\sqrt{3.6\frac{\rho_s-\rho}{\rho}gd+\left(\frac{\gamma_0}{\gamma_{0*}}\right)^{\frac{5}{2}}\frac{\varepsilon_0+gh\delta\left(\frac{\delta}{d}\right)^{\frac{1}{2}}}{d}} \quad (1)$$

$$\gamma_{0*} = 0.68\gamma_s(d/d_0)^n \quad (2)$$

$$n = 0.080 + 0.014(d/d_{25}) \quad (3)$$

式中：k'为常数，一般取值 0.32；h 为水深；Δ 为床面糙率高度，当 $d\leqslant 0.5$ mm 时，取值 1.0 mm，当 0.5 mm$<d\leqslant$10 mm 时，取值 $2d$，当 d >10 mm 时，取值 $2d_*^{1/2}d^{1/2}$；d'根据粒径判断，当 $d\leqslant$0.5 mm 时，取值 0.5 mm，当 0.5 mm$<d\leqslant$10 mm 时，取值 d，当 d>10 mm 时，取值 10 mm；d_*=10 mm；ρ_s 和 ρ 为沙粒和水的密度；g 为重力加速度；d 为中值粒径，即 $d=d_{50}$；γ_0 为床面泥沙干容重；γ_{0*}为泥沙颗粒的稳定干容重；ε_0 为综合黏结力参数，其值为 1.75 cm^3/s^2；δ 为薄膜水厚度参数，其值为 2.31×10^{-5} cm。

1.3.3　*再悬浮通量*

再悬浮通量的计算参考 Partheniades[27]经验公式，具体如下：

$$\frac{dM_E}{dt} = E\left(\frac{\tau_0}{\tau_{cr}}-1\right) \quad (4)$$

式中：E 为再悬浮常数，本文取 1.25×10^{-4}；τ_0为底切应力；τ_{cr}为临界切应力。

1.3.4　*表层沉积物输运通量*

单宽输沙率与输沙通量的计算参考 Bartholdy 等[28]的半经验公式。具体公式如下：

$$q_{sb} = 0.5u_f{}^3V_D{}^2d^{-1} \quad (5)$$

$$u_f = \frac{u}{\left[8.5+2.5\ln\left(\frac{z}{k}\right)\right]} \quad (6)$$

$$k = \frac{d}{12} \quad (7)$$

$$V_D = \left[6+2.5\ln\left(\frac{D}{k}\right)\right]u_f \quad (8)$$

$$Q_{sb} = q_{sb}\times T \quad (9)$$

式中：q_{sb} 为单宽输沙率 [kg/(m·s)]；V_D 为垂线平均流速；u_f为摩阻流速(m/s)；d 为中值粒径；0.5 为经验系数(kg·s^4/m^5)；u 为实测流速；k 为底床粗糙度(m)；z 为潮流测量高度(m)；D 为水深(m)；Q_{sb} 为平均单宽通量(kg/m)；T 为时间。

2　结果与讨论

2.1　海流与底质特征

2.1.1　*海流特征*

实测结果显示，研究区 C1、C2 站位海流流速分别为 11 ~ 102 cm/s、4 ~ 118 cm/s，流速最大值均出现在落潮期的表层，流速最小值出现在涨

潮期的表层和落潮期的中层。流速高值区主要出现在落急时段，各层平均流速总体呈现自表层至底层逐渐减小的趋势(图 2)，落潮历时大于涨潮历时。根据 C1 与 C2 站位底层海流玫瑰图(图 3)可见，C1 站位附近海域底层海流表现出典型的往复流特征，而 C2 站位受附近小岛的影响，底层海流呈现旋转流的特点。

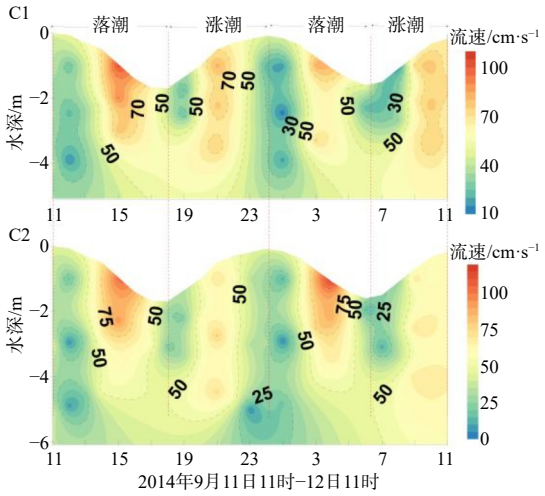


图 2 海流流速时间序列剖面

Fig. 2 Time series profile of ocean current velocity

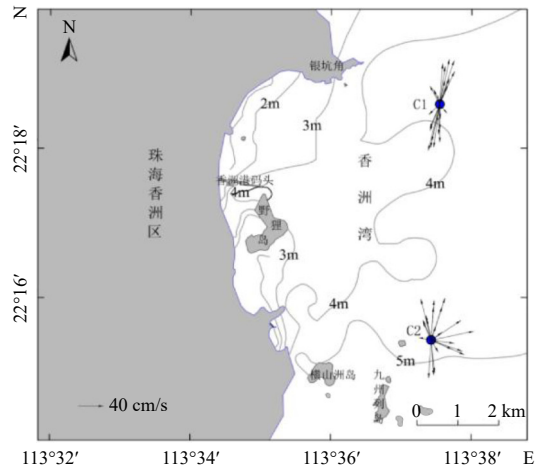


图 3 底层海流玫瑰图

Fig. 3 Rose diagram of bottom ocean currents

2.1.2 表层沉积物特征

Folk 分类命名投点分布结果显示，研究区表层沉积物包括含砾泥(31 个样品)、含砾砂质泥(30 个样品)、粉砂(15 个样品)、泥(13 个样品)、砂质粉砂(9 个样品)、砾质泥(7 个样品)、砂质砾(3 个样品)、含砾砂(3 个样品)、黏土(2 个样品)、含砾泥质砂(1 个样品)10 种类型。样品以含砾泥、含砾砂质泥为主，两者占总样品数量的 53.51%；砂质砾、含砾砂、黏土、含砾泥质砂样品数量较少，仅占总样品数量的 7.89%。就平面分布来看(图 4)，颗粒较细的泥、含砾泥、含砾砂质泥及粉砂分布最广，占研究区域的 90% 以上，含砾砂仅分布于研究区西北角的近岸海域，其余类型的表层沉积物呈斑点状或条带状分布于 3.5 m 以浅海域。

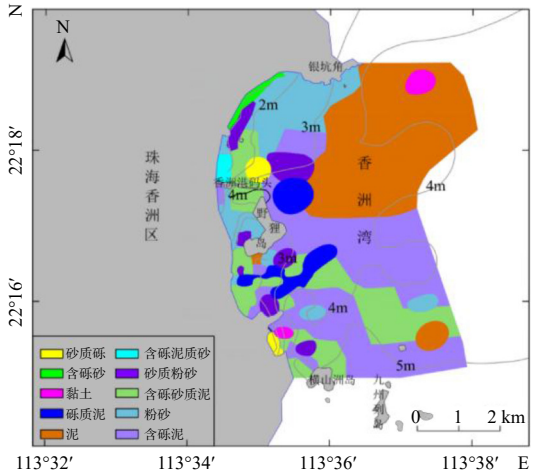


图 4 表层沉积物类型分布

Fig. 4 Distribution of surface sediment types

研究区表层沉积物类型丰富，粒级组分从最细的黏土至最粗的砾均有分布(图 5)，平均粒级组分含量从高至低的类型分别为粉砂(50.25%)、黏土(32.35%)、砂(14.98%)、砾(2.42%)，表层沉积物颗粒表现出整体细、局部粗的特征。对比图 4、图 5 发现，沉积物各粒级组分的平面分布特征与沉积物类型的平面分布规律有较好的吻合性，并且存在显著的分区特征，砾组分和砂组分含量高值区零星分布于近岸，粉砂组分高值区近似平行海岸线且自岸向海逐渐降低，黏土组分高值区分布特征呈现与粉砂组分相反的趋势。

表层沉积物平均粒径为−0.97 ~ 9.3 Φ，变化范围较大，属极粗砂至黏土范围(平均值为 5.65 Φ)，其分布趋势与沉积物粒级的分布趋势较一致。整体来看，Φ 高值区位于远岸和中部海域，Φ 低值区位于南、北两侧的近岸。研究区由海向

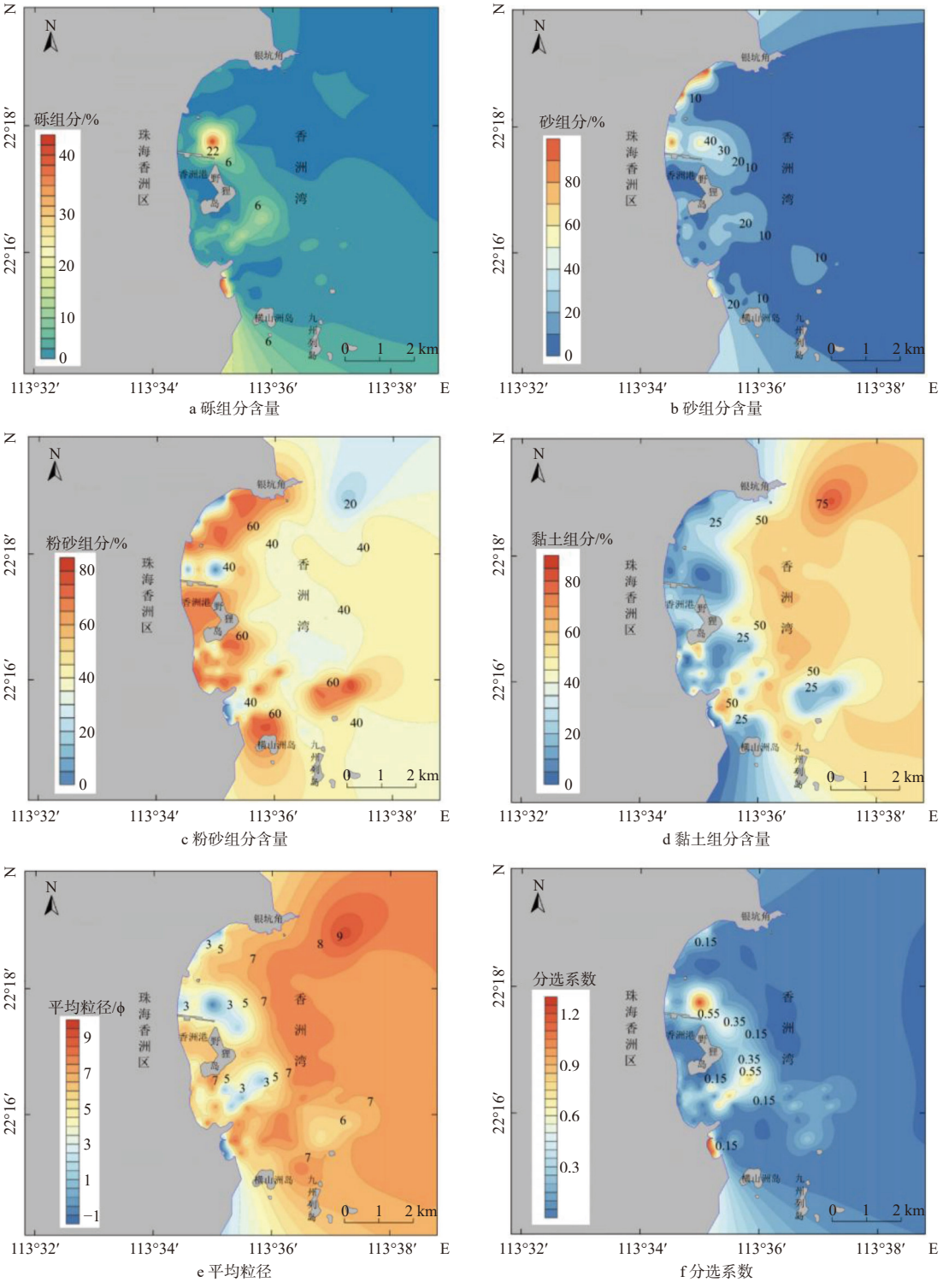


图 5　表层沉积物组分含量与粒度参数分布

Fig. 5　Distribution of component content and particle size parameters in the surficial settlement

岸北部 Φ 值逐渐减小，中部和南部 Φ 值先增大后减小，指示北部由外海向近岸沉积物颗粒逐渐变粗，而中部和南部由外海向近岸沉积物颗粒先变细后增粗。分选系数为 0 ~ 1.23，属分选极好至分选较差范畴；平均值为 0.15，属于分选极好。经统计，114 个表层沉积物样品中仅有 12 个样品的分选系数大于 0.35，指示研究区大部分区域表层沉积物分选极好。研究区局部表层沉积

物介于分选中等至分选较差的区间，对应砾含量高值区，主要底质类型为砂质砾、含砾泥，这种差异化的分布特征与其复杂的水动力条件、多样的物质来源以及人类活动密切相关。

2.2 泥沙起动流速

根据前述公式计算了 C1、C2 站位的泥沙起动流速（表 1），结果显示，C1、C2 站位中值粒径对应的表层泥沙起动流速分别为 57 cm/s、32 cm/s，研究区北侧外海表层泥沙起动流速略大，两个站位实测底层最大流速均大于中值粒径对应的泥沙起动流速，对比各个时刻实测底层海流流速与起动流速，C1、C2 站位在一天中分别有 41.7% 的时段（10 h）、70.8% 的时段（17 h）底层流速大于中值粒径对应的起动流速，表明两个站位周边海域在单纯的潮流作用下泥沙容易发生再悬浮进入水体。

表 1 表层沉积物起动流速计算结果

Tab.1 Results for incipient motion of surface sediments

站位	C1	C2
水深/m	4.2	4.8
中值粒径/μm	9	25
起动流速/kg·m^{-1}·d^{-1}	57	32
底层最大流速/cm·s^{-1}	78	72

2.3 表层沉积物再悬浮特征

根据公式（4）计算得到 C1、C2 站位在单个潮周期内的再悬浮通量分别为 3.52×10^{-5} ~ 4.21×10^{-3} kg/(m^2·s) 与 0 ~ 1.70×10^{-3} kg/(m^2·s)，日再悬浮量分别为 151.87 kg/m^2、58.72 kg/m^2，两个站位涨潮段日再悬浮量均略小于落潮段（图 6）。对比逐时再悬浮通量与底层潮流流速发现，再悬浮通量的变化趋势与潮流流速变化趋势呈正相关响应，初步考虑应与研究区的底质类型为粉砂和泥密切相关。研究区位于伶仃洋西侧、珠江主要河道入海口处，表层沉积物中细颗粒组分含量较高，在较强的水动力作用下，泥沙较易起动，随着海流流速增大，泥沙扰动增强，再悬浮通量增大；反之，随着海流流速减小，泥沙扰动减弱，再悬浮通量变小；若海流流速低于临界值，表层沉积物将无法扰动再悬浮，例如，C2 站位在 11 日 12 时和 12 日 07 时两个时段再悬浮通量为 0。

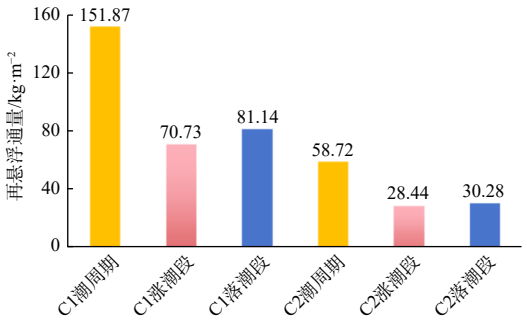


图 6 研究区涨、落潮段表层沉积物再悬浮通量

Fig. 6 The resuspended flux of surface sediments during the rising and falling tide periods in the research area

2.4 表层沉积物输运通量

根据前述公式计算得到单日内研究区涨潮段与落潮段平均单宽通量和单日平均单宽净通量，本文分别计算涨、落潮段各自逐时的单宽输沙率，再求其平均，表 2 中单宽输沙率为各自潮段的平均值。

表 2 表层沉积物输运通量

Tab.2 Transport fluxes in surficial settlements

站位	涨潮单宽输沙率/g·m^{-1}·s^{-1}	落潮单宽输沙率/g·m^{-1}·s^{-1}	涨潮输沙量/kg·m^{-1}·d^{-1}	落潮输沙量/kg·m^{-1}·d^{-1}	净输沙量/kg·m^{-1}·d^{-1}
C1	35.93	36.53	1422.84	1709.61	286.77
C2	10.99	8.82	435.08	412.80	−22.28

注：“−”表示净输沙方向指向涨潮方向

结果显示，观测时段 C1 站位涨潮段与落潮段单宽输沙率分别为 0.428 ~ 117.87 g/(m·s) 与 0.036 ~ 147.50 g/(m·s)，涨潮段输沙量为 1422.84 kg/(m·d)，落潮段输沙量为 1709.61 kg/(m·d)，净输沙量为 286.77 kg/(m·d)，表现为落潮输沙，方向总体呈 SSW 向，即向南南西向输沙。观测时段 C2 站位涨潮段与落潮段单宽输沙率分别为 0.005 ~ 38.87 g/(m·s) 与 0.0006 ~ 35.58 g/(m·s)，涨

潮段输沙量为 435.08 kg/(m·d)，落潮段输沙量为 412.80 kg/(m·d)，净输沙量为 22.28 kg/(m·d)，表现为涨潮输沙，方向总体呈 NW 向，即向北西向输沙。

东北侧海域平均日净输运通量明显高于东南侧海域，与前文东北侧海域日再悬浮量高于东南侧海域的结果一致，但东北侧海域的表层沉积物输运通量大于再悬浮量，说明数据采集时段潮流控沙不是水体中泥沙含量变动的唯一动力，数据采集时恰逢九月雨季，河流径流大，应有上游河道携沙补给。对此，蔡世荣[29]基于实测数据和遥感影像分析认为，径流、季风和降雨变化是直接造成珠江口悬浮泥沙通量短期和周期性变化的主要因素，珠江口的悬浮泥沙分布主要集中在入海口处，且西岸高于东岸。贾淇文等[30]也认为，伶仃洋水域夏季悬浮泥沙含量较高，珠江冲淡水西向扩展造成西南部出现悬浮泥沙含量高值区，水下地形、风向与降雨、排水、排沙分别影响了伶仃洋悬浮泥沙含量的时空分布与季节变化。

2.5　表层沉积物运移趋势

沉积物不同粒径出现概率的差异化趋势，可以较好地反映沉积物的净运移趋势[4,31]，特征距离的选取对判定表层沉积物净运移趋势尤为重要，贾建军等[23]和高抒[32]根据相关研究分别把最大采样距离和$\sqrt{2}$倍的最大采样距离认定为判定净运移趋势最佳特征距离，本文选取 1.4 km 和 2 km 作为特征距离分别绘制运移趋势进行对比。图 7 中矢量仅指示了该采样点表层沉积物的净搬运方向和该粒径趋势的显著性，并不代表沉积物搬运率的大小。

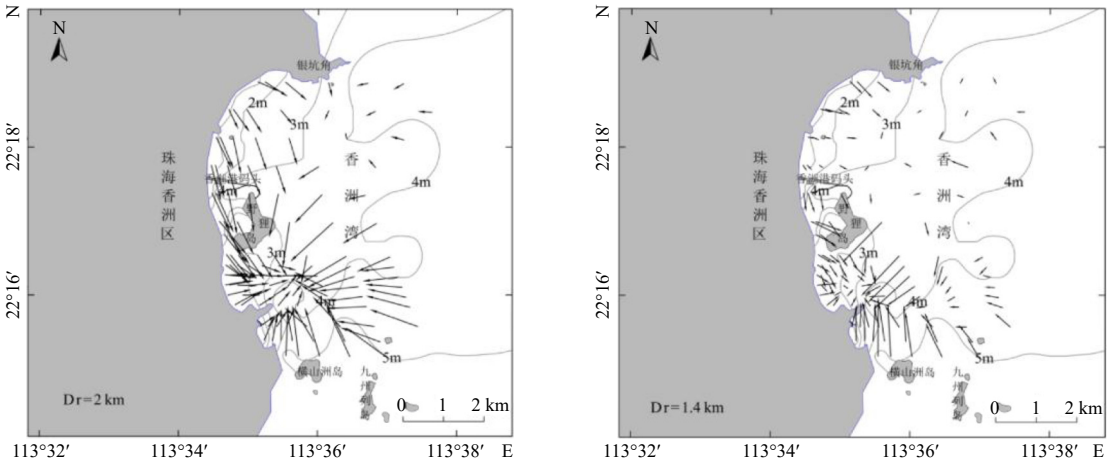


图 7　香洲湾表层沉积物运移趋势

Fig. 7　Grain size net trend of the surficial settlements in Xiangzhou Bay

结果显示，无论特征距离选取 2 km 还是 1.4 km，香洲湾的南部表层沉积物的运移趋势都较为一致，呈现向中间汇聚的趋势。而香洲湾北部表层沉积物的运移趋势在选取不同特征距离时差异较大，当选取 2 km 为特征距离时，表层沉积物总体表现为向香洲湾南部汇聚的趋势；在选取最大采样距离(1.4 km)为特征距离时，表层沉积物运移趋势较杂乱，表现为 3 m 以浅海域表层沉积物向海运移、3 m 以深海域表层沉积物运移无序的特征。总体来看，通过 Gao-Collins 粒径趋势分析方法判定得到的表层沉积物净运移趋势与前文通过计算沉积物净输运通量分析得到的研究区表层沉积物运移趋势结论一致，即在研究区野狸岛的东南部形成一个泥沙汇聚中心，这与此处水深地形密切相关，沿岸潮流、上游径流在绕过野狸岛后流速降低，以跃移、推移形式携带的粗颗粒物质开始沉降，而外海的潮流波浪携带泥沙到达近岸与河口冲淡水相互作用，亦发生沉降累积[30]。

2.6　沉积动力环境分区

Flemming 三角图解法以沉积物粒级组分含量百分比对研究区水动力强弱进行定性的判断，

本文 114 个表层沉积物样品 Flemming 三角图投点结果(图 8)显示,研究区沉积动力环境复杂,水深较浅,受波浪、潮流、河流径流入海、海岸地形的复合影响,自岸向海水动力变化多样,致使沉积物从水动力最强的 S 区到最弱的 E 区均有分布。沉积物主要分布于 D 区和 E 区,指示研究区的沉积物粒径较集中,以粉砂和黏土为主;样品集中在Ⅱ区、Ⅲ区和Ⅳ区,说明细颗粒组分较高,水体扰动较强。

研究区内表层沉积物的砂泥比值(图 9)总体呈现近岸大、远岸小的特征,指示水动力由近岸向远岸逐渐减弱。砂泥比值高值区(高于 0.15)主要分布于研究区南北近岸、野狸岛南北两侧,此处受岛屿、码头、海岸线的遮挡,水下地形地貌发生变化,潮流变化明显、波浪破碎,水动力最强,对应底质颗粒最粗;砂泥比值低于 0.15 的区域主要位于香洲港和研究区外侧海域,指示该处沉积物颗粒整体偏细,香洲港受野狸岛和码头的保护,波浪和潮流作用减弱;部分区域砂泥比值为 0,表明此处海域沉积物颗粒最细,水动力条件相对较弱。粉砂黏土比值为 0.19 ~ 22,分区明显,大于 5 的区域主要集中在研究区北侧近岸、野狸岛南侧,此处颗粒整体较粗,水体扰动性强;小于 1 的区域主要分布于研究区外侧的北部与中部海域,指示此处海域水体中递变悬移组分较多,水体扰动性较强。

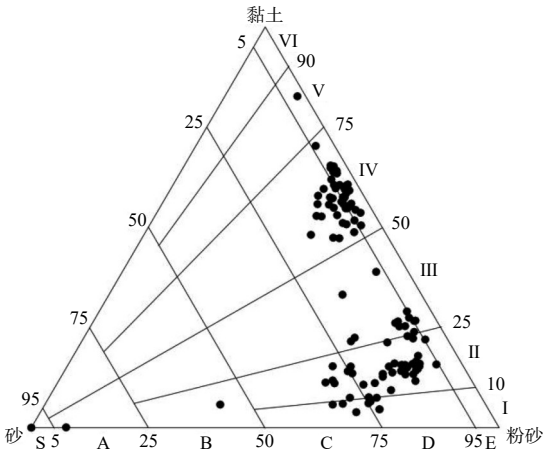


图 8 研究区表层沉积物 Flemming 三角分区

Fig. 8 Flemming triangle division map of surficial settlements in the study area

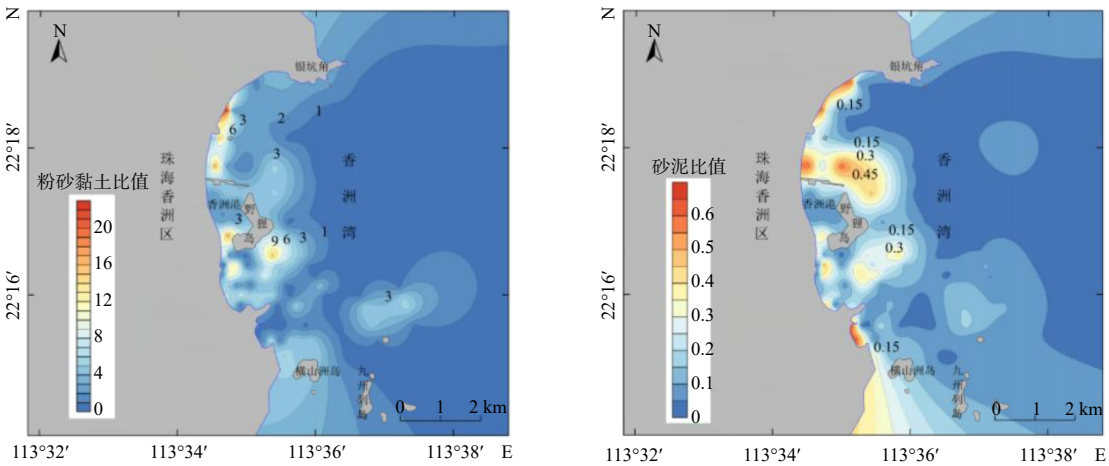


图 9 研究区沉积物粉砂/黏土、砂/泥分布

Fig. 9 Distribution map of silt/clay and sand/mud in the study area

本文根据 Flemming 三角图投点结果,结合沉积物类型、粉砂/黏土、砂/泥等分布情况,将研究区的沉积动力环境初步划分为水动力强(S、A、B 区)、较强(CⅠ、CⅡ区)、中等(DⅠ、DⅡ、DⅢ区)、较弱(DⅣ、EⅣ、EⅤ区)4 个层级,分区结果如图 10 所示。

水动力强区域(S、A、B 区):分布范围较小,主要集中于研究海域南北两侧的沿岸,水深 1.5 m 以浅的区域,底质以砂质砾、含砾砂和含砾泥质砂为主,沉积物颗粒平均粒径较大,砂/泥数值高。此区域水动力强,水体扰动性强,泥沙运动受潮流和波浪的耦合作用控制,泥沙搬运以

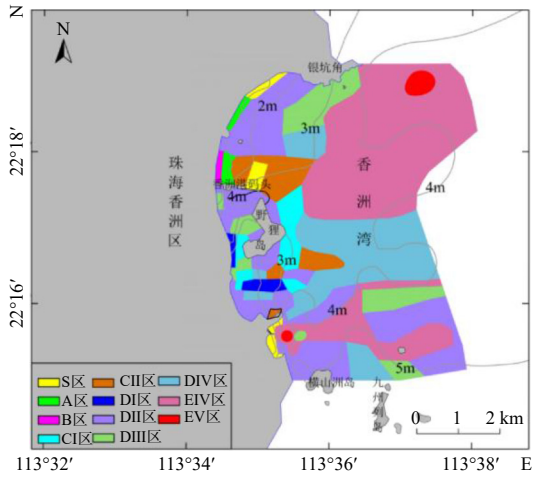


图 10　研究区沉积动力环境分区

Fig. 10　Dynamic sediment environment divisions in the study area

推移和跃移为主。

水动力较强区域(CⅠ、CⅡ区)：主要分布于野狸岛周边海域，水深为 1.5~3.5 m，底质以砂质粉砂和含砾泥为主，沉积物颗粒平均粒径较大，砂/泥数值较高，粉砂/黏土数值高。此区域递变悬浮组分含量增多，水动力强，水体扰动性较强，泥沙运动受潮流和波浪的耦合作用控制，泥沙搬运以跃移和悬移为主。

水动力中等区域(DⅠ、DⅡ、DⅢ区)：分布范围较广，主要集中于研究区北部、中部的近岸和南部，在 0 ~ 5 m 水深均有分布，沉积物细颗粒组分含量高，粉砂、黏土占比较大。此区域内递变悬浮组分含量开始上升，水动力中等，水体扰动性较强，泥沙搬运以跃移和悬移为主。

水动力较弱区域(DⅣ、EⅣ、EⅤ区)：分布范围较广，主要集中于研究区中北部水深 3 m 以深海域，底质为黏土、泥和含砾泥，沉积物颗粒平均粒径最小，且黏土含量高。此区域内递变悬浮组分含量最大，水体扰动较强，水动力与其他区域相比较弱，泥沙运动受潮流径流的控制为主，泥沙搬运以悬移为主。

2.7　泥沙输运控制因素分析

表层沉积物的分布格局与输运过程主要受物源、水体动力条件、海底地形及人类活动等多方面的综合影响。一般来讲，物源提供了沉积物的原始形态和组分含量；周期性的海流、江河径流入海与偶发性的风暴潮等加速水体扰动，对表层沉积物进行改造重塑，并控制其输运和时空分布；海底地形制约表层沉积物的分布运移；人类海洋开发活动(如码头建设、沙滩修复、人工采沙等)会突发性改变特定区域的表层沉积物分布格局，并对沉积物输运产生一定时期的后续影响。本文沉积物类型(图 4)与组分含量(图 5)空间分布呈现的沿岸粗颗粒、远岸细颗粒的格局应是多种控制因素所致。

珠江径流是影响香洲湾泥沙分布的一个重要因素，珠江作为我国三大水系之一，流域广泛、水量充足，径流携沙是研究区泥沙的一个主要来源，每年上游径流会携带河道挖沙、清淤悬浮起的泥沙与沿岸入河的泥沙至下游，在珠江口受河口冲淡水与潮流的周期性作用，控制泥沙输运，贾淇文等[30]也发现，珠江口冲淡水西向扩展造成伶仃洋西南部多出现悬浮泥沙含量高值区。本研究结果显示，在单纯的潮流作用下泥沙易于再悬浮进入水体，表层沉积物日再悬浮量较为可观，说明伶仃洋西滩浅滩泥沙再悬浮是香洲湾泥沙的又一来源，证实了潮流是研究区泥沙起动与运移的又一主要动力。研究区水深较浅，河口、海岛、岬角的特殊地形地貌单元制约着泥沙输运，也是表层沉积物类型和粒度组分多样分布的主要因素之一。根据前文计算与分析结果，珠江径流携带的泥沙、伶仃洋西滩底质再悬浮的泥沙在沿岸输运过程中，受野狸岛及香洲港码头的影响，被迫改变输运方向，在野狸岛东南部受潮流能通量的影响产生汇聚沉降。丁芮等[33]基于数字模拟认为，外海传入的潮流能通量在珠江口内汇聚，并在西侧浅滩与沟槽之间存在一个环状余流，利于泥沙的沉降积累。王国槐等[34]基于实测的资料认为，珠江口南部的表层沉积物微塑料主要来源于珠江水体携带，其输运受潮流和径流的双重影响，并在香洲湾和桂山岛海域沉降积累。波浪对研究区沉积物分布运移的影响亦不能忽视，研究区常年有风浪和涌浪，波浪在浅水区破碎，扰动表层沉积物使其进入水体，在潮流和河口冲淡水的作用下往复搬运。何用等[35]计算了不同水深条件下伶仃洋的波浪挟沙力，认为水深越浅波浪挟沙力越大，在浅滩海域波浪对

水体挟沙的作用十分突出。人类活动是影响香洲湾沿岸海域泥沙分布的又一重要因素，修建海岸围堤、码头以及开展沙滩修复工程，使得大颗粒物质进入沿岸海域，在水动力作用下破碎与重塑，经过波浪、沿岸流、离岸流的携带进入近岸海域。需要注意的是，受调查资料重复获取测试比对的限制，本文仅定性探讨并分析了表层沉积物的再悬浮特征和输运趋势，对表层沉积物再悬浮通量、输运通量，因受采样时段海流差异、经验公式参数选取的差异，其计算结果会有波动，仅供相关研究者参考。综上分析，珠江径流携沙、伶仃洋西滩底质再悬浮以及沿岸海洋工程建设是香洲湾水体泥沙的主要来源，研究区泥沙的起动、再悬浮及输运受潮流、波浪、径流与人类活动的多重综合影响。

3 结 论

（1）研究区表层沉积物类型多样，细颗粒的泥、含砾泥、含砾砂质泥及粉砂分布最广，粗颗粒的砂质砾、含砾砂、砾质泥、砂质粉砂等呈斑点状或条带状分布，粒级组分以粉砂和黏土为主，沉积物颗粒表现出整体细、局部粗的特征。

（2）研究区实测底层最大潮流流速大于中值粒径对应的泥沙起动流速的单日时长超过 10 h，在单纯的潮流作用下泥沙易于再悬浮进入水体，且日再悬浮量较为可观。

（3）表层沉积物日净输运在研究区东北侧海域表现为落潮输沙，在东南侧海域表现为涨潮输沙，在野狸岛东南形成一个泥沙汇聚中心，东北侧海域日净输运通量高于东南侧海域。

（4）研究区沉积动力环境复杂，从水动力最强的 S 区到最弱的 E 区均有分布，沉积物主要集中于 D 区和 E 区，沉积物颗粒以较细的粉砂和黏土为主，水体递变悬移组分较多、扰动较强。

（5）珠江径流携沙、伶仃洋西滩底质再悬浮以及沿岸海洋工程建设是香洲湾水体泥沙的主要来源，香洲湾泥沙的起动、再悬浮及输运受潮流、波浪、径流与人类活动的多重综合影响。

参考文献：

[1] 林纪江, 王 平, 胡日军, 等. 海南日月湾海域表层沉积物分布特征与运移趋势 [J]. 海洋地质前沿, 2023, 39(6): 11-21.

[2] Zhou Z, Liang M J, Chen L, et al. Processes, feedbacks, and morphodynamic evolution of tidal flat-marsh systems: progress and challenges[J]. Water Science and Engineering, 2022, 15(2): 89-102.

[3] 瞿洪宝, 苟鹏飞, 孙龙飞, 等. 海南岛崖州湾表层沉积物空间分布特征及其受控机制 [J]. 海洋学报, 2021, 43(12): 70-81.

[4] 林纪江, 王 平, 余世维, 等. 闽粤交界处大埕湾海域表层沉积物分布运移特征及沉积动力环境分区 [J]. 海洋科学, 2023, 47(1): 13-24.

[5] Wang S S, Pan C H, Xie D F, et al. Grain size characteristics of surface sediment and its response to the dynamic sedimentary environment in Qiantang Estuary, China[J]. International Journal of Sediment Research, 2022, 37(4): 457-468.

[6] Simon N, Worden R H, Muhammed D D, et al. Sediment textural characteristics of the Ravenglass Estuary; development of a method to predict PALAEO sub-depositional environments from estuary CORE samples[J]. Sedimentary Geology, 2021, 418: 105906.

[7] 李九发, 李为华, 应 铭, 等. 黄河三角洲飞雁滩沉积物颗粒度分布和粒度参数特征及水动力解释 [J]. 海洋通报, 2006, 25(3): 38-44.

[8] 胡日军, 吴建政, 朱龙海, 等. 东海舟山群岛海域表层沉积物运移特性 [J]. 中国海洋大学学报 (自然科学版), 2009, 39(3): 495-500,442.

[9] 刘 成, 胡日军, 朱龙海, 等. 庙岛群岛海域沉积动力环境分区及沉积物输运趋势 [J]. 海洋地质前沿, 2018, 34(8): 24-33.

[10] 陈俊锦, 张经纬, 刘时桥, 等. 南海中沙群岛海域表层沉积物粒度特征及其输运趋势 [J]. 海洋地质与第四纪地质, 2022, 42(2): 15-27.

[11] 陈 翰, 陈 忠, 颜 文, 等. 汕头近岸海域表层沉积物粒度特征及其输运趋势 [J]. 沉积学报, 2014, 32(2): 314-324.

[12] 肖 晓, 冯秀丽, 石要红, 等. 广西沿岸海域表层沉积物粒度分布与输运特征 [J]. 中国海洋大学学报 (自然科学版), 2018, 48(7): 65-72.

[13] Kasper-Zubillaga J J, Arellano-Torres E, Álvarez-Sánchez L F, et al. Implications of polymodal distributions in the grain size parameters of coastal dune sands (Oaxaca, Mexico)[J]. Sedimentary Geology, 2022, 437: 106189.

[14] Wooldridge L J, Worden R H, Grifiths J, et al. The origin of clay-coated sand grains and sediment heterogeneity in tidal flats[J]. Sedimentary Geology, 2018, 373: 191-209.

[15] 杨旭辉, 冯秀丽, 褚忠信, 等. 中国东部陆架表层沉积物粒度特征及其沉积环境浅析 [J]. 中国海洋大学学报 (自然科学版), 2012, 42(7/8): 126-134.

[16] 林纪江, 胡日军, 王 平, 等. 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 [J]. 海洋地质与第四纪地质, 2022, 42(3): 9-24.

[17] 吴　琼, 李木桂, 罗　欢. 半封闭式港湾防波堤型式对湾内水动力环境的影响研究 [J]. 人民珠江, 2021, 42(12): 96-105.
[18] 英晓明, 王　平. 珠海香洲港海域水体交换能力研究 [J]. 水道港口, 2016, 37(1): 39-45.
[19] 杨裕桂, 宣小铭, 刘国珍, 等. 半封闭式港湾水动力特性分析: 以香洲港为例 [J]. 人民珠江, 2023, 44(12): 101-109,135.
[20] 李　玫, 廖宝文, 陈玉军, 等. 深水光滩红树林恢复工程技术: 以珠海野狸岛为例 [J]. 林业科技通讯, 2021(2): 20-23.
[21] Folk R L, Ward W C. Brazos River bar [Texas]: a study in the significance of grain size parameters[J]. Journal of Sedimentary Research, 1957, 27(1): 3-26.
[22] Folk R L, Andrews P B, Lewis D W. Detrital sedimentary rock classification and nomenclature for use in New Zealand[J]. New Zealand Journal of Geology and Geophysics, 1970, 13(4): 937-968.
[23] 贾建军, 高　抒, 薛允传. 图解法与矩法沉积物粒度参数的对比 [J]. 海洋与湖沼, 2002, 33(6): 577-582.
[24] Gao S, Collins M. Net sediment transport patterns inferred from grain-size trends, based upon definition of “transport vectors”[J]. Sedimentary Geology, 1992, 81(1/2): 47-60.
[25] Flemming B W. A revised textural classification of gravel-free muddy sediments on the basis of ternary diagrams[J]. Continental Shelf Research, 2000, 20(10/11): 1125-1137.
[26] 窦国仁. 再论泥沙起动流速 [J]. 泥沙研究, 1999(6): 1-9.
[27] Partheniades E. Erosion and deposition of cohesive soils[J]. Journal of the Hydraulics Division, 1965, 91(1): 105-139.
[28] Bartholdy J, Bartholomae A, Flemming B W. Grain-size control of large compound flow-transverse bedforms in a tidal inlet of the Danish Wadden Sea[J]. Marine Geology, 2002, 188(3/4): 391-413.
[29] 蔡世荣. 珠江口悬浮泥沙的季节变化定量遥感监测和趋势分析 [D]. 广州: 广州大学, 2024.
[30] 贾淇文, 章桂芳, 唐世林, 等. 2013～2018 年珠江河口伶仃洋水域悬浮泥沙季节性变化分析 [J]. 中山大学学报 (自然科学版), 2021, 60(5): 59-71.
[31] Mclaren P, Bowles D. The effects of sediment transport on grain-size distributions[J]. Journal of Sedimentary Research, 1985, 55(4): 457-470.
[32] 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.
[33] 丁　芮, 陈学恩, 曲念东. 珠江口及邻近海域潮波数值模拟: Ⅰ模型的建立和分析 [J]. 中国海洋大学学报 (自然科学版), 2015, 45(11): 1-9.
[34] 王国槐, 梁　昊, 赵　卫, 等. 珠江口南部海域表层沉积物中微塑料的空间分布及运移机制 [J]. 中国地质调查, 2024, 11(3): 76-82.
[35] 何　用, 高时友, 徐峰俊, 等. 珠江口潮流泥沙数学模型关键问题探讨 [J]. 泥沙研究, 2014(4): 60-66.

（本文编辑：曲丽梅）