

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.

LIN Jijiang, WANG Ping, HU Rijun, et al. Distribution characteristics and migration trend of surface sediments in Riyue Bay, Hainan, South China[J]. Marine Geology Frontiers, 2023, 39(6): 11-21.

## 海南日月湾海域表层沉积物分布特征与运移趋势

林纪江<sup>1,2</sup>, 王平<sup>1,2</sup>, 胡日军<sup>3\*</sup>, 郑兆勇<sup>2,4</sup>, 冷星<sup>3</sup>, 伊善堂<sup>5</sup>, 丁小雨<sup>1,2</sup>

(1 国家海洋局南海信息中心, 广州 510310; 2 自然资源部海洋环境探测技术与应用重点实验室, 广州 510310; 3 中国海洋大学海洋地球科学学院, 青岛 266100; 4 国家海洋局南海规划与环境研究院, 广州 510310; 5 中国地质调查局广州海洋地质调查局, 广州 510075)

**摘要:**海南日月湾是典型的岬角弧形海湾, 海岸类型多样, 底质粒级较粗。基于实测的海流、表层沉积物粒度数据, 分析了海南日月湾海域表层沉积物的分布特征, 计算了泥沙起动流速与表层沉积物输运通量, 探讨了表层沉积物运移趋势。结果表明, 研究区表层沉积物颗粒较粗, 整体以含砾砂为主, 其次为砾质砂、砂、砂质砾和粉砂质砂, 呈圆斑状零星分布; 沉积物粒级组分从最细的黏土到最粗的砾均有分布, 细颗粒主要分布于研究区东侧和西侧近岸海域, 粗颗粒呈 NS 向条带状分布于研究区中南部海域, 呈现中部分选差、周边分选好的特征; 研究区泥沙起动流速在近岸自东北向西南递增, 在远岸自东北向西南先减小后增大, 粒径对泥沙起动流速的影响大于水深, 靠近分界洲岛海域, 单纯的潮流作用只能使部分颗粒发生再悬浮, 表层沉积物平均日净输运通量介于  $0.04 \sim 3.7 \text{ kg m}^{-1} \text{ d}^{-1}$ , 净输沙方向总体呈 SW 向, 平均日净输运通量在东北侧海域明显高于西南侧海域, 涨潮段单宽输沙率略大于落潮段单宽输沙率 (R4 站位除外), 涨、落潮段输沙方向基本一致。

**关键词:**海南日月湾; 分布特征; 起动流速; 运移趋势; 输运通量

中图分类号: P736.2

文献标识码: A

DOI: 10.16028/j.1009-2722.2022.056

## 0 引言

泥沙运移在海岸带环境研究中具有重要意义, 泥沙既是营养物质的载体, 又是污染物循环扩散的搬运工。表层沉积物是研究近海海底沉积作用和泥沙运移的重要指标, 水动力条件、搬运介质及水深地形等不同的沉积环境下, 沉积物及其粒度参数的分布格局也不尽相同<sup>[1]</sup>。受沉积物搬运“源—汇”过程的制约, 其粒度参数是分析研究沉积物与沉积

动力环境关系的重要纽带<sup>[2]</sup>, 可用以反演水动力条件及沉积物物质来源<sup>[3-4]</sup>, 判别沉积物输运方式与趋势<sup>[5-6]</sup>, 指示沉积动力环境和海平面变化过程<sup>[7]</sup>, 分析区域沉积动力特征<sup>[8-9]</sup>。

日月湾位于海南省万宁市南侧海域, 整体形态表现为弧形海湾, 是中国著名的冲浪胜地, 有学者基于实测资料与模型模拟对日月湾开展了大量的研究<sup>[10-13]</sup>, 主要集中在人工岛建设对日月湾内沿岸输沙及岸线的影响、对环境影响的正负效应及应对策略, 海洋模型在离岸人工岛建设中的应用等海洋工程方面的研究, 而在沉积物类型、粒级、粒度参数的分布特征及输运通量等沉积环境方面尚缺乏系统的研究。本文基于实测的海流、表层沉积物粒度数据, 计算了泥沙起动流速与表层沉积物输运通量, 分析了日月湾海域表层沉积物的底质类型、粒级组分及粒度参数分布特征, 探讨了表层沉积物运移趋势。研究成果不仅有助于深入了解日月湾陆、海相互作用的沉积环境过程和海岸演变趋势, 丰富对季节性小河流域影响的

收稿日期: 2022-02-26

资助项目: 国家海洋局南海分局局长基金(180202); 广东省促进经济高质量发展专项海洋经济发展项目(GDOE[2019]A55); 2020 年国家重点研发计划重点专项“海洋环境预报模式业务化运行评估与专项数据产品共享服务平台构建”(2019YFC1408400)

作者简介: 林纪江(1990—), 男, 硕士, 工程师, 主要从事海洋沉积物动力环境与海洋管理方面的研究工作. E-mail: 1025862976@qq.com

\* 通讯作者: 胡日军(1980—), 男, 博士, 教授, 主要从事海洋沉积物动力方面的研究工作. E-mail: hrj@ouc.edu.cn

开放性海湾沉积动力特征的认识,为日月湾砂质岸线保护、岸滩整治修复、海岸工程合理开发建设提供参考依据,也可为海南岛东南浅海近岸区沉积物质的运移和沉积动力环境的研究提供科学依据。

## 1 研究区概况

日月湾位于海南岛东南部海域,热带海洋性气候显著,雨量充沛,连续降雨天数8—9月份最长,达20天以上,8—10月的降雨量最多,都在270 mm以上。有山溪性季节小河——田头河等从海湾出海,洪水期会携带陆源碎屑物质入海,局部地貌受径流注入影响,底质分布以砂为主<sup>[14]</sup>,水深在30 m以浅(图1)。受上、下岬角的保护,日月湾海域总体属于弱潮流区域,潮汐性质总体呈不正规日潮特征,平均涨潮历时大于落潮历时,涨潮流较强于落潮流,最大潮差1.37 m,平均潮差0.84 m。日月湾波浪由外海的波浪折绕射而来,以涌浪为主,波浪动力具有明显的季节变化,冬季以SE向浪占绝对主导(76.5%),夏季则以SSE、SE及SW向浪为主,正常天气下波浪波高<4 m。日月湾在海南岛大的断裂构造基础上,发育形成砂质海岸地貌,属五指山隆起区,向东南开口。海岸地貌类型为岬角海湾地貌,海岸类型多样,由东北向西南依次可以进一步划分为基岩海岸、弧形砂质海岸、珊瑚礁(基岩)海岸、砂质海岸和侵蚀残留型海岸等<sup>[11]</sup>。海域年主导风向为N和SSW向,出现频率分别为13.8%、11.8%,最大风速分别为11.1、17.2 m/s<sup>[11]</sup>,灾害性天气主要是热带气旋,其次是冬季来自大陆北至东北的冷空气大风。

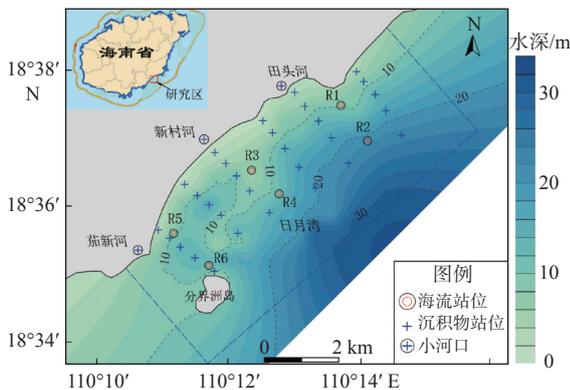


图1 研究区调查站位分布

Fig.1 Distribution of survey stations in the study area

## 2 资料来源与处理方法

### 2.1 海流

2011年9月在研究区布设6个海流调查站位同时观测,海流观测采用六点法(表层、0.2H、0.4H、0.6H、0.8H、底层)连续整点观测27 h,其中,表层为距表面1.0 m、底层为离底1.0 m(H为瞬时水深),每层停留3 min,采样的时间间隔是1 h。海流观测仪器采用日本ALEC公司制造的AEM-USB海流计,测量范围为0~500 cm/s,精度为1 cm/s,对海流资料进行准调和和分析,得出研究区的海流性质、余流特征。准调和和分析原理:近岸带实测的海流,包括潮流和非潮流(也称余流)2部分,对于几天甚至一天的短期观测资料,只有少数几个主要分潮的调和常数可以由观测值直接确定,许多分潮分离不开,就需要引入一些已知的关系来确定,即差比关系;以一个分潮为主,通过差比关系将其余分潮合并到主分潮,从而成为一项,但是这一项的振幅和角速率不再是一个常量,而是随时间发生缓慢改变的,这就是准调和分潮。其目的—来可以依据实测资料,分离出潮流和非潮流;二来通过计算得到潮流调和常数和潮流特征值,进而得出研究海域的潮流性质<sup>[15-16]</sup>。

### 2.2 表层沉积物

2011年9月在研究区布设30个沉积物调查站位(图1),样品采用蚌式采样器获得,现场密封保存带回实验室,取0~1 cm的表层样品进行粒度分析,对于粒径<1 000 μm的样品,直接采用欧美克激光粒度分析仪测试分析,先将样品均匀混合,然后取干样约2 g,再加水稀释,并添加20 mL浓度为0.5 mol/L的六偏磷酸钠,静置24 h充分分散后上机测试。按1/4Φ间距进行测试,为了保证结果准确,每个样品测试3次,然后取3次测试结果的平均值。对于有粒径>1 000 μm的样品,先称重,之后用1 mm孔径的筛子筛,细颗粒部分仍用激光粒度仪进行分析,粗颗粒部分用传统筛分法分析,两部分数据利用仪器仿真文件合并获得完整的粒度分布。利用Folk和Ward公式<sup>[17]</sup>方法来计算粒度参数,本文沉积物含砾组分样品数较多,Folk分类命名法考虑了沉积物中砾组分的动力学意义<sup>[18]</sup>,因此

采用 Folk 分类命名方法对研究区沉积物进行定名。提出的分级定性描述(表 1)。粒度参数分级的定性描述参考贾建军等<sup>[19]</sup>2002 年

表 1 粒度参数定性描述<sup>[19]</sup>Table 1 Qualitative description of grain size parameters<sup>[19]</sup>

分选		偏态		峰态	
分选程度	分选系数	偏态	偏态值	峰态	峰态值
分选极好	<0.35	极负偏	<-1.50	非常窄	<0.72
分选好	0.35~0.5	负偏	-1.50~-0.33	很窄	0.72~1.03
分选较好	0.5~0.71	近对称	-0.33~0.33	中等	1.03~1.42
分选中等	0.71~1.00	正偏	0.33~1.50	宽	1.42~2.75
分选较差	1.00~2.00	极正偏	>1.50	很宽	2.75~4.50
分选差	2.00~4.00			非常宽	>4.50
分选极差	>4.00				

## 2.3 计算公式

### 2.3.1 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 窠国仁<sup>[20]</sup>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:

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

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

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

式中:  $k'$  为常数, 一般取值 0.32;

$h$  为水深, m;

$\rho_s$  和  $\rho$  分别为沙粒和水的密度;

$g$  为重力加速度;

$d$  为中值粒径, 即  $d=d_{50}$ ;

$\gamma_0$  为床面泥沙干容重,  $t/m^3$ ;

$\gamma_{0*}$  为泥沙颗粒的稳定干容重,  $t/m^3$ ;

$\varepsilon_0$  为综合粘聚力参数, 其值为  $1.75 \text{ cm}^3/s^2$ ;

$\delta$  为薄膜水厚度参数, 其值为  $2.31 \times 10^{-5} \text{ cm}$ ;

$d'$  为床面糙率高度, 当  $d \leq 0.5 \text{ mm}$  时, 取值  $1.0 \text{ mm}$ ; 当  $0.5 \text{ mm} < d \leq 10 \text{ mm}$  时, 取值  $2d$ ; 当  $d > 10 \text{ mm}$  时, 取值  $2d_*^{1/2} d^{1/2}$ 。  $d'$  根据粒径判断, 当  $d \leq 0.5 \text{ mm}$  时, 取值  $0.5 \text{ mm}$ ; 当  $0.5 \text{ mm} < d \leq 10 \text{ mm}$  时, 取值  $d$ ; 当  $d > 10 \text{ mm}$  时, 取值  $10 \text{ mm}$ 。  $d_* = 10 \text{ mm}$ 。

### 2.3.2 表层沉积物输运通量

表层沉积物的单宽输沙率能较好的反映其输

运速率, 本文参考 BARTHOLDY 等<sup>[21]</sup>提出的半经验公式来计算单宽输沙率以及涨落潮段输沙通量。具体公式见式(4)~(8):

$$q_{sb} = 0.5 u_f^3 V_D^2 d^{-1} \quad (4)$$

$$u_f = \frac{u}{\left( 8.5 + 2.5 \ln \left( \frac{z}{k} \right) \right)} \quad (5)$$

$$k = \frac{d}{12} \quad (6)$$

$$V_D = \left( 6 + 2.5 \ln \left( \frac{D}{k} \right) \right) u_f \quad (7)$$

$$Q_{sb} = q_{sb} \times T \quad (8)$$

式中:  $q_{sb}$  为单宽输沙率,  $\text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ ;

$V_D$  为垂线平均流速,  $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ;

$u_f$  为摩阻流速,  $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ;

$d$  为中值粒径, mm;

$0.5$  为经验系数,  $\text{kg} \cdot \text{s}^4 \cdot \text{m}^{-5}$ ;

$u$  为实测流速,  $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ;

$k$  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,  $\text{kg} \cdot \text{m}^{-1}$ ;

$T$  为时间, s。

## 3 表层沉积物分布特征

### 3.1 表层沉积物类型特征

表层沉积物命名投点结果(图 2)显示, 研究区表层沉积物有砂质砾、砾质砂、含砾砂、砂和粉砂质砂 5 种类型, 沉积物颗粒较粗, 整体以含砾砂为

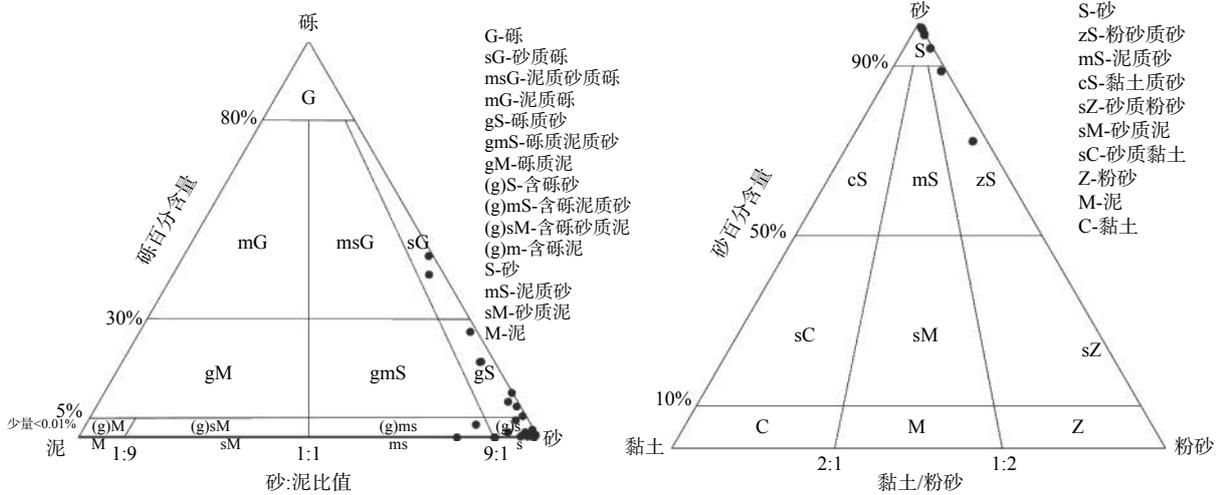


图2 研究区表层沉积物的 Folk 分类命名分布

Fig.2 Sediment type of the surface sediment according to Folk's classification in the study area

主(图3、表2), 占样品总数的47%, 其次为砾质砂、砂, 分别占比23%、17%, 砂质砾和粉砂质砂在研究区海域内呈圆斑状零星分布, 二者总共占比13%, 砾主要为贝壳、珊瑚礁碎屑等颗粒。

就平面分布来看, 含砾砂在除东北侧日月湾湾顶和南侧分界洲岛周边外的研究区域广泛分布, 砾含量占0.1%~4.4%, 砂含量占82.3%~98.9%, 粉砂含量占0.3%~16%, 黏土含量较低, 仅占0~1.7%。较粗的砾质砂主要分布于分界洲岛北侧附近海域, 水深主要介于10~20 m, 砾含量占5.5%~26.7%, 砂含量占71.8%~93.8%, 粉砂含量占0.2%~3%, 黏土含量极低, 仅占0~0.2%。较细的砂分布于研

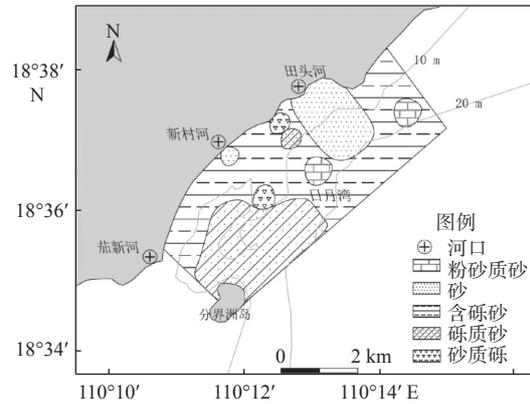


图3 研究区表层沉积物类型分布

Fig.3 Distribution of surface sediment types in the study area

表2 表层沉积物类型及粒度参数

Table 2 Statistics of the surface sediment type and grain size parameters

沉积物类型	样品数	取值	砾/%	砂/%	粉砂/%	黏土/%	Mz/Φ	偏态	峰态	分选系数
砂质砾(sG)	2	最大值	45.8	55.6	3.1	0.2	-0.5	0.2	1.8	2
		最小值	41.1	53.2	0.9	0.1	-0.8	0	0.8	1.9
		平均值	43.45	54.4	2.0	0.15	-0.65	0.1	1.3	1.95
砾质砂(gS)	7	最大值	26.7	93.8	3	0.2	0.6	0.1	2.4	2
		最小值	5.5	71.8	0.2	0	-0.4	-0.8	1.2	0.7
		平均值	14.11	84.26	1.53	0.1	0.26	-0.3	1.64	1.24
含砾砂((g)S)	14	最大值	4.4	98.9	16	1.7	3.6	0.7	2.7	1.8
		最小值	0.1	82.3	0.3	0	0.5	-0.4	1	0.4
		平均值	1.11	93.9	4.56	0.4	1.8	0.2	1.68	0.84
砂(S)	5	最大值	0	98.9	5.3	0.6	3	0.2	1.4	0.6
		最小值	0	94.1	1.1	0	2.7	0.1	1	0.4
		平均值	0	97.2	2.6	0.18	2.84	0.12	1.1	0.5
粉砂质砂(zS)	2	最大值	0	88.7	24.9	2.9	4	0.7	2.5	1.7
		最小值	0	72.2	10.2	1.1	3.3	0.4	1.4	0.9
		平均值	0	80.45	17.55	2.0	3.65	0.55	1.95	1.3

究区北侧的 2 个季节性小河口周边海域, 水深在 20 m 以浅, 砂含量占 94.1%~98.9%, 粉砂含量占 1.1%~5.3%, 黏土含量很低, 仅占 0~0.6%。更细的粉砂质砂零星分布在研究区域的东北侧和中部海域, 水深介于 10~20 m, 砂含量占 72.2%~88.7%, 粉砂含量占 10.2%~24.9%, 黏土含量较低, 仅占 1.1%~2.9%。颗粒最粗的砂质砾仅呈圆斑状零星分布于 2 个季节性小河口之间和研究区中部海域, 水深在 10 m 以浅, 砾含量占 41.1%~45.8%, 砂含量占 53.2%~55.6%, 粉砂含量占 0.9%~3.1%, 黏土含量极低, 仅占 0.1%~0.2%。

### 3.2 表层沉积物粒度组分含量特征

沉积物粒度组分能较好地反映沉积物粒度特征, 是指示沉积环境的重要指标<sup>[22]</sup>。依据颗粒粒径大小, 将粒度分为砾石、砂、粉砂和黏土, 对应的粒径值分别为 > 2、2~0.063、0.063~0.004 和

<0.004 mm。研究区内表层沉积物粒度组分含量多样, 从最细的黏土到最粗的砾均有分布(图 4), 黏土、粉砂、砂与砾的平均含量分别为 0.38%、4.22%、88.67%、6.71%。对比图 3 和图 4 可以发现沉积物各粒度组分的平面分布特征与沉积物类型分布规律吻合度较好, 并且存在显著的分区分带特征。

砾组分含量为 0~45.8%, 主要分布于研究区的中南部, 其高值区大致呈 NS 向带状分布, 底质类型对应较粗的砂质砾和砾质砂, 中东部区域无砾石组分分布。砂组分含量介于 53.2%~98.9%, 在研究区域内呈现中间低值外侧高值的分布现象, 其含量与分布均占绝对优势, 除 2 处底质为砂质砾的圆斑状区域外其他海域砂组分含量均超过了 70%, 砂组分含量超过 90% 的区域主要分布于研究区东北侧和西侧近岸区域。粉砂组分含量为 0.2%~24.9%, 其分布规律与砂组分含量呈现大致相反趋势, 高值区域位于研究区的东侧, 低值区域分布于研究区北侧

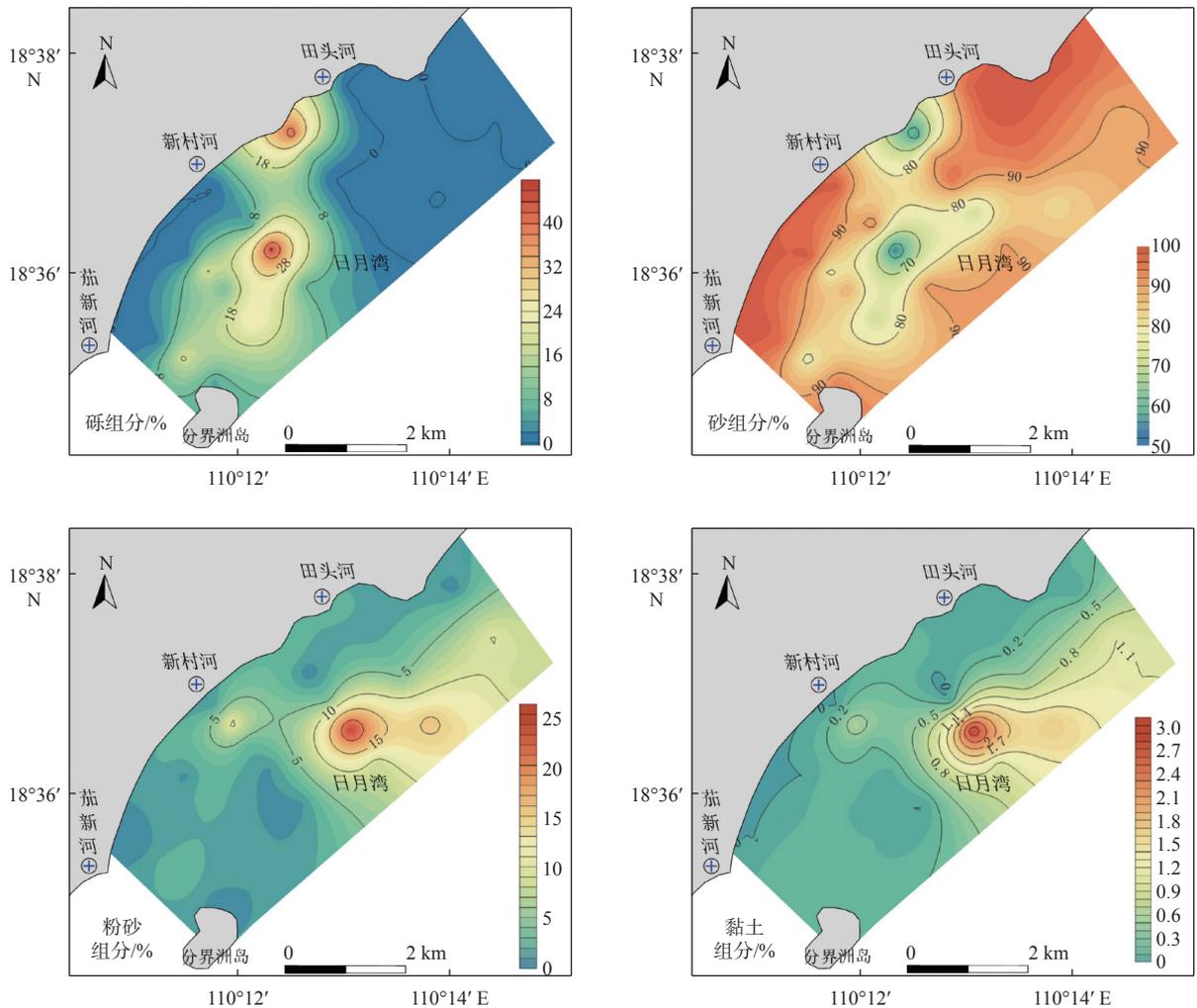


图 4 表层沉积物中的砾、砂、粉砂、黏土百分含量分布

Fig.4 The percentage content of gravel, sand, silt and clay in the surface sediment

和西侧近岸区域。黏土组分含量为0~2.9%，整体含量较低，其分布规律大致与粉砂组分相同。

薛玉龙等<sup>[23]</sup>认为海南万宁浅海表层沉积物主要由极细砂、细砂、中砂组成，砂含量普遍较高，特别是近岸水深30 m以浅区域，砂粒级组分平均为60%~80%，粉砂与黏土在水深30 m以浅区域组分含量较低，与本文分析的表层沉积物粒级组分的多样分布状态基本一致。

### 3.3 表层沉积物粒度参数特征

平均粒径(Mz)、分选系数( $\sigma$ )、偏态(Sk)、峰态(Kg)等沉积物粒度参数，客观地反映了沉积物运移与沉积动力条件等方面的信息，是沉积学研究的重要内容，可用粒度参数推测水动力条件、识别沉积环境类型、判定物质运动方式等<sup>[24-26]</sup>。

本文对平均粒径(Mz)、分选系数( $\sigma$ )、偏态(Sk)、峰态(Kg)4个粒度参数进行分析(图5)。

平均粒径介于 $-0.8\Phi\sim 4\Phi$ ，属于极粗砂至极细砂范围，平均值为 $1.57\Phi$ ，对应为砂粒级，平均粒径变化范围较小，其分布趋势与沉积物粒级的分布趋势较一致，粒径 $\Phi$ 高值区位于东侧海域，低值区呈NS向条带状分布，指示东侧海域沉积物颗粒平均值细于西南侧海域，即由东侧外侧海域向西南侧近岸海域沉积物颗粒先增粗后变细。

分选系数介于0.4~2.0，属于分选好至分选较差范畴，平均值为0.98，属于分选中等，根据分选分级定性描述(表1)<sup>[19]</sup>，研究区东侧和西侧近岸沉积物分布于分选好至分选较好的区间，对应砂含量高值区，研究区中部沉积物分布于分选中等至分选较差的区间，对应砾含量高值区，这种差异化的分布特征与研究区多样的物质来源及复杂的水动力条件密切相关。

峰态值介于0.8~2.7，属于很窄到宽，平均值为1.57，属于宽。研究区峰态值分区显著，远岸海

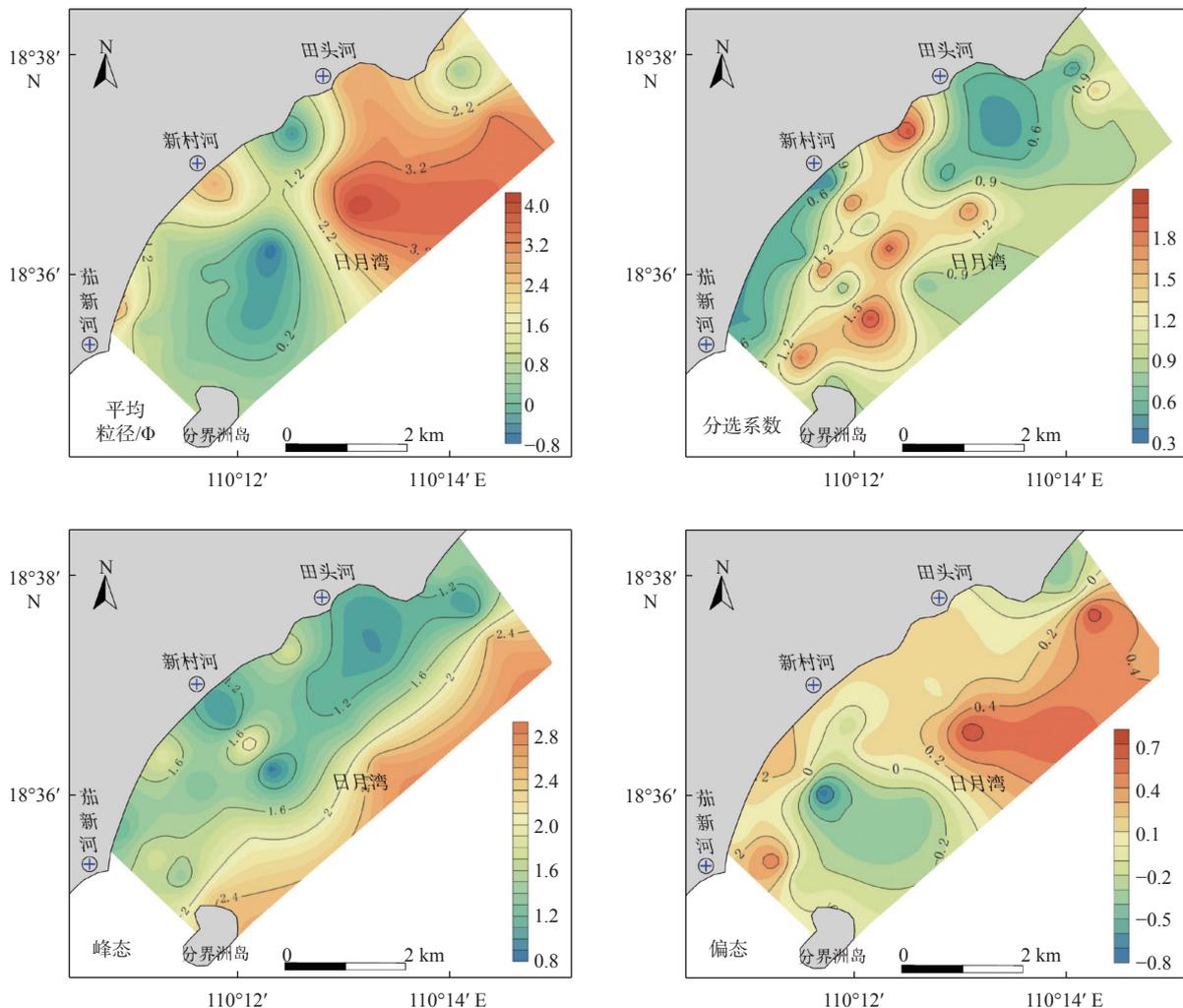


图5 表层沉积物粒度参数分布

Fig.5 Distribution of grain size parameters in the surface sediment

域属于高值区且峰态值等值线近乎平行于海岸线分布, 峰态值为 1.3~2.7, 属于中等到宽; 近岸海域属于峰态值低值区, 多数为 0.8~1.3, 属于很窄到中等, 局部出现高值中心, 峰态值为 1.6~2.0, 属于中等到宽。表明远岸海域由于潮流与波浪的共同作用, 沉积物粒度的级配组成较好, 存在一定优势组分, 使频率曲线峰态值较高; 近岸海域粒度的级配分布较为分散, 沉积物的组成和水动力环境变化较为复杂。

偏态值介于-0.8~0.7, 属于负偏到正偏, 平均值为 0.09, 属于近对称。研究区内大部分海域的偏态值介于-0.33~0.33, 为近对称, 表明此海域内的中值粒径与平均粒径近似相等, 沉积物颗粒的粒级组分粗细分布近似, 研究区东侧海域远岸海域偏态值高于 0.33, 表明此处海域沉积物颗粒的粒级组分粗细分布呈正偏, 细颗粒组分占比高, 偏态值低值区出现于研究区西侧中部和东北侧近岸, 指示此处海域粗颗粒组分占比较高。

## 4 泥沙运移分析与讨论

### 4.1 泥沙起动流速

泥沙起动流速计算结果(表 3、图 6)表明, 研究区中值粒径对应的表层泥沙起动流速为 22~39 cm/s, 总体差别不大。受泥沙粒径与水深的共同影响, 近岸起动流速自东北向西南逐渐递增, 远岸起动流速自东北向西南先减小后增大, 对比站点 R3、R5、R6 的计算结果, 可以发现相同粒径下, 水深越深泥沙起动流速越大, 但变化不明显, R1 与 R4 站点水深差别不大, 但是 R1 站点泥沙粒径偏大, 因此起动流速较大。实测研究区底层(离底 1.0 m)潮流流速较低, 由表 3、图 6 可见, R1-R4 站点底层最大实测流速小于中值粒径对应的泥沙起动流速, 表明 R1-R4 站点及周边海域单纯的潮流作用下泥沙易于再

悬浮进入水体; R5、R6 站点底层最大实测流速低于中值粒径对应的泥沙起动流速, 但通过计算发现部分其他粒径对应的起动流速低于底层最大实测流速(如 R6 站点粒径为 0.55Φ~4.6Φ 的颗粒计算起动流速为 22~37 cm/s), 说明靠近分界洲岛的 R5、R6 站点及附近海域, 单纯的潮流作用仍可使底质泥沙发生再悬浮, 但作用较弱仅限于部分颗粒物质, 大规模的泥沙再悬浮是在波浪、风暴潮及沿岸流等综合作用下发生的。

表 3 表层沉积物起动流速计算结果  
Table 3 Results of incipient motion of surface sediments

站点	R1	R2	R3	R4	R5	R6
水深/m	12.3	22.8	7.8	12.8	10.6	16.6
中值粒径/ $\mu\text{m}$	329.9	125.0	707.1	134.0	707.1	707.1
起动流速/(cm/s)	26	25	36	22	37	39
底层最大流速/(cm/s)	33	37	47	31	21	37

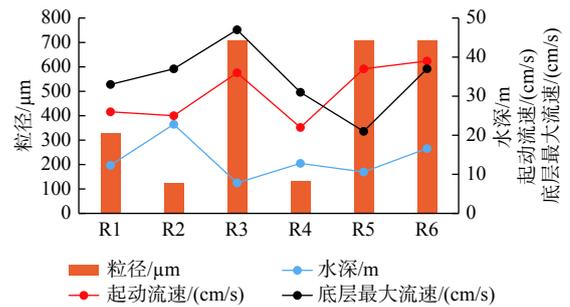


图 6 表层沉积物起动流速计算结果  
Fig.6 Results of incipient motion of surface sediments

### 4.2 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、落潮段平均单宽通量和平均单宽净通量(表 4、图 7)。表中涨、落潮单宽输沙率为涨、落潮段各自的平均值, 本文根据研究区潮位曲线, 先分出涨、落潮段, 计算出每个小时的单宽输沙率, 然后求其平均, 作为涨、落潮段的单宽输沙率(表 4)。结果显示, 研究

表 4 表层沉积物输运通量  
Table 4 Transport fluxes of surface sediments

站点	R1	R2	R3	R4	R5	R6
涨潮单宽输沙率/( $\text{g}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$ )	0.041 7	0.032 3	0.060 4	0.023 8	0.000 6	0.008 7
落潮单宽输沙率/( $\text{g}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$ )	0.018 8	0.019 1	0.022 0	0.033 2	0.000 3	0.004 1
涨潮输沙/( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{d}^{-1}$ )	1.95	1.51	2.83	1.11	0.03	0.41
落潮输沙/( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{d}^{-1}$ )	0.74	0.76	0.87	1.32	0.01	0.16
净输沙/( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{d}^{-1}$ )	2.69	2.27	3.7	2.43	0.04	0.57

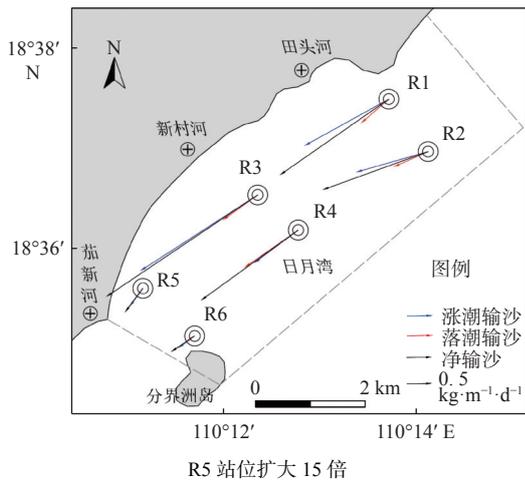


图7 表层沉积物输运通量

Fig.7 Transport fluxes of surface sediments

区表层沉积物平均日净输运通量总体不大,介于  $0.04 \sim 3.7 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ , 净输沙方向总体呈 SW 向, 即由东北向西南方向输沙, 与前人<sup>[11]</sup>根据 CERC 公式 (计算不同波向的输沙量) 计算沿岸输沙率得出沿岸净输沙方向为西南向的结论一致, 平均日净输运通量东北侧海域明显高于西南侧海域。涨潮段单宽输沙率介于  $0.0006 \sim 0.0604 \text{ g} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ , 最大值出现于 R3 站位, 最小值出现于 R5 站位; 落潮段单宽输沙率为  $0.0003 \sim 0.0332 \text{ g} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ , 最大值出现于 R4 站位, 最小值出现于 R5 站位, 涨潮段单宽输沙率略大于落潮段单宽输沙率 (R4 站位除外); 涨、落潮段输沙方向基本一致, 涨潮输沙通量介于  $0.03 \sim 2.83 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ , 落潮输沙通量介于  $0.01 \sim 1.32 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ , 涨、落潮段输沙通量的平面变化规律与单宽输沙率平面分布变化表现一致。

近岸自东北向西南输沙通量先增大后减小, 主要是 R3 站位北侧有季节性小河流输入, 采样时间恰好是洪水期, 且 R3 站位实测潮流流速较大, 水深较浅, 易于表层沉积物的扰动及运输; 远岸自东北向西南输沙通量呈减小趋势, 主要是沿该方向潮流流速变化不大, 而沉积物颗粒逐渐变粗, 泥沙起动流速变大 (表 3、图 6), 尤其是靠近分界洲岛的 R6 站位, 底层最大实测流速低于中值粒径对应的泥沙起动流速, 单纯的潮流作用仅能起动部分粒径的物质, 表层沉积物再悬浮比较困难, 潮流控沙作用减弱; 根据前文分析 R5、R6 与 R3 站位沉积物粒径相当, 但日输沙量却远远小于 R3 站位, 原因是 R3 站位水深较浅且流速大于 R5、R6 站位, 易于表层沉积物的起动及搬运。

### 4.3 泥沙运移趋势与来源分析

根据不同类型的粒径出现概率的差异化趋势, 可以较好地反映沉积物的净输运趋势<sup>[27]</sup>, 本文根据 Gao-Collins 粒径趋势分析方法<sup>[28]</sup>, 绘制了表层沉积物运移趋势图 (图 8), 图中合矢量的方向代表了该采样点沉积物的净搬运方向, 而该合矢量的长度并不代表沉积物搬运率的大小, 仅表示该粒径趋势的显著性。结果显示, 研究区泥沙输运整体呈现自外海向近岸运输的趋势, 且具有明显的分段特征, 西南侧海域输运趋势显著于东北侧海域。研究区东北侧砂质海岸地貌区泥沙输运趋势不明显, 且越靠近岸边, 在田头河径流和潮流的共同影响下, 沿岸方向的输运分量越大; 研究区西侧海域泥沙垂直岸线方向搬运趋势非常显著, 且越靠近西南侧分界洲岛, 泥沙垂直岸线方向搬运趋势越显著, 而沿岸方向的活动性较弱。

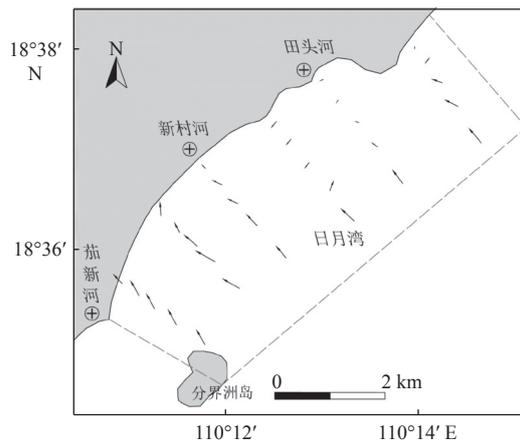


图8 日月湾净输沙趋势

Fig.8 The net sediment transport trend in the Riyue Bay

本文粒径趋势分析结果与表层沉积物输运通量计算结果 (图 7、8) 并不完全一致, 有学者<sup>[25,29]</sup>认为受海底地形、水动力分布等的影响, 物质输运动力会产生侧向差异, 粒径趋势矢量可能受到这种侧向差异的影响, 从而形成与优势运输方向不完全一致的结果。也有学者<sup>[29]</sup>发现波浪向岸传播时会使涨潮流速更大, 增强涨、落潮的流速不对称性, 利于沉积物颗粒继续向前运移, 薛春汀等<sup>[30]</sup>发现近浅海区沉积物的带状分布受波浪、沿岸流 (破波带内波浪作用产生) 及海岸流 (破波带外中国边缘海环流系统的一部分) 的共同控制。李珊<sup>[11]</sup>认为日月湾近岸波浪引起的波流及季风产生的风海流大致与实测潮流达到同一量级, 流向基本与等深线走

向一致, 并根据日月湾附近波浪观测资料结合佐藤公式, 推算正常天气下(波高 $<4\text{ m}$ )波浪可对研究区  $10\text{ m}$  以浅海底泥沙产生推移作用, 在大风浪天气下, 波高可超过  $4\text{ m}$ , 波浪可掀动  $10\text{ m}$  以深海域泥沙,  $10$  年一遇的极值波高( $7.8\text{ m}$ )可使  $20\text{ m}$  水深以浅的海底泥沙发生推移, 使  $35\text{ m}$  水深以浅的海底泥沙起动。波浪受海底地形的影响变形、破碎, 产生的强烈紊动促使泥沙迅速悬浮, 进而在潮流作用下运移, 一般说来, 小波浪破碎水深较浅, 碎波带狭窄, 沿岸流和沿岸增水都很小, 波高较大的浪, 其破碎水深较深, 泥沙活动带范围宽, 波浪破碎所形成的沿岸流和沿岸增水都较大。赵利等<sup>[31]</sup>认为海南岛东南浅海近岸区( $160\text{ m}$  等深线以浅)沉积物质的运移趋势主要呈与岸线近乎平行的西南向, 河流径流注入的陆源物质在华南近岸流与粤西沿岸流等的控制下, 整体自东北向西南方向输运; 西南部海域受夏季海南岛东岸多东南、东向风浪及南岸多偏南向风浪影响, 则呈现出东南与南向近垂直岸线的输运趋势; 部分沿岸区域输运趋势多变, 与海岸多港湾、风浪和潮流共同控制沿岸沉积相关。本文实测潮流与沉积物粒径组分数数据亦显示, 近岸侧海域流速值较小但粒径较粗, 说明单纯的潮流作用对研究区泥沙再悬浮及输运影响较弱, 研究区泥沙运移受波浪、潮流、风暴潮、径流等多种因素共同控制。

研究区附近有田头河等 3 条小河入海, 背靠五指山东南侧的丘陵区, 径流量季节变化明显,  $8\text{--}10$  月的降雨量大, 都在  $270\text{ mm}$  以上, 尤其是  $8\text{--}9$  月, 连续降雨天数达 20 天以上, 会携带部分陆域沙源入海; 研究区属于弱流区、波浪基本影响到  $2\text{ m}$  以浅海域, 珊瑚礁与基岩侵蚀不明显, 补沙量不大; 根据历史水深资料比对, 研究区  $20\text{ m}$  以浅海床以冲刷为主。根据以上分析讨论及前文 3.1—3.3 节分析的表层沉积物平面分布特征, 结合同期获取的悬浮泥沙含量日月湾两端内侧高于外侧的平面分布特征, 初步判断研究区泥沙来源主要有河流输沙、近岸侵蚀补沙 2 个方面。

本文通过计算表层沉积物净输运通量获取泥沙输运方向在海南岛东南浅海近岸区尚属首次, 与李珊<sup>[11]</sup>通过计算不同波向的输沙量及赵利等<sup>[31]</sup>通过沿岸流分析研究认为沿岸净输沙方向为西南向的结论基本一致。可以看出, 通过潮流计算表层沉积物输运通量, 结合粒径趋势分析泥沙输运趋势可较好地分析开放性海湾沉积动力特征, 也可为海南

岛东南浅海近岸区沉积物质的运移和沉积动力环境的研究提供参考。

## 5 结论

(1) 研究区表层沉积物有砂质砾、砾质砂、含砾砂、砂和粉砂质砂 5 种类型, 整体以含砾砂为主, 其次为砾质砂、砂、砂质砾和粉砂质砂, 呈圆斑状零星分布。各粒径组分平面分布与沉积物类型分布规律吻合度较好, 且存在显著的分区特征, 细颗粒主要分布于研究区的东侧和西侧近岸海域, 粗颗粒呈 NS 向条带状分布于研究区中南部海域, 呈现中部分选差、周边分选好的特征。

(2) 研究区表层沉积物中值粒径对应的表层泥沙起动流速为  $22\text{--}39\text{ cm/s}$ , 泥沙起动流速在近岸自东北向西南递增, 在远岸自东北向西南先减小后增大, 靠近分界洲岛海域单纯的潮流作用只能使部分颗粒发生再悬浮。

(3) 研究区表层沉积物平均日净输运通量介于  $0.04\text{--}3.7\text{ kg}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{d}^{-1}$ , 净输沙方向总体呈 SW 向, 平均日净输运通量东北侧海域明显高于西南侧海域; 涨潮段单宽输沙率略大于落潮段单宽输沙率(R4 站位除外), 涨、落潮段输沙通量的平面变化规律与单宽输沙率平面分布变化表现一致。

(4) 单纯的潮流作用对研究区泥沙再悬浮及输运影响较弱, 研究区泥沙运移受波浪、潮流、风暴潮、径流等多种因素共同控制。

### 参考文献:

- [1] 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.
- [2] 杨阳, 高抒, 周亮, 等. 海南新村港潟湖表层沉积物粒度特征及其沉积环境[J]. 海洋学报, 2016, 38(1): 94-105.
- [3] 袁萍. 渤海表层沉积物的空间分布及其与物源和沉积动力环境的关系[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2015.
- [4] 王伟伟, 付元宾, 李树同, 等. 渤海中部表层沉积物分布特征与粒度分区[J]. 沉积学报, 2013, 31(3): 478-485.
- [5] 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.
- [6] 吕纪轩, 胡日军, 李毅, 等. 烟台北部近岸海域表层沉积物粒度分布及沉积动力环境特征[J]. 海洋地质前沿, 2020, 36(4): 27-36.
- [7] 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.
- [8] 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): 132-140.
- [9] 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.
- [10] 龚文平, 李昌宇, 林国尧, 等. DELFT 3D在离岸人工岛建设中的应用: 以海南岛万宁日月湾人工岛为例[J]. 海洋工程, 2012, 30(3): 35-44.
- [11] 李珊. 海南万宁日月湾人工岛冲淤特性研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2015.
- [12] 张翠萍, 贾后磊, 郑兆勇, 等. 离岸人工岛填海造地的正负环境效应分析及对策研究: 以海南万宁日月湾人工岛为例[J]. 海洋湖沼通报, 2016(2): 17-23.
- [13] 李汉英, 张红玉, 王霞, 等. 海洋工程对砂质海岸演变的影响: 以海南万宁日月湾人工岛为例[J]. 海洋环境科学, 2019, 38(4): 575-581.
- [14] 全长亮, 孙龙飞, 黄仕锐. 海南省海洋地质调查主要进展与成果[J]. 中国地质调查, 2020, 7(1): 60-70.
- [15] 方国洪, 郑文振, 陈宗辅, 等. 潮汐和潮流的分析和预报[M]. 北京: 海洋出版社, 1986, 98-131.
- [16] 张锋, 李瑞杰, 孙杰, 等. 长江口及其邻近海域两定点周日海流观测的准调和解析[J]. 海洋湖沼通报, 2019(5): 57-63.
- [17] FOLK R L, WARD W C. Brazos River bar: a study in the significance of grain size parameters [J]. Journal of Sedimentary Petrology, 1957, 27(1): 3-26.
- [18] 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.
- [19] 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.
- [20] 窦国仁. 再论泥沙起动流速[J]. 泥沙研究, 1999(6): 1-9.
- [21] 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.
- [22] 吴敏. 海南岛周边海域环境变化的粘土矿物学研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2007.
- [23] 薛玉龙, 王雪木, 杨凡. 海南万宁浅海表层沉积物粒度及地球化学特征对浅海砂矿的指示[J]. 中国矿业, 2017, 26(1): 220-226.
- [24] 金秉福. 粒度分析中偏度系数的影响因素及其意义[J]. 海洋科学, 2012, 36(2): 129-135.
- [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.
- [26] 卢连战, 史正涛. 沉积物粒度参数内涵及计算方法的解析[J]. 环境科学与管理, 2010, 35(6): 54-60.
- [27] MCLAREN P, BOWLES D. The effects of sediment transport on grain-size distributions [J]. Journal of Sedimentary Research, 1985, 55(4): 457-470.
- [28] 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.
- [29] ASSELMAN N E M. Grain-size trends used to assess the effective discharge for floodplain sedimentation, River Waal, the Netherlands [J]. Journal of Sedimentary Research, 1999, 69(1): 51-61.
- [30] 薛春汀, 张勇. 中国近岸海区沿岸流和海岸流对沉积物的搬运[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2010, 30(1): 1-7.
- [31] 赵利, 蔡观强, 钟和贤, 等. 海南岛东南浅海表层沉积物粒度特征及沉积环境[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2021, 41(2): 64-74.

## Distribution characteristics and migration trend of surface sediments in Riyue Bay, Hainan, South China

LIN Jijiang<sup>1,2</sup>, WANG Ping<sup>1,2</sup>, HU Rijun<sup>3\*</sup>, ZHENG Zhaoyong<sup>2,4</sup>, LENG Xing<sup>3</sup>, YI Shantang<sup>5</sup>, DING Xiaoyu<sup>1,2</sup>

(1 South China Sea Information Center, State Oceanic Administration, Guangzhou 510310, China; 2 Key Laboratory of Marine Environmental Detection Technology and Application, Ministry of Natural Resources, Guangzhou 510310, China; 3 College of Marine Geosciences, Ocean University of China, Qingdao 266100, China; 4 South China Sea Institute of Planning and Environmental Research, State Oceanic Administration, Guangzhou 510310, China; 5 Guangzhou Marine Geological Survey, China Geological Survey, Guangzhou 510075, China)

**Abstract:** The Riyue Bay in Hainan, South China, is a typical headland arc-shaped bay with various types of coasts and the grain size of the substrate is relatively coarse. By analyzing the sea current and the particle size of the surface sediments obtained in 2011, the surface sediments distribution in the Riyue Bay was clarified, the incipient motion and transport fluxes of the surface sediments calculated, and the net sediment transport trend discussed. Results show that the surface sediments in the study area were relatively coarse, and were mainly composed of gravel-bearing sand, followed by gravel sand and sand, and sandy gravel and silty sand were sporadically distributed. The sediment grain sizes ranged from the clay the finest to the gravel the coarsest; fine particles distributed mainly in the east and west coastal waters of the study area, while coarse particles distributed in NS-direction stripes in the central and southern areas. In addition, the sorting was poor in the central area and good in the surroundings. The incipient velocity of sediment increases from northeast to southwest in the nearshore area, while in the offshore, it firstly decreases and then increases from northeast to southwest. The influence of particle size on the incipient velocity of sediment is greater than that of water depth. The simple tidal current action in the sea area near the Fenjiezhou Island can only cause some particles to resuspension. The incipient motion was between 22 and 39 cm/s. The average daily net transport flux of surface sediments was between 0.04 and 3.7 kg m<sup>-1</sup> d<sup>-1</sup>. The direction of net sediment transport was generally along the direction of SW. The average daily net transport flux in the northeastern sea area was significantly higher than that in the southwestern sea area. The single width sediment transport rate during the rising tide period is slightly higher than that during the falling tide period (excluding station R4), and the sediment transport direction during the rising and falling tide periods is basically the same.

**Key words:** Riyue Bay of Hainan; distribution characteristics; incipient motion; migration trend; transport flux