

曾维特, 张东强, 刘兵, 等. 海南岛北部海湾表层沉积物粒度特征及输运趋势[J]. 海洋地质前沿, 2024, 40(5): 10-18.

ZENG Weite, ZHANG Dongqiang, LIU Bing, et al. Grain size characteristics and transport trends of surface sediment in the bays of northern Hainan Island[J]. Marine Geology Frontiers, 2024, 40(5): 10-18.

海南岛北部海湾表层沉积物粒度特征及输运趋势

曾维特^{1,2}, 张东强^{1,3*}, 刘兵^{1,4}, 杨永鹏^{1,3}, 张航飞⁵, 吴多誉¹, 王晓林^{1,3}

(1 海南省海洋地质资源与环境重点实验室, 海口 570206; 2 海南省海洋地质调查研究院, 海口 570206; 3 海南省地质调查院, 海口 570206; 4 海南省海洋地质调查局, 海口 570206; 5 四川省地质矿产勘查开发局二零七地质队, 乐山 614000)

摘要:对海南岛北部海湾(海口湾、铺前湾、木兰湾和东寨港)192站位的表层沉积物样品进行粒度分析,基于粒级组划分沉积物类型,利用Flemming三角图式法进行沉积动力分区,采用二维粒径趋势分析模型(GSTA)分析沉积物输运趋势。结果表明:研究区表层沉积物类型包括砾、砂质砾、砂、粉砂质砂、砂质粉砂和粉砂,其中,砂分布面积最广,其次为粉砂质砂,沉积物粒度由南往北依次呈“细—粗”旋回式变化,近岸和口门外砂体分选性较好,东寨港内湾和琼州海峡中部沉积物分选性差。研究区整体以偏高能环境为主,物质输运方式包括河流输沙、海岸侵蚀、沿岸输沙和底床剥蚀,其中,北部海峡潮流余流作用强劲,表层沉积物存在EW向输运趋势;海湾中部受波浪和潮流的共同影响,于白沙浅滩处(如意人工岛)形成一个沉积汇聚中心;河口区受波浪、径流和潮流季节交替性作用控制,洪季时口门形成的堆积沙体,在NE向浪和W向沿岸流的侵蚀搬运作用下,向西输运至海口湾;近岸区主要受波浪改造作用影响,其中,铺前湾和木兰湾海域沉积物由海向岸搬运,趋势与波浪和涨潮流作用方向一致;东寨港水动力条件较弱,沉积物无明显输运趋势。研究结果揭示了本区海湾现代沉积特征及陆海交互作用,可为海岸侵蚀防护、航道安全保障和海洋环境治理提供科学依据。

关键词:海南岛; 北部海湾; 沉积物; 粒度特征; 输运趋势

中图分类号:P736.2

文献标识码:A

DOI: 10.16028/j.1009-2722.2023.170

0 引言

海水中大规模的泥沙运移会对港口建设、海底光缆铺设和航道维护等造成重大影响,因此,研究泥沙运移模式和分布格局意义重大^[1-4]。沉积物粒度参数可以用来识别沉积环境,也常用于提取沉积动力和物质输运等重要信息^[5-7]。MCLAREN等^[8]建立了一维沉积物粒径趋势模型,并提出可用2种

粒径趋势来判别沉积物净输运方向。在此基础上,部分学者对粒径趋势分析方法进行了改良^[9-11],其中,GAO和COLLINS^[12-13]通过对比相邻样品的粒径参数,并对单个粒径趋势矢量进行合成,提出了二维粒径趋势模型(GSTA),该模型已被广泛应用于河口、海湾和三角洲等多种环境的沉积物输运趋势研究^[14-18]。

海南岛拥有丰富的海岸带资源,2019年,国务院印发《国家生态文明试验区(海南)实施方案》,将海洋生态文明建设作为国家生态文明试验区(海南)和自由贸易试验区(港)建设的重要内容。海南岛北部海湾(海口湾、铺前湾、木兰湾和东寨港)是海南省海洋生态文明建设的先行区与示范区,前人学者针对该海域的地质环境、水文动力条件和岸滩稳定性等问题已进行了大量调查研究^[19-25]。如王奎博等^[19]对海口市海岸带侵蚀脆弱性进行了评价;周晗宇等^[20]利用粒度数据研究了海口湾西海岸海

收稿日期: 2023-07-05

资助项目: 海南省自然科学基金青年基金(421QN369); 海南省科协青年科技英才创新计划项目(QCXM202008); 海南省海洋地质资源与环境重点实验室自主课题(ZZ[2020]2019256-01)

第一作者: 曾维特(1986—),男,博士,副研究员,主要从事海洋地质方面的研究工作。E-mail: zengweite@126.com

* 通讯作者: 张东强(1983—),男,硕士,高级工程师,主要从事海洋地质和水工环地质方面的研究工作。E-mail: zhangdongqiang83@163.com

滩稳定性;滕学春等^[22]、陈达森等^[23]基于实测资料及数值模拟分析了琼州海峡波浪场和余流场特征;谢华亮等^[24]建立了南渡江河口动力沉积模式。然而,对于该海域系统的沉积物质组成、空间分布规律、输运趋势和沉积动力驱动机制等方面研究较为缺乏,本文通过分析海南岛北部海湾表层沉积物的粒度特征和空间分布类型,利用 FLEMMING 三角图式法进行沉积动力分区,采用二维粒径趋势模型进行沉积物输运趋势分析,有助于深入了解本区海湾的现代沉积特征及陆海交互作用,以期为海岸侵蚀防护、航道安全保障和海洋环境治理提供科学依据。

1 研究区概况

研究区域位于琼州海峡南岸,海南岛北部,东起文昌木兰头,西至长流镇新海村岬角,横跨海口、文昌 2 市,包括海口湾、铺前湾、木兰湾和东寨港 50 m 以浅海域(图 1),海域面积约 600 km²。研究区地处低纬度热带北缘,属热带海洋季风气候,地势总体呈南高北低,微向海倾,东部地形平缓,西北部因地形坡度陡倾水深急剧加大,最大水深可达 112 m,海岸地貌类型主要包括剥蚀堆积平原区、火山岩台地、河海混合堆积三角洲平原、滨海堆积平原,水下地貌以水下浅滩、潮汐通道和深槽为主^[25]。海湾内有南海明珠和如意岛 2 处人工填岛,其中,南海明珠人工岛位于海口湾西侧双滩浅滩,填海面

积约 2.65 km²,如意岛位于铺前湾西北侧白沙浅滩,填海面积约 7.16 km²。

研究区海域为典型浪控型海湾,以风浪为主,常浪向为 NE 向,次常浪向为 NEE 向,强浪向为 N 向,波高一般 < 2 m,潮汐属不正规日潮,其中,大潮表现为全日潮,中潮一般为混合潮,而小潮则为半日潮^[22];潮流呈往复流性质,表现为涨潮东流、落潮西流,或涨潮西流、落潮东流,余流主要受强风向及粤西沿岸流的影响,以 W 向为主^[25]。区内南渡江发源于白沙县南华山,为海南岛第一大河,在海口市北部海甸岛、新埠岛分别汇入海口湾和铺前湾。

2 样品与方法

2.1 样品采集

研究区表层沉积物取样站位网度为 2 km×2 km,部分海域取样网度加密为 1 km×2 km,共采集表层沉积物样品 192 站位。使用抓斗式取样器采集表层 10 cm 的样品,用小勺刮取最表层 2 cm 的沉积物,置于聚乙烯袋中进行密封,并立即冷藏于 4 ℃ 的冷藏箱中。所有样品的采集、输运、贮存、预处理按《海洋监测规范》(GB 17378—2007)^[26] 的相关规定进行。

2.2 粒度分析

沉积物粒度分析在海南省地质测试研究中心

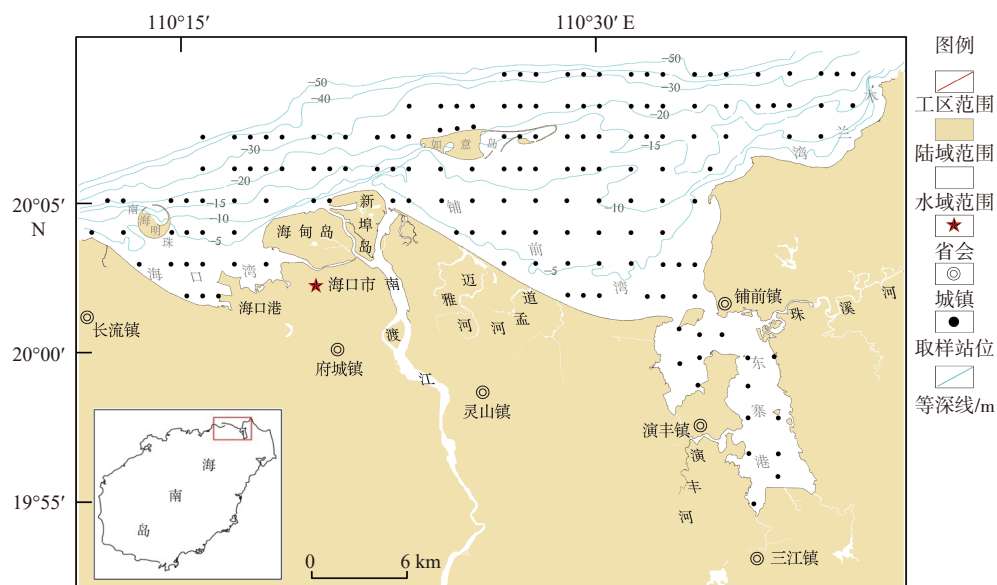


图 1 海南岛北部海湾研究区范围

Fig.1 Location of the study areas

完成。首先取适量原样充分混合均匀后在 80 ℃ 下烘干。对于粒径 $< 2\ 000\ \mu\text{m}$ 的样品,取适量样品加入 10 mL 双氧水和盐酸溶液分别去除有机质和钙质生物,滴加 0.05 N 六偏磷酸钠,在烧杯中静置 24 h,并用超声波振荡仪振荡 15 min 后用 Master-sizer 2000 型激光粒度仪测试,其测量范围为 $0.02 \sim 2\ 000\ \mu\text{m}$,相对误差 $< 2\%$,粒径分辨率为 0.01Φ ,重复测量相对误差 $< 3\%$;对于粒径 $> 2\ 000\ \mu\text{m}$ 的样品,先称重,再用筛分法称量,将 2 部分数据利用激光衍射粒度分析仪仿真程序合并获得完整的粒度分布。样品粒度使用 Krumbein 等比值 Φ 表示,平均粒径(M_z)、分选系数(δ)、偏态(Sk)、峰态(K_g)等粒度参数采用 FOLK-WARD 图解法^[27] 计算公式获得。

基于沉积物粒度分析结果,采用 FOLK 方案^[28]

对沉积物进行命名分类,使用 FLEMMING 三角图式法^[29] 对沉积动力环境进行分区,利用 GAO 等^[30] 提出的 GSTA 模型进行输运趋势分析,选择的特征距离为略大于最大采样间距的 $\sqrt{2}$ 倍。

3 结果

3.1 粒度组分分布特征

沉积物粒度组分可用于指示并区分沉积环境,根据沉积物粒径大小,将研究区表层沉积物粒度分为砾($> 2\ \text{mm}$)、砂($2 \sim 0.006\ 3\ \text{mm}$)、粉砂($0.006\ 3 \sim 0.004\ \text{mm}$)和黏土($< 0.004\ \text{mm}$),表层沉积物粒度组分分布特征如图 2 所示。

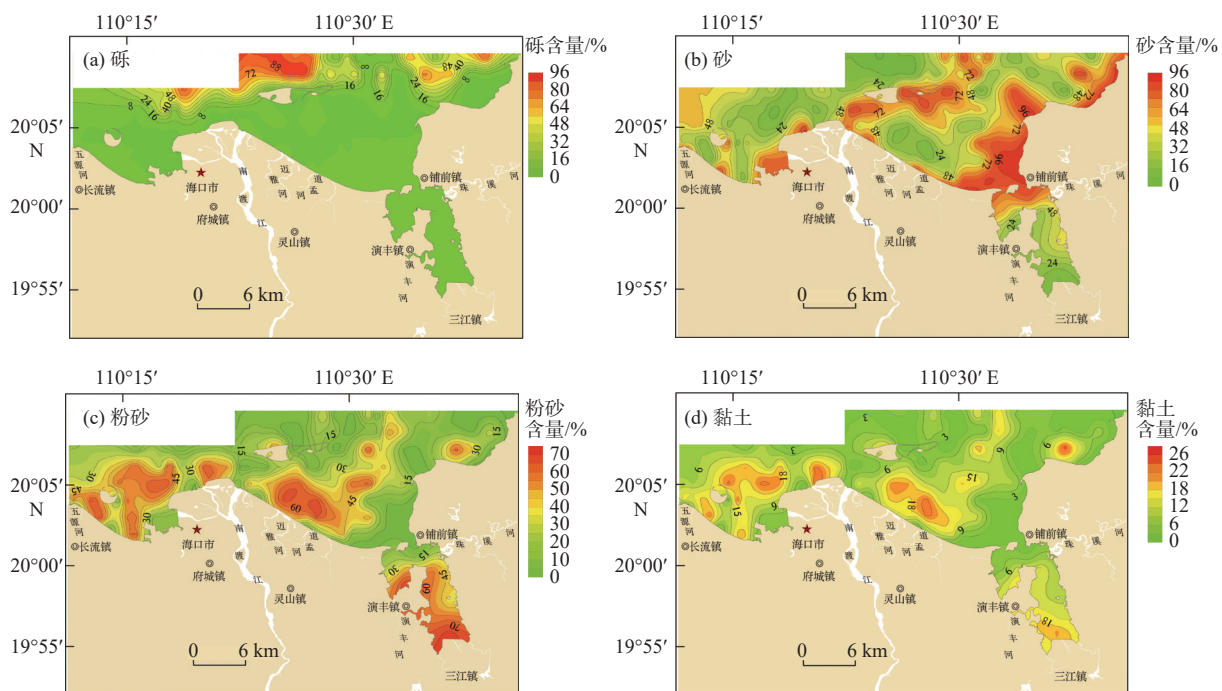


图 2 表层沉积物粒度组分百分含量

Fig.2 The percentage of grain size fraction

研究区 192 件沉积物样品中,砾石组分检出率为 22.92%,含量介于 2.40%~95.30%,均值 47.13%,其高值区主要位于北部琼州海峡,中部和南部砾石组分含量低,甚至不含砾石(图 2a)。砂组分检出率为 100%,含量为 3.03%~100%,均值 56.96%,其高值区主要分布在铺前湾和木兰湾近岸一带,包括南渡江、珠溪河、道孟河与五源河河口;如意岛周边也是砂组分高值分布区,砂含量 $> 50\%$ (图 2b)。粉砂组分检出率为 85.42%,含量为 0.60%~73.04%,均

值 29.40%,其高值区分布于东寨港内湾、铺前湾西侧以及海口湾,而北部海域粉砂含量较少(图 2c)。黏土组分检出率为 83.33%,含量为 0.02%~28.24%,平均 9.39%。黏土含量最少,其分布趋势与粉砂组分相同(图 2d)。

3.2 沉积物粒度参数

研究区表层沉积物平均粒径分布范围为 $-1.29\Phi \sim 6.98\Phi$ (表 1),平均为 3.05Φ 。由内湾东寨

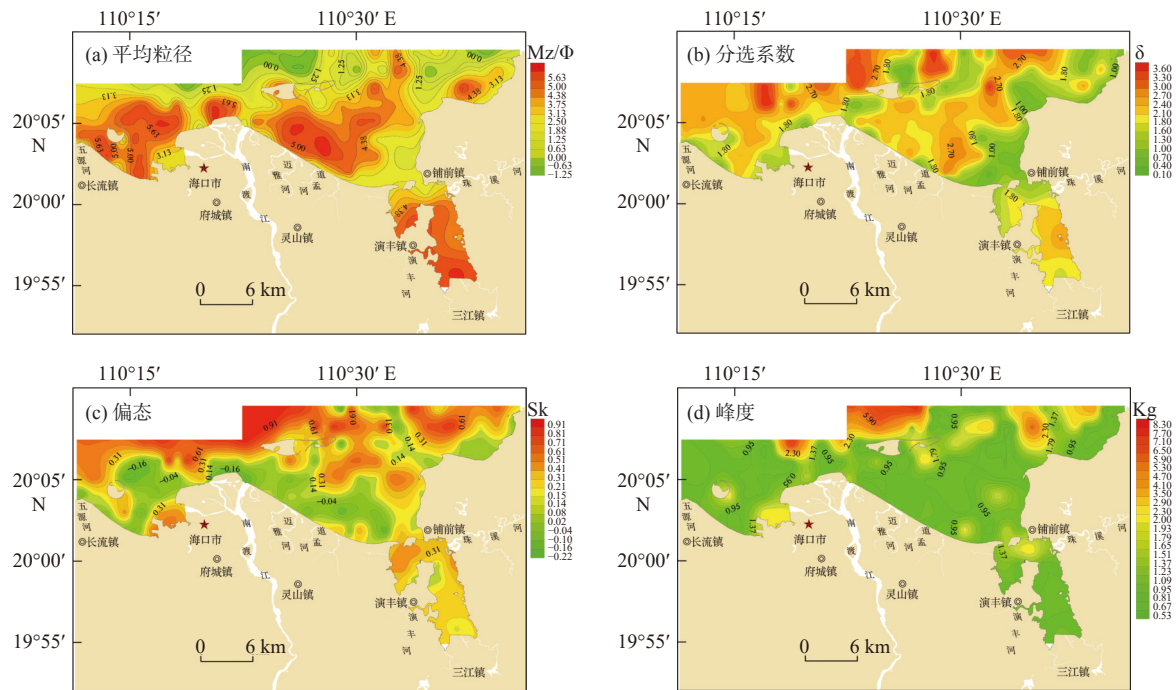
港向北, 沉积物粒度依次呈“细—粗”旋回式变化。其中, 北部琼州海峡平均粒径均 $<1.20\Phi$, 颗粒最粗; 南渡江和珠溪河入海口、铺前湾和木兰湾近岸海域沉积物粒度较粗, 平均粒径均 $<2.70\Phi$; 海口湾、铺前湾中西部、迈雅河入海口和东寨港内湾沉积物粒度较细, 平均粒径为 $4.35\Phi\sim6.98\Phi$ 。

表 1 表层沉积物粒级组分及粒度参数统计
Table 1 Grain size fraction and parameter of surface sediment

	粒级组分/%				粒度参数			
	砾	砂	粉砂	黏土	平均粒径/ Φ	分选系数	偏态	峰度
最小值	2.40	3.03	0.60	0.02	-1.29	0.12	-0.22	-0.60
最大值	95.30	100.00	73.04	28.24	6.98	3.89	0.92	8.66
平均值	47.13	56.96	29.40	9.39	3.05	1.78	0.26	1.31
检出率	22.92	100	85.42	83.33	100	100	100	100

沉积物分选系数介于 $0.12\sim3.89$ (图 3b), 平均为 1.78。海口湾西海岸、铺前湾和木兰湾近岸沉积物分选系数 <1.00 , 分选性中等—极好, 其余海域分选系数均 >1.00 , 分选性较差—差, 其中, 研究区北部沉积物分选系数可达 2.70 以上, 属分选差。研究

区表层沉积物偏态介于 $-0.22\sim0.92$ (图 3c), 平均 0.26, 正偏态集中在研究区北部, 负偏态则集中在研究区各海湾中部。研究区沉积物峰度介于 $0.53\sim8.66$ (图 3d), 平均 1.32, 由南往北峰度逐渐增大, 北部峰度值在 2.30 以上。



(a) 平均粒径; (b) 分选系数; (c) 偏态; (d) 峰度

图 3 表层沉积物粒度参数

Fig.3 Grain size parameters of surface sediments

3.3 沉积物类型及分布特征

研究区表层沉积物类型共有 6 种(图 4), 包括砾(G)、砂质砾(sG)、砂(S)、粉砂质砂(zS)、砂质粉砂(sZ)和粉砂(Z)。砂质沉积物分布面积最广, 主要位于铺前湾东部、木兰湾一带, 以及南渡江、珠溪河等河流入海口, 其中, 入海口的砂质沉积物呈

现舌状分布特征; 粉砂质砂分布面积仅次于砂, 主要呈带状分布于铺前湾北部、木兰湾中部、海口湾西北部及东寨港北部; 砂质粉砂和粉砂 2 种细颗粒沉积物分布区域大致相同, 呈团状分布于海口湾、铺前湾中西部、东寨港及木兰湾中部; 砾和砂质砾 2 种粗颗粒沉积物仅在研究区北部琼州海峡一带分布。

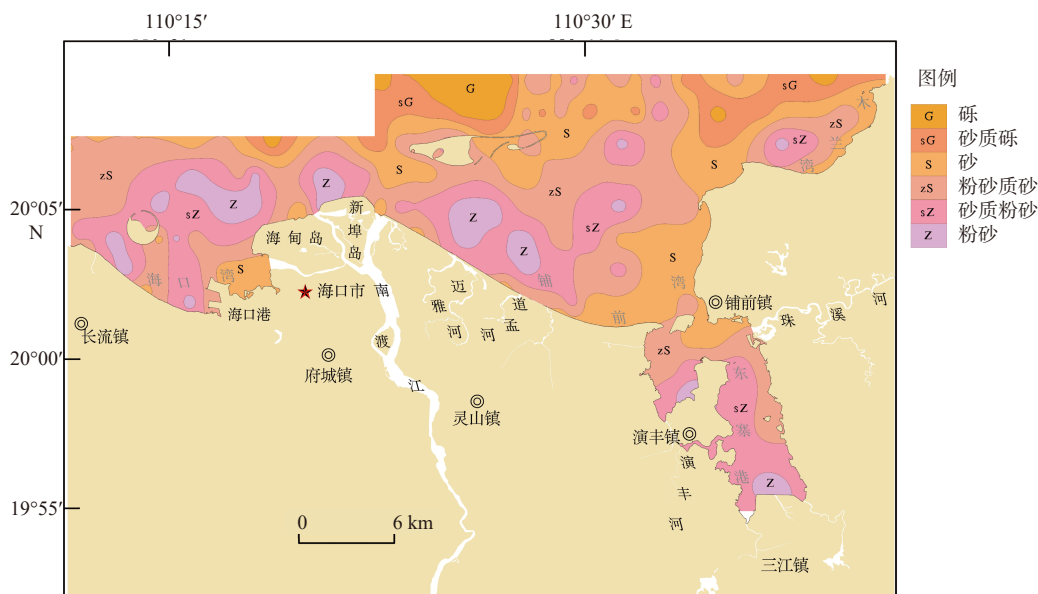


图4 表层沉积物类型分布

Fig.4 Distribution of surface sediment types

4 讨论

4.1 沉积动力分区

根据沉积物粒度组分百分含量变化,将Flemming三角图划分为25个区。S—E区,沉积物砂含量减少,粉砂含量增加,粒度逐渐减小;I—VI区,黏土含量增加,沉积动力逐渐减弱。三角图式分析结果(图5)显示,海南岛北部海湾表层沉积物在S、A—E 6个区均有分布,水动力分区均集中在I、II和III区,表明研究区海域沉积物整体偏高能沉积环境,水动力较强。

研究区北部海域沉积物多分布于S和A区(图6),该区沉积环境属于高能沉积环境。已有研

究表明,该区泥沙搬运受潮余流、季节性风生环流、外海沿岸径流、压强梯度流等流系的综合影响^[23]。当海流穿越琼州海峡,因“狭管效应”使得流速加快,实测表层流速达1.22~2.51 m/s,强劲的冲刷作用对海峡底部不断侵蚀,大量细颗粒悬移质、跃移质和部分推移质被输送至海峡外部^[31],留下粗颗粒的砾、砂质砾和砂,平均粒径介于 $-1.29\Phi \sim 1.29\Phi$ 。

海湾中部沉积物集中分布在II和III区,与北部海域相比,水动力呈减弱趋势,主要表现为由北向南随着水深变浅,潮流动力逐渐减弱,同时波浪动力逐渐增强。研究区海域波高 $H \leq 2.0$ m,频率为99.70%^[32],扰动水深可达20 m^[33],当海底泥沙被波浪垂向起动再悬浮,在与潮流的共同作用下,来自北部海峡的悬浮物质和近岸口门外的剥蚀物经搬运堆积于此,类型以细颗粒的粉砂质砂、砂质粉砂和粉砂为主,平均粒径为 $1.88\Phi \sim 6.98\Phi$ 。

铺前湾至木兰湾近岸海域沉积物多分布在A区,水动力较强。由于铺前湾年平均潮差仅为0.83~1.19 m^[34],且湾内潮流流速较小,实测表层流速介于0.11~0.52 m/s,涨落潮流作用弱,因此,近岸沉积物主要受波浪掀沙、搬运和改造作用。根据研究区波浪实测资料^[32],波高 $H \leq 0.9$ m,频率达70.76%,可对水深5 m以浅的泥沙进行掀动和推移^[33],当入射波在近岸破碎并造成冲蚀,海底泥沙被搅动导致细颗粒物质不易沉积,沉积物粒度在逐渐粗化的过程中分选亦变好,分选系数范围为0.12~0.70。

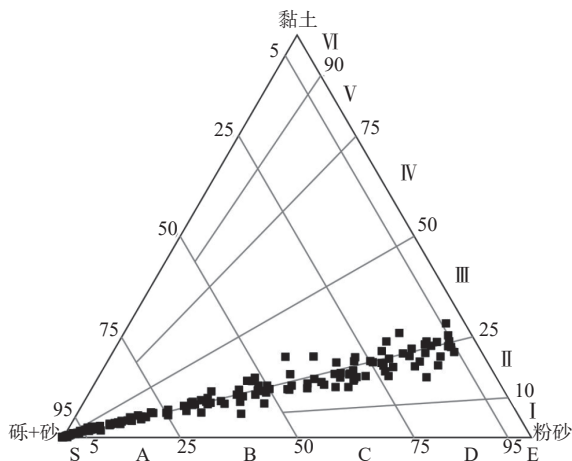


图5 沉积动力分区三角图式

Fig.5 The Flemming triangle diagram

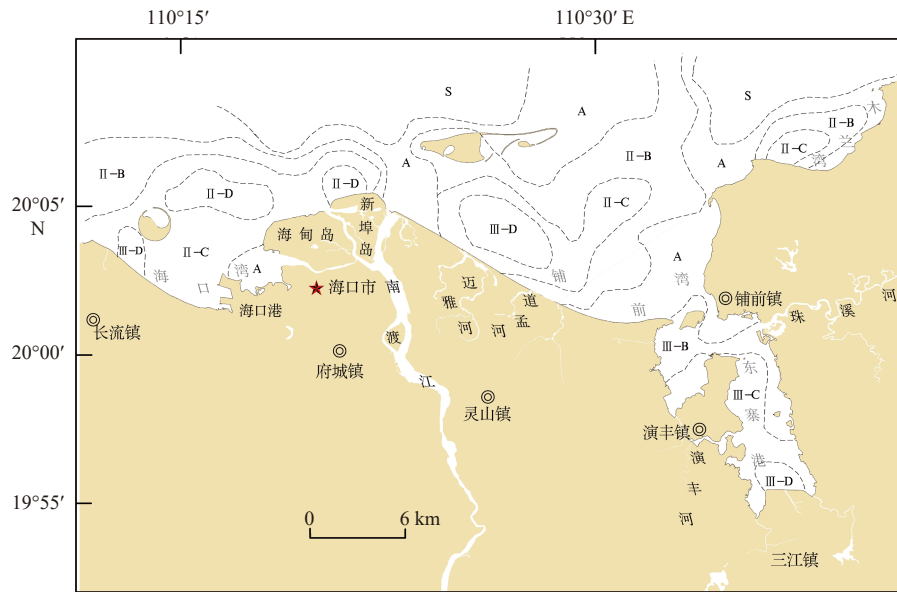


图 6 表层沉积物 Flemming 分区

Fig.6 Sedimentary dynamic environment

新埠岛、海甸岛和海口港附近南渡江河口区,泥沙运转和三角洲地貌塑造主要动力为径流和波浪,其次为潮流,动力分区集中在 A 区,水动力较强。河口区径流和波浪作用具有季节性变化^[35],洪季时,径流起主导作用,此时南渡江径流量和输沙量分别占全年的 80%、90%,河口喷射流将泥沙向海输送,辐射范围可达口门外 15 m 等深线附近^[24],并形成边缘堆积沙嘴和湾口拦沙坝,因此,洪季时河口区为“沉积汇”;枯季时,径流量和输沙量大幅减少,波浪起主导作用,波生沿岸流和潮流对河口的堆积沙体不断侵蚀并向西输运,最终形成西向沿岸沙坝,枯季河口区转变为“沉积源”。由于多种水动力的搬运和改造,使得沉积物分选性变化大,系数介于 0.40~2.10,分选性较好—差。

东寨港为半封闭海湾,水体对外交换能力差,沉积物主要分布于Ⅲ区,动力条件进一步减弱。沉积物以细颗粒砂质粉砂、粉砂质砂和粉砂为主,平均粒径集中在 $3.75\Phi \sim 6.25\Phi$ 。由于珠溪河、演丰河流量较小,径流动力较弱,且泥沙输入有限,沉积物在水体扩散过程中因流速骤减,未及分选就快速混合堆积,因此,分选性差—极差,系数介于 1.30~3.00。

4.2 沉积物输运趋势

研究区沉积物输运趋势(图 7)显示,北部和东北部沉积物存在 EW 向输运趋势,这与琼州海峡 EW 向往复流的运动形式相吻合,其水动力条件主要受西口(北部湾)和东口(南海)2 个独立潮波系统

所叠加影响,由于西口的潮时早于东口,且潮差为东口的数倍,从而形成以“涨潮东流、落潮西流”为主的潮流特征^[25]。

铺前湾海域沉积物呈现由海向岸的搬运趋势,其北部和中部沉积物输运方向为 S—WS 向,与研究区全年 NE 向浪(常浪向)和 N 向浪(强浪向)^[22]作用方向一致。铺前湾具有典型螺线海岸的特征,当 NE 向优势浪涌入,会在海湾东部形成波影区,波能减弱,随着每年 7—9 月 NW 向浪逐渐增多^[22,31],在与 E 向涨潮流的共同作用下,铺前湾东部沉积物呈现出 E—SE 向输运趋势。

如意人工岛由白沙浅滩堆填改建而成,该区域存在 1 个明显的汇聚中心,沉积物由四周向此输运聚集。在全新世海侵(距今约 6000 a)过程中,海水开始侵入琼州海峡并对底床进行侵蚀,海峡水道粗颗粒沉积物经再搬运作用堆积于铺前湾口,形成 EW 向线状白沙浅滩^[36],即湾口沙坝,该作用一直持续至今。如意岛西南方向为南渡江干流河口门,此区域泥沙输运趋势为 NE 向。由于如意岛对 N 向和 NE 向优势浪的遮挡作用,导致其南部波影区波浪消能,海水动力减弱,此处沉积物无明显输运趋势。

根据龙塘水文站资料显示,南渡江年平均径流量为 $66.81 \times 10^8 \text{ m}^3$,年平均输沙量 $53.12 \times 10^4 \text{ t}$ ^[37],径流入海过程受到潮流作用影响,E 向涨潮流对其进行顶托,使得粗颗粒推移质沉积物在口门附近堆积,W 向落潮流与下泄径流相互叠加,携带大量细

颗粒悬移质泥沙向西侧运移。此外,研究区海域NE向优势浪与新埠岛和海甸岛成锐角相遇并形成沿岸流,在侵蚀海岸的同时引起强烈的W向沿岸输沙活动,因此,表层沉积物整体输运趋势由东向

西,在近岸一侧由于波浪作用进一步加强,沉积物输运趋势转为S—SW向。

东寨港深入内陆,相比海口湾和铺前湾,潮流、波浪动力作用均大幅减弱,沉积物无明显输运趋势。

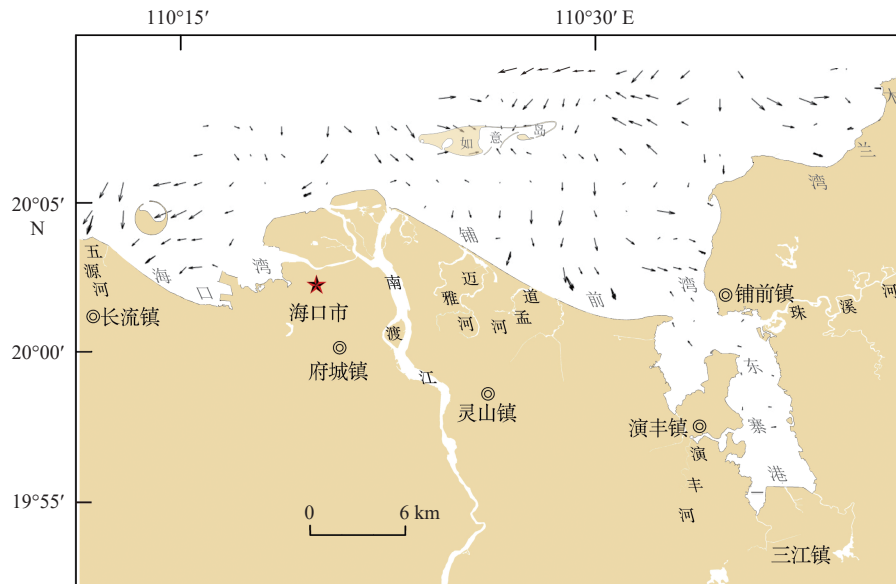


图7 表层沉积物输运趋势

Fig.7 Trends of surface sediment transport

5 结论

(1)海南岛北部海湾表层沉积物主要类型为砾、砂质砾、砂、粉砂质砂、砂质粉砂和粉砂。由南往北,沉积物粒度依次呈“细—粗”旋回式变化,其中,砂分布面积最广,分布于南渡江口门、铺前湾东部和木兰湾沿岸,分选性较好;粉砂主要分布于东寨港、海口湾和铺前湾中西部,分选性较差;砾和砂质砾主要分布于北部琼州海峡,分选性极差。

(2)研究区海域沉积物整体偏高能环境。其中,北部海峡受潮余流影响,动力条件最强;海湾中部水动力呈减弱趋势,受波浪和潮流共同作用;近岸海域主要受波浪改造作用,水动力较强;河口区波浪、径流和潮流作用具有季节交替性,水动力较强;东寨港水体对外交换能力差,动力进一步减弱。由北向南随着水深变浅,潮流动力逐渐减弱,波浪动力逐渐增强。

(3)受琼州海峡EW向往复流的影响,研究区北部表层沉积物存在EW向输运趋势。铺前湾和木兰湾海域沉积物由海向岸搬运趋势明显,并与波浪和涨潮流作用方向一致,白沙浅滩处(如意人工岛)为一个沉积汇聚中心。海口湾表层沉积物输运

方向整体向西,在近岸一侧由于波浪作用的加强,方向转为S—SW向。东寨港沉积物无明显输运趋势。

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] 徐方建, 李安春, 黄敬利. 东海陆架浙-闽沿岸泥质沉积研究进展 [J]. 海洋通报, 2012, 31(1): 97-104.
- [3] 王雪木, 瞿洪宝, 熊元凯, 等. 海南昌化江入海口底表沉积物粒度特征及输运趋势 [J]. 现代地质, 2022, 36(1): 88-95.
- [4] 项立辉, 安成龙, 张晓飞, 等. 连云港近岸海域表层沉积物沉积特征及粒径趋势分析 [J]. 应用海洋学学报, 2015, 34(3): 317-325.
- [5] 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.
- [6] 石学法. 海洋沉积环境的基本参数和研究流程 [J]. 海洋科学, 1992, 6: 30-33.
- [7] 肖晨曦, 李志忠. 粒度分析及其在沉积学中应用研究 [J]. 新疆师范大学学报(自然科学版), 2006, 3: 118-123.
- [8] MCLAREN P, BOWLES D. The effects of sediment transport on grain-size distributions[J]. Journal of Sedimentary Research, 1985, 55: 457-470.
- [9] ASSELMAN, NATHALIE E M. Suspended sediment dynamics in a large drainage basin: the River Rhine[J]. Hydrological Processes, 1999, 13(10): 1437-1450.

- [10] POIZOT E, MEAR Y, THOMAS M, et al. The application of geostatistics in defining the characteristic distance for grain size trend analysis[J]. *Computers and Geosciences*, 2006, 32(3): 360-370.
- [11] GAO S, COLLINS M. A critique of the McLaren method for defining sediment transport paths: discussion[J]. *Journal of Sedimentary Petrology*, 1991, 61(1): 143-146.
- [12] GAO S, COLLINS M. Net sediment transport patterns inferred from grain-size trends, based upon definition of "transport vectors"[J]. *Sedimentary Geology*, 1994, 90(1/2): 47-60.
- [13] GAO S, COLLINS M. Analysis of grain-size trends, for defining sediment transport pathways in marine environments[J]. *Coastal Research*, 1994, 10(1): 70-78.
- [14] 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.
- [15] 陈斌, 印萍, 徐刚, 等. 浙江内陆架表层沉积物粒度分布特征及运移趋势[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2016, 36(6): 95-100.
- [16] 张连杰, 赵博, 王鹏, 等. 大连湾海域沉积动力环境与物质输运[J]. *海洋地质前沿*, 2019, 35(6): 12-19.
- [17] PULLEY S, GOUBET A, MOSER I, et al. The sources and dynamics of fine-grained sediment degrading the freshwater pearl mussel (*Margaritifera margaritifera*) beds of the River Torridge, Devon, UK[J]. *Science of The Total Environment*, 2019, 657(20): 420-434.
- [18] 徐方建, 李安春, 李铁刚, 等. 东海内陆架 EC2005 孔沉积物粒度分形特征[J]. *地质学报*, 2011, 85(6): 1038-1044.
- [19] 王奎博, 张丽, 王瑞琪, 等. 海南岛海岸侵蚀脆弱性评价[J]. *遥感技术与应用*, 2022, 37(5): 1149-1158.
- [20] 周晗宇, 陈沈良, 钟小菁, 等. 海口湾西海岸海滩沉积物与海滩稳定性分析[J]. *热带海洋学报*, 2013, 32(1): 26-34.
- [21] 曾维特, 杨永鹏, 张东强, 等. 海南岛北部海湾沉积物重金属来源、分布主控因素及生态风险评价[J]. *环境科学*, 2018, 39(3): 1085-1094.
- [22] 滕学春, 吴秀杰. 琼州海峡的波浪特征[J]. *黄渤海海洋*, 1993, 4: 1-8.
- [23] 陈达森, 陈波, 严金辉, 等. 琼州海峡余流场季节性变化特征[J]. *海洋湖沼通报*, 2006, 2: 12-17.
- [24] 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.
- [25] 中国海湾志编纂委员会. 中国海湾志: 第十一分册, 海南省海湾[M]. 青岛: 海洋出版社, 1999.
- [26] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫局. 海洋监测规范 第3部分: 样品采集、贮存与运输: GB 17378.3—2007[S]. 北京: 中国标准出版社, 2007.
- [27] FOLK R L, WORD W. Brador rivers bar: a study in the significance of grain size parameters[J]. *Journal of Sedimentary Research*, 1957, 27: 3-27.
- [28] 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: 937-968.
- [29] 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.
- [30] 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.
- [31] 陈亮, 张玉芬, 李团结, 等. 琼州海峡及周边海域沉积环境及近万年以来沉积演化[J]. *地球科学(中国地质大学学报)*, 2014, 39(6): 696-704.
- [32] 陈宜展, 曹永港, 黄艳松, 等. 海口湾海域波浪特征分析[J]. *海洋工程*, 2019, 37(2): 96-103.
- [33] 戴志军, 陈子燊, 欧素英. 海南岛南渡江三角洲海岸演变的波浪作用分析[J]. *台湾海峡*, 2000, 4: 413-418.
- [34] 胡泰桓, 李志强, 朱士兵, 等. 琼州海峡南岸海滩剖面动态变化特征分析[J]. *应用海洋学学报*, 2021, 40(4): 678-687.
- [35] 吴创收, 杨世伦, 罗向欣, 等. 近四十年南渡江水下三角洲的冲淤变化及其主控原因[J]. *海洋科学进展*, 2011, 29(3): 339-345.
- [36] 陈海洲, 王宝灿, 谢琳. 海口白沙浅滩的形成与演变[J]. *海岸工程*, 2011, 30(4): 37-45.
- [37] 林尤文, 于森, 朱丽蓉, 等. 南渡江水沙变化特征及其趋势分析[J]. *人民珠江*, 2020, 41(12): 15-20.

Grain size characteristics and transport trends of surface sediment in the bays of northern Hainan Island

ZENG Weite^{1,2}, ZHANG Dongqiang^{1,3*}, LIU Bing^{1,4}, YANG Yongpeng^{1,3},
ZHANG Hangfei⁵, WU Duoyu¹, WANG Xiaolin^{1,3}

(1 Hainan Key Laboratory of Marine Geological Resources and Environment, Haikou 570206, China; 2 Marine Geological Survey of Hainan Province, Haikou 570206, China; 3 Hainan Geological Survey, Haikou 570206, China; 4 Hainan Marine Geological Survey, Haikou 570206, China; 5 No.207 Geological Team, Sichuan Bureau of Geology and Mineral Resources, Leshan 614000, China)

Abstract: Characteristics of grain size distribution from 192 surface sediment samples collected in the bays of northern Hainan Island (Haikou Bay, Puqian Bay, Mulan Bay, and Dongzhai Port) were analyzed and the types of sediment were classified. The depositional dynamics were analyzed using Flemming triangle diagram, GSTA model was utilized to identify sediments transport trends. The modern sedimentary characteristics and land sea interaction in this area were revealed, and the scientific basis was provided for coastal erosion protection, channel safety assurance, and marine environment governance. Results show that the main types of surface sediments in the study area are gravel, sandy gravel, sand, silty sand, sandy silt, and silt. The distribution areas of sand were the widest, followed by silty sand. From south to north, the grain sizes of sediments changed cyclically. The sorting of surface sediments in estuary and seacoast was good, while it was poor in Dongzhai Harbor and middle of Qiongzhou Strait. The study area was dominated by high-energy environments. Sediment transport modes included river transport, coastal erosion, coastal transport, and seabed erosion. The trend of surface sediments transport in the northern part of study area was east to west, which was mainly influenced by the strong tidal residual current in Qiongzhou Strait. Baisha Shoal was a sedimentary convergence center, which was formed by the combined effects of waves and currents. The dominant sedimentary dynamics of estuary, included waves, runoff and tidal current, were alternated seasonally. The accumulated sand body that formed at estuary during flood season was eroded by northeastern waves and western coastal current, and then the eroded sediments were transported westward to Haikou Bay. Sediments of the nearshore area were transformed by wave. Sediments in the Puqian Bay and Mulan Bay were transported from sea to shore in a trend consistent with the directions of wave action and flood currents. The hydrodynamic of Dongzhai Port was weak, with no obvious trend of sediment transport. There was no obvious transport trend of sediment in the Dongzhai Port.

Key words: Hainan Island; northern bay; sediment; grain size; transport trend