

海南三亚海域沉积物分布特征及其沉积环境指示

张亮^{1,2}, 刘文涛^{1,2}, 贾磊^{1,2}, 夏真^{1,2}, 胡梦茜^{1,2}, 崔振昂^{1,2}

ZHANG Liang^{1,2}, LIU Wentao^{1,2}, JIA Lei^{1,2}, XIA Zhen^{1,2}, HU Mengxi^{1,2}, CUI Zhen'ang^{1,2}

1. 自然资源部海底矿产资源重点实验室, 广东 广州 510760;

2. 中国地质调查局广州海洋地质调查局, 广东 广州 510760

1. Key Laboratory of Marine Mineral Resource, Ministry of Natural Resources, Guangzhou 510760, Guangdong, China;

2. Guangzhou Marine Geological Survey, China Geological Survey, Guangzhou 510760, Guangdong, China

摘要:2015—2016年开展1:5万三亚海岸带综合地质调查,在三亚近岸海域采集328站位表层沉积物、完成5站位定点海流观测,获取了三亚海域表层沉积物粒度分布特征和水动力特征,并研究其指示的沉积环境。结果表明,研究区沉积物类型主要是粘土质粉砂、砂、砂质粉砂、砾石质砂、粉砂和粉砂质砂,其中粘土质粉砂是最主要沉积物类型,平均粒径为0.22~7.37 ϕ 。沉积物输运趋势显示,沿岸不同岸段出现侵蚀淤积趋势,东西瑁洲岛离岸输运,研究区南部存在多个沉积中心。海流结果表明,研究区属往复流,涨潮方向为西北向,落潮方向为东南向,余流方向主要为东南向。对水深、沉积物粒度参数进行了主成分分析和聚类分析,综合考虑水动力、物源和地形因素及其相互作用,将研究区划分为3类沉积环境。这种划分方法能揭示不同控制因素下的沉积环境差异,研究结果可为三亚海域生态环境保护、海洋工程建设提供科学依据。

关键词:沉积物;粒度;水动力;输运趋势;聚类;海南三亚

中图分类号:P736.21;P5 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-2552(2021)02/03-0341-09

Zhang L, Liu W T, Jia L, Xia Z, Hu M X, Cui Z A. Distribution characteristics of sediments and indication significance of sedimentary environment in the Sanya area, Hainan Province. *Geological Bulletin of China*, 2021, 40(2/3): 341-349

Abstract: In order to obtain the grain size distribution characteristics and hydrodynamics of surface sediments in Sanya area and to study the indicative significance of sedimentary environment, a total of 328 surface sediments samples were collected and five fixed-point ocean current observations were completed in the coastal waters of Sanya during the 1:50000 comprehensive geological survey in this area from 2015 to 2016. The results show that the types of sediments in the study area are mainly clayey silty sand, sand, sandy silty sand, gravelly sand, silty sand and silty sand, with the mean size 0.22~7.37 ϕ , among which clayey silty sand is the most important. The grain size transport trend indicates that there are an erosion-deposition trend in some sectors along the coastline, offshore transport of the Maozhou island and multiple deposition centers in the south of the study area. The results show that there exists a reciprocating current in the study area, the direction of high tide is northwest, the direction of ebb tide is southeast, and the direction of residual current is southeast. Based on the principal component analysis and cluster analysis, according to the hydrodynamic, provenance and topographic factors as well as their interactions, the study area is divided into three types of sedimentary environments. This division way can reveal the difference in the sedimentary environments under different controlling factors. The results of the study can provide a scientific basis for ecological environmental protection and marine engineering construction in Sanya.

Key words: sediments; grain size; hydrodynamic; transportation trend; clustering; Sanya, Hainan Province

河口海岸地区位于海陆交互地带,地质环境复杂多样,对周围环境变化响应敏感,其沉积物特征

能反映动力条件及人类活动的影响,记录沉积环境演变。粒度作为沉积物基本特征,是识别沉积环

收稿日期:2020-04-15;修订日期:2020-12-02

资助项目:中国地质调查局项目《海南岛东北部沿海综合地质调查》(编号:DD20190308)

作者简介:张亮(1983-),男,硕士,高级工程师,从事海洋沉积学研究。E-mail:zhangliang1698@126.com

境、判断沉积物来源的重要指标^[1-6]。根据粒度参数组合方式,研究沉积物输运趋势^[7],分析水动力条件^[8],研究对地球化学元素的粒度控制效应等^[5],对海砂资源评价具有重要指示意义^[1,9]。

三亚位于海南岛南部,附近是一系列开敞的海湾,形态呈对数螺旋形,周围有三亚河等注入,受波浪、潮汐影响较大。随着海南自贸区建设和重大用海工程的规划实施,如凤凰岛的填海建设,以及海洋旅游快速发展等,三亚近岸海域出现侵蚀淤积、海滩泥化黑化、生态退化、环境污染等问题,尤其是三亚新机场规划建设,将导致哪些环境问题,这些都引起了政府部门的重视和科学学者的关注。很多学者从地貌环境演化^[10]、三亚湾沉积环境研究^[6]、三亚湾海滩整治^[11-12]、水动力^[13-14]、三亚港淤积^[15-16]、珊瑚礁^[17-19]、岸线蚀淤^[20-22]等方面开展了系统研究。本文根据 2015 年和 2016 年在三亚海域开展的表层沉积物取样和水动力观测资料,分析表层沉积物粒度特征,进行沉积物输运趋势分析,识别控制沉积环境因子,从更大空间范围对三亚近海进行沉积环境分析,以期对三亚海域环境治理、港口开发、工程建设提供参考。

1 区域概况

研究区位于三亚市附近,范围东起鹿回头半岛南侧,西至南山岭(大小洞天景区),并向海延伸约 15 km,涵盖整个三亚湾、红塘湾(图 1)。研究区有三亚河、肖旗河等河流注入,沿岸沙坝发育,向海一侧发育成沙滩^[12],三亚河口形成沙坝-潟湖地貌,还分布有海蚀地貌^[14]。研究区海底地貌单一,较平坦,东瑁洲岛和西瑁洲岛在研究区中部。近岸主要受波浪作用,同时受潮流作用和生物活动影响。冬季(10 月—次年 5 月)盛行东北风,夏季(5—10 月)盛行西南风,受季风影响,波浪来向也随之变化。近岸海区波浪冬季以 E 或 NE 向为主,夏季主要为 S 或 SW 向^[10],SE 向因鹿回头半岛阻挡,影响较小,因此三亚近岸海域的风浪以 S 向和 SW 向为主^[12]。根据红塘湾附近测站一年波浪资料统计结果,年平均有效波高为 0.42 m,最大波高为 1.83 m,大浪主要出现在 SSE 向,其次是 SW 向^[14]。本区潮汐为不正规日潮混合潮型^[12],以日潮为主,落潮流大于涨潮流^[23],潮流动力较弱^[13,23],多年平均潮差 0.79 m,最大潮差 2.26 m^[23]。

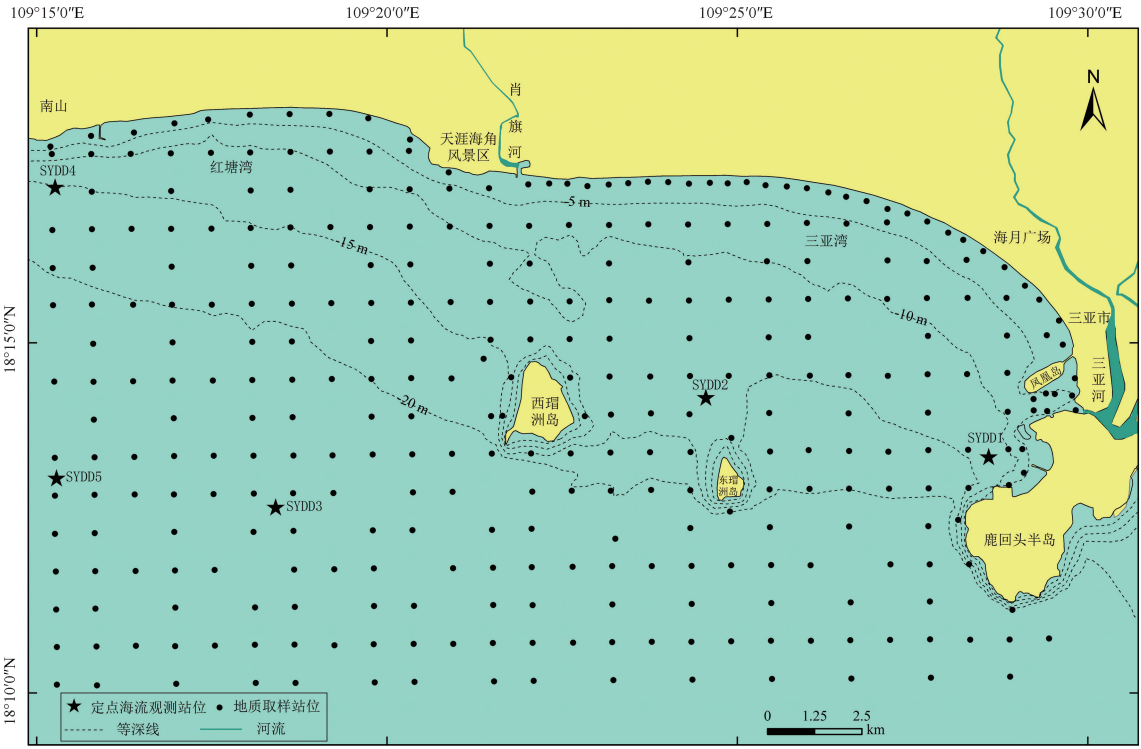


图 1 三亚近岸海域采样站位

Fig. 1 Location of sampling stations in the Sanya coastal waters

2 样品采集与分析方法

2015年8月和2016年7月在研究区进行表层地质取样328站位(其中2015年100站位,2016年228站位)。2016年完成3个站位同步定点海流观测,2017年完成2个站位同步观测,每次时间长度25 h,共5站位(图1)。

地质取样采用国产抓斗取样器,取样深度5~10 cm;定点海流观测使用ADCP,仪器型号为美国RTI公司生产的RTI 600 kHz和300 kHz、美国Sontek公司生产的ADP 500 kHz;定位使用国产南方锐镜S86T双频接收机(水平精度厘米级),调查船无法进入的浅滩地区,租用小型渔船(吃水深度小于1 m)趁高潮期间驶入,采用国产集思宝G3手持GPS导航(水平定位精度3~5 m)。在实验室对沉积物样品进行粒度测试,激光粒度仪使用英国马尔文公司的Mastersizer 2000型(范围0.02~2000 μm ,可重复性小于0.5%)、Mastersizer 3000型(范围0.01~3500 μm ,可重复性小于0.5%)。沉积物粒度参数采用福克和沃德公式计算,沉积物命名方案以Shepard^[24]的沉积物分类方法为基础,包括砾级(大于2 mm)组分在内,将含量超过25%的粒级组分参与定名,应用Gao-Collins方法计算沉积物输运趋势^[25]。沉积物粒度测试在海南省地质测试研究中心和广州海洋地质调查局实验测试所完成。

3 分析结果

3.1 沉积物粒度参数

研究区主要的沉积物类型为粉砂质砾石、砾石质砂、砂、粉砂质砂、砂质粉砂、粉砂和粘土质粉砂7种类型(图2)。粘土质粉砂范围最广,主要分布在研究区南部、红塘湾、鹿回头半岛西侧海域,零星分布于三亚河口、东西瑁洲岛附近。砂主要位于沿海岸线的浅水区、西瑁洲岛至天涯海角(肖旗河)之间海域。砂质粉砂主要见于红塘湾南部、三亚湾北部、鹿回头半岛西侧、东瑁洲岛东部海域。砾石质砂只分布在西瑁洲岛南部。粉砂分布较少,呈点状分布于研究区的中部和南部。粉砂质砂主要存在于三亚湾西部及南部,东部也有分布,零星分布于三亚河口、鹿回头半岛、东西瑁洲岛附近。粉砂质砾石仅分布于西瑁洲南部,与砾石质砂相邻,沉积

物粒径较粗。

研究区沉积物较细,平均粒径范围为0.22~7.37 ϕ ($\phi=-\log_2 d$, d 单位mm),平均值为5.37 ϕ ,其中较粗的沉积物(0~2 ϕ)分布于西瑁洲岛和天涯海角之间海域、肖旗河口、红塘湾海滩、三亚河口及三亚湾部分海滩附近(图3)。平均粒径分布规律性明显,呈现出近岸(岛)、河口区粗,随着远离海岸(岛)和河口,沉积物粒度逐渐变细。分选系数范围为0.51~4.61,平均值为1.98,总体分选性差—中等(小于1)的沉积物主要分布于三亚湾—红塘湾海滩附近,并从北至南分选性变差。偏态范围为-0.66~0.75,平均值为0.09,其中红塘湾中部、肖旗河口、东瑁洲南部、西瑁洲北部和南部海域为负偏,沉积物偏粗。三亚附近海域峰态范围为0.55~6.27,平均值为5.30,呈现窄峰态。

研究区沉积物组分主要是砂、粉砂和粘土,仅西瑁洲岛沉积物含有少量砾石(图4)。沉积物砂含量范围为0.94%~99.97%,平均值为29.74%,平均粒径的平面分布类似,呈现近岸(岛屿)砂含量高、远岸(岛屿)砂含量低的特点。粉砂含量范围为0.03%~78.44%,平均值为52.40%,平面分布和砂含量分布规律相反,表现为近岸(岛)低(含量低于20%)、离岸(岛)海域高。粘土含量范围为0~33.57%,平均值为16.61%,平面分布和粉砂含量分布规律相同,表现为近岸(岛)粉砂含量低,低于5%,离岸(岛)和鹿回头半岛海域粉砂含量高,含量高于20%。

3.2 沉积物输运趋势

根据沉积物输运趋势结果,三亚近岸海域分为6个不同区域(图5),分别位于沿岸浅水区和研究区南部海域(ABCDE)。另外,东西瑁洲岛附近海域为离岸输送,处于侵蚀状态。

沿岸浅水海域,顺海岸线分布,呈EW走向,范围从东部鹿回头到南山附近海域,可将岸段细分为3个部分,分别为东南部淤积、中部侵蚀和西部淤积趋势。沿岸沉积物输运趋势具体表现为:①沿岸东南部,从鹿回头半岛南端到三亚市海月广场附近海域,其东部沉积物输运方向主要为NE向,表现为鹿回头沿岸输送,沉积物搬运至凤凰岛东北部,西部沉积物也运移至此沉积,导致三亚湾局部岸段处于淤积状态。②沿岸的中部海域,范围是海月广场至天涯海角,除肖旗河外,该岸段沉积物输运方向主

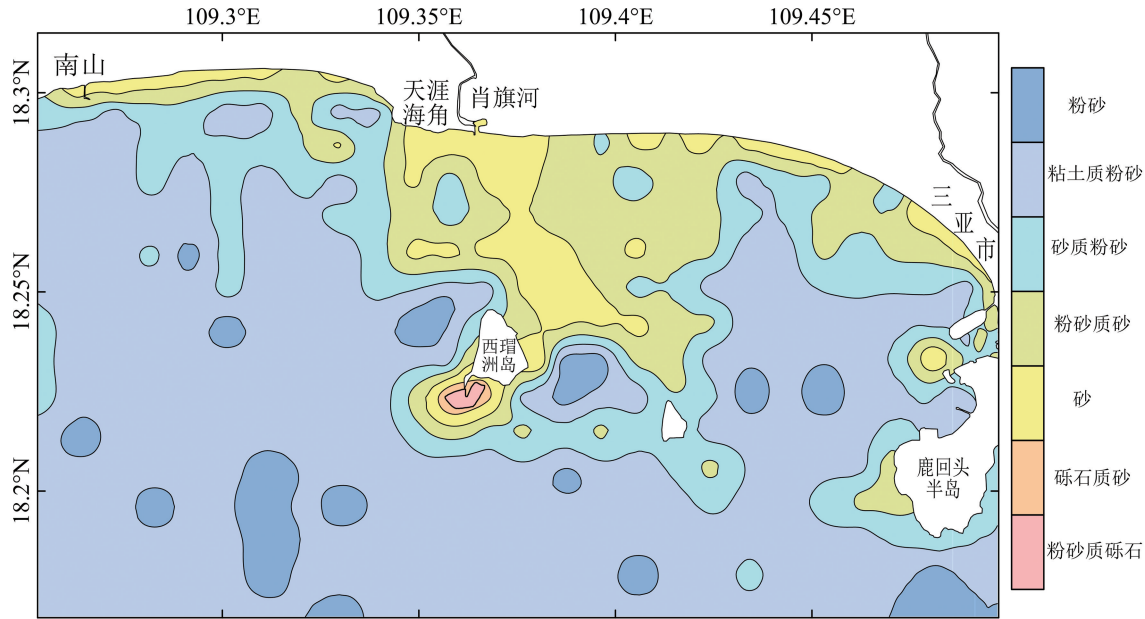


图 2 三亚近岸海域沉积物类型分布

Fig. 2 Distribution pattern of sediments in the Sanya coastal waters

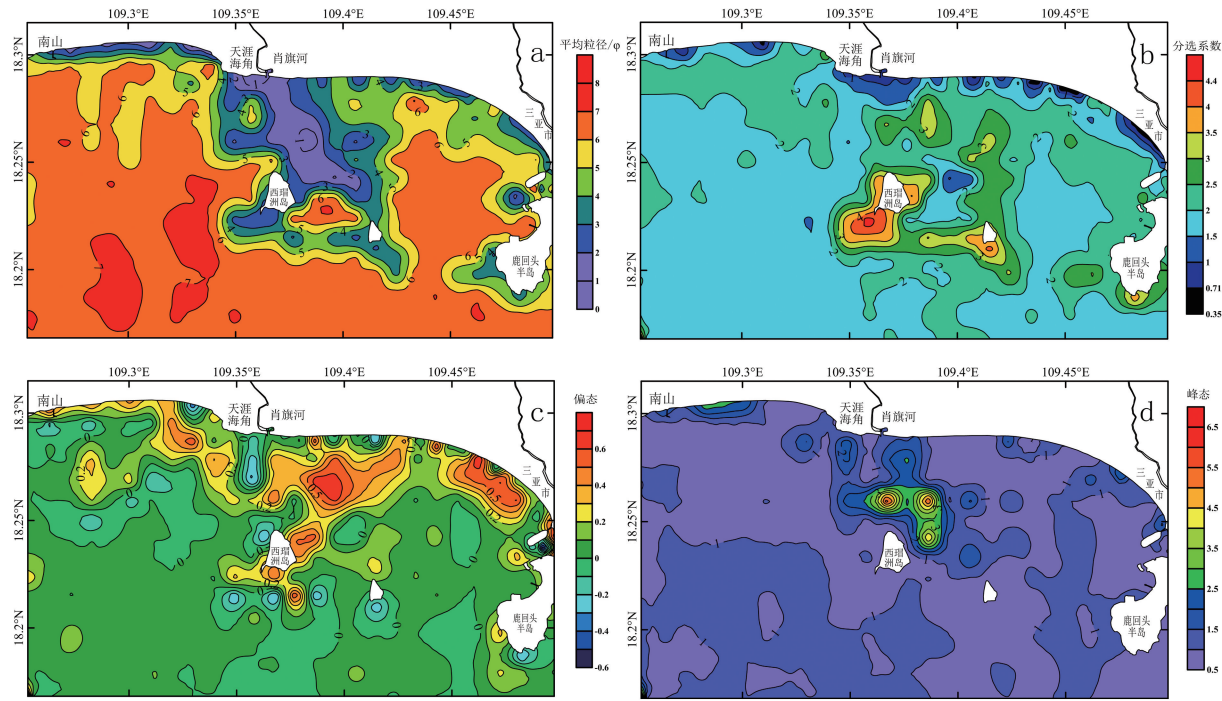


图 3 三亚近岸海域沉积物粒度参数分布

Fig. 3 Distribution patterns of the grain size parameters of sediments in the Sanya coastal waters

a—平均粒径;b—分选系数;c—偏态;d—峰态

要 为 偏 南 向, 岸 段 处 于 侵 蚀 状 态。③ 沿 岸 的 西 部, 沉 积 物 输 运 方 向 为 NNE 向, 与 岸 线 几 乎 垂 直, 向 岸 方 向, 呈 现 淤 积 状 态, 主 要 在 沿 岸 流 和 外 海 潮 流 作

用 下, 输 送 的 泥 沙 在 近 岸 发 生 沉 积。
在 研 究 区 南 部 和 鹿 回 头 半 岛 西 侧 海 域, 存 在 5 个 汇 聚 中 心, 周 围 沉 积 物 向 各 中 心 位 置 搬 运, 其 中 位

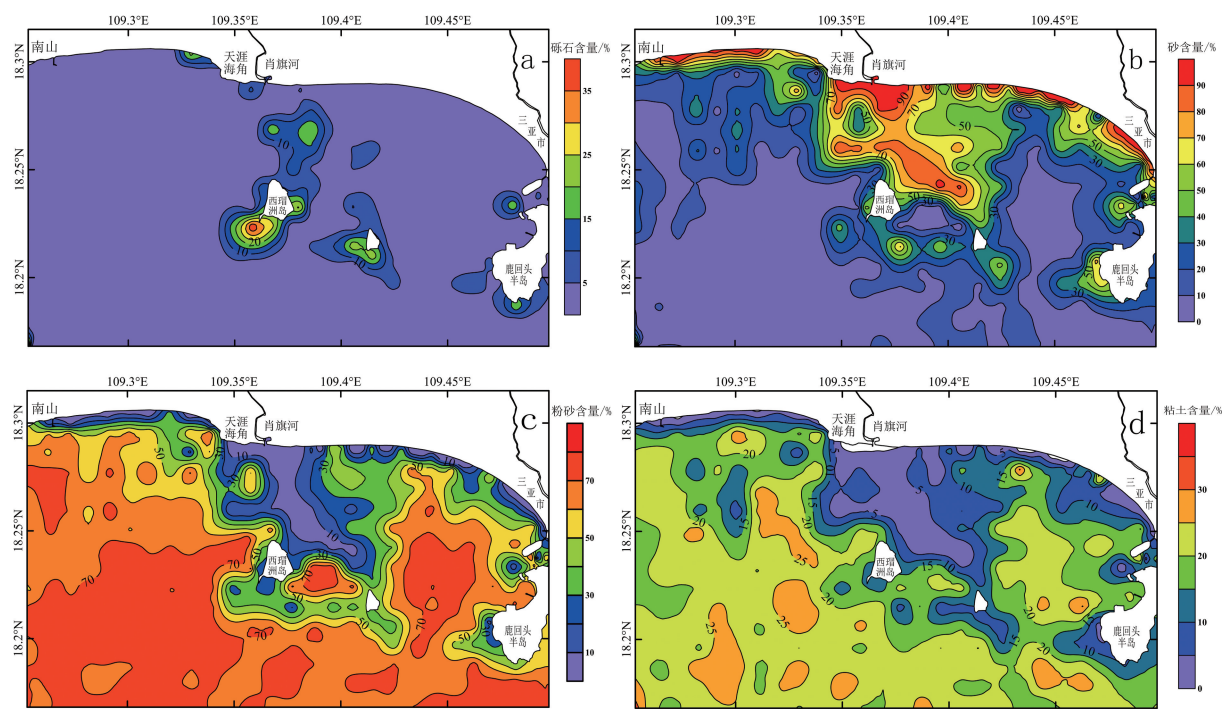


图 4 三亚近岸海域沉积物粒度组分含量平面分布

Fig. 4 Distribution of grain size component contents of sediments in the Sanya coastal waters
a—砾石;b—砂;c—粉砂;d—粘土

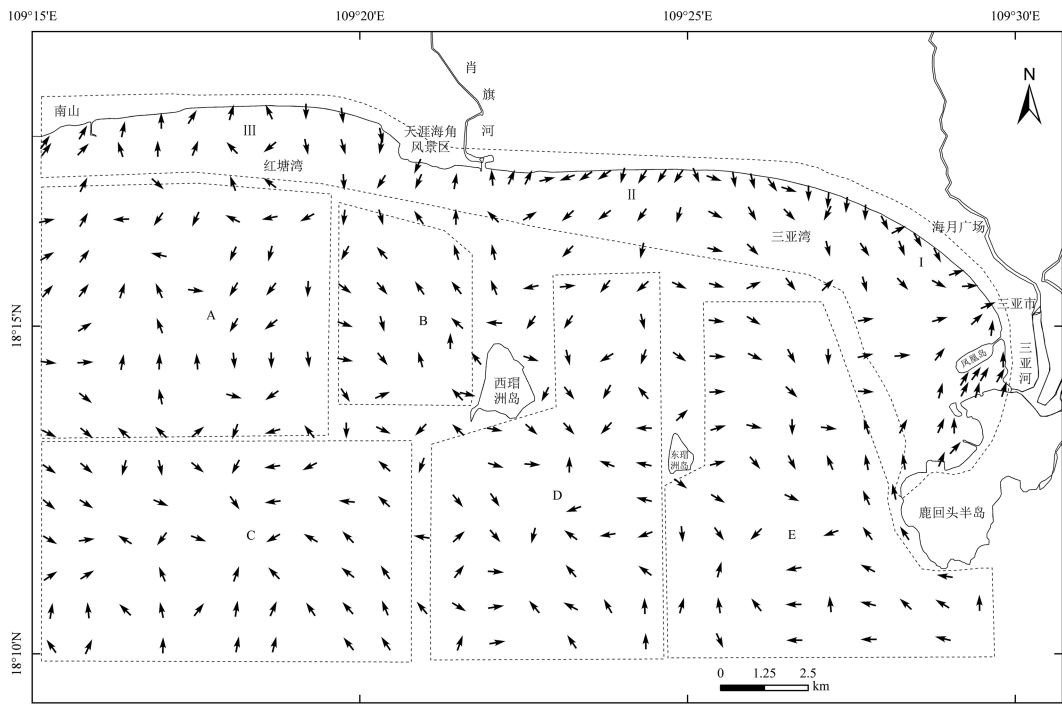


图 5 三亚近岸海域沉积物运输趋势

Fig. 5 Transportation trend of sediments in the Sanya coastal waters

于西瑁洲岛西侧 3 个,东西瑁洲岛之间存在 1 个汇聚中心,东瑁洲岛和鹿回头半岛之间 1 个沉积汇集中心。

3.3 水动力观测结果

根据同步周日海流观测结果(表 1),研究区为不规则半日潮往复流,涨潮主要方向为 NW 向,落潮主要方向为 SEE 向,在鹿回头半岛西侧 SYDD1 站位涨潮流为 NNE 向,落潮流为 SSW 向,红塘湾海域涨潮流为 W 向,落潮流为 E 向。潮流流速随水深增大而增大,深水区潮流流速高于浅水区,西部流速大于东部,三亚河口附近流速最低,落潮流速略大于涨潮。潮位增水过程由东南向西北,在东、西瑁洲岛的地形遮挡作用下,北部潮位升高过程近似呈 SN 向,三亚湾内部潮位上涨最慢,时间最晚。

余流是从实测海流中分离出来的非周期性部分,可用于研究泥沙运移。研究表明,自东向西,余流方向从 N 向逐步转为 NE 向,最后为 E 向。SYDD1 站位余流为 N 向,大致沿着海岸线走向运动(表 1)。从流速分布看,西部余流大于东部,南部大于湾内,鹿回头半岛西侧的三亚湾内部余流最小。SYDD2 在东西瑁洲岛的之间,因“狭管效应”,海流从开阔海域经过狭窄地段,流速增大,通过后流速降低。SYDD4 在开敞的近岸海域,等深线密集,水深变化大,余流较大(表 1)。

3.4 聚类分析结果

3.4.1 R 型聚类分析

将沉积物平均粒径、分选系数、偏态、峰态、砾石含量、砂含量、粉砂含量、粘土含量和水深作为聚类指标,进行 R 型聚类分析,把具有相同聚集趋势的

参数合并,对指标进行压缩,结果可分为 3 个聚类(图 6)。聚类 1 为偏态、峰态、分选系数、平均粒径、砾石含量、粘土含量和水深,聚类 2 为砂含量,聚类 3 为粉砂含量。

为了识别控制沉积环境的因子,对 328 个站位的粒度参数和组分含量进行主成分分析,将粒度参数组合成一个新的、更小的新变量集进一步分析。结果显示(表 2),成分 1 和成分 2 的主成分贡献累积方差达 72.24%,将其作为主要因素考虑。

成分 1 对各项粒度参数均有控制作用,贡献方差达 53.79%,对平均粒径、粉砂含量、粘土含量等控制作用较强,与水深关系较大,这与 R 型聚类分类的结果一致,为研究区控制沉积物分布特征的最主要因素,而砾石含量、砂含量、分选系数、偏态和峰态为负载荷。因子 1 反映了研究区内粒度参数受水动力控制,对于近岸浅水等波浪主导区域,沉积物粒度较粗,分选性较好,在波浪掀沙、潮流输沙作用下,离岸愈远,水深越深,沉积物分选性较差,以粉砂、粘土为主,平均粒径较细。因子 2 贡献方差为 18.45%,主要控制砾石含量和分选系数,而对其他粒度参数控制极弱。从砾石含量的平面分布看,东瑁洲岛、西瑁洲岛近岸、肖旗河口南侧、三亚河口、鹿回头半岛南部含量较高,该海域分选系数也较差,这主要与物源有关,物质来源是珊瑚礁体破坏产物和末次冰期残存砂砾质风化物质。东、西瑁洲岛珊瑚礁块体,肖旗河口的砂砾质物质,在波浪作用下发生破碎,因物源和动力环境复杂,分选性较差。

表 1 三亚附近海域定点站位海流及余流特征

Table 1 Current and residual current characteristics of fixed stations in the Sanya coastal waters

站位	涨潮最		落潮最		余流		时间
	大流速	方向	大流速	方向	流速	方向	
	$/(m \cdot s^{-1})$		$(m \cdot s^{-1})$		$(m \cdot s^{-1})$	$/^{\circ}$	
SYDD1	0.51	NNE	0.61	SSW	0.01	26	2016/09/02-03
SYDD2	0.46	NWW	0.48	SEE	0.07	325	2016/09/01-02
SYDD3	0.71	NWW	0.86	SEE	0.04	38	2016/09/01-02
SYDD4	0.74	W	0.76	SEE	0.08	95	2017/08/07-08
SYDD5	0.67	NWW	0.82	SEE	0.07	70	2017/08/07-08

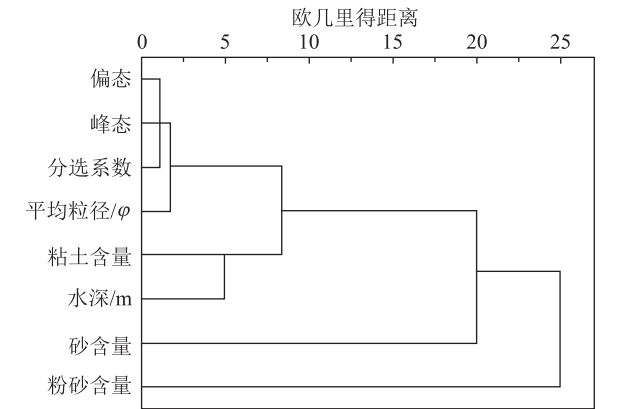


图 6 三亚近海海域沉积物粒度参数和平均水深 R 型聚类分析

Fig. 6 The R-type clustering analysis of water depth and grain size parameters of the sediments in the Sanya coastal waters

表 2 主因子分析负荷矩阵和贡献累积方差

Table 2 Principal factor analysis load matrix and contribution cumulative variance

因素	成分 1	成分 2
砾石含量	-0.42	0.84
砂含量	-0.97	-0.16
粉砂含量	0.97	0.01
粘土含量	0.93	0.07
平均粒径/ ϕ	0.97	-0.14
分选系数	-0.03	0.91
偏态	-0.51	-0.10
峰态	-0.45	-0.13
水深/m	0.73	0.24
累计	53.79%	72.24%

3.4.2 Q 型聚类分析

沉积环境差异主要体现在沉积物粒度参数特征,与水深、水动力、物质来源密切相关^[2]。本文以沉积物粒度参数、组分含量和水深指标进行 Q 型聚类分析,研究沉积物分布的区域性差异。将聚类分析结果和水动力条件、实地调查结果综合分析,表层沉积物站位可分为 3 类,代表不同沉积环境(图 7)。I 区为浅水波浪区,有 64 个站位,分布在近

岸、西瑁洲岛北侧至肖旗河口、鹿回头南端,平均流速为 0.20 m/s,平均粒径为 2.39 ϕ ,分选系数平均值为 1.64,偏态平均值为 0.24,峰态平均值为 1.64,主要沉积物类型为砂和粉砂质砂,水深较浅,平均水深 6.75 m,主要为古海岸侵蚀砂。II 区为潮流作用及弱波浪作用区,有 217 个站位,分布在研究区大部分海域,平均流速为 0.36 m/s,平均粒径为 6.48 ϕ ,分选系数平均值为 1.89,偏态平均值为 0.03,峰态平均值为 0.98,主要沉积物类型为砂质粉砂、粘土质粉砂和粉砂,水深较深,平均水深 22.72 m,主要为潮流输沙。III 区为波流混合作用区,主要是珊瑚礁岩石等粗颗粒,有 47 个站位,分布在东西岛南侧、肖旗河口的粗质沉积区东侧和鹿回头半岛西侧,平均流速为 0.27 m/s,平均粒径为 4.13 ϕ ,分选系数平均值为 2.88,偏态平均值为 0.16,峰态平均值为 0.81,主要沉积物类型为粉砂质砂和砂质粉砂,平均水深 14.13 m。

4 讨 论

4.1 沉积物分布与其代表的环境分区的控制因素

沉积物分布特征可以反映不同的水动力条件,相同环境下,平均粒径粗说明水动力强,分选性好代表动力环境集中单一。三亚海域水动力主要是

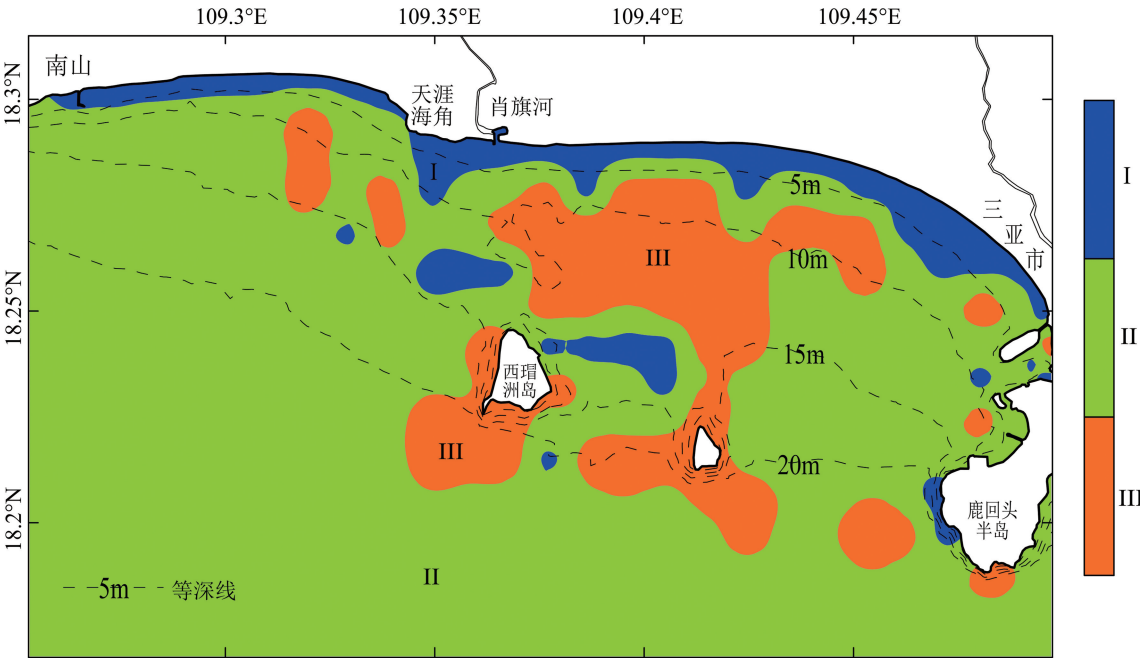


图 7 三亚近岸海域沉积环境分区

Fig. 7 Division of the sedimentary environments in the Sanya coastal waters

波浪和潮流,而河流作用较弱,Q型聚类结果揭示了不同动力环境作用。粗粒径沉积区(小于 2ϕ)主要分布在10 m等深线以内,分选性较好,与波浪作用范围一致,据估算,三亚海域波浪影响水深不超过10 m。三亚附近海域波浪计算^[14]表明,平均波高0.9 m可使水深1.5 m以浅水域的海床泥沙完全起动,可使水深3 m以浅水域的海床泥沙表层起动;3 m的大浪可以使水深6 m以浅水域海床泥沙完全起动,可使水深10 m以浅水域的海床泥沙表层起动。三亚海域平均波高0.7 m,最大波高2.0 m。东西向岸线的近岸浅水区在SW向波浪作用下,产生的沿岸流将沉积物往东南搬运^[14]。该方向风浪作用下沉积物分布从西向东逐渐变粗,沉积物分选性较好,主要为砂,砂含量90%以上,成分较均一。在鹿回头半岛和东瑁洲岛阻挡下,又处于SW向波浪的波影区,三亚湾内部流速较小,平均流速0.1 m/s,水动力较弱,细颗粒容易发生沉积,沉积物较细。如前所述,研究区的波浪作用最多只能影响水深10 m以内,而对于研究区南部和西北部,大部分海域水深大于10 m,底部沉积物基本不受波浪影响,根据海流观测,虽流速比湾内大,但以潮流输运悬移质泥沙为主,所以沉积物分布较细。本区三亚河口和肖旗河口沉积物较粗,主要是河流携带泥沙入海后,流速降低,迅速沉降的结果。

根据主成分分析,泥沙来源也影响沉积物分布特征,在珊瑚礁分布区和河口沉积区体现更明显。三亚海域的泥沙来源主要由3个部分组成,即侵蚀海岸来沙、陆源来沙和生物残体碎屑来沙。全新世海侵将古砂质海岸沉溺于海底,其中位于波浪作用影响范围内的部分古砂质岸线成为海岸带泥沙来源,发生侵蚀搬运后再重新分布,在波浪掀沙作用下,浪流混合作用将侵蚀泥沙搬运至海滩沉积,分布区域由岸向海延伸到10 m等深线,沉积物平均粒径 $0\sim 1.5\phi$,以砂和粉砂质砂为主,其中一部分被潮流搬运至南部深水区,以细颗粒为主。陆源泥沙主要是花岗岩山地和基岩海岸风化产物,还有陆地海侵时期珊瑚礁破坏产物,由沿岸河流携带入海。研究区河流主要是三亚河和肖旗河,三亚河输沙能力弱,主要在河口港区和10~20 m水深处沉积^[6,17],对整个三亚湾贡献量较小,其中粗颗粒在河口区沉积,占河口区沉积量的20%^[16],细颗粒物质可被潮流输送到湾内水动力较弱区域。肖旗河附

近沉积物平均粒径在 $0\sim 1\phi$ 之间,沉积物较粗,该处为古海岸砂砾质沉积、现代河口堆积与部分海蚀物质,物源复杂,分选性较差。生物来源主要为珊瑚礁等碎屑物质,研究区碳酸钙和有机质含量较高,为20%~80%^[17,19],表明珊瑚礁为海底沉积物提供了丰富的物质来源,其中东、西瑁岛四周平均含量高达60%^[17]。水深10 m以内水下岸坡带为现今珊瑚主要生长范围,据前人研究^[19],碳酸钙与沉积物粒径负相关,即碳酸钙含量越高,沉积物越粗,而细颗粒沉积物则碳酸钙含量低。在东、西瑁洲岛、凤凰岛(白排礁)、鹿回头半岛,附近沉积物较粗,珊瑚贝壳含量高,野外现场也发现沉积物含有生物碎屑,说明珊瑚礁体为这些区域提供了大量的沉积物质来源。

4.2 沉积物输运趋势

沉积物输运趋势是沉积环境动力条件、物质源汇的最直观表现,对其进行探讨,可以更深入地刻画研究区现代沉积特征。三亚湾内部(研究区东部)沉积物输运趋势表现为汇聚,泥沙在鹿回头半岛沿岸输送,进入湾内,潮流输沙和三亚河口的河流输沙汇合,加之水动力环境较弱,处于东西瑁洲岛波影区,容易沉积。沿岸的中部岸段,海月广场向西至天涯海角附近岸线和海域,该岸段沉积物输运方向主要为S向,岸段处于侵蚀状态,其原因是泥沙供应相对不足,泥沙沿岸运动基本停止,在SW向波浪作用下,本地沉积物被侵蚀向东南搬运。靠近西岛码头(肖旗河附近)局部岸段,沉积物输运方向主要为N向,向岸方向,表现为淤积状态,主要与河流输沙和古海岸残存物有关,水下砂砾石物质自古存在,在波浪作用下为区域沉积提供沙源,又因小型河流入海后流速快速降低,携带泥沙发生沉积,从而表现出局部淤积状态。该区域的西部,沉积物输运方向为NNE向,与岸线几乎垂直,向岸方向,呈现淤积状态,主要在沿岸流和外海潮流作用下,输送的泥沙物质在近岸发生沉积。东西瑁洲岛附近海域为离岸输送,处于侵蚀状态,为其他区域沉积提供物质来源。研究区西南部在E向余流下,将泥沙向东输送,同时波浪侵蚀海岸的泥沙向南搬运,与西瑁洲岛侵蚀物质、南部外海输沙汇合,分别形成A、B、C区3个沉积中心;在SE向余流下,东西瑁洲岛、海滩侵蚀泥沙向东南运移,与南部外海输沙形成D区沉积;东南部的东瑁

洲岛侵蚀泥沙与南部外海输沙汇集, 出现东南部 E 区沉积中心。

5 结 论

(1) 研究区主要的沉积物类型为粉砂质砾石、砾石质砂、砂、粉砂质砂、砂质粉砂、粉砂和粘土质粉砂 7 种类型, 以粘土质粉砂为主。平均粒径为 $0.22 \sim 7.37 \phi$, 其中, 粒径较大的沉积物主要分布于西瑁洲岛和天涯海角之间海域、肖旗河口、红塘湾近岸、三亚河口等地, 以及三亚湾近岸。

(2) 根据沉积物输运趋势不同, 研究区可划分为沿岸浅水海域、东西岛附近海域、研究区南部海域等。沿岸浅水海域分别表现为东南部淤积、中部侵蚀和西部淤积趋势。东西岛附近处于离岸侵蚀状态。在研究区南部和鹿回头半岛西侧海域, 存在 5 个沉积中心, 周围沉积物向其中心位置搬运。

(3) 根据实测结果, 研究区属于典型的往复流性质, 涨潮方向为 NW 向, 平均流速为 $0.15 \sim 0.22 \text{ m/s}$, 落潮为 SE 向, 流速一般为 $0.24 \sim 0.60 \text{ cm/s}$ 。潮流流速随水深增大而增大, 落潮流速略大于涨潮流速。

(4) 对沉积物各种粒度参数、水深等作为聚类指标和主成分分析, 成分 1 和成分 2 的主成分贡献累积方差达 72.24%, 水动力和泥沙来源是控制沉积环境的主要因素。根据 Q 型聚类分析结果和水动力观测、沉积物输运趋势等, 表层沉积物站位可分为 3 类, 代表不同主控因素的沉积环境。

致谢: 广州海洋地质调查局张顺枝高级工程师、霍振海、习龙工程师参加了野外采样, 环工所同事进行了室内分样, 海南省地质调查院技术人员参与了野外采样; 另外, 审稿专家对文章修改提出了宝贵意见, 谨致谢忱。

参考文献

[1] 梅西, 李学杰, 密蓓蓓, 等. 中国海域表层沉积物分布规律及沉积分异模式[J]. 中国地质, 2020, 47(5): 1447-1462.
[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] 李亮, 陈忠, 刘建国, 等. 南海北部表层沉积物类型及沉积环境区划[J]. 热带海洋学报, 2014, 33(1): 54-61.

[4] 李军, 胡邦琦, 李国刚, 等. 山东半岛近海不同粉砂粒级含量分布的空间差异性及其沉积学意义[J]. 海洋学报, 2017, 39(1): 64-75.
[5] 李家胜, 高建华, 李军, 等. 鸭绿江河口沉积物元素地球化学及其控制因素[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2010, 30(1): 25-31.
[6] 毛龙江, 张永战, 张振克, 等. 海南岛三亚湾现代沉积环境[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2007, 27(4): 17-22.
[7] 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.
[8] 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.
[9] 全长亮, 张匡华, 陈飞, 等. 海南岛北部海域海砂资源潜力评价[J]. 中国地质, 2020, 47(5): 1567-1575.
[10] 毛龙江, 张永战, 魏灵, 等. 海南岛三亚湾海滩研究[J]. 第四纪研究, 2006, 26(3): 477-484.
[11] 崔振昂, 吴自军, 李亮, 等. 三亚湾海滩泥黑化调查评价[J]. 地质论评, 2020, 66(s1): 157-158.
[12] 季小梅, 张永战, 朱大奎. 三亚海岸演变与人工海滩设计研究[J]. 第四纪研究, 2007, 27(5): 853-860.
[13] 严珍珍, 杜小平, 范湘涛. 三亚湾海岸动力演变的数值模拟研究[J]. 海岸工程, 2019, 38(3): 176-186.
[14] 左书华, 谢华亮, 崔成, 等. 三亚红塘湾海域海床表层沉积物及泥沙运动特征[J]. 海洋地质前沿, 2018, 34(8): 18-23.
[15] 吴小根, 金波, 卫建飞. 三亚港近期淤积变化及其原因分析[J]. 海洋通报, 1998, 17(5): 51-57.
[16] 潘少明, 朱晓东, Smith J N. 海南岛三亚港现代沉积速率的研究[J]. 海洋与湖沼, 1995, 26(2): 133-137.
[17] 赵美霞, 余克服, 施祺, 等. 三亚鹿回头珊瑚礁区沉降物的来源、分布及影响因素[J]. 科学通报, 2013, 58(17): 1583-1589.
[18] 刘景儒, 王其涵, 王建平, 等. 三亚海岸珊瑚礁地层成因演化与工程地质分区[J]. 岩土力学, 2014, 35(增 1): 334-340.
[19] 卢博, 梁元博, 李赶先, 等. 三亚角外海海底地形地貌及现代沉积[J]. 海南大学学报自然科学版, 1995, 13(3): 226-231.
[20] 段依妮, 滕骏华, 蔡文博. 基于潮位观测的三亚湾海岸侵蚀遥感提取与分析[J]. 海洋预报, 2016, 33(3): 57-64.
[21] 李喜海, 梁海燕. 三亚湾海岸侵蚀原因分析及防治对策[J]. 海洋开发与管理, 2008, (12): 103-106.
[22] 梁超, 黄磊, 崔松雪. 近 5 年三亚海岸线变化研究[J]. 海洋开发与管理, 2015, (5): 43-45.
[23] 《中国海湾志》编纂委员会编. 中国海湾志第十一分册(海南省海湾)[M]. 北京: 海洋出版社, 1999: 183-223.
[24] Shepard F P. Nomenclature based on sand-silt-clay ratios[J]. Journal of Sedimentary Petrology, 1954, 24: 151-158.
[25] Gao S, Collins M, Lanckneus J, et al. Grain-size trends associated with net sediment transport pattern - an example from the Belgian continental-shelf[J]. Marine Geology, 1994, 121(3/4): 171-185.