

DOI: 10.16562/j.cnki.0256-1492.2020051502

海南岛东南浅海表层沉积物粒度特征及沉积环境

赵利, 蔡观强, 钟和贤, 李波, 邹翎琦, 李顺, 韩艳飞

1. 自然资源部海底矿产资源重点实验室, 中国地质调查局广州海洋地质调查局, 广州 510760
2. 南方海洋科学与工程广东省实验室(广州), 广州 511458

摘要:对海南岛东南浅海 377 组表层沉积物样品(平均水深 112.3 m)开展粒度测定及沉积物类型划分,并运用统计规律及沉积物运输趋势分析,探讨了底质沉积物分布格局与物质来源及沉积动力环境关系。结果表明,海南岛东南浅海沉积物类型复杂,共分布 13 种沉积物类型,粒度组成以粉砂和砂为主,平均粒径均值为 5.73 Φ ,优势粒级为细粉砂级(6~8 Φ),分选差。不同海域沉积物粒径差异明显,北部近岸以含砾沉积为主,中部呈 NE-SW 向的砂质沉积区(水深 80~120 m),西南近岸滨海、北中部海域以及东南部海域多为粉砂、黏土沉积。结合地理位置、沉积物源及水动力条件差异,研究区划分为 3 个沉积区: I 区主要以含砾粗颗粒沉积为主,受控于海南岛上径流及强风浪作用,物质来源以万泉河等河流运输及岸线侵蚀物质为主,强动力(高能)沉积环境; II 区以砂沉积为主,受到表层流及风浪等共同影响,可能主要是残留滨海沉积混入了海南岛径流及岸线侵蚀、少量珠江流域及外海复杂来源等现代细粒物质的混合沉积,中等动力沉积环境; III 区以细粒沉积为主,主要受华南近岸流、风浪作用及南海暖流影响,推测物质来源主要为海南岛河流输入、岸线侵蚀及复杂外海来源细粒物质的加入,弱动力(低能)沉积环境。

关键词:多元统计; 粒径趋势; 沉积环境; 海南岛东南浅海; 粒度参数

中图分类号: P736.2 文献标识码: A

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

ZHAO Li, CAI Guanqiang, ZHONG Hexian, LI Bo, ZOU Liqi, LI Shun, HAN Yanfei

1. Key Laboratory of Marine Mineral Resources, Ministry of Natural Resources, Guangzhou Marine Geological Survey, Guangzhou 510760, China
2. Southern Marine Science and Engineering Guangdong Laboratory (Guangzhou), Guangzhou 511458, China

Abstract: 377 surface sediment samples from the sea area off the southeast of Hainan Island are analyzed for grain size distribution and sediment classification. Using the multivariate statistical method in addition to transportation trend analysis, the relationship between the grain size distribution patterns and their bearing on source and hydrodynamic conditions is discussed. There are 13 types of sediments in the study area. Sediments are mainly composed of silt and sand and dominated by fine silt (6~8 Φ), with a Mz value of 5.73 Φ and poor sorting. Obvious differences in sediment grain size are observed in different sea areas. Gravel-bearing sediments occur mainly in the north coast; sandy sediments are distributed in the middle of the study area in a NE-SW direction within a water depth of 80~120 m; and silt and clay sediments in the southwest coast, the north central sea area and the southeast sea area. Based on the differences in geographic locations, sediment sources and hydrodynamic conditions, the study area is divided into three sedimentary districts. The District I is dominated by gravel-bearing coarse-grained sediments, which are mainly formed by runoff and strong wind waves along the Hainan Island. Sediments are sourced from coastal erosion and local rivers such as the Wanquan River and deposited in strong dynamic environments; The District II is dominated by sandy sediments formed by the mixed relict and coastal deposits under the joint action of surface currents, wind wave, runoff and coastal erosion. A small amount of fine-grained materials may come from the Pearl River Basin and other offshore complex sources. The District III is dominated by fine-grained sediments, affected mainly by coastal currents, wind waves and South China Sea warm currents. It is assumed that most of the sediments in this region are sourced from river input, coastal erosion and some fine-grained materials from complex offshore sources by weak hydrodynamic.

Key words: particle size analysis; multivariate statistics; grain-size trend analysis; sedimentary environment; the sea area off southeast of Hainan Island

资助项目:自然资源部海底矿产资源重点实验室开放基金“琼西南海域 ZBW 钻孔晚更新世以来沉积特征及其环境意义”(KLMMR-2018-A-07),“北部湾晚更新世以来沉积物磁学特征及其环境意义”(KLMMR-2017-A-03);南方海洋科学与工程广东省实验室(广州)人才团队引进重大专项“粤港澳大湾区现代沉积与千年尺度环境演变”(GML2019ZD0209);中国地质调查局项目(GZH201400210; DD20190627; DD20190216; DD20190209);海南省基础与应用基础研究计划(自然科学领域)高层次人才项目(2019RC349)

作者简介:赵利(1989—),男,工程师,硕士,主要从事海洋沉积与地球化学方面研究, E-mail: zhaoli666888.ok@163.com

收稿日期:2020-05-15; **改回日期:**2020-08-11. 文凤英编辑

海洋沉积物的粒度特征及其空间变化(粒径趋势)是海洋沉积及动力学研究的重要方向之一,其主要受物源组分、输运方式、搬运距离、水动力条件以及地形地貌等多重因素控制^[1-2]。多元统计方法主要提取多个变量间相互关联的规律性,其中对多项替代性指标的聚类分析在海洋沉积物源及环境演化研究中得到广泛应用^[3-5],粒径趋势方法在示踪滨浅海陆架沉积净输运趋势的研究中效果良好^[6]。因此,基于粒度组分含量及参数变化,综合多元统计结果及沉积粒径趋势规律,可有效追踪物质来源,判别水动力条件,厘清沉积物运移趋势和划分沉积环境类型等。

近年来,国内外学者对南海大比例尺、广深海域的沉积物类型研究已取得许多基础、系统的认识和成果^[7-8],尤其是对南海北部及环海南岛周边海域^[9-11]、海南岛部分近岸小区域的港湾、河口进行了精细研究^[12-14]。然而,海南岛东南陆架浅海沉积过程受岛上径流、沿岸流、潮汐、风浪及南海暖流等复杂沉积动力环境影响,沉积类型多样。此外,由于受沉积物分析样品数量、测试手段及精度差异等多种因素制约,尚未对海南岛东南浅海表层沉积物开展系统详实的研究。本文分析了在海南岛东南浅海区获取的 377 组表层沉积物样品的粒度组分,探讨了该海区的沉积类型、运移趋势及沉积环境等,为深入揭示陆架浅海沉积环境演化、重要能源(如天然气水合物、油气资源)的勘探开发及区域协调发展和生态环境保护提供了基础资料。

1 研究区概况

海南岛东南海域研究范围为 18°~19°N、109°30'~111°E,海域面积 $1.13 \times 10^4 \text{ km}^2$ (图 1),水深范围为 0~1400 m。大部分区域位于 250 m 以浅区域,地形自岸向海倾斜,地势平坦,水深等值线为 NE 走向,地貌以水下岸坡和陆架平原为主,岸坡上发育小型沙波、浅滩、沙丘,水深 250 m 以深为陆坡陡坡区域,地形剧烈变化,水深变化较大,坡度较陡^[15]。海岸线较为曲折,以砂质岸线为主,基岩岸线为辅,沿海一带港湾、港口较多。海域沉积受海南岛多个入海河流影响,如万泉河、陵水河、太阳河等。属于低纬度热带季风气候,冬季盛行东北风,夏季盛行东南风和西南风,夏秋期间常受热带风暴和台风侵袭。海域潮流性质为不规则日潮型,以日潮为主,平均潮差 0.79 m ^[16]。

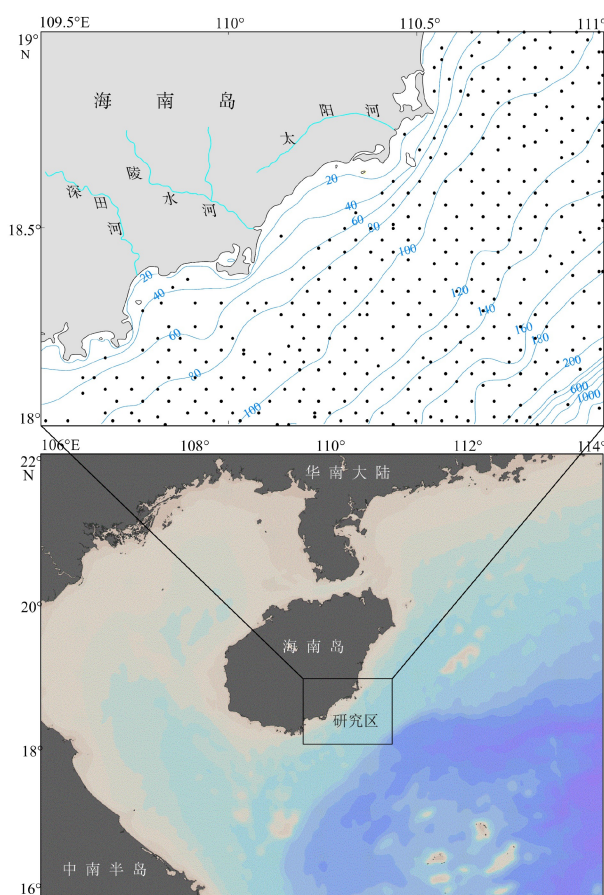


图 1 研究区位置和底质采样站位
黑色圆点为取样站位。

Fig. 1 The location of study area and sampling stations
Black dots represent sampling stations.

2 材料与方法

2017年7月广州海洋地质调查局开展海南岛周边海域 1:25 万海洋区域地质调查工作,利用“奋斗五号”调查船在海南岛东南浅海区获取了 377 个站位的沉积物样品。站位间距大体为 $5 \text{ km} \times 5 \text{ km}$,每个站位选取表层 0~2 cm 的部分。

沉积物粒度室内分析测试工作在广州海洋地质调查局实验测试中心完成。具体方法为:对于最粗粒径 $< 2000 \mu\text{m}$ 的样品,使用激光粒度仪 (Mastersizer-2000) 上机分析,仪器测量范围为 $0.02 \sim 2000 \mu\text{m}$, 粒径分辨率 0.01Φ 。测试流程:适量的沉积物样品中加入 5 mL 30% 的 H_2O_2 和 0.25 mol/L 的 HCl, 去除有机质和碳酸盐; 搅拌并静置加满蒸馏水的溶液以去除盐分至呈中性; 超声波振荡分散后上机测试。对含有粒径 $> 2000 \mu\text{m}$ 的样品,采用传统筛分法和激光粒度仪测试结合方法:烘干称重后过 $1400 \mu\text{m}$ 孔径标准筛,激光粒度仪测试细颗粒部分,

筛析法分析粗颗粒部分(1 Φ 间隔),合并获得完整粒度数据。

粒级标准采用温德华氏标准,粒度参数采用矩法计算,采用Folk三端元分类法^[17]对各沉积物样品命名。沉积空间分布差异及区划等主要运用多元统计分析中的Q型聚类及因子分析法,沉积物净运移趋势分析主要基于Gao-Collins模型(1994)。

3 结果

3.1 沉积类型和粒度特征

3.1.1 沉积类型及分布特征

海南岛东南浅海海域沉积物粒级范围为-2~

11 Φ (表1)。由表1可看出,沉积物的优势粒级5~9 Φ 占55.80%,含量最高(16.82%)粒级为7~8 Φ ,含量最低(0.81%)粒级是<-2 Φ ,表明研究区整体以细粒沉积为主。沉积物类型的命名依据Folk等(1970)提出的分类方案(图2):(A)含砾碎屑沉积物;(B)不含砾碎屑沉积物,研究区共分布13种沉积类型:含砾泥、砾质泥、含砾泥质砂、砾质泥质砂、砾质砂、泥质砂质砾、砂质砾、粉砂质砂、泥质砂、砂质泥、砂质粉砂、粉砂、泥等,其中以较细粒的砂质粉砂、粉砂和砂质泥为主,这三种类型约占71.35%,其次为粗粒的砾质泥质砂、泥质砂,约占13.53%,其他类型沉积物较少见(图3)。

从图3可看出,砂质粉砂分布最广,广泛分布于研究区中部、东北部近120 m等深线附近及西南部

表1 海南岛东南浅海表层沉积物粒级组成及粒度参数
Table 1 Grain size parameters of surface sediments in the southeast of Hainan island

粒级/ Φ	全区 (n=377)			I区 (n=36)			II区 (n=101)			III区 (n=240)		
	最大值	最小值	平均值	最大值	最小值	平均值	最大值	最小值	平均值	最大值	最小值	平均值
<-2	28.39	0.00	0.81	28.39	1.80	7.42	10.93	0.00	0.30	2.83	0.00	0.03
-2~-1	29.98	0.00	1.02	29.98	4.56	9.28	6.95	0.00	0.35	4.97	0.00	0.06
-1~0	46.24	0.00	1.68	46.24	3.48	14.64	12.75	0.00	0.75	6.02	0.00	0.12
0~1	34.77	0.00	2.59	34.77	5.41	18.12	12.55	0.00	2.61	9.79	0.00	0.25
1~2	40.81	0.00	4.92	40.81	2.06	15.53	32.09	1.07	10.24	14.91	0.00	1.09
2~3	43.26	0.00	8.67	18.93	0.15	4.98	43.26	8.20	22.24	12.66	0.00	3.51
3~4	29.29	0.04	7.62	13.96	0.13	3.71	29.29	3.25	13.29	18.18	0.04	5.82
4~5	21.71	0.24	6.71	12.78	0.24	3.52	14.57	1.16	4.84	21.71	1.67	7.97
5~6	25.48	0.00	11.09	8.28	0.00	3.65	11.31	0.00	6.83	25.48	7.55	14.00
6~7	27.25	0.00	15.96	10.87	0.00	5.20	17.29	0.00	10.18	27.25	11.35	20.00
7~8	29.38	0.00	16.82	11.74	0.00	5.66	19.92	0.00	11.76	29.38	10.08	20.63
8~9	21.78	0.00	11.93	9.32	0.00	4.37	15.66	0.00	8.83	21.78	4.86	14.37
9~10	10.88	0.00	5.78	4.84	0.00	2.27	7.92	0.00	4.29	10.88	1.77	6.94
>10	9.26	0.00	4.41	3.50	0.00	1.67	6.39	0.00	3.48	9.26	1.46	5.21
砾石	45.33	0.00	1.83	45.33	6.37	16.70	12.55	0.00	0.64	6.69	0.00	0.09
砂	92.8	0.04	25.47	92.80	24.64	56.97	89.90	20.17	49.14	43.12	0.04	10.78
粉砂	76.04	0.24	50.58	36.31	0.24	18.03	53.52	6.63	33.61	76.04	38.27	62.60
黏土	37.86	0.00	22.12	17.36	0.00	8.30	29.31	0.00	16.59	37.86	8.09	26.52
Mz	7.83	-0.67	5.73	3.75	-0.67	1.97	6.23	2.35	4.77	7.83	4.40	6.69
si	6.39	0.91	2.32	6.39	0.91	3.25	3.77	1.42	2.61	3.50	1.42	2.05
Ski	0.73	-0.25	0.06	0.55	-0.23	0.26	0.73	-0.22	0.21	0.31	-0.25	-0.03
Kg	2.23	0.64	0.97	2.03	0.66	1.05	2.23	0.64	0.91	1.18	0.69	0.98
Md	7.83	-0.75	5.63	4.11	-0.75	1.33	6.72	2.24	4.46	7.83	4.61	6.77

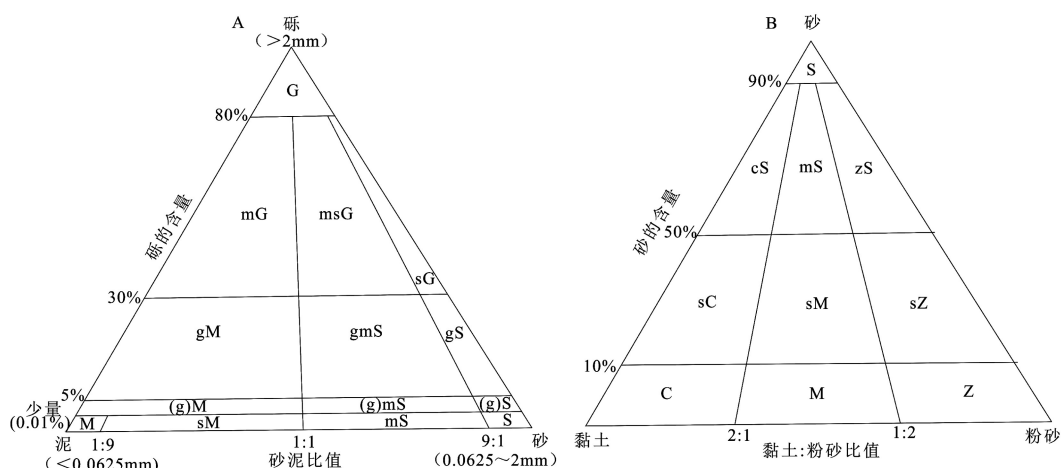


图 2 沉积物分类图^[17]

A. 含砾碎屑沉积物分类: G-砾, sG-砂质砾, msG-泥质砂质砾, mG-泥砾, gS-砾质砂, gmS-砾质泥质砂, gM-砾质泥, (g)S-含砾砂, (g)mS-含砾泥质砂, (g)M-含砾泥, S-砂, m S-泥质砂, s M-砂质泥, M-泥; B. 不含砾碎屑沉积物分类: S-砂, zS-粉砂质砂, mS-泥质砂, cS-黏土质砂, sZ-砂质粉砂, sM-砂质泥, sC-砂质黏土, Z-粉砂, M-泥, C-黏土。

Fig.2 The classification of sediments^[17]

A. Textural classification of gravel-bearing sediments: G-gravel, sG-sandy gravel, msG-muddy sandy gravel, mG- muddy gravel, gS-gravelly sand, gmS-gravelly muddy sand, gM- gravelly mud, (g)S- slightly gravelly sand, (g)mS- slightly gravelly muddy sand, (g)M- slightly gravelly mud, S-sand, mS- muddy sand, sM- sandy mud, M-mud; B. Textural classification of gravel-free sediments and sedimentary rocks: S- sand, zS- silty sand, mS- muddy sand, cS-clayey sand, sZ-sandy silt, sM- sandy mud, sC- sandy clay, Z-silt, M-mud, C-clay.

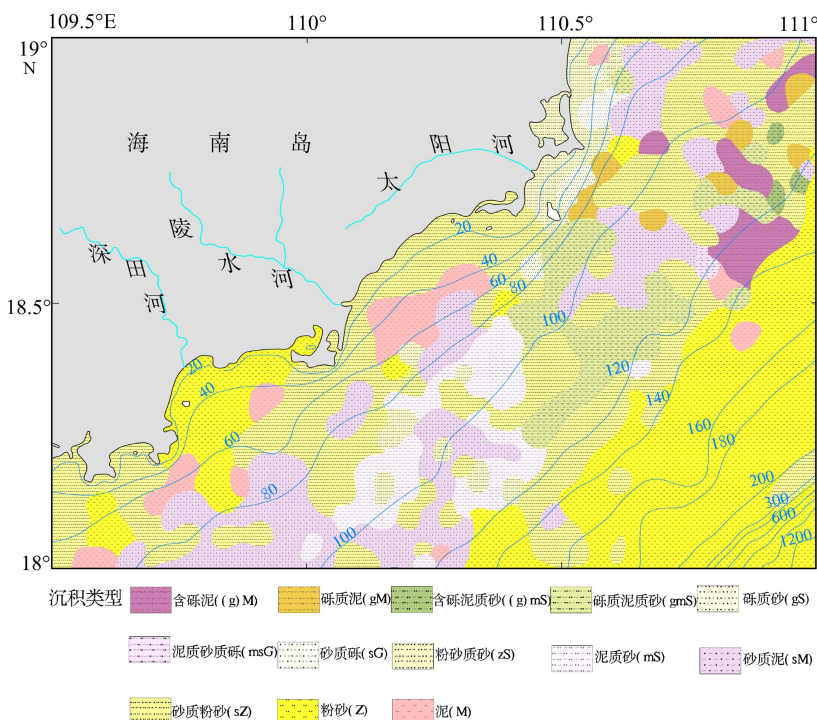


图 3 海南岛东南浅海海域沉积类型分布图

Fig.3 The distribution of sediments in the southeast of Hainan Island

近岸等, 以粗粉砂组分为主, 粒度频率曲线表现为双峰态(图 4a), 多数 3、7、8 Φ 明显突出, 少数 2、4 和 5 Φ 峰较明显, 反映物质来源的多源性; 粉砂较为集中分布于研究区东南部海域(水深 > 140 m 范

围), 及西南部滨海海域等, 频率曲线基本呈单峰态(图 4b), 集中于 6~8 Φ 峰明显突出, 表明沉积物来源单一; 砂质泥主要分布于中南部海域, 同时呈多个斑块状分布在水深 60~100 m 的中北部海域, 频

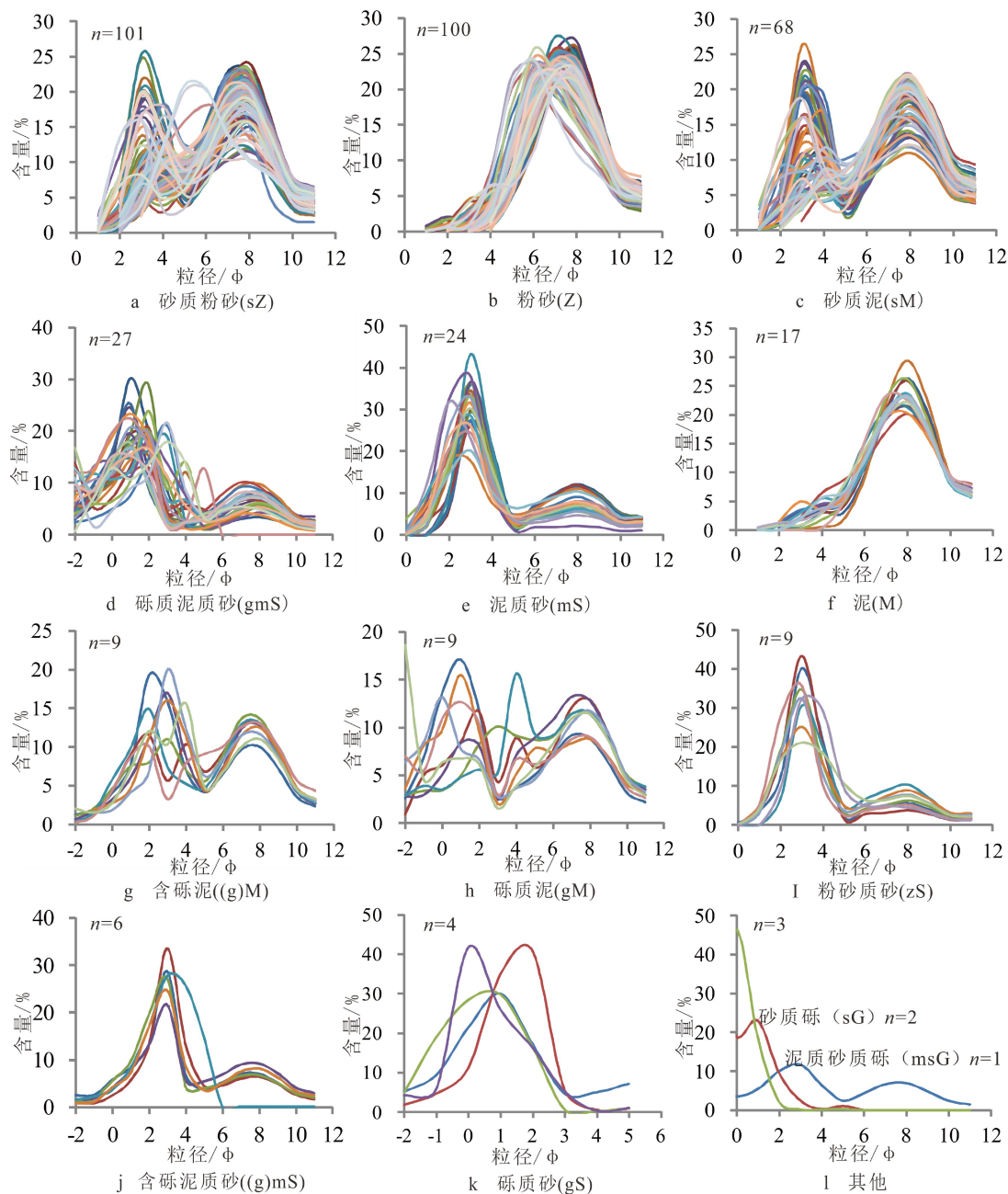


图4 海南岛东南浅海表层沉积物各沉积类型频率曲线

n 为样品数, 不同颜色曲线代表不同站位样品。

Fig.4 Grain size frequency curves of surface sediments in the southeast of Hainan island

n is the number of samples, different color curves represent different station samples.

率曲线呈双峰态(图4c), 与砂质粉砂近似, 多数3、4和8 Φ 峰明显突出。三种主要沉积类型中细粒组分占优, 表明研究区大部分为水动力条件较弱的浅海沉积环境。

砾质泥质砂主要分布在研究区中部离岸80~100 m水深海域, 少量呈斑状分布于东北部, 频率曲线呈双峰态(图4d), 多数站位的1、2 Φ 较突出, 7、8 Φ 次之, 滚动组分占比接近50%, 悬浮组分次之, 跳跃组分含量较低, 表明该区域水动力条件较强,

细颗粒沉积物被带走, 剩余较粗颗粒沉积物。泥质砂主要分布在研究区中部偏西南海域, 分布范围较少, 频率曲线呈双峰态(图4e), 多数样品的2、3 Φ 明显突出, 7、8 Φ 略突出, 跳跃、悬浮组分含量近似, 沉积物处于中等水动力条件。其余沉积类型多呈较小范围的斑块状分布, 频率曲线见图4f—4l。

总体来看, 研究区近岸海湾以粉砂和泥为主, 西南部和中部以砂质粉砂和粉砂为主, 东北部沿岸以粉砂质砂为主, 含砾沉积物主要分布于东北部和

中部, 东南部远岸海域以粉砂为主。从海岸到滨海, 再到浅海区域, 变化趋势由沉积类型单一、颗粒较粗逐渐至类型复杂、颗粒粗再到类型单一、颗粒较细。底质沉积类型的分布格局与物源、地形和沉积动力条件关系密切。

3.1.2 沉积物粒度参数及组分特征

粒径参数作为研究沉积特征及鉴别沉积环境的主要依据, 对其深入分析有助于阐明海底沉积物来源、判定物质搬运方式和识别沉积作用环境类型等^[18-19]。海南岛东南浅海站位各沉积类型比例及对应的粒度参数见表 2, 各站位粒度参数的分布规律见图 5a—5d。

平均粒径大体反映沉积物的平均动能, 沉积物 M_z 为 $-0.67 \sim 7.83\Phi$, 均值为 5.73Φ , 多以细粉砂组分 ($6 \sim 8\Phi$) 为主。分布上表现为北部万宁近岸滨海海域粒径最粗, $M_z < 1\Phi$, 为粗砂及砾级, 与砂质砾、砾质砂、泥质砂质砾等含砾沉积类型对应, 为近岸强动力 (高能) 沉积环境。粗粒沉积向外延伸至研究区中部 (基本呈 NE 向, $80 \sim 120$ m 水深等深线范围内), 为相连斑块状展布, 平均粒径 $M_z < 4\Phi$, 多为砂级, 基本对应砾质泥质砂、砾质泥、泥质砂、粉砂质砂等砂质沉积, 代表过渡区域复杂的物质来源及沉积环境; 其余大部分海域如研究区西南近岸滨海、北中部海域, 以及东南部 > 120 m 水深等深线海域, M_z 普遍 $> 6\Phi$, 多为细粉砂级, 与砂质粉砂、砂质

泥、粉砂、泥等粉砂、黏土质沉积对应, 代表弱动力 (低能) 沉积环境。

沉积物分选系数为 $0.91 \sim 6.39$, 均值为 2.32 , 因研究区沉积物粒级范围广, 优势粒级不明显, 属分选差的等级。研究区近岸、东南部 > 140 m 水深等深线海域的粉砂、泥等细粒沉积及近岸北部少量的砾质砂、砂质砾等粗粒沉积, 其分选系数 < 2.0 , 粒径频率曲线的扩散程度较低, 属分选较差等级, 近岸可能与较强风浪作用导致砂的均一化有关。 $80 \sim 140$ m 等深线范围内沉积物分选系数均大于 2.0 , 分选差, 其中中北部海域含砾泥、砾质泥质砂、砾质泥等含砾沉积物分选系数均大于 3.0 , 呈斑块状分布, 分选程度更差, 推测可能是残留砂经改造后的沉积区。

偏态变化范围为 $-0.25 \sim 0.73$, 平均值为 0.06 , 一半样品 (50%) 偏度 (Ski) 为 $-0.1 \sim 0.1$, 粒度频率曲线为对称—近对称分布, 正负偏态分布区域差异明显, 其中正偏态 (28.6%) 多分布于北部近岸, 呈 NE 向中部、少部分东南部海域, 粒度分布曲线偏向粗颗粒端, 水动力作用较强的区域沉积物颗粒通常偏粗; 负偏态 (21.4%) 分布于研究区西南海域, 其他零星分布, 粒度分布曲线偏向细颗粒端。

峰态范围为 $0.64 \sim 2.23$, 平均值为 0.97 , 其中粉砂质砂、砾质砂、砾质泥质砂峰态较大, 频率曲线尖锐, 高值主要呈斑块状分布于中西部海域, 说明

表 2 海南岛东南浅海各沉积类型及粒度参数特征

Table 2 Characteristics of grain size parameters of various types of sediments in the southeast of Hainan island

	沉积类型	所占比例/%	M_z	M_d	Si	Ski	K_g
1	砂质粉砂 (sZ)	26.79 ($n=101$)	6.15	6.27	2.29	-0.04	0.90
2	粉砂 (Z)	26.53 ($n=100$)	6.98	6.96	1.77	0.03	1.00
3	砂质泥 (sM)	18.04 ($n=68$)	6.24	6.43	2.46	-0.07	0.87
4	砾质泥质砂 (gmS)	7.16 ($n=27$)	2.33	1.43	3.46	0.35	1.08
5	泥质砂 (mS)	6.37 ($n=24$)	4.06	3.12	2.53	0.54	1.08
6	泥 (M)	4.51 ($n=17$)	7.20	7.23	1.92	-0.04	1.06
7	含砾泥 ((g) M)	2.39 ($n=9$)	4.56	4.49	3.09	0.03	0.78
8	砾质泥 (gM)	3.39 ($n=9$)	3.88	3.94	3.74	-0.02	0.79
9	粉砂质砂 (zS)	2.39 ($n=9$)	4.12	3.45	2.18	0.47	1.35
10	含砾泥质砂 ((g) mS)	1.59 ($n=6$)	3.37	2.74	2.74	0.27	1.10
11	砾质砂 (gS)	1.06 ($n=4$)	0.34	0.32	1.25	0.02	1.20
12	砂质砾 (sG)	0.53 ($n=2$)	-0.65	-0.71	1.14	0.08	0.92
13	泥质砂质 (msG)	0.27 ($n=1$)	0.83	1.03	6.39	-0.18	1.25
总		100 ($n=377$)	5.73	5.63	2.32	0.06	0.97

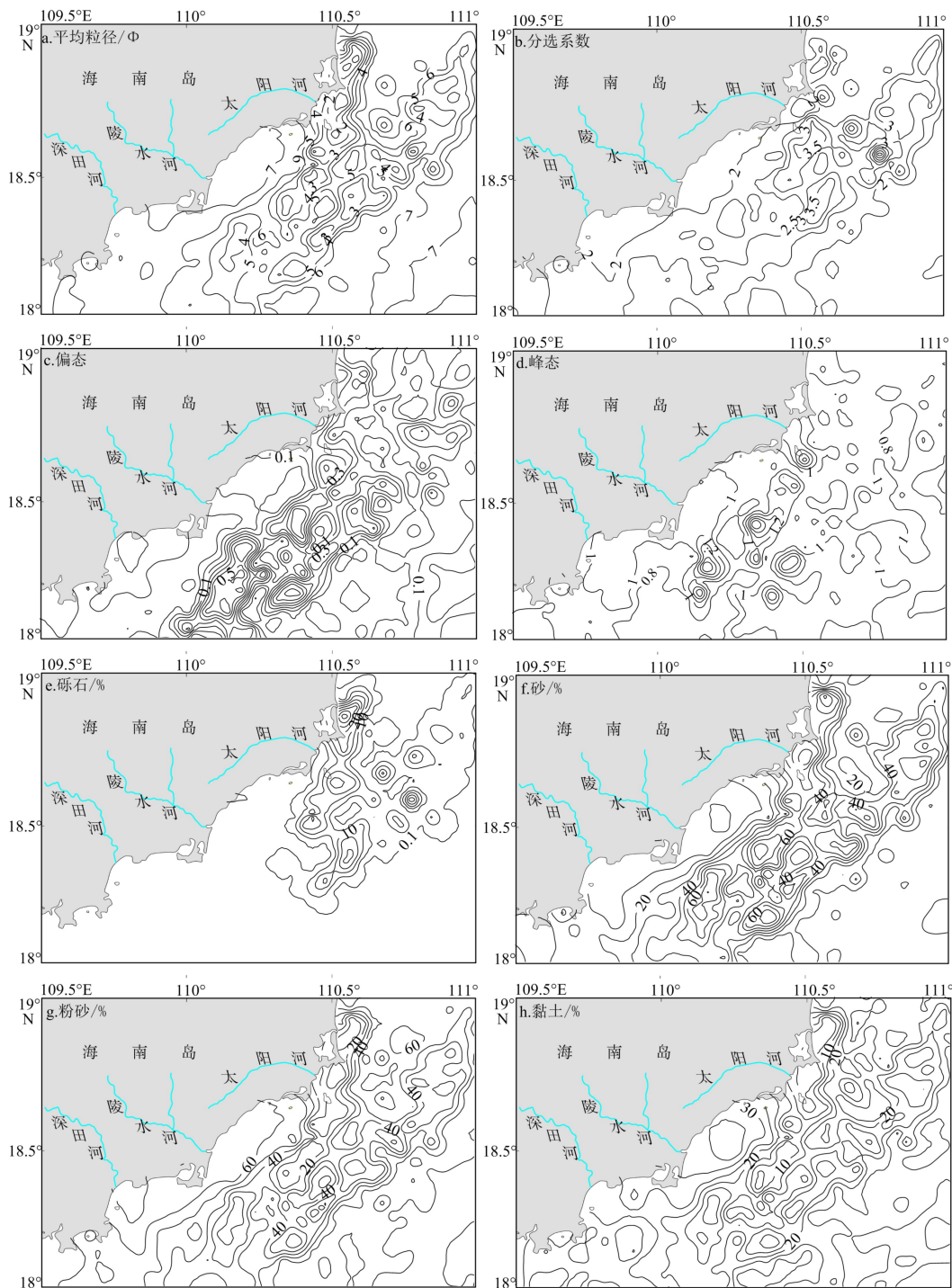


图5 海南岛东南浅海粒度参数与各粒级组分含量分布图

Fig.5 Distribution of grain size parameters and grain size fractions in the southeast of Hainan island

沉积物的砂粒级含量较高,其他曲线多为中等—平坦。

海南岛东南浅海沉积物各粒级组分含量见图5e—5h。由图可看出,沉积物组分以粉砂为主,均值50.58%,砂和黏土含量相近,砂含量为25.47%,黏土含量为22.60%,砾石少量,平均含量为1.35%。砾石主要分布于北部海域,特别是西北部近岸海

域,含量差异较大,个别站位高达45%,大部分海域均不含砾石,呈分布范围较小且集中的特征。砂含量变化趋势明显,西北部近岸海域,并向东南外延伸至研究区中部为其高值区,近似呈NE向展布,含量在40%以上,西南近岸及东南部水深>120m海域为低值区,含量基本在20%以下。粉砂含量的分布特征及规律与砂含量基本呈此消彼长的关系,黏

土与粉砂的分布变化较相似, 整体上多呈斑块状分布趋势。

3.2 聚类统计分析

对 377 组表层沉积物样品的 14 个粒度使用 SPSS 软件进行聚类分析, 选取平均粒径、峰态和分选系数 3 个粒度参数, 同时结合水深数据对沉积物样品的 4 个参数进行 Q 型聚类分析, 据此可分为 3 类不同的沉积区, 并绘制了沉积环境分区图(图 6), 各沉积环境分区的粒度特征差异明显(表 1)。

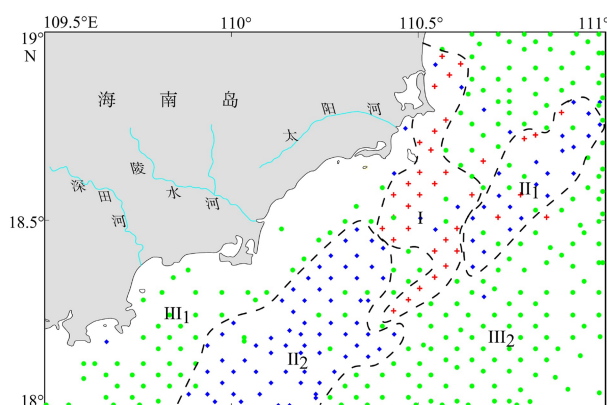


图 6 海南岛东南浅海沉积物 Q 型聚类沉积分区图
不同点代表聚类分析中不同类别取样站位。

Fig.6 Q-cluster diagram for the sediments in
the southeast of Hainan Island

Different points represent different types of sampling stations.

I 沉积区主要分布于西北部近岸海域, 并向南延伸至研究区中部约 120 m 水深等深线, 底质类型基本为砾质泥质砂、砾质泥、砾质砂、砂质砾等含砾沉积为主, 为 3 个沉积区中粒径最粗区域, 粒度组分中砂含量最高, 均值达 56.97%, 砾石含量均值高达 16.70%, 粉砂及黏土分别为 18.03%、8.30%, 含量相对较低。平均粒径为 1.97 Φ , 分选最差, 偏态基本为正偏。

II 沉积区被 I 分割为 NW 向两部分, 其中东北部的 II₁ 区范围较小, 基本位于 100~120 m 等深线范围内, 西南部的 II₂ 区延伸至研究区南部边界, 位于 80~120 m 等深线范围内。以砂质粉砂、砂质泥、粉砂质砂、泥质砂等砂质沉积类型为主, 砂含量均值达 49.14%, 粉砂及黏土分别为 33.61%、16.59%, 较 I 区显著增加, 平均粒径为 4.77 Φ , 分选差, 基本为正偏。

III 沉积区分布于万宁以南的近岸 80 m 水深以浅的滨海及北中部海域(III₁), 以及东南部 120 m 水深以深海域(III₂), 底质类型多为粉砂、砂质粉砂、

砂质泥、泥等细粒粉砂黏土质沉积, 粉砂及黏土组分含量均值分别高达 62.60%、26.52%, 远高于 I、II 沉积区, 砂含量均值为 10.78%, 平均粒径为 6.69 Φ , 分选差但较上两个沉积区相对较好, 偏度多数呈负偏, 粒度频率曲线表现为较平坦特征。

3.3 粒径趋势分析

物质来源不同以及多种沉积环境下的差异搬运、分选等均为影响沉积物粒径趋势的重要因素。在 Gao-Collins 粒径趋势分析中, 特征距离 D_{er} 的选取对最终沉积物净输运趋势分析的影响较大[20-22]。本次粒径趋势矢量的计算中, 经对比发现最终选取 0.15° 为特征距离, 每站位分析时只与其相邻站位进行比较, 以求获得合理的沉积物净输运趋势(图 7), 同时结合研究区海洋沉积水动力条件(主要是环流及风浪)进行了探讨。

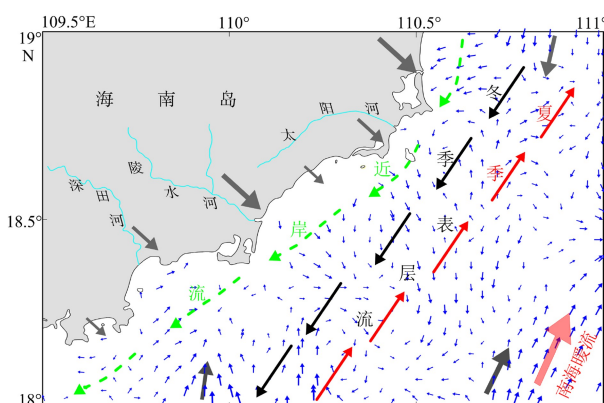


图 7 海南岛东南浅海表层沉积物粒径运移趋势
灰色箭头表示潜在物源, 流向示意图引自文献[23]。

Fig.7 Grain size net trend for the surface sediments in
the southeast of Hainan island

Grey arrows indicate potential provenance and flow direction, from reference[23].

由图 6 可以看出, 研究区沉积运移主要呈与海南岛岸线近乎平行的西南向, 北部万泉河等径流入海物质在华南近岸流、粤西沿岸流以及南海季风漂流(冬季)等的控制下, 整体自东北向西南方向输运, 此趋势向岸外延伸至约 160 m 等深线。东南部(水深 > 160 m)深水区域, 沉积物输运方向为东北向, 可能主要受自西南-东北向暖流影响。在中部以北水深 80~100 m 的位置, 存在一小区域范围的东北向输运趋势, 可能为河流入海或残留物质受到南海季风漂流(夏季)影响, 向东北方向运移; 西北部海域基本为东北向输运趋势, 可能主要受冬季与台风季节东北向与偏北向风浪作用影响; 西南部海域

则为东南及南向近垂直岸线输运趋势,主要与夏季海南岛东岸多东南与东向风浪及南岸多偏南向风浪影响有关。部分沿岸区域输运趋势多变,可能与海岸多港湾,风浪与潮流均为沿岸沉积主要动力有关。

4 讨论

4.1 物质来源及沉积动力

沉积类型分布主要受控于沉积物源、流场动力、地形地貌、海区本底物质组成等因素。前人基于不同尺度、多种方法对南海北部沉积物源及环境进行了探讨,如粒度^[21,22]、元素地球化学^[24-28]、碎屑矿物^[29]、单矿物成因^[30]、黏土矿物^[31]以及环境磁学^[32]等,结果表明,物源方面,南海北部周边众多河流,包括珠江、红河、湄公河、台湾岛河流、海南岛河流等陆源物质的汇入,以及绵长岸线的风化剥蚀沉积,为海南岛周边海域提供了充足的物质来源。研究区主要位于海南岛东南陆架浅水海域,岛上汇入河流主要为东部河流,特别是海南岛第三、四大河流万泉河和陵水河在流域面积、径流量等方面较大,现代河流沙多堆积于宽阔的海岸平原或沙坝潟湖带,进而影响到近海陆架的沉积作用^[24],因此,物质来源主要为海南岛径流输入和沿岸侵蚀搬运物质。其次,珠江流域物质在粤西沿岸流作用下向西南输送,以及南海表层流所携的复杂来源物质,均会对该区域沉积作用产生部分影响。

沉积动力方面,研究区主要发育流系包括华南近岸流、广东沿岸流、南海表层环流、南海暖流以及局部上升流^[33-35]。具体来看,靠近陆地的西南向华南近岸流,不随季节变化而改变;广东沿岸流(粤西沿岸流)主要源于江河淡水,方向终年由东北流向西南;夏季和冬季的表层环流随季风方向的转变而方向相反:冬季为东北-西南的逆时针向环流,流向西南,夏季为西南-东北向的顺时针向环流,流向东北或偏东;南海暖流沿海南岛以东100 m等深线,终年由西南流向东北。潮流与风浪方面,海南岛东南部为不规则日潮混合潮,潮差0.7~0.8 m,最大潮差1.89 m,大潮平均最大流速45 cm/s,为弱流区。海南岛东南临开阔外海,季风性风浪对其近岸作用显著,具体表现为冬季与台风季节风浪多东北与偏北向且风力强劲,夏季多东南与东向且风浪频繁,大浪甚至高达6 m^[16]。因此,研究区主要受海南岛上径流输送、近岸流系及海浪作用等动力条件影响。

4.2 沉积环境区划

根据以上研究区粒度分析结果,并结合地理位置、物质来源、输运距离、水动力影响及沉积环境变迁等差异,划分为3个沉积环境区(图6)。

砂砾质沉积区(I区):自西北部近岸向南延伸至研究区中部约120 m等深线,呈不规则带状,底质类型以含砾沉积为主,代表该区多为较粗粒物质沉积,为强动力沉积环境。输运趋势显示:该区受岛上地表径流影响较大,北部的万泉河河流输沙量丰富,在西南向表层流及强风浪作用影响下,大量河流入海及岸线侵蚀物质堆积至此,经分选细粒物质再悬浮搬运,导致此区沉积了许多较粗的沉积物。推测此沉积区主要受控于岛上径流及强风浪作用,物质来源以万泉河等河流输运及岸线侵蚀物质为主,搬运距离较近,沉积动力条件强。

砂质沉积区(II区):包括东北部的II₁区及西南部的II₂区(水深80~120 m范围),与水深关系密切,底质类型以砂质沉积为主,粒径中等,该区较I沉积区砂质组分含量增加,分选度提高,水动力条件中等。粒径输运趋势显示,II₁呈砂质沉积小区域范围的东北向输运趋势,可能为河流入海物质输运至I沉积区后,受到南海季风漂流(夏季)影响;II₂区北部主要在西南向的粤西沿岸流、南海季风漂流(冬季)等水动力条件控制下,海南岛径流及岸线侵蚀、少量珠江流域物质自东北向西南方向输运,输运趋势及范围高于II₁区,南部则为东南向近垂直岸线输运趋势,主要为外海复杂来源物质,在夏季海南岛东南与东向风浪、南岸偏南向风浪的作用下运移有关。II沉积区可能主要是以前低海平面时的残留滨海沉积,受到表层流及风浪等现代沉积动力共同作用,混入海南岛径流及岸线侵蚀、少量珠江流域及外海复杂来源等现代细粒物质的混合沉积,应当属于再造沉积,沉积动力条件中等。

泥质沉积区(III区):分布于万宁以南的滨浅海区、北部浅海及东南部深水区,占研究区面积最大,底质类型多为粉砂及黏土质沉积,粒径较细,为弱动力沉积环境。粒径输运趋势显示,万宁以南水深较浅的滨海区域,主要受华南近岸流、风浪的作用,因发育较宽海岸平原或沙坝潟湖带,河流输入泥沙较少,且区域植被覆盖良好,在内陆架滨海区沉积细粒物质,物质来源以岸线侵蚀及河流细粒物质的悬浮扩散为主。北部为东北向输运趋势,主要受冬季与台风季节东北向与偏北向风浪作用影响,推测可能接受了珠江流域物质。东南部外陆架深水区

沉积水动力条件较弱,多沉积细粒物质,沉积物运输方向为东北向,可能受南海暖流携带的复杂来源物质的影响。

5 结论

(1)海南岛东南浅海表层沉积物共有13种类型,包括含砾泥、砾质泥、含砾泥质砂、砾质泥质砂、砾质砂、泥质砂质砾、砂质砾、粉砂质砂、泥质砂、砂质泥、砂质粉砂、粉砂、泥等。沉积物不同类型其平均粒径、分选系数、偏态、峰态差异显著,整体表现为粒径较细、分选差、偏态多近于对称分布、峰态多中等。

(2)海域沉积特征及环境差异明显,北部近岸以含砾沉积为主,强动力(高能)沉积环境,研究区中部为呈NE-SW向的砂质沉积区(水深80~120 m范围),中等动力沉积环境,西南近岸滨海、北中部海域以及东南部海域多为粉砂、黏土质沉积,弱动力(低能)沉积环境。

(3)研究区可分为3个沉积区:I区受控于海南岛上径流及强风浪作用,物质来源可能以万泉河等河流输运及岸线侵蚀物质为主;II区可能主要是低海平面时的残留滨海沉积,受到表层流及风浪等共同作用,混入海南岛径流及岸线侵蚀、少量珠江流域及外海复杂来源等现代细粒物质的混合沉积;III区主要受华南近岸流、风浪作用及南海暖流影响,推测物质来源主要为海南岛河流输入、岸线侵蚀及复杂外海来源细粒物质的加入。

参考文献 (References)

- [1] Brooks G R, Doyle L J, Davis R A, et al. Patterns and controls of surface sediment distribution: West-central Florida inner shelf [J]. *Marine Geology*, 2003, 200 (1-4): 307-324.
- [2] De Falco G, Molinaroli E, Baroli M, et al. Grain size and compositional trends of sediments from *Posidonia oceanica* meadows to beach shore, Sardinia, western Mediterranean [J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2003, 58 (2): 299-309.
- [3] 杨守业, 李从先. 元素地球化学特征的多元统计方法研究: 长江与黄河沉积物元素地球化学研究[J]. *矿物岩石*, 1999, 19 (1): 63-67. [YANG Shouye, LI Congxian. Multiple statistic study of element geochemical characteristics element geochemical study on the Changjiang and Huanghe sediments [J]. *Journal of Mineralogy and Petrology*, 1999, 19 (1): 63-67.]
- [4] 王秀红. 多元统计分析在分区研究中的应用[J]. *地理科学*, 2003, 23 (1): 66-71. [WANG Xiuhong. Application of multivariate statistical analysis in regionalization study [J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2003, 23 (1): 66-71.]
- [5] 徐志伟, 汪亚平, 李炎, 等. 多元统计及物源分析支持的北部湾东部海域沉积物运输趋势[J]. *海洋学报*, 2010, 32 (3): 67-78. [XU Zhiwei, WANG Yaping, LI Yan, et al. Sediment transport patterns in the eastern Beibu Gulf based on grain-size multivariate statistics and provenance analysis [J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2010, 32 (3): 67-78.]
- [6] Gao S, Collins M B, Lanckneus J, et al. Grain size trends associated with net sediment transport patterns: An example from the Belgian continental shelf [J]. *Marine Geology*, 1994, 121 (3-4): 171-185.
- [7] 张富元, 章伟艳, 张德玉, 等. 南海东部海域表层沉积物类型的研究[J]. *海洋学报*, 2004, 26 (5): 94-105. [ZHANG Fuyuan, ZHANG Weiyan, ZHANG Deyu, et al. Research on surface sediment types and distributions from the eastern South China Sea, China [J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2004, 26 (5): 94-105.]
- [8] Liu J G, Xiang R, Chen Z, et al. Sources, transport and deposition of surface sediments from the South China Sea [J]. *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, 2013, 71: 92-102.
- [9] 高为利, 张富元, 章伟艳, 等. 海南岛周边海域表层沉积物粒度分布特征[J]. *海洋通报*, 2009, 28 (2): 71-80. [GAO Weili, ZHANG Fuyuan, ZHANG Weiyan, et al. Characteristics of grain size distributions of surface sediments in the Hainan island Offshore area [J]. *Marine Science Bulletin*, 2009, 28 (2): 71-80.]
- [10] 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. [LI Liang, CHEN Zhong, LIU Jianguo, et al. Distribution of surface sediment types and sedimentary environment divisions in the northern South China Sea [J]. *Journal of Tropical Oceanography*, 2014, 33 (1): 54-61.]
- [11] 赵利, 彭学超, 钟和贤, 等. 南海北部陆架区表层沉积物粒度特征与沉积环境[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2016, 36 (6): 111-122. [ZHAO Li, PENG Xuechao, ZHONG Hexian, et al. Characteristics of grain size distribution of surface sediments and depositional environments in the northern shelf region of the South China sea [J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2016, 36 (6): 111-122.]
- [12] 葛晨东, Slaymaker O, Pedersen T F. 海南岛万泉河口沉积环境演变[J]. *科学通报*, 2003, 48 (21): 2357-2361. [GE Chendong, Slaymaker O, Pedersen T F. Change in the sedimentary environment of Wanquan river estuary, Hainan Island, China [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2003, 48 (21): 2357-2361.]
- [13] 张亮, 贾建军, 高建华, 等. 海南博鳌海域的沉积物运输趋势与沉积速率[J]. *热带海洋学报*, 2011, 30 (2): 123-130. [ZHANG Liang, JIA Jianjun, GAO Jianhua, et al. Sediment transport and deposition rate along the Boao coast, Hainan Island [J]. *Journal of Tropical Oceanography*, 2011, 30 (2): 123-130.]
- [14] 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. [YANG Yang, GAO Shu, ZHOU Liang, et al. Grain size distribution of surface sediments and sedimentary environment in the lagoon of Xincun, Hainan Island [J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2016, 38 (1): 94-105.]
- [15] 陈泓君, 彭学超, 朱本铎, 等. 南海1: 100万海南岛幅海洋区域地质调查与编图成果综述[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2014, 34 (6): 87-100. [CHEN Hongjun, PENG Xuechao, ZHU Benduo, et al. A brief

- review of 1: 1000000 marine geological survey and mapping results of the Hainan sheet in the south china sea [J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2014, 34 (6): 87-100.]
- [16] 殷勇, 朱大奎, 唐文武, 等. 博鳌地区沙坝-泻湖沉积及探地雷达的应用[J]. *地理学报*, 2002, 57 (3): 301-309. [YIN Yong, ZHU Dakui, TANG Wenwu, et al. On barrier-lagoon development and GPR application in BOAO area [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2002, 57 (3): 301-309.]
- [17] 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.
- [18] Friedman G M. Address of the retiring president of the international association of sedimentologists: difference in size distributions of populations of particles among sands from various origins [J]. *Sedimentology*, 1979, 26 (1): 3-32.
- [19] 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. [JIN Bingfu. Influencing factors and significance of the skewness coefficient in grain size analysis [J]. *Marine Sciences*, 2012, 36 (2): 129-135.]
- [20] 程鹏, 高抒. 北黄海西部海底沉积物的粒度特征和净输运趋势[J]. *海洋与湖沼*, 2000, 31 (6): 604-615. [CHENG Peng, GAO Shu. Net sediment transport patterns over the Northwestern Yellow Sea, based upon grain size trend analysis [J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 2000, 31 (6): 604-615.]
- [21] 乔淑卿, 石学法, 王国庆, 等. 渤海海底质沉积物粒度特征及输运趋势探讨[J]. *海洋学报*, 2009, 32 (4): 139-147. [QIAO Shuqing, SHI Xuefa, WANG Guoqing, et al. Discussion on grain-size characteristics of seafloor sediment and transport pattern in the Bohai Sea [J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2009, 32 (4): 139-147.]
- [22] 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. [CHEN Liang, ZHANG Yufen, LI Tuanjie, et al. Sedimentary environment and its evolution of Qiongzhou Strait and nearby seas since last ten thousand years [J]. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 2014, 39 (6): 696-704.]
- [23] Liu J G, Xiang R, Chen M H, et al. Influence of the Kuroshio current intrusion on depositional environment in the Northern South China Sea: Evidence from surface sediment records [J]. *Marine Geology*, 2011, 285 (1-4): 59-68.
- [24] 许冬. 海南岛近海沉积地球化学研究[D]. 国家海洋局第二海洋研究所硕士学位论文, 2007. [XU Dong. The research of sedimentary geochemistry of the Hainan Island Nearshore sea area[D]. Master Dissertation of Second Institute of Oceanography of the State Oceanic Administration, 2007.]
- [25] Zhang J, Wang D R, Jennerjahn T, et al. Land-sea interactions at the east coast of Hainan Island, South China Sea: A synthesis [J]. *Continental Shelf Research*, 2013, 57: 132-142.
- [26] 闫慧梅. 南海北部陆架区沉积物来源及其输运机制[D]. 中国石油大学(华东)硕士学位论文, 2016. [YAN Huimei. Sediments sources and transportation from the continental shelf of the northern South China Sea[D]. Master Dissertation of China University of Petroleum (East China), 2016.]
- [27] 徐方建, 陈世悦, 操应长, 等. 近4400年来南海北部陆架沉积地球化学记录及其地质意义[J]. *沉积学报*, 2010, 28 (6): 1198-1205. [XU Fangjian, CHEN Shiyue, CAO Yingchang, et al. Geochemical records and geological significance of the continental shelf sediments in the northern South China Sea since 4400a [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2010, 28 (6): 1198-1205.]
- [28] 赵建如. 南海西北部表层沉积物元素地球化学空间多尺度变化与机制研究[D]. 中国地质大学(北京)博士学位论文, 2016. [ZHAO Jianru. Elements geochemistry spatial multiscale variability of surface sediments and its mechanism in northwest of the South China Sea[D]. Doctor Dissertation of China University of Geosciences (Beijing), 2016.]
- [29] 谭文华. 海南岛周边海域底质碎屑矿物分布及其物源分析[D]. 中国地质大学(北京)硕士学位论文, 2007. [TAN Wenhua. Study on the distribution and origin of the seafloor detrital minerals in the offshore water of Haian Island[D]. Master Dissertation of China University of Geosciences (Beijing), 2007.]
- [30] 周渭. 海南岛近海表层沉积物中辉石与角闪石的成因及物源研究[D]. 中国地质大学(北京)硕士学位论文, 2007. [ZHOU Wei. Study on the geneses and sources of pyroxene and amphibole in the offshore sediments around Haian Island[D]. Master Dissertation of China University of Geosciences (Beijing), 2007.]
- [31] 吴敏. 海南岛周边海域环境变化的粘土矿物学研究[D]. 中国地质大学(北京)博士学位论文, 2007. [WU Min. Clay mineralogical study on environmental change of Hainan Island offshore[D]. Doctor Dissertation of China University of Geosciences (Beijing), 2007.]
- [32] 田成静, 欧阳婷萍, 朱照宇, 等. 海南岛周边海域表层沉积物磁化率空间分布特征及其物源指示意义[J]. *热带地理*, 2013, 33 (6): 666-673. [TIAN Chengjing, OUYANG Tingping, ZHU Zhaoyu, et al. Spatial distribution of magnetic susceptibility and its provenance implication of surface sediments in the Sea areas around the Hainan island [J]. *Tropical Geography*, 2013, 33 (6): 666-673.]
- [33] 刘昭蜀, 赵焕庭, 范时清. 南海地质[M]. 北京: 科学出版社, 2002. [LIU Zhaoshu, ZHAO Huanting, FAN Shiqing. Geology of the South China Sea[M]. Beijing: Science Press, 2002.]
- [34] 刘志飞, Trentesaux A, Clemens S C, et al. 南海北坡ODP1146站第四纪粘土矿物记录: 洋流搬运与东亚季风演化[J]. *中国科学(D辑)*, 2003, 46 (12): 1223-1235. [LIU Zhifei, Trentesaux A, Clemens S C, et al. Quaternary clay mineralogy in the northern South China Sea (ODP Site 1146) [J]. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 2003, 46 (12): 1223-1235.]
- [35] Fang G H, Fang W D, Fang Y, et al. A survey of studies on the South China Sea upper ocean circulation [J]. *Acta Oceanographica Taiwanica*, 1998, 37 (1): 1-16.