

DOI: 10. 16562/j. cnki. 0256-1492. 2017. 06. 015

南海宣德海域表层沉积物粒度特征及其输运趋势

李亮, 何其江, 龙根元, 贺超, 杨凡

(海南省海洋地质调查研究院, 海口 570206)

摘要:对宣德海域 151 个表层沉积物样品进行了粒度组分、粒径参数分析, 结果表明岛礁区分布有 8 种沉积物类型, 粒度组成以砂和砾为主, 粉砂和黏土相对较少。通过因子分析和聚类分析, 研究区可分为 4 类沉积区, I 区位于研究区中心地带, II 区位于岛礁附近海域, III 区主要位于环礁中心海域, IV 区主要位于宣德环礁的礁盘外沿海域。粒径趋势分析显示, 沉积物输运格局与研究区水动力条件吻合, 并在七连屿海域形成汇聚区。

关键词:粒度特征; 粒径趋势; 表层沉积物; 宣德海域

中图分类号: P736. 21

文献标识码: A

文章编号: 0256-1492(2017)06-0140-09

沉积物粒度是研究海洋沉积作用及过程的重要指标之一^[1,2], 可以用来揭示沉积物的物质来源、沉积动力和输移趋势等环境信息, 并能在很大程度上反映出海域的动力-沉积-地貌相互耦合机制^[3,4], 其组成及分布主要受物源和沉积环境等因素控制^[5-7]。

研究区位于西沙宣德群岛海域, 主要由 12 座小岛组成, 永兴岛是西沙诸岛中面积最大的岛屿, 也是三沙市政府所在地。宣德环礁位于西沙台阶东北部, 为 NNW—SSE 向椭圆形, 长约 28 km, 宽约 16 km, 北部礁盘发育好, 宣德环礁礁盘大致按低潮面发育, 内部水深, 边缘水浅, 形成盘状形态, 生态环境良好^[8]。西沙群岛海区的潮汐为不规则日潮, 平均潮差 0.89 m, 最大潮差 2.05 m, 潮流特征春夏季总体方向是东北, 最大流速 66 cm/s, 秋冬流向偏北^[9]。

近年来, 西沙岛礁的开发和建设已逐步践行, 部分岛礁及相关海域已经进行开发利用^[10], 西沙其独特地理位置和有利的资源环境将为国家“一带一路”战略布局提供有力支撑。前人对西沙海域有关研究主要集中于珊瑚种属调查^[11-13]、气候环境演化^[14-16]、地质构造等方面^[17-19], 对于岛礁区底质研究却鲜有报道。目前, 灰砂岛沉积特征、物质来源及形成过程成为众多学者探讨的焦点^[20-22], 本文通过对南海宣德群岛海域表层沉积物的粒度分析和多元统计结果, 并结合沉积物输运趋势分析, 探讨了研究区沉积物粒度分布及输运特征, 为深入揭示研究区

沉积环境特征、岛礁的形成演化及工程建设提供重要基础资料。

1 材料与方法

2016 年 3—5 月, 海南省海洋地质调查研究院使用抓斗采样器在宣德环礁海域取得 151 个表层沉积物样品, 取样站位如图 1 所示。沉积物主要为灰白色珊瑚碎屑砂, 其中珊瑚块体和生物贝壳广泛存在。

表层沉积物经密封后送至中国科学院南海海洋研究所进行全岩粒度分析, 测试仪器为 Mastersizer 2000 型激光粒度仪。实验室具体处理流程如下: 首先取适量样品烘干, 对于粒径小于 2 000 μm 的样品, 用蒸馏水浸泡并滴加 0.05 N 六偏磷酸钠, 并在烧杯中静置 24 h, 然后使用激光粒度仪进行测试, 测试前利用超声波振荡仪振荡 15 min。激光粒度仪测量范围为 0.02~2 000 μm , 相对误差小于 2%, 粒级分辨率为 0.01 Φ , 重复测量相对误差 < 3%。对于粒径大于 2 000 μm 的样品, 先称重, 采用传统筛法分析称量, 两部分数据利用激光粒度分析仪仿真程序获得完整的粒度分布。粒级标准采用尤登-温德华氏等比制 Φ 值粒级标准, 粒度参数用矩法计算, 沉积物的分类和定名采用 Folk & Ward 三端元分类法^[23]。

粒径趋势分析是指根据粒度特征的空间差异反演颗粒堆积前的搬运过程^[24,25]。本文采用 Gao-Collins 模型^[26,27], 利用表层沉积物的平均粒径、分选系数及偏态来反演研究区内的沉积物运移趋势, 该模型因其操作简单模拟结果客观, 已被广泛应用于河口、港口、海岸带、陆架和湖泊等环境沉积物净

基金项目: 海南省国土资源厅项目 (HZ2015-235)

作者简介: 李亮 (1987—), 男, 硕士, 工程师, 主要从事海洋沉积研究与资源环境调查工作, E-mail: liliang_ocean@163.com

收稿日期: 2017-04-30; 改回日期: 2017-06-21。周立君编辑

输运趋势的研究^[28-30]。

2 结果

2.1 沉积物类型及分布特征

研究区表层沉积物可分为 8 种类型(图 1b),分别为泥质砂质砾(msG)、砾质砂(gS)、砾质泥质砂(gmS)、含砾砂((g)S)、砂(S)、粉砂质砂(zS)、含砾泥质砂((g)mS)以及珊瑚碎块(CL₁₆),其中珊瑚碎块类型是以实际站位所取得样品进行描述命名。主要沉积物类型为泥质砂质砾、砾质砂、砾质泥质砂、粉砂质砂以及珊瑚块体,其分布占 80%以上,细颗粒沉积物含量较少。

2.2 表层沉积物粒级组分分布特征

研究区沉积物粒度主要以砾、砂组成,总体较粗,粉砂及黏土含量相对较少。研究区砾石含量为 0~64.20%,平均为 15.09%(表 1),大部分海域都含有砾石组分,其含量分布如图 2a 所示,从图中可以看出,砾石高含量(>30%)主要分布于西沙洲南部、南沙洲东部、石岛近岸以及银砾浅滩附近海域,

低含量(<10%)主要分布于七连屿及永兴岛附近海域,其底质主要为珊瑚礁体。研究区砂质分布较广,遍布于整个海域,最大值达到 100%,最小值为 14.61%,平均值为 71.04%(表 1)。研究区大部分海域砂质含量超过 50%,主要成分为珊瑚碎屑砂,其他成分较少。砂质含量低值区主要分布于西沙洲南侧、七连屿东部以及银砾浅滩附近海域(图 2b),永兴岛西南部大片海域底质主要为珊瑚礁体,砂质沉积物也较少。研究区粉砂含量相对较少,只有零星分布,其最大值为 57.56%,最小值为 0,平均值为 11.65%(表 1),其高含量(>30%)主要位于西沙洲南侧和银砾浅滩海域(图 2c),此处海域底质粗颗粒相对含量较少,与砂含量呈负相关。黏土含量介于 0~27.83%之间,平均为 2.12%(表 1),黏土组分主要集中在西沙洲南侧海域(图 2d),位于礁盘内侧,水流相对平缓,其他海域几乎不含黏土。

2.3 表层沉积物粒度参数特征

沉积物粒度参数主要包括平均粒径、分选系数、偏态值和峰态值,它们不仅记录了沉积动力条件和沉积物运移信息,同时也是识别沉积环境类型、推断沉积物来源以及搬运方式的常用手段。

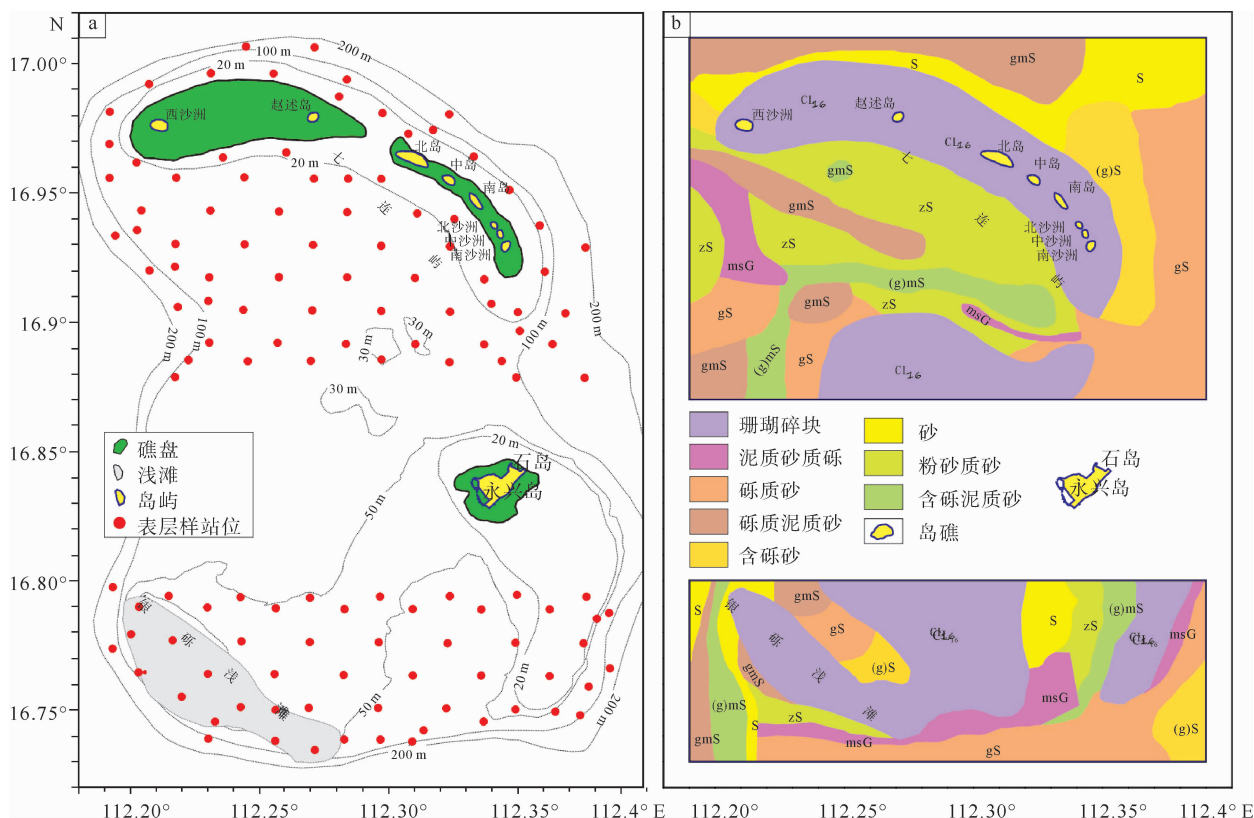


图 1 研究区位置(红框)与取样站位(a)及沉积物类型分布图(b)

Fig. 1 (a) Location of the study area and sampling positions (Red dots) and (b) Distribution of surface sediment types

表1 表层沉积物粒级组分统计
Table 1 Composition of surficial sediments

	砾/%	砂/%	粉砂/%	黏土/%	平均粒径/ Φ	分选系数	偏态	峰态
最大值	64.20	100	57.56	27.83	6.58	3.50	0.91	2.67
最小值	0	14.61	0	0	-0.29	0.66	-0.37	0.57
平均值	15.09	71.04	11.65	2.12	1.79	1.92	0.18	1.16

平均粒径反映了沉积介质的平均动能大小。研究区平均粒径介于 $-0.29 \sim 6.58 \Phi$ 之间,平均为 1.79Φ (表1)。从图3a可以看出研究区平均粒径相对比较粗,大部分都介于 $1 \sim 3 \Phi$ 之间,反映出该

海域强水动力特征,只有零星几处海域平均粒径较细,主要分布于七连屿南侧海域以及银砾浅滩附近,其底质沉积物为含砾泥质砂和砾质泥质砂。研究区处于环礁礁盘之上,水深较浅,底质沉积物主要以珊

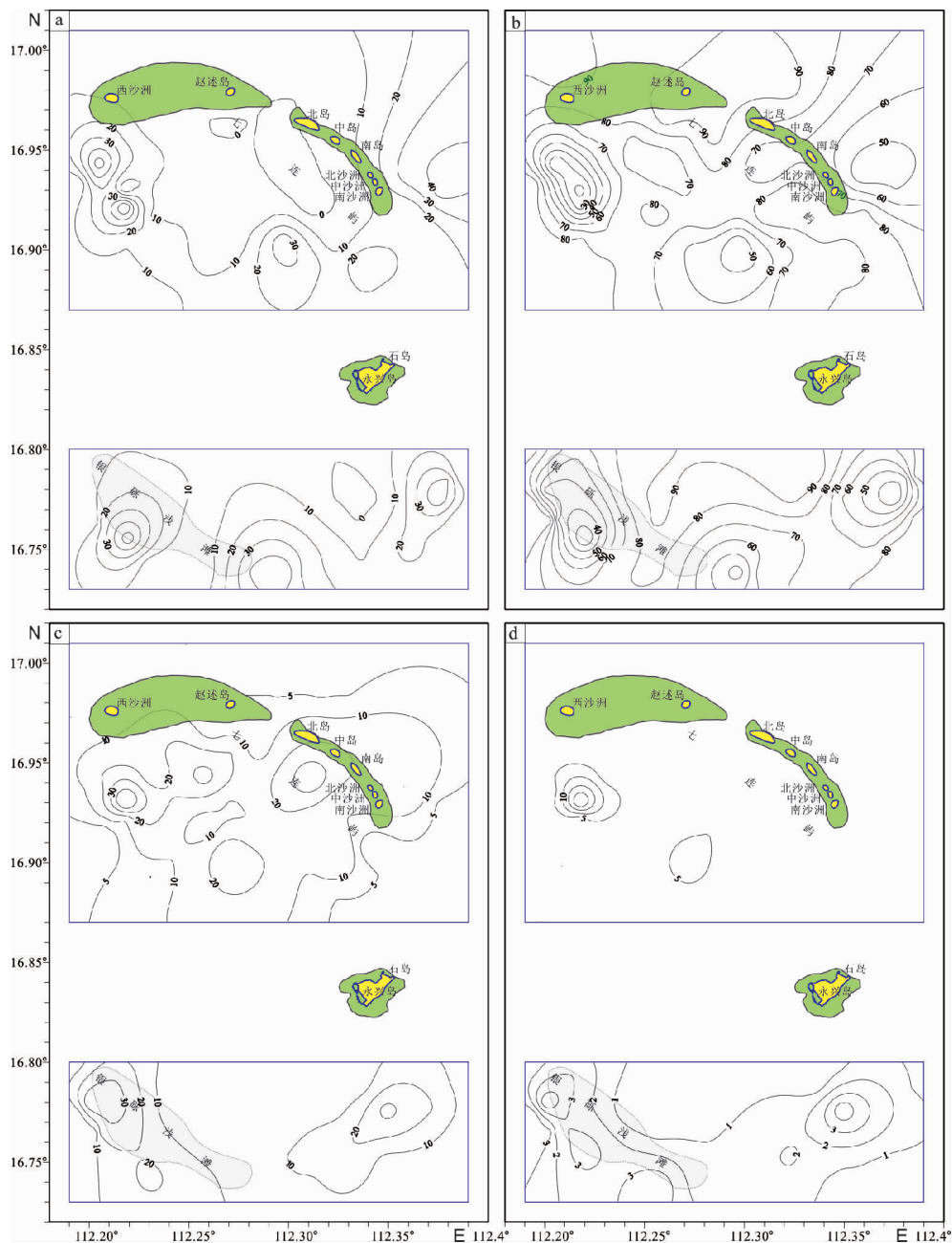


图2 表层沉积物粒级组分百分含量分布(a.砾石,b.砂,c.粉砂,d.黏土)

Fig. 2 Distribution map of gravel, sand, silt, and clay percentage of the surface sediments

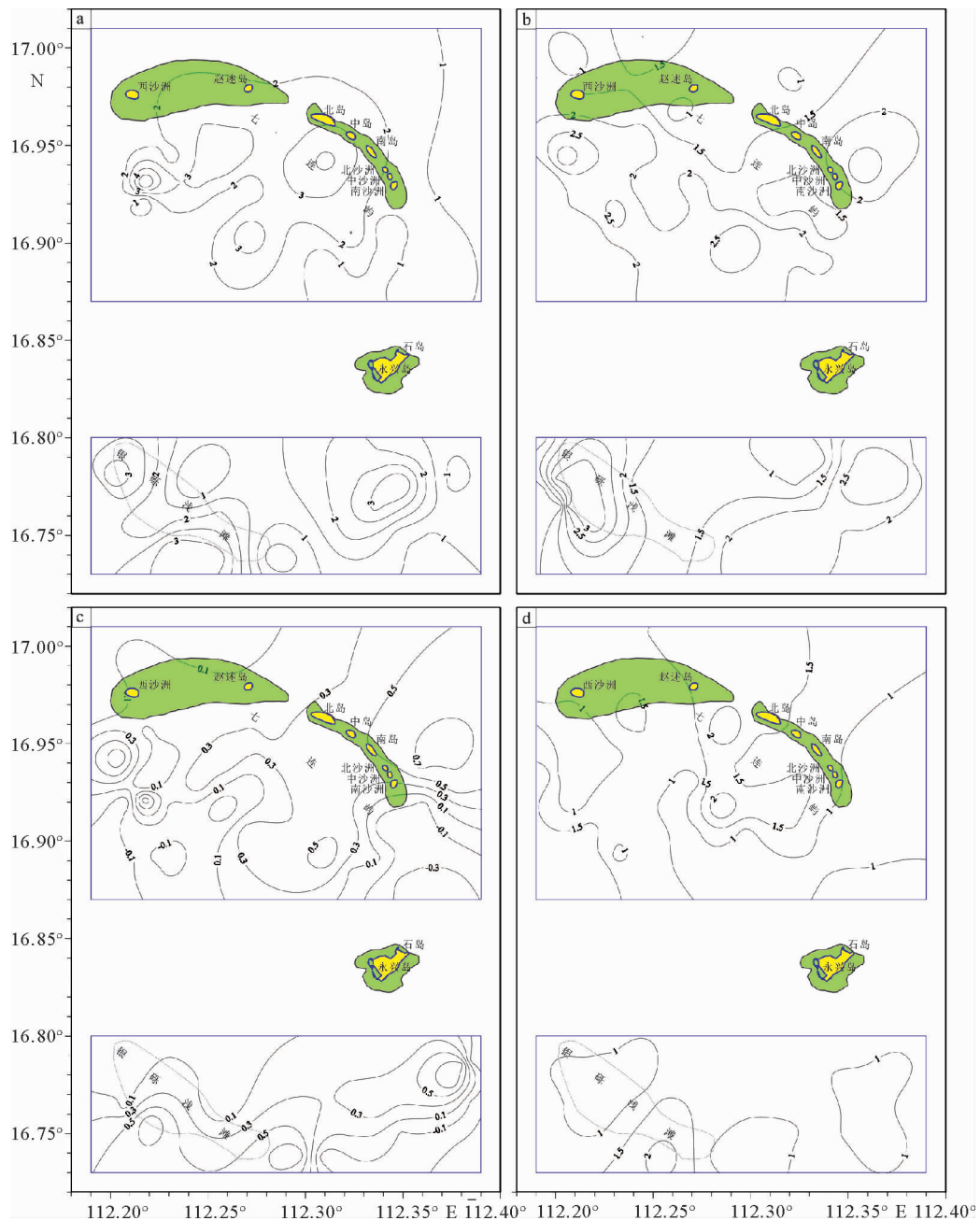


图 3 表层沉积物粒径参数分布(a.平均粒径 b.分选系数 c.偏态 d.峰态)

Fig. 3 Isoline map of grain size parameters of surface sediments

瑚碎屑砂为主,并含有大量的贝壳碎屑,由于强水动力的影响,细粒物质随水流的冲刷被搬运而走,粗颗粒沉积物受物源影响不断被磨圆而沉积下来。

分选系数是沉积物粒径分选程度的体现,某一主要粒级越突出,含量越高,分选系数就越小,分选性就越好;若粒径分布越广,粒级比较分散,其分选系数就越大,分选性就越差。研究区分选系数介于 0.66~3.50 之间,平均为 1.92(表 1)。研究区表层沉积物分选性整体较差,分选较好($\sigma < 1$)主要位于西沙洲-中岛附近海域(图 3b),并成散点状,此外,

在永兴岛南侧也有小片海域分选性较好,其底质主要为砂和粉砂质砂。研究区其他海域分选系数都大于 1,属于分选差的范畴。

偏态用来反映沉积物粒度频率曲线的对称程度,对沉积物的成因有重要的意义。研究区偏度介于 -0.37~0.91 之间,平均为 0.18(表 1),只有零星海域趋于负偏(图 3c),主要位于南沙洲南侧以及研究区西部海域,七连屿近岸海域以及银砾浅滩附近主要以正偏为主,其底质为砾、砂质等粗颗粒沉积物,这也客观反映出沉积物粒径越粗,分选越差,偏

态也以正偏为主。

峰态是粒度频率曲线的尖锐程度的体现,反映了沉积物粒度频率分布曲线中部和尾部的展型比。研究区表层沉积物峰态值介于0.57~2.67之间,平均为1.16(表1)。窄峰态($K_g < 1$)主要位于南沙洲-北沙洲西北侧、永兴岛东北侧以及七连屿附近海域(图3d),永兴岛西侧大片海域为中等峰态,宽峰态主要分布于七连屿西南侧和研究区的西侧。

3 讨论

3.1 沉积环境分区

沉积物的多个指标数据可以提供丰富的信息,但也增加了分析问题的复杂性和难度^[31]。事实上,不同指标之间往往存在一定的相关性,因此,本文采用主成分因子分析对沉积物粒度数据进行降维处理,获得每个样品对主因子的贡献得分。以方差贡献大于5%为标准选取的因子数为4个,前4种因子特征值比例分别为32.3%、24.5%、20.9%、10.0%,累计特征值比例为87.7%,方差极大旋转因子载荷显示(图4),因子1主要由细颗粒黏土成分的正载荷组成,因子2主要由中、粗粉砂级物质正载荷组成,因子3由负载荷砾及正载荷细砂级物质组成,因子4由正载荷粗砂级物质组成。将因子得分作为样品的新变量作Q型聚类分析(图5),根据以上分析结果有效划分出沉积物样品类别,最后以此绘制出研究区沉积环境分区图。如图6a所示,研究区可分为4类沉积区。

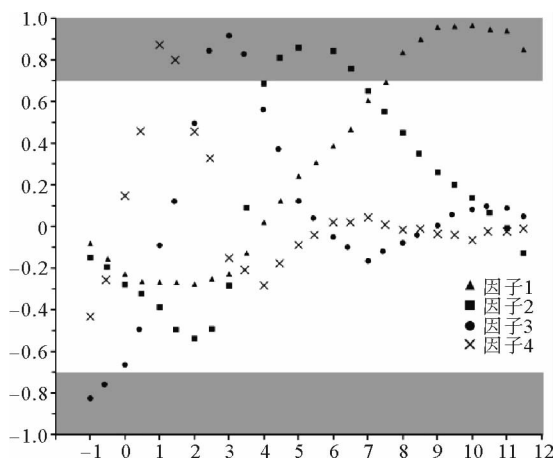


图4 方差极大旋转后各因子在各粒级上的主成分载荷
Fig. 4 The grain-size factor loading map of surface sediments (via varimax rotation)

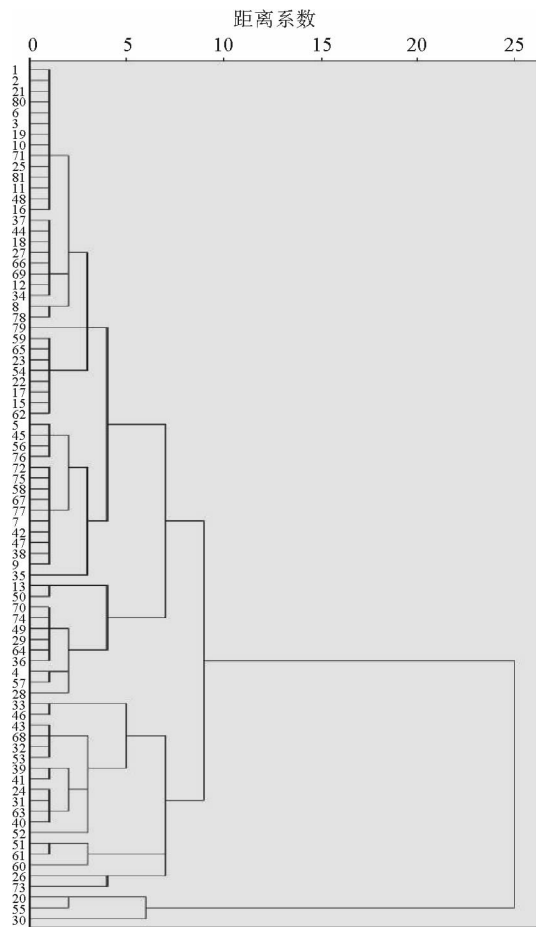


图5 表层沉积物聚类分析谱系(以因子得分为变量)
Fig. 5 Diagram of cluster analysis of surface sediments (Factor scores as variables)

I类沉积区分布于研究区中心地带,介于岛礁与礁盘外沿之间,其底质主要为粉砂质砂,沉积物平均粒径相对较细,呈弱的正偏或是近于对称,因子分析显示出其主控因子由中、粗粉砂以及细砂正载荷组成,分选相对差于周围沉积物,表明该区沉积物的分布与水动力的变化以及物源条件有关,礁盘外强烈的海流冲刷礁盘外沿,携带大量沉积物通过研究区西部“海底通道”进入礁盘,随着水深逐渐变浅,沉积物颗粒逐渐变细,同时潮汐的变化也使得近岸物质被搬运至浅水区域。

II类沉积区分布于岛礁附近海域,其底质类型中靠近岛礁的主要为珊瑚块体,远离岛礁的区域主要为砾质泥质砂,该区主要特征为底质沉积物颗粒较粗,以粗砂为主,分选相对较好,黏土以及砾石含量极少。该区靠近岛礁以及浅滩,沉积物受物源影响明显,搬运方式主要为波浪和潮汐。

III类沉积区分布于环礁中心海域,底质主要为砾质砂,因子分析显示其主控因子为正载荷粗砂和负载荷细砾组成,表明该区水动力强烈。

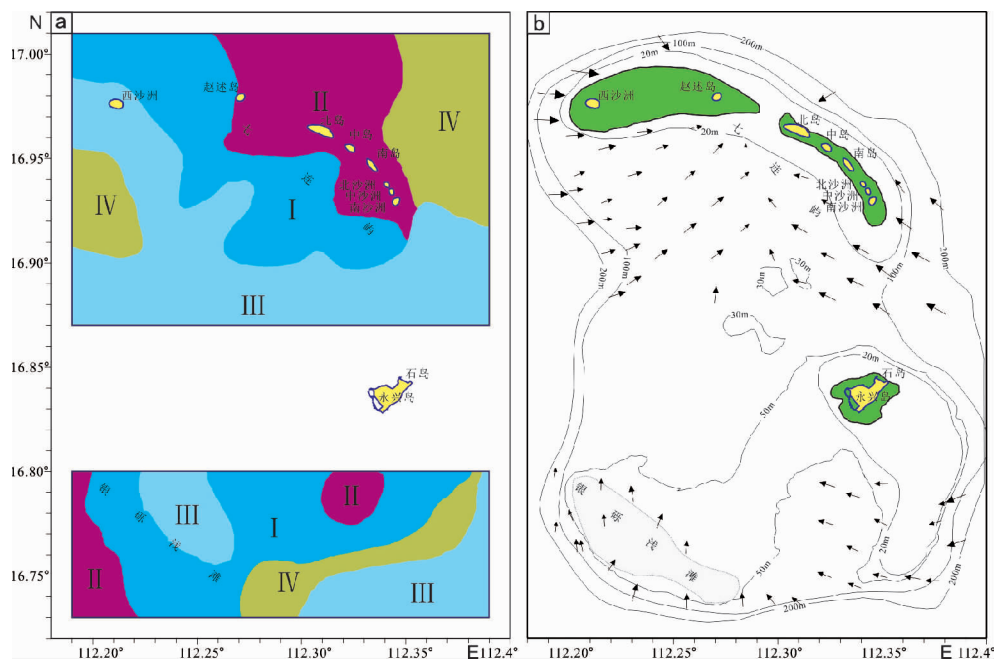


图 6 研究区沉积环境分区(a)及沉积物净输运趋势(b)

(I 区沉积物底质相对较细,为多物源成分组成;II 区以近岸沉积物为主,为浅水区域;

III 区主要为静态沉积区,水动力相对平稳;IV 区为礁盘外沿区,沉积物受地形及海流影响;

三角形站位为 ADCP 测流点;矢量箭头表示沉积物净搬运方向,长度仅表示粒径趋势的显著性,不代表搬运速率的大小)

Fig. 6 Sedimentary environments of the study area (a) and sediment transport pattern by grain size trend analysis (b)

IV 类沉积区分布于宣德环礁的礁盘外沿海域,底质主要为泥质砂质砾,因子分析沉积物主控因子由细颗粒黏土和砾级组分组成。该区主要受洋流以及礁盘海底地形的影响,礁盘处海水深度由外至内迅速降低,礁盘外侧沉积物磨圆较好,颗粒明显粗于礁盘内侧,礁盘内侧水深较浅,部分更有暗礁浅滩出露海面,水动力较弱,因此细颗粒沉积物得以保存。此外,外海强烈的海流受地形影响而发生剧烈形变,潮流流向转变使得该区底质沉积物分选较差。

3.2 沉积物净输运趋势分析

由于本文采样站位的不规则和不均匀性,采用地质统计方法未能有效获取粒径趋势分析模型所需的变程值(即特征距离),因此,本文取最大采样间距 0.08 作为特征距离^[25,28],通过 GSTA 模型获得的研究区沉积物输运趋势如图 6b 所示(已剔除边界效应),其中矢量箭头表示沉积物净搬运方向,矢量长度仅表示粒径趋势的显著性,不代表搬运速率的大小。

宣德环礁海域是一个半封闭的沉积系统,南部两侧水深梯度变化大,东西两侧则变化相对缓慢。礁盘内沉积物物质来源主要有 3 种:(1)南海沉积物

随着洋流的搬运作用进入,此部分主要以细颗粒为主,主要沉积于礁盘内侧;(2)珊瑚碎屑砂以及生物贝壳的自然沉降,此部分是礁盘内最主要的沉积物;(3)礁盘外沿被海流不断冲刷而卷起的沉积物沉积于礁盘内部。从粒径输运趋势图可以看出,研究区西部沉积物粒径趋势大致由西南向东北输运,东部则由东南向西北输运,这也与研究区 ADCP(声学多普勒流速剖面仪)实测海流流向一致(如图 7 所示),即主要表现为,随着时间的变化表层流向主要在东、西方向轮转,研究区北部,强流向以 E 为主,其次为 SE 向,研究区南部,强流向以 NW 向为主,其次为 E 向。这种输运格局主要是因为研究区受东西两侧“海流通道”的潮流影响,潮流进入礁盘内之后,在深水处沉积物以海流为主进行搬运,随着水深的降低,潮汐和波浪将占据主要作用,涨潮时,沉积物向岛礁侧搬运,落潮时,底质则随着潮汐和波浪作用远离岛礁,由于不断的冲刷和反复搬运,底质沉积物磨圆较好。此外,研究区海域复杂的海底地形及变化的水动力条件使得底质沉积物分选又较差。岛礁区沉积物随着潮流的不断输运,在七连屿附近海域形成汇聚区,也为岛礁的物质输运提供了稳定来源。

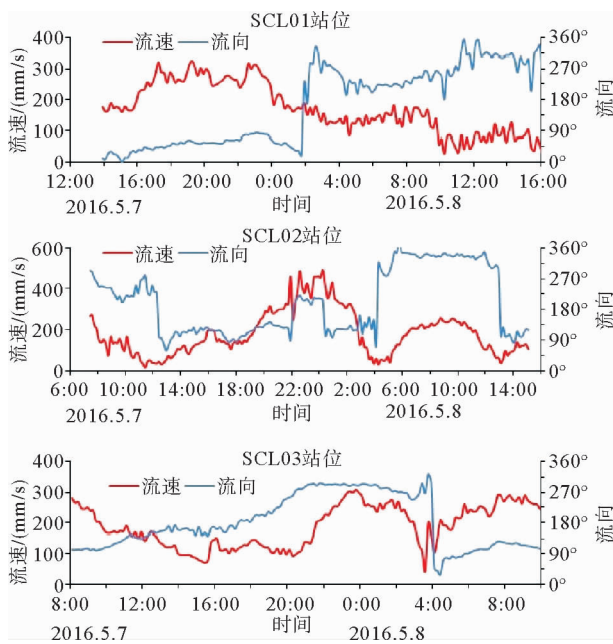


图7 研究区典型站位表层流速流向示意图

Fig. 7 Velocity and direction of the Surface flow from typical sites in the study area

4 结论

(1) 研究区表层沉积物可分为8种沉积物类型,分别为泥质砂质砾、砾质砂、砾质泥质砂、含砾砂、砂、粉砂质砂、含砾泥质砂以及珊瑚碎块。其中,泥质砂质砾、砾质砂、砾质泥质砂、粉砂质砂以及珊瑚块体为主要沉积物类型,分布达80%以上。

(2) 因子分析和聚类方法结果表明,研究区可分为4类沉积环境区。I类沉积区主要位于研究区中心地带,II类沉积区主要位于岛礁附近海域,III类沉积区主要位于环礁中心海域,IV类沉积区主要位于宣德环礁的礁盘外沿海域。

(3) 粒径趋势分析结果表明,沉积物输运格局与研究区水动力条件吻合,并在七连屿附近海域形成汇聚区,为西沙岛礁物质输运提供稳定来源。

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] Zhong Y, Chen Z, Li L, et al. Bottom water hydrodynamic provinces and transport patterns of the northern South China Sea: evidence from grain size of the terrigenous sediments[J]. *Continental Shelf Research*, 2017, 140: 11-26.
- [3] Cheng P, Gao S, Bokuniewicz H. Net sediment transport patterns over the Bohai Strait based on grain size trend analysis[J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2004, 60(2): 203 - 212.
- [4] Shi X F, Chen C F, Liu Y G, et al. Trend analysis of sediment grain size and sedimentary process in the central South Yellow Sea[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2002, 47(14): 1202-1207.
- [5] 李泽文, 栾振东, 阎军, 等. 南海北部外陆架表层沉积物粒度参数特征及物源分析[J]. *海洋科学*, 2011, 35(12): 92-100. [LI Zewen, LUAN Zhendong, YAN Jun, et al. Characterization of grain size parameters and the provenance analysis of the surface sediment in the outer shelf of the northern South China Sea[J]. *Marine Sciences*, 2011, 35(12): 92-100.]
- [6] 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.]
- [7] 孙有斌, 高抒, 李军. 边缘海陆源物质中环境敏感粒度组分的初步分析[J]. *科学通报*, 2003, 48(1): 83-86. [SUN Youbin, GAO Su, LI Jun. Preliminary analysis of environmental sensitive grain size group of terrigenous material in the edge of the sea[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2003, 48(1): 83-86.]
- [8] 曾昭璇. 中国珊瑚礁地貌研究[M]. 广州: 广东人民出版社, 1997: 149-164. [ZENG Zhaoxuan. *Geomorphology of Coral Reef Research in China*[M]. Guangzhou: Guangdong People's Publishing House, 1997: 149-164.]
- [9] 王道儒, 侍茂崇, 南峰. 西沙群岛潮、余流特征研究[J]. *中国海洋大学学报*, 2012, 42(10): 1-9. [WANG Daoru, SHI Maochong, NAN Feng. Study on features of tide and residual currents in the region of paracel Islands[J]. *Periodical of Ocean University of China*, 2012, 42(10): 1-9.]
- [10] 黎春红, 蔡岩. 西沙群岛海洋生物资源的旅游开发与利用[J]. *热带生物学报*, 2013, 4(2): 177-180. [LI Chunhong, CAI Yan. Development of marine bio-tourism of Xisha Islands[J]. *Journal of Tropical Biology*, 2013, 4(2): 177-180.]
- [11] 黄晖, 尤丰, 练健生, 等. 西沙群岛海域造礁石珊瑚物种多样性与分布特点[J]. *生物多样性*, 2011, 19(6): 710-715. [HUANG Hui, YOU Feng, LIAN Jiansheng, et al. Species diversity and distribution of scleractinian coral at Xisha Islands, China[J]. *Biodiversity Science*, 2011, 19(6): 710-715.]
- [12] Huang H, Lian J S, Huang X P, et al. Coral cover as a proxy of disturbance: a case study of the biodiversity of the hermatypic corals in Yongxing Island, Xisha Islands in the South China Sea[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2006, 51(S2): 129-135.
- [13] 朱志雄, 周永灿, 柯韶文, 等. 西沙群岛造礁石珊瑚主要疾病调查与初步研究[J]. *海洋学报*, 2012, 34(6): 195-204. [ZHU Zhixiong, ZHOU Yongchang, KE Shaowen, et al. The survey and preliminary research on main diseases of ston-

- y coral in Xisha Archipelago[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2012, 34(6): 195-204.]
- [14] Yu K F. Coral reefs in the South China Sea: their response to and records on past environmental changes[J]. *Science China Earth Sciences*, 2012, 55(8): 1217-1229.
- [15] 黄晖,董志军,练健生. 论西沙群岛珊瑚礁生态系统自然保护区的建立[J]. *热带地理*, 2008, 28(6): 540-544. [HUANG Hui, DONG Zhijun, LIAN Jiansheng. Establishment of nature reserve of coral reef ecosystem on the Xisha Islands[J]. *Tropical Geography*, 2008, 28(6): 540-544.]
- [16] 孙立广,赵三平,刘晓东,等. 西沙群岛生态环境报告[J]. *自然杂志*, 2005, 27(2): 79-84. [SUN Liguang, ZHAO Sanping, LIU Xiaodong, et al. An eco-environmental report on Xisha archipelago, South China Sea[J]. *Chinese Journal of Nature*, 2005, 27(2): 79-84.]
- [17] 马玉波,吴时国,邢树文,等. 南海北部陆坡混合沉积地层模式及地震响应特征[J]. *吉林大学学报:地球科学版*, 2012, 42(1): 88-95. [MA Yubo, WU Shiguo, XING Shuwen, et al. Stratigraphic model and seismic characteristics of the mixed sedimentation in the slope area of North South China Sea[J]. *Journal of Jilin University: Earth Science Edition*, 2012, 42(1): 88-95.]
- [18] 易亮,王振峰,张道军,等. 西沙西科1井三亚组生物礁沉积的磁性地层及其环境意义[J]. *海岸工程*, 2016, 35(3): 1-11. [YI Liang, WANG Zhenfeng, ZHANG Daojun, et al. Magnetostratigraphy of biogenic reef in the Sanya formation of borehole xk-1 from Xisha islands and its environmental significance[J]. *Coastal Engineering*, 2016, 35(3): 1-11.]
- [19] 冯英辞,詹文欢,姚衍桃,等. 西沙群岛礁区的地质构造及其活动性分析[J]. *热带海洋学报*, 2015, 34(3): 48-53. [FENG Yingci, ZHAN Wenhuan, Yao Yantiao, et al. Analysis of tectonic movement and activity in the organic reef region around the Xisha Islands[J]. *Journal of Tropical Oceanography*, 2015, 34(3): 48-53.]
- [20] 吕炳全,王国忠,全松青. 西沙群岛灰砂岛的沉积特征和发育规律[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 1987, 7(2): 59-69. [LV Bingquan, WANG Guozhong, QUAN Songqing. Sedimentary characteristics and evolutionary pattern of the sand cays in the Xisha Islands[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 1987, 7(2): 59-69.]
- [21] Zhu H T, Jiang X W, Meng X L, et al. A quantitative approach to monitoring new sand cay migration in Nansha Islands[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2016, 35(3): 102-107.
- [22] McKoy H, Kennedy D M, Kench P S. Sand cay evolution on reef platforms, Mamanuca Islands, Fiji[J]. *Marine Geology*, 2010, 269(1-2): 61-73.
- [23] Folk R L. A review of grain-size parameters[J]. *Sedimentology*, 1966, 6(2): 73-97.
- [24] 王国庆,石学法,刘焱光,等. 粒径趋势分析对长江南支口外沉积物输运的指示意义[J]. *海洋学报*, 2007, 29(6): 161-166. [WANG Guoqing, SHI Xuefa, LIU Yanguang, et al. Grain-size trend analysis on the south branch of the Changjiang Estuary in China and its implication to sediment transportation[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2007, 29(6): 161-166.]
- [25] 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): 314-424. [CHEN Han, CHEN Zhong, YAN Wen, et al. Grain size characteristics of surface sediments and their transport patterns over the coastal waters of Shantou City, Guangdong Province[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2014, 32(2): 314-424.]
- [26] 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.
- [27] 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. [GAO Shu. Grain size trend analysis: principle and applicability[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2009, 27(5): 826-836.]
- [28] 闵凤阳,汪亚平,左平,等. 深圳湾西北部海域表层沉积物的分布特征及输运趋势[J]. *沉积学报*, 2009, 27(4): 714-722. [MIN Fengyang, WANG Yaping, ZUO Ping, et al. Sediment grain size characteristics and transport patterns in the Northwestern Shenzhen Bay, China[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2009, 27(4): 714-722.]
- [29] 杨群慧,李木军,杨胜雄,等. 南海西南部表层沉积物粒度特征及输运趋势[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2013, 33(6): 1-7. [YANG Qunhui, LI Mujun, YANG Shengxiong, et al. Grain size distribution of surface sediments in the southwestern South China Sea and Transport trend analysis[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2013, 33(6): 1-7.]
- [30] 汪亚平,高抒,贾建军. 胶州湾及邻近海域沉积物分布特征和运移趋势[J]. *地理学报*, 2000, 55(4): 449-458. [WANG Yaping, GAO Shu, JIA Jianjun. Sediment distribution and transport patterns in Jiaozhou Bay and adjoining areas[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2000, 55(4): 449-458.]
- [31] 张尧庭,方开泰. 多元统计分析引论[M]. 北京:科学出版社,1982:393-425. [ZHANG Yaoting, FANG Kaitai. Introduction of Multivariate Statistical Analysis[M]. Beijing: Science Press, 1982: 393-425.]

SEDIMENT GRAIN SIZE DISTRIBUTION PATTERN AND TRANSPORTATION TREND IN THE XUANDE WATER, SOUTH CHINA SEA

LI Liang, HE Qijiang, LONG Genyuan, HE Chao, YANG Fan

(Marine Geological Survey Institute of Hainan Province, Haikou 570206, China)

Abstract: Grain size analysis and parameter calculation have been carried out for 151 surface sediments collected from the Xuande Waters in the South China Sea. Results show that the surface sediments of the area are made of 8 types of sediments dominated by sand and gravel. Silt and clay contents are relatively small. Factor and Cluster analysis of grain size parameters is used to discriminate different depositional environments. The study area can be further divided into four subareas, The subarea I is mainly located in the middle of study area, the subarea II near the reefs, the subarea III located in the inner Xuande Atoll, and the subarea IV located in lateral edges of the reef atoll. Grain size trend analysis suggests that the sediment transport pattern is consistent with the hydrodynamic conditions of the study area, and a sediment depositional area is formed in the water next to the Tri Ton island.

Key words: grain size characteristics; grain-size trend analysis; surface sediment; Xuande waters