



南海中沙群岛海域表层沉积物粒度特征及其输运趋势

陈俊锦, 张经纬, 刘时桥, 陈万利, 秦永鹏, 吴时国

Grain size distribution pattern of surface sediments and its implications for transportation trend: A case from the waters off Zhongsha Islands, the South China Sea

CHEN Junjin, ZHANG Jingwei, LIU Shiqiao, CHEN Wanli, QIN Yongpeng, and WU Shiguo

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16562/j.cnki.0256-1492.2021090901>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

北康盆地基底卷入断层特征及其对南海南部构造演化的启示

Features of the basement-involved faults in the Beikang Basin and their implications for the tectonic evolution of the southern South China Sea

海洋地质与第四纪地质. 2021, 41(4): 116



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

陈俊锦, 张经纬, 刘时桥, 等. 南海中沙群岛海域表层沉积物粒度特征及其输运趋势[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2022, 42(2): 15-27.

CHEN Junjin, ZHANG Jingwei, LIU Shiqiao, et al. Grain size distribution pattern of surface sediments and its implications for transportation trend: A case from the waters off Zhongsha Islands, the South China Sea[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2022, 42(2): 15-27.

南海中沙群岛海域表层沉积物粒度特征及其输运趋势

陈俊锦^{1,2}, 张经纬³, 刘时桥³, 陈万利^{1,4}, 秦永鹏¹, 吴时国^{1,2}

1. 中国科学院深海科学与工程研究所, 三亚 572000

2. 中国科学院大学, 北京 100049

3. 中国地质调查局海口海洋地质调查中心, 海口 571127

4. 海南省海洋地质资源与环境重点实验室, 海口 571127

摘要:对南海中沙群岛海域 232 个表层沉积物样品进行了粒度分析,以探讨研究区沉积物来源、沉积环境和输运趋势。根据 Folk 沉积物命名法,将研究区沉积物划分为砂、粉砂质砂、砂质粉砂、砂质泥、粉砂和泥等 6 种类型,以砂质泥和泥为主,粒径较粗、分选较好的沉积物主要分布在中沙台地海域。通过对组分含量、粒度参数和水深进行聚类分析和主成分分析,综合考虑沉积物来源和海底地形地貌的影响,将研究区划分为 5 类沉积区:台地区、台地阶地区、台地周缘斜坡区、海槽海岭区和深海盆地区。结合沉积环境分区进行了粒径趋势分析,研究显示,沉积物主要以中沙台地和西沙隆起海域为中心向周缘输运,在中沙海槽海域形成汇聚区。研究区沉积物输运格局主要受季风、海流、潮汐和波浪等因素的共同控制,与沉积物来源、海底地形地貌和实测水动力条件相吻合。

关键词:表层沉积物;粒度特征;输运趋势;中沙群岛海域

中图分类号:P736.21

文献标识码:A

DOI: 10.16562/j.cnki.0256-1492.2021090901

Grain size distribution pattern of surface sediments and its implications for transportation trend: A case from the waters off Zhongsha Islands, the South China Sea

CHEN Junjin^{1,2}, ZHANG Jingwei³, LIU Shiqiao³, CHEN Wanli^{1,4}, QIN Yongpeng¹, WU Shiguo^{1,2}

1. Institute of Deep-Sea Science and Engineering, Chinese Academy of Sciences, Sanya 572000, China

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

3. Haikou Marine Geological Survey Center, China Geological Survey, Haikou 571127, China

4. Key Laboratory of Marine Geology Resources and Environment of Hainan Province, Haikou 571127, China

Abstract: 232 surface sediment samples taken from offshore Zhongsha Islands were analyzed so as to better understand the sources, depositional environment and transporting patterns of the sediments. 6 types of sediments are recognized. i.e. sand, silty sand, sandy silt, silt, sandy mud and mud, dominated by sandy mud and mud. The coarser sediments, which usually have higher sorting, are mainly distributed in the water areas surrounding the Islands. Cluster analysis and principal component analysis are used for the study of component contents, grain size parameters and water depth. In consideration of the influences of sediment sources and seabed topography, the study area is divided into five depositional subareas: platform, platform terrace, slope around platform, trough and ridge, and deep-sea basin subareas. In combination with the depositional environment classification, grain size trend analysis is conducted. The results suggest that the sediments are mainly provided by the Zhongsha platform and the Xisha uplift, dispersed in surrounding waters, and finally deposited in the Zhongsha Trough. The sediment transportation is jointly influenced by sediment sources, seabed topography and water hydrodynamic conditions, under the control of monsoon, tide, wave and ocean current.

Key words: surface sediments; grain size distribution; sediment transportation pattern; Zhongsha Islands waters

资助项目:国家自然科学基金-广东省联合基金重点基金项目“南沙海区减薄陆壳裂陷盆地构造演化及特色深水油气系统”(U1701245);中国地质调查局项目“海南中沙群岛海域海洋区域地质调查”(DD20191027);中国科学院边缘海与大洋地质重点实验室资助项目“西沙群岛宣德孤立碳酸盐台地周缘深水沉积体系研究”(OMG202010);中国工程科技发展战略海南研究院咨询研究项目“海洋地球物理大数据平台建设和其在南海资源勘探开发战略规划中的应用”(20-NH-ZT-01)

作者简介:陈俊锦(1996—),男,硕士研究生,主要从事海洋地质、海洋地球物理研究, E-mail: chenjj@idsse.ac.cn

通讯作者:张经纬(1996—),男,助理工程师,主要从事海底地质研究, E-mail: 17801040683@163.com

收稿日期:2021-09-09; **改回日期:**2021-09-23. 文凤英编辑

沉积物粒度分析是海洋环境“源-汇”沉积体系研究的重要环节,对海洋沉积动力学的发展至关重要^[1]。传统的粒度分析方法有筛析法、沉降法、图像分析法等,而激光粒度仪的发展和广泛应用使得粒度分析的效率有了极大的提升,能够高效准确地获得沉积物粒度的大小^[2]。沉积物粒度分布特征是沉积-动力过程综合效应的结果,主要受沉积物来源和沉积动力过程(颗粒磨损、选择性搬运、不同物质来源的混合)等因素的影响^[3-5]。沉积学家可以通过沉积物粒度分布特征的空间变化来揭示物质来源、沉积环境、沉积动力过程以及输运趋势^[6-9]。

McLaren 等^[3-4]首先提出了利用沉积物的3个粒度参数(平均粒径、分选系数、偏态)来研究沉积物输运趋势的一维模型,该方法的缺点是可能导致高频噪声。后来,Gao 等^[10-11]基于半定量滤波技术开发了一种粒度参数的分析程序,获得输运矢量的二维模型,代表了沉积物的净输运方向,称为“粒径趋势分析”方法(GSTA)。这种方法已被广泛应用于河口、海岸、大陆架、海底峡谷等海洋环境中沉积物输运趋势研究^[9,12-15],其结果与流场观测、人工示踪实验和地貌特征所显示的沉积物输运格局较为一致。通过沉积物输运趋势的分析,可以推断出陆源物质的搬运及其在海洋环境中的分布和最终沉积,如 Sánchez 等^[16]研究了加利福尼亚 Santa Rosalía 矿区前沉积物中潜在的有害元素(铜、锌)在海洋环境中的运输和积累,发现铜和锌的空间分布与沉积物净输运趋势较为吻合。

南海广泛发育了许多岛屿、礁、暗沙和浅滩,自北向南可以分为东沙、西沙、中沙和南沙四大群岛,岛礁海域沉积过程和水动力环境复杂,蕴含着丰富的生物和油气资源。前人对南海的沉积物粒径分析研究主要限于南海北部大陆架和大陆坡^[17-20],而对岛礁海域的研究鲜有报道^[21]。中沙群岛海域的相关研究主要集中于生物群落特征调查^[22-23]、气候环境演变^[24-25]和地质构造^[26-28]等方面,而对该区沉积物的输运趋势和影响因素,尤其是动力过程及机制的认识还需要更深入的挖掘。本文利用中沙群岛海域表层沉积物的粒度分析数据,对表层沉积物的沉积物类型、粒度分布特征和输运趋势开展研究,并结合海底地形地貌和底流实测数据进行了探讨,为研究区灾害评估及岛礁建设提供重要参考依据。

1 区域概况

南海是西太平洋最大的边缘海之一,是一个半

封闭性海域,通过吕宋海峡与太平洋相连通,在东南亚季风和黑潮的影响下,具有独特而复杂的环流模式和海水特性^[29]。南海的表层流和深层流为气旋性,中层流为反气旋性,称之为“三明治”型,三者之间的联系还需要进一步研究^[30]。表层流主要由东南亚季风驱动,冬季盛行东北季风,夏季盛行西南季风,同时,黑潮对表层流也产生了至关重要的影响;深层流主要由吕宋溢流驱动,其结构可能受到海底地形的强烈影响^[30-32]。

中沙群岛海域位于南海北部下陆坡-洋壳盆地过渡带,三面分别被西北次海盆、东部次海盆和西南次海盆环绕^[33]。研究区为热带季风气候,年均气温为24~26℃,降雨量充沛,夏季和秋季之间台风和暴雨较为频繁,夏季盛行西南季风,冬季盛行东北季风。研究区发育的大型地貌单元包括中沙台地、西沙隆起、中沙海槽、中沙南盆地、深海平原、中沙北海岭、中沙南海岭等,发育的大型环礁主要有中沙环礁、东岛环礁、浪花礁(图1)。中沙环礁屹立在中央海盆的西北边缘,是南海诸岛中最大的环礁,完全被海水淹没,水深约15~600 m,走向呈NE-SW向,由一系列暗沙和礁滩组成,环绕着水深为75~85 m的潟湖^[34],其周缘斜坡地形陡峭,发育大量海底峡谷,东侧陡崖汇聚至深海平原,西侧过渡到中沙海槽,南北侧分别发育有中沙南海岭和中沙北海岭。中沙环礁的北部被一向海坡的阶地环绕,受季风影响在东北部形成一个喇叭形“口门”,使潟湖与外海以海底峡谷相连通。西沙隆起位于研究区西北部,水深约500~2500 m,东岛环礁和浪花礁主要出露其东部,均发育有通向中沙海槽的海底峡谷。中沙海槽位于中沙台地和西沙隆起的交界处,水深约2600~3200 m,呈NE-SW向展布的低陷长条带状,地形相对较平坦,其北端延伸至深海盆地,南端融汇到中沙南盆地,东侧地形梯度落差大于西侧。中沙南盆地位于研究区西南部,周围被高地形环绕,水深约3380~3840 m,盆地内部地形平坦。

2 样品与方法

2.1 样品采集和测试

2020年7—11月,中国地质调查局海口海洋地质调查中心利用重力活塞取样器、重力柱状取样器和箱式取样器在中沙群岛海域(15°~17°N、112.5°~115.5°E)共取得232个表层沉积物样品(图1),仅中

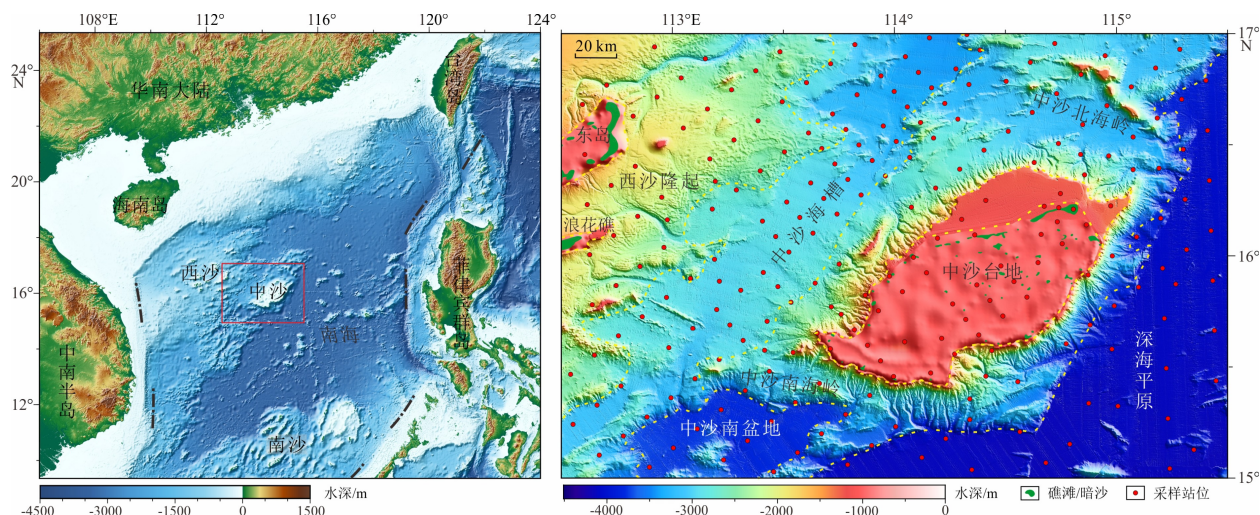


图 1 研究区地理位置及采样站位

Fig.1 Location map of the study area and sampling stations

沙台地上的样品中含有珊瑚、介壳碎片等粗颗粒物。沉积物粒度分析测试采用 Beckman Coulter LS13 320 型激光粒度仪。样品具体处理流程如下: 首先向样品加入适量蒸馏水和 0.5 mol/L 的六偏磷酸钠浸泡 24 h, 再将浸泡样品全部倒入激光样品槽中进行超声振动高速离心, 使样品充分分散, 然后使用激光粒度仪进行测试。激光粒度仪测量范围为 0.01~3 500 μm , 重复性误差 $\leq \pm 0.5\%$, 准确性误差 $\leq \pm 0.5\%$, 每个样品测试 3 次, 测试结果取平均值, 最后获得不同粒级组分的百分含量。

2.2 粒度数据处理

粒度分级采用 Wentworth 等比 Φ 值粒级标准^[35]; 由于研究区沉积物样品中不含砾级颗粒, 故沉积物命名采用 Folk 不含砾碎屑沉积物分类图解法^[36]; 粒度参数采用 McManus 矩值法计算^[37], 包括平均粒径 (μ)、分选系数 (σ)、偏态 (Sk)、峰态 (Kg):

$$\mu = \sum_{i=1}^n P_i S_i \quad (1)$$

$$\sigma = \left[\sum_{i=1}^n P_i (S_i - \mu)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (2)$$

$$Sk = \left[\sum_{i=1}^n P_i (S_i - \mu)^3 \right]^{\frac{1}{3}} \quad (3)$$

$$Kg = \left[\sum_{i=1}^n P_i (S_i - \mu)^4 \right]^{\frac{1}{4}} \quad (4)$$

式中: P_i 为粒级 S_i (以 Φ 为单位) 对应的百分含量, n 为粒级组分的总数量。

粒径趋势分析采用 Gao-Collins 的 GSTA 二维模型, 假设了某种粒径趋势出现在净输运方向上的概率远高于在任何其他方向上出现的概率, 利用表层沉积物的 3 个粒度参数 (平均粒径、分选系数和偏态) 来反演研究区内沉积物的净输运趋势^[10-11,38], 通过 Fortran 语言实现^[39]。3 个粒度参数可以组合成 8 种可能的粒径趋势类型, 水槽实验研究发现以下两种类型的粒径趋势出现的概率最大: 沿沉积物输运方向, ①平均粒径变细、分选更好、更负偏 (低能环境); ②平均粒径更粗、分选更好、更正偏 (高能环境)^[4]。粒径趋势方法如下: 首先通过比较每两个相邻采样站位的粒度参数来获得所有的趋势矢量, 该矢量无量纲, 具有单位长度, 矢量的长度并不完全代表沉积物的输运强度, 二者之间的关系还尚未清楚^[40]; 其次, 再对每个采样站位的趋势矢量求和, 得到合矢量, 代表了该站位沉积物的输运趋势; 最后, 对该合矢量进行平均处理来消除噪声, 即对每个站位与周围直接相邻的站位进行矢量平均, 得到余矢量, 更好地反映了沉积物的净输运趋势^[10]。

3 结果

3.1 各粒级组分分布特征

研究区沉积物粒度主要由砂、粉砂、黏土组成, 遍布于整个海域, 其含量分布如图 2 所示。

砂含量为 0~100%, 平均含量为 22.80%, 以中砂和细砂为主。砂含量以中沙台地为中心向四周逐渐降低 (图 2a), 砂含量高值区 ($>30\%$) 主要分布于研究区中部的中沙台地海域, 砂含量低值区

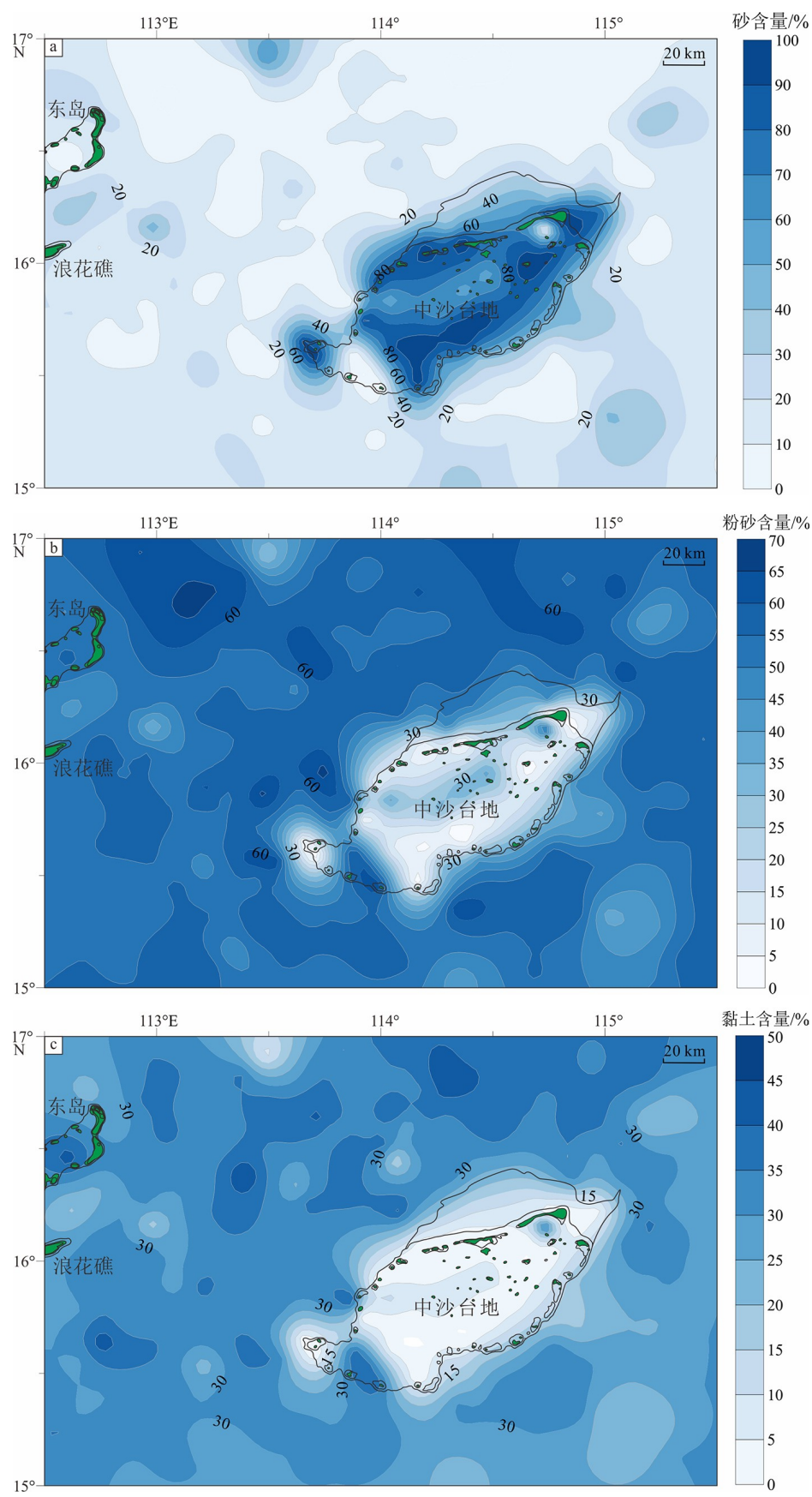


图 2 研究区表层沉积物粒级组分百分含量分布
a. 砂, b. 粉砂, c. 黏土。

Fig.2 Percentage contents of the sand (a), silt (b), and clay (c) of the surface sediments in the study area

($<30\%$)主要分布于中沙海槽、中沙北海岭和西沙隆起东北部斜坡附近海域。粉砂含量为 $0\sim67.8\%$, 平均含量为 49.53% , 以细粉砂为主, 粗粉砂较少。粉砂含量以中沙台地为中心向四周逐渐升高(图 2b), 粉砂含量低值区($<30\%$)主要分布于研究区中部的中沙台地海域, 除中沙台地海域外的其他海域都是粉砂含量高值区($>30\%$), 粉砂含量分布趋势与砂含量几乎相反。黏土含量为 $0\sim45.46\%$, 平均含量为 27.67% 。黏土含量以中沙台地为中心向四周逐渐升高(图 2c), 黏土含量低值区($<30\%$)主要分布于研究区中部的中沙台地海域以及深海平原和西沙隆起附近海域, 黏土含量高值区($>30\%$)主要分布于中沙海槽和中沙北海岭附近海域, 黏土含量分布趋势与粉砂含量分布趋势相一致, 与砂含量分布趋势相反。各粒级组分分布特征总体上表现为靠近中沙台地海域粗粒级组分含量高, 而远离中沙台地海域细粒级组分含量高, 与研究区物质来源、水动力环境和沉积环境密切相关。

3.2 粒度参数分布特征

沉积物粒度参数包括平均粒径、分选系数、偏态和峰态, 粒度参数及其组合在一定程度上可以反映沉积物来源和沉积动力特征^[41]。研究区表层沉积物粒度参数的平面分布如图 3 所示。

平均粒径代表沉积物粒度分布的集中趋势, 受沉积介质平均动能和沉积物原始大小的控制, 是沉积物粒度特征中最主要的特征之一^[42]。研究区表层沉积物平均粒径为 $0.62\sim7.81\Phi$, 平均值为 6.21Φ 。中沙台地海域沉积物的平均粒径最粗, 为 $0.5\sim4.5\Phi$, 反映其水动力环境较强; 西沙隆起和深海平原海域次之, 为 $4\sim7\Phi$; 中沙海槽和中沙北海岭附近海域的平均粒径最细, 大部分都 $>7\Phi$ (图 3a)。研究区整体呈现出中沙台地海域沉积物较粗, 而其他海域较细的特点, 说明中沙台地海域为主要沉积物来源。中沙台地海域沉积物类型主要以砂和粉砂质砂等粗粒沉积物为主, 由于水深较浅且水动力较强, 细粒沉积物被流体冲刷向台地四周搬运, 而粗粒沉积物则在台地上沉积下来。

分选系数表示沉积物颗粒大小的均匀程度, 分选系数越小, 分选越好, 反之, 分选系数越大, 分选越差^[42]。研究区表层沉积物分选系数为 $0.58\sim3.16$, 平均值为 2.07 , 总体上沉积物分选较差。中沙台地海域沉积物的分选系数主要为 $0.5\sim1.7$, 局部偏大, 分选较好—较差; 中沙海槽、中沙北海岭、中沙南盆地和东岛附近海域次之, 分选较差, 为 $1.7\sim2.1$;

东岛东南部和深海平原海域的分选差, 分选系数 >2.1 , 高值呈散点状分布, 不存在分选极差(分选系数 >4)(图 3b)。研究区整体上呈现出中沙台地海域分选较好, 而其他海域较差的特点, 说明研究区水动力差异明显。中沙台地海域水动力较强, 受季风、潮流、波浪的分选作用, 沉积物不断被流体冲刷磨圆, 总体上分选较好, 而其他海域的物源和地形较为复杂, 水动力条件变化强烈, 因此沉积物分选差。

偏态可以反映沉积物粒度分布的不对称程度^[42]。研究区表层沉积物偏态为 $-1.32\sim2.71$, 平均值为 0.09 。中沙台地海域沉积物的偏态主要为 $0.4\sim2.5$, 为正偏(偏态 >0.33)。此外主要还有西沙隆起北部和中沙北海岭海域偏态呈正偏; 而中沙海槽、深海平原、中沙南盆地海域的偏态为 $-1.4\sim1$, 大部分以负偏为主(偏态 <-0.33), 正偏呈斑点状分布于其中(图 3c)。粗粒沉积物容易在近物源区沉积, 因此研究区正偏态主要集中在中沙台地和西沙隆起海域, 而其他海域由于远离物源区搬运距离较远, 流体中富含悬浮的细粒沉积物, 为负偏态。

峰态可以衡量粒度频率曲线的尖锐程度^[42]。研究区表层沉积物峰态为 $0.76\sim3.65$, 平均值为 2.60 。研究区大部分海域为宽峰态(峰态 >1.42), 窄峰态(峰态 <1.03)主要分布于中沙台地海域南部和北部边缘, 有 4 个低值区(图 3d), 说明研究区的粒度分布范围较宽, 整体上细粒沉积物占优势。

3.3 沉积物类型及分布特征

在砂、粉砂、黏土含量的三元图中对研究区 232 个表层沉积物进行分类投点。研究区表层沉积物主要分为 6 种类型(图 4): 砂(S)、粉砂质砂(zS)、砂质粉砂(sZ)、粉砂(Z)、砂质泥(sM)、泥(M)。砂质泥和泥是研究区主要的沉积物类型, 较粗沉积物主要分布在中沙台地及其周缘海域, 较细沉积物广泛分布于研究区中沙海槽、深海平原、中沙南盆地等海域, 总体上沉积物普遍偏细。砂质泥(40.95%)在研究区分布最广泛, 主要沉积在西沙隆起东部斜坡、中沙台地斜坡、中沙海槽、深海平原和中沙南盆地附近海域; 泥(34.05%)主要分布在研究区北部的中沙海槽、中沙北海岭和西沙隆起北部斜坡附近海域, 由北向南延伸; 砂质粉砂(9.48%)主要沉积在东岛海域、中沙台地及其北部阶地, 砂(6.90%)和粉砂质砂(6.03%)绝大部分主要沉积在中沙台地海域; 粉砂(2.59%)占比最少, 零散分布于中沙海槽海域(图 5)。

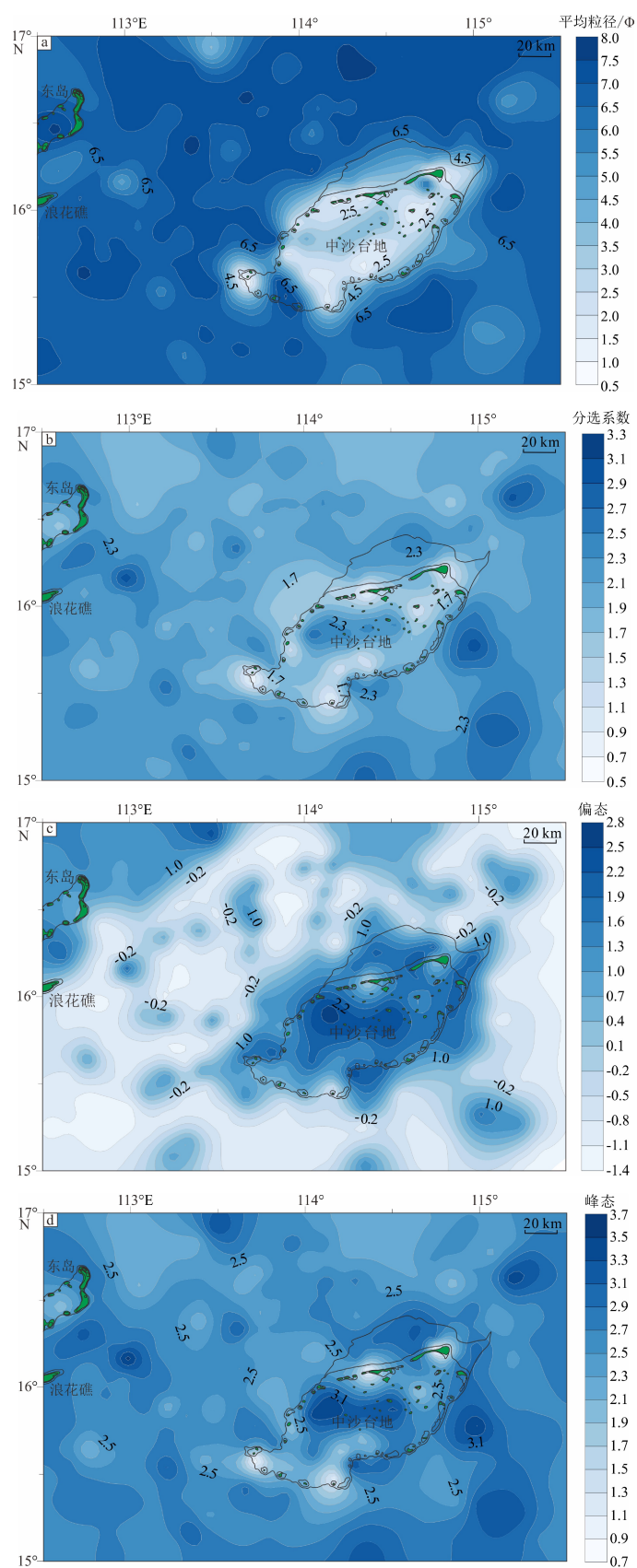


图 3 研究区表层沉积物粒度参数分布

a. 平均粒径, b. 分选系数, c. 偏态, d. 峰态。

Fig.3 Distribution of grain size parameters of the surface sediments in the study area

a. Mean diameter, b. sorting coefficient, c. skewness, d. kurtosis.

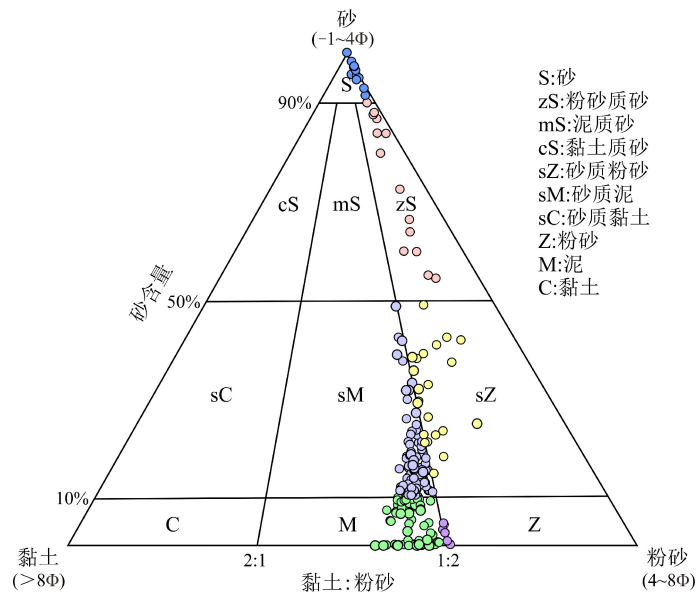


图 4 研究区表层沉积物分类三元图
Fig.4 Classification of surface sediments in the study area

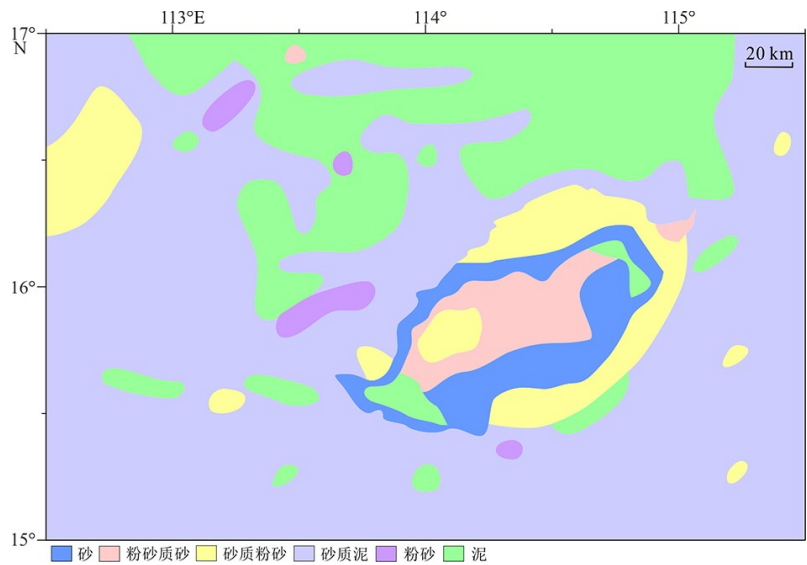


图 5 研究区表层沉积物类型空间分布
Fig.5 Spatial distribution of surface sediment types in the study area

4 讨论

4.1 沉积环境分区

利用粒度分析数据划分现代沉积环境是现今较常用的方法。由于各项粒度相关参数之间可能存在不同程度的内在联系,采用所有的粒度相关参数(组分含量、粒度参数等)直接进行聚类分析不能有效揭示研究区内的沉积环境差异。因此,需要压缩指标,并最大限度地保持指标中所包含的特征信息^[43-44]。

首先通过 R 型聚类分析,以各项粒度相关参数为变量,对变量进行分类,把具有相同聚集趋势(即距离较近)的变量合并,结合主成分分析法,提取出对环境鉴别最敏感的指标,再根据提取出的指标进行 Q 型聚类分析,研究沉积物分布的区域性差异,划分研究区沉积环境。

4.1.1 R 型聚类分析和主成分分析

将表层沉积物的组分含量(砂、粉砂、黏土)、粒度参数(平均粒径、分选系数、偏态、峰态)和水深作为聚类指标,进行 R 型聚类分析。结果显示,这 8 个聚类指标可划分为 4 个聚类(图 6),聚类 1 为粉砂含量、平均粒径、黏土含量,聚类 2 为水

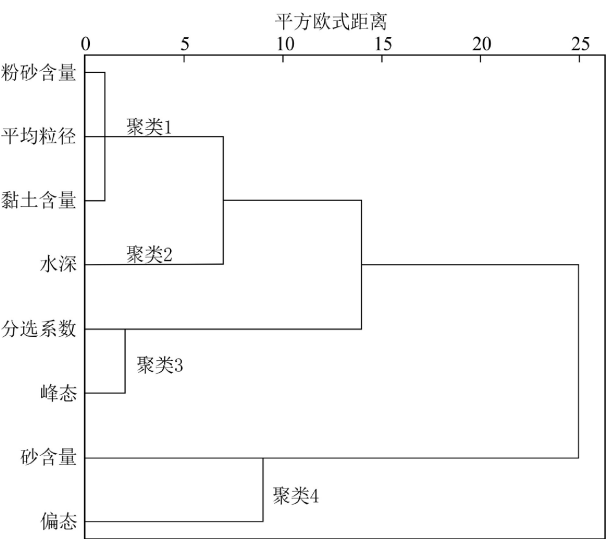


图 6 表层沉积物 R 型聚类分析谱系
Fig.6 R type cluster analysis of surface sediments

深, 聚类 3 为分选系数和峰态, 聚类 4 为砂含量和偏态。

为了提取出对沉积环境鉴别最敏感的因子, 采用主成分分析法对研究区 232 个表层沉积物样品的组分含量、粒度参数和水深进行降维处理, 筛选出对数据方差贡献最大的成分。以方差贡献 > 10% 为标准, 得到了 4 个起主要控制作用的因子, 它们的特征值方差分别为 49.09%、24.14%、13.49% 和 11.58%, 累积特征值方差达到 98.3%。

因子 1 主要受砂含量、平均粒径、粉砂含量和黏土含量的控制作用, 因子 2 主要受峰态和分选系数的控制作用, 因子 3 主要受偏态的控制作用, 因

表 1 主成分分析因子载荷矩阵				
Table 1 Principal component analysis factor loading matrix				
变量	因子1	因子2	因子3	因子4
砂含量	-0.967	-0.064	0.165	-0.181
平均粒径	0.955	0.101	-0.201	0.183
粉砂含量	0.953	0.141	-0.101	0.186
黏土含量	0.937	-0.050	-0.247	0.164
峰态	-0.060	0.980	0.051	0.033
分选系数	0.209	0.943	-0.046	0.166
偏态	-0.306	0.024	0.926	-0.218
水深	0.392	0.211	-0.281	0.850

子 4 主要受水深的控制作用(表 1), 与 R 型聚类分析的结果较一致。

结合 R 型聚类分析和主成分分析的结果, 本文最后采用平均粒径、峰态、偏态和水深作为划分沉积环境的指标。

4.1.2 Q 型聚类分析

根据选定的平均粒径、偏态、峰态和水深 4 个指标进行 Q 型聚类分析, 研究区 232 个表层沉积物样品可分为 4 类, 分别位于台地区、台地周缘斜坡区、海槽海岭区和深海盆地, 结合多波束地形数据, 考虑到中沙台地特殊地形地貌的影响, 最终将中沙群岛海域划分为 5 类沉积区, 分别代表了不同的沉积环境。

I 类沉积区为台地区, 分布在中沙台地和西沙隆起碳酸盐台地(图 7), 水深较浅, 平均水深 108 m。

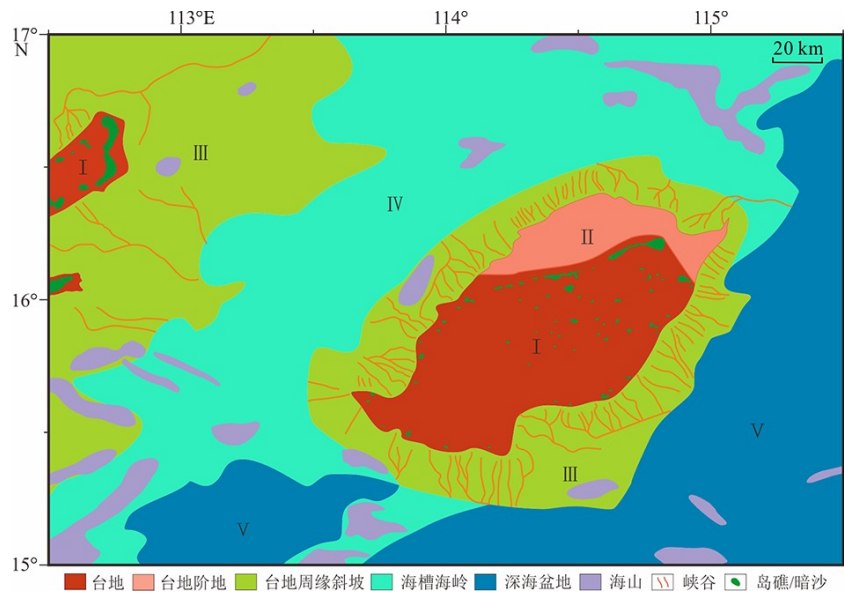


图 7 研究区沉积环境分区
Fig.7 Sedimentary environments of the study area

表 2 研究区各沉积环境分区相关参数统计值
Table 2 Statistical values of relevant parameters in subareas of the study area

沉积环境分区	主要底质类型	砂/%	粉砂/%	黏土/%	平均粒径/ Φ	分选系数	偏态	峰态	水深/m
I	砂、粉砂质砂	72.98 (0~100)	19.01 (0~62.89)	8.01 (0~43.13)	3.04 (0.61~7.81)	1.62 (0.58~2.74)	1.51 (-0.66~2.7)	2.38 (0.76~3.49)	108 (24~475)
II	砂质粉砂	51.19 (37.18~83.65)	39.51 (13.39~49.57)	9.30 (2.96~13.25)	4.36 (2.63~5.07)	2.10 (1.9~2.28)	2.16 (2.08~2.28)	2.95 (2.83~3.06)	373 (312~481)
III	砂质粉砂、砂质泥	14.91 (0~63.62)	54.78 (29.1~67.8)	30.31 (7.27~45.46)	6.68 (3.67~7.81)	2.16 (1.67~3.16)	0.30 (-1.23~2.39)	2.63 (2.07~3.65)	1904 (386~3352)
IV	砂质泥、泥	10.14 (0~41.62)	56.09 (38.56~66.91)	33.77 (14.85~43.98)	7.01 (5.07~7.8)	2.08 (1.57~3.05)	-0.39 (-1.32~2.1)	2.56 (1.97~3.51)	2784 (1080~3796)
V	砂质泥	18.69 (6.54~42.23)	53.26 (37.77~59.39)	28.05 (19.67~36.14)	6.50 (5.25~7.25)	2.30 (1.95~3.06)	-0.49 (-1.29~1.77)	2.80 (2.42~3.52)	4077 (3631~5230)

注: 平均值(最小值~最大值)。

沉积物粒度最粗,其底质主要为砂、粉砂质砂、砂质粉砂,平均粒径的均值为 3.04 Φ ,砂、粉砂、黏土的平均含量分别为 72.98%、19.01% 和 8.01%;分选系数为 0.58~2.74,分选较好—差,总体上较差;偏态为-0.66~2.70,主要为正偏;峰态的均值为 2.38,呈宽峰态(表 2)。该沉积区为主要物源区,发育大量岛礁,水动力较强,沉积物粒径较粗,同时受到潮汐、波浪的往返冲刷和季风流的影响,分选相对较好。

II 类沉积区为台地阶地区,位于中沙台地北部,由台地后退形成的一个阶地(图 7),平均水深 373 m。沉积物粒度较粗,其底质主要为粉砂质砂,平均粒径的均值为 4.36 Φ ,砂、粉砂、黏土的平均含量分别为 51.19%、39.51% 和 9.30%;分选系数为 1.90~2.28,分选差;偏态为 2.08~2.28,为正偏;峰态很宽,均值为 2.95(表 2)。该沉积区南部紧靠物源区,受物源影响明显,沉积物粒径较粗,可通过重力流将台地区沉积物搬运至该区,因此分选差。

III 类沉积区为台地周缘斜坡区,位于中沙台地周缘斜坡和西沙隆起碳酸盐台地东部斜坡(图 7),平均水深 1 904 m。沉积物粒度较细,其底质主要为粉砂质砂和砂质泥,平均粒径均值为 6.68 Φ ,砂、粉砂、黏土平均含量分别为 14.91%、54.78% 和 30.31%;分选系数为 1.67~3.16,分选差;偏态为-1.23~2.39,主要为正偏;峰态均值为 2.63,呈宽峰态(表 2)。多波束地形数据显示(图 1),该沉积区发育了大量的海底峡谷,是将沉积物从台地向深海搬运的主要通道,水深和地形变化大,水动力较强。

IV 类沉积区为海槽海岭区,分布在中沙海槽、中沙北海岭和中沙南海岭(图 7),水深较深,平均水深 2 784 m。沉积物粒度较细,其底质主要为砂质泥和泥,平均粒径的均值为 7.01 Φ ,砂、粉砂、黏土的平均含量分别为 10.14%、56.09% 和 33.77%;分选系数

为 1.57~3.05,分选差;偏态为-1.32~2.10,主要为负偏;峰态均值为 2.56,呈宽峰态(表 2)。该沉积区两侧为物源区,地形较低,起伏变化较小,是沉积物的有利汇聚区,沉积物分布可能受到底流的影响。

V 类沉积区为深海盆地区,分布在深海平原和中沙南盆地(图 7),为研究区水深最深的海域,平均水深 4 077 m。沉积物粒度较细,其底质主要为砂质泥,平均粒径的均值为 6.50 Φ ,砂、粉砂、黏土的平均含量分别为 18.69%、53.26% 和 28.05%;分选系数为 1.95~3.06,分选差;偏态为-1.29~1.77,主要为负偏;峰态很宽,均值为 2.80(表 2)。该沉积区远离物源,地形平坦,水动力条件较弱,以沉积作用为主,沉积物分布主要受底流的作用。

4.2 沉积物净输运趋势分析

研究区采样站位之间的间隔不规则且不均匀,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特征距离,因此,本文取最大采样间距 0.3 作为特征距离^[21,44],通过 Gao-Collins 模型获得研究区沉积物的净输运趋势,已剔除边缘效应。研究区物源复杂且水深梯度变化大,为避免水深和地形的影响,本文根据沉积环境分区进行了粒径趋势分析,得到研究区的沉积物净输运趋势,趋势矢量箭头表示沉积物的净搬运方向,趋势矢量长度仅表示粒径趋势的显著性,不代表沉积物搬运速率的大小。研究区涉及了浅水碳酸盐环境和周缘深水环境,为了研究浅水碳酸盐台地生源沉积与深水盆地的源汇关系,样品处理过程中均没有加盐酸,因此自生生物碎屑的存在会影响沉积物的输运趋势,但台地区(源)到深水区(汇)的趋势矢量方向几乎不受影响,仅趋势矢量的长度受到一定影响。

研究区沉积环境和水动力条件复杂,台地海域

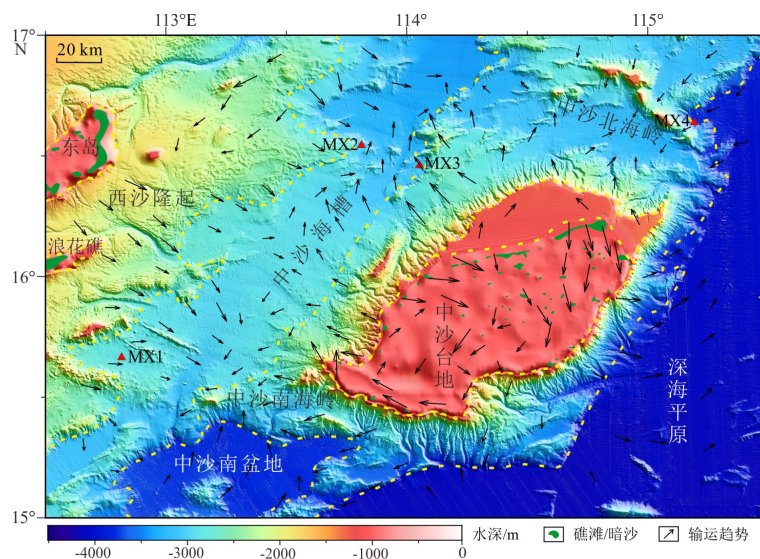


图 8 研究区沉积物净运输趋势

Fig.8 The net sediment transport pattern in the study area

水深较小(数十至数百米),受表层流影响显著,而其他海域水深较大(数百米至数千米),受中—深层流影响显著,不同的沉积环境具有独特的沉积物输运趋势,如图 8 所示,沉积物整体上以中沙台地和西沙隆起海域为中心向周缘输运,在中沙海槽海域形成汇聚区。

I 台地区:中沙台地之上的沉积物主要从台地周缘的礁滩/暗沙向台地内部输运,以 NE 向和 SW 向为主,整体上受季风的影响较明显,中沙台地西侧的礁滩发育较弱,受潮流和波浪的往返作用,沉积物由西向东从边缘往中心输运。

II 台地阶地区:沉积物输运方向主要为 N 向,沉积物由中沙台地向阶地输运,受表层流和低地形的控制,该区可能沉积了大量从中沙台地搬运来的重力流沉积。

III 台地周缘斜坡区:中沙台地斜坡沉积物具有以中沙台地为中心向四周海域输运的特征,输运方向与海底峡谷延伸方向一致,其北部以 NW-NE 向为主向中沙海槽北段输运,西部以 NW-W 向为主向中沙海槽中段输运,南部以 SW 向为主向中沙海槽南段和中沙南海岭输运,东部以 SE 向为主向深海平原输运。西沙隆起斜坡沉积物具有以西沙隆起碳酸盐台地为中心向四周海域输运的特征,其东部和东南部沉积物输运方向主要为 SE-E 向,输运方向与海底峡谷延伸方向一致,而东北部由于紧靠西北次海盆,当吕宋溢流(沿海盆逆时针流动)^[30-31]流经西北次海盆时会对该区的沉积物输运产生较大影响,表现为 SW 向输运。中沙台地斜坡向西输运的沉积物与西沙隆起斜坡向东输运的沉积物在中

沙海槽海域相遇,形成了一个汇聚区。

IV 海槽海岭区:中沙海槽海域是沉积物汇聚区,沉积物由两侧的中沙台地和西沙隆起海域向中沙海槽内输运,中沙北海岭和中沙南海岭海域的沉积物分别由中沙台地经斜坡向北和向南输运。中沙海槽北段和中沙北海岭北部由于紧靠西北次海盆,受吕宋溢流的影响,沉积物输运方向主要为 SW 向和 SE 向,由于吕宋溢流在中沙北海岭处受到了海山的阻挡,中沙北海岭南北两侧沉积物输运方向呈现相反的趋势。

V 深海盆地区:中沙南盆地海域沉积物具有由盆地四周向盆地中心输运的特征,沉积物来源为中沙台地和西沙隆起海域,以及中沙南盆地西南部的中建南海域。深海平原海域地势平坦,沉积物输运方向主要为 NE-E 向,主要受中沙台地物源和底流的影响。

通过 ADCP(声学多普勒流速剖面仪)获取了研究区 4 个站位(MX1—MX4)的底流流速和流向分布(图 9)。MX1 站位位于西沙隆起东南部,水深为 2424 m,流速整体上小于 0.1 m/s,主要流向为 NE 向,流向变化较强烈,与该站位附近的沉积物输运趋势方向一致。MX2 站位位于中沙海槽北部,水深为 2653 m,流速整体为 0.1~0.2 m/s,流向呈顺时针旋转变动,该站位可能位于不同流体的交汇区。MX3 站位位于中沙海槽东北部,水深为 2709 m,流速整体上小于 0.15 m/s,主要流向为 NW-N 向,较为稳定,与该站位附近的沉积物输运趋势方向一致。MX4 站位位于中沙北海岭东部,水深为 3733 m,流速整体上小于 0.08 m/s,流向以 SW-NW 向为主,

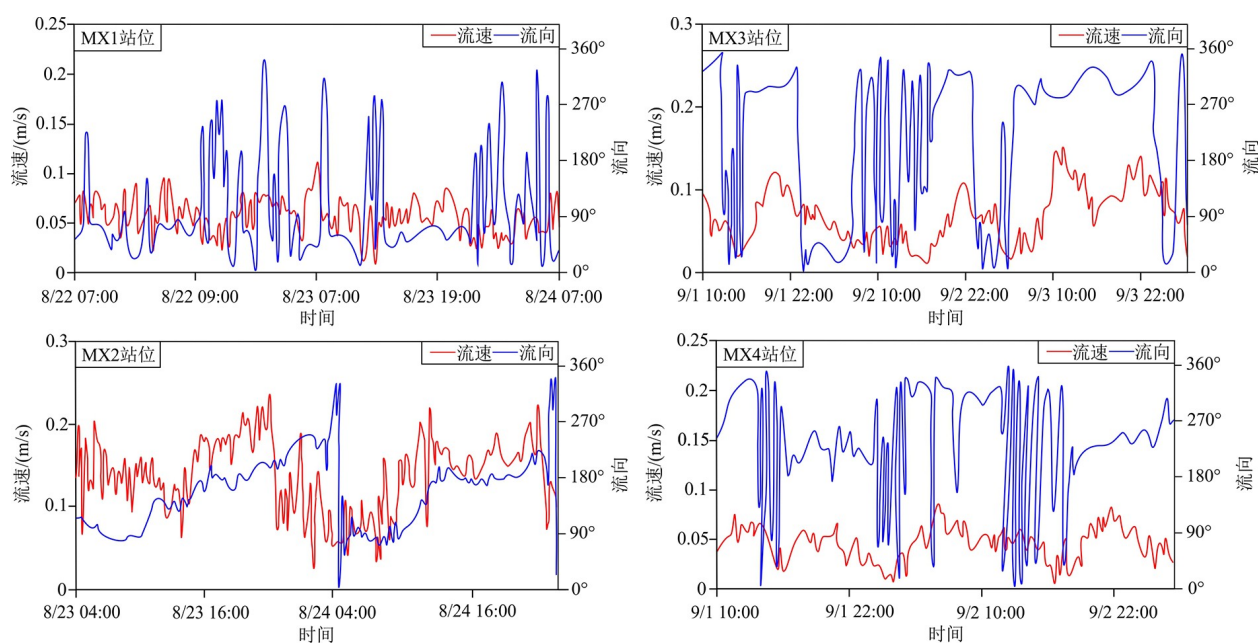


图 9 研究区 MX1—MX4 站位底流流速及流向

Fig.9 The flow velocity and direction of the bottom currents at stations MX1—MX4 in the study area

与该站位附近的沉积物输运趋势方向一致。粒径趋势分析得到的沉积物输运方向与实测底流流向一致,反映了 Gao-Collins 模型在研究区的适用性和可靠性。

5 结论

(1)中沙群岛海域的表层沉积物可划分为 6 种沉积物类型:砂、粉砂质砂、砂质粉砂、粉砂、砂质泥和泥,其中砂质泥和泥是主要的沉积物类型。表层沉积物中粉砂含量最高,平均含量为 49.53%,黏土和砂含量次之,平均含量分别为 27.67% 和 22.80%。平均粒径、分选系数、偏态和峰态的平均值分别为 6.21Φ 、2.07、0.09 和 2.60。沉积物来源主要为中沙台地和西沙隆起海域,近物源区沉积物粒径较粗,远物源区沉积物粒径较细。

(2)通过对组分含量、粒度参数和水深进行聚类分析和主成分分析,综合考虑沉积物来源和海底地形地貌的影响,将研究区划分为 5 类沉积区,分别代表不同的沉积环境:Ⅰ类沉积区为台地区,Ⅱ类沉积区为台地阶地区,Ⅲ类沉积区为台地周缘斜坡区,Ⅳ类沉积区为海槽海岭区,Ⅴ类沉积区为深海盆地区。

(3)沉积物粒径趋势分析结果显示,研究区沉积物主要以中沙台地和西沙隆起海域为中心向周缘输运,在中沙海槽海域形成了一个汇聚区。沉积

物输运格局与研究区沉积物来源、海底地形地貌和实测水动力条件相吻合,主要受季风、海流、潮汐和波浪等因素的共同控制。

参考文献 (References)

- [1] Pedreros R, Howa H L, Michel D. Application of grain size trend analysis for the determination of sediment transport pathways in intertidal areas [J]. *Marine Geology*, 1996, 135 (1-4): 35-49.
- [2] Folk R L. A review of grain - size parameters [J]. *Sedimentology*, 1966, 6 (2): 73-93.
- [3] McLaren P. An Interpretation of Trends in Grain Size Measures [J]. *Journal of Sedimentary Research*, 1981, 51 (2): 611-624.
- [4] McLaren P, Bowles D. The effects of sediment transport on grain-size distributions [J]. *Journal of Sedimentary Research*, 1985, 55 (4): 457-470.
- [5] 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.
- [6] Friedman G M. Distinction between dune, beach, and river sands from their textural characteristics [J]. *Journal of Sedimentary Research*, 1961, 31 (4): 514-529.
- [7] Visher G S. Grain Size Distributions and Depositional Processes [J]. *Journal Of Sedimentary Research*, 1969, 39 (3): 1074-1106.
- [8] Plomaritis T A, Paphitis D, Collins M. The use of grain size trend analysis in macrotidal areas with breakwaters: Implications of settling velocity and spatial sampling density [J]. *Marine Geology*, 2008, 253 (3-4): 132-148.
- [9] 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.
- [10] Gao S, Collins M. Net sediment transport patterns inferred from grain-size trends, based upon definition of "transport vectors" [J]. *Sedimentary Geology*, 1992, 80 (1-2): 47-60.
- [11] Gao S, Collins M B. Analysis of grain size trends, for defining sediment transport pathways in marine environments [J]. *Journal of Coastal Research*, 1994, 10 (1): 70-78.
- [12] Balsinha M, Fernandes C, Oliveira A, et al. Sediment transport patterns on the Estremadura Spur continental shelf: Insights from grain-size trend analysis [J]. *Journal of Sea Research*, 2014, 93: 28-32.
- [13] Liang J, Liu J, Xu G, et al. Grain-size characteristics and net transport patterns of surficial sediments in the Zhejiang nearshore area, East China Sea [J]. *Oceanologia*, 2020, 62 (1): 12-22.
- [14] Wang C T, Chen M, Qi H S, et al. Grain-Size Distribution of Surface Sediments in the Chanthaburi Coast, Thailand and Implications for the Sedimentary Dynamic Environment [J]. *Journal of Marine Science and Engineering*, 2020, 8 (4): 242.
- [15] Liu J T, Liu K J, Huang J C. The effect of a submarine canyon on the river sediment dispersal and inner shelf sediment movements in southern Taiwan [J]. *Marine Geology*, 2002, 181 (4): 357-386.
- [16] Sánchez A, Shumilin E, Rodríguez-Figueroa G. Sediment transport patterns inferred from grain size trends and trace metal dispersion near the Santa Rosalía mining district, Gulf of California [J]. *Sedimentary Geology*, 2019, 380: 158-163.
- [17] Zhang W, Zheng J H, Ji X M, et al. Surficial sediment distribution and the associated net sediment transport pattern in the Pearl River Estuary, South China [J]. *Continental Shelf Research*, 2013, 61-62: 41-51.
- [18] Li T, Li T J. Sediment transport processes in the Pearl River Estuary as revealed by grain-size end-member modeling and sediment trend analysis [J]. *Geo-Marine Letters*, 2018, 38 (2): 167-178.
- [19] 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.]
- [20] 张洪运, 庄丽华, 阎军, 等. 南海北部陆架坡折附近表层沉积物的粒度特征和其输运趋势[J]. *海洋科学*, 2019, 43 (10): 96-105. [ZHANG Hongyun, ZHUANG Lihua, YAN Jun, et al. Grain size characteristics of surface sediments and their transport patterns near the shelf break of the northern South China Sea [J]. *Marine Sciences*, 2019, 43 (10): 96-105.]
- [21] 李亮, 何其江, 龙根元, 等. 南海宣德海域表层沉积物粒度特征及其输运趋势[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2017, 37 (6): 140-148. [LI Liang, HE Qijiang, LONG Genyuan, et al. Sediment grain size distribution pattern and transportation trend in the Xuande Water, South China Sea [J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2017, 37 (6): 140-148.]
- [22] 朱文聪, 李娜娜, 艾红, 等. 西沙和中沙群岛海域生物多样性特点[J]. *广东农业科学*, 2010, 37 (12): 1-6. [ZHU Wencong, LI Nana, AI Hong, et al. The characteristics of biodiversity of fish in Xisha & Zhongsha Islands [J]. *Guangdong Agricultural Sciences*, 2010, 37 (12): 1-6.]
- [23] 李亚芳, 杜飞雁, 王亮根, 等. 南海中沙西沙海域海樽类群落结构特征研究[J]. *南方水产科学*, 2016, 12 (4): 64-70. [LI Yafang, DU Feiyan, WANG Lianggen, et al. Community structure of Thaliacea in the Zhongsha and Xisha Islands, South China Sea [J]. *South China Fisheries Science*, 2016, 12 (4): 64-70.]
- [24] 余克服. 南海珊瑚礁及其对全新世环境变化的记录与响应[J]. *中国科学:地球科学*, 2012, 42 (8): 1160-1172. [YU Kefu. Coral reefs in the South China Sea: their response to and records on past environmental changes [J]. *Science China Earth Sciences*, 2012, 42 (8): 1160-1172.]
- [25] Huang X X, Betzler C, Wu S G, et al. First documentation of seismic stratigraphy and depositional signatures of Zhongsha atoll (Macclesfield Bank), South China Sea [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2020: 104349.
- [26] Li Y H, Huang H B, Grevemeyer I, et al. Crustal structure beneath the Zhongsha Block and the adjacent abyssal basins, South China Sea: New insights into rifting and initiation of seafloor spreading [J]. *Gondwana Research*, 2021, 99: 53-76.
- [27] 赵斌, 高红芳, 张衡, 等. 基于深度域地震成像的中沙海槽盆地东北部结构构造研究[J]. *热带海洋学报*, 2019, 38 (2): 95-102. [ZHAO Bin, GAO Hongfang, ZHANG Heng, et al. Structure study of the northeastern Zhongsha Trough Basin in the South China Sea based on prestack depth migration seismic imaging [J]. *Journal of Tropical Oceanography*, 2019, 38 (2): 95-102.]
- [28] 徐子英, 汪俊, 高红芳, 等. 中沙地块南部断裂发育特征及其成因机制[J]. *中国地质*, 2020, 47 (5): 1438-1446. [XU Ziyang, WANG Jun, GAO Hongfang, et al. The characteristics and formation mechanism of the faults in the southern part of the Zhongsha Bank, South China Sea [J]. *Geology in China*, 2020, 47 (5): 1438-1446.]
- [29] Quan Q, Xue H J. Layered model and insights into the vertical coupling of the South China Sea circulation in the upper and middle layers [J]. *Ocean Modelling*, 2018, 129: 75-92.
- [30] Wang G H, Xie S P, Qu T D, et al. Deep South China Sea circulation [J]. *Geophysical Research Letters*, 2011, 38 (5): L05601.
- [31] Wyrtki K. *Physical Oceanography of the Southeast Asian Waters: Naga Report Volume 2: Scientific Results of Marine Investigations of the South China Sea and the Gulf of Thailand* [M]. California: Scripps Institution of Oceanography, University of California, 1961.
- [32] Zhu Y H, Sun J C, Wang Y G, et al. Overview of the multi-layer circulation in the South China Sea [J]. *Progress in Oceanography*, 2019, 175: 171-182.
- [33] 黎雨晗, 黄海波, 丘学林, 等. 中沙海域的广角与多道地震探测[J]. *地球物理学报*, 2020, 63 (4): 1523-1537. [LI Yuhan, HUANG Haibo, QIU Xuelin, et al. Wide-angle and multi-channel seismic surveys in Zhongsha waters [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2020, 63 (4): 1523-1537.]
- [34] 黄金森. 中沙环礁特征[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 1987, 7 (2): 23-26. [HUANG Jinsen. Features of the Zhongsha Atoll in the South China Sea [J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 1987, 7 (2): 23-26.]

- [35] Wentworth C K. A scale of grade and class terms for clastic sediments [J]. *The Journal of Geology*, 1922, 30 (5): 377-392.
- [36] 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.
- [37] McManus J. Grain size determination and interpretation[M]//Tucker M. *Techniques in Sedimentology*. Oxford: Blackwell, 1988: 63-85.
- [38] 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.
- [39] Gao S. A FORTRAN program for grain-size trend analysis to define net sediment transport pathways [J]. *Computers & Geosciences*, 1996, 22 (4): 449-452.
- [40] Gao S, Collins M. The use of grain size trends in marine sediment dynamics: A review [J]. *Chinese Journal of Oceanology and Limnology*, 2001, 19 (3): 265-271.
- [41] Gao S, Collins M, McLaren P, et al. A critique of the "McLaren Method" for defining sediment transport paths; discussion and reply [J]. *Journal of Sedimentary Research*, 1991, 61 (1): 143-147.
- [42] 姜在兴. 沉积学[M]. 2版. 北京: 石油工业出版社, 2010: 52 [JIANG Zaixing. *Sedimentology*[M]. 2nd ed. Beijing: Petroleum Industry Press, 2010: 52.]
- [43] 李玉中, 陈沈良. 系统聚类分析在现代沉积环境划分中的应用: 以崎岖列岛海区为例[J]. 沉积学报, 2003, 21(3): 487-494. [LI Yuzhong, CHEN Shenliang. Application of system cluster analysis to classification of modern sedimentary environment: a case study in Qiqu Archipelago Area[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2003, 21(3): 487-494.]
- [44] 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): 314-324. [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): 314-324.]