

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

张洪运^{1,2,3}, 庄丽华^{1,2,4}, 阎军^{1,2,4}, 马小川^{1,2,4}

(1. 中国科学院海洋研究所, 山东 青岛 266071; 2. 中国科学院海洋地质与环境重点实验室, 山东 青岛 266071; 3. 中国科学院大学, 北京 100049; 4. 中国科学院海洋大科学研究中心, 山东 青岛 266071)

摘要: 对南海北部陆架坡折附近取的 50 个表层沉积物样品, 作粒度测试, 计算粒度参数。粒度分析表明研究区的沉积物主要存在 4 种类型: 含砾砂、砾质砂、砂质砾和含砾泥质砂; 沉积物组分中砾石和砂占绝对优势, 基本上不含黏土。综合因子分析和聚类分析的结果把研究区划分为 4 类沉积区: I 类沉积区属于内陆架沉积区, II 类沉积区属于陆架坡折上部沉积区, III 类沉积区属于陆架坡折下部沉积区, IV 类沉积区属于陆架边缘沉积区, 每类沉积区都代表着不同的沉积环境。研究区沉积物的粒径趋势分析结果显示, 陆架坡折附近的沉积物主要向内陆架和外陆架边缘或上陆坡输运, 同时存在着跨陆架输运和沿陆架坡折输运现象, 这与研究区实测的底流方向相一致。本研究表明, 南海北部陆架坡折附近的沉积环境和沉积物输运模式比较复杂和特殊。本研究对今后陆架和陆坡区其他相关的研究具有十分重要的指导和借鉴意义。

关键词: 南海北部; 陆架坡折; 沉积物粒度; 沉积环境; 物质输运

中图分类号: P736.21 文献标识码: A 文章编号: 1000-3096(2019)10-0096-10
DOI: 10.11759/hyxx20181226003

粒度分析是研究沉积物的颗粒大小和分布情况, 其作为沉积学的一种基本方法, 被广泛应用于沉积环境分析和泥沙输运等研究上^[1-2]。粒度参数作为沉积物的一个重要指标, 包含很多信息, 不仅能够揭示物质来源和沉积环境, 还能反映研究区的水动力条件和物质输运路径等信息^[3-4]。因此, 对海洋表层沉积物的粒度分布参数和其组合的研究, 可用来区分海底底质类型, 划分沉积环境类型和判别沉积物的输运方向^[5-7]。

以往对表层沉积物的粒度特征和输运的研究与分析多集中在潮汐汉道^[8]、海湾^[1, 9]、潮滩^[10-11]、河口和内陆架^[12-13]等地方。陆架坡折是陆架和陆坡两大地貌单元的分界线, 是陆架向陆坡转换的过渡地带, 又称陆架坡折带, 这里地形坡度的迅速变化, 水深的增加, 往往造成水动力环境的改变, 势必影响沉积物的输运^[14-15]。陆架坡折线基本上位于水下 20~550 m, 全球平均深度是 133 m^[16]。陆架坡折因其特殊的地理位置, 往往成为陆源沉积物跨陆架输运的短暂停留区, 并且当今的陆架坡折处, 广泛存在末次冰期以来的大量残留的砂质沉积体^[17], 使得陆架坡折处的沉积环境和沉积过程十分复杂。

由于资料和样品有限, 我们对陆架坡折处的沉

积环境, 沉积物的输运和其动力过程了解得相对较少。因此, 本文根据在南海北部陆架附近获得的表层沉积物, 测试粒度参数, 分析粒径趋势, 结合实测的底流数据, 来探讨陆架坡折处的粒度分布特征和沉积物的输运, 这有助于我们了解陆架坡折的沉积环境和沉积过程, 同时对附近的资源开发也有重要的现实意义。

1 区域概况

研究区位于 114.5°~115.5°E 和 20°~21.5°N(投影坐标 WGS 1984 UTM Zone 50N), 属于南海北部的陆架坡折区, 东沙群岛以西海域, 水深 100~200 m(图 1), 位于古珠江三角洲的外缘^[18], 同时研究区还处于末次冰期以来的古海岸线附近^[19]。南海是太平洋的最重要的边缘海之一, 同时是一个半封闭的海盆, 周围

收稿日期: 2018-12-26; 修回日期: 2019-02-20

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(41576056)

[Foundation: National Natural Science Foundation of China, No. 41576056]

作者简介: 张洪运(1991-), 男, 山东临沂人, 在读博士, 主要从事海底地形地貌方面的研究工作, E-mail: hongyun-zhang@qq.com; 庄丽华(1974-), 通信作者, 女, 山东招远人, 高级工程师, 博士, 主要从事海洋沉积、海洋工程地质与灾害地质工作, 电话: 0532-82898669, E-mail: lhzhuang@qdio.ac.cn

被大陆和一系列的岛屿所围绕,因此有着十分重要的地质过程和复杂水动力环境,是世界上多学科的研究热点地区。南海北部陆架比较宽阔平坦,呈NE-SW走向,其平均坡度在 $3^{\circ}\sim 4^{\circ}$ ^[20]。南海北部的陆架广泛分布着各种砂质沉积物^[5],是一个典型的沙波活动区^[21-23]。

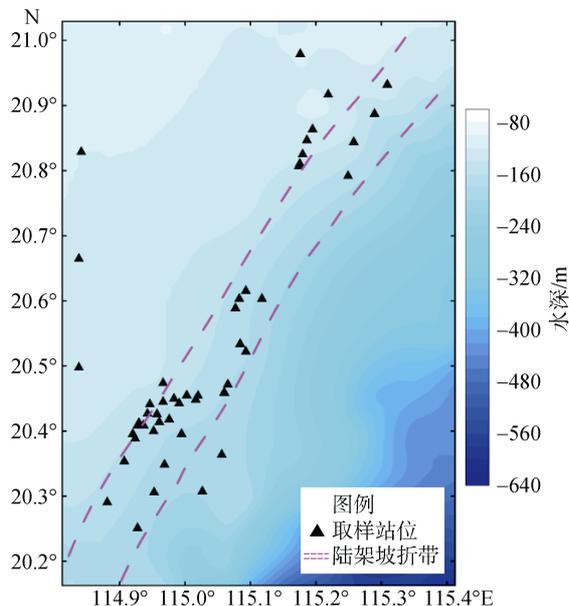


图1 研究区的区域位置和表层取样站位

Fig. 1 Locations of the study area and the surface sediment samples

南海北部水动力环境较为复杂,其主要表现形式有天文潮、季风环流、黑潮和内波^[24-27]。研究区的潮汐主要以不规则全日潮为主^[28]。表层环流在研究区表现为:在东北季风期间流向西南方,在西南季风期间流向西北方^[29]。黑潮也会时不时地影响到南海北部陆架^[30]。另外,南海北部的陆架和陆坡同时还受到内波的影响,内波主要是以内潮和内孤立波的形式影响研究区^[31-32]。

2 样品与方法

2.1 样品采集和测试

2010年9月和2017年4月,中国科学院海洋研究所利用箱式取样器和锚式取样器分别在南海北部陆架破折线附近的沙波活动区共取得表层沉积物50个(图1)。同时在2008年3月和2011年7月至10月,在研究区用两个海流计(ALEC公司生产),分别获取了30d和80d的底流数据。

沉积物的粒度测试在中国科学院海洋研究所完

成,采用筛分法和激光粒度测试相结合的方法。样品的实验室处理步骤是,先加适量30%双氧水去除有机质,再加适量10%盐酸去除碳酸盐和钙质胶结物,然后再加适量的1 mol/L的六偏磷酸钠分散沉积物。最后用0.85 mm孔径的筛子过筛,将样品分成粗组分和细组分,分别烘干称质量。粒径大于0.85 mm的粗组分采用筛分法,细组分样品用激光粒度仪进行测试,激光粒度仪型号是Cilas model 1190,测量范围是0.02~2 000 μm 。最后计算获得沉积物的各种参数。粒度参数采用矩值法计算^[33],粒度分级采用温德华氏等比级来划分,用 Φ 来表示^[34], Φ 粒级是现代最常用的粒级划分方案,其中 $\Phi = -\log_2(d/d_0)$ (d 为沉积物颗粒的直径,单位为毫米, $d_0=1$ mm), Φ 为无量纲参数,是一个变量符号^[35]。沉积物的命名采用Folk的含砾沉积物命名法^[35]。Folk的含砾沉积物的三角形分类图解是根据沉积物中砾石组分百分比为80%、30%~80%、5%~30%和0.01%~5%及微量划分为5层,然后以砂泥比值为9:1和1:1将三角形的每层分为3个区间,这样含砾沉积物共划分为14个类型^[36]。

2.2 沉积物粒度数据的处理

现代数理统计方法在看似随机的现象或者有限的观测中查找出总体的规律并作出可靠性的判断,已经被用于判别沉积环境和分区上,取得了良好的效果^[7]。常用的分析方法是因子分析和聚类分析。

因子分析的主成分分析法是用尽可能少的因子去反映整体样本的信息,这样就可以判断沉积环境中占主导的粒级组分。利用专业的统计分析软件IBM SPSS Statistics对研究区的沉积物的各粒级所占百分比进行主成分分析,计算各粒级的特征值和方差百分比,通过对碎石图的分析选择主因子个数,计算成分矩阵,最后通过方差极大旋转因子载荷来确定旋转后的各主因子的成分构成。

聚类分析主要是把类似的对象组合到一起的分析过程。聚类分析在沉积物类型划分及物源分析方面有非常广泛的应用^[37],R型聚类分析是聚类分析的一种,一般是对多个测量的指标进行分类。这里我们通过因子分析结果和沉积物的粒度参数以及沉积物中各种成分的含量,综合利用IBM SPSS Statistics作R型聚类分析,具有相同环境分区的沉积物会在谱系图上聚集到一起,最后根据聚类分析的谱系图结合地质背景和沉积环境来进行沉积环境分区。

沉积物的粒度参数的空间变化会反映出沉积物的运输方向,因此,对沉积物做粒径趋势分析来获取沉积物的运输方向,这里采用已经被广泛应用和检验的 Gao-Collin 的 GSTA 运输模型^[38-39]。

3 结果

3.1 表层沉积物粒级组分特征

研究区表层沉积物中砾石组分百分比为 0.01%~85.91%,平均为 21.67%,大部分海域都含有砾石组分,其分布如图 2a 所示(图中的 X 和 Y 为投影坐标,下同)为砾石组分最多出现在研究区的东南部分,最

小出现在北部区域,北部区域的砾石组分百分比均小于 20%,砾石组分百分比从东南到西北递减。研究区表层沉积物中砂的组分百分比为 3.38%~99.99%,平均 77.08%,其分布如图 2b 所示,砂组分百分比分布与砾石的分布相反,东南部的数值小,西北部的数值大,从东南到西北数值逐渐变大。粉砂组分的分布如图 2c 所示,研究区的粉砂组分百分比基本沿着水深等值线呈条带状分布,从东南到西北逐渐变大,但占比都不超过 20%。黏土组分的分布如图 2d 所示,研究区的表层沉积物基本不含黏土,只有西北部含有十分少量的黏土组分。

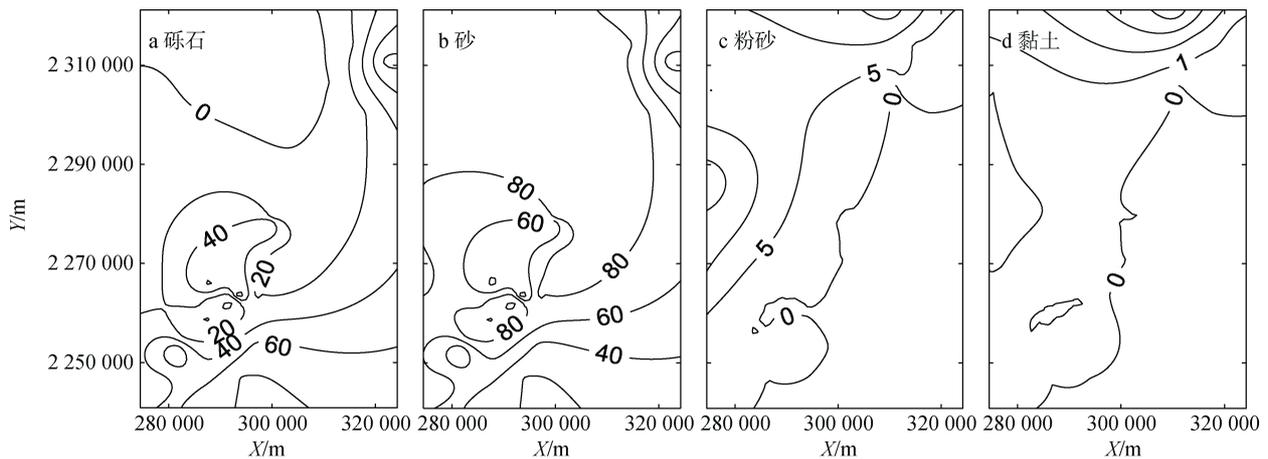


图 2 研究区表层沉积物各组分百分比(%)

Fig. 2 Percentage of each component of surface sediments in the study area (%)

3.2 沉积物的类型和分布

研究区沉积物的主要组分为砂和砾石,粉砂和黏土占比较少,因此根据 Folk 的含砾沉积物的命名方法,研究区的表层沉积物可划分为 4 种类型,按照其分布广度依次是砂质砾、砾质砂、含砾砂、含砾质泥质砂(图 3)。从图中可以看出,砂质砾和砾质砂分布最广,在陆架坡折线南部附近呈连续对称的带状分布,砾质砂中间分布着少量片状的含砾砂,研究区的东西两侧分布着少量含砾泥质砂。

3.3 表层沉积物粒度参数分布特征及其空间差异

沉积物的粒度参数一般包括平均粒径,分选系数,偏度,峰度。每一种粒度参数都反映数值量化的粒度特征。粒度参数及其组合一定程度上可以反映沉积物物源和运输以及沉积环境特征^[40]。研究区沉积物的粒度参数平面分布图如图 4 所示。

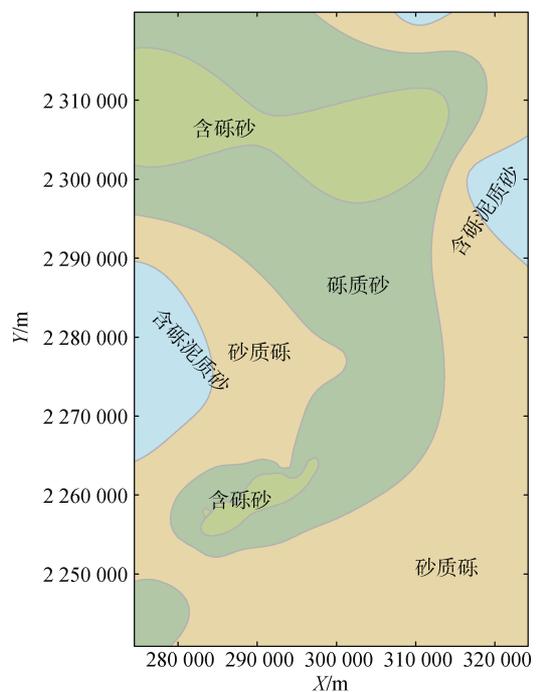


图 3 研究区的表层沉积物类型分布图

Fig. 3 Distribution of surface sediment types of study area

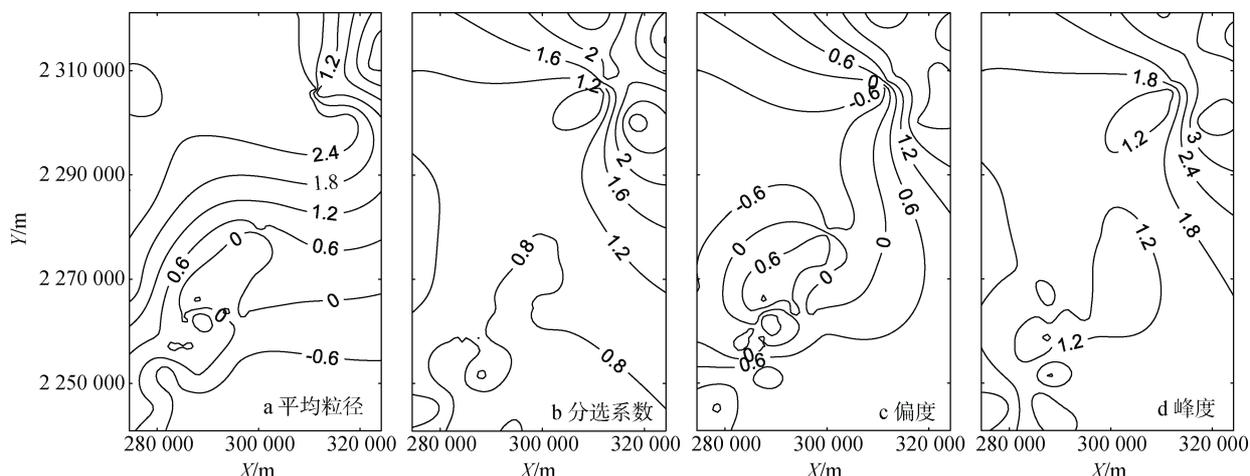


图 4 研究区表层沉积物的各粒度参数等值线图

Fig. 4 Contour maps of sediment grain size parameters of study area

平均粒径反映的是沉积物粒度的一个集中趋势^[40]。研究区表层沉积物平均粒径为 $\Phi = -1.0 \sim 3.0$ ，均值为 0.56。沉积物平均粒径最小出现在研究区的西北部，最小平均粒径 $\Phi = 3.0$ 。沉积物平均粒度最粗出现在研究区的西南区域的站位，平均粒径 $\Phi = -1.0$ 。从平均粒径的等值线图上可以看出研究区的沉积物自西北向东南逐渐变粗。研究区的平均粒径较大，另外研究区距离陆地较远，显示他们的物源并不是现在的陆源的物质。

分选系数是区分沉积物的粒度均匀程度的指标^[40]。研究区表层沉积物的分选系数范围在 0.4~3.1，平均 1.0。分选系数的好坏一定程度上可以反映水动力环境条件。总体上来看，沉积物大部分处于分选极好到分选较好的范围内，研究区南部的沉积物分选最好，有可能是风成沙丘或者海滩砂，东北的沉积物的分选系较差，有可能含有河流输入的物质或者含有浊流输入的成分。空间上来看，研究区中部的沉积物分选性好于四周。

偏度反映的是沉积物粒度分布的不对称程度^[40]。研究区沉积物的偏度范围在 $-1.1 \sim 2.8$ ，平均 0.2。研究区偏度数值范围比较大，从很负偏态到很正偏态均有，且以正偏态为主，表明沉积物以粗组分为主。负偏度主要集中在研究区的西部和西北部，说明沉积物相对以细组分为主，而研究区东北部和西南部部分点状区域的偏度较大，说明沉积物相对以粗组分为主。

峰度反映的是沉积物粒度频率曲线的尖锐程度^[40]。研究区沉积物的峰度范围在 0.6~3.9，平均值

为 1.5。峰度较小值基本出现在陆架坡折线附近，峰度较大值出现在研究区的东北部。

4 讨论

4.1 沉积环境分区

4.1.1 因子分析提取环境敏感因子

在多元统计分析中，主成分分析法常用于减少数据的维数，筛选出对数据方差贡献最大的成分^[41]。沉积物的多个粒度之间往往存在一定的相关性，因此可以采用主成分分析法来对不同粒度进行关联分析，选出对沉积环境最敏感的粒度组分。这里对每个站位的沉积物各粒级的占比做主成分分析，从得到的碎石图(图 5)和方差贡献值上来看(表 1)，有 4 个因子起主要作用，它们的特征值方差分别为 49.79%，19.55%，14.21%和 7.08%，累积方差达到在 90.63%。

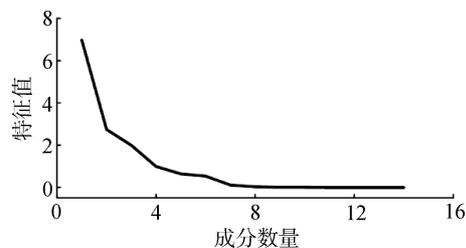


图 5 沉积物的主成分分析的碎石图

Fig. 5 The scree plot of the principal component analysis of sediments

其中，因子 F1 主要由细颗粒粉砂和黏土成分 ($\Phi = 7 \sim 12$) 的正载荷组成，因子 F2 主要由粗粉砂 ($\Phi = 4 \sim 5$) 的正载荷成分组成，因子 F3 主要由粗颗粒的细

砾质载荷和中砂成分($\Phi = -2 \sim -1$ 和 $1 \sim 2$)的正载荷组成, 因子 F4 由极粗砂的载荷和细砂($\Phi = -1 \sim 0$ 和 $\Phi = 2 \sim 3$)级别的正载荷组成(图 6)。

表 1 表层沉积物的粒度因子结构分析

Tab. 1 Grain size factor structure analysis of surface sediments

公因子	特征值	因子贡献率/%	累积贡献率/%
F1	6.97	49.79	49.79
F2	2.74	19.55	69.35
F3	1.99	14.20	83.55
F4	0.99	7.08	90.63

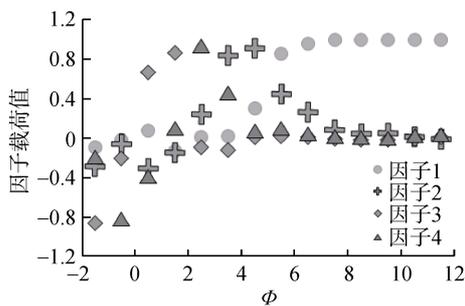


图 6 旋转后的各因子在各粒级上的主成分载荷

Fig. 6 Principal component loads of rotated factors on different grain sizes

4.1.2 沉积物的聚类分区划分沉积环境分区

将沉积物的平均粒径, 分选系数, 峰态, 偏态, 砾石的含量, 砂的含量, 粉砂的含量, 黏土的含量等参数结合因子分析的结果做 R 型聚类分析, 得到聚类分析的谱系图(图 7)。从聚类分析的谱系图上可以看出, 研究区所有的样品可分为 4 类, 每一类样品的聚集都代表着一种不同的沉积环境。

研究区处在古珠江三角洲的外缘^[18], 末次盛冰期以来, 南海北部陆架被海水淹没, 海岸线下降到现在水深 100 m 多的陆坡区, 因此南海北部的陆架坡折不断遭受侵蚀, 同时接受新的陆源沉积, 陆架和陆坡区发育许多埋藏古河道、海岸沙丘、海底沙丘和水下三角洲^[19]。综合这些地质背景和聚类分析结果, 将研究区划分为 4 个沉积环境分区, 沉积环境分区基本上沿着陆架坡折线的走向呈条带状分布, 如图 8 所示。I 类内陆架沉积区: 主要分布在研究区的西北部, 水深相对较浅, 其底质主要为含砾砂, 沉积物大部分相对较细, 含有少量砾石, 分选好, 呈现很负偏态, 典型的频率曲线呈单峰不对称形态(图 9), 说明物源较为单一。推测可能是低海平面时期的海滩砂或者浅海砂经过了现代水动力条件的筛选。II 类陆

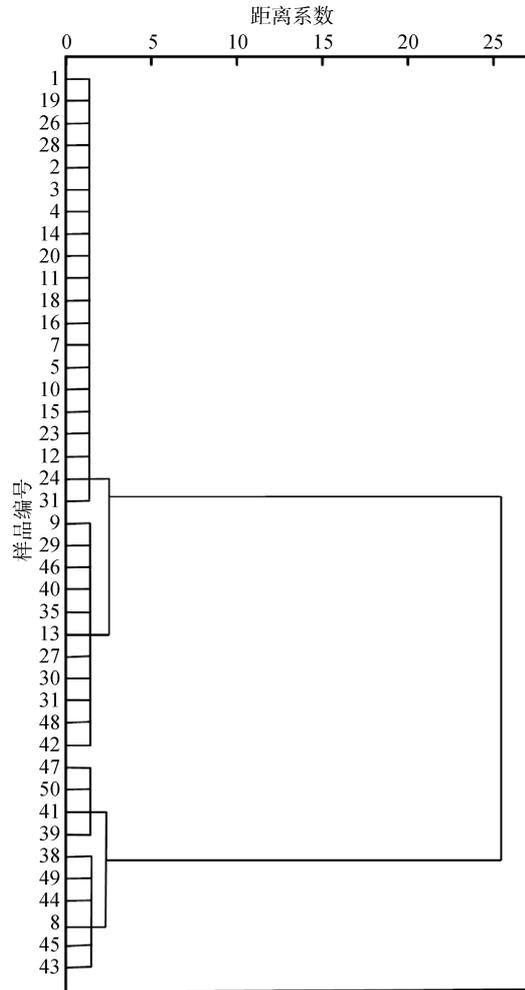


图 7 研究区表层沉积物 R 型聚类分析的谱系图

Fig. 7 Diagram of R-type cluster analysis for samples from surface sediments

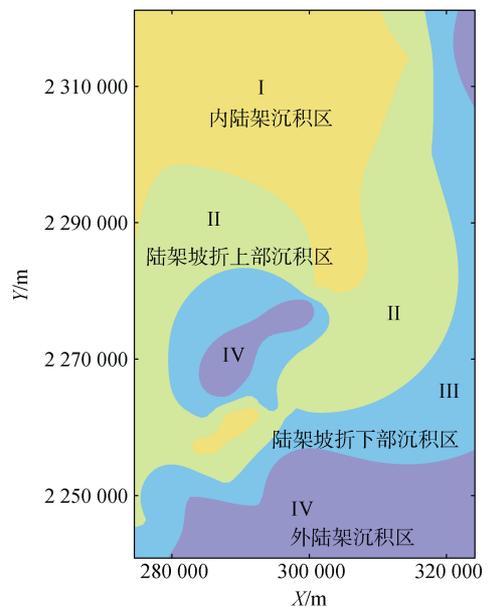


图 8 研究区的沉积环境分区图

Fig. 8 Sedimentary environment zones of study area

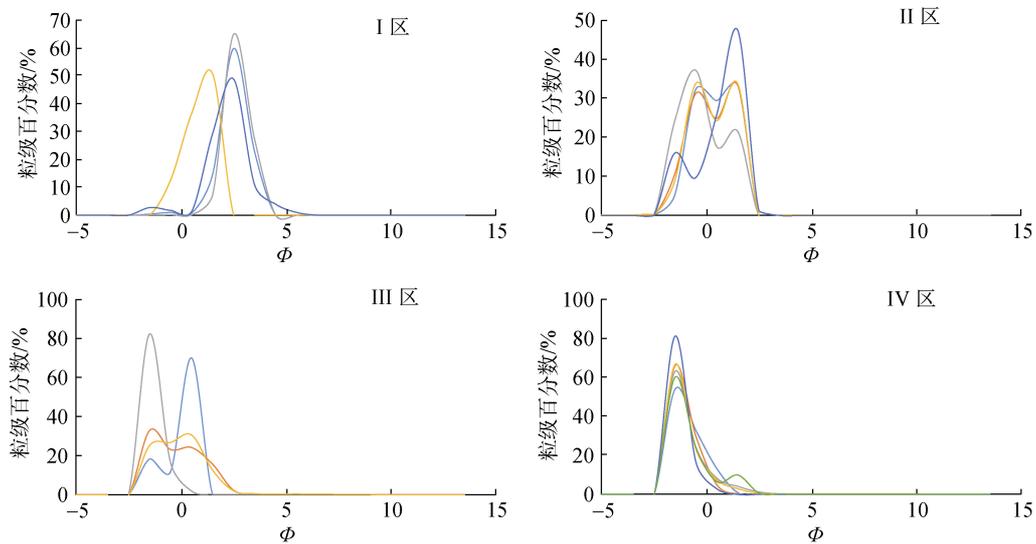


图9 不同沉积环境分区的典型沉积物粒度频率曲线

Fig. 9 Typical sediment particle size curves for different sedimentary environment zones

架坡折上部沉积区：主要在研究区的中上部陆架坡折附近，其底质以砾质砂为主，沉积物含有较多砾石，平均粒径相对较粗，分选较好，也呈很负偏态，典型的频率曲线呈双峰状态，峰宽较窄(图 9)，说明沉积物物源的多样性。推测沉积物可能是古珠江的河流输入物质混合低海平面时期的物质。III 类陆架坡折下部混合沉积区：主要在研究区的中下部陆架坡折附近，以砂质砾和砾质砂的混合成分为主，平均粒径较粗，分选中等，呈很正偏态，典型的频率曲线呈双峰状态或者单峰状态(图 9)。此处的沉积物的粒径相对陆架坡折上部的沉积物粒径更大，推测为低海平面时候的海滩砂混合着古珠江带来的一些陆源碎屑沉积物，同时有可能还含有一些浊流沉积的成分。IV 类外陆架沉积区：主要在研究区的下部，处于深水区域，以砂质砾为主。分选较好，呈正偏态，呈现出单峰对称特点(图 9)，说明物源单一，并且粒径相对其他沉积区更大，推测为古珠江输入物质在后期高能海浪环境下筛选后的残留沉积物。

4.2 沉积物输运趋势分析

南海北部陆架坡折是一个开放的沉积体系，坡折处水深变化较大，沉积物以末次盛冰期以来残留的浅海砂、海滩砂以及古珠江三角洲的沉积为主，另外还有一些现代珠江的河流输运物质^[17]。研究区内波活动频繁，导致海底存在阵发性的强流，海底实测流速较大，尽管研究区沉积物较粗，但是实测强流可以造成沉积物的起运和搬运^[42]。

在粒径趋势分析上，最常用的是 Gao-Collins 模

型，在很多海域都验证了该模型的可靠性^[38]。由于采样间隔的不规则，常先采用插值法进行预处理，形成规则网格来进一步分析沉积物的输运趋势^[7]。在 Gao-Collins 粒径趋势分析中，采取不同的特征距离往往会有不同的结果，为了使特征距离能够反映真实的泥沙输运状况，同时又符合研究区的尺度大小，这里我们采用 3 倍的网格化间距作为特征距离。经过计算，得到沉积物输运趋势图(图 10)。

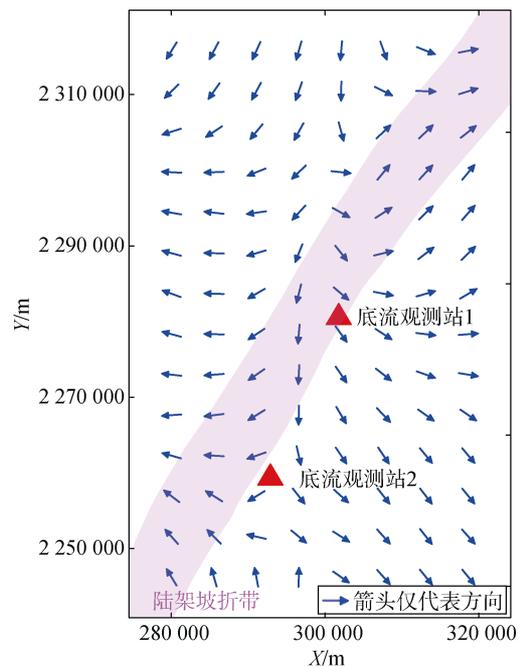


图10 研究区表层沉积物的粒径输运趋势

Fig. 10 Grain size transport trend of surface sediments of study area

总体上, 研究区的沉积物存在内陆架和外陆架两个主输运方向, 但是也存在少量跨陆架的输运和沿陆架坡折向外海的输运。底流观测站 1 所观测到的底流主要集中在 SE 和 NW 两个方向, SE 向的底流占据绝对的优势, NW 向的底流相对比较弱(图 11), 在沉积物输运趋势图上表现为向 SE 向的净输运(图 10)。底流观测站 2 显示此处底流存在 3 个主要方向,

分别为 SE、SW 和 W 方向, 没有 NE 向的流向(图 11), 在沉积物输运趋势图上表现为此处有 3 个主要输运方向, SE、SW 和 W 方向, 并且不存在 NE 向的输运(图 10)。粒径趋势分析模型计算的沉积物的输运方向与研究区两处底流观测站所观测的底流流向一致, 也反映了 Gao-Collin 模型在研究区的适用性和可靠性。

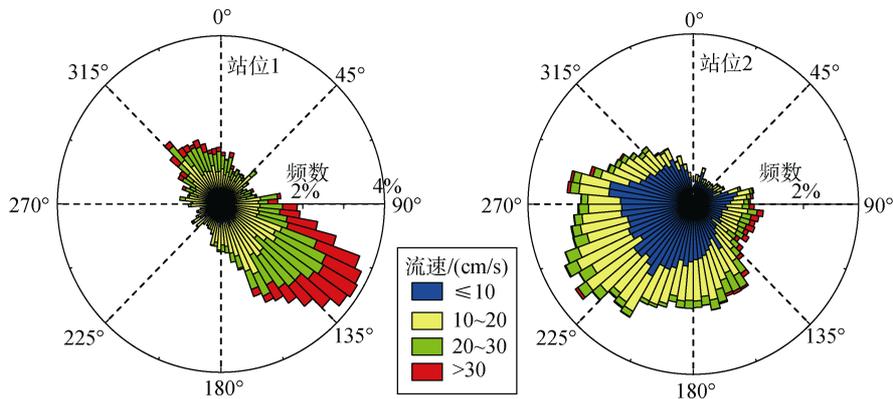


图 11 底流观测站 1、2 的流速和流向玫瑰图
Fig. 11 The rose chart of bottom currents at sites 1 and 2

5 结论与展望

1) 南海北部陆架坡折处的表层沉积物主要是砂质沉积物, 粒度较粗, 大都含有砾石成分, 总共可以划分为 4 种类型: 砾质砂、含砾砂、砂质砾和砾质泥质砂, 其中砂质砾和砾质砂占绝对优势。

2) 因子分析和聚类分析的显示, 南海北部陆架坡折可以划分为 4 类沉积区。分区基本沿着陆架坡折呈带状分布, I 类沉积区位于研究区西北部, 主要是内陆架沉积区, 沉积物类型比较单一。II 类沉积区位于研究区陆架坡折的上部, 沉积物的物源呈现多样性。III 类沉积区位于陆架坡折的下部, IV 类沉积区位于研究区的东南部, 此沉积区的沉积物粒度较粗。

3) 表层沉积物粒径趋势分析的结果表明, 陆架坡折附近的沉积物有向内陆架和外陆架两个主要输运方向, 还有少量的跨陆架输运和沿陆架向海的输运, 这与研究区实测水动力条件相吻合。

4) 为了能更好地研究南海北部陆架坡折的沉积环境和沉积过程, 未来需要扩大研究区的范围, 获取更多的表层沉积物样, 同时应该做更多水动力环境的观测, 再配合数值模拟才能更好地揭示南海北部陆架坡折附近的沉积环境和沉积过程。

参考文献:

- [1] 王伟伟, 庄丽华, 阎军, 等. 青岛市汇泉湾海水浴场表层沉积物粒度特征及输运趋势[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2007, 31(3): 13-17.
Wang Weiwei, Zhuang Lihua, Yan Jun, et al. Grain size characteristics and transport trend of surficial sediment in Huiquan Bay beach in Qingdao[J]. Journal of China University of Petroleum, 2007, 31(3): 13-17.
- [2] 卢健, 李安春. 南黄海表层沉积物粒度特征季节变化及其影响因素[J]. 海洋科学, 2015, 39(3): 48-58.
Lu Jian, Li Anchun. Seasonal variations and influencing factors of the grain size characteristics of surface sediments in the South Yellow Sea[J]. Marine Sciences, 2015, 39(3): 48-58.
- [3] 杨旭辉, 冯秀丽, 褚忠信, 等. 中国东部陆架表层沉积物粒度特征及其沉积环境浅析[J]. 中国海洋大学学报(自然科学版), 2012, 42(7-8): 126-134.
Yan Xuhui, Feng Xiuli, Chu Zhongxin, et al. Surface sediment distribution and sedimentary environment on the east China continental shelf [J]. Periodical of Ocean University of China, 2012, 42(7-8): 126-134.
- [4] 袁萍. 渤海表层沉积物的空间分布及其与物源和沉积动力环境的关系[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2015.
Yuan Ping. Distribution of surface sediment in the Bohai Sea and its relationship with sediment supply and sedimentary dynamic environment[D]. Qingdao: Ocean

- University of China, 2015.
- [5] 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): 57-64.
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): 57-64.
- [6] 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 sediment and depositional environments in the northern shelf region of the South China Sea[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2016, 36(6): 111-122.
- [7] 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[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2014, 32 (2): 314-324.
- [8] Gao Shu, Collins M B. Analysis of grain size trends, for defining sediment transport pathways in marine environments[J]. Coastal Education and Research Foundation 1994, 10(1): 70-78.
- [9] 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.
- [10] 贾建军, 汪亚平, 高抒, 等. 江苏大丰潮滩推移质输运与粒度趋势信息解译[J]. 科学通报, 2005, 50(22): 2546-2554.
Jia Jianjun, Wang Yaping, Gao Shu, et al. Interpretation of bedload transport and grain size trend information of dafeng tidal flat in Jiangsu Province[J]. Chinese Science Bulletin, 2005, 50 (22): 2546-2554.
- [11] 王华强, 高抒. 杭州湾北岸高潮滩沉积与沿岸物质输运趋势[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2007, 27(6): 25-30.
Wang Huaqiang, Gao Shu. Tidal flat sediment characteristics and transport trends along the northern bank of Hangzhou Bay[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2007, 27(6): 25-30.
- [12] 石学法, 刘焱光, 任红, 等. 南黄海中部沉积物粒径趋势分析及搬运作用[J]. 科学通报, 2002, 47(6): 452-456.
Shi Xuefa, Liu Yanguang, Ren Hong, et al. Analysis of sediment particle size trend and its transport in the middle of the South Yellow Sea[J]. Chinese Science Bulletin, 2002, 47(6): 452-456.
- [13] 彭晓彤, 周怀阳, 叶瑛, 等. 珠江河口沉积物粒度特征及其对底层水动力环境的指示[J]. 沉积学报, 2004, 22(3): 487-493.
Peng Xiaotong, Zhou Huaiyang, Ye Ying, et al. Characteristics of sediment grain size and their implications for bottom hydrodynamic environment in the Pearl River estuary[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2004, 22(3): 487-493.
- [14] 刘宝和. 中国石油勘探开发百科全书 勘探卷[M]. 北京: 石油工业出版社, 2008: 1-1119.
Liu Baohe. Encyclopedia of Petroleum Exploration and Development in China Volume of Exploration[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2008: 1-1119.
- [15] 谢钦春, 叶银灿, 陆炳文. 东海陆架坡折地形和沉积作用过程[J]. 海洋学报, 1984, 6(1): 61-71.
Xie Qinchun, Ye Yincan, Lu Bingwen. Topography and sedimentation process of East China Sea shelf and slope[J]. Acta Oceanologica Sinica, 1984, 6(1): 61-71.
- [16] Lotha G. Encyclopædia Britannica[M]. Chicago, USA: Encyclopædia Britannica, Inc. 2016.
- [17] 冯文科, 黎维峰, 石要红. 南海北部海底沙波地貌动态研究[J]. 海洋学报, 1994, 16(6): 92-99, 142.
Feng Wenke, Li Weifeng, Shi Yaohong. Study on the dynamics of seabed sand wave geomorphology in the north of South China Sea[J]. Acta Oceanologica Sinica, 1994, 16 (6): 92-99, 142.
- [18] 鲍才旺. 珠江口陆架区埋藏古河道与古三角洲[J]. 海洋地质与第四纪地质, 1995, 15(2): 25-36.
Bao Caiwang. Buried ancient channels and deltas in the Zhujiang River mouth shelf area[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 1995, 15(2): 25-36.
- [19] 姚衍桃, Harff J, Meyer M, 等. 南海西北部末次盛冰期以来的古海岸线重建[J]. 中国科学(D 辑: 地球科学), 2009, 39(6): 753-762.
Yao Yantao, Harff J, Meyer M, et al. Reconstruction of paleocoastlines for the northwestern South China Sea since the Last Glacial Maximum[J]. Science China (Series D-Earth), 2009, 39(6): 753-762.
- [20] 冯文科, 鲍才旺, 陈俊仁, 等. 南海北部海底地貌初步研究[J]. 海洋学报, 1982, 4(4): 462-472.
Feng Wenke, Bao Caiwang, Chen Junren, et al. Preliminary study on submarine relief of the northern South China Sea[J]. Acta Oceanologica Sinica, 1982, 4(4): 462-472.
- [21] 张洪运, 庄丽华, 阎军, 等. 南海北部东沙群岛西部海域的海底沙波与内波的研究进展[J]. 海洋科学, 2017, 41(10): 149-157.
Zhang Hongyun, Zhuang Lihua, Yan Jun, et al. Progress of sand waves and internal waves research in sea area west of the Dongsha Islands in the northern South

- China Sea[J]. *Marine Sciences*, 2017, 41(10): 149-157.
- [22] 栾锡武, 彭学超, 王英民, 等. 南海北部陆架海底沙波基本特征及属性[J]. *地质学报*, 2010, 84(2): 87-99.
Luan Xiwu, Peng Xuechao, Wang Yingming, et al. Characteristics of sand waves on the northern South China Sea shelf and its formation[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2010, 84(2): 87-99.
- [23] 吴建政, 胡日军, 朱龙海, 等. 南海北部海底沙波研究[J]. *中国海洋大学学报(自然科学版)*, 2006, 36(6): 1019-1023.
Wu Jianzheng, Hu Rijun, Zhu Longhai, et al. Study on the seafloor sandwaves in the northern South China Sea[J]. *Periodical of Ocean University of China*, 2006, 36(6): 1019-1023.
- [24] Fang Guohong . A survey of studies on the South China Sea upper ocean circulation[J]. *Acta Oceanographica Taiwanica*, 1998, 37(1): 1-16.
- [25] Li Junyi, Zheng Quanan, Hu Jianyu, et al. A case study of winter storm-induced continental shelf waves in the northern South China Sea in winter 2009[J]. *Continental Shelf Research*, 2016, 125: 127-135.
- [26] Hwang J, Dahms H, Tseng L, et al. Intrusions of the Kuroshio Current in the northern South China Sea affect copepod assemblages of the Luzon Strait[J]. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 2007, 352(1): 12-27.
- [27] Zheng Quanan, Susanto R, Ho C, et al. Statistical and dynamical analyses of generation mechanisms of solitary internal waves in the northern South China Sea[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2007, 112(C03021): 1-16.
- [28] 杨万康, 尹宝树, 杨德周, 等. 基于 FVCOM 的南海北部海域潮汐潮流数值模拟[J]. *海洋科学*, 2013, 37(9): 10-19.
Yang Wankang, Yin Baoshu, Yang Dezhou, et al. Application of FVCOM in numerical simulation of tide and tidal currents in the northern South China Sea[J]. *Marine Sciences*, 2013, 37(9): 10-19.
- [29] Hu Jianyu, Kawamura H, Hong Huasheng, et al. A review on the currents in the South China Sea: Seasonal circulation, South China Sea warm current and Kuroshio intrusion[J]. *Journal of Oceanography*, 2000, 56(6): 607-624.
- [30] 马应良. 南海北部陆架邻近水域十年水文断面调查报告[M]. 北京: 海洋出版社, 1990: 254.
Ma Yinliang. A Ten-Year Hydrographic Cross-Sectional Survey Report of the Waters Adjacent to the Continental Shelf in the Northern Part of the South China Sea[M]. Beijing: China Ocean Press, 1990: 254.
- [31] 李群, 陈旭, 徐肇廷, 等. 南海东北部陆架波折处潮地作用激发非线性内波的数值模拟[J]. *水动力学研究与进展*, 2009, 24(6): 724-733.
Li Qun, Chen Xu, Xu Zhaoting, et al. Numerical modeling on the nonlinear internal wave generation by the tide-shelf break interaction at the Northeastern South China Sea[J]. *Chinese Journal of Hydrodynamics*, 2009, 24(6): 724-733.
- [32] 翟荣伟, 陈桂英, 尚晓东. 南海北部相干内潮和非相干内潮演变特征[J]. *海洋学报*, 2017, 39(11): 24-36.
Zhai Rongwei, Chen Guiying, Shang Xiaodong. Evolution characteristics of coherent and incoherent internal tides in the northern South China Sea[J]. *Haiyang Xuebao*, 2017, 39(11): 24-36.
- [33] McManus J. Grain size determination and interpretation[C]. Tucker M E. *Techniques in Sedimentology*. Oxford: Blackwells, 1988: 63-85.
- [34] Chester W. A scale of grade and class terms for clastic sediments[J]. *The Journal of Geology*, 1922, 30(5): 377-392.
- [35] 刘珊珊. 关于粒径“ Φ ”的规范表达[J]. *编辑学报*, 2019, 31(增刊 1): 146-147.
Liu Shanshan. Discussion on the normative expression of sediment grain size “ Φ ”[J]. *Acta Editologica*, 2019, 31(Sup. 1): 146-147.
- [36] Folk R L, Andrews P, Lewis D W. Detrital sedimentary rock classification and nomenclature for use in New Zealand[J]. *New Zealand Journal of Geology & Geophysics*, 1970, 13(4): 937-968.
- [37] Zhou Di, Chen Hanzong, Lou Youlang. The logratio approach to the classification of modern sediments and sedimentary environments in northern South China Sea[J]. *Mathematical Geology*, 1991, 23(2): 157-165.
- [38] Gao Shu, Collins M. Net sediment transport patterns inferred from grain-size trends, based upon definition of “transport vectors”[J]. *Sedimentary Geology*, 1992, 81(1): 47-60.
- [39] 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 Sedimentology Sinica*, 2009, 27(5): 826-836.
- [40] 朱筱敏. 沉积岩石学[M]. 北京: 石油工业出版社, 2008: 53-80.
Zhu Xiaomin. *Sedimentary Petrology*[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2008: 53-80.
- [41] Jolliffe I. Pincipal component analysis [J]. *Journal of Marketing Research*, 2002, 25(4): 513.
- [42] Zhang Hongyun, Ma Xiaochuan, Zhuang Lihua, et al. Sand waves near the shelf break of the northern South China Sea: Morphology and recent mobility[J]. *Geo-Marine Letters*, 2019, 39(1): 19-36.

Grain size characteristics of surface sediments and their transport patterns near the shelf break of the northern South China Sea

ZHANG Hong-yun^{1, 2, 3}, ZHUANG Li-hua^{1, 2, 4}, YAN Jun^{1, 2, 4}, MA Xiao-chuan^{1, 2, 4}

(1. Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Qingdao 266071, China; 2. Key Laboratory of Marine Geology and Environment, Chinese Academy of Sciences, Qingdao 266071, China; 3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 4. Center for Ocean Mega-Science, Chinese Academy of Sciences, Qingdao 266071, China)

Received: Nov. 24, 2018

Key words: the northern South China Sea; shelf break; sediment grain size; sedimentary environment; sediment transport

Abstract: Fifty surface sediment samples were collected near the shelf break of the continental shelf in the northern South China Sea. The grain sizes were analyzed to investigate the sedimentary environmental zoning and grain size transport trend. The contents of gravel, sand, silt, and clay in the study area are 21.7%, 76.8%, 1.4%, and 0.2%, respectively. The sediments in the study area are mainly divided into four types, which are (gravel) sand, gravel sand, sandy gravel, and (gravel) muddy sand. The study area can be divided into four types of sedimentary areas based on factor analysis and cluster analysis. Area I is located in the northwest of the study area; it belongs to the sedimentary area of the inner shelf. Area II belongs to the upper sedimentary areas of the shelf break, while Area III belongs to the bottom sedimentary areas of the shelf break. Area IV is the shelf-margin sedimentary area. Finally, the net transport of sediments is analyzed according to Gao-Collins's GSTA model. The results show that the sediments near the shelf break mainly migrate to the inner shelf and upper slope; some can migrate across the shelf break, and some migrate along the shelf break, which agrees with the bottom current observation at the study area. The study shows that the sedimentary environment and sediment transport patterns near the shelf break of the northern South China Sea are very complex and special. This study has important guidance and referential significance for future related research on the areas near the continental shelf and slope areas.

(本文编辑: 刘珊珊)