

南海北部外陆架表层沉积物粒度参数特征及物源分析

李泽文^{1,2,3}, 栾振东¹, 阎军¹, 庄丽华¹

(1. 中国科学院 海洋研究所, 中国科学院 海洋地质与环境重点实验室, 山东 青岛 266071; 2. 中国科学院研究生院, 北京 100049; 3. 华能新能源股份有限公司, 北京 100036)

摘要: 为研究南海北部外陆架沉积物来源及沉积特征, 对南海北部外陆架 18 个站位进行了表层沉积物取样和分析, 通过对沉积物的分类和粒度参数的计算, 探讨了沉积物类型和粒度参数的分布特征及其指示意义。研究表明, 研究区表层沉积物类型包括砾、砂质砾、砾质砂、砾质泥质砂、含砾砂、含砾泥质砂和含砾泥 7 种类型。沉积物运输方式在外陆架以推移运输为主, 靠近内陆架区域以跃移和悬移为主。从外陆架向内陆架方向, 平均粒径变小, 分选程度变差, 偏态更加正偏, 峰形由尖窄单峰态变为宽平双峰态。南海北部外陆架靠近陆坡区域沉积物主要来源于末次冰期残留沉积物, 在 WNW-N 方向潮流作用下, 大致沿 SE-NW 方向由外陆架向内陆架运输, 随着向内陆架方向靠近, 愈靠近华南大陆, 珠江等水系运输而来在陆源碎屑沉积物组成中所占比例增大。

关键词: 南海北部; 沉积物; 粒度参数; 沉积物来源

中图分类号: P736.21⁺²

文献标识码: A

文章编号: 1000-3096(2011)12-0092-09

南海石油资源丰富, 石油储量约为 230~300 亿 t, 约占我国总资源量的 1/3, 有“第二个波斯湾”之称, 近海石油开发活动频繁, 海底管道作为一种快速有效的运输油气的工具而大量铺设于海底。海底表层沉积物直接承载着油气管道, 出现水动力对海底沉积物的冲刷过程和沉积物迁移可能导致管线悬跨等风险因素, 而底质沉积物特征直接影响到管道附近是否发生局部冲刷及冲刷的严重程度, 因此, 掌握海底沉积物的粒度参数及物源特征对于管道悬跨程度的预测和保证海洋油气开发的安全运营具有重要指导意义。

目前, 对南海表层沉积物来源的研究主要集中在南海西部和东部^[1-2], 对南海北部外陆架区沉积物来源的研究相对较少, 观点各异, 有学者认为珠江流域运输而来的陆源碎屑是南海北部表层沉积物的主要物源^[3], 也有学者认为南海北部陆架的沉积物来自台湾海峡和台湾岛^[4], 还有学者认为此区域的粗颗粒沉积物及由其组成的海底沙波是末次冰盛期低海面时期形成的残留沉积^[5]。分析南海北部表层沉积物粒度参数特征, 进而研究其沉积物来源具有重要的理论意义。

1 区域概况

研究区位于南海北部大陆架珠江口盆地 100~

200 m 水深区域, 香港东南约 160~240 km。南海是西太平洋面积最大的边缘海, 属于西太平洋边缘沟-弧-盆体系的一部分。南海北部陆架位于 106°~121°E, 16°~23°N 之间, 西起越南, 北邻中国东南大陆, 东至台湾岛, 长约 1 600 km 左右, 是我国南海北部大陆边缘一个重要组成部分。南海北部陆架自 NE 向 SW 延伸, 形似如意状, 整体上平坦而宽阔, 发育海南岛和东沙群岛两个大型岛屿。南海北部的潮汐主要是太平洋潮波传入引起的, 兼有月球和太阳的引潮力在南海引起的潮振动^[6]。由于陆域或岛屿地形的制约, 太平洋潮波于中国台湾与菲律宾之间的巴士海峡和巴林塘海峡传入南海后, 一部分向台湾海峡传去, 其主体部分沿着南海大陆架呈弧形向海南岛方向传播。

2 样品采集与分析

2.1 样品的采集

2010 年 9 月以中国科学院海洋研究所的“科学

收稿日期: 2010-11-12; 修回日期: 2011-08-15

作者简介: 李泽文(1986-), 男, 山东烟台人, 助理工程师, 硕士, 主要从事海洋地质与沉积学研究, 电话: 0532-82898669, E-mail: lizewen1986@126.com; 阎军, 通信作者, 研究员, 从事海洋沉积动力学与海洋工程地质学研究, E-mail: jyan@qdio.ac.cn

三号”作为调查船,使用箱式取样器对南海北部外陆架的表层沉积物进行取样,海上定位采用 NAVCOM SF3050 星站差分 GPS,定位误差小于 ± 15 cm,表层沉积物样品取样站位共 18 个(图 1),用于粒度分析的样品控制在海底 0~5 cm 深度范围内采取,样品采集后用 PVC 袋封装,并进行样品编号,备测试用。在海上调查过程中使用走航式 ADCP 对流速剖面进行了测量。

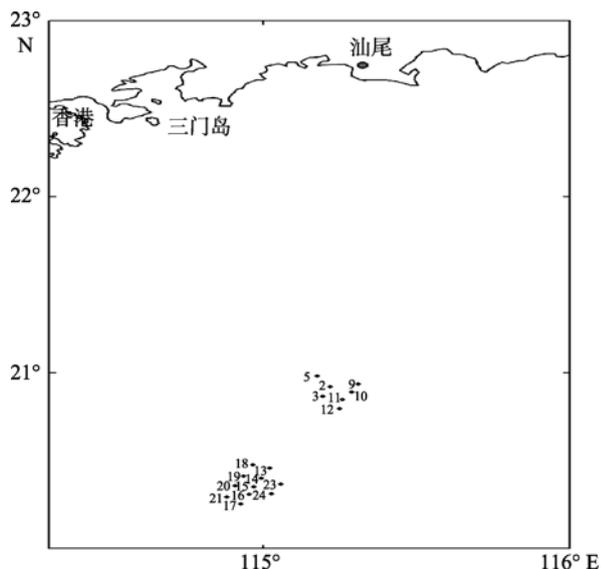


图 1 表层沉积物取样点分布图

Fig. 1 Distribution of sampling points of surface sediment

2.2 样品的分析

由于多数沉积物样品较粗,超过激光粒度仪的测量范围,粒度测试采用筛析法和激光粒度仪相结合的方法,用孔径间隔为 0.5ϕ 的分样筛过筛,粒径大于 $1\ 000\ \mu\text{m}$ 的部分采用筛析,小于 $1\ 000\ \mu\text{m}$ 的部分采用激光粒度仪测量。粒度分析按海洋底质调查技术规程要求^[7]进行。取适量湿样品,先后各加入过量的 30% 的 H_2O_2 和 $0.25\ \text{mol/L}$ 的 HCl 溶液以去除有机质和碳酸盐(至不起气泡为止),然后将样品进行反复离心和洗盐,直到溶液呈中性为止,经超声波充分分散后在中国科学院海洋研究所用法国产 Cilas940L 激光粒度仪上进行测量。仪器测量范围为 $0.3\sim 2\ 000\ \mu\text{m}$,重复测量的相对误差小于 2%, 粒径划分标准采用尤登-温德华氏等比制 ϕ 值粒径标准。

研究区沉积物的分类和命名采用含砾石沉积物的 Folk 三角图解法^[8]。沉积物的平均粒径 M_z 、分选系数 δ_i 、偏态 S_{ki} 和峰态(K_u)通过矩法计算,粒度分

组间距为 0.25ϕ 。Mc Manus 矩算法^[9]的数学计算公式如下:

$$M_z = \frac{\sum fm}{100}$$

$$\delta_i = \sqrt{\frac{\sum f(m - M_z)^2}{100}}$$

$$S_{ki} = \frac{\sum f(m - M_z)^3}{100\delta_i^3}$$

$$K_u = \frac{\sum f(m - M_z)^4}{100\delta_i^4}$$

式中: f ——每组粒级的频率百分数; M ——粒级组中值; M_z 代表沉积物粒度分布的集中趋势,即碎屑物质的粒度一般趋向于围绕着一个平均的数值集中分布,平均粒径的平面等值线图表征了沉积物粒径的平面分布特征,是追索物质来源的重要依据之一; δ_i 是表征沉积物分选性的指标,用来区分沉积物颗粒大小的均匀程度,分选系数越大,分选程度越差; S_{ki} 是用来表示沉积物粒度频率曲线不对称程度的参数; K_u 刻画粒径在平均粒径两侧集中程度,通常用来衡量沉积物频率分布曲线峰形的宽窄陡缓程度,峰态越窄,样品粒度分布越集中。

3 结果

3.1 沉积物类型及分布特征

南海北部外陆架区细粒沉积物的颜色多为黄褐色,随着粒径变粗,颜色逐渐加深,呈灰黑色和青灰色。由于研究表层沉积物样品中均含有砾石成分,因此采用含砾沉积物的 Folk 三角图分类法进行命名,这种方法可以反映沉积区的动力学条件,并进而推断沉积环境。按此分类方法,南海北部外陆架 $100\sim 200\ \text{m}$ 水深处表层沉积物可分为砾(G)、砂质砾(sG)、砾质砂(gS)、砾质泥质砂(gmS)、含砾砂((g)S)、含砾泥质砂((g)mS)和含砾泥((g)M)共 7 种类型,各站位沉积物类型及粒度参数见表 1。

全区范围来看,沉积物类型空间分布呈现明显的区域差异性。研究区南部沉积物成分较粗,沉积物类型以砂质砾为主,这也是研究区内分布最广的沉积物类型,所占比例达 38.90%,这一类型的沉积物物质组成以砾石为主,砾石在沉积物中的质量分数为 35.42%~78.41%,砾石质量分数最高值出现在西南端的 24 号采样点,砾石质量分数高达 78.41%;其次是砂,质量分数为 21.52%~37.42%;而泥质(粉砂

表 1 研究区表层沉积物粒度参数及沉积物类型

Tab. 1 Grain size parameters and sediment types in the study area

站位	水深 (m)	平均粒径	分选系数	偏度	峰度	质量分数(%)				沉积物类型
						砾石	砂	粉砂	黏土	
2	121	1.425 ϕ	1.895	2.041	3.022	12.66	81.36	4.66	1.33	砾质砂
3	125	1.35 ϕ	2.072	1.625	2.599	4.46	89.1	5.81	0.63	含砾砂
5	116	2.247 ϕ	2.769	2.842	3.724	2.46	73.02	19.32	5.2	含砾泥质砂
9	124	-0.858 ϕ	0.718	1.369	2.105	67.48	32.1	0.32	0.1	砂质砾
10	141	-0.715 ϕ	1.538	2.543	3.409	85.91	10.56	2.79	0.74	砾
11	152	5.423 ϕ	2.662	-2.017	3.567	2.23	22.48	57.82	17.48	含砾泥
12	167	2.876 ϕ	3.065	2.466	3.896	18.17	53.51	20.27	8.05	砾质泥质砂
13	170	-0.896 ϕ	0.622	1.14	1.781	76.74	23.03	0.18	0.04	砂质砾
14	173	-1.061 ϕ	0.584	1.35	2.118	96.62	2.94	0.35	0.09	砾
15	176	0.036 ϕ	1.346	1.778	2.58	35.42	63.09	1.14	0.35	砂质砾
16	175	-0.778 ϕ	0.524	0.611	0.772	55.58	44.42	0	0	砂质砾
17	190	-0.846 ϕ	0.522	0.881	1.438	62.49	37.42	0.07	0.02	砂质砾
18	133	-0.714 ϕ	0.841	1.309	1.942	64.33	35.39	0.2	0.07	砂质砾
19	145	0.612 ϕ	0.908	-0.717	1.296	13.09	86.68	0.23	0	砾质砂
20	164	-1.008 ϕ	0.404	0.855	1.446	81.31	18.6	0.06	0.02	砾
21	176	0.124 ϕ	1.387	1.917	2.728	27.34	70.51	1.7	0.44	砾质砂
23	188	-0.812 ϕ	0.69	1.103	1.66	67.83	32	0.13	0.04	砂质砾
24	190	-0.967 ϕ	0.437	0.81	1.325	78.41	21.52	0.06	0.01	砂质砾

和黏土)的质量分数均不超过 1.00%。研究区北部除了在 9 站和 10 站零星分布较粗颗粒沉积物外,相对南部而言表层沉积物颗粒粒度整体较细,广泛分布成分以砂为主的沉积物,如 2 站(砾质砂)、3 站(含砾砂)、5 站(含砾泥质砂),砂质质量分数为 73.02%~89.10%。沉积物组成最粗的砾(G)呈斑状分布于研究区南部(14 站及 20 站)和东北部(10 站),沉积物组成最细的为东北部 11 站的含砾泥。

由研究区南部到北部,砾石质量分数逐渐减少,砂、粉砂、黏土质量分数逐渐增加。从粉砂和黏土累计质量分数等值线图(图 2)可以看出,研究区东北部存在一个粉砂和黏土的高值圈闭区,细粒沉积物圈闭通常指示沉积中心的存在^[10],因此东北部区域可能是研究区的沉积中心。

沉积物粒径的概率累积曲线在斜率上呈现分段特征,分为两到三段,一般沉积物频率累积曲线由 1 ϕ (粗切点)和 3 ϕ (细切点)将沉积物分为滚动总体、跳跃总体和悬浮总体 3 个部分,分别代表推移、跃移、悬移 3 种不同搬运方式所沉积的物质^[11]。选取研究区南部 18 站和 20 站及北部的 2 站和 3 站作为代表站位,做出其沉积物概率累积曲线(图 3),其中滚动总体、跳跃总体和悬浮总体部分分别标示为 I, II,

III 三段。根据沉积物概率累积曲线对不同区域的沉积物组成中的正态次总体和沉积物搬运方式进行对比。

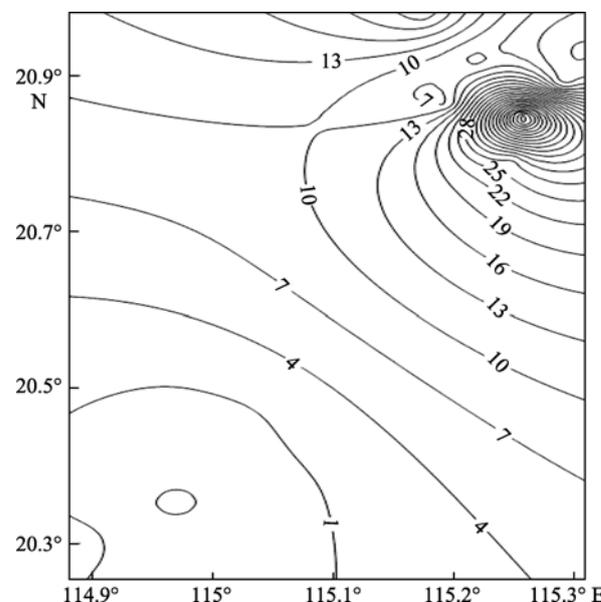


图 2 南海北部外陆架表层沉积物粉砂和黏土累计质量分数等值线图

Fig. 2 Contour map of accumulated content of silt and clay in surface sediment

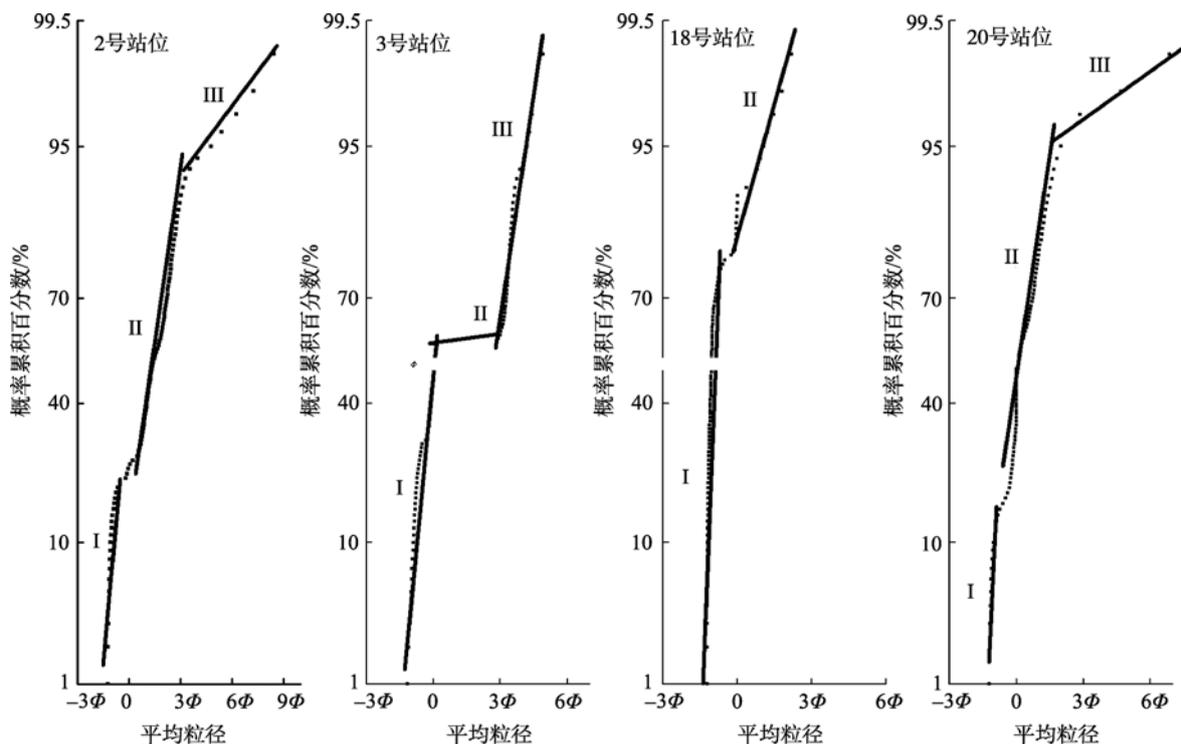


图3 典型沉积物概率累积曲线

Fig. 3 Typical cumulative probability curves of grain size distribution of the surface sediments

南部的 18 站和 20 站沉积物类型为砂质砾和砾质砂, 滚动总体组分分别约为 90%和 75%, 跳跃总体组分分别约为 5%和 20%, 砂质砾中几乎没有悬浮总体, 砾质砂中悬浮总体也少于 5%。东北部 2 站和 3 站沉积物类型为砾质砂和含砾砂, 滚动总体组分约为 20%和 50%, 2 站跳跃总体组分比例较大, 约为 70%, 而 3 站悬浮总体含量较多, 达 25%左右。沉积物组成中的正态次总体和输运方式的空间差异体现为: 由外陆架向内陆架方向, 滚动总体减少, 跳跃总体和悬浮总体比例变大, 以推移方式搬运的沉积物逐渐减少, 而以跃移和悬移方式搬运的沉积物比例逐渐增大。

3.2 沉积物粒度参数分布特征

表层沉积物的粒径大小及其组合状况是沉积物物源条件和水力搬运过程等综合作用的结果, 其空间分布特征反映了海底沉积动力过程的能量分配、沉积物输移等诸多的沉积环境信息, 同时也体现了近海沉积物-水界面交换类型的空间差异^[12]。早在 20 世纪 60 年代, Doeglas^[13]和 Halls^[14]就分析了粒度成分对判别沉积环境的指示作用, 利用粒度分析对沉积物来源进行了判别。本研究中选择沉积物平均粒径、分选系数、偏度及峰度对南海北部外陆架表层

沉积物来源进行分析。

研究区平均粒径在 $-1.108\phi \sim 2.247\phi$ 之间, 均值为 0.302ϕ 。平均粒径最小的沉积物出现在研究区东北部的 5 号站位, 平均粒径为 2.247ϕ , 粒度最粗的沉积物位于研究区南部的 20 号站位, 平均粒径达 -1.008ϕ 。研究区表层沉积物平均粒径与沉积物类型有较好的对应关系, 沉积物平均粒径由南向北逐渐减小, 由图 4、表 2 可以看出, 北部 6 个取样点平均粒径的平均值小于南部 12 个取样点的平均粒径。

研究区内不同区域表层沉积物分选系数差异较大, δ_i 值在 0.404 ~ 3.065 之间。从全区范围来看, 沉积物分选性呈现显著的空间变化趋势, 分选性由外陆架向内陆架方向, 即研究区南部沉积物样品分选系数值普遍较小, 分选性好, 向内陆架方向靠近, 北部沉积物样品分选系数值相对偏高, 分选性较差。

研究区沉积物的 S_{K_i} 值为 $-2.017 \sim 2.842$, 范围较宽, 从极负偏到极正偏, 绝大多数沉积物呈正偏态, 表明沉积物整体较粗, 正偏度表明分布在频率分布曲线峰右侧方向上的尾部比在左侧方向的尾部有拉长的趋势。由表 2 可以看出, 相对于南部而言, 北部沉积物偏度值较大, 这是由于北部沉积物组成中细

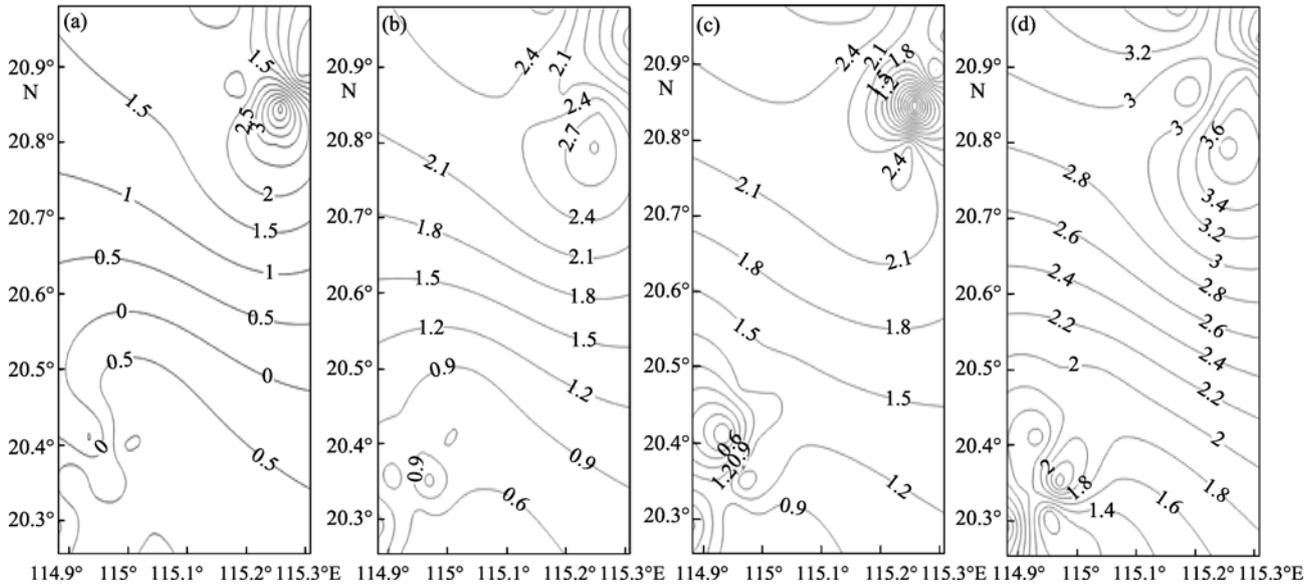


图4 表层沉积物粒度参数等值线

Fig. 4 Contour maps of grain size parameters of surface sediments
(a) 平均粒径等值线; (b) 分选系数等值线; (c) 偏度等值线; (d) 峰度等值线

(a) isopleths of average grain size; (b) isopleths of sorting coefficient; (c) isopleths of skewness; (c) isopleths of kurtosis

表2 研究区南部与北部表层沉积物粒度参数对比

Tab. 2 Comparison of grain-size parameters in the northern and southern part

沉积区	M_z	δ_i	S_{K_i}	K_u
北部	1.68ϕ	2.10	1.55	3.19
南部	-0.57ϕ	0.75	1.00	1.74

颗粒的粉砂和黏土含量较高, 右侧尾部比左侧尾部拉长趋势明显, 而南部沉积物组成中细粒成分较少, 导致频率分布曲线右侧尾部频率近于零。

研究区 K_u 值的变化范围为 0.772 ~ 3.896, 南部和北部峰态值差异明显, 由南向北频率分布曲线峰形由很窄过渡到很宽平, 说明由外陆架到内陆架方向, 沉积物粒度分布范围越来越宽。

为了形象直观地比较研究区粒度参数的空间差异, 在研究区选取北部 3 号站位(含砾砂), 以及南部的 18 号(砂质砾)的沉积物粒度频率分布曲线(图5)进行对比和分析。

从典型沉积物频率分布曲线(图 5)可以看出, 研究区南部沉积物粒径在频率分布曲线上分布范围较窄, 主峰非常明显, 大概位于 -1ϕ 左右, 呈单峰峰型, 峰窄而高, 峰度值较小, 峰所在粒级百分含量均高于 65%, 是分选性好的表现; 而北部的两个站位的粒度分布较宽, 具有双峰, 峰度值较大, 峰所在的粒级百分含量均低于 30%, 占比并不高, 表明沉积物分选

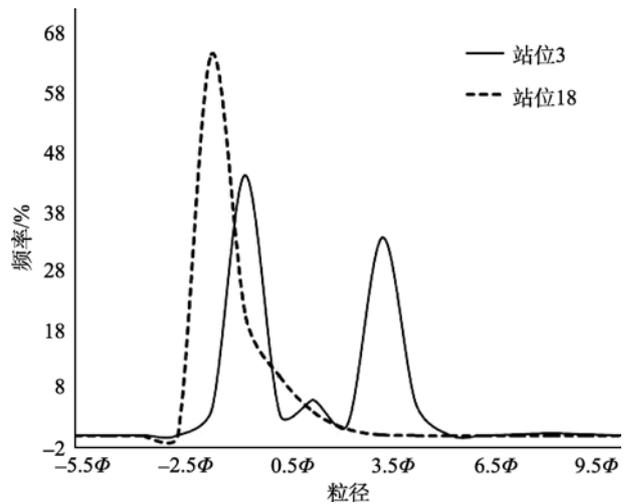


图5 典型沉积物频率分布曲线

Fig. 5 Typical frequency distribution curves of surface sediments

较差。自外陆架向内陆架方向, 沉积物粒径分布范围变宽, 沉积物峰态由窄尖的单峰态变为宽平的双峰态, 分选性变差, 峰值处所对应的粒径减小, 指示水动力条件由简单变复杂, 且沉积物来源的多元性增强。

4 讨论

沉积物的粒度特征是沉积物物源、水动力强弱

和搬运距离等综合作用的结果,在沉积物粒度中包含了物源和水动力条件的信息。对于沉积物粒度的分析是判定沉积物来源及输运方式(悬移、跃移和推移)、区分沉积环境、判别水动力条件和分析沉积物输运趋势的主要途径^[15-16]。

4.1 沉积物来源分析

4.1.1 粒度参数指示沉积物来源分析

通常情况下潮流陆架区域表层沉积物粒径由外陆架向内陆架呈现增大趋势,而南海北部外陆架区域表层沉积物平均粒径由外陆架向内陆架方向逐渐变小,呈现一种和一般陆架沉积相反的沉积变化格局。由于平均粒径主要受物源区的粒度分布和搬运介质的平均动能的影响,因此在源区一致的情况下,平均粒径可以作为底流速度的替代性指标反映底流的平均动能。一般来讲,粗粒沉积见于高能环境,细粒沉积见于低能环境。在输运过程中沉积物在重力分异作用下不断沉降,输运路径上游为粗颗粒沉积物,而下游为细颗粒沉积物,从而形成沿输运方向沉积物逐渐细化的趋势。本研究中,从表层沉积物粉砂和黏土累计质量分数(图 2)及平均粒径的空间分布(图 4(a))可以看出,研究区表层沉积物平均粒径由南向北递减,北部存在一个细粒径沉积物闭合区,指示一个沉积中心的存在。在重力分异造成的沉积物分选作用下,底质泥沙在由源到汇的输运路径上呈由粗到细的趋势,粒径等值线显示底质泥沙粒径是由南到北减小的,指示沉积物的大致输运方向是由外陆架向内陆架。结合以往在不同年份水深资料基础上进行的沙波区水深剖面对比^[17],南海北部外陆架沙波的迁移方向是由 SE 向 NW,说明海底表层沉积物的运动方向是 SE-NW 方向。

由沉积物的输运趋势可以推论,沉积物来源于当地或研究区以南。有文献指出,在末次冰盛期,南海北部海岸线曾降至现在 180 m 等深线的位置^[18]。¹⁴C 测年资料^[5,19-20]证明,南海北部陆架表层沉积物是在晚更新世末次冰期低海平面时期的残留沉积。彭学超等^[17]利用单道地震资料对海底冲刷进行的分析表明,在不断隆升的东沙群岛附近的上中新统-第四纪地层于全新世遭受剥蚀,最大剥蚀厚度约 800 m,侵蚀速率约 8 cm/a。因此,南海北部外陆架海底表层沉积物主要来自晚更新世地层受到冲刷改造的再沉积。

4.1.2 钙质生物碎屑指示沉积物来源分析

样品前处理过程中,使用盐酸对沉积物样品进

行处理前后沉积物的干质量差可大致代表沉积物中钙质生物碎屑(主要是贝壳碎屑和珊瑚碎屑)的质量。由于个体较大的贝壳碎屑不易被海流带走,因此在输运方向上贝壳碎屑大小和含量存在空间差异,在上游强流速区沉积物中大而完整的贝壳含量高,而在下游低流速区仅有小而破碎的贝壳碎屑,且含量相对低。本次调查中,研究区西南部多数站位(15, 16, 17, 23, 24 站)的表层沉积物样品中钙质生物碎屑含量相对高,质量百分比均超过 20%,且多为个体较大的贝壳,而其他站位的沉积物样品中钙质生物碎屑含量较少,多小于 10%,且为细小的贝壳和珊瑚碎屑。通过沉积物中钙质生物碎屑含量的这种空间差异性能够定性分析得出:沉积物中钙质生物碎屑的由南部向北、西搬运,佐证了对沉积物由外陆架向内陆架方向输运的推测。

结合本次调查中应用 SONIC2024 多波束系统获取的水深资料^[21],研究区东南部地形地貌与其他区域差异较大,地貌类型主要是地形起伏剧烈的隆起脊和脊间沟槽等地貌,而其他区域为沙波地貌。东南区域沉积物样品中大量出现贝壳及珊瑚等钙质生物碎屑,且都位于水深 175 ~ 190 m 的东南区域,贝壳等钙质生物碎屑在此区域的大量存在与水深条件不相适应,据张富元等^[2]研究中发现,东沙群岛东北部沉积物中亦存在大量贝壳珊瑚碎屑,且水深也在 190 m 左右,与末次冰期约 180 m^[18]水深的古海岸线的位置相近,说明这两个区域的含贝壳珊瑚碎屑的沉积物可能形成于晚更新世末次冰期低海面期间,贝壳和珊瑚发育于当时的浅海环境,而研究区的底质泥沙是盛冰期前后海岸上的沿岸堤、沙坝、泻湖及河口三角洲混合作用的产物。

4.1.3 粒度参数组合关系指示沉积物来源分析

物源和水动力的强弱变化能够形成差异性的沉积环境,而不同的沉积环境又能直接通过沉积物粒度及粒度参数组合特征反映出来。为分析物源和水动力的变化,对粒度参数进行了相关分析(表 3),计算结果显示,分选系数与峰态呈显著正相关关系($r=0.91$, $p<0.01$),平均粒径与分选系数和峰态也具有显著相关性,由于 ϕ 值越大,粒径越小。因此,平均粒径与分选系数和峰态都呈显著负相关关系,随着沉积物粒径的减小,分选性变差。

通常情况下,在沉积物输运方向上,随着沉积物粒径的减小,分选性变差,偏态更加正偏,而南海北部外陆架的海底表层沉积物在由外陆架向内陆架方向上,

平均粒径变小, 沉积物分选变差, 偏态更加正偏。前人研究表明, 沉积物粒径和分选性的这种负相关关系是沉积物在粒径减小方向上物源多元性增强的结果。研究区粒径减小方向上沉积物分选性变差指示: 由外陆架向内陆架方向, 水动力逐渐减弱, 物源的多元化特征逐渐增强。沉积物频率分布曲线由单峰转变为双峰, 也指示了可能有其他物源加入到沉积物中。

表 3 南海北部外陆架表层沉积物粒度参数相关关系
Tab. 3 Correlation coefficients between grain size parameters of surface sediment in the study area

	M_z	δ_i	S_{K_i}	K_u
M_z	1			
δ_i	0.881	1		
S_{K_i}	-0.267	0.202	1	
K_u	0.714	0.908	0.367	1

南海北部外陆架沉积物来源以末次冰期前后的残留沉积物为主, 在研究区靠近陆坡方向的区域, 残留沉积物是表层沉积物的绝对优势组分, 愈向内陆架靠近, 沉积物来源的多元性增强, 其他来源的沉积物所占比重越来越大。对于除了残留沉积物以外的其他沉积物来源, 推测主要是华南大陆的陆源碎屑。研究区西北方向的珠江是注入南海北部的最大河流, 年输沙量 8.3×10^7 t, 除了珠江以外, 在广东东部还有相对较小的韩江, 径流量为珠江的 1/10, 年输沙量约为 7.0×10^6 t, 这些入海河系携带的沉积物输运到南海北部陆架, 成为表层沉积物组成中的一部分, 导致沉积物物质来源的多元性增强, 这一影响在越靠近岸的区域影响越大, 愈向外海方向, 其在沉积物组成中的比重愈小。前人研究结果^[26]也证明, 相对于外陆架而言, 内陆架沉积物来源主要是珠江等水系每年所携带的陆源物质, 以及沿岸流自东往西所带来的沉积物混合而成, 佐证了研究区靠近内陆架方向沉积物比靠近外陆架方向沉积物在物源上更具有多元化特点的推测。

综上, 南海北部外陆架表层沉积物来源并不是单一的, 而是具有多元性和空间差异性, 外陆架沉积物中末次冰期残留沉积物占绝对优势, 随着与华南大陆海岸距离的靠近, 华南大陆通过珠江和韩江等水系输运而来的陆源碎屑在表层沉积物中所占比例逐渐增大, 物源多元化加强。

4.2 输运沉积物的水动力来源

沉积物来源是控制沉积物粒度参数空间差异形

成的内在因素, 而水动力条件是外因。南海北部陆架区存在潮汐、南海北部环流和南海暖流, 这些海流的活动能够产生推动沉积物由 SE 向 NW 输运的流速分量, 为表层沉积物的输运提供必要的水动力条件。

此次海上调查过程中使用走航式 ADCP 获得了大量的流速剖面资料^[21], 通过分析发现: 研究区近底海流的优势流向为 WNW-N, 以往在调查区附近(21°N, 115°E)的海流实测资料^[19,27-28]显示, 该区的海流以潮流为主, 不同季节潮流的主方向与此次实测结果相近, 而且不同深度的流向基本一致。海底沉积物受到 WNW-N 向底流的冲刷向西北方向搬运, 大部分沉积物在底流及沿岸流的共同作用下被带至远处再沉积, 其中部分较粗的沉积物仍留在附近沉积, 从而形成由深水向浅水方向海底沉积物由粗变细的沉积特征。在靠近华南大陆一侧区域, 珠江等水系输运陆源碎屑的作用显现, 这些地表径流将陆源碎屑输运至南海, 并向深水区扩散, 其所携带的陆源碎屑在沉积物组成中比例越来越小。

5 结论

南海北部外陆架 100 ~ 200 m 水深处表层沉积物可分为砾、砂质砾、砾质砂、砾质泥质砂、含砾砂、含砾泥质砂和含砾泥共 7 种类型。研究区南部沉积物以砂质砾居多, 砾石成分占绝对优势, 沉积物多以推移质的形式输运, 愈向内陆架方向, 沉积物中砂和粉砂的比例逐渐大于砾石, 以跃移质和悬移质形式输运的沉积物含量增加。

从外陆架向内陆架方向, 沉积物平均粒径减小, 分选变差, 沉积物频率分布曲线更加正偏, 曲线的峰形由高而尖窄的单峰态变为低而宽平的双峰态, 沉积物物源的多元性增强。

南海北部外陆架的表层沉积物的物质来源存在区域性差异, 在靠近陆坡一侧, 沉积物组成中末次冰期前后的残留沉积物占绝对优势, 而在北部靠近华南大陆一侧, 物源的多元性增强, 除残留沉积物以外, 华南大陆经珠江等水系输运而来的陆源碎屑所占比例增大, 物源的多元性增强。

潮流对南海北部外陆架沉积物空间分布特征具有重要作用, 研究区涨潮流速大于落潮流速, 在主方向为 WNW-N 向的潮流的作用下, 南海北部外陆架的末次冰期残留沉积物被剥蚀再改造, 继而向西北部内陆架方向输运。

参考文献:

- [1] 李学杰, 汪品先, 廖志良, 等. 南海西部表层沉积物陆源碎屑分布特征及其物源[J]. 中国地质, 2008, 35(1): 123-130.
- [2] 张富元, 章伟艳, 张德玉, 等. 南海东部表层沉积物类型的研究[J]. 海洋学报, 2004, 26(5): 94-105.
- [3] 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): 233-245.
- [4] 丁巍伟, 李家彪, 韩喜球, 等. 南海东北部沉积物波的形态、粒度特征及物源分析[J]. 海洋学报, 2010, 32(2): 96-105.
- [5] 冯文科, 黎维峰. 南海北部海底沙波地貌[J]. 热带海洋, 1994, 13(3): 39-46.
- [6] 王文介. 南海北部的潮波传播与海底沙脊和沙波发育[J]. 热带海洋, 2000, 19(1): 1-7.
- [7] 国家海洋局 908 专项办公室. 海洋底质调查技术规程[M]. 北京: 海洋出版社, 2006: 23-31.
- [8] 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: 937-968.
- [9] McManus J. Grain size determination and interpretation [C]//Tucher M. Techniques in Sedimentology. Oxford: Black-well, Oxford, 1988: 63-85.
- [10] 石学法, 陈春峰, 刘焱光, 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.
- [11] 青岛海洋大学地质系. 沉积物分析[M]. 青岛: 青岛海洋大学出版社, 1991: 52-62.
- [12] 刘付程, 张存勇, 彭俊. 海州湾表层沉积物粒度的空间变异特征[J]. 海洋科学, 2010, 34(7): 54-58.
- [13] Doeglas D J. Grain-size indices, classification and environment[J]. Sedimentology, 1968, 10(2): 83-100.
- [14] Halls J R. Significance of statistical parameters for distinguishing sedimentary environments in New South Wales, Australia[J]. Journal of Sedimentary Petrology, 1967, 37: 1059-1069.
- [15] 乔淑卿, 石学法, 王国庆, 等. 渤海底质沉积物粒度特征及输运趋势探讨[J]. 海洋学报, 2010, 32(4): 139-147.
- [16] Wang L, Sarnthein M, Erlenkeuser H, et al. East Asian monsoon climate during the Late Pleistocene: high-resolution sediment records from the South China Sea [J]. Marine Geology, 1999, 156(1): 243-282.
- [17] 彭学超, 吴庐山, 崔兆国, 等. 南海东沙群岛以北海底沙波稳定性分析[J]. 热带海洋学报, 2006, 25(3): 21-27.
- [18] Wang P X. Response of Western Pacific marginal seas to glacial cycles: paleoceanographic and sedimentological features [J]. Marine Geology, 1999, 156: 5-39.
- [19] 冯文科, 夏真, 李小荣. 南海北部海底沙波稳定性研究[J]. 南海地质研究, 1993, 5: 26-41.
- [20] 冯文科, 黎维峰, 石要红. 南海北部海底地貌动态研究[J]. 海洋学报, 1994, 16 (6): 92-99.
- [21] 中国科学院海洋研究所. 番禺 30-1—惠州 21-1B 平台区域海洋环境与海管悬跨治理研究报告[R]. 青岛: 中国科学院海洋研究所, 2010.
- [22] 谈丽芳. 南海火山玻璃的初步研究[J]. 矿物岩石地球化学通报, 1991, 3: 158-172.
- [23] 杨群慧, 林振宏, 张富元, 等. 南海中东部表层沉积物矿物组合分区及其地质意义[J]. 海洋与湖沼, 2002, 33(6): 591-599.
- [24] 季福武, 林振宏, 杨群慧, 等. 南海东部表层沉积物中轻矿物分布与来源[J]. 海洋科学, 2004, 28(2): 32-35.
- [25] 邵磊, 李献华, 韦刚健, 等. 南海陆坡高速堆积体的物质来源[J]. 中国科学(B 辑), 2001, 31(10): 828-833.
- [26] 卢博, 李赶先, 黄韶健, 等. 南海北部大陆架海底沉积物物理性质研究[J]. 海洋工程, 2004, 22(3): 48-55.
- [27] 王尚毅, 李大鸣. 南海珠江口盆地陆架斜坡及大陆坡海底沙波动态分析[J]. 海洋学报, 1994, 16(6): 121-132.
- [28] 邱章, 方文东. 南海北部春季海流的垂向变化[J]. 热带海洋, 1999, 18 (4): 33-38.

Characterization of grain size parameters and the provenance analysis of the surface sediment in the outer shelf of the northern South China Sea

LI Ze-wen^{1,2,3}, LUAN Zhen-dong¹, YAN Jun¹, ZHUANG Li-hua¹

(1. Key Laboratory of Marine Geology and Environment, Institute of Oceanology, the Chinese Academy of Sciences, Qingdao 266071, China; 2. Graduate University of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. Huaneng Renewables Corporation Limited, Beijing 100036, China)

Received: Nov., 12, 2010

Key words: the northern South China Sea, sediment, grain size parameters, provenance of sediment

Abstract: In order to discuss the provenance of surface sediment in the outer continental shelf of the northern South China Sea, 18 surface sediment samples in the continental shelf were sampled and tested. Through the computation of average grain size, sorting coefficient and other grain size parameters, distribution of grain size parameters of surface sediment was obtained and analyzed. All samples can be classified into seven types in terms of grain size, which were gravel, sandy gravel, gravelly muddy sand, sand containing gravel, muddy sand containing gravel and mud containing gravel. From outer continental shelf to inner continental shelf, the changing trends of different grain size parameters were conspicuous, average grain size became smaller, sorting coefficient became larger, skewness became more positive, and kurtosis became larger. At sampling position that was closer to the continent of South China, diversity of provenance of surface sediment was strengthened. Hydrodynamic condition transporting the sediment comes from the WNW-N direction current, driving the sediment from SE to NW to the inner continental shelf. To the inner continental shelf, which is closed to China mainland, ratio of sediment transported from South China by the Pearl River and the Han River became bigger in the composition of surface sediment.

(本文编辑: 刘珊珊)