

文章编号: 1000-0550(2014)02-0314-11

汕头近岸海域表层沉积物粒度特征及其输运趋势

陈翰^{1,2} 陈忠¹ 颜文¹ 李亮^{1,2} 刘建国¹ 黄蔚霞¹ 黎刚¹

(1. 中国科学院南海海洋研究所边缘海地质重点实验室 广州 510301; 2. 中国科学院大学 北京 100049)

摘要 对汕头近岸海域 70 个站位表层沉积物作了粒度分析和粒度参数计算,以探讨沉积物粒度分布特征。分析结果显示,研究区表层沉积物可划分为 9 种底质类型,以黏土质粉砂(YT)、砂质粉砂(ST)和砂—粉砂—黏土(S—T—Y)为主;砾、砂、粉砂和黏土的平均含量分别为 1.4%、29.2%、51.0%、18.4%。平均粒径在 0.12~7.30 ϕ 之间变化,平均值为 5.53 ϕ ;分选系数、偏态和峰态值的变化范围分别为 0.50~2.94、-0.65~0.30 和 0.63~2.67,对应的平均值为 1.82、-0.02 和 1.11。根据粒度分析结果,结合系统聚类方法和因子分析方法将研究区分为四类沉积区,分别代表不同的沉积环境,并应用 GSTA 模型分析了沉积物净输运趋势。结果显示,在汕头港水深 < 10 m 的海区,径流来沙和海域来沙有在榕江入海口和近岸汇聚的趋势;水深 > 10 m 的海区,沉积物呈现出明显的沿海岸线东北向输运的特征;在柘林湾,沉积物主要表现为弱的由海岸/海岛向海湾输运的特征。粒径趋势模型所揭示的这种沉积物输运格局与研究区的物源和水动力状况较好吻合,可为研究区港口建设和航道管理的决策提供参考资料。

关键词 粒度特征 沉积环境 粒径趋势分析 汕头近岸

第一作者简介 陈翰 男 1986 年出生 博士研究生 海洋沉积学 E-mail: chenhan@scsio.ac.cn

通讯作者 陈忠 E-mail: chzhsouth@scsio.ac.cn

中图分类号 P736.21 文献标识码 A

0 引言

河口和海湾是海岸带的重要组成部分,其作为港口航道、旅游、海水养殖资源的重要性早已被认识。河口、海湾的现代沉积环境是研究海岸带海洋环境和陆海相互作用的基础和重要内容,同时也为海岸带开发和海洋工程建设提供科学参考^[1,2]。粤东汕头近岸海域位于南海东北部,与东海的福建厦门海域相邻,是快速发展中的汕头特区的重要门户,在“海峡西岸经济区”中占据重要地位。近年来,人类活动对该海域的影响日益加剧,对海湾沉积、生态学的研究显得日益重要。前人对汕头近岸海域的研究,主要集中在环境污染^[3,4]和生态系统^[5,6]调查,港口工程评价^[7-9]以及对表层沉积物的物源示踪^[10,11]等方面,此外对部分海湾进行了泥沙来源和搬运的研究^[12-15],但受资料和样品所限,对该海域的沉积环境、沉积动力过程和沉积物输运等方面都了解甚少。

沉积物粒度特征包含了丰富的沉积物运移等海洋沉积动力学方面的重要信息,在划分近海底质

类型、区分沉积环境、判定物质输运方式和判别水动力条件等方面有着重要的作用^[16-18]。汕头近岸海区受径流、潮流和波浪等动力作用以及咸淡水交汇的影响,加上复杂多变的地形,决定了其表层沉积物的组成、粒度变化也较为复杂。

本文根据汕头近岸海域表层沉积物的粒度组成和粒度参数,开展粒径趋势分析,结合有关资料,探讨研究区沉积物粒度分布特征、沉积环境及沉积物输运方向,不仅有助于了解该海域沉积环境的未来演变趋势,并且对该区港口建设、航道管理、水产养殖、环境保护及资源开发等具有重要的参考意义。

1 区域概况

汕头近岸海域位于南海东北部闽粤交界处,主要由柘林湾和汕头港组成,地理位置为 23°12′~23°37′N, 116°24′~117°12′E。柘林湾是一个稳定性较好的半封闭小型河口湾,北面、西面为陆地包围,南面为南澳岛,中部分布着海山、西澳和汛洲等岛。汕头港位于榕江、韩江的出海口,是汕头地区工业、农业、水上交通、旅游和对外贸易的主要港

①国家自然科学基金重大研究计划(批准号:91128206)、国家自然科学基金—广东联合基金(批准号:U1133002)与中国科学院边缘海地质重点实验室开放研究基金课题(编号:MSGL12-09)联合资助
收稿日期:2013-03-15;收修改稿日期:2013-04-19

口。随着城市建设的发展,该区港口岸线和水域资源日益减少、萎缩,海湾面积大幅减少,纳潮集水能力明显下降^[8]。

研究区水深 1~20 m,潮汐性质为不正规半日混合潮型,涨潮历时大于落潮历时。潮流最大流速为 0.79 m/s,平均流速为 0.27 m/s;余流最大流速为 0.16 m/s,平均流速为 0.09 m/s,表层和底层余流流向较一致,受地形影响,都是沿岸线走向^[15,19]。

根据测波站实测资料,该海域位于华南强浪区,波浪具有以下特点:(1) 海域具有常(强)浪向集中、大浪频率高、季节性分布明显等特点;(2) 深水区平均波高约 1.0 m,平均周期 4~5 s,波向主要集中在 ESE—S 向;(3) 常、强浪主要集中于 E—SSW 向;(4) 夏秋季节常受台风侵袭,台风登陆或过境时,可出现 5 m 以上的特大波高;(5) 海域常年多为涌浪,频率约占 90%^[7,20]。

汕头沿岸表层环流与整个南海环流密切相关。观测表明,汕头沿岸海域是一个季节性上升流区。夏季,由于西南季风的作用,沿岸为 NE 向流,Ekman 效应使得海水作离岸运动,有利于上升流的发生。冬季,季风转向,东北季风驱动了 SW 向沿岸流,表层海水向岸辐聚,有利于下降流的发生。外海水沿海底地形爬升至惠来近岸,并随沿岸流向东北方向运动,在汕头以东近岸海域形成上升流。研究区汕头港以东水域最大流速可达 1 m/s 以上^[21,22]。

2 样品与方法

2.1 样品采集与粒度测试

2008 年 1 月,中国科学院南海海洋研究所在汕头近岸海域(汕头港和柘林湾)进行表层沉积物样品的采集,使用不锈钢抓斗取得 70 个站位的底质表层样(采样深度 0~5 cm),采样站点是参考 908 规范和有关标准,根据调查区块的工作量和比例尺平均布设(图 1a)。

沉积物测试按国家 908 综合调查与评价专项之“海底底质调查技术规程”操作,包括去除有机质、钙质胶结物和生物壳体 CaCO_3 以及洗盐等过程^[23]。对于粒径小于 2 000 μm 的样品,直接用激光粒度仪分析;对于粒径大于 2 000 μm 的样品,先称重,用 1 mm 孔径的筛子湿筛,细颗粒部分仍用激光粒度仪进行分析,粗粒度部分用传统筛法分析(1 ϕ 间

隔),两部分数据利用 Mastersizer 软件自带的仿真程序合并获得完整的粒度分布。测试仪器为 Mastersizer2000 型激光衍射粒度分析仪,测量范围 0.02~2 000 μm ,相对误差小于 2%。粒度分级采用尤登—温德华氏等比制 ϕ 值粒级标准分级,沉积物的命名采用谢帕德三角图分类法,粒度参数采用矩法计算^[24]。将计算结果进行克里格插值、高斯低通滤波过滤,得到各粒度参数的空间分布图,此过程用 Golden Software Surfer 8.0 实现。

2.2 沉积物粒度数据处理

利用现代数理统计方法对沉积物粒度数据进行综合分析是研究沉积环境和物源判别的有效和常用的手段之一,其中系统聚类分析是最常用的方法,它采取分类后各亚类内距离最小、亚类间距离最大的基本原则来定量地确定研究对象不同种类的划分。对样品进行的系统聚类分析通常称为 Q 型系统聚类分析。同样的方法对样品的多个测定指标(或变量)进行系统聚类分析,称为 R 型系统聚类分析^[25]。本文采用 SPSS Statistics 20 统计分析软件对样品的粒度数据进行聚类分析,并用因子分析法来研究沉积动力环境或物源的空间差异。

在输运方向上,沉积物的粒度参数会发生沿程变化。因而,可以通过分析粒度参数的分布特征来获取沉积物的输运信息。本文的粒径趋势分析采用 GSTA 粒径趋势模型得到沉积物净输运趋势。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输运趋势的研究^[18,26~30],其原理可参考相关文献[31]。

3 结果

3.1 沉积物类型分布特征

汕头近岸海域表层沉积物可划分为 9 种底质类型(图 1b),以黏土质粉砂(YT)、砂质粉砂(ST)和砂—粉砂—黏土(S—T—Y)为主,其中黏土质粉砂分布于海区中部的大片宽阔海域,砂质粉砂分布较为分散,砂—粉砂—黏土分布于柘林湾北部、南部和汕头港西南边缘,靠近岛屿与半岛,说明该海区整体沉积动力较弱。此外还有砾质砂(GS)、砂(S)、粉砂(T)、粉砂质砂(TS)等类型,砾质砂分布于南澳岛西部和南部站位;砂和粉砂质砂的分布一般沿陆地边缘、岛屿及河口;粉砂则分布于榕江河口区、海区中部及岛屿周边。

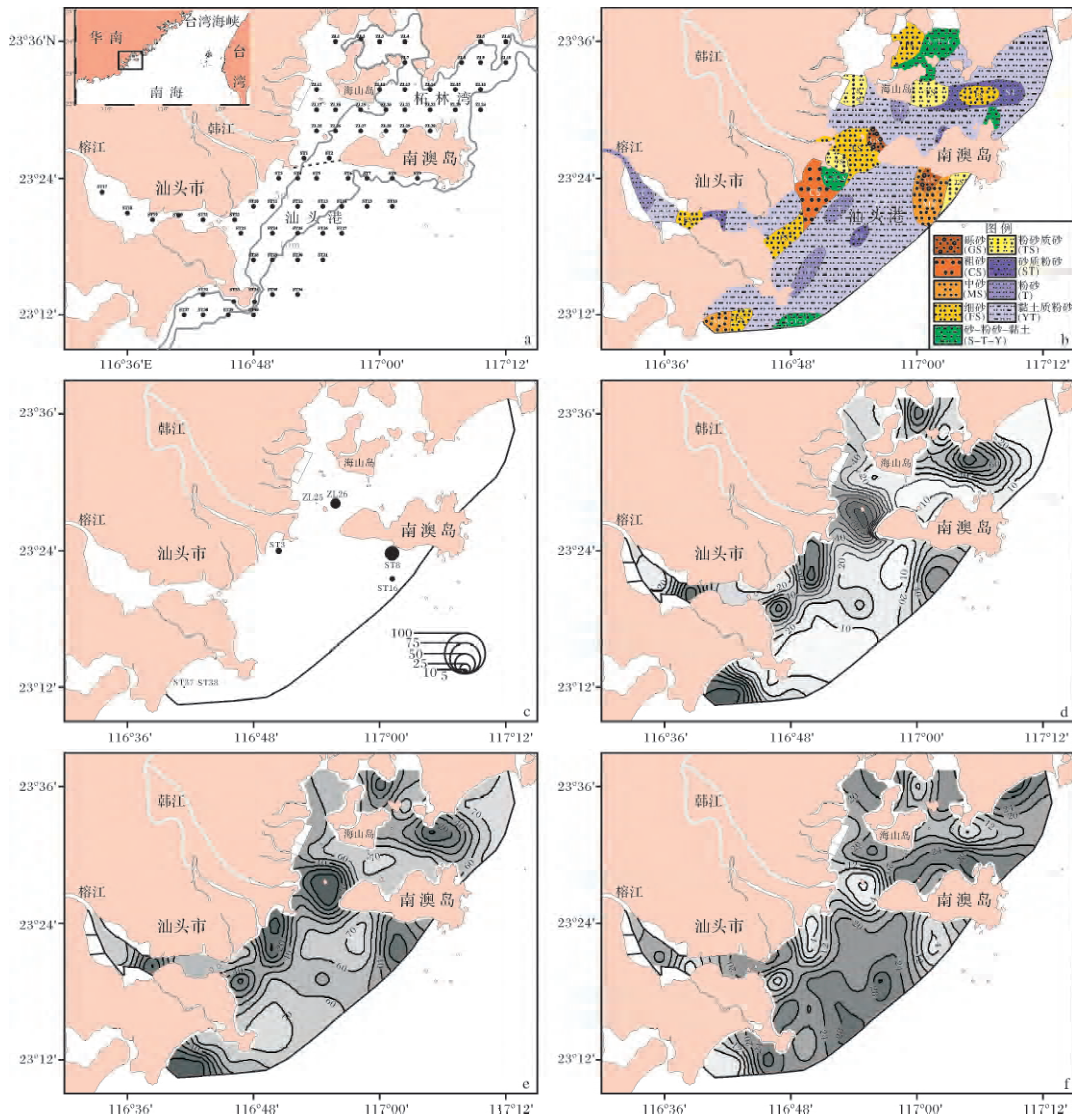


图 1 研究区位置及站位分布图 (a) , 沉积物底质类型分布图 (b) , 以及各粒级组分含量分布图 (c.砾; d.砂; e.粉砂; f.黏土)

Fig.1 a. Location of the study area and sampling sites offshore Shantou City; b. Subarea of sediment types; c-f. Distribution of (c) gravel ,(d) sand ,(e) silt ,(f) clay constituent content

3.2 沉积物粒度组成特征

在研究区中,沉积物中粉砂含量最高,平均值达 51.0%;砂与黏土含量次之,平均含量分别为 29.2%和 18.4%;砾石含量最低,平均值仅为 1.4%。

研究区共有 7 个站位含砾石组分,含量变化为 0.2%~35.7%,高含量区主要分布在南澳岛的西北部及南部海域(图 1c)。砂粒级组分以中、细砂为主。砂含量的变化范围从 0.74%~100%,含量高于 30%的站位主要分布在大陆沿岸、柘林湾东部、南澳岛南部、榕江河道及入海口(图 1d)。粉砂含量为 0.01%~80.7%,全区大部分海域粉砂含量较高,低

值站位主要分布在大陆沿岸,与砂含量高值区近似(图 1e)。本区黏土含量变化范围为 0~32.8%,高值区集中在东北和西南海域,中部近岸海域比西部偏低(图 1f)。

3.3 沉积物粒度参数分析

粒度参数采用福克—沃德提出的四种参数,即平均粒径(Mz)、分选系数(σ_i)、偏态(Sk)和峰态(Kg)。

平均粒径在一定程度上反映了沉积环境的变化、沉积动能的平均强度和物质来源等。该海区表层沉积物平均粒径在 0.12~7.30 ϕ 之间变化,平均

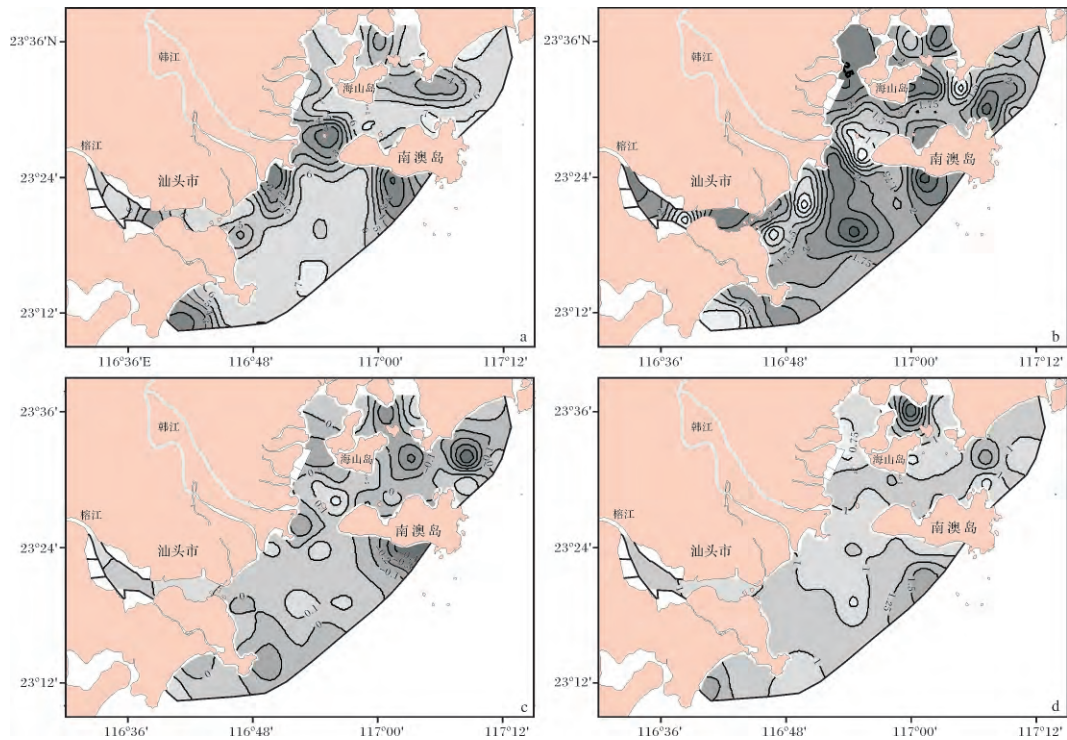


图2 研究区表层沉积物粒度参数等值线图

a. 平均粒径 b. 分选系数 c. 偏态值 d. 峰态值

Fig.2 Isoline map of grain size parameters

a. The mean grain size; b. The coefficient of sorting; c. Kurtosis; d. Skewness

值为 5.53ϕ 。平均粒径的高值站位分布于柘林湾北部、南澳岛北岸和汕头港南部海域, 低值站位主要集中在海区中部的近岸海域; 柘林湾北部的低值站位聚集在高值站位所环绕的海区内, 具有与纬线平行分布的趋势(图 2a)。研究区呈现出近岸或岛沉积物较粗、而海区中部较细的特点, 证明了研究区沉积物来源主要为陆地, 通过风化剥蚀及搬运沉积作用形成的观点^[10, 11]。

分选系数反映了沉积介质载荷的筛选能力。本海区沉积物的分选系数为 $0.50 \sim 2.94$, 平均 1.82 。多数站位的分选系数在 $1.0 \sim 2.0$ 之间, 表明沉积物分选性差或很差。图 2b 中显示分选性较好的站位零星分布于近岸, 可能与沉积物类型单一有关。分选性较差的站位集中分布在柘林湾大部 and 汕头港中部, 对应粉砂与黏土含量较高。说明该海域水动力差异明显, 在近岸和靠近海岛的部分海区水动力较强, 而在柘林湾和汕头港中部等部分海域水动力较弱。

偏态值可量度沉积物颗粒频率分布的对称程度。本海区沉积物的偏态值在 $-0.65 \sim 0.30$ 之间, 平

均值为 -0.02 。偏态分布表明(图 2c), 沉积物粒径负偏态的站位分布较分散, 主要分布在南澳岛南部和柘林湾北部的近岸; 正偏态的站位主要集中在榕江河道和海区中部的宽阔海域。这表明, 径流来沙中包含来自悬浮体的细粒物质, 其传播距离较远, 而粗粒物质易在近岸沉积。

峰态值用以衡量粒度频率曲线的尖锐程度。本海区沉积物的峰态值在 $0.63 \sim 2.67$ 之间, 平均值 1.05 。从分布图上看(图 2d), 多数站位峰态值小于 1.11 , 属于近正态或平坦的范围, 说明本海区的沉积物粒径混杂, 水动力分选不明显。

4 讨论

4.1 现代沉积环境分区

通过分析粒度数据来划分现代沉积环境是当前常用的方法。由于采用所有的粒度参数进行系统聚类分析不能有效揭示研究区内的沉积环境差异, 各项粒度参数之间也可能存在不同程度的内在联系。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^[32, 33]。本文尝试把系统聚类

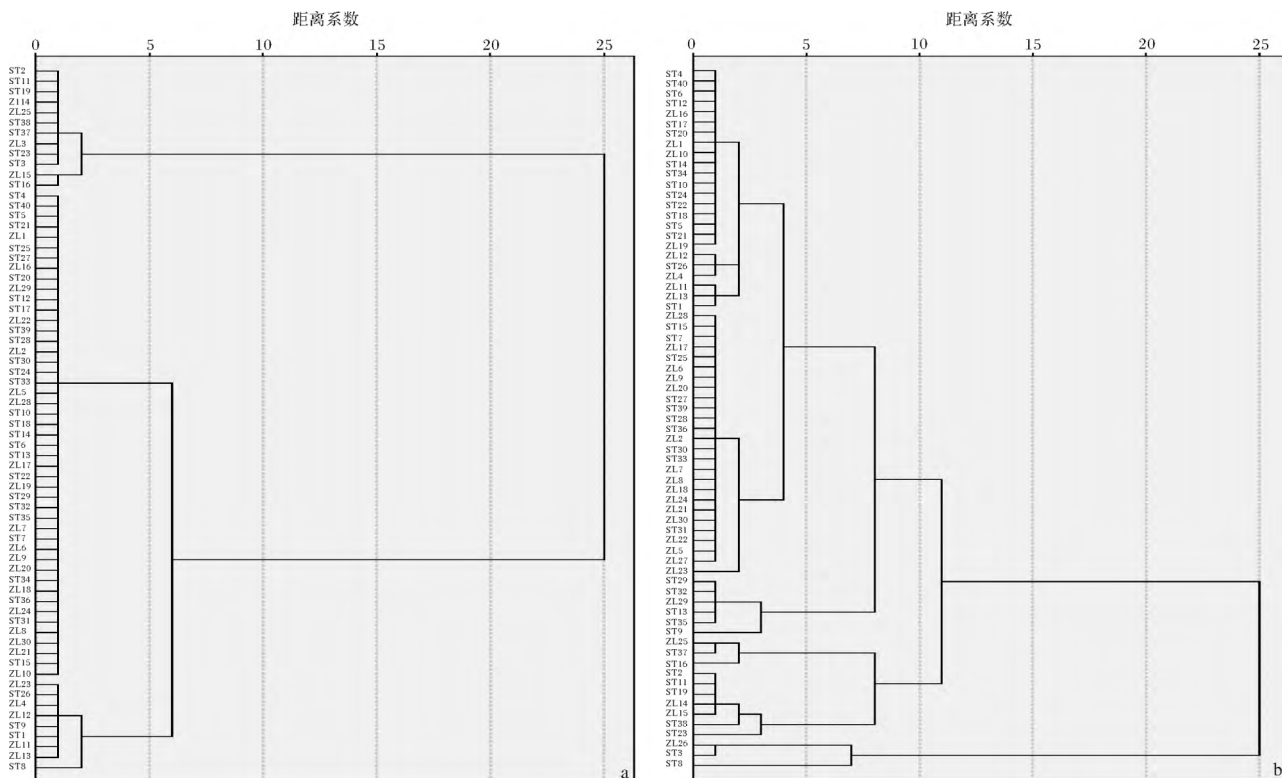


图 3 汕头近岸表层沉积物样品 Q 型聚类分析谱系

a. 以粒度相关参数为变量; b. 以主控因子得分为变量

Fig.3 Diagram of Q-type cluster analysis for samples from surface sediments
a. Grain size parameters as variables; b. Factor scores as variables

分析和因子分析相结合,来分析汕头近岸表层沉积物的粒度信息,并划分研究区现代沉积环境。

4.1.1 对粒度相关参数的系统聚类分析

所采用的沉积物粒度相关参数包括平均粒径、中值粒径、偏态值、峰态值、分选系数、砂含量、粉砂含量、黏土含量,对这 8 个参数作 R 型聚类分析,将具有相同聚集趋势(即距离较近)的参数合并,提取出对环境鉴别最敏感的参数,最终选择粉砂含量、砂含量和分选系数为沉积环境划分参数(方法见文献 [32])。研究表明,粉砂含量是对研究区水动力条件最敏感的参数,砂含量是受物源条件影响最为显著的参数,而分选系数是对地形与流场相互作用最为敏感的参数^[17,32]。因此以这三个指标参数为变量作 Q 型聚类分析,能有效划分样品类别。聚类分析谱系图见图 3a。

4.1.2 对沉积物各粒级参数的因子分析

对汕头近海 70 个表层沉积物样品、50 种粒级进行 R 型因子分析,获得 3 个主控因子:因子 1 特征值比例占 49.55%,因子 2 占 23.07%,因子 3 占

13.37%,这 3 个主因子特征值比例累计达 86.00%。方差极大旋转因子载荷显示旋转后的各因子反映的粒度变化范围清晰(见图 4),因子 1 主要由 5.5~11 ϕ (细粉砂、黏土级为主)的正载荷和 1.5~3.75 ϕ (中、细砂级为主)的负载荷组成,因子 2 主要由 -1~1.5 ϕ (细砾、粗砂级为主)的负载荷组成,因子 3 则

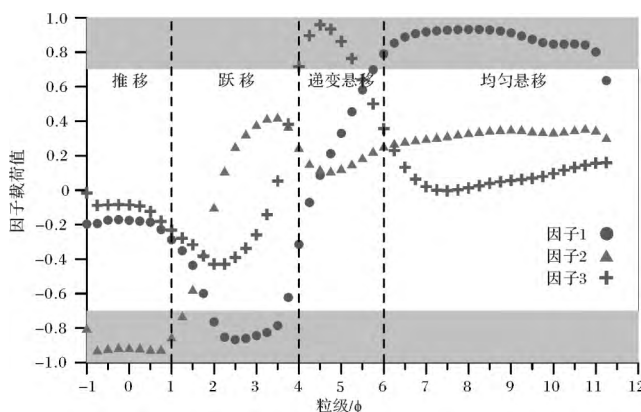


图 4 方差极大旋转后各因子在各粒级上的主成分载荷
Fig.4 The grain-size factor loading map of surface sediments of the study area (via varimax rotation)

由 3.75~5.5 ϕ (粗粉砂级为主) 的正载荷组成, 因子得分的空间分布指示了沉积环境(物源特征、水动力条件)的空间分异特征。将每个样品对主因子的贡献度量化为因子得分, 把因子得分作为样品的新变量作 Q 型聚类分析^[33], 方法同上, 聚类结果如图 3b 所示。

4.1.3 现代沉积环境划分

根据上述两种方法的统计结果, 综合分析得出各样品所属类别, 确定分类数为 4, 并以此绘制出研究区沉积环境分区图(图 5)。

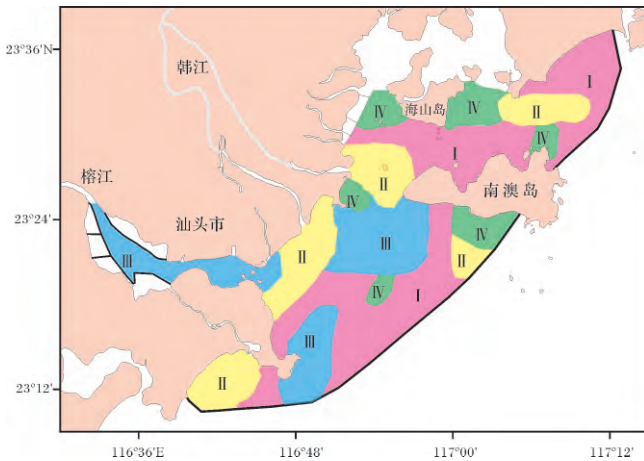


图 5 研究区沉积环境分区图

Fig.5 Sedimentary environment of the study area

I 类沉积区广泛分布于研究区中部水深大于 5 m 的范围内, 其主要沉积物类型为黏土质粉砂, 沉积物粒度较细, 主要呈负偏态或近于对称(表 1), 分选相对好于周边的沉积物。因子分析显示该区沉积物的主控因子主要由 5.5~11 ϕ (细粉砂、黏土级为主) 的正载荷和 1.5~3.75 ϕ (中、细砂级为主)

的负载荷组成, 说明该区沉积物的分布与水动力环境和物源条件有一定联系, 即该区有丰富的泥沙来源细颗粒物而较少岛源粗颗粒物, 可能是该区远离河口和海岸带, 受河流和潮汐影响较弱, 有利于细颗粒泥沙的沉积。

II 类沉积区主要位于榕江、韩江河口区域和南澳岛附近, 水深较浅, 主要沉积物类型为砂。该区沉积物的显著特征是分选相对较好, 粒度较粗。由于位于河口区域且靠近海岸和岛屿, 源于陆地风化物的粗颗粒物较多, 导致沉积物粒径相对较粗。此外, 河流和潮流的共同作用使得该区水动力较强, 不利于细颗粒泥沙的沉积, 也使得该区沉积物的分选性相对较好。

III 类沉积区主要分布在榕江下游和汕头港近岸, 主要沉积类型为黏土质粉砂和砂—粉砂—黏土。该区沉积物的粒度较细, 主要呈正偏态, 分选相对较差。因子分析沉积物的主控因子主要由 3.75~5.5 ϕ (粗粉砂级为主) 的正载荷组成, 说明沉积物主要受水动力条件的强烈影响。在榕江下游, 由于受河流和潮流的共同作用, 水动力条件比较复杂, 因此沉积物分选性较差。

IV 类沉积区主要位于南澳岛和海山岛周边, 主要沉积物类型为粉砂质砂。粒度较粗, 且分选较差。同 II 区类似, 该区沉积物中粗粒组分主要来源于附近岛屿风化物。由于岛屿对潮流和风浪的阻挡使得该区域的潮波发生变形, 潮流分叉, 加之岛屿间的诸多潮汐通道的复杂流路, 使得沉积物的分选性较差。此外, 在汕头港中心也有小范围 IV 类沉积区分布, 可能与该海域暗礁分布有关。

表 1 研究区各沉积环境分区沉积物粒度组成和粒度参数

Table 1 The grain-size compositions and parameters of sediments in each subarea of sedimentary environments

沉积环境分区		I	II	III	IV
主要沉积物类型		黏土质粉砂	砂	黏土质粉砂 砂—粉砂—黏土	粉砂质砂
粒度组成(%)	砾		(0~15.59) 3.21		
	砂	(0~15.99) 5.75	(73.73~100) 90.96	(3.38~26.92) 16.28	(29.99~51.87) 42.21
	粉砂	(54.66~76.20) 67.1	(0.01~16.37) 4.47	(54.67~76.69) 63.86	(18.65~47.19) 38.93
	黏土	(22.63~32.82) 27.15	(0~8.43) 1.36	(13.83~25.5) 19.87	(2.74~24.93) 14.89
粒度参数	平均粒径 $Mz(\phi)$	(6.70~7.30) 7.01	(0.43~2.96) 2.22	(5.82~6.73) 6.22	(0.12~6.60) 4.47
	偏态值 Sk	(-0.15~0.18) -0.001	(-0.65~0.17) -0.06	(-0.20~0.18) 0.03	(-0.52~0.26) -0.15
	峰态值 Kg	(0.99~1.29) 1.1	(0.95~2.67) 1.37	(0.80~1.19) 0.95	(0.63~0.86) 0.72
	分选系数 σ_i	(1.26~2.38) 1.72	(0.5~2.22) 1.04	(1.62~2.39) 2.13	(2.19~2.94) 2.61
主控因子		1	1, 2	3	1, 2, 3

* (最小值~最大值) 平均值。

4.2 沉积物净输运趋势分析

在粒度趋势的分析中,特征距离(DC)的选取很重要,不同的特征距离计算的结果所反映的海底沉积物净输运趋势也不一样^[27]。获取特征距离的方法主要有经验估计法,即选择最大采样间距为特征距离^[34];或根据情况分区,取不同的特征距离^[26,35,36];或用地质统计法来确定特征距离^[28,37]。

笔者首先对研究区原始采样点进行粒径趋势分析,由于已有的采样站位不规则、不均匀,且站位较少,用地质统计方法不能有效获得粒径趋势分析模型所需的变程值(即特征距离)^[37],因此特征距离取最大采样间距0.06(大地坐标中任何两点之间的欧氏距离,下同),获得的研究区沉积物输运趋势如图6a所示。图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,并不代表搬运速率的大小。由图6a可以看出,研究区大部分站位参与比较和合成矢量的相邻站位过少且片面,不能够反应该点所代表的沉积物输运趋势的真实方向。因此,本文对原始数据进行等距离插值,以期能有效提高原始数据的信息量及其准确性,得出更可靠的粒度趋势分析结果^[29,38]。

利用Golden Surfer 8.0软件,基于克里格插值法对原始数据按0.014°间距进行插值。取不同的特征距离来对比模型的模拟效果。分别对特征距离取0.02(约插值间距的 $\sqrt{2}$ 倍),0.04,0.06,0.08和0.1,等各种情况进行粒径输运趋势分析,得到净输运趋势如图6b,c,d,e,f所示(已剔除边界矢量)。插值后规则网格的粒径趋势分析与原始采样点的结果有较大的差异。插值后的分析结果对特征距离的变化不敏感,基本都显示出以下特点:在汕头港水深小于10m的海区,沉积物净输运趋势较不明显,但随着特征距离的增大,在榕江入海口和汕头港近岸表现出由海湾向河口输运的趋势;在水深大于10m的海区,表现出明显的由西南沿海岸线向东北方向输运,直到南澳岛的阻隔才逐渐减弱;在柘林湾,沉积物粒径趋势主要表现为由陆/岛向海输运。

年来,当地政府对汕头港外航道拦门沙已进行数次成功的整治,使得进港船舶的吨位不断增加^[7,9],但后续这些海区的回淤情况,仍需引起足够重视^[12]。而柘林湾的沉积物净输运趋势再次证明了该海湾淤积少的特征^[15],而且其水深、潮差大,加上其区位优势明显,位于其中的潮州港确为难得的天然良

粒径趋势模型所揭示的沉积物输运格局与物源和水动力状况较为吻合。首先,研究区的潮汐为外海传来的协振潮进入近岸的潮波,在榕江入海口附近,因地形影响及海岸的反射作用形成驻潮波,表层和底层余流流向较有规律,都是沿岸线走向,且流向湾内^[19]。这一水动力环境与该区沉积物沿海岸向湾内输运的趋势相符(图6)。韩江、榕江等径流携带的泥沙进入下游,其中细粒级部分直接或通过底质再悬浮的方式搬运进入汕头港,而粗粒级部分由于受潮波的阻隔作用,在榕江入海口和汕头港沿岸沉积,形成待狎金浅滩等一系列浅滩。这与黄利周^[9]的观点相一致,而Liu *et al.*^[11]通过黏土矿物对该区沉积物来源与贡献的研究也证实了这一点。

其次,在汕头港外水深大于10m的海区,潮流和海流成为该海区沉积物输运的主要作用力。据Zhu *et al.*^[39]对该海区ADCP观测结果表明,表层海流中常年存在东北向背景流,且在上埃克曼层以深层次流向常年向北。蔡尚湛等^[22]通过遥感资料分析,认为该海域的上升流随沿岸流向东北方向运动。而丁晓英等^[40]通过遥感图像分析,认为该海区涨潮流的流路比较一致,沿程保持北东方向。这几种水动力模式正是导致该海区沉积物呈现出明显的东北向输运的原因所在。

最后,柘林湾由于岛屿众多,海岸线复杂,该海区受径流、潮流与波浪等多种动力作用,水沙动力环境复杂,在输运趋势图上没有表现出明显的规律,总体仍是在潮余流和海流的相互作用下由海岸/岛屿向海湾输运,但随着特征距离的增大这一趋势越来越弱。这一趋势也印证了魏金城等^[14]“根据柘林湾卫星遥感水沙影像及柘林湾表层含沙浓度平面分布图认为柘林湾泥沙主要来源为黄冈河来沙,其次为韩江支流来沙”的结果相一致。

汕头近岸海区泥沙输运在榕江入海口和汕头港沿岸形成汇聚区,径流来沙、海域来沙在这些区域不断淤积发展,不断形成浅滩。并且在涨落潮流的作用下,沿海岸线往复输运,使得这些浅滩的长度不断增加,这也给港口建设带来不利影响^[40]。近港,发展潜力巨大。

5 结论

(1) 汕头近岸海区表层沉积物出现9种底质类型,以黏土质粉砂(YT)、砂质粉砂(ST)和砂—粉砂—黏土(S—T—Y)为主。沉积物中粉砂含量最

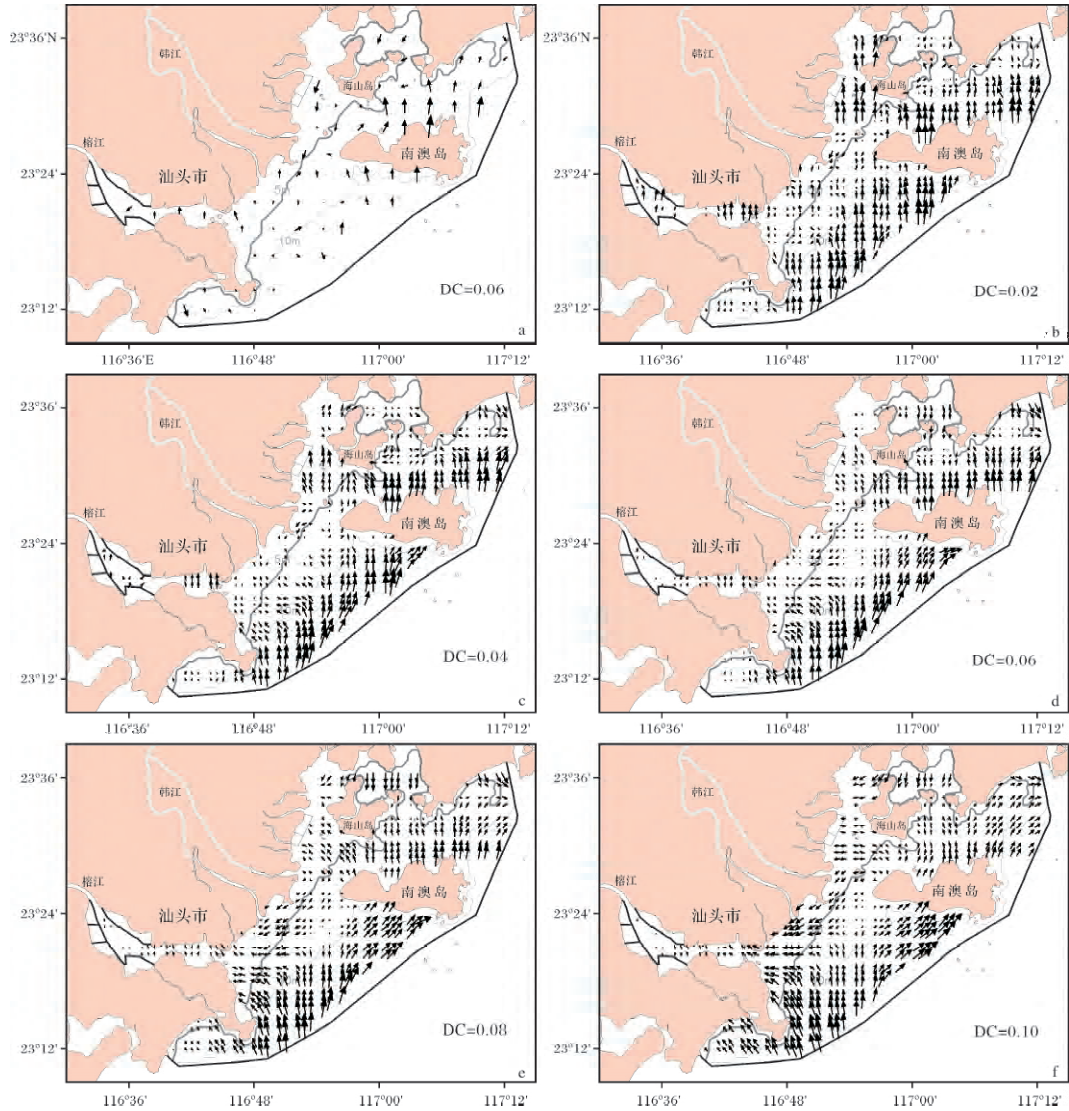


图 6 在汕头近岸海域进行粒径趋势分析获得的沉积物净输运趋势

a.原始站位结果; b-f. 插值后结果

Fig.6 The net sediment transport pattern by grain size trend analysis with different characteristic distances

a.Result from the original data; b-f. Results from the interpolated data

高, 平均值达 51%; 砂与黏土含量次之, 平均含量分别为 29.2% 和 18.4%; 砾石含量最低, 平均值仅为 1.4%。平均粒径在 $0.12 \sim 7.30 \phi$ 之间变化, 平均值为 5.53ϕ ; 分选系数、偏态和峰态值的变化范围依次为 $0.50 \sim 2.94$, $-0.65 \sim 0.30$ 和 $0.63 \sim 2.67$, 对应的平均值为 1.82, -0.02 和 1.11。

(2) 系统聚类方法和因子分析方法结果表明, 研究区可分为四类沉积区, 分别代表不同的沉积环境。GSTA 模型分析沉积物净输运趋势的结果显示, 在汕头港水深 $< 10 \text{ m}$ 的海区, 径流来沙和海域来沙有在榕江入海口和近岸汇聚的趋势; 水深 $> 10 \text{ m}$ 的海区, 沉积物呈现出明显的沿海岸线东北向输

运的特征; 在柘林湾, 沉积物主要表现为弱的由海岸/海岛向海湾运输的特征。

(3) 粒径趋势模型所显示的沉积物输运格局与研究区的水动力状况较为吻合, 且与前人对该区泥沙来源等研究相印证, 可为研究区港口建设和航道管理的决策提供参考。

参考文献 (References)

1 沈焕庭, 朱建荣. 论我国海岸带陆海相互作用研究 [J]. 海洋通报, 1999, 18(6): 11-17 [Shen Huanting, Zhu Jianrong. The land and ocean interactions in the coastal zone of China [J]. Marine Science Bulletin, 1999, 18(6): 11-17]

- 2 Knebel H J. Modern sedimentary environments in a large tidal estuary, Delaware Bay [J]. *Marine Geology*, 1989, 86(2/3): 119-136
- 3 乔永民, 黄长江, 赵建刚. 汕头柘林湾沉积物重金属富集特征与环境质量评价 [J]. *海洋环境科学*, 2010, 29(3): 324-327 [Qiao Yongmin, Huang Changjiang, Zhao Jiangan. Heavy metal accumulation and environmental quality assessment for surface sediment in Zhelin Bay [J]. *Marine Environmental Science*, 2010, 29(3): 324-327]
- 4 杜虹, 王亮根, 曹会彬, 等. 汕头港浮游植物组成特征及其与环境的关系 [J]. *生态学杂志*, 2011, 30(8): 1757-1765 [Du Hong, Wang Lianggen, Cao Huibin, et al. Phytoplankton community composition and its relationships with the environment in Shantou Harbor of South China [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2011, 30(8): 1757-1765]
- 5 李传燕, 黄宗国, 郑成兴, 等. 汕头港污损生物生态研究 [J]. *台湾海峡*, 1996, 15(1): 19-24 [Li Chuanyan, Huang Zongguo, Zheng Chengxing, et al. Ecological studies on fouling organisms in Shantou Harbor [J]. *Journal of Oceanography in Taiwan Strait*, 1996, 15(1): 19-24]
- 6 Wang C, Li X, Lai Z, et al. The study on seasonal trait of *Nitzschia* population in Zhelin Bay of eastern Guangdong [J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2008, 76(2): 319-326
- 7 黄建维, 詹清光. 汕头港外拦门沙整治技术和功效 [J]. *海洋工程*, 2000, 18(4): 55-62 [Huang Jianwei, Zhan Qingguang. Regulation techniques for the sand bar outside Shantou Harbour [J]. *Ocean Engineering*, 2000, 18(4): 55-62]
- 8 庄小洪. 汕头港安全和危防现状及管理对策初探 [J]. *交通环保*, 2001, 22(3): 41-43 [Zhuang Xiaohong. Approach on present situation on the safety and pollution prevention in Shantou Port and managing measures [J]. *Environmental Protection in Transportation*, 2001, 22(3): 41-43]
- 9 黄利周. 汕头港外航道泥沙来源及一期整治工程总结 [J]. *水运工程*, 2001, 30(7): 55-57 [Huang Lizhou. Silt source at outer channel of Shantou Port and a summary of phase I regulation project [J]. *Port & Waterway Engineering*, 2001, 30(7): 55-57]
- 10 Yan B, Yan W, Miao L, et al. Geochemical characteristics and provenance implication of rare earth elements in surface sediments from bays along Guangdong Coast, Southeast China [J]. *Environmental Earth Sciences*, 2012, 65(7): 2195-2205
- 11 Liu J, Yan W, Chen Z, et al. Sediment sources and their contribution along northern coast of the South China Sea: Evidence from clay minerals of surface sediments [J]. *Continental Shelf Research*, 2012, 47: 156-164
- 12 张忍顺. 汕头湾口外的泥沙运动和淤积问题 [J]. *南京大学学报: 地理学*, 1984(2): 36-46 [Zhang Renshun. Sediment movement and silting problems outside the estuary of Shantou Bay [J]. *Journal of Nanjing University: Geography*, 1984(2): 36-46]
- 13 李元亚, 金捷. 汕头港泥沙来源及运动途径的模糊相似分析 [J]. *泥沙研究*, 1991, 13(3): 28-37 [Li Yuanya, Jin Jie. The fuzzy and resemble analysis about sediment sources and movement pathways in Shantou Port [J]. *Journal of Sediment Research*, 1991, 13(3): 28-37]
- 14 魏金城, 温令平. 广东柘林湾水沙遥感影象分析 [J]. *水道港口*, 1993, 14(4): 29-31 [Wei Jincheng, Wen Lingping. MSS image analysis of water and sediment in Zhelin Bay, Guangdong province [J]. *Journal of Waterway and Harbor*, 1993, 14(4): 29-31]
- 15 蔡爱智. 汕头柘林湾的泥沙来源与沉积环境 [J]. *厦门大学学报: 自然科学版*, 1994, 33(4): 515-520 [Cai Aizhi. The source and environment of sediment in Zhelin Bay of eastern Guangdong province [J]. *Journal of Xiamen University: Natural Science*, 1994, 33(4): 515-520]
- 16 Passega R. Grain size representation by CM patterns as a geologic tool [J]. *Journal of Sedimentary Research*, 1964, 34(4): 830-847
- 17 El-Ella R A, Coleman J M. Discrimination between depositional environments using grain-size analyses [J]. *Sedimentology*, 1985, 32(5): 743-748
- 18 Gao S, Collins M, 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
- 19 国家海洋局南海海洋工程勘察与环境研究院. 汕头市澄海区莱芜岛旅游服务综合基地建设工程环境影响报告书 [R]. 广州, 2012 [South China Sea Marine Engineering and Environment Institute, SOA. Environmental Impact Report of Base Construction Project about Travel Services in Laiwu Island, Chenghai District, Shantou City [R]. Guangzhou, 2012]
- 20 黎维祥, 李伟仪. 汕头海域的波浪特性分析 [J]. *水运工程*, 2009, 38(7): 25-28 [Li Weixiang, Li Weiyi. Analysis of wave characteristics around the sea areas of eastern Guangdong [J]. *Port & Waterway Engineering*, 2009, 38(7): 25-28]
- 21 刘长建, 夏华永, 王东晓. 2006 年冬季粤东沿岸下降流观测分析 [J]. *海洋学报*, 2010, 32(1): 1-9 [Liu Changjian, Xia Huayong, Wang Dongxiao. The observation and analysis of eastern Guangdong coastal downwelling in the winter of 2006 [J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2010, 32(1): 1-9]
- 22 蔡尚湛, 吴日升, 许金电. 2006 年夏季粤东至闽南近岸海域上升流的特征 [J]. *台湾海峡*, 2011, 30(4): 489-497 [Cai Shangzhan, Wu Risheng, Xu Jindian. Characteristics of upwelling in eastern Guangdong and southern Fujian coastal waters during 2006 summer [J]. *Journal of Oceanography in Taiwan Strait*, 2011, 30(4): 489-497]
- 23 廉耀康, 李炎. 台湾浅滩沉积物粒度特征及输运趋势 [J]. *台湾海峡*, 2011, 30(1): 122-127 [Lian Yaokang, Li Yan. Grain size characteristics and transport trend in the Taiwan Bank [J]. *Journal of Oceanography in Taiwan Strait*, 2011, 30(1): 122-127]
- 24 Folk R L, Ward W C. Brazos River bar: A study in the significance of grain size parameters [J]. *Journal of Sedimentary Petrology*, 1957, 27(1): 3-26
- 25 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]
- 26 Shi X, Chen C, Liu Y, 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
- 27 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
- 28 Ma F, Wang Y, Li Y, *et al.* The application of geostatistics in grain size trend analysis: A case study of eastern Beibu Gulf [J]. Journal of Geographical Sciences, 2010, 20(1): 77-90
- 29 Ju J, Zhu L, Feng J *et al.* Hydrodynamic process of Tibetan Plateau lake revealed by grain size: Case study of Pumayum Co [J]. Chinese Science Bulletin, 2012, 57(19): 2433-2441
- 30 Dai Z J, Liu J T, Lei Y P, *et al.* Patterns of sediment transport pathways on a Headland Bay Beach-Nanwan Beach, South China: A case study [J]. Journal of Coastal Research, 2010, 26(6): 1096-1103
- 31 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]
- 32 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]
- 33 王蒙光, 雷怀彦, 史跃中. 应用因子分析与系统聚类方法划分现代沉积环境——以九龙江河口区为例 [J]. 厦门大学学报: 自然科学版, 2008, 47(3): 431-437 [Wang Mengguang, Lei Huaiyan, Shi Yuezhong. Application of factor analysis and system cluster analysis to classification of modern sedimentary environment—A case study in Jiulongjiang Estuary [J]. Journal of Xiamen University: Natural Science, 2008, 47(3): 431-437]
- 34 闵凤阳, 汪亚平, 高建华, 等. 长江口北支的沉积物输运趋势 [J]. 海洋通报, 2010, 29(3): 264-270 [Min Fengyang, Wang Yaping, Gao Jianhua, *et al.* Sediment transport pathway within the North Branch, Changjiang Estuary [J]. Marine Science Bulletin, 2010, 29(3): 264-270]
- 35 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 adjacent areas [J]. Acta Geographica Sinica, 2000, 55(4): 449-458]
- 36 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 [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, 2010, 32(4): 139-147]
- 37 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]
- 38 贾建军, 程鹏, 高抒. 利用插值试验分析采样网格对粒度趋势分析的影响 [J]. 海洋地质与第四纪地质, 2004, 24(3): 135-141 [Jia Jianjun, Cheng Peng, Gao Shu. Comparison between grain size trends derived from irregular and regular sampling grids with the help of GIS interpolation tools [J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2004, 24(3): 135-141]
- 39 Zhu Dayong, Li Li, Li Yan, *et al.* Seasonal variation of surface currents in the southwestern Taiwan Strait observed with HF Radar [J]. Chinese Science Bulletin, 2008, 53(15): 2385-2391
- 40 丁晓英, 许祥向. 应用遥感技术分析韩江河口悬沙的动态特征 [J]. 国土资源遥感, 2007, 20(3): 71-73 [Ding Xiaoying, Xu Xiangxiang. A remote sensing analysis of characteristics of suspended sediments movement in Hanjiang Estuary [J]. Remote Sensing for Land & Resources, 2007, 20(3): 71-73]

Grain Size Characteristics of Surface Sediments and Their Transport Patterns over the Coastal Waters of Shantou City , Guangdong Province

CHEN Han^{1 2} CHEN Zhong¹ YAN Wen¹ LI Liang^{1 2}
LIU Jian-guo¹ HUANG Wei-xia¹ LI Gang¹

(1. Key Laboratory of Marginal Sea Geology , South China Sea Institute of Oceanography , Chinese Academy of Sciences , Guangzhou 510301;

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

Abstract: Grain size analysis and parameter calculation have been carried out based on 70 surface sediments collected from the coastal waters of Shantou City , and characteristics of frequency distribution have been researched. The results show that the surface sediments of the area are made up of 9 kinds of sediment types , the main types are clayey silt , sandy silt and sand-silt-clay. The content of gravel , sand , silt , and clay in the surface sediments is 1.4% , 29.2% , 51.0 % , and 18.4 % , respectively. The mean grain size of sediments in this area is 0.12~7.30 ϕ and the average is 5.53 ϕ . The coefficient of sorting is 0.50~2.94 and the average is 1.82. Skewness is -0.65~0.30 and the average is -0.02. Kurtosis is 0.63~2.67 and the average is 1.11. The modern sedimentary environment in coastal waters of Shantou can be classified into 4 types by system cluster analysis and factor analysis. Spline interpolation method was employed to the data of grain size parameters over the study area. Then , the sediment transport trends were simulated by using GSTA (Grain Size Trend Analysis) model. The grain size trends analysis shows that: In Shantou harbor that the water depth <10 m , sediments from the runoff and sea were converged to the estuaries and offshore; Sediments in Shantou harbor that the water depth >10 m are transported towards the north-east along the coast. In Zhelin Bay , the sediments' migration trends are from coasts/islands to bay. This pattern is highly consistent with the provenance of sediments and the local hydrodynamics , which could be applied to the decision-making in port and waterway engineering.

Key words: grain-size characteristics; sedimentary environment; grain-size trend analysis; coastal waters of Shantou City