

文章编号: 1000-0550(2009) 04-0714-09

深圳湾西北部海域表层沉积物的分布特征及输运趋势¹

闵凤阳¹ 汪亚平¹ 左平¹ 刘运令¹ 吴祥柏²

(1. 南京大学海岸与海岛开发教育部重点实验室 南京 210093

2. 厦门大学海洋与环境学院 近海海洋环境科学国家重点实验室 福建厦门 361005)

摘要 在深圳湾西北部海域进行表层沉积物取样, 通过粒度分析获取沉积物粒度参数。结果表明, 该海域中北部沉积物以粉砂为主, 分选较差; 局部有较粗的砂、砾沉积物分布, 分选性差。地质统计分析结果显示, 粒度参数半方差—距离的相关性与沉积物粒度参数的空间分布有关, 剔除空间“异常”值后, 可在半方差图中获取粒度参数的变程值, 并将其作为粒径趋势模型的特征距离。粒径趋势分析表明, 海湾西部海域的沉积物向东北净输运, 深圳河口海域的沉积物偏西向输运, 从而在海湾北部近岸海域形成一个沉积物汇聚中心, 这与水动力观测结果基本吻合。此外,²¹⁰Pb测年结果也表明, 这个沉积物汇聚中心的沉积速率也相应较高, 显示出较强的淤积趋势。

关键词 粒度参数 地统计学 粒径趋势分析 沉积速率 深圳湾

第一作者简介 闵凤阳 男 1983年出生 硕士研究生 自然地理学 E-mail: minfengyang1983@163.com

通讯作者 汪亚平 E-mail: ypwang@nju.edu.cn

中图分类号 P512.2 **文献标识码** A

海湾是海岸常见的沉积地貌单元, 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。深圳湾是珠江口的一个小型海湾, 北连深圳, 南接香港, 地理位置优越, 是深圳经济快速发展的重要支撑。20世纪70年代以前, 深圳湾岸线和面积变化甚微; 但自深圳划为经济特区以后, 经济迅速发展, 土地需求量加大, 并通过实施大规模填海造陆工程来获得土地, 在一定程度上改变了深圳湾原来的水动力和沉积状况。特别是近年来, 人类活动对深圳湾的影响日益加剧, 对海湾沉积、生态学的研究显得日益重要。前人对深圳湾的研究, 主要集中在环境污染^[1-4]和生态系统的调查^[5,6], 以及对围海工程的评价^[7-9]等方面, 而对湾内的沉积动力过程、沉积物输运等方面了解甚少。研究深圳湾的沉积物特征和输运, 不仅有助于了解深圳湾沉积环境的未来演变趋势, 并且对深圳湾的港口建设、航道管理、环境保护及资源开发具有前瞻性的意义。

1 区域概况

深圳湾是位于珠江口东侧的半封闭型海湾, 面积112 km², 湾内纵深约14 km, 平均宽度为7.5 km, 大部分水深浅于5 m, 平均深度2.9 m, 湾口可达6 m左

右, 向伶仃洋陡然变深^[10]。深圳湾的潮型为不规则半日混合潮, 年均潮差1.37 m。北部有大沙河注入, 东、南面有深圳河和元朗河注入, 其中以深圳河流量最大。湾内有蛇口港和东角头港等重要港口, 在湾顶分布着淤泥质潮滩和红树林, 东北部为福田红树林自然保护区, 东南部香港一侧为米埔自然保护区(图1)。

2 材料与方法

2.1 底质采样与粒度分析

2006年3月, 用蚌式采样器在深圳湾西北部海域获得了81个表层沉积物样品(图1), 样品的采集深度约为5 cm。对于粒径<2 mm的样品, 采用英国Malvern公司生产的MasterSizer 2000型激光粒度仪(测量范围为0.02~2 000 μm, 重复测量的误差小于3%)进行粒度分析。对于粒径>2 mm的样品采用筛分法和激光粒度仪结合的方法: 先烘干称重, 用1.4 mm孔径的标准筛进行湿筛, 然后将细颗粒部分用激光粒度仪进行分析, 粗颗粒部分烘干称重并用传统筛法分析; 将上述分析数据按照1/4φ间隔输出, 合并后获得完整粒度分布。粒度参数(平均粒径 μ , 分选系数 σ , 偏态 Sk 和峰态 Ku)采用矩法公式计算^[11]:

¹ 国家自然科学基金(批准号: 40576023)、国家908专项(编号: 908-02-03-08)、教育部“新世纪优秀人才支持计划”(批准号: NCET-06-0446)共同资助。

收稿日期: 2008-04-20 收修修改稿日期: 2008-11-18

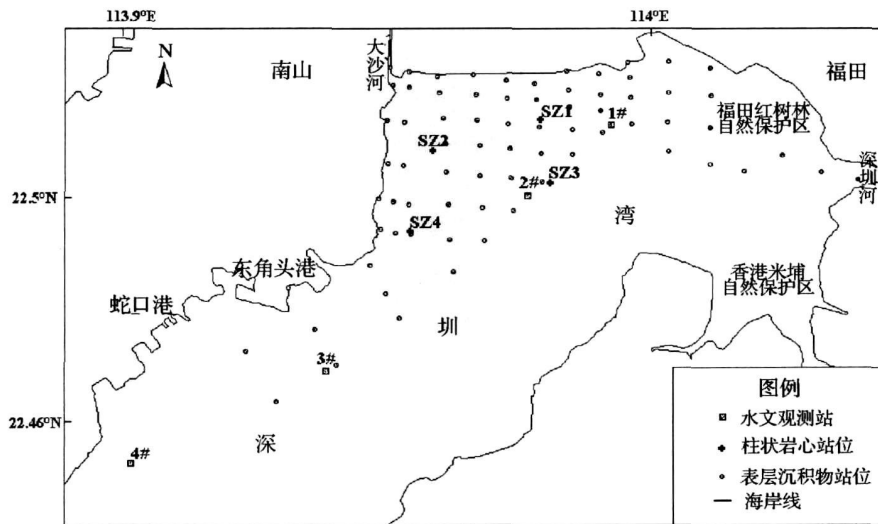


图 1 研究区域位置图

Fig 1 The location of the study area

$$\mu = \sum_i^n P_i x_i \quad (1)$$

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

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

$$Ku = \left[\sum_i^n P_i (x_i - \mu)^4 \right]^{\frac{1}{4}} \quad (4)$$

式中 P_i 为样品中粒径为 x_i (以 ϕ 制表示) 的组分出现的频率; n 为该样品所有粒径组分的数目。粒度参数分级采用贾建军等^[12]提出的分级标准。

2.2 粒径趋势分析

根据沉积物的 3 种粒度参数 (平均粒径、分选系数及偏态) 的平面分布特征, 对相邻两个采样点的粒度参数进行比较, 可以定义 8 种粒径趋势。基于经验的证据, 其中两种类型的粒径趋势在沉积物的净搬运方向上有较高的出现概率, 即 (1) 沉积物在运移方向上分选变好、粒径变细且更加负偏; (2) 沉积物在运移方向上分选变好、粒径变粗且更加正偏^[13-14]。对两个相邻的采样点的粒度参数进行一一比较, 则可以确定各采样点的粒径趋势矢量^[13-14]。

判断 2 个采样点是否相邻, 可用特征距离 D_c 来衡量。若两采样点之间的间距大于 D_c , 则认为相邻, 否则不相邻^[14]。对每个采样点得到的矢量进行合成, 可得到一个合矢量。求出各个采样点的合矢量, 并对其平滑处理, 以消除“噪声”, 从而可得到研究区沉积物二维搬运格局^[15]。但在该模型中, 特征

距离的选取常常依赖于经验的估计 (如采用最大采样间距), 而且对于特征距离所可能包含的物理意义也不明晰。最近, Poizot 等^[16]采用地质统计学方法来确定特征距离, 即通过计算某些粒度参数的半方差图, 获取该参数的变程值, 将其作为特征距离。本文在深圳湾获取的样品有限, 采样站位也不规则, 地质统计法是否适用, 仍需作进一步探讨。

3 结果

3.1 沉积物粒度分布特征

按照 Folk^[17] 和 Blair & Pherson^[18] 的分类系统, 深圳湾西北部海底沉积物可分为 6 类, 即泥、粉砂、砂质粉砂、砾砂质泥、泥砾质砾、砂砾质砾。其中分布范围最广的是粉砂, 占研究区域的 70% 以上。其次是砂质粉砂和泥, 约占 17%, 表明该海域沉积物颗粒相对较细。由砂、砾混合形成的粗颗粒沉积物集中分布在深圳河口处和海湾中部 4# 站附近, 主要为砾砂质泥、泥砂质砾、砂泥质砾。室内鉴定表明, 深圳河口的沉积物含有部分岩石风化物, 而非生物壳体或海洋动力的产物, 主要是由河流从上游山区携带到河口区域堆积形成的。此外, 测量期间有挖泥船在 1# 附近疏浚、抛撒沉积物, 人为造成了该站位附近沉积物的粗化。

研究区域表层沉积物平均粒径大多数集中在 6 ~ 8 ϕ 之间, 为细粉砂和极细粉砂级, 占研究区域面积的 90% 以上 (图 2a)。平均粒径较粗的沉积物主要

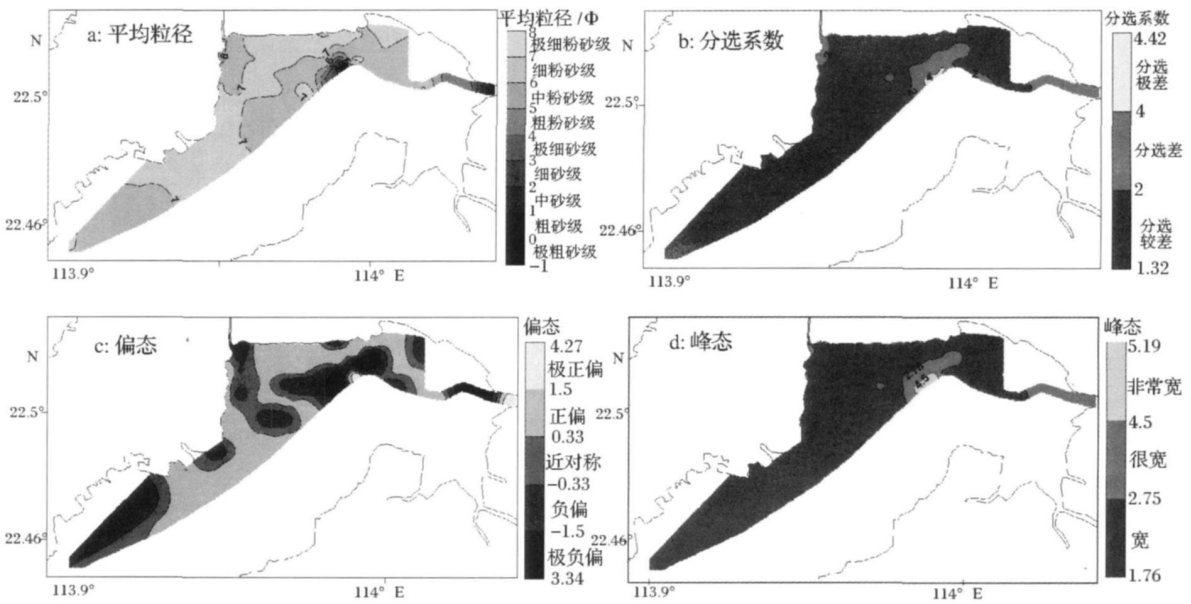


图 2 深圳湾沉积物粒度参数分布

Fig 2 Distribution patterns of the grain size parameters in Shenzhen Bay

分布在河口区。从河口向外平均粒径逐渐变细,如深圳河口平均粒径从 0.47ϕ 变化到 6.38ϕ ,大沙河口从 5.87ϕ 变化至 7.47ϕ 。深圳河口比大沙河口物质要粗得多,主要是由于径流量大,上游发源于山地,携带更多的粗颗粒入湾所致。

深圳湾沉积物的分选系数为 $1.32 \sim 4.42$ 其中 90% 以上区域为分选较差,深圳河和大沙河的河口地区沉积物分选性差,海湾中部人为抛泥造成沉积物高度混杂,分选性极差(图 2b)。沉积物平均粒径与分选系数之间存在着一定的相关关系,即平均粒径越粗,分选性越差,可能与粗颗粒的沉积物未经长距离搬运的分选,而是快速混杂堆积所致。

深圳湾西北部海域沉积物多属细粉砂级,且表层沉积物的中值粒径越大,粒径分布曲线不对称性越显著,粒径峰值偏向较粗一侧的趋势更加明显,因此,深圳湾沉积物以正偏占优,且主要分布在海湾中部。深圳河口和 # 站附近的局部区域呈极正偏特征;海湾西部、大沙河口和深圳河口的外侧,呈负偏到极负偏(图 2c)。

深圳湾绝大部分海区的沉积物为宽峰态特征,大沙河口、深圳河口及附近地区的峰态系数为很宽;# 站附近为非常宽,再次表明该处沉积物来源的泛杂(图 2d)。

湾内典型沉积物的粒度频率分布如图 3 所示,其中 a 和 b 来自海湾中部,这些沉积物粒度均为单

峰,频率曲线大致呈正态分布,表明沉积物随着搬运产生的分选比较充分。图 3d 为大沙河口沉积物,呈双峰状,可能与该处既有大沙河携带而来的陆源物质,也有海流携带的物质,物源和水动力均较为复杂。e、f 为深圳河口沉积物,粒度分布范围更宽,砾占也占有一定比例,物质显著粗化。

深圳湾西北部海域的这种沉积物分布格局,不但与物源密切相关,还与水动力、人类活动有显著关系。深圳湾表层沉积物为海相淤积层,属近代沉积。淤泥中央厚 ($> 10\text{ m}$), 两侧浅滩地区薄 ($< 8\text{ m}$)^[10]。深圳湾是一个浅水港湾,海洋动力主要是外海(伶仃洋)传来的潮波,并由纳潮量维持一定的水深^[19]。前人的研究认为,深圳湾沉积物来源以外海为主,而外海多为泥质沉积^[20],故深圳湾的沉积物总体上较细。而在入湾的河口海域,河流从上游搬运较粗的砂、砾堆积在河口区,造成河口区域物质粗化。正常天气条件下,深圳湾主要以潮汐为主要动力因素,而潮流的流速较小(大潮期间的垂线平均流速 $< 0.5\text{ m/s}$,小潮期间 $< 0.25\text{ m/s}$),水动力偏弱,有利于细颗粒沉积物的搬运和堆积,而不利于粗颗粒沉积物的搬运和扩散,因此粗颗粒的分布较为集中,多在距离物源较近处快速堆积。

3.2 沉积物运输趋势

3.2.1 特征距离的确定

由于测量期间有挖泥船在 # 站附近作业,导致

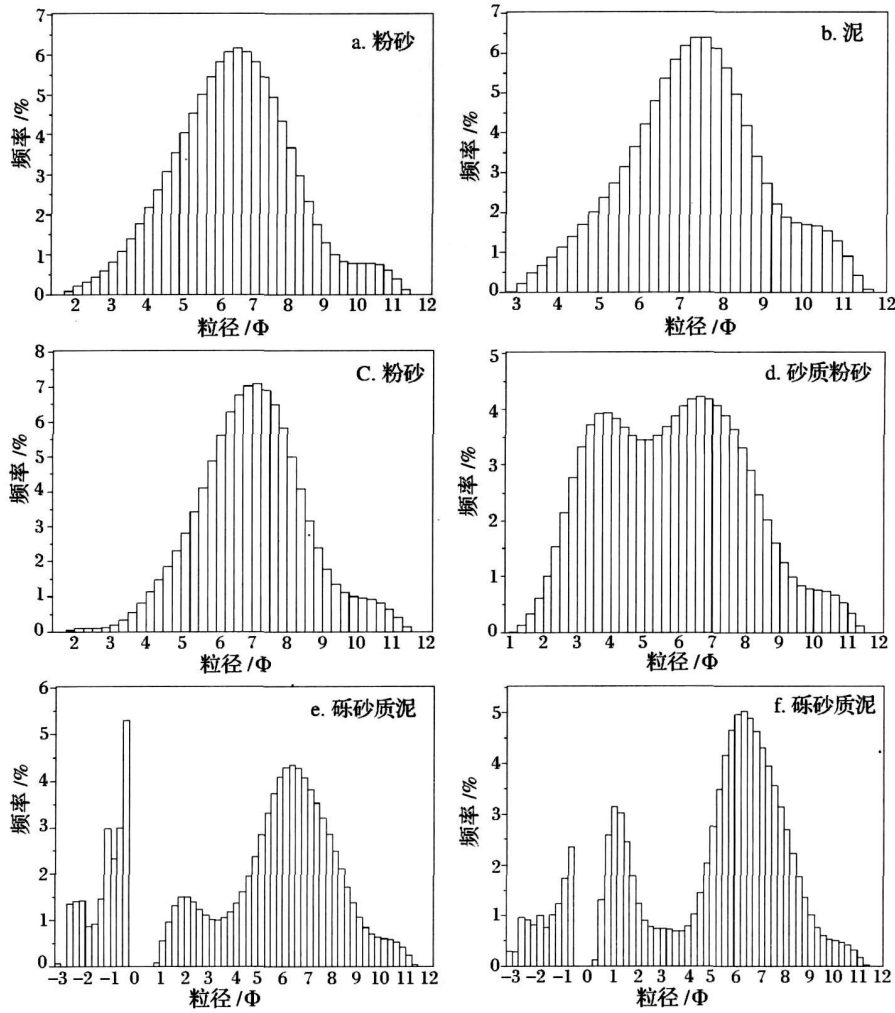


图 3 典型沉积物样品粒度频率直方图

Fig 3 Grain size frequency histogram for the typical sediments

该处的沉积物人为粗化; 深圳河从上游携带粗颗粒在河口区堆积, 无论是从平均粒径还是其他粒度参数来看, 这两个区域的沉积物在整个海湾表现为极度异常, 其沉积物的来源和沉积物的搬运方式也与海湾其他区域有较显著的差异, 因此, 将这些区域获取的样品作为空间分布“异常”值来处理, 而海湾的其他区域沉积物, 仍视为正常的海湾动力环境的产物。

对在深圳湾西北部海域获取的所有站位的沉积物粒度参数进行地质统计分析, 可以看出, 各种粒度参数并未出现某个显著的变程值, 半方差值基本上随着距离的增加呈单调上升的趋势 (图 4)。如平均粒径的半方差值随着距离的增加, 似呈指数上升的趋势, 并不能达到一个相对稳定的值。分选、偏态、峰态的半方差值在 6 000 m 以内振荡起伏; 6 000 m 以后则迅速上升。因此, 如果不剔除异常站位, 则地统计

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)。

当剔除“异常”值后, 粒度参数的地统计结果较为理想 (图 5)。平均粒径的半方差值随距离快速增至为一个相对稳定的值, 采用高斯模型拟合, 相关系数达 0.96, 其它粒度参数的半方差图值也有类似特征, 但相关性相对略差。根据平均粒径地统计中函数拟合的结果, 变程约为 1 220 m, 将其作为特征距离, 进行粒径趋势分析。在深圳湾, 正常天气条件下以潮流动力占优, 该变程值可能对应于潮流搬运形成的沉积物空间分异的距离。可见, 地质统计学方法在采样区域间距不规则、采样数目较少的情况下, 也可获得有效的变程值 (特征距离), 但需事先分析并剔除整个沉积系统中可能存在的空间分布异常值。

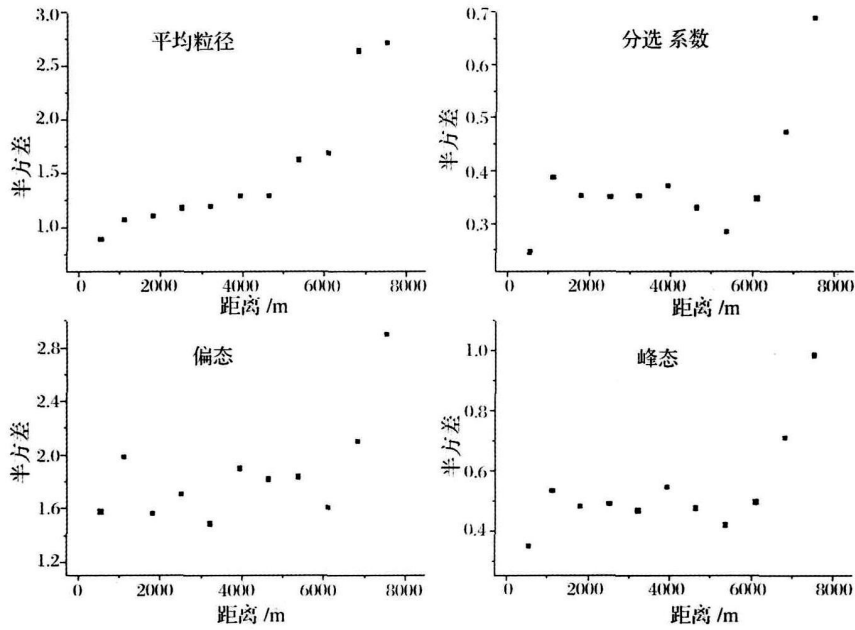


图 4 深圳湾表层沉积物粒度参数的半方差图

Fig. 4 The variograms for the grain size parameters of the superficial sediments in Shenzhen Bay

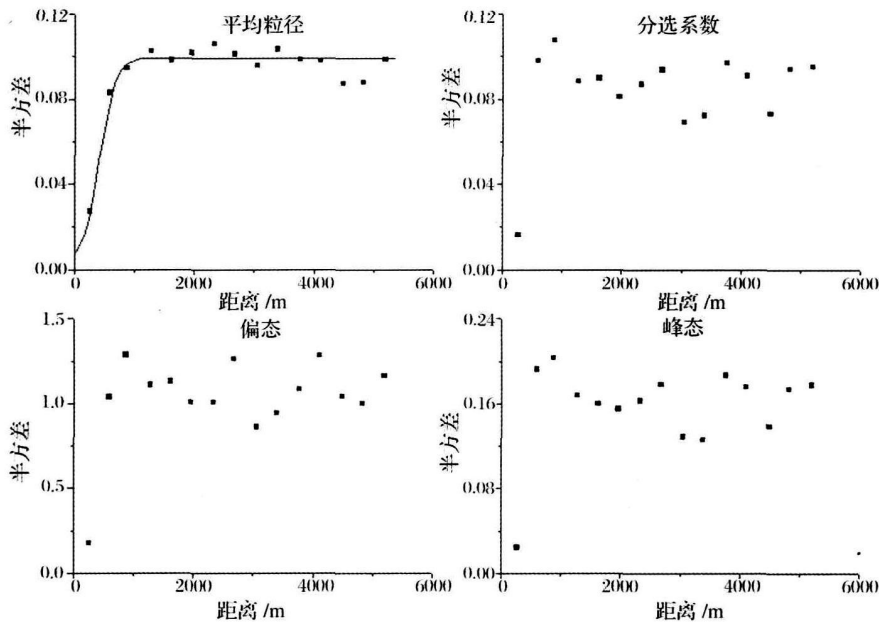


图 5 剔除“异常”站位后的沉积物粒度参数的半方差图

Fig. 5 The variograms for the grain size parameters of the superficial sediments after elimination abnormal points

3.2.2 粒径趋势

采用 Gao-Collins 粒径趋势分析模型^[21, 22], 获得了深圳湾西北部海域的海底表层沉积物的净输运趋

势。如图 6 所示, 矢量箭头为沉积物净搬运方向, 矢量长度表示粒径趋势的显著性。

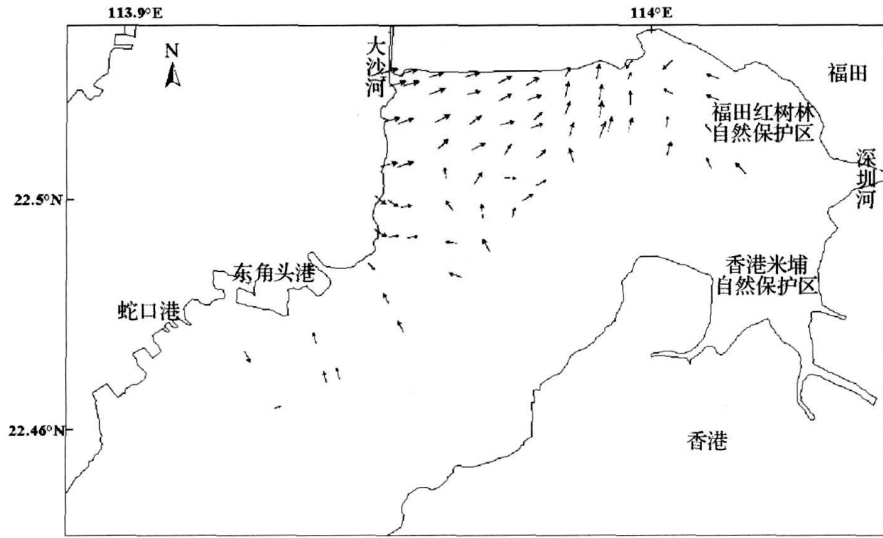


图 6 深圳湾沉积物粒径趋势图

Fig 6 Grain size trends in Shenzhen Bay

从图 6 可看出, 深圳湾西北部海域沉积物的运输主要表现为沉积物从深圳河口、福田红树林鸟类自然保护区向西、西北方向运输; 而深圳湾西部, 从大沙河口至东角头港外海域, 沉积物主要表现为向东、东北方向运输; 仅在东角头港局部海域, 沉积物主要向西北方向运输, 但也是从湾口指向湾内。

粒径趋势模型所显示的这种沉积物运输格局与深圳湾的水动力状况是较为吻合的。深圳湾主要受伶仃洋传来的潮波的影响, 潮波进入深圳湾后, 由于湾内水深变浅, 同时受湾内地形的约束, 潮流流向基本呈西南—东北向往复流动^[23]。潮波传入湾内后逐

步向东北偏转, 潮流流速减缓, 有利于其携带而来的沉积物在深圳湾的北部弱流区域的沉降和堆积。根据实测的余流资料, 大小潮期间, 水文站 2#、3#、4#的余流大都流向湾内, 1#余流指向偏西方(流速可达 5.47 cm/s), 将导致沉积物向湾内北部区域输送。对深圳湾流场的数值模拟也发现^[24], 深圳湾的余流大致呈西南—东北向, 且指向湾内, 口门处较大, 湾内较小, 同样也会导致沉积物向湾内北部浅滩区域运输。而在深圳河口附近, 由于径流作用显著, 河口海域沉积物呈西向输移趋势。因此, 在滨海大道岸外海域形成一个净堆积区。

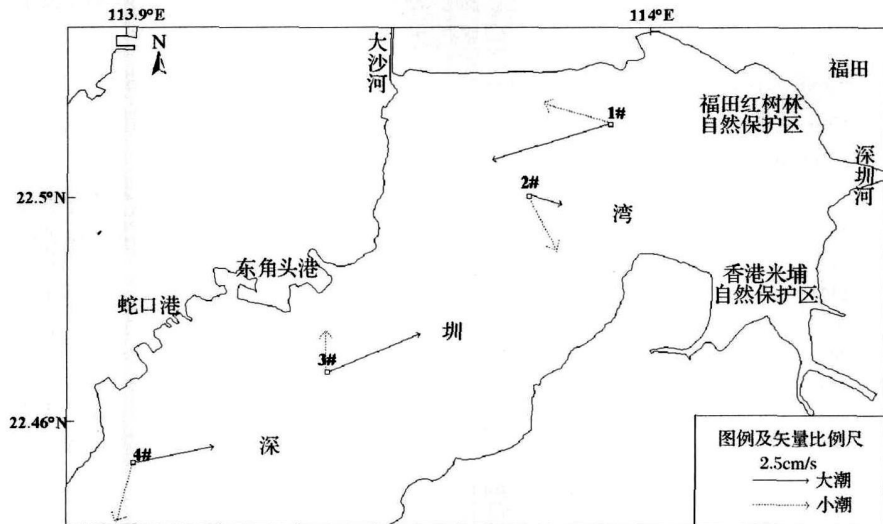
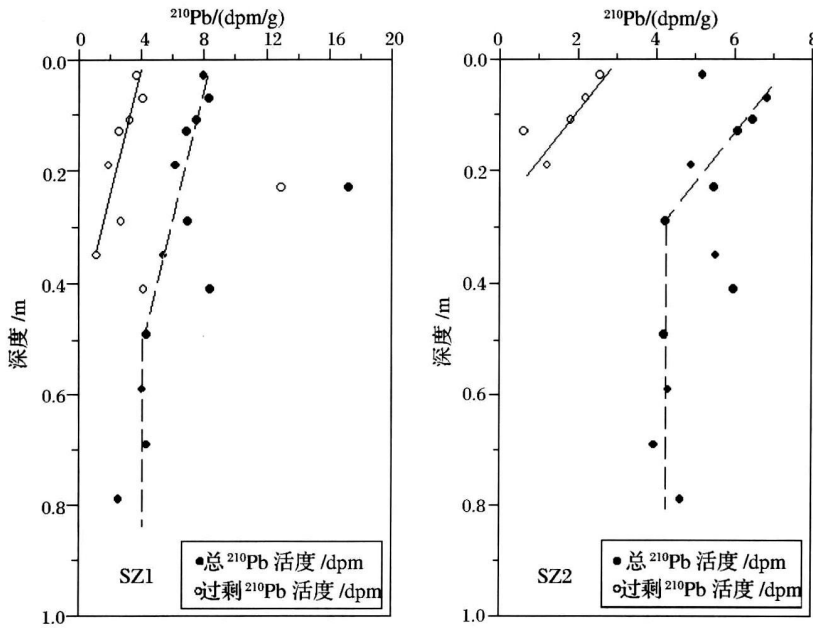


图 7 深圳湾海区余流

图 8 深圳湾 SZ1、SZ2 岩心的 ^{210}Pb 活度分布Fig 8 The ^{210}Pb activity of the sediment cores SZ1, SZ2 in Shenzhen Bay

在研究区的 SZ1、SZ2、SZ3、SZ4 站位采集柱状岩芯样品, 运用 α 能谱仪法测定 SZ1、SZ2 的 ^{210}Pb 活度, 运用 γ 能谱法测定 SZ3、SZ4 的 ^{137}Cs 的活度。所得的 SZ1、SZ2 的 ^{210}Pb 活度垂向变化如图 8 所示。从图中可以看出, SZ1、SZ2 岩心的 ^{210}Pb 活度分别在 49 cm、29 cm 呈现明显的转折, 而其下 ^{210}Pb 的活度基本不变 (即本底值)。在本底上方, ^{210}Pb 活度呈现显著的指数衰减模式, 剔除异常点, 可计算出这两个站位的沉积速率。

表 1 深圳湾沉积速率统计

Table 1 The statistics of the sedimentation rates in Shenzhen bay

沉积速率 / (mm/yr)	时间	位置	参考资料
2.5	1950~2000	整个海湾	黄小平等 ^[3]
3.7	近百年以来	海湾中部	林瑞芬等 ^[25]
0.95~1.81	1984~1994	内湾	北京大学等 ^[26]
9.2	1952~2006	海湾北部浅滩	本文研究 (SZ1)
2.8	1902~2006	大沙河口外侧	本文研究 (SZ2)
8.1	1963~2006	海湾北部浅滩	本文研究 (SZ3)
2.6	1963~2006	东角头港外海域	本文研究 (SZ4)

Pb 同位素和 Cs 同位素测年的结果基本一致, 即大沙河口外侧的 SZ2 和东角头外海域的 SZ4 平均沉积速率约为 2.8 mm/yr 和 2.6 mm/yr , 而海湾北部浅滩 (SZ1 和 SZ3) 的沉积速率高达 9.2 mm/yr 和 8.1

mm/yr 远大于其他区域的沉积速率 (见表 1), 表明该区在较长时间尺度上是深圳湾西北部海域的一个净堆积中心, 海底淤涨速率最大。

4 结论

(1) 深圳湾西北部海域的沉积物分布以粉砂占优, 颗粒较细, 分选较差, 多数为正偏, 粒度常为单峰分布; 仅在受径流影响显著的深圳河口和受人类活动影响的 # 站附近的局部区域, 沉积物较粗, 分选极差, 峰态较宽, 粒度为多峰分布。

(2) 深圳河口和 # 站附近的沉积物受海洋动力因素的影响极小, 与海湾其他区域的沉积物相比属于粒度参数的空间分布异常区。剔除深圳河口和 # 站附近的粒度参数“异常”值后, 用地统计学方法计算了各粒度参数的半方差随距离的变化。结果表明, 可有效地确定出平均粒径的变程值为 1.220 m , 即代表平均粒径在正常水动力 (潮流) 条件下形成的空间分异的距离, 可取作粒径趋势分析的特征距离。可见, 在深圳湾西北部海域这种采样区域间距不规则、采样数目较少的情况下, 用地统计方法也可获得某些粒度参数具有显著分异特征的变程值, 并将其作为粒径趋势分析的特征距离。

(3) 粒径趋势分析结果表明, 而深圳湾西部海域的沉积物主要表现为向东、东北方向运输, 东部海域

的沉积物向偏西向、西北方向输运,从而在海湾北部形成一个沉积物的汇聚区或净堆积中心。在该海域获取柱状岩芯进行²¹⁰Pb测年,结果表明,该汇聚区的沉积速率较其他区域显著偏高。

致谢 南京大学王晓辉参加野外采样与观测,江苏省水文水资源勘测局、南京水利科学研究院在采样与观测中给予诸多帮助,一并致谢!

参考文献 (References)

- 1 谢镜明, 麦志勤, 张展霞, 等. 深圳湾、大鹏湾海水和底泥中维生素 B₁、B₁₂测定结果及初步分析 [J]. 海洋与湖沼, 1994, 25(2): 185-189 [Xie Jingming, Mai Zhiqin, Zhang Zhanxia, et al. Preliminary analysis of the vitamin B₁ and B₁₂ concentrations for Shenzhen bay and Dapeng Bay [J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 1994, 25(2): 185-189]
- 2 方圆, 赵智杰, 孙卫玲, 等. 深圳湾潮间带湿地沉积物的重金属分布特征 [J]. 应用基础与工程科学学报, 2002, 8(4): 343-353 [Fang Yuan, Zhao Zhijie, Sun Weiling, et al. Spatial distribution of heavy metals in inter-tidal wetlands of deep bay, Shenzhen [J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2002, 8(4): 343-353]
- 3 黄小平, 李向东, 岳维忠, 等. 深圳湾沉积物中重金属污染累积过程 [J]. 环境科学, 2003, 24(4): 144-149 [Huang Xiaoping, Li Xiangdong, Yue Weizhong, et al. Accumulation of heavy metals in the sediments of Shenzhen Bay, South China [J]. Environmental Science, 2003, 24(4): 144-149]
- 4 杨丽, 蔡立哲, 童玉贵, 等. 深圳湾福田潮滩重金属含量及对大型底栖动物大的影响 [J]. 台湾海峡, 2005, 24(2): 157-164 [Yang Li, Cai Lizhe, Tong Yugu, et al. Heavy metal contents on Futian tidal flat in Shenzhen Bay and their effect on macrobenthos [J]. Journal of Oceanography in Taiwan Strait, 2005, 24(2): 157-164]
- 5 王勇军, 曾启杰, 常弘. 深圳福田红树林湿地鹭科鸟类群落生态系统研究 [J]. 中山大学学报: 自然科学版, 1999, 38(2): 85-89 [Wang Yongjun, Zeng Qijie, Chang Hong. The community ecology of Herons (Ardeidae) in Futian mangrove wetland, Shenzhen [J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni Natural Sciences, 1999, 38(2): 85-89]
- 6 吴振斌, 贺锋, 付贵萍, 等. 深圳湾浮游生物和底栖生物现状调查研究 [J]. 海洋科学, 2002, 26(8): 58-64 [Wu Zhenbin, He Feng, Fu Guiping, et al. Investigation of plankton and benthos in Shenzhen Bay [J]. Marine Sciences, 2002, 26(8): 58-64]
- 7 倪晋仁, 秦华鹏, 赵智杰. 基于水质模型的海湾填海岸线选择 [J]. 环境科学导报, 2001, 21(6): 684-688 [Ni Jinren, Qin Huapeng, Zhao Zhijie. Determination of post-reclamation coastline based on water quality model [J]. Acta Scientiarum Circumstantiae, 2001, 21(6): 684-688]
- 8 秦华鹏, 倪晋仁, 梁林. 基于水动力数学模型的海湾填海岸线选择 [J]. 水动力研究与进展, 2002, 17(1): 92-99 [Qin Huapeng, Ni Jinren, Liang Lin. Determination of the post-reclamation coastline based on hydrodynamic model [J]. Journal of Hydrodynamics, 2002, 17(1): 92-99]
- 9 秦华鹏, 倪晋仁, 李义天. 基于泥沙数学模型的海湾填海岸线选择 [J]. 泥沙研究, 2002, 3: 52-58 [Qin Huapeng, Ni Jinren, Li Yitian. Determination of post-reclamation coastline based on the sediment transport model [J]. Journal of Sediment Research, 2002, 3: 52-58]
- 10 朱大奎, 李海宇, 潘少明, 等. 深圳湾海底沉积层的研究 [J]. 地理学报, 1999, 54(3): 224-232 [Zhu Daku, Li Haiyu, Pan Shaoming, et al. The seabed sediment of the Shenzhen Bay, China [J]. Acta Geographica Sinica, 1999, 54(3): 224-232]
- 11 Momanus J. Grain size determination and interpretation [C] // Tucker M. ed. Techniques in Sedimentology [M]. Oxford: Blackwell, 1988: 63-85
- 12 贾建军, 高抒, 薛允传. 图解法与矩法沉积物粒度参数的对比 [J]. 海洋与湖沼, 2002, 33(6): 577-582 [Jia Jianjun, Gao Shu, Xue Yunchuan. Grain-size parameters developed from graphic and moment methods—a comparative study [J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 2002, 33(6): 577-582]
- 13 Gao Shu, Collins Michael A. A critique of "Mclaren Method" for defining sediment transport paths [J]. Journal of Sedimentary Petrology, 1991, 61: 143-146
- 14 Gao Shu, Collins Michael A. Net sediment transport pattern inferred from grain size trends based upon definition of "transport Vectors" [J]. Sedimentary Geology, 1992, 81(3/4): 47-60
- 15 Gao Shu. A Fortran program for grain size trend analysis to define net sediment transport pathways [J]. Computer & Geosciences, 1996, 22(4): 449-452
- 16 Point E, Meay Y, Thomas M, et al. The application of geostatistics in defining the characteristic distance for grain size trend analysis [J]. Computer & Geosciences, 2006, 32: 360-37
- 17 Folk R L, Andrews P B, Lewis D W. Detrital sedimentary classification and nomenclature for use in New Zealand [J]. New Zealand Journal of Geology and Geophysics, 1970, 13: 937-968
- 18 Blair T C, McPherson J G. Grain-size and textural classification of coarse sedimentary particles [J]. Journal of Sedimentary Research, 1999, 69(1): 6-19
- 19 刘杏林, 赵焕庭, 郑德延, 等. 深圳湾的演变与开发利用 [J]. 热带海洋, 1988, (1): 48-56 [Liu Xinglin, Zhao Huanqing, Zheng Deyan, et al. The evolution and development-utilization of Shenzhen bay [J]. Tropical Oceanology, 1988, (1): 48-56]
- 20 陈耀泰. 珠江口沉积分区 [J]. 中山大学学报: 自然科学版, 1995, 34(3): 109-114 [Chen Yaotai. Sedimentation divisions of Pearl River mouth [J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni Natural Sciences, 1995, 34(3): 109-114]
- 21 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: 171-185
- 22 汪亚平, 高抒, 贾建军. 胶州湾及其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]

- 23 王琳, 陈上群. 深圳湾自然条件特征及治理应注意的问题 [J]. 人民珠江, 2001(6): 4-7 [Wang Lin, Chen Shangqun. Features of natural condition of Shenzhen Bay and problems needed to pay attention to during improvement [J]. Pearl River, 2001(6): 4-7]
- 24 张淑珍, 孟伟. 深圳湾物理自净能力的研究 (iv) 潮流和浓度场的模拟 [J]. 海洋学报, 1987, 9(4): 413-419 [Zhang Shuzhen, Meng Wei. The study of the physical self-purification in Shenzhen Bay (iv) modeling the current and concentration fields [J]. Acta Oceanologica Sinica, 1987, 9(4): 413-419]
- 25 林瑞芬, 闵育顺, 卫克勤, 等. 珠江口沉积柱 ^{210}Pb 法年龄测定结果及其环境地球化学意义 [J]. 地球化学, 1998, 27(5): 401-411 [Lin Ruifen, Min Yushun, Wei Keqin, et al. ^{210}Pb -dating of sediment cores from the pearl river mouth and its environmental geochemistry implication [J]. Geochimica, 1998, 27(5): 401-411]
- 26 北京大学, 汇亚环保顾问公司, 环境科学顾问(亚洲)有限公司. 深港治理深圳河工程环境评估研究 [R]. 一期工程评价报告, 1995 [Peking University, Huaya environmental protection consultant Environmental Sciences Consultant (Asia), The environmental evaluation of the engineering treatment for the Shenzhen River [R]. The First Stage Report, 1995]

Sediment Grain Size Characteristics and Transport Patterns in the Northwestern Shenzhen Bay, China

MIN Feng-yang¹ WANG Ya-ping¹ ZUO Ping¹ LIU Yun-ling¹ WU Xiang-bai²

(1. Key Laboratory for Coast and Islands Development, Ministry of Education, Nanjing University, Nanjing 210093

2. College of Oceanography and Environment Sciences, Xiamen University, Xiamen, Fujian 361005)

Abstract Surface sediment samples were collected in the northwestern Shenzhen Bay, China, and then analyzed using by Mastersize 2000 and sieving to obtain grain size data. The results indicate that the silt sediment covers the North Bay with little poorly sorting and poorly sorted coarse sand and gravel in some areas. In order to use the grain size trends analysis model, the geostatistic method is used for the determination of characteristic distance. The geostatistic results are associated with the some "normal" or "abnormal" grain-size parameters in the study area. A variation range is remarkably determined after eliminating some "abnormal" values, which could be considered as the characteristic distance. The grain size trends analysis shows that sediment transport northeastwards in the west bay, and westwards in the Shenzhen River estuary area. Thus, the near shore area adjoining the north coast becomes a net sediment transport converge area. This pattern is highly consistent with the local hydrodynamics. Furthermore, ^{210}Pb dating result suggests that the sedimentation rate in this area is much higher than other area in the bay, which is consistent with the results of grain size trends analysis.

Key words grain size parameters, geostatistics, grain size trend analysis, sedimentation rates, Shenzhen Bay