

粒径趋势分析对长江南支口外沉积物运输的指示意义

王国庆^{1,2}, 石学法^{1,2}, 刘焱光^{1,2}, 王昆山^{1,2}

(1. 国家海洋局第一海洋研究所, 山东 青岛 266061; 2. 国家海洋局第一海洋研究所 海洋沉积与环境地质国家海洋局重点实验室, 山东 青岛 266061)

关键词: 粒度参数; 粒径趋势分析; 长江口; 沉积物运输

中图分类号: P713; P736.2 文献标识码: A 文章编号: 0253-4193(2007)06-0161-06

1 引言

沉积物粒径趋势分析是自 20 世纪 80 年代逐步发展起来的一种粒度分析方法, 其核心是从沉积物粒度参数的空间分布变化规律中提取沉积物净输运方向的信息^[1]. 这一方法已经成功地被应用于河流体系、湖泊、海岸带、港口、河口乃至陆架、海底峡谷等多种沉积环境中进行沉积物输运趋势的分析^[2-11]. 目前将该方法直接应用于大河三角洲沉积物体系来探讨沉积物在三角洲体系内部的输运趋势的研究还较少见.

本文选择目前比较成熟的 Gae-Collins 粒径趋势分析方法^[6], 在长江南支口外的现代长江三角洲区域进行粒径趋势分析, 其意义在于: 长江南支口外区域现为长江入海物质的主要输运通道, 也是长江入海物质的主要沉积场所, 了解该区域内沉积物的输运趋势, 对于探讨长江三角洲的现代沉积作用有着直接的指示意义.

2 研究区概况及分析方法

2.1 研究区概况

本文的研究区位于长江南支口门之外, 水深范围为 3~50 m (见图 1). 海底地形整体呈西北高东南低的态势, 由长江径流冲刷形成的河槽状地形发育. 5~10 m 等深线为一水下平台, 坡度较小, 不足 1/

10 000; 10 m 等深线以外海底坡度变陡, 可达 7/10 000.

长江口河口砂坝以东主要为正规半日潮, 潮流主要为顺时针方向的旋转流, 落急和涨急(潮流椭圆长轴)方向主要为东南偏南—西北偏北向, 在 10 m 等深线附近为东南—西北向, 并主要为旋转流; 河口砂坝以西为非正规半日浅海潮, 潮流为往复流, 流向大致与河轴方向一致, 主要为东南—西北向; 河口砂坝区域属于旋转流向往复流的转变过渡区域^[12].

2.2 分析方法

本文选用的样品为 2004 年 12 月 1~25 日取自研究区的 488 个底质沉积物样品(见图 1). 采样网格为 3 km × 3 km 的正方形网格. 除砂质沉积区样品用抓斗式取样器采取外, 其余均用箱式取样器采取. 用于粒度分析的样品控制在海底 0~5 cm 以深的范围内采取. 室内分析流程如下: 取适量样品置于烧杯中, 加入 15 mL 3% 的双氧水浸泡 24 h, 去除有机质, 然后加入 5 mL 3 mol/dm³ 的稀盐酸浸泡 24 h 去除沉积物中的钙质胶结物及生物贝壳, 其后将样品进行反复离心、洗盐直至溶液呈中性为止. 处理后的样品经超声波振荡分散后再上机测试. 粒度分析所用仪器为英国 Malvern 公司生产的 Mastersizer 2000 型激光粒度仪, 测量范围为 0.02~2 000 μm, 重复测量的相对误差小于 3%. 粒级统一使用尤登-温德华氏等比值 Φ 粒级标准表示, 对于平

收稿日期: 2006-12-29. 修订日期: 2007-05-10.

基金项目: 国家海洋局“908”专项资助项目(908-02-02-05); 国家自然科学基金资助项目(40431002; 40606017).

作者简介: 王国庆(1976—), 男, 湖北省荆门市人, 博士后, 从事海洋沉积地质学研究. E-mail: gqwang@fio.org.cn

均粒径、分选系数、偏态等粒度参数采用矩法进行计算^[13]。考虑到采样网格的“边缘效应”^[10]及规则正

方形采样网格的要求,仅选用图 1 中虚线框范围内的 306 个样品进行粒径趋势分析。

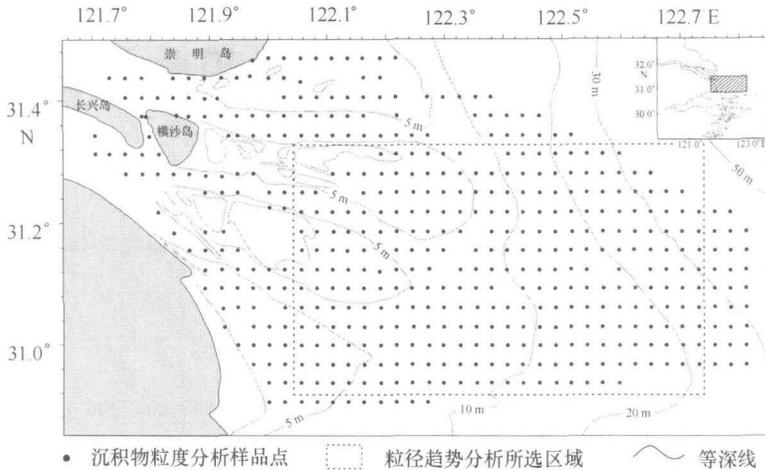


图 1 沉积物粒度趋势分析所选择样品点

3 结果和讨论

3.1 研究区沉积物粒度参数变化特征

研究区内的表层沉积物粒度参数的平面分布如图 2 所示。平均粒径为 $2.50 \sim 7.66$ ，平均值为 6.05 ，以中、细粉砂质沉积物为主。从平均粒径的区域分布来看，长江三角洲前缘区平均粒径相对较粗。4 等值线所圈闭的砂质沉积区域主要分布于九段沙、横沙浅滩、崇明东滩及北港河道内，6 以上的中、细粉砂沉积物主要分布于前三角洲、南港至南汇边滩一线的近岸区域，在河道内以及河口砂坝间的局部区域也有零星的分布。分选系数为 $0.87 \sim 2.51$ ，平均值为 1.73 ，分选性大致为中等至较差。从其区域分布特征看，河口砂坝的分选性相对要高，分选系数在 1.5 以下，这是由于河口砂坝区是三角洲体系中水动力条件最强的区域，反复的筛选作用使该区域内沉积物的分选性相对要高。研究区内偏态的变化范围为 $-1.88 \sim 2.56$ ，平均值为 1.37 ，大部分站位的偏态值大于 0.5 ，属于正偏态的范畴。从其区域分布特征看，正偏态幅度较大的站位出现在河口砂坝以及北港的河道砂沉积区域，而负偏态的样品则零星分布于研究区内。

3.2 粒径趋势分析结果

在 Gao-Collins 粒径趋势分析方法中特征距离的选择对分析结果有着显著的影响。本文以 0.01° 为间隔，取 $0.03^\circ \sim 0.12^\circ$ 的数值作为特征距离进行

了粒径趋势矢量的计算，并做对比分析，结果表明，当特征距离分别取 $0.03^\circ, 0.06^\circ, 0.09^\circ, 0.12^\circ$ 时所计算的结果比较有代表性。从图 3 可以看出，当特征距离取 0.03° ，即近于或等于采样的间距时，对绝大部分样品点而言，由于参与比较和矢量合成的相邻点太少，得出的粒径趋势矢量多沿东—西或南—北向排列，并在部分站位为“0 值”。当特征距离取 0.06° 时，趋势矢量在局部区域呈现出一定的规律性，但从整体上看，趋势矢量指向的规律性仍不太明显。当特征距离取 0.09° 时，研究区内沉积物的输运有两个明显的趋势：由长江口向外，沉积物向东南向由河口向陆架输运，大致在 122.2°E ，一部分沉积物转而向南输运，输运方向指南汇边滩至杭州湾一线，另一部分沉积物向东输运，至 122.5°E 之后逐渐转而向东北方向输运；在研究区的东南角，沉积物有由东南向西北方向，即由陆架向河口区的输运趋势，在 122.6°E 附近这一输运趋势也转化为向北和向西的两种输运趋势。在以 31.5°N ， 122.4°E 为中心的区域，受上述两种相反方向上的输运趋势的影响，趋势矢量的指向较为混乱，大致呈逆时针方向排布的规律。从整体上看，在这一特征距离下研究区内沉积物呈现两种截然相反的输运趋势，但从其分布的区域面积看，仍以河口向陆架的输运趋势为主。当特征距离增加至 0.12° 时，上述输运趋势的规律性更明显，趋势矢量的分布异常明显，而且没有明显的噪声点。

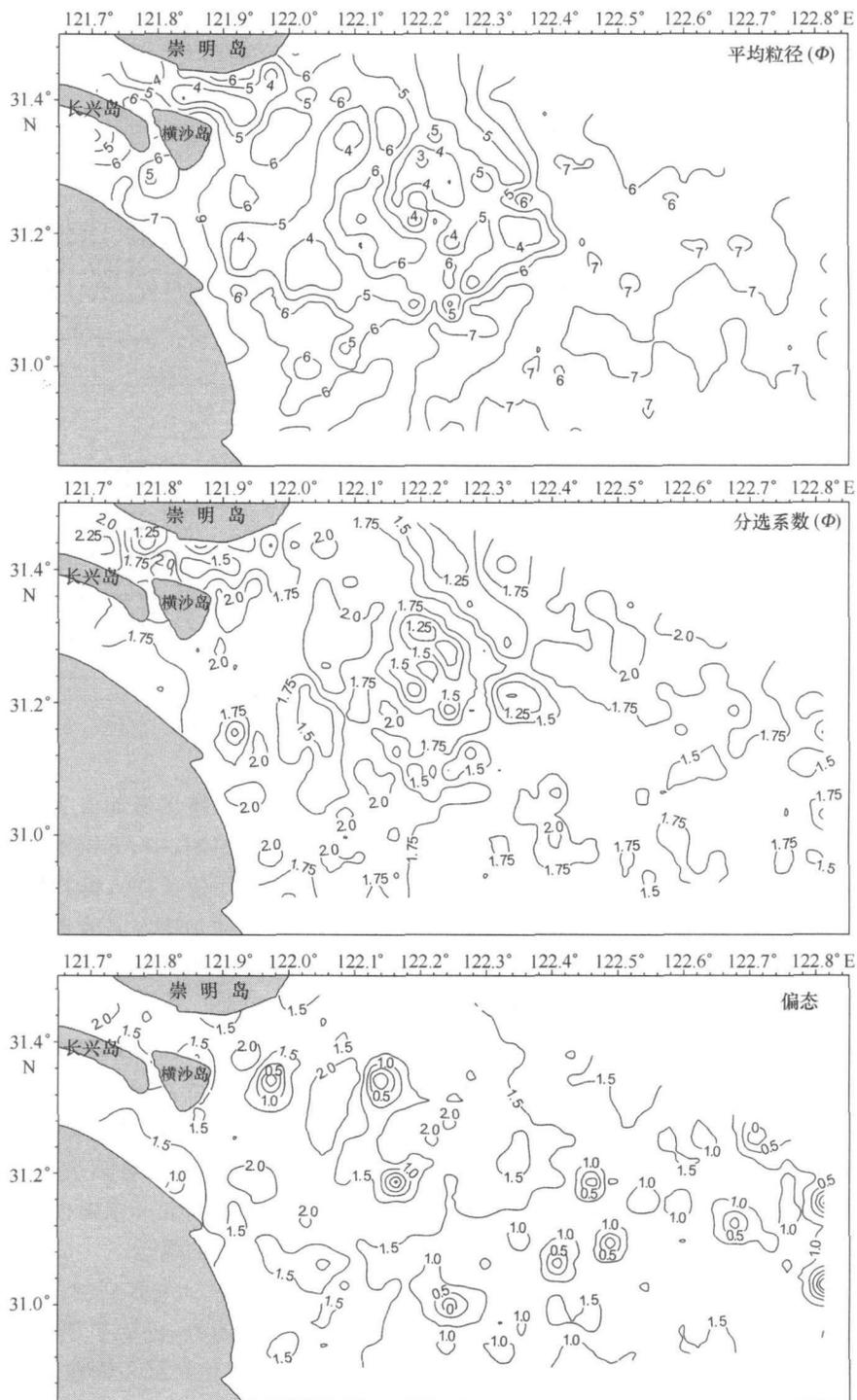


图2 沉积物粒度参数的平面分布

3.3 结果的显著性检验

一般来说,特征距离应参考研究区内的采样间距进行选择。Gao 和 Collins^[6]认为特征距离应以最大采样间距为宜,贾建军等^[4]则认为特征距离的选择应该略大于采样间距的 $\sqrt{2}$ 倍为宜。对于同一区域、同一采样间距的样品,特征距离的不同选取也可

能会引起计算出的粒径趋势有明显的差异。对于本文的计算结果,当特征距离为 0.09°时才能得到有明显指示意义的趋势矢量分析结果。这一特征距离已经相当于采样间距的 3 倍了,如此大的特征距离是否有效还需要对计算出来的结果进行必要的显著性检验。

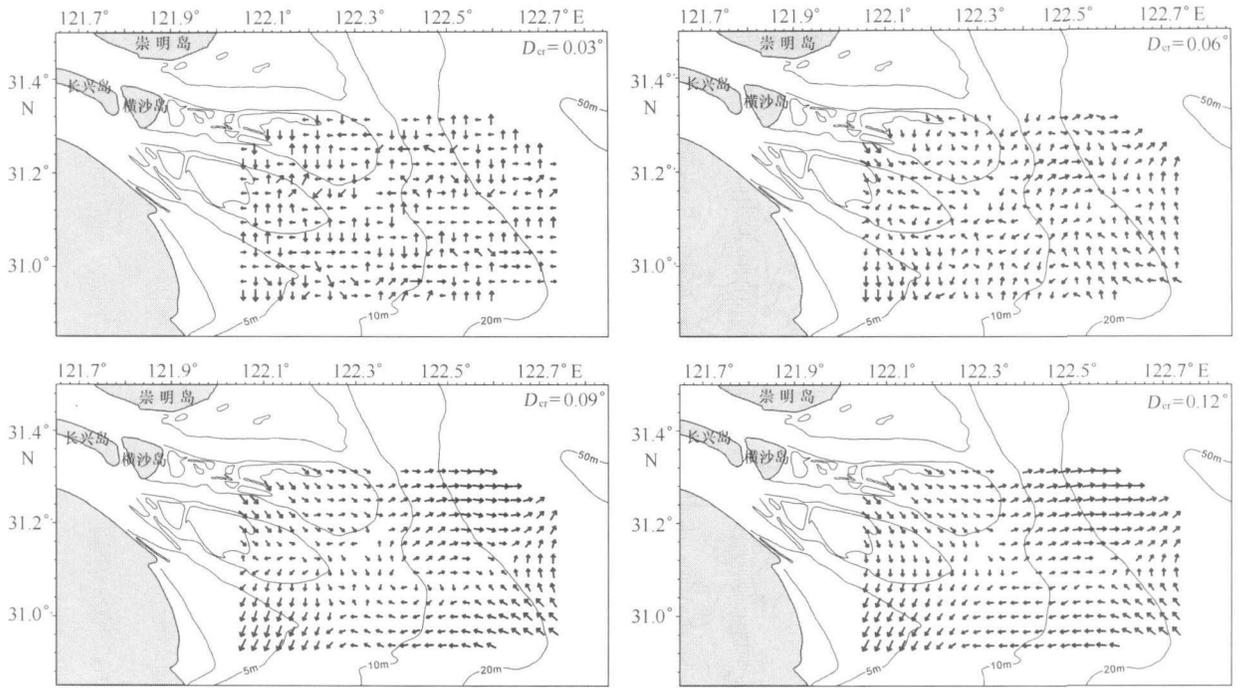


图3 不同特征距离(D_{cr})下粒度趋势的分析结果

本文按照 Gao 和 Collins^[6] 提出的检验方法对不同特征距离下的计算结果进行了检验。从检验结果看(见图 4), 样品的粒度参数经随机排列后计算出的特征长度的统计分布接近于正态分布, 略有负偏。特征矢量长度(L)及与之对应的 99% 置信区间的特征矢量长度(L_{99})均随着特征距离的增大而增加。当特征距离取 0.06° 时, 特征矢量长度仍远小于 99% 置信区间的特征矢量长度, 这表明在此特征距离下所计算出的趋势矢量不具有显著性, 仍属于“噪声”的范畴。当特征距离取 0.09° 时, 特征矢量长度才稍大于 99% 置信区间的特征矢量长度, 对应的趋势矢量开始具有显著性, 趋势矢量的平面分布显示出一定的规律性。在特征距离为 0.12° 时, 特征矢量长度明显大于 99% 置信区间的特征矢量长度, 所对应的趋势矢量在空间上具有明显的规律性。这一检验方法证明在本文的研究区内, 特征距离取 0.09° 是合适的, 所获取的沉积物运输趋势也是比较有效的。

3.4 粒径趋势分析结果的意义

本文进行粒径趋势分析的区域涵盖的是长江南支口外三角洲前缘至前三角洲区域。在这一区域内对底质沉积物的运输与沉积起着主导作用的是长江径流和潮汐。在河口砂坝以西区域, 径流使落潮流的作用明显强于涨潮流, 落潮流为该区域的优势流, 沉积物主要沿河槽向外输运。由河口砂坝向东涨潮流

的作用逐渐强于落潮流而成为优势流^[14], 表层水体受长江冲淡水控制, 中、下层水体受潮流控制^[15]。长江冲淡水的作用使长江入海物质中的细颗粒组分以悬浮物的形式向陆架方向输运, 而中、下层水体中涨潮流的作用使沉积物呈现出由陆架向河口地区的输运趋势。实测资料显示^[16, 17], 在落潮流占优势的区域, 洪、枯季均是由河口地区向陆架净输沙; 在以涨潮流占优势的区域, 枯季为陆架向河口地区净输入沙, 而在夏季由河口向外逐渐由向陆架净输出沙转变为向河口净输入沙。在研究区内潮流总体的涨落急方向基本是沿西北—东南向^[14], 因此沉积物主要沿西北—东南方向输运。

由粒径趋势所观察到的沉积物输运还有沿东、南方向运移的趋势, 反映了研究区内水动力条件在洪、枯两季的变化对沉积物输运的影响。在洪季长江径流的作用增强, 由径流和落潮流控制的区域可达 122.5°E , 其后长江冲淡水的一部分转而流向东北, 另一部分向西南进入杭州湾^[15], 因此沉积物也呈现出向东、向南方向的输运趋势。枯季长江径流量小, 长江径流出长江口后与黄海沿岸流向南混合成闽浙沿岸流, 使长江口沉积物向南输运。

根据长江口和杭州湾的余流数值模拟结果, 冬季长江口的拉格朗日余流有利于长江口入海物质向杭州湾的扩散^[18], 这与由粒径趋势分析所得

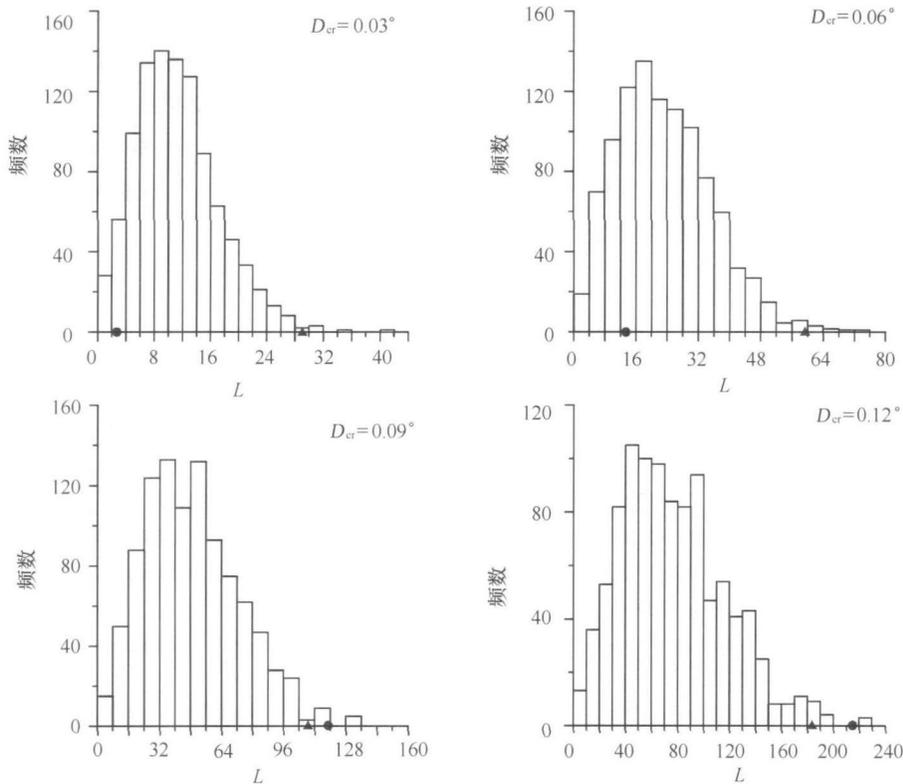


图4 不同特征距离下特征矢量长度值的频数分布

● L 为某一特征距离下由 Gao-Collins 方法计算出的特征矢量长度, ▲ L_{99} 为某一特征距离下将样品点随机重排后计算出的多个特征矢量长度值的 99% 置信区间的上限

到的 122.5°E 以西的沉积物运输趋势是比较一致的, 但由粒径趋势分析得出的研究区内 122.5°E 以东存在的沉积物由陆架向河口的运输趋势在拉格朗日余流的模拟结果中却没有能够得到很好的体现. 从理论上讲, 拉格朗日余流的空间分布对于物质的运输有着比较明显的指示意义^[19], 然而这一方法与由粒径趋势分析方法得出的结果之间却有一定的差异. 这主要是由于以下两个原因. 其一, 研究时限的不一致. 长江河口地区水动力条件通常较强, 活动层偏厚, 表层沉积物多经历了反复的再悬浮过程才最终沉积下来. 从已有的研究成果来估算^[6], 本文将粒径趋势分析的样品限定于表层 $0\sim 5\text{ cm}$, 实际上是将样品控制在活动层的范围内. 这一活动层内沉积物粒度的组成体现了不同季节水动力条件综合作用的结果, 由粒径趋势分析得出的结果实际上反映的是一个比较长时间尺度内的沉积物运输趋势. 现有的拉格朗日余流模拟结果只是根据冬季的资料进行的模拟, 反映的是冬季长江口外余流及其对物质运输的作用, 这与由粒径趋势分析方法得出的结果不在一个时间尺度内. 其二, 两者的理论基础不同. 拉

格朗日余流的结果是基于表层质点跟踪的资料来进行计算的, 这一方法实际上反映的是水动力对于沉积物的运输作用, 而不涉及到沉积物的沉积作用. 粒径趋势分析方法是根据沉积物的粒度特征来反演其运输过程, 沉积物所经历的沉积作用过程对于分析的结果有着至关重要的作用. 一般来说, 沉积物在海洋环境中的运输过程除受到水动力条件的控制外, 还普遍受到絮凝作用的影响. 由絮凝作用引起的沉积物运输趋势上的变化在水动力条件的分布格局中得不到体现, 同时部分沉积物组分在运输过程中始终不与底质沉积物发生交换或沉积, 而是以悬浮形态进行搬运, 它的粒度沿程变化就不会反映在底质沉积物中^[10]. 因此, 底质沉积物粒度的空间分布格局并非严格体现了水动力条件的分布格局, 这就导致拉格朗日余流的模拟结果与粒径趋势分析结果并不完全一致.

4 结论

(1) 在不同的特征距离下应用 Gao-Collins 粒径趋势分析方法计算了研究区内的粒径趋势矢量, 结合

显著性检验, 认为特征距离为 0.09° 时所得的粒径趋势矢量结果可以反映研究区内沉积物的输运趋势。

(2) 粒径趋势分析结果揭示了研究区内有由河口向陆架和由陆架向河口的两种输运趋势, 反映的分别是落、涨潮流为优势流的区域内沉积物输运的不同趋势。径流、潮流相互作用的季节性变化使沉积

物呈现出向东、向南方向的输运趋势。

(3) 粒径趋势分析的结果与研究区内拉格朗日余流的模拟结果总体上比较符合, 但由于两者所考虑的时间尺度不一样、基于的原理不一样, 因而两者的分析结果有着一定的差异。

参考文献:

- [1] GAO Shu, 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.
- [2] ASSELMAN N E. Grain size trends used to assess the effective discharge for flood plain sedimentation, River Waal, the Netherlands [J]. *Journal of Sedimentary Research*, 1999, 69(1): 51—61.
- [3] 刘高峰, 沈焕庭, 王永红, 等. 长江口涨、落潮槽底沙输移趋势探讨[J]. *海洋通报*, 2003, 22(4): 1—7.
- [4] 贾建军, 程鹏, 高抒. 利用插值试验分析采样网格对粒径趋势分析的影响[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2004, 24(3): 135—141.
- [5] 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.
- [6] GAO Shu, COLLINS M. Net sediment transport patterns inferred from grain-size trends, based upon definition of “transport vectors” [J]. *Sedimentary Geology*, 1992, 80: 47—60.
- [7] 吴加学, 沈焕庭. 黄茅海河口湾泥沙输移研究——兼论 McLaren 模型在河口中应用的问题[J]. *泥沙研究*, 1999, (3): 26—32.
- [8] GAO Shu, COLLINS M. Analysis of grain size trends, for defining sediment transport pathways in marine environments [J]. *Journal of Coastal Research*, 1994, 10(1): 70—78.
- [9] LIU T James, LIU Kue-jang, HUANG Jeff 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.
- [10] 程鹏, 高抒. 北黄海西部海底沉积物的粒度特征和净输运趋势[J]. *海洋与湖沼*, 2000, 31(6): 604—615.
- [11] 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, (6): 54—58.
- [12] 沈焕庭, 潘定安. 长江河口最大浑浊带[M]. 北京: 海洋出版社, 2001. 15—31.
- [13] MCMANUS J. Grain size determination and interpretation [A]. TUKER M. *Techniques in Sedimentology* [M]. Oxford: Blackwell, 1988. 63—85.
- [14] 董永发, 丁文盛. 长江河口沉积物粒度特征与水动力的关系[A]. 陈吉余, 沈焕庭, 恽才兴, 等. 长江河口动力过程和地貌演变[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1988. 314—322.
- [15] 潘定安, 胡方西, 周月琴, 等. 长江河口夏季的盐淡水混合[A]. 陈吉余, 沈焕庭, 恽才兴, 等. 长江河口动力过程和地貌演变[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1988. 151—165.
- [16] 左书华, 李九发, 万新宁, 等. 长江河口悬沙浓度变化特征分析[J]. *泥沙研究*, 2006, (3): 68—75.
- [17] 茅志昌, 潘定安, 沈焕庭. 长江河口悬沙的运动方式与沉积形态特征分析[J]. *地理研究*, 2001, 20(2): 170—177.
- [18] 朱首贤, 丁平兴, 史峰岩, 等. 杭州湾、长江口余流及其物质输运作用的模拟研究: II. 冬季余流及其对物质的输运作用[J]. *海洋学报*, 2000, 22(6): 1—12.
- [19] 冯士筌, 鹿有余. 浅海 Lagrange 余流和长期输运过程的研究——一种三维空间弱非线性理论[J]. *自然科学进展——国家重点实验室通讯*, 1993, 3(2): 126—132.

Grain-size trend analysis on the south branch of the Changjiang Estuary in China and its implication to sediment transportation

WANG Guo-qing^{1,2}, SHI Xue-fa^{1,2}, LIU Yan-guang^{1,2}, WANG Kun-shan^{1,2}

(1 *First Institute of Oceanography, State Oceanic Administration, Qingdao 266061, China*; 2 *Key Laboratory of Marine Sedimentology and Environmental Geology of State Oceanic Administration, First Institute of Oceanography, State Oceanic Administration, Qingdao 266061, China*)

Key words: grain-size parameters; grain-size trend analysis; Changjiang Estuary in China; sediment transport