

文章编号: 100020550(2004)0320487207

珠江河口沉积物粒度特征及其对底层水动力环境的指示¹

彭晓彤¹ 周怀阳¹ 叶 瑛² 陈光谦¹

1(中国科学院广州地球化学研究所 广州 510640) 2(浙江大学地球科学系 杭州 310027)

摘要 珠江口伶仃洋及邻近海域沉积物粒级变化大。频率分布曲线形态的变化揭示了珠江河口不同区域泥沙来源的差异。在平面分布上,粗粒级含量从西北部和北部向东南部迅速降低,而细粒级含量高值往往出现在河口中部。表层沉积物平均粒径梯度变化方向与珠江口悬浮物的运移方向大致吻合。反演获得的底层海流不同区域的优势速度与实测资料相符。两者较好地指示了沉积物多年平均优势海流速度和方向,表明利用沉积物粒度数据比较成功地反演出了珠江口沉积物堆积前的搬运水动力环境。

关键词 珠江口 沉积物粒度 反演 水动力环境

第一作者简介 彭晓彤 男 1973年出生 副研究员 地球化学

中图分类号 P512.2 **文献标识码** A

粒度分析是揭示海洋沉积环境水动力状况的主要手段。在同一沉积环境中,底质沉积物粒度分布的空间变化,反映了多种动力搬运的综合,包含着河口沉积水动力条件的重要信息(包括环境类型、物质运动方式、沉积物输运方向和速度等)^[1~10,12]。近年来,沉积物粒度参数被广泛应用于判别海洋沉积物输运方向和底层水流速反演的研究之中,为海洋沉积动力学的研究提供了良好的研究手段^[1~4]。有关珠江河口泥沙沉积学的研究,自上世纪八十年代以来就有报道,研究内容侧重于对珠江河口沉积相与沉积分区的研究^[5~7]。周蒂曾用统计分析方法对珠江口外现代沉积物运移方向进行了研究^[8],但至今尚未见有利用沉积物粒度参数对珠江口伶仃洋海域进行底层水沉积动力学反演的研究。本文将在探讨珠江口沉积物粒度特征的基础上,利用沉积物粒度参数进行沉积动力学反演,以揭示珠江口伶仃洋及邻域底层水在较长时间内的平均或优势水动力参数。

1 采样与方法

1999年夏季,香港科技大学和国家海洋局第二海洋研究所联合开展了/珠江河口污染计划0(PREPP)项目的海上调查和采样工作。本次研究借助于此航次,在珠江河口布设了25个站位,分别位于伶仃洋和河口外近海(见图1)。其中12个站位采集

了沉积柱样品,其它站位采取表层沉积物。

表层沉积物样品用箱式采样器采集。样品采集上来后,用塑料勺在箱式采样器中仔细取上部0~1 cm的沉积物,代表表层沉积物。沉积物柱状样品用沉积物多管采样器采集。采集上来的沉积柱长度在30~50 cm之间。柱状样品采集后,用塑料小刀沿纵向剖开两份,每隔1 cm或2 cm进行分样。将分好的分层样品装入清洁的聚乙烯袋中,扎紧袋口,于4 e以下冷冻贮存。

将聚乙烯袋中的湿样转到洗净并编号的瓷蒸发皿中,于50 e下烘干(24小时),用电子天平称取少量(0.5 g)沉积物置于500 mL烧杯中,加入10%的H₂O₂100 mL微加热去掉有机质,静置24h后,吸取去除上层清液,加入0.05N的(NaPO₃)₆溶液10 mL,转入特制试管中,用超声波分散10 mins。用马尔文MAM5005型激光粒度分析仪进行测定。测量范围为0.05~880 Lm,相对误差小于3%。流速和流向等数据通过科考船上配备的锚系现场原位测定。

2 结果与讨论

2.1 沉积物粒度参数统计特征

珠江口表层沉积物平均粒径在2.417~223.2 Lm之间变化,中值粒径在3.148~243.2 Lm之间变化。样品粒级变化大,从细砂到粘土均有。平均而

¹ 中国科学院知识创新领域前沿项目(GIGCX-03-07)与香港科技大学珠江河口污染计划(PREPP)项目联合资助1
收稿日期:20032025;收修改稿日期:20032012

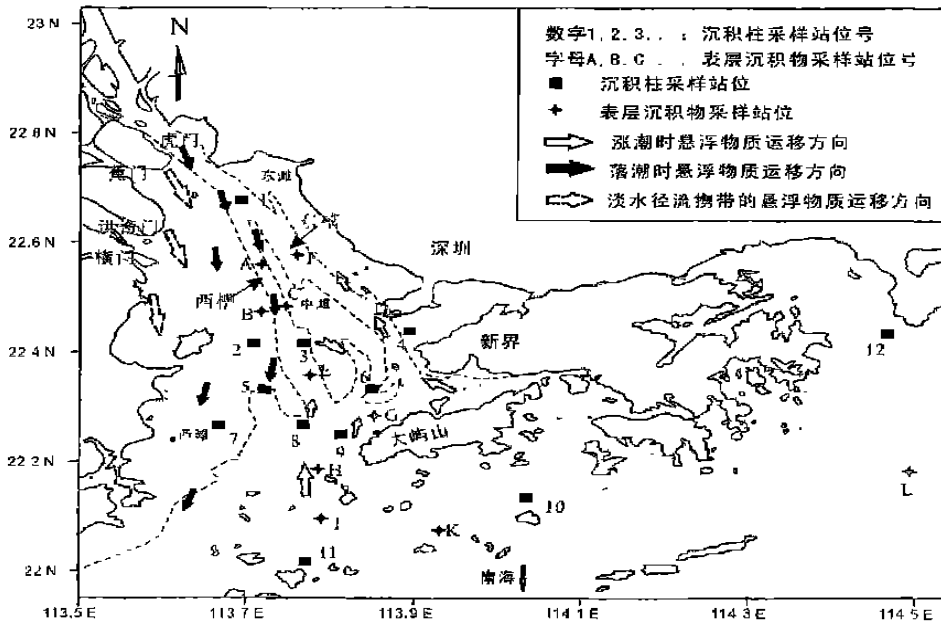


图1 研究区域和采样站位

Fig. 1 The study area and sampling stations

言,口外近海粒度粗于河口中部,河口北部又粗于口外近海。深槽沉积物粒度粗于浅滩。中值粒径与平均粒径存在着较好的相关关系,相关系数达0.900。相对于细沉积物而言,粗沉积物的分选系数较小(如1号和A号站位),反映了水动力越强,沉积物越粗,分选性越好的原理。从偏态系数来看,珠江口沉积物普遍出现偏态系数 < 0 的现象,说明沉积物的组成上有一个粒径区间较宽的粗粒部分。其形成主要是因为强径流和潮流的双重影响下,水流的搅动淘洗作用使细颗粒泥沙难以沉降,加之底部的再悬浮作用,使已沉积下来的部分细粒泥沙被掀起带走,留下偏粗的沉积物。1号和A号站位表层沉积物尖度值极高(分别为23.84和11.42),属于极尖窄范围,从另一面也反映分选较好。其他站位表层沉积物峰度表现相对较平缓。

2.2 频率分布曲线

珠江河口区的泥沙来源有三:一为径流挟带的下行泥沙,二为随潮上朔的海域来沙,三为区域内部搬运的泥沙。本次研究可从频率分布曲线特征识别出这三种来源的泥沙(图2)。研究区沉积物频率分布曲线主要有单峰和双峰两种形态。单峰形态出现在1号站位表层沉积物中,沉积物平均粒径、中值和众数相差不大,分别为223.2 Lm, 243.2 Lm和245.2

Lm,表明沉积物来源单一,主要来源于珠江干流,分选好。从河口北部到伶仃洋中部,沉积物细粒组分逐渐增多,粗粒组分逐渐减少,并出现双峰形态(如A和F站位),意味着细粒组分来源大量增加。由于珠江河口底部具有强烈的再悬浮作用,通过再悬浮迁移的细粒组分主要来源于伶仃洋最大混浊带,与珠江干流输入的粗粒组分来源存在差异,因此其频率分布曲线表现为双峰形态。在伶仃洋中部(如出2,3,6号站位),粗粒组分进一步减少,而细粒组分进一步增加,并占绝对优势,平均粒径、中值和众数往往出现在细粒部分,这显然与盐、淡水混合作用下,伶仃洋中部附近最大混浊带内细粒组分大量沉降有关。再往南至口外近海(如10,11和12号站位),细粒组分开始减少,而粗粒组分却在一定程度上有所增加,频率分布曲线又表现为明显的双峰形态,表明存在一个粗粒组分输入的外在来源(海域来源),这种频率分布曲线特征与万山群岛附近存在残余砂的分布相吻合。

2.3 粒度垂直分布特征

粒度在沉积柱中的垂向变化是多种因素作用下的沉积环境变化的综合反映。从图3可以看出,伶仃洋北部虎站口附近的1号沉积柱砂质和粉砂质组含量随深度有剧烈变化。该沉积柱这种粒度垂直分布特征的形成,一方面与洪枯季输沙量、径流量和流

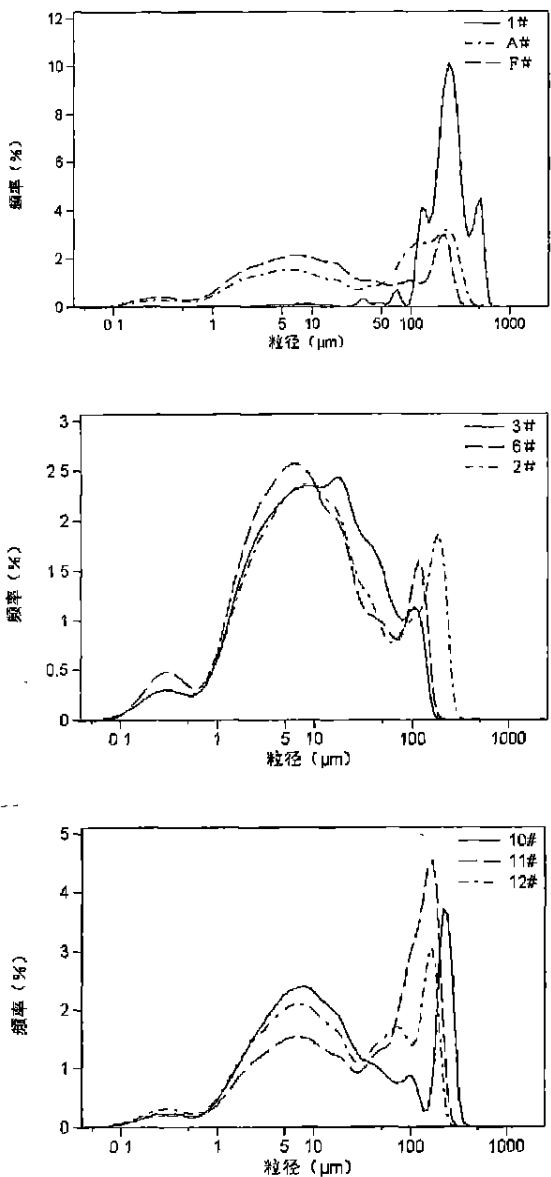


图2 表层样品的几种典型频率分布曲线

Fig. 2 Some representative frequency curve of surface sediments

速年际变化相关,另一方面也可能与近十余年来该区域附近河道的疏浚相关。伶仃洋中部沉积柱(如2, 3, 7号沉积柱)粘土含量在垂向分布上相对稳定,砂质和粉砂质含量均在一定幅度内变化。与口外近海沉积柱相比,伶仃洋中部区域沉积柱各粒级组分随深度变化幅度较大。特别是在处于槽滩交界处的沉积柱,受沉积环境变化(如洪枯季水流变化以及槽滩位置可能发生的相对位移)的影响,砂质和粉砂质相对百分含量可发生较明显的变化。口外近海沉积柱中粘土、粉砂、砂三组分含量的相对稳定,反映了受陆架

水控制之下的沉积环境的单一和稳定性。

2.4 不同粒级含量的平面分布

作出6个粒级的含量等值线图(图4),发现粗粒级(粗砂、中砂和细砂)和细粒级(极细砂、粉砂和粘土)的等值线分布特征截然不同。对于粗粒级部分,同一粒级的含量从西北部 and 北部向东南部迅速降低。粗砂和中砂主要出现在河口北部区域(淇澳岛和内伶仃岛以北区域)。细砂在整个河口均有分布,但河口北部区域和口外近海含量较高。对于细粒级部分,同一粒级的含量高值往往出现在河口中西部,粘土粒级含量的高值区明显出现在最大混浊带及附近水域,这主要与盐淡水的相互作用下最大混浊带的再悬浮和絮凝沉降作用有关。随粒级的变小(从极细砂、粉砂到粘土),细粒级部分的高值有向西南迁移的趋势。在珠江口的元素区域分布格局上,大多数微量金属元素(如Cu, Cr, Ni, Ba, V)的高值区分布于细粒组分沉积物区(河口西部最大混浊带附近);相反,低值区分布于粗粒沉积区(如河口北部),表现出明显的元素粒控效应。

2.5 平均粒径梯度变化对沉积物搬运方向的指示

沉积物平均粒径、偏态系数和分选系数是重要的沉积物粒度参数,可分别单独或组合用来进行沉积物粒径趋势分析和判别海洋沉积物搬运方向^[1,3,4,9,10]。本次研究发现平均粒径梯度变化对伶仃洋及邻域沉积物搬运方向的指示效果较好。

利用表层沉积物平均粒径作粒径梯度变化矢量图(图5),以观察粒径变化的幅度和方向。从图5可以看出,在虎门口至淇澳岛以北的伶仃洋水域,粒径梯度变化幅度最大,体现了不同粒径河流来源的泥沙在该区域的快速沉淀,反映了径流作用为该区域的主要动力之一。分辨出两个粒径梯度主要降低方向。一个从河口北部和西部向南和东南方向降低。在河口北部,平均粒径降低方向又分为两支,这与东槽和西槽位置基本吻合,反映了落潮时珠江干流水团出虎门口后的部分运移方向。粒径变化趋势还显示,河口西部向东南方向也有明显的粒径降低,这表明由于西部水道的强大的径流喷射作用,其水流与泥沙可以越过西滩与西槽,参与到中滩及东滩的物质组成。另一粒径主要变化方向是从口外近海万山群岛附近向北降低,这与底层陆架水入侵的方向相符,表明淡水径流已不是控制该区域沉积的主要因素,另一方面也反映了万山群岛附近的残余砂对珠江河口区沉积的贡献。淇澳岛和内伶仃岛以南至北纬22.66°区域,是底

层陆架盐水和淡水径流水体强烈交汇和相互作用区域,沉积物的再悬浮、再输送和再沉淀作用显著,最大混浊带亦存在于此,表层沉积物平均粒径幅度变化虽然不大,但方向相对较复杂,说明了盐淡水相互作用下沉积物沉降和输送过程的复杂性。

将图5与珠江口悬浮物的运移方向(图1)进行对比可发现,除大屿山东北部附近可能受海岸侵蚀的影响平均粒径梯度变化与陆架水入侵方向不符外,两者大致吻合,因此,珠江口表层沉积物平均粒径梯度变化方向可用来近似指示沉积物搬运方向,并可用来指示优势海流方向。

2.6 底层海流优势速度的反演

细粒组分的沉降极大地受颗粒的絮凝现象及颗粒形状等因素所影响,利用细粒组分(如粉砂和粘土)的沉降来估计水流速度可靠性较低^[2]。因此,本文利用沉积物粗粒级组分的分布特征来反演底层海流速度。

由于河口段潮流的往复特性使流速及流向均作周期性变化,故反演获取的海流速度代表的是较长时间内的平均海流速度^[11]。具体方法详见参考文献2,简述如下。

根据 Chepil 公式,求出使粗粒组分发生运动的临界剪切应力 S_c :

$$S_c = [0.66Dg(Q - Q_v)N \tan A] / (1 + 0.85 \tan A) \quad (1)$$

式中 D 、 g 、 Q 、 Q_v 、 N 和 A 分别代表颗粒直径、重力加速度、颗粒质量、海水质量、海水对颗粒的拖曳力和抬升力的平均比值和动摩擦角。在计算过程中,分别取 g 、 Q 、 Q_v 、 N 和 A 为 980、2.65、1.0、0.3 和 24。取该粒级粒度范围的中值代表颗粒直径 D 。对于粗砂、中砂、细砂和极细砂, A 分别取 7, 5, 3, 1。

根据公式 2, 公式 3, 公式 4, 分别求出实际临界剪切力 S_m , 临界磨擦速度 U_c 和雷诺数 Re :

$$S_m = S_c / T \quad (2)$$

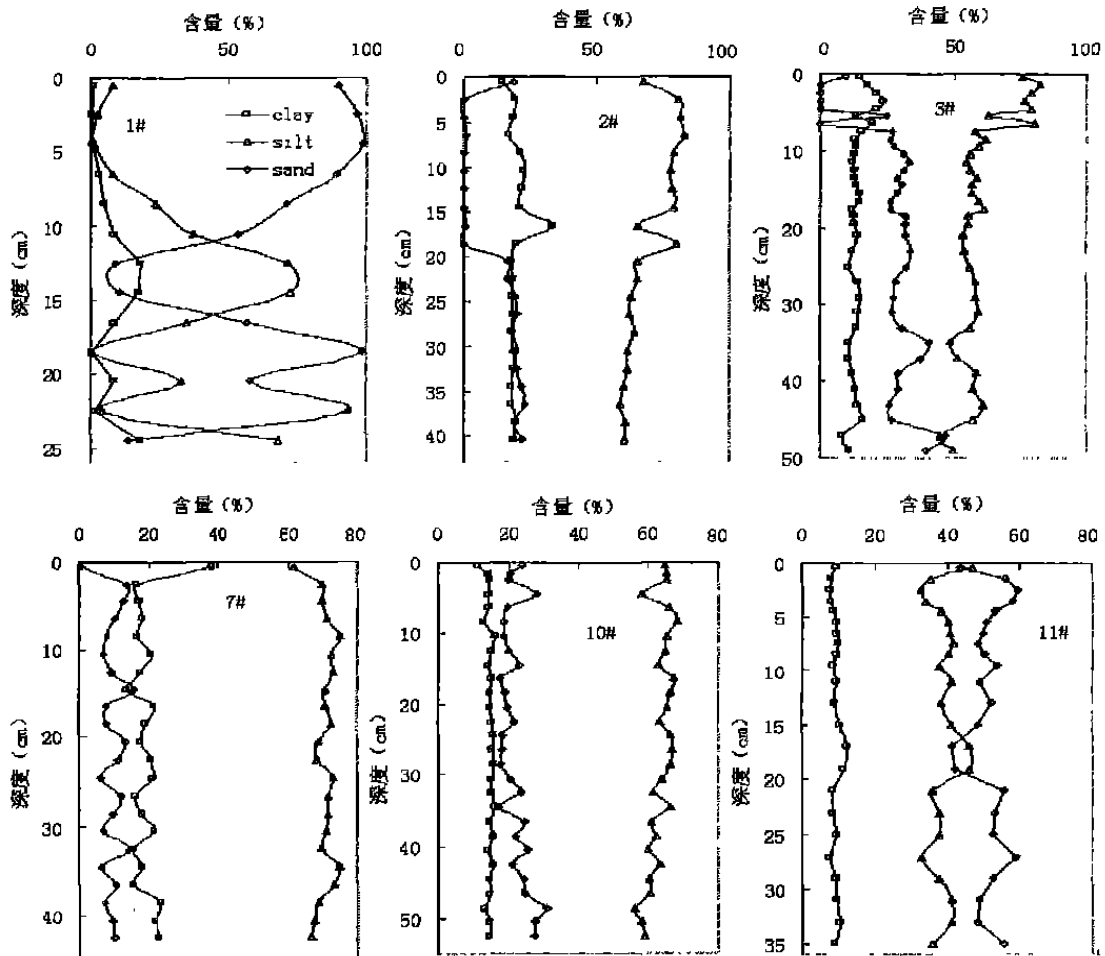


图3 珠江口沉积柱粘土、粉砂和砂三组分垂直分布

Fig. 3 The depth profile of clay, silt and sand in some sediment cores

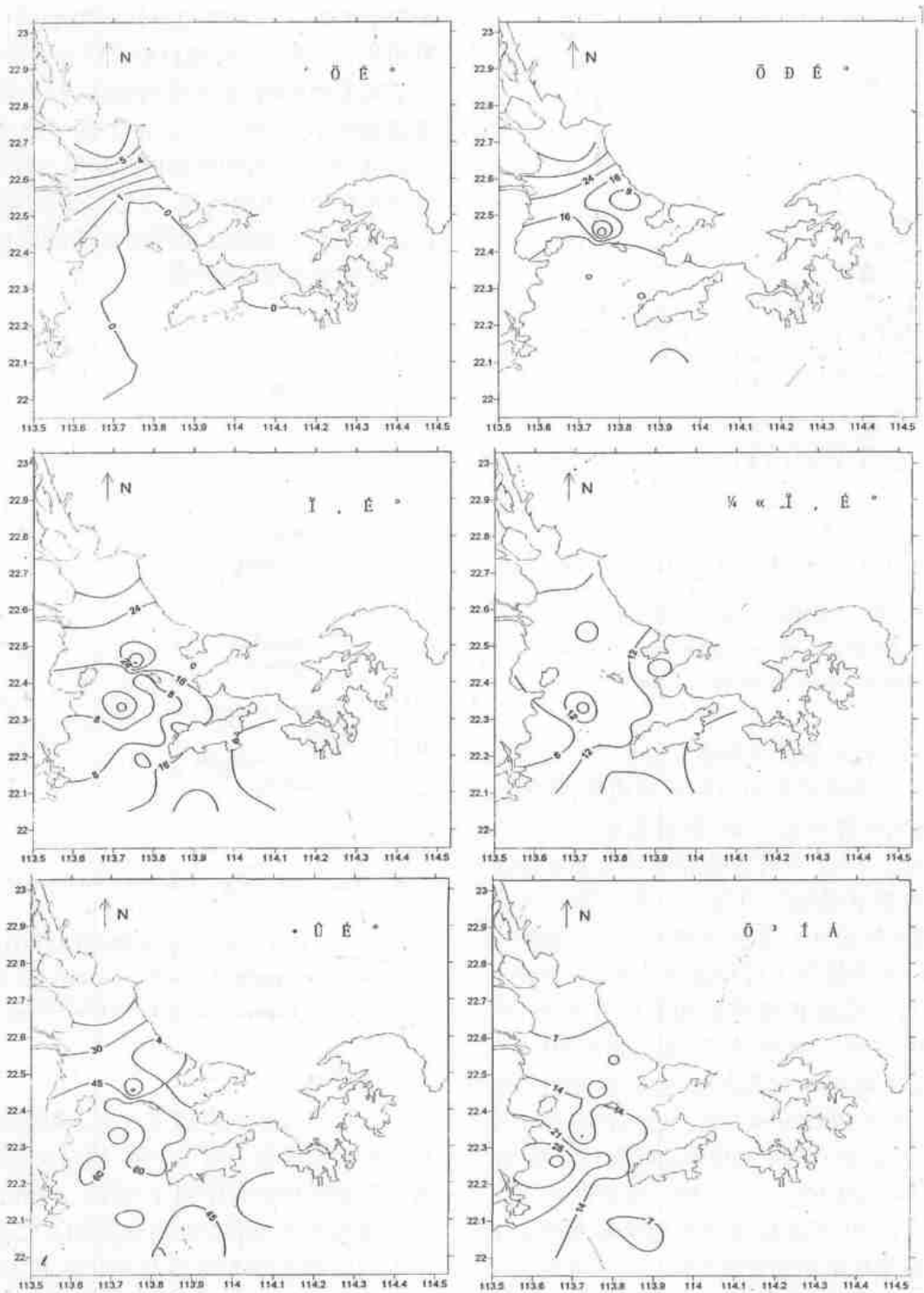


图 4 沉积物粗砂(0~ 1W)、中砂(1~ 2W)、细砂(2~ 3W)、极细砂(3~ 4W)、粉砂(4~ 9W)和粘土(> 9W)含量等值线
 Fig. 4 The distribution of several grain size components in the Pearl River estuary

$$U_c = \sqrt{S_m / Q_w} \quad (3)$$

$$Re = U_c D / M \quad (4)$$

其中紊流系数 T 取 2.5, 水的动粘度 M 取 0.012。

最后应用 von Karman-Prandtl 公式算出海底以

上高底 Z 的水流速度 U_z 。

$$U_z / U_c = 2.5 \ln(ZU_z / M) + 5.5 \quad Re < 5 \quad (5)$$

$$U_z / U_c = 2.5 \ln(Z / D) + 8.5 \quad Re > 70 \quad (6)$$

$$U_z / U_c = 2.5 \ln(Z / D) + 9.5 \quad 5 < Re < 70 \quad (7)$$

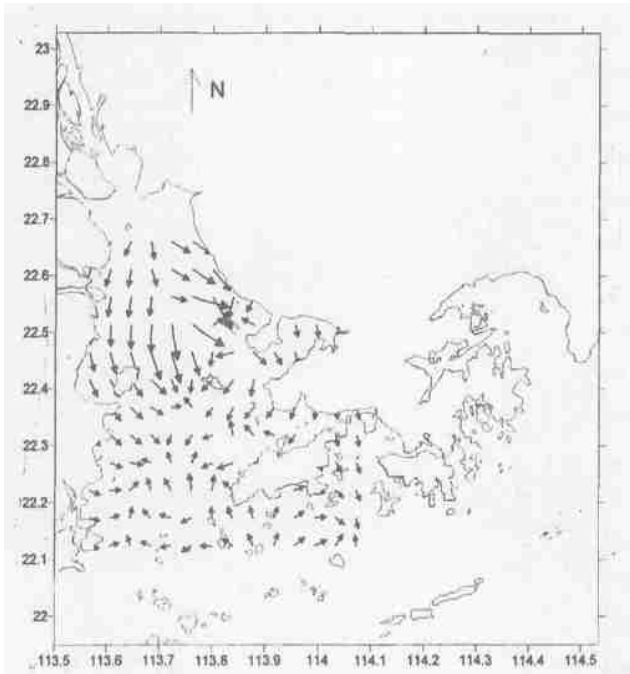


图5 表层沉积物平均粒径梯度变化

Fig. 5 The distribution of mean grain size of surface sediments in the Pearl River estuary

通过概率统计分析,可假设某粒级含量的1%等值线对应于 $T = 2.5$ 时的临界剪切力和水流速度,代表该粒级颗粒以拖曳状搬运的开始;假设某粒级含量的5%等值线对应于 $T = 2.0$ 时的临界剪切力和水流速度,代表其以跳跃状搬运的开始^[2]。将计算出的离底1 m高度的水流速度 U_z 值标于粗砂、中砂、细砂和极细砂1%和5%等值线上后叠加成一图,并重叠优势海流方向,得出底流优势速度和方向分布图(图6)。该图表明,在河口北部,底层水主要以 $50 \sim 80 \text{ cm/s}$ 左右的速度向南和东南方向运动,在虎门口底层水流速估计可达 100 cm/s 左右。进入伶仃洋中部后,由于盐、淡水的交汇使得底层水速度突然变缓,速度主要在 $13.64 \sim 49.67 \text{ cm/s}$ 之间。两股陆架水入侵也造成了伶仃洋中部底层水的平均优势方向发生变化,同一区域出现相反的优势方向。在口外近海区域,底层水的优势方向与陆架水入侵的方向一致,主要以 45 cm/s 左右的速度向北和西北方向运动。

根据 PREPP 对东经 113.749 , 北纬 22.481 站位的底层水流实测结果,底层水流速度最高为 90 cm/s 。本次研究在河口北部北纬 22.64 度附近反演获取的底层水优势水流速度为 75.75 cm/s , 在小于 90 cm/s 流速范围内,符合实际水流情况。3号站位78%的实测流速数据小于 50 cm/s , 5号站位92%的实测流速

数据小于 50 cm/s , 这与反演结果对河口中部流速估算相符合。9号站位相对靠近口外近海,在很大程度上受陆架水影响,流速相对较高,但仍有65%的实测流速数据小于 50 cm/s 。由于这些流速数据都是洪季数据,与反演得出的反映多年平均流速的底层优势水流速度相比可能要高。以上分析表明,通过沉积物粒径反演得出的底层水优势速度较好地反映了珠江口底层水流速的实际情况。

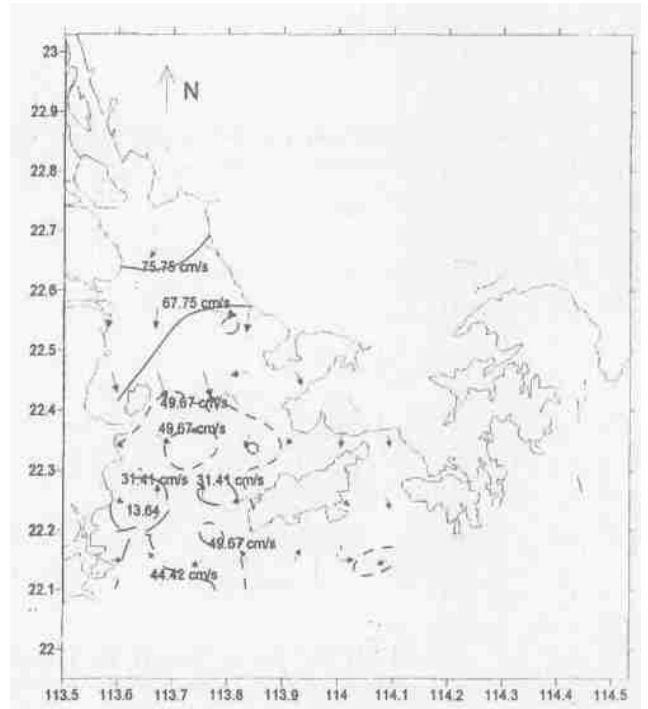


图6 珠江口优势水流速度和方向

Fig. 6 The simulated velocity and direction of predominant currents in the Pearl River estuary

3 结论

珠江口沉积物粒级变化大,从细砂到粘土均有。口外近海粒度粗于河口中部,河口北部又粗于口外近海。深槽沉积物粒度粗于浅滩。频率分布曲线和垂直分布曲线不同形态的出现及相互之间的转换反映了不同区域泥沙来源的差异和水动力环境的特点。粗砂、中砂、细砂、极细砂、粉砂和粘土等6个粒级含量等值线分布特征截然不同。在表层沉积物平均粒径梯度变化矢量图上分辨出两个粒径梯度主要降低方向。一个从河口北部和西部向南和东南方向降低。另一粒径主要变化方向是从口外近海万山群岛附近向北降低。表层沉积物平均粒径梯度变化方向与珠江口悬浮物的运移方向大至吻合,可用来近似指示珠江口沉积物搬运方向和优势海流方向。对珠江口不

同区域底层海流的优势速度的反演结果表明, 河口北部底层水主要以 50~ 80 cm/s 左右的速度向南和东南方向运动。在伶仃洋中部, 底层水流速度主要在 13.64~ 49.67 cm/s 之间。口外近海区域底层水的优势方向与陆架水入侵的方向一致, 主要以 45 cm/s 左右的速度向北和西北方向运动。以上反演获得的底层水流速度和方向基本与实测资料相符, 表明利用沉积物粒度数据较成功地反演出了珠江口沉积物堆积前的搬运水动力环境。

参考文献(References)

- 程鹏, 高抒. 北黄海西部海底沉积物粒度特征和净输送趋势. 海洋与湖沼, 2000, 31(6), 604~ 615 [Cheng Peng, Gao Shu. Net sediment transport patterns over the north western Yellow Sea, based up2 on grain size trend analysis. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 2000, 31(6): 604~ 615]
- 周蒂. 利用沉积物数据反演沉积水动力参数. 地质科学, 1999, 34(1): 49~ 58 [Zhou Di. The estimation of sedimentary hydrodynamic parameters from sediment grain size data. *Scientia Geologica Sinica*, 1999, 34(1): 49~ 58]
- Asselman N E M. Grain size trends used to assess the effective discharge for floodplain sedimentation, vier wall, the Netherlands. *Journal of Sedimentary Research* 1999, 69(1), 51~ 61
- Gao S, Collins M. Analysis of grain size trends for defining sediment transport pathways in marine environments. *Journal of Coastal Research*, 1994, 10(1): 70~ 78
- 赵焕庭. 珠江河口演变. 北京: 海洋出版社, 1990. 1~ 210 [Zhao Huanting The change of Pearl River Estuary. Beijing: Ocean Press, 1990. 1~ 210]
- 王文介. 珠江口的沉积作用和沉积相. 沉积学报, 1985, 3(2): 129~ 139 [Wang Wenjie. Sedimentary process and sedimentary facies in the Pearl River estuary. *Acta Sedimentologica Sinica*, 1985, 3(2): 129~ 139]
- 陈耀泰. 珠江口沉积分区. 中山大学学报(自然科学版), 1995, 34(3): 109~ 114 [Chen Yaotai Sedimentation divisions of the Pearl River Mouth. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni*, 1995, 34(3): 109~ 114]
- 周蒂, 范时清. 珠江口外现代沉积物运移方向的统计分析. 热带海洋, 1989, 8(3): 96~ 103 [Zhou Di, Fan Shiqing. A statistical analysis to transport direction of modern sediments outside the Pearl River estuary. *Tropic Oceanology*, 1989, 8(3): 96~ 103]
- Pedrerros R, Howa H L, Michel C. Application of grain size trend analysis for the determination of sediment transport pathways in intertidal areas. *Marine Geology*, 1996, 135: 35~ 49
- McLaren PA, Bodes D. The effects of sediment transport on grain size distributions. *Journal of Sedimentary Petrology*, 1985, 55(4): 457~ 470
- 赵今声, 赵子丹, 秦崇仁, 等. 海岸河口动力学. 北京: 海洋出版社, 1993. 375~ 543 [Zhao Jinseng, Zhao Zhidan, Qin Chongren, et al. *Dynamics of Coast and Estuary*. Beijing: Ocean Press, 1993. 375~ 543]
- 蒋东辉, 高抒. 渤海海峡潮流底应力与沉积物分布的关系. 沉积学报, 2002, 20(4): 663~ 667 [Jiang Donghui, Gao Shu. Relationship between the tidally induced near bed shear stress and the distribution of surficial sediments in the Bohai Strait. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2002, 20(4): 663~ 667]

Characteristics of Sediment Grain Size and Their Implications for Bottom Hydrodynamic Environment in the Pearl River Estuary

PENG Xiaotong¹ ZHOU Hua2yang¹ YE Ying² CHEN Guang2qian¹

1(Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640)

2(Department of Earth Science, Zhejiang University, Hangzhou 310027)

Abstract Analysis of sediment grain size showed that the grain size grade changed greatly in the Pearl estuary. Frequency distribution curves indicated the different sources of the suspended matters in the Pearl River estuary. In spatial distribution, content of coarser sediment component decreased quickly from north and northwest to south2 east. However, finer sediment component always had higher contents in the middle of the estuary where a turbidity maximum zone existed, which was related to the resuspension and flocculation in this zone. Mean grain sizes and coarser components of sediments were successfully used to inverse the direction and velocity of bottom currents before the accumulation of sediments. The grade direction of mean grain sizes was basically coincident to the transport direction of the suspended matter. The predominant velocity of bottom current in various zone were consistent with data obtained on2the2spot survey.

Key words Pearl River estuary, sediment grain size, inversion, hydrodynamic environment