

长江口海域悬浮物的粒度特征与成因分析

庞重光¹, 于炜^{1,2}, 杨扬^{1,2}

(1. 中国科学院海洋研究所, 青岛 266071; 2. 中国科学院研究生院, 北京 100049)

摘要 利用现场激光粒度仪(LISST-100X C 型),在不扰动天然细颗粒泥沙絮凝体的情况下,于 2008 年 7 月在长江口海域测量了 24 个站位不同层次悬浮絮凝体的粒径分布和体积浓度.结合同步测得的海水温度、盐度和浊度数据,得出了长江口海域悬浮物的粒度特征并进行了成因分析.长江口观测海域悬浮物的平均中值粒径为 4.69ϕ ,粒级分布具有分选较差、峰态宽、近对称的特征.悬浮絮凝体的垂向平均体积含量随离岸距离的增加而显著降低,而中值粒径却具有增大的趋势;在 31.0°N 断面,平均中值粒径从 $11\mu\text{m}$ 增加到了 $60\mu\text{m}$.随着离岸距离的增加,细颗粒悬浮泥沙的含量显著降低,而一些粒径较大的生物体或大粒径絮凝体的含量相对增多,造成了中值粒径的明显增大.本次观测所得的有效密度在 $246\sim 1\,334\text{ kg/m}^3$ 之间,平均为 613 kg/m^3 .当悬浮物含量较高时,由于大絮凝体比小絮凝体的沉降速度快,大絮凝体有效密度小于小絮凝体,从而导致悬浮物的中值粒径随水深的增大而明显增大,絮凝体有效密度随水深的增加而减小.37 和 44 站有效密度与中值粒径的相关系数均在 0.9 以上.

关键词 LISST-100X C 型 絮凝体 粒径分布 中值粒径 有效密度 长江口

中图分类号 X143 **文献标识码** A **文章编号** 0250-3301(2010)03-0618-08

Characteristics and Its Forming Mechanism on Grain Size Distribution of Suspended Matter at Changjiang Estuary

PANG Chong-guang¹, YU Wei^{1,2}, YANG Yang^{1,2}

(1. Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Qingdao 266071, China; 2. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract In July of 2008, under the natural condition of sea water, the Laser *in-situ* scattering and transmissometry (LISST-100X Type C) was used to measure grain size distribution spectrum and volume concentration of total suspended matter in the sea water, including flocs at different layers of 24 sampling stations at Changjiang Estuary and its adjacent sea. The characteristics and its forming mechanism on grain size distribution of total suspended matter were analyzed based on the observation data of LISST-100X Type C, and combining with the temperature, salinity and turbidity of sea water, simultaneously observed by Alec AAQ1183. The observation data showed that the average median grain size of total suspended matter was about 4.69ϕ in the whole measured sea area, and the characteristics of grain size distribution was relatively poor sorted, wide kurtosis, and basically symmetrical. The conclusion could be drawn that vertically average volume concentration decreased with the distance from the coastline, while median grain size had an increase trend with the distance, for example, at 31.0°N section, the depth-average median grain size had been increased from $11\mu\text{m}$ up to $60\mu\text{m}$. With the increasing of distance from the coast, the concentration of fine suspended sediment reduced distinctly, nevertheless some relatively big organic matter or big flocs appeared in quantity, so its grain size would rise. The observation data indicated that the effective density was ranged from 246 kg/m^3 to $1\,334\text{ kg/m}^3$, with average was 613 kg/m^3 . When the concentration of total suspended matter was relatively high, median grain size of total suspended matter increased with the water depth, while effective density decreased with the depth, because of the faster settling velocity and less effective density of large flocs that of small flocs. As for station 37 and 44, their correlation coefficients between effective density and median grain size were larger than 0.9.

Key words LISST-100X Type C; flocs; grain size distribution; median grain size; effective density; Changjiang Estuary

河口海域是 2 种物理、化学性质和动力机制均不同的水体的交汇地带,在此海域,水沙交换频繁,其变化机制也异常复杂.河口海域悬浮物往往以大颗粒集合体为主,絮凝现象十分显著,这些悬浮絮凝体结构松散,在外部应力的作用下极易发生破碎.传统的海水取样、抽滤甚至颗粒分析过程等都会引起絮凝体颗粒大小、形态发生改变.为避免传统测试手段的误差,人们一般利用现场测试手段对悬浮絮凝体进行观测分析.美国 Sequoia Scientific 公司制造的

LISST-100 (Laser *in-situ* Scattering and Transmissometry) 激光粒度仪作为一种方便、可靠的水体悬浮物测量仪器,在国外已得到广泛应用^[1-3].近年来,国内一些学者在长江口^[4-6]、珠江口^[7,8]、胶州湾^[9]以及渤海等海域相继开展了利用 LISST-

收稿日期 2009-04-07 修订日期 2009-08-12

基金项目 国家高技术研究发展计划(863)项目(2006AA09Z157); 国家重点基础研究发展规划(973)项目(2007CB411802)

作者简介 庞重光(1973~),女,博士,研究员,主要研究方向为沉积动力学,E-mail: chgpang@ms.qdio.ac.cn

100 激光粒度仪的测量工作,在分析数据资料的基础上弄清了观测海域悬浮絮凝体的基本特性。然而,在长江口海区,以往研究工作集中在口门以内的区域,如程江等^[4,5]在长江口徐六泾站位(盐水入侵界),唐建华等^[6]在长江口的南槽。本实验则以长江口门以外海域为研究重点,在以往研究中关于此海域悬浮物粒径的现场测量鲜见报道。

本研究利用现场激光粒度仪(LISST-100X C型),在不扰动天然细颗粒泥沙絮凝体的情况下,测量了夏季长江口海域24个站位不同层次悬浮絮凝体的粒径分布和体积含量。结合同步测得的海水温度、盐度和浊度数据,计算了悬浮絮凝体的特征粒度参数,质量浓度和有效密度,研究了长江口海域悬浮物的粒度特征并分析其形成原因,以期为长江口海域悬浮物动力沉积过程的研究提供依据。

1 研究区域与研究方法

1.1 观测站位与测量方法

2008年7月8~12日在长江口及其邻近海域进行了水文、悬浮泥沙状况的海上调查。共进行了24个大面站的观测,站位图如图1所示。各大面站的观测项目包括:Alec AAQ1183所测的海水的压力、温度、盐度、浊度、叶绿素、溶解氧和pH值等参数;以及现场同步采集水样、经孔径0.45 μm的醋酸纤维滤膜过滤水样,105℃烘干12 h后,称重计算得海水中总悬浮物浓度。选用LISST-100X C型现场激光粒度仪测量了悬浮物粒径谱及其体积含量。

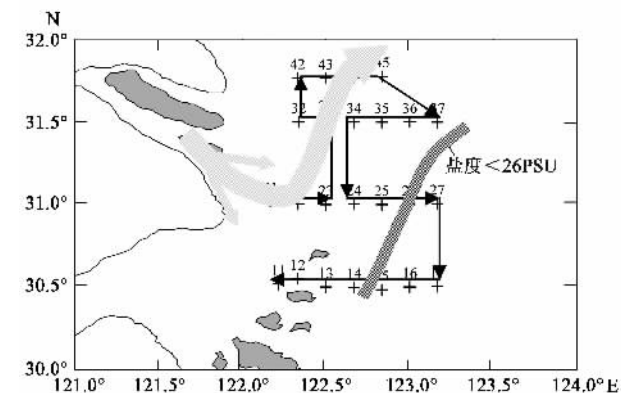


图1 2008年7月观测站位图(黑色箭头表示观测路径)

Fig. 1 Sampling stations in July, 2008 at Changjiang Estuary

LISST-100X C型的有效粒径测量范围为2.5~500 μm,测量内容包括悬浮细颗粒泥沙絮凝体的粒径谱及其体积含量。其测量原理为在激光的衍射过程中,一束平行激光束被水中悬浮颗粒所散射、吸收

和反射,大颗粒以小角度、小颗粒以大角度散射,向前散射的激光从0.1°~20°的角度共分32级被记录和存储,运用Mie散射理论,反推激光散射数据可获得悬浮颗粒物分32个粒级的体积含量,同时可计算出悬浮物32个粒级的总体积含量和中值粒径,粒级间隔约为1/4φ。

1.2 计算方法

1.2.1 悬浮泥沙浓度

现场采集同步水样86个厘定AAQ1183所测的浊度数据,得到现场悬浮物的换算公式:

$$SSC = 0.8397 \times Turb - 17.196 \quad (1)$$

式中,SSC为悬浮物浓度(mg/L),Turb为浊度值(NTU),相关系数R达到0.9以上。厘定换算公式适用的悬浮物浓度范围为1.0~746.0 mg/L,其中1.0 mg/L为率定数据组的最低悬浮物浓度,746.0 mg/L为率定数据组的最高悬浮物浓度。

1.2.2 絮凝体有效密度

絮凝体在水体中的真实密度称之为絮凝体有效密度,用 $\Delta\rho$ 表示。可以通过悬浮物的体积含量和悬浮物的质量浓度计算得出^[10,11],公式为:

$$\Delta\rho = SSC / VC \quad (2)$$

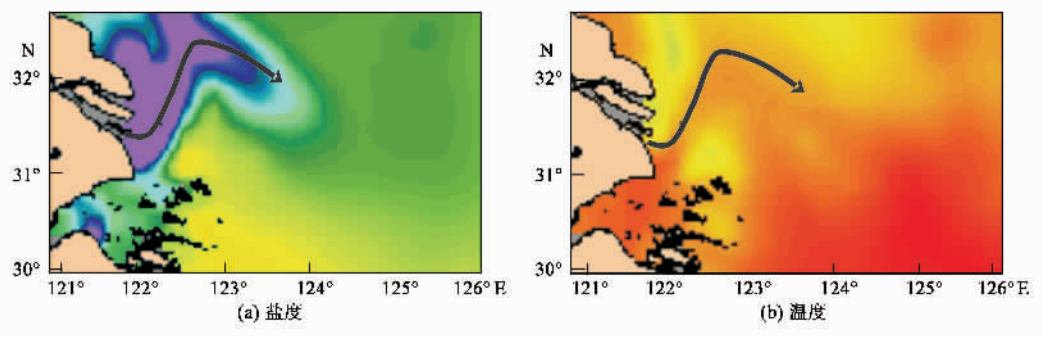
式中, $\Delta\rho$ 为絮凝体有效密度(kg/L),SSC为悬浮泥沙浓度(mg/L),VC为絮凝体的体积含量(μL/L)。悬浮物浓度的适用范围同1.2.1。

2 结果与分析

2.1 长江冲淡水的扩展与悬浮泥沙的分布

如图1所示,根据温度、盐度数据绘制的浅色粗线表示观测时段长江冲淡水主流的扩展路径。冲淡水入海后,在惯性和科氏力的作用下继续向东南方向流动、扩散;而后,在南风、倾斜的底地形、淡水的浮力强迫(斜压效应)以及台湾暖流的顶托等^[12,13]的共同作用下,冲淡水转向东北方向扩展。深色粗线表示盐度<26PSU的冲淡水的扩展范围。图2为同期卫星遥感资料数值模拟结果,同化后的表层盐度、温度分布更加完整地显示了长江冲淡水主流的扩展路径,只是扩展范围与实际海上观测结果还存在一定差距。图2来自http://www.7320.nrlssc.navy.mil/global_ncom/ecs.html。

然而,表层悬浮物浓度的平面分布图[图3(a)]却没有像温度、盐度分布图那样,明确显示冲淡水向东北的转向,只是观测区东北方向的悬浮物浓度略高于东南,隐约显示出冲淡水向东北方向的扩散。在底层[图3(b)],长江入海携带的高浓度悬



紫色代表盐度 <26PSU,颜色的渐变变化代表 0.2PSU 的增加 绿色代表温度为 23℃,颜色的渐变变化代表 0.5℃ 的增加 ;黑线表示长江冲淡水主流的扩展路径

图 2 东海北部海域,遥感资料经数模同化后的表层温盐分布

Fig. 2 Sea surface temperature and salinity obtained by remote sensing and numerical model assimilation in the northern East China Sea

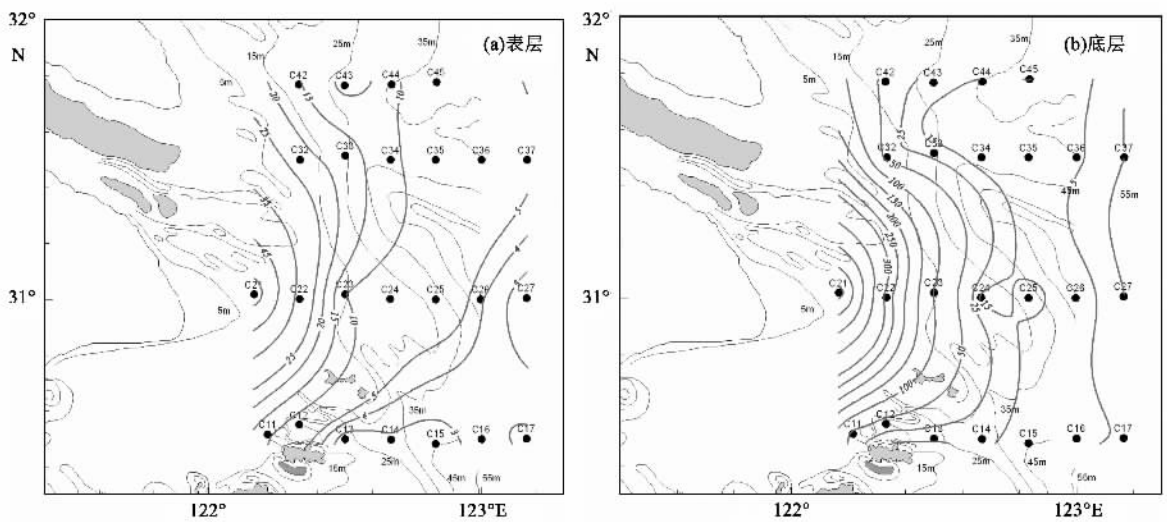


图 3 悬浮物浓度分布

Fig. 3 Distribution of suspended matter concentration

浮泥沙根本没有任何向东北转向扩散的迹象,而是继续在惯性和科氏力的作用下向东南方向扩散,同时伴随着快速沉降其浓度在迅速减少,甚至不能越过 123°E (123°E 以东,底层悬浮物浓度 < 5 mg/L). 上述现象与以往的观测结论一致^[14,15].

2.2 长江口海域悬浮物的粒度参数

在每个大面站,对 LISST-100X C 型所测原始数据经剔除异常值和垂向平均处理后,得不同层次(垂向间隔为 1 m)海水中悬浮物的粒径分布谱,以

体积浓度表示. 根据粒径分布谱,经统计分析后计算得各站位、各层次悬浮物的总体积浓度、平均粒径、中值粒径、标准偏差(即分选系数)、偏态和峰态. 各粒度参数的计算采用矩法^[16]进行.

如表 1 所示,列出了长江口海域所有站位、层次悬浮物粒度参数的平均值、最大值、最小值. 根据粒度参数等级分类^[16,17],总体上说,长江口观测海域悬浮絮凝体的粒级分布具有分选较差(分选系数在 1.00 ~ 2.00 之间)、峰态宽(峰态在 1.42 ~ 2.75 之

表 1 长江口观测海域悬浮物的特征粒度参数

Table 1 Characteristic parameters on suspended particle (floc) size at the Changjiang Estuary

项目	体积浓度/ $\mu\text{L} \cdot \text{L}^{-1}$	平均粒径/ φ	中值粒径/ φ	标准偏差	偏态	峰态
平均值	49.11	4.60	4.69	1.86	0.26	2.59
最小值	2.47	3.02	2.84	1.26	-1.22	1.39
最大值	1592.81	6.75	6.85	2.79	1.49	5.25

间)、近对称(偏态在 $-0.33 \sim 0.33$ 之间)的特征。

对长江口观测海域所有悬浮絮凝体的各粒径参数进行相关分析,得出以下相关关系.中值粒径与水深具有明显的负相关,相关系数为 -0.44 ;由此表明,从整体上说,随着水深的增加, φ 值表示的中值粒径明显减小,即悬浮絮凝体的粒径明显变粗,相应地悬浮物的体积浓度和质量浓度明显增加。

偏态与中值粒径具有显著的负相关,相关系数高达 -0.81 ,表明从总体上说, φ 值表示的中值粒径越大,即悬浮絮凝体的中值粒径越小时,其粒级分布更易负偏 ; φ 值表示的中值粒径越小,即悬浮絮凝体的粒径越大时,其更易正偏,如图 4 所示.图 4 中 22 站 2 m 层(图中标识为 22-2 m)悬浮物的中值粒径为 6.85φ ,由于细粒级含量高,其偏态值为 -1.22 ,属显著负偏 ;14 站 12 m 层(图中标识为 14-12m)

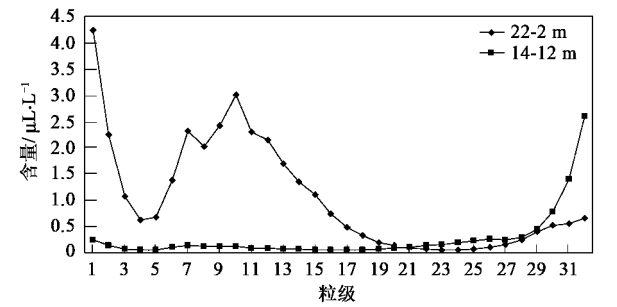


图 4 2 个典型偏态值 ($-1.22, 1.43$) 的粒径分布
Fig. 4 Particle (floc) size distribution of total suspended matter measured by the LISST as a function of volume concentration on two typical skew-values

悬浮物的中值粒径为 2.88φ ,由于絮凝体大颗粒的相对大量存在,其偏态值为 1.43 ,属显著正偏。

标准偏差与峰态之间具有明显的正相关,相关系数为 0.67 ;表明峰态不明显的悬浮物其分选也差,峰态显著的悬浮物其分选良好,这与二者的物理意义是一致的,然而,虽然峰态值和分选系数有着统计意义和物理意义的联系,但是,在理论上样本的各阶矩之间在数学上是线性独立的。

2.3 长江口海域悬浮物的粒径分布特征

如表 2 所示,各观测断面悬浮絮凝体的垂向平均中值粒径具有随离岸距离的增加而增大的趋势.1 断面即 30.5°N 断面,位于口门以南,垂向平均中值粒径由 5.87φ ($18\text{ }\mu\text{m}$) 增加到了 3.99φ ($63\text{ }\mu\text{m}$) ,粒径增加了 3.5 倍 ;然而,其体积浓度从 $146.73\text{ }\mu\text{L/L}$ 下降到了 $7.89\text{ }\mu\text{L/L}$.2 断面即 31.0°N 断面,位于口门附近,垂向平均中值粒径由 6.53φ ($11\text{ }\mu\text{m}$) 增加到了 4.05φ ($60\text{ }\mu\text{m}$) ,粒径增加超过 5 倍 ;然而,其体积浓度从 $1152.15\text{ }\mu\text{L/L}$ 迅速下降到了 $8.47\text{ }\mu\text{L/L}$,同样显示了夏季长江入海高浓度悬浮泥沙的快速沉降效应.3 断面即 31.5°N 断面,位于口门以北,垂向平均中值粒径由 4.80φ ($36\text{ }\mu\text{m}$) 增加到了 3.35φ ($98\text{ }\mu\text{m}$) ,粒径增加了不到 3 倍,增加幅度较小 ;相反地,其体积含量从 $164.77\text{ }\mu\text{L/L}$ 下降到了 $6.89\text{ }\mu\text{L/L}$.4 断面即 31.77°N 断面,无论是中值粒径的增加,还是体积浓度的降低,其幅度均较小,与本断面离入海口的位置最远有关,受到长江入海悬浮泥沙的影响最小。

表 2 各观测站位的垂向平均中值粒径和体积含量

Table 2 Vertically averaged median grain size and volume density at different station

1 断面			2 断面			3 断面			4 断面		
站点	中值粒径 / φ	体积含量 / $\mu\text{L} \cdot \text{L}^{-1}$	站点	中值粒径 / φ	体积含量 / $\mu\text{L} \cdot \text{L}^{-1}$	站点	中值粒径 / φ	体积含量 / $\mu\text{L} \cdot \text{L}^{-1}$	站点	中值粒径 / φ	体积含量 / $\mu\text{L} \cdot \text{L}^{-1}$
11	5.87	146.73	21	6.53	1152.15						
12	5.25	95.29	22	6.45	443.09	32	4.75	164.77	42	5.20	72.20
13	5.10	66.35	23	5.75	286.89	33	4.80	74.53	43	5.11	35.53
14	4.99	39.93	24	5.51	62.94	34	4.39	21.72	44	5.01	24.05
15	5.29	20.02	25	4.35	44.85	35	4.19	23.25	45	4.57	17.36
16	4.90	11.14	26	4.05	16.76	36	3.48	12.06			
17	3.99	7.89	27	4.27	8.47	37	3.35	6.89			

传统观点认为,海水中悬浮物的中值粒径应该随离岸距离的增加而减小.然而,本次现场观测获得的悬浮物中值粒径却随离岸距离的增加而增大,与传统认识相反,究其原因如下.用 LISST-100X C 型所测得的粒径分布谱,是海水中所有悬浮物的粒径

分布,其中包含一定的生物量,不仅仅是悬浮泥沙 ;而且对于悬浮泥沙而言,并不是单个悬浮泥沙颗粒的粒径分布,而是包含悬浮泥沙在内的絮凝体的粒径分布.在近岸,由于细颗粒悬浮泥沙的大量存在,海水中悬浮物的中值粒径较小 ;随着离岸距离的增

加,细颗粒悬浮泥沙的含量显著降低,而一些粒径较大的生物体或大粒径絮凝体的含量相对增多^[18],因此,其中值粒径明显增大。

本次观测所得的悬浮物中值粒径在 $3 \sim 7 \varphi$ ($8 \sim 120 \mu\text{m}$) 之间,平均为 4.7φ ($38 \mu\text{m}$),而李军等^[19]在大致同样海域,过滤后的悬浮物经分散后再测得的中值粒径在 $7 \sim 8.5 \varphi$ 之间,表明单个悬浮泥沙的粒径大多小于 $7 \mu\text{m}$,大于此粒径的悬浮物一般可以认为是絮凝体或其他生物体。根据关许为等^[20]在长江口 20 个站位用显微镜对细颗粒泥沙絮凝体现场观测结果显示,长江口细颗粒泥沙絮凝体的直径分布在 $10 \sim 500 \mu\text{m}$ 之间,大部分出现在 $10 \sim 200 \mu\text{m}$ (即 $9 \sim 27$ 粒级之间) 范围,与本研究用 LISST-100X C 型的现场观测基本一致。悬浮物中生物体或有机体含量的多少可以通过烧失量来表示,然而,由于本次观测海域悬浮物的含量普遍偏小,水样经过滤后留在滤膜上的质量也很小,基本不能进行烧失量的计算。但对滤膜的显微镜观测发现,随着离岸距离的增加,生物量明显增多。

如表 2 所示,32 站的垂向平均中值粒径明显偏大,大于其他断面同样经度的站位如 12、22、42 站的中值粒径。然而,其悬浮物含量并不低,明显高于 12、42 站的含量。从图 5 悬浮物的粒径分布对比可以看出,虽然 32 站底层 ($10 \sim 12 \text{ m}$ 层) 的悬浮物浓度与 21 站表层 ($1 \sim 2 \text{ m}$ 层) 的浓度相近,但是其粒径组成却十分不同,21 站 $< 7.8 \varphi$ ($4.4 \mu\text{m}$, 4 粒级) 的悬浮泥沙含量很高,而 32 站 $5.66 \sim 3.27 \varphi$ ($13 \sim 23$ 粒级) 之间的絮凝体的含量很大,因此,32 站的中值粒径显著偏大。一般认为^[14,21,22],絮凝的最佳盐度范围为 $10 \sim 13 \text{ PSU}$,然而,盐度为 33 PSU 的 32 站底层的絮凝结构,无论是其数量,还是絮团的大小都明显优于处于最佳絮凝盐度 (11 PSU) 的 21 站表层。即使与相同的水深层次 (32 站 2 m 和 21 站 2 m) 相比,盐度为 30 PSU 的 32 站 2 m 层的絮凝结构也以大絮团为主,优于同样处于最佳絮凝盐度 (13 PSU) 的 21 站 2 m 层。

在长江入海口处,除盐度对絮凝结构有显著影响之外,以往研究^[4~6]还表明水体的紊动强度是决定絮凝体粒径的主要因素之一。紊动对絮凝体大小的影响存在 2 个相反的阶段:①紊动强度小于絮凝体的临界剪切强度,水体紊动增加了颗粒之间的碰撞概率,从而可以形成较大的絮凝体,絮凝体的大小随水流紊动强度的增加而增大。②紊动强度大于絮凝体的临界剪切强度,在紊动强度足够大时,大絮凝

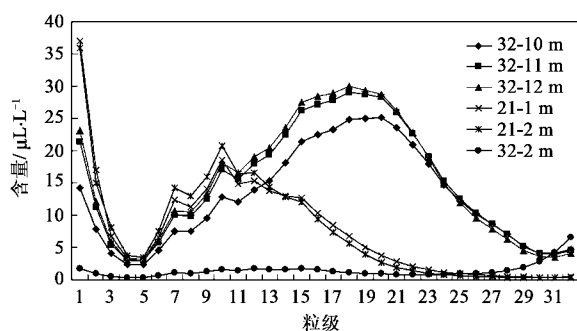


图 5 悬浮物浓度相近、粒度组成不同的悬浮物粒径分布

Fig. 5 Grain size distribution of total suspended matter with similar concentration and different grain size

体受紊动剪切作用而破裂,絮凝体随水流紊动强度的增加而减小。因此,本研究试图把 32 站大絮凝体的发育与观测期间的海水流速联系起来,发现观测期间正好处于憩流时段,部分解释了本站位大絮凝体大量存在的事实。与 32 站相比,33 站 (图 6 所示) 观测期间正好处于急流时段,因此,其上层海水中几乎没有大絮凝体的存在。

如图 6 所示,2 断面不同站位悬浮物的粒度组成。总体上说,悬浮物的粒径分布呈现单峰、双峰,甚至多峰结构,其中以单峰和双峰结构为主。从 21 ~ 27 站,悬浮物的粒度组成从细颗粒为主逐渐向粗颗粒为主过渡。2 断面所有站位悬浮物的主要粒级组成都包含 < 3 粒级 (8.05φ , $3.8 \mu\text{m}$) 的单颗粒泥沙,只是随着离岸距离的增加,此组分的含量在显著减小。从 21 ~ 27 站,悬浮物中另一主要粒级组成的区间一直在变化,而且具有明显变大的趋势,即随着离岸距离的增加,悬浮物中大颗粒絮凝体所占的比例在明显增加;从 21、22、23 站的 $7 \sim 15$ 粒级区间,到 24 站的 $10 \sim 22$ 粒级区间,再到 25 站的 $15 \sim 25$ 区间,直到 26、27 站的 $23 \sim 26$ 区间,絮凝体的粒径越来越大,从而造成了如前节所述的中值粒径的明显增大。2 断面的不少站位,特别是那些远离岸线的站位,其悬浮物中存在粒径很大的生物体或絮凝体,粒级 > 29 (1.84φ , $280 \mu\text{m}$),有的站位会以这些大颗粒为主要组分,如 26、27 站。当然,这一“上升尾”现象也可能是由于 $> 500 \mu\text{m}$ (LISST-100X C 型的量程) 的絮凝体产生的衍射信号造成的^[2]。

如图 6 所示,33 站 (水深 26 m) 不同层次悬浮物的粒级组成。从 $5 \sim 23 \text{ m}$ 层,33 站的悬浮物粒级组成可以大致分为逐渐过渡的 4 种形态: $5 \sim 7 \text{ m}$ $8 \sim 15 \text{ m}$; 16 m , $17 \sim 23 \text{ m}$ 。随着水深的增加,其粒径组成逐渐变大,而总粒级含量即体积浓度经历了从

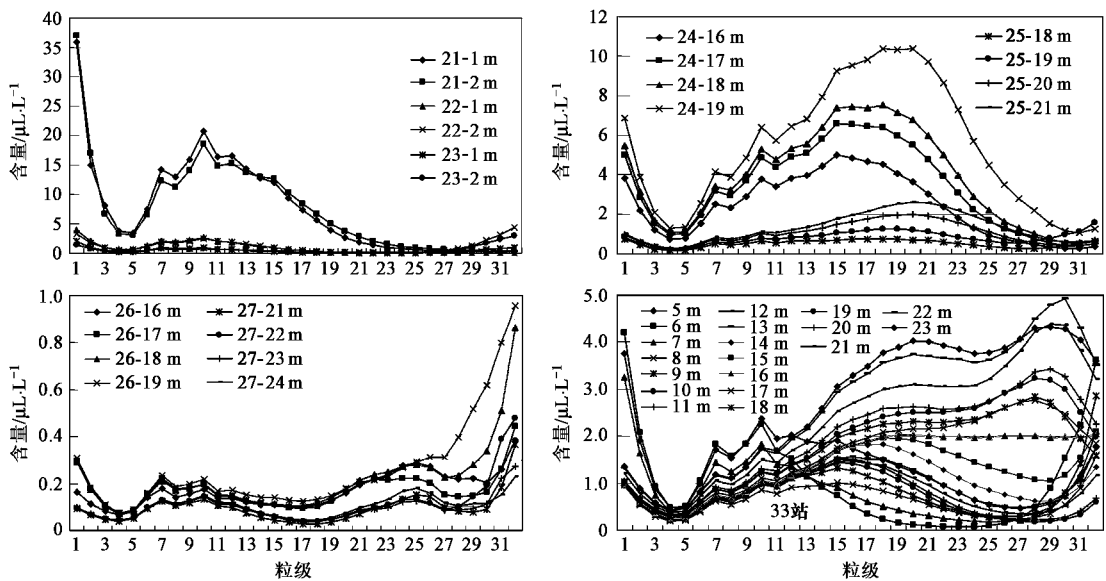


图6 不同站位不同层次悬浮物粒径分布

Fig. 6 Particle (floc) size distribution of total suspended matter at different station and layer

大变小、又变大的过程。5~7 m 层的悬浮物粒径分布以 <3 粒级、6~13 粒级、>29 粒级的三粒级区间为主要组分的三峰结构为特征;8~15 m 层的悬浮物粒径分布也是三峰结构,然而其主要组分的粒级区间与 5~7 m 层不同,分别是 <3 粒级、7~26 粒级和 >30 粒级。16 m 层为过渡类型, >15 粒级的大絮凝体的含量均较高,而且几乎等量分布。17~23 m 层的悬浮物中主要包含 >10 粒级的絮凝体,尤其是 27~31 粒级区间的含量最高。33 站的粒径分布表明,由于大絮凝体比小絮凝体的沉降速度快,所以随着水深的增加,悬浮物中大絮凝体的含量逐渐增大,从而导致其中值粒径随水深的增加而明显增大。

2.4 长江口海域悬浮物的有效密度

絮凝使小粒径的泥沙聚集在一起形成大粒径的泥沙集合体。絮凝体的空隙率、含水、含有机质的比例很大^[23,24],细颗粒泥沙絮凝后形成的絮凝体有效密度将会发生显著的改变。事实上,LISST-100X C 型现场激光粒度仪不仅能够检测到较大的絮凝体,也能分辨出单颗粒悬沙。因此,从严格意义上说,公式(2)的计算结果并非絮凝体的真实有效密度,而是总悬浮物的平均有效密度。

由于大絮凝体的空隙率明显高于小絮凝体的空隙率^[24],所以据 Mikkelsen 等^[1]在丹麦海域的研究,当絮凝体的平均粒径从 41 μm 增加到 109 μm 时,有效密度从 1 283 kg/m³ 减小到 686 kg/m³。当絮凝

体的粒径进一步增加到 300 μm 时,其有效密度仅有约 30 kg/m³^[3]。本次观测所得的有效密度在 246~1 334 kg/m³ 之间,平均为 613 kg/m³。与程江等^[4]在徐六泾的观测结果(絮凝体有效密度变化范围在 532~1 456 kg/m³,平均为 1 004 kg/m³)相似,但由于本次观测的站位大多位于长江入海口门以外,絮凝体粒径明显偏大,所以其有效密度也会相应减小。

某一海域絮凝体有效密度和其平均粒径的关系可被描述为: $\Delta\rho \propto D_m^{\alpha}$ ^[2,5,7,10,25]。Fennessy 等^[10]在 Tamar 河口的研究中得出 α 为 -1.084;Sternberg 等^[25]在 California 陆架海的研究显示 α 为 -0.46;Mikkelsen 等^[2]在丹麦海域的研究表明 α 的变化范围在 -0.86~-0.33 之间;Xia 等^[7]在珠江口的观测显示,1999 和 2000 年包括洪季和枯季的全部数据的统计 α 为 -1.52;程江等^[5]在长江徐六泾站大、小潮表层数据分别统计 α 为 -0.368 和 -0.646。由于本次观测的范围较大,不同站位絮凝体的成分和结构有很大差别,所以本次观测全部站位的有效密度与相应的中值粒径之间不存在相关关系,不能得出上述关系式。然而,对于某一站位,其絮凝体有效密度和中值粒径具有明显的相关关系,在 37 和 44 站的观测结果中表现尤为显著,如图 7 所示。44 站两者的相关系数高达 0.98 而 37 站的相关系数也达 0.90,两者的变化趋势可以说完全相同。

当悬浮物含量较高时,如 44 站和上节所述的 33 站,表层絮凝体有效密度明显大于底层,其原因

是底层比表层大絮凝体多,而大絮凝体有效密度小于小絮凝体,因此表层絮凝体有效密度大于底层.当悬浮物含量较低时,如 37 站,絮凝体的粒径随水深

的增加没有明显的趋势性变化,相应地絮凝体的有效密度也没有显著变化,只是略微有所减小,从 0.8 kg/L 减小到 0.7 kg/L.

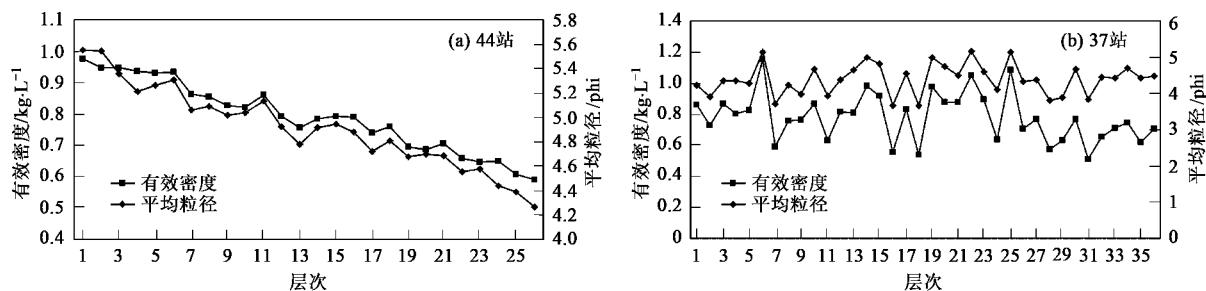


图 7 絮凝体中值粒径和有效密度随深度的变化

Fig. 7 Variation of median grain size and effective density of total suspended matter with depth

3 结论

(1) 长江冲淡水入海后,在惯性和科氏力的作用下继续向东南方向流动、扩散,而后,在南风、倾斜的底地形、淡水的浮力强迫以及台湾暖流的顶托等的共同作用下,冲淡水转向东北方向扩展.而长江入海携带的高浓度悬浮泥沙基本没有随冲淡水向东北转向扩散,而是继续向东南方向扩散,同时伴随着快速沉降其浓度在迅速减少,甚至不能越过 123°E.

(2) 长江口观测海域悬浮物的平均中值粒径 4.69φ, 粒级分布具有分选较差、峰态宽、近对称的特征.随着水深的增加,悬浮物的粒径明显变粗;悬浮物的中值粒径越小时,其粒级分布更易负偏,峰态窄的悬浮物其分选良好.

(3) 悬浮絮凝体的垂向平均体积浓度随离岸距离的增加而显著降低,而中值粒径却具有增大的趋势.随着离岸距离的增加,细颗粒悬浮泥沙的含量显著降低,而一些粒径较大的生物体或大粒径絮凝体的含量相对增多,絮凝体的粒径越来越大,从而造成了中值粒径的明显增大.

(4) 悬浮物的粒径分布呈现单峰、双峰,甚至多峰结构,其中以单峰和双峰结构为主.悬浮体絮凝结构的形成是由悬浮颗粒的成分、浓度、水体的紊动强度以及盐度等因素共同决定的,不能只片面地考虑某种因素的作用如盐度.

(5) 本次观测所得的有效密度在 246 ~ 1334 kg/m³ 之间,平均为 613 kg/m³.当悬浮物含量较高时,由于大絮凝体比小絮凝体的沉降速度快,从而导致其中值粒径随水深的增加而明显增大.又由于絮

凝体有效密度和其中值粒径的良好相关关系,大絮凝体有效密度小于小絮凝体,因此絮凝体有效密度随水深的增加而减小.

参考文献:

- [1] Mikkelsen O A, Pejrup M. *In-situ* particle size spectra and density of particle aggregates in a dredging plume [J]. *Marine Geology*, 2000, **170** (3-4): 443-459.
- [2] Mikkelsen O A, Pejrup M. The use of a LISST-100 laser particle size for *in-situ* estimates of floc size, density and settling velocity [J]. *Geo Marine Letters*, 2001, **20**: 187-195.
- [3] Mikkelsen O A, Hill P S, Milligan T G. Seasonal and spatial variation of floc size, settling velocity and density on the inner Adriatic Shelf (Italy) [J]. *Continental Shelf Research*, 2007, **27** (3-4): 417-430.
- [4] 程江,何青,王元叶. 利用 LISST 观测絮凝体粒径、有效密度和沉速的垂线分布 [J]. *泥沙研究*, 2005, **1**: 33-39.
- [5] 程江,何青,夏小明. 长江口徐六泾悬浮细颗粒泥沙絮凝体特性 [J]. *海洋与湖沼*, 2007, **38** (4): 304-313.
- [6] 唐建华,何青,王元叶,等. 长江口浑浊带絮凝体特性 [J]. *泥沙研究*, 2008, **2**: 27-33.
- [7] Xia X M, Li Y, Yang H, *et al.* Observations on the size and settling velocity distributions of suspended sediment in the Pearl River Estuary, China [J]. *Continental Shelf Research*, 2004, **24** (16): 1809-1826.
- [8] 夏小明,李炎,杨辉,等. 枯季珠江河口悬浮泥沙絮凝沉降特征的观测与分析 [J]. *海洋学研究*, 2006, **24** (1): 6-18.
- [9] 魏建伟,石学法,方习生,等. 胶州湾悬浮颗粒现场剖面测量与结果分析 [J]. *海洋科学进展*, 2006, **24** (1): 74-82.
- [10] Fennessy M J, Dyer K R, Huntley D A. INSSEV: An instrument to measure the size and settling velocity of flocs *in-situ* [J]. *Marine Geology*, 1994, **117** (1-4): 107-117.
- [11] Fettweis M. Uncertainty of excess density and settling velocity of mud flocs derived from *in situ* measurements [J]. *Estuarine*,

- Coastal and Shelf Science, 2008, 78 :426-436.
- [12] 白学志,王凡. 夏季长江冲淡水转向机制的数值试验[J]. 海洋与湖沼,2003, 34(6) :593-603.
- [13] 朱建荣,王金辉,沈焕庭,等. 2003 年 6 月中下旬长江口外海区冲淡水和赤潮的观测及分析[J]. 科学通报,2005, 50(1) :59-65.
- [14] 沈焕庭,等. 长江河口物质通量[M]. 北京 :海洋出版社, 2001. 115-122.
- [15] Li S H, Yun C X. Coastal current systems and the movement and expansion of suspended sediment from Changjiang River Estuary [J]. Marine Science Bulletin, 2006, 8(1) :22-33.
- [16] McManus J. Grain size determination and interpretation [A]. In : Tucker M. Techniques in Sedimentology [C]. Oxford : Blackwell, 1988. 63-85.
- [17] 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.
- [18] 陈庆强,孟翊,周菊珍,等. 长江口细颗粒泥沙絮凝作用及其制约因素研究[J]. 海洋工程,2005, 23(1) :74-82.
- [19] 李军,高抒,曾志刚,等. 长江口悬浮体粒度特征及其季节性差异[J]. 海洋与湖沼,2003, 34(5) :499-510.
- [20] 关许为,陈英祖,林以安,等. 长江口泥沙絮凝体的现场显微观测[J]. 泥沙研究,1992, 3 :54-59.
- [21] 翟世奎,孟伟,于志刚,等. 三峡工程一期蓄水后的长江口海域环境[M]. 北京 :科学出版社,2008. 75-97.
- [22] 刘启贞,李九发,徐灿华,等. 盐度和腐殖酸共同作用下的长江口泥沙絮凝过程研究[J]. 海洋学报,2008, 30(3) : 140-147.
- [23] 李秀文,何青. 长江口细颗粒泥沙絮凝问题研究综述[J]. 人民长江,2008, 39(6) :15-17.
- [24] Dyer K R, Manning A J. Observation of the size, settling velocity and effective density of flocs, and their fractal dimensions [J]. Journal of Sea Research, 1999, 41(1-2) :87-95.
- [25] Sternberg R W, Berhane I, Ogston A S. Measurement of size and settling velocity of suspended aggregates on the northern California continental shelf [J]. Marine Geology, 1999, 154(1-4) :43-53.