

邓智瑞,何青,杨清书,等. 珠江口磨刀门泥沙絮凝特征[J]. 海洋学报, 2015, 37(9): 152-161, doi:10.3969/j.issn.0253-4193.2015.09.015

Deng Zhirui, He Qing, Yang Qingshu, et al. Observations of in situ flocs characteristic in the Modaomen Estuary of the Pearl River[J]. Haiyang Xuebao, 2015, 37(9): 152-161, doi:10.3969/j.issn.0253-4193.2015.09.015

珠江口磨刀门泥沙絮凝特征

邓智瑞¹, 何青^{1*}, 杨清书², 林建良¹

(1. 华东师范大学 河口海岸学国家重点实验室, 上海 200062; 2. 中山大学 河口海岸研究所, 广东 广州 510006)

摘要: 本文利用激光粒度仪实测得到珠江口磨刀门河口 2013 年夏季悬浮泥沙现场絮凝及絮凝体特征, 同时对比悬沙分散粒径和含沙量, 研究表明: 悬沙分散粒径平均值为 $27.9 \mu\text{m}$, 现场实测絮团粒径平均值为 $91.6 \mu\text{m}$, 表明磨刀门口外的悬浮泥沙絮凝现象显著; 实测絮团平均粒径变化范围为 $13.0 \sim 273.8 \mu\text{m}$, 小潮期间絮团粒径平均值为 $131.5 \mu\text{m}$, 大于大潮平均值 $76.9 \mu\text{m}$; 絮凝体粒径在垂向上的变化表现为由表及底先变大再变小。絮团体积浓度、沉速与粒径的关系在不同情况下有差异, 体积浓度和絮团粒径在表层和中层有明显正相关关系, 絮团沉速在大潮时刻随着粒径的增大而增大。综合分析影响絮凝的因素, 得知在珠江口盐度对于絮团大小影响不明显; 而流速大小的差异是影响大小潮之间絮团大小不同的主要因素。研究结果有助于了解珠江口细颗粒泥沙输移特性和相关生物化学过程。

关键词: 珠江口; 磨刀门; 悬浮泥沙; 絮凝

中图分类号: P737.14

文献标志码: A

文章编号: 0253-4193(2015)09-0152-10

1 引言

黏性细颗粒泥沙一般指小于 $62 \mu\text{m}$ 的、具有颗粒间黏性的泥沙, 其絮凝现象是河流和河口悬沙起动、运移和沉积的一个重要过程。悬浮泥沙颗粒在颗粒间电荷引力、水体胶质等的作用下, 多颗粒结合在一起, 形成更大颗粒、低密度(相对于泥沙颗粒)的絮凝体, 即絮团。絮团的沉降速度要远远大于分散的泥沙颗粒, 因此研究悬浮泥沙絮凝一直是细颗粒泥沙研究中的一个重要内容。同时絮凝体也促成物质吸附作用, 因此作为水体污染物和营养盐等物质输送的载体, 对河口水质环境和生物化学物质输运等具有重要

作用。

絮凝体的组成、动力过程和形成机制在室内实验、现场观测和数值模拟等方面已经有大量研究^[1-3]。传统室内实验方法可获取悬沙的级配和沉速数据, 但其工序相当复杂, 从水样采集、保存到分析, 脆弱的絮凝体均可能被打碎, 因而分析得到的数据往往不能真实反映絮凝体的特性^[4]。现场激光粒度仪 LISST-100 则可以现场实时获取水中悬浮颗粒物现场絮团粒径谱和沉速谱^[5], 功能较全面, 测验效率高, 精度好。程江^[6]使用 LISST-100 在长江口现场观测到絮团, 并使用谱分析方法研究了絮团随潮流的周期变化。唐建华^[7]分析了水动力、悬浮物浓度、盐

收稿日期: 2015-01-22; 修订日期: 2015-04-09。

基金项目: 国家自然科学基金项目(41276080, 41476073, 51320105005); 科技部科技基础性工作专项重点项目“中国典型河口动力沉积地貌本底数据调查”(2013FY112000)。

作者简介: 邓智瑞(1990—), 男, 广西省来宾市人, 博士研究生, 主要从事河口海岸泥沙研究。E-mail: 52132601012@ecnu.cn

* 通信作者: 何青, 教授, 主要从事河口海岸泥沙运动研究工作。E-mail: qinghe@sklec.ecnu.edu.cn

度等因素对絮团的影响,并且提出了基于现场资料的絮团沉速算法。陈锦山等^[8]、Guo 和 He^[9]从长江口絮凝现象的观测延伸至整个长江流域。在珠江口,仅有夏小明等^[10]使用 LISST-ST 实测分析了枯季磨刀门悬沙絮凝沉降特征,得到絮团中值粒径 10~96 μm 、现场沉速 1~20 mm/s;同时认为低悬沙浓度对于絮凝的影响不显著,而水体污染物的存在可能增大絮凝体沉速。国内对于河口区絮团的研究主要集中在长江口,对于珠江口泥沙絮凝现象的研究较少,认识还不够深入,因此有待进一步研究。

珠江是由西江、北江、东江及珠江三角洲诸河汇聚而成的复合水系,年总径流量为 $3.26 \times 10^{12} \text{ m}^3$,西江作为珠江流域的最大支流,河流总长为 $2.21 \times 10^3 \text{ km}$,年径流量和输沙率分别为 $2.28 \times 10^{11} \text{ m}^3$ 和 $6.45 \times 10^9 \text{ t}$,悬沙浓度为 0.23 g/L;北江流域河流长 468 km,年径流量和输沙率分别为 $4.49 \times 10^{10} \text{ m}^3$ 和 $5.45 \times 10^8 \text{ t}$,悬沙浓度为 0.13 g/L;东江河流长 562 km,年径流量和输沙率分别为 $2.34 \times 10^{10} \text{ m}^3$ 和 $2.36 \times 10^8 \text{ t}$,悬沙浓度为 0.10 g/L。这 3 条河流总径流量和输沙率分别占整个珠江流域的 80% 和 95%^[11]。珠江河口由 8 个口门入海,其中磨刀门位于广东省珠海市洪湾企人石,是西江径流的主要出海口门。磨刀门多年平均径流量为 $9.23 \times 10^{10} \text{ m}^3$,占马口站径流量的 1/3,占西、北江径流量的 1/3,居珠江三角洲八大口门之首。磨刀门口门潮差小、潮流弱,年均潮差为 0.86 m,多年最大潮差平均为 2.04 m,在八大口门中是最小的。磨刀门属强径流弱潮流河口,多年平均山潮比为 5.78,洪水期以径流作用为主^[12]。国内学者已较全面地分析了珠江磨刀门口悬沙泥沙的来源、路径、通量以及河口冲淤演变规律^[13-14],在此基础上,本文利用 LISST-100C 在珠江磨刀门口外定点观测洪季大潮和小潮悬浮絮凝及其絮团的分布与变化情况。

2 资料与方法

2.1 数据来源

在磨刀门拦门沙外侧布设垂线进行水文测验,测点如图 1 所示。观测时间为 2013 年 7 月 22 日 14:00 至 7 月 25 日 14:00(大潮)和 7 月 28 日 8:00 至 7 月 29 日 11:00(小潮)。测量过程中,采用 LISST-100 现场激光粒度仪进行水体悬浮物现场粒度的逐时垂线测量,垂线测量采样间隔为 2 s;同时用 OBS-3A 与 LISST-100 同步测量悬沙浓度(NTU)及盐度,采样间隔同样为 2 s。另外,每整点时刻按 6 层法采取各层

图 1 珠江口地形及磨刀门观测点

Fig. 1 Map of the Pearl River Estuary topography and the sample site in Modaomen Estuary

水体水样,用作室内含沙量分析及盐度标定,同时部分特征时刻如涨急、涨憩、落急、落憩时刻,额外采集一份水样,带回实验室内做悬浮泥沙分散粒度分析。

2.2 样品和数据处理

水样含沙量的分析方法是:用滤膜(孔径为 0.45 μm 的醋酸纤维膜,先烘干称重)进行过滤,过滤后的膜在 120 $^{\circ}\text{C}$ 的烘箱内烘干 8 h,然后称重,由此重量差和水体体积计算出悬浮含沙量。悬浮泥沙分散粒度的分析方法是:先加入 0.16% 的六偏磷酸钠(NaPO_3)。作为分散剂,浸泡 24 h 并用超声波震荡,用英国马尔文公司生产的 Master sizer 2000 型激光粒度仪进行粒度分析,获得 $1/4\Phi$ ($\Phi = -\log_2 D$) 间隔的粒度分布。由粒度分布曲线可计算平均粒径等代表参数。

OBS 浊度和含沙量之间的校正:根据现场获取的水样含沙量,与同一时刻、同一层位的 OBS 浊度相比较(见图 2),在浊度小于 2 000 NTU 的情况下,悬浮物浓度与浊度变化呈线性相关^[15],因此可由 OBS 的浊度换算得到更多时间序列的含沙量。

2.3 沉速计算方法

Fettweis 提出了现场絮团有效密度的计算公式^[16]:

$$\Delta\rho = \rho_F - \rho_w = \left(1 - \frac{\rho_w}{\rho_P}\right) \frac{M_F}{V_F}, \quad (1)$$

式中, $\Delta\rho$ 是有效密度(单位: kg/m^3), ρ_w 为水的密度, ρ_P 为泥沙颗粒密度(取 $2\,650 \text{ kg}/\text{m}^3$), ρ_F 为絮团密度

图 2 浊度和含沙量之间的关系

Fig. 2 Relationship between turbidity and suspended sediment concentration

(单位: kg/m^3), M_p 可用质量浓度代替(单位: kg/m^3); V_F 为体积浓度(单位: $\mu\text{L}/\text{L}$), 由 LISST-100 直接测得。

沉速计算根据 Mikkelsen 和 Pejrup^[17] 的研究建议, 采用 Stokes 公式:

$$\omega_s = \frac{D_m^2 \Delta \rho g}{18\mu}, \quad (2)$$

式中, D_m 为絮团代表粒径, 此处取为平均粒径(单位: μm), μ 为水的动力黏滞系数(单位: $\text{Pa} \cdot \text{s}$), 根据水温选取相应的值。

3 结果

3.1 基本水文泥沙特征

观测期间的水文数据项目有粒度、流速、含沙量、盐度和温度等。由于观测期间为夏季, 水体水温较高, 水温变化范围在 $27.9 \sim 29.0^\circ\text{C}$ 之间, 同时观测点水深较浅(约 $6 \sim 8 \text{ m}$), 因而温度在垂向上的变化不大。

现场的含沙量在大潮和小潮的分布规律相似, 底部的含沙量都大于表层和底层, 表层和底层含沙量约在 $0.05 \text{ g}/\text{L}$ 以下, 并且随着潮周期的变化不显著; 但底层的含沙量平均为 $0.1 \text{ g}/\text{L}$, 在大潮和小潮期间均出现多个峰值达到 $0.2 \text{ g}/\text{L}$, 出现峰值的时刻接近急流特征时刻(涨急、落急)。

分散粒径随时间的变化与特征时刻相对应。泥沙的分散粒径最大为 $60.7 \mu\text{m}$, 最小为 $8.3 \mu\text{m}$; 磨刀门口外的泥沙主要为粉砂和砂, 黏土成分较少, 泥沙颗粒较粗。在大潮时刻, 分散泥沙的平均粒径变化范围约为 $10 \sim 140 \mu\text{m}$, 中层的分散粒径比表层和底层的大, 而表层和底层的分散粒径较为接近, 总体看来, 分散粒径随着潮汐周期变化呈现出一定的规律性, 在涨急、涨憩时刻分散粒径较大, 落憩时刻分散粒径较小。

3.2 絮团大小及絮凝效率

根据 LISST-100 所测数据, 现场絮团平均粒径基本特征如表 1 所示。大潮时最大絮团出现在底层, 平均粒径为 $212.6 \mu\text{m}$, 最小絮团也出现在底层, 平均粒径为 $13.0 \mu\text{m}$, 大潮时絮团平均粒径大小为 $76.9 \mu\text{m}$; 小潮时最大絮团出现在表层, 平均粒径为 $273.8 \mu\text{m}$, 最小絮团出现在底层, 平均粒径为 $25.9 \mu\text{m}$, 小潮时絮团平均粒径大小为 $131.5 \mu\text{m}$ 。小潮絮团平均粒径大于大潮。现场絮团的粒径在特征时刻变化范围为 $14.0 \sim 212.6 \mu\text{m}$; 在大潮时刻表层絮团大小多数大于底层, 而在小潮时刻则相反, 底层大多数絮团粒径大于表层絮团。

大潮时刻表层和底层絮团大小较接近, 平均大小约为 $60 \mu\text{m}$, 中层絮团最大, 平均为 $107 \mu\text{m}$; 表层和底层泥沙分散粒径平均约为 $23 \mu\text{m}$, 中层泥沙颗粒最粗, 平均粒径为 $63 \mu\text{m}$ 。絮团粒径与分散粒径均呈现出中间大, 表底小的规律, 在小潮中也是如此。

总体看来, 垂向各水层悬浮物的絮团粒径基本大于其对应时刻的分散粒径, 甚至达 10 倍以上, 由此可推断磨刀门河口的悬浮颗粒可能相互黏结形成絮团而使悬浮物粒径增大, 即该区域发生明显的絮凝作用。对应特征时刻, 发现絮团粒径与分散粒径的分离在憩流时刻尤为明显, 表明潮周期动力环境变化会影响磨刀门河口的泥沙絮凝效应。此外, 对观测数据进行垂向对比发现, 悬浮物絮团粒径与分散粒径的分离在中层最为明显, 由此向表、底分离均减弱, 表明絮凝作用随水深的增加呈先增后减的变化趋势。

表 1 磨刀门河口大小潮期间实测絮团平均粒径的比较

Tab. 1 Comparison about the mean floc diameter of two tidal cycle

大小潮	水层	项目	最大值/ μm	最小值/ μm	平均值/ μm	极差/ μm
大潮	表层	现场	208.3	17.4	63.0	190.9
		分散	44.0	11.1	26.7	32.9
		现场/分散	4.7	1.6	2.4	5.8

续表 1

大小潮	水层	项目	最大值/ μm	最小值/ μm	平均值/ μm	变化范围/ μm	
大潮	中层	现场	206.6	20.8	107.6	185.8	
		分散	144.7	18.3	62.9	126.5	
		现场/分散	1.4	1.1	1.7	1.5	
	底层	现场	212.6	13.0	60.1	199.5	
		分散	60.7	8.3	23.3	52.4	
		现场/分散	3.5	1.6	2.6	3.8	
	小潮	表层	现场	273.8	29.0	109.5	244.8
			分散	36.5	9.8	23.8	26.7
			现场/分散	7.5	3.0	4.6	9.2
中层		现场	258.9	69.7	155.9	189.3	
		分散	54.7	18.8	33.2	35.9	
		现场/分散	4.7	3.7	4.7	5.3	
底层		现场	227.5	25.9	129.1	201.6	
		分散	59.9	8.3	21.6	51.6	
		现场/分散	3.8	3.1	6.0	3.9	

3.3 絮团特征随时间变化

图3为絮凝体体积浓度、有效密度和沉速随时间的变化。絮凝体体积包括絮凝体中水的体积和所有颗粒物的体积。絮凝体体积浓度是指单位体积水体中所含絮凝体的体积,单位为 $\mu\text{L}/\text{L}$ ^[6],即体积浓度越大,絮凝体之间的碰撞几率越大,相互作用也越明显。大潮时刻磨刀门水体底层的体积浓度要明显大于表层和中层,而小潮时刻表、中、底层体积浓度较为接近。陈锦山等^[8]研究了长江流域的絮凝现象指出,絮团体积浓度与悬浮物浓度呈良好的线性关系,即悬浮物浓度高的区域,絮团体积浓度也很高,而絮团粒径反而很小。

絮凝体的有效密度是絮凝体在水中的真实密度,是絮团的沉速计算的关键部分。图中显示有效密度变化范围较大,在 $0\sim 500\text{ g}/\text{L}$ 之间,且底层的有效密度明显大于表层和中层,大潮期间的表层和中层有效密度比小潮的略大。

絮凝体沉速在大小潮时刻存在差异。大潮时刻,最大沉速为 $1.2\text{ mm}/\text{s}$,大部分沉速小于 $0.8\text{ mm}/\text{s}$,沉速垂向分布从大到小依次为底层、中层、表层,而小潮时刻底层沉速明显大于表层和中层,最大可达 $1.3\text{ mm}/\text{s}$,表层和中层沉速较接近,均小于 $0.6\text{ mm}/\text{s}$ 。

4 讨论

4.1 絮团特性

4.1.1 絮团组成

图4a中展示了特征时刻的粒径累计百分比。对比絮团的现场观测和泥沙室内分散粒径的累计频率曲线可知,现场粒径频率和室内粒径频率分布差别很大,形成絮团后,细颗粒组分所占频率明显减小,而较大颗粒组分所占比例较高,可见在磨刀门口外,水体中的细颗粒参与了絮凝,并且更多的形成大絮团。从垂向分布上看,表层的分散粒径最细,且现场形成的絮团最小,而中层的分散粒径最粗,絮团也大于表层和底层,说明在珠江磨刀门河口泥沙分散粒径的大小与形成的絮团大小有密切关系。

4.1.2 体积浓度与絮团粒径

Van der Lee^[18]认为,在高体积浓度情况下,絮凝体颗粒增多,加大了絮凝体之间的碰撞几率,有利于形成大的絮凝体,絮凝体粒径随着体积浓度的增大而增大。程江^[6]观测了长江口徐六泾的絮凝现象,认为絮凝体平均粒径和体积浓度的关系存在两个阶段,在临界体积浓度($75\ \mu\text{L}/\text{L}$)之下时絮凝体平均粒径随体积浓度增加而增大,超过临界值($75\ \mu\text{L}/\text{L}$)时絮凝体

图 3 磨刀门絮团体积浓度、有效密度、沉速随时间分布
 Fig. 3 Variation of floc volume concentration, effective floc density and settling velocity along the Modaomen Estuary

平均粒径随体积浓度的增加变化不大。本次的观测结果与之略有不同,大、小潮中由于表层和中层的体积浓度基本处于 $75 \mu\text{L/L}$ 以下,因而呈现出随着体积浓度的增大而增大的关系,但是底层却无明显的相关性,这有可能是底部较大含沙量产生再悬浮作用,增加絮团间碰撞,因而并未产生随体积浓度增加而絮团增大的现象。

4.1.3 沉速与絮团粒径

絮凝体沉速和其平均粒径之间的关系可以用 ω_s

$=\alpha \cdot Dm^\beta$ 来表示^[17]。从图 5 中可以看出,大小潮时刻的絮团沉速均没有明显的分层现象,大潮时刻絮团沉速随着絮团粒径增大而增大, α 值在 $0.000\ 005 \sim 0.000\ 7$ 之间, β 值在 $1.1 \sim 2.3$ 之间,但小潮时刻则没有这一明显关系。根据 Stokes 公式,絮团的沉速由有效密度和絮团粒径共同控制,同时也会受到其他物理、化学和生物因素的影响,因而小潮时刻的特殊性还需进一步研究。

图 4 特征时刻现场和室内粒度频率曲线

Fig. 4 Representative accumulative size distributions of dispersed particles and flocs in the estuary

图 5 絮团粒径和体积浓度、沉速的关系

Fig. 5 Relationship between floc diameter, volume concentration and settling velocity

4.1.4 珠江口絮凝特性

表 2 展示了国内外河口的絮团研究成果,对比可知,珠江口磨刀门絮团平均粒径较大,与国外几个河口相接近,变化范围从 $10\sim 600\ \mu\text{m}$ 不等,略大于长江河口的 $14\sim 191\ \mu\text{m}$;同时絮团的有效密度在 $5\sim 500\ \text{kg}/\text{m}^3$,比国外河口及长江口小;总体沉速较小与长江口絮团沉速相接近。造成这些差异的原因主要与珠江口磨刀门河口的水动力特性有关,磨刀门河口含

沙量为 $0.05\sim 0.2\ \text{kg}/\text{m}^3$,远低于长江口的 $0.1\sim 0.6\ \text{kg}/\text{m}^3$,并且流速小于长江口(最大 $0.8\ \text{m}/\text{s}$),易形成比长江口大的絮团,同时珠江口相比于国外的河口较大,径流量大,水体交换剧烈,因而产生较低的有效密度,且沉速也相对较小。此外,珠江河口泥沙絮凝现象在不同季节也有不同的特征,对比夏小明等^[10]在枯季的观测结果,发现珠江河口洪季的絮团粒径,沉速等均大于枯季,这可能与径流量、潮流及温度等因素的季节性

变化有关。总体看来,珠江河口拥有特殊的动力条件,其泥沙运动中絮凝过程是一个值得深入研究的课题。

表 2 国内外河口絮凝研究结果比较
Tab. 2 Comparison about the floc from different researchers

研究人员	河口	粒径 / μm	有效密度 / $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$	沉速 / $\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$	含沙量 / $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$	切应力 / $\text{N} \cdot \text{m}^{-2}$	流速 / $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$
Dyer 等 ^[19]	Tamar	50~350	50~750	0.6	8	0.04~0.7	—
Dyer 等 ^[20]	Dollard	16~300	5~1 000	0.03~6	0.01~11.3	0.1~0.57	—
Manning 等 ^[21]	Gironde	43~435	30~1 000	2~6	<0.2	0.06~0.6	—
Manning 等 ^[22]	Scheldt	100~350	20~250	0.5~4	0.15~0.3	<0.24	—
Manning 和 Schoellhamer ^[23]	San Francisco Bay	22~639	160~1 600	0.04~15.8	<0.25	0.2~0.5	—
唐建华 ^[7]	长江口	40~191	161~840	0.32~1.66	0.13~0.62	—	0.1~2.5
程江 ^[6]	长江口	14.9~86.7	689~1 429	0.19~3.18	0.28~0.48	—	0.1~1.5
夏小明等 ^[10]	珠江口	10~96	—	0.01~0.2	0.003~0.15	—	—
本文	珠江口	13.0~273.8	5~500	0~1.3	0.05~0.2	—	0.1~0.8

4.2 絮团时空差异及影响因素

4.2.1 垂向变化

程江^[6]观测了长江口絮凝现象,发现絮凝大小在垂线上表现为从表层到底层逐渐增大的规律。但本次综合磨刀门河口大、小潮絮凝体在不同特征潮位的垂线变化(图 6)发现,泥沙絮凝体粒径大小在垂线上

基本表现为由表及底先增后减的趋势,在中层出现最大值,表、底层粒径相对较小且大小相接近。从盐度垂向分布图(图 6)可知,盐度在垂向上表现为从表层到底层逐渐增大的趋势,且水体分层较为明显,小潮时刻水体层化现象大于大潮时刻(见图 7)。

图 6 大小潮絮团大小和盐度的垂向分布

Fig. 6 Profile of floc diameter and salinity along the flow depth

有对长江口的研究表明^[24-26],盐水会促进絮团的形成,盐度对絮凝体大小的影响分两个阶段,在较低的盐度下,盐度的增加会促使大絮团的产生,而当超过一定盐度之后,对于絮凝体大小的影响不明显,有学者在长江口研究得到最佳絮凝盐度范围为 3~16^[6-7,26]。但夏小明等^[10]在珠江口的研究中发现河

口盐度与现场平均粒径和沉速之间似乎没有较好的相关性,并且在不同的河口水域会呈现出不同的规律,盐度的絮凝效应具有明显的区域变化特征。本次在珠江磨刀门河口的观测中,研究区域盐度较高,大潮盐度在 15~30 之间,小潮盐度在 7~30 之间,将絮团粒径与盐度作相关性分析(见图 7),发现絮团粒径

图7 盐度与絮团大小的关系

Fig. 7 Relationship between mean floc diameter and salinity

大小与盐度没有明显相关关系,大絮团多出现在20~30的盐度范围内,盐度可能超过了影响絮凝形成的最佳范围,因此盐度对絮凝的形成影响较小,说明在珠江磨刀门河口,盐度并非制约絮团形成的主要因素。

4.2.2 大小潮差异

水动力条件是制约水体中絮凝形成的关键因素。阮文杰^[27]对絮凝形成机理的研究结果显示,流速对于絮凝的影响应分为两个阶段:在流速较小时,水体的紊动使得水体中泥沙颗粒碰撞增加,利于形成絮团;当流速增加到一定值之后,絮团体积也达到峰值,此时流速的增加使得絮团受到的剪切力增加,絮团自身会被分解,因而会阻碍大絮团的产生。现场流速和絮团大小关系如图8,由图可知,小潮时刻总体的絮团粒径要大于大潮时刻,粒径变化范围也比大潮时刻大。流速与絮团大小并无明显相关性,但在大小潮时刻流速对絮团的影响明显不同,在小潮时刻,会有大于150 μm 的絮团产生,而在大潮流速较大时,絮团反而会变小,由此可见,在珠江磨刀门河口,大小潮之间的动力差异是导致絮团大小不同的主导因素,但由于其他因素的影响,流速与絮团大小的关系较为复杂,絮团大小的变化规律还需进一步研究。

5 总结

本文根据洪季珠江口磨刀门口外定点观测数据,分析讨论了悬沙絮凝特征,得到以下主要结论:

(1)珠江口磨刀门悬沙絮凝现象显著,絮团平均粒径是分散粒径的2.3倍。絮团大小在13.0~273.8 μm 之间。小潮絮团大于大潮,大潮平均大小为76.9 μm ,小潮平均大小为131.5 μm 。絮团的体积浓度受

图8 流速与絮团大小的关系

Fig. 8 Relationship between mean floc diameter and velocity along the Modaomen Estuary

悬沙浓度影响,垂向分布规律为底层最大,最高可达200 $\mu\text{L/L}$,表层和中层则大多不超过50 $\mu\text{L/L}$ 。珠江口形成絮凝的泥沙以粒径小的细颗粒为主,并且泥沙分散粒径对于形成絮团的大小有密切关系;

(2)通过计算得到有效密度、沉速的分布规律,其在空间分布上表现为底层水体较大,中层和表层水体较小,有效密度变化范围在5~500 g/L ,沉速则在0~1.3 mm/s 之间,在时间分布上,大小潮的差异不显著。通过相关性分析可知,表层和中层的体积浓度和絮团大小有较明显的正相关关系,而底层则由于较高的含沙量使絮团碰撞沉降,絮团并未随着体积浓度的增加而增大;沉速和絮团粒径大小的关系在大小潮不同,大潮时沉速随粒径增大而增大,但小潮时刻没有明显的相关性;

(3)通过分析盐度和流速对于絮团大小的影响可知,在珠江口高盐度(盐度10~30)的环境下,盐度对于絮团大小的影响很小;絮团粒径在大小潮之间的差

异主要由流速差异引起,大潮时刻流速较大,难以形成大于 $150 \mu\text{m}$ 的絮团,而在流速较小的小潮时刻,可以形成大于 $150 \mu\text{m}$ 的大絮团,由此可见流速对于絮团大小的影响分两个阶段,当流速较小时促进絮团的形成,当流速较大时则会破坏絮团,抑制大絮团的

形成。

致谢:本研究现场采样得到中山大学河口海岸研究所的协助,特此感谢!

参考文献:

- [1] Manning A J, Langston W J, Jonas P J C. A review of sediment dynamics in the Severn Estuary: Influence of flocculation[J]. Marine Pollution Bulletin, 2010, 61(1/3): 37–51.
- [2] Manning A J, Dyer K R. The use of optics for the in situ determination of flocculated mud characteristics[J]. Journal of Optics a-Pure and Applied Optics, 2002, 4(4): S71–S81.
- [3] Winterwerp J C, Bale A J, Christie M C, et al. Flocculation and settling velocity of fine sediment[Z]. Elsevier, 2002, 5: 25–40.
- [4] Gibbs R J. Estuarine flocs: their size, settling velocity and density[J]. Journal of Geophysical Research, 1985, 90(C2): 3249–3251.
- [5] Agrawal Y C, Pottsmith H C, Lynch J, et al. Laser instruments for particle size and settling velocity measurements in the coastal zone[G]// Prospects for the 21st Century Conference Proceedings. OCEANS 96 MTS/IEEE (Cat. No. 96CH35967), 1996(3): 1135–1142.
- [6] 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.
Cheng Jiang, He Qing, Wang Yuanye. Using LISST 100 for in situ estimates of floc size, density and settling velocity, Changjiang Estuary, China [J]. Journal of Sediment Research, 2005(1): 33–39.
- [7] 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.
Tang Jianhua, He Qing, Wang Yuanye, et al. Study on in-situ flocs size in turbidity maximum of the Changjiang Estuary[J]. Journal of Sediment Research, 2008(2): 27–33.
- [8] 陈锦山, 何青, 郭磊城. 长江悬浮物絮凝特征[J]. 泥沙研究, 2011(5): 11–18.
Chen Jinshan, He Qing, Guo Leicheng. Flocculation characteristics of suspended particulate matter in Yangtze River[J]. Journal of Sediment Research, 2011(5): 11–18.
- [9] Guo L C, He Q. Freshwater flocculation of suspended sediments in the Yangtze River, China[J]. Ocean Dynamics, 2011, 61(2/3): 371–386.
- [10] 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.
Xia Xiaoming, Li Yan, Yang Hui, et al. Observations of the size and settling velocity distributions of suspended sediment in the Zhujiang River Estuary during dry season[J]. Journal of Marine Sciences, 2006, 24(1): 6–18.
- [11] 吴创收. 华南流域人类活动和气候变化对入海水沙通量和三角洲演化的影响[D]. 上海: 华东师范大学, 2013.
Wu Chuangshou. Impacts of human activities and climate change on sediment flux and delta evolution in Southern China basin[D]. Shanghai: East China Normal University, 2013.
- [12] 谭超, 黄本胜, 龚文平, 等. 珠江磨刀门河口排洪动力特征及拦门沙演变响应的初步研究[J]. 水利学报, 2013(9): 1023–1029.
Tan Chao, Huang Bensheng, Gong Wenping, et al. The dynamics of flood releasing and its effects on the morphological evolution of the mouth bar in the Modaomen Estuary of the Pearl River[J]. Shuili Xuebao, 2013(9): 1023–1029.
- [13] 贾良文, 吴超羽, 任杰, 等. 珠江口磨刀门枯季水文特征及河口动力过程[J]. 水科学进展, 2006(1): 82–88.
Jia Liangwen, Wu Chaoyu, Ren Jie, et al. Hydrologic characteristics and estuarine dynamic process during the dry season in Modaomen Estuary of the Pearl River[J]. Advances in Water Science, 2006(1): 82–88.
- [14] 方神光, 王少波. 磨刀门水道枯季水动力特性分析[J]. 水文, 2013(5): 70–74.
Fang Shengguang, Wang Shaobo. Analysis of water dynamic characteristics of Modaomen waterway during dry season[J]. Journal of China Hydrology, 2013(5): 70–74.
- [15] 刘红, 何青, 王元叶, 等. 长江口浑浊带海域 OBS 标定的实验研究[J]. 泥沙研究, 2006(5): 52–58.
Liu Hong, He Qing, Wang Yuanye, et al. OBS situ calibration research in the turbidity maximum of the Changjiang Estuary, China[J]. Journal of Sediment Research, 2006(5): 52–58.
- [16] 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(2): 426–436.
- [17] Mikkelsen O A, Pejrup M. The use of a LISST-100 laser particle sizer for in-situ estimates of floc size, density and settling velocity[J]. Geo-Marine Letters, 2001, 20(4): 187–195.
- [18] Van der Lee W T B. Temporal variation of floc size and settling velocity in the Dollard estuary[J]. Continental Shelf Research, 2000, 20(12/13): 1495–1511.
- [19] Dyer K R, Bale A J, Christie M C, et al. The turbidity maximum in a Mesotidal Estuary, the Tamar Estuary, UK: II. the floc properties[J]. Proceedings in Marine Science, 2002, 5: 219–232.
- [20] Dyer K R, Christie M C, Feates N, et al. An investigation into processes influencing the morphodynamics of an intertidal mudflat, the Dollard

- Estuary, the Netherlands: I. Hydrodynamics and suspended sediment[J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2000, 50(5): 607–625.
- [21] Manning A J, Dyer K R, Lafite R, et al. Flocculation measured by video based instruments in the Gironde Estuary during the European Commission SWAMIEE project[J]. *Journal of Coastal Research*, 2004(5): 58–69.
- [22] Manning A J, Martens C, De Mulder T, et al. Mud floc observations in the turbidity maximum zone of the Scheldt estuary during neap tides[J]. *J Coast Res SI*, 2007, 50: 832–836.
- [23] Manning A J, Schoellhamer D H. Factors controlling floc settling velocity along a longitudinal estuarine transect[J]. *Marine Geology*, 2013, 345: 266–280.
- [24] 关许为,陈英祖,杜心慧. 长江口絮凝机理的试验研究[J]. *水利学报*, 1996(6): 70–74.
Guan Xuwei, Chen Yingzu, Du Xinhui. Experimental study on mechanism of flocculation in Yangtze Estuary[J]. *Shuili Xuebao*, 1996(6): 70–74.
- [25] 林以安,唐仁友,李炎. 长江口絮凝聚沉特征与颗粒表面理化因素作用——II. 颗粒表面性质对聚沉的作用[J]. *泥沙研究*, 1997(4): 78–86.
Lin Yian, Tang Renyou, Li Yan. Coagulation, settling characteristics and action of surface physico-chemical factors of particles in the Changjiang Estuary——II. Role of surface colloidal property variation on the coagulation and settling of particles[J]. *Journal of Sediment Research*, 1997(4): 78–86.
- [26] 张志忠,蒋国俊. 长江口阳离子浓度与细颗粒泥沙絮凝沉积[J]. *海洋学报*, 1995, 17(1): 76–82.
Zhang Zhizhong, Jiang Guojun. Cation concentration and fine sediment flocculation deposition in Changjiang Estuary[J]. *Haiyang Xuebao*, 1995, 17(1): 76–82.
- [27] 阮文杰. 细颗粒泥沙动水絮凝的机理分析[J]. *海洋科学*, 1991(5): 46–49.
Ruan Wenjie. Mechanistic analysis on hydrodynamic flocculation on fine sediments[J]. *Marine Sciences*, 1991(5): 46–49.

Observations of in situ flocs characteristic in the Modaomen Estuary of the Pearl River

Deng Zhirui¹, He Qing¹, Yang Qingshu², Lin Jianliang¹

(1. State Key Laboratory of Estuarine and Coastal Research, East China Normal University, Shanghai 200062, China; 2. Institute of Estuarine and Coastal Research, Sun Yat-Sen University, Guangzhou 510275, China)

Abstract: The Laser In Situ Scattering and Transmissometry-100 (LISST-100) was used to the field observation in the Modaomen Estuary of the Pearl River during the July 2013 (flood season). Based on the in situ data, we get some flocculation information; the dispersion of suspended sediment particle size is about 27.9 μm , the measured floccules mean diameter is about 91.6 μm , it indicated that suspended sediment flocculation phenomenon significantly. The in situ mean diameter of floc varied from 13.0 to 273.8 μm , the neap tidal floc was larger than spring tide. The variation of floc particle size was decreases at first, and then increases. The relationship between floc diameter and volume concentration, settling velocity were vary from case to case. The volume concentration and particle size of the floccules had positive correlation in surface and middle layer, floccules settling velocity increases with the increase of particle size in spring time. Comprehensive analysis of the factors affecting flocculation, the results show that the salinity have no significant relationship with floccules size, the influence of velocity to floccules had two kinds of circumstances, large flow motion will hinder the development of the floc size. These knowledge will contributes to a further understanding of fine sediment transport characteristics and biochemical process in the Pearl River Estuary.

Key words: Pearl River Estuary; Modaomen Estuary; suspended sediment; flocculation