

长江口徐六泾悬浮细颗粒泥沙絮凝体特性*

程江^{1,2} 何青¹ 夏小明³

(1. 华东师范大学 河口海岸学国家重点实验室 上海 200062; 2. 华东师范大学 环境科学系 上海 200062;
3. 国家海洋局第二海洋研究所 杭州 310012)

提要 2003 年 6 月 14 日—22 日, 利用现场激光粒度仪 LISST-100 在不扰动颗粒物的情况下, 于长江口徐六泾定点连续观测了洪季大、小潮表层粘性悬浮细颗粒泥沙絮凝体的实有粒径、体积浓度, 配合 OBS-3A 现场测量的悬沙浓度计算了现场絮凝体的有效密度和静水沉速。观测结果显示, 徐六泾大、小潮表层絮凝体体积浓度、粒径、有效密度和静水沉速的平均值分别为 98.0 $\mu\text{l/L}$ 、39.8 μm 、1173 kg/m^3 、1.14 mm/s 和 70.8 $\mu\text{l/L}$ 、64.4 μm 、919 kg/m^3 、2.32 mm/s 。研究表明: 长江口徐六泾表层絮凝体体积浓度主要受水流流速影响, 再悬浮现象明显, 体积浓度过程线滞后流速过程线, 落潮期间滞后 10—30 min, 涨潮则滞后 30—50 min;

小于一定流速时絮凝体平均粒径随流速增大而增大, 大于一定流速时絮凝体平均粒径则随流速增大而减小, 徐六泾大、小潮表层絮凝体在 50 cm/s 的垂线平均流速时出现平均粒径与垂线平均流速关系的转折; 徐六泾大、小潮表层絮凝体平均粒径在体积浓度 75 $\mu\text{l/L}$ 时出现平均粒径与体积浓度关系的转折, 体积浓度小于 75 $\mu\text{l/L}$ 时粒径随体积浓度增加而增大, 超过 75 $\mu\text{l/L}$ 时粒径随体积浓度的增加变化不明显; 絮凝体有效密度由粒径大小控制, 粒径大, 有效密度小, 反之亦然, 粒径和有效密度共同决定絮凝体静水沉速, 有效密度和沉速与平均粒径之间均存在良好的幂指数关系。

关键词 LISST, 絮凝体, 粒径, 有效密度, 沉速, 长江口

中图分类号 P731

河口地区水体盐度较高, 加之富含生物有机质, 输移到该区域的细颗粒泥沙易发生絮凝。絮凝改变了原先细颗粒泥沙的粒径、密度和沉速等一系列的物理性质, 形成了大粒径、低密度和高沉速的絮凝体。絮凝体的大量出现改变了河口地区泥沙及其吸附污染物质的输运方式。研究悬浮泥沙粒径分布的传统方法是先采集现场水样, 而后进行实验室分析; 测定泥沙颗粒沉速的方法往往采用 Owen 沉降管(Owen, 1971)。虽然这些方法可以获取悬浮泥沙的级配和沉速数据, 但是在传统的采样和分析过程中脆弱的絮凝体会被打碎, 因而得到的并不是现场絮凝体的真实数据(Gibbs, 1981)。从 20 世纪 90 年代初, 相继研发了一些现

场观测技术, 例如利用水下小型摄影机测量絮凝体粒径和沉速(Fennessy *et al.*, 1994, 1996, 1997; Sternberg *et al.*, 1996, 1999), 然后利用斯托克斯公式反推计算絮凝体的有效密度。最近几年, 美国 Sequoia 公司开发了一种现场激光粒度仪 LISST(Laser In Situ Scattering and Transmissometry), 可以快捷地获取水中悬浮颗粒物现场粒径谱和沉速谱(Agrawal *et al.*, 2000, 2001)。从 1999 年开始已有科学家利用 LISST 在河口海岸区域开展絮凝体现场粒径和沉速时空变化的研究, 但多集中应用在国外水域(Mikkelsen *et al.*, 2000, 2001, Mikkelsen, 2002; Voulgaris *et al.*, 2004; 兰志刚等, 2004)。国内学者 Xia 等(2004)利用 LISST 沉速仪

* 国家重点基础研究发展规划“973”项目, 2002CB412403、2004CB720505 号; 国家自然科学基金资助项目, 50379014 号。程江, 博士研究生, E-mail:sklec777@hotmail.com

通讯作者, 教授, E-mail:qinghe@sklec.ecnu.edu.cn

收稿日期: 2006-01-04, 收修改稿日期: 2006-12-06

在珠江河口对絮凝体特性进行了洪枯两季的研究, 笔者所在课题组曾对长江河口区域絮凝体进行了初步的研究(He *et al*, 2004; 程江等, 2005a, 2005b)。

以往研究认为长江口泥沙絮凝临界粒径约为 0.03 mm(张志忠等, 1995), 悬沙粒径以小于 0.032 mm 的颗粒为主, 0.032—0.016 mm 以下各粒级占 90.5%(吕全荣等, 1985; 张志忠, 1996), 这使得细颗粒泥沙絮凝沉降的现场状况和絮凝体在不同区域的特性显得非常重要。徐六泾作为长江河口的重要边界点, 属河口悬浮细颗粒泥沙絮凝出现的“峰值区”, 该处细颗粒泥沙的现场泥沙粒径、有效密度和沉速研究不仅对河口泥沙运动研究机理, 而且对长江三峡、南水北调和长江口深水航道等重大工程对河口地区泥沙运动变化的影响研究都显得非常重要。本文作者利用美国 Sequoia 公司产 B 型 2.5 cm 光程 LISST-100, 在不扰动絮凝体的情况下, 取得了徐六泾处定点大、小潮表层连续各 26 h 的悬浮细颗粒泥沙絮凝体粒径、有效密度和沉速现场资料, 研究了它们的变化过程以及相互之间的关系, 对天然原始状况下的河口区域细颗粒泥沙的特性有了新的认识, 可为悬浮细颗粒泥沙运动, 尤其是河口区域滩涂冲淤演变、港口航道维护、细颗粒泥沙所吸附污染物的运输等研究提供关键的悬浮细颗粒泥沙絮凝体特性数据。

1 研究区域和研究方法

1.1 观测站位

定点观测站点 120°57.70'E, 31°47.90'N 位于长江进入河口区的重要边界点徐六泾(图 1)。徐六泾既是南北支的分流点, 又是整个长江口的起点。长江口在徐六泾以下, 由崇明岛分隔为南支和北支, 南支河段在浏河口以下又被长兴岛和横沙岛分隔为南港与北港, 南港在九段以下再被九段沙分隔为南槽与北槽, 形成三级分汊、四口入海的格局。测站距口门约 110km, 江面宽约 5 km, 位于中泓线偏南, 水深超过 10 m。

1.2 测量方法和原理

用 LISST-100 进行了大、小潮定点表层(水下 1m)连续观测, 大潮时间从 2003 年 6 月 14 日 09: 00—15 日 11: 00, 小潮从 2003 年 6 月 21 日 01: 00—22 日 03: 00。LISST-100 的有效粒径测量范围为 1.46—230.14 μm , 测量内容包括表层悬浮

细颗粒泥沙絮凝体的粒级谱、平均粒径和体积浓度。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°到 20°的角度共分 32 级被记录和存储, 运用 Mie 散射理论(Born *et al*, 1975), 反推激光散射数据可获得悬浮颗粒物分 32 个粒级的体积浓度, 同时可计算出悬浮颗粒物 32 个粒级的总体积浓度和平均粒径。连续观测时大潮和小潮采样间隔分别为 4 min 和 5min, 分别取得有效连续数据 354 个和 303 个。

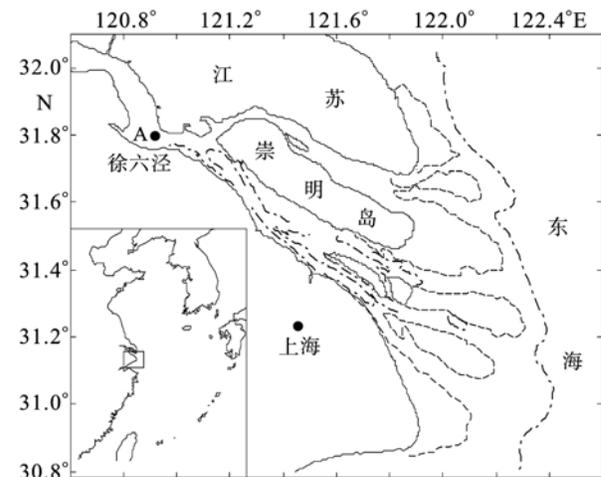


图 1 长江河口徐六泾测站(A: 测站)

Fig.1 Field measurement location in the Changjiang (Yangtze) Estuary (A: Xuliujing sampling point)

用美国 D&A 公司的 OBS-3A 测量表层悬沙浓度和盐度, 采样间隔为 5 min。为了保证悬沙浓度测量精度, 用现场同步采集表层水样, 孔径 0.45 μm 的醋酸纤维滤膜过滤水样, 105 $^{\circ}\text{C}$ 烘干 12 h 后, 称重计算悬沙浓度的方法厘定 OBS-3A。用美国 SonTek 公司的 500kHz 的 ADP 测量垂线流速、流向。共设 20 个采样单元, 每个单元为 1 m, 采样间隔为 5 min, 流速、流向测量精度分别达到 1cm/s 和 0.1°。本次测量仪器均安装在经过改装的木质测量船船舷侧, 船长约 25 m, 宽约 4 m, 排水量约 120 t。测量仪器除 ADP 按操作要求固定在水面下 0.5 m 处外, 其余 LISST-100 和 OBS-3A 均由绞车控制悬置于水下 1 m 处进行测量。

1.3 计算方法

1.3.1 悬浮泥沙浓度 现场采集同步水样厘定 OBS-3A 浊度数据, 得到现场悬浮泥沙的厘定换算公式(式 1):

$$SSC = 0.002154 \cdot NTU - 0.01830 \quad (1)$$

式(1)中 SSC 为悬浮泥沙浓度(kg/m^3), NTU 为 OBS-3A 浊度值, 相关系数 R^2 达到 0.9 以上。厘定换算公式适用的悬浮泥沙浓度范围为 $0.039\text{—}0.629 \text{ kg}/\text{m}^3$, 其中 $0.039 \text{ kg}/\text{m}^3$ 为率定数据组的最低悬浮泥沙浓度, $0.629 \text{ kg}/\text{m}^3$ 为率定数据组的最高悬浮泥沙浓度。

1.3.2 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。可以通过悬浮泥沙的体积浓度和悬浮泥沙浓度计算得出(Fennessy *et al*, 1994; Mikkelsen *et al*, 2000), 公式如下:

$$\Delta\rho \approx \frac{SSC}{VC} \quad (2)$$

式(2)中 $\Delta\rho$ 为絮凝体有效密度(kg/m^3), SSC 为悬浮泥沙浓度(mg/m^3), VC 为絮凝体的体积浓度($\mu\text{L}/\text{L}$)。悬浮泥沙浓度的适用范围同 1.3.1。

1.3.3 絮凝体沉速 计算泥沙沉速的公式有武水公式、沙玉清公式、窦国仁公式、斯托克斯公式、冈恰洛夫公式等(钱宁等, 1983; 张瑞瑾, 1998)。此次所得徐六泾大小潮表层连续 657 个数据的沙粒雷诺数(钱宁等, 1983), 最大为 0.308, 最小为 0.003, 平均为 0.110, 均小于 0.5, 属滞留区, 因此可选用斯托克斯滞留区公式计算长江口徐六泾处的絮凝体的静水沉速:

$$\omega_s = \frac{D_m^2 \cdot \Delta\rho \cdot g}{18 \cdot \eta} \quad (3)$$

式(3)中 ω_s 为絮凝体沉速(m/s); D_m 为絮凝体的平均粒径(m); $\Delta\rho$ 为絮凝体有效密度(kg/m^3); g 为重力加速度(m/s^2), 本文中计算时取 $9.81 \text{ m}/\text{s}^2$; η 为水的动力粘滞系数 [$\text{kg}/(\text{s} \cdot \text{m})$], 研究区域观测时水温为 25°C , 本文中计算时取 $0.000890 \text{ kg}/(\text{s} \cdot \text{m})$ 。

2 结果和讨论

2.1 水动力特征

长江口水量丰沛, 输沙量大, 年均径流量为 $28\ 700 \text{ m}^3/\text{s}$, 年均输沙量为 $4.330 \times 10^8 \text{ t}$ 。径流量

有明显的季节性变化, 5—10 月经流占年径流量的 71.1%, 为洪季; 11 月到翌年 4 月只占 28.3%, 为枯季。沙量年内分配的不均匀性较径流更为明显, 洪季 6 个月的输沙量占年输沙总量的 87.2%, 枯季 6 个月的输沙量仅占 12.8%。长江口是中等强度的潮汐河口。徐六泾多年平均潮差为 2.05 m, 涨潮平均历时 4 h 16 min, 落潮平均历时 8 h 8 min(沈焕庭等, 2001)。

此次 ADP 测流结果见表 1。观测数据显示, 受长江大径流量的影响, 徐六泾处落潮流流速一般比涨潮流速大(表 1, 图 2a、3a)。大潮时垂线最大流速落潮略大于涨潮, 小潮时两者差值达 29 cm/s。由于大小潮进潮量相差悬殊, 就潮周期垂线平均流速而言, 大潮 101 cm/s 远大于小潮 79 cm/s。对于涨落潮垂线平均流速, 大潮时, 落潮比涨潮大。流速过程线相当规则。涨潮流速过程线顶峰明显且持续时间短并左右对称; 落潮流速过程线相对平缓而持续时间长(图 2a、3a), 落潮流的强度超过涨潮流。受长江河槽地形影响, 涨落潮流向基本上与河槽主轴线平行。大潮时, 表层涨潮流流向为 295° , 表层落潮流流向为 115° (图 2b); 小潮时, 两者分别为 285° 和 115° (图 3b)。

2.2 盐度

此次观测期间盐度在 0.16—0.17 之间。据关许为等(1992)和王保栋(1994)研究, 在长江口盐淡水交汇锋面附近(盐度约在 0.08—1.00), 由于盐水入侵, 电解质含量突然增大, 细颗粒泥沙表面性质发生显著变化, 电泳淌度迅速减小, 其稳定性显著降低, 属河口絮凝出现的“暴发区”; 长江口颗粒物从河流向海方向运移过程中在盐度 0.10—2.00 出现絮凝速度的峰值区(林以安等, 1995)。徐六泾测站位虽然盐度较小, 但属于细颗粒泥沙易发生絮凝的区域。

2.3 絮凝体体积浓度

大潮表层絮凝体体积浓度最大为 $253 \mu\text{L}/\text{L}$, 最小为 $29.4 \mu\text{L}/\text{L}$, 平均为 $98.0 \mu\text{L}/\text{L}$; 小潮表层相应的数据分别为 $152 \mu\text{L}/\text{L}$ 、 $19.0 \mu\text{L}/\text{L}$ 和 $70.8 \mu\text{L}/\text{L}$ 。

表 1 涨落潮、大小潮流速对比

Tab.1 Comparison of current velocities between flood and ebb, spring and neap tide

| 项 目 | 大潮最大流速(cm/s) | 大潮平均流速(cm/s) | 小潮最大流速(cm/s) | 小潮平均流速(cm/s) |
|----------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|
| 落潮垂线平均值 | 148 | 101 | 106 | 65 |
| 涨潮垂线平均值 | 146 | 79 | 77 | 43 |
| 潮周期垂线平均值 | 148 | 97 | 106 | 58 |

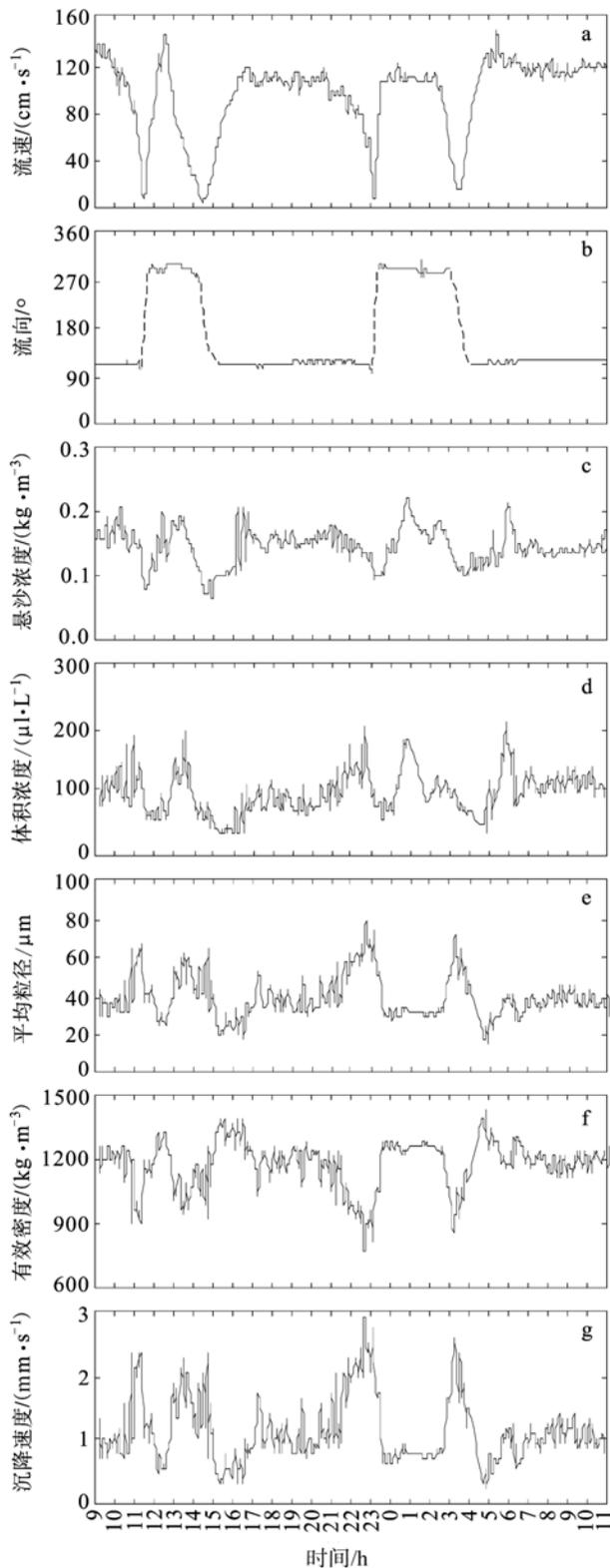


图2 大潮表层流速(a)、流向(b)、悬沙浓度(c)、絮凝体体积浓度(d)、平均粒径(e)、有效密度(f)和沉降速度(g)随时间变化过程(2003年6月14日09:00—15日11:00)

Fig.2 Temporal variations of current velocity (a), current direction (b), suspended sediment concentration (c), flocs volume concentration (d), flocs mean diameter (e), flocs effective density (f) and flocs settling velocity (g) in the surface water during spring tide

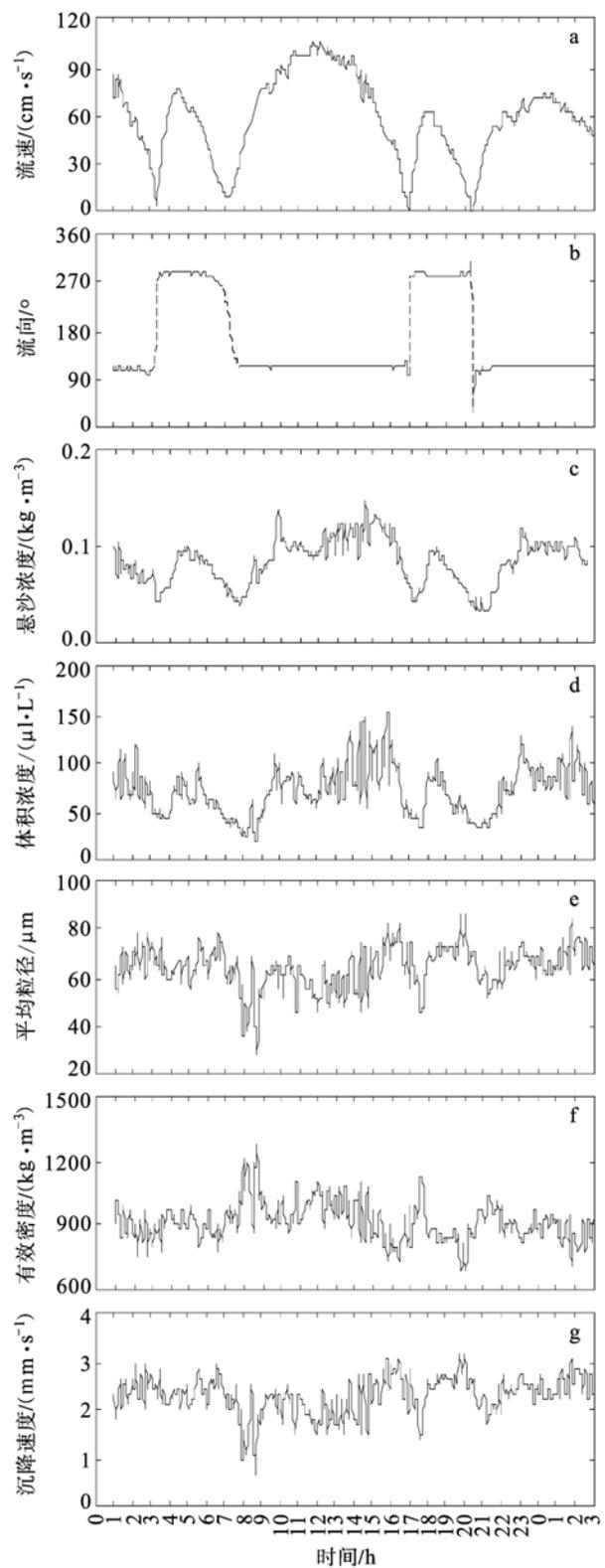


图3 小潮表层流速(a)、流向(b)、悬沙浓度(c)、絮凝体体积浓度(d)、平均粒径(e)、有效密度(f)和沉降速度(g)随时间变化过程(2003年6月21日01:00—22日03:00)

Fig.3 Temporal variations of current velocity (a), current direction (b), suspended sediment concentration (c), flocs volume concentration (d), flocs mean diameter (e), flocs effective density (f) and flocs settling velocity (g) in the surface water during neap tide

这是由于在长江口区域大潮流速远大于小潮流速(表 1), 导致大潮絮凝体体积浓度大于小潮絮凝体体积浓度。图 2d、3d 表明, 不论在大潮还是小潮期间, 在落潮过程中絮凝体体积浓度的扰动比涨潮过程中更加频繁和强烈, 存在着高频振荡。这与流体动力不稳定和表示垂向切变不稳定的速度梯度有关。有研究表明, 长江口区域落潮期间垂向速度梯度比涨潮期间大, 使垂向切变不稳定增强, 絮凝体体积浓度扰动就越频繁和强烈(朱建荣等, 2001; 程江等, 2003)。

潮周期内, 絮凝体体积浓度和垂线平均流速之间关系良好(图 2d、3d)。絮凝体再悬浮现象明显, 絮凝体体积浓度过程线滞后于流速过程线, 两者之间存在一个时间差, 落潮约在 10—30 min, 涨潮约在 30—50 min。床面上絮凝体的再悬浮引起的絮凝体体积浓度的变化主要是由潮流引起, 因而絮凝体体积浓度响应比潮流响应滞后, 滞后间隔由垂向湍流扩散系数、泥沙垂向梯度、测点和河底间垂向距离决定(朱建荣等, 2001; 程江等, 2003)。

2.4 絮凝体的现场粒径

大、小潮表层絮凝体平均粒径是 39.8 μm 和 64.4 μm , 大潮比小潮要小 39%, 粒径变化范围分别为 14.9—78.1 μm 和 29.5—86.7 μm 。不论是大潮还是小潮, 在高流速时的絮凝体平均粒径小于低流速(图 2e、3e), 急流时平均粒径达到最小值, 憩流时平均粒径最大。Xia 等(2004)在珠江口的观测也得到了相类似的结果。

据阮文杰(1991)研究, 絮凝体在水流中所受到的剪切力可分为三部分: (1)由流速梯度所产生的剪切力, 对于流速呈对数分布的水流, 在主流区内, 水流切应力呈直线分布, 且与平均流速的二次方成正比(钱宁等, 1983); 当流速增大时, 水流切应力亦相应增大, 絮凝体受到的切应力亦相应增大; (2)由于絮凝后泥沙颗粒体积增大, 运动状态改变而引起的切应力, 按固、液两相紊流理论(窦国仁等, 1987), 在未絮凝前, 颗粒间的相互作用及固相颗粒对液相运动的影响, 均可以忽略不计; 絮凝体形成后, 体积增大上千倍, 絮凝体运动的惯性力、支持运动所需的能量、重力作用均随之增加, 这样絮凝体就不能随所有尺度的紊动而运动, 并产生滞后于周围水流的相对运动; (3)在紊动掺混过程中, 涡流崩解时所产生的极高

的瞬时紊剪切力, 引起絮凝体破碎。

在河口地区控制絮凝强度的主要因素是潮流及其导致的水动力作用(李安春等, 1996)。由于大潮表层平均流速为 97 cm/s, 小潮只有 58 cm/s, 大潮水动力条件要强于小潮, 导致大潮表层絮凝体平均粒径要小于小潮。水流紊动对絮凝体大小的影响有两个相反阶段: 在絮凝体的临界剪切强度以下, 水流紊动增加了颗粒之间的碰撞几率, 从而可以形成较大的絮团, 絮凝体的大小随水流紊动强度的增加而增大; 在絮凝体的临界剪切强度以上, 水流紊动引起的剪切力使絮团的直径受限制, 在紊动强度足够大时, 大絮团受紊动剪切作用而破裂, 絮凝体的大小随水流紊动强度的增加而减小。由于不同粒径的絮凝体的抗剪强度不同, 小粒径的絮凝体抗剪能力强, 大絮凝体的抗剪强度小。强紊动剪切条件, 即高流速情况下, 所产生的紊动剪切力超过了大絮凝体的抗剪能力, 导致大絮凝体被打碎而形成小絮凝体, 絮凝体平均粒径减小; 弱紊动剪切条件, 即低流速情况下, 大絮凝体不易被打碎, 有利于小絮凝体结合形成大絮凝体, 絮凝体平均粒径就增大。此次观测数据很好地反映了这一絮凝体成长发育规律(图 2a、2e、3a、3e), 大、小潮表层絮凝体在 50 cm/s 的垂线平均流速时出现平均粒径与垂线平均流速关系的转折, 即小于 50 cm/s 的垂线平均流速时絮凝体平均粒径随流速增大而增大, 大于 50 cm/s 的垂线平均流速时絮凝体平均粒径随流速增大而减小(图 4)。

絮凝体平均粒径也随着其体积浓度的变化而发生相应的改变(图 2d、2e、3d、3e)。有研究者(Willem *et al.*, 2000)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加大, 或是在高流速的条件下, 床面上的大粒径的泥沙颗粒再悬浮, 使絮凝体粒径增大。

此次观测结果和 Willem 等的结论有所不同。絮凝体粒径和其体积浓度的关系存在两个阶段, 在临界体积浓度之下时絮凝体粒径随体积浓度增大而增大, 超过临界值时絮凝体粒径随体积浓度的增加变化不大。可以这样解释这种现象, 在临界体积浓度之下, 絮凝体粒径变化可用 Willem 等的结论来解释。超过临界体积浓度, 由于此时

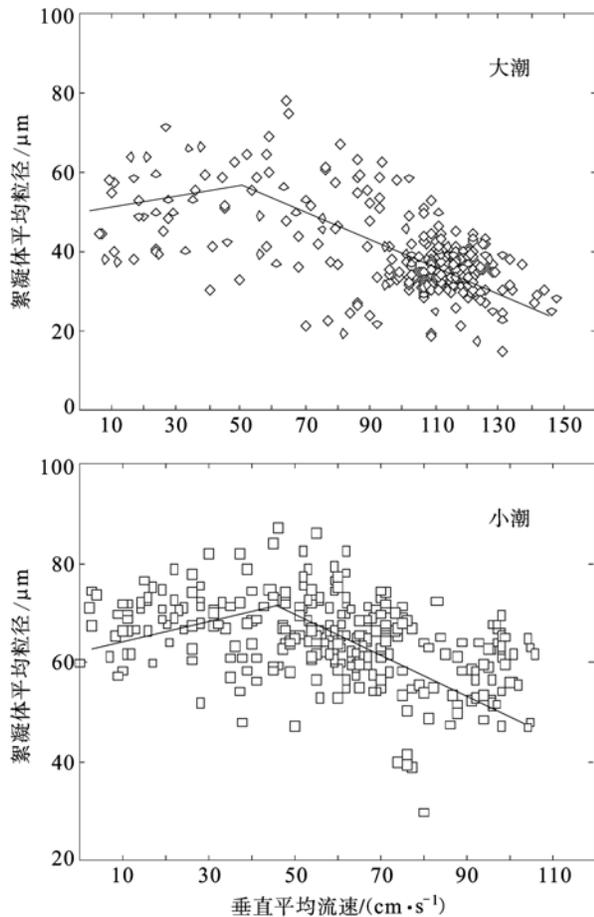


图4 大、小潮絮凝体粒径和流速关系图

Fig.4 Relationship between flocs' mean diameter and current velocity during spring tide and neap tide

水动力条件很强, 在高流速的条件下, 虽然絮凝体之间的碰撞概率增加, 但增强的紊动剪切导致大粒径絮凝体破碎, 正负两种作用相抵消使得絮凝体粒径变化不大; 同时在河口海岸地区的水体中, 水流梯度在近床面区域(离床底 10%—20%的水深范围内)最大, 水流产生的紊动能中的大约 80%集中在此区域, 近底区有最强的剪切力 (Mehta *et al*, 1975), 卢金友等(2005)对长江天然河道水流紊动的观测也显示近河底处紊动强度最大, 强烈的紊动剪切力打碎了床面再悬浮的大粒径絮凝体, 所以在高流速的条件下床面上絮凝体的再悬浮并没有使表层水体絮凝体的平均粒径有明显增大趋势。此次观测显示, 长江口徐六泾大、小潮表层絮凝体粒径在絮凝体体积浓度为 $75 \mu\text{l/L}$ 时出现絮凝体平均粒径与絮凝体体积浓度关系的转折(图 5)。

2.5 絮凝体的有效密度

合理估计絮凝体的有效密度是准确计算絮凝体沉速, 进而计算泥沙沉降通量的关键。从絮

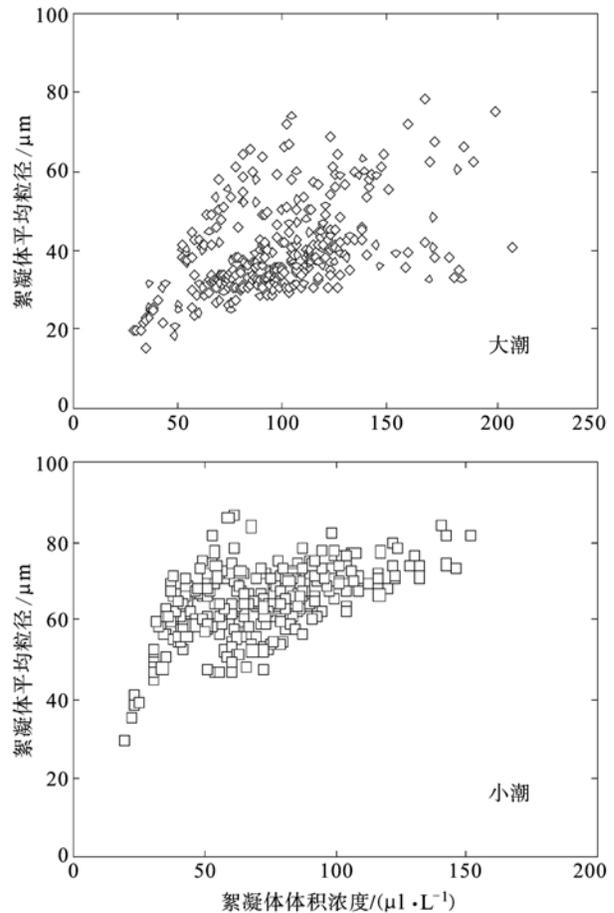


图5 大小潮絮凝体粒径和体积浓度关系图

Fig.5 Relationship between flocs' mean diameter and flocs' volume concentration during spring tide and neap tide

凝体的形成过程来看, 随着高阶絮凝体的形成, 絮凝体的空隙率亦逐步增大, 而密度则随之减小。Fennessy 等(1994)用摄像系统观测到的絮凝体最大的有效密度在 500 kg/m^3 和 900 kg/m^3 左右。根据 Hill 等(1998)在阿拉斯加 Glacier 湾和 Sternberg 等(1999)在加利福尼亚北部的沿海大陆架的观测, 小絮团有效密度有时几乎是大絮团有效密度的两个数量级, 小絮团的有效密度变化范围在 $30\text{—}1600 \text{ kg/m}^3$ 之间, 而大絮团的有效密度较为均匀。Manning 等(2004)在 Gironde 河口, 得到大絮团的有效密度在 $27\text{—}120 \text{ kg/m}^3$, 而小絮团的有效密度在 $140\text{—}160 \text{ kg/m}^3$ 。据 Mikkelsen 等(2000)在丹麦海域的研究, 当絮凝体的平均粒径从 $41 \mu\text{m}$ 增加到 $109 \mu\text{m}$ 时, 有效密度从 1283 kg/m^3 减小到 686 kg/m^3 , 全部样品的有效密度最小为 478 kg/m^3 , 最大为 1411 kg/m^3 。上述现象的主要原因是: 不同环境中形成的絮团的有机质含量和矿物组分可能不同, 而且絮团的有效密度还和絮团形成时的含沙量、水环境条件、受力时间

等因素有关。较小的絮团既可能主要由低密度的有机物构成,也有可能主要由粘土矿物颗粒构成(例如石英的有效密度是 $1\ 650\ \text{kg/m}^3$),因而有效密度变化范围较大;而大絮团主要由各种小絮团构成,因而有效密度较均匀。

此次在徐六泾连续观测所得的大、小潮表层悬浮泥沙浓度变化范围分别为 $0.067\text{—}0.218\ \text{kg/m}^3$ 和 $0.033\text{—}0.147\ \text{kg/m}^3$ (图 2c、3c),此悬浮泥沙浓度未超过 B 型 2.5 cm 光程 LISST-100 的测量范围,因此均测得絮凝体体积浓度。利用式 2 计算得到大潮表层絮凝体有效密度最大为 $1\ 429\ \text{kg/m}^3$,最小为 $778\ \text{kg/m}^3$,平均为 $1\ 173\ \text{kg/m}^3$;小潮表层相应的数据分别为 $1\ 279\ \text{kg/m}^3$ 、 $689\ \text{kg/m}^3$ 和 $919\ \text{kg/m}^3$ (图 2f、3f)。Voulgaris 等(2004)在南加州的研究也表明大潮时絮凝体有效密度平均为 $540\ \text{kg/m}^3$,要大于小潮时的约 $100\ \text{kg/m}^3$ 。这主要是由于絮凝体的空隙率和含水、含有机质的比例很大,絮凝体的空隙率和含水率随着粒径的增大而增加,因此造成大粒径絮凝体的密度小于小粒径絮凝体。由于水动力条件控制着絮凝体的平均粒径,絮凝体的大小又直接影响着絮凝体的有效密度,所以絮凝体的有效密度的变化过程受流速变化过程影响,小于一定流速时絮凝体有效密度随流速增大而减小,反之絮凝体有效密度随流速增大而增大。由于大潮水动力条件要强于小潮,导致大潮表层絮凝体有效密度大于小潮时的现象。

有研究者用 $\Delta\rho \propto D_m^a$ 来描述絮凝体有效密度和其平均粒径的关系(McCave, 1975; Fennessy *et al*, 1994; Hill, 1998; Sternberg *et al*, 1999; Mikkelsen *et al*, 2001; Xia *et al*, 2004)。McCave(1975)在大洋表面的研究显示 $\Delta\rho \propto D_m^a$ 中 a 为 -0.50 ; Fennessy 等(1994)在 Tamar 河口研究的 a 是 -1.084 ; Hill(1998)在 Alaskan 水域研究 a 为 -0.54 ; Sternberg 等(1999)在 California 陆架的研究显示 a 为 -0.46 ; Mikkelsen 等(2001)在丹麦海域的研究表明 a 的变化范围在 $-0.86\text{—}0.33$ 之间; Xia 等(2004)在珠江口的观测显示,1999 年洪季航次 a 为 -1.58 ,2000 枯季航次四个测站 a 在 $-1.71\text{—}0.18$ 之间变化,1999 和 2000 全部数据统计的 a 为 -1.52 ;此次徐六泾大、小潮表层数据分别为 -0.368 和 -0.646 。由于影响絮凝体有效密度的因素众多,不同研究区域的物理、生物、化学特性

也各异,因此造成絮凝体有效密度可能会出现一到两个数量级的差异,同时 a 值的差异也很大。

2.6 絮凝体的沉速

单个的絮凝体可能有多达 10^6 个的细小泥沙颗粒所组成,这意味着颗粒大小的变化范围可能有 4 个数量级,即从 $1\ \mu\text{m}$ 的粘土颗粒到几厘米的絮凝体,颗粒的沉降速度也可能存在 4 个数量级的变化范围,即从 $0.01\ \text{mm/s}$ 到几厘米每秒(Manning *et al*, 1999)。因此,絮凝持续改变了悬浮细颗粒泥沙的沉降特性,絮凝后细颗粒泥沙的静水沉速可增加几倍至上百倍。本文中作者利用式 3 计算絮凝体的静水沉速,结果表明,在潮周期内,大潮表层絮凝体静水沉速最大为 $2.91\ \text{mm/s}$,最小为 $0.19\ \text{mm/s}$,平均为 $1.14\ \text{mm/s}$,主要集中在 $0.75\text{—}1.25\ \text{mm/s}$;小潮表层相应的数据分别为 $3.18\ \text{mm/s}$ 、 $0.68\ \text{mm/s}$ 和 $2.32\ \text{mm/s}$,主要集中在 $1.95\text{—}2.75\ \text{mm/s}$ (图 2g、3g)。不同研究者依据不同的研究方法取得了大量絮凝体的沉速数据(表 2),沉速最小为 $0.002\ \text{mm/s}$,最大为 $8.94\ \text{mm/s}$,沉速大致在几微米每秒至几毫米每秒的范围之内。造成絮凝体沉速差别如此巨大的原因主要是絮凝体沉速由絮凝体的大小和有效密度共同决定,不同研究区域的物理、生物、化学特性的差异也影响了絮凝体的沉速。

Willem 等(2000)在荷兰 Dollard 河口的现场观测显示,潮周期内可根据潮流相位的变化来模拟絮凝体的沉速。此次观测发现絮凝体的静水沉速随潮型而异,大潮水动力条件要强于小潮,因而大潮的紊动剪切要强于小潮,导致大潮表层絮凝体平均粒径要小于小潮。大粒径的絮凝体的沉速要比小粒径的絮凝体要大,所以小潮沉速大,大潮沉速小,小潮沉速甚至是大潮的 2 倍。按照式 3,在颗粒密度不变的情况下,颗粒沉速和其平均粒径的二次方成正比。由于絮凝体有效密度是随其平均粒径的增加而减小的,粒径对沉速的影响是二次方,有效密度的影响只是一次方,所以沉速还是随着粒径的增大而增加,但不是二次方的关系。由于小潮表层絮凝体平均粒径是 $64.4\ \mu\text{m}$,大于大潮的 $39.8\ \mu\text{m}$,所以小潮沉速要比大潮大。

类似絮凝体有效密度和其平均粒径的关系,絮凝体沉速和其平均粒径之间的关系也可用 $\omega_s = a \cdot D_m^b$ 来表示(Fennessy *et al*, 1994; Hill *et al*,

1998; Sternberg *et al.*, 1999; Mikkelsen *et al.*, 2001; Xia *et al.*, 2004), 不同研究者取得的结果见表 3。系数 a 值在 0.0000228—0.00820 之间变化, 指数 b 值相对变化较小, 在 0.290—1.632 之间变化。不同公式中指数相近, 系数有较大差异, 这主要是研究方法不同, 以及不同研究区域的物理、化学和生物背景的差异所致。

3 结论

本文中作者利用 B 型 2.5cm 光程 LISST-100 现场激光粒度仪, 在不扰动悬浮颗粒物的情况下, 于长江口徐六泾对悬浮细颗粒泥沙絮凝体特性进行了表层定点大小潮连续观测, 研究了细颗粒泥沙絮凝体粒径、体积浓度、有效密度和静水沉速随潮周期的变化过程以及相互之间的关系, 得到如下初步结论:

(1) 大潮表层絮凝体平均体积浓度为 98.0 $\mu\text{L/L}$, 小潮表层为 70.8 $\mu\text{L/L}$ 。絮凝体体积浓度主

要受水流流速影响, 流速高, 体积浓度大, 大潮体积浓度要比小潮大。床面上絮凝体再悬浮引起的絮凝体体积浓度的变化主要是由潮流引起, 存在絮凝体体积浓度过程滞后于流速过程现象, 落潮滞后时间在 10—30 min, 涨潮滞后在 30—50 min。

(2) 大、小潮表层絮凝体平均粒径分别为 39.8 μm 和 64.4 μm 。潮流流速对絮凝体平均粒径影响明显, 大、小潮表层絮凝体在 50 cm/s 的垂线平均流速时出现絮凝体平均粒径与垂线平均流速关系的转折, 即小于 50 cm/s 的垂线平均流速时平均粒径随流速增加而增大, 大于 50 cm/s 的垂线平均流速时平均粒径随流速增大而减小。

(3) 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, 超过临界值时絮凝体平均粒径随体积浓度的增加变化不大。大、小潮

表 2 不同研究者的絮凝体静水沉速研究结果对比

Tab.2 Flocs' settling velocity in still water from different researches

| 文献来源 | $\omega_s(\text{mm/s})$ | $D_m(\mu\text{m})$ | 地点 | 采样时间 |
|--------------------------------|-------------------------|--------------------|-----------------------------|-----------------------|
| 严镜海, 1988 | 2.88—8.94 | — | 室内图解法分析 | 1978 年 8 月 |
| 时钟等, 2000 | 1.81—4.26 | — | 北槽口外, Rouse 公式拟合 | 1994 年 |
| 陈沈良等, 2003 | 2.14—4.38 | — | 南汇水域, Rouse 公式拟合 | 1994 年 9—10 月 |
| Sternberg <i>et al.</i> , 1999 | 0.09—8.13 | 130—740 | 加利福尼亚北部陆架 | 1995 年 9—11 月 |
| Mikkelsen <i>et al.</i> , 2001 | 0.01—1.00 | 22—330 | 北海 Horsens Fjord | 1999 年 6 月, 9 月 |
| Xia <i>et al.</i> , 2004 | 0.049—0.240 | 1.25—100 | 珠江口 | 1999 年 7 月 |
| Xia <i>et al.</i> , 2004 | 0.002—2.000 | 1.25—200 | 珠江口 | 2001 年 1 月 |
| Voulgaris <i>et al.</i> , 2004 | 0.02—0.20 | 25—75 | North Inlet, South Carolina | 2000 年 6 月—2001 年 2 月 |
| 程江等, 2005a | 0.70—5.62 | 30.0—98.8 | 长江口徐六泾垂线观测 | 2003 年 6 月 |
| 本文(大潮) | 0.19—2.91 | 14.9—78.1 | 长江口徐六泾 | 2003 年 6 月 |
| 本文(小潮) | 0.68—3.18 | 29.5—86.7 | 长江口徐六泾 | 2003 年 6 月 |

表 3 不同研究者的絮凝体静水沉速和粒径相关分析(R^2 为相关系数)

Tab.3 Regression statistics for the relationships between flocs' settling velocity in still water and mean diameter from different researches (R^2 : correlation coefficient)

| 文献来源 | $\omega_s = a \cdot D_m^b$ | | |
|------------------------------------|----------------------------|-------------|-------------|
| | a | b | R^2 |
| Mikkelsen <i>et al.</i> , 2001 | 0.00026 | 1.529 | 0.856 |
| Sternberg <i>et al.</i> , 1999 | 0.00020 | 1.540 | 0.610 |
| Xia <i>et al.</i> , 2004(洪季) | 0.003 | 0.420 | 0.246 |
| Xia <i>et al.</i> , 2004(枯季) | 0.0003—0.0018 | 0.290—0.820 | 0.510—0.855 |
| Voulgaris <i>et al.</i> , 2004(大潮) | 0.00124 | 1.389 | — |
| Voulgaris <i>et al.</i> , 2004(小潮) | 0.000228 | 1.553 | — |
| 程江等, 2005a | 0.0065 | 1.418 | 0.942 |
| 本文(大潮) | 0.0027 | 1.632 | 0.879 |
| 本文(小潮) | 0.0082 | 1.354 | 0.818 |

注: ω_s 、 D_m 单位分别为 mm/s、 μm

表层絮凝体在絮凝体体积浓度为 $75\mu\text{l/L}$ 时出现絮凝体平均粒径与絮凝体体积浓度关系的转折。

(4) 大、小潮表层絮凝体平均有效密度分别为 $1\ 173\ \text{kg/m}^3$ 和 $919\ \text{kg/m}^3$ 。小于一定流速时絮凝体有效密度随流速增大而减小,反之絮凝体有效密度随流速增大而增大。絮凝体有效密度由其粒径大小控制,粒径大,有效密度小,反之亦然,可用 $\Delta\rho \propto D_m^a$ 来描述絮凝体有效密度和其平均粒径的关系,此次徐六泾的大、小潮表层絮凝体的 a 值分别为 -0.368 和 -0.646 。

(5) 大潮表层絮凝体平均静水沉速在 $0.19\text{—}2.91\ \text{mm/s}$ 之间,平均为 $1.14\ \text{mm/s}$,小潮表层絮凝体平均静水沉速变化范围为 $0.68\text{—}3.18\ \text{mm/s}$,平均为 $2.32\ \text{mm/s}$ 。絮凝体粒径和有效密度共同决定着絮凝体沉速;大、小潮表层絮凝体沉速和平均粒径之间的关系可分别用 $\omega_s = 0.0027 \cdot D_m^{1.632}$ 和 $\omega_s = 0.0082 \cdot D_m^{1.354}$ 来表示。

致谢 厦门大学李炎教授对本文提出了宝贵的修改意见,谨致谢忱。

参 考 文 献

王保栋, 1994. 河口细颗粒泥沙的絮凝作用. 黄渤海海洋, 12(1): 72—76

兰志刚, 龚德俊, 于新生等, 2004. 现场粒径分析仪与 ADCP 同步测量悬浮沉积物浓度的粒径修正方法. 海洋与湖沼, 35(5): 385—392

卢金友, 徐海涛, 姚仕明, 2005. 天然河道水流紊动特性分析. 水利学报, 36(9): 1029—1034

关许为, 陈英祖, 林以安等, 1992. 长江口泥沙絮凝体的现场显微观测. 泥沙研究, 3: 54—59

吕全荣, 王效京, 1985. 长江口细颗粒沉积物的粘土矿物及地球化学特征. 沉积学报, 3(4): 141—151

朱建荣, 薛元忠, 2001. 长江河口横沙小港泥沙浓度的观测研究. 华东师范大学学报(自然科学版), 3: 68—73

阮文杰, 1991. 细颗粒泥沙动水絮凝的机理分析. 海洋科学, 5: 46—49

严镜海, 1988. 潮汐水流中细颗粒泥沙絮凝沉降的初步探讨. 泥沙研究, 4: 10—22

张志忠, 1996. 长江口细颗粒泥沙基本特性研究. 泥沙研究, 1: 67—73

张志忠, 阮文杰, 蒋国俊, 1995. 长江口动水絮凝沉降与拦门淤积的关系. 海洋与湖沼, 26(6): 633—637

张瑞瑾, 1998. 河流泥沙动力学. 北京: 中国水利水电出版社, 46—55

时 钟, 朱文蔚, 周洪强, 2000. 长江口北槽口外细颗粒

悬沙沉降速度. 上海交通大学学报, 24(1): 18—23

李安春, 陈丽蓉, D Eisma, 1996. 伊姆斯-道拉德河口悬浮体絮凝过程及其控制因素. 海洋与湖沼, 27: 138—144

沈焕庭, 潘定安, 2001. 长江河口最大浑浊带. 北京: 海洋出版社, 29—31

陈沈良, 谷国传, 张国安, 2003. 长江口南汇近岸水域悬沙沉降速度估算. 泥沙研究, 6: 45—51

林以安, 唐仁友, 李 炎等, 1995. 长江口生源要素的地球生物地球化学特征与絮凝沉降的关系. 海洋学报, 17(5): 65—72

钱 宁, 万兆惠, 1983. 泥沙运动力学. 北京: 科学出版社, 82—108

程 江, 何 青, 王元叶等, 2003. 长江口徐六泾洪季水沙特性观测研究. 海洋通报, 22(5): 86—91

程 江, 何 青, 王元叶, 2005a. 利用 LISST 观测絮凝体粒径、有效密度和沉速的垂线分布. 泥沙研究, 1: 33—39

程 江, 何 青, 王元叶等, 2005b. 长江河口细颗粒泥沙絮凝体粒径的谱分析. 长江流域资源与环境, 14(4): 460—464

窦国仁, 1987. 紊动力学(下). 北京: 高等教育出版社, 398—468

Agrawal Y C, Pottsmith H C, 2000. Instruments for particle size and settling velocity observations in sediment transport. Marine Geology, 168: 89—114

Agrawal Y C, Traykovski P, 2001. Particles in the bottom boundary layer: concentration and size dynamics through events. Journal of Geophysical Research, 106: 9533—9542

Born M, Wolf E, 1975. Principles of Optics. Pergamon, New York, 808

Fennessy M J, Dyer K R, Huntley D A, 1994. INSSEV: an instrument to measure the size and settling velocity of flocs *in-situ*. Marine Geology, 117: 107—117

Fennessy M J, Dyer K R, Huntley D A *et al*, 1997. Estimating of setting flux spectra in estuaries using INSSEV. In: Parker Burt N R, Watts J ed. Cohesive Sediment, Wiley, 87—104

Fennessy M J, Dyer K R, 1996. Floc population characteristics measured with INSSEV during the Elbe estuary intercalibration experiment. Journal of Sea Research, 36: 55—62

Gibbs R J, 1981. Floc breakage by pumps. Journal of Sedimentary Petrology, 51: 670—672

He Qing, Cheng Jiang, Wang Yuan-ye, 2004. In situ estimates of floc size and settling velocity in the Changjiang estuary. Proceedings of Ninth International Symposium on River Sedimentation. Beijing: Tsinghua Publishing Press, 416—422

Hill P S, Syvitski J P, Cowan E A *et al*, 1998. In situ observation of floc setting velocities in Glacier Bay, Alaska. Marine Geology, 145: 85—94

McCave I N, 1975. Vertical flux of particles in the ocean. Deep Sea Research, 22: 491—502

Mehta A J, Partheniades E, 1975. An investigation of the depositional properties of flocculated fine sediment. hydrology Research, 92(C13): 361—381

- Manning A J, Dyer K R, 1999. A laboratory examination of floc characteristics with regard to turbulent shearing. *Marine Geology*, 160: 147—170
- Manning A J, Dyer K R, Lafite R *et al*, 2004. Flocculation measured by video based instruments in the Gironde Estuary during the European Commission SWAMIEE project. *Journal of Coastal Research*, SI 41: 58—69
- Mikkelsen O A, 2002. Examples of spatial and temporal variations of some fine-grained suspended particle characteristics in two Danish coastal water bodies. *Oceanologica Acta*, 25: 39—49
- Mikkelsen O A, Pejrup M, 2000. *In situ* particle size spectra and density of particle aggregates in a dredging plume. *Marine Geology*, 170: 443—459
- Mikkelsen O A, Pejrup M, 2001. The use of a LISST-100 laser particle sizer for *in-situ* estimates of floc size, density and settling velocity. *Geo-Marine Letters*, 20: 187—195
- Owen M W, 1971. The effect of turbulence on setting velocities of silt flocs. *Proceeding of International Association of Hydraulic Engineering and Research*. Paris, 27—37
- Sternberg R W, Berhane I, Ogston A S, 1999. Measurement of size and settling velocity of suspended aggregates on the northern California continental shelf. *Marine Geology*, 154: 43—53
- Sternberg, R.W, Ogston, A, Johnson, R, 1996. A video system for *in situ* measurement of size and settling velocity of suspended particulates. *Journal of Sea Research*, 36: 127—130
- Voulgaris George, Meyers Samuel T, 2004. Temporal variability of hydrodynamics, sediment concentration and sediment settling velocity in a tidal creek. *Continental Shelf Research*, 24: 1659—1683
- Willem T B, Van der Lee, 2000. Temporal variation of floc size and settling velocity in the Dollard estuary. *Continental Shelf Research*, 20: 1495—1511
- Xia X M, Lia Y, Yang H *et al*, 2004. Observations on the size and settling velocity distributions of suspended sediment in the Pearl River Estuary, China. *Continental Shelf Research*, 24: 1809—1826

CHARACTERISTICS OF SUSPENDED FINE SEDIMENT FLOCS IN CHANGJIANG (YANGTZE) ESTUARY

CHENG Jiang^{1,2}, HE Qing¹, XIA Xiao-Ming³

(1. State Key Laboratory of Estuarine and Coastal Research, East China Normal University, Shanghai, 200062; 2. Department of Environmental Science, East China Normal University, Shanghai, 200062; 3. Second Institute of Oceanography, State Oceanic Administration, Hangzhou, 310012)

Abstract Natural physical characteristics, such as mean diameter (D_m), effective density ($\Delta\rho$) and settling velocity (ω_s) of fine suspended sediment flocs in Changjiang (Yangtze) Estuary are studied. Temporal changes in D_m and volume concentration (VC) of fine suspended sediment in surface water during spring and neap tides were measured *in situ* in June of 2003 in Xuliujing with a laser particle size analyzer (Laser In Situ Scattering and Transmissometry, LISST); and suspended sediment concentration (SSC) with an optical backscatter (OBS), from which mean $\Delta\rho$ and mean ω_s of flocs were calculated in the field. The observation shows that average VC , D_m , $\Delta\rho$ and ω_s at the surface water during spring tide are 98.0 $\mu\text{L/L}$, 39.8 μm , 1173 kg/m^3 and 1.14 mm/s , whereas those during neap tide are 70.8 $\mu\text{L/L}$, 64.4 μm , 919 kg/m^3 and 2.32 mm/s , respectively. Results show that flocs' VC and D_m at the surface water were closely related to current velocity; and the peaks of VC lag those of the current velocity. The lag variation during ebb and flood tides is 10—30 min and 30—50 min, respectively. Current velocity at 50 cm/s is a turning point of D_m vs. vertical average current velocity, before the point, D_m increases with current velocity, and decreases after the point. Similarly, VC at 75 $\mu\text{L/L}$ becomes a critical point in the surface water, below the point, D_m increases with VC , and above the point, D_m stabilizes. $\Delta\rho$ is D_m dependent, larger flocs have much lower $\Delta\rho$ than smaller flocs. Both D_m and $\Delta\rho$ of flocs affect ω_s . In the surface water during spring tide and neap tide, a power exponent relationship exists between $\Delta\rho$ and D_m , and ω_s and D_m .

Key words LISST; Flocs; Grain size; Effective density; Settling velocity; Changjiang (Yangtze) Estuary