

悬沙组分对再悬浮过程响应的初步研究 ——以长江口南槽口门为例

张一乙¹, 杨 旻¹, 陈景东¹, 徐海东², 高建华¹, 汪亚平¹

(1. 南京大学 地理与海洋科学学院, 江苏 南京 210023; 2. 长江水利委员会水文局长江口水文水资源勘测局, 上海 200136)

摘要: 根据 2011 年 5 月 31 日至 6 月 3 日在长江口南槽口门附近海域投放三角架观测系统获取的沉积动力观测数据以及现场采集的水样和底质样品, 进行底部边界层参数、悬沙粒度及悬沙组分分析, 以探讨研究区近底部边界层特征和沉积物再悬浮过程。结果表明, 研究区海域的悬沙以粉砂组分为主, 潮周期内近底部流速与相应层位的悬沙浓度变化呈正相关, 存在显著的再悬浮作用。分析发现, 随着水体中悬沙砂组分的增加, 再悬浮通量随之显著增加; 砂组分减小, 则再悬浮通量亦减小。因此, 悬沙砂组分是对再悬浮过程响应的敏感组分, 在一定程度上可指示和“示踪”再悬浮效应。

关键词: 悬沙浓度; 边界层参数; 再悬浮通量; 砂组分; 长江口

中图分类号: P737.2 文献标识码: A 文章编号: 1000-3096(2016)11-0129-09
doi: 10.11759/hyxx20131212001

长江口地区受潮汐和近岸环流的影响, 物质供应丰富, 动力条件复杂, 一直是众多学者研究的重要区域^[1-3]。对河口沉积物特性及其运输机制的了解是研究河口过程的基础。在长江口海域, 底部边界层动力过程和沉积物的再悬浮过程对沉积物的运输机制具有重要的影响^[4-5]。前人研究表明, 使用船载 ADCP(声学多普勒流速剖面仪)进行水文观测时, 由于近底部悬沙浓度较高常导致 ADCP 无法获得有效数据, 加之 ADCP 近底部盲区的存在, 常规方法难以精确估算海底边界层参数^[6], 而边界层内常常是再悬浮作用强烈、悬沙浓度变化最剧烈的区域。因此, 使用三角架观测系统对海底边界层进行高精度的观测, 对于更精确地描述海底边界层内的物理过程显得尤为重要。此外, 在潮周期内, 悬沙粒径对流速变化有着明显响应, 众多学者在这方面研究获取了很多成果^[7-8], 然而主要还只是专注于涨落潮周期内悬沙粒径和水动力之间的变化响应, 并没有过多考虑悬沙的再悬浮过程及其组分之间的关系。随后李占海等^[9]使用直读式流速仪研究了崇明东滩水域悬沙粒径与再悬浮过程的联系, 但由于仪器技术限制, 流速空间分辨率较低。所以, 本文通过投放三角架观测系统, 使用 ADCP 获取高精度高分辨率的流速数据, 可以进一步分析和探究悬沙粒径组分与再悬浮过程特征的联系, 有可能通过分析近底部边界层内悬浮物组分比例, 特别是提取出

对再悬浮过程响应敏感的组分, 将有助于更深入地了解局部区域再悬浮与边界层内沉积物的运输机制。此外, 近 30 a 来长江流域大量修建水坝, 入海泥沙锐减^[10], 沉积物各组分比例也发生了变化, 因此深入了解河口区的悬沙组分, 对于更全面评价水坝影响以及河口三角洲的侵蚀灾害管理也具有重要意义^[11]。

本文以长江口南槽口外海域为研究区, 采用海底三角架系统和船载定点水文观测相结合, 对距离海底 2 m 以内水层的流速和浊度进行高精度、高分辨率观测, 计算近底部边界层参数、再悬浮和沉降通量; 根据潮周期内悬沙粒径-流速响应机制, 分析对再悬浮过程响应敏感的粒径组分, 以定量分析长江口南槽口门外底部边界层过程与沉积物运输机制。

1 研究方法

1.1 数据采集和样品处理

2011 年 5 月 31 日至 6 月 1 日在长江口南槽口门

收稿日期: 2015-04-12; 修回日期: 2016-03-21

基金项目: 国家自然科学基金(40906042, 40830853); 海洋公益性行业科研专项经费项目(201105001)

[Foundation: National Natural Science Foundation of China, No.40906042, No.40830853; Marine Public Welfare Scientific Research Funding, No.201105001]

作者简介: 张一乙(1985-), 男, 江苏盐城人, 硕士研究生, 主要从事海洋地质学研究, E-mail: wiji11@sina.com; 杨旻(1978-), 通信作者, 男, 讲师, E-mail: yangyi@nju.edu.cn

外海域(CJK04 站), 6月2日至6月3日在杭州湾口门海域(CJK06 站)(图 1), 分别放置海底三脚架进行连续观测。三脚架上放置 1 200 kHz ADCP 进行流速剖面连续观测, ADCP 距离海底高度为 2 m, 有效观测距离为距底 1.8 m 至海底, 采样间隔为 0.7 s, 单元层厚 2 cm; 放置 RBR 多参数水质仪分别在距离海底 0.15, 0.4 和 1 m 3 个层位, 进行浊度连续观测, 采样间隔为

3 s; 放置 SBE26 浪潮仪进行潮位观测, 仪器距海底 2 m, 采样间隔为 300 s。同时, 在上述观测过程中, 每小时使用船载光学后向散射浊度计采用六点法(距水面 1 m, 0.2 h, 0.4 h, 0.6 h, 0.8 h, 距海底 1 m)采集垂向剖面的浊度和温盐度数据, 使用采水器采集 3 层(分别距水面 1 m, 0.5 h, 距海底 1 m)水样, 在两个站位分别采集底质表层样。观测期间风力 3~4 级, 浪高 0.6~1.2 m。

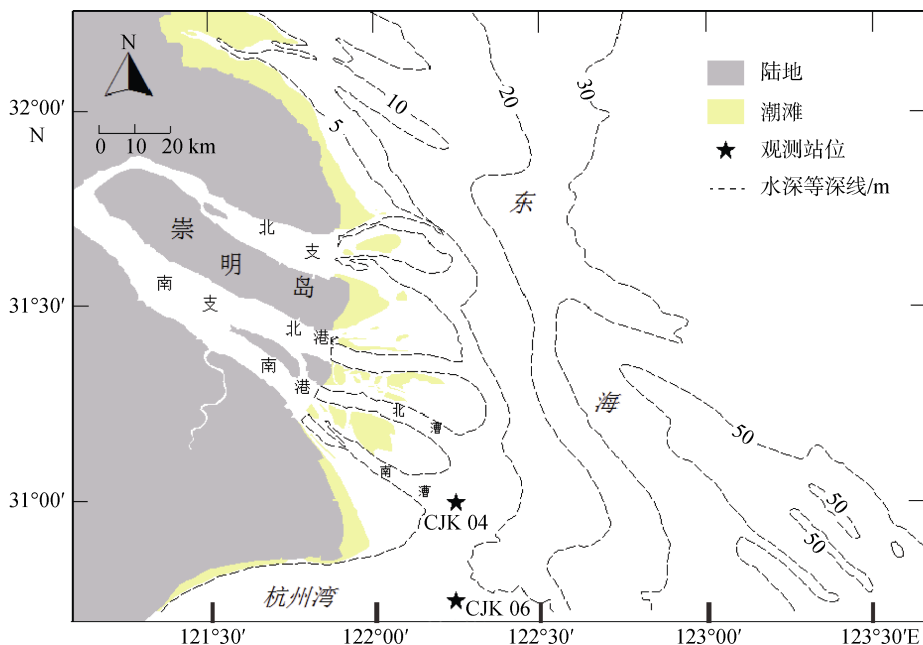


图 1 观测站点区位图

Fig. 1 Map of the observation station

对现场采集的水样用 0.45 μm 孔径的滤膜在室内进行抽滤, 把滤膜放入烘箱 40℃ 恒温下烘干、称质量, 计算悬沙质量浓度(mg/L)。使用英国 Malvern 公司生产的 Mastersizer 2000 型激光粒度仪对悬沙水样以及底质样品进行粒度测量(测量范围为 0.01~2 000 μm, 粒径分辨率 φ 为 0.1, 重复测量的相对误差小于 3%), 以 0.25 间距输出样品各粒级的百分含量, 再采用矩值法计算粒度参数, 包括平均粒径、分选系数等。室内通过相关分析方法^[12], 将现场采集的水样进行浓缩后, 按照不同比例与纯净海水进行混合, 从而对 RBR 和 OBS 进行浊度标定^[13], 建立浊度(单位: 1 NTU=1 mg/L)与现场悬沙质量浓度(SSC)的相关关系(图 2), 即可将仪器观测所得浊度数据转化为悬沙浓度数据, 从而获取高分辨率的悬沙浓度数据。

1.2 数据分析方法

在潮流边界层厚度内, 流速随高度的变化呈现对数分布, 即符合冯卡门-普朗特(Von Karman-Prandtl)流

速对数分布剖面公式^[14]:

$$u_z = \frac{u_*}{\kappa} \ln \frac{z}{z_0} \quad (1)$$

式中, u_z (m/s)为在距海底高度为 z (m)的地方的流速, u_* (m/s)为摩阻流速, κ 为 Von Karman 常数, 海洋环境中取值 0.4, z_0 (m)为粗糙长度。因此, 垂线平均流速公式可以写作^[15]:

$$U = \frac{u_*}{\kappa} \ln \frac{H}{ez_0} \quad (2)$$

H 为水深(m), e 是自然对数的底(取值 2.718)。

在海洋环境中, 距离底床 100 cm 处的流速 u_{100} 被认为对沉积物搬运有重要的作用^[16], u_{100} 和 C_{100} (拖曳系数)分别由下式计算:

$$u_{100} = -\frac{\ln z_0}{\ln(H/ez_0)} \bar{u} \quad (3)$$

$$C_{100} = \frac{u_*^2}{u_{100}^2} = u_*^2 \left[\left(\frac{u_*}{\kappa} \right) \ln \left(\frac{1}{z_0} \right) \right]^{-2} = \kappa^2 \left[\ln \left(\frac{1}{z_0} \right) \right]^{-2} \quad (4)$$

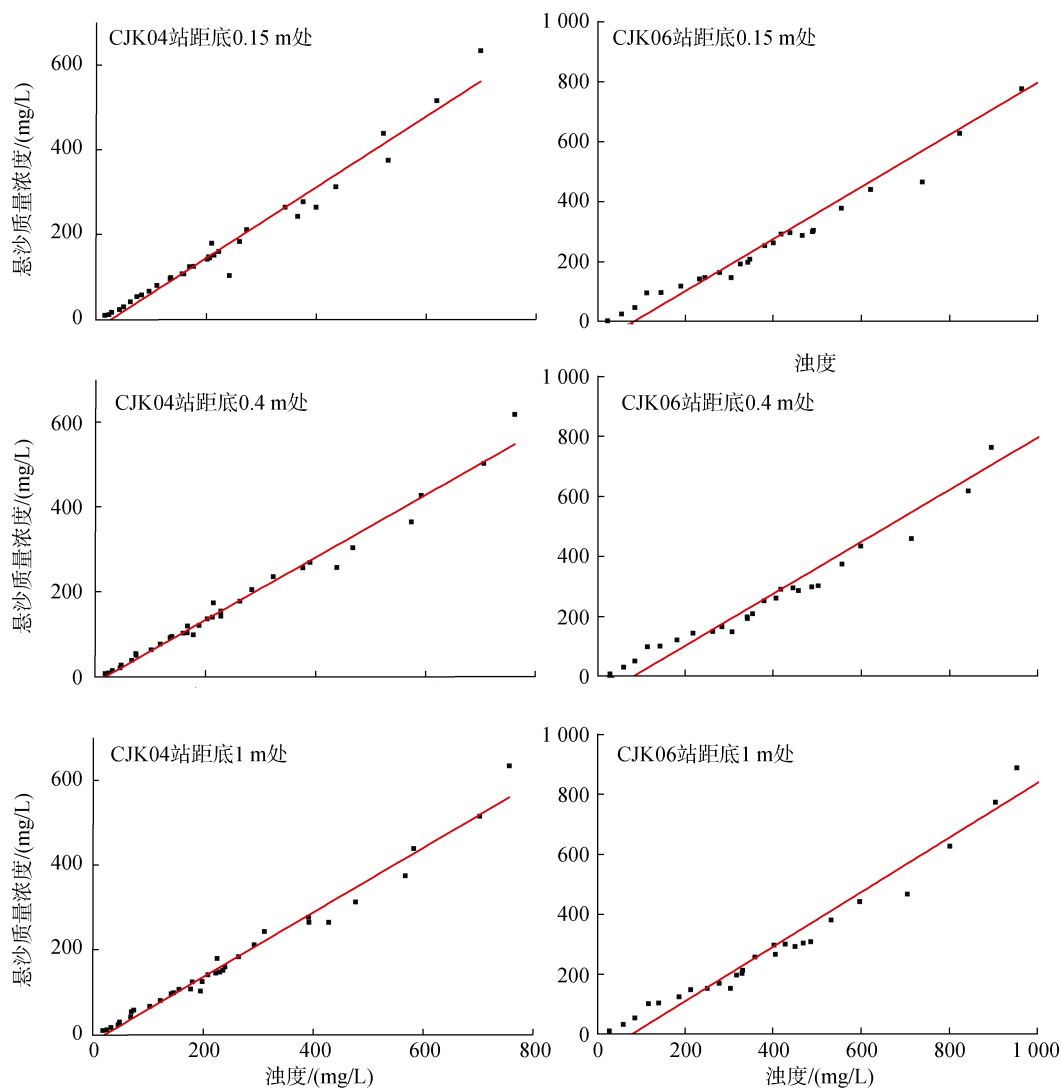


图 2 RBR 浊度数据与悬沙质量浓度之间的关系

Fig. 2 Relationship between turbidity and suspended sediment concentration (SSC)

对于非黏性沉积物-水界面，底床上可发生再悬浮的沉积物数量与剩余剪切应力的大小成正比。对于黏性沉积物-水界面的物质交换通常使用沉降和侵蚀通量表示，侵蚀通量可表示为：

$$\frac{dM_E}{dt} = E \left(\frac{\tau_0}{\tau_{cr}} - 1 \right) \quad (5)$$

沉降通量表达式为：

$$\frac{dM_D}{dt} = C_b w_s \left(1 - \frac{\tau_0}{\tau_{cr}} \right) \quad (6)$$

式中， $\frac{dM_E}{dt}$ 为侵蚀通量($\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$)， $\frac{dM_D}{dt}$ 为沉降通量($\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$)， τ_0 和 τ_{cr} 分别为底部切应力和临界侵蚀切应力($\text{kg}/(\text{m} \cdot \text{s}^2)$)， C_b 为近底部悬沙质量浓度(kg/m^3)， w_s 为悬沙沉降速度(m/s)， E 是再悬浮常数(取值 2×10^{-4}

或 5×10^{-5})。研究表明，长江口水体悬浮颗粒以黏性沉积物为主，对于小于 1 mm 絮团，其在海水中的沉降速度可表示为： $w_s = 0.245 D_{50}^{1.58}$ ， D_{50} 为底部沉积物的中值粒径(m)^[17]。

沉积物底床剪切应力 τ_0 (N/m^2) 的计算公式为^[14]：

$$\tau_0 = \rho u_*^2 \quad (7)$$

根据公式(4) τ_0 又可以用如下公式计算：

$$\tau_0 = \rho C_{100} u_{100}^2 \quad (8)$$

在近岸和浅海区域，在浪-流共同作用下近底部流速超过沉积物临界起动流速时，则沉积物处于活动状态。根据 Miller 等人研究，粒径小于 2 mm 的非黏性砂质沉积物临界起动剪切应力的公式为^[18]：

$$u_{cr} = 122.6 D_{50}^{0.29} \quad (9)$$

对于黏性沉积物, 临界起动剪切应力可由如下公式求出^[19]:

$$\tau_{cr} = g\theta_{cr}(\rho_a - \rho)D_{50} \quad (10)$$

$$\theta_{cr} = \frac{0.30}{1+1.2D_*} + 0.055(1 - e^{-0.020D_*}) \quad (11)$$

$$D_* = \left[\frac{g(s-1)}{\nu^2} \right] d \quad (12)$$

$$s = \rho_s / \rho \quad (13)$$

$$\nu = [1.14 - 0.031(T_e - 15) + 0.00068(T_e - 15)^2] \times 10^{-6} \quad (14)$$

θ_{cr} 为沉积物起动临界希尔兹数, g 为重力加速度(取值 9.81 m/s^2), ρ_s 为沉积物密度(取值 2650 kg/m^3), ρ 为海水的密度(取值 1024 kg/m^3), D_* 为无量纲粒径, ν 为海水的运动粘滞系数, T_e 为水体的温度($^{\circ}\text{C}$)。

综上所述, 可得:

$$\frac{\tau_0}{\tau_{cr}} - 1 = \frac{\rho C_{100} u_{100}^2}{g\theta_{cr}(\rho_s - \rho)D_{50}} - 1 \quad (15)$$

2 结果

2.1 近底部水动力特征

CJK04 站, 观测期间水位变化为 $8.54\sim 11.82 \text{ m}$, 平均水深为 10.04 m , 最大潮差为 3.09 m 。CJK06 站,

观测期间水位变化为 $10.31\sim 14.05 \text{ m}$, 平均水深为 12.08 m , 最大潮差为 3.74 m 。CJK04 站落潮历时比涨潮历时长(1 h 左右), 可能与径流入海作用有关, CJK06 站涨落潮历时基本相等。

选取距海底 0.15 m (下层)、 0.4 m (中层)、 1 m (上层) 3 个水层进行分析。CJK04 和 CJK06 站因为近底部流速受底部摩擦影响, 低层流速较小, 3 层水层流速变化趋势基本相同(图 3)。CJK04 站上、中、下层的平均流速分别为 $0.50, 0.42, 0.31 \text{ m/s}$; CJK06 站上、中、下层的平均流速分别为 $0.51, 0.46, 0.25 \text{ m/s}$ 。两站的最大值都出现在涨潮阶段, 最小值大多出现在平潮阶段, 但两站流速的极低值比水位的波峰波谷出现时间大约滞后 1 h, 即平潮的高水位和低水位出现后 1 h 才有流速的低值出现, 这表明该海域的潮波性质为非纯驻波。

对 ADCP 采集的流速剖面进行 5 min 平均以消除噪声和海底生物的影响, CJK04 站得到 320 个流速剖面, 其中流速与水深对数相关系数 R^2 在 0.85 以上的占 77%, 而 CJK06 站得到 312 个流速剖面里, R^2 超过 0.85 的也达到 73%, 符合流速对数剖面模型的计算要求。根据公式(1)、(3)计算两站的摩阻流速 u_* (图 3)。CJK04 站 u_* 在 5 月 31 日 01: 00 和 6 月 1

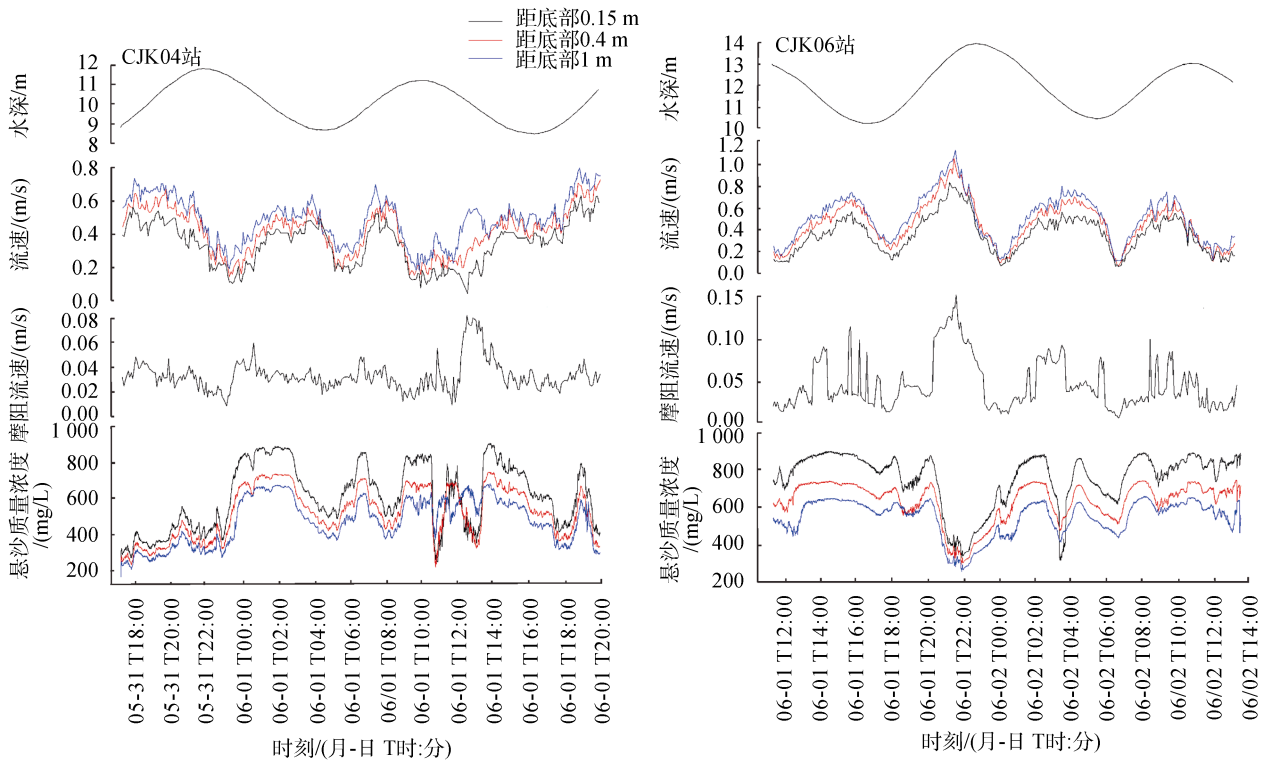


图 3 水深、流速、摩阻流速与悬沙浓度时间序列图

Fig. 3 Time series of depth velocity u_* and SSC

日 13:00 落急时刻达到极大值 0.08, 0.09 m/s, 在 5 月 31 日 23:00 和 6 月 1 日 12:00 两个高平潮期间分别达到极小值 0.008, 0.009 m/s。CJK04 站摩阻流速从落急到高平潮期间变化不明显, 在高平潮到落急期间会出现较明显的增大, 此外对比 3 层流速显示, 摩阻流速与距底部 1 m 处流速具有较好的响应。CJK06 站摩阻流速与距底部 1 m 处流速具有很好的相关关系, 摩阻流速在涨急落急期间都相应出现极大值, 在涨憩落憩期间则相应出现了极小值。CJK06 站摩阻流速在一些高流速时间段出现了异常低值可能与悬沙浓度变化导致的密度成层有关^[21]。总体看来, CJK06 站摩阻流速与距底部 1 m 处流速的相关关系比 CJK04 站要好, 这主要与 CJK04 受径流影响, 底部流速剖面不完全符合流速对数剖面有关。另外, 分析两站摩阻流速数据可以发现, CJK06 站所在杭州湾口外海域的摩阻流速比 CJK04 站所在的长江口南槽口门要大。

2.2 悬沙

2.2.1 悬沙浓度

观测期间在海底三角架下、中、上 3 层(即分别距海底 0.15, 0.4, 1 m)布设 RBR 浊度传感器对海底近底部浊度进行连续观测, 并通过室内标定试验获取现场悬沙浓度。悬沙浓度结果显示, CJK04 站观测期间下、中、上层的悬沙质量浓度变化范围分别是 238.83~906.03, 255.38~754.40, 229~688.08 mg/L; 悬沙质量浓度平均值分别为 649.69, 552.23, 485.68 mg/L。CJK06 站观测期间下、中、上层的悬沙质量浓度变化范围分别是 342.87~901.21, 304.95~743.86, 267.82~659.70 mg/L; 悬沙质量浓度平均值分别为 758.14, 633.97, 547.72 mg/L(图 3)。

CJK04 站悬沙质量浓度与距底部流速具有较好的对应关系, 5 月 31 日 22:00, 6 月 1 日 11:00 涨憩时刻, 6 月 1 日 4:30, 16:03 落憩时刻悬沙质量浓度相应出现了极小值; 在 6 月 1 日 1:00 落急时刻, 7:00, 19:00 涨急时刻悬沙浓度也相应出现了极大值。值得注意的是, 在 5 月 31 日 20:00 涨急时刻、6 月 1 日 12:30 落急时刻, 流速处于较高值而悬沙浓度却出现了异常低值, 这主要是由于光学传感器在高浊度环境下接收的光学信号会出现明显衰减, 导致观测数据产生误差^[22]。CJK06 站悬沙质量浓度与距底部流速也具有较好的对应关系, 6 月 2 日 15:00 落急时刻、6 月 3 日 10:00 涨急时刻, 悬沙质量浓度相应出现了极大值; 6 月 2 日 18:00、6 月 3 日 7:00 两个落憩时刻, 6 月 3 日 0:30 涨憩时刻悬沙质量浓度则相应

出现了极小值。与 CJK04 站类似, 由于光学传感器的限制, 在 6 月 2 日 22:00 涨急时刻、6 月 3 日 4:00 落急时刻, 悬沙质量浓度出现了异常低值。

2.2.2 悬沙组分

距海底 1 m 处水样悬沙的粒度分析结果显示(图 4), 两站距海底 1 m 处悬沙主要以粉砂为主, CJK04 站粉砂组分为 78.37%, 黏土组分为 20.41%, 砂组分为 1.22%; CJK06 站粉砂组分为 79.73%, 黏土组分为 19.4%, 砂组分为 0.87%。CJK04 站观测期内平均粒径 ϕ 为 6.6~7.3, 落潮期间平均粒径比涨潮期间的小; 分选系数范围在 1.25~1.6, 落潮时分选比涨潮时分选好。CJK06 站观测期内平均粒径 ϕ 为 6.5~7.2, 与 CJK04 类似, 也是落潮时平均粒径小; 分选系数范围在 1.2~1.6 之间, 落潮分选比涨潮分选好。此外, CJK04 站与 CJK06 站的潮周期内砂组分变化趋势与分选系数的变化趋势具有极好的对应关系。

2.3 再悬浮通量

两站观测期间采集的底质样品分析结果显示, CJK04 站底质中值粒径 ϕ 为 7.13, CJK06 站底质中值粒径为 6.82(图 4)。根据公式(10), (11)计算得出, 两站的 θ_{cr} 都约为 0.055, 但是由于中值粒径的差别, CJK04 站的 τ_{cr} ($6.25 \times 10^{-2} \text{ N/m}^2$)约是 CJK06 站($1.17 \times 10^{-1} \text{ N/m}^2$)的 50%。通过公式(14)计算两站再悬浮通量(E 取值 2×10^{-4})得出, CJK04 站再悬浮通量平均值为 $4.01 \times 10^{-3} \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$, 变化范围为 $0 \sim 2.24 \times 10^{-2} \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$; CJK06 站再悬浮通量平均值为 $5.04 \times 10^{-3} \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$, 变化范围为 $0 \sim 4.15 \times 10^{-2} \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 。CJK04 站($\frac{\tau_0}{\tau_{cr}} - 1$)数值变化趋势与流速基本相关(图 5), 在 5 月 31 日 23:00~6 月 1 日 1:00 落潮阶段和 6 月 1 日 12:00~6 月 1 日 14:00 落潮阶段出现明显的增大, 而且落潮期间($\frac{\tau_0}{\tau_{cr}} - 1$)数值大于涨潮期间数值, 表明长江径流对观测点再悬浮过程能起到明显作用。CJK06 站($\frac{\tau_0}{\tau_{cr}} - 1$)数值变化趋势与流速具有极好的相关关系, 在 6 月 2 日 16:00、6 月 3 日 4:30 落急时刻, 6 月 2 日 22:00、6 月 3 日 9:00 涨急时刻相应出现了极大值, 由于杭州湾喇叭口地形的束窄作用, 涨潮期间($\frac{\tau_0}{\tau_{cr}} - 1$)数值大于落潮数值。根据公式(5)、(6)可知, 两站的($\frac{\tau_0}{\tau_{cr}} - 1$)都大于 0, 说明观测期间两站底部一直在发生侵蚀, 再悬浮强度大。

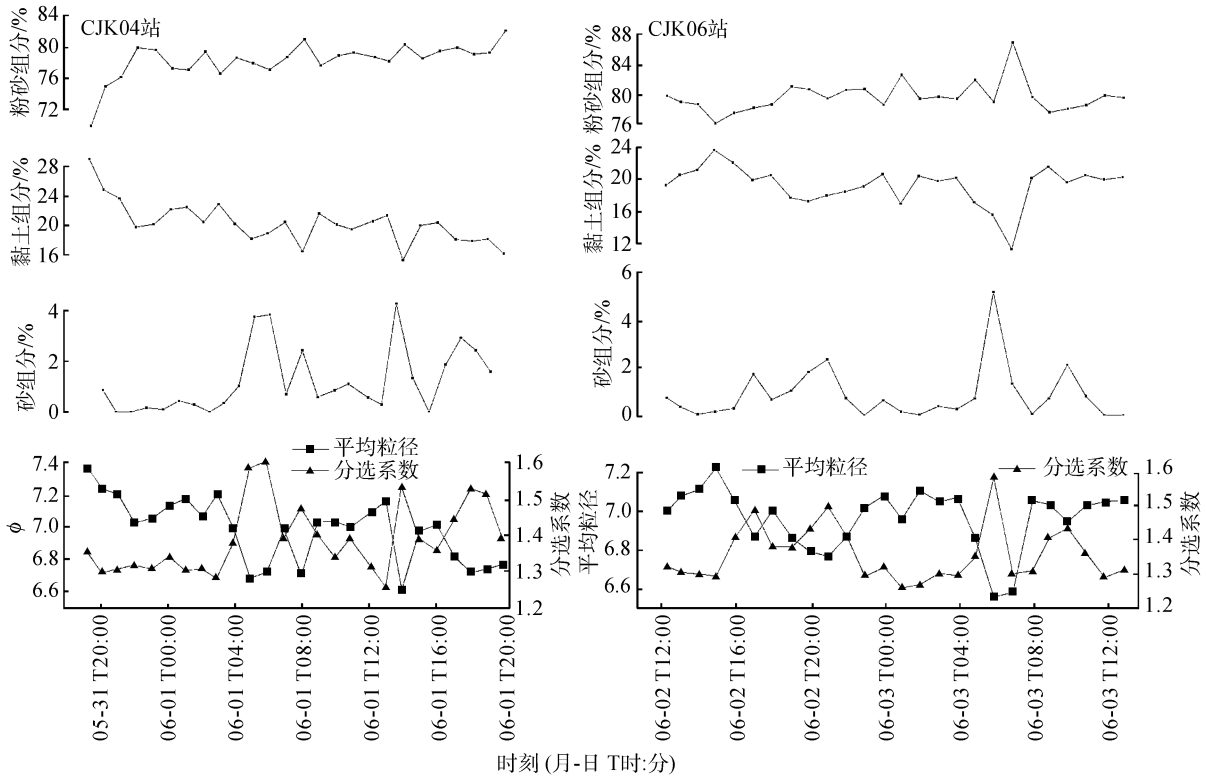


图 4 潮周期悬沙组分、平均粒径与分选系数

Fig. 4 SSC, average particle size, and sorting coefficient in the tidal cycle

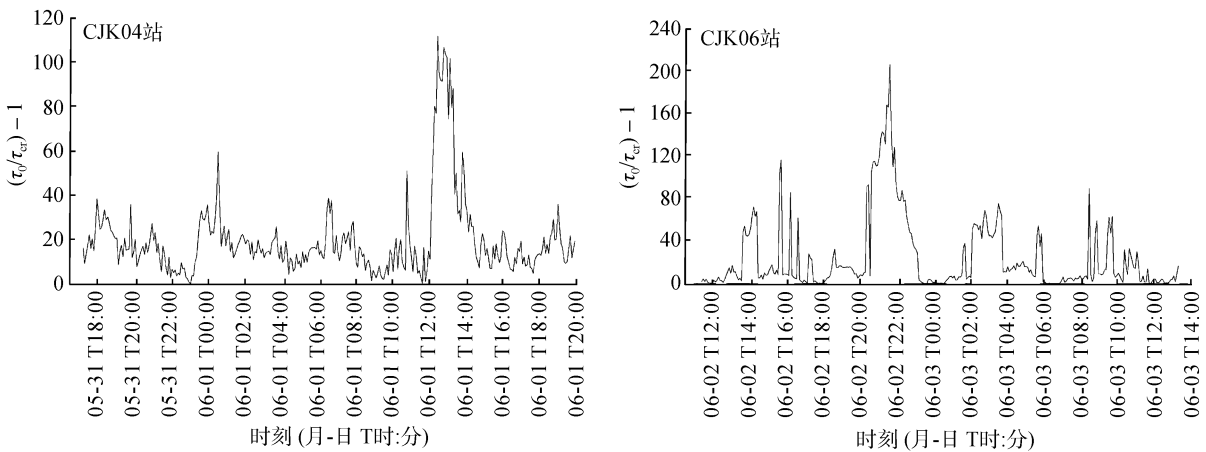


图 5 $(\frac{\tau_0}{\tau_{cr}} - 1)$ 在潮周期内的变化

Fig. 5 $(\frac{\tau_0}{\tau_{cr}} - 1)$ in the tidal cycle

3 讨论

本次两个观测站分别位于长江南槽口门外和杭州湾外近海海域, 通过对距海底 1 m 的悬沙组分与再悬浮通量进行对比分析可以发现, 悬浮物质中的砂组分与再悬浮通量的变化趋势具有显著的一致性(图 6), 其中位于杭州湾外部的 CJK06 站由于受到径

流作用较小, 变化趋势对应情况比 CJK04 站更好。

CJK06 站在涨潮期间底部流速大于落潮期间底部流速(图 3), 这与杭州湾的喇叭口地形有一定的关系, 海流通过喇叭口被束窄, 流速增强; 而落潮时海流从杭州湾往外, 海流分散, 能量消弱, 因此海流流速减小。体现在再悬浮通量变化趋势上, 涨潮时再悬浮通量比落潮时要大, 而在砂组分变化上则是涨潮

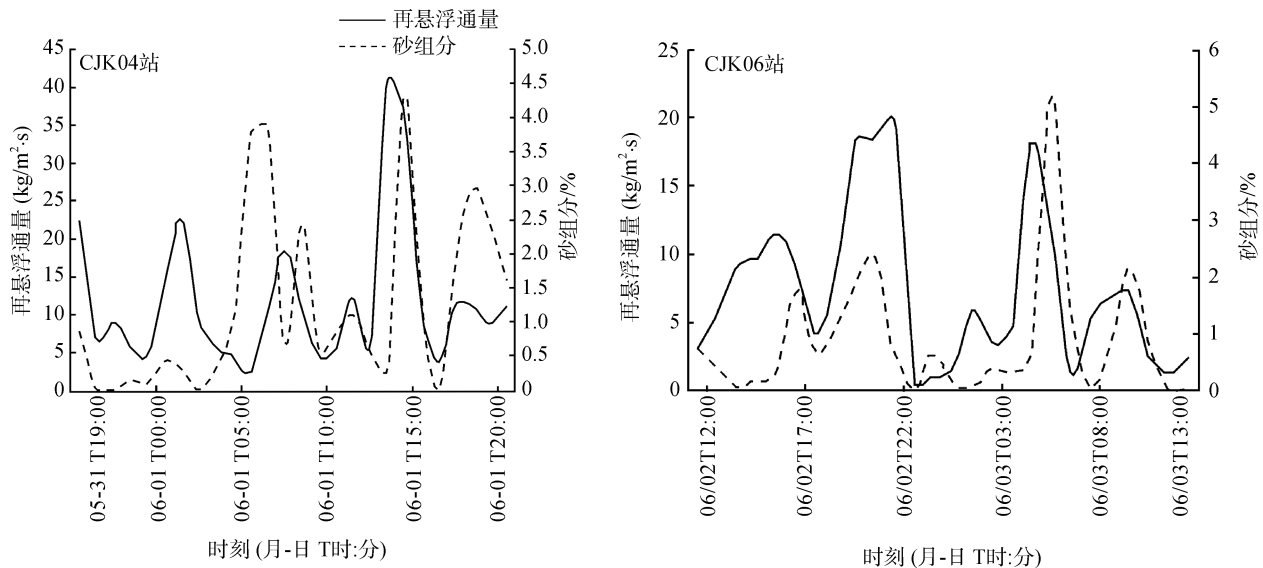


图 6 再悬浮通量与砂组分变化趋势对比
Fig. 6 Comparison of the trends in resuspension flux and sand fractions

时比落潮时高。在 6 月 2 日 22:00 时, 再悬浮通量在涨急后出现了一个极大值, 而砂组分在此前 1 h 已经出现了极大值, 表明当地再悬浮物质中砂组分已经基本被起动, 后续起动的组分可能是以粉砂为主的悬浮物。在 6 月 3 日 06:00 落急过后约 1 h, 砂组分出现了一个峰值, 在动力条件比涨潮弱的条件下, 悬浮物中砂组分比涨潮时带起的还高, 表明该砂组分中大部分可能是落潮流从杭州湾带来的悬浮物, 而原地再悬浮的占比较小。10:00 涨急时又出现了一个砂组分的极值, 与此同时再悬浮通量也出现了一个极值。通过分析图 6 可以发现, CJK06 站砂组分与再悬浮通量两者变化趋势具有较好的一致性, 具有较好的正相关关系, 基本上可以通过对水体中砂组分的监测来指示当地沉积物再悬浮的强度。

CJK04 站位于南槽口门外, 在地形上类似于喇叭形河口, 涨潮期间底部流速稍大于落潮期间底部流速(图 3), 但没有 CJK06 站明显, 主要是受到长江径流影响, 落潮流速得到了加强。CJK04 站的砂组分与再悬浮通量同样存在着比较好的正相关关系, 在 6 月 1 日 5:00 的落憩期间和 14:00 落急期间, 砂组分均出现了峰值, 但对应的再悬浮通量只在 14:00 落急时刻出现峰值。两个时间段砂组分含量接近而再悬浮通量差别较大, 主要是因为落憩时水动力较弱, 因此再悬浮能力弱, 再悬浮能起动的悬沙量较少, 而较高的含砂量可能是由于径流作用携带至此进行沉降的。在 6 月 1 日 1:00 落急时刻, 砂组分只有

0.35%, 但此时再悬浮通量却出现了一个较大的数值, 主要是因为砂组分在悬浮泥沙中一般较少, 起动后常在较短时间内被输运, 而水样采集频率是 1 次/h, 因此采水过程中容易错失最佳采样时间而不能正确获取再悬浮发生初期砂组分的数据。此外, 水样采集工作在时间频率上和 RBR、ADCP 等高时间分辨率仪器具有较大的差别, 因此也不能很好地反映出砂组分与再悬浮通量的相关关系, 需要配合采用更高时间频率的粒度观测仪器, 可以更详细精确地表现两者的关系。

此外, 对比 CJK06 和 CJK04 站的再悬浮通量可以发现, 两站距底 1 m 水样悬浮物中砂组分接近, 两地的再悬浮通量数值也接近。可见, 砂组分与再悬浮通量之间存在着较好的相关关系, 对再悬浮作用具有较敏感响应。

4 结论

1) 长江口南槽口门和杭州湾口门处海域受不正规半日潮控制。在潮波向岸的传播过程中, 由于海底地形影响产生潮不对称效应, 近底部涨潮流稍大于落潮流。长江口南槽口门外摩阻流速比杭州湾口门外摩阻流速要小, 南槽口门摩阻流速在落潮期间受径流影响较明显。

2) 观测区近底部悬沙以粉砂组分为主, 在 75% 左右。其中, 砂组分对再悬浮作用响应最为敏感, 砂组分与再悬浮强度的变化趋势基本一致, 砂组分的

变化对悬浮沉积物的再悬浮强度具有一定的指示意义。长江径流对长江口外再悬浮过程起到明显作用,而杭州湾外再悬浮过程则主要受到潮流影响,总体而言长江口南槽口门外海域再悬浮强度小于杭州湾口门海域。

致谢:南京大学的杜家笔、王应飞、于欣、雷晓、石勇参加了野外观测,倪文斐、李明亮、魏晓参加了室内样品分析,谨致谢忱!

参考文献:

- [1] 沈健, 沈焕庭, 潘定安, 等. 长江河口最大浑浊带水沙输运机制分析[J]. 地理学报, 1995, 50(5): 411-420.
Shen Jian, Shen Huanting, Pan Ding'an, et al. Analysis of transport mechanism of water and suspended sediment in the turbidity maximum of the Changjiang Estuary[J]. Acta Geographica Sinica, 1995, 50(5): 411-420.
- [2] 杨旸, 汪亚平, 高建华, 等. 长江口枯季水动力悬沙特征与再悬浮研究[J]. 南京大学学报(自然科学), 2006, 42(6): 643-655.
Yang Yang, Wang Yaping, Gao Jianhua, et al. Hydrodynamics and fine grained sediment resuspension in Changjiang Estuary during dry seasons[J]. Journal of Nanjing University(Natural Sciences), 2006, 42(6): 643-655.
- [3] Gao Shu, Wang Yaping, Gao Jianhua. Sediment retention at the Changjiang sub-aqueous delta over a 57 year period, in response to catchment changes[J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 2011, 95(1): 29-38.
- [4] 陈沈良, 张国安, 杨世伦, 等. 长江口水域悬沙浓度时空变化与泥沙再悬浮[J]. 地理学报, 2004, 59(2): 260-266.
Chen Shenliang, Zhang Guoan, Yang Shilun, et al. Temporal and spatial changes of suspended sediment concentration and resuspension in the Yangtze River Estuary and its adjacent waters[J]. Acta Geographica Sinica, 2004, 59(2): 260-266.
- [5] 汪亚平, 潘少明, Wang H V, 等. 长江口水沙入海通量的观测与分析[J]. 地理学报, 2006, 61(1): 35-46.
Wang Yaping, Pan Shaoming, Wang H V, et al. Measurements and analysis of water discharges and suspended sediment fluxes in Changjiang Estuary[J]. Acta Geographica Sinica, 2006, 61(1): 35-46.
- [6] 王爱军, 汪亚平, 高抒. 声学多普勒流速仪盲区数据处理及其在长江河口区的应用[J]. 水利学报, 2004, 35(10): 77-82.
Wang Aijun, Wang Yaping, Gao Shu. Determination of current velocity in blank layer of ADCP[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2004, 35(10): 77-82.
- [7] 李伯根, 谢钦春, 夏小明, 等. 椒江河口最大浑浊带悬沙粒径分布及其对潮动力的响应[J]. 泥沙研究, 1999, 1: 18-26.
Li Bogen, Xie Qinchun, Xia Xiaoming, et al. Size distribution of suspended sediment in maximum turbidity zone and its response to tidal dynamics in Jiaojiang River estuary[J]. Journal of Sediment Research, 1999, 1: 18-26.
- [8] 杨旸, 高建华, 汪亚平, 等. 长江口南港底部边界层特征的观测与分析[J]. 海洋科学, 2007, 31(3): 58-65.
Yang Yang, Gao Jianhua, Wang Yaping, et al. Observing and analysing the characteristics of bottom boundary layer in Nangang port in the Changjiang River estuary[J]. Marine Sciences, 2007, 31(3): 58-65.
- [9] 李占海, 陈沈良, 张国安. 长江口崇明东滩水域悬沙粒径组成和再悬浮作用特征[J]. 海洋学报, 2008, 30(6): 155-163.
Li Zhanhai, Chen Shenliang, Zhang Guoan. The study on grain-size distribution of suspended sediment and resuspension process on the Chongming east intertidal and subtidal zones in the Changjiang Estuary in China[J]. Acta Oceanologica Sinica, 2008, 30(6): 155-163.
- [10] Li Peng, Yang Shilun, Milliman J D, et al. Spatial, temporal, and human-induced variations in suspended sediment concentration in the surface waters of the Yangtze Estuary and adjacent Coastal areas[J]. Estuaries and Coasts, 2012, 35: 1316-1327.
- [11] 李鹏, 杨世伦, 戴仕宝, 等. 近 10 年来长江口水下三角洲的冲淤变化——兼论三峡工程蓄水的影响[J]. 地理学报, 2007, 62(7): 707-716.
Li Peng, Yang Shilun, Dai Shibao, et al. Accretion/erosion of the subaqueous delta at the Yangtze Estuary in recent 10 years[J]. Acta Geographica Sinica, 2007, 62(7): 707-716.
- [12] Gao Shu. A solution to the third type of linear relationships between two variables in earth sciences[J]. Journal of Ocean University of Qingdao, 1997, 27(3): 373-381.
- [13] 薛元忠, 何青, 王元叶. OBS 浊度计测量泥沙浓度的方法与实践研究[J]. 泥沙研究, 2004, 4: 56-60.
Xue Yuanzhong, He Qing, Wang Yuanye. The method and application of OBS in the measurement of sediment concentration[J]. Journal of Sediment Research, 2004, 4: 56-60.
- [14] Dyer K R. Coastal and estuarine sediment dynamics[M]. Chichester: John Wiley, 1986.
- [15] Jia Jianjun, Gao Shu, Xue Yunchuan. Sediment dynamic processes of the Yuehu inlet system, Shandong Peninsula, China[J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 2003, 57(5): 783-801.

- [16] 汪亚平, 高抒, 贾建军. 海底边界层水流结构及底移质搬运研究进展[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2000, 20(3): 101-106.
Wang Yaping, Gao Shu, Jia Jianjun. Flow structure in the marine boundary layer and bedload transport: a review[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2000, 20(3): 101-106.
- [17] Lick W, Huang Hening, Jepsen R. Flocculation of fine grained sediments due to differential settling[J]. Journal of Geophysical Research: Oceans (1978–2012), 1993, 98(C6): 10279-10288.
- [18] Miller M C, McCave I N, Komar P D. Threshold of sediment motion under unidirectional currents[J]. Sedimentology, 1977, 24(4): 507-527.
- [19] Soulsby R. Dynamics of marine sands: a manual for practical applications[M]. London: Thomas Telford, 1997.
- [20] 王韞玮, 高抒. 强潮环境下悬沙对底部边界层的影响[J]. 海洋科学, 2010, 34(1): 52-57.
Wang Yunwei, Gao Shu. The effect of sediment resuspension on benthic boundary layer in macro-tidal environments[J]. Marine Sciences, 2010, 34(1): 52-57.
- [21] 张文祥, 杨世伦. OBS 浊度标定与悬沙浓度误差分析[J]. 海洋技术, 2008, 27(4): 5-8.
Zhang Wenxiang, Yang Shilun. Turbidity calibration of OBS and errors analysis of suspended sediment concentration[J]. Ocean Technology, 2008, 27(4): 5-8.

Preliminary study of the response of suspended sediment components to resuspension processes in the mouth of the South Channel, Changjiang River Estuary

ZHANG Yi-yi¹, YANG Yang¹, CHEN Jing-dong¹, XU Hai-dong², GAO Jian-hua¹, WANG Ya-ping¹

(1. School of Geographic and Oceanographic Science, Nanjing University, Nanjing 210023, China; 2. Survey Bureau of Hydrology and Water Resources of the Changjiang River Estuary, Changjiang Water Resources Commission, Shanghai 200136, China)

Received: Apr. 12, 2015

Key words: suspended sediment concentration; friction velocity; resuspension flux; sand component; the Changjiang River Estuary

Abstract: Based on the sediment dynamics data obtained using a tripod observation system deployed in the mouth of the South Channel in the Changjiang River Estuary, we investigated the bottom boundary layer characteristics and resuspension processes in the region. In addition, we analyzed water samples using a Malvern Mastersize 2000 laser granulometer to obtain the grain-size distribution curves of the suspended sediments. Our results indicate that the sediments in this area are mainly silt. There was a good linear relationship between the near-bottom current velocity and suspended sediment concentration; this indicates the occurrence of strong resuspension events. The sand component of the suspended sediment increased with resuspension flux and vice versa. Thus, the sand component of suspended sediments could be used as a proxy of resuspension events.

(本文编辑: 刘珊珊)