

# 长江口南港底部边界层特征的观测与分析

杨 旻, 高建华, 汪亚平, 潘少明, 王爱军

(南京大学 海岸与海岛开发教育部重点实验室, 江苏 南京 210093)

**摘要:** 对长江口 2002 年和 2003 年共 4 个潮周期的数据进行了分析, 通过流速对数剖面公式计算边界层参数, 并对各个潮周期内的边界层参数的变化规律进行了分析, 同时也对悬沙输送可能对垂向水流结构以及边界层参数造成的影响进行了探讨。结果表明, 悬沙的时间分布特征对温度、盐度、水体密度的分布格局有重要影响, 主要表现在水体的  $R_f$  值普遍较高, 分层稳定。此外, 悬沙也可影响边界层参数, 从而对水流结构产生影响。由于水体的层化作用, 使层间的摩擦阻力增大, 相当于在垂向上产生不同内边界层, 因而影响了流速在垂向上的变化。

**关键词:** 声学多普勒流速剖面仪; 水流结构; 边界层参数; 长江口

**中图分类号:** TV143      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1000-3096 (2007) 03-0058-08

海底边界层是水体水流结构明显受到底部影响的水层。在均匀、恒定流, 以及底床平坦、固定的理想条件下, 流速随高度的变化呈对数分布。而自然界中还大量存在的非单向恒定的波浪、潮流、内波等常常造成流速分布偏离 Von Karmen-Prandtl 对数分布形式<sup>[1-5]</sup>。在长江口这种底部沉积物活动剧烈、高悬沙浓度环境下, 悬沙的垂向分布必然导致水体垂向密度梯度的变化, 造成垂向密度分层, 影响到水体的垂向紊动结构, 并导致其底部边界层参数和厚度的改变。此前的研究也表明, 不同的悬沙分布剖面对应着不同类型的流速垂向分布结构<sup>[6]</sup>。此时如果仍采用卡门-普郎特模型, 则会对边界层参数的计算产生较大误差。解决这个问题的方法有两种, 其一是改变边界层参数之一的底床糙度的定义和卡门常数的值, 其二是修改卡门-普郎特模型本身。由于改进的卡门-普郎特模型给出了密度分层影响的表达式, 因此其物理意义较为明确, 也有利于探讨悬沙浓度与边界层参数的关系。作者拟采用改进的卡门-普郎特模型分析强潮、高悬沙浓度河口的悬沙浓度对潮流边界层的影响。

长江口水沙输送量巨大, 近岸环流复杂, 动力条件季节变化明显, 地形冲淤多变因此长江口地区

历来是众多学者研究细颗粒物过程的一个重要区域<sup>[7]</sup>。声学多普勒流速剖面仪 (ADCP) 是近年来发展起来的一种用于测量流速的声学仪器, 同时还可以通过建立回声强度和现场取得水样的回归关系式而获得悬沙浓度的数据<sup>[8-10]</sup>。作者主要利用通过 ADCP 获得的高频率和高分辨率的流速和悬沙浓度数据, 从边界层内部的过程和机制方面, 通过建立分层和边界层参数之间的函数关系式, 探讨长江口地区悬沙浓度分布对底部边界层的影响。

## 1 数据采集和分析方法

### 1.1 数据采集

2002 年 10 月 29 日 11:30 至 30 日 0:30 和 2002 年 10 月 30 日 11:30 至 31 日 0:30 以及 2003 年 11 月 16 日 16:10 至 17 日 05:10 和 11 月 15 日 12:30 至 16 日 13:00 分别在 A2、A1 站用 ADCP(美

收稿日期: 2004-06-23; 修回日期: 2006-02-22

基金项目: 国家重点基础研究发展规划项目(2002CB412401); 国家自然科学基金资助项目(40106009)

作者简介: 杨旻 (1978-), 男, 黑龙江哈尔滨人, 主要从事海洋沉积动力学的研究, E-mail: njuyang@sohu.com

国 RDI 公司生产的 600 Hz 宽幅 ADCP)进行了定点观测。单元层厚度设定为 0.52 m, ADCP 探头置于水下 1.2 m, 声波波束与垂向的夹角 20°。在观测过程中, 分别取不同深度的水样并现场过滤。在水文

观测过程中, 每 0.5 h 用 CTD (美国 Sea-Bird 公司生产的 SBE25 型 CTD) 沿水深作剖面观测, A1, A2 站测量期间的潮相为中潮, 观测期间天气状况良好, 但风浪较大。

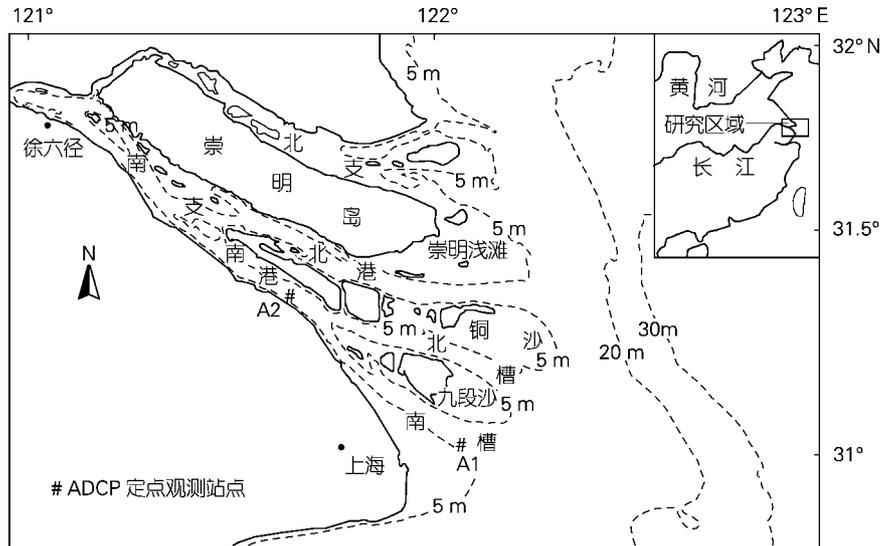


图 1 长江口区区位图

Fig. 1 Location map of the Changjiang River estuary

### 1.2 悬沙浓度数据的获取

将 ADCP 观测过程中现场取得同步、同层次水样过滤、烘干、称质量, 获得悬沙浓度。通过回归分析, 建立水样悬沙浓度与对应声学信息(回声强度)之间的关系。最后, 根据这些回归关系式, 将声学信息转换为与流速同步的悬沙浓度剖面信息。

### 1.3 数据处理

在边界层厚度内, 流速随高度的变化符合 Von karmen-Prandtl 流速对数分布剖面公式:

$$u = \frac{u_*}{k} \ln \frac{z}{z_0} \quad (1)$$

式中  $k$  是 Von Karman 常数, 约为 0.4,  $u$  为底床摩阻流速(m/s),  $z$  为距底床高度(m),  $z_0$  为粗糙长度。

Adams 等通过对具有稳定分层的海底边界层的研究, 建立了一个有关于  $R_i$  和  $z$  的修正函数<sup>[11,12]</sup>, 得到了具有稳定分层条件下的 Von karmen-Prandtl 流速对数分布剖面修正公式:

$$u = \frac{u_*}{k} \left( \ln \frac{z}{z_0} + A \int \frac{z R_i}{z} dz \right) \quad (2)$$

式中,  $A$  为常数, 等于 5.5, 其它同公式(1),  $R_i$  (Flux Richardson number) 是用来判断水体分层情况的一个重要参数, 但由于  $R_i$  (Gradient Richardson number) 可以直接由实测流速和密度求出, 在计算和应用上更为简便, Mellor 和 Obukhov 给出了  $R_f$  和  $R_i$  之间的经验关系式<sup>[13]</sup>,  $R_i$  可由公式(4)求出:

$$R_f = 0.725 \left[ R_i + 0.186 - (R_i^2 - 0.316R_i + 0.0346)^{\frac{1}{2}} \right] \quad (3)$$

$$R_i = \frac{g \frac{\partial \rho}{\partial z}}{\rho \left( \frac{\partial u}{\partial z} \right)^2} \quad (4)$$

式中  $\rho$  为水体密度,  $u$  为距离底床  $z$  处的流速,  $g$  为重力加速度 (9.8 m/s<sup>2</sup>),

底床剪切力 ( ) 表示在单位时间、单位面积上

通过的动量通量：

$$\tau = \rho u_*^2 \quad (5)$$

摩擦系数  $C_{100}$  可以表示为摩阻流速和  $u_{100}$  (距床 1 m 处的流速) 比值的平方：

$$C_{100} = \frac{u_*^2}{u_{100}^2} \quad (6)$$

水体和水沙混合物的密度转换公式如下：

$$\rho_m = \rho_w + \frac{c}{\rho_s} (\rho_s - \rho_w) \quad (7)$$

式中  $\rho_m$  为水沙混合物的密度( $\text{kg}/\text{m}^3$ )， $\rho_w$  为水体的密度( $\text{kg}/\text{m}^3$ )， $\rho_s$  为沉积物的密度( $\text{kg}/\text{m}^3$ )，数值为 2 650  $\text{kg}/\text{m}^3$ ， $c$  为悬沙质量浓度( $\text{kg}/\text{m}^3$ )。

## 2 结果

### 2.1 流速和悬沙质量浓度随时间的变化

长江口的潮流流速和悬沙质量浓度变化主要有以下几个特征(图 2 和图 3)：最大流速均出现在落急，除憩流阶段，其余时刻的流速垂向分层比较明显；A1-2002、A2-2002、A1-2003 和 A2-2003 的最大悬沙质量浓度分别出现在落急、落急、涨急和初落，除落憩和涨憩外，悬沙质量浓度在垂向上也都出现不同程度的分层现象。

### 2.2 边界层参数

图 4 显示，A1-2002，A2-2002，A1-2003 和 A2-2003 站分别有 75.4%，64%，70% 和 71% 的数据的线性回归后  $r > 0.9$ ，即符合流速垂向的对数分布，其余的数据都出现在憩流阶段。

从分析结果(图 4)来看，长江口的潮流边界层参数主要有以下特点：摩阻流速在一定程度上反映了底部边界层对对应时刻流速的影响程度，同时也反映了回归后的对数流速剖面斜率的大小，可以表征为流速沿垂线的变化率。各站位摩阻流速平均值的分布情况是 A1-2002，A2-2002，A1-2003 和 A2-2003，对应的值分别为 0.075，0.09，0.053 和 0.048 m/s。其中落潮流的平均值大于涨潮流平均值，4 个站位的落潮和涨潮平均摩阻流速的比值分别为 1.27，1.3，1.12 和 1.9，这说明这各站位落潮期间流速沿垂线的变化率要大于涨潮；粗糙长度主要受到沉积物粒度特征、底部微地貌特征、浪-流作用和沉积物运动的影响<sup>[14,15]</sup>。在剔除不符合流速对数分布的数据后，A1-2002，A2-2002，A1-2003 和 A2-2003 的潮周期平均值分别为 0.26，0.28，0.12 和 0.09 cm，落潮平均值大于涨潮

平均值，4 个站位落潮和涨潮平均值的比值分别为 1.93，1.67，1.99 和 1.5。摩擦系数和粗糙长度在潮周期内的变化相一致，4 个站位的摩擦系数的潮周期平均值分别为 0.35，0.19，0.38 和 0.17，而落潮和涨潮平均值的比值则分别为 1.67，1.46，1.58 和 1.21。

## 3 讨论

分层计算结果显示，由于观测处于枯水期，水体中的温度、盐度以及密度在层间的分布较为均一，因此 4 个站点的  $R_f$  值大约为 0。但长江口由于悬沙分布的影响，加大了原有的垂向密度梯度，除少数时刻对应的  $R_f$  值减小之外，水体的  $R_f$  值普遍提高，并且分层稳定(图 5)。

悬沙在垂向上的分布可对流速剖面的形状产生影响，不同的悬沙分布剖面对应着不同类型的流速垂向分布结构<sup>[6]</sup>。此外，底部沉积物的再悬浮、沉降以及悬沙输送，不但可以改变原先水体密度的垂向梯度和层间水体的紊动强度，还可以通过改变边界层的内部结构(边界层参数)而对垂向水流结构产生影响。作者通过计算发现(图 6)，在考虑悬沙浓度影响的情况下(由公式(2)计算得出)，摩阻流速、摩擦系数、河床剪切力和底床糙度分别比不考虑悬沙浓度垂向不均匀分布导致分层影响情况下(由公式(1)计算得出)的计算值平均减少了 31%，47%，23% 和 34%，摩阻流速、摩擦系数和河床剪切力都和  $R_f$  呈负相关，其关系式如下：

$$u_*' = 0.6943u_* - 0.0036 \quad (8)$$

$$\tau' = 0.53\tau - 0.3309 \quad (9)$$

$$C'_{100} = 0.6556C_{100} - 0.0123 \quad (10)$$

悬沙在改变水体分层状况的同时也加大了水层间的密度差异，使层间的摩擦力增大，这相当于在垂向形成了若干个内边界层，因而改变了流速在垂向上的分布。这种现象，可能是由于悬浮颗粒的絮凝作用和粘弹性引起了粘滞层增厚从而引起摩擦力减小造成的<sup>[16]</sup>。底床糙度和摩擦系数减小，将直接减小底部边界层的厚度，进而影响水流结构。而值减小意味着水流对底床改造能力减弱，使底部细颗粒沉积物的再悬浮强度降低，另外水体悬浮颗粒的相互碰撞产生的絮凝作用也能改变了河床底质的粒度结构<sup>[14]</sup>，使底床糙度和摩擦系数减小。

从观测和计算结果可知，憩流阶段的流速垂向分布大都偏离 Von karmen-Prandtl 流速对数分布形式，



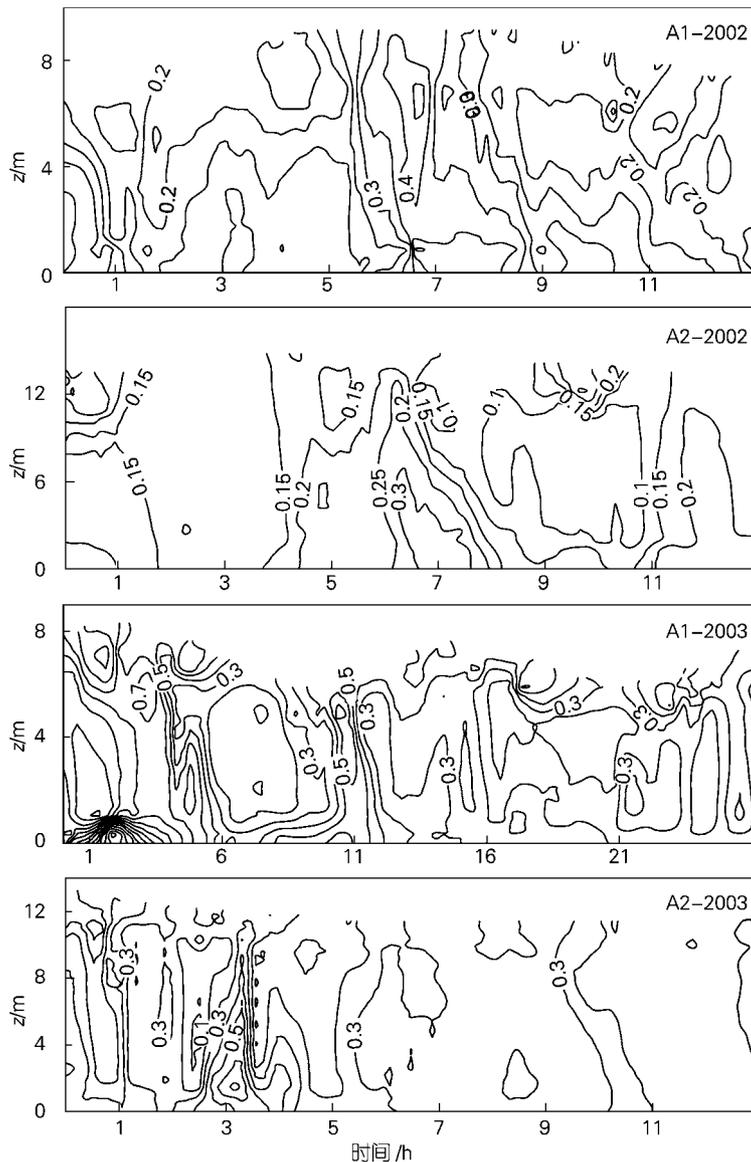


图3 长江口定点站位潮周期内的悬沙质量浓度 (g/L) 剖面等值线

Fig.3 The suspended sediment concentration (g/L) isonic line of different stations in the Changjiang River estuary

水体中悬沙对水流结构和边界层的影响表现为两个方面：一是悬沙导致的分层相当于形成了若干垂向热量、动量和物质垂向输送的“屏障”；二是悬沙浓度本身对水流结构和边界层影响。在高悬沙浓度环境下的颗粒态物质运动过程中的相互碰撞以及对水体能量的消耗是不能被人们所忽视的，但由于悬浮颗粒态物质在水中的运动形式不能用经典牛顿力学来描述，这就给人们理解这种效应本身给边界层带来的影响

造成了一定的困难。这还有待于相应的物理学基础理论的不完善和观测技术的不断改进，提高观测的精度和数据的分辨率。目前已有学者通过室内试验手段，建立了实测摩阻流速和悬沙浓度以及通过线性回归方法得到的摩阻流速之间的经验关系式<sup>[2]</sup>，但大多是在悬沙浓度较低的环境下通过室内水槽实验得到的一个经验关系式，对于像长江口这样野外环境条件复杂、悬沙的地区是否适用还有待于做进一步探讨。

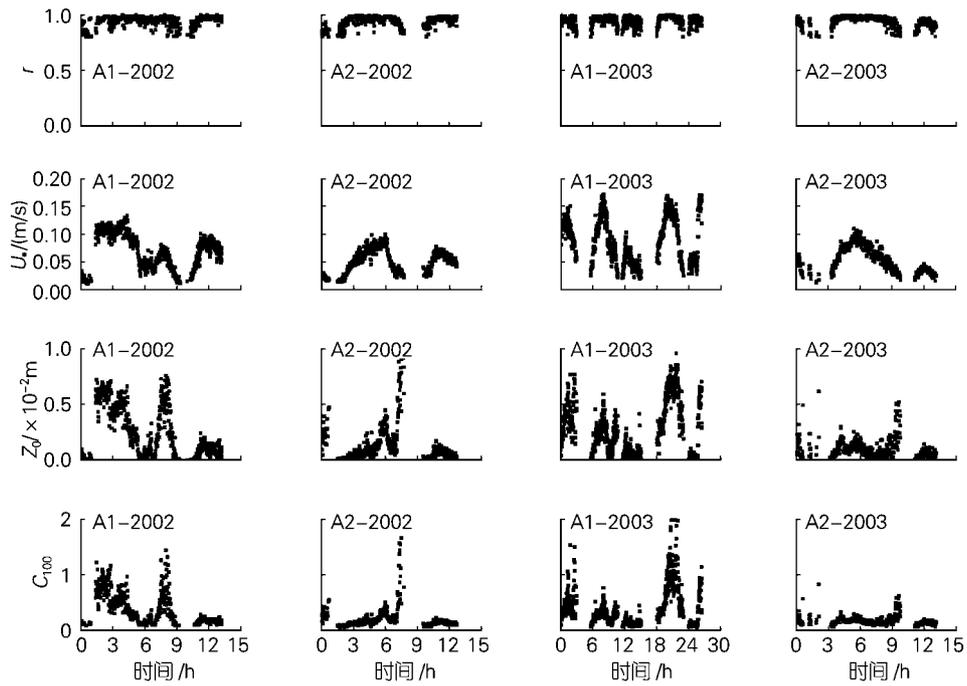


图4 各个站位线性回归相关系数 ( $r$ ) 以及边界层参数沿时间序列分布

Fig. 4 The correlation coefficient of linear regression and the boundary layer parameters at different stations during tidal cycle

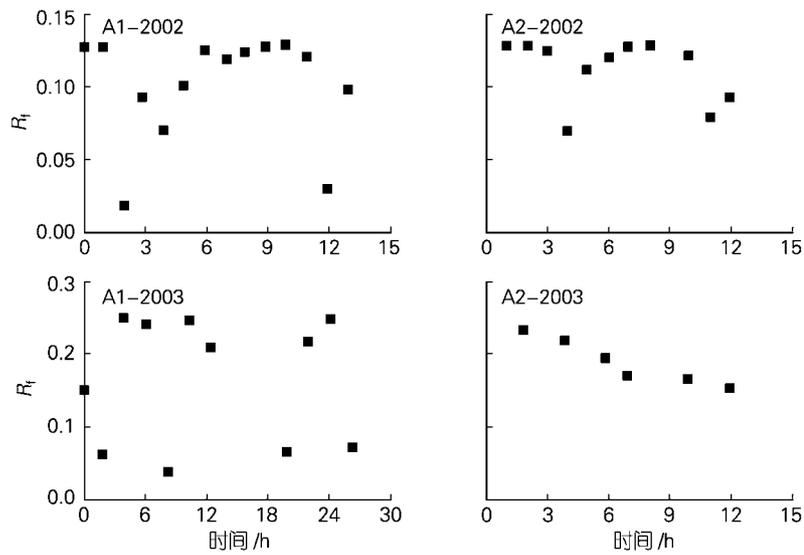


图5 考虑和未考虑悬沙浓度影响情况下的  $R_f$  在潮周期内的变化

Fig.5 The variation of  $R_f$  calculated respectively in and without consideration of the influence of suspended sediment concentration in tidal cycle

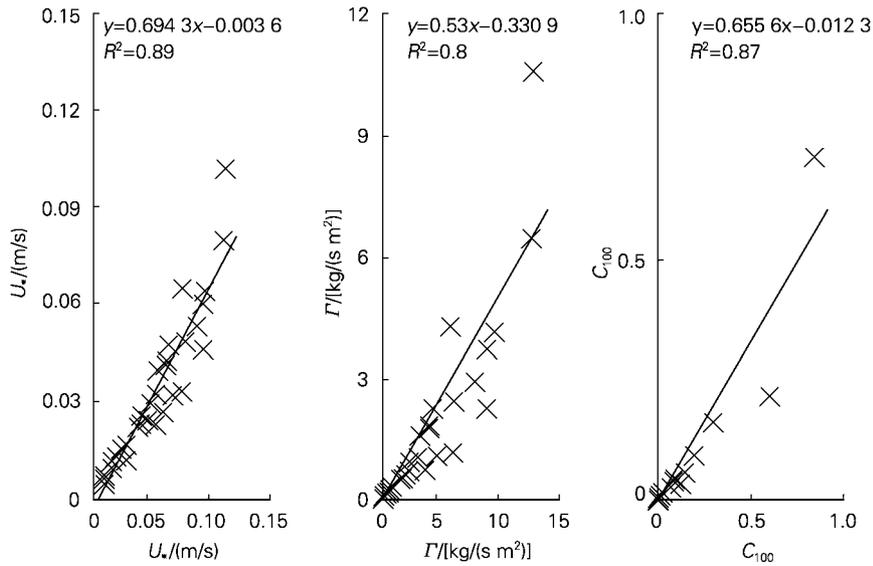


图 6 考虑和未考虑悬沙浓度影响情况下的边界层参数相互关系

Fig. 6 The comparison result between bottom boundary layer parameters respectively derived from Equation (1) and Equation( 2)

#### 4 结论

悬沙分布对长江口的水流结构以及水体结构和边界层参数造成了很大的影响,由于悬沙分布的影响加大了原先的纵向密度梯度,水体的  $R_f$  值被普遍提高,并且分层稳定。

悬沙分布对长江口水流结构的影响主要体现在以下几个方面:(1)由于悬沙分布的影响,改变了原有水体的纵向密度梯度,同时也改变了水体的分层状态。(2)悬沙还可以通过改变边界层参数而对水流结构产生影响,在考虑悬沙浓度影响的情况下,摩阻流速、摩擦系数、河床剪切力和底床糙度分别比不考虑悬沙浓度垂向不均匀分布导致分层影响情况下的计算值平均减少了 31%,47%,23%和 34%,摩阻流速、摩擦系数和河床剪切力都和  $R_f$  呈负相关。(3)由于分层作用,影响了边界层内部结构,进而影响水流结构。

参考文献:

[1] Heathershaw A D, Langhorne D N. Observations of near-bed velocity profiles and seabed roughness in tidal currents flowing over sandy gravel[J]. *Estuary, Coastal and Shelf Science*,1988, 26: 459-482.  
[2] Li Michael Z, Gust G. Boundary layer dynamics and drag

reduction in flows of high cohesive sediment suspensions[J].

*Sedimentology*, 2000,47: 71-86.

[3] Wilkinson L D. Benthic boundary layers of estuarine and coastal environments wave imposed on boundary layers[J].

*Review in Aquatic Science*, 1986,1: 75-95.

[4] 薛鸿超,顾家龙,任汝述. 海岸动力学[M].北京:人民交通出版社,1980.307-332.

[5] 周济福,刘青泉,李家春. 河口混合过程的研究[J]. *中国科学(A)*, 1999, 29(9): 835-843.

[6] Frienrichs C T, Wright L D, Hepworth D A, et al. Bottom-boundary-layer process associated with fine sediment accumulation in coastal seas and bays[J]. *Continental Shelf Research*, 2000, 20: 807-841.

[7] 时钟. 长江口水动力过程的研究进展(1979-1999)[J]. *海洋科学*, 2001, 25(6): 54-56.

[8] Glenn P H, Thorne P D, Flatt D, et al. Comparison between ADCP and transmissometer measurements of suspended sediment concentration[J]. *Continental Shelf Research*, 1999,19: 421-441.

[9] 程鹏,高抒.用 ADCP 测量悬沙浓度的可行性分析与现场标定[J]. *海洋与湖沼*, 2001, 32(2): 168-176.

[10] 汪亚平,高抒,李坤业.用 ADCP 进行走航式悬沙浓度测量的初步研究[J]. *海洋与湖沼*, 1999, 30(6): 758-763.

- [11] Adams J C E , Weatherly G L. Suspended-sediment transport and benthic boundary layer dynamics[J]. **Marine Geology**, 1981, 42: 1-18.
- [12] Adams J C E , Weatherly G L. Some effects of suspended sediment stratification on an oceanic bottom boundary layer [J]. **Journal of Geophysical Research**, 1981, 86: 4 161-4 172.
- [13] Mellor A S, Obukhov A M. Basic laws in turbulent mixing in the ground layer of the atmosphere, Tr. Geofiz[J]. **Inst Akad Nauk SSSR**, 1974, 24(151): 163-187.
- [14] Gross T F, Nowell A R M. Mean flow and turbulence scaling in a tidal boundary layer[J]. **Continental Shelf Research**, 1983, 2: 109-126.
- [15] Huntley D A, Nicholle R J, Liu C, *et al.* Measurements of the semi-diurnal drag coefficient over sand waves[J]. **Continental Shelf Research**, 1994, 14: 437-456.
- [16] Gust G. Observations on turbulent-drag reduction in a dilute suspension of clay in sea-water[J]. **Journal of Fluid Mechanism**, 1976, 75: 29-47.
- [17] Cheng R T, Ling C H, Gartner J W. Estimates of bottom roughness length and bottom shear stress in south San Francisco Bay, California [J]. **Journal of Geophysical Research**, 1999, 104(C4): 7 715-7 728.
- [18] Vincent C E, Harvey J G. Roughness length in the turbulent Ekman layer above the sea bed [J]. **Marine Geology**, 1976, 22: 75-81.
- [19] Soulsby R L, Dyer K R. The form of the near-bed velocity profile in a tidally accelerating flow[J]. **Journal of Geophysical Research**, 1981, 86: 8 067-8 074.

## Observing and analysing the characteristics of bottom boundary layer in Nangang port in the Changjiang River estuary

YANG Yang , GAO Jian-hua , WANG Ya-ping , PAN Shao-ming , WANG Ai-jun

(Ministry of Education Key Laboratory of Coastal and Island Development, Nanjing University, Nanjing 210093, China)

Received: Jun., 23, 2004

**Key words:** acoustic doppler current profile; flow structure; bottom boundary layer parameters; the Changjiang River estuary

**Abstract:** Four field investigations of the velocity and suspend concentration of sediments have been carried out by using acoustic doppler current profiler (ADCP) in the Changjiang River estuary. The bottom boundary layer parameters, which have been obtained through regression analysis of tidal cycle, have also been analysed in order to study the relationship between suspended material and flow structure. The results indicated that the vertical distributions of temperature, salinity and fluid density within water body were influenced by the suspended sediment transport and distribution, and the suspended material changes the vertical density gradient, which makes the water highly stratified. The bottom boundary layer parameters were influenced by stratification induced by suspended sediments, subsequently the flow structure was also changed. The stratification increased the friction among different layers which corresponded to forming a internal boundary layer, therefore, the vertical slop of the velocity has been affected.

(本文编辑：刘珊珊)