

# 莱州湾口弱层结水体中沉积物再悬浮特征 及其水平、沉降通量研究\*

原野<sup>1,2</sup> 江文胜<sup>1</sup> 高会旺<sup>3</sup> 郭新宇<sup>4</sup>

(1. 中国海洋大学物理海洋教育部重点实验室 青岛 266100; 2. 国家海洋环境预报中心 北京 100081;  
3. 中国海洋大学环境科学与工程学院 青岛 266100; 4. 日本爱媛大学沿岸环境科学研究中心  
爱媛松山 7908577)

**提要** 近海悬浮物在海水中的运移受诸多因素影响, 其中由于径流输入导致的水体层化是不可忽视的因素之一, 研究层结水体中沉积物受潮流、波浪影响的再悬浮特征有重要意义。2005 年 5 月 15 日在黄河口西侧 18 海里处的莱州湾口设立了一个周日连续观测站, 试图揭示弱层结水体中悬浮物的再悬浮特征及其水平、沉降通量。利用 ADCP 回声强度反演得到了高分辨率的悬浮物时空分布, 在详细分析潮流、波浪以及密度层结变化的基础上, 指出以上诸因素是影响沉积物再悬浮的主要机制。潮流和波浪联合作用于底床使沉积物起动进入水体, 而层结强度与位置的变化则是起动的沉积物能否有效再悬浮(进入水体中、上层)的调控机制。在波浪和层结的影响下, 涨潮时更多沉积物再悬浮进入水体, 使得一个半日潮周期内出现指向湾内的悬浮物水平净通量。由于密度层结抑制水体湍流扩散强度, 阻碍层结界面处物质交换, 导致悬浮物浓度垂向梯度增大, 进而增大悬浮物沉降通量。

**关键词** 沉积物, 密度层结, 再悬浮, 沉降通量, 莱州湾口

**中图分类号** P731

对于河口型海湾, 由于径流淡水输入导致的密度层结较为普遍, 研究层结条件下沉积物在潮流、波浪作用下的再悬浮特征具有重要意义。一般认为, 层结阻碍铅直方向的物质交换, 造成底部再悬浮的沉积物很难穿越层结进入到水体上层。研究表明, 层结的强度及其位置控制着底边界层内沉积物的再悬浮和沉降特征。Simpson 等(1990, 1997, 2005)观测发现密度层结抑制其下水体的湍流强度, 使沉积物不能有效地再悬浮。Geyer(1993), Blake 等(2001)分别指出密度层结通过抑制水体垂向混合强度增大层结下方的浓度垂向梯度, 加速悬浮物沉降。此外, 层结的演变影响着海湾内悬浮物水平输运。Scully 等(2003)通过在美国约克湾的多次观测, 指出由于“潮剪切”造成的涨落潮层结不对称性使得沉积物再悬浮也呈现不对称性, 进而造成悬浮物潮内水平净通量指向湾顶。

莱州湾位于渤海南部, 受黄河径流的影响, 是典型的河口型海湾(图 1)。

黄河位于湾口西侧, 在向莱州湾供给淡水的同时, 也携带大量泥沙入海(赵鹏等, 2010)。在寒潮大风和温带气旋的影响下, 莱州湾主要受偏北风控制, 由于湾内水深浅, 风浪成长较快, 南向波动为强波向(李平等, 1997)。现场观测与数值模型研究(江文胜, 1997; 吴永胜等, 2002; 李东风, 2004; 苏健等, 2001; 江文胜等, 2002)表明莱州湾内潮流及波浪联合作用产生的底切应力控制着湾内泥沙的再悬浮。受黄河淡水输入影响, 莱州湾口西侧水体中存在显著的季节性密度层结, 其演变过程在很大程度上影响着沉积物的再悬浮和沉降过程。本文中作者分析了 2005 年 5 月于莱州湾口得到的潮流、温盐以及悬浮物的观测资料, 试图揭示弱层结水体中悬浮物的浓度、粒径分

\* 国家基础研究规划重点项目, 2005CB422300 号; 国家自然科学基金项目, 40806001 号; 日本综合地球环境学研究所研究项目: 1-2FR“近年黄河急剧水环境变化及其意义”, 2002—2007。原野, 博士, E-mail: yuanye@nmefc.gov.cn

收稿日期: 2010-02-10, 收修改稿日期: 2010-09-17

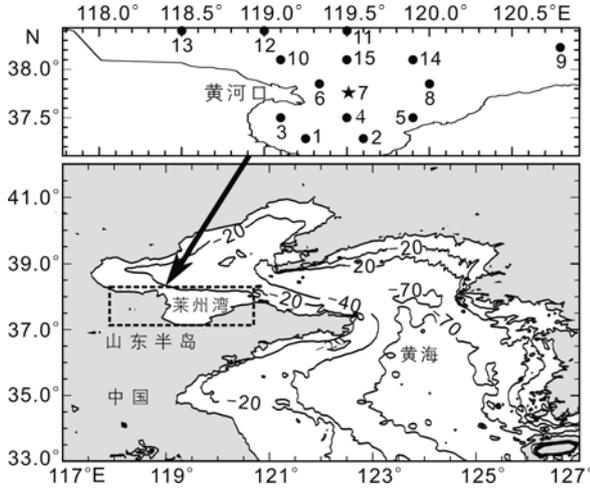


图1 观测站位(站位7为周日观测站)

Fig. 1 Location of Anchor Station 7

布特征及其再悬浮对潮流、波浪以及层结变化的动力响应,并在此基础上估算了悬浮物的水平和沉降通量。

## 1 仪器配置与方法

### 1.1 仪器配置

2005年5月15日17:00—5月16日17:00于黄河口东18海里(119°30'E, 37°45'N)莱州湾口设立一个周日观测站(站位7)。观测期间正处于小潮,观测站位平均水深14.5 m,潮差1.2 m。该站位的沉积物质主要来自黄河携带入海泥沙,以粉砂级矿物质为主,中值粒径为4—6 (约为15.6—62.5 μm) (江文胜等, 2005)。本次观测所用仪器为RDI Workhorse Sentinel 600 kHz ADCP(声学多普勒流速剖面仪,带测波功能),RBR XR-620 CTD和LISST-100(激光现场粒度仪)各一台。观测中ADCP进行海床基布设,ADCP换能器位于底上0.5 m处,采取“仰视”工作方式,采样层厚0.5 m,盲区设置1 m。由于盲区和海表附近旁瓣区的影响,ADCP的有效观测范围从海床以上1.7 m直至海表以下1 m,覆盖了80%以上的观测水体。RBR XR-620 CTD和LISST-100每小时进行一次剖面测量,以得到观测期间水体温度、盐度以及悬浮物粒径分布的变化特征。

### 1.2 数据处理

将ADCP流速剖面数据进行10 min平均,利用Perlin等(2005)改进后的Von Kármán-Prandtl流速对数剖面拟合得到潮致摩擦速度( $u_{*c}$ )时间序列。由于层结效应对湍流特征尺度的抑制作用,该方法考虑了层结水体中普遍存在的“流速双对数层”,将流速对数

剖面拟合的方法推广到层结水体中:

$$U(z) = \frac{u_{*c}}{\kappa} \ln \frac{z(h_d - z_0)}{z_0(h_d - z)} \quad (1)$$

式中 $h_d = D^2/(D-1)$ ,其中 $D$ 表示底混合层高度,本文中 $D$ 取值为水体中部层结的潮内平均距底高度(9.3 m)。由于本次观测中ADCP只能记录距底1.7 m以上的流速剖面,上式拟合得到的 $u_{*c}$ 序列是表面摩擦与形阻之和,其中表面摩擦指直接作用于沉积颗粒表面(或其上方不远处)的拖曳应力,而形阻指不同尺度海底地形上方的海水压强场不均匀所产生的阻滞效应。当观测区域的海底存在大型沙坡或其他大尺度地形变化,所产生的形阻要远大于表面摩擦。研究认为海底沉积物的剥蚀、卷挟过程由表面摩擦控制,而形阻与表面摩擦联合影响着底边界层内流场的垂向结构以及再悬浮颗粒物的垂向扩散过程。此外,根据Soulsby(1997)提出的波浪边界层模型,利用ADCP测波功能得到的波浪参数计算浪致摩擦速度( $u_{*w}$ )。

利用同步得到的高时空分辨率悬浮物浓度和流速剖面计算了一个半日潮周期内(约15日22时至16日11时)悬浮物水平净通量,具体计算公式为:

$$F_i = \int_T C_i(t) \cdot V_i(t) dt \quad (2)$$

式中 $T$ 为半日潮周期, $i$ 表示ADCP采样水层, $C_i(t)$ 和 $V_i(t)$ 分别代表第 $i$ 层悬浮物浓度和水平流速时间序列。

计算悬浮物沉降通量最重要的是确定重力沉降速度( $w_s$ )。当水体雷诺数较小时,沉降速度由悬浮物的粒径、有效密度和水体的分子粘性决定。Soulsby(1997)提出了适用于粘性或非粘性泥沙的沉降公式:

$$w_s = \frac{v}{d_{50}} \left[ \left( 10.36^2 + 1.049 D_*^3 \right)^{1/2} - 10.36 \right] \quad (3)$$

式中 $D_* = d_{50} \left[ \frac{g \rho_{eff}}{\rho v^2} \right]^{1/3}$ 为无量纲粒径,其中 $\rho_{eff}$ 为有效密度, $d_{50}$ 为近底层悬浮物中值粒径, $\rho$ 为海水密度, $v$ 为海水运动学粘性系数。本文中作者采用LISST-100现场测定的悬浮物中值粒径和有效密度计算沉降速度(Mikkelsen *et al*, 2000, 2001),从而避免了实验室内粒度分析所造成的悬浮物絮凝结构的破碎。

观测现场的水动力环境,尤其是湍流混合强度,极大影响着悬浮物沉降速度。为了考察本次观测中水体中存在的弱层结是否对悬浮物沉降速度造成影响,作者将Rouse浓度垂线公式推广到层结水体中来计算 $w_{so}$ 。在底边界层内,忽略水体水平、垂向对流,可近似认为沉积物的重力沉降与向上端扩散造成的再

悬浮达到平衡, 即  $-w_s C = K \partial C / \partial z$ 。取湍扩散系数  $K = \kappa u_* z [1 - (z/h_d)]$ , 上式经整理可得 Rouse 浓度垂线公式:

$$C = C_a \left[ \frac{z}{z_a} \cdot \frac{h_d - z_a}{h_d - z} \right]^{-\beta} \quad (4)$$

其中  $\beta = w_s / \kappa u_*$  为沉降因子(Soulsby, 1997),  $C_a$  和  $z_a$  分别为距海底最近水层处的悬浮物浓度和对应的距底高度,  $h_d$  同式(1)。由上式可见沉降因子越大, 悬浮颗粒物浓度垂向梯度越大, 分布越不均匀。将 ADCP 反演得到的高频悬浮物浓度剖面序列做 10 min 平均后与离底高度  $z$  进行双对数拟合可以得到沉降因子  $\beta$ , 将摩擦速度时间序列带入  $\beta$  中即可得到悬浮物的重力沉降速度  $w_s$ , 其中相关性  $R^2 > 0.96$  的对数拟合通过有效检验。

## 2 结果分析

### 2.1 流场分析

图 2 为不同深度处 ADCP 流速矢量序列。流速观测从 15 日 17:00 开始, 此时落潮流从莱州湾内流出, 流向北偏西, 至 19:00 流速量值达到最大, 接近 0.45 m/s。22:00 左右水体上层潮流顺时针旋转至东南向, 涨潮流从西北方向的黄河口沿岸流入莱州湾, 16 日 00:00 之后其流向迅速转为南向; 而水体下层涨潮流向一直为南向。涨潮期间最大流速出现在 8—10 mab<sup>1)</sup> 处, 10 mab 流速达到 0.7 m/s 以上, 随深度增大衰减到 0.5 m/s 左右。04:00—05:00 观测站位达到最高水位, 随即潮流迅速转为北向, 从莱州湾内流出。08:00 之后水体上层落潮流开始东偏, 至落潮末期流向旋转为东北向, 而下层潮流始终指向正北向。落潮时表层流速可达到 0.7 m/s 以上, 至底层由于海底摩擦其量值迅速衰减到 0.4 m/s。在观测将要结束的涨潮阶段, 流速量值较小, 表、底流速最大不超过 0.3 m/s, 流向为西南向。另外, 图 2 纵向比较可见该站位涨潮历时从表至底逐渐增大, 而落潮历时从表至底逐渐减小, 其中第一次涨潮时(22:00—04:00)表层涨潮历时为 5.5 h, 底层涨潮历时为 6.9 h; 紧接着落潮时(04:00—11:00), 表层落潮历时为 7.5 h, 底层落潮历时为 6 h。

根据 ADCP 观测得到的流速剖面, 将不同深度的潮流进行调和可知该站位以  $M_2$  分潮占优, 属于不正规半日潮型。 $M_2$  分潮流椭圆主轴为南北向, 其中 8 mab 以内椭率  $K = -0.1$ , 潮流为往复运动, 8 mab 以外

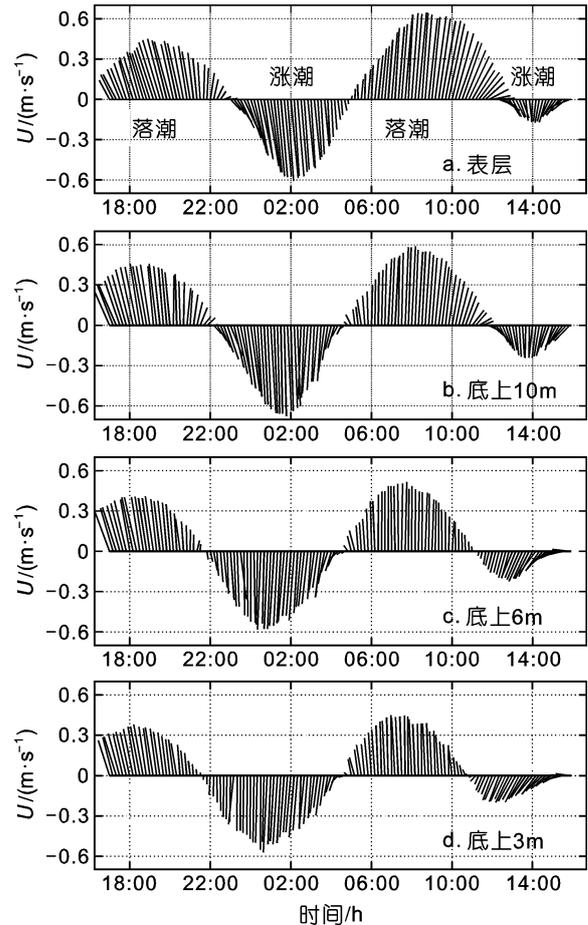


图 2 流速矢量图

Fig.2 Velocity vectors at different depth

椭率  $K = -0.3$ , 具有旋转潮特征(表 1)。水体上层流速东分量较为显著, 在涨、落潮交替的转流时刻其值最大可达 0.25 m/s。表、底层余流流速为 0.07 m/s 左右, 水体中部其量值迅速衰减到 0.03 m/s。从底至表余流流向从西偏北迅速转至北向。从潮流和余流的空间分布特征来看水体中部流速剪切强烈, 表、底流场存在较大差异。

总体来看观测期间该站位涨、落潮流不对称, 水体上、下层流速、流向差异较大, 上层水体上层涨潮历时显著小于落潮历时, 具有旋转潮流特征, 而下层涨潮历时略微大于落潮历时, 具有往复潮流特征。

### 2.2 波浪观测结果

本次观测中利用 ADCP 的测波功能对波浪状况进行了观测, 但根据现场目测, 该仪器观测结果要小于实际值。观测开始时海面基本无波浪。从 22:00 开始, 东北风逐渐增大, 局地风浪迅速成长, 且湾外较

1) mab 代表距底高度(Meter Above Bottom)

表 1  $M_2$  分潮潮流椭圆及欧拉余流垂向分布特征  
Tab.1 Vertical distributions of residual currents and  $M_2$  tidal ellipses

距底高度 (m)	$M_2$ 分潮潮流椭圆		欧拉余流			
	主轴朝向	椭率 $K$	$u$ (cm/s)	$v$ (cm/s)	流速 (cm/s)	流向 ( $^{\circ}$ )
12	南北向	-0.3	1.8	6.7	6.9	15
10		-0.3	2.6	5.5	6.1	25
8		-0.2	0.4	2.8	2.8	8
6		-0.1	-5.2	2.8	5.9	298
4		-0.1	-6.5	2.3	6.9	289
2		-0.1	-7.1	1.1	7.2	278

长周期涌浪向南传播至观测站位, 有效波高上升到 0.45 m, 至次日 03:30 达到最大值 0.64 m。从 06:00 直至观测结束波浪略微减小, 但最低值不低于 0.35 m(图 3)。

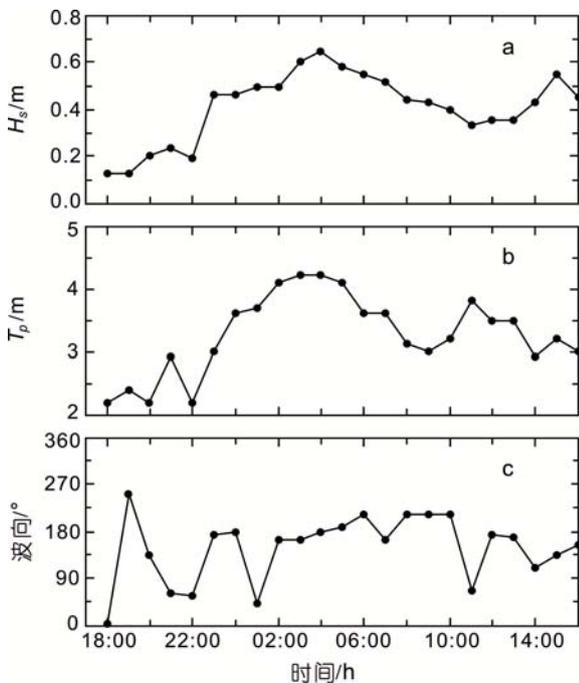


图 3 观测期间波浪状况(a)有效波高; (b)波浪周期; (c)波向  
Fig. 3 Wave parameters recorded by ADCP during the observation

### 2.3 密度层结的潮内变化

利用  $\partial\rho/\partial z$  从表至底的积分值  $\delta\rho$  来表征层结强度(图 4 底部)。观测期间水体中维持着较弱的密度层结, 涨潮时层化略微加强, 至高潮之后(16 日 04:30)层结强度达到  $0.75 \text{ kg/m}^3$ ; 落潮时层化减弱, 其最小值出现在低潮时(09:00)。在一个半日潮周期内, 密度层结随着潮流的往复而上下起伏, 涨潮时层结抬升, 落潮时层结下沉, 幅度可达 4—5 m(图 4a)。观测站位

底层主要受南-北向的往复潮流控制, 外海较咸海水在莱州湾口以“楔形”方式涨进落退, 导致密度层结的强化、减弱以及层结位置的上下波动。

图 4c 与图 4a 对比发现, 流速剪切垂向最大值和密度层结吻合很好, 取值范围在  $0.06\text{—}0.20\text{s}^{-1}$  之间。对比流速东分量和余流分布可见, 上、下两层流体由于流速和流向的较大差异而导致界面处的强剪切。由于海底摩擦效应, 潮流在底边界层内迅速衰减(图 4b), 其流速剪切在涨、落急时也呈现高值, 但其取值范围 ( $0.03\text{—}0.04 \text{ /s}$ ) 比层结界面处的流速剪切小得多。近底层落潮时的流速剪切大于涨潮时, 并且其强值区在 16 日落潮时(08:00)可延伸到层结下方。

梯度理查德森数( $Ri$ )可以用来判断水体中的层化与湍流混合状态, 如式(1):

$$Ri = \frac{-g/\rho \cdot \partial\rho/\partial z}{(\partial u/\partial z)^2 + (\partial v/\partial z)^2} \quad (5)$$

一般认为  $Ri > 0.25$  时, 水体处于稳定的层化状态, 湍流被抑制; 当  $Ri < 0.25$  时, 层化效应随着  $Ri$  减小而减小, 流速剪切更易诱发湍流混合。图 4d 利用归一化  $\lg(Ri/0.25)$  表征水体湍流混合状态, 可见底边界附近涨、落潮时流速剪切的高值区对应着  $Ri$  的低值区, 即使当潮流较强时,  $Ri$  的低值区仅延伸到 5 mab 左右。观测期间由于水体中部稳定的密度层结, 使得水体湍流垂向混合较弱。

### 2.4 悬浮物浓度、粒径分布特征

利用声学方法进行悬浮物浓度反演提供了连续的、高时空分辨率的悬浮物浓度动态变化过程, 可用于详细刻画沉积物对不同动力条件下的再悬浮过程。本文中作者利用 ADCP 回声强度数据反演了观测期间悬浮物浓度的分布状况, 反演过程中综合考虑了声波球状扩散、声速、噪音本底、悬浮颗粒物和海水对声波衰减等校正过程(汪亚平等, 1999; 兰志刚等, 2004; 原野等, 2008; Deines, 1999; Gartner, 2004;

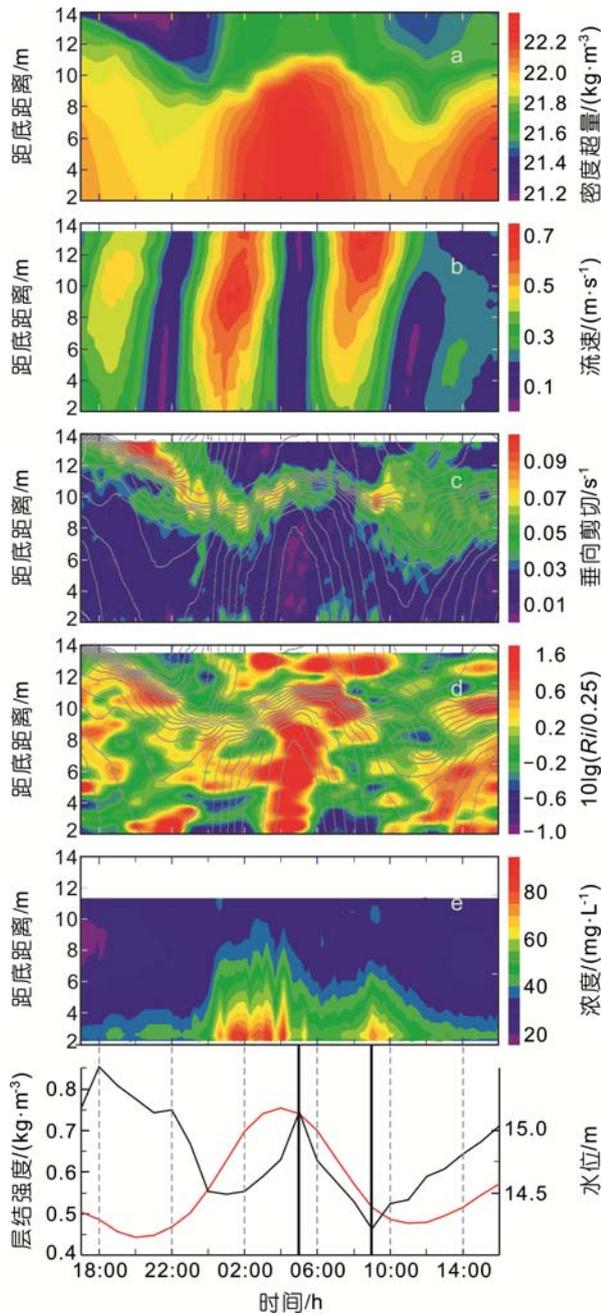


图4 观测期间密度层结(a)、流速(b)、流速剪切(c)、理查森森数  $\lg(Ri/0.25)$  (d)以及悬浮物浓度(e)变化

Fig.4 Density (a), tidal velocity (b), shear (c), Richardson number  $\lg(Ri/0.25)$  (d) and SPM concentration (e) distributions  
黑线: 层结强度; 红线: 水位

Hoitink *et al.*, 2005), 反演得到的悬浮物浓度分布如图4e (由于 ADCP 盲区效应, 1.7 mab 以内无有效数据)。

由图 4e 可见, 从观测开始到 23:00, 海底沉积物再悬浮较弱, 3mab 附近悬浮物浓度不超过 40 mg/L。从涨急时刻一直到高潮时(00:00—05:00), 海底沉积物再悬浮显著, 4 mab 以内悬浮物浓度达到 90 mg/L

之上, 50 mg/L 等值线位于底上 7—8 m 且随着涨潮流减弱却略有抬升(02:30—04:30)。落潮时(05:00—10:00)50 mg/L 等值线稳定在 4 mab, 仅在 09:00 浓度达到 80 mg/L 以上。此外, 密度层结之上的水体上层并未看到悬浮物浓度的潮内变化, 可见再悬浮的沉积物不能穿越层结进入到水体上层。

中值粒径分布状况(图 5)显示悬浮物粒径特征在水深 6—7 m 处有显著分界线, 界线以上的悬浮颗粒物中值粒径显著大于界线以下。图 6 为不同深度处悬浮物粒径谱的典型分布状况, 可见表层海水中有大颗粒物( $d > 100 \mu\text{m}$ ), 其百分比含量超过了 70%。由于河口外咸淡水交汇处易产生絮凝现象, 推测这些大颗粒物为粉砂级颗粒物的絮凝体。中层海水中悬浮物呈现双峰分布, 粉砂级颗粒物百分比含量为 50.4%, 絮凝体百分比含量为 38%, 可见水体中上层的悬浮物主要是细粉砂及其絮凝体, 中值粒径较大。底层海水中的悬浮物主要是粉砂质沉积物的再悬浮, 其粒径谱分布与江文胜等(2005)在该站位的底质粒度分析结果相近。

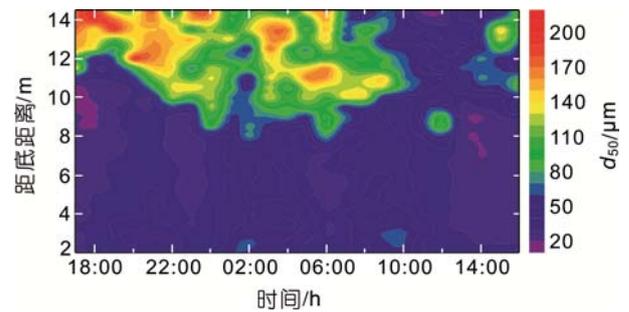


图5 悬浮物中值粒径( $\mu\text{m}$ )分布状况  
Fig.5 Median size distribution ( $\mu\text{m}$ )

### 3 讨论

#### 3.1 沉积物再悬浮机制

观测站点位于莱州湾口, 潮流作用显著, 且湾内水深较浅, 冬、春季在偏北风作用下波浪成长迅速, 潮流和波浪导致的底切应力联合控制着沉积物的再悬浮。此外, 由于黄河淡水输入导致的层结效应也影响着沉积物的再悬浮特征。

##### 3.1.1 沉积物再悬浮对潮致及浪致摩擦速度的响应

图 7A 中将反演得到的距底 2.5 m 悬浮物浓度与  $u_{*c}$  (蓝线) 和  $u_{*w}$  (红线) 分别比较来看其对后者的响应。观测期间两次显著的再悬浮过程分别对应了两次  $u_{*c}$  的高值区。从 15 日 17:00 直至 20:00 落潮时在较强  $u_{*c}$  作用下悬浮物浓度仅仅在 40 mg/L 波动。转流

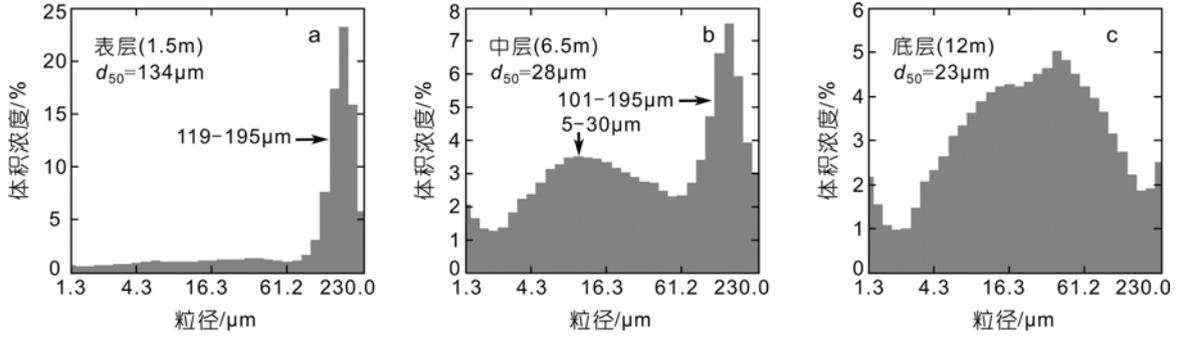


图 6 不同深度处悬浮物粒径谱

Fig.6 Particle size distribution in three typical depth (a)表层; (b)中层; (c)底层

后涨急时(00:00—02:00)  $u_{*c}$  高值对应着悬浮物浓度迅速升高(如箭头 a)。此时, 由于风力加大, 迅速成长的风浪使  $u_{*w}$  升高到 0.6 cm/s, 推测涨潮流联合波浪作用于海底使得沉积物迅速再悬浮。16 日 02:00—04:30 较强的波浪作用于海底, 使得悬浮物浓度在涨潮流减弱后仍然维持在较高浓度(箭头 c), 即使在涨、落潮交替的转流时刻(05:00), 悬浮物浓度也不低于 55 mg/L。落急时(06:00—08:30)悬浮物浓度并未随着摩擦速度升高而马上到达峰值, 仅仅维持在 50—55 mg/L, 而当落潮流开始减弱时(09:00), 悬浮物浓度却迅速达到峰值(箭头 b)。

**3.1.2 一种可能的机制——层结强度对沉积物再悬浮的影响**  
Scully 等(2003)观测发现底质中沉积物的起动取决于起动临界应力, 受层结影响较小, 但是沉积物进入水体后, 其再悬浮的高度和在水体中停留的时间取决于该深度处的湍扩散系数, 显著受层结影响, 其影响程度与密度层结的离底高度成反比, 与层结强度成正比。

如图 7B, 从 16 日 06:30—10:00(落急时刻到低潮时)尽管近底层最大落潮流超过 40cm/s, 但沉积物浓度并未显著升高, 仅在落潮末期(09:00)层结强度最弱时悬浮物浓度达到峰值(箭头 f), 推测密度层结抑制了近底层的湍流混合强度, 单纯潮流引起的底切应力不能造成沉积物显著再悬浮, 而当层结减弱时水体湍扩散增强, 沉积

物则迅速扩散到距底较远的高度上。对比发现, 悬浮物浓度的高值区都对应了密度层结的低值区(箭头 d,e,f), 推断底边界层内沉积物是否能有效再悬浮在很大程度上受层结强度影响。此外, 当  $\lg(Ri/0.25) < -0.65 (Ri < 0.06)$  时, 水体垂向混合强烈, 沉积物再悬浮显著(箭头 f)。

**3.2 波致再悬浮对悬浮物水平运输的影响**

图 8A 为计算所得悬浮物水平净通量剖面, 其值取决于涨、落潮流和相应的沉积物再悬浮, 可见一个半日潮周期内悬浮物南北向水平净通量指向湾内。观测期间涨潮流和南向传播的波浪联合作用于海底, 产生的底切应力使得再悬浮从强度和持续时间上都

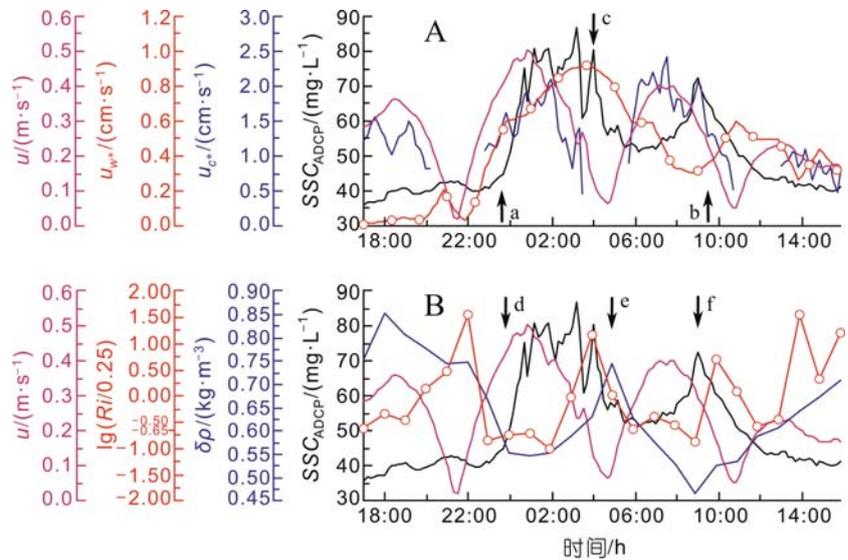


图 7 近底层(2.5mab)悬浮物浓度、潮致、浪致摩擦速度和流速时间序列(A)和近底层(2.5mab)悬浮物浓度、理查德森数、流速和层结强度时间序列(B)

Fig. 7 Near-bed (2.5 mab) sediment concentration, friction velocity and tidal velocity time series(A) and near-bed (2.5 mab) sediment concentration, stratification strength and tidal velocity time series(B)

图 A 黑色: 悬浮物浓度; 蓝色: 潮致摩擦速度; 红色: 波致摩擦速度; 紫色: 近底层流速  
图 B 黑色: 悬浮物浓度; 蓝色: 层结强度; 红色:  $\lg(Ri/0.25)$ ; 紫色: 近底层流速

显著大于落潮时。莱州湾外底层高盐海水涨进落退,使层结界面在不同深度上波动,涨潮时层结迅速抬升,落潮时明显下沉,涨潮时再悬浮的沉积物可到达离底更远的高度上(7—8 mab)。正是由于波浪和层结的影响,使得一个半日潮周期内出现悬浮物水平通量的不对称现象。此外,层结两侧的悬浮物东西向水平净输运方向截然相反。

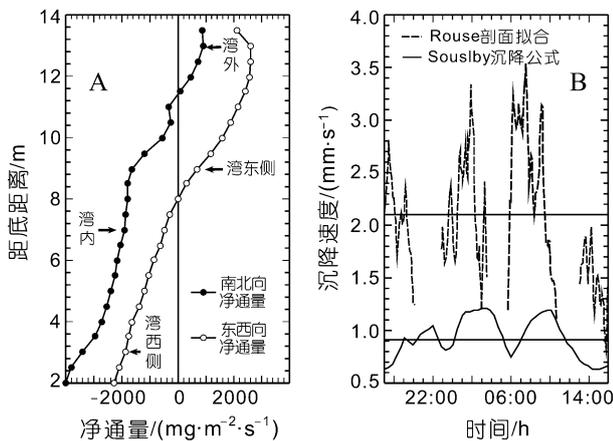


图8 悬浮物潮内水平净通量剖面(A)和沉降速度潮内变化(B)  
Fig.8 Profiles of tidally-averaged SPM horizontal fluxes(A) and settling velocity time series(B)

### 3.3 密度层结对悬浮物沉降通量的影响

本次观测中层结所在高度处悬浮物浓度剖面出现拐点,再悬浮沉积物很难穿越层结垂向扩散到水体上层,可以预见水体中部层结会使得悬浮物沉降加快,从而使得沉降通量增大。图8B可见,由Rouse剖面拟合得到的沉降速度潮内平均值为2.2 mm/s,显著大于Soulsby沉降公式的计算结果(0.92 mm/s),且其潮内变化十分剧烈,涨、落急时刻其最大值可达到4.0 mm/s。由于层结抑制湍流混合,阻碍界面两端物质垂向交换,再悬浮的沉积物不能在湍扩散作用下悬浮至离底更远的高度上,而是迅速沉降,底层浓度垂向梯度增大,导致拟合得到的沉降因子 $\beta$ 较大。应该指出的是,尽管两者得到的沉降速度潮内变化趋势一致,但所反映的机制却是截然不同的。Soulsby沉降公式体现了再悬浮沉积物的粒径和有效密度变化带来的沉速改变,而利用Rouse浓度剖面基于垂向物质守恒,体现了浓度梯度和湍扩散强度的潮内变化对沉降速度的影响。

## 4 结论

密度层结是水体中物质和能量交换的天然屏障,为了了解层结水体中悬浮物浓度分布特征及其沉降

状况,2005年5月在黄河口东侧的莱州湾口进行了24 h周日观测,观测发现:

(1) 莱州湾口海水流动显著分层,外海较咸海水以“楔形”方式随着潮流在莱州湾内涨落,导致莱州湾内密度层结的强化、减弱及其位置的上下波动。

(2) 观测期间两次显著的沉积物再悬浮过程分别对应了两次较强的涨、落潮流,而当潮流较弱时,浪致摩擦速度与悬浮物浓度的高值区对应也较好,说明潮流和波浪控制着沉积物的起动、再悬浮。此外,悬浮物浓度的高值区对应了层结强度的低值区,而层结强度的最小值恰好对应了悬浮物浓度的峰值。

(3) 莱州湾南向波动为强波向。本次观测中,在潮流、波浪( $H_s > 0.6\text{m}$ )以及层结位置波动的联合作用下,使得涨潮时沉积物的再悬浮更显著,并且持续时间较长,造成一个半日潮周期内向湾里的净泥沙通量。密度层结对沉积物再悬浮的压制作用导致悬浮物浓度垂向梯度增大,进而增大悬浮物沉降通量。

莱州湾口的沉积物再悬浮和沉降特征受各种持续和偶发等诸多因素影响,实测的悬浮物时空分布往往是许多因素综合作用的结果,今后仍然需要不同水文动力条件下的连续观测来揭示莱州湾悬浮物输运特征。

## 参 考 文 献

- 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
- 江文胜, 王厚杰, 2005. 莱州湾悬浮泥沙分布形态及其与底质分布的关系. 海洋与湖沼, 36(2): 97—103
- 江文胜, 苏健, 杨华等, 2002. 渤海悬浮物浓度分布和水动力特征的关系. 海洋学报, 24(S1): 212—217
- 江文胜, 1997. 渤海悬浮物输运的动力模型和数值研究. 青岛: 青岛海洋大学, 15—17
- 苏健, 江文胜, 孙文心, 2001. 渤海中南部悬浮物海洋调查资料分析. 青岛海洋大学学报, 31(5): 647—652
- 李平, 朱大奎, 1997. 波浪在黄河三角洲形成中的作用. 海洋地质与第四纪地质, 17(2): 39—46
- 李东风, 2004. 黄河河口二维泥沙有限元数学模型及应用——潮流和泥沙输运沉积过程模拟分析. 海洋科学进展, 22(3): 284—291
- 吴永胜, 王兆印, 2002. 渤海动力对黄河入海泥沙输移的影响. 黄渤海海洋, 20(2): 22—30
- 汪亚平, 高抒, 李坤业, 1999. 用 ADCP 进行走航式悬沙浓度测量的初步研究. 海洋与湖沼, 30(6): 758—763
- 赵鹏, 江文胜, 毛新燕等, 2010. 2000—2005 年莱州湾盐度的变化及其主要影响因素. 海洋与湖沼, 41(1): 12—23
- 原野, 赵亮, 魏皓等, 2008. 利用 ADCP 和 LISST-100

- 仪观测悬浮物浓度的研究. 海洋学报, 30(3): 48—55
- Blake A C, Kineke G C, Milligan T G *et al*, 2001. Sediment trapping and transport in the ACE Basin, South Carolina. *Estuaries*, 24(5): 721—733
- Deines K L, 1999. Backscatter estimation using broadband acoustic Doppler current profilers. *Proceedings of the IEEE Sixth Working Conference on Current Measurements*, San Diego, CA: IEEE, 249—253
- Geyer W R, 1993. The importance of suppression of turbulence by stratification on the estuarine turbidity maximum. *Estuaries*, 16(1): 113—125
- Gartner J W, 2004. Estimating suspended solids concentrations from backscatter intensity measured by acoustic Doppler current profiler in San Francisco Bay, California. *Marine Geology*, 211: 169—187
- Hoitink A J F, Hoekstra P, 2005. Observation of suspended sediment from ADCP and OBS measurements in a mud-dominated environment. *Coastal Engineering*, 52: 103—118
- 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
- Perlin A, Moum J N, Klymak J M *et al*, 2005. A modified law-of-the-wall applied to oceanic bottom boundary layers. *Journal of Geophysical Research*, 110, C10S10, doi: 10.1029/2004JC002310
- Simpson J H, Brown J, Matthews J P *et al*, 1990. Tidal straining, density currents, and stirring in the control of estuarine stratification. *Estuaries*, 13(2): 125—132
- Simpson J H, 1997. Physical processes in the ROFI regime. *Journal of Marine System*, 12: 3—15
- Simpson J H, Williams E, Brasseur L H *et al*, 2005. The impact of tidal straining on the cycle of turbulence in a partially stratified estuary. *Continental Shelf Research*, 2005, 25: 51—64
- Scully M E, Friedrichs C T, 2003. The influence of asymmetries in overlying stratification on near-bed turbulence and sediment suspension in a partially mixed estuary. *Ocean Dynamics*, 53: 208—219
- Soulsby R, 1997. *Dynamics of marine sands*. London: Thomas Telford Publications, 45—46

## RESUSPENSION AND ASSOCIATED HORIZONTAL, SETTLING FLUXES OF SEDIMENT IN THE WEAKLY STRATIFIED LAIZHOU BAY MOUTH

YUAN Ye<sup>1,2</sup>, JIANG Wen-Sheng<sup>1</sup>, GAO Hui-Wang<sup>3</sup>, GUO Xin-Yu<sup>4</sup>

(1. *Physical Oceanography Institute, Ocean University of China, Qingdao, 266100*; 2. *National Marine Environmental Forecasting Center, Beijing, 100081*; 3. *College of Environmental Science and Engineering, Ocean University of China, Qingdao, 266100*; 4. *Center for Marine Environmental Studies, Ehime University, Matsuyama, Japan, 7908577*)

**Abstract** Transportation of suspended particulate matter (SPM) is affected by many factors in coastal seas, among which stratification plays an important part in this matter. Nearly 24-hour continuous data were collected on May 15, 2005 in order to understand the resuspension characteristic, horizontal and settling fluxes of sediment in the weakly stratified Laizhou Bay mouth, which is 18 km west of Yellow River Mouth. This project utilized ADCP instrumentation to estimate the high-resolution of SPM concentration profiles. Combined with the detailed description of tidal current, wave and stratification status, three significant findings were discovered: (1) both tidal current and wave play the important roles in the incipient motions of sediment, while stratification strength and height determine the turbulence intensities in the water column which influence the diffusion of suspended sediment to higher water levels; (2) because of asymmetry of resuspension arisen by combined wave- and current-induced shear stress, landward tidally-averaged sediment flux was observed; (3) pycnocline is a natural barrier which inhibits the across-interface exchange of suspended sediment, and suppression of sediment resuspension led to increased vertical gradient of concentration, which in turn resulted in an increased settling flux.

**Key words** SPM, Stratification, Resuspension, Settling flux, Yellow River mouth