



## 洋口港潮滩沉积过程研究\*

李兰满, 林伟波, 张一乙, 陈鹏

(江苏省海涂研究中心, 江苏南京 210013)

**摘要:** 为了研究江苏典型淤积潮滩泥沙沉积特征, 于2021年7月在洋口港开展断面调查。研究表明, 该区域潮流为正规半日潮, 涨潮流向为西南向、落潮流向为东北向。观测期间, 波高随风场的增强明显变大, 潮流大小主要随着潮周期变化; 增强的波浪有助于水体扰动和泥沙悬浮; 底部切应力主要受潮流作用, 受波浪作用较小; 波流联合切应力大部分时间都小于临界侵蚀应力, 水体中的悬沙多倾向于沉降, 滩面易淤积; 悬沙总体上沿岸向南和平行向岸输送。

**关键词:** 洋口港; 潮滩沉积; 悬沙运输; 底部切应力

中图分类号: U652; P736.21

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2025)01-0023-06

### Sedimentary process of tidal flat in Yangkou Port

LI Lanman, LIN Weibo, ZHANG Yiyi, CHEN Peng

(Tidal Flat Research Center of Jiangsu, Nanjing 210013, China)

**Abstract:** To study the sediment deposition characteristics of typical silted tidal flats in Jiangsu Province, a cross-section survey was carried out at Yangkou Port in July 2021. The results show that there is a normal semi-diurnal tide in the study region. The current is southwestward during the flood, and gradually become northeastward during the ebb. The wave is obviously forced by the strong wind, and the wave height is obviously enhanced, the current mainly changes with the tidal cycle. The strong waves in windy period contribute to the disturbance of the water column and conducive to the suspension of sediment. The bed shear stress is mainly contributed by the current. The combined shear stress of wave and current is weaker than the critical erosion stress in most of the time, resulting in the settling of suspended sediment. On the whole, the suspended sediment is transported southward along the coast and parallel to the shore.

**Keywords:** Yangkou Port; tidal flat; sediment process; bed shear stress

潮滩地区潮流、波浪、陆地径流等动力作用频繁, 物质能量交换剧烈, 台风风暴潮过程、水动力环境、物质能量循环过程对其地貌演变有着重要的影响<sup>[1-2]</sup>。赵秧秧等<sup>[3]</sup>发现江苏如东潮滩潮汐作用使潮滩沉积具有分带性, 平均高潮线和平均低潮线附近泥沙堆积, 在台风风暴下, 开边界泥沙悬沙浓度会影响潮滩冲淤演变格局, 潮间带中下部侵蚀; 李占海<sup>[4]</sup>发现江苏大丰潮滩的悬沙浓度变化主要与平流输运有关, 全潮净输运量受

落潮控制, 大丰潮滩总体属于堆积状态, 局地发生侵蚀; Chen et al.<sup>[5]</sup>基于斗龙港现场观测结果, 发现硅藻的存在可以减弱泥沙的侵蚀, 影响沉积过程; 陈景东<sup>[6]</sup>发现较正常天气, 大风天气下的潮滩增水幅度增加、波浪作用增强, 造成悬沙浓度增加。前人的研究成果促进了对江苏潮滩沉积过程的认识, 然而由于现场观测比较困难, 目前针对江苏潮滩典型淤积地区的沉积动力学研究不够充分。

收稿日期: 2024-04-09

\*基金项目: 江苏省海洋科技创新项目 (JSZRHYKJ202312, JSZRHYKJ202214)

作者简介: 李兰满 (1996—), 女, 硕士, 工程师, 从事江苏近岸滩涂研究。

本文利用 2021 年 7 月江苏洋口港现场观测数据, 初步分析该区域潮滩的沉积过程。

## 1 研究区域概况

洋口港位于如东海域, 岸线走向为 SEE—NWW, 潮汐属于正规半日潮, 平均潮差约为 4.61 m, 最大潮差可达 8 m, 主要为往复流, 小部分属于旋转流。涨落潮历时、流速差别不明显, 涨潮流速略小于落潮流速。风浪波以轻、小浪为主, 大部分有效波高范围小于 1.1 m, 平均周期 4.1~4.9 s 的波浪出现频率为 72%。潮间带沉积物中粉砂质砂和砂质粉砂占主导, 平均粒径范围为 18~125  $\mu\text{m}$ , 海岸外的沉积物随着潮流和波浪的作用在潮滩上不断分选、堆积。

## 2 研究方法

### 2.1 数据采集

研究区域位于洋口港外的光滩区域, 现场观测共布设 3 个站点, 由陆向海依次为  $bt_1$ 、 $bt_2$ 、 $bt_3$ , 站位位置见图 1。观测时间自 2021-07-06—2021-07-21, 观测期间约覆盖 21 个潮周期。采用三维高频声学多普勒流速仪 (acoustic doppler velocimetry, ADV) 测量各站点的流速、水位等, 利用光学后向散射 (optical back scattering, OBS) 浊度计采集浊度数据。各站位仪器布设和参数设置见表 1。 $bt_3$  站在距底 0.02 m (下部) 和 0.44 m (上部) 的深度布设浊度计。高精度的测量数据为研究该地区的冲淤特性提供了有效支撑。

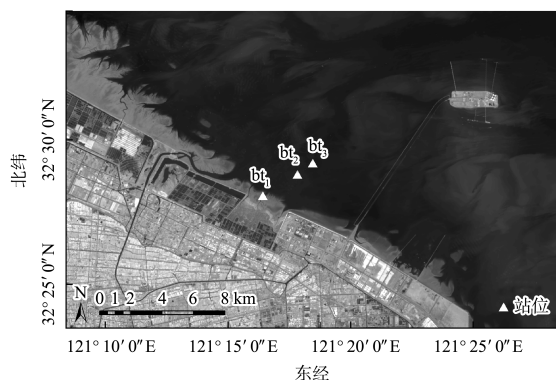


图 1 站位图

Fig. 1 Map of sampling stations

表 1 各站位仪器布设及采样参数设置

Tab. 1 Observation instruments and data acquisition settings

站位	距底高度/m	采样频率/Hz	采样间隔/min
$bt_1$	0.31	16	10
	0.02	1	1
$bt_2$	0.42	16	10
	0.02	1	1
$bt_3$	0.31	16	10
	0.44	1	1

风场数据来源于羲和能源气象大数据平台, 为小时级的气象数据。该数据集是基于多个气象数据源经过降尺度计算、优化融合和校正后的结果, 能反映研究区域风场的变化特征。

### 2.2 数据分析与处理

ADV 观测期间易受外界因素影响, 需要对原始数据进行质量控制, 即去掉回声强度  $\leq 20$  dB 和相关系数  $\leq 70\%$  的无效数据, 得到有效的流速、流向、水位。本文基于 Tucker 等<sup>[7]</sup>提出的线性波理论公式, 利用谱分析方法, 根据水位数据计算得到有效波高、波周期等数据。针对浊度数据, 通过实验室标定得到悬沙浓度, 将悬沙浓度和浊度进行一元回归, 得到浊度与瞬时悬沙浓度的关系, 相关系数达 0.95 以上, 相关性较好。

单宽输沙量  $Q_s$  反映观测时间内输沙量的变化:

$$Q_s = \int_0^t u(t) c(t) h(t) dt \quad (1)$$

式中:  $u$  为流速, m/s;  $c$  为悬沙浓度,  $\text{kg}/\text{m}^3$ ;  $h$  为水位, m;  $t$  为采样时间, s。

底床沉积物的沉积过程需要同时考虑流致底床切应力  $\tau_c$  和波致底床切应力  $\tau_w$ <sup>[8]</sup>, 其中:

$$\tau_c = \rho u_*^2 \quad (2)$$

$$\overline{u(z)} = \frac{u_*}{k} \ln\left(\frac{z}{z_0}\right) \quad (3)$$

式中:  $u_*$  为摩阻流速, m/s;  $\rho$  为海水密度, 取  $1\,025\text{ kg}/\text{m}^3$ ;  $\overline{u(z)}$  为距滩面  $z$  处的流速, m/s;  $k$  为冯卡门常数, 取 0.4;  $z_0$  为底床的粗糙长度,  $z_0 = k_s/30$ , 其中  $k_s = 2.5d_{50}$ ,  $d_{50}$  为底床表层沉积物的中值粒径。根据野外调查的结果,  $bt_1$ 、 $bt_2$ 、 $bt_3$

站泥沙中值粒径分别为 44、120、62  $\mu\text{m}$ , 潮滩上部和下部泥沙较细, 潮滩中部泥沙较粗。

$\tau_w$  计算公式为<sup>[9]</sup>:

$$\tau_w = \frac{1}{2} \rho f_w U_w^2 \quad (4)$$

其中:

$$u_w = \omega A = \frac{\pi H}{T \sinh(2\pi h/L)} \quad (5)$$

$$A = \frac{H}{2 \sinh(2\pi h/L)} \quad (6)$$

式中:  $u_w$  为波浪峰值轨迹速度,  $\text{m/s}$ ;  $f_w$  为波浪摩擦因子;  $A$  为峰值轨迹位移,  $\text{m}$ ;  $H$  为有效波高,  $\text{m}$ ;  $T$  为有效波周期,  $\text{s}$ ;  $h$  为水深,  $\text{m}$ ;  $L$  为波长,  $\text{m}$ ;  $\omega$  为角速度,  $\text{s}^{-1}$ 。

波浪摩擦因子  $f_w$  与雷诺数  $Re_w$  有关, 公式为<sup>[10]</sup>:

$$\begin{cases} f_w = 2Re_w^{-0.5} & Re_w \leq 5 \times 10^5 \text{ (层流)} \\ f_w = 0.0521Re_w^{-0.187} & Re_w > 5 \times 10^5 \text{ (光滑紊流)} \\ f_w = 0.237r^{-0.52} & \text{(粗糙紊流)} \end{cases} \quad (7)$$

其中:

$$Re_w = u_w A / \nu \quad (8)$$

$$r = A / k_s \quad (9)$$

式中:  $r$  为相对糙度;  $\nu$  为海水运动黏度, 取  $1.14 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ 。

通常情况下, 潮滩河口地区底部沉积物同时受到波浪和潮流的作用, 波浪联合作用下的底部切应力为  $\tau_{c,w}$ :

$$\tau_{c,w} = \tau_c \left[ 1 + 1.2 \left( \frac{\tau_c}{\tau_c + \tau_w} \right)^{3.2} \right] \quad (10)$$

底床沉积物临界侵蚀剪切应力  $\tau_{c,r}$  为<sup>[11]</sup>:

$$\tau_{c,r} = 0.05 + \beta \left[ \frac{1}{(\pi/6)^{1/3} (1+sW)^{1/3} - 1} \right]^2 \quad (11)$$

式中:  $\beta$  为与颗粒粒径有关的系数, 取 0.3;  $s = \rho_s / (\rho - 1)$ ,  $\rho_s$  为沉积物颗粒密度,  $\text{kg/m}^3$ ;  $W$  为含水量, 取 30%<sup>[12]</sup>。计算得  $\tau_{c,r}$  为  $0.13 \text{ N/m}^2$ 。悬沙临界沉降切应力  $\tau_{c,r,d}$  的范围为  $0.06 \sim 0.10 \text{ N/m}^2$ , 一般可以取  $\tau_{c,r}$  的  $1/2$ , 因此取  $\tau_{c,r,d}$  为  $0.06 \text{ N/m}^2$ , 适用于细颗粒悬浮泥沙<sup>[13]</sup>。

### 3 试验结果

#### 3.1 风场和水深

观测期间 3 个站点的水深变化如图 2 所示, 整个观测期间共覆盖了 21 个完整潮周期。3 个站点最大水深范围由陆向海方向水深逐渐增大,  $bt_2$  和  $bt_3$  两站距离较近, 水深范围相差不大。水深变化体现了大小潮周期特征, 小潮出现在 7 月 7 日, 大潮出现在 7 月 14 日, 期间属于小潮向大潮转变的过程。潮汐表现出半日潮的特征, 一天内两次潮周期的历时较接近、潮差相差不大。

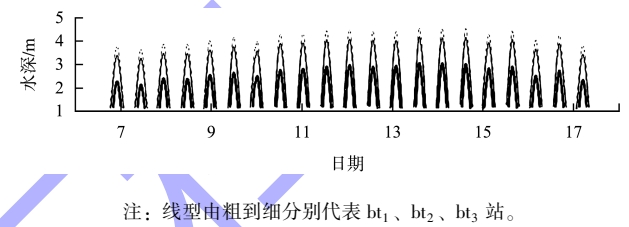


图 2 水深随时间变化曲线  
Fig. 2 Curves of water depth with time

图 3 为研究区域内基于再分析数据刻画的风场结果, 其风速小于实际风速。如图所示, 7—8 日为东南风, 平均风速为  $3.1 \text{ m/s}$ , 随后逐渐增大; 9 日晚—10 日凌晨风速最大约为  $6.1 \text{ m/s}$ , 为西南风; 11 日风速略有减弱; 12—17 日风速持续增强, 风向渐变为东南风, 其中 15—17 日风速增强速度比 12—14 日剧烈, 17 日最大风速可达  $11 \text{ m/s}$ 。该结果显示了观测期间风场总体的变化特征, 现场观测时, 9 日晚—10 日凌晨、15—17 日期间出现过 7 级以上大风。

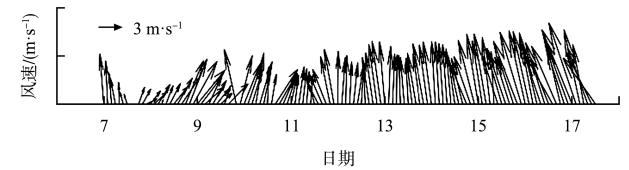


图 3 风场矢量随时间变化  
Fig. 3 Change of wind vector with time

#### 3.2 潮流

潮滩地区近底部的水动力是影响悬沙输运的重要因素。3 站的近底部流速观测结果如图 4 所示,  $bt_3 > bt_2 > bt_1$ 。在小潮转向大潮的时期, 潮周

期的平均流速有增加的趋势，流速变化主要随着潮周期变化，受增强风场的影响并不明显。

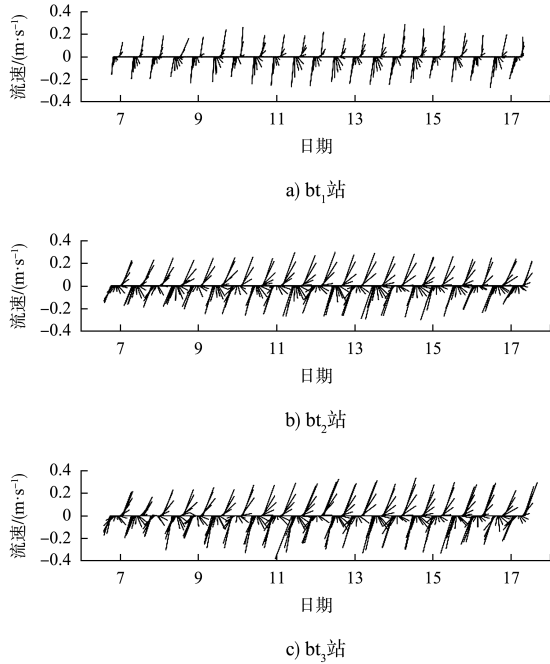


图 4 近底部流速随时间变化曲线

Fig. 4 Curves of current velocity near bottom with time

潮周期内，涨潮初期、落潮末期流速最大，流向由西南向逐渐转变为东北向，高平潮时流速最小。对比涨落潮阶段的平均流速可知，落潮阶段略大于涨潮阶段。落潮阶段历时比涨潮阶段历时略长，3 站涨落潮历时比约为 0.92。总的来说，3 站位涨落潮不对称现象不明显，涨潮的平均流速和历时与落潮阶段差别不大。

### 3.3 波浪

潮周期内的有效波高见图 5。7—9 日，风场较平缓，3 站有效波高的最大值分别为 0.14、0.21、0.32 m；12—17 日，风场增强，3 站有效波高最大值分别为 0.35、0.44、0.50 m，均出现在 17 日；10 日波高也出现明显的增强，bt<sub>3</sub> 站有效波高最大值可达 0.32 m。在风场增强的时期，有效波高明显变大，此时潮周期内最大有效波高约为风场平缓时期的 2~5 倍，表明观测站有效波高受到风场的影响而明显增大。

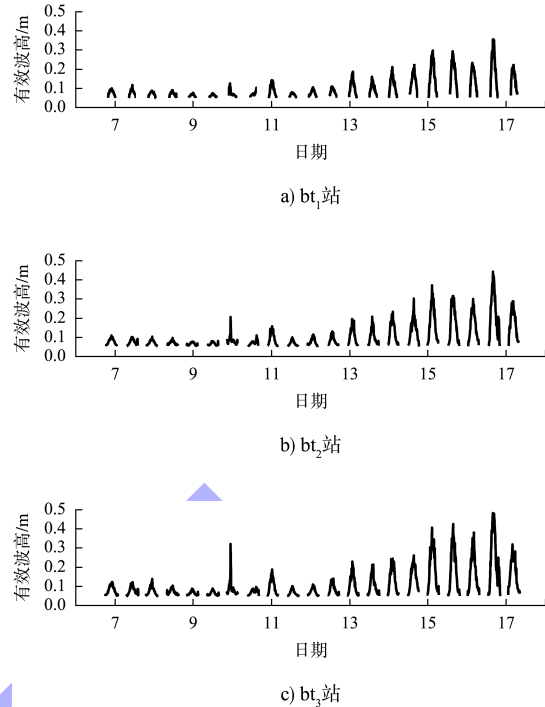


图 5 有效波高随时间变化曲线

Fig. 5 Curves of significant wave height with time

### 3.4 悬沙浓度

如图 6 所示，总体上 bt<sub>1</sub>、bt<sub>2</sub> 站的悬沙浓度在风场增强时变大，而 bt<sub>3</sub> 站位于上部，悬沙浓度较小，小潮转大潮期间悬沙浓度略微增强。不同站位潮周期内的悬沙浓度也有不同的特征。bt<sub>1</sub> 站，7—14 日，悬沙浓度峰值大部分出现在涨潮初期；15—17 日，悬沙浓度明显增大，潮周期内悬沙浓度峰值出现在落潮后期或高平潮阶段。bt<sub>1</sub> 站水位较低，易受风的影响，10 日出现瞬时大风时悬沙浓度出现明显高值。bt<sub>2</sub> 站，14—15 日，悬沙浓度峰值只出现在高平潮时期；其他时期悬沙浓度在涨潮阶段强于落潮阶段；风场明显增强时期悬沙浓度为前期的 10~25 倍。bt<sub>3</sub> 站，大部分潮周期内悬沙浓度在涨潮初期和落潮后期出现峰值，涨潮初期大于落潮后期；部分潮周期在高平潮时出现峰值，可能是由于潮流转向阶段水动力较弱，悬浮泥沙容易出现沉降。

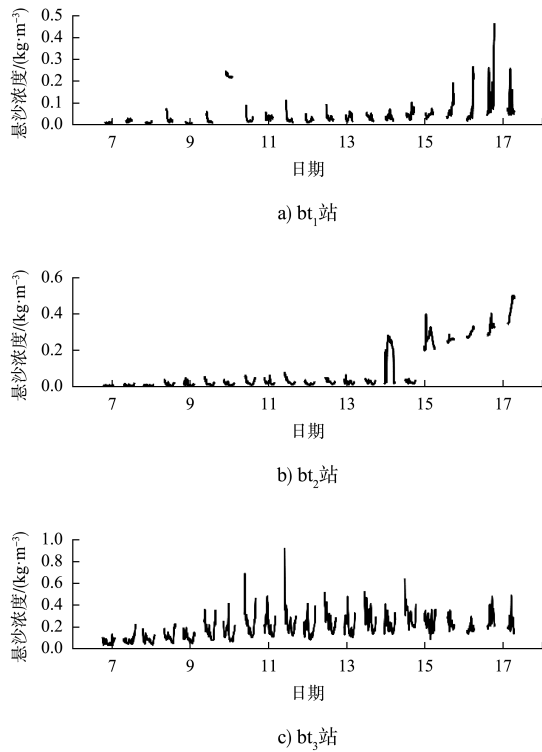


图 6 悬沙浓度随时间变化曲线

Fig. 6 Curves of suspended sediment concentration with time

### 3.5 悬沙输运

为了研究水平方向上的悬沙输运特征, 得出潮周期内累计底部悬沙输运量, 如图 7 所示, 单宽输沙量分解成平行岸方向和向-离岸方向。除了  $bt_1$ 、 $bt_3$  站部分潮周期悬沙离岸输运外, 总体上各站位的悬沙都向岸、向南输运, 沿岸向南的悬沙输运分量比向岸方向大。3 站在风速增强阶段潮周期内累计悬沙输运量明显增多。

悬沙输运量的变化主要与流速和悬沙浓度有关。 $bt_1$  站的悬沙输运在 10 日受瞬时强风的影响较大, 该站位水深较浅, 悬沙浓度剧烈增强, 输沙量明显增大, 最大值为  $0.46 \text{ kg/m}$ ; 14—17 日由于落潮悬沙浓度强于涨潮阶段, 悬沙输运量总体离岸输运。 $bt_2$  站悬沙浓度受增强风的影响更加明显, 强风期间总的单宽输沙量达  $0.75 \text{ kg/m}$ 。 $bt_3$  站上部的单宽输沙量在大潮期间增加, 日周期输沙量呈现波动变化, 增强的风场对上部水层输沙量的影响不明显。

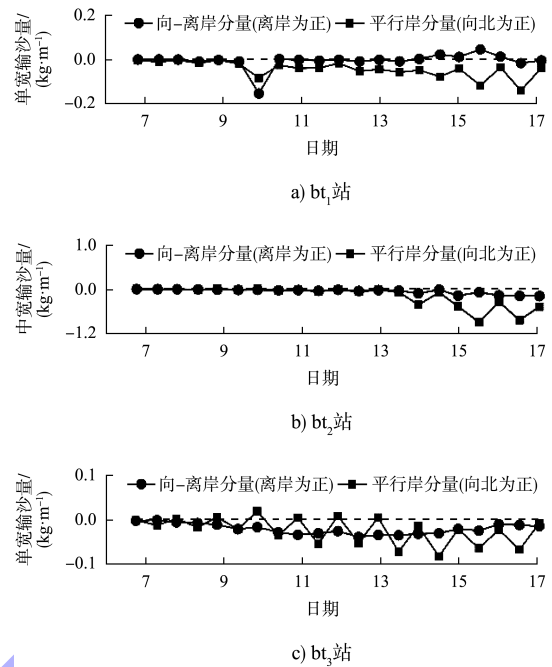


图 7 单宽输沙量随时间变化曲线

Fig. 7 Curves of sediment transport flux per-unit width with time

### 3.6 底部切应力

3 站底部切应力如图 8 所示。风速增强阶段水体悬沙与底床沉积物的交换程度更剧烈, 3 站位  $\tau_w$  明显增强, 此时风将能量传递给水体, 增强了有效波高, 有利于将底部泥沙颗粒再悬浮。风场增强对波浪作用显著, 必然影响滩面沉积物的稳定性。

与  $\tau_w$  不同,  $\tau_c$  对增强风的作用无显著响应。在潮周期内,  $\tau_c$  在涨潮刚开始不久和落潮末期滩面将要露出时出现峰值, 高平潮时期出现最小值。在观测期间,  $\tau_{c,w}$  总体变化趋势与  $\tau_c$  相似, 表明  $\tau_{c,w}$  主要由  $\tau_c$  主导, 底部泥沙沉积过程受到潮流作用比波浪作用强。

对比临界应力,  $bt_1$  站的  $\tau_{c,w}$  基本都小于  $\tau_{c,r,d}$ , 滩面易发生淤积, 风场较强阶段  $\tau_w$  一般大于  $\tau_{c,r,d}$ , 甚至大于  $\tau_{c,r}$ , 说明波浪作用使得底层悬沙易于悬浮、不易沉降, 从而保持较高的悬沙浓度。 $bt_2$ 、 $bt_3$  站落潮后期滩面底部  $\tau_{c,w}$  大于  $\tau_{c,r}$ , 滩面倾向于发生侵蚀, 其余大部分时期  $\tau_{c,w}$  小于

$\tau_{c,r}$ , 在高平潮阶段  $\tau_{c,w}$  小于  $\tau_{c,r,d}$ , 表明悬沙多处于沉降状态, 整个滩面不易侵蚀, 以淤积为主。

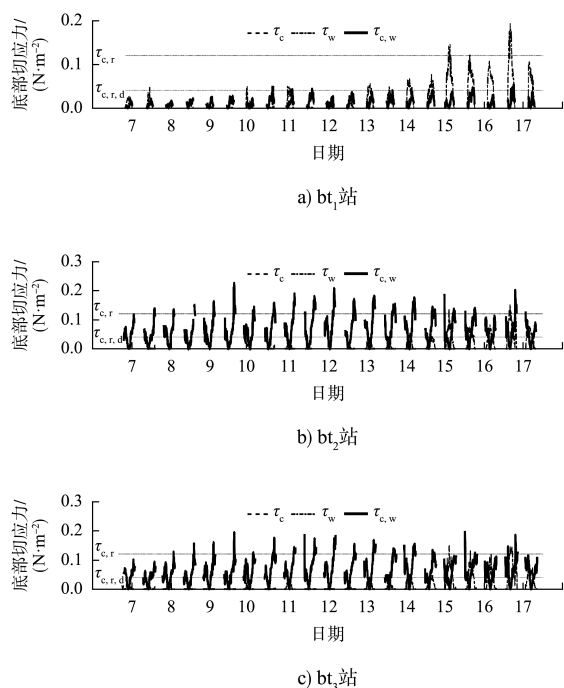


图 8 底部切应力随时间变化曲线

Fig. 8 Curves of bed shear stress with time

#### 4 结论

1) 洋口港潮流呈现正规半日潮特征, 涨潮阶段历时、平均流速与落潮阶段差别不大, 潮流方向由西南向逆时针转向东北向。

2) 风场增强时波高明显增大, 潮流大小主要随潮周期变化而变化。增强的风场有助于波浪变大, 促进水体的扰动, 底床沉积物易被悬浮带入水体, 使水体悬沙浓度明显增强, 悬沙浓度为风速平缓时期的几倍至数十倍。

3) 底部切应力受潮流作用主导, 波浪的作用并不明显。波流联合切应力大部分时间都小于临界侵蚀应力, 水体中悬沙趋向于沉降, 滩面容易淤积。

4) 风场增强期间的悬沙输运量明显大于平静天气, 悬沙总体上沿岸向南和平行向岸输送。

#### 参考文献:

[1] 范吉庆. 台风对长江口潮间带湿地沉积动力过程的影响[D]. 上海: 华东师范大学, 2019.

[2] 苗丽敏, 杨世伦, 朱琴, 等. 风暴过程中潮滩悬沙浓度和悬沙输运的变化及其动力机制: 以长江三角洲南汇潮滩为例[J]. 海洋学报, 2016, 38(5): 158-167.

[3] 赵秧秧, 高抒. 台风风暴潮影响下潮滩沉积动力模拟初探: 以江苏如东海岸为例[J]. 沉积学报, 2015, 33(1): 79-90.

[4] 李占海. 江苏大丰潮滩沉积动力过程研究[D]. 上海: 华东师范大学, 2006.

[5] CHEN D Z, LI M L, ZHANG Y Y, et al. Effects of diatoms on erosion and accretion processes in saltmarsh inferred from field observations of hydrodynamic and sedimentary processes[J]. Ecohydrology, 2020, 13(8): 225325501.

[6] 陈景东. 大风天气条件下的潮滩沉积动力过程[D]. 南京: 南京大学, 2016.

[7] TUCKER M J, PITT E G. Waves in ocean engineering[M]. New Jersey: Elsevier Science, 2001: 88-102.

[8] WHITEHOUSE R, SOULSBY R, ROBERT W, et al. Dynamics of estuarine muds [M]. London: Thomas Telford, 2000.

[9] VAN RIJN L C. Principles of sediment transport in rivers, estuaries and coastal seas [M]. Amsterdam: Aqua, 1993.

[10] SOULSBY R L. Dynamics of Marine Sands: A manual for practical applications [M]. London: Thomas Telford Publications, 1997.

[11] TAKI K. Critical shear stress for cohesive sediment transport [J]. Proceedings in marine science, 2000, 3(6): 53-61.

[12] 张鹰, 张东, 胡平香. 海岸带潮滩土壤含水量遥感测量[J]. 海洋学报, 2008, 30(5): 29-34.

[13] 王爱军, 叶翔, 李云海. 台风期间港湾海岸湿地侵蚀、淤积的环境动力学机制初探: 以福建罗源湾为例[J]. 沉积学报, 2013, 31(2): 315-324.

(本文编辑 王传瑜)