

DOI: 10.16562/j.cnki.0256-1492.2019111801

# 福宁湾海域冬季大潮期悬浮泥沙输运特征

孟令鹏<sup>1</sup>, 胡日军<sup>1,2</sup>, 李毅<sup>3</sup>, 袁晓东<sup>1</sup>, 朱龙海<sup>1,2</sup>, 郭俊杰<sup>1</sup>

1. 中国海洋大学海洋地球科学学院, 青岛 266100

2. 中国海洋大学海底科学与探测技术教育部重点实验室, 青岛 266100

3. 华能霞浦核电有限公司, 宁德 352000

**摘要:**基于2014年12月在福宁湾附近海域8个站位的同步水文泥沙观测资料,分析了冬季大潮期悬浮泥沙分布以及输运通量的变化规律,并结合理查森数、水体混合所需的势能、潮动力引起的水体势能变化率的计算结果,初步探讨了水体的垂向混合对于悬浮泥沙垂向分布的影响,研究了悬浮泥沙的输运机制。结果表明,从湾内到湾外,温度、盐度总体上呈现递增的趋势;平面上各站位悬浮泥沙浓度由湾内向湾外递减;潮周期内悬浮泥沙浓度变化存在不对称性,总体来说,湾内及湾口处(1#站除外)涨潮阶段悬浮泥沙浓度高,湾外(4#站除外)落潮阶段悬浮泥沙浓度较高。从湾内向湾外,随着水深的增加潮周期内水体的垂向混合逐渐减弱,悬沙浓度的垂向差异逐渐增大。悬浮泥沙输运在湾内及湾口整体表现为向陆输运,在湾外为向海输运。在湾内及湾口处,各分层悬浮泥沙的输运方向大多向陆,且量值较高,而湾外的悬浮泥沙输运方向在垂向上存在差异。由于潮流不对称以及悬浮泥沙的滞后效应引起的潮泵项输运对总的悬浮泥沙通量起主要贡献。

**关键词:**悬浮泥沙;层化与混合;输运机制;福宁湾

中图分类号:P736.21

文献标识码:A

## Transport characteristics of suspended sediment in Funing Bay during spring tide in winter

MENG Lingpeng<sup>1</sup>, HU Rijun<sup>1,2</sup>, LI Yi<sup>3</sup>, YUAN Xiaodong<sup>1</sup>, ZHU Longhai<sup>1,2</sup>, GUO Junjie<sup>1</sup>

1. College of Marine Geosciences, Ocean University of China, Qingdao 266100, China

2. Key Lab of Submarine Geosciences and Prospecting Techniques, Ministry of Education, Ocean University of China, Qingdao 266100, China

3. Huaneng Xiapu Nuclear Power Co., Ltd., Ningde 352000, China

**Abstract:** Based on the simultaneous field observations at the eight stations near the area of Funing Bay in December of 2014, the variation in suspended sediment distribution pattern and transport flux during the winter spring tide was analyzed. Combined with the calculation results of the Richardson number, the water mixed potential energy, as well as the change rate of water potential energy caused by tidal power, the effects of vertical mixing of water bodies on the distribution of suspended sediment were also discussed, and the transport mechanism of suspended sediments was studied. The results show that the temperature and salinity increase from inside to outside of the bay, and the suspended sediment share the same trend. The concentration of suspended sediment is obviously asymmetrical during a tide cycle, that is, the concentration of suspended sediment is high during the flood tide inside and at the mouth of the bay except the No.1 station, while the concentration is high during the ebb tide outside the bay except the No. 4 station. From inside to outside of the bay, with the increase in water depth, the vertical mixing of water body gradually weakens, and the vertical difference of suspended sediment concentration gradually increases. The transport of suspended sediment is generally transited to the land inside and at the mouth of the bay, while the transport of suspended sediment is transited to the sea outside the bay. The vertical stratified transport direction is mostly landward with a higher value inside and at the mouth of the bay, while the suspended sediment transport direction is different in the vertical direction outside the bay. The tidal pump transport due to the asymmetry of tidal current and the hysteresis effect of suspended sediment plays a major role in the total suspended sediment transport.

**Key words:** suspended sediment; lamination and mixing; transport mechanism; Funing Bay

悬浮泥沙作为研究海洋沉积动力过程中的一个重要因子<sup>[1]</sup>,其在潮汐、风浪等因素的共同作用下发生悬浮、运移以及沉积<sup>[2]</sup>,这对于研究物质循环以及地形地貌冲淤具有重要的意义<sup>[3]</sup>。对于近岸潮流

资助项目:国家自然科学基金项目“山东半岛海湾对泥沙的捕获机制——以威海湾为例”(41776059);中国华能集团有限公司总部科技项目“霞浦核电海岛厂址开发利用研究”(HNKJ20-H18)

作者简介:孟令鹏(1994—),男,硕士研究生,海洋地质专业, E-mail: 2481370910@qq.com

通讯作者:胡日军(1980—),男,副教授,主要从事海洋沉积动力研究, E-mail: hrj@ouc.edu.cn

收稿日期:2019-11-18; 改回日期:2020-01-17. 文凤英编辑

流速较大的区域,悬浮泥沙的运动主要受到潮流的控制<sup>[4-5]</sup>,潮周期内悬浮泥沙浓度的变化往往表现出与潮流变化相同的周期性。潮流深刻地影响着悬浮泥沙浓度的时空变化特征以及输运通量,尤其是潮周期内潮流的不对称效应以及水体中悬浮泥沙对于潮流的响应而引起的滞后性,对于悬浮泥沙的输运通量具有重要的影响<sup>[6-7]</sup>。

对于水体垂向上的物质交换,水体的层化结构的形成与消失是决定海底沉积物、营养盐以及各种水溶物质垂向输送的重要因素<sup>[8]</sup>。关于水体层化结构研究,前人多集中于研究陆架浅海季节性的温跃层以及河口地区水体的垂向结构变化,刘浩等<sup>[9]</sup>利用三维斜压海流模式(POM)重现了渤海表底温差的季节变化,并进一步对其层化状况以及潮汐锋面的形成发展过程做了研究;李霞等<sup>[10]</sup>根据Simpson经典河口环流理论,分析了长江口南支南港北槽枯水期水体垂向结构的潮周期变化以及潮汐应变对垂向结构的影响。另有研究者对于水体垂向结构的研究也做了许多有意义的工作<sup>[11-12]</sup>,但是对于陆架浅海海湾短时间尺度内的结构特征以及其对于悬浮泥沙浓度垂向分布的影响研究较少。

福宁湾位于福建省北部,前人对于该区域的研究主要集中于近岸海域的水质及沉积物地球化学特征<sup>[13-14]</sup>,但是缺乏对于该海域悬浮泥沙输运机制的研究。本文基于2014年冬季在福宁湾附近海域获得的水文泥沙数据,结合大潮期内水体的水文状况以及悬浮泥沙浓度的时空变化特征,分析了水体的垂向混合状况对于悬浮泥沙垂向分布的影响以及悬浮泥沙通量,探讨了福宁湾附近海域悬浮泥沙的输运机制。

## 1 研究区概况

研究区位于福建北部的福宁湾附近海域,地理坐标范围为 $26^{\circ}36' \sim 26^{\circ}57'N$ 、 $120^{\circ}05' \sim 120^{\circ}31'E$ ,观测站点主要分布在水深20 m以浅的区域(图1)。该海域为亚热带季风气候,冬季多为北风,夏季多为南风,夏季容易受到台风的影响。半日潮波自西北太平洋传入东海后,主要部分通过东海北部进入黄海和渤海,而另外一部分则向浙江、福建传播。研究区主要受进入福建东海潮波分支的影响,潮汐类型为规则半日潮,以 $M_2$ 分潮为主,平均潮差大于4 m<sup>[15]</sup>。海流以往复流为主,涨潮流向多为NWW向,落潮流流向为SEE向,近岸区域水深较浅,涨潮流占优。研究区附近海域泥沙来源主要包括陆源来沙

和近海泥沙,其中陆域来沙有限,仅在湾顶局部堆积,而近海泥沙在浪、流的作用下原地再悬浮,并随着涨、落潮流搬运是影响研究区泥沙淤积的主要泥沙来源。作为东海内陆架环流的重要组成部分,闽浙沿岸流(MZCC)冬季在东北季风的驱动下,沿岸线缓慢地向西南流动,其大致分布在50 m以浅的区域,流速大致为0.24 m/s<sup>[16]</sup>。

## 2 数据来源与研究方法

### 2.1 数据来源

2014年12月23—24日,国家海洋局第三海洋研究所在福宁湾海域进行了8个站位连续27h同步观测。海流剖面观测采用美国RDI公司生产的ADCP多普勒海流剖面仪和挪威诺泰克公司生产的AWAC多普勒海流剖面仪,每5分钟观测一次,观测剖面按0.5 m分层,提取数据时根据实际水深按六点法(表层、0.2H、0.4H、0.6H、0.8H、底层)进行提取。考虑到多普勒海流剖面仪的盲区为0.5~1 m,因此各站均增加一台日本ALEC公司的EM型电磁海流计进行表层海流观测,以对声学海流计的表、底层观测结果进行修正。悬浮泥沙现场观测采用加拿大RBR XR-420+Tu浊度仪,按照六点法进行观测。现场在浊度观测的同时,每两小时按照六点法(表层、0.2H、0.4H、0.6H、0.8H、底层)采集现场的水样,每层水样不少于500 mL。对现场采集的水样在实验室进行抽滤、烘干、称重。过滤膜为0.45 μm醋酸纤维膜,样品在电热培养恒温箱经一定温度烘干,称重在精度1/10 000的天平进行。为保证质量,烘干称重反复进行2—3次,保证误差小于0.5 mg。对实测浊度数据与含沙量称重结果进行相关计算,得到相关公式后计算整个观测时段的含沙量值,冬季大潮期各站实测浊度与含沙量相关系数均达到0.8以上(图2)。

温度、盐度采用XR-420-CTD+Tu温盐深浊度仪进行水温、盐度观测,观测时间、层次与悬浮泥沙观测一致。为了更好地了解观测期间的海洋气象状况,在1#、7#站位采用手持风向风速仪进行风速观测,观测时间为每3小时进行一次(表1)。

### 2.2 研究方法

#### (1) 泥沙通量计算

悬浮泥沙在潮周期内的输运主要受到余流和潮不对称效应的影响。为了分析两者对泥沙输运

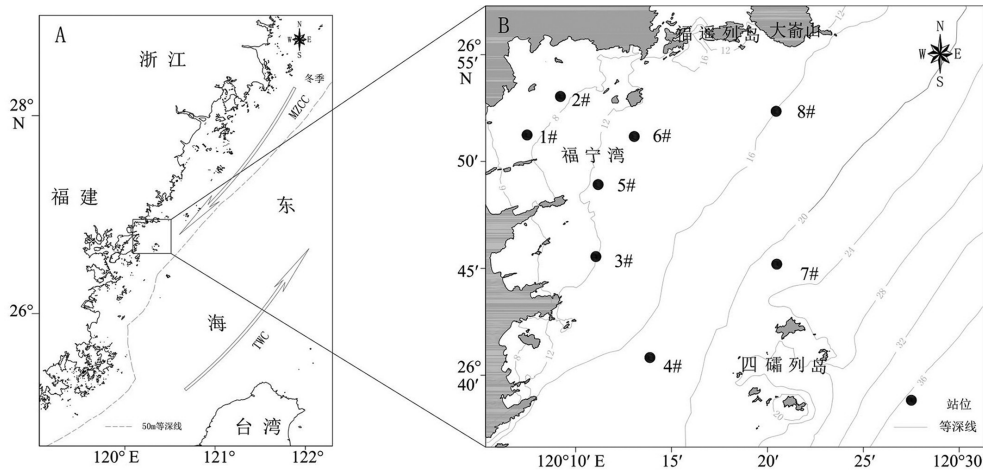


图 1 福宁湾附近海域调查站位图

A. 东海主要环流系统(改绘自 Guan<sup>[17]</sup>)。MZCC: 闽浙沿岸流; TWC: 台湾暖流。B. 研究区调查站位图(水深起算基于 85 高程基准面)。

Fig.1 Location of Survey stations in the offshore area of Funing Bay

A. East China Sea main circulation system(Repainted from Guan<sup>[17]</sup>). MZCC: Min-Zhe Coastal Current; TWC: Taiwan Warm Current.

B. Survey station map of the study area(The water depth is based on the 85 elevation datum).

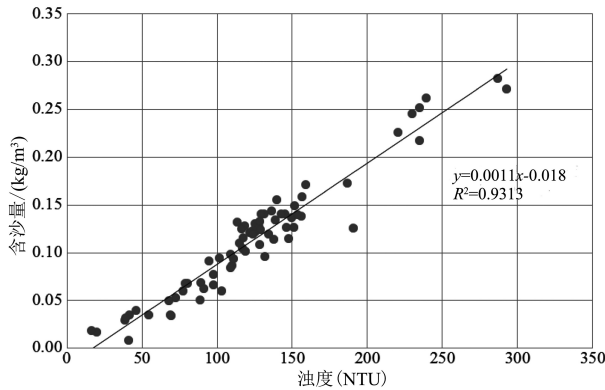


图 2 实测浊度与含沙量相关曲线图 (冬季 3#站)

Fig.2 The curve of turbidity and sediment concentration was measured at No. 3 station in winter

的影响程度,我们采用通量分解方法<sup>[6-7, 18]</sup>,将总的悬浮泥沙通量分解为:

$$\langle u \cdot C \rangle = \langle u \rangle \langle C \rangle + \langle u' \cdot C' \rangle \quad (1)$$

其中,  $u$  代指流速,  $C$  代指悬浮泥沙浓度, “ $\langle \rangle$ ”指潮平均算子。公式右侧的第一项指余流和潮平均悬浮泥沙浓度导致的输运项,即平流输运项;右侧第二项指两个潮脉动项互相作用导致的输运项,即潮泵项,与潮流不对称和悬浮泥沙的滞后效应有关<sup>[19]</sup>。

(2)层化特征指标

利用梯度 Richardson 数 (Rig)<sup>[20]</sup> 描述水体的稳定程度,其计算方法为:

$$Rig = \frac{g}{\rho} \cdot \frac{\partial \rho}{\partial z'} \left( \frac{\partial u}{\partial z'} \right)^{-2} \quad (2)$$

公式中:  $z'$  为垂向距离,  $\rho$  为密度,  $u$  为各层流速,  $g$  为重力加速度。梯度 Richardson 数可以用于判断水体的混合状态,基于线性稳定理论,当  $Rig < 0.25$  时,水体是不稳定的,混合增强;当  $Rig > 0.25$  时,流体稳定,混合被抑制<sup>[20]</sup>。

在计算梯度 Richardson 数时,水体密度  $\rho$  利用的海水状态方程<sup>[21]</sup>求得:

$$\rho = \rho_0 + AS + BS^{3/2} + CS^2 \quad (3)$$

公式中:  $\rho_0, A, B, C$  皆为水体温度的函数;  $S$  为水体盐度;  $T$  为水温。

$$\rho_0 = 999.842594 + 6.793952 \times 10^{-2}T - 9.095290 \times 10^{-3}T^2 + 1.001685 \times 10^{-4}T^3 - 1.120083 \times 10^{-6}T^4 + 6.536332 \times 10^{-9}T^5$$

$$A = 8.24493 \times 10^{-1} - 4.0899 \times 10^{-3}T + 7.6438 \times 10^{-5}T^2 - 8.2467 \times 10^{-7}T^3 + 5.3875 \times 10^{-9}T^4$$

$$B = -5.72466 \times 10^{-3} + 1.0227 \times 10^{-4}T - 1.6545 \times 10^{-6}T^2$$

$$C = 4.8314 \times 10^{-4}$$

(3)水体势能的变化

根据 Simpson 等的研究,陆架浅海水体完全混合所需要的势能  $\phi$  可根据如公式下计算<sup>[22-24]</sup>:

$$\phi = \frac{1}{h} \int_{-h}^0 (\bar{\rho} - \rho)gzdz \quad \bar{\rho} = \frac{1}{h} \int_{-h}^0 \rho dz \quad (4)$$

其中:  $h$  为水深,  $\bar{\rho}$  为水深平均后的密度,  $z$  为沿垂向水深坐标。

势能  $\phi$  的数值大小主要受到 3 个因素的控制,即海表的热辐射通量、潮流以及风的搅动<sup>[23]</sup>。前者由于海水吸收太阳热辐射抑制水体的垂向混合,后

两者分别通过水体与海底摩擦以及水体各层之间的剪切流导致水体的湍流混合和风对表层海水的搅动,增强水体的垂向混合。 $\phi$ 值越大代表水体的垂向分层越好,近于或等于0则代表垂向混合较好<sup>[22-23]</sup>。

当海面风速较小时,相对于潮流而言,风对水体混合的促进作用是比较小的,这时潮流对于水体的混合起主要作用<sup>[23]</sup>。由于本研究区横跨范围不大,在最外侧和最内侧的风速观测结果可以代表整个研究区的情况,另根据冬季大潮期间在湾内的1#站位和湾外的7#站位进行的风速观测结果(表1),在整个海流观测期间,大多数时间段内海表的风速小于4 m/s,并且湾内风速小于湾外,仅在海流观测末期东北风开始增强,在这种风况下风的作用可以不进行讨论<sup>[25-26]</sup>。并且当研究区域跨度较小时,在相同的时间段内各站位海表热辐射通量可视作为一定值。因此本文中我们重点讨论潮流的作用,即潮汐紊动(STI)对于水体混合的影响,潮动力引起的势能变化率(STI)的计算公式为<sup>[23]</sup>:

$$STI = \frac{4}{3\pi} \varepsilon k \rho \frac{u_d^3}{h} \quad (5)$$

式中 $\varepsilon$ 为有效混合系数, $k$ 为底部拖曳系数, $u_d$ 为底层流速。在这里根据Simpson的研究<sup>[23]</sup>, $k$ 值取0.0025, $\varepsilon$ 取0.0038。

### 3 结果

#### 3.1 温盐时空变化特征

本文中为了方便讨论,根据站位的位置将1#、

2#站位归为湾内站位,3#、5#、6#站位归为湾口站位,4#、7#、8#站位归为湾外站位。从温度、盐度时间序列图来看(图3),湾内站位的温度变化范围为11.6~13.59℃,盐度变化范围为25.55~26.88PSU;湾口站位的温度变化范围为13.16~14.6℃,盐度变化范围为27.00~27.7PSU;湾外站位温度变化范围为12.5~14.65℃,盐度变化范围为26.45~29.1PSU。从湾内向湾外,温度、盐度值整体呈现递增的趋势。

在一个潮周期内,6#站位的温度、盐度变化不大,其余各站位温度、盐度的变化特征表现为涨潮时温度、盐度升高,落潮时温度、盐度降低,各站位温度、盐度表现出随潮流变化的周期性。湾外的7#站位,潮周期内多数时刻温度、盐度在垂向上存在分层,表层温度、盐度低,底层温度、盐度高,同一时刻其表、底层盐度差值最大可达到2.06PSU,这与前人对该区域进行调查取得的结果一致<sup>[27]</sup>。其余各站位在一个潮周期内,水体的垂向混合状况好于7#站位,只在涨憩时刻附近水体存在微弱的分层现象。同时受太阳辐射的影响,在12~14时之间,各站位表层水温会出现微弱的高值。

#### 3.2 流速时空变化特征

研究区各站位海流流向以NW-SE向、E-W向为主,其中1#、2#站位由于位于湾内且水深较浅,潮流运动形式明显受海湾地形的影响表现为往复流,向湾外随着地形变得开阔潮流逐渐具有旋转性,并且海流矢量的垂向平均值也向湾外递增(图4)。根据海流流速的时间序列图(图6),湾外的站位流速最大,且各站位中上层流速明显大于底层。湾内各站位涨潮最大流速为53~73 cm/s,落潮最大流速为

表1 冬季大潮期海面风速观测表(1#、7#站)

Table 1 Observations of sea surface wind speed at No. 1 and No. 7 station during the winter spring tide

1#站				7#站			
序号	时间	风速/(m/s)	风向	序号	时间	风速/(m/s)	风向
1	19:00	0.7	N	1	19:00	3.7	NE
2	21:00	1.6	W	2	21:00	3.0	N
3	1:00	1.7	S	3	1:00	0.8	S
4	4:00	1.4	SW	4	4:00	0.9	W
5	7:00	0.8	SW	5	7:00	2.2	SW
6	10:00	0.3	E	6	10:00	3.2	SE
7	13:00	2.6	SE	7	13:00	3.4	SE
8	16:00	2.6	NE	8	16:00	4.2	NE
9	19:00	2.3	NE	9	19:00	4.3	NE

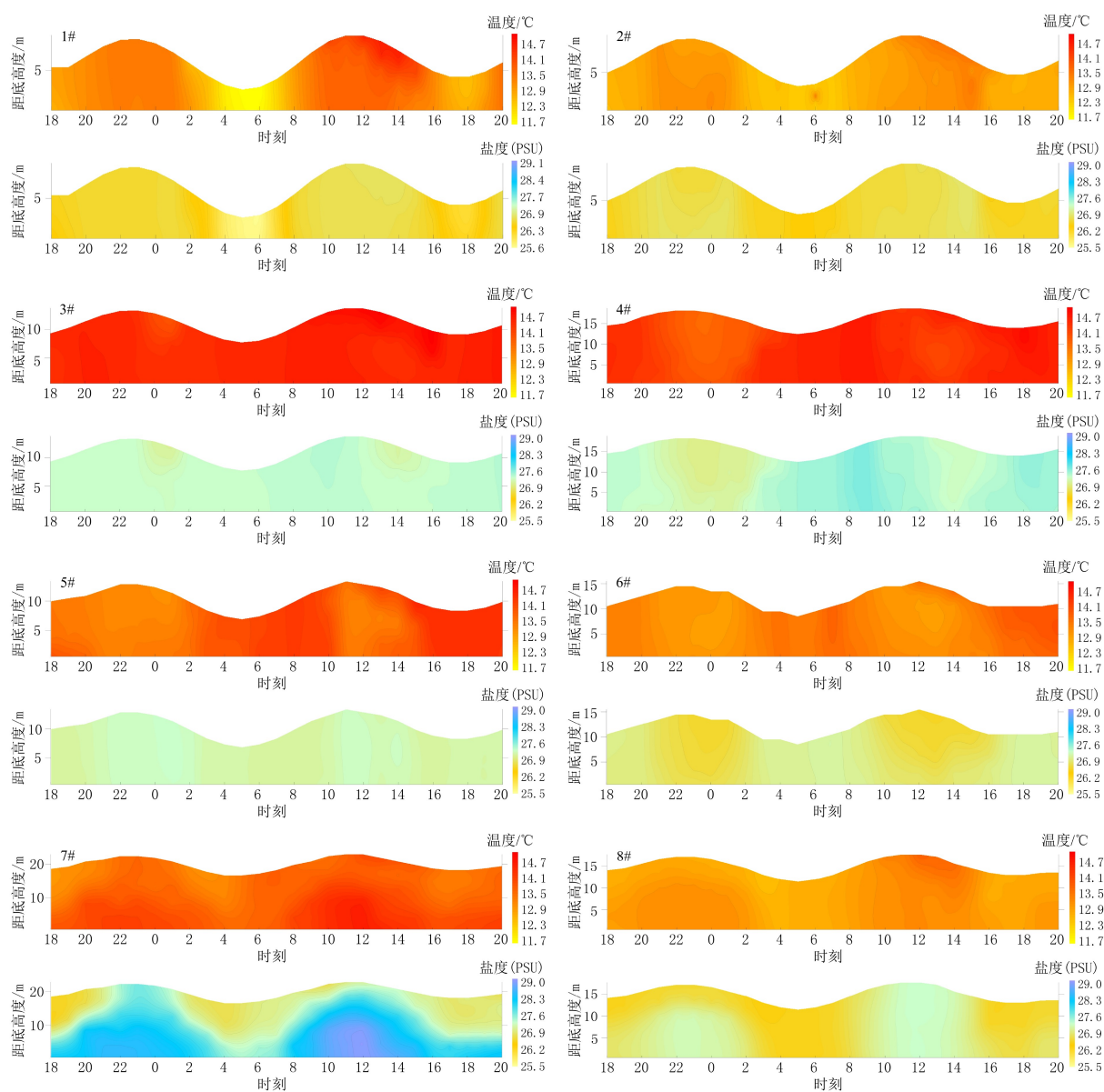


图3 各站位温度(°C)、盐度(PSU)时间序列图

Fig.3 Temperature (°C) and salinity (PSU) time series of each station

48~57 cm/s, 涨落潮流速最大值分别出现在1#站位的0.2H和2#站位的表层; 湾口各站位涨潮最大流速为40~64 cm/s, 落潮最大流速为43~72 cm/s, 涨落潮流速最大值分别出现在5#站位0.4H和6#站位表层; 湾外各站位涨潮最大流速为50~75 cm/s, 落潮最大流速为58~92 cm/s, 涨落潮流速最大值分别出现在7#站位表层和8#站位0.2H。

研究区各站位涨、落潮流在最高潮位前后大约3h达到最大值。在整个观测期间(包含两个完整的潮周期), 各站位第二个潮周期的涨潮阶段流速明显大于第一个潮周期的涨潮阶段, 第一个潮周期落潮阶段流速明显大于第二个潮周期的落潮阶段, 相邻潮周期潮流的不对称现象明显。1#、2#站位涨潮

流明显占优, 其余站位两个潮周期内最大流速均出现在第一个潮周期的落潮阶段。从湾内到湾外随着水深的增大, 落潮流的优势变得更为明显。

### 3.3 悬浮泥沙浓度时空变化特征

在平面上, 研究区各站位悬浮泥沙浓度从湾内向湾外递减, 湾内站位平均含沙量为111.8~120.2 mg/L, 湾口站位平均含沙量为63.6~91.2 mg/L, 湾外站位平均含沙量为32.2~82.9 mg/L。根据各站位涨、落潮垂向平均悬浮泥沙浓度平面分布图(图5), 涨、落潮阶段的垂向平均悬浮泥沙浓度的最大值分别出现在2#站位和1#站位, 为131.4和112.8 mg/L; 最小值均出现在7#站位, 分别为27.2和34.9 mg/L。

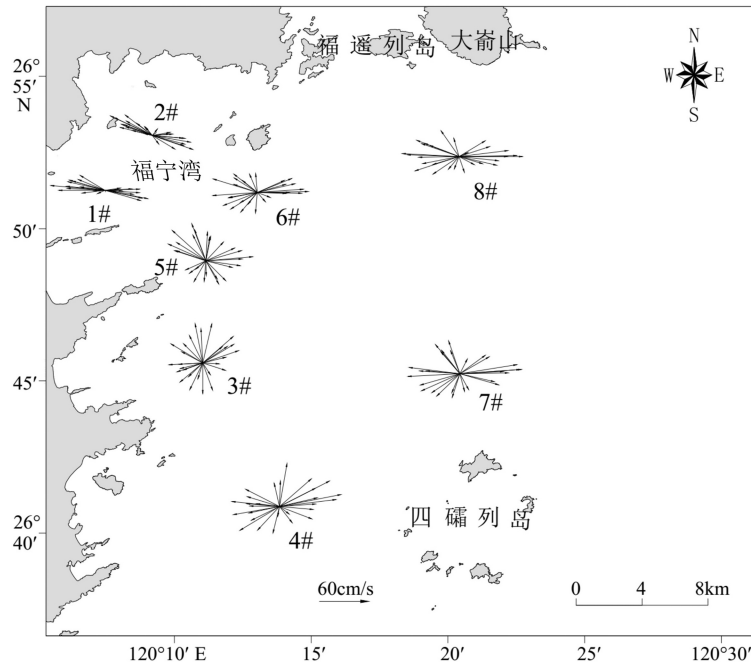


图4 各站位垂向平均海流矢量图

Fig.4 Vertical average current vector of each station

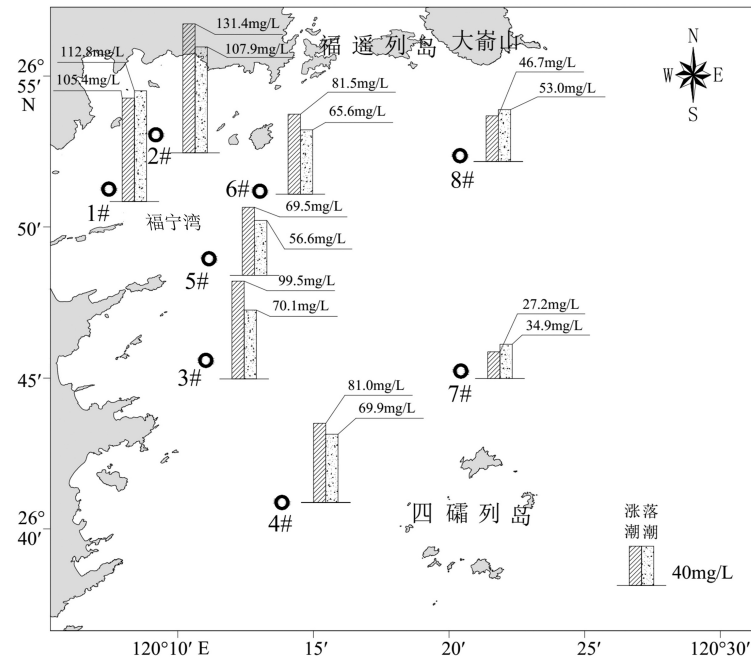


图5 各站位涨、落潮垂向平均悬浮泥沙浓度平面分布图

Fig.5 Horizontal distribution of vertical mean suspended sediment concentration at each station

除湾外的7#、8#站位以及湾内的1#站位，落潮阶段的垂向平均悬浮泥沙含量大于涨潮阶段外，其余各站位涨潮阶段的垂向平均悬浮泥沙含量均大于落潮阶段。

根据悬浮泥沙浓度时间序列图(图6)，各站位表层悬浮泥沙浓度低，底层悬浮泥沙浓度高，悬浮泥沙浓度变化滞后于流速变化。各站位表、底层潮平均悬浮泥沙浓度的最大差值出现在5#站位，差

值为153.1 mg/L; 最小差值出现在7#站位，差值为48.7 mg/L。对比流速与悬浮泥沙浓度时间序列图，从涨潮初期开始，各站位随着流速逐渐增大，底部泥沙的再悬浮作用以及水体垂向各层剪切形成湍流增强，底层泥沙再悬浮导致水体中悬浮泥沙浓度逐渐升高<sup>[28-29]</sup>；涨憩时刻由于流速较小，湍流混合减弱，泥沙颗粒受到的重力与湍流提供的支持力的平衡被打破，悬浮泥沙加速沉降到底层从而导致表底

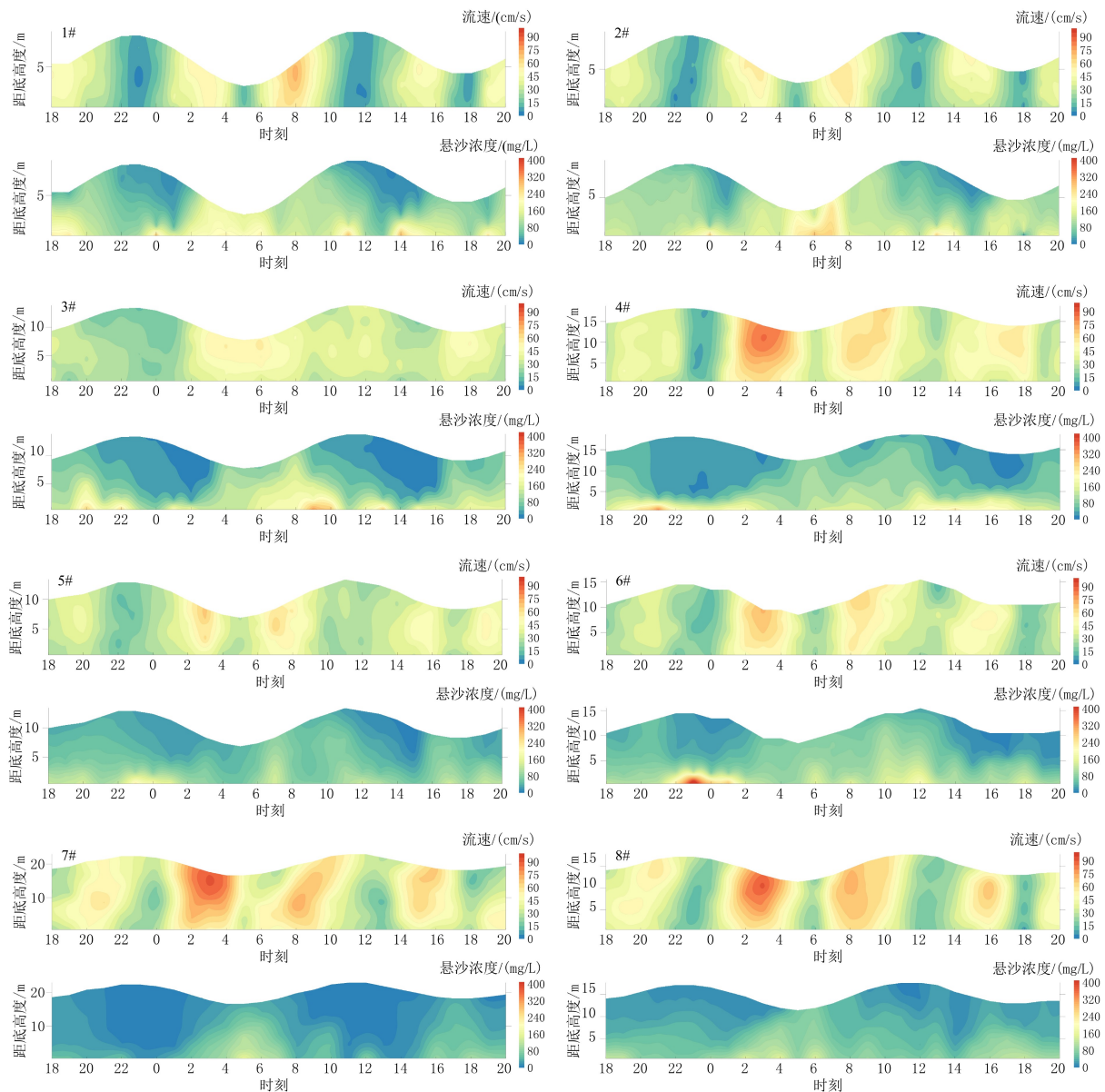


图 6 流速 (cm/s)、悬浮泥沙 (mg/L) 浓度时间序列图

Fig.6 Time series diagram of flow rate (cm/s) and suspended sediment concentration (mg/L)

层的悬浮泥沙差值增大<sup>[30]</sup>, 中上层悬浮泥沙浓度的低值会一直持续到落潮初期; 随着落潮阶段流速的逐渐增大, 再悬浮作用和湍流混合作用逐渐增强, 水深逐渐减小, 水体中悬浮泥沙浓度增高并向上扩散, 并持续到落憩时刻。

### 3.4 悬浮泥沙运输通量

为了更好地分析垂向上悬浮泥沙运输的差异, 本文在垂向上将水体分为 6 层, 并根据通量分解算法, 将整个悬浮泥沙通量分为两个部分: 即平流输运项和潮泵项。前者主要受到余流和潮周期平均含沙量的控制, 后者主要与潮不对称现象相关<sup>[6-7, 18]</sup>。根据计算结果(图 7), 湾内及湾口处的站位除底层

外, 其余各分层悬浮泥沙运输均是向陆的; 湾外的 4#、8# 站位悬浮泥沙运输在垂向上存在转向, 表层输运向陆, 向下各层则逐渐转向海, 而 7# 站位则相反, 上层的悬浮泥沙向海输运, 向下逐渐转向陆。各站位各层悬浮泥沙运输的最大量值出现在 3# 站  $0.6H$ , 为  $13.012 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ ; 最小量值出现在 8# 站表层, 为  $1.483 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 。综合各站位垂向上整体的悬浮泥沙运输趋势, 在湾内及湾口处是向陆的, 在湾外转为向海输运。

比较各站位垂向各分层的平流输运项和潮泵项的量值(表 2), 1# 站位垂向各层均以平流输运项占优, 2#、5# 站位表层至  $0.4H$  以潮泵项占优, 而  $0.6H$  至底层则以平流输运项占优。向湾外随着潮

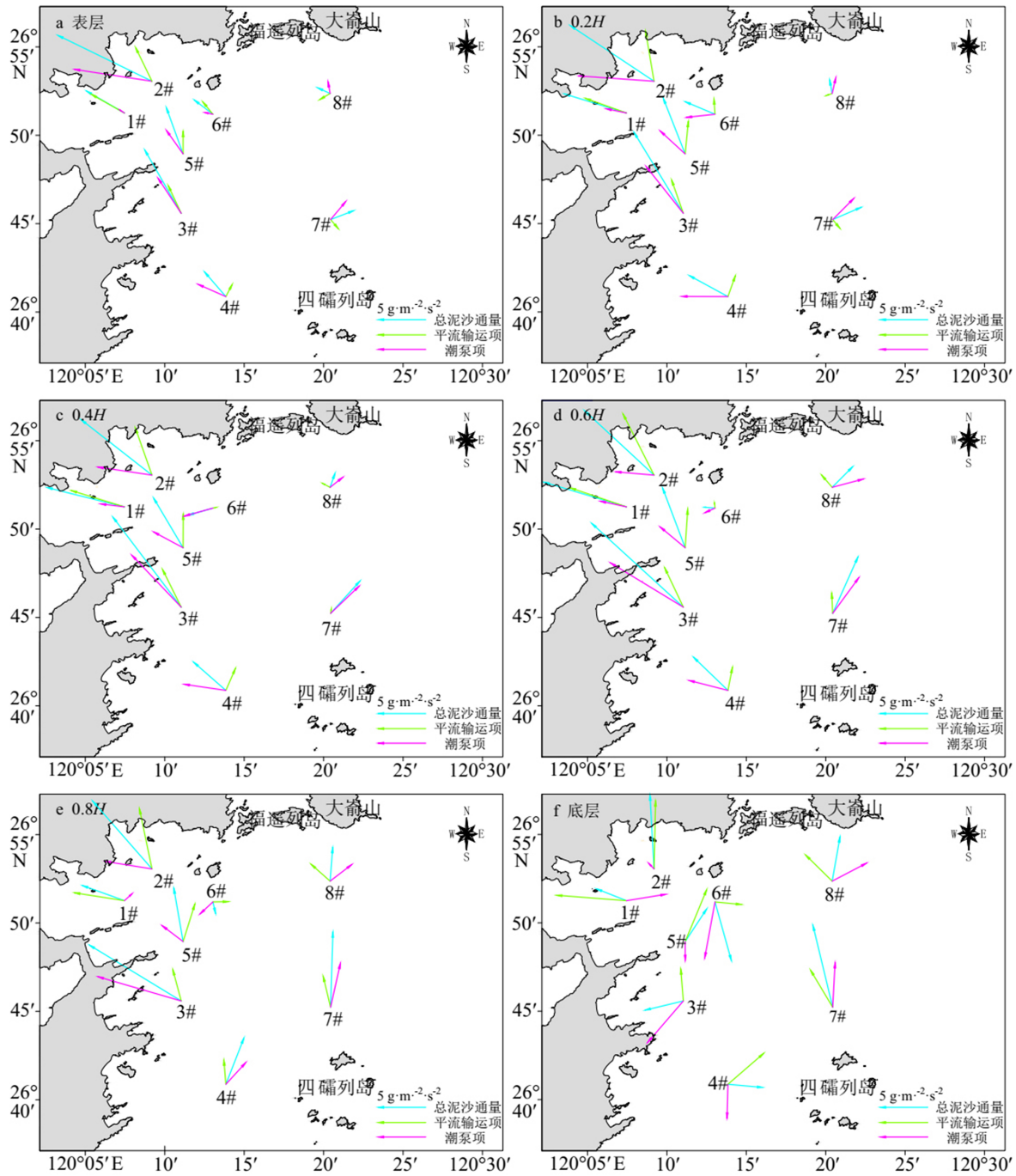


图7 各站位各分层悬浮泥沙输运通量

Fig.7 Vertical stratified suspended sediment transport capacity of each station

流的不对称现象变得明显,各站位的潮泵项输运占据主导地位。总体而言,潮泵项对于研究区的悬浮泥沙输运起主要贡献。

### 4 讨论

#### 4.1 水体垂向混合对悬浮泥沙垂向分布的影响

对于陆架浅海区域,水体的垂向混合主要控制

因素包括海表面的热辐射、潮流剪切以及风的搅动,前者抑制水体的垂向混合,后两者起到促进作用<sup>[22-23]</sup>。水体的垂向混合状态对悬浮泥沙的垂向分布有明显的影 响,水体垂向混合较弱而出现层化时会抑制底层悬浮泥沙的向上扩散<sup>[18,30]</sup>。为了描述水体的垂向混合状态,我们利用梯度 Richardson 数来描述水体的稳定程度,并根据  $\ln(Rig/0.25)$  进行绘图,当  $\ln(Rig/0.25) < 0$  时表示水体垂向混合较好,  $\ln(Rig/0.25) > 0$  时表示水体的垂向混合得到抑制。



表 2 各站位各层总悬浮泥沙运输通量中各输沙项占比 (单位: %)  
Table 2 Proportion of each sediment transport item in the total suspended sediment transport amount of each layer at each station (unit: %)

		表层	0.2H	0.4H	0.6H	0.8H	底层
1#	平流输运项	86.9	67.4	69.7	68.8	113.3	216.1
	潮泵项	13.2	32.8	30.6	31.3	24.1	124.0
2#	平流输运项	36.1	50.7	55.9	72.4	68.4	91.9
	潮泵项	75.0	75.0	60.8	40.7	52.5	11.0
3#	平流输运项	42.4	37.8	37.5	35.2	30.4	82.2
	潮泵项	57.8	63.5	63.5	68.7	80.7	138.8
4#	平流输运项	42.8	50.4	56.3	49.5	49.3	135.1
	潮泵项	93.2	104.7	98.8	84.1	59.7	97.5
5#	平流输运项	46.0	54.8	58.4	60.9	72.3	143.2
	潮泵项	58.9	57.0	58.2	51.2	48.8	48.8
6#	平流输运项	68.6	48.6	15.3	52.0	130.1	44.0
	潮泵项	36.8	89.2	115.2	104.0	146.9	93.6
7#	平流输运项	48.9	37.2	12.1	33.3	42.7	51.4
	潮泵项	95.6	96.5	90.1	71.8	59.9	53.1
8#	平流输运项	88.3	47.1	58.6	56.1	75.7	83.2
	潮泵项	87.6	116.9	108.5	111.0	81.1	86.6

并根据各站位随时间变化的水体完全混合所需要的势能  $\varphi$ , 估算水体的混合状态; 根据公式计算得到潮汐紊动引起的势能变化率 (STI), 评估潮流对于水体混合起到的作用。

湾内的 1#、2# 站位由于水深较浅, 根据梯度 Richardson 数的结果只有在部分时刻水体出现微弱的层化 (图 8)。水体完全混合所需的势能  $\varphi$  值较小, 最大仅约  $1 \text{ J} \cdot \text{m}^{-3}$ , 并且  $\varphi$  值多数时间内近于或等于 0, 仅在涨憩时刻前后出现较小的峰值 (图 9), 潮周期内湾内的水体垂向混合较好。潮汐紊动引起的势能变化率 (STI) 在涨急和落急时刻出现峰值, 同时由于水深较小潮动力的作用更为明显, STI 的数值超出其余站位大概一个数量级, 在涨憩和落憩时刻 STI 值近于或等于 0。因为水体的垂向混合较好, 除涨憩时刻开始至落潮初期潮流流速较小, 泥沙沉降导致垂向上悬浮泥沙浓度出现明显差异外, 大多数时间段内悬浮泥沙浓度垂向差异较小。

湾口的 3#、5#、6# 站位, 在涨憩时刻前后部分层位  $\ln(\text{Rig}/0.25) > 0$ , 说明此时水体的垂向混合得到抑制。各站位的势能  $\varphi$  在涨憩时刻前后出现微小的峰值, 且峰值较湾内的站位有所增加, 在大多数时间段内  $\varphi$  值同样近于或等于 0, 水体以垂向混

合为主。潮流流速较大的时刻各站位潮汐紊动引起的势能变化率 (STI) 出现极值, 但 STI 的极值较湾内的站位小, 在涨憩时刻附近 STI 的值近于等于 0, 当势能  $\varphi$  出现峰值并且潮汐紊动引起的势能变化率 (STI) 较小的时刻 (图 9), 悬浮泥沙浓度垂向梯度较大。

湾外的 4#、7#、8# 站位, 由于水深进一步增大, 势能  $\varphi$  的量值有所增加, 并且大多数时间段内  $\varphi$  值大于 0。但由于水深较深, 潮流的混合作用减弱, 潮汐紊动引起的势能变化率 (STI) 相比其余站位小, 较高的  $\varphi$  值和较低的 STI 使得水体的垂向混合较弱, 这在涨憩时刻附近更为明显。根据图 8 的结果, 在涨憩时刻前后部分层位  $\ln(\text{Rig}/0.25) > 0$ , 水体出现层化, 但各站位潮周期内水体中层化的范围明显大于湾内及湾口的站位, 水体层化导致的表底悬浮泥沙浓度差异更为明显。尤其是 7# 站位, 相比其余各站位, 其水深最深, 势能  $\varphi$  的极值也最大, 且在潮周期内  $\varphi$  值一直为正。但由于水体各层流速剪切以及潮流与底床摩擦引起的湍流混合作用较弱, 使得潮汐紊动引起的势能变化率 (STI) 最小, 水体的垂向混合较差<sup>[31]</sup>。同时水体中上部的层化也抑制了悬浮泥沙的上浮, 并使得上层的悬浮泥沙加速回到底层, 表底悬浮泥沙浓度差增大<sup>[30]</sup>, 导致了

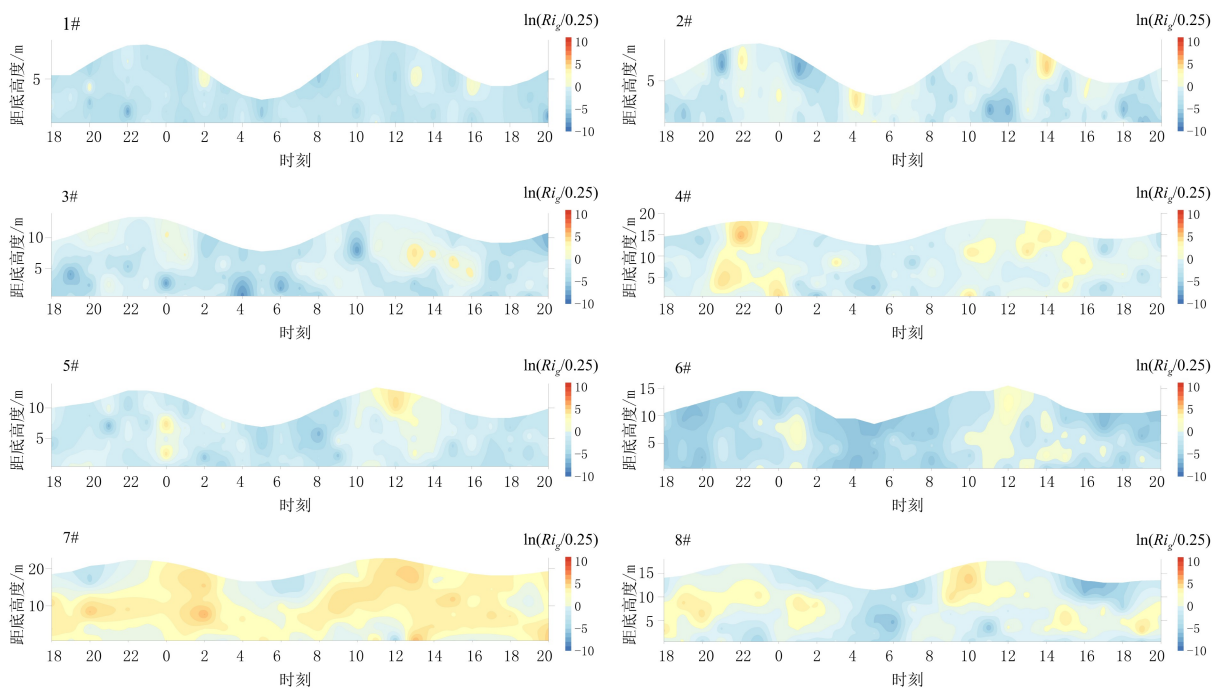


图8 各站位垂向梯度 Richardson 数时间序列图

Fig.8 Time series of gradient Richardson Numbers for each station

涨憩时刻前后中上层悬浮泥沙浓度出现低值。

#### 4.2 悬浮泥沙输运机制

研究区湾内的1#、2#站位,其平流输运项量值在垂向上差异不大,且各层的泥沙输运均向陆(见图7)。1#站位表层至 $0.6H$ 潮泵项输运向陆,但 $0.8H$ 和底层,由于落潮阶段悬浮泥沙的浓度大于涨潮阶段,造成了底层潮泵项向海输运<sup>[18]</sup>;而2#站位潮泵项的量值在垂向上有向下递减的趋势,但其输运方向均为向陆输运。需要注意的是,1#和2#站位位置相近,但潮泵项的量值却差异较大,这可能是因为1#站位涨、落潮阶段悬浮泥沙浓度相近,导致其潮泵项输运量值较低。

湾口的3个站位,3#站位的平流输运项和潮泵项的输运均向陆,相近的输运方向导致两者叠加后总泥沙通量值较高。5#站位垂向各层的平流输运项的输运方向和量值近似,表层至 $0.8H$ 潮泵项的输运向陆,而底层则同样因落潮阶段较高的悬浮泥沙浓度导致潮泵项的输运转为向海。6#站位垂向各层的潮泵项输运均向陆,但各层的平流输运的方向则存在差异,其中表层至 $0.6H$ 的输运向陆,而 $0.8H$ 和底层则向海。结合4.1节的内容,在海流观测的两个潮周期内,6#站位在涨憩时刻前后水体中出现层化结构(图8),而在浅海区域,当水体中存在层化结构时,其会对潮流和余流的垂向结构造成明显的影响<sup>[32,33]</sup>,水体中表底的潮余流流速值和方向

会存在较大的差异(图10),这可能是导致平流输运方向转向的主要原因。同时由于层化现象的存在,底层泥沙的悬浮扩散得到抑制,而表层泥沙也会加速沉降,底层的悬浮泥沙浓度较高<sup>[30]</sup>,导致了除底层外,其余垂向各分层各输运项的量值较小。

湾外的3个站位,4#站位各层的平流输运在垂向上存在转向(图7),潮流的不对称导致垂向各层的潮泵项输运是向海的。7#站位垂向各层的平流输运存在差异,在表层和 $0.2H$ 向海,而中下层则因底层盐度相对较高的海水随着潮流沿地形上涌时,在下部形成向陆的正压力,导致平流输运转向陆<sup>[18]</sup>;流速较高的落潮流以及落潮阶段较高的悬浮泥沙浓度导致潮泵项输运向海。同时潮周期内水体中形成的层化结构使得泥沙的再悬浮及扩散得到抑制,表层悬浮泥沙浓度较低,虽然表层余流值较大但其输运通量值较小(图10),总的泥沙通量从表至底逐渐递增。8#站位同样由于层化结构的存在导致垂向各层的余流存在差异,进而影响了各层的泥沙输运,表层及 $0.2H$ 的平流输运方向不同于其余各分层;而落潮流占优以及落潮阶段的高浓度悬沙,导致了潮泵项向海输运。

## 5 结论

(1)冬季福宁湾附近海域从湾内向湾外,温度、盐度值整体呈现递增的趋势,并且在时间上表现出

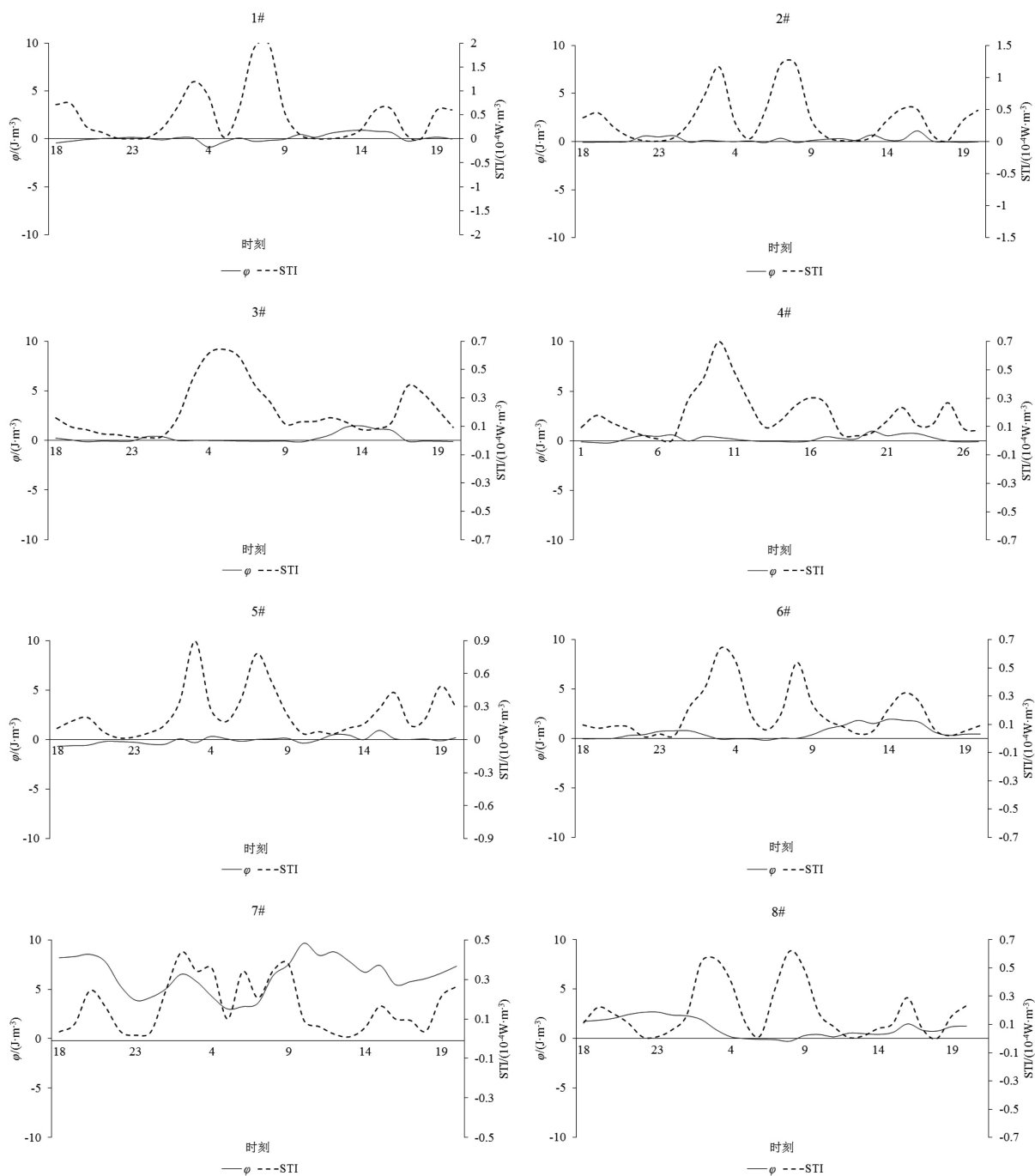


图 9 各站位水体混合所需势能  $\varphi$  (实线)、潮汐紊动引起的势能变化率 STI (虚线) 随时间的变化  
 Fig.9 Time series diagram of the potential energy required for water body mixing at each station (solid line) and the potential energy change rate (dotted line) caused by tidal turbulence

随潮流的变化的周期性。

(2) 研究区悬浮泥沙浓度整体呈现由湾内向湾外递减的趋势, 潮周期内悬浮泥沙浓度变化存在不对称性, 总体来说, 湾内及湾口处涨潮阶段悬浮泥沙浓度高, 湾外落潮阶段悬浮泥沙浓度较高。

(3) 从湾内向湾外, 随着水深的增加, 水体混合所需要的势能  $\varphi$  增大, 潮汐紊动引起的势能变化率

(STI) 减小, 潮周期内水体的垂向混合逐渐减弱, 悬浮泥沙浓度的垂向差异逐渐增大。

(4) 研究区悬浮泥沙运输通量主要为  $1.483 \sim 13.012 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ , 各站位垂向上整体的悬浮泥沙运输趋势, 在湾内及湾口为向陆运输, 在湾外转为向海运输; 研究区悬浮泥沙运输主要是由潮泵项运输引起的。

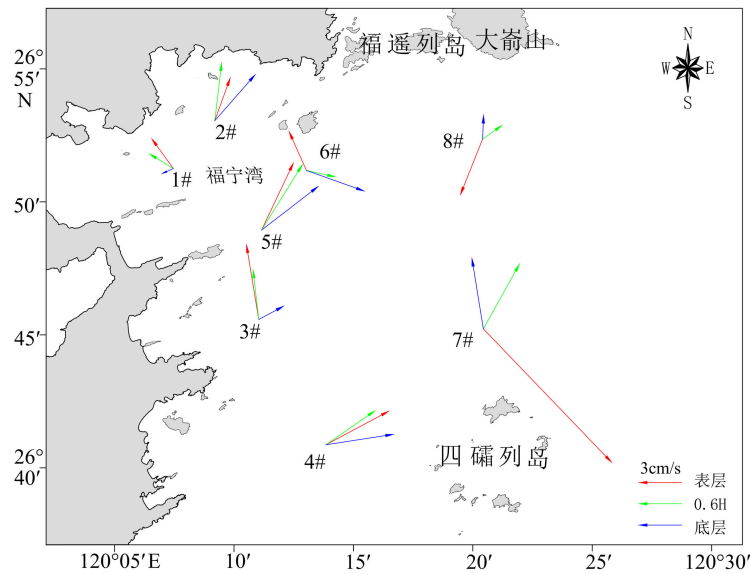


图 10 各站表层、0.6H、底层余流流矢图

Fig.10 Residual vector diagram of surface layer, 0.6h and bottom layer of each station

### 参考文献 (References)

- [1] 邢飞, 汪亚平, 高建华, 等. 江苏近岸海域悬沙浓度的时空分布特征[J]. *海洋与湖沼*, 2010, 41(3): 459-468. [XING Fei, WANG Yaping, GAO Jianhua, et al. Seasonal distributions of the concentrations of suspended sediment along Jiangsu coastal sea [J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 2010, 41(3): 459-468.]
- [2] 陈勇, 韩震, 杨丽君, 等. 长江口水体表层悬浮泥沙时空分布对环境演变的响应[J]. *海洋学报(中文版)*, 2012, 34(01): 145-152. [CHEN Yong, HAN Zhen, Yang Lijun, et al. The spatial and temporal distribution of suspended sediment concentration and its response to environmental change in the Changjiang Estuary [J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2012, 34(01): 145-152.]
- [3] 杨晓东. 乐清湾悬沙输移特性研究[D]. 浙江大学, 2010. [YANG Xiaodong. Study on transport characteristics of suspend sediment in Yueqing bay [D]. Zhejiang University, 2010.]
- [4] Prandle D. Tidal Characteristics of Suspended Sediment Concentrations [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 1997, 123(4): 341-350.
- [5] 石学法, 刘升发, 乔淑卿, 等. 东海闽浙沿岸泥质区沉积特征与古环境记录[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2010, 30(4): 19-30. [SHI Xuefa, LIU Shengfa, QIAO Shuqing, et al. Depositional feature sand paleoenvironmental records of the mud deposits in Min-Zhe coastal mud area, East China sea [J]. *Marine Geology and Quaternary Geology*, 2010, 30(4): 19-30.]
- [6] Liu G, J Zhu, Y Wang, H Wu, et al. Tripod measured residual currents and sediment flux: Impacts on the silting of the Deepwater Navigation Channel in the Changjiang Estuary [J]. *Estuarine Coastal & Shelf Science*, 2011, 93(3): 192-201.
- [7] Li L, H Wu, J T Liu, et al. Sediment Transport Induced by the Advection of a Moving Salt Wedge in the Changjiang Estuary [J]. *Journal of Coastal Research*, 2014, 31(3): 671-679.
- [8] 刘浩, 骆智斌, 潘伟然. 泉州湾水体结构的潮周期变化[J]. *台湾海峡*, 2009, 28(3): 316-320. [LIU hao, LUO Zhibin, PAN Weiran. Intra tidal variation of the water column in Quanzhou Bay [J]. *Journal of Oceanography in Taiwan Strait*, 2009, 28(3): 316-320.]
- [9] 刘浩, 潘伟然. 渤海层化结构及潮汐锋面季节变化的数值研究[J]. *水科学进展*, 2007(03): 398-403. [LIU Hao, PAN Weiran. Numerical simulation of the seasonal variations of the stratification and tidal front in the Bohai Sea [J]. *Advances in Water Science*, 2007(03): 398-403.]
- [10] 李霞, 胡国栋, 时钟, 等. 长江口南支南港的北槽枯季水体中混合、层化与潮汐应变[J]. *水运工程*, 2013(9): 79-88. [LI Xia, HU Guodong, SHI Zhong, et al. Mixing, stratification and tidal straining in dry season within the north passage of the south branch / south channel of the Changjiang River estuary [J]. *Port & Waterway Engineering*, 2013(9): 79-88.]
- [11] Rippeth T P, Fisher N R, Simpson J H. The Cycle of Turbulent Dissipation in the Presence of Tidal Straining [J]. *Journal of Physical Oceanography*, 2001, 31(8): 2458-2471.
- [12] 赵保仁, 曹德明, 李微弱, 等. 渤海的潮混合特征及潮汐锋现象[J]. *海洋学报(中文版)*, 2001, 23(4): 113-119. [ZHAO Baoren, CAO Deming, and LI Weifei, et al. Tidal mixing characters and tidal fronts phenomenon in the Bohai sea [J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2001, 23(4): 113-119.]
- [13] 张开毕. 福建近岸浅海沉积物元素丰度及含量变化特征[J]. *福建地质*, 2008, 27(04): 392-401. [ZHANG KaiBi. Characteristics of the elemental abundance and content of near-shore neritic sediment in Fujian Province [J]. *Geology of Fujian*, 2008, 27(04): 392-401.]
- [14] 刘炜, 李奶姜, 李婕. 福宁湾水质状况及其水体富营养化的初步探讨[J]. *海洋通报*, 2008(01): 111-115. [LIU Wei, LI Naijiang, LI Jie. Preliminary analysis on the state of water and eutrophication in the Funing Bay [J]. *Marine Science Bulletin*, 2008(01): 111-115.]
- [15] 江甘兴. 福建海区的潮汐和潮流[J]. *台湾海峡*, 1992(2): 89-94. [JIANG Ganxing. Tides and tidal currents in Fujian waters [J].

- Journal of Oceanography in Taiwan Strait, 1992(2): 89-94.]
- [16] 曾定勇, 倪晓波, 黄大吉. 冬季浙闽沿岸流与台湾暖流在浙南海域的时空变化[J]. 中国科学: 地球科学, 2012, 42(07): 1123-1134. [ZENG Dingyong, NI Xiaobo, HUANG Daji. Temporal and spatial variability of the ZheMin Coastal Current and the Taiwan Warm Current in winter in the southern Zhejiang coastal sea (in Chinese) [J]. *Scientia Sinica Terrae*, 2012, 42(07): 1123-1134.]
- [17] Guan B X. Patterns and Structures of the Currents in Bohai, Huanghai and East China Seas [J]. *Oceanology of China Seas*, 1994, 1: 17-26.
- [18] Li X, Zhu J, Rui Y, et al. Sediment trapping in the Changjiang Estuary: Observations in the North Passage over a spring-neap tidal cycle [J]. *Estuarine Coastal & Shelf Science*, 2016, 177: 8-19.
- [19] Yu Q, Y Wang, J Gao, et al. Turbidity maximum formation in a well-mixed macrotidal estuary: The role of tidal pumping [J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2014, 119: 7705-7724.
- [20] Trowbridge J H. A simple description of the deepening and structure of a stably stratified flow driven by a surface stress [J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 1992, 97(C10): 15529-15543.
- [21] Millero F J, Poisson A. International one-atmosphere equation of state of seawater [J]. *Deep Sea Research Part A, Oceanographic Research Papers*, 1981, 28: 625-629.
- [22] Simpson J H, Allen C M, Morris N C G. Fronts on the continental shelf [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1978, 83(C9): 4607-4614.
- [23] Simpson J H, Bowers D B. Models of stratification and frontal movement in shelf seas [J]. *Deep Sea Research Part A, Oceanographic Research Papers*, 1981, 28(7): 727-738.
- [24] Simpson J H, Brown J, Allen J M. Tidal Straining, Density Currents, and Stirring in the Control of Estuarine Stratification [J]. *Estuaries*, 1990, 13(2): 125-132.
- [25] 董朝锋, 李磊, 孟艳秋, 等. 磨刀门水道枯季大潮水体层化混合分析[J]. 水利水运工程学报, 2018(01): 48-57. [TONG Chaofeng, LI Lei, MENG Yanqiu, et al. Analysis of stratification-mixing mechanism during spring tide of dry season in the Modaomen waterway [J]. *Hydro-Science and Engineering*, 2018(01): 48-57.]
- [26] Simpson J H, Burchard H, Fisher N R, et al. The semi-diurnal cycle of dissipation in a ROFI: Model-measurement comparisons [J]. *Continental Shelf Research*, 2002, 22(11): 1615-1628.
- [27] 薛碧颖, 王厚杰, 张勇, 等. 闽北附近海域悬浮体输运及通量的季节变化[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2018, 38(05): 30-40. [XUE Biying, WANG Houjie, ZHANG Yong, et al. Seasonal variations of suspended sediments in transport and flux in the coastal area of the northern Fujian Province [J]. *Marine Geology and Quaternary Geology*, 2018, 38(05): 30-40.]
- [28] 汪亚平, 高抒, 贾建军. 浪流联合作用下潮滩沉积动力过程的高分辨率数据采集与分析[J]. 科学通报, 2006, 51(03): 339-348. [WANG Yaping, GAO Shu, JIA Jianjun. High-resolution data collection for analysis of sediment dynamic processes associated with combined current-wave action over intertidal flats [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2006, 51(03): 339-348.]
- [29] 李远. 近期长江口北槽水沙特性及悬沙浓度垂向分布规律[D]. 2018. [LI Yuan. Recent characteristics of flow and suspended sediment and vertical sediment concentration distribution pattern in the North Passage of Yangtze Estuary [D]. 2018.]
- [30] Geyer W R. The importance of suppression of turbulence by stratification on the estuarine turbidity maximum [J]. *Estuaries*, 1993, 16(1): 113-125.
- [31] 刘志宇. 强潮驱陆架海中的湍流与混合[D]. 中国海洋大学, 2009. [LIU Zhiyu. Turbulence and mixing in tidally energetic shelf sea [D]. Ocean University of China, 2009.]
- [32] Howarth M J. The effect of stratification on tidal current profiles [J]. *Continental Shelf Research*, 1998, 18(11): 1235-1254.
- [33] 鲍献文, 宋军, 姚志刚, 等. 北黄海潮流、余流垂直结构及其季节变化[J]. 中国海洋大学学报自然科学版, 2010, 40(11): 11-18. [BAO Xianwen, SONG Zhijun, YAO Zhigang, et al. The vertical structure and seasonal variation of the tide current and residual current in the North Yellow Sea [J]. *Periodical of Ocean University of China*, 2010, 40(11): 11-18.]