



海洋地质与第四纪地质

MARINE GEOLOGY & QUATERNARY GEOLOGY

福宁湾海域夏季大潮期悬浮泥沙输运特征及控制因素

伊兆晗, 胡日军, 李毅, 陈晓磁, 陈娟娟, 孟令鹏, 朱龙海, 张晓东

Characteristics and controlling factors of suspended sediment transportation in summer spring tide in Funing Bay

YI Zhaohan, HU Rijun, LI Yi, CHEN Xiaoci, CHEN Juanjuan, MENG Lingpeng, ZHU Longhai, and ZHANG Xiaodong

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16562/j.cnki.0256-1492.2021040401>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

南海北部陆坡神狐海域SH-CL38站位的粒度特征及沉积记录

Sediment grain size characteristics of the Core SH-CL38 in the Shenu area on the northern continental slope of the South China Sea
海洋地质与第四纪地质. 2021, 41(5): 90

海洋天然气水合物储层蠕变行为的主控因素与研究展望

Controlling factors and research prospect on creeping behaviors of marine natural gas hydrate-bearing-strata
海洋地质与第四纪地质. 2021, 41(5): 3

南黄海崂山隆起二叠系砂岩储层特征及其油气勘探前景

Characteristics and hydrocarbon prospects of the Permian sandstone reservoirs of the Laoshan Uplift, South Yellow Sea
海洋地质与第四纪地质. 2021, 41(5): 181

东海南部陆架水体2011年夏季温盐结构及其对台湾暖流和黑潮入侵的指示

The summer thermohaline structure of 2011 of the southern East China Sea shelf and its implications for the intrusion of Taiwan Warm Current and Kuroshio Current
海洋地质与第四纪地质. 2021, 41(5): 151



关注微信公众号，获得更多资讯信息

DOI: 10.16562/j.cnki.0256-1492.2021040401

福宁湾海域夏季大潮期悬浮泥沙输运特征及控制因素

伊兆晗¹, 胡日军^{1,2}, 李毅³, 陈晓磁³, 陈娟娟³, 孟令鹏⁴, 朱龙海^{1,2}, 张晓东^{1,2}

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 352100

4. 同济大学海洋与地球科学学院, 上海 200082

摘要:根据福宁湾夏季水文泥沙实测资料,分析了研究区悬浮泥沙浓度变化特征,研究了悬浮泥沙的输运机制,探讨了悬浮泥沙输运的控制因素。结果表明,平面上,悬浮泥沙浓度从湾内到湾外呈现递减的分布趋势;垂向上,各站位平均含沙量由底层向表层逐层递减。悬浮泥沙在湾内表现为向陆方向输运,在湾口和湾外整体则向西南方向输运,平流输运在悬沙输运中占主导地位。正常天气下,研究区夏季的悬沙净输运方向与余流方向基本一致;西南强风天气下,研究区悬浮泥沙的浓度增大,其输运方向受风向控制指向东北向。闽浙沿岸流(夏季)活动较弱,对研究区悬浮泥沙的输运基本没有影响。

关键词:悬浮泥沙;时空变化;输运机制;控制因素;福宁湾

中图分类号:P736.21 文献标识码:A

Characteristics and controlling factors of suspended sediment transportation in summer spring tide in Funing Bay

YI Zhaohan¹, HU Rijun^{1,2}, LI Yi³, CHEN Xiaoci³, CHEN Juanjuan³, MENG Lingpeng⁴, ZHU Longhai^{1,2}, ZHANG Xiaodong^{1,2}

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

4. School of Ocean and Earth Science, Tongji University, Shanghai 200082, China

Abstract: Using the measured hydrological and sediment data in the summer Funing Bay, the variation characteristics of suspended sediment concentrations are analyzed, the transport mechanism of suspended sediment studied, and the controlling factors of suspended sediment transportation discussed in this paper. The results show that the suspended sediment concentration decreases from the inside to the outside of the bay in plane view. Vertically, the average sediment concentration of each station decreases from the bottom layer to the surface layer. Suspended sediment is transported landward within the bay, and moves southwestward in the mouth and outside the bay, and advection transport dominates the transport of suspended sediment. Under normal weather, the net transport direction of suspended sediment in the study area in summer is basically consistent with the residual flow direction. Under the southwest strong wind weather, however, the concentration of suspended sediment in the study area increases, and the transport direction turns to northeast. The Min-Zhe coastal current is weak in summer and has little effect on the transportation of suspended sediment in the study area.

Key words: suspended sediment; change in time and space; transport mechanism; control factors; Funing Bay

海湾地区的悬浮泥沙时空分布特征及输运机制一直是海洋沉积作用研究的热点问题之一^[1]。一方面海湾系统因为不同的地形地貌以及水动力条件而具有独特的悬浮泥沙输运特征^[2];另一方面,悬

浮泥沙在潮汐、风浪的作用下,不断呈现出动态的变化。在任何情况下,水体中的悬浮泥沙都是影响水质的一个重要因素^[3],并且水体中的悬浮泥沙在水动力作用下的输运会引起海底冲淤的变化,进而

资助项目: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);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);山东省自然科学基金资助项目“近 50 年来山东半岛滨海沙滩侵蚀演变的定量评价及其影响因素”(ZR2019MD037)

作者简介:伊兆晗(1995—),男,硕士,地质工程专业。E-mail: yizhaohan123@163.com

通讯作者:胡日军(1980—),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:2021-04-01; 改回日期:2021-06-07。文凤英编辑

影响海床演变和岸滩的稳定性^[4-5]。开展海湾悬浮泥沙输运机制研究,对于指导海洋工程建设与理解现代沉积过程都具有重要意义^[6]。

近年来,随着遥感卫星技术的进步,其更高的灵敏度和信噪比可以提供更高精度的悬浮泥沙数据信息^[7]。根据遥感数据来研究海域内悬浮泥沙的变化规律和输运趋势已被学者广泛应用到世界各地的河口和近海海域^[8-10]。韩国的 GOCI 卫星凭借其高时间分辨率的优点,能够满足对 TSS 短时间尺度内变化研究的需求,成为众多学者青睐的研究手段^[11-13]。杨雪飞^[14]利用数学模型与 GOCI 影像数据对比验证的方法研究了东海近海域悬浮泥沙浓度逐时变化,其数学模型对比结果表明 GOCI 影像数据精准,可以用于近岸水体的动态变化监测。Yin 和 Huang^[15]利用 GOCI-TSS 数据详细描述了东海近岸海域一次完整的潮周期变化;艾乔^[16]等将实测数据与遥感影像相结合,分析了辽东半岛近海泥区悬浮泥沙潮周期内的时空分布及变化趋势。因此,GOCI 数据应用于近岸海域悬浮泥沙浓度短时间尺度内的变化是可靠的。

通量机制分解法可以探讨不同环境下不同动力因子对物质输移贡献的大小,是悬浮泥沙输运机制研究中较为成熟可靠的方法。东海北部冬季悬浮泥沙在平流输沙项的作用下,为济州岛泥质区的沉积提供了大量物质来源^[17];而对于弱动力浅海海域,潮泵输运项在天津港附近海域的悬浮泥沙输运中起主导地位^[18]。在近海海域中,水深、流速以及悬沙浓度等其他条件复杂的相互作用会导致不同的输沙机制。在 Aulne River 附近海域,河口区域以欧拉余流输运项为主,但顺着由海向陆,斯托克斯漂移输运项和潮泵输沙项的作用逐渐增大,同时,潮周期内水体底部泥沙的再悬浮作用对泥沙输运量的贡献也不可忽视^[19]。

东海属于大陆架边缘海,长江和黄河为其提供了大量的沉积物源^[20],其泥沙输运活动相对活跃,悬浮泥沙含量具有典型的季节变化特征^[21]。冬季受陆架环流的作用,悬浮泥沙浓度较高;夏季受温跃层和盐跃层的影响,底层悬浮泥沙浓度较高,但整体悬浮泥沙浓度要低于冬季^[22-23]。福宁湾海域水深地形多变,岸线蜿蜒曲折,岬角相间,岛屿众多,工业生产和海水养殖等人类活动密集,水动力条件复杂多变。研究区海域悬浮泥沙浓度和输运趋势存在显著的季节性变化^[24],孟令鹏^[25]等主要探讨了冬季正常天气下悬沙的时空变化及输运机制,而关

于夏季悬浮泥沙输运机制以及控制因素的研究目前尚未有相关研究。因此,本文基于 2015 年福宁湾海域夏季大潮期水文泥沙观测资料,分析研究区海域悬浮泥沙输运机制,探讨悬浮泥沙输运控制因素,为复杂水动力环境下的海湾泥沙输运研究提供参考。

1 研究区概况

研究区位于福建省霞浦县东南部的福宁湾附近海域,水深较浅,湾内水深不足 12 m,湾外最大水深不超过 30 m。福宁湾湾口东开,面向东海,基岩海岸,岸线蜿蜒曲折,长约 85 km。湾内岛屿众多,分布有火烟山岛、大目岛、小目岛等;湾口处分布长表岛、屿尾岛、北澳岛等;湾外福瑶列岛、四礵列岛环峙。地理坐标范围为 $26^{\circ}40' \sim 26^{\circ}55' N$ 、 $120^{\circ}05' \sim 120^{\circ}25' E$, 观测站位见图 1。该海域为中亚热带季风湿润气候,年均降雨量 1100~1800 mm,季风特征明显,夏季以西南风和南风为主,且容易受到台风的影响,冬季多为东北风^[24]。来自西北太平洋的半日潮波流入东海后,主要部分流入黄海和渤海,而另外一部分则向浙闽方向的海域传播,形成了研究区以 M_2 分潮为主的正规半日潮^[26]。

2 数据来源与研究方法

2.1 数据来源

国家海洋局第三海洋研究所于 2015 年 7 月 2 日 10:00 至 7 月 3 日 12:00(大潮期)在福宁湾海域进行了多船同步 10 个站位连续 27 h 海流观测。海流观测主要采用 ADCP、AWAC 海流剖面仪,并按照规范中的六点法(表层、0.2H、0.4H、0.6H、0.8H、底层)提取数据。考虑到 ADCP、AWAC 在表层和底层约有 0.5 m 的盲区,因此在每个站位增加一台 Alec Compact EM 电磁海流计按六点法逐层逐时进行观测,以作校正。

为测验悬浮泥沙浓度,现场每小时按照六点法采集水样,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,称重在精度为 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。

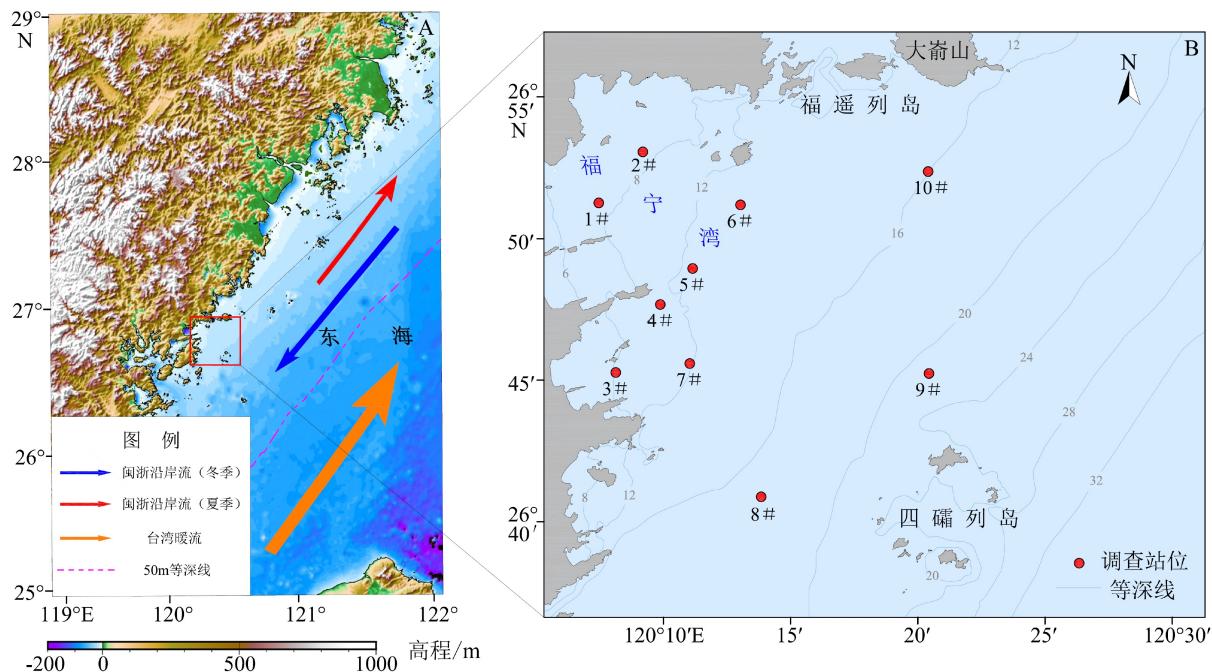


图 1 福宁湾海域调查站位图

A. 东海环流图(改绘自 Guan^[27]), B. 研究区调查站位图。

Fig.1 Location map of Funing Bay Survey Stations

A: East China Sea main circulation system (Repainted from Guan^[27]), B: Survey stations of the study area.

2.2 研究方法

2.2.1 潮流场数值模拟

利用 MIKE 21 对研究区海域进行潮流场模拟, 从模拟结果中提取研究区海域大潮期海流数据, 并绘制余流场矢量图。计算域坐标范围为 $25.808^{\circ}\sim27.366^{\circ}\text{N}$ 、 $119.672^{\circ}\sim121.142^{\circ}\text{E}$, 顺岸距离约为 168 km, 垂直岸线距离约为 70 km。为清楚了解研究区附近海域的潮流状况, 将研究区附近海域进行局部加密处理(图 2)。

2.2.2 悬浮泥沙浓度遥感反演

本文利用韩国海洋卫星中心提供的 GOCCI-TSS 影像来反演悬浮泥沙浓度, GOCCI-TSS 是基于 GOCCI 数据的二级产品, 其中的 TSS 是利用 GDPS 软件基于 Case-2 算法得到的产品。通过观察 2013—2017 年 GOCCI-TSS 影像的长时间序列, 挑选了正常天气大潮期(2014 年 7 月 28 日)和强风天气大潮期(2016 年 8 月 19 日)的遥感影像来分析研究区悬浮泥沙时空分布的变化特征。根据卫片选取时间, 从欧洲中期天气预报中心网站下载卫片对应日期的风场数据, 用 MATLAB 编程提取计算得到研究区域内的风速及风向数据(表 1)。

2.2.3 悬浮泥沙通量计算

目前机制分解法在泥沙输运机制方面研究中

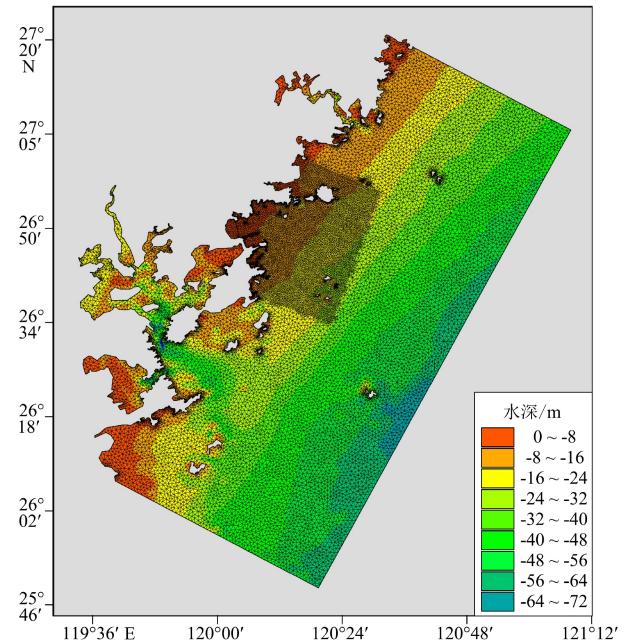


图 2 研究区海域数值模拟加密网格图

Fig.2 Refined grid for numerical simulation in the study area

较为成熟^[17,28], 因能直接确定影响通量变化的各种因素、相互作用及其贡献大小, 是目前通量计算研究中较为成熟和可靠的方法^[19]。

依据 Ingram^[29] 和 Uncles^[30] 等提出的用相对水深进行分解瞬时的物质输运量的方式, 潮周期 T_t 平

表 1 遥感卫片日期对应的风速风向
Table 1 The wind speed and direction corresponding to the date of the remote sensing image

时间	风速/(m/s)	风向/(°)	时间	风速/(m/s)	风向/(°)
2014.07.28 00:00	2.91	256	2016.08.19 00:00	8.38	228
2014.07.28 06:00	5.55	257	2016.08.19 06:00	8.98	222
2014.07.28 12:00	4.07	259	2016.08.19 12:00	11.46	224
2014.07.28 18:00	3.36	246	2016.08.19 18:00	14.87	232

均瞬时单宽悬沙输移通量 T 的计算式为:

$$\begin{aligned} T &= \frac{1}{T_t} \int_0^{T_t} \int_0^h u c d z_0 dt = \frac{1}{T_t} \int_0^{T_t} \int_0^1 u c h d z d t \\ &= h_0 \overline{u_0 c_0} + \langle h_t \overline{u_t} \rangle \overline{c_0} + \langle h_t \overline{c_t} \rangle \overline{u_0} + \langle h_t \overline{u_t c_t} \rangle \\ &\quad + h_0 \overline{u'_0 c'_0} + \langle h_t \overline{u'_t c'_t} \rangle + \langle h_t \overline{u'_t c'_0} \rangle + \langle h_t \overline{u'_t c'_t} \rangle \quad (1) \\ &= (T_1) + (T_2) + (T_3) + (T_4) + (T_5) \\ &\quad + (T_6) + (T_7) + (T_8) \end{aligned}$$

式中: T_1 -欧拉余流输运量; T_2 -斯托克斯漂移输运量; T_1+T_2 -拉格朗日平流输运量, 即平流输运项; T_3 -潮汐与悬浮泥沙含量的潮变化相关项; T_4 -悬浮泥沙与潮流场变化相关项; T_3+T_4 -潮泵作用输沙项, 是由 h_t , $\overline{u_t}$, $\overline{c_t}$ 三者相关产生的泥沙输运; T_5 -垂向流速变化和悬浮泥沙浓度变化的相关项, 为垂向上的净环流产生的输沙项; T_6 , T_7 -时均量和潮汐振动切变引起的剪切扩散; T_8 -垂向潮振荡切变作用产生的泥沙输运。

3 结果

3.1 潮流及余流特征

为方便讨论, 根据观测站位所在的地理位置特征, 将研究区 1# 和 2# 站位归为湾内站位, 3#、4#、5#、6# 和 7# 站位归为湾口站位, 8#、9# 和 10# 归为湾外站位。研究区湾内受湾顶地形、岛屿及岸线的影响, 表现出明显的往复流性质, 流向以 NW-NE 为主; 湾口处 3# 和 6# 站位往复流以 SW-NE 为主, 其余站位旋转流现象相对明显; 而处于等深线 12 m 以外的湾外区域表现为带一定旋转性质的往复流(图 3)。潮流从海湾外向海湾内移动时, 受滩面摩擦力的影响, 水体能量不断衰减, 导致流速降低^[31]。从平面上看, 研究区海域潮流湾外流速较大, 而湾口和湾内流速较小。

余流指示着水体的运移和交换情况, 是进一步研究物质输运的基础^[32]。根据余流计算结果(表 2)绘制各站位垂向余流矢量图(图 4)。余流最大值出

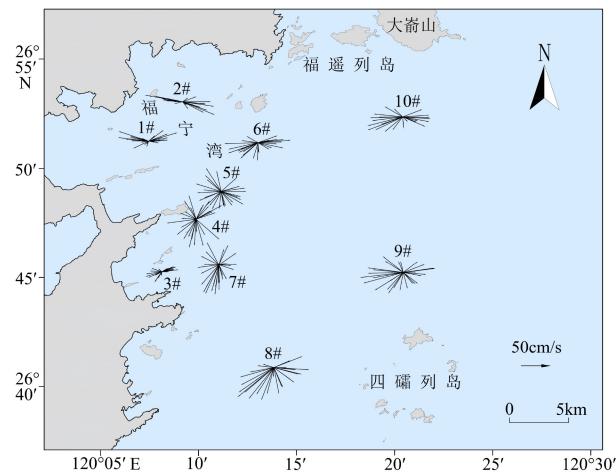


图 3 各站位垂向平均海流矢量图

Fig.3 Vertical mean current vectors at each station

现在 8# 站位 $0.2H$, 流速为 20.7 cm/s , 方向为 195° ; 最小值出现在 3# 站位底层, 流速为 0.2 cm/s , 对应方向为 172.9° 。研究区湾内余流受水深地形的影响, 方向由表层到底层差异较大, 表层和近表层余流流向以 NW 向为主, 底层和近底层偏 NE 向; 湾口处各站位的各层余流方向较为一致, 主要为 SW 流向, 6# 和 7# 站位余流流速较大, 其余 3 个站位流速较小; 湾外离岸处余流流速较大, 且各个层位的余流方向相近, 以 SW 流向为主。从整体上看, 各个站位余流表层和近表层余流较大, 余流流速由表层到底层逐渐减小。

本文选取长门、北礁两个验潮站位和 2#、6#、9# 三个海流观测站位的实测数据与数值模拟结果对比验证(图 5 和图 6), 结果显示研究区数值模拟得到的流速流向与实测资料吻合度较高, 表明通过数值模拟能够比较真实地反映研究区潮流场的特征。根据数值模拟结果(图 7), 研究区海域大潮期余流流速主要为 $1 \sim 20 \text{ cm/s}$, 余流流速整体上表现为由湾内到湾外逐渐增大的趋势, 余流流速最大值出现在湾外的四礁列岛附近。余流流向湾内表现为向岸输运, 湾口与湾外处余流指向西南方向, 这与余流计算结果基本一致, 说明数值模拟结果能够

表 2 各站位余流流速流向统计
Table 2 Residual flow statistics for each station

站位	表层		0.2H		0.4H		0.6H		0.8H		底层	
	流速/ (cm/s)	流向/ (°)										
1#	13.4	277	5.8	308	10.9	279	4.3	359	4.9	18	6.3	292
2#	9.2	322	7.2	327	1.9	35	4.1	52	7.0	55	5.7	57
3#	2.4	215	1.7	168	1.7	230	2.1	238	1.4	206	0.2	173
4#	1.8	305	2.1	276	2.1	267	2.4	258	2.8	231	2.4	247
5#	2.2	263	3.8	276	2.2	239	1.2	26	1.1	347	2.1	28
6#	13.5	190	10.8	200	8.3	199	5.7	204	5.0	194	4.0	194
7#	12.7	213	12.3	211	11.1	206	10.3	206	8.7	198	7.6	200
8#	20.2	197	20.7	195	17.0	193	14.7	192	13.8	194	13.9	192
9#	14.3	256	15.4	251	10.2	247	9.0	237	6.9	247	7.3	248
10#	12.5	219	12.1	226	7.5	230	8.2	225	5.8	242	5.0	230

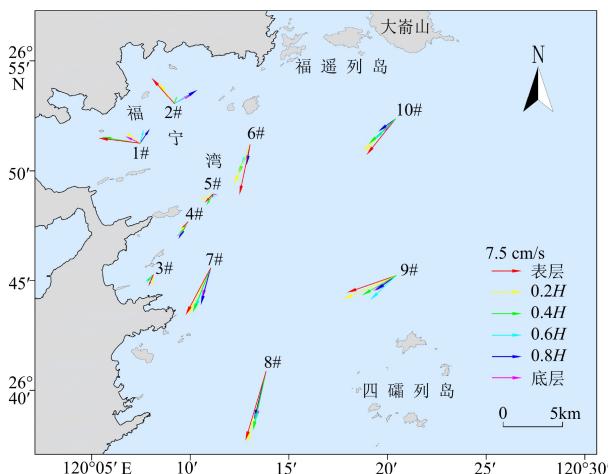


图 4 各站位垂向余流矢量图

Fig.4 Vertical residual current vector of each station

比较真实地反映研究区海域余流场的特征。

3.2 悬浮泥沙时空变化特征

3.2.1 潮周期内悬浮泥沙浓度变化特征

悬浮泥沙浓度在大潮周期的尺度下变化较为

复杂,各个站位悬浮泥沙浓度在单日内一般出现2~6次峰值,尤以湾内海域明显(图8)。大潮期间,潮周期内悬浮泥沙浓度变化与潮位变化的相关性较好。湾内站位在涨潮中间时刻和落潮中间时刻,悬浮泥沙浓度受流速引起的再悬浮作用迅速增大,而在高潮和低潮时刻水体流速下降,再悬浮作用减弱,表层的悬浮泥沙下沉,导致水体中垂向平均悬浮泥沙的浓度减小。湾口处和湾外海域,虽然水深增加,但流速引起的悬浮泥沙浓度变化滞后现象并不明显。研究区海域涨、落潮平均悬浮泥沙浓度差异在0.31~5.56 mg/L之间,最大浓度差异出现在2#站位,落潮平均悬浮泥沙浓度要比涨潮时高。整体来看,大潮期间涨潮与落潮平均悬浮泥沙浓度变化相对差异较小。

平面上,通过各站位涨、落潮垂向平均悬浮泥沙浓度图(图9)可以看出,悬沙浓度整体上表现为湾内最大,湾口次之,湾外最小。通过对比各站位由表层到底层的平均悬沙浓度(表3),表底层悬沙浓度变化最大的是2#站位,底层悬沙浓度约为表层

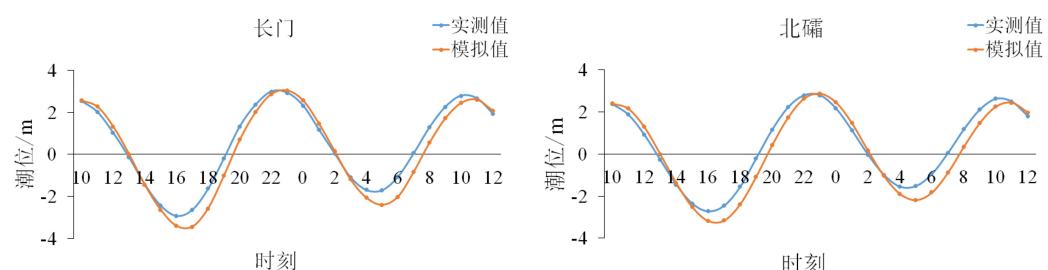


图 5 长门、北礁站位潮位验证图

Fig.5 Tide level verification at Changmen and Beishuang stations

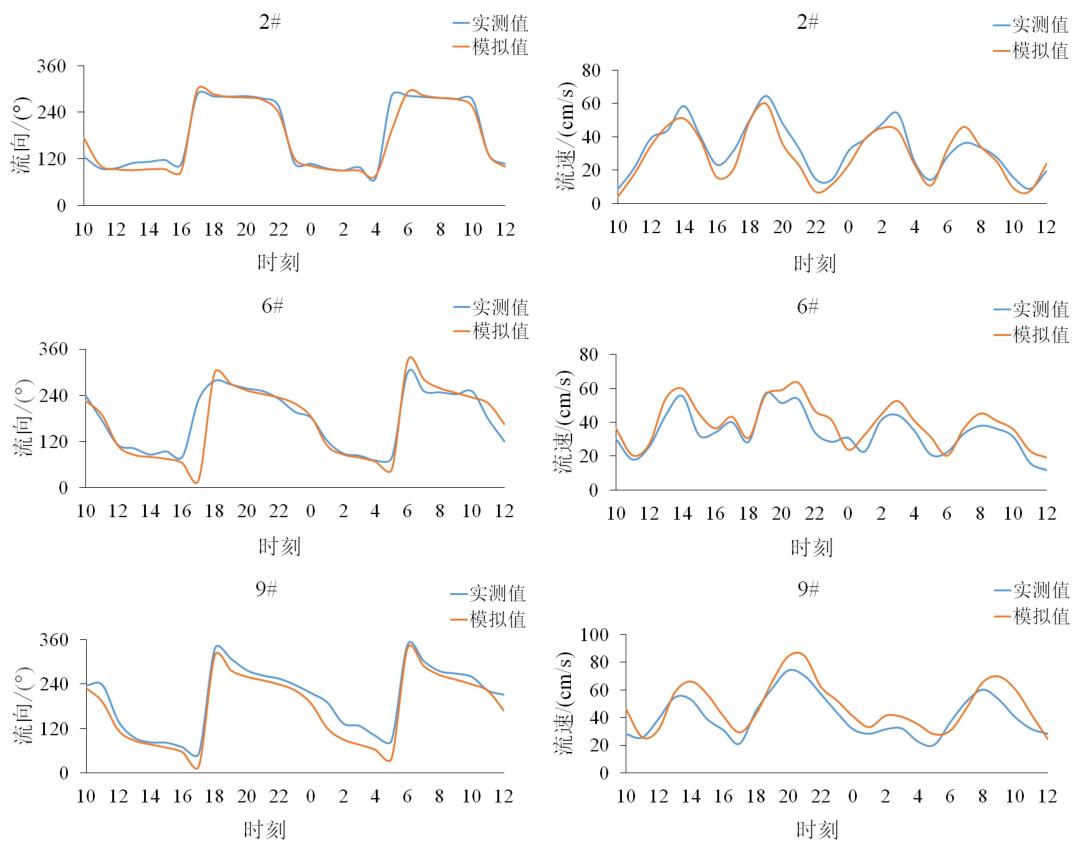


图 6 2#、6#、9#站位流向、流速验证图

Fig.6 Verification of flow direction and velocity at 2#, 6# and 9# stations

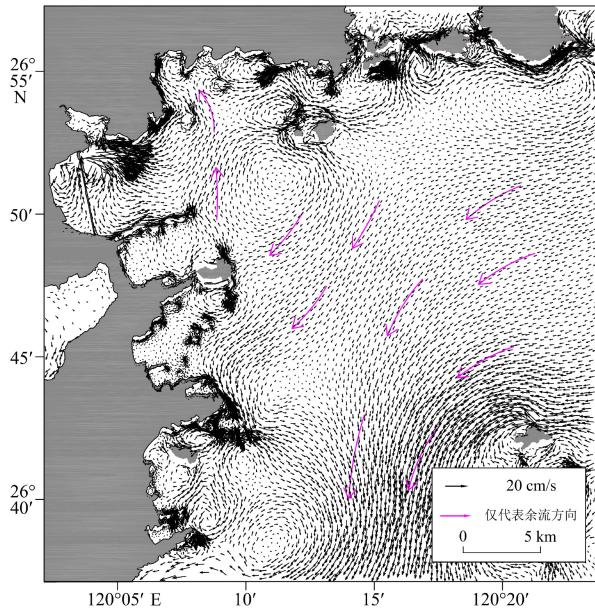


图 7 正常天气下研究区海域大潮期余流分布图

Fig.7 Spring tide residual current distribution in the study area under normal weather

的 3.5 倍; 9# 站位悬沙浓度在垂向上变化最小, 各层之间的悬沙浓度差值在 0.2~9.1 mg/L 之间。各站位的最大含沙量均出现在底层, 最大含沙量值出现

在 2# 站位底层, 为 91.6 mg/L。研究区悬浮泥沙浓度的垂向分布整体表现为由底层向表层递减。

3.2.2 强风天气下悬浮泥沙浓度的时空变化特征

本文选取了正常天气与强风速天气的 GOCE 遥感影像进行对比, 来揭示强风天气对研究区海域表层悬浮泥沙浓度的影响。因研究区域相对较小, 受卫星工作时间的限制以及云层遮挡的影响, 湾内影像缺失严重, 故重点讨论湾口和湾外海域表层悬浮泥沙浓度变化。根据潮位变化以及 GOCE 卫星工作时段, 分别选取了涨潮中间时刻和落潮中间时刻的影像, 结合福宁湾湾口开向以及地形因素挑选 A(红色)、B(蓝色)两个区域代表湾口和湾外海域(图 10、图 11), 利用两个区域典型时刻悬浮泥沙浓度进行对比(表 4)。

2016 年 8 月 19 日大潮期研究区海域平均风速为 10.92 m/s, 风向为西南向(表 1)。通过对比可以看出(图 10、图 11), 涨潮中间时刻, 强风天气下研究区湾口海域表层悬浮泥沙浓度约为正常天气下的 1.3 倍, 湾外海域表层悬浮泥沙在强风作用以及潮流作用的叠加作用下, 其悬浮泥沙浓度是正常天气下的 1.6 倍, 尤其以湾外南侧海域明显。落潮中间时刻研究区海域表层悬浮泥沙浓度变化与涨潮

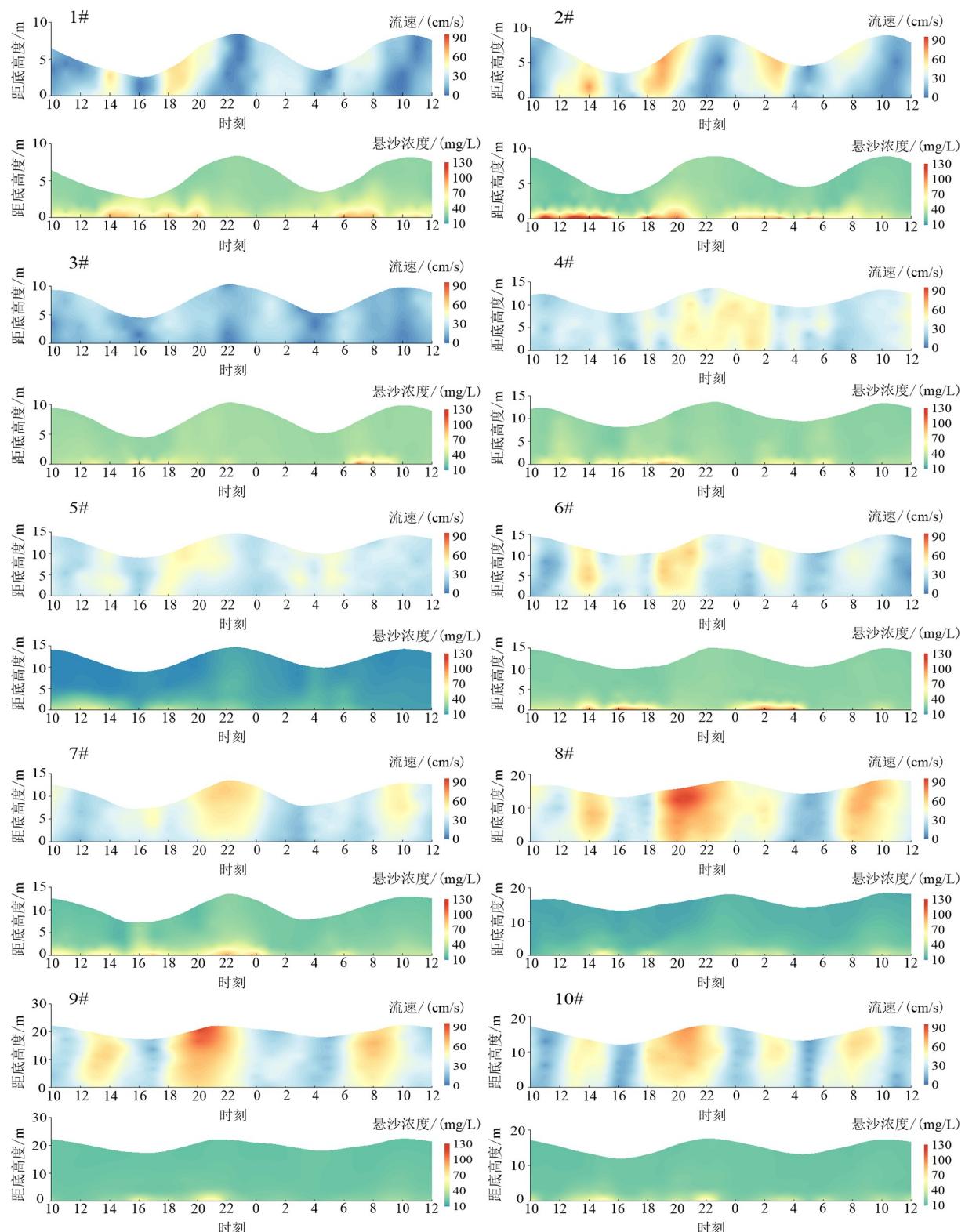


图 8 各站位流速与悬浮泥沙浓度时间序列图

Fig.8 Time series of velocity and suspended sediment concentration at each station

中间时刻规律相似, 湾口和湾外海域悬浮泥沙浓度大风天气下约为正常天气下的 1.3 倍, 湾外海域表层悬浮泥沙浓度在强风天气下显著增大。整体来看, 强风天气对湾口和湾外海域水体表层悬浮泥沙浓度影响较大, 与正常天气相比, 强风作用以及潮

流作用相叠加, 导致水体表层中悬浮泥沙浓度增大。

3.3 悬浮泥沙输运通量

通过通量机制分解法计算得到研究区内各个站位的悬浮泥沙输运项输沙率(表 5)。研究区海域

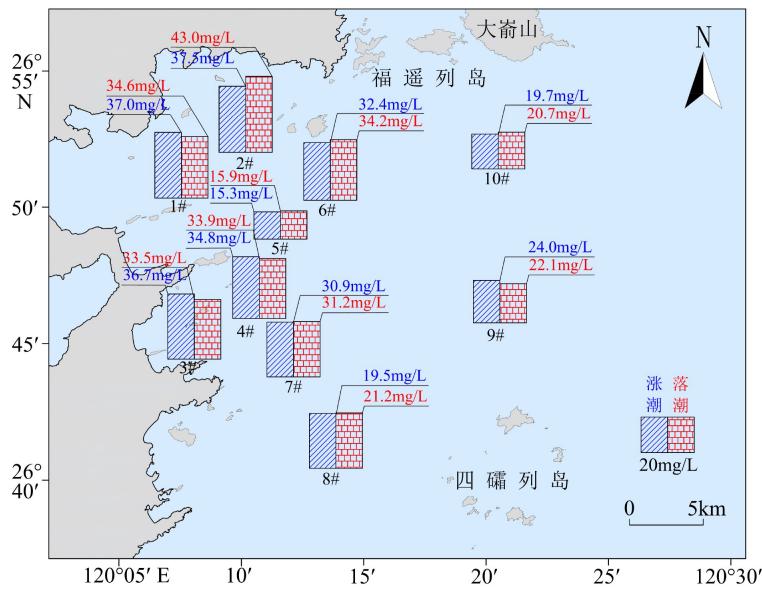


图9 各站位涨、落潮垂向平均悬浮泥沙浓度图

Fig.9 Vertical average suspended sediment concentration of rising and falling tides at each station

表3 各层位平均悬浮泥沙浓度

Table 3 Average suspended sediment concentration
in each layer

站位	表层	mg/L				
		0.2H	0.4H	0.6H	0.8H	底层
1#	27.8	32.0	29.8	39.9	52.1	59.1
2#	26.4	26.9	28.4	30.9	44.4	91.6
3#	31.3	31.7	32.3	32.9	34.8	48.9
4#	28.8	29.3	30.1	31.5	33.7	52.0
5#	9.9	10.2	10.9	12.9	17.5	27.5
6#	26.4	26.7	27.0	28.7	31.7	57.9
7#	22.0	22.7	24.0	26.9	33.7	55.8
8#	15.2	15.6	16.5	18.3	22.0	35.2
9#	19.9	20.1	20.7	21.6	23.2	32.3
10#	15.7	15.8	16.3	17.4	19.7	34.9

最大输沙率出现在湾外的8#站位，净输沙率($T_{\text{总}}$)为 $47.93 \text{ g}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{m}^{-1}$ ，输沙方向为 197° ；最低的是2#站位，净输沙率($T_{\text{总}}$)为 $4.75 \text{ g}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{m}^{-1}$ ，输沙方向为 279° 。湾外的8#站位欧拉余流输沙项(T_1)最大，为 $44.82 \text{ g}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{m}^{-1}$ ，方向为 196° ；斯托克斯漂流输运项(T_2)最大为 $12.67 \text{ g}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{m}^{-1}$ ，对应方向为 201° ，出现在湾口处的7#站位。湾内的2#站位垂向净环流输沙项(T_5)最大，为 $4.15 \text{ g}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{m}^{-1}$ ，对应输沙方向为 33° 。潮泵输沙项(T_3+T_4)整体较低，只有7#站位超过了 $1 \text{ g}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{m}^{-1}$ ；所有站位 $T_6+T_7+T_8$ 项输沙均低于 $1 \text{ g}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{m}^{-1}$ 。

研究区海域从湾内到湾口再到湾外，所有站位

的欧拉余流输沙项(T_1)和斯托克斯漂流输运项(T_2)的输运方向与净输沙($T_{\text{总}}$)的输沙方向较为一致。潮泵输沙项(T_3+T_4)除1#和5#外，其余站位的输沙方向与净输沙($T_{\text{总}}$)方向也有较好的契合。垂向净环流输沙项(T_5)在湾内的1#和2#站位占比较大，在其他站位影响较小。 $T_6+T_7+T_8$ 输沙项总体的输沙量较小，对净输沙($T_{\text{总}}$)影响不大，甚至可以忽略。研究区净输沙量整体上呈现近岸小、离岸高的格局。

4 讨论

4.1 悬浮泥沙输运规律

根据单宽输沙率计算各个输沙项占比(表6)，通过对比发现各个站位的输沙分项由于存在方向差异，输沙占比差异较大，表明其对输沙率的贡献相差也较大，导致湾内、湾口和湾外有着不同的悬浮泥沙输运机制。

湾内的1#和2#站位，以欧拉余流输运项(T_1)为主，其次是斯托克斯漂流输运项(T_2)和垂向净环流输运项(T_5)，其余输沙项占比较低。湾内欧拉余流输运项(T_1)分别占到了121.5%和140.9%，在悬沙输运中起主导作用；斯托克斯漂流输运项(T_2)和垂向净环流输运项(T_5)对悬沙的输运贡献相差不大。由于湾内水体混合较弱，垂向上悬沙浓度差异相对较大，并且垂向上余流流向差异较大。受水深地形的影响，余流在垂向上各向差异以及悬沙浓度垂向分布不均会产生垂向净环流输沙^[33-34]。因此，垂向

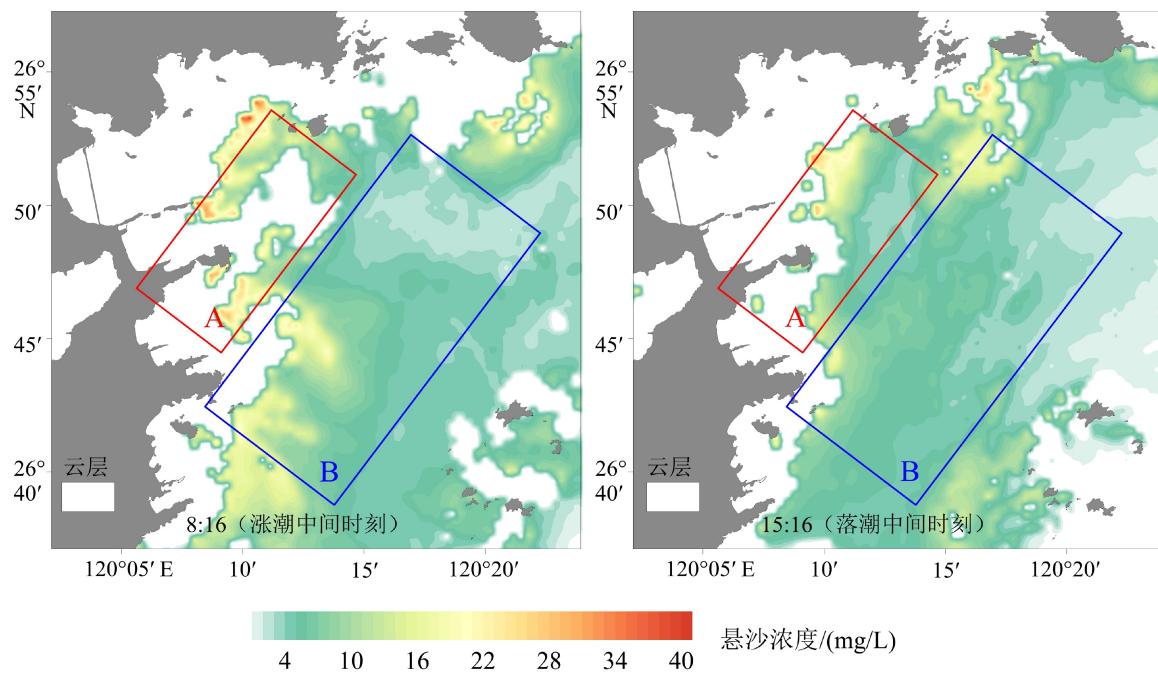


图 10 正常天气大潮遥感反演影像

Fig.10 Remote sensing inversion of spring tides in normal weather

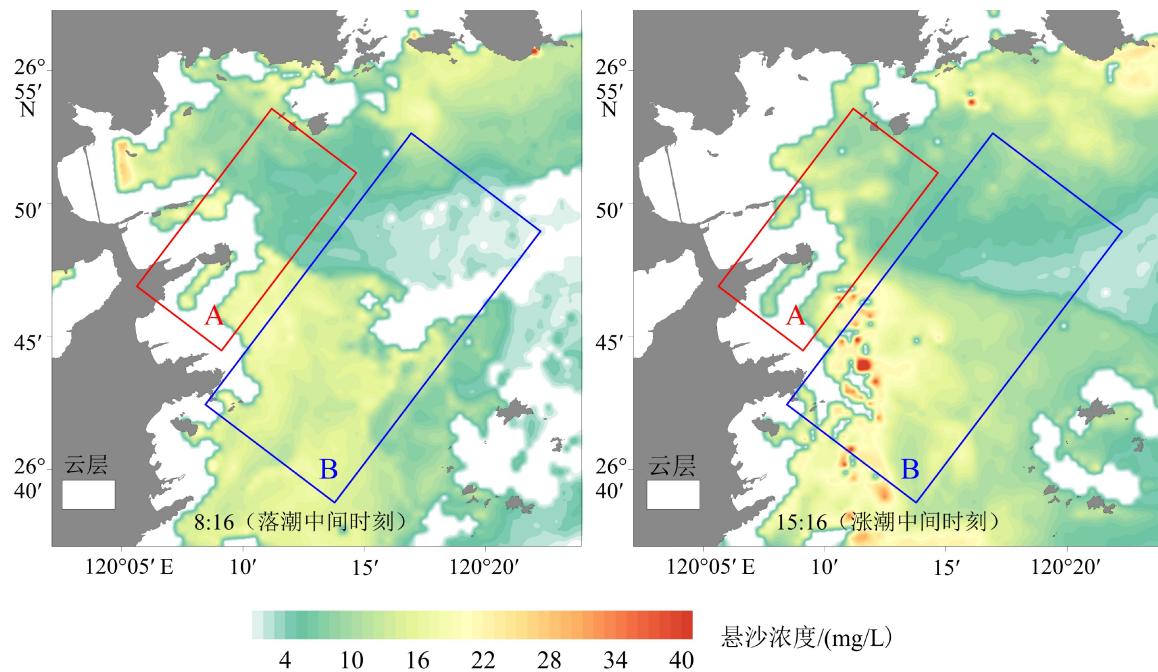


图 11 西南强风天气大潮遥感反演影像

Fig.11 Remote sensing inversion image of spring tide in southwest strong wind weather

净环流输运项(T_5)对湾内悬浮泥沙的输运有较大影响。虽然湾内悬浮泥沙浓度相对较高,但垂向余流的方向差异较大,故湾内悬浮泥沙净输沙率较小,输运方向指向近岸方向。

湾口处的 3#、4# 和 5# 站位的悬沙输运受欧拉余流输运项(T_1)和斯托克斯漂流输运项(T_2)的影响较大,垂向净环流输沙(T_5)及其他输运项影响较小。

潮周期内潮汐变化量(h_t)与潮流变化量(\bar{u}_t)正相关较强,斯托克斯漂流输运项(T_2)输沙贡献有所增加;水体混合状态相对于湾内较好,垂向悬浮泥沙浓度梯度较小,垂向净环流输运项(T_5)作用较小;其他悬沙输运贡献较低。整体以平流输沙项(T_1+T_2)为主,且余流较小,净输沙率较低,输运方向为相对靠近湾内的 SW 向。6# 和 7# 站位欧拉余流输沙项

表4 正常天气与强风天气悬浮泥沙浓度

Table 4 Suspended sediment concentration in normal and strong wind weather

mg/L

区域	正常天气						强风天气					
	涨潮中间时刻			落潮中间时刻			涨潮中间时刻			落潮中间时刻		
	最小	最大	平均	最小	最大	平均	最小	最大	平均	最小	最大	平均
A	4.76	30.04	7.95	3.65	27.36	7.10	5.76	36.56	10.23	4.24	22.12	9.71
B	2.87	21.74	5.64	2.55	17.16	5.12	3.56	44.56	9.42	3.57	19.88	7.73

表5 各站位输沙率

Table 5 Sediment transport rate of each station

站位	输沙项	$\text{g} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$						
		T_1	T_2	T_1+T_2	T_3+T_4	T_5	$T_6+T_7+T_8$	$T_{\text{总}}$
1#	输沙率	11.40	3.09	12.24	0.23	2.91	0.33	9.39
	方向	301	220	287	185	79	133	293
2#	输沙率	6.69	2.74	4.61	0.25	4.15	0.50	4.75
	方向	350	324	329	288	33	142	279
3#	输沙率	3.93	3.02	6.85	0.01	0.18	0.06	6.62
	方向	210	184	187	179	256	263	188
4#	输沙率	4.91	7.22	11.37	0.30	0.21	0.07	11.78
	方向	248	207	223	226	187	70	222
5#	输沙率	3.14	4.19	6.31	0.19	0.91	0.16	5.44
	方向	273	211	237	181	68	102	232
6#	输沙率	30.35	6.32	36.23	0.17	2.19	0.28	34.22
	方向	202	226	206	239	23	121	206
7#	输沙率	30.04	12.67	42.68	1.04	1.89	0.62	41.41
	方向	206	201	205	192	50	39	203
8#	输沙率	44.82	4.85	49.46	0.43	1.81	0.27	47.93
	方向	196	214	198	204	24	74	197
9#	输沙率	30.35	6.32	36.23	0.17	2.19	0.28	34.22
	方向	202	226	206	239	23	121	206
10#	输沙率	25.15	5.33	30.35	0.29	1.66	0.29	28.76
	方向	233	247	235	268	47	104	236

(T_1)占主导地位, 斯托克斯漂流输运项(T_2)次之, 其他悬沙输运项影响甚微。由于余流流速相对较大, 欧拉余流输沙项(T_1)占比最大; 水体混合程度较高, 垂向悬浮泥沙浓度差异较小, 垂向净环流输运项(T_5)占比较低。6#和7#站位以平流输沙项(T_1+T_2)为主, 余流速度相对较大, 且方向较为一致, 故净输沙率较高, 输运方向为相对靠近湾外的SW向。

湾外3个站位悬浮泥沙输运项以欧拉余流输运项(T_1)为主, 其次是斯托克斯输运项(T_2), 其余输沙

表6 各站位输沙项占比

Table 6 Proportion of sediment transport items at each station

%

站位	T_1	T_2	T_1+T_2	T_3+T_4	T_5	$T_6+T_7+T_8$
1#	121.5	32.9	130.4	2.4	31.0	11.4
2#	140.9	57.6	97.0	5.2	87.4	23.5
3#	59.3	45.6	103.4	0.2	2.7	1.2
4#	41.7	61.2	96.5	2.5	1.8	0.7
5#	57.8	77.0	116.1	3.5	16.7	3.4
6#	88.7	18.5	105.9	0.5	6.4	1.2
7#	72.6	30.6	103.1	2.5	4.6	1.5
8#	93.5	10.1	103.2	0.9	3.8	0.6
9#	88.7	18.5	105.9	0.5	6.4	1.2
10#	87.4	18.5	105.5	1.0	5.8	1.1

项贡献甚微。湾外欧拉余流输运项(T_1)占到了主要地位, 为88.7%~93.5%; 潮汐变化量(h_t)与潮流变化量(\bar{u}_t)正相关较弱, 且湾外水体悬浮泥沙浓度相对较低, 悬沙输运受斯托克斯输运项(T_2)影响明显低于湾内和湾口; 水体混合比较均匀, 垂向上的悬沙交换比较充分, 垂向净环流项(T_5)对输沙贡献较小, 只有3.8%~6.4%。总体来说, 湾外各层余流流向趋于一致, 且流速较大, 整体的输沙率较大, 平流输沙项(T_1+T_2)起主导作用, 净输沙率达到了28.76~47.93 $\text{g} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$, 输运方向为SW向。

研究区海域悬浮泥沙输运项整体以平流输沙(T_1+T_2)为主; 垂向净环流(T_5)是仅次于平流输沙(T_1+T_2)的贡献项, 从湾内到湾口再到湾外, 其对泥沙输运影响逐渐减小; 其余输沙项对泥沙输运的影响可以忽略不计。

4.2 悬浮泥沙输运控制因素

大量研究结果表明, 近海悬浮泥沙的分布及输运受多种因素的制约, 例如潮流、沿岸流、强风和季节变化等均会对水体中悬浮泥沙的分布及输运

产生较大的影响^[35-36]。综合分析讨论各种因素对悬浮泥沙输运的影响, 有利于了解海洋沉积动力的过程, 也才能对海域整体的沉积动力环境有更清楚的认识。

4.2.1 海流对悬浮泥沙输运的影响

根据数值模拟结果(图 12), 研究区海域湾内潮流为典型的往复流, 涨潮时潮流整体由东向西流, 落潮流整体由西向东流, 因此, 悬浮泥沙随涨落潮做往复运动, 悬浮泥沙净输运方向与潮流的主流向基本一致, 净输运方向指向湾内。湾口处海域受岛屿、海湾地形的影响, 潮流场相对较为复杂, 潮流的旋转性质显著增强, 潮流的多变导致悬浮泥沙的净输运方向与潮流的主流向存在一定差异, 而与余流方向一致, 主要向西南方向输运。湾外海域相对开阔, 虽然潮流的往复流运动形式增强, 但仍以旋转流为主, 因此, 悬浮泥沙的净输运方向与潮流的主流向并不一致, 而与余流方向基本一致, 主要向西南方向输运。

研究区悬浮泥沙随着涨潮流整体由湾外向湾内输运, 随着落潮流由湾内向湾外输运, 但泥沙净输运方向与潮流的主流向并不一致, 而与余流方向基本一致。因此, 余流方向基本可以指示研究区悬浮泥沙的净输运趋势。根据研究区余流场特征(图 7), 夏季正常天气下, 研究区海域由湾内向湾外余流流速逐渐增大。湾内悬浮泥沙浓度较大, 但余流流速相对较小, 水体表层到底层流向差异较大, 故湾内的悬浮泥沙输运通量较小; 湾口处悬浮泥沙浓度相对减小, 但余流流速增大, 且余流垂向上流

向相近, 悬浮泥沙输运通量与湾内相比较大; 湾外虽然悬浮泥沙浓度最小, 但余流流速较大, 而且各层位余流流向相近, 整体的悬浮泥沙输运量较大。受余流控制, 研究区夏季正常天气下悬浮泥沙输运整体上表现为湾内向近岸方向输运, 而湾口和湾外海域悬浮泥沙向西南方向输运。

4.2.2 强风天气对悬浮泥沙输运的影响

强风天气不仅会增大水体流速, 使水体中的悬浮泥沙浓度显著提高^[37], 甚至还会改变海域的潮流特征, 对泥沙输运方向以及海底冲淤产生较大影响^[38]。

为了进一步探讨强风对悬浮泥沙输运的影响, 本文模拟了西南强风天气下(风速为 10 m/s)大潮期的余流场(图 13)与正常天气下大潮余流场(图 7)比较, 强风天气对研究区海域余流影响显著。湾内余流流速略有增大, 为 3~15 cm/s, 流向变化相对较小, 均指向近岸方向。由于湾内岸线曲折, 受海湾和岛屿的遮蔽, 湾内水动力条件变化相对较小, 因此, 强风对其总体影响相对较小。湾口处和湾外海域, 地形相对开阔, 余流受风的影响显著, 其方向由正常天气下的西南流向变为东北流向。悬沙通量计算结果表明, 研究区海域泥沙净输运方向与余流基本一致, 而余流方向可以指示悬浮泥沙的净输运趋势^[39]。结合强风天气下的余流场(图 13), 强风改变了研究区的余流方向, 进而改变了悬浮泥沙的输运方向, 使其由正常天气下的西南向变为东北向, 对泥沙输运趋势影响显著。

研究区悬浮泥沙输运以平流输运为主, 因此, 悬沙净输运主要受悬沙浓度和余流流速控制。一

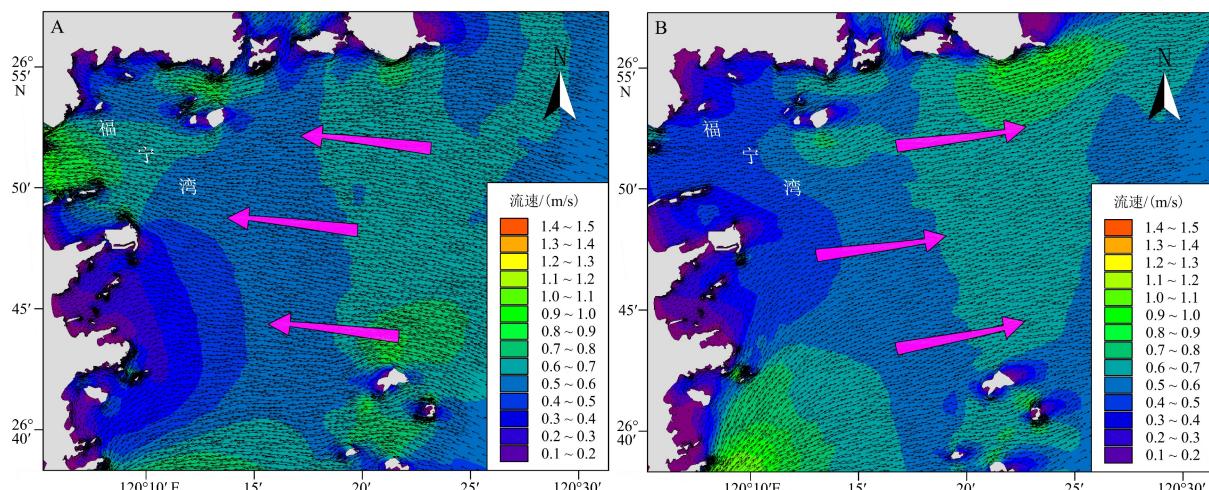


图 12 研究区大潮期流场图

A: 涨潮中间时刻, B: 落潮中间时刻。

Fig.12 Flow field of spring tide in the study area

A: The middle of the high tide, B: The middle of the ebb tide.

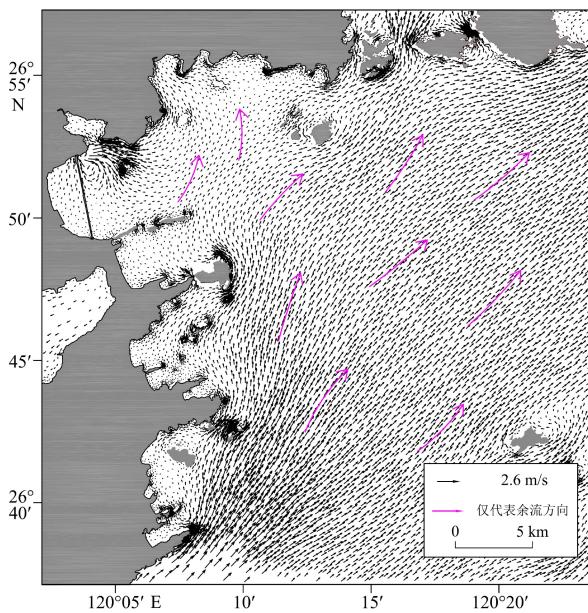


图 13 夏季西南强风天气下余流分布图

Fig.13 Residual current distribution under strong southwest wind weather in summer

方面,研究区强风天气下湾口和湾外余流流速相对较大,主要为5~40 cm/s,明显大于正常天气的余流流速,而较大的余流会产生更大的泥沙输运通量;另一方面,遥感影像对比结果表明,强风天气会导致水体悬浮泥沙浓度普遍增大(表4),而这会进一步增加海域的泥沙输运通量^[40]。因此,强风导致研究区余流流速增大和悬浮泥沙浓度升高,从而使其泥沙输运通量较正常天气明显增大。综上可以看出,西南强风天气下,研究区悬浮泥沙输运方向主要受风控制,其输运通量亦普遍增大,强风对研究区泥沙输运影响显著。

4.2.3 闽浙沿岸流对悬浮泥沙输运的影响

闽浙沿岸流和台湾暖流是研究区附近海域的主要流系,而台湾暖流对海域沉积环境的影响在水深50 m处的外海海域才开始体现出来^[24],与研究区相距较远,不会对研究区海域悬浮泥沙输运产生影响。闽浙沿岸流受季风气候的影响,冬季活动强度较大而夏季相对较小,其影响范围始终处于一个变化的过程之中^[41-42]。夏季闽浙沿岸流流向与冬季相反,沿海岸线向东北方向流动,最大平均流速小于0.2 m/s(图1)^[43]。

悬浮泥沙输运通量计算结果表明,夏季正常天气下研究区海域悬浮泥沙输运以平流输运为主,其净输运方向与余流方向基本一致,整体向西南方向输运(图4);而夏季闽浙沿岸流则向东北方向流动,与研究区整体的悬浮泥沙输运方向相反。闽浙沿

岸流具有明显的季节变化特征,夏季闽浙沿岸流影响范围最小,主要分布于浙江省北部沿岸海域,对福建典型海域(罗源湾、厦门湾和东山湾)没有影响^[44]。本研究区紧邻罗源湾,亦表明闽浙沿岸流(夏季)对研究区悬沙输运基本没有影响。同时,夏季台湾暖流强度相对较大,受台湾暖流的挤压,闽浙沿岸流流速相对较小,活动强度较弱^[45],其在闽北近海海域悬沙输运通量与冬季相比显著减少,对悬浮泥沙的输运作用较小^[24]。此外,福宁湾区域水深较浅,岸线蜿蜒曲折,岬角相间,岛屿众多,受地形遮蔽作用影响较大,其水动力条件主要受潮流和风浪影响。综上,闽浙沿岸流的活动对研究区海域的悬浮泥沙输运基本不会产生影响。

5 结论

(1)夏季福宁湾海域周期平均悬浮泥沙浓度的变化幅度从湾内向湾外逐渐变小;在平面分布上,湾内悬浮泥沙浓度较高,湾口次之,湾外最低;垂向上,悬沙浓度表现为由表层至底层逐渐增大。

(2)研究区悬浮泥沙单宽输沙量为4.75~47.93 g·s⁻¹·m⁻¹,整体输沙率呈现近岸小、离岸高的格局。平流输沙项在悬浮泥沙输运中占主导地位,其次为垂向净环流项,其余输沙项贡献甚微。

(3)正常天气下,研究区的悬沙净输运方向与余流方向基本一致,输运方向指向西南;西南强风天气下,研究区悬浮泥沙的浓度增大,其输运方向受风控制,指向东北;闽浙沿岸流(夏季)对研究区悬浮泥沙的输运基本没有影响。

参考文献 (References)

- [1] Xie D F, Gao S, Wang Z B, et al. Numerical modeling of tidal currents, sediment transport and morphological evolution in Hangzhou Bay, China [J]. *International Journal of Sediment Research*, 2013, 28 (3): 316-328.
- [2] 刘潇, 冯秀丽, 刘杰, 等. 山东半岛靖海湾及其附近海域悬沙粒度特征及再悬浮作用研究[J]. *泥沙研究*, 2013 (4): 68-73. [LIU Xiao, FENG Xiuli, LIU Jie, et al. Characteristics of grain size distribution and resuspension process of suspended sediment in Jinghai Bay and its adjacent waters, Shandong Peninsula [J]. *Journal of Sediment Research*, 2013 (4): 68-73.]
- [3] Bian C W, Jiang W S, Quan Q, et al. Distributions of suspended sediment concentration in the Yellow Sea and the East China Sea based on field surveys during the four seasons of 2011 [J]. *Journal of Marine Systems*, 2013, 121-122: 24-35.
- [4] 宋泽坤, 张俊彪, 施伟勇, 等. 杭州湾口门中部水沙输运机制初探: 以

- 岱衢洋为例[J]. *海洋通报*, 2015, 34(3): 267-274. [SONG Zekun, ZHANG Junbiao, SHI Weiyong, et al. Mechanism of water and suspended sediment transport in the middle outlet of the Hangzhou Bay: a case study of Daiquyang Sea [J]. *Marine Science Bulletin*, 2015, 34(3): 267-274.]
- [5] 陈斌, 高飞, 刘健. 夏季浙江沿岸陆架区泥沙输运机制[J]. *海洋学报*, 2017, 39(3): 96-105. [CHEN Bin, GAO Fei, LIU Jian. Sediment transport mechanism in the Zhejiang inner continental shelf in summer [J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2017, 39(3): 96-105.]
- [6] Hu R J, Ma F, Wu J Z, et al. Sediment transport in the nearshore area of Phoenix Island [J]. *Journal of Ocean University of China*, 2016, 15(5): 767-782.
- [7] 陈瑞瑞, 蒋雪中. 长江河口悬浮泥沙向浙闽沿岸输运近期变化的遥感分析[J]. *海洋科学*, 2017, 41(3): 89-101. [CHEN Ruirui, JIANG Xuezhong. Analysis of suspended sediment variations from the Yangtze Estuary to Zhejiang-Fujian Provincial coastal waters using remotely sensed data [J]. *Marine Sciences*, 2017, 41(3): 89-101.]
- [8] Doxaran D, Froidefond J M, Lavender S, et al. Spectral signature of highly turbid waters: Application with SPOT data to quantify suspended particulate matter concentrations [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2002, 81(1): 149-161.
- [9] Waghmare S M, Hanamgond P T, Mitra D, et al. Application of remote sensing and GIS techniques to study sediment movement along Harwada Beach, Uttar Kannada, West Coast of India [J]. *Journal of Coastal Research*, 2020, 36(6): 1121-1129.
- [10] Li P, Ke Y H, Wang D W, et al. Human impact on suspended particulate matter in the Yellow River Estuary, China: Evidence from remote sensing data fusion using an improved spatiotemporal fusion method [J]. *Science of the Total Environment*, 2021, 750: 141612.
- [11] Ryu J H, Han H J, Cho S, et al. Overview of geostationary ocean color imager (GOCI) and GOCI data processing system (GDPS) [J]. *Ocean Science Journal*, 2012, 47(3): 223-233.
- [12] 刘波, 程乾, 曾焕建, 等. 基于GOCI数据的杭州湾跨海大桥两侧水域悬浮泥沙浓度空间分异规律研究[J]. 杭州师范大学学报: 自然科学版, 2016, 15(1): 102-107. [LIU Bo, CHENG Qian, ZENG Huanjian, et al. On the suspended sediment concentration distribution and diversity of the waters on both sides of Hangzhou Bay sea-crossing bridge based on GOCI data [J]. *Journal of Hangzhou Normal University: Natural Science Edition*, 2016, 15(1): 102-107.]
- [13] 周钰, 宣基亮, 黄大吉. 基于GOCI观测数据的长江浅滩悬浮泥沙的潮周期变化特征[J]. *中国科学: 地球科学*, 2020, 63(9): 1381-1389. [ZHOU Yu, XUAN Jiliang, HUANG Daji. Tidal variation of total suspended solids over the Yangtze Bank based on the geostationary ocean color imager [J]. *Science China Earth Sciences*, 2020, 63(9): 1381-1389.]
- [14] 杨雪飞. 基于GOCI和数值模拟的东海近岸悬浮泥沙浓度逐时变化研究[D]. 中国科学院研究生院(上海技术物理研究所)博士学位论文, 2016. [YANG Xuefei. Diurnal variation of suspended sediment concentration coupled GOCI and numerical simulation in coastal waters of the East China Sea [D]. Doctor Dissertation of Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, 2016.]
- [15] Yin W B, Huang D J. Evolution of submesoscale coastal frontal waves in the East China Sea based on geostationary ocean color imager observational data [J]. *Geophysical Research Letters*, 2016, 43(18): 9801-9809.
- [16] 艾乔, 石勇, 高建华, 等. 辽东半岛东岸近海泥区悬沙浓度的时空分布及控制因素分析[J]. *海洋学报*, 2019, 41(1): 121-133. [AI Qiao, SHI Yong, GAO Jianhua, et al. Spatio-temporal distribution and control factors of surface suspended sediment concentration in the mud deposition along eastern coast offshore of the Liaodong Peninsula [J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2019, 41(1): 121-133.]
- [17] Pang C G, Yuan D L, Jiang M, et al. Observed cross-shelf suspended sediment flux in the southern Yellow Sea in winter [J]. *Marine Geology*, 2020, 419: 106067.
- [18] 杜家笔, 裴艳东, 高建华, 等. 弱动力浅海中的悬沙输运机制: 以天津港附近海域为例[J]. *海洋学报*, 2012, 34(1): 136-144. [DU Jiabi, PEI Yandong, GAO Jianhua, et al. The suspended sediment transport associated with low flow patterns in shallow waters: a case study from the Tianjin subtidal area [J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2012, 34(1): 136-144.]
- [19] Moskalski S, Floc'h F, Verney R. Suspended sediment fluxes in a shallow macrotidal estuary [J]. *Marine Geology*, 2020, 419: 106050.
- [20] Milliman J D, Meade R H. World-wide delivery of river sediment to the oceans [J]. *Journal of Geology*, 1983, 91(1): 1-21.
- [21] Pang C G, Li K, Hu D X. Net accumulation of suspended sediment and its seasonal variability dominated by shelf circulation in the Yellow and East China Seas [J]. *Marine Geology*, 2016, 371: 33-43.
- [22] Qiao L L, Liu S D, Xue W J, et al. Spatiotemporal variations in suspended sediments over the inner shelf of the East China Sea with the effect of oceanic fronts [J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2020, 234: 106600.
- [23] Wang S Q, Mao Y, Zheng L F, et al. Remote sensing of water turbidity in the Eastern China Seas from Geostationary Ocean Colour Imager [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2020, 41(11): 4080-4101.
- [24] 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(5): 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 & Quaternary Geology*, 2018, 38(5): 30-40.]
- [25] 孟令鹏, 胡日军, 李毅, 等. 福宁湾海域冬季大潮期悬浮泥沙输运特征[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2020, 40(3): 61-73. [MENG Lingpeng, HU Rijun, LI Yi, et al. Transport characteristics of suspended sediment in Funing Bay during spring tide in winter [J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2020, 40(3): 61-73.]
- [26] 江甘兴. 福建海区的潮汐和潮流[J]. *台湾海峡*, 1992, 11(2): 89-94. [JIANG Ganxing. Tides and tidal currents in Fujian waters [J]. *Journal of Oceanography in Taiwan Strait*, 1992, 11(2): 89-94.]
- [27] Guan B X. Patterns and structures of the currents in Bohai, Huanghai and East China Seas[M]//Zhou D, Liang Y B, Zeng C K. *Oceanology of China Seas*. Dordrecht: Springer, 1994: 17-26.
- [28] Xiao Y, Wu Z, Cai H Y, et al. Suspended sediment dynamics in a well-mixed estuary: The role of high suspended sediment concentration

- (SSC) from the adjacent sea area [J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2018, 209: 191-204.
- [29] Ingram R G. Characteristics of the Great Whale River plume [J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 1981, 86 (C3): 2017-2023.
- [30] Uncles R J, Elliott R C A, Weston S A. Dispersion of salt and suspended sediment in a partly mixed estuary [J]. *Estuaries*, 1985, 8 (3): 256-269.
- [31] 范恩梅, 陈沈良, 张国安. 连云港海域水文泥沙运动特征[J]. *世界科技研究与发展*, 2009, 31 (4): 703-707. [FAN Enmei, CHEN Shenliang, ZHANG Guoan. The hydrological and sediment characteristics in lianyungang coastal waters [J]. *World Sci-Tech R & D*, 2009, 31 (4): 703-707.]
- [32] 史文奇, 邢传玺, 马玉贤, 等. 辽东湾中部西岸浅水海域冬季实测海流分析[J]. *海洋通报*, 2018, 37 (4): 389-395. [SHI Wenqi, XING Chuanxi, MA Yuxian, et al. Analysis of current observation in shallow inshore waters along the west coast of central Liaodong Bay in winter [J]. *Marine Science Bulletin*, 2018, 37 (4): 389-395.]
- [33] Bowden K F. The mixing processes in a tidal estuary [J]. *International Journal of Air and Water Pollution*, 1965, 7: 343-356.
- [34] Yu Q, Wang Y W, Gao J H, et al. Turbidity maximum formation in a well-mixed macrotidal estuary: The role of tidal pumping [J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2014, 119 (11): 7705-7724.
- [35] Man J, Pang C G, Liu Z L, et al. Sediment resuspension in winter in an exceptional low suspended sediment concentration area off Qinhuangdao in the Bohai Sea [J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2020, 245: 106859.
- [36] 刘波, 胡日军, 袁晓东, 等. 龙口近岸海域潮流作用下悬浮泥沙时空分布特征及输运机制[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2020, 40 (4): 55-66. [LIU Bo, HU Rijun, YUAN Xiaodong, et al. Spatiotemporal distribution pattern and transport mechanism of suspended sediments in Longkou offshore under the action of tidal current [J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2020, 40 (4): 55-66.]
- [37] 边淑华, 胡泽建, 迟万清, 等. 粉砂质海岸大风天泥沙运动研究[J]. *海洋科学*, 2007, 31 (12): 4-8. [BIAN Shuhua, HU Zejian, CHI Wanqing, et al. Sediment movement on the silty coast during a storm [J]. *Marine Sciences*, 2007, 31 (12): 4-8.]
- [38] 张火明, 邵力行, 田中仁, 等. 基于MIKE21模型的椒江口台州湾在异常天气下的泥沙输运研究[J]. *中国计量大学学报*, 2019, 30 (4): 441-448. [ZHANG Huoming, SHAO Lixing, TIAN Zhongren, et al. Study on sediment transport in Taizhou Bay of Jiaojiang Estuary based on MIKE21 model under abnormal weather [J]. *Journal of China University of Metrology*, 2019, 30 (4): 441-448.]
- [39] 王华强, 高抒. 杭州湾北岸高潮滩沉积与沿岸物质输运趋势[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2007, 27 (6): 25-30. [WANG Huaqiang GAO Shu. Tidal flat sediment characteristics and transport trends along the northern bank of Hangzhou bay [J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2007, 27 (6): 25-30.]
- [40] 乔璐璐. 冬季大风事件下渤海环流及泥沙输运过程研究[D]. 中国海洋大学博士学位论文, 2008. [QIAO Lulu. Circulation and sediments transport due winter storms in the Bohai Sea and Yellow Sea [D]. Doctor Dissertation of Ocean University of China, 2008.]
- [41] 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 (7): 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 [J]. *Scientia Sinica Terra*, 2012, 42 (7): 1123-1134.]
- [42] 邱云, 许金电, 郭小钢, 等. 东北季风期台湾海峡的逆温现象[J]. *海洋学报*, 2012, 34 (2): 13-22. [QIU Yun, XU Jindian, GUO Xiaogang, et al. Temperature inversion in the Taiwan Strait during northeast monsoon [J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2012, 34 (2): 13-22.]
- [43] 万小芳, 潘爱军, 郭小钢, 等. 台湾海峡西侧水动力环境的季节变化特征[J]. *应用海洋学报*, 2013, 32 (2): 156-163. [WAN Xiaofang, PAN Ajun, GUO Xiaogang, et al. Seasonal variation features of the hydrodynamic environment in the western Taiwan Strait [J]. *Journal of Applied Oceanography*, 2013, 32 (2): 156-163.]
- [44] 张志欣. 中国近海沿岸流及毗邻流系的观测与分析研究[D]. 中国海洋大学博士学位论文, 2014. [ZHANG Zhixin. Observation and analysis of the coastal current and its adjacent current system in the China offshore waters [D]. Doctor Dissertation of Ocean University of China, 2014.]
- [45] 王颖. 中国海洋地理[M]. 北京: 科学出版社, 2013. [WANG Ying. *Marine Geography of China* [M]. Beijing: Science Press, 2013.]