

刘 波,胡日军,李 毅,等. 夏季潮流作用下龙口湾海域悬浮泥沙时空变化特征及其输运机制[J].海洋地质前沿,2020,36(3):20-30.

## 夏季潮流作用下龙口湾海域悬浮泥沙 时空变化特征及其输运机制

刘 波<sup>1</sup>,胡日军<sup>1,2</sup>,李 毅<sup>3</sup>,朱龙海<sup>1,2</sup>,袁晓东<sup>1</sup>,尹砚军<sup>1</sup>,冷 星<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,福建宁德 352000)

**摘 要:**根据龙口湾海域海流、悬浮泥沙等实测资料,利用 Morlet 小波分析与单宽悬沙通量机制分解法,分析了研究区悬浮泥沙浓度时空分布特征和变化规律,并探讨了悬浮泥沙的输运机制。研究表明,平面分布上,研究区的悬浮泥沙分布呈现人工岛外悬沙浓度大于岛内水道海域的分布特征;垂向上,各站位平均含沙量由底层向表层逐层递减,特征明显。悬浮泥沙浓度在潮周期的变化较为复杂,各站位悬浮泥沙浓度在单日内一般出现 2~4 次峰值;悬浮泥沙浓度峰值往往滞后于流速峰值 0.5~2 h;悬浮泥沙浓度在时间上的变化以 12~16 h 尺度为主要周期。研究区单宽输沙通量主要介于 2.64~24.68  $\text{gs}^{-1}\text{m}^{-1}$ ;整体上呈现人工岛外海域悬沙通量高于人工岛内的平面分布格局。悬浮泥沙输运方向与潮致余流方向基本一致;受余流、地形、悬沙浓度等影响,各个输沙分项对输沙率的贡献相差较大,平流输运在悬沙输移中占绝对优势,其次为垂向净环流输沙。

**关键词:**龙口湾;悬浮泥沙;时空变化;输运机制

**中图分类号:**P731.2;TV148.5

**文献标识码:**A

**DOI:**10.16028/j.1009-2722.2019.098

### 0 引言

悬浮泥沙在潮汐、风浪、地形地貌等共同作用下发生悬浮、运移、沉积,这对水体质量、物化循环、岸线演变以及海底冲淤都具有重要意义<sup>[1-2]</sup>。海湾因其独特的地理环境而成为物质和能量频繁交互的重要场所,其水体中的悬浮泥沙在水动力作用下的输运往往会引起海底冲淤变化,进而影响海床演变和岸滩的稳定性<sup>[3]</sup>。开展海湾悬浮泥沙时空变化特征及输运机制研究,不但对于海洋工程建设具有实际指导意义,而且对理解现代沉积过程以及污染物的迁移过程都具有重要的科学

意义。因此,海湾地区水体悬浮泥沙的输运特征一直是海洋沉积作用研究的热点之一<sup>[4-9]</sup>。渤海海域不同海区的悬浮体含量各不相同,基本趋势呈现悬浮体含量随离岸距离的增加而减少<sup>[10]</sup>。江文胜等<sup>[11]</sup>基于实测水文泥沙资料认为在渤海中悬浮物的浓度受水动力因素影响很大,在通常情况下悬浮物浓度由潮流控制,且随潮周期变化非常明显。不同海湾、河口悬沙输运机制存在明显差异,如长江河口悬沙输运主要取决于欧拉余流<sup>[12]</sup>,而潮泵效应是天津港附近海域悬沙输运的主要贡献项<sup>[13]</sup>。

龙口湾为莱州湾东北部的一个附属海湾(图 1),龙口湾不但因湾内大型人工构筑物(港口、人工岛等)的建设改变了湾内的水动力条件,而且研究区位于莱州湾环流与鲁北沿岸流交界附近<sup>[14-20]</sup>,水动力条件复杂。因此,龙口湾因其复杂的地形地

收稿日期:2019-05-06

作者简介:刘 波(1993—),男,在读硕士,主要从事海洋地质方面的研究工作.E-mail:liuboemail@qq.com

貌和水动力条件而具有独特的泥沙输运特征。然而,目前对于龙口湾海域的研究主要集中于潮流场与冲淤特征<sup>[21-23]</sup>、表层沉积物分布与组成<sup>[24-25]</sup>等方面,尚缺乏对该研究区悬浮泥沙输运特征系统深入的研究。本文基于龙口湾海域的实测海流与悬浮泥沙资料,分析了该海域悬浮泥沙在时间与空间上的分布特征及其对潮流的响应,并且通过单宽悬沙通量分解法探讨了龙口湾海域悬沙输运特征。该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的科学意义。

## 1 研究区概况

龙口湾位于莱州湾之东北隅,是指砣姆岛岛头与界河口连线以东、呈对数螺线型半敞开的海湾,为莱州湾的一个附属海湾。

龙口湾内地貌主要为浅海平原,其海岸为基岩海岸或砂质海岸<sup>[26]</sup>,总体来说,砣姆岛以北为微侵蚀的砂质海岸,砣姆岛以南的连岛海岸以基岩海岸或人工岸线为主,并存在水下沙咀,人工岛群以南主要为砂质海岸。湾内水深除航道外不足 10 m(图 1),湾外水深一般为 10~20 m。

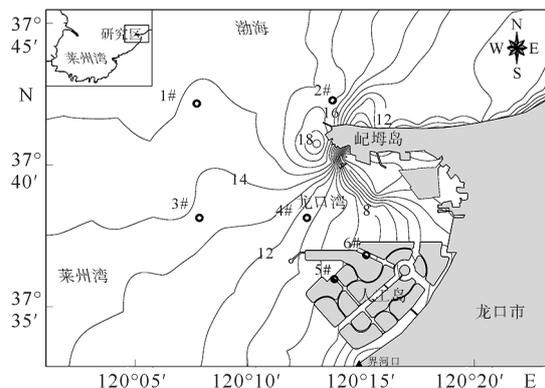


图 1 研究区位置站位分布

Fig.1 Location of the study area and survey stations

前人对研究区的沉积动力环境已经有了初步的研究。冯兴如等<sup>[21]</sup>利用 FVCOM 模式建立了龙口海域三维潮汐潮流数值模型,结果表明,龙口海域潮汐类型主要为不规则半日潮,龙口湾内界河口北侧余流为向南或西南。安永宁等<sup>[23]</sup>运用 MIKE 21 数值模型模拟了龙口人工岛建设前后海域潮流场和海底冲淤的变化特征,发现人工岛

群建成后,其北侧和西南侧海域以淤积为主,西侧海域以冲刷为主。任鹏等<sup>[25]</sup>根据表层沉积物粒度资料,确定龙口湾底质类型以粉砂、砂为主,湾外沉积物粒径较大。全年主导风向为 S 向,其次为 NNE 向,冬季主要为 N 向。波浪以风浪为主,湾内和湾外差别较大。湾外常浪和强浪向均为 NE 向,次常浪和次强浪向均为 NNE 向;湾内常浪向为 SW 向,次常浪向为 SSW、NE 向,强浪向为 WSW 向,次强浪向为 S、SSW 和 SW 向<sup>[26]</sup>。

## 2 资料与方法

### 2.1 资料来源

#### (1) 海流和潮位

中国海洋大学于 2018 年 7 月 29 日 9:00 至 7 月 30 日 9:00(大潮期)在龙口湾海域进行了多船同步 6 个定点连续 25 h 海流观测,观测期间无明显风浪,海况良好,站位如图 1。

海流观测使用电磁流向流速仪(JFE AEM213-D,日本)采集流向、流速、水深等数据,每隔 1 小时采集 1 次数据,每次采集历时约 2 分钟,测流分层设置为 1 m。数据处理分 6 层进行(即表层、0.2H(H 为水深)、0.4H、0.6H(中层)、0.8H 和底层(离底约 0.5 m)),水深 < 5 m 的站位按“三点法”进行,即表层、0.6H(中层)和底层。

潮位观测使用加拿大 RBR 公司生产的 TGR-2050 型潮位仪,采样间隔 10 分钟。

#### (2) 悬浮泥沙

悬沙水样的采集与海流观测同步进行,取样间隔为 1 h,取样按“六点法”进行(即表层、0.2H、0.4H、0.6H、0.8H 和底层),水深 < 5 m 的站位按“三点法”进行,即表层、0.6H 和底层。采用真空负压法进行悬浮体抽滤,滤膜直径 47 mm,孔径 0.45 μm,采用精度为 1/10 万的电子天平进行悬浮体称量,过滤后进行样品烘干、恒温下称质量,计算出各站悬沙质量浓度,悬浮体浓度数据皆经过双重滤膜进行了校正。

### 2.2 研究方法

#### (1) 小波分析

本文采用的是 Morlet 复小波函数对悬沙浓

度的时间序列信号进行小波变换,可以清晰地揭示出悬浮泥沙浓度隐藏在时间序列中的多种变化周期<sup>[27-30]</sup>。

利用 matlab 中的 Wavelet Toolbox 对实测的悬浮泥沙浓度时间序列进行小波变换,采用的是一维 complex continuous wavelet 1D 中的 Morlet 小波进行分析得到 Morlet 复小波系数的实部,它可以反映悬浮泥沙浓度在不同时间尺度的周期变化以及在时间域中的分布。

### (2) 通量机制分解法

目前通量机制分解法是国内外通量计算研究中较为成熟的方法<sup>[31-32]</sup>。本文采用单宽通量机制分解方法来研究各个动力项对研究区悬浮泥沙的作用。依据 Ingram<sup>[33]</sup> 和 Uncles 等<sup>[34]</sup> 提出的用相对水深进行分解瞬时的物质输运量,潮周期  $T_i$  平均瞬时单宽悬沙输移通量  $T$  的计算式为:

$$T = \frac{1}{T_i} \int_0^{T_i} \int_0^h usdz_0 dt = \frac{1}{T_i} \int_0^{T_i} \int_0^1 uchdz dt =$$

$$h_0 \overline{u_0 c_0} + \langle h_t \overline{u_t} \rangle \overline{c_0} + \langle h_t \overline{c_t} \rangle \overline{u_0} + \langle h_t \overline{u_t c_t} \rangle + h_0 \overline{u'_0 c'_0} + \langle h_t \overline{u'_t c'_t} \rangle + \langle h_t \overline{u'_t c'_0} \rangle + \langle h_t \overline{u'_t c'_t} \rangle = (T_1) + (T_2) + (T_3) + (T_4) + (T_5) + (T_6) + (T_7) + (T_8)$$

式中:  $T_1$ —欧拉余流贡献项;

$T_2$  为斯托克斯漂移输移量;

$T_1 + T_2$  为平流输运;

$T_3$  为潮汐与悬浮泥沙变化相关项;

$T_4$  为悬浮泥沙与潮流变化相关项;

$T_5$  为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;

$T_6$ 、 $T_7$  为时均量和潮汐振动切变引起的剪切扩散;

$T_8$  为垂向潮振荡切变作用。

## 3 潮流及余流特征

根据实测海流资料,将各个站位表层、0.6H 层(H 为水深)、底层海流特征值列于表 1,并绘制

表 1 1#~6# 站位涨、落潮段平均流速垂向分布

Table 1 The average vertical velocity at 1#~6# stations at flood and ebb tide

站位	层位	涨潮				落潮			
		最大		平均		最大		平均	
		流速/(cm/s)	流向/(°)	流速/(cm/s)	流向/(°)	流速/(cm/s)	流向/(°)	流速/(cm/s)	流向/(°)
1#	表层	55.3	240.3	20.5	184.5	61.0	243.0	33.1	175.3
	0.6H	42.3	233.7	24.0	176.0	44.7	48.0	24.5	107.5
	底层	29.0	231.7	15.5	185.9	30.3	44.3	15.8	98.2
2#	表层	89.0	255.3	46.6	245.9	101.2	81.0	50.4	162.0
	0.6H	67.7	256.3	35.6	211.9	80.0	83.0	39.7	140.5
	底层	58.7	248.7	28.9	188.9	65.0	86.0	29.5	126.0
3#	表层	59.3	225.0	23.1	203.0	78.0	47.3	35.1	169.5
	0.6H	39.3	252.3	21.2	182.3	49.7	43.3	23.2	134.7
	底层	30.3	254.0	16.2	233.5	37.3	47.0	18.0	135.0
4#	表层	42.3	190.3	16.3	240.9	49.7	68.0	21.6	153.2
	0.6H	26.7	239.7	17.4	209.5	44.7	68.0	18.5	81.9
	底层	22.0	154.0	13.8	215.8	32.7	70.3	14.3	122.9
5#	表层	12.0	327.3	4.9	256.5	15.3	310.3	8.6	238.7
	0.6H	17.0	125.7	8.0	140.6	11.7	136.7	4.2	217.1
	底层	10.0	135.7	5.0	176.7	6.0	326.7	4.1	215.0
6#	表层	10.3	243.0	6.2	209.5	13.0	301.3	7.0	276.2
	0.6H	12.3	121.7	6.3	182.6	10.7	159.7	4.2	220.4
	底层	5.7	125.3	3.0	160.2	7.0	10.0	3.5	162.0

各时刻垂向平均海流矢量图(图 2)。1#—4# 站位海流运动形式为明显的往复流,流向以 NE—SW 向、EW 向为主。砣姆岛北侧的 2# 站位流速最大,最大流速出现落潮期的表层,为 101.2 cm/s;其他开阔海域流速相对较小;而湾内人工岛水道的流速最低,5# 站位的平均流速为 4.1~8.6 cm/s。垂向上(图 3),受滩面的黏滞效应影响,垂向流速分布基本呈现从表层向底层递减的趋势<sup>[35]</sup>。在潮周期上,一般束水归槽的落潮流流速比涨潮期流速大,落潮流历时比涨潮流历时短,如:1# 站位各层平均落潮流速(15.8~33.1 cm/s)比平均涨潮流速(15.5~24.0 cm/s)要大,在表层尤为明显。

采用准调和分析法,得到研究区各站位平均余流,并计算垂向平均余流值(表 2,图 4)。可以发现,水道内站位余流流速明显小于开阔海域,最大余流值出现在 2# 站位,为 8.2 cm/s,对应流向为 59.3°,最小余流值出现在 5# 站位,为 2.4 cm/s,对应流向为 191.7°。

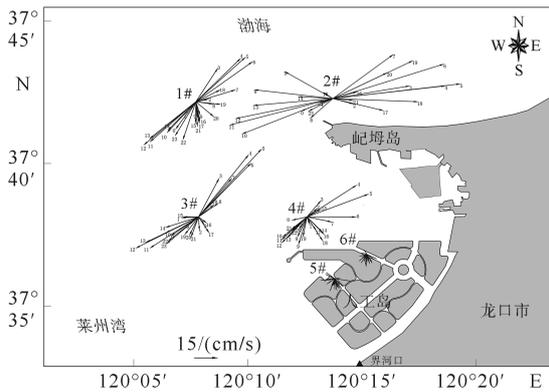


图 2 各站位垂线平均潮流矢量

Fig.2 The vertical trend vector of each station

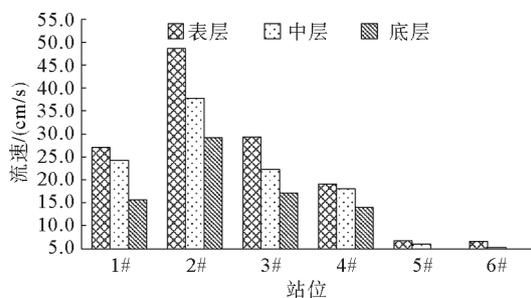


图 3 各站位流速垂向变化

Fig.3 Vertical variation of average velocity at each station

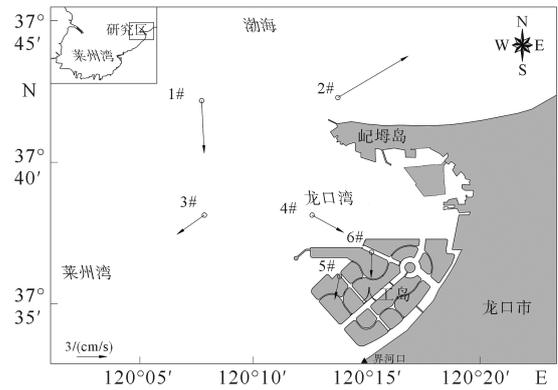


图 4 各站位垂向余流矢量图

Fig.4 Vertical residual current vectors of stations

表 2 各站位垂向平均余流

Table 2 Vertical average residual current of stations

站位	余流/(cm/s)	方向/(°)
1#	5.3	177.2
2#	8.2	59.3
3#	3.3	239.0
4#	3.6	118.8
5#	2.4	191.7
6#	2.6	180.8

## 4 悬浮泥沙时空分布及变化特征

### 4.1 悬浮泥沙空间分布及变化特征

#### 4.1.1 平面分布及变化特征

根据各站位涨、落潮平均悬浮泥沙浓度统计表(表 3)与各站位涨、落潮垂向平均悬浮泥沙浓度平面分布图(图 5),对研究区的悬浮泥沙平面分布特征进行分析。

表 3 各站位平均悬沙浓度

Table 3 The average suspended sediment concentration of each station / (mg/L)

站位	涨潮	落潮
1#	28.4	25.3
2#	27.6	27.6
3#	22.7	24.1
4#	32.6	32.5
5#	25.0	24.7
6#	9.6	11.8

研究区海域平均悬浮泥沙浓度为 9.6~32.5 mg/L, 最小平均悬浮泥沙浓度出现在位于人工岛水道内的 6# 站位的涨潮阶段, 最大平均悬浮泥沙浓度出现在位于人工岛与砵姆岛之间的龙口湾口海域的 4# 站位的落潮阶段。研究区 4# 站位的悬沙浓度最高, 其涨、落潮平均悬沙浓度分别为 32.6、32.5 mg/L; 其次是位于龙口湾外的 1#、2# 站位悬浮泥沙浓度较高, 1# 站位涨、落潮阶段平均悬浮泥沙浓度分别为 28.4、25.3 mg/L, 2# 站位涨、落潮阶段平均悬浮泥沙浓度分别为 27.6、27.6 mg/L; 3# 站位位于湾外的开阔海域悬沙浓度略低, 涨、落潮阶段平均悬浮泥沙浓度分别为 22.7、24.1 mg/L; 5#、6# 站位虽然同样位于人工岛水道内, 水动力较弱, 但是 5# 站位的悬浮泥沙浓度高得多, 其涨、落潮阶段平均悬浮泥沙浓度分别为 25.0、24.7 mg/L。整体上, 研究区的悬浮泥沙平面分布呈现人工岛外海域浓度大于岛内水道海域的分布特征。

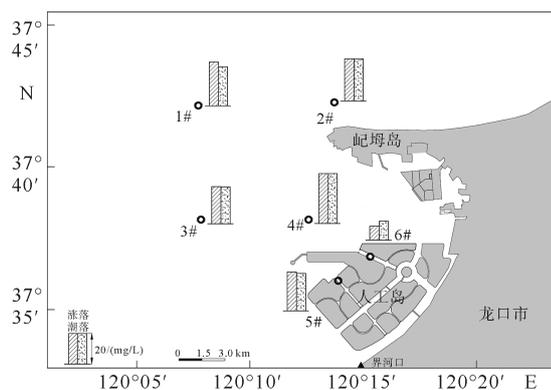


图5 各站位涨、落潮垂向平均悬浮泥沙浓度平面分布  
Fig.5 Vertical distribution of average suspended sediment concentration

#### 4.1.2 垂向分布及变化特征

根据研究区悬浮泥沙垂向变化分布统计表(表4)及各站位悬浮泥沙垂向变化分布图(图6), 对研究区悬浮泥沙的垂向分布特征进行分析。

研究区各站位平均含沙量由底层向表层逐层递减, 特征明显。表底层悬沙浓度变化最大的是 1# 站位, 其表、中、底层悬沙浓度分别为 24.3、24.4、31.7 mg/L; 6# 站位悬沙浓度在垂向上变化最小, 其表、中、底层悬沙浓度分别为 10.6、10.6、12.1 mg/L。各站位的最大含沙量除 4# 站位外均

出现在底层(表5), 最大含沙量值出现在 2# 站位底层, 最大含沙量可达 61.8 mg/L。

表4 各站位悬浮泥沙垂向变化分布统计表

Table 4 Vertical variation of suspended sediment at each station / (mg/L)

站位	1#	2#	3#	4#	5#	6#
表层	24.3	25.6	21.0	29.0	22.0	10.6
中层	24.4	27.0	22.9	31.0	24.2	10.6
底层	31.7	32.1	26.1	33.4	26.9	12.1

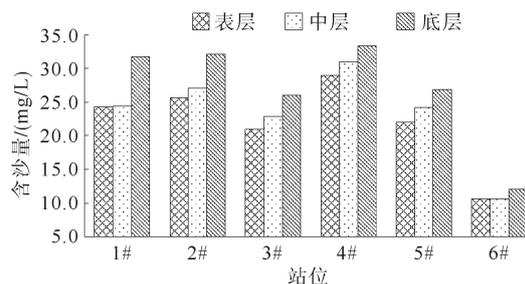


图6 各站位悬浮泥沙垂向变化

Fig.6 Vertical variation of suspended sediment at each station

表5 各站位最大含沙量出现的层位与阶段

Table 5 The horizons and stages of maximum sediment concentration

站位	含沙量/(mg/L)	层位	阶段
1#	50.0	底层	落潮
2#	61.8	底层	涨潮
3#	34.4	底层	落潮
4#	54.6	表层	落潮
5#	32.8	底层	落潮
6#	25.0	底层	落潮

前人研究认为<sup>[36-37]</sup>, 在同一温盐环境下, 潮流强度对悬浮泥沙在垂向上的分布影响较大, 潮流作用越强, 悬浮泥沙的垂向扩散系数就越大。随着涨落潮流的增强, 底床泥沙发生再悬浮, 水体含沙量不断增强, 并且底层含沙量最高。结合各站位流速和悬浮泥沙浓度随时间变化分布(图7), 可以发现, 海底表层沉积物在涨落潮流增强时发生起动、悬浮, 并且不断向上层水体扩散, 扩散过程明显, 悬浮泥沙受自身粒径、垂向环流等因素的

影响,水体含沙量呈现底层向表层递减的趋势。以 3# 站位为例,10:00 左右时该站位流速较低,底层含沙量在 24.0 mg/L 左右,中层、表层更低,13:00 左右时流速达到高值,含沙量随之达到高值,底层含沙量已超过 30.0 mg/L,泥沙向中层、表层扩散明显,中层达到 26.0 mg/L,表层在 24.0 mg/L 左右。

### 4.2 悬浮泥沙时间分布及变化特征

根据研究区各站位流速和悬浮泥沙浓度随时间变化分布(图 7)可以发现,悬浮泥沙浓度在潮周期的变化较为复杂。各站位悬浮泥沙浓度在单日内一般出现 2~4 次峰值。结合表 4 可以发现,

落潮阶段的水体含沙量峰值更大,除 2# 站位外其他站位最大含沙量均出现在落潮阶段。不同站位悬沙浓度峰值所出现的涨、落潮阶段有所区别。1# 站位第 1 个悬沙浓度峰值出现在涨潮中(9:00 左右),而第 2 个(18:00 左右)、第 3 个(6:00 左右)悬沙浓度峰值却均出现在低潮时刻;2# 站位在第 1 个高潮(12:00)、第 1 个低潮(17:00~18:00)时出现小的峰值;3# 站位的两个较大的悬沙浓度峰值出现在落潮阶段;4# 站位的悬沙浓度峰值出现在第 1 个高潮时(12:00)、第 1 个(18:00)和第 2 个低潮(7:00)附近;5#、6# 站位含沙量低,泥沙在潮周期上的分布较为复杂,没有明显规律。

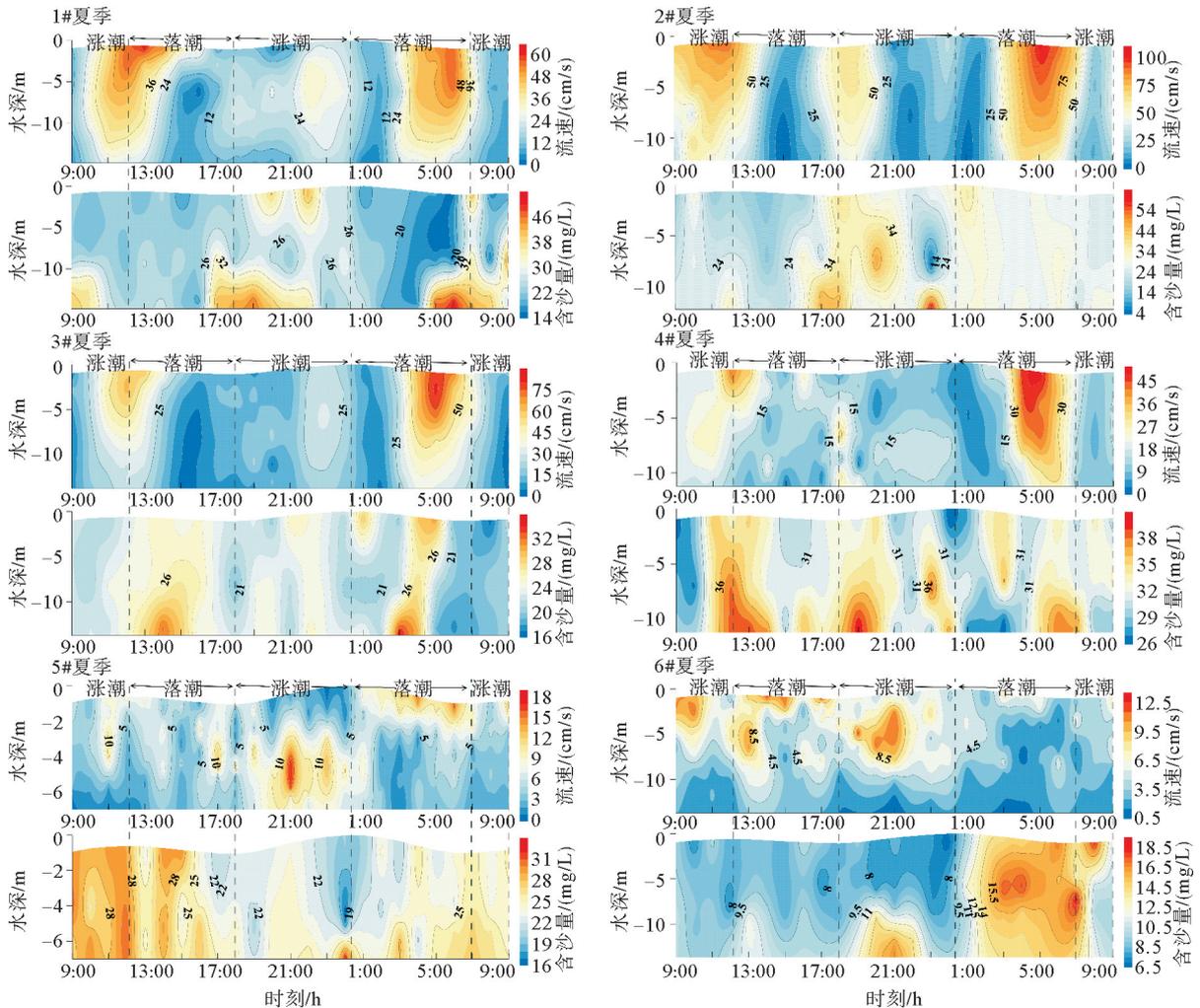


图 7 各站位流速和悬浮泥沙浓度随时间变化分布图

Fig.7 The variation of current velocity and suspended sediment concentration with time

悬沙浓度峰值一般与流速峰值对应较好,而悬沙浓度的低值则对应流速低值时刻附近。当流速增强,海底表层沉积物受到的切应力超过起动临界值,海底表层沉积物起动,底部水体的含沙量增高;而当流速减小到临界值之后,底床的表层沉积物受到的切应力小于临界值,水体中的悬沙发生沉降,悬沙浓度随之降低。然而,泥沙的起动、再悬浮均需要一个过程,故悬沙浓度的变化滞后于流速的变化,因此,大部分站位的悬浮泥沙浓度峰值也在涨、落潮流速峰值 0.5~2 h 之后出现。

为进一步研究悬浮泥沙浓度在潮周期上的变化特征,本文选取研究区内部分典型站位(1#、2#、4#、5# 站位)作为分析对象,将垂向平均悬浮泥沙浓度时间序列进行小波变换,分析得到 Morlet 复小波系数的实部,它能反映不同时间尺度的周期变化及其在时间域中的分布,可以反映悬沙浓度变化周期在时间上的分布特点。悬沙浓度周期分布见图 8,图中 H、L 分别代表悬浮泥沙浓度的高值区和低值区。

根据 Morlet 小波分析结果,可以发现,1# 站位悬浮泥沙浓度变化过程中存在着 12~16 h、7~9 h 两类尺度的周期变化规律,其中,12~16 h 尺

度为 1# 站位悬沙浓度变化的主要周期,在 12~16 h 尺度上悬浮泥沙浓度高低交替存在准 3 次震荡;7~9 h 尺度为 1# 站位悬沙浓度变化的第二周期,存在 4 次震荡,两个尺度的周期变化在整个分析时段表现的相对稳定。位于岬姆岛北侧的 2# 站位悬浮泥沙浓度变化过程中存在着 12~16 h、7~9 h 两类尺度的周期变化规律,且以 12~16 h 尺度上的周期较为显著,而在 7~9 h 尺度上的周期变化不明显,这与悬沙浓度在时间上的变化受到地形影响有关。位于湾口的 4# 站位与水道内的 5# 站位的复小波系数实部在时间上的分布情况较为一致,悬浮泥沙浓度变化过程中存在着 13~16 h 尺度的周期变化规律,悬浮泥沙浓度高低交替存在 3 次震荡,该周期的变化在整个时段表现较为稳定。

整体上,湾外站位的悬沙浓度变化存在两个相似时间尺度的变化周期,且以 12~16 h 为主要周期,两个尺度的周期变化在整个分析时段表现稳定;湾口、湾内站位的悬沙浓度高低交替以 13~16 h 为主要周期,但是在其他时间尺度上的悬浮泥沙浓度变化规律不明显。研究区为不正规半日潮流,其悬沙浓度的变化周期与潮流的变化周期具有一致性。

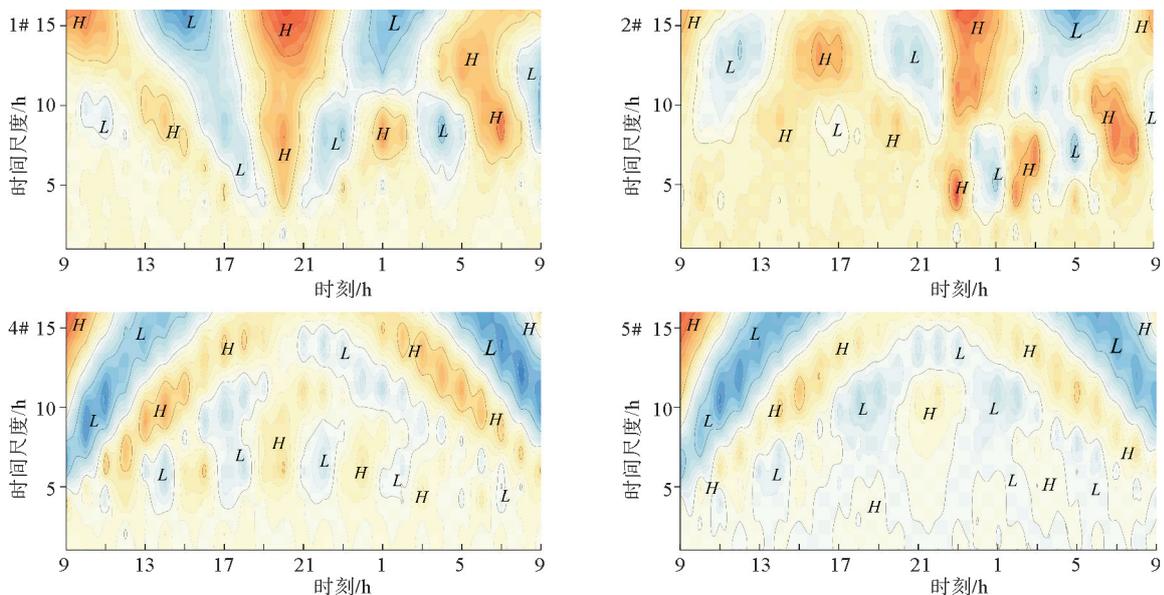


图 8 悬浮泥沙浓度周期分析

Fig.8 Periodic analysis of suspended sediment concentration

## 5 悬浮泥沙运输机制

### 5.1 单宽输沙通量

研究区 1#~6# 站位悬浮泥沙输运通量计算结果见表 6。研究区最大单宽净输沙率出现在位于砵母岛北侧的 2# 站位,单宽净输沙率( $T_{\text{总}}$ )可达  $24.68 \text{ gs}^{-1} \text{ m}^{-1}$ ,对应输沙方向为  $39.3^\circ$ ;6# 站位单宽净输沙率最低,仅为  $2.64 \text{ gs}^{-1} \text{ m}^{-1}$ ,对应输沙方向为  $192.6^\circ$ 。欧拉余流输沙项( $T_1$ )输沙率最大可达  $25.55 \text{ gs}^{-1} \text{ m}^{-1}$ ,出现在 2# 站位,对应输沙方向  $38.7^\circ$ ;斯托克斯漂移输移项( $T_2$ )输沙率最大仅为  $1.42 \text{ gs}^{-1} \text{ m}^{-1}$ ,出现在位于湾口的 4# 站位,对应输沙方向  $217.8^\circ$ ;垂向净环流输沙项( $T_5$ )最大为  $4.51 \text{ gs}^{-1} \text{ m}^{-1}$ ,出现在 4# 站

位, $T_3+T_4$  项输沙率相对较低,所有站位均未超过  $1.0 \text{ gs}^{-1} \text{ m}^{-1}$ , $T_6+T_7+T_8$  项输沙率较低,所有站位均低于  $0.1 \text{ gs}^{-1} \text{ m}^{-1}$ 。

所有站位欧拉余流输沙项( $T_1$ )的输沙方向与单宽净输沙量( $T_{\text{总}}$ )的输沙较为一致,以 1# 站位为例, $T_1$  的输沙方向为  $173.5^\circ$ , $T_{\text{总}}$  输沙方向为  $174.0^\circ$ 。垂向净环流输沙项( $T_5$ )的输沙方向除 3# 站位外均与  $T_{\text{总}}$  输沙方向相差较大,但是大部分站位的  $T_5$  项对  $T_{\text{总}}$  影响不大,只有 4# 站位的  $T_5$  项在  $T_{\text{总}}$  中所占比例较大,为 23%。 $T_2$ 、 $T_3+T_4$  以及  $T_6+T_7+T_8$  等输沙项的输沙方向往往与单宽净输沙率( $T_{\text{总}}$ )有较大区别,但是,它们在  $T_{\text{总}}$  中占的比例较小,甚至可以忽略。在平面上,研究区单宽悬沙通量整体表现为:人工岛外海域悬沙通量较大,人工岛内悬沙通量较低。

表 6 各站位悬浮泥沙输运项及单宽净输沙率

Table 6 Flux decomposition and sediment net transport rate of each station

站位	项目	输沙率/( $\text{gs}^{-1} \text{ m}^{-1}$ ),方向/( $^\circ$ )						
		$T_1$	$T_2$	$T_1+T_2$	$T_3+T_4$	$T_5$	$T_6+T_7+T_8$	$T_{\text{总}}$
1#	输沙率	22.31	0.48	22.03	0.31	0.70	0.07	21.74
	方向	173.5	299.5	174.5	198.6	17.9	165.7	174.0
2#	输沙率	25.55	0.63	24.92	0.16	0.53	0.03	24.68
	方向	38.7	224.0	38.6	290.5	154.1	33.0	39.3
3#	输沙率	9.55	0.38	9.64	0.12	0.03	0.01	9.68
	方向	228.3	227.5	316.2	27.2	232.3	229.2	230.1
4#	输沙率	18.93	1.42	19.64	0.02	4.51	0.05	19.63
	方向	156.2	217.9	159.9	320.3	86.5	350.1	159.3
5#	输沙率	4.20	0.42	4.61	0.03	0.01	0.01	4.56
	方向	162.4	146.7	161.0	345.0	314.9	348.3	161.1
6#	输沙率	2.60	0.50	2.96	0.02	0.41	0.07	2.64
	方向	206.0	157.5	198.7	116.1	343.2	343.2	192.6

### 5.2 悬浮泥沙运输机制

将各站位垂向平均余流与悬沙输运项进行对比分析(图 9)可以发现,实测平均余流方向与平流输运项( $T_1+T_2$ )的输沙方向以及净输沙( $T_{\text{总}}$ )方向基本一致,可以初步认为,潮余流在悬沙输运中占主导地位。

通过对比各站位悬浮泥沙输运项及单宽净输

沙率,发现各个输沙分项对输沙率的贡献相差较大。总体表现为  $T_1+T_2$  贡献最大, $T_5$  次之,尤以平流输运项( $T_1+T_2$ )在悬沙输移中起主导作用,各站位平流输运项( $T_1+T_2$ )输沙率在净输沙率( $T_{\text{总}}$ )中占了 100%~112%,2# 站位欧拉余流输运项( $T_1$ )输沙率可达  $25.55 \text{ gs}^{-1} \text{ m}^{-1}$ ,占该站位净输沙率的 103.5%;斯托克斯余流输运项( $T_2$ )贡献一般比较小,仅在 A2 站位贡献较大,占

了  $T_{\text{总}}$  的 46.3%；垂向净环流输沙项 ( $T_5$ ) 对净输沙率  $T_{\text{总}}$  的贡献相对较大, 在 4#、5#、6# 站位尤为明显；而各站位  $T_3 + T_4$ 、 $T_6 + T_7 + T_8$  两悬沙输运项输沙率较低, 几乎没有贡献, 忽略不计。

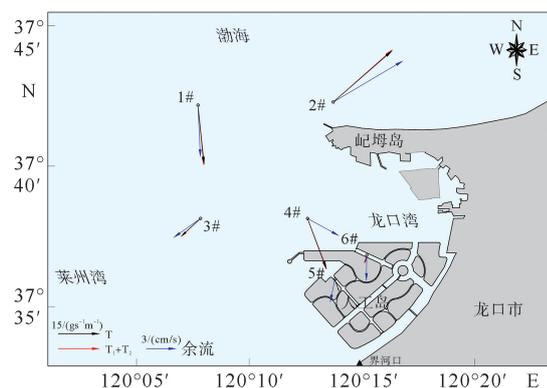


图9 研究区各站位悬浮泥沙输运项与平均余流图

Fig.9 The vector graph of suspended sediment transport item and vertical average residual flow

对比不同海域的单宽悬沙通量, 可以发现, 位于龙口湾外部开阔海域的 1#、3# 站位单宽净输沙率 ( $T_{\text{总}}$ ) 较高, 且均以欧拉余流输沙项 ( $T_1$ ) 占主导地位, 其他悬沙输运项几乎不起作用。  $T_1$  项不仅与欧拉余流值相关, 还受站位所在海域的水深、背景含沙量值影响。根据 1#、3# 站位的余流特征 (表 2, 图 4), 可以发现这两个站位的欧拉余流相对较大 (垂向平均余流值分别为 5.25、3.33 cm/s), 而且该海域水深 (14~16 m) 比湾内深、背景含沙量大, 在各因素综合影响下使得 1#、3# 站位单宽悬浮泥沙输运通量相对较高。2# 站位位于纪母岛以北, 其单宽悬沙通量较大, 且以欧拉余流输沙项 ( $T_1$ ) 占绝对优势, 这与其较大的余流值和较大的水深密切相关, 该站位的平均余流值可达 8.17 cm/s, 最大水深在 17 m。4# 站位位于纪母岛岛头与人工岛北侧的湾口之间, 余流受地形影响较大, 位置特殊。该站位的悬浮泥沙输运通量表现为欧拉余流输沙项 ( $T_1$ ) 占主导地位, 而垂向净环流输沙项 ( $T_5$ ) 亦占关键地位, 该站位垂向净环流输沙项 ( $T_5$ ) 输沙率占单宽净输沙率 ( $T_{\text{总}}$ ) 的 23%, 输沙率为  $4.51 \text{ gs}^{-1} \text{ m}^{-1}$ 。垂向净环流输沙项 ( $T_5$ ) 是在垂向各层余流大小、方向不一致以及含沙量在垂向上的不均匀分布的影响下造成的, 水体垂向上各层输沙量不能相互抵消, 从

而产生净输沙<sup>[38]</sup>。根据图 6, 悬浮泥沙浓度在垂向上分布相对不均匀。因此, 4# 站位单宽悬沙通量受到欧拉余流、余流在垂向上方向和强度的差异、垂向悬沙浓度分布不均等多种因素的影响。5#、6# 站位在两个季节的单宽净输沙率 ( $T_{\text{总}}$ ) 均比较低, 且也以欧拉余流输沙项占主导地位, 其它悬沙输运项几乎不起作用。5#、6# 站位位于水道内水深较浅, 平均余流强度较低 (表 2, 图 4), 5#、6# 站位垂向平均余流值分别为 2.37、2.57 cm/s, 水道内背景含沙量也较低 (表 3), 在各因素的共同影响下, 使得水道内海域单宽悬沙通量较低。

结合前文, 水体中的大部分泥沙只是随着涨、落潮流往复搬运, 实际产生的净输沙通量较少。平流输运在研究区的悬浮泥沙输运中占主导地位, 垂向净环流输沙居次要地位。

## 6 结论

本文基于水文泥沙资料, 分析了悬浮泥沙时空变化特征, 结合悬浮泥沙输运通量和潮流特征, 探讨了悬沙输运机制, 得出主要结论如下:

(1) 在平面分布上, 人工岛外海域悬浮泥沙浓度大于岛内水道海域; 垂向上, 各站位水体平均含沙量由表层向底层递增。

(2) 各站位悬浮泥沙浓度在单日内一般出现 2~4 次峰值, 悬浮泥沙浓度峰值往往滞后于流速峰值 0.5~2 h; 悬浮泥沙浓度在时间上的变化以 12~16 h 尺度为主要周期。

(3) 潮流作用下, 研究区单宽输沙通量主要介于  $2.64 \sim 24.68 \text{ gs}^{-1} \text{ m}^{-1}$ ; 整体上, 人工岛外海域悬沙通量远高于人工岛内。

(4) 受潮流强度、水深、背景含沙量等因素的共同影响, 研究区悬浮泥沙输运以平流输运为主, 垂向净环流输沙为辅, 悬浮泥沙输运方向与潮流余流方向基本一致。

### 参考文献:

- [1] 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(1): 145-152.
- [2] 乔璐璐. 冬季大风事件下渤海海环流及泥沙输运过程研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2008.

- [3] 李九发.长江河口南汇潮滩泥沙输移规律探讨[J].海洋学报(中文版),1990(1):75-82.
- [4] 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.
- [5] Yang Y P, Zhang M J, Li Y T, et al. The variations of suspended sediment concentration in Yangtze River Estuary [J]. Journal of Hydrodynamics, 2015, 27(6): 845-856.
- [6] Liu J H, Yang S L, Zhu Q, et al. Controls on suspended sediment concentration profiles in the shallow and turbid Yangtze Estuary [J]. Continental Shelf Research, 2014, 90: 96-108.
- [7] Stephens J D, Allison M A, Di D R, et al. Sand dynamic in the Mekong River channel and export to the coastal ocean [J]. Continental Shelf Research, 2017, 147: 38-50.
- [8] 刘 潇, 冯秀丽, 刘 杰, 等. 山东半岛靖海湾及其附近海域悬浮泥沙分布与变化[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2012, 32(6): 9-15.
- [9] Yang Z, Ji Y, Bi N, et al. Sediment transport off the Huanghe (Yellow River) delta and in the adjacent Bohai Sea in winter and seasonal comparison [J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 2011, 93(3): 173-181.
- [10] 秦蕴珊, 李 凡. 渤海海水中悬浮体的研究[J]. Acta Oceanologica Sinica, 1982, 4(2): 191-200.
- [11] 江文胜, 苏 健, 杨 华, 等. 渤海悬浮物浓度分布和水动力特征的关系[J]. 海洋学报(中文版), 2002(S1): 212-217.
- [12] Liu J H, Yang S L, Zhu Q, et al. Controls on suspended sediment concentration profiles in the shallow and turbid Yangtze Estuary [J]. Continental Shelf Research, 2014, 90: 96-108.
- [13] 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(中文版), 2012, 34(1): 136-144.
- [14] Jingbang M, Xingquan L. A numerical study of the wintertime circulation in the Northern Huanghai Sea and the Bohai Sea part I: Basic characteristics of the circulation [J]. Chinese Journal of Oceanology and Limnology, 1988, 6(3): 216-226.
- [15] 蓝先洪, 密蓓蓓, 李日辉, 等. 渤海东部和黄海北部沉积物中重金属分布特征[J]. 中国环境科学, 2014, 34(10): 2660-2668.
- [16] 赵保仁, 方国洪, 曹德明. 渤海、黄海和东海的潮流特征及其与近岸环流输送的关系[J]. 海洋科学集刊, 1995, 36: 1-11.
- [17] 方国洪, 杨景飞. 渤海潮运动的一个二维数值模型[J]. 海洋与湖沼, 1985(5): 337-346.
- [18] Yang S Y, Jung H S, Lim D I, et al. A review on the provenance discrimination of sediments in the Yellow Sea [J]. Earth-Science Reviews, 2003, 63(1): 93-120.
- [19] Guan B. Patterns and structures of the currents in Bohai, Huanghai and East China Seas [J]. Oceanology of China Seas, 1994, 1: 17-26.
- [20] 韦钦胜, 于志刚, 冉祥滨, 等. 黄海西部沿岸流系特征分析及其对物质运输的影响[J]. 地球科学进展, 2011, 26(2): 145-156.
- [21] 冯兴如, 杨德周, 尹宝树. FVCOM 在龙口海域潮汐潮流模拟中的应用研究[J]. 海洋科学, 2010, 34(6): 94-99.
- [22] 王从敏, 彭马川, 张启龙. 龙口湾潮流场的数值模拟[J]. 海岸工程, 1996, 15(4): 1-8.
- [23] 安永宁, 吴建政, 朱龙海, 等. 龙口湾冲淤特性对人工岛群建设的响应[J]. 海洋地质动态, 2010, 26(10): 24-30.
- [24] 吕双燕, 金秉福, 贺世杰, 等. 莱州湾-龙口湾表层沉积物有机质特征及来源分析[J]. 环境化学, 2017, 36(3): 650-658.
- [25] 任 鹏, 孙志高, 王传远, 等. 人工岛建设对龙口湾表层沉积物粒度及黏土矿物组成特征的影响[J]. 海洋科学进展, 2016, 34(4): 578-587.
- [26] 中国海湾志编纂委员会. 中国海湾志(第三分册)[M]. 北京: 海洋出版社, 1998.
- [27] 杨晓东. 乐清湾悬沙输移特性研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2010.
- [28] 吴德安. 江苏辐射沙洲水道潮流及悬沙动力研究[D]. 南京: 南京师范大学, 2004.
- [29] Venugopal V, Foufoula-Georgiou E. Energy decomposition of rainfall in the time-frequency-scale domain using wavelet packets [J]. Journal of Hydrology, 1996, 187(1/2): 3-27.
- [30] Kumar P, Foufoula-Georgiou E. A multicomponent decomposition of spatial rainfall fields: 2. Self-similarity in fluctuations [J]. Water Resources Research, 1993, 29(8): 2533-2544.
- [31] 胡日军, 吴建政, 朱龙海, 等. 东海舟山群岛海域表层沉积物运移特性[J]. 中国海洋大学学报(自然科学版), 2009, 39(3): 495-500, 442.
- [32] 陈 斌, 刘 健, 高 飞. 莱州湾悬沙输运机制研究[J]. 水科学进展, 2015, 26(6): 857-866.
- [33] Ingram R. G. Characteristics of the Great Whale River Plume [J]. Journal of Geophysical Research, 1981, 86(C3): 2017-2023.
- [34] Uncles R J, Elliott R C A, Weston S A. Dispersion of salt and suspended sediment in a partly mixed estuary [J]. Estuaries and Coasts, 1985, 8(3): 256-269.
- [35] 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.
- [36] Dyer K R. Coastal and estuarine sediment dynamics [J]. Coastal Engineering, 1988, 12(1): 106.
- [37] 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]. 上海: 华东师范大学, 2018.

[38] 杨晓东, 姚炎明, 蒋国俊, 等. 乐清湾悬沙输移机制分析

[J]. 海洋通报, 2011, 30(1): 53-59.

## SPATIO-TEMPORAL VARIATION CHARACTERISTICS AND TRANSPORT MECHANISM OF SUSPENDED SEDIMENTS IN LONGKOU BAY UNDER THE INFLUENCE OF SUMMER TIDAL CURRENT

LIU Bo<sup>1</sup>, HU Rijun<sup>1,2</sup>, LI Yi<sup>3</sup>, ZHU Longhai<sup>1,2</sup>, YUAN Xiaodong<sup>1</sup>, YIN Yanjun<sup>1</sup>, LENG Xing<sup>1</sup>

(1 College of Marine Geosciences, Ocean University of China, Qingdao 266100, China; 2 Key Laboratory 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, Fujian Province, China)

**Abstract:** According to the measured data of sea current and suspended sediment in Longkou Bay, the temporal and spatial distribution patterns and the variation of suspended sediment concentration in the study area were discussed in order to explore the transport mechanism of suspended matter with Morlet wavelet analysis and decomposition method of unit-width suspended sand flux. The results show that, horizontally, the concentration of suspended sediment outside the artificial island is larger than that within the island. Vertically, the average sediment concentration of each station decreases obviously from the bottom to the surface layers. The variation of suspended sediment concentration in the tidal cycle is complicated. The concentration of suspended sediment in each station generally shows 2~4 peaks in a single day; the peak concentration of suspended sediment tends to lag behind the peak value of flow rate for half an hour to two hours; and the change cycle of suspended sediment concentration is basically 12~16 h. The unit-width sediment transport flux in the study area mainly ranges from 2.64 to 24.68  $\text{gs}^{-1}\text{m}^{-1}$ . The overall distribution of suspended sand flux outside the artificial island is higher than that within the artificial island. The direction of suspended sediment transport is basically consistent with the direction of the tidal residual current. Due to the influence of residual current, topography and suspended sediment concentration, the contribution of each sediment transport to the sediment transport rate is quite different, and the advection transport has an absolute advantage in suspended sediment transport, followed by vertical net circulation sediment transport.

**Key words:** Longkou Bay; suspended sediment; temporal and spatial distribution; transport mechanism