

DOI: 10.16562/j.cnki.0256-1492.2019072301

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

刘波¹, 胡日军^{1,2}, 袁晓东¹, 朱龙海^{1,2}, 姜胜辉^{1,2}, 王楠^{1,2}, 尹砚军^{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

摘要:根据 2015 年 1 月与 2017 年 5 月两期大潮期 27 小时海流连续同步观测及悬浮泥沙资料, 利用 Morlet 小波分析与单宽悬沙通量机制分解法, 结合潮流场特征, 分析了龙口湾海域悬浮泥沙的时空分布特征, 研究了潮流作用下的悬沙输运机制。结果表明, 平面上, 悬沙浓度在龙口湾内较低, 湾口、湾外海域的悬沙浓度相对较高; 垂向上, 研究区整体表现为悬沙浓度由底层向表层递减。潮周期尺度上, 悬浮泥沙浓度峰值较流速峰值存在 0.5~2 h 的时间滞后; 悬浮泥沙浓度在时间上的变化以 12~16 h 尺度为主要周期。季节尺度上, 1 月悬沙浓度远远大于 5 月。研究区内单宽输沙通量为 1.21~239.77 g·s⁻¹·m⁻¹, 整体上悬沙通量呈现出湾口最高、湾外开阔海域其次、湾内最低的分布格局。平流输运项 (T_1+T_2) 在悬沙输移中占绝对优势, 潮致余流在悬沙输运起主要作用。季节上, 1 月份单宽输沙通量远远高于 5 月份, 整体呈现出夏季落淤储沙而冬季再悬浮输沙的季节性输运特征。湾外海域悬浮泥沙大致向 SW、S 向输运, 砵母岛以北海域沿 W、SW 向砵母岛头输运, 进入湾内后, 悬浮泥沙的输运沿人工岛北侧和西侧分为两支。研究区内, 在海流、地形等的综合作用下, 整体表现为由渤海向莱州湾的净输沙趋势。

关键词: 悬浮泥沙; 时空分布; 输运机制; 龙口湾

中图分类号: P736.21

文献标识码: A

Spatiotemporal distribution pattern and transport mechanism of suspended sediments in Longkou offshore under the action of tidal current

LIU Bo¹, HU Rijun^{1,2}, YUAN Xiaodong¹, ZHU Longhai^{1,2}, JIANG Shenghui^{1,2}, WANG Nan^{1,2}, YIN Yanjun^{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

Abstract: Based on the data collected from tidal current observation and suspended sediment sampling at the coastal Longkou Bay, which had lasted for a total of 27 hours in January, and May 2017, the characteristics of tidal current field and the transport mechanism of suspended sediments were studied with the method of Morlet Wavelet Transform and flux mechanism analysis. The results show that the concentration of suspended sediments is lower within the bay, but relatively higher at the mouth and outside areas of the bay. Vertically, the concentration of suspended matters gradually decreases from the bottom to top. The peak of suspended sediment concentration has a half to two hour time lag behind the peak of current velocity, and the variation in suspended sediment concentration shows a cycle of 12~16 h variation. The net sediment transport rate ranges from 1.21 to 239.77 g·s⁻¹·m⁻¹. In general, the suspended sediment flux outside the bay is higher than that inside. In terms of seasonal variation, the suspended matters are far higher in January than that in May, indicating the seasonal transport characteristics: storage in summer and transport in winter. Suspended sediments move towards SW and S in offshore waters, while in the water to the north of the Qimu Island follow a W and SW path to the head of the island. When it comes into the bay, the transport of suspended sediment is separated into two branches along the north and west sides of the artificial island respectively. Under the joint effect of ocean current, topography and so on, the net sediment transport is mainly from the Bohai Sea to Laizhou Bay in the study area.

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

资助项目: 国家自然科学基金“山东半岛海湾对泥沙的捕获机制——以威海湾为例”(41776059)

作者简介: 刘波(1993—), 男, 在读博士, 主要从事海洋地质学研究, E-mail: liuboemail@qq.com

通讯作者: 胡日军(1980—), 男, 博士, 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: 2019-07-23; 改回日期: 2019-09-20. 文凤英编辑

悬浮泥沙的运移对海水质量、物化循环、岸线演变以及海底冲淤都具有重要意义^[1-4]。海湾因其独特的地理环境而成为物质和能量频繁交换的重要场所,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^[5]。开展海湾悬浮泥沙时空分布特征及输运机制研究,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]。因此,海湾地区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之一^[7-13]。潮流作用下,海湾悬沙浓度往往具有明显的潮周期变化特征^[14-15];季节上,前人基于实际调查、遥感反演、数值模拟等方法对悬沙浓度的季节性变化进行了大量研究^[11, 16-17],认为在渤海海域冬季悬浮泥沙浓度整体要高于夏季。悬浮泥沙的输运机制在不同海湾往往存在明显区别,如长江河口悬沙输运主要取决于欧拉余流^[8],天津港附近海域悬沙输运的主要贡献项是潮泵效应^[18],而平流输运与潮泵效应均是莱州湾海域悬沙输运的主要动力因素^[15]。

龙口湾为莱州湾东北部的一个附属海湾(图1),是典型的连岛坝成因的次生型半封闭海湾^[19]。龙口湾不但因湾内大型人工构筑物的建设(港口、人工岛群)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^[20-27],水动力条件复杂。因此,龙口湾因其复杂的地形地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^[28-30]、表层沉积物分布与组成^[31-32]等方面,尚缺乏对该研究区悬浮泥沙输运机制系统深入的研究。本文基于龙口湾海域的两期实测海流与悬浮泥沙资料,分析了该海域悬浮泥沙的时空分布特征,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机制。

1 研究区概况

龙口湾位于莱州湾的东北角,是指砣矶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^[33],砣矶岛以北为微受冲刷的砂质海岸,砣矶岛以南的连岛海岸以基岩海岸或人工岸线为主,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。底质类型以粉砂、砂为主,湾外沉积物粒径较大^[32]。研究区潮汐性质为不

规则半日潮,潮流性质以不规则半日潮流为主^[28]。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,而湾内常浪向为SW向,强浪向为WSW向^[33]。

2 资料与方法

2.1 资料来源

2015年1月7日10:00至1月8日12:00(大潮期),中国海洋大学在龙口湾海域进行了多船同步6个定点连续27 h海流观测及悬浮体取样。2017年5月10日11:00至5月11日13:00(大潮期),中国海洋大学在龙口近岸海域布设了6个海流观测站位(A1与B4、A3与B6站位较近),进行了大潮期单周日同步观测及悬浮体取样,观测期间前后无明显风浪,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小时监测一次,每次监测历时150 s,测流分层设置为1 m。数据处理按“六点法”进行(即表层、 $0.2H$ (H 为水深)、 $0.4H$ 、 $0.6H$ 、 $0.8H$ 和底层(离底约0.5 m)),水深小于5 m的站位按“三点法”进行,即表层、 $0.6H$ 和底层。水位观测使用潮位仪(TGR-2050,加拿大),每隔10分钟取样一次。

悬沙水样的采集与海流观测同步进行,使用竖式采水器进行取样,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),水深小于5 m的站位按“三点法”进行,即表层、 $0.6H$ 和底层。悬浮泥沙浓度测量实验在中国海洋大学海底科学与探测技术教育部重点实验室完成,采用真空负压法进行悬浮体抽滤,滤膜直径47 mm,孔径 $0.45\ \mu\text{m}$,采用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^[34-37]。

文章主要对包含大潮期实测悬浮泥沙浓度的4个典型站位进行分析,利用matlab中的Wavelet

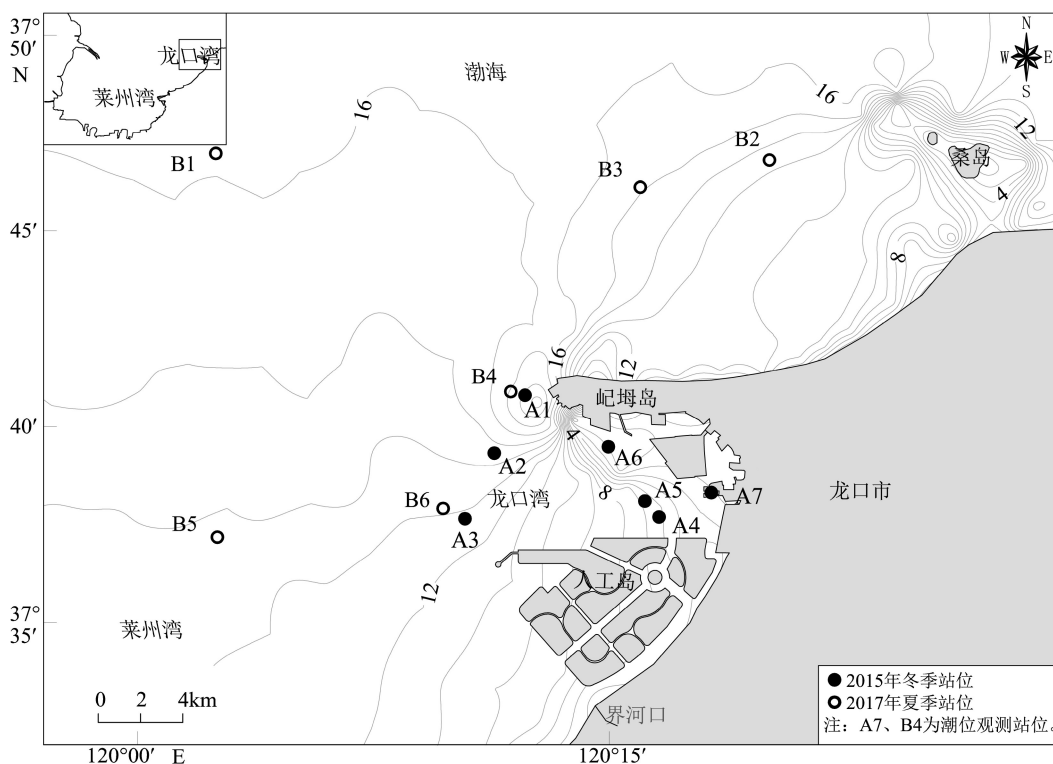


图 1 研究区地形与站位

Fig.1 Geographic map of the study area and survey stations

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的较为成熟的方法^[15, 38-39]。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^[40] 和 Uncles 等^[41] 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 平均瞬时单宽悬沙输移通量 T 的计算式为:

$$T = \frac{1}{T_t} \int_0^{T_t} \int_0^h ucdz_0 dt = \frac{1}{T_t} \int_0^{T_t} \int_0^1 ucdz dt =$$

$$h_0 \overline{u_0 c_0} + \langle h_t \overline{u_t} \rangle \overline{c_0} + \langle h_t \overline{c_t} \rangle \overline{u_0} + \langle h_t \overline{u_t c_t} \rangle + h_0 \overline{u'_0 c'_0} +$$

$$\langle h_t \overline{u'_0 c'_t} \rangle + \langle h_t \overline{u'_t c'_0} \rangle + \langle h_t \overline{u'_t c'_t} \rangle =$$

$$(T_1) + (T_2) + (T_3) + (T_4) + (T_5) + (T_6) + (T_7) + (T_8)$$

式中: T_1 -欧拉余流贡献项; T_2 -斯托克斯漂移输移量; T_1+T_2 -平流输运; T_3 -潮汐与悬浮泥沙变化相关项; T_4 -悬浮泥沙与潮流变化相关项; 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。

3 潮流动力特征

对同一季节的不同海域的海流分布特征进行分析(表 1、图 2)。在平面分布上, 湾口海域受砣母岛头和人工岛的挑流作用, 流速较大, 湾内海域受砣母岛、人工岛以及海底地形影响, 流速较小。湾内(A4—A6 站)各层平均流速(表 1)范围为 5.7~14.7 cm/s, 而湾口(A1—A3 站)平均流速为 16.3~44.6 cm/s。湾外开阔海域流速相对湾口较小, 湾外(B1—B3、B5 站)各层平均流速为 11.4~44.6 cm/s, 湾口(B4 站)平均流速为 26.0~43.6 cm/s。在湾口海域(A1—A3、B4、B6 站点)呈现往复流特征, 主流方向为 NNE-SSW(图 2), 涨潮流流向以 SSW、SW 为主, 落潮流流向以 NNE、NE 为主; 湾外海域(B1、B2、B3 站)往复流特征不明显或为旋转流, 涨潮流流向以 WSW 为主, 落潮流流向以 ENE 为主。在垂向上, 流速分布基本呈现从表层向底层递减的趋势, 这是受滩面的黏滞效应影响, 潮流受滩面摩擦, 能量不断衰减, 使流速存在着表层向底层递减的分布特征^[42]。

再结合流速随时间的变化情况分析潮流在潮

表 1 各站位表中底层涨-落潮平均流速 (cm/s)
Table 1 The average velocity of high and low tide at each station (cm/s)

站位		A1	A2	A3	A4	A5	A6	B1	B2	B3	B4	B5	B6
涨潮	表层	44.6	25.8	24.5	14.7	9.1	8.1	31.7	44.6	30.3	43.6	25.9	23.4
	中层	42.6	23.8	21.9	7.1	8.8	7.9	30.3	28.4	25.5	38.7	20.4	21.4
	底层	36.3	16.7	16.7	7.6	7.0	6.7	21.5	19.1	17.5	28.8	13.0	13.3
落潮	表层	32.8	14.0	19.4	8.7	7.2	6.1	27.7	39.6	32.8	41.9	25.7	32.9
	中层	31.4	22.4	20.5	11.8	9.5	7.1	24.6	28.4	23.5	39.5	20.0	19.6
	底层	28.2	16.6	16.3	9.0	8.4	5.7	19.7	18.7	17.8	26.0	11.4	8.9

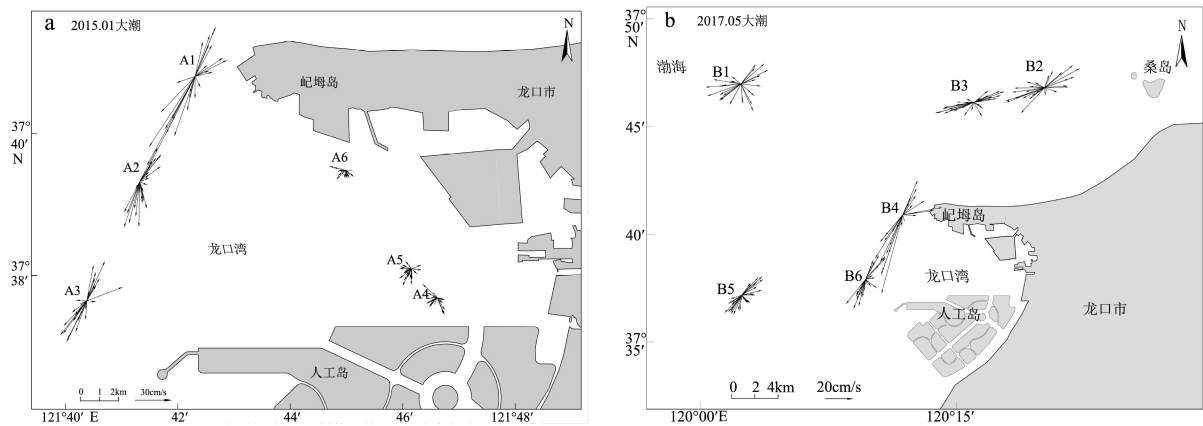


图 2 各站位垂向平均潮流矢量图
Fig.2 The vector graph of depth-averaged tidal current at each station

周期上的变化特点。流速在一个潮周期内有 3~4 个峰值,为典型的半日潮性质。根据实测数据,该海域涨潮历时较落潮长约 1 小时。位于砣姆岛头附近的 A1、B4 站,砣姆岛近岸的阻挡作用与较大水深对落潮流起了减缓作用,涨潮流速整体略大于落潮流速,而其他站位涨、落潮流强度基本一致。从不同季节来看,分别对比位于同一海域的 A1(1 月)与 B4(5 月)、A3(1 月)与 B6(5 月)的实测平均流速(表 1),发现 5 月流速与 1 月相差不大。

4 悬浮泥沙浓度时空分布特征

4.1 悬浮泥沙浓度的空间分布特征

根据各站位表、中、底层的平均悬浮泥沙浓度(表 2,图 3),分析研究区悬浮泥沙的平面分布与垂向分布特征。

平面上,湾口的 A1—A3 站位(图 3)各层位悬沙浓度为 49.8~90.0 mg/L,而位于湾内的 A4—A6 站位各层位悬沙浓度为 16.4~41.2 mg/L,悬浮泥沙的平面分布表现为明显的“湾内低,湾口高”的特

征。位于湾口及湾外的 B1—B6 站位悬浮泥沙浓度相差不大,浓度相对高值区出现在 B3 站位,其各层悬沙浓度为 19.7~22.8 mg/L,低值区出现在 B5 站位,其各层悬沙浓度为 10.7~17.4 mg/L。湾内海域水深较浅,且受到砣姆岛与人工构筑物的阻挡作用,使得湾内水动力较弱,从潮流矢量图(图 2)也可以发现,研究区流速分布与悬沙浓度的分布相对应,也表现出湾内低于湾口、湾外。当水动力较强时,海流施加在表层沉积物的剪切应力更强,使得同样条件下的海底表层沉积物更容易起动、悬浮。因此,在地形、潮流流速的共同作用下,湾内悬浮泥沙浓度低于湾口、湾外。

垂向上,通过对比各站位表、中、底层悬沙浓度(表 2,图 3),可以发现,研究区两个季节悬浮泥沙浓度的垂向分布整体表现为悬沙浓度由底层向表层递减。如 A1 站位底层、中层、表层悬沙浓度分别为 79.7、62.2、53.3 mg/L,由底层到表层逐层递减。结合图 4 可以发现,当潮流强度增强时,悬沙浓度在垂向上有着明显升高,悬沙浓度变化对潮流强度有较好的响应,可以认为在正常天气的同一温盐环境下,潮流强度是影响研究区悬沙垂向分布的

表 2 各层位平均悬浮泥沙浓度 (mg/L)						
Table 2 The average suspended sediment concentration of each layers (mg/L)						
层位	A1	A2	A3	A4	A5	A6
表层	53.3	65.8	49.8	23.6	22.9	16.4
中层	62.2	76.2	65.8	24.6	33.1	16.5
底层	79.7	90.0	76.9	41.2	31.9	19.9
层位	B1	B2	B3	B4	B5	B6
表层	13.6	15.4	19.7	15.6	10.7	15.9
中层	16.0	18.6	20.2	18.1	14.0	22.8
底层	19.3	20.3	22.8	20.1	17.4	19.2

主要因素。海底表层沉积物在涨、落潮流增强时发生起动、悬浮,泥沙颗粒由底层向水体表层扩散,并且悬沙浓度在底层高、表层低,这与前人对悬沙在潮流作用下垂向分布的研究相一致^[43-44]。

4.2 潮周期尺度下悬浮泥沙浓度的变化规律

悬沙浓度在潮周期的变化较为复杂,如图 4 所示。总体而言各站位悬浮泥沙浓度的分布特点较为一致,在单日内出现 2—4 次峰值,位于湾口海域的 A1—A3、B4、B6 站位出现 3 个峰值且峰值形态较为平滑,最大悬沙浓度(见表 3)出现于 A2 站位,可达 160.2 mg/L, A5 站位位于湾内,出现 4 个峰值,其峰值历时相对较短,其最大悬沙浓度为 79.4 mg/L,湾外的 B1—B3、B5 站位出现 4 个峰值,最高悬沙浓度出现在 B2 站位,为 31.8 mg/L。悬沙浓度峰值一般出现在涨急、落急时刻附近,而悬沙浓度的低值则出现在涨憩和落憩时刻附近。当流速超过一定强度时,海底表层沉积物受到的切应力超过临界值,底床受到冲刷,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。然而泥沙的启动、再悬浮扩散均需要一个过程,故悬沙浓度的变化滞后于流速的变化,其峰值也在涨落潮流速峰值半小时到两小时之后出现。

为进一步研究悬浮泥沙浓度随时间的周期变化特征,本文选取研究区内各区域、季节的典型站位(A1、A5、B1、B4)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。悬沙浓度周期分析见图 5,图中 H、L 分别代表悬浮泥沙浓度的高值期和低值期。

根据 Morlet 小波分析结果, A1 站位悬浮泥沙浓度变化过程中存在着 12~16 h、6~10 h 两类尺度的周期变化规律。其中, 12~16 h 尺度为 A1 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; 6~10 h 尺度为 A1 站位悬沙浓度变化的第二周期,存在准 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。位于湾内的 A5 站位悬浮泥沙浓度变化周期相对复杂,仅在 14~16 h 尺度上仍存在较为明显的悬浮泥沙浓度高低交替的准 3 次震荡。B1 站位悬浮泥沙浓度变化过程中存在着 12~16 h、6~9 h 两类尺度的周期变化规律。其中,在 12~16 h 尺度上悬浮泥沙浓度高低交替存在 3 次震荡;在 6~9 h 尺度上存在 5 次震荡,在整个分析时段表现稳定。B4 站位存在 12~16 h、6~10 h 两个时间尺度。其中,在 12~16 h 尺度上悬浮泥沙浓度高低交替存在准 3 次震荡,为悬沙浓度变化的主要周期;在 6~10 h 尺度上存在 5 次震荡,在整个分析时段表现稳定。

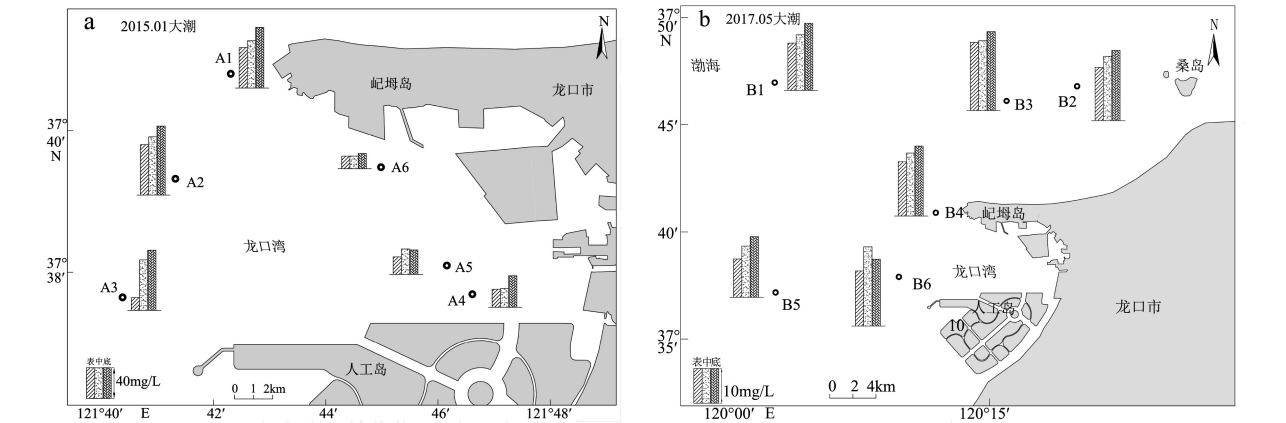


图 3 各站位悬浮泥沙平面分布图

Fig.3 The average suspended sediment concentration of each layers

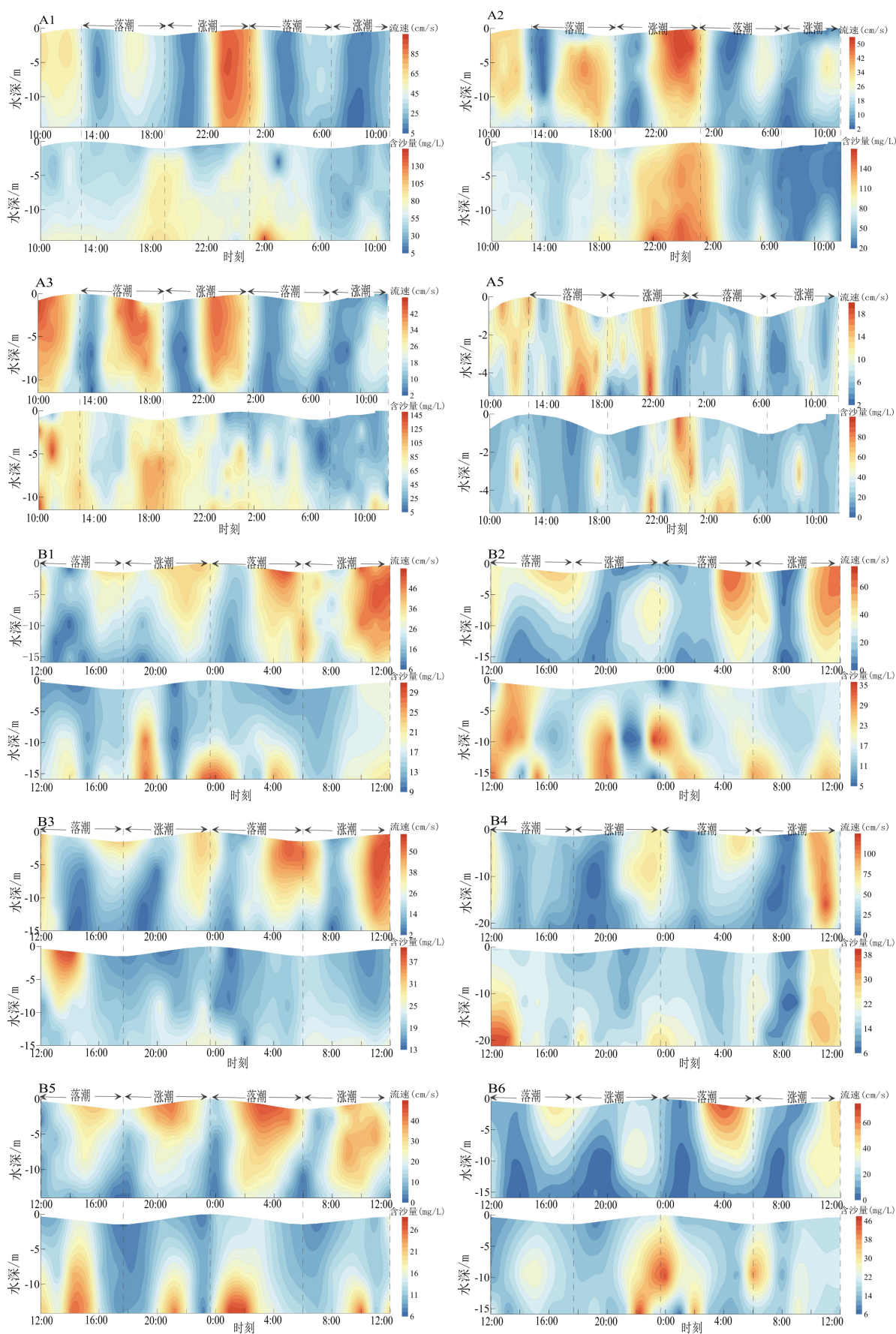


图4 各站位流速和悬浮泥沙浓度随时间变化分布图

Fig.4 The time-based variation in current velocity and suspended sediment concentration

表 3 各站位最大流速、最大悬浮泥沙浓度
Table 3 The maximum suspended sediment concentration and velocity of each station

站位	A1	A2	A3	A4	A5	A6	B1	B2	B3	B4	B5	B6
流速/(cm/s)	91.1	126.1	46.5	23.0	19.0	24.0	55.33	65.33	55.67	121.0	47.0	69.67
悬沙浓度/(mg/L)	148.0	160.2	141.8	88.8	79.4	77.8	29.0	31.8	40.0	37.8	28.0	46.0

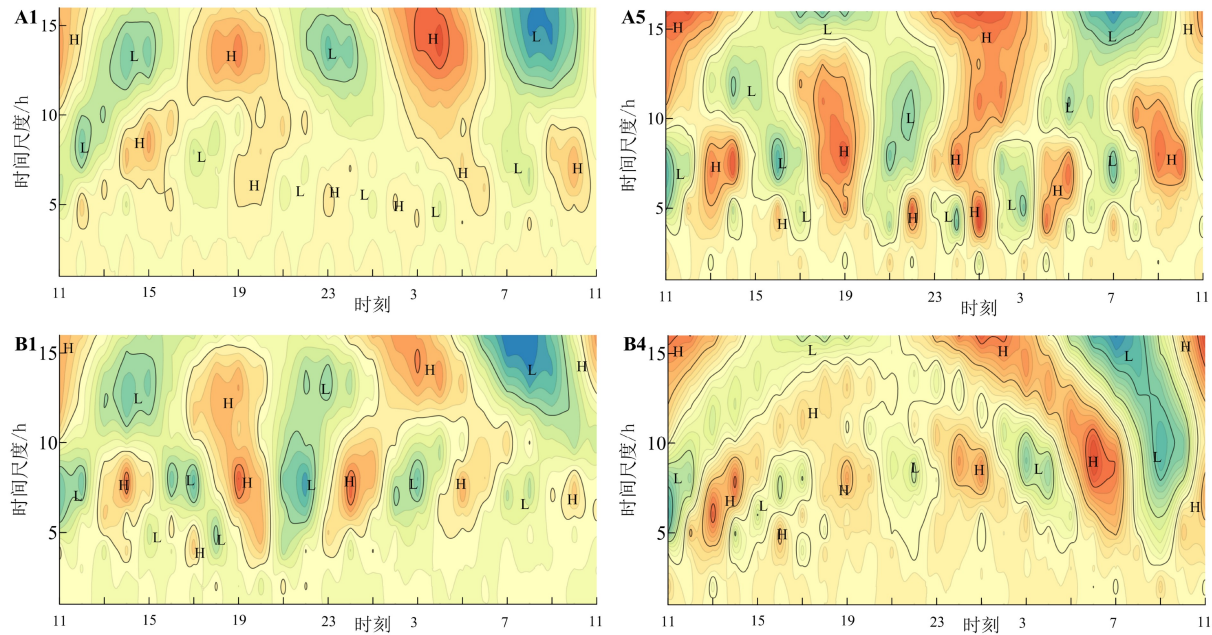


图 5 悬浮泥沙浓度周期分析
Fig.5 Periodic analysis of suspended sediment concentration

整体上,湾口、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;湾内站位的悬沙浓度变化周期较为复杂。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。

4.3 季节尺度下悬浮泥沙浓度的变化规律

从不同季节来看(表 4),分别对比位于同一海域的大潮期 A1(1 月)与 B4(5 月)、A3(1 月)与 B6(5 月)的实测平均悬浮泥沙浓度(分别为 63.6、17.94、62.5、19.27 mg/L),可以发现,1 月悬沙浓度远远高于 5 月。然而,潮流的季节变化并不显著,从站位 A1、B4、A3、B6 实测平均流速(分别为 36.3、36.70、19.51、20.15 cm/s)可以发现,潮流不是影响悬沙浓度季节变化的主要原因。

5 月份水体垂向结构上层化明显,表、底层水体温差较大,存在着明显的温跃层^[45],强烈的层化作用抑制了流场跨越密度界面的流动,上下水体难以发生交换,既影响了潮流对沉积物的再悬浮作用,又阻碍了底层再悬浮泥沙向表层运移;1 月份在高

频率强劲的北风作用下,水体垂向混合均匀,有利于打破研究区水体的层化现象,且 1 月份太阳辐射较弱,对水体温度的影响较小,使得水体表、底层温差较小,不存在明显的温跃层现象,有利于泥沙的垂向运移。另外,根据中国气象局资料,1 月份调查取样的前一天,龙口湾海域存在强劲北风(研究区冬季的典型天气),风速超过 10.3 m/s,风向为由湾外向湾内的北风,具有较强的掀沙能力,而风后 3~5 天内水体才会恢复至风前的含沙量特征^[46],这在一定程度上使得 1 月份悬浮泥沙浓度较高。因此,龙口湾海域 1 月份悬沙浓度远大于 5 月份的典型现象是在潮流、水体温度、大风等共同作用下的结果。

5 悬浮泥沙输运机制

5.1 单宽输沙通量

通过单宽通量机制分解法计算得到研究区内 A1—A6(1 月)、B1—B6(5 月)站位的各悬浮泥沙输运项输沙率及其在净输沙率(T)所占比例(表 5、表 6)。结果显示,欧拉余流输沙项(T_1)净输沙率最

表 4 各站位实测平均悬浮泥沙浓度与平均流速
Table 4 The average suspended sediment concentration and velocity of each station

站位	A1	A2	A3	A4	A5	A6	B1	B2	B3	B4	B5	B6
流速/ (cm/s)	36.3	21.1	19.51	7.77	8.40	6.30	26.4	24.9	24.57	36.70	20.32	20.15
悬沙/ (mg/L)	63.6	74.5	62.5	29.5	29.3	19.4	16.3	18.1	20.92	17.94	14.1	19.27

表 5 1 月各站悬沙输运项及单宽净输沙率
Table 5 Flux decomposition and sediment net transport rate in January g·s⁻¹·m⁻¹

站位	T_1	T_2	T_1+T_2 (%)	T_3+T_4	T_5 (%)	$T_6+T_7+T_8$	T
A1	230.77	9.83	240.22 (100.2)	0.65	3.77 (1.6)	0.15	239.77
A2	99.05	4.67	103.09 (104.6)	1.27	6.12 (6.2)	0.18	98.60
A3	19.49	10.91	24.40 (103.6)	1.76	1.78 (7.6)	0.69	23.55
A4	1.65	0.54	1.16 (95.9)	0.17	0.29 (7.6)	0.20	1.21
A5	3.81	0.10	3.86 (97.6)	0.03	0.17 (4.3)	0.04	3.96
A6	2.56	1.53	1.59 (81.5)	0.59	0.04 (2.2)	0.03	1.95

注： T_1 - T_8 为具有方向的矢量值，因此，部分悬沙输运项在净输沙率（ T ）中占的比例大于100%。

表 6 5 月各站悬沙输运项及单宽净输沙率
Table 6 Flux decomposition and sediment net transport rate in May g·s⁻¹·m⁻¹

站位	T_1	T_2	T_1+T_2 /%	T_3+T_4	T_5 /%	$T_6+T_7+T_8$	T
B1	20.84	0.47	21.19 (102.6)	0.08	1.63 (7.9)	0.02	20.66
B2	18.81	0.96	18.53 (112.5)	0.07	2.06 (12.5)	0.07	16.47
B3	12.63	0.63	13.18 (100.0)	0.15	0.24 (1.8)	0.02	13.17
B4	64.72	1.98	64.86 (105.0)	1.79	1.97 (2.4)	0.14	61.78
B5	5.60	0.68	5.73 (110.0)	0.11	0.85 (16.4)	0.03	5.21
B6	5.68	0.72	5.33 (127.6)	0.05	1.95 (46.7)	0.05	4.17

注： T_1 - T_8 为具有方向的矢量值，因此，部分悬沙输运项在净输沙率（ T ）中占的比例大于100%。

大为 230.77 g·s⁻¹·m⁻¹，出现在位于湾口的 A1 站位，斯托克斯漂移输移项(T_2)最大为 10.91 g·s⁻¹·m⁻¹，出现在位于湾口的 A3 站位，垂向净环流输沙项(T_5)最大为 6.12 g·s⁻¹·m⁻¹，出现在位于湾口的 A2 站位， T_3+T_4 项净输沙率相对较低，只有 A2、A3、B4 站位超过 1.0 g·s⁻¹·m⁻¹， $T_6+T_7+T_8$ 项净输沙率较低，所有站位均低于 1.0 g·s⁻¹·m⁻¹，净输沙率(T)最大为 239.77 g·s⁻¹·m⁻¹，出现在 A1 站位， T 最小为 1.21 g·s⁻¹·m⁻¹，出现在位于湾内的 A4 站位。研究区整体表现为湾口悬沙通量最大，湾外开阔海域其次，湾内悬沙通量最低。

5.2 悬浮泥沙输运机制

通过对比各站位单宽通量，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)中平均占了 108.6%，A1 站位平流输运项输沙率可达 240.22 g·s⁻¹·m⁻¹，占该站位净输沙率的 100.2%；垂向净环流项(T_5)亦占据关键地位，各站位垂向净环流项(T_5)输沙率在净输沙率中平均占了 9.8%，B6 站位垂向净环流项(T_5)输沙率占该站位净输沙率的 46.7%，为 1.95 g·s⁻¹·m⁻¹，B5 站位垂向净环流项(T_5)输沙率亦占该站位净输沙率的 16.4%，为 0.85 g·s⁻¹·m⁻¹；而各站位 T_3+T_4 、 $T_6+T_7+T_8$ 两悬沙输运项平均输沙率分别为 5.2%、2.1%，几乎没有贡献。

各个分项又在时空分布上有所差异。位于岬埗岛头的 A1、B4 站位的净输沙率(T)与同季节其他站位相比净输沙率较高，且平流输沙(T_1+T_2)占绝

对优势, 其次为垂向净环流输沙(T_5)。平流输沙(T_1+T_2)不仅与余流值有关, 而且与当地潮周期平均悬浮泥沙浓度及水深呈线性关系^[47]。受砣母岛头挑流作用, 该区域水动力较强、悬浮泥沙浓度大、水深较深, 在多种因素共同作用下使得平流输沙在该海域占主导地位。垂向净环流输沙(T_5)的强度与垂向余环流的强弱及悬沙浓度的垂向变化强度呈正比, 由图 3、图 4 可见, 部分站位流速、悬浮泥沙浓度在垂向上变化较大, 使得垂向净环流输沙(T_5)也占据一定优势; A4、A5、A6 站处于湾内, 流速较低, 水深较浅, 水体悬浮泥沙浓度低, 故 A4、A5、A6 站净输沙率比同时期其他站点低。A3 站点的斯托克斯漂移输移量 T_2 占相对较大比例, 可达该站净输沙率的 46.3%, 这与人工岛工程的阻挡造成的潮周期的不对称输沙有关。研究区内, 平流输运项(T_1+T_2)在悬沙输移中起主导作用, 且其在净输沙率(T)上所占比例表现出明显的分布格局: 湾内相对较小(占 87.5%~97.6%), 湾口、湾外较大(占 100.2%~127.6%)。

输沙率在季节尺度上的分布特征明显。分别对比位于湾口同一海域的 A1(1月)与 B4(5月)、A3(1月)与 B6(5月)站位的净输沙率 T (分别为 239.77、61.78、23.55、4.17 $\text{g}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{m}^{-1}$), 可以发现, 1 月份净输沙率远远高于 5 月份。前人研究认为^[48-51], 夏季时, 太阳辐射对水面影响大, 且昼夜温差大, 使得水体表、底层温差大, 进而在垂向上形成温跃层, 温跃层的存在既影响了潮流对海底表层沉积物的再悬浮作用, 又抑制了悬浮泥沙的扩散, 使得夏季悬沙输运通量偏低; 冬季时, 太阳辐射强度弱, 水体表、底层温差小, 而且冬季强劲的东北风使得水体垂向上混合均匀, 也不利于形成温跃层, 这都对悬

浮泥沙的输运起着促进作用。因此, 在研究区范围内, 整体呈现出夏季落淤储沙而冬季再悬浮输沙的季节性输运特征。

5.3 悬浮泥沙输运趋势

研究区垂向平均余流的方向整体上呈现为由渤海向莱州湾方向, 该方向与莱州湾顺时针环流一致^[22-30]。将垂向平均余流与悬沙输运项进行对比分析, 可以发现 T_1+T_2 项的输沙方向、平均余流方向与净输沙(T)方向基本一致, 因此, 潮致余流在悬沙输运中占主导地位。

结合实测海流特征(图 2), 涨、落急时刻潮流场(图 6)^[30]以及悬沙输运项与余流的对比分析(图 7)可以进行海流与泥沙输运趋势的综合分析。

整体上, 涨潮流占优势, 且涨潮流历时较落潮流长约 1 小时, 涨潮流路径与余流基本一致。涨潮时, 海流由北部开阔海域向南绕过砣母岛, 经挑流作用, 水动力在砣母岛头增强, 并在该海域(A1 站)存在最大的净输沙率。到湾内时, 海流大致被人工岛分为两部分, 一部分绕过砣母岛进入湾内, 另一部分流向人工岛西南部。湾内水动力较为复杂, 该海域水深较浅、背景悬浮泥沙浓度较低、水动力较弱, 因此净输沙率较低。至 A2、A3 站位, 砣母岛与防波堤挑流作用增强了涨潮流, 再者, 该海域表层沉积物以粉砂质砂、黏土质粉砂为主^[32], 较易引起泥沙的再悬浮, 而且涨潮时悬浮泥沙浓度较大(图 4), 在各种因素的综合作用下, 使得该海域净输沙率较高。落潮时, 整体流向与涨潮时相反, 流速略低, 落潮期历时较涨潮期短约 1 小时, 落潮期输沙通量相对较低。与之不同的是, A4 站位受人工岛阻挡涨潮流、人工水道增强落潮流的影响(图 2), 落潮流

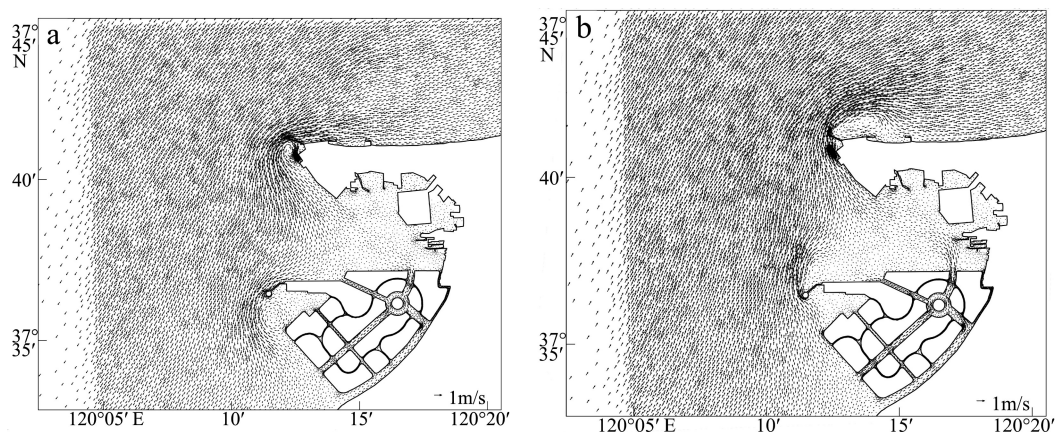


图 6 龙口湾海域涨 (a)、落 (b) 急时刻潮流场 (改绘自文献 [30])

Fig.6 Tidal current fields during fast flood tide (a) and fast ebb tide (b) (modified from reference [30])

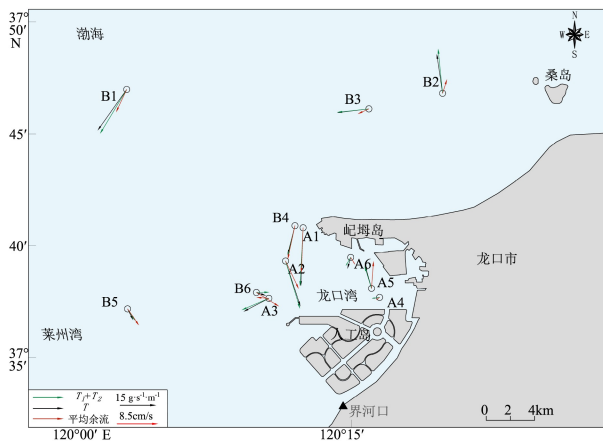


图7 悬沙输运项与垂向平均余流叠置图

(注: 站位 A1、A2、A3、A6、B4 的悬沙输运项分别缩小至原来的 1/10、1/5、1/2、1/5, 站位 A4、A5、A6 扩大 2.5 倍。)

Fig.7 The vector graph of suspended sediment transport item and vertical average residual flow

略占优势,并在 A4 站位形成一个漩涡,使得落潮流向 SW,净输沙方向亦为 SSW、SW。人工岛西部海流存在西南向的净输沙。

初步认为,龙口湾外海域悬浮泥沙主要在潮致余流作用下大致向 SW、S 向运输;配姆岛以北海域沿 W、SW 向配姆岛头运输;到湾口海域,受地形、流速、表层沉积物、水深等因素的综合影响,单宽输沙通量剧增;过湾口后,悬浮泥沙的输运分为两支,一部分沿人工岛北部进入湾内,受地形、人工构筑物等影响,输运路径复杂,另一部分,沿着人工岛西侧向西南输运。研究区内,在海流、地形等的综合作用下,整体表现为由渤海向莱州湾的净输沙趋势。

6 结论

(1)在平面分布上,悬浮泥沙浓度在龙口湾内较低,湾口、湾外海域的悬沙浓度相对较大;垂向上,研究区整体表现为悬沙浓度由底层向表层递减。

(2)在时间分布上,悬浮泥沙浓度峰值滞后于流速峰值 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;同一海域,受潮流、温度、大风等共同作用,1 月悬沙浓度远远高于 5 月。

(3)研究区单宽输沙通量主要为 1.21~239.77 $\text{g}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{m}^{-1}$,整体上悬沙通量呈现湾口最高、湾外开阔海域其次、湾内最低的分格局;1 月份单宽输沙通量远高于 5 月份,整体呈现出夏季落淤储沙而冬季再悬浮输沙的季节性输运特征。

(4)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,平流输运项(T_1+T_2)在悬沙输移中占绝对优势,其次为垂向净环流输沙(T_3),悬浮泥沙输运方向与潮致余流方向基本一致。

(5)在海流、地形等的综合作用下,研究区整体表现为由渤海向莱州湾的净输沙趋势。

参考文献 (References)

- [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, 2012, 34(1): 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(1): 145-152.]
- [2] 秦蕴珊, 赵一阳, 赵松龄, 等. 渤海地质[M]. 北京: 科学出版社, 1985: 1-232. [QIN Yunshan, ZHAO Yiyang, ZHAO Songling, et al. Geology of the Bohai Sea[M]. Beijing: Science Press, 1985: 1-232.]
- [3] Webster T, Lemckert C. Sediment resuspension within a microtidal estuary/embayment and the implication to channel management [J]. Journal of Coastal Research, 2002, 36(sp1): 753-759.
- [4] 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]. 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.]
- [5] 李九发. 长江河口南汇潮滩泥沙输移规律探讨[J]. 海洋学报, 1990, 12(1): 75-82. [李九发. Study on sediment transport law of Nanhui tidal flat in Yangtze estuary [J]. Acta Oceanologica Sinica, 1990, 12(1): 75-82.]
- [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] 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.
- [8] 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.
- [9] Stephens J D, Allison M A, Di Leonardo D R, et al. Sand dynamics in the Mekong River channel and export to the coastal ocean [J]. Continental Shelf Research, 2017, 147: 38-50.
- [10] 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.
- [11] 秦蕴珊, 李凡. 渤海海水中悬浮体的研究[J]. 海洋学报, 1982, 4(2): 191-200. [QIN Yunshan, LI Fan. Study on the suspended matter of the sea water of the Bohai gulf [J]. Acta Oceanologica Sinica, 1982, 4(2): 191-200.]
- [12] 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.]
- [13] Yang Z S, Ji Y J, Bi N S, et al. Sediment transport off the Huanghe (Yellow River) delta and in the adjacent Bohai Sea in winter and seasonal comparison [J]. *Estuarine Coastal & Shelf Science*, 2011, 93(3): 173-181.
- [14] 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. [LIU Xiao, FENG Xiuli, LIU Jie, et al. Spatial and temporal distribution pattern of suspended sediment in the Jinghai Bay and adjacent waters, Shandong peninsula [J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2012, 32(6): 9-15.]
- [15] 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. [CHEN Bin, LIU Jian, GAO Fei. Suspended sediment transport mechanism in Laizhou Bay [J]. *Advances in Water Science*, 2015, 26(6): 857-866.]
- [16] 庞重光, 李坤, 于炜. 渤海表层悬沙的时空分布特征及其动力成因[J]. *海洋科学进展*, 2014, 32(4): 450-458. [PANG Chongguang, LI Kun, YU Wei. Distribution characteristics, seasonal variability and dynamical mechanism of suspended sediment in the surface layer of the Bohai Sea [J]. *Advances in Marine Science*, 2014, 32(4): 450-458.]
- [17] Bian C W, Jiang W S, Greatbatch R J, et al. The suspended sediment concentration distribution in the Bohai Sea, Yellow Sea and East China Sea [J]. *Journal of Ocean University of China*, 2013, 12(3): 345-354.
- [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] 韩彬, 宋转玲, 曹磊, 等. 龙口湾近岸海域水质状况调查与评价[J]. *海洋科学进展*, 2010, 28(2): 186-192. [HAN Bin, SONG Zhuanling, CAO Lei, et al. Survey and assessment of coastal seawater quality in Longkou Bay [J]. *Advances in Marine Science*, 2010, 28(2): 186-192.]
- [20] Miao J B, Liu X Q. 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.
- [21] 蓝先洪, 蜜蓓蓓, 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. [LAN Xianhong, MI Beibei, LI Rihui, et al. Distribution of heavy metals in surface sediments in the eastern Bohai Sea and the northern Yellow Sea [J]. *China Environmental Science*, 2014, 34(10): 2660-2668.]
- [22] 赵保仁, 方国洪, 曹德明. 渤海、黄海和东海的潮余流特征及其与近岸环流输送的关系[J]. *海洋科学集刊*, 1995(1): 1-11. [ZHAO Baoren, FANG Guohong, CAO Deming. Characteristics of tidal residual current sand the irrelations with coastal current transports in the Bohai sea, Yellow sea and East China Sea [J]. *Studia Marina Sinica*, 1995(1): 1-11.]
- [23] 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(1-2): 93-120.
- [24] Guan B X. Patterns and structures of the currents in Bohai, Huanghai and East China Seas[M]//*Oceanology of China Seas*. Dordrecht: Springer, 1994: 17-26.
- [25] 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输运的影响[J]. *地球科学进展*, 2011, 26(2): 145-156. [WEI Qinsheng, YU Zhigang, RAN Xiangbin, et al. Characteristics of the western coastal current of the Yellow Sea and its impacts on material transportation [J]. *Advances in Earth Science*, 2011, 26(2): 145-156.]
- [26] 刘成, 胡日军, 朱龙海, 等. 庙岛群岛海域沉积动力环境分区及沉积物输运趋势[J]. *海洋地质前沿*, 2018, 34(8): 24-33. [LIU Cheng, HU Rijun, ZHU Longhai, et al. Dynamic environment division and sediment transport trend in the area off Miaodao Islands [J]. *Marine Geology Frontiers*, 2018, 34(8): 24-33.]
- [27] 马晓红, 韩宗珠, 艾丽娜, 等. 中国渤黄海的沉积物源及输运路径研究[J]. *中国海洋大学学报: 自然科学版*, 2018, 48(6): 96-101. [MA Xiaohong, HAN Zongzhu, AI Li'na, et al. Research on provenance and transport pattern in the Bohai Sea and Yellow Sea [J]. *Periodical of Ocean University of China*, 2018, 48(6): 96-101.]
- [28] 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. [FENG Xingru, YANG Dezhou, YIN Baoshu. Application of FVCOM in tidal modeling of the seas adjacent to Longkou City [J]. *Marine Sciences*, 2010, 34(6): 94-99.]
- [29] 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. [WANG Congmin, PENG Machuan, ZHANG Qilong. Numerical simulation for the tidal current field in the Longkou bay [J]. *Coastal Engineering*, 1996, 15(4): 1-8.]
- [30] 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. [AN Yongning, WU Jianzheng, ZHU Longhai, et al. Response of erosion-deposition pattern to artificial islands construction in Longkou bay [J]. *Marine Geology Letters*, 2010, 26(10): 24-30.]
- [31] 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. [LYU Shuangyan, JIN Bingfu, HE Shijie, et al. Characteristics and sources of organic matter in surface sediments of Laizhou Bay and Longkou Bay [J]. *Environmental Chemistry*, 2017, 36(3): 650-658.]
- [32] 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. [REN Peng, SUN Zhigao, WANG Chuanyuan, et al. Impacts of construction of artificial islands on the flow-sediment regulation scheme on grain and clay compositions in the Longkou Bay [J]. *Advances in Marine Science*, 2016, 34(4): 578-587.]
- [33] 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, 1991. [China Bay Record Committee. The Bay Chorography in China: Bays in the South Shandong Peninsula and Jiangsu Province[M]. Beijing: China Ocean Press, 1993: 73-94.]

- [34] 杨晓东. 乐清湾悬沙输移特性研究[D]. 浙江大学硕士学位论文, 2010. [YANG Xiaodong. Study on transport characteristics of suspended sediment in Yueqing bay [D]. Master Dissertation of Zhejiang University, 2010.]
- [35] 吴德安. 江苏辐射沙洲水道潮流及悬沙动力研究[D]. 南京师范大学博士学位论文, 2004. [WU Dean. Hydrodynamic studies to the tidal current and suspended sediments in the channels of Jiangsu radial sand ridges [D]. Doctor Dissertation of Nanjing Normal University, 2004.]
- [36] 王文圣, 丁晶, 向红莲. 小波分析在水文学中的应用研究及展望[J]. *水科学进展*, 2002, 13(4): 515-520. [WANG Wensheng, DING Jing, XIANG Honglian. Application and prospect of wavelet analysis in hydrology [J]. *Advances in Water Science*, 2002, 13(4): 515-520.]
- [37] 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.
- [38] 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.
- [39] 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. [HU Rijun, WU Jianzheng, ZHU Longhai, et al. Characteristic of surface sediment transport in Zhoushan Archipelago Sea Area, East China Sea [J]. *Periodical of Ocean University of China*, 2009, 39(3): 495-500, 442.]
- [40] Ingram R G. Characteristics of the Great Whale River Plume [J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 1981, 86(C3): 2017-2023.
- [41] 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.
- [42] 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.]
- [43] 孔亚珍, 朱传芳, 丁平兴. 水流作用下的悬沙垂向扩散系数[J]. *泥沙研究*, 2009(6): 43-47. [KONG Yazhen, ZHU Chuanfang, DING Pingxing. Vertical diffusion coefficient of suspended sediment in flows [J]. *Journal of Sediment Research*, 2009(6): 43-47.]
- [44] 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]. 华东师范大学硕士学位论文, 2018. [LI Yuan. Recent characteristics of flow and suspended sediment and vertical sediment concentration distribution pattern in the North Passage of Yangtze Estuary [D]. Master Dissertation of East China Normal University, 2018.]
- [45] 鲍献文, 万修全, 吴德星, 等. 2000年夏末和翌年初冬渤海水文特征[J]. *海洋学报*, 2004, 26(1): 14-24. [BAO Xianwen, WAN Xiuquan, WU Dexing, et al. Hydrologic characteristics of the end summertime in 2000 and early wintertime in 2001 in the Bohai Sea [J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2004, 26(1): 14-24.]
- [46] 陈斌, 黄海军, 严立文, 等. 小清河口附近海域泥沙运动特征及风场对泥沙输运的影响[J]. *海洋学报*, 2009, 31(2): 104-112. [CHEN Bin, HUANG Haijun, YAN Liwen, et al. Sediment movement and the effect of wind to sediment transport near Xiaoqing River Estuary [J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2009, 31(2): 104-112.]
- [47] 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. [YANG Xiaodong, YAO Yanming, JIANG Guojun, et al. Study on the transport mechanism of suspended sediment in Yueqing Bay [J]. *Marine Science Bulletin*, 2011, 30(1): 53-59.]
- [48] 杨作升, 郭志刚, 王兆祥, 等. 黄东海陆架悬浮体向其东部深海区输送的宏观格局[J]. *海洋学报*, 1992, 14(2): 81-90. [YANG Zuosheng, GUO Zhigang, WANG Zhaoxiang, et al. The macro pattern of the suspended body of the Yellow Sea and the East China Sea to the eastern deep sea area [J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 1992, 14(2): 81-90.]
- [49] 孙效功, 方明, 黄伟. 黄、东海陆架区悬浮体输运的时空变化规律[J]. *海洋与湖沼*, 2000, 31(6): 581-587. [SUN Xiaogong, FANG Ming, HUANG Wei. Spatial and temporal variations in suspended particulate matter transport on the Yellow and East China Sea shelf [J]. *Oceanologia Et Limnologia Sinica*, 2000, 31(6): 581-587.]
- [50] 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.
- [51] 冷星, 朱龙海, 胡日军. 山东半岛东部海域泥质区冬季悬浮泥沙时空变化及输运机制[J]. *中国海洋大学学报: 自然科学版*, 2019, 49(4): 106-116. [LENG Xing, ZHU Longhai, HU Rijun. The spatiotemporal change and transport mechanism of suspended sediment in the mud area of the eastern sea of Shandong Peninsulain winter [J]. *Periodical of Ocean University of China*, 2019, 49(4): 106-116.]