

莱州湾西南部海域悬浮泥沙浓度 变化规律及输运机制

姜睿¹, 吴建政^{1,2}, 朱龙海^{1,2}, 胡日军^{1,2}, 岳娜娜³

(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 国家海洋局第一海洋研究所, 青岛 266061)

摘要:根据 2015 年 6 月莱州湾西南部海域 5 个站位大小潮 25 h 海流连续同步观测及悬浮泥沙取样资料, 分析了研究区悬浮泥沙浓度的时空变化规律; 结合通量机制分解法, 研究了悬浮泥沙输运机制, 并探讨了悬浮泥沙浓度变化的影响因素。结果表明, 莱州湾西南部海域悬浮泥沙浓度整体具有由北向南逐渐减小、由表层向底层逐渐增加的趋势; 底层悬浮泥沙浓度在涨、落急时段出现峰值; 潮周期内悬浮泥沙输运表现出不对称性, 并且平流输运在悬浮泥沙输运中起到主导作用; 水动力是影响悬浮泥沙浓度变化的主要因素, 悬浮泥沙浓度与流速变化基本呈正相关关系, 但浓度峰大多滞后流速峰 1~2 h。

关键词:莱州湾西南部; 悬浮泥沙; 通量机制

中图分类号: P736.21

文献标识码: A

DOI: 10.16028/j.1009-2722.2017.09004

河口及其附近海湾是陆海作用较为强烈的区域, 也是陆源泥沙扩散及沉降的主要区域^[1]。悬浮泥沙既是海水营养盐和有机物的载体, 又对污染物的迁移和循环起着重要作用^[2], 同时也可以反映细颗粒沉积物输运动态, 从而反演水动力输运过程^[3]。因此, 悬浮泥沙的时空变化规律及输运特征对海洋地质研究具有重要意义。

目前国内外学者对河口海湾区的悬浮泥沙特征进行了大量研究^[4-7], 其中对莱州湾悬浮泥沙的研究大多运用数值模拟^[8,9]和遥感反演的方法^[10-12]。笔者基于莱州西南部悬浮泥沙实测资料, 分析该海域悬浮泥沙时空分布特征, 并运用物质通量分析方法探讨其悬浮泥沙输运机制, 对进一步认识并预测该区冲淤演变趋势、岸线变化动态等具有重要意义。

1 研究区概况

研究区位于莱州湾西南部海域。莱州湾位于渤海南部, 黄河三角洲和胶东半岛之间, 是渤海三大海湾之一。莱州湾海域处于暖温带半湿润气候区, 常风向为 SSE 向, 强风向为 NE 向; 该海域以不正规混合半日潮为主, 潮流运动以往复流为主; 常浪向为 NE 向, 全年有效波高在 1.6~2.9 m 之间, 最大波高在 2.5~4.7 m 之间。研究区地理位置及海流观测、悬浮泥沙取样站位见图 1。

2 资料与方法

2.1 资料来源

2015 年 6 月 16—17 日(大潮期)、2015 年 6 月 24—25 日(小潮期), 中国海洋大学分别在研究区进行了 5 个站位的 25 h 海流连续同步观测及

收稿日期: 2017-04-15

作者简介: 姜睿(1992—), 女, 在读硕士, 主要从事海洋地质方面的研究工作. E-mail: firstpianist@163.com

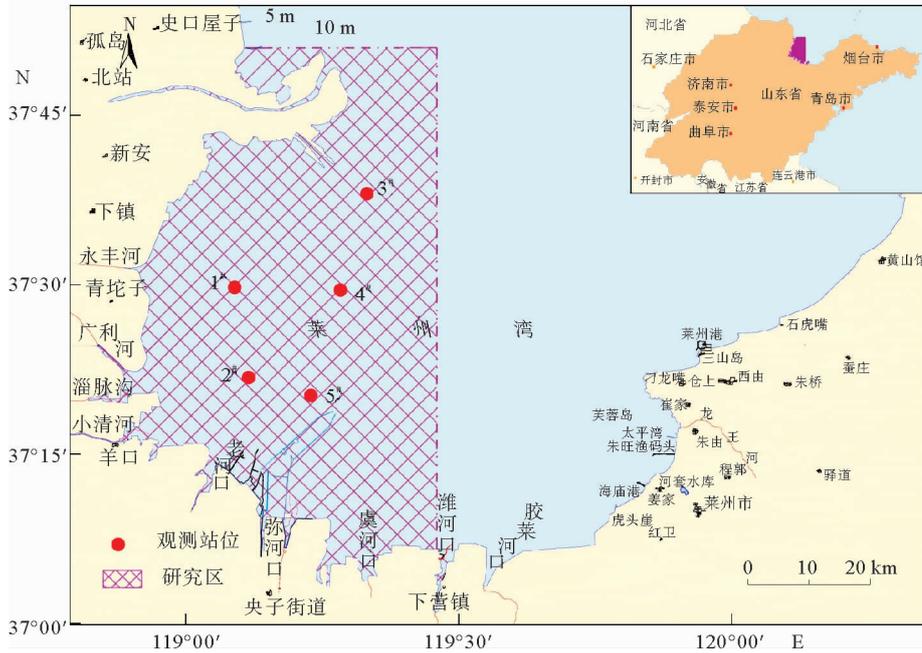


图1 研究区位置及观测站位

Fig.1 Geographic location and survey stations in the study area

悬浮泥沙取样调查。海流观测采用 AEM213-D 型电磁海流计,观测层位一般为表层(距海水表面 0.5 m)、0.6H 层(H 为实测水深,下文简称为中层)和底层(距底床 0.5 m),水深 < 5 m 时只对表层和底层进行观测。观测时间间隔为 1 h。水样的采集与海流观测同步进行,样品送回实验室进行抽滤、烘干、称重,计算得到悬浮泥沙浓度数据。

2.2 研究方法

通量机制分解法是研究物质运输的一种十分有效的方法^[13-16]。本文在实测资料的基础上,根据 Dyer^[17]的物质通量计算方法,将实测瞬时流速 u 分解为垂向平均值 U 和垂向偏差项 u' ,垂向平均值又可以分解为垂向平均的潮周期平均项 \bar{u}_0 和垂向平均的潮周期偏差项 \bar{u}_t ;同理,悬浮泥沙浓度 c 也可分解为垂向平均的潮周期平均项 \bar{c}_0 ,垂向平均的潮周期偏差项 \bar{c}_t 和垂向偏差项 c' 。水深 h 可分解成潮周期平均项 h_0 和潮周期偏差项 h_t 。即

$$u = \bar{u}_0 + \bar{u}_t + u' \quad (1)$$

$$c = \bar{c}_0 + \bar{c}_t + c' \quad (2)$$

$$h = h_0 + h_t \quad (3)$$

潮周期平均单宽输水量可表示为:

$$\langle Q \rangle = \frac{1}{T} \int_0^T \int_0^h u dz dt = \bar{u}_0 h_0 + \langle \bar{u}_t h_t \rangle \quad (4)$$

式中: $\langle \rangle$ 为潮平均;

T 为潮周期;

$\bar{u}_0 h_0$ 为平均流项;

$\langle \bar{u}_t h_t \rangle$ 为潮汐与潮流相关项。

潮周期单宽泥沙输运量可表示为:

$$\begin{aligned} \langle Q_s \rangle &= \frac{1}{T} \int_0^T \int_0^h u c dz dt = \bar{u}_0 \bar{c}_0 h_0 + \\ &\langle \bar{u}_t h_t \rangle \bar{c}_0 + \bar{u}_0 \langle \bar{c}_t h_t \rangle + \langle \bar{u}_t \bar{c}_t \rangle h_0 + \\ &\langle \bar{u}_t \bar{c}_t h_t \rangle + \langle \bar{u} c' \rangle h_0 + \langle \bar{u} c' h_t \rangle \\ &= T1 + T2 + T3 + T4 + T5 + T6 + T7 \quad (5) \end{aligned}$$

式中: $T1$ 为欧拉余流输运项;

$T2$ 项为斯托克斯漂移项;

$T1+T2$ 为拉格朗日输运,称为平流输运项;

$T3、T4、T5$ 为悬浮泥沙与潮汐相关项,是由于潮汐引起的泥沙浓度变化而产生的泥沙输运,称为潮泵效应;

$T3+T4+T5$ 称为潮泵效应项;

$T6$ 为由垂向含沙量分层引起的重力环流贡献项;

$T7$ 与环流输运和水深变化有关, $T6+T7$ 称为垂向净环流输移项。

3 结果

3.1 悬浮泥沙浓度时空分布

3.1.1 悬浮泥沙浓度空间分布特征

(1) 平面分布

大潮和小潮期间,各观测站位垂向平均悬浮泥沙浓度分别介于 25.9~49.9 和 14.8~35.5 mg/L 之间,结果如表 1 所示。在一个潮周期内,垂向平均悬浮泥沙浓度整体呈现北高南低、近岸

大于远岸的趋势,并且各站位大潮时悬浮泥沙浓度约为小潮期的 1.5 倍。

(2) 垂向分布

各站位各层潮周期平均悬浮泥沙浓度具有随水深增加而增大的趋势(图 2、3)。其中,大潮期 1[#]、5[#] 及小潮期 1[#] 的悬浮泥沙浓度在垂向上的变化率较为均一,由表层向底层逐渐增大;大潮期 3[#]、4[#] 及小潮期 3[#] 的悬浮泥沙浓度从表层至中层增大缓慢,中层至底层增大较快。大潮期 2[#] 及小潮期 2[#]、4[#]、5[#] 站位悬浮泥沙浓度在垂向上变化较小。

表 1 研究区大小潮悬浮泥沙浓度特征值

Table 1 Suspended sediment concentration during a spring and neap tide period in the study area

站位	大潮					小潮				
	水深/m	悬浮泥沙浓度/(mg/L)				水深/m	悬浮泥沙浓度/(mg/L)			
		表层	中层	底层	垂向平均		表层	中层	底层	垂向平均
1 [#]	4.9	34.8	—	47.1	41.0	4.6	25.2	—	35.6	30.4
2 [#]	6.6	24.2	26.5	27.4	26.0	6.1	19.1	19.3	21.2	19.6
3 [#]	5.7	46.6	48.0	59.5	49.9	5.5	34.2	34.5	39.8	35.5
4 [#]	9.1	36.2	37.6	48.3	39.3	8.3	21.8	23.0	25.2	23.1
5 [#]	7.9	22.9	26.1	29.6	25.9	7.6	14.4	14.9	15.2	14.8

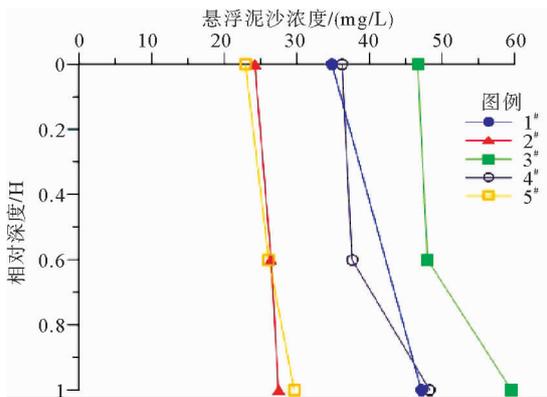


图 2 大潮期间潮周期平均悬浮泥沙浓度分布
Fig. 2 The distribution of average suspended sediment concentration during a neap tide

3.1.2 悬浮泥沙浓度时间分布特征

各站位大小潮悬浮泥沙浓度和潮流流速随时间变化如图 4 所示,从图中可以看出,各站位底部悬浮泥沙浓度的变化更加明显,在观测时段内出现多次高浓度峰并且大潮悬浮泥沙浓度峰明显高

于小潮悬浮泥沙浓度峰。根据悬浮泥沙浓度峰出现的时间可以看出,大小潮的悬浮泥沙浓度峰一般都出现在涨急、落急之后,说明悬浮泥沙浓度有随潮流流速更迭而呈现周期性变化的趋势。

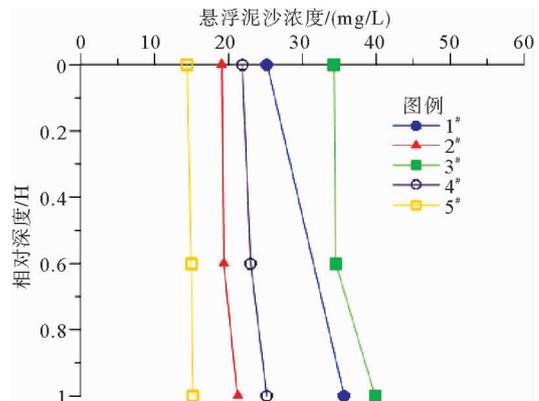


图 3 小潮期间潮周期平均悬浮泥沙浓度分布
Fig. 3 The distribution of average suspended sediment concentration during a spring tide

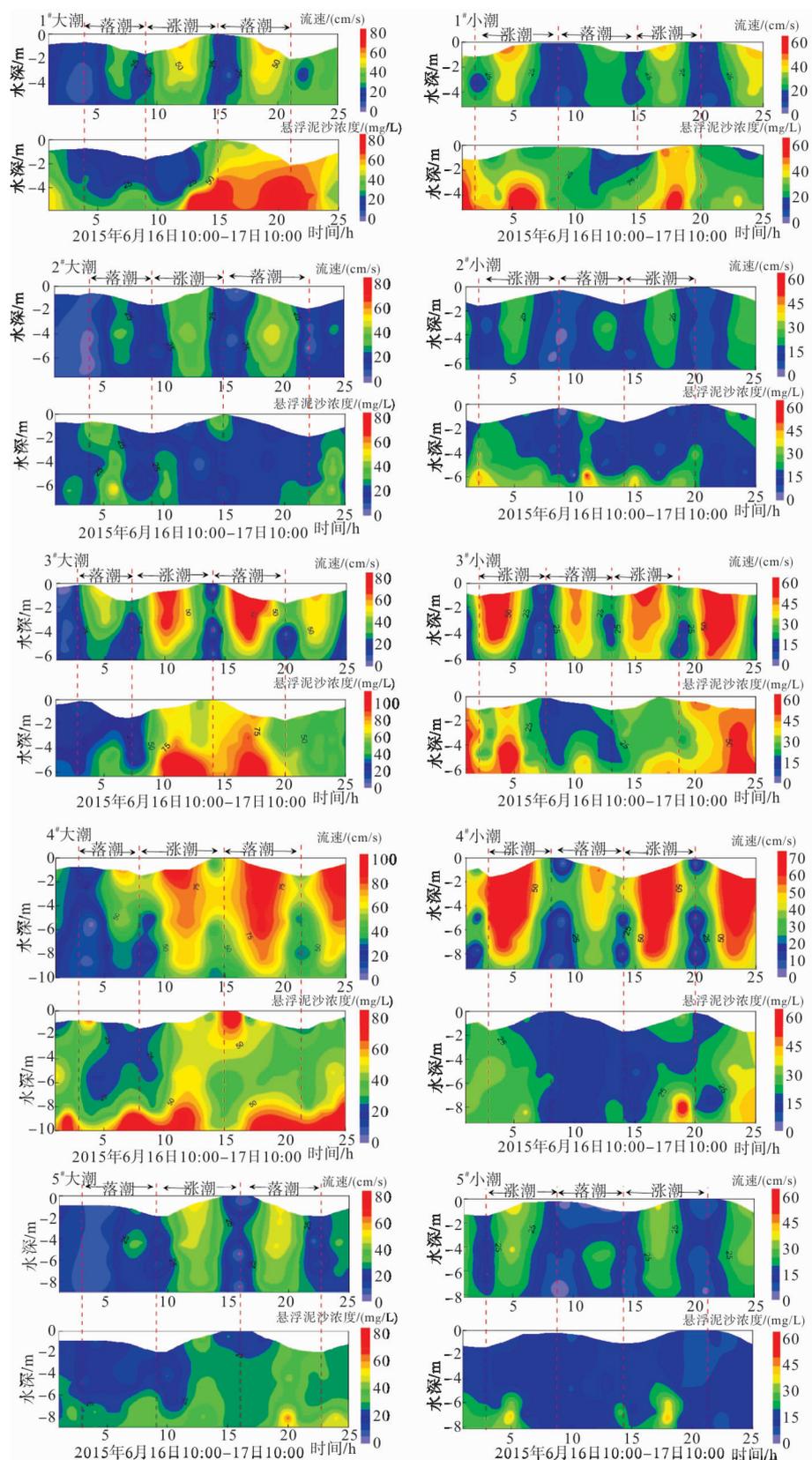


图4 各站位大小潮潮流流速和悬浮泥沙浓度随时间变化的分布

Fig. 4 The variation in spring and neap tidal current velocity and suspended sediment concentration with time

3.2 悬浮泥沙通量机制分解

3.2.1 水量输运及余流

利用各测点大小潮的海流同步观测资料,按照公式(1)、(3)和(4)计算得到潮周期单宽输水量,结果如表 2 所示。 Q_E 、 Q_S 、 Q_L 的方向分别取决于欧拉余流、斯托克斯余流和拉格朗日余流的输运方向(正值表示涨潮方向,负值表示落潮方向)。

大潮期间,1#、2#、3#、5# 站位欧拉余流、斯托克斯余流和拉格朗日余流均与涨潮流方向一致;4# 站位欧拉余流与斯托克斯余流方向相反,分别与涨潮流及落潮流方向一致;小潮期间,3# 站位欧拉余流、斯托克斯余流和拉格朗日余流的方向与大潮期相反,均与落潮流方向一致;其余站位的余流方向与大潮期一致。观测期间,大部分站位欧拉余流与涨潮流方向一致。

表 2 潮周期单宽平均输水量

Table 2 Average transport discharge per unit width $/(m^3 \cdot (s \cdot m)^{-1})$

测站	大潮			小潮		
	Q_E	Q_S	Q_L	Q_E	Q_S	Q_L
1#	0.101	0.039	0.140	0.071	0.030	0.101
2#	0.087	0.027	0.114	0.079	0.020	0.099
3#	0.081	0.038	0.119	-0.075	-0.057	-0.133
4#	0.373	-0.117	0.256	0.371	-0.069	0.302
5#	0.347	0.018	0.365	0.243	0.017	0.261

各站位余流计算结果见图 5、6,欧拉余流在拉格朗日余流中占据主导地位,并且欧拉余流的方向和拉格朗日余流十分接近,在研究区内大致形成一个顺时针环流。拉格朗日余流的计算数值在 1.3~4.6 cm/s 之间,大部分站位的斯托克斯余流相对较弱,其数值基本 <1 cm/s。

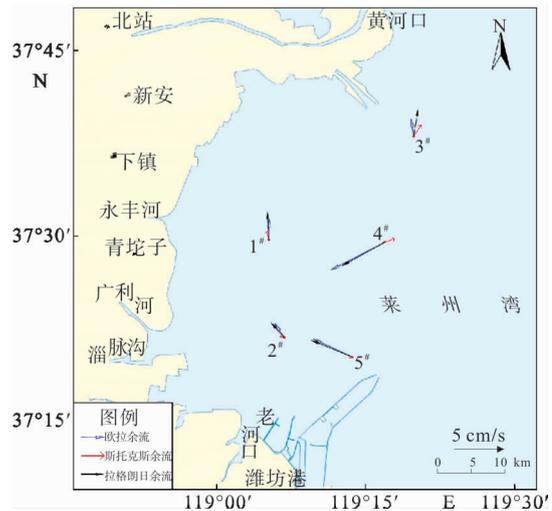


图 6 研究区海域小潮期余流矢量

Fig. 6 Residual currents vector graph for the study region during a spring tide

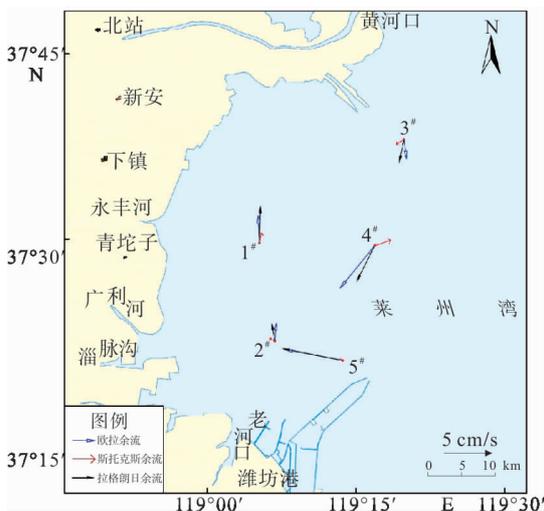


图 5 研究区海域大潮期余流矢量

Fig. 5 Residual currents vector graph for the study region during a spring tide

3.2.2 悬浮泥沙输运

利用各站位大小潮的同步观测资料,按照公式(1)~(3)和(5),计算得到潮周期单宽悬浮泥沙输运通量,结果如表 3、4 所示。

在大小潮悬浮泥沙输运通量分解后的各项中,大部分以 $T1$ 、 $T2$ 和 $T4$ 为主要贡献项,其余

表3 大潮期间单宽悬浮泥沙输运通量机制分解

Table 3 Analysis of suspended sediment transport per unit width during a spring tide

测站	/(g · s ⁻¹ · m ⁻¹)				
	1#	2#	3#	4#	5#
T1	3.46	2.06	4.04	14.47	8.82
T2	1.32	0.64	1.88	-4.55	0.46
T3	-0.05	0.02	-0.02	0.17	-0.01
T4	-3.36	-1.26	-3.42	3.75	2.02
T5	0.31	-0.15	1.32	-1.98	0.29
T6	-1.06	-0.23	-0.27	-2.01	-0.50
T7	-0.28	0.04	-0.04	-0.09	-0.03
T总	0.34	1.14	3.50	13.72	11.06
T绝对值	9.84	5.54	10.99	27.02	12.13

表4 小潮期间单宽悬浮泥沙输运通量机制分解

Table 4 Analysis of suspended sediment transport per unit width during a neap tide

测站	/(g · s ⁻¹ · m ⁻¹)				
	1#	2#	3#	4#	5#
T1	1.91	1.44	-2.54	8.07	3.53
T2	0.81	0.37	-1.93	-1.51	0.25
T3	0.01	-0.01	0.01	-0.07	-0.03
T4	3.72	-0.07	-1.51	-3.95	3.04
T5	0.41	-0.06	-0.23	0.41	0.03
T6	0.21	0.36	0.31	0.29	0.09
T7	-0.01	0.01	0.01	0.01	-0.01
T总	7.06	2.04	-5.88	3.25	6.90
T绝对值	7.08	2.32	6.31	14.30	7.00

各项所占比例很小。对比单宽输沙量绝对值和单宽净输沙量可以看出,大潮期1#站位单宽输沙量

绝对值是单宽净输沙量的28.7倍,由此推断该站位泥沙交换的主要形式为“多进多出搬运”,其余站位单宽输沙量的绝对值与单宽净输沙量的比值均<5,由此推断泥沙交换表现为输沙的不对称性。

为了能够更有效地比较悬浮泥沙输运通量机制分解中各项所占的比重,本文采用“平流比”^[18]来描述平流输运项与潮泵效应项的比值(表5)。

小潮期间1#站位平流比<1,说明泥沙输运以潮泵项为主,水体与海底泥沙间的交换强烈。除小潮期1#站位,其余站位大小潮期间的平流比均>1,说明泥沙输运以平流项为主。

4 讨论

4.1 悬浮泥沙浓度变化的影响因素

(1) 悬浮泥沙浓度与水动力的关系

海水中泥沙运动的重要体现就是悬浮泥沙浓度的变化,而潮流作为莱州湾入海泥沙运动的主要动力^[19],是影响悬浮泥沙浓度变化的主要影响因素。根据悬浮泥沙浓度的时间变化规律,大部分站位的潮流流速在开始涨、落潮后2~3 h达到最高,悬浮泥沙浓度峰也随之出现。据统计,大小潮期间悬浮泥沙浓度峰与流速峰同步出现或悬浮泥沙浓度峰滞后流速峰1~2 h的现象均有发生,其中,大潮期间悬浮泥沙浓度峰大多滞后流速峰1 h;小潮期间悬浮泥沙浓度峰大多滞后流速峰2 h,两者间有较好的相关性,这与前人研究的附近区域悬浮泥沙特点类似^[20]。滞后的时间由于波

表5 各测站大小潮期间悬浮泥沙输运对比

Table 5 Comparison between suspended sediment transports of a spring tide and a neap tide

测站	大潮			小潮		
	T1+T2	T3+T4+T5	平流比	T1+T2	T3+T4+T5	平流比
1#	4.78	-3.10	1.540	2.72	4.13	0.658
2#	2.70	-1.38	1.953	1.81	-0.14	1.953
3#	5.92	-2.12	2.793	-4.47	-1.73	2.590
4#	9.93	5.90	1.682	6.56	-3.61	1.820
5#	9.28	2.31	4.023	3.78	3.05	1.242

浪和海底沉积物的不同会存在一定的差别。

(2) 悬浮泥沙浓度与底质类型分布的关系

根据莱州湾西南部海域表层沉积物类型分布^[21], 3[#] 站位于粉砂区, 其悬浮泥沙浓度明显大于其余位于砂质粉砂区的站点。江文胜等^[22] 针对莱州湾底质类型及悬浮物的粒径分布的调查结果表明, 距黄河口较近的区域中底质粒径分布存在 2 个峰值, 其中较细的峰值与水体悬浮颗粒粒径相近; 而距河口较远区域的底质呈单峰分布, 粒径相对较粗。这说明底部泥沙的再悬浮对研究区内水体含沙量的贡献十分重要。正常潮流动力条件下, 研究区底质类型中较细的颗粒易形成再悬浮, 使得悬浮泥沙浓度相对较大。

5 结论

(1) 莱州湾西南部海域悬浮泥沙浓度分布在平面上呈现北高南低的特征; 在垂向上, 由表层向底层逐渐增加, 但变化梯度整体较小; 在时间上, 底层悬浮泥沙浓度在涨、落急时段出现峰值, 且大潮期悬浮泥沙浓度峰值大于小潮期。

(2) 研究区海域悬浮泥沙在一个潮周期内的输运具有不对称性, 欧拉余流和斯托克斯效应共同产生的平流输运在莱州湾西南部海域悬浮泥沙输运中起到主导作用, 潮汐捕捉作用是次要因素。

(3) 潮流和波浪是造成悬浮泥沙浓度变化的主要因素。研究区悬浮泥沙浓度具有随涨、落潮交替和流速更迭而呈现周期性变化的趋势, 悬浮泥沙浓度峰值大致滞后流速峰值 1~2 h。

参考文献:

- [1] Milliman J D, Shen H T, Yang Z S, et al. Transport and deposition of river sediment in the Changjiang Estuary and adjacent continental shelf[J]. *Continental Shelf Research*, 1985, 4: 37-45.
- [2] Webster T, Lemckert C J. Sediment resuspension within a microtidal estuary/embayment and the implication to channel management[J]. *Journal of Coastal Research*, 2002, SI36(4): 753-759.
- [3] Hu R J, Wu J Z, Zhu L H, et al. Suspended Sediment Transport and Deposition in the Zhoushan Archipelago Sea Area[J]. *Journal of Ocean University of China: Oceanic and Coastal Sea Research*, 2009, 8(4): 343-351. doi: 10.1007/s11802-009-0343-y.
- [4] Le V S, Yamashita T, Okunishi T, et al. Characteristics of suspended sediment material transport in the Ishikari Bay in snowmelt season[J]. *Applied Ocean Research*, 2006, 28: 275-289.
- [5] 万新宁, 李九发, 沈焕庭, 等. 长江口外海滨泥沙分布及扩散特征[J]. *地理研究*, 2006, 36(3): 68-75.
- [6] 陈沈良. 杭州湾口南汇咀近岸水域水沙特征与通量[J]. *海洋科学*, 2004, 28(3): 18-22.
- [7] 唐建华, 梁 斌, 季若华. 强潮河口悬浮泥沙浓度垂向结构分析——以杭州湾乍浦水域大潮期为例[J]. *水利水运工程学报*, 2009, 6(2): 39-43.
- [8] 刘桂卫, 黄海军, 丘仲锋. 大风浪影响下海域泥沙输运异变数值模拟[J]. *水科学进展*, 2010, 21(5): 701-707.
- [9] 计建强, 汪一航, 王新怡, 等. 夏季黄河入海泥沙的数值模拟研究[J]. *海洋科学*, 2016, 40(3): 118-127.
- [10] 刘艳霞, 黄海军. 基于遥感反演的莱州湾泥沙分布及其沉积动力分析[J]. *海洋学报*, 2013, 35(6): 43-53.
- [11] 崔廷伟, 张 杰, 马 毅, 等. 渤海悬浮物分布的遥感研究[J]. *海洋学报*, 2009, 31(5): 10-18.
- [12] 刘 晓, 黄海军, 刘艳霞, 等. 黄河三角洲附近海域悬浮泥沙浓度估算[J]. *人民黄河*, 2013, 35(2): 10-12.
- [13] 堵盘军, 张 蓓, 费岳军, 等. 温州瓯飞浅滩海域悬沙输运特征及其来源探讨[J]. *泥沙研究*, 2012(6): 65-74.
- [14] 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.
- [15] 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.
- [16] 刘高峰, 朱建荣. 河口涨落潮槽水沙输运机制研究[J]. *泥沙研究*, 2005(5): 51-57.
- [17] Dyer K R. *Estuaries: A Physical Introduction* [M]. 2nd ed. Singapore: John Wiley & Sons, 1997: 195.
- [18] 宋永港, 卢永金, 刘新成. 黄浦江河口水沙输运机制研究[J]. *华东师范大学学报*, 2016(3): 136-145.
- [19] 李殿魁, 杨玉珍, 等. 延长黄河口清水沟流路行水年限的研究[M]. 郑州: 黄河水利出版社, 2002: 42-86.
- [20] 陈 斌, 刘 健. 莱州湾悬沙输运机制研究[J]. *水科学进展*, 2005, 26(6): 857-866.
- [21] 陈文良, 郑世民, 朱龙海, 等. 莱州湾西部海域表层沉积物运移趋势[J]. *海洋地质前沿*, 2016, 32(11): 12-17.
- [22] 江文胜, 王厚杰. 莱州湾悬浮泥沙分布形态及其与底质分布的关系[J]. *海洋与湖沼*, 2005, 36(2): 97-103.

THE CONCENTRATION CHANGE AND TRANSPORT MECHANISM OF SUSPENDED SEDIMENTS IN SOUTHWESTERN LAIZHOU BAY

JIANG Rui¹, WU Jianzheng^{1,2}, ZHU Longhai^{1,2}, HU Rijun^{1,2}, YUE Nana³

(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 The First Institute of Oceanography, SOA, Qingdao 266061, China)

Abstract: Observations for 25 hours during a spring and neap tide cycle were carried out at five sites of the southwestern Laizhou Bay on June 2015, together with suspended sediment sampling. Temporal and spatial changes in suspended sediment concentration were studied. The method of flux mechanism analysis was then adopted to study the transport mechanism of the suspended matter and the influence factors of concentration changes. Results show that the concentration of suspended sediment in the southwestern area of Laizhou Bay has a decreasing tendency from north to south and an increasing trend from surface to bottom. The concentration of suspended matter near the bottom peaked in both the ebb and flood tides, which is several times as high as the normal. The sediment transport during a tide cycle is asymmetry, and the advection transport dominates the suspended matter. Facts suggest that hydrodynamics is the principal factor affecting the change in suspended sediment concentration. The suspended sediment concentration has a positive correlation with flow rate. However, the peak concentration is mostly delayed by 1-2 h.

Key words: The southwestern Laizhou Bay; suspended sediment; flux mechanism