

皇甫雪睿,李 毅,胡日军,等.烟台西部近岸海域冬季悬浮泥沙浓度时空变化及其输运特征[J].海洋地质前沿,2020,36(5):22-33.

烟台西部近岸海域冬季悬浮泥沙浓度 时空变化及其输运特征

皇甫雪睿¹,李 毅²,胡日军^{1,3},朱龙海^{1,3},刘 波¹,尹砚军¹

(1 中国海洋大学海洋地球科学学院,青岛 266100;2 华能霞浦核电有限公司,福建宁德 352000;

3 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:基于 2017 年 12 月在烟台港近岸海域 6 个站位大、小潮期的海流和悬沙同步观测资料,分析了悬浮泥沙浓度的时空变化规律,利用悬浮泥沙通量机制分解方法计算了研究区的悬浮泥沙输运通量,并初步讨论了潮流作用下悬浮泥沙的输运机制。结果表明,研究区各站位悬浮泥沙含量大潮期大于小潮期;大潮期各站位悬浮泥沙浓度多出现 2~4 个峰值,小潮期各站位悬浮泥沙浓度变化较为复杂,其规律性较弱;悬浮泥沙变化一般滞后于流速变化 1~2 h。从平面分布上来看,研究区大潮期各站位悬浮泥沙浓度差异较大,小潮期差异较小;垂向上,大小潮期各层位悬浮泥沙含量变化不大,层化现象较弱。研究区水体的平流输运项主导着这一区域的悬浮泥沙输运,垂向净环流项起辅助作用,其他输沙项的贡献很小,研究区悬浮泥沙净输运方向与余流方向大致一致。大潮期垂向净环流项对悬浮泥沙输运的贡献略大于小潮期,小潮期平流输运项对悬浮泥沙输运的贡献略大于大潮期,大小潮变化对研究区泥沙输运影响显著。

关键词:烟台西部近岸海域;悬浮泥沙;时空变化;泥沙输运

中图分类号:P954

文献标识码:A

DOI:10.16028/j.1009-2722.2019.107

0 引言

悬浮体是沉积物向海洋输运过程中的主要运移形式,其主要成分为悬浮泥沙^[1]。悬浮泥沙的搬运、沉降、再悬浮过程对海底地形地貌的形成变化意义重大^[2-3]。此外,海水中悬浮体一般颗粒较小,对颗粒态营养盐和污染物具有较强的吸附作用,因此悬浮体的分布和输运也会影响到生态环境与海洋生物化学循环^[4-5]。

渤、黄海的沉积泥沙输运季节显著,具有“夏

储冬输”的特点^[2,6],冬季是悬浮泥沙输运的主要季节,冬季悬浮泥沙浓度大,冬季的表层悬浮泥沙浓度大约是夏季的 3~10 倍^[7],其输运量也远大于夏季。渤海地区悬浮物受水动力影响很大,通常情况下其浓度受潮流作用控制^[8],渤海与黄海悬浮泥沙有较为频繁的交流,春季黄海悬浮泥沙经渤海海峡进入渤海,夏秋冬季渤海悬浮泥沙通过渤海海峡进入北黄海^[9],根据前人研究,每年约有 1 000 t 的沉积物由渤海通过渤海海峡南部进入北黄海^[10]。黄海悬浮泥沙的分布受海流与海浪作用明显,并且也受到河流输沙及海底地形的影响^[11],北黄海悬浮泥沙浓度受水深及水动力影响较大,冬季水体中悬浮泥沙浓度远高于夏季,从蓬莱至威海沿岸海域,水体悬浮物浓度呈递减趋势,表明有部分再悬浮沉积物在向东输送过程中会沿途沉积^[12]。对于悬浮泥沙的输运机制,不同地区主导因素有所不同,例如长江口、废黄河口地

收稿日期:2019-04-25

资助项目:国家自然科学基金面上项目“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:皇甫雪睿(1994—),男,在读硕士,主要从事海洋地质方面的研究工作.E-mail: 1449913956@qq.com

区以欧拉余流为主,而在连云港近岸海域、天津港附近海域潮泵效应则是悬沙输运的主导因素^[13-16],与本文研究区相邻的蓬莱近岸地区,悬浮泥沙的输运由平流输运项主导,悬浮泥沙的输运受余流影响显著^[17]。

研究区位于烟台西部,靠近庙岛海峡,是黄渤海悬浮泥沙输运的必经之路,受到黄渤海物质交换的影响明显^[17-19]。对于黄渤海的物质交换,春季净输入物质为由黄海向渤海,而在夏季、秋季和冬季净输运物质则由渤海指向黄海,3个季节中冬季输运量最大^[20]。研究区附近海域水动力较弱,大潮期潮流流速大于小潮期,落潮流流速大于涨潮流。此外,研究区人类活动频繁,港口等人工构筑物建设会对近岸水动力和地形地貌产生显著影响^[21]。

为进一步认识烟台西部近岸海域的现代沉积环境特征及泥沙分布、输运过程,同时为研究区海洋工程建设和海岸带科学管理、利用与防护等提供参考,本文基于2017年12月(冬季)在烟台港近岸海域6个站位对大小潮的海流和悬沙同步观测资料,分析了冬季潮流作用下悬浮泥沙的分布特征及其变化规律,并利用悬浮泥沙通量机制分解方法初步探讨了冬季潮流作用下烟台西部近岸海域悬沙的输运特征。海流和悬沙同步观测可获取的连续的实时同步数据能很好地反映潮流与悬浮泥沙的变化趋势及其之间的对应关系。

1 研究区概况

研究区(图1)位于山东半岛北部、烟台西部近岸海域,为剥蚀堆积准平原区,地形和地貌类型

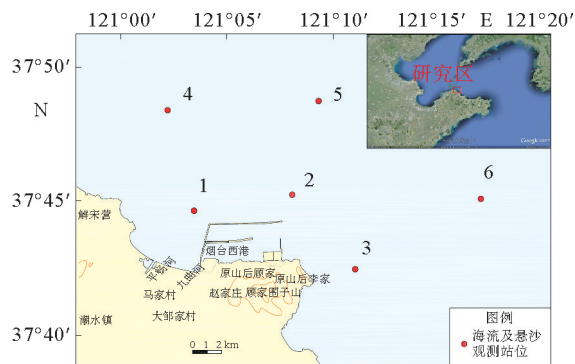


图1 研究区位置与观测站位图

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

简单。研究区附近海域水深一般为10~20 m。潮汐属于正规半日潮,日不等现象不明显,大潮潮差2.12 m,小潮潮差1.87 m。潮流以往复流为主,主流向NW—SE向,潮流类型属不正规半日潮流。研究区常风向为N向,强风向为NNW和NW向^[22]。常浪向为NNW、NW,出现频率分别为8.20%、8.19%;次常浪向为N、NNE,出现频率分别为5.91%、5.77%。强浪向为NNW向,次强浪向为N向^[23]。

2 资料来源与方法

2.1 海流观测及处理

中国海洋大学在烟台港西港近岸海域布设了6个海流观测站位(图1),分别进行了大、小潮期单周日同步观测,观测时间分别为2017年12月19日15时至2017年12月20日15时(大潮期)、2017年12月27日10时至2017年12月28日10时(小潮期)。

海流观测使用声学多普勒流速流向仪(1号、2号、4号和5号站位,流速测量精度 $\pm 0.25\%$, ± 2.0 mm/s)以及直读式海流计(3号和6号站位,流速测量精度 ± 1 cm/s)对流向、流速、水深等数据进行采集,测流间隔为1 h,每次测流历时150 s。其中1号、2号、4号和5号站位数据处理按“六点法”进行(即表层、0.2H、0.4H、0.6H、0.8H和底层),3号和6号站位数据处理按“三层法”(即表层、中层和底层)进行。本文调查所用仪器精度符合本文研究需要。

2.2 悬浮泥沙取样及处理

在测流过程中使用竖式采水器同步采取现场水样,数据采集频率时间间隔1 h。经实验室处理(抽滤、烘干、称重),获取各站位的悬浮泥沙含量数据。各站位悬浮泥沙数据处理按表层、中层、底层进行。悬浮泥沙浓度的测定采用误差在 $\pm 2\%$ 之内的真空抽滤实验进行测定。

2.3 悬浮泥沙通量机制分解

通量机制分解法是一种通量计算方法,在国内外通量计算研究中得到广泛认可,被认为是较

为可靠、成熟的计算方法^[24-28]。

依据 Ingram^[29] 和 Uncles 等^[30] 提出的通过相对水深对瞬时物质输运量进行分解的方法,瞬时流速用 $u(x, z, t)$ 表示,其中 x 表示纵向坐标, $z(0 \leq z \leq 1)$ 表示相对水深, t 表示时间,相应地水深 h 可表示为 $h(x, t)$, 含沙量 c 可表示为 $c(x, z, t)$ 。在不考虑流速脉动项的前提下,潮周期 T_i 平均瞬时单宽悬沙输移通量 T 的计算式为:

$$T = \frac{1}{T_i} \int_0^{T_i} \int_0^h u c \, dz \, dt = \frac{1}{T_i} \int_0^{T_i} \int_0^1 u c h \, dz \, dt =$$

$$\begin{aligned} & h_0 \overline{u_0 c_0} + \langle h_i \overline{u_i c_i} \rangle + \overline{c_0} + \langle h_i \overline{c_i} \rangle + \overline{u_0} + \\ & \langle h_i \overline{u_i c_i} \rangle + h_0 \overline{u'_0 c'_0} + \langle h_i \overline{u'_i c'_i} \rangle + \\ & \langle h_i \overline{u'_i c'_i} \rangle + \langle h_i \overline{u'_i c'_i} \rangle = \\ & (T_1) + (T_2) + (T_3) + (T_4) + (T_5) + \\ & (T_6) + (T_7) + (T_8) \end{aligned}$$

式中: T_1 为欧拉余流贡献项;

T_2 为斯托克斯漂移输移量;

$T_1 + T_2$ 为平流输移;

T_3 为潮汐与悬浮泥沙变化的相关项;

T_4 为悬浮泥沙与潮流变化的相关项;

T_5 为垂向流速变化和悬浮泥沙含量变化的相关项,是垂向上的净环流产生的贡献;

T_6, T_7 分别为时均量和潮汐振动切变引起的剪切扩散;

T_8 为垂向潮振切变作用。

3 研究区海流特征

3.1 实测海流特征

研究区涨潮流流向主要集中在偏东南向,落潮流流向主要集中在西北向(图 2)。由表 1 可见,平面上表现为大潮期 1~6 站点表

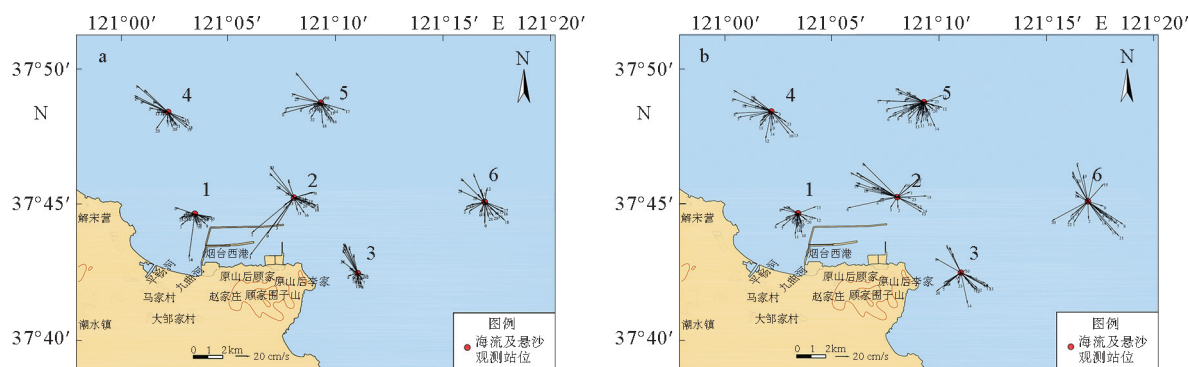


图 2 大潮期(a)和小潮期(b)各站位垂线平均潮流矢量图

Fig.2 Average tide vector of each station in the spring tide period(a)and in the neap tide period(b)

表 1 大、小潮期间海流观测特征值

Table 1 Characteristic values of current observation during the spring tide and neap tide

测站	流速/(cm/s), 流向/(°)															
	平均流速				涨潮最大流速								落潮最大流速			
	大潮		小潮		大潮		小潮		大潮		小潮		大潮		小潮	
	表层 流速	底层 流速	表层 流速	底层 流速	表层 流速	底层 流速	表层 流速	底层 流速	表层 流速	底层 流速	表层 流速	底层 流速	表层 流速	底层 流速	表层 流速	底层 流速
1	22.5	12.6	12.9	7.7	41.5	130.1	18.1	307.8	24	116.2	18.8	164	51.1	285.9	17.2	317.6
2	45.4	15.6	21.1	7.8	51.3	104.1	14.5	114.1	33	123.3	15	251.7	126.1	289.7	86.7	142.2
3	21.2	15.4	12.1	12.3	33.4	313.9	17.9	340.8	25.9	197.8	20	115.4	54.5	338.5	34.7	332.4
4	34.9	10.1	18.2	8.7	52.6	134.2	16.1	112.7	24.8	137.3	14.9	325.1	78.2	306	14.3	325
5	33	9.9	19.4	7.5	50	126	17.5	75.8	25.6	146	20.9	184.7	89.1	322.8	19.2	123.9
6	28.3	20.6	20.6	18.9	41	326.7	31.9	99.5	43.2	305.4	41	299.5	75.6	321.5	51.7	301.6

层、底层平均流速分别介于 21.2~45.4、9.9~20.6 cm/s,小潮期 1~6 站点表层、底层平均流速分别介于 12.1~21.1、7.5~18.9 cm/s。研究区海域大潮期涨潮时最大流速约为 52.6 cm/s,落潮时最大流速约为 126.1 cm/s;小潮期涨潮时最大流速约为 43.2 cm/s,落潮时最大流速约为 56.0 cm/s。研究区潮流整体表现为落潮流速大于涨潮流速,大潮期流速大于小潮期流速,由表层至底层流速逐渐减小。

3.2 潮余流特征

由表 2 可见,研究区大潮期潮余流值为 1.2~11 cm/s,各站位中 2 号和 4 号站表层潮余流流速最大,均为 11.0 cm/s,流向分别为 309.7°和 263.1°,5 站底层潮余流流速最小,为 1.2 cm/s,流向为 93.6°。小潮期潮余流值介于 0.5~13.1 cm/s,

2 号站表层潮余流流速最大,为 13.1 cm/s,流向为 319.8°。各站位中 1 号、3 号和 4 号站位小潮期余流流速小于大潮期,2 号、5 号和 6 号站位小潮期余流流速大于大潮期(图 3)。

4 悬浮泥沙时空分布及变化特征

4.1 悬浮泥沙时间变化特征

4.1.1 涨落潮时段悬浮泥沙浓度变化规律

大潮期间悬浮泥沙涨落潮阶段平均浓度结果(见表 3 和图 4a)表明,1 号、3 号和 6 号 3 个站位落潮阶段悬浮泥沙含量介于 20.6~26.2 mg/L,涨潮阶段悬浮泥沙含量介于 20.3~25.4 mg/L,落潮阶段悬浮泥沙含量大于涨潮阶段;2 号、4 号和 5 号 3 个站位落潮阶段悬浮泥沙含量介于

表 2 2017 年 12 月大、小潮期各站位潮余流分布特征

Table 2 Distribution characteristics of tidal currents at stations in the spring tide and neap tide periods in December 2017

流速/(cm/s),方向/(°)

测站	大潮								小潮							
	表层		中层		底层		平均		表层		中层		底层		平均	
	流速	方向	流速	方向	流速	方向	流速	方向	流速	方向	流速	方向	流速	方向	流速	方向
1	8.7	167.9	2.9	197.1	3.7	144.5	5.1	169.8	3.7	199.5	0.8	208.8	0.5	340.9	1.7	249.7
2	11	309.7	7.4	338.7	6.3	78.9	8.2	242.4	13.1	319.8	11.5	300.4	3.6	315.1	9.4	311.8
3	9.4	312.3	6.3	317.5	5.5	321.5	7.1	317.1	3.6	62.7	3.2	12.4	3.7	14.8	3.5	30
4	11	263.1	11.9	271.5	1.4	128.3	8.1	221	7.8	278.7	7.3	264.6	3.2	301.8	6.1	281.7
5	9.4	315.2	8.1	319.4	1.2	93.6	6.2	242.7	12.2	295.5	11.9	295.3	2.5	242.6	8.9	277.8
6	10	312.8	8.7	310.7	7	282.1	8.6	301.9	9.5	284	13	353.8	10.2	298.4	10.9	312.1

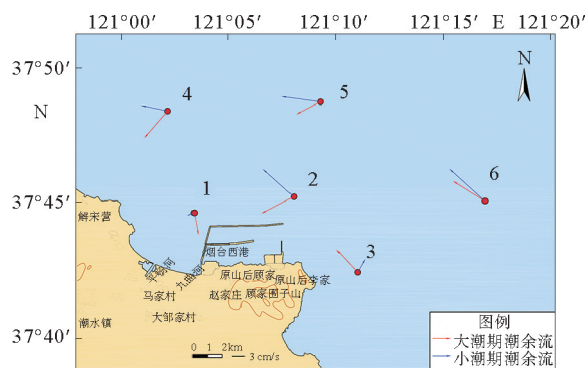


图 3 大、小潮期各站位垂线平均余流矢量图

Fig.3 Average residual current vector at each station in the spring and neap tide

24.1~66.4 mg/L,涨潮阶段悬浮泥沙含量介于 28.7~70.7 mg/L,涨潮阶段悬浮泥沙含量大于落潮阶段,6 个站位总体平均悬浮泥沙含量涨潮阶段略大于落潮阶段。各站位涨落潮平均悬浮泥沙浓度的比值介于 0.93~1.19,平均值约为 1.07,表明各站位涨潮阶段平均悬浮泥沙含量与落潮阶段较为接近。

小潮期的一个潮周期内(见表 3 和图 4b),1 号、2 号、4 号和 6 号 4 个站位落潮阶段悬浮泥沙含量介于 16.7~27.2 mg/L,涨潮阶段悬浮泥沙含量介于 14.7~26.5 mg/L,落潮阶段悬浮泥沙含量大于涨潮阶段;3 号、5 号 2 个站位悬浮泥沙

表3 大、小潮期各站涨落潮阶段平均悬浮泥沙含量

Table 3 Average suspended sediment content during the rising and falling tides in spring tide and neap tide
(mg/L)

站号	大潮			小潮		
	落潮垂向平均	涨潮垂向平均	涨落潮垂向悬浮泥沙含量之比	落潮垂向平均	涨潮垂向平均	涨落潮垂向悬浮泥沙含量之比
1	16.7	14.7	0.88	16.7	14.7	0.88
2	27.2	26.5	0.97	27.2	26.5	0.97
3	21.4	21.8	1.02	21.4	21.8	1.02
4	23.2	19.4	0.84	23.2	19.4	0.84
5	21.3	23.5	1.1	21.3	23.5	1.1
6	19.2	19.1	0.99	19.2	19.1	0.99
平均值	21.5	20.8	0.97	21.5	20.8	0.97

注:涨落潮阶段平均悬浮泥沙含量分别为涨潮阶段、落潮阶段各层位悬浮泥沙含量的平均值。

含量落潮阶段(分别为 21.4 和 21.3 mg/L)小于涨潮阶段(分别为 21.8 和 23.5 mg/L),6 个站位总体平均悬浮泥沙含量落潮阶段大于涨潮阶段。各站位涨落潮平均悬浮泥沙浓度的比值介于 0.84~1.10,各站位整体涨落潮平均悬浮泥沙浓度的比值 0.97。各站位涨落潮阶段平均悬浮泥沙含量普遍较为接近,相差不大。

4.1.2 潮周期内各站位悬浮泥沙浓度变化规律

研究区大潮期各站位悬浮泥沙浓度多出现 2~4 个峰值(图 5),以 1 号站位为例,其悬浮泥沙浓度在第 1 日的 18:00、次日 3:00 和次日 10:00 这 3 个时刻出现峰值,同一站位的流速—时间变化剖面则显示其流速在 16:00、次日 2:00 和次日 9:00 出现 3 次峰值。类似地,在 5 号站位,在 19:00 及次日 4:00 悬浮泥沙浓度出现了 2 个峰值,而这一站位的流速则在 16:00 及次日 2:00 出

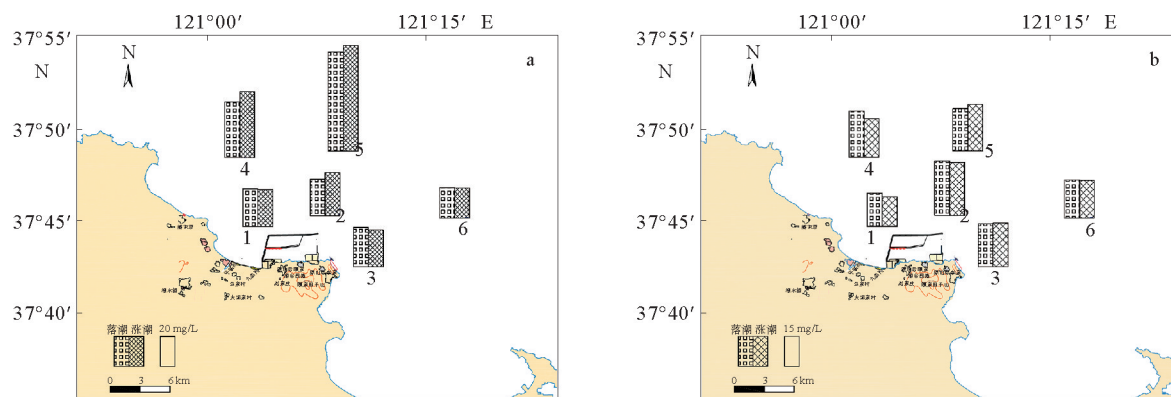


图4 大潮期(a)和小潮期(b)各站悬浮泥沙涨落潮阶段平均浓度分布

Fig.4 Average concentration distribution of suspended sediment during the spring tide period(a) and the neap tide period(b)

现峰值。可见大潮期悬浮泥沙变化一般滞后于流速变化 1~2 h,悬浮泥沙浓度峰值的出现时间大多出现在涨憩、落憩 1~2 h 后。

研究区小潮期各站位悬浮泥沙浓度变化较为复杂,其规律性较弱,在一个潮周期内可见 4 个以上的峰值(图 6)。与大潮期不同,小潮期各站位悬浮泥沙浓度在峰值之间少有连续的变化趋势而是具有明显的波动,这一特点在 2 号站位和 3 号站位尤为突出。与大潮期类似,小潮期悬浮泥沙变化一般滞后于流速变化 1~2 h,悬浮泥沙浓度峰值的出现时间大多出现在涨憩、落憩 1~2 h 后。

4.2 悬浮泥沙空间分布特征

4.2.1 悬浮泥沙平面分布

各站位的平均悬浮泥沙浓度是该站位观测周期内所有层位悬浮泥沙浓度的平均值,垂线平均最大悬浮泥沙含量是对各站位逐时计算垂线平均悬浮泥沙含量后进行比较得到的最大值。

由表 4 可见,大潮期潮周期内平均悬浮泥沙浓度介于 20.5~68.6 mg/L。大潮期平均悬浮泥沙浓度最大值出现在 5 号站位,为 88.0 mg/L,最小值出现在 6 号站位,为 28.0 mg/L。总体而言,大潮期各站位悬浮泥沙浓度在平面上分布上有较

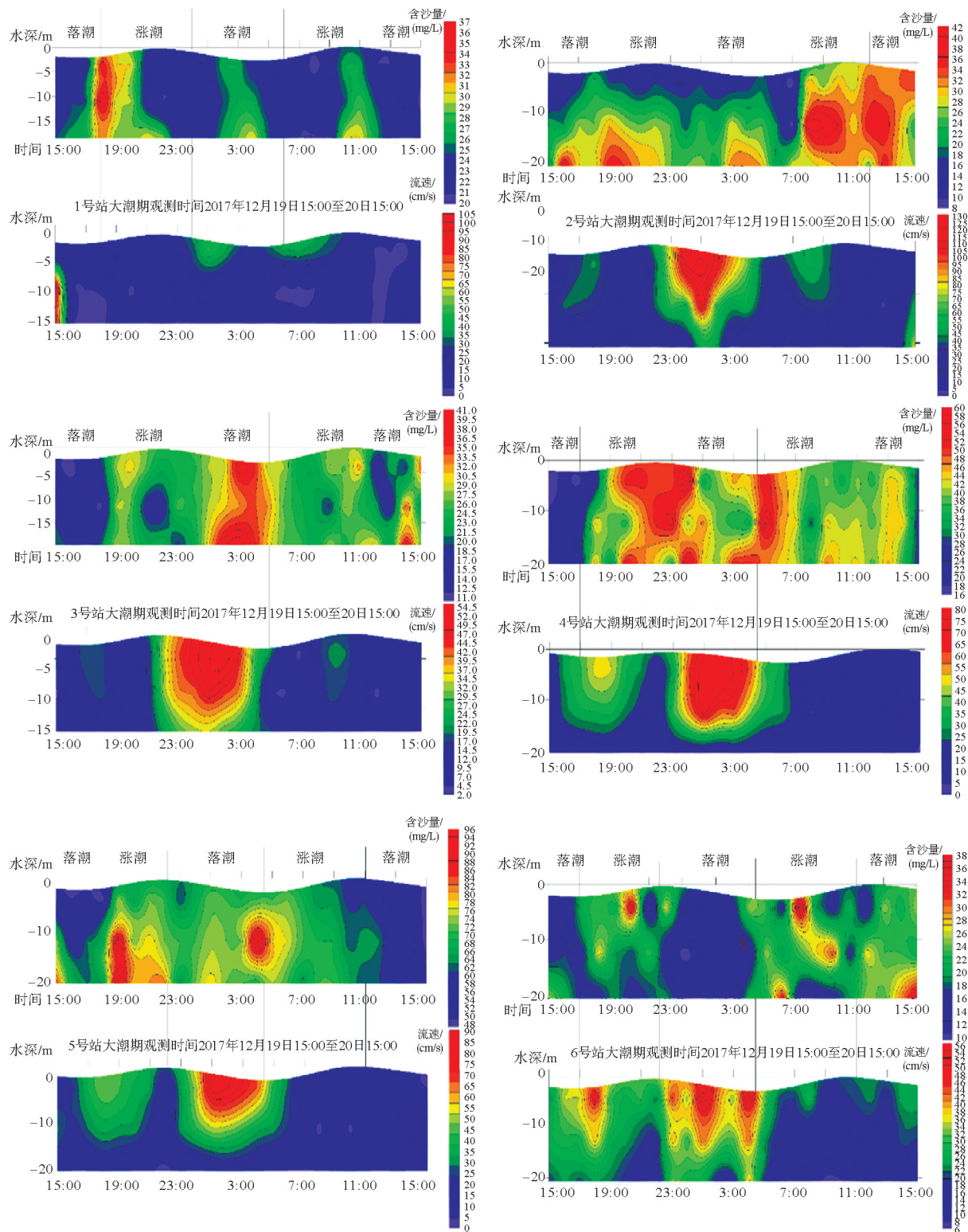


图 5 大潮期各站位悬浮泥沙浓度与流速随时间变化剖面图

Fig.5 Suspended sediment concentration and flow rate over time at each station during the spring tide period

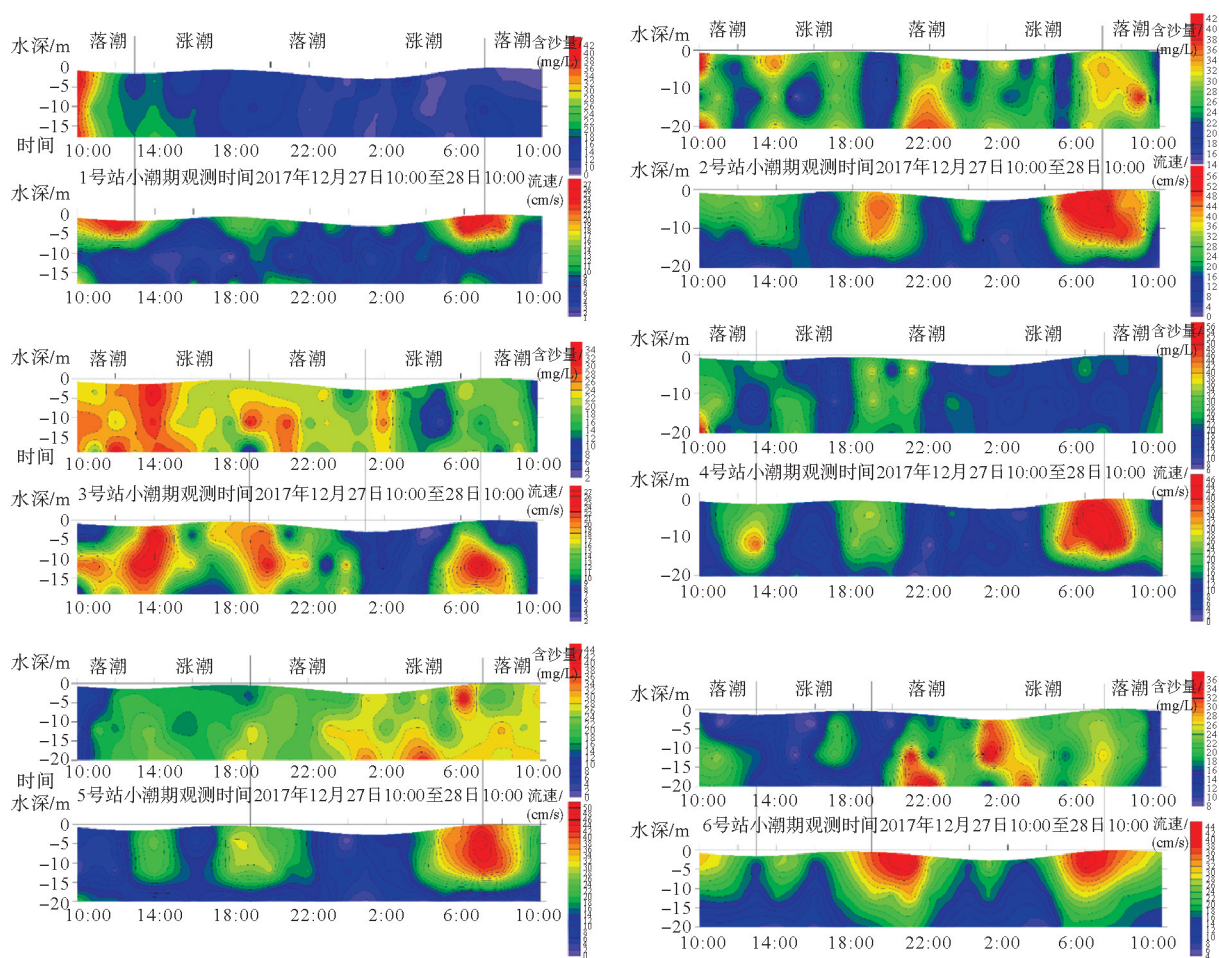


图6 小潮期各站位悬浮泥沙浓度与流速随时间变化剖面图

Fig.6 Changes in suspended sediment concentration and flow rate with time at each station during neap tide

为明显的差异。小潮期潮周期内平均悬浮泥沙浓度介于 $15.7 \sim 26.8 \text{ mg/L}$ 。小潮期平均悬浮泥沙浓度最大值出现在 2 号站位, 为 34.1 mg/L , 最小值出现在 6 号站位, 为 28.7 mg/L 。总体而言, 小潮期各站位悬浮泥沙浓度在平面上差别不大。

表4 大、小潮期间各站位悬沙浓度

Table 4 Suspended sediment concentration in spring and neap tides

站位	平均悬浮泥沙浓度		垂线平均最大悬沙浓度	
	大潮期	小潮期	大潮期	小潮期
1	24.9	15.7	30.0	29.0
2	26.4	26.8	36.0	34.1
3	25.3	21.6	37.9	30.6
4	40.7	21.3	54.1	31.8
5	68.6	22.4	88.0	32.7
6	20.5	19.2	28.0	28.7

4.2.2 悬浮泥沙垂向分布

大潮期各站位落潮阶段表层悬浮泥沙浓度介于 $18.5 \sim 61.2 \text{ mg/L}$ (表 5), 中层悬浮泥沙浓度介于 $19.1 \sim 69.1 \text{ mg/L}$, 底层悬浮泥沙浓度介于 $21.5 \sim 69.1 \text{ mg/L}$, 整体上各站位悬浮泥沙浓度自表层至底层递增, 各站位表层、底层悬浮泥沙浓度的比值介于 $0.6 \sim 1.0$; 涨潮阶段表中底 3 层悬浮泥沙浓度分别介于 $20.7 \sim 66.5$ 、 $21.0 \sim 72.5$ 和 $19.3 \sim 73.0 \text{ mg/L}$, 整体上各站位悬浮泥沙浓度自表层至底层递增, 各站位表层、底层悬浮泥沙浓度的比值介于 $0.8 \sim 1.1$, 除 2 号站位落潮阶段表层与底层悬浮泥沙浓度差别较大, 各站位垂向上悬浮泥沙浓度差别较小 (图 7a)。

小潮期各站位落潮阶段表层悬浮泥沙浓度介于 $16.0 \sim 26.4 \text{ mg/L}$ (表 5), 中层介于 $16.8 \sim 26.6 \text{ mg/L}$, 底层介于 $17.0 \sim 28.7 \text{ mg/L}$; 涨潮阶

表 5 各站位各层平均悬浮泥沙含量(大、小潮)

Table 5 Average suspended sediment content (spring tide and neap tide) in each layer at each station

/(mg/L)

站位	大潮								小潮							
	落潮				涨潮				落潮				涨潮			
	表层	中层	底层	表/底	表层	中层	底层	表/底	表层	中层	底层	表/底	表层	中层	底层	表/底
1	24.5	24.9	26	0.9	23.8	24.1	26.1	0.9	16.1	16.8	17	0.9	14.5	14	15.4	0.9
2	18.5	24	29.7	0.6	23.8	31.5	30.7	0.8	26.4	26.6	28.7	0.9	27.5	23.9	28	1
3	25.4	24.7	28.6	0.9	23.7	23.8	25.9	0.9	20.5	22.1	21.6	0.9	22.2	21.4	21.7	1
4	35.4	37.4	39.1	0.9	45.5	42.6	44	1	23.1	24.3	22.1	1	19.8	18.8	19.7	1
5	61.2	69.1	69.1	0.9	66.5	72.5	73	0.9	18.5	22.9	22.4	0.8	22.1	21.8	26.5	0.8
6	21.3	19.1	21.5	1	20.7	21	19.3	1.1	16	20.6	21.1	0.8	19	20.6	17.6	1.1

注:表中的表底比值为同一潮阶段表层与底层平均悬浮泥沙含量的比值

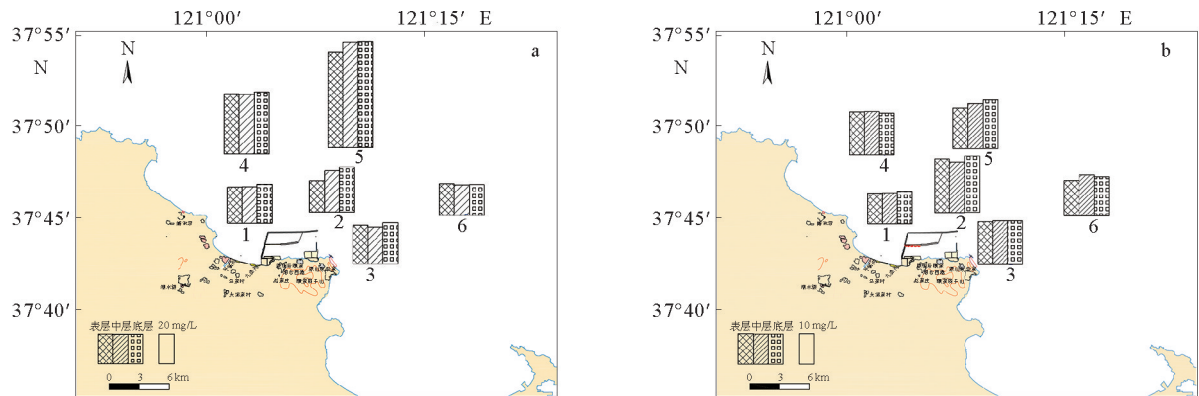


图 7 大潮期(a)和小潮期(b)悬浮泥沙各层平均浓度分布

Fig.7 Average concentration of suspended sediment in spring tide period (a) and neap tide period(b)

段表中底 3 层悬浮泥沙浓度分别介于 14.5~27.5、14.0~23.9 和 15.4~28.0 mg/L。垂向上表层悬浮泥沙浓度变化趋势与大潮期相似,表现为自表层至底层递增,各层位悬浮泥沙平均含量较为接近(图 7b)。落潮阶段各站位表层与底层平均悬浮泥沙浓度比值介于 0.8~1.0,涨潮阶段各站位表层与底层平均悬浮泥沙浓度比值介于 0.8~1.1。与大潮期不同的是,小潮期研究区各站位之间悬浮泥沙浓度差异更小。

各层位悬浮泥沙平均含量较为接近,表明研究区垂向上水体中的悬浮泥沙交换频繁,水体混合均匀,层化现象较弱,产生这一现象的原因可能是受冬季风影响,研究区水体混合均匀^[31-32]。

5 悬浮泥沙输运特征

本文所提到的悬浮泥沙输运通量计算均是指

在正常天气潮流作用下的计算结果,未考虑风浪的影响因素。

5.1 悬浮泥沙输运通量

大潮期悬浮泥沙输运通量介于 14.14~36.75 $\text{g} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$,最大值出现在 2 号站,为 36.75 $\text{g} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$,对应方向 7.0°;最小值出现在 1 号站位,为 14.14 $\text{g} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$,对应方向 163.3°。各分项中平流输运项(T_1+T_2)最大,各站位平流输运项(T_1+T_2)以 2 号站位值最大,为 32.37 $\text{g} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$,1 号站位最小,为 13.93 $\text{g} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$;垂向净环流项(T_5)值次于 T_1+T_2 ,其中 5 号站位 T_5 值最大,为 4.74 $\text{g} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$,1 号站位 T_5 值最小,为 0.22 $\text{g} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$;大潮期各站位 T_3+T_4 和 $T_6+T_7+T_8$ 均较小。

小潮期各站位悬浮泥沙输运通量介于 1.26~20.12 $\text{g} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$,最大值出现在 2 号站,为

20.12 $\text{g} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$, 对应方向 309.8° , 最小值出现在1号站, 为 1.26 $\text{g} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$, 对应角度为 211.2° 。各分项中平流输运项(T_1+T_2)最大, 各站位平流输运项(T_1+T_2)以5号站位, 为 16.67 $\text{g} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$, 1号站位 T_1+T_2 值最小, 为 1.34 $\text{g} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$; 垂向净环流项(T_5)值次于平流输运项(T_1+T_2), 其中 T_5 值最大为 0.26 $\text{g} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$, 出现在5号站, 最小值为 0.02 $\text{g} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$, 出

现在1号站。小潮期各站位 T_3+T_4 和 $T_6+T_7+T_8$ 值均较小。

综上所述可以看出(表6), 研究区大、小潮期单宽悬沙输运率(T)最大值均出现在2号站位, 最小值均出现在1号站位, 大、小潮期各站位 T 与 T_1+T_2 的方向基本一致, 各站位大潮期单宽悬沙输运率(T)值均大于小潮期。

表6 各站悬沙输运项及单宽悬沙净输运率(大、小潮)

Table 6 Net transport capacity of suspended sediments and single-width suspended sediment transport rate (spring tide and neap tide)

站位	计算结果	大潮							小潮						
		T_1	T_2	T_5	T_1+T_2	T_3+T_4	$T_6+T_7+T_8$	T	T_1	T_2	T_5	T_1+T_2	T_3+T_4	$T_6+T_7+T_8$	T
1	和矢量	14.02	0.09	0.22	13.93	0.01	0	14.14	1.37	0.07	0.02	1.34	0.08	0.01	1.26
	角度	163.6	325	138.3	163.7	135.7	48	163.3	206	322	356.1	208.7	1	287.5	211.2
2	和矢量	32.88	0.61	4.74	32.37	0.12	0.11	36.75	20.96	0.17	0.99	21.1	0.04	0.01	20.12
	角度	5.2	217.4	22.4	4.6	122.1	204.6	7	309.2	277.3	110.8	309	118.3	228.6	309.8
3	和矢量	15.75	0.24	1.58	15.59	0.04	0.01	17.19	6.37	0.07	0.04	6.38	0.02	0	6.39
	角度	317.8	185	327.2	317.1	1.7	297	318.1	26.1	306.8	331.3	25.5	182.9	305.7	25.2
4	和矢量	27.23	0.63	0.56	26.69	0.12	0.16	26.17	12.01	0.18	0.09	12.17	0.02	0.01	12.24
	角度	266.2	117.5	95.9	265.5	121.2	300.1	265.3	274.5	307.5	231.9	275	299.6	91.6	274.7
5	和矢量	29.67	0.65	1.41	30.28	0.14	0.04	31.55	16.63	0.07	0.26	16.67	0.03	0.01	16.86
	角度	322	300.6	328.1	321.5	126.3	240.2	321.8	287.9	235	240.8	287.7	328.2	100.2	287.2
6	和矢量	21.02	0.18	1.35	20.85	0.03	0.03	22.14	6.4	0.57	0.07	5.93	0.09	0.02	5.96
	角度	356.3	153.6	352.7	356.5	211	179.1	356.2	350.1	138	201.3	353	331.2	304.5	352.3

和矢量/ $(\text{g} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1})$, 角度/ $(^\circ)$

5.2 悬浮泥沙输运机制

大、小潮期各站位欧拉余流输运项(T_1)的值远大于其他项, 基本主导了大潮期悬浮泥沙的输运。根据计算结果, 平流输运项(T_1+T_2)在大潮期的贡献率介于 $88.2\% \sim 102.0\%$, 小潮期介于 $94.2\% \sim 106.5\%$ 。大、小潮期各站位的平流输运项(T_1+T_2)由大到小排列顺序均是2号、5号、4号、6号、3号和1号, 这明显与余流大小有关, 总体而言余流较大的站位平移输运项(T_1+T_2)一般也较大。然而这一规律并不绝对, 如6号站位具有最大的潮余流值, 但其平移输运项(T_1+T_2)仍小于2号、5号和4号站位, 对比悬浮泥沙的特征发现, 6号站位的悬浮泥沙浓度在大、小潮期均小于2号、5号和4号站位, 因此可以认为余流很大程度

上影响着研究区悬浮泥沙的输运, 但同时悬浮泥沙背景值对悬浮泥沙通量的计算结果也有影响。

垂向净环流输沙项(T_5)是在各层余流大小、方向不一致以及悬浮泥沙含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^[33]。垂向净环流项(T_5)的贡献率在大潮介于 $1.6\% \sim 12.9\%$, 小潮期介于 $0.7\% \sim 6.1\%$ 。根据海流实测资料, 大潮期各站位表层、底层余流流速的差值介于 $3.0 \sim 9.6 \text{ cm/s}$, 小潮期各站位表层、底层平均流速差值介于 $-0.7 \sim 9.7 \text{ cm/s}$, 大潮期各层位余流之间流速差别较大, 因此, 大潮期垂向环流作项(T_5)对悬浮泥沙的输运影响大于小潮期。根据潮余流结果(图8), 2号站位和5号站位各层潮余流方向差别较大, 同时根据悬浮泥沙的垂向分布特征(图

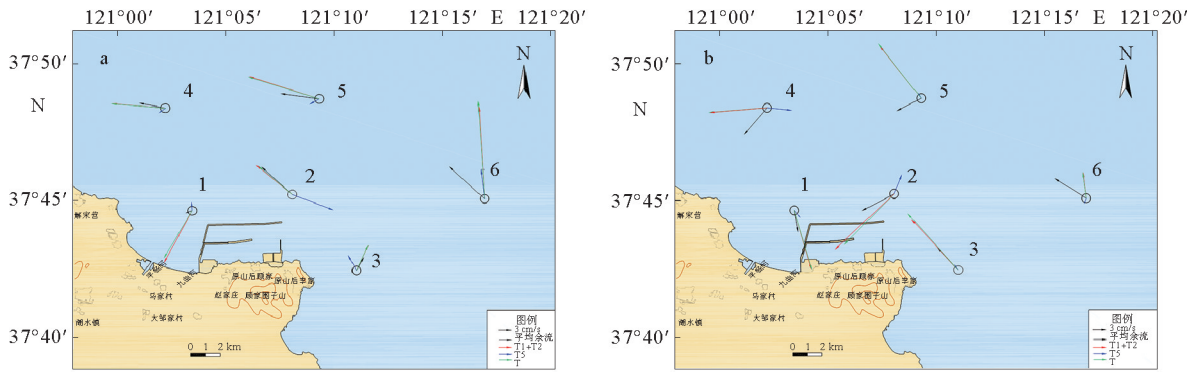
7),2 号和 5 号站位悬浮泥沙垂向差别明显大于其他站位,相应的其垂向环流作项(T_5)计算结果也均大于其他站位。

潮周期悬浮泥沙通量机制的结果表明,对于研究区海域,平流输运项主导着这一区域整体上的悬浮泥沙输运,垂向净环流项起次要作用。这意味着,研究区水体中的悬浮泥沙主要随着涨、落潮流往复搬运,产生的净输沙通量较少,悬浮泥沙的净输运方向与余流方向基本一致(见表 7)。此外,大潮期垂向净环流项对悬浮泥沙输运的贡献略大于小潮期,小潮期平流输运项对悬浮泥沙输运的贡献略大于大潮期,小潮期余流作用对悬浮泥沙输运的影响更加明显;同时,大潮期悬浮泥沙输运通量远大于小潮期,因此,可以看出研究区内悬浮泥沙输运受大小潮变化影响明显。

表 7 大小潮期各站位潮余流、悬浮泥沙输运方向一览表

Table 7 List of tidal currents and suspended sediment transport directions at each station in the period of spring and neap tides

站位	大潮期		小潮期	
	潮余流方向	悬沙输运方向	潮余流方向	悬沙输运方向
1	169.8	163.2	249.7	211.2
2	242.4	7.0	311.8	309.8
3	317.1	318.1	30.0	25.2
4	220.9	265.2	281.7	274.7
5	242.7	321.8	277.8	287.1
6	301.8	356.2	312.0	352.3



注:(a)图中 2 号、4 号、5 号站位的 T_1+T_2 和 T 缩小为 0.5 倍,1 号、4 号的 T_5 扩大为 10 倍,6 号站位的 T_5 扩大至 20 倍;
(b)图中 1 号 T_1+T_2 和 T 放大至 10 倍,2 号站位 T_1+T_2 和 T 缩小至 0.5 倍,1 号、3 号站位 T_5 放大至 100 倍,
4 号站位 T_5 放大至 50 倍,2 号、5 号站位 T_5 放大至 10 倍,6 号站位 T_5 扩大至 5 倍。

图 8 各站位大潮期(a)和小潮期(b)悬沙输运项与平均余流叠置图

Fig.8 The vector graph of suspended sediment transport item and vertical average residual flow in spring tide period (a) and neap tide period(b)

6 结论

本文基于海流与悬浮泥沙的实测资料,分析了烟台西部近岸的悬浮泥沙时空变化特征,并初步探讨了悬浮泥沙的输运的机制,其主要结论如下:

(1)研究区大潮期悬浮泥沙含量大于小潮期;一个潮周期内,大潮期涨潮阶段垂线平均悬浮泥沙含量略大于落潮阶段,小潮期涨潮阶段垂线平均悬浮泥沙含量略小于落潮阶段。大潮期各站位

悬浮泥沙浓度多出现 2~4 个峰值,小潮期各站位悬浮泥沙浓度变化较为复杂,其规律性较弱;悬浮泥沙变化一般滞后于流速变化 1~2 h,悬浮泥沙浓度峰值的出现时间大多出现在涨憩、落憩 1~2 h 后。

(2)从平面分布上来看,研究区大潮期各站位悬浮泥沙浓度差异较大,小潮期差异较小;垂向上,大小潮期各层位悬浮泥沙含量变化不大,层化现象较弱,小潮期各站位垂向悬沙浓度差异比大潮期小。

(3)研究区的悬浮泥沙输运以平流输运为主,

垂向净环流输运为辅,其他输沙项的贡献很小,悬浮泥沙的净输运方向与余流方向基本一致。

(4)研究区大潮期垂向净环流项对悬浮泥沙输运的贡献略大于小潮期,小潮期平流输运项对悬浮泥沙输运的贡献略大于大潮期,悬浮泥沙输运受大小潮的变化影响显著。

参考文献:

- [1] 余佳. 黄海悬浮体分布及季节性变化[D]. 青岛:中国海洋大学, 2012.
- [2] 杨作升,王兆祥,郑爱芬,等. 黄河口毗邻渤海陆架区悬浮体成分[J]. 青岛海洋大学学报, 1990, 20(1): 26-40.
- [3] 乔璐璐. 冬季大风事件下渤海环流及泥沙输运过程研究[D]. 青岛:中国海洋大学, 2008.
- [4] Zhang J, Liu S M, Xu H, et al. Riverine sources and estuarine fates of particulate organic carbon from North China in late summer [J]. *Estuarine Coastal and Shelf Sciences*, 1998, 46(3): 439-448.
- [5] Ma M, Feng Z, Guan C, et al. Pah and Pcb in sediments from the intertidal zone of the Bohai Sea and the Yellow Sea [J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2001, 42 (2): 132-136.
- [6] 刘雪. 基于遥感的中国东部海域悬浮泥沙季节变化研究[D]. 青岛:中国海洋大学, 2014.
- [7] Bi N, Yang Z, Wang H, et al. Seasonal variation of suspended-sediment transport through the southern Bohai Strait [J]. *Estuarine Coastal & Shelf Science*, 2011, 93(3): 239-247.
- [8] 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*, 2002(S1): 212-217.
- [9] 李爱超, 乔璐璐, 万修全, 等. 渤海海峡悬浮体分布、通量及其季节变化[J]. *海洋与湖沼*, 2016, 47(2): 310-318.
- [10] Zhang J, Huang W W, Martin J M. Trace metals distribution in Huanghe (Yellow River) estuarine sediments [J]. *Estuarine Coastal and Shelf Science*, 1988, 26 (5): 499-516.
- [11] 秦蕴珊, 李凡, 郑铁民, 等. 南黄海冬季海水中悬浮体的研究[J]. *海洋科学*, 1986, 10(6): 1-7.
- [12] 鲍献文, 李真, 王勇智, 等. 冬、夏季北黄海悬浮物分布特征[J]. *泥沙研究*, 2010(2): 48-56.
- [13] 吴祥柏, 汪亚平, 潘少明. 长江河口悬沙与盐分输运机制分析[J]. *海洋学研究*, 2008, 26(4): 8-19.
- [14] 杨林. 废黄河口海域悬沙时空变化及输移特征[D]. 上海:上海海洋大学, 2018.
- [15] 张存勇. 连云港近岸海域沉积物再悬浮及悬沙动力研究[D]. 青岛:中国海洋大学, 2011.
- [16] 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.
- [17] 林纪江, 胡日军, 朱龙海, 等. 潮流作用下蓬莱近岸海域悬浮泥沙的时空分布及变化特征[J]. *海洋地质前沿*, 2017, 33(12): 13-23.
- [18] 张伟, 周连成, 吴建政, 等. 渤海海峡南部海域表层沉积物分布特征及控制因素[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2015, 35(5): 19-28.
- [19] 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): 26-35.
- [20] 李爱超, 乔璐璐, 万修全, 等. 渤海海峡悬浮体分布、通量及其季节变化[J]. *海洋与湖沼*, 2016, 47(2): 310-318.
- [21] Jiang S H, Hu R J, Feng X L, et al. Influence of the construction of the Yantai West Port on the dynamic sedimentary environment [J]. *Marine Georesources & Geotechnology*, 2017: 1-9.
- [22] 董有强, 周锋. 烟台港西港区规划锚地锚泊安全研究[J]. *中国水运*, 2010(4): 26-27.
- [23] 秦福寿, 王钺, 张国建, 等. 烟台港西港区规划设计建设中关键技术问题回顾[J]. *港口技术*, 2014(2): 13-17.
- [24] 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.
- [25] Yu Q, Wang Y P, Flemming B, et al. Tide-induced suspended sediment transport: Depth-averaged concentrations and horizontal residual fluxes [J]. *Continental Shelf Research*, 2012, 34: 53-63.
- [26] 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.
- [27] 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.
- [28] 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(中文版)*, 2017, 39(3): 96-105.
- [29] Ingram R G. Characteristics of the Great Whale River Plume [J]. *Journal of Geophysical Research*, 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 and Coasts*, 1985, 8(3): 256-269.
- [31] 唐建华, 梁摇斌, 李若华. 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]. *水利水电工程学报*, 2009(2): 39-43.
- [32] 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.
- [33] 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.

TEMPORAL AND SPATIAL VARIATION OF SUSPENDED SEDIMENT CONCENTRATION IN THE NEARSHORE WATERS OF WESTERN YANTAI AND ITS TRANSPORT CHARACTERISTICS IN WINTER

HUANGFU Xuerui¹, LI Yi², HU Rijun^{1,3}, ZHU Longhai^{1,3}, LIU Bo¹, YIN Yanjun¹

(1 College of Marine Geosciences, Ocean University of China, Qingdao 266100, China;

2 Huaneng Xiapu Nuclear Power Co., Ltd., Ningde 352000, Fujian Province, China; 3 Key Laboratory of Submarine Geosciences and Prospecting Techniques, Ministry of Education, Ocean University of China, Qingdao 266100, China)

Abstract: Based on the simultaneous observation of currents and suspended matters in spring and neap tides at six stations in the coastal waters of Yantai Port in December 2017, this paper studied the temporal and spatial variation in suspended sediment concentrations. The transport flux of suspended matter was calculated, and the transport mechanism of suspended sediment under tidal currents discussed. The results show that the suspended sediment content in the spring tide is greater than that in the neap tide; and the concentration of suspended matter at each station has 2~4 peaks during the spring tide period, whereas that in the neap tide is more complicated and lack of regularity. The change in suspended sediment generally lags behind the flow rate change for 1~2 hours. From the view of plane distribution, the concentration of suspended sediment at different stations in the study period is quite different, and the difference in neap tide period is rather small. In the vertical direction, however, the suspended sediment content in each layer of the spring and neap tides has little change, and the stratification phenomenon is not obvious. The advection transport of the water in the study area dominates the suspended sediment transport, while the vertical net circulation plays a supporting role, and the contribution of other sediment transport modes is rather small. The net transport direction and residual flow of suspended sediment in the study area are roughly the same. The contribution of the vertical net circulation to the suspended sediment transport during the spring tide period is slightly larger than that during the neap tide period. The contribution of the advection transport in the neap tidal period to the suspended sediment transport is slightly greater than that during the spring tide period, and the influence of the fluctuation of spring and neap tides on the sediment transport is significant in the area.

Key words: nearshore waters in western Yantai; suspended sediment; temporal and spatial changes; sediment transport