

DOI: 10.16562/j.cnki.0256-1492.2018.01.008

舟山沈家门海域悬沙输运特征研究

董超, 陈俊兵, 谢永清, 王建强, 陈选博

浙江省水文地质工程地质大队, 浙江省海洋勘测研究院, 宁波 315000

摘要:通过对舟山沈家门海域水文泥沙观测站位数据进行处理和分析,探讨了区域悬沙浓度时空分布及影响因素;对各站位单宽净输沙量和输运方向进行了计算,揭示了海域悬沙输运机制。结果表明:受长江、钱塘江等大河泥沙注入和周边岛屿物质输入影响,海域悬沙浓度较高;平面分布上,悬沙浓度有从东北向西南减小趋势,位于莲花洋的C1站位浓度最大,峙头洋C4站位悬沙浓度较小;悬沙浓度垂向上随水深的增加,逐渐升高;在涨、落潮流的影响下悬沙起运、悬扬、沉降、落淤,浓度随潮流流速变化具较高的相关性;通量机制分解计算表明海域悬沙输运以平流输沙项为主导,单宽净输运率大潮期大于小潮期;总体上,泥沙输运有沿水道走向离岸向海运动趋势。

关键词:悬沙;通量机制分解;输运特征;沈家门海域

中图分类号:P736.2

文献标识码:A

Transportation of suspended sediment in Shenjiamen offshore area of Zhoushan

DONG Chao, CHEN Junbing, XIE Yongqing, WANG Jianqiang, CHEN Xuanbo

Zhejiang Institute of Hydrogeology and Engineering Geology, Zhejiang Ocean Exploration and Research Institute, Ningbo 315000, China

Abstract: Based on both the data of tidal current and suspended sediment collected from the sea area off Shenjiamen of the Zhoushan Islands, temporal and spatial variation in suspended sediment concentrations during neap and spring tides and their influence factors are discussed in this paper. The transportation characteristics of the suspended matter in the sea area are described by sediment net discharge rate and moving direction. Results show that suspended sediment concentration in the study area is higher than that in surrounding areas, owing to the inputs from the Yangtze, Qian Tang and other rivers as well as surrounding islands. In general, the suspended sediment concentration is spatially in a pattern decreasing from northeast to southwest. The highest sediment concentration appears at the C1 station in Lianhuayang sea, while the lowest at the C4 station in the Zhitouyang sea. Vertically, the suspended sediment concentrations gradually increase with the increase in water depth. The movement of suspended sediment from initiation to settlement is mainly under the control of tidal movement. There is a high correlation between the suspended sediment concentration and the tidal current velocity. Flux mechanism decomposition shows that suspended sediment is mainly transported in a form of advection. Net transport rate in spring tide is greater than that in the neap tide period. To sum up, the sediment transport in the study area is in a trend towards the sea through channels.

Key words: suspended sediment; flux mechanism decomposition; characteristics of transport; Shenjiamen sea area

在海洋中,随波浪和潮流浮游前进的泥沙,称为悬移质^[1],一般粒径较细,主要由粉砂和黏土组成,这也是本文的主要研究对象。悬沙输运是近岸海水泥沙运动的重要方式之一,也是近岸海洋沉积动力学、河口海岸工程建设研究的重要内容之一^[2,3];海岸带水体泥沙扩散、输移和再悬浮对于周边地形地貌冲淤、海岸演变、水体物理、化学环境交换有重要影

响^[4,5]。通过对河口海岸泥沙运动规律进行研究,对于沿海地区资源合理开发和环境保护具有重要意义。

本文研究区位于舟山沈家门海域,是由舟山本岛、普陀岛、朱家尖岛、登步岛等岛屿所围的海域。该区域岛礁星罗棋布,水道纵横交错,地形起伏多变,是舟山群岛新区重要的港口交通、航运、现代渔业、大宗商品贸易等活动的重要集散地;也是中国东

资助项目:长江三角洲海岸带综合地质调查与监测项目(舟山群岛新区)(GZH201200506);浙江省财政配套专项“舟山群岛新区海岸带综合地质调查与监测”

作者简介:董超(1985—),男,硕士,工程师,主要从事河口海岸沉积动力和地质环境应用研究,E-mail:315060923@qq.com

收稿日期:2016-09-04;**改回日期:**2016-11-18 文凤英编辑

部沿海和长江流域走向世界的主要海上门户,是古代“海上丝绸之路”主航路——东方航路之南方海路的必经之节点和重要枢纽。此外,区内滩涂资源丰富,是舟山市围海造地重点规划区,也是舟山重要的后备土地资源聚集区。沿海活跃的社会经济活动对海域水沙环境造成一定影响,已陆续有不同学者对区域周边海域环境的泥沙运动、潮流动力条件、海床演变等方面进行了研究。蒋国俊等^[6]对舟山群岛内主要峡道潮流沉积动力进行了探讨,季荣耀等^[7]对浙江嵊泗列岛岛屿工程作用下的水沙动力过程进行了研究,胡日军等^[8]利用海域表层沉积物资料研究了舟山全境内沉积物运移趋势和净输运通量,冯沈科等^[9]通过舟山螺头水道水文泥沙资料对水道内的水动力和悬沙分布进行了数值模拟,季有俊等^[10]利用实测的水深地形和水文泥沙数据资料对舟山钓梁岛域围垦区的泥沙运动和海床演变进行了分析。本文基于前人的研究理论和成果,利用最新实测的水文、泥沙数据资料对沈家门海域的悬沙分布和输运机制特征进行研究和分析。

1 数据与方法

为全面获取研究区海域悬沙浓度和泥沙运动基本特征,2013 年 7 月 22—24 日(大潮)和 2013 年 7 月 30 日—8 月 1 日(小潮)在该海域分别对 C1—C6 六个测站进行定点连续 26 小时水文泥沙监测

(图 1),获得测站的水深、流速、流向和悬沙浓度等数据。

定点海流流速、流向和水深观测采用 RDI 公司生产的 300kHz 和 600kHz 的 ADCP 海流仪进行,同时各船配备一台直读式海流仪对测点上、下盲区进行海流比对测定。

悬沙水样采用横式采样器(1.5L)采取,分别在表层、 $0.2H$ 、 $0.4H$ 、 $0.6H$ 、 $0.8H$ (H 为测站水深)和底层(距离海底 0.5m)采水。水样用真空泵进行滤膜过滤,滤膜直径 47mm ,孔径 $0.45\mu\text{m}$ 。烘干后用电子天平称量悬浮体质量,计算出各站悬沙浓度。

2 悬沙浓度分布特征

2.1 悬沙浓度平面时空分布特征

从各站位的悬沙浓度平均值分布来看,大潮期 C1 站和 C3 站落潮悬沙浓度大于涨潮浓度,其余各站涨潮浓度大于落潮,涨潮悬沙浓度平均值为 $0.383\text{kg}/\text{m}^3$,落潮悬沙浓度平均值为 $0.370\text{kg}/\text{m}^3$,涨潮略高于落潮;悬沙浓度最高值为 $0.967\text{kg}/\text{m}^3$,出现在 C1 站落潮时刻。最低值为 $0.080\text{kg}/\text{m}^3$,出现在 C3 站落潮时刻;小潮期 C3 站和 C4 站落潮悬沙浓度大于涨潮浓度,其余各站涨潮浓度大于落潮,涨潮悬沙浓度平均值为 $0.191\text{kg}/\text{m}^3$,落潮浓度平均值为 $0.150\text{kg}/\text{m}^3$,同样是涨潮悬沙浓度略高于落

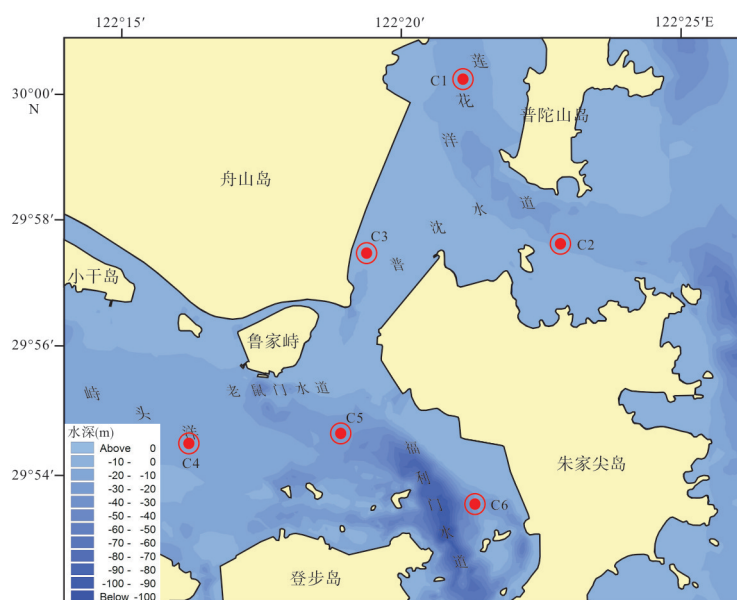


图 1 研究区和水文泥沙监测站位

Fig.1 Study area and monitoring stations

潮,悬沙浓度最高值为 $0.864\text{kg}/\text{m}^3$,出现在 C1 站涨潮时刻,最低值为 $0.007\text{kg}/\text{m}^3$,出现在 C2 站落潮时刻。

从悬沙浓度时间变化来看,各站位悬沙浓度均是大潮时期大于小潮时期,大潮各站位各时刻悬沙浓度平均值为 $0.376\text{kg}/\text{m}^3$,小潮时期仅为 $0.171\text{kg}/\text{m}^3$;无论大、小潮 C1 站位均是悬沙浓度最高值,这可能是由于该站位距离海岸较近,且位于本岛和普陀岛之间,除了受到海域泥沙的影响外,还受到两侧陆域来沙的影响;而离岸较远的 C4 和 C5 站位浓度均较低。

本区域位于长江水下三角洲和杭州湾口门外缘,陆域江河来沙量均较大,且周边岛礁众多,潮滩分布广泛,为区域提供了充足来沙量,悬沙浓度含量整体表现较高(表 1)。根据李占海等的研究^[11],再悬浮作用在大潮期明显,这是由于大潮期潮流流速明显高于小潮,而小潮随着潮流流速的减弱,主要以沉降作用为主,泥沙落淤,海水中悬浮泥沙量减少,

这是造成大潮悬沙浓度较小潮高的主要原因。根据胡日军的研究,群岛内岛屿众多,地形变化较大,潮流场受岛礁地形因素影响,流速较大,区内平流输沙能力较强,平流输沙占主导地位,当外海潮波传入舟山海域后,平流输送的作用由群岛外侧逐渐向岛内、大陆沿海减弱,相应的输沙量也逐渐减少,这是海域悬沙浓度由东北方向的 C1 站位向西南方向的 C4、C6 站位减小的原因。

2.2 悬沙浓度垂向分布特征

通过对各站各层实测 25h 悬沙浓度数据进行算术平均计算,分析垂向悬沙浓度变化特征。悬沙浓度的垂向变化较为明显,无论大潮还是小潮,随着水深的增加,浓度逐渐升高(图 2),浓度最高值一般出现在底层,最低值一般出现在表层。

大潮各站位垂向悬沙含量浓度为 $0.125\sim 0.131\text{kg}/\text{m}^3$,小潮各站位垂向悬沙含量浓度为 $0.017\sim 1.438\text{kg}/\text{m}^3$,最大值均出现在 C1 站位的底层,最小

表 1 各站大、小潮垂线平均含沙量分布特征(kg/m^3)

Table 1 Vertical profiles of suspended sediment concentrations during spring and neap tides

站号	潮汛	大潮			小潮		
		平均值	最大值	最小值	平均值	最大值	最小值
C1	涨潮	0.641	0.897	0.368	0.575	0.864	0.265
	落潮	0.687	0.967	0.327	0.335	0.468	0.215
C2	涨潮	0.648	0.935	0.383	0.104	0.229	0.017
	落潮	0.492	0.682	0.273	0.078	0.168	0.007
C3	涨潮	0.278	0.923	0.089	0.184	0.430	0.112
	落潮	0.395	0.702	0.080	0.272	0.499	0.064
C4	涨潮	0.270	0.399	0.199	0.015	0.016	0.015
	落潮	0.229	0.427	0.115	0.043	0.092	0.022
C5	涨潮	0.212	0.270	0.127	0.098	0.158	0.053
	落潮	0.208	0.310	0.107	0.078	0.140	0.036
C6	涨潮	0.246	0.306	0.158	0.171	0.108	0.056
	落潮	0.211	0.382	0.110	0.095	0.160	0.038

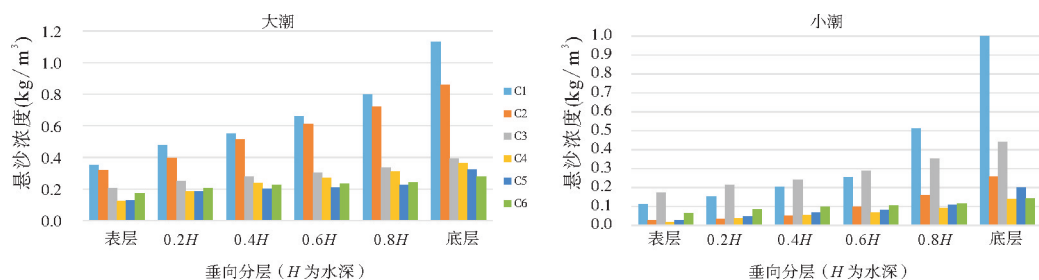


图 2 潮周期悬沙浓度垂向分层变化

Fig.2 Vertical distribution of suspended sediment concentrations in a tidal period

值均出现在 C4 站位表层。位于研究区海域东北侧站位的 C1、C2 和 C3 站位含沙量浓度高于西南侧海域的 C4、C5 和 C6 站位,这是由于前面 3 个站位所处的位置较后者地形更为开阔,且离普沈水道流向主轴线较近,水道内的横向环流和垂向环流致使呈现较强潮流流速,泥沙扰动能力强,潮流输沙对含沙量浓度作出较大贡献,另外,较高的流速流场加速了悬沙与底沙的交换过程,一方面底沙更容易起动,再悬浮作用明显,另一方面悬沙也不易沉降,使得水体中悬沙浓度明显增高。

2.3 悬沙浓度分布与潮流、余流关系

(1)潮流与悬沙浓度分布

研究海区的潮流为规则半日潮流,潮流运动以往复流为主要运动形式。其中 C1 和 C3 站位受两侧岛屿束窄地形影响,潮流顺水道方向往复流动,涨潮方向 NE,落潮方向 SW;C2、C4、C5 和 C6 测站涨落潮流方向相同,即涨潮流方向为 NW,落潮流流向为 SE(图 3)。从潮流流速来看(表 2),大潮期,C1 站位涨、落潮流速明显高于其他站位,C6 站位涨、落

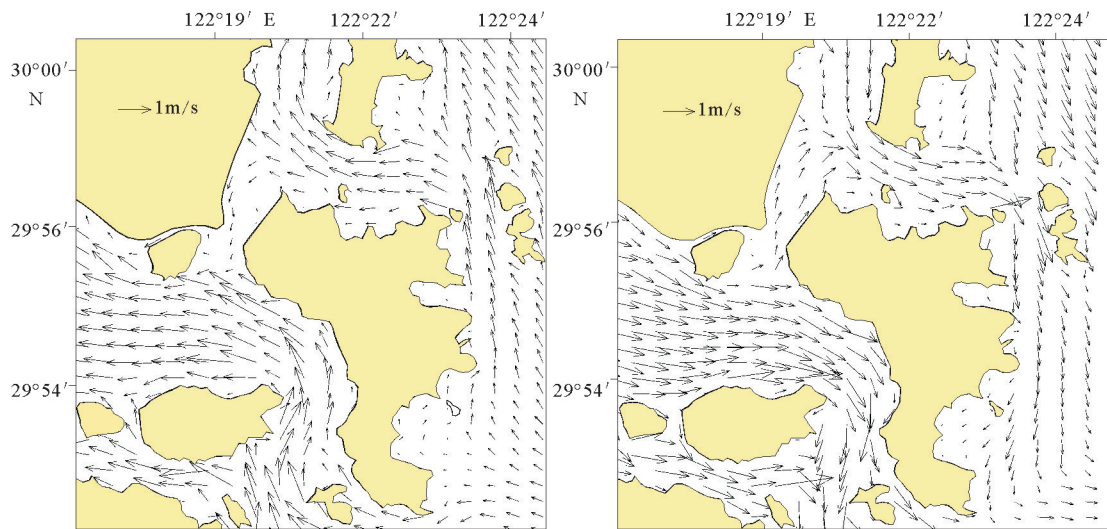


图 3 研究区海域潮流流场示意图(左:涨急;右:落急)^[12]
Fig.3 Tidal current field map of study area

表 2 大、小潮垂线潮流流速和流向

Table 2 Vertical profiles tidal currents in spring and neap tides

站号	涨落	大潮		小潮		全潮最大可能	
		流速(m/s)	流向(°)	流速(m/s)	流向(°)	流速(m/s)	流向(°)
C1	涨潮	1.11	348	0.64	4	1.73	354
	落潮	0.94	195	0.57	184	1.50	191
C2	涨潮	0.62	294	0.42	303	1.04	298
	落潮	0.97	126	0.32	120	1.29	125
C3	涨潮	0.79	24	0.50	30	1.29	26
	落潮	0.49	326	0.49	212	0.53	269
C4	涨潮	0.80	285	0.39	290	1.19	287
	落潮	0.92	107	0.39	112	1.31	108
C5	涨潮	0.92	294	0.41	293	1.23	294
	落潮	0.95	121	0.37	130	1.32	124
C6	涨潮	0.61	262	0.35	259	0.96	261
	落潮	0.71	138	0.41	133	1.12	136

潮流速均较小,其余站位流速相当;小潮期,C1、C2和C3站位的涨落潮流速要高于C4、C5和C6站位,全潮最大可能流速也是C1站位最大。

从潮流流速和悬沙浓度过程曲线中可以看出(图4),受半日潮涨落潮流的影响,在日潮周期内二者具有比较好的对应关系,各站位在一个涨落潮周期中基本上呈现2个峰值和谷值趋势,除大潮5号站位外,时间上对应也比较好。悬沙浓度峰值一般出现在涨急和落急的一段时间内,悬沙浓度变化均稍滞后,随着流速的减弱,悬沙浓度也逐渐下降,在涨落潮憩流时刻达到最小值。这种现象一般是由于较大的流速对海底泥沙造成强烈扰动,底沙再悬浮,浓度也就逐渐升高;当潮流流速降低时,不足以支撑悬扬的泥沙,并且底沙也不能起动时,海水中的悬沙浓度也逐渐降低。涨潮过程平均流速略大于落潮过程平均流速,泥沙更容易起动。

从各站位分布来看,小潮期,位于莲花洋、普沈水道C1、C2和C3站位潮流流速明显高于峙头洋、老鼠门水道、福利门水道的C4、C5和C6站位,前者的悬沙浓度也明显高于后者,可见潮流流速与悬沙浓度有密切关系;而大潮期,悬沙浓度变化规律和小潮期相同,但是流速却没有呈现相同的变化,相反地C4和C5站位潮流流速大于C2和C3站位,可见大潮期,对于C2、C3站位,除了潮流对海水悬浮泥沙产生一定影响外,还有其他因素,诸如底泥的特性等使悬沙浓度产生了变化。

(2) 余流分布

余流是从实测海流中剔除周期性潮流后的一种水体运动^[8]。在一定程度上余流可以指示水体和泥沙的净运移方向^[13],其对海水中的悬浮物质在水平方向的输送具有重要作用。余流的表示和研究方法一般有欧拉余流、斯托克斯余流和拉格朗日余流等^[14-17],每种计算方法均代表其特定的意义,本文主要采用欧拉余流计算方法,将一个太阴日周期中所测各时刻的海流消去潮流部分得出余流的大小和方向^[18](表3)。

各站位大潮期余流流速明显大于小潮,全潮余流流速为0.01~0.31m/s,大、小潮期最大值均出现在C6站位,最小值出现在C4站位,大潮期C1、C3和C5站位余流流向基本和涨潮流方向一致,其余三站位余流流向大致和落潮流方向相同;小潮期C2、C3和C5站位余流流向基本和涨潮流方向一致,其余站位余流流向大致和落潮流方向相同。欧拉余流方向与区域涨落潮优势流有关,一定程度上指示了悬浮泥沙的平均流输送方向,但又不和悬沙净输运

方向绝对一致,这与站位所处的地形环境、潮汐不对称、底沙特性等有关^[19],需要进行具体计算分析。

表3 大、小潮垂线平均余流

Table 3 Vertical profiles of residual currents

站号	大潮		小潮	
	流速(m/s)	流向(°)	流速(m/s)	流向(°)
C1	0.18	348	0.03	185
C2	0.18	126	0.04	314
C3	0.32	24	0.04	272
C4	0.15	113	0.01	166
C5	0.17	284	0.10	266
C6	0.31	183	0.19	175

3 悬沙通量和运移机制

本文根据Dyer等人^[20-22]的物质通量计算方法,对实测的海流流速、悬沙浓度和水深进行分解,对研究区海域各站潮周期单宽悬沙输运量进行了计算和分析。

按照悬沙通量机制分解方法,潮周期悬沙单宽净输运率可以分解为8个主要的通量项^[23,24]:

$$\begin{aligned} \frac{1}{T} \int_0^T \int_0^h u c dz &= \frac{1}{T} \int_0^T \int_0^h u c dz = h_0 \overline{u_0 c_0} + \\ &\langle h_t \overline{u_t} \rangle \overline{c_0} + \langle h_t \overline{c_t} \rangle \overline{u_0} + \langle h_t \overline{u_t c_t} \rangle + h_0 \overline{u'_0 c'_0} + \\ &\langle h_t \overline{u'_0 c'_t} \rangle + \langle h_t \overline{u'_t c'_0} \rangle + \langle h_t \overline{u'_t c'_t} \rangle \\ &= T_1 + T_2 + T_3 + T_4 + T_5 + T_6 + T_7 + T_8 \end{aligned}$$

公式中: T 为潮周期, u 为瞬时流速, c 为瞬时含沙量, h 为水深, z 为相对水深, t 为时间; $\overline{u_0}$ 、 $\overline{u_t}$ 、 $\overline{u'_0}$ 、 $\overline{u'_t}$ 分别表示瞬时流速的垂向平均量项及其偏差项在潮周期的平均和变化;同样 $\overline{c_0}$ 、 $\overline{c_t}$ 、 $\overline{c'_0}$ 、 $\overline{c'_t}$ 分别表示瞬时悬沙浓度的垂向平均量项及其偏差项在潮周期的平均和变化; h_0 、 h_t 表示瞬时水深的潮周期垂向平均量和变化; $\langle \rangle$ 内的量值表示垂向可积变量的潮平均值。 T_1 表示平均流引起的输沙; T_2 表示潮汐与潮流相关项,即斯托克斯漂移输移量; T_3 表示潮汐与含沙量变化相关项; T_4 表示潮流与悬沙浓度相关项; T_5 表示垂向流速变化和悬沙浓度变化相关项; T_6 、 T_7 表示时均量和潮汐振动切变引起的剪切扩散; T_8 表示垂向潮振荡切变作用;最后利用矢量合成的方法计算潮平均悬沙单宽净输运量及其方向,计算结果见表4。

从计算结果来看,各站位均以平均流输沙项 T_1 、斯托克斯输移项 T_2 作用项为主,“潮泵效应”项 $T_3+T_4+T_5$ 、垂向潮振荡切变作用 T_8 有微弱影响,

T_6 、 T_7 项作用量值非常小,基本没有体现。其中 T_1 平均流输沙项,即欧拉余流输沙项在各项中占到了绝对优势,大潮时为 $0.53 \sim 1.67 \text{ kg}/(\text{m} \cdot \text{s})$,最大值出现在 C1 站位,最小值为 C4 站位;小潮时为 $0.01 \sim 0.41 \text{ kg}/(\text{m} \cdot \text{s})$,最大值出现在 C6 站位,最小值为 C4 站位;这个基本和前面计算的欧拉余流结果相对应。斯托克斯漂移对泥沙输运也有着重要影响,相应的由 T_1 和 T_2 组成的平流输沙项也就成为各站位单宽净输沙量的最大贡献者,二者的泥沙净输运方向基本控制了单宽泥沙通量的输运方向,体现了本区域悬沙输运以平流输沙为主。“潮泵效应”中 T_4 项贡献高于其他两项,这与泥沙的再悬浮、沉降与冲刷以及悬沙浓度变化和潮流流速相位差有关^[25],大潮时 $T_3 + T_4 + T_5$ 最大为 $0.06 \text{ kg}/(\text{m} \cdot \text{s})$,出现在 C2 站位,小潮时最大为 $0.03 \text{ kg}/(\text{m} \cdot \text{s})$,出现在 C3 站位,从悬沙浓度与潮

流流速过程曲线(图 4)可以看出各站位浓度和流速均存在不同程度的相位差,使得出现了由潮汐潮流对悬沙作用造成的净输沙效应。此外,由于大潮时各站位潮流流速较大,区内泥沙再悬浮作用显著,也造成 T_4 项均有不同程度体现;小潮时,随着潮流流速的减弱,泥沙不易起动,随着再悬浮作用的减弱 T_4 项效应也随之减弱,除 C6 和 C1 站位外,其余站位小潮均没有体现。垂向潮振荡切变作用引起的输沙项在大潮 C2 站位最大,为 $0.05 \text{ kg}/(\text{m} \cdot \text{s})$,小潮时对各站位影响均比较微弱。总体来看,时间上大潮期各站位单宽净输运量远大于小潮期(图 5),从空间分布看,位于地形束窄、靠近水道轴线的 C1、C3、C5、C6 站位潮周期内悬沙单宽净输运率大于地形较为开阔处的 C4 和 C2 站位;除 C3 站位小潮期单宽净输运向陆外(输运量小),其余站位单宽净输运方向有沿水道走向离岸向海运动趋势。

表 4 各站位大、小潮悬沙输移通量分解

Table 4 Decomposition of suspended sediment transport during spring and neap tide periods

站位	潮流		T_1	T_2	T_3	T_4	T_8	$T_1 + T_2$	$T_3 + T_4 + T_5$	$\langle T \rangle$
C1	大潮	量值	1.67	0.73	0.01	0.06	0.03	2.38	0.05	2.45
		方向	348	2	168	4	28	352	8	353
	小潮	量值	0.24	0.12	0	0.03	0.01	0.12	0.03	0.09
		方向	185	5	185	5	31	184	5	186
C2	大潮	量值	1.61	1.05	0.03	0.09	0.05	0.57	0.06	0.47
		方向	126	301	126	301	350	137	299	136
	小潮	量值	0.06	0.04	0	0	0.01	0.1	0.01	0.11
		方向	314	302	314	302	333	310	325	312
C3	大潮	量值	1.08	0.16	0.01	0.02	0.01	1.24	0.03	1.28
		方向	24	32	24	40	48	25	35	26
	小潮	量值	0.09	0.02	0	0	0	0.08	0	0.08
		方向	272	29	272	40	177	283	19	282
C4	大潮	量值	0.53	0.28	0	0.05	0.03	0.26	0.04	0.19
		方向	113	283	113	285	282	123	284	131
	小潮	量值	0.01	0.01	0	0	0	0.01	0	0.01
		方向	166	290	166	282	177	252	279	250
C5	大潮	量值	0.94	0.1	0	0	0	1.04	0	1.03
		方向	284	296	104	113	97	285	112	285
	小潮	量值	0.24	0	0	0	0	0.24	0	0.24
		方向	266	117	266	294	242	266	291	266
C6	大潮	量值	1.42	0.32	0.01	0.01	0.01	1.33	0.01	1.34
		方向	183	295	183	88	102	195	151	194
	小潮	量值	0.41	0.02	0	0.01	0.01	0.39	0.01	0.4
		方向	175	310	175	122	126	177	133	175

注:量值的单位为 $\text{kg}/(\text{m} \cdot \text{s})$,方向的单位为($^\circ$)。



图4 大、小潮悬沙浓度和潮流流速过程线

Fig.4 Relationship between velocity and suspended sediment concentration

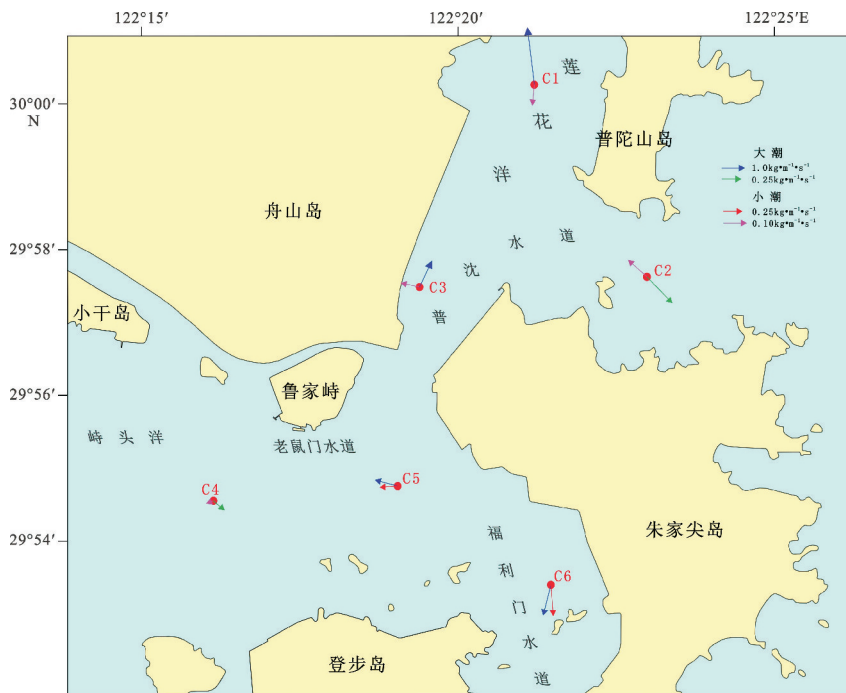


图 5 大、小潮单宽悬沙净输运

Fig.5 Suspended sediment net transport rate during spring and neap tide periods

4 结论

(1)从悬沙的平面分布看,群岛内受到平流输沙影响,海域悬沙浓度由东北方向的 C1 站位向西南方向的 C4、C6 站位减小;研究区海域大、小潮泥沙再悬浮和沉降各占优势,是造成大潮悬沙浓度高于小潮的主要原因,大潮各站位各时刻悬沙浓度平均值为 0.376 kg/m^3 ,小潮期为 0.171 kg/m^3 。

(2)垂向上,随着水深的增加,悬沙浓度逐渐增大,最高值一般出现在底层,最低值一般出现在表层。

(3)水文泥沙测量结果显示,各站位涨、落潮流速过程和含沙量过程有较高的相关性。一个涨落潮周期中悬沙浓度基本上呈现 2 个峰值和谷值趋势。悬沙浓度峰值一般出现在涨急和落急的一段时间内,悬沙浓度变化均稍显滞后,随着流速的减弱,悬沙浓度也逐渐下降,在涨落潮憩流时刻达到最小值,区内欧拉余流对悬沙的输运方向有一定指示作用。

(4)通过现场测量的潮流和泥沙资料,采用通量机制分解的方法,计算了各站位悬沙潮周期单宽净输运率,明确了悬沙输运的内在机制;结果表明:该海域悬浮泥沙输运以平流输沙为主,潮泵效应”和垂向潮振荡切变作用对部分站位有一定程度影响;单宽净输运率大潮期大于小潮期;总体上,泥沙输运有沿水道走向离岸向海运动趋势。

参考文献 (References)

- [1] 中国水利学会泥沙专业委员会. 泥沙手册[M]. 中国环境科学出版社, 1989. [Chinese Hydraulic Engineering Society-Silt Specialized Committee. Handbook of Sedimentation[M]. China Environmental Science Press, 1989.]
- [2] 郑祥靖, 潘伟然, 张国荣, 等. 厦门湾悬沙分布特征与动力分析[J]. 厦门大学学报: 自然科学版, 2013, 52(4): 539-544. [ZHENG Xiangjing, PAN Weiran, ZHANG Guorong, et al. Distribution characteristics of suspended sediment and dynamical analysis in the Xiamen Bay[J]. Journal of Xiamen University: Natural Science, 2013, 52(4): 539-544.]
- [3] SHI Huabin, YU Xiping. An effective Euler-Lagrange model for suspended sediment transport by open channel flows[J]. International Journal of Sediment Research, 2015, 30(4): 361-370.
- [4] Rose C P, Thorne P D. Measurements of suspended sediment transport parameters in a tidal estuary[J]. Continental Shelf Research, 2001, 21(15): 1551-1575.
- [5] Chen W B, Liu W C, Hsu M H, et al. Modeling investigation of suspended sediment transport in a tidal estuary using a three-dimensional model[J]. Applied Mathematical Modelling, 2015, 39(9): 2570-2586.
- [6] 蒋国俊. 舟山群岛水道水动力及沉积特性[J]. 浙江大学学报: 理学版, 2001, 28(1): 82-91. [JIANG Guojun. The characteristics of hydro-dynamics and sediments in the strait channels of Zhoushan Islands area[J]. Journal of Zhejiang University: Science Edition, 2001, 28(1): 82-91.]
- [7] 季荣耀, 陆永军, 左利钦. 岛屿海岸工程作用下的水沙动力过

- 程研究[J]. 水科学进展, 2008, 19(5): 640-649. [JI Rongyao, LUYongjun, ZUO Liqin. Process of the hydrodynamics and sediment affected by island coastal structures[J]. Advances in Water Science, 2008, 19(5): 640-649.]
- [8] 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, 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.]
- [9] 冯沈科, 姚炎明. 舟山螺头水道悬沙数值模拟研究[J]. 海洋通报, 2013, 32(1): 58-65. [FENG Shenke, YAO Yanming. Research on the suspended sediment simulation for the Luotou strait of Zhoushan Islands area[J]. Marine Science Bulletin, 2013, 32(1): 58-65.]
- [10] 季有俊, 刘杜娟, 黄潘阳, 等. 舟山岛域围垦对邻近水道泥沙运动和 seabed 演变影响分析[J]. 水道港口, 2015, 36(2): 112-120. [JI Youjun, LIU Dujuan, HUANG Panyang, et al. Influence analysis of sediment dynamics and seabed evolution in adjacent channel under Zhoushan islands reclamation project [J]. Journal of Waterway and Harbor, 2015, 36(2): 112-120.]
- [11] 李占海, 高抒, 沈焕庭. 金塘水道的悬沙输运和再悬浮作用特征[J]. 泥沙研究, 2006(3): 55-62. [LI Zhanhai, GAO Shu, SHEN Huanting. Processes of suspended sediment transport and resuspension in Jintang Channel[J]. Journal of Sediment Research, 2006(3): 55-62.]
- [12] 浙江省水文地质工程地质大队. 舟山群岛新区海岸带综合地质调查与监测围填海工程地质环境调查与评价专题成果报告[R]. 宁波, 2013. [Zhejiang Institute of Hydrogeology and Engineering Geology. Report on the geological survey and monitoring of the Coastal Zone In Zhoushan Islands[R]. Ningbo, 2013.]
- [13] 张慧, 堵盘军, 郑晓琴. 浙闽海域余流特征分析[J]. 海洋通报, 2011, 30(2): 152-158. [ZHANG Hui, DU Panjun, ZHENG Xiaoqin. Characteristics analysis of residual current of Zhejiang-Fujian water[J]. Marine Science Bulletin, 2011, 30(2): 152-158.]
- [14] 陈建勇, 戴志军, 陈吉余, 等. 杭州湾北岸弧形岸段悬沙净输移分析—以龙泉-南竹港岸段为例[J]. 泥沙研究, 2009(2): 53-59. [CHEN Jianyong, DAI Zhijun, CHEN Jiyu, et al. Analysis on the net sediment transportation along arc-shaped coast in the northern bank, Hangzhou bay—a case study of Longquan-Nanzhu harbor segment[J]. Journal of Sediment Research, 2009(2): 53-59.]
- [15] 吴德安, 张忍顺, 沈永明. 江苏辐射沙洲水道垂线平均余流的计算与分析[J]. 海洋与湖沼, 2007, 38(4): 289-295. [WU De'an, ZHANG Renshun, SHEN Yongming. Tidal residual current analysis in the tidal channels of the radial sand ridge off Jiangsu coast, China sea area[J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 2007, 38(4): 289-295.]
- [16] 孔亚珍, 丁平兴, 贺松林. 长江口邻近海域余流的基本特征分析[J]. 海洋科学进展, 2007, 25(4): 367-375. [KONG Yazhen, DING Pingxing, HE Songlin. Analysis of basic characteristics of residual current in the Changjiang River estuary and adjacent Sea areas[J]. Advances in Marine Science, 2007, 25(4): 367-375.]
- [17] 朱首贤, 丁平兴, 史峰岩, 等. 杭州湾、长江口余流及其物质输运作用的模拟研究 I. 杭州湾、长江口三维联合模型[J]. 海洋学报, 2000, 22(5): 1-12. [ZHU Shouxian, DING Pingxing, SHI Fengyan, et al. Numerical study on residual current and its impact on mass transport in the Hangzhou Bay and the Changjiang estuary I. A 3-D joint model of the Hangzhou Bay and the Changjiang estuary[J]. Acta Oceanologica Sinica, 2000, 22(5): 1-12.]
- [18] 董胜, 孔令双. 海洋工程环境概论[M]. 青岛: 中国海洋大学出版社, 2005. [DONG Sheng, KONG Lingshuang. An Introduction to Ocean Engineering Environment[M]. Qingdao: Ocean University of China Press, 2005.]
- [19] 闫龙浩. 长江口外海滨悬沙输运研究—以崇明东滩近岸水域为例[D]. 华东师范大学学位论文, 2010. [YAN Longhao. Suspended sediment transport characteristics in offshore area of Yangtze Estuary—a case study from nearshore Waters of Chongming eastern beach[D]. East China Normal University, 2010.]
- [20] Dyer K R. The salt balance in stratified estuaries[J]. Estuarine and Coastal Marine Science, 1974, 2(3): 273-281.
- [21] SU Jilan, WANG Kangshan. The suspended sediment balance in Changjiang Estuary[J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 1986, 23(1): 81-98.
- [22] Fischer H B. Mass transport mechanisms in partially stratified estuaries[J]. Journal of Fluid Mechanics, 1972, 53(4): 671-687.
- [23] 高建华, 汪亚平, 潘少明, 等. 长江口悬沙动力特征与输运模式[J]. 海洋通报, 2005, 24(5): 8-15. [GAO Jianhua, WANG Yaping, PAN Shaoming, et al. Characteristics of suspended sediment dynamics and transport pattern in Changjiang river estuary[J]. Marine Science Bulletin, 2005, 24(5): 8-15.]
- [24] 陈炜, 李九发, 李占海, 等. 长江口北支强潮河道悬沙运动及输移机制[J]. 海洋学报, 2012, 34(2): 85-91. [CHEN Wei, LI Jiufa, LI Zhanhai, et al. The suspended sediment transportation and its mechanism in strong tidal reaches of the North Branch of the Changjiang Estuary[J]. Acta Oceanologica Sinica, 2012, 34(2): 85-91.]
- [25] 时伟荣, 李九发. 长江河口南北槽输沙机制及浑浊带发育分析[J]. 海洋通报, 1993, 12(4): 70-76. [SHI Weirong, LI Jiufa. Mud transport calculation in Yangtze Estuary and analyses of formation of turbidity maximum[J]. Marine Science Bulletin, 1993, 12(4): 70-76.]