



# 三门湾海域悬沙输运特征及其影响机制<sup>\*</sup>

吴创收<sup>1</sup>, 黄世昌<sup>2</sup>, 罗向欣<sup>3</sup>

(1. 中交上海航道勘察设计研究院有限公司, 上海 310020;

2. 浙江省水利河口研究院, 浙江 杭州 310020; 3. 中山大学, 广东 广州 510275)

**摘要:** 基于 2013 年洪枯季三门湾海域 12 个测站潮流和含沙量同步观测资料, 运用机制分解法研究三门湾枯季和洪季悬沙输移变化特征, 探讨不同水动力因子的贡献率。结果表明: 1) 无论是洪季还是枯季, 三门湾的欧拉余流和斯托克斯余流从小潮至大潮逐渐增大。欧拉余流方向基本向海, 斯托克斯余流绝大部分向陆。单宽输水量的大小和方向主要由欧拉余流决定。2) 枯季时三门湾海域“平流输沙(T1+T2)”对单宽输沙量绝对值的贡献率最大, 其中 T1 项最大贡献率可达 83%; “潮泵输沙项(T3+T4+T5)”的贡献率在湾中区域最大。洪季时, 三门湾的平流输沙项的贡献率降低, 而潮泵输沙项贡献率增大。3) 无论是洪季和枯季时, 三门湾泥沙净输运个别站位(SM08 和 SM11)输沙方向相反, 其他站位的规律基本一致。

**关键词:** 三门湾; 机制分解法; 悬沙输运

**中图分类号:** U 6; TV 148<sup>+.1</sup>

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1002-4972(2021)07-0007-07

## Characteristics of suspended sediment transport in Sanmen Bay and its influencing mechanism

WU Chuang-shou<sup>1</sup>, HUANG Shi-chang<sup>2</sup>, LUO Xiang-xin<sup>3</sup>

(1. Shanghai Waterway Engineering Design and Consulting Co., Ltd. Shanghai 200120, China;

2. Zhejiang Institute of Hydraulic and Estuarine, Hangzhou 310020, China; 3. Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275, China)

**Abstract:** Based on the simultaneous observation data of tidal current and sediment content at 12 stations in the Sanmen Bay during dry and flood seasons in 2013, the mechanism decomposition method was used to analyze the transport mechanism of suspended sediment in the dry and flood seasons, and to explore the contribution rate of different hydrodynamic factors. Results show that: 1) Whether it is the flood season or the dry season, the Euler residual current and Stokes residual current increase gradually from neap tide to spring tide. The direction of Euler residual current is seaward, and the direction of Stokes residual current is landward in the study area. The size and direction of the single-width water delivery are mainly determined by the Euler residual current. 2) During the dry season, the advection transport term is the principal constituent of the suspended sediment transport in Sanmen Bay, and the largest contribution rate of T1 is 83% in the study area. The contribution rate of the tidal pumping transport term (T3+T4+T5) is the largest in the middle of the bay. During the flood season, the contribution rate of the advection transport item in Sanmen Bay decreases, while the contribution rate of the tidal pumping transport term increases. 3) Regardless of the flood season and the dry season, the net transport of sediment at individual stations (SM08 and SM11) in Sanmen Bay is in the opposite direction, and the laws of other stations are basically the same.

**Keywords:** the Sanmen Bay; mechanism deposition method; suspended sediment transport

海湾作为大陆与海洋的结合部, 常年受到海洋与陆地的相互作用, 往往形成自己独特的自然

环境和明显区域优势, 对人类社会的发展具有重要的意义<sup>[1-3]</sup>。然而, 近几十年海湾地区受到大量

**收稿日期:** 2020-09-21

**\*基金项目:** 国家自然科学基金资助项目(41406101)

**作者简介:** 吴创收(1981—)男, 博士, 高级工程师, 从事河口海岸沉积动力方面的研究。

人类活动的影响,如港口建设、围垦造地、桥梁工程等,海湾的沉积动力环境已发生明显改变,对海湾地貌系统的稳定性以及海床冲淤演变造成不可逆的影响<sup>[4-9]</sup>。

三门湾位于浙江省的中部,是浙江省第二大海湾,是一个典型的半封闭强潮海湾<sup>[10]</sup>,具有舌状潮滩和港汊相间排列的特征。许多研究者已对围垦造地对三门湾岸线变化以及水动力变化进行了深入研究<sup>[11-13]</sup>,1979—2013 年由于大规模围垦造地和海岸开发活动,三门湾的大陆岸线长度减少 40.18 km<sup>[14]</sup>,2003—2013 年大规模围垦造成三门湾的纳潮量已减少 7%。但是三门湾海域的悬沙输运机制却涉及较少,本文拟以 2013 年枯季和洪季同步观测资料为基础,运用通量机制分解法对浙江省三门湾的悬沙输运进行深入分析研究,以为后期的三门湾整治修复工程提供理论依据。

## 1 区域概况

三门湾是一个典型的强潮半封闭海湾,面积在浙江省排名第二,地处中国“黄金海岸线”中段。湾内长超过 40 km,宽约 10 km,平均水深为 9 m,潮差由湾口向湾顶增大,最大潮差 7.22 m<sup>[15]</sup>,是浙江省“三湾一港”的重要组成部分。据统计 1973—2013 年岸线总长度减少 40.18 km,陆域共增加 155.89 km<sup>2</sup>。20 世纪 90 年代三门湾深槽略受冲刷,滩涂缓慢淤涨,入湾通道处于动态平衡中<sup>[16]</sup>。

## 2 现场观测和研究方法

### 2.1 现场观测

2013 年 1 月和 7 月在三门湾海域的 12 个定点(图 1)共开展了 3 次海流和悬沙同步观测,湾口(SM01~SM04)S04 站位于高塘岛与花岙岛之间的潮汐汊道;湾中(SM05~SM09)SM5 和 SM6 位于猫头水道的两端,SM09 位于高塘岛北侧的潮汐汊道;湾顶为 SM10~SM12。枯季是 1 月 27—28 日(大潮)、1 月 30—31 日(中潮)和 2 月 3—4 日(小潮);洪季是 7 月 24—25 日(大潮)、7 月 28—29 日(中潮)和 7 月 31 日—8 月 1 日(小潮)。观测期间,按

照 GB/T 12763.2—2007《海洋调查规范·海洋水文观测》对研究区域的潮流(流速、流向)和悬沙浓度进行同步观测。潮流主要采用 ADCP 和 SLC-9 新型海流计。大、中、小潮从涨潮流前 1 h 开始观测,每小时(取正点记录)观测一次。每条垂线、每个航次连续观测 25 h。悬沙水样采用 XCL 型的横式采样器,起迄时间与测流同步,采样间隔为 1 h,容积为 2 L。在实验室内对水样经过过滤、烘干、称质量后获得含沙量数据。冬季观测期间平均风速在 1.3~3.0 m/s,夏季观测期间平均风速在 3.1~6.2 m/s。

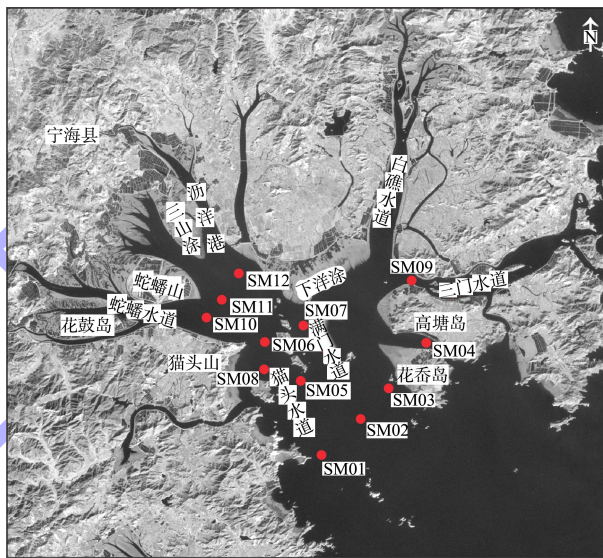


图 1 三门湾海域 2013 年枯季和洪季的水沙观测点位置

### 2.2 研究方法

本文基于通量机制分解法分析不同水动力因子对三门湾悬沙的贡献率,该方法是分析河口海岸水沙输运通量的重要方法,已被广泛应用于对河口海岸的水沙输运研究<sup>[17-22]</sup>。其本质是将水沙输运通量定量分解成多个动力项,定量研究各个动力项对于泥沙输运量的贡献率。在实际应用中,通量分解只是计算单宽通量。分析时只需要对潮流椭圆长轴方向上单宽内纵向水、沙通量进行机制分解。具体计算过程如下:

在计算过程中,设  $x$  为纵向坐标,  $t$  为时间,  $z$  为相对水深( $0 \leq z \leq 1$ ),瞬时流速  $u(x, z, t)$  可以分解为垂向平均量  $\bar{u}$  及其偏差项  $u'$  之和,瞬时含沙量  $c(x, z, t)$  分解为垂向平均量  $\bar{c}$  及其偏差项  $c'$  之和。

$u(x,z,t)=\overline{u}+u'$  (1)

$c(x,z,t)=\overline{c}+c'$  (2)

$\overline{u}$ 、 $\overline{c}$ 、 $u'$ 、 $c'$ 又可以分解为潮平均量和潮变化项之和:

$\overline{u}=\overline{u_0}+\overline{u_t}$  (3)

$u'=u'_0+u'_t$  (4)

$\overline{c}=\overline{c_0}+\overline{c_t}$  (5)

$c'=c'_0+c'_t$  (6)

瞬时流速可以分解为:

$u(x,z,t)=\overline{u_0}+\overline{u_t}+u'_0+u'_t$  (7)

瞬时含沙量可以分解为:

$c(x,z,t)=\overline{c_0}+\overline{c_t}+c'_0+c'_t$  (8)

另外, 水深  $h(x,t)$  可以分解为:

$h(x,t)=h_0+h_t$  (9)

因此, 根据流速、水深的分解方法, 潮周期单宽平均量表示为:

$$\langle Q \rangle = \frac{1}{T} \int_0^T \int_0^l u h d z d t = \overline{u_0} h_0 + \langle \overline{u_t} h_t \rangle = h_0 (\overline{u_E} + \overline{u_S}) = h_0 \overline{u_L}$$
 (10)

式中:  $\langle \rangle$  表示潮平均,  $\overline{u_E}$ 、 $\overline{u_S}$  和  $\overline{u_L}$  即为一维垂向平均欧拉、斯托克斯和拉格朗日余流;  $T$  表示潮周期。

另外含沙量也可以分解为:

$c(x,z,t)=\overline{c_0}+\overline{c_t}+c'_0+c'_t$  (11)

单宽瞬时悬沙输移量可以写为:

$$F = \frac{1}{T} \int_0^T \int_0^l h u c d z d t =$$

$$h_0 \overline{u_0 c_0} + \langle h_t \overline{u_t} \rangle \overline{c_0} + \langle h_t c_t \rangle \overline{u_0} + \langle h_t \overline{u_t} c_t \rangle +$$
 (12)

$$h_0 \langle \overline{u'_0 c'_0} \rangle + h_t \langle \overline{u'_0 c'_t} \rangle + h_t \langle \overline{u'_t c'_0} \rangle + h_t \langle \overline{u'_t c'_t} \rangle$$

式中:  $h_0 \overline{u_0 c_0}$  为平均流引起的悬沙输移(T1);  $\langle h_t \overline{u_t} \rangle \overline{c_0}$  为潮汐和潮流相关项(T2), 即斯托克斯漂移量;  $h_0 \overline{u_0 c_0} + \langle h_t \overline{u_t} \rangle \overline{c_0}$  为平流输移(T1+T2), 即拉格朗日输移;  $\langle h_t c_t \rangle \overline{u_0}$  为潮汐与悬沙含量的潮变化相关项(T3);  $\langle h_t \overline{u_t} c_t \rangle$  为水深、流速和悬沙含量变化相关项(T4);  $h_0 \langle \overline{u'_0 c'_0} \rangle$  为垂向流速与含沙量变化的相关项(T5);  $h_t \langle \overline{u'_0 c'_t} \rangle + h_t \langle \overline{u'_t c'_0} \rangle$  为时均量与潮振动切变引起的剪切扩散(T6+T7);  $h_t \langle \overline{u'_t c'_t} \rangle$  为垂向潮振荡切变作用项(T8)。

### 3 水沙结果分析

#### 3.1 水动力和泥沙变化特性

三门湾潮流明显季节变化特征。洪季落潮平均流速从 0.51 m/s 减少至 0.41 m/s, 减少了 20%; 涨潮平均流速从 0.46 m/s 减少至 0.44 m/s, 减少了 4%。枯季潮流从湾口向湾顶逐渐降低, 落潮平均流速从 0.62 m/s 减少至 0.52 m/s, 减少了 16%; 涨潮平均流速从 0.67 m/s 减少至 0.45 m/s, 减少了 18%。三门湾悬沙浓度洪枯季变化情况见表 1。

表 1 三门湾悬沙浓度洪枯季变化情况

区位	测点	悬沙浓度/(kg·m <sup>-3</sup> )					
		大潮		中潮		小潮	
		洪季	枯季	洪季	枯季	洪季	枯季
湾口	SM01	0.60	0.36	0.18	0.49	0.06	0.36
	SM02	0.41	0.48	0.18	0.69	0.07	0.31
	SM03	0.55	0.74	0.27	0.87	0.07	0.66
	SM04	0.63	0.72	0.35	0.86	0.09	0.67
湾中	SM05	0.50	0.36	0.14	0.60	0.08	0.32
	SM06	0.41	0.25	0.19	0.48	0.05	0.29
	SM07	0.93	0.33	0.25	0.51	0.09	0.32
	SM08	0.61	0.53	0.26	0.67	0.10	0.42
	SM09	0.41	0.47	0.23	0.69	0.09	0.39
湾顶	SM10	0.57	0.30	0.20	0.46	0.06	0.25
	SM11	0.33	0.28	0.12	0.42	0.07	0.28
	SM12	0.42	0.32	0.20	0.45	0.06	0.27
均值		0.53	0.43	0.21	0.60	0.07	0.38

3.2 余流

三门湾的欧拉余流 (UE)、斯托克斯余流 (US) 方向存在空间差异性, 而且从大潮至小潮, 都是逐渐减少, 见图 2、3。枯季时, 位于潮汐汉道的 SM04 和 SM09, 欧拉余流(UE)最大, 大潮余流值可达 0.10 m/s 以上, 斯托克斯余流(US)大潮

最大值为 0.03 m/s。洪季时, 潮汐汉道的 SM09 站的欧拉余流最大, 大潮时余流值可达 0.20 m/s, 斯托克斯余流(US)最大值为 0.05 m/s。根据最小二乘法分析枯季和洪季的单宽输水量与欧拉余流存在明显的正相关关系(图 4)。

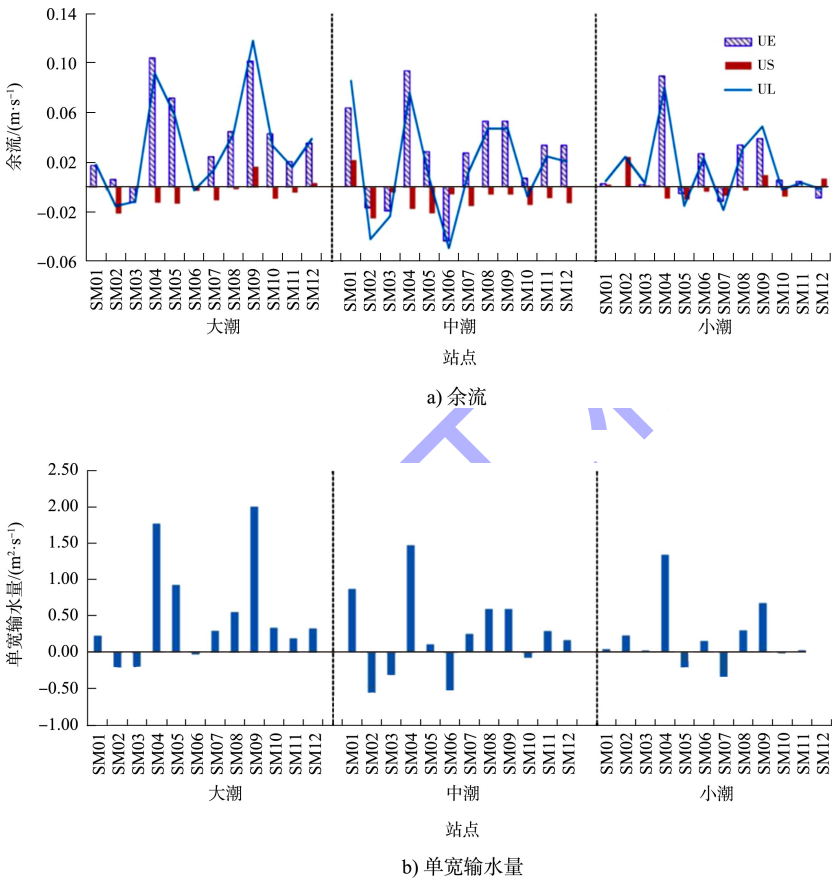
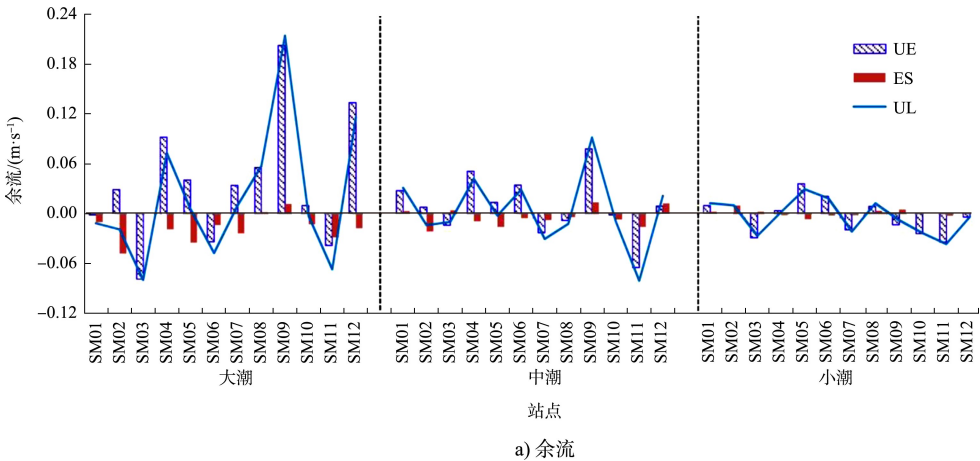


图 2 三门湾枯季余流和单宽输水量随潮周期的变化





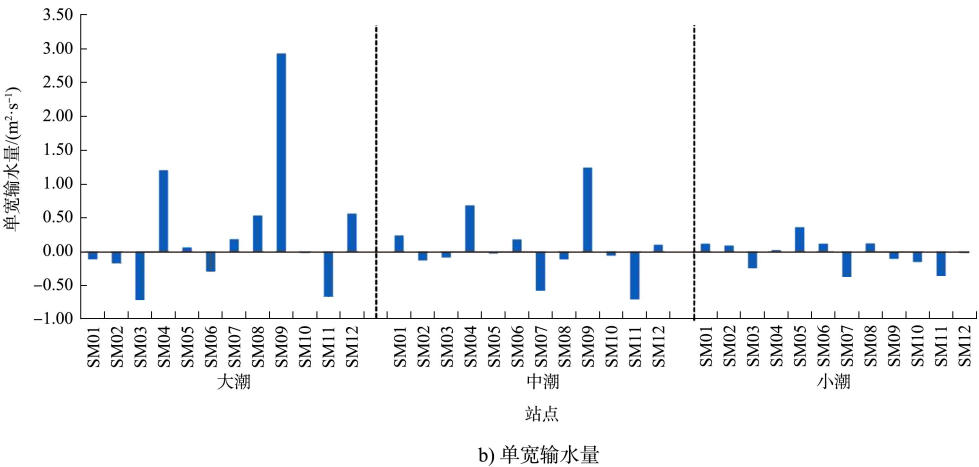


图 3 三门湾洪季余流和单宽输水量随潮周期的变化

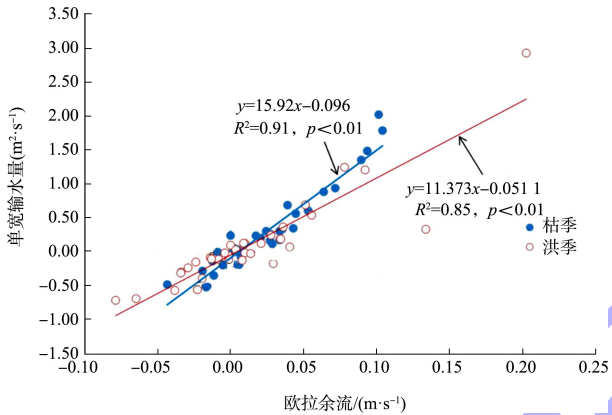


图 4 三门湾的单宽输水量与欧拉余流的相关关系

4 悬沙输移机制分析

4.1 枯季

平流输移(T1+T2)。三门湾潮汐汊道 SM04 和 SM09 的 T1 和 T2 值较大(表 2)，T1 项贡献率分别

是 83%和 81%，而 T2 项贡献率分别是 -12%和 14%(表 3)。湾中和湾顶 T1 项分别是 0.111 ~ 0.913 kg/(m·s)和 0.173~0.253 kg/(m·s)，二者贡献率大于湾口贡献率。T2 项以湾口 SM02 站的贡献率最大，为 60%。

“潮泵效应”项(T3+T4+T5)。T3、T4、T5 这 3 项也具有明显的空间变化特征，且 T5>T4>T3。T5 项变化范围是 0.002~0.029 kg/(m·s)，贡献率以湾中最大。T4 变化范围是 0.002~0.054 kg/(m·s)，除了 SM09 测站以外，其他站位的输沙方向向陆。湾口和湾顶贡献率相对较大。T3 项最小，变化范围是 0.001~0.029 kg/(m·s)，输沙方向基本上是向海(表 2)。其他项(T6+T7+T8)相对比较小，在此不做讨论。贡献率见表 3。

表 2 三门湾海域枯季不同驱动力的输沙量

区位	站点	输沙量								平流 输沙量	潮流 输沙量	单宽 输沙量	单宽输沙 量绝对值
		T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8				
湾口	SM01	0.416	0.121	0.004	-0.012	-0.052	0.000	0.000	-0.003	0.537	-0.060	0.474	0.608
	SM02	-0.108	-0.274	-0.001	-0.033	0.024	0.001	0.015	-0.002	-0.382	-0.010	-0.377	0.458
	SM03	-0.302	-0.035	0.002	-0.054	-0.040	0.000	0.008	-0.013	-0.337	-0.092	-0.434	0.454
	SM04	4.068	-0.589	0.009	-0.043	-0.131	0.000	0.017	-0.009	3.479	-0.166	3.321	4.866
湾中	SM05	0.667	-0.323	0.008	-0.008	-0.087	0.000	0.019	-0.002	0.344	-0.087	0.274	1.114
	SM06	-0.110	-0.035	-0.004	-0.038	-0.029	0.000	0.008	-0.002	-0.145	-0.071	-0.210	0.226
	SM07	0.413	-0.295	0.003	-0.004	-0.115	-0.001	0.011	-0.001	0.117	-0.116	0.011	0.843
	SM08	0.913	-0.080	0.029	-0.062	-0.111	-0.002	0.005	-0.008	0.834	-0.145	0.684	1.210
	SM09	2.421	0.402	0.019	0.075	-0.051	0.000	0.000	-0.004	2.823	0.043	2.861	2.972
湾顶	SM10	0.173	-0.111	0.004	-0.041	0.002	0.001	0.005	-0.001	0.062	-0.035	0.031	0.338
	SM11	0.251	-0.064	0.003	-0.027	-0.019	0.000	0.001	0.000	0.187	-0.043	0.144	0.365
	SM12	0.210	-0.030	0.003	-0.044	-0.008	-0.001	0.000	-0.002	0.180	-0.048	0.129	0.298

注：正值表示向海输运，负值表示向陆输运。单宽输沙量为各输沙项的矢量和，单宽输沙量绝对值为其标量和。

表 3 三门湾海域枯季不同输沙项相对于单宽输沙量绝对值的贡献率

区位	站点	贡献率/%							
		T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8
湾口	SM01	68	20	1	-2	-9	0	0	0
	SM02	-24	-60	0	-7	5	0	3	0
	SM03	-67	-8	0	-12	-9	0	2	-3
	SM04	83	-12	0	-1	-3	0	0	0
湾中	SM05	60	-29	1	-1	-8	0	2	0
	SM06	-49	-15	-2	-17	-13	0	4	-1
	SM07	49	-35	0	0	-14	0	1	0
	SM08	75	-7	2	-5	-9	0	0	-1
	SM09	81	14	1	3	-2	0	0	0
湾顶	SM10	51	-33	1	-12	1	0	1	0
	SM11	69	-18	1	-7	-5	0	0	0
	SM12	70	-10	1	-15	-3	0	0	-1

4.2 洪季

平流输沙(T1+T2)。位于潮汐汉道的 SM09 和 SM04 的 T1 项值较大,变化范围是 1.363 kg/(m·s)和 1.257 kg/(m·s)(表 4),贡献率达到 88%和 79%。其他测站的变化范围是 0.014~0.447 kg/(m·s),贡献率是 11%~70%。而 T2 项变化范围 0.025~0.449 kg/(m·s),贡献率以 SM02 站为最大,贡献率达到-42%左右(表 5)。

“潮泵效应”项(T3+T4+T5)。这三项的变化是 T4>T5>T3,而且 T4 和 T5 项的输沙方向基本上向陆。T4 项变化范围是 0.003~0.613 kg/(m·s),湾中的 SM07 站值最大,潮汐汉道的 SM04 站值最小。T5 项变化范围是 0.003~0.172 kg/(m·s),湾中的 SM07 站值最大,湾口的 SM03 站值最小。T3 值变化范围是 0.001~0.040 kg/(m·s),输沙方向基本上是向海。

表 4 三门湾海域洪季不同驱动力的输沙量

区位	站点	输沙量								kg/(m·s)			
		T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8	平流输沙量	潮流输沙量	单宽输沙量	单宽输沙量绝对值
湾口	SM01	0.037	-0.055	0.001	-0.131	-0.037	-0.001	0.004	-0.006	-0.018	-0.167	-0.187	0.272
	SM02	0.124	-0.213	0.000	-0.132	-0.031	0.001	0.024	0.008	-0.089	-0.163	-0.219	0.533
	SM03	-0.446	0.006	-0.007	-0.171	0.003	-0.001	0.006	0.001	-0.440	-0.175	-0.608	0.641
	SM04	1.257	-0.255	0.004	-0.057	-0.016	0.000	0.005	-0.002	1.001	-0.069	0.936	1.596
湾中	SM05	0.307	-0.250	0.008	-0.176	-0.092	-0.001	0.025	0.005	0.057	-0.260	-0.174	0.864
	SM06	-0.014	-0.029	-0.004	-0.013	-0.005	0.000	0.003	0.001	-0.042	-0.022	-0.060	0.069
	SM07	0.447	-0.449	0.008	-0.613	-0.172	-0.003	0.015	0.018	-0.002	-0.777	-0.748	1.725
	SM08	0.304	0.003	0.011	-0.137	-0.058	-0.001	0.010	-0.003	0.307	-0.183	0.130	0.527
	SM09	1.363	0.115	0.040	-0.003	-0.017	-0.001	0.000	0.002	1.477	0.020	1.499	1.541
湾顶	SM10	0.025	-0.058	0.001	-0.119	0.006	0.001	0.013	-0.005	-0.033	-0.112	-0.136	0.228
	SM11	-0.194	-0.100	-0.003	-0.094	0.009	0.001	0.010	-0.001	-0.294	-0.088	-0.371	0.412
	SM12	0.284	-0.025	0.013	-0.069	-0.009	-0.002	0.001	0.002	0.259	-0.065	0.195	0.405

表 5 三门湾洪季海域不同输沙项相对于单宽输沙量绝对值的贡献率

区位	站点	贡献率/%							
		T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8
湾口	SM01	14	-20	0	-48	-14	0	1	-2
	SM02	23	-40	0	-25	-6	0	5	2
	SM03	-70	1	-1	-27	0	0	1	0
	SM04	79	-16	0	-4	-1	0	0	0

续表5

区位	站点	贡献率/%							
		T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8
湾中	SM05	36	-29	1	-20	-11	0	3	1
	SM06	-20	-42	-6	-19	-7	0	4	1
	SM07	26	-26	0	-36	-10	0	1	1
	SM08	58	1	2	-26	-11	0	2	-1
	SM09	88	7	3	0	-1	0	0	0
湾顶	SM10	11	-25	0	-52	3	0	6	-2
	SM11	-47	-24	-1	-23	2	0	2	0
	SM12	70	-6	3	-17	-2	0	0	0

5 结论

1)三门湾海域无论是欧拉余流, 还是斯托克斯余流, 从小潮至大潮逐渐增大。而且欧拉余流方向基本向海, 斯托克斯余流绝大部分方向向陆, 单宽输水量的大小和方向主要由欧拉余流所决定。

2)通过机制分解法分析, 三门湾海域枯季, 平流输沙(T1+T2)对于单宽输沙量绝对值的贡献率最大, T1 项最大贡献率可达 83%; 潮泵输沙项湾中的贡献率大于湾口和湾顶; 洪季时, 潮汐汉道的 SM04 和 SM09 还是以平流输沙贡献率最大。而其他站位平流输沙对于单宽输沙量绝对值的贡献率减少, 潮泵输沙项(T3+T4+T5)的贡献率增大。

参考文献:

[1] 张云, 张英佳, 景昕蒂, 等.我国海湾海域使用的基本状况[J].海洋环境科学, 2012, 31( 5) : 755-757.

[2] 黄小平, 张凌, 张景平, 等.我国海湾开发利用存在的问题与保护策略[J].中国科学院院刊, 2016, 31( 10) : 1151-1156.

[3] 侯西勇, 侯婉, 毋亭.20 世纪 40 年代初以来中国大陆沿海主要海湾形态变化[J].地理学报, 2016, 71( 1) : 118-129.

[4] ZHAO K, QIAO L L, SHI J H, et al. Evolution of sedimentary dynamic environment in the western Jiaozhou Bay, Qingdao, China in the last 30 years[J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 2015, 163: 244-253.

[5] GAO G D, WANG X H, BAO X W, et al. Land reclamation and its impact on tidal dynamics in Jiaozhou Bay, Qingdao, China[J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 2014, 151: 285-294.

[6] XIE D F, GAO S, WANG Z B, et al. Numerical modeling of tidal currents, sediment transport andmorphological evolution in Hangzhou Bay, China [J]. International Journal of Sediment Research, 2013, 28( 3) : 316-328.

[7] ZHANG Y, LU X Q, SHAO X L.Temporal variation of sedimentation rates and potential factors influencing those rates over the last 100 years in Bohai Bay, China[J]. Science of the total environment, 2016, 572: 68-76.

[8] WU C Q, CAI F, ZHAO G T, et al. Impact of coastal engineering constructions on the topographic and morphological evolution of Quanzhou Bay, Fujian, China [J]. 2011, Ocean and Coastal management, 2011, 54 ( 7) : 544-555.

[9] LIU Y F, XIA X M, CHEN S L, et al. Morphological evolution of Jinshan trough in Hangzhou Bay ( China) from 1960 to 2011 [J]. Estuarine, coastal and shelf science, 2017, 198: 367-377.

[10] 吴桑云, 王文海, 丰爱平, 等.我国海湾开发活动及其环境效应[M].北京: 海洋出版社, 2011.

[11] 黄潘阳, 陈培雄, 来向华, 等.三门湾 2003—2013 年间围涂工程对水动力环境的影响研究[J].中国海洋大学学报( 自然科学学报), 2017, 47( 10) : 91-98.

[12] 宋泽坤, 施伟勇, 张峰, 等.三门湾近期水动力特性观测研究[J].应用海洋学学报, 2017, 36( 2) : 279-285.

[13] 宋文杰, 禹丝思, 陈梅花, 等.近 30 年三门湾海岸线时空变化及人为干扰度分析[J].浙江师范大学学报( 自然科学版), 2017, 40( 3) : 343-349.

[14] 陈晓英, 张杰, 马毅, 等.近 40 a 来三门湾海岸线时空变化遥感监测与分析[J].海洋科学, 2015, 39( 2) : 43-49.

[15] 师鹏飞, 许东峰, 王俊, 等.三门湾外海的潮汐和潮流特征[J].海洋学研究, 2012, 30( 2) : 27-35.