

· 综 合 ·



# 虾峙门航道口门附近水动力特征研究

刘高伟, 王元叶

(上海河口海岸科学研究中心, 上海 201201)

**摘要:** 以2015年5月10—19日(小潮至大潮)在虾峙门航道口门附近水域的定点水文测验资料为支撑, 利用调和分析、数理统计及机制分解等方法研究该水域水动力特征及水体输移机制, 研究结果表明: 虾峙门航道口门附近潮汐性质为中等强度的非正规半日浅海潮; 潮波特性近似于典型前进波特性; 潮流运动形式处于往复流向旋转流的过渡区, 呈顺时针方向旋转; 潮流流速垂向分布表现为由表至底减小, 最大流速出现在表层或 $0.2H$ 层; 垂线平均流速表现为大潮>小潮>中潮; 该水域涨潮流占主导优势, 且小潮至大潮优势流逐渐减小。水体输移动力以欧拉余流为主, 同样表现为大潮>小潮>中潮。

**关键词:** 虾峙门航道; 潮汐; 潮流; 水体输移机制

**中图分类号:** U 612

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1002-4972(2017)02-0014-05

## Study on hydrodynamics characteristics in the mouth area of Xiashimen strait channel

LIU Gao-wei, WANG Yuan-ye

(Shanghai Estuarine & Coastal Research Center, Shanghai 201201, China)

**Abstract:** On the basis of the hydrological data obtained from fixed-point observation in the mouth area of Xiashimen strait channel from May 10 to 19, 2015 (from neap tide to spring tide), the hydrodynamics characteristics and transport mechanism of water are analyzed using the method of harmonic analysis, mathematical statistics and decomposition mechanism. The results show that: the nature of tides is moderate intensity non-regular semidiurnal shallow sea tide; the characteristic of tidal wave is similar to that of typical forward wave; the form of tidal current is in the transition zone of the reversing current to rotational flow, and the tides rotate in a clockwise direction. The vertical distribution of tidal current velocity decreases from the surface to the bottom, and the maximum flow rate appears in the surface layer or  $0.2H$  layer; the average vertical velocity shows spring tide > neap tide > mean tide; the flood current is dominant in the water, and tide dominant flow decreases from neap tide to spring. Water transport power bases on Euler residual current, and shows spring tide > neap tide > mean tide.

**Keywords:** Xiashimen channel; tides; tide; water transport mechanism

虾峙门航道是大型船舶进出宁波-舟山港的主要航道, 由口内、口外两段航道组成, 口内水道位于舟山群岛的虾峙岛和桃花岛之间, 口外航道位于虾峙门水道口以东水域。口内航道自然水深优良, 最小水深在30 m以上; 口外航道最小水深

只有18.2 m, 仅能通航15万吨级船舶<sup>[1-2]</sup>。为了促进上海国际航运中心的建成和发展, 充分发挥宁波-舟山深水港的作用, 2007年5月开始对口外航道进行整治, 2008年1月完工并顺利验收。

航道建成后需要进行日常维护, 保持通航水

**收稿日期:** 2016-06-22

**作者简介:** 刘高伟(1987—), 男, 硕士, 助理工程师, 从事河口海岸工程水文、泥沙勘测研究。

深; 而航道的开发建设和维护往往要以航道水域的水文动力等条件为依据。本文以实测资料为依据, 研究虾峙门航道口门附近水域的水动力特征及水体输移机制, 可为虾峙门口外航道的维护提供科学依据, 为舟山航运事业发展提供理论参考。

## 1 资料与方法

### 1.1 资料来源

本文数据均源于实测资料, 2015-05-10—2015-05-19 在虾峙门航道口门附近 S1 测点 (图 1) 进行 3 个不同潮次 (从小潮至大潮) 的定点水文测验。主要利用 ADCP 进行流速、流向测量。其中, 每个潮次连续测验时间均大于 26 h, 且潮位数据连续 10 d 不间断测量。

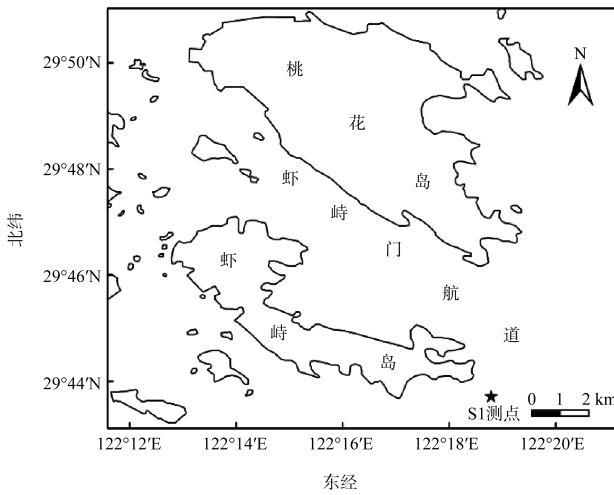


图 1 水文测验位置

### 1.2 研究方法

#### 1.2.1 调和分析

虾峙门航道口门附近潮汐特征值主太阴半日分潮振幅 ( $H_{M_2}$ )、太阴太阳赤纬日分潮振幅 ( $H_{k_1}$ )、主太阴日分潮振幅 ( $H_{O_1}$ )、太阴浅海分潮振幅 ( $H_{M_4}$ )、太阴太阳浅海分潮振幅 ( $H_{MS_4}$ ) 通过实测潮位资料的调和与分析获得;  $M_2$  分潮潮流的椭圆长轴、方向、椭率通过实测潮流资料的调和与分析获得<sup>[3]</sup>。

#### 1.2.2 单宽潮量与优势流计算

本文从潮量角度来描述涨落潮强弱, 即单宽

落潮量除以单宽涨潮量和单宽落潮量之和<sup>[4]</sup>:

$$R_Q = \frac{Q_e}{Q_e + Q_f} \times 100\% \quad (1)$$

$$Q_{e(f)} = \sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n v_{ij} H_{ij} T_{ij} \cos\theta \quad (2)$$

式中:  $R_Q$  为优势流;  $Q_e$  为单宽落潮量;  $Q_f$  为单宽涨潮量;  $m$  为落潮流历时或涨潮流历时;  $n$  为分层数;  $v_{ij}$  为流速 (m/s);  $H$  为水深 (m);  $T$  为观测时段 (s);  $\theta$  为实测流向与潮流长轴方向的夹角;  $j$  为某时段;  $i$  为某层次。

#### 1.2.3 单宽水体输移机制分解

设  $x$  为纵向坐标,  $t$  为时间,  $z$  为相对水深 ( $0 \leq z \leq 1$ ), 水深可分解为潮平均项和潮变化项, 即:

$$h(x, t) = h_0(x) + h_t(x, t) \quad (3)$$

瞬时流速可分解为垂向平均量和垂向偏差项, 即:

$$u(x, z, t) = \bar{u}(x, t) + u'(x, z, t) \quad (4)$$

$\bar{u}(x, t)$  和  $u'(x, z, t)$  又可分解为潮平均量和潮变化项之和, 即:

$$\bar{u}(x, t) = \bar{u}_0(x) + \bar{u}_t(x, t) \quad (5)$$

$$u'(x, z, t) = u'_0(x, z) + u'_t(x, z, t) \quad (6)$$

所以瞬时流速可以分解为:

$$u(x, z, t) = \bar{u}_0(x) + \bar{u}_t(x, t) + u'_0(x, z) + u'_t(x, z, t) \quad (7)$$

潮平均单宽水体输移量:

$$\langle Q \rangle = \frac{1}{T} \int_0^T \int_0^h u dz dt = \langle h \bar{u} \rangle = \bar{u}_0 h_0 + \langle \bar{u}_t h_t \rangle \quad (8)$$

式中:  $\langle Q \rangle$  为潮平均;  $\bar{u}_0 h_0$  为平均流项;  $\langle \bar{u}_t h_t \rangle$  为潮汐与潮流相关项, 也称作斯托克斯漂移效应;  $T$  为潮周期。因此式 (8) 可以表示为:

$$\langle Q \rangle = (\bar{u}_E + \bar{u}_S) h_0 = \bar{u}_L h_0 \quad (9)$$

式中:  $\bar{u}_E = \bar{u}_0$  为欧拉余流;  $\bar{u}_S = \langle \bar{u}_t h_t \rangle / h_0$  为斯托克斯余流;  $\bar{u}_L = \langle Q \rangle / h_0 = (\bar{u}_E + \bar{u}_S)$  为拉格朗日余流。

## 2 潮汐特征

### 2.1 潮汐性质

根据实测潮位数据通过调和与分析获得不同分潮的调和常数, 主太阴半日分潮  $M_2$  振幅为 137.4 cm,

太阴浅海分潮  $M_4$  振幅为 6.4 cm，主太阳半日分潮  $S_2$  振幅为 61.1 cm，太阴太阳浅海分潮  $MS_4$  振幅为 4.2 cm，太阴太阳赤纬日分潮  $K_1$  振幅为 32.7 cm，主太阴全日分潮  $O_1$  振幅为 18.4 cm。利用半日潮性质判别系数  $F = (H_{K_1} + H_{O_1}) / H_{M_2}$  来判断虾峙门航道口门附近海域潮汐性质， $F$  值为 0.37，小于 0.5，故属于半日潮性质。根据浅水分潮判别系数  $G = H_{M_4} / H_{M_2}$  判断该海域浅水分潮性质， $G$  值为 0.05，浅水分潮性质显著。可见，虾峙门航道口门附近海域潮汐性质为非正规半日浅海潮。

### 2.2 潮汐主要特征

潮差和涨落潮历时是表述潮汐特征的重要参考指标。测量期间虾峙门航道附近海域小潮平均潮差为 183 cm，中潮平均潮差为 277 cm，大潮平均潮差为 348 cm，属于中等强度潮汐。小潮期间平均涨潮历时为 6.92 h，平均落潮历时为 5.20 h；中潮期间平均涨潮历时为 6.55 h，平均落潮历时为 5.69 h；大潮期间平均涨潮历时为 6.80 h，平

均落潮历时为 5.84 h。统计资料显示相邻两高潮或两低潮出现不等现象，涨落潮历时也不对称。

## 3 潮流特征

### 3.1 潮流椭圆要素

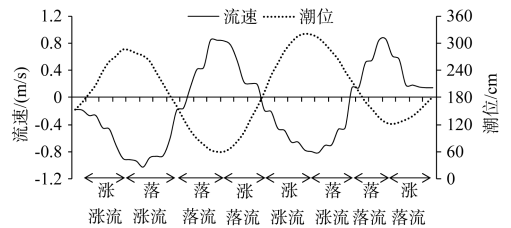
虾峙门航道口门附近海域以  $M_2$  分潮为主控潮流，根据实测数据利用调和和分析获得不同层次  $M_2$  分潮的椭圆要素（表 1）。 $M_2$  分潮长轴长小潮期间由表至底先增大再减小，最大值在 0.4 层为 0.78 m/s；中潮期间由表至底逐渐减小，最大值在表层为 0.82 m/s；大潮期间由表至底基本呈现逐渐减小趋势，表层至 0.4 层长轴长均最大约为 1.10 m/s；小潮至大潮底层长轴长均为最小，并且小潮至大潮长轴长逐渐增大。小潮至大潮的长轴向由表至底均表现为逐渐减小趋势，即由表至底呈逆时针旋转；另外，小潮长轴向沿涨潮方向，中潮和大潮长轴向沿落潮方向。椭率小潮期间由表至底逐渐减小，而中潮和大潮期间逐渐增大。

表 1 虾峙门航道口门附近海域  $M_2$  分潮各层次椭圆要素

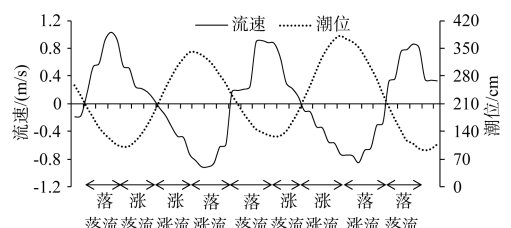
层次	长轴长/(m/s)			长轴向/(°)			椭率		
	小潮	中潮	大潮	小潮	中潮	大潮	小潮	中潮	大潮
表层	0.75	0.82	1.10	17	172	176	0.30	0.08	0.19
0.2 层	0.77	0.80	1.09	17	171	178	0.29	0.07	0.17
0.4 层	0.78	0.78	1.10	11	167	176	0.25	0.18	0.20
0.6 层	0.76	0.76	1.05	11	167	175	0.29	0.21	0.23
0.8 层	0.73	0.73	0.90	1	164	171	0.12	0.25	0.22
底层	0.56	0.55	0.72	1	158	168	0.14	0.31	0.22
垂线平均	0.75	0.76	1.03	11	168	174	0.22	0.16	0.21

### 3.2 潮波特性

舟山及杭州湾附近的潮波主要是外海传播来的谐振动，该水域主要受东海前进波系统的影响。小潮期间涨急发生在最高潮位（高平潮）之后的 1 h 左右，落急发生在最低潮位（低平潮）之前的 0.5 ~ 1 h，转流基本上发生在半潮位时刻；涨潮-涨潮流、落潮-涨潮流、落潮-落潮流及涨潮-落潮流这 4 个阶段的时间基本接近。中潮、大潮期间这种特点十分相似，可见，虾峙门航道口门附近水域潮波特性基本接近典型前进波特性（图 2）。



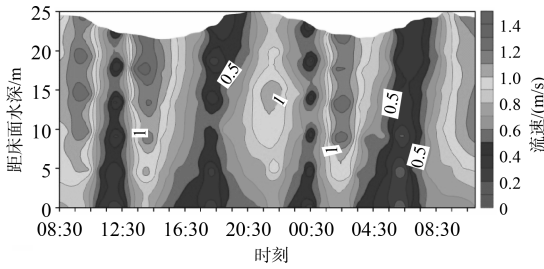
a) 小潮期间



b) 中潮期间







c) 大潮期间(2015-05-18—2015-05-19)

图4 虾峙门航道口门附近海域小、中、大潮期间潮流等深线

### 3.4 优势流

将实测数据代入公式(1)、(2)，计算得到虾峙门航道口门附近海域小潮至大潮期间的单宽涨、落潮量及优势流(表3)。

表3 虾峙门航道口门附近海域单宽潮量及优势流

潮型	涨潮平均单宽潮量/万 m <sup>3</sup>	落潮平均单宽潮量/万 m <sup>3</sup>	优势流/%
小潮	36.4	20.3	35.8
中潮	30.4	23.5	43.6
大潮	44.9	36.6	44.9

可见，涨潮单宽潮量始终大于落潮单宽潮量，优势流均小于50%，说明该海域始终以涨潮流优势为主，且小潮至大潮期间落潮优势逐渐增大。

### 4 水体输移机制

根据现场实测数据再结合公式(3)~(9)计算得到虾峙门航道口门附近海域余流及纵向单宽平均净输水量(表4)。

表4 虾峙门航道口门附近海域余流及单宽平均净输水量

潮型	余流/(m/s)			单宽净输水量/(m <sup>2</sup> /s)		
	$\bar{u}_E$	$\bar{u}_S$	$\bar{u}_L$	$\bar{u}_E h_0$	$\bar{u}_S h_0$	$\bar{u}_L h_0$
小潮	0.536 6	0.000 9	0.537 5	12.290 2	0.020 6	12.310 8
中潮	0.520 5	0.001 5	0.522 0	12.163 1	0.035 1	12.198 1
大潮	0.736 2	0.000 1	0.736 3	17.176 1	0.002 3	17.178 4

计算结果显示：虾峙门航道口门附近海域小潮期间欧拉余流约为0.54 m/s；中潮期间欧拉余流比小潮期间稍小，约为0.52 m/s；大潮期间欧拉余流最大，约为0.74 m/s。小潮至大潮期间斯托克斯余流极小，可以忽略不计，在相同潮情下，拉格朗日余流大小与欧拉余流大小十分接近。

同一余流不同潮情之间的大小关系与同一余流单宽净输水量不同潮情之间的大小关系相同，即不同潮情下，欧拉余流单宽净输水量同样表现

为大潮最大、小潮次之、中潮最小。拉格朗日余流单宽净输水量等于欧拉余流单宽净输水量与斯托克斯余流单宽净输水量之和，由于斯托克斯余流单宽净输水量较小(可忽略不计)，故在相同潮情下，拉格朗日余流单宽净输水量与欧拉余流单宽净输水量同样相近。

### 5 结论

1) 虾峙门航道口门附近水域潮汐性质为非正规半日浅海潮，属于中等强度潮汐，且相邻两高潮或两低潮出现不等现象，涨落潮历时也不对称。

2) 虾峙门航道口门附近水域潮波特性近似于典型前进波特性；潮流运动形式处于往复流向旋转流的过渡区，呈顺时针方向旋转；潮流垂向分布表现为由表至底流速呈减小趋势，最大流速一般出现在表层或0.2层。

垂线平均流速大潮>小潮>中潮，小潮和中潮期间涨潮垂线平均流速大于落潮，大潮期间落潮垂线平均流速大于涨潮；落潮流向略显分散，而涨潮流向比落潮流向更为分散；且大潮涨潮流向比小潮和中潮较为分散。优势流小潮至大潮逐渐减小，且均小于0.5，说明该水域涨潮流占主导优势。

3) 拉格朗日余流等于欧拉余流与斯托克斯余流之和，相同潮情下，欧拉余流较大，斯托克斯余流极小，可忽略不计。同一余流不同潮情之间的大小关系与同一余流单宽净输水量不同潮情之间的大小关系相同，即不同潮情下，欧拉余流单宽净输水量表现为大潮最大，小潮次之，中潮最小。

### 参考文献:

- [1] 蒋国俊,姚炎明.虾峙门水道口门区动力和动力沉积特性[J].海洋通报,1998,17(4):46-54.
- [2] 徐炳良.通过虾峙门浅谈船舶的狭水道航行[C]//全国气象海洋环境与船舶航行安全学术研讨会论文集.北京:[s.n.],2010.
- [3] 刘高伟,程和琴,杨忠勇.长江口深水航道三期工程前后北槽中上段水动力及含沙量变化特征[J].水运工程学报,2015(6):7-16.
- [4] 徐海根,茅志昌.长江口南北槽分水分沙变化及其原因分析[M]//陈吉余,沈焕庭,恽才行.长江河口动力过程和地貌演变.上海:上海科学技术出版社,1988:404-418.