

# 沙埕港湾口断面潮流及余流特征分析\*

万凯<sup>1</sup> 鲍献文<sup>1,2①</sup> 姚志刚<sup>1,2</sup> 万修全<sup>1,2</sup> 夏颖颖<sup>1</sup>

(1. 中国海洋大学海洋环境学院 青岛 266100; 2. 中国海洋大学物理海洋教育部重点实验室 青岛 266100)

**提要** 基于对沙埕港湾口断面的连续走航观测资料, 成功构建了沿走航断面的 10 个站点的连续海流序列, 并分析了潮流、余流、潮通量等水文要素。分析结果表明, 沙埕港湾口水道潮流类型为正规半日潮流, 涨潮最先出现在中下层而落潮最先出现在上层, 涨(落)潮转流相差约为 30min。水道内潮流为往复流,  $M_2$  和  $S_2$  分潮流流速较大, 倾角基本沿水道主轴方向。沙埕港湾口断面余流呈 2 层结构, 10m 以浅基本为东南向余流流出湾口, 核心位于湾口断面南侧。10m 以深多为西北向流入湾内, 入流核心位于湾口断面中部的底层区域。对潮通量的计算表明, 通过湾口进入沙埕港的潮通量约为  $1.63 \times 10^8 \text{m}^3$ 。

**关键词** 潮流; 余流; 纳潮量; 走航 ADCP

**中图分类号** P731.21 **doi:** 10.11693/hyhz20130315002

沙埕港是位于浙江福建交界的海湾, 属福建省福鼎市, 地理范围  $120^\circ 10.74' - 120^\circ 26.57' \text{E}$ ,  $27^\circ 8.37' - 27^\circ 9.07' \text{N}$ 。湾内水深大都在 15m 以上, 最大水深 45m(鲍献文等, 2008), 是一个天然的深水避风良港。沙埕港港区为正规半日潮, 潮差较大, 大潮时可达 7—8m(李克先等, 2001); 湾内岸线曲折多变, 海流变化主要受地形影响。沙埕港湾口较为狭窄且为湾内与外海进行水体和物质交换的唯一通道, 湾口断面的潮流及余流特征对研究沙埕港水动力环境与物质输运过程有一定意义。

前人对沙埕港的研究主要集中在风暴潮的特征分析和数值模拟方面。李克先等(1995; 2001)在对沙埕港多年风暴潮历史资料的特征分析基础上, 建立了一个基于气压高度、局地风速的二元线性回归极值预报模式。栾曙光等(2012)使用 Mike21 模型对超强台风“桑美”正面登陆时的风场进行了数值模拟, 分析了台风造成灾害的原因。然而, 对沙埕港海流及余流方面的研究则较少, 高精度观测资料的缺乏使科研工作者对沙埕港湾内海流、余流的空间结构和

变化规律的认识尚不明晰。声学多普勒流速剖面仪 (Acoustic Doppler Current Profiler, ADCP) 的普及和应用对获得高精度的海流资料提供了便利(汪亚平等, 1999; Wang Y H *et al*, 2003; 杨锦坤等, 2009)。ADCP 对海流流场不产生扰动和影响, 具有传统仪器无可比拟的观测精度。同时 ADCP 观测也具有观测时间间隔短, 观测层次精细的优势, 可以提供时空上连续的海流观测序列, 从而对海流的潮流和余流精细结构有一个较为完整和细致的认识。本文利用走航观测获得的沙埕港湾口高精度断面资料对沙埕港湾口断面的潮流、余流的结构和性质以及潮通量等进行分析, 以提高对沙埕港湾口潮流及其水体交换特征的认识, 同时在 ADCP 走航资料的数据处理和应用方面进行有益探索。

## 1 数据及处理过程

本文使用的资料来自中国海洋大学于 2006 年 4 月 28 日 10:04—2006 年 4 月 29 日 11:30 在福建沙埕港湾口进行的 25h 连续走航观测(图 1)。走航路线为

\*福建主要海湾海洋环境与数模研究, FJ908-01-01-scg 号; 国家自然科学基金项目, 41006004 号、41276013 号、41206013 号; 高等学校博士学科点专项科研基金, 2011013213000 号; 国家海洋局青年科学基金重点项目, 2012202 号。万凯, 博士研究生, E-mail: wankaig@gmail.com

通讯作者: 鲍献文, 博士生导师, 教授, E-mail: xwbao@ouc.edu.cn

收稿日期: 2013-03-15, 收修改稿日期: 2013-11-28

东北-西南方向,基本与沙埕港湾口主轴方向垂直。观测使用的仪器为美国 Sontek 公司 Acoustic Doppler Profiler(ADP)-1000K,观测垂直方向分为 18 个测层,

层厚 1m,观测间隔 30s (GEOTECH ENVIRONMENTAL EQUIPMENT, 2001)。仪器的具体参数和详细配置见表 1。

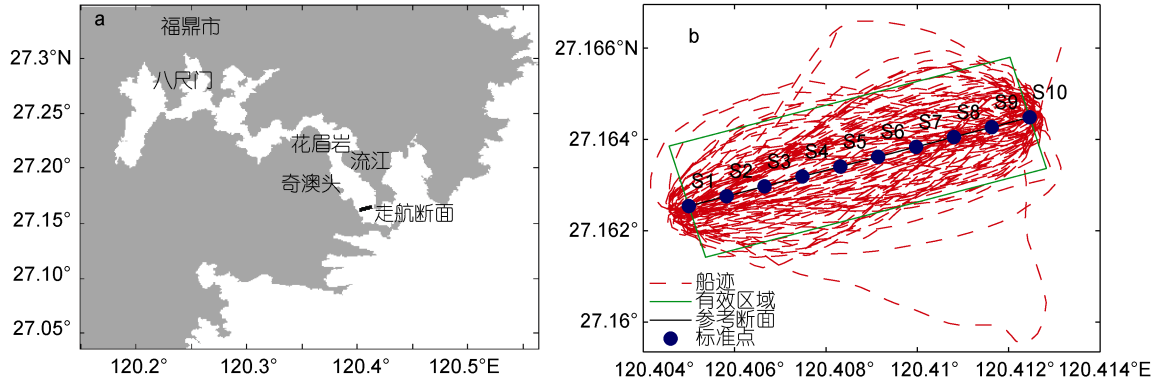


图 1 沙埕港地理特征及走航断面位置(a, 黑色线)和走航 ADCP 轨迹(b)

Fig.1 The geographical features of Shachenggang Channel, position of the underway transaction (a) and trajectory of the shipboard ADCP

表 1 ADP-1000K 参数及配置

Tab.1 Parameters and configuration of ADP-1000K

盲区	最大观测深度	最小观测深度	建议层厚
0.5m	25—40m	>1.3m	0.4—2m
观测层数	首层深度	探头入水深度	层厚
18	2.5m	1.5m	1m

对于走航观测而言,最理想的航迹是一条直线,观测船在此直线上做往复运动,但由于船只在航行时受海流、航速等因素的影响,实际的航迹会有所偏差,因此观测获得的数据序列会随时间和空间变化。为保证船只尽量沿着湾口断面直线航行,消除空间位置差异对数据的影响,本次走航观测在断面两端设置了浮标以辅助航行,并且考虑到观测的需要,走航时船速基本保持稳定,约 1.7m/s;沙埕港湾口的宽度约为 1.2km,断面单次走航的时间约为 12min,从平均来看,每个观测点 2 次观测的时间间隔应该为 12min 左右,但是由于船的航迹的漂移、船体掉头等原因,不能保证观测样本之间的时间均匀性。

首先对观测数据进行质量控制,采用用 ADP 自带底跟踪与 Difference Global Positioning System (DGPS)相结合的方法订正船速后求出海流速度,剔除观测中的观测异常值和完好率较差的数据,同时对所有剔除的数据使用完好的数据进行内插补齐。其次处理经质量控制的数据,剔除空间上明显偏离湾口断面的数据后,对有效数据进一步处理和分析。

为了分析简便,本文忽略走航船只空间位置的变化,把本次走航的空间维度简化为 1 维,同时把整个走航过程分为若干个航段,认为从断面的一个端点到对面端点的单次走航为 1 个航段。对于所有的数据可以建立如下关系  $v=v(x, t)$ , 其中  $v$  表示速度矢量,  $x$  表示观测点的空间位置,  $t$  表示观测的时间。做如下假设:对于任意航段的空间上的任意点  $x$  存在位于  $x$  两侧的相邻点  $x_1, x_2$ , 且  $x_1, x_2$  满足  $(x_1 < x < x_2)$ , 如果  $x_1, x_2$  处的海流分量值已知,就可以根据空间位置使用线性内插的方法获得  $x$  处的值。从船速和数据时间间隔两方面来分析上述假设的合理性,平均船速为 1.7m/s,数据时间间隔为 30s,也就是说相邻两个数据之间的空间位置相差大约为 51m,在海流流场随空间变化比较平缓的前提下,上述假设是成立的。也就是说,对于走航获得的任意航段的资料,可以认为其在空间上是连续的,取断面上的任意点  $x_0$  在每个航段上观测的值即可以构成 1 个不等时间间隔的观测序列。再假设在 1 个航段耗时 12min 的时间内,任意点  $x_0$  的空间位置变化是较为缓慢的,那么对上述不等时间间隔的观测序列在时间上进行差值,就可以获得等时间间隔的观测序列。为保证合理性,选择一个航段耗时的时间 12min 为等时间间隔,这样就获得了一个时间间隔为 12min 的观测序列。值得特别指出的是,由于观测资料所限,在此忽略了  $x_0$  点附近水位变化的影响,认为在整个观测时间范围内任意航段相同层次的数据近似位于同一深度上。

在上述假设下,对走航船只航迹使用最小二乘法拟合以确定走航断面,同时为保证数据的质量舍去了主轴端点附近走航开始和结束的少量数据,以消除走航船只掉头导致船体姿态变化对观测数据的影响,这样获得了一个沿主轴方向的断面,称之为参考断面。为了分析简便,在参考断面上取相同空间间隔的10个点(记为S1—S10,具体位置见图1b),作为走航数据转换为等时间间隔的观测序列的空间基准点,称之为标准点。数据处理的结果是获得了在各个标准点上的等间隔海流观测序列,本文后续的分析就是基于这10个标准点所获得的海流观测序列进行的。

## 2 分析和结果

### 2.1 海流时间序列及潮流椭圆

对10个标准点的海流时间序列进行分析,由于10个标准点空间的距离较近,潮流变化特征较为相似,受篇幅的限制,取S5点作为代表点。S5点位于沙埕港湾口的中心位置,流场特征具有很好的代表性,S5站的潮流时间序列能够代表整个断面的情况。首先做出海流时间变化序列图(图2),并结合断面附近的潮位观测进行潮汐潮流分析。从潮位数据来看,2006年4月28日10时—2006年4月29日11时,由

于观测开始时为高潮,所以观测序列出现了2次完整的低潮(28日16时、29日4时),且相邻2个波谷的时间间隔约为12.5h,为十分明显的正规半日潮特征。涨潮时约为6h,潮流沿西北方向进入沙埕港,平均潮流流向约为 $300^\circ$ ,最大涨潮流流速约为 $1\text{m/s}$ 。落潮时同样约为6h,海流沿东南方向推出沙埕港,平均流向约为 $150^\circ$ ,最大落潮流流速同样为 $1\text{m/s}$ 。涨落潮流流速比较接近,涨落潮流流向基本与湾口水道主轴方向平行,从东西分量( $U$ )和南北分量( $V$ )上来看,湾口潮流 $UV$ 两方向分量较为接近, $V$ 方向略大,最大可达 $0.9\text{m/s}$ ,发生在落潮时刻, $U$ 方向分量略小,可达 $0.7\text{m/s}$ ,发生在涨潮时。潮流 $UV$ 分量的时间序列也有明显的2次涨潮、落潮现象,表现出典型的正规半日潮流特征。涨潮流(28日19时)、落潮流(28日13时)出现在涨潮落潮时段的中间时刻,而高低潮时海流流速很小,这符合半封闭海湾潮波的典型特点,即最大流速出现在半潮面时刻而高低潮时流速最小。从垂直方向看,海流垂向分布均匀,除涨急、落急时中上层流速比底层流速略大外,其他时刻几乎表现为垂向分布均匀的流动。转流时间方面,涨潮时中下层最先转流,但提前的时间有限,约为30min,落潮时表层最先转流,30min后中下层开始落潮。总体来说转流各层次是基本同步的。

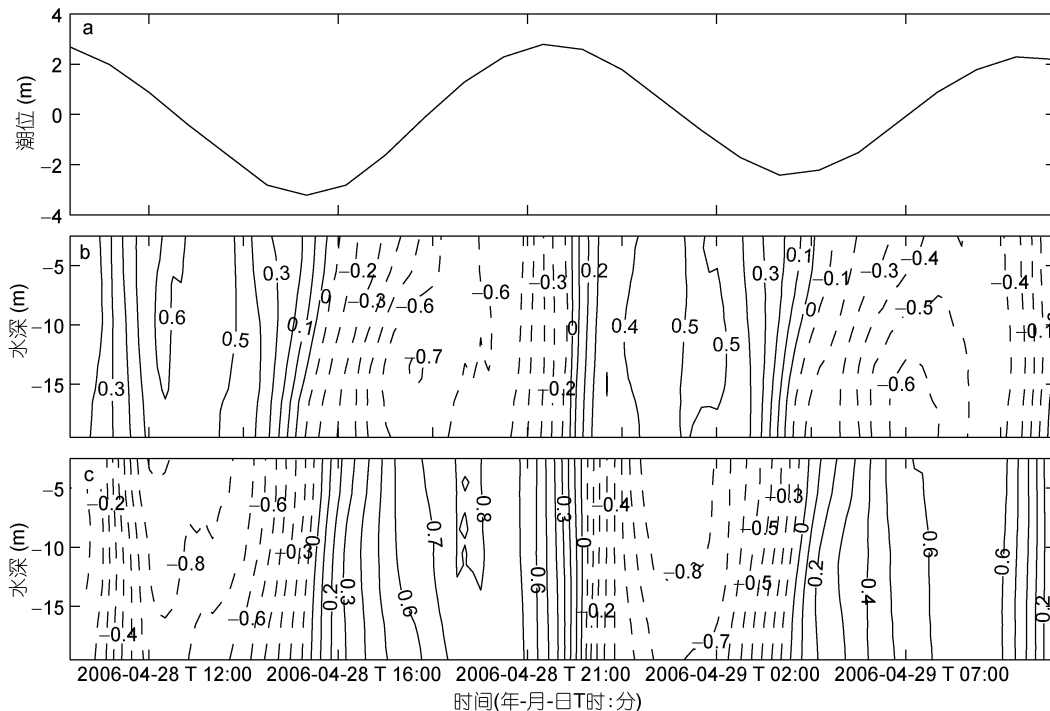


图2 潮位(a)以及S5站 $U$ (m/s, b)和 $V$ (m/s, c)的时间序列分布

Fig.2 The time series of tide level (a), the east-west component  $U$  ( m/s, b) and the north-south component  $V$  ( m/s, c) at S5 station  
实线: 流速分量为正( $U$  向东,  $V$  向北); 虚线: 流速分量为负( $U$  向西,  $V$  向南); 黑色粗线: 流速为零

调和和分析是研究不同频率分潮的贡献和分布特征的有效方法,利用普遍使用的  $t\_tide$ (Pawlowicz *et al.*, 2002)潮汐分析程序对上述 25h 等时间间隔的观测序列进行调和和分析。根据瑞利准则( $\Delta f=1/T$ , 其中,  $\Delta f$  为频率的分辨率,  $T$  为采样时长), 25h 的时间观测长度并不能够分离同一潮族的分潮(比如关注的  $O_1$  和  $K_1$ 、 $M_2$  和  $S_2$ ); 为了对不同分潮的贡献有更清楚的认识, 基于沙埕港湾口附近的历史数据, 引入上述分潮的差比关系来分离同一潮族的不同分潮, 最终选定  $O_1$ 、 $K_1$ 、 $M_2$ 、 $S_2$ 、 $M_3$ 、 $M_4$  共 6 个分潮做出对应分潮的潮流椭圆, 如图 3 所示。

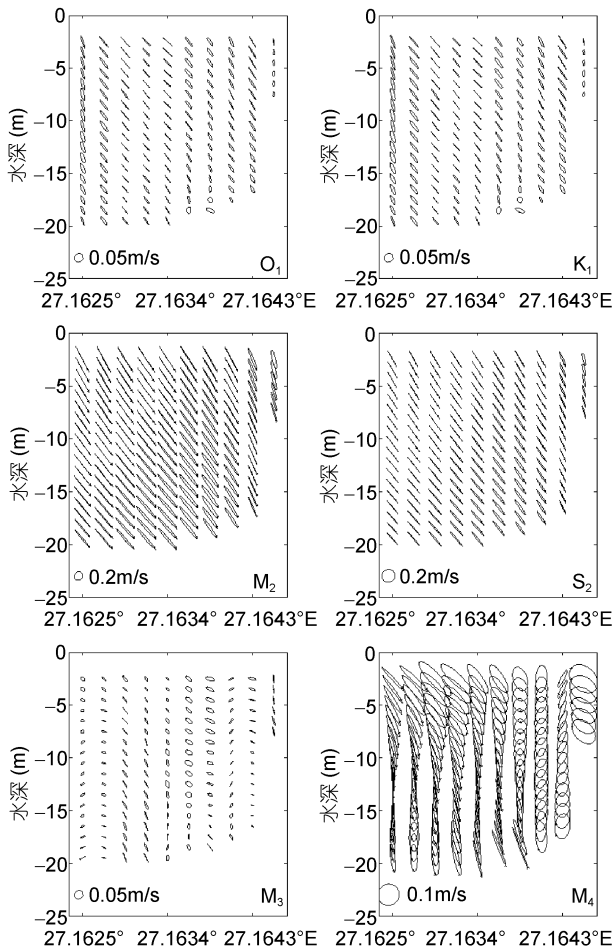


图3 沙埕港湾口水道潮流椭圆垂向分布

Fig.3 The vertical distribution of the tidal current ellipse in the Shachenggang Channel

从沙埕港湾口水道潮流椭圆的情况来看, 振幅最为显著的为  $M_2$  分潮, 其值远大于其他分潮, 沿参考断面  $M_2$  分潮的潮流椭圆长轴最大可达 0.72m/s, 出现在湾口中部表层区域,  $M_2$  分潮长轴的最小值为 0.44m/s, 出现在参考断面最北侧的底层区域。从空间整体分

布来看,  $M_2$  分潮长轴值最大位于沙埕港湾口中部, 从中部至两侧逐渐减小, 且南侧值衰减较北侧小, 也就是说南侧  $M_2$  长轴值大于北侧。垂直方向  $M_2$  分潮的长轴值在参考断面北侧表现为表底一致, 而在断面的中部和南侧则表现为底层值略小, 中上层区域值略大的分层结构。推测造成这种现象的原因是底摩擦对潮流的影响, 北侧水深较南侧浅, 底摩擦对潮流的影响较为显著, 故而  $M_2$  分潮长轴值较小而断面中部和南部由于水深较深, 潮流受底摩擦的影响相对较小而值较大。同理可推测参考断面中部和南侧分层的现象也是受底摩擦影响, 由于北侧底摩擦影响更显著故而北侧  $M_2$  长轴值垂直均匀分布。 $M_2$  分潮潮流椭圆的椭圆率大都在 0.05 以下, 表现出很强的往复流的特点, 在沙埕港断面中部的中上层椭圆率在 0.1 左右, 旋转性较强, 这也符合狭长水道以往复流为主, 水道中部由于受岸线影响较小而旋转性强的特征。 $M_2$  分潮主轴倾角主要为  $100^\circ-130^\circ$ , 基本沿沙埕港水道主轴方向, 倾角由北侧向南侧逐渐增大, 最大值出现在南侧表层区域, 潮流椭圆的倾角变化与沙埕港湾口的地理特征是一致的。此外, 和狭长水道的特征不同, 参考断面北侧 S10 点  $M_2$  分潮表现出了较强的旋转性, 椭圆率可达 0.2, 根据走航现场的实际情况推测, 造成此现象的原因是走航参考断面位于沙埕港北侧岸线的转折处。西北-东南走向的北侧岸线进入沙埕港后迅速折为东北-西南方向, 观测获得的海流资料在转折处受岸线约束而流向变化复杂, 表现出较强的旋转性。

振幅仅次于  $M_2$  分潮的是  $S_2$  分潮, 但是其长轴量值要比  $M_2$  小很多, 为 0.2—0.32m/s, 约为  $M_2$  分潮的一半,  $S_2$  分潮的空间分布特征和旋转性都和  $M_2$  分潮非常接近, 其北侧 S10 站处海流的旋转性也较大。接下来是代表浅水分潮的  $M_4$ (走航资料观测时间较短给出的  $M_4$  分潮实际上包含整个 1/4 日潮族)和代表的 1/3 日分潮的  $M_3$  分潮, 其潮流椭圆长轴量值为 0.08—0.2m/s, 空间分布特征和旋转性也与  $M_2$  分潮类似, 但是旋转性更强, 椭圆率最大可达 0.3。再次为全日潮族的  $O_1$  和  $S_1$  分潮, 其振幅最为微弱, 为 0.01—0.09m/s, 从图上可以看到其倾角与  $M_2$  分潮类似, 基本沿沙埕港湾口水道主轴方向, 但是其旋转性比半日分潮更强。

## 2.2 余流

鲍献文等(2008)的研究结果表明沙埕港水道海流以潮流为主, 且半日分潮对潮流贡献最大, 其他分

潮贡献较小,  $M_2$  分潮周期为 12.42h,  $S_2$  分潮为 12h, 如果对 25h 走航资料取平均, 可以滤去大部分潮流信号, 获得沙垵港湾口的余流空间结构, 结果如图 4 所示。

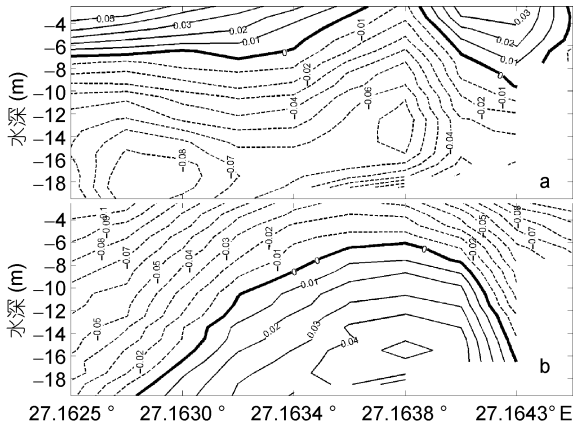


图 4 沙垵港水道断面余流结构  $U$ (m/s, a)和  $V$ (m/s, b)

Fig.4 East-west component  $U$  (m/s, a) and the north-south component  $V$  (m/s, b) of residual current in the transection of the Shachenggang Channel

实线: 流速分量为正( $U$ 向东,  $V$ 向北); 虚线: 流速分量为负( $U$ 向西,  $V$ 向南); 黑色粗线: 流速为零

对于沙垵港湾口断面余流东分量  $U$ , 可以清楚地看到湾口断面  $U$  分量呈分层分布, 入流为负值, 基本表现为从整个中下层向西流入沙垵港, 在水道中间偏北处( $27.1638^\circ\text{N}$ )入流的范围最大可直达表层, 形成一个突出的脊从而将表层出流一分为二。入流流速随水深变深而增加, 其核心位于  $27.1626^\circ\text{N}$ — $27.1638^\circ\text{N}$  的下层区域, 流速为  $0.06\text{m/s}$  以上, 最大值为  $0.08\text{m/s}$ , 位于断面南侧; 流核在北侧上翘至  $15\text{m}$  处, 形成的脊状突起直至表层, 中心流速约为  $0.07\text{m/s}$ , 表层入流则十分微弱, 约为  $0.01\text{m/s}$ 。总体而言, 入流流速水平方向变化较为平缓, 这说明海水进入沙垵港水道时比较均匀, 没有明显的强侧和弱侧之分。而水道上层  $U$  分量基本为正值, 向东流出湾口, 出流南侧流幅较宽但影响深度较浅, 约为  $7\text{m}$  左右, 水平方向变化较为平缓, 在  $27.1634^\circ\text{N}$  处开始上翘; 东向出流北侧流幅较窄但深度范围可达  $10\text{m}$ , 在水平方向上 2 侧变化都较平缓, 流速等值线微微向脊的方向翘起。对于流速量值方面, 东向出流流速最大值为  $0.05\text{m/s}$ , 位于湾口断面南侧表层区域, 北侧出流最大值为  $0.03\text{m/s}$ , 同样位于表层区域, 出流从表向下呈逐渐减弱的趋势。对于东向出流而言, 南侧的流速和影响面积大于北侧, 这说明海水主要从南侧流出沙垵港。推测此现象的原因为春季东风的影响,

由于春季风力较弱影响深度有限, 故中下层的入流没有此现象。

对于  $V$  分量, 同样有比较明显的分层结构, 入流为正值且集中在  $26.1628^\circ\text{N}$ — $26.1643^\circ\text{N}$  的中下层区域, 等值线呈拱形, 在北侧边界附近等值线较为密集, 入流中心位于  $26.1638^\circ\text{N}$ 、深度  $15\text{m}$  水深附近区域, 最大流速为  $0.05\text{m/s}$ , 中心平均流速约为  $0.04\text{m/s}$ 。南向出流为负值, 主要位于中上层区域, 在湾口断面南侧出流影响的垂向范围最大, 可直达底部, 出流垂向范围最小位于入流流核上部  $7\text{m}$  水深附近。出流流速较入流大, 最大位于湾口断面两侧的表层, 为  $0.1\text{m/s}$ , 断面中部表层流速较弱为  $0.04\text{m/s}$ , 垂直方向上流速基本呈从上到下逐渐减小的趋势。出流与  $U$  方向表层出流类似, 也有南侧出流强于北侧特点。

总体来说, 在沙垵港湾口水道断面, 东南向流出沙垵港的海流主要集中在水道上层, 约为  $10\text{m}$  以浅的区域, 而且具有较为明显的出流偏向南侧的现象, 入流的位置主要位于水道的中下层区域, 整个湾口断面呈“底进表出”的结构。

为了更直观的了解沙垵港湾口断面的余流空间分布特征, 本文给出了沿参考断面的余流矢量的空间分布图(图 5)。可以清楚地看到水道上层基本为东南向的出流, 且出流流速和垂向深度自水道两侧向水道中心递减, 断面中心表层区域入流几乎为 0。除  $S10$  点附近受岸线影响出流方向接近  $180^\circ$  外, 其余区域绝大部分出流的方向为  $130^\circ$  左右, 基本沿沙垵港湾口水道的主轴方向。至于中下层入流情况则略为复杂, 位于断面中部的大部分区域为西北向的入流, 入流的方向大约为  $300^\circ$ , 基本与出流的方向相反, 断面北侧  $S9$  中下层区域受岸线影响入流方向约为  $270^\circ$ , 北向余流分量近乎消失。断面南侧  $S1$ — $S3$  站入流方向从  $235^\circ$  逐渐增大至  $270^\circ$ , 结合沙垵港湾口南侧的岸线可以发现湾口南侧岸线有 1 个指向西南方的小凹陷, 故而造成入流略向南偏。整个断面余流矢量随深度顺时针旋转, 转流的深度自南向北逐渐变浅,  $27.1638^\circ\text{N}$  表层出流近乎消失, 后转流深度开始增加, 于  $S9$  站附近位置达到最大值, 最大转流深度为  $12\text{m}$ 。  $S10$  站则因受水深较浅和北侧岸线的影响, 余流矢量不随深度旋转, 全深度表现为偏南向流。

### 2.3 纳潮量

海湾纳潮量是半封闭海湾的主要水文参数, 是衡量海湾与外海进行水体和物质交换能力的重要参考, 反映了海湾的自净能力。对于海湾纳潮量的计算,

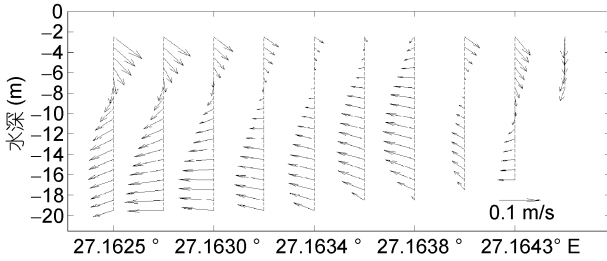


图5 湾口水道断面余流垂向矢量图

Fig.5 The vertical vector of residual currents along transection

较为传统的方法是根据公式  $T = \frac{1}{2}(S_L + S_H)H$  计算, 其中  $T$  为纳潮量,  $S_H$  和  $S_L$  分别为高潮时和低潮时海湾水域面积,  $H$  为平均潮差。胡建宇(1998)根据罗源湾的具体特点, 对上述公式进行改良以考虑湾内滩涂对纳潮量计算的影响, 使用公式  $T = (S_1 + \frac{1}{2}S_2)H$  来计算纳潮量, 其中  $H$  为平均潮差,  $S_1$  为海域面积,  $S_2$  为滩涂面积。但是多数海湾都存在湾内水深不能同时达到高潮或低潮的问题, 传统的纳潮量计算方法在确定高低潮海域面积时会产生较大误差, 以至于影响纳潮量的计算。随着 ADCP 的广泛应用, 科学家开始直接使用 ADCP 获得的潮流断面资料计算海湾纳潮量(乔贵宇等, 2009; 熊学军等, 2008)。本节使用上述获得的 25h 潮流时间序列, 采用公式(1)计算通过沙埕港湾口断面的累计水体体积的时间变化序列, 结果如图 6 所示。

$$T = \int_{t_s}^{t_E} \int_{z=Z_b}^{z=0} \int_{x=0}^{x=X_{all}} \int_{y=0}^{y=Y_{all}} (u \cdot dx + v \cdot dy) \cdot dz \cdot dt$$

其中  $t_s$  和  $t_E$  分别代表观测的起始和结束时间,  $dt$  为观测时间间隔, 这里取走航一次的时间 12min;  $Z_b$  表示观测断面的深度,  $dz$  为垂向单元的厚度, 这里取为测层厚度 1m,  $X_{all}$  和  $Y_{all}$  分别为观测断面沿东西和南北方向的长度。由于 ADCP 的自身特性, 获得的海流序列存在一定程度的表层和底层盲区; 而受岸线和水深的影响, 走航路线很难涵盖整个湾口断面, 所以对于走航获得的潮流序列, 通常会存在底层、表层和断面两侧的盲区。本次计算考虑了表层和底层的盲区的影响, 使用相近层次的数据进行近似处理, 由于缺少相应的观测和历史参考资料, 本次计算未考虑断面两侧盲区则。

从图 6 可以看出, 2006 年 4 月 28 日 16 时—22 时 50 分, 进入沙埕港的海水体积为  $1.63 \times 10^8 \text{m}^3$ , 28 日 22 时 50 分—次日 4 时 15 分, 流出沙埕港的海水体积为  $1.57 \times 10^8 \text{m}^3$ , 而 28 日 10 时—16 时, 流出沙埕港的海

水体积为  $1.71 \times 10^8 \text{m}^3$ , 为本次观测时间段内最大值。走航观测开始时(农历四月初一), 沙埕港海域正处于朔望大潮, 故而通过断面海流计算所得的纳潮量表现出随时间减小的现象。

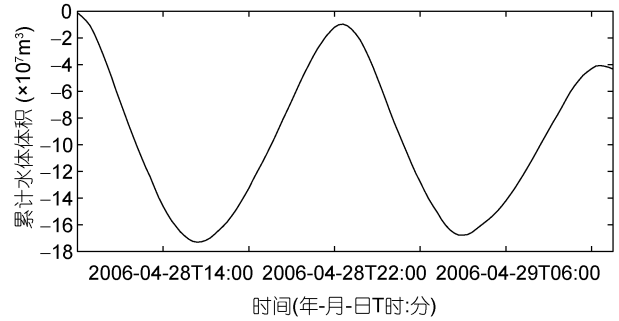


图6 沿断面积分的累计水体体积

Fig.6 Cumulative tidal flux integrated along transection

切线斜率为正值: 流入湾内

### 3 结论

本文基于沿沙埕港湾口断面走航获得的 25h 潮流序列, 构建了 S1—S10 共 10 个标准点的等时间间隔连续海流数据。基于上述 10 个站点的海流序列对沙埕港湾口断面的潮流特征, 余流结构和纳潮量进行了分析, 结论如下:

1) 沙埕港湾口水道海流主要以潮流为主, 潮流的类型为正规半日潮流, 潮流的方向基本沿湾口水道的主轴方向。结合附近的水位观测进行潮流的分析对比可知, 涨、落潮历时均为 6h 左右, 最大涨、落潮流出现在半潮面附近, 高、低潮时潮流的流速最小。涨、落潮顺序各层次基本一致, 涨潮时中下层提前约 30min 转流, 落潮时表层提前 30min 转流。

2) 根据对各标准点海流数据的调和和分析结果, 沙埕港湾口水道潮流表现为十分明显的半日潮流, 主太阴半日分潮流  $M_2$  振幅最为显著, 最大分潮流可达 0.73m/s, 主太阳半日分潮流  $S_2$  振幅次之, 约为  $M_2$  振幅的 1/2 略少。 $M_2$  分潮流最大值位于沙埕港湾口水道断面中部表层区域, 沿断面向两侧减小。整个断面  $M_2$  分潮流表现出较强的往复性, 倾角为  $100^\circ$ — $130^\circ$ , 基本沿水道主轴方向, 只在靠近北侧岸线的 S10 点附近表现出略强的旋转性。 $S_2$  分潮流的空间分布和  $M_2$  分潮流十分类似, 其他的分潮流振幅很小但表现出更强的旋转性。

3) 观测获得的沙埕港湾口水道余流在垂向呈较为明显的 2 层结构, 上层基本以东南向出流为主, 且

出流流速和垂向深度自水道两侧向水道中心递减, 断面中心表层区域入流几乎为零, 出流流速最大约为 0.1m/s, 位于水道南侧; 中下层入流的情况较为复杂, 大部分区域为西北向入流, 南侧区域受岸线影响入流方向在 235°—270°左右; 余流矢量大都随深度顺时针旋转, S10 站附近受水深较浅和岸线的影响, 余流方向接近 180°。

4) 对沙埕港纳潮量的估计表明, 通过走航观测断面进入沙埕港的潮通量约为  $1.63 \times 10^8 \text{m}^3$ , 因为计算未考虑两侧盲区部分对纳潮量的贡献, 故而估算的纳潮量应比真实的纳潮量小。

### 参 考 文 献

- 乔贯宇, 高大鲁, 华 锋等, 2009. 实测数据和数值模拟相结合的办法计算海湾纳潮量. 港工技术, 46(4): 1—5
- 李克先, 1995. 沙埕港台风暴潮极值预报的统计方法. 水利科技, 3: 50—52
- 李克先, 陈新加, 2001. 沙埕港台风暴潮特征分析. 水文, S1: 60—61
- 杨锦坤, 相文玺, 韦广昊等, 2009. 走航 ADCP 数据处理与质量控制方法研究. 海洋通报, 28(6): 101—105
- 汪亚平, 高 抒, 1999. 用 ADCP 进行走航式悬沙浓度测量的初步研究. 海洋与湖沼, 30(6): 758—763
- 胡建宇, 1998. 罗源湾海水与外海水的交换研究. 海洋环境科学, 17(3): 51—54
- 栾曙光, 李 可, 桑宝峰, 2012. 沙埕港超强台风“桑美”灾害成因的数值模拟分析. 大连海洋大学学报, 1: 69—72
- 鲍献文, 乔璐璐, 于华明, 2008. 福建省海湾围填海规划水动力影响评价. 北京: 科学出版社, 10—11
- 熊学军, 胡筱敏, 王冠琳等, 2008. 半封闭海湾纳潮量的一种直接观测方法. 海洋技术, 26(4): 17—19
- Pawlowicz R, Beardsley B, Lentz S, 2002. Classical tidal harmonic analysis including error estimates in MATLAB using T\_TIDE. Computers & Geosciences, 28(8): 929—937
- Geotech Environmental Equipment, Inc, 2001. Sontek/YSI Acoustic Doppler Profiler operation manual
- Wang Y H, Jan S, Wang D P, 2003. Transports and tidal current estimates in the Taiwan Strait from shipboard ADCP observations (1999—2001). Estuarine, Coastal and Shelf Science, 57(1): 193—199

## TIDAL AND RESIDUAL CURRENT CHARACTERISTICS AT MOUTH OF SHANGCHENGGANG CHANNEL

WAN Kai<sup>1</sup>, BAO Xian-Wen<sup>1,2</sup>, YAO Zhi-Gang<sup>1,2</sup>, WAN Xiu-Quan<sup>1,2</sup>, XIA Ying-Ying<sup>1</sup>

(1. College of Physical and Environmental Oceanography, Ocean University of China, Qingdao 266100, China;

2. Physical Oceanography Laboratory, Ocean University of China, Qingdao 266100, China)

**Abstract** Based on shipboard ADCP measurements at the mouth of the Shachenggang Channel in South Fujian, China ( $120^{\circ}10.74'—120^{\circ}26.57'E$ ;  $27^{\circ}08.37'—27^{\circ}09.07'N$ ; mostly 15m deep and max. 45m deep), the time series of tidal current at 10 sites along transection were constructed. The hydrological factors such as tidal current, residual current, and tidal transport are analyzed to understand the tidal and residual current characteristics in this region. The tidal currents are identified as regular semidiurnal tidal flows. Tidal flood currents appear first in lower layers ~30 min ahead to upper layers currents in flood phase, while ebb currents first show up in upper layers about 30 min ahead in ebb phase. The tidal currents in the channel are alternating currents, in which  $M_2$  and  $S_2$  constituents have relatively stronger speed and mainly flow along the principal axis of the channel. A two-layered structure is found in residual currents at the transection, with southeastward outflows centered at the south section in the upper 10m and northwestward inflows centered at the middle section blow the 10m depth. The approximate tidal transports between the channel and open sea through transection are  $1.63 \times 10^8 \text{m}^3$ .

**Key words** tidal currents; residual current; tidal transport; shipboard ADCP