

胶州湾湾口夏季海流时空分布特征*

蔡忠亚¹, 刘哲^{1**}, 陈子煜¹, 郭新宇², 高会旺¹

(1. 中国海洋大学海洋环境与生态教育部重点实验室, 山东 青岛 266100;

2. 日本爱媛大学沿岸环境科学研究中心, 日本 松山 7908577)

摘要: 基于2009年夏季中潮时胶州湾湾口薛家岛-团岛断面的走航 ADCP 观测数据, 分析了胶州湾湾口断面海流时空分布特征及影响因素。结果表明: 湾口处海水运动以潮流为主, 总体表现为驻波性质, 强流发生在涨、落潮中间时刻。受岸线诱导, 湾口海流在涨潮(落潮)时呈西北(东南)向, 流速在断面上主要表现为南北方向上的变化。平流项引起的“潮流调整”效应使得断面北侧西向海流和南侧东向海流被加强, 造成海流东西分量在水平方向上存在不对称性现象, 即南北两侧海水运动涨、落潮不同步, 欧拉余流呈现“北进南出”的形态。同时, 东风分量会使得断面中心区域产生“表进底出”形态, 而南北方向欧拉余流结构受风影响较小。

关键词: 潮流; 欧拉余流; 潮流调整; 风; 胶州湾湾口

中图分类号: P731.21

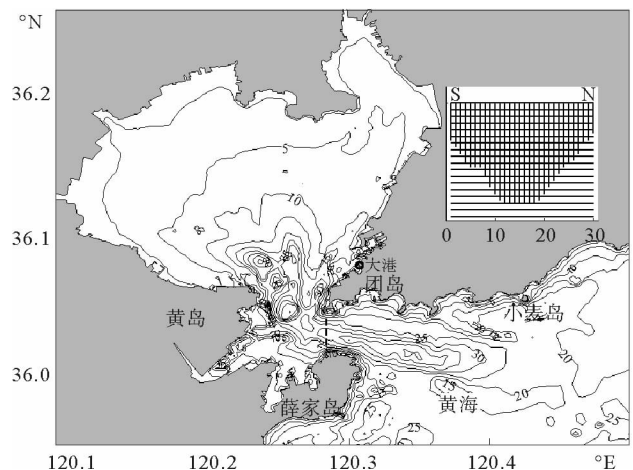
文献标志码: A

文章编号: 1672-5174(2014)04-086-07

胶州湾位于黄海之滨, 山东半岛的南岸, 以团岛头(36°02'36"N, 120°16'49"E)与薛家岛脚子石(36°00'53"N, 120°17'30"E)连线为界, 与黄海相通(见图1)。胶州湾是潮运动占优的海湾, 其中 M₂ 分潮对湾内动能的贡献超过 80%^[1], 为典型的半日潮海湾。湾口位于团岛与薛家岛之间, 口门最窄处为 3.1 km, 因此胶州湾具有很强的封闭性, 与外海的物质交换能力差。作为海湾与黄海相连接的通道, 湾口是胶州湾与外海进行水交换的关键界面。因此, 定量认识湾口流场的时空分布特征和控制机制, 无疑有助于深入理解胶州湾水交换过程和物理自净能力。

以往的研究中对胶州湾水动力基本特征和水交换机制已经有一定基础^[2-12]。特别是自 21 世纪初以来, 走航式声学多普勒剖面流速仪(Acoustic Doppler Current Profiler, 简称 ADCP)开始应用于研究胶州湾湾口流速分布特征。乔贯宇等使用湾口 ADCP 走航资料计算了胶州湾纳潮量^[13], 卢燕等使用 ADCP 资料分析了湾口处团岛-薛家岛断面大、小潮时期的欧拉余流空间分布特征^[14]。这些研究为认识胶州湾湾口水交换过程奠定了基础, 但在之前研究中多侧重于欧拉余流的空间结构, 对湾口瞬时流时空分布特征的认识以及湾口断面海水运动的控制机制分析不够。

本文基于夏季中潮胶州湾湾口走航 ADCP 观测数据, 详细分析胶州湾湾口断面瞬时流和欧拉余流的时间、空间分布特征, 探讨湾口处海水运动的控制机制。



(湾口黑色虚线处为 ADCP 走航观测断面, 观测期间的逐时风速和水位资料在小麦岛气象站和大港验潮站处获得, 右上角子图为断面网格划分。Black dashed line at bay mouth shows the section of ADCP observation, hourly wind and sea level data during observation were obtained at Xiaomaidao weather station and Dagang tidal station. Partition of ADCP observation section (higher right).)

图1 胶州湾地形图

Fig. 1 Topography of Jiaozhou Bay

1 海上观测与数据处理

1.1 海上观测与数据来源

2009年8月17日13时~8月20日15时组织开展了胶州湾湾口团岛-薛家岛断面 ADCP (The SonTek/YSI Current Surveyor) 走航观测(见图1)。观测期间正值夏季中潮, 具有较好的代表性。观测中

* 基金项目: 国家海洋局公益项目(200805011)资助

收稿日期: 2013-01-07; 修订日期: 2013-04-21

作者简介: 蔡忠亚(1989-), 男, 硕士, 主要从事近海环境动力学研究。E-mail: czyloo@ouc.edu.cn

** 通讯作者: E-mail: zliu@ouc.edu.cn

ADCP 仪器固定在水下 1 m,每隔 10 s 测定 1 次海流数据,船速为 2.0~2.5 m/s,由于湾口较窄(约 3 km),每个单项航程约 20~30 min,大约每小时可以往返 1 趟,共得到 120 个左右的剖面数据。走航观测过程中 ADCP 与差分 GPS 连接,记录剖面位置,并用于对流向进行校正。

收集了观测期间大港验潮站的逐时水位数据以及小麦岛气象观测站的逐时风速数据,用于确定潮时并研究风对湾口断面海水运动的影响。由于胶州湾湾口与湾顶处潮时相差小于 10 min^[4],大港处与湾口处差异更小;小麦岛处气象站离湾口断面距离约为 13 km,两处风速风向没有显著变化,因此两处数据可以用于对湾口流速数据的分析。

1.2 数据处理

为了方便对断面走航数据进行分析,将胶州湾湾口断面南北方向上等间距划分为 30 个网格,每个网格水平间隔约为 100 m,垂向间隔为 1 m(见图 1 中子图),走航观测数据中落在每个网格中的流速进行空间平均作为该网格的流速。由于仪器自身的地理定位并不准确,导致所测流速的方向与流速实际的方向相差 1 个偏角,需要对 ADCP 数据进行校正,降低系统误差^[15-16]。参照差分 GPS 的定位数据,通过统计计算,这个角度在 8°左右。因此,将所得流场东西和南北方向的流速重新计算,得到东西和南北方向更为准确的流速。另外,由于走航观测中各个网格点观测时间不同,采用同步订正,将各点的流速内插到每次走航的中间时刻所对应流速,以保证每趟走航的各点流速在同一时间。

处理之后可以得到湾口断面每个网格点上流速的时间序列,观测中得到的海流数据包括周期运动的潮流和余流两部分。余流决定了潮际或更长时间尺度上的物质输运过程。由于,余流产生于海水运动的非线性过程,无法通过直接观测获得,需要从振荡瞬时海流中进行时间平均提取。根据所用滤潮方法不同,余流可分为拉格朗日余流和欧拉余流两种^[17-20]。前者需要根据 1 个或数个潮周期后流体微团的净位移除以相应的时间间隔来得到^[18]。鉴于本文使用的是走航数据,无法获得拉格朗日余流,只能据此得到欧拉余流,其计算方法如下:

$$[\bar{u}, \bar{v}] = \frac{1}{T} \cdot \int_0^T [u, v] dt \quad (1)$$

式中: u, v 代表断面海水流动的东西分量和南北分量; T 为 1 个太阴日的时间 25 h; \bar{u}, \bar{v} 代表东西方向和南北方向的欧拉余流。

2 流速潮内时空分布特征

由于流速为矢量,为便于讨论将流速分解为东西、

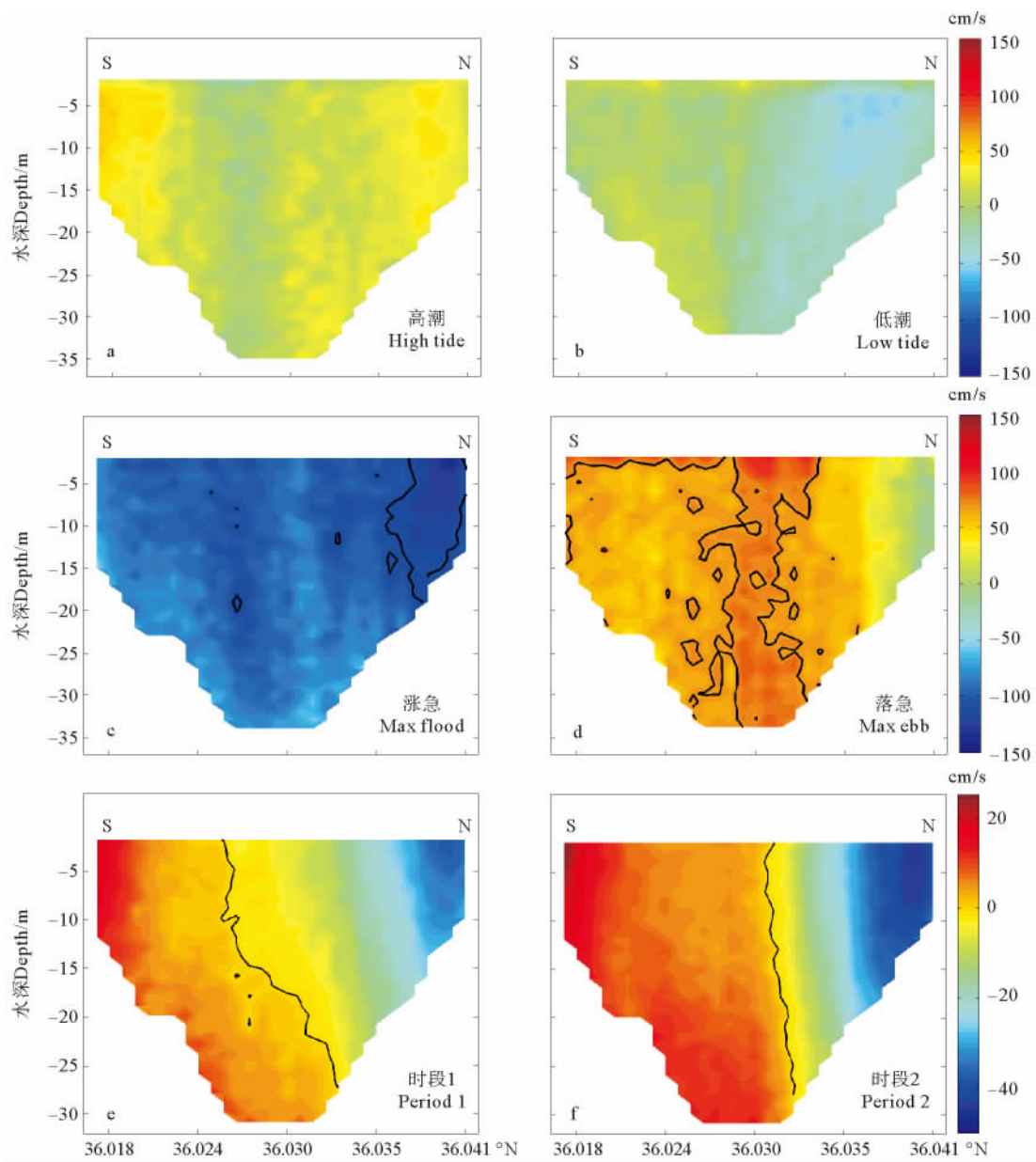
南北方向 2 个分量,加以分析。由于湾口断面呈南北向,流速的东西分量决定了进出胶州湾水体通量,故下文重点分析流速东西分量。

2.1 流速东西分量潮内时空分布特征

流速东西分量整体上表现为驻波的性质。以第一个观测的潮周期的流场为例(8月17日13时~18日4时),强流发生在涨急和落急时刻,在高潮和低潮时流场中各点流速接近于 0(见图 2a, b)。涨潮过程中,海水主要从湾口北侧西向流动进入胶州湾,北侧海水入流速度大于南侧流速,进水速度最快可达 130 cm/s 左右;在落潮过程中,海水主要从南侧东向流动流出海湾,南侧海水速度大于北侧速度,相对于断面北侧,南侧水深较深,因此落急流速(90 cm/s 左右)相对弱于涨急流速(见图 2c, d)。涨、落潮过程中流速东西分量在所测量的垂直范围内分布比较均匀,体现出潮流的正压特性,亦与之前的研究^[5]一致。

为讨论湾口断面海水运动的同步性,将断面南北两侧(各 5 个网格)和中部区域(10 个网格)流速东西分量进行空间平均得到平均流速的时间序列(见图 3)。断面北侧区域先于其他区域达到最大正向流速(落急),亦最早转向(涨潮),涨急和落急的时刻大体与中心区域相同。总体上,断面北侧的正向流动(出流)被抑制,而负向流动(入流)加强。断面南侧则与北侧正相反,最早达到最大负向流速(涨急),并最早转向(落潮)。因此,湾口断面北侧先涨潮且入流加强,南侧先落潮且出流加强。

整个走航观测过程中主要风向发生了变化,在观测前半段以东南风为主,在后半段时间中风速转向,主要表现为南风。为了分析风对湾口欧拉余流空间结构的影响,特选择两个时间段(长度均为 25 h)分别考察欧拉余流形态。第一时段为 8 月 17 日 13:30~18 日 14:30;第二时段为 8 月 19 日 06:00~8 月 20 日 07:00。在 2 个时段东西向欧拉余流均体现出“北进南出”的时空分布特征(见图 2e, f),湾口北侧欧拉余流东西向分量水平梯度大于南侧,南北两侧欧拉余流最大值均位于断面表层位置。第一时段北侧入流最大值可达 35 cm/s,而南侧流出最大值可达 20 cm/s;第二时段欧拉余流强度有所加强,入流和出流最大可达 44 和 25 cm/s。在垂直方向上 2 个时段东西向欧拉余流的空间结构存在明显区别。第一时段断面东西向欧拉余流在垂直方向上存在梯度,断面表层的入流区域(负值)向南侧延伸,底层的出流区域(正值)向北侧延伸,在中心区域表层和底层的欧拉余流方向相反,表层表现为入流而底层为出流;第二时段断面东西向欧拉余流在垂向上分布比较均匀,不存在显著的表底差异,在以往对湾口走航 ADCP 观测研究^[5,14]中东西向欧拉余流多为此结构。



(等值线正值为东向流动,c和d中黑线表示流速等于110 cm/s和70 cm/s位置。两个时间段断面东西向欧拉余流(e,f),黑线表示0值位置。每行子图共用 colorbar。Positive value represents the eastward current, and black line in c and d shows the position where velocity equals 110 cm/s and 70 cm/s, respectively. Euler residual current in E-W direction in two periods (e, f), and black line shows the position of 0. Subfigures in each row share the common colorbar.)

图2 4个典型潮时湾口断面瞬时流动东西分量(a,b,c,d)

Fig. 2 E-W component of instantaneous current at four typical tide phases (a, b, c, d)

2.2 流速南北分量潮内时空分布特征

与东西分量类似,流速南北分量在高、低潮时刻流速较弱(见图4a,b)。涨、落潮过程中,海水流动主要在断面的中心及偏北位置处。涨潮时断面海水北向流动,涨急时刻最大流速在60 cm/s左右;落潮时断面海水南向流动,落急时刻最大流速在80 cm/s左右(见图4c,d)。

在第一和第二时段,湾口南北向欧拉余流空间结构形态大体相同。整个断面南北方向上存在水平梯度,在断面北侧离岸较近区域为北向欧拉余流,在所测

范围垂向上分布比较均匀,其他区域欧拉余流为南向流动且由表至底逐渐减弱,在断面南侧底层的小部分区域存在较弱的北向欧拉余流。第二时段整体上欧拉余流强度要强于第一时段。两个时段北向欧拉余流最大约为15和20 cm/s,南向欧拉余流最大约为20和30 cm/s(见图4e,f)。

3 机制分析

湾口海水运动存在不对称现象(见图2c-f,图3),并且湾口东西向欧拉余流空间结构会随时间产生变化。

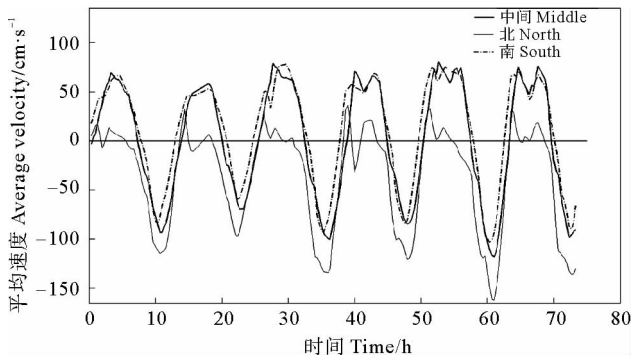


图 3 湾口断面南北两侧和中心区域东西向平均流速时间序列

Fig. 3 Time series of average velocity in E-W direction at north, south and middle part of bay mouth section

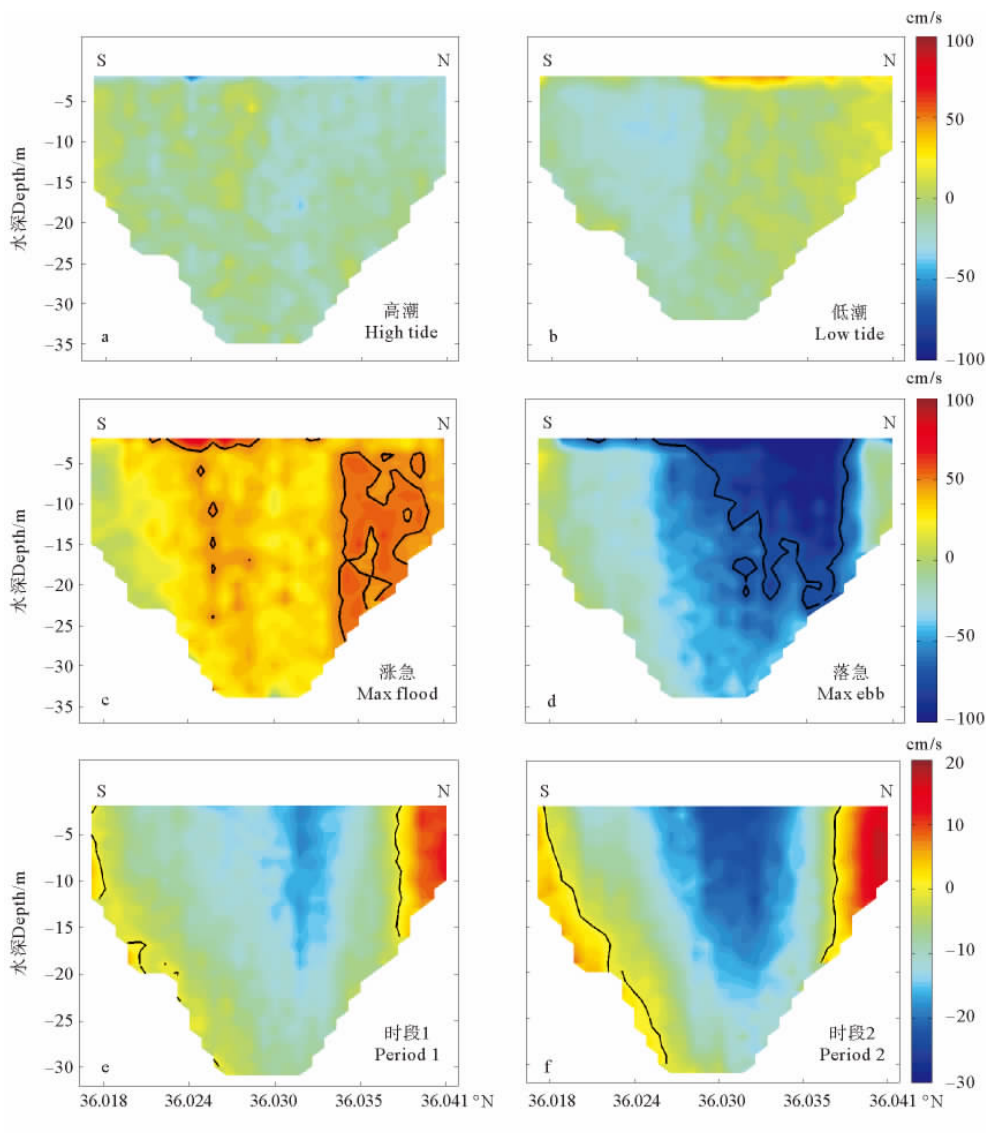
为此,对胶州湾岸线诱导,“潮流调整”及风的影响进行分析。

3.1 岸线诱导

胶州湾仅通过狭窄的东南湾口与外海相连接(见图 1),使得流速东西向分量显著强于南北向分量。受岸线诱导,在涨潮过程中,断面上海水西北方向流动才能进入海湾,落潮时海水东南方向流动才能流出。

3.2 “潮流调整”

Huijts 等^[21]指出,海水运动过程中平流项在海峡横向断面不同位置方向不同,且在整个潮周期内方向基本不发生变化,平流项所导致的该现象称之为“潮流调整”。“潮流调整”会引使断面一侧的出流加强,而另一侧入流加强,从而使沿海峡方向欧拉余流产生不对称



(等值线正值为北向流动,c和d中黑线表示流速等于50和70cm/s位置。2个时间段断面南北向欧拉余流(e,f),黑线表示0值位置。图中每行共用colorbar。Positive value represents the northward current, black line in c and d shows the position where velocity equals 50 and 70 cm/s. Euler residual current in N-S direction in two periods(e, f), black line shows the position of 0. Subfigures in each row share the common colorbar.)

图 4 4 个典型潮时湾口断面瞬时流动南北分量(a,b,c,d)

Fig. 4 N-S component of instantaneous current at four typical tide phases (a, b, c, d)

现象。本文使用其理论来分析胶州湾湾口处海水运动的不对称现象。

从 3.1 中对湾口海流东西分量的分析来看,海流在垂直方向上分布比较均匀没有显著的垂向梯度,主要表现为南北方向上的流速变化。如果将东方向作为 x 正方向,北方向作为 y 正方向,可参照 Huijts 的理论^[21]对平流项 $v \frac{\partial u}{\partial y}$ 进行分析。将该项分别在南北两侧(各 5 个网格)进行空间平均,然后考察其时间变化可以看出,在涨潮和落潮时期, $v \frac{\partial u}{\partial y}$ 在断面北侧基本上表现为正值,在南侧则为负值(见图 5)。因此在整个潮周期内,断面北侧(南侧)始终存在 x 负方向(正方向)的“潮流调整”作用力。对于湾口处海水运动东西分量来说北侧加强入流,而南侧加强出流。因此,在涨潮时北侧海水得以更早的转为西向流动,并且在涨潮过程中

海水主要从北侧进入胶州湾;而断面南侧则在落潮时则可以更早的转为东向流动,并且在落潮过程中海水主要从南侧流出胶州湾(见图 3)。这造成胶州湾外湾口海水东西向运动的不对称现象,其在欧拉余流表现为“北进南出”。

3.3 风对欧拉余流的影响

对照观测期间前后两个阶段的风向变化,可以看到在第一时段主要为东南风,而第二时段主要为南风(见图 6)。对于尺度较小的海区,表层海水的主要流向基本与风向一致,进而在海湾内产生逆风向的海面坡度,在水平梯度力作用下,在深水部分的底层生成与风应力方向相反的流动,而在浅水区域的底层则没有反向补偿流的存在,整体上流动方向与风应力方向相同^[22]。因此对于湾口断面东西向欧拉余流,在第一时段东风分量影响下,表层产生与风向相同的西向流动,断面北侧海水负值欧拉余流(入流)加强,入流区域向南侧延伸。相应的在中心深水区域底层位置产生的风生流方向与风向相反,在断面中心区域底层的正值欧拉余流(出流)加强并向断面北侧延伸,在断面中心区域表底之间产生“表进底出”的结构。而在第二时段,风向转为南风,不存在东风分量,欧拉余流东西分量在垂直方向上相对比较均匀。因此在湾口断面处,东风分量会对东西向欧拉余流有明显的影响,改变欧拉余流空间结构。对于湾口处南北方向欧拉余流,湾口的几何形态使得南风的风区较短,并且南北两侧岸线处法线流速为 0 的条件也会限制南风诱导的风生流,因此湾口南北向欧拉余流的空间结构没有发生显著变化。

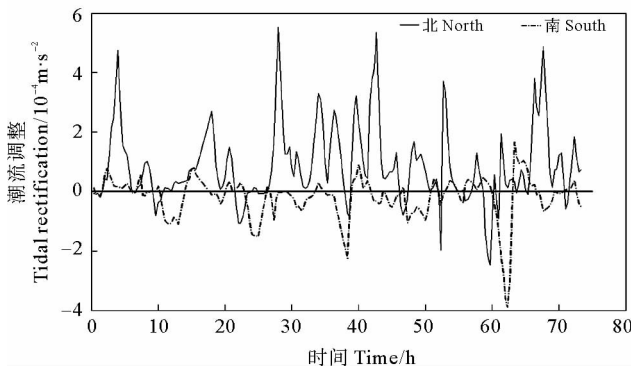


图 5 涨潮、落潮过程中断面南北两侧“潮流调整”作用
Fig. 5 Tidal rectification at north and south part of bay mouth section during flood and ebb tide

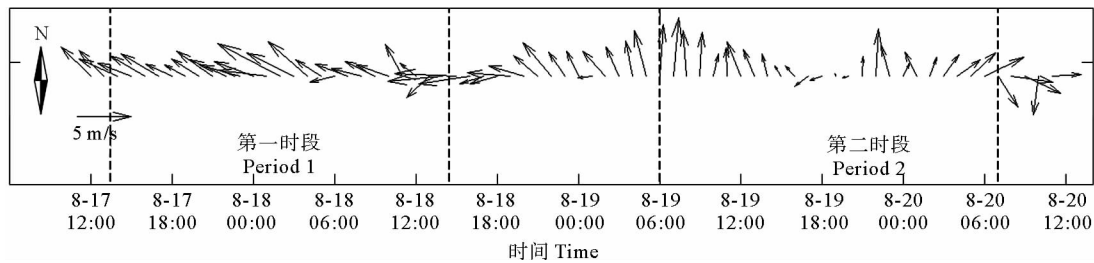


图 6 观测期间逐时风速
Fig. 6 Hourly wind data during ADCP observation

4 结语

基于 2009 年夏季中潮时的 ADCP 走航数据,分析了胶州湾湾口断面海流和余流的时空分布特征。发现平流非线性过程导致的“潮流调整”效应使断面北侧(南侧)始终存在西向(东向)作用力,造成了湾口欧拉余流“北进南出”的不对称现象。此外,夏季东南

风对欧拉余流垂向结构的影响主要体现在,东风分量扩大了断面中部的表层西向入流和底层东向出流范围。

致谢:感谢调查航次中的全体成员!此外,本文得到中国海洋大学谢立安教授的多次指导,中国海洋大学本科生褚强、宫磊参与了数据处理方面工作,在此一

并致谢。

参考文献:

- [1] 丁文兰. 潮汐和潮流[M]. // 刘瑞玉. 胶州湾生态学和生物资源. 北京: 科学出版社, 1992: 30-56.
- [2] 陈金瑞, 陈学恩, 于华明, 等. 胶州湾潮汐潮流高分辨率数值模拟研究[J]. 中国海洋大学学报: 自然科学版, 2011, 41(7/8): 29-35.
- [3] 高大鲁, 魏泽勋, 华锋. 胶州湾多分潮漫滩数值模拟研究[J]. 海洋科学进展, 2007, 25(2): 131-138.
- [4] 吕新刚, 乔方利, 夏长水. 胶州湾潮汐潮流动边界数值模拟[J]. 海洋学报, 2008, 30(4): 21-29.
- [5] 吕新刚, 赵昌, 夏长水, 等. 胶州湾水交换及湾口潮余流特征的数值研究[J]. 海洋学报, 2010, 32(2): 20-30.
- [6] 闫菊, 王海, 鲍献文. 胶州湾三维潮流及潮致余环流的数值模拟[J]. 地球科学进展, 2001, 16(2): 172-177.
- [7] 王翠, 孙英兰, 张学庆. 基于 EFDC 模型的胶州湾三维潮流数值模拟[J]. 中国海洋大学学报: 自然科学版, 2008, 38(5): 833-840.
- [8] Chen C S, Ji R B, Zheng L Y, et al. Influences of physical processes on the ecosystem in Jiaozhou Bay: A coupled physical and biological model experiment[J]. Journal of Geophysical Research, 1999, 104(C12): 29925-29949.
- [9] Liu Z, Wei H, Liu G S, et al. Simulation of water exchange in Jiaozhou Bay by average residence time approach[J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 2004, 61: 25-35.
- [10] Lou A G, Hu Y B, Kuang L, et al. Analysis and prediction of influence imposed on Jiaozhou Bay tidal currents and tidal energy of M_2 tidal system by Jiaozhou Bay reclamation[J]. Oceanic and Coastal Sea Research, 2009, 8(1): 23-29.
- [11] Wang C, Zhang X Q, Sun Y L. Numerical simulation of water exchange characteristics of the Jiaozhou Bay based on a three-dimensional lagrangian model[J]. China Ocean Engineering, 2009, 23(2): 277-290.
- [12] Shi J H, Li G X, Wang P. Anthropogenic influences on the tidal prism and water exchanges in Jiaozhou Bay[J]. Journal of Coastal Research, 2011, 27(1): 57-72.
- [13] 乔贯宇, 华锋, 范斌, 等. 基 ADCP 湾口测流的纳潮量计算[J]. 海洋科学进展, 2008, 26(3): 287-291.
- [14] 卢燕, 华锋, 魏泽勋, 等. 胶州湾湾口垂直断面余流分析初探[J]. 海洋科学进展, 2008, 26(3): 305-316.
- [15] Joyce T M. On in situ "calibration" of shipboard ADCPS [J]. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 1989, 6: 169-172.
- [16] 刁新源, 于非, 葛人峰, 等. 船载 ADCP 测量误差的因素分析和校正方法[J]. 海洋科学进展, 2006, 24(4): 552-560.
- [17] Feng S Z, Cheng R T, Xi P G. On tide-induced lagrangian residual current and residual transport; 1. Lagrangian residual current [J]. Water Resources Research, 1986, 22(12): 1623-1634.
- [18] Feng S Z, Ju L, Jiang W S. A Lagrangian mean theory on coastal sea circulation with inter-tidal transports I. Fundamentals [J]. Acta Oceanologica Sinica, 2008, 27(6): 1-16.
- [19] Jiang W S, Feng S Z. Analytical solution for the tidally induced Lagrangian residual current in a narrow bay[J]. Ocean Dynamics, 2011, 61(4): 543-558.
- [20] Liu G L, Liu Z, Gao H W, et al. Simulation of the Lagrangian tide-induced residual velocity in a tide-dominated coastal system; a case study of Jiaozhou Bay, China[J]. Ocean Dynamics, 2012, 62(10-12): 1443-1456.
- [21] Huijts K M H, Schuttelaars H M, Swart H E D, et al. Analytical study of the transverse distribution of along-channel and transverse residual flows in tidal estuaries[J]. Continental Shelf Research, 2009, 29: 89-100.
- [22] 刘桂林. 青岛胶州湾环流的特点研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2006.

Temporal and Spatial Distribution of the Summertime Sea Currents in the Jiaozhou Bay Mouth

CAI Zhong-Ya¹, LIU Zhe¹, CHEN Zi-Yu¹, GUO Yin-Yu², GAO Hui-Wang¹

(1. The Key Laboratory of Marine and Ecology, Ministry of Education, Ocean University of China, Qingdao 266100, China;

2. Center for Marine Environmental Studies, Ehime University, Matsuyama 7908577, Japan)

Abstract: Based on the ADCP data observed during moderate tide in summer 2009, the temporal and spatial distribution of the sea currents in the Jiaozhou Bay (JZB) mouth was analyzed. The results show that the currents were dominated by tidal motion. The maximum tidal current occurs at the middle time of flood and ebb tide, respectively, characterized by stationary wave. Induced by the shoreline of JZB, currents are directed northwestward (southeastward) during flood (ebb) tide, and the magnitude of the currents mainly changes in the north-south direction. The tidal rectification due to the advection process strengthens, respectively, the westward flow in north and the eastward flow in south of the bay mouth, resulting in the horizontal asymmetric phenomenon. Consequently, the tidal currents in the south and north are asynchronous, and the Euler residual current shows the pattern of “inflow from north and outflow from south”. The east-west component of the Euler residual current shows an inflow in north part and an outflow in the south. The east-west component of the surface wind affects the vertical structure of the Euler residual current at the center of JZB mouth. The eastward wind during the observed period leads to an inflow in the upper layer and outflow in bottom layer, while the structure of the north-south component of the Euler residual current is insensitive to wind direction changes.

Key words: tidal current; tidal residual current; tidal rectification; wind; Jiaozhou Bay mouth

责任编辑 庞 旻