

渤海湾潮致余流数值模拟研究

刘鑫仓¹, 刘艳玲², 迟万清^{1,3*}, 卢志勇¹, 黄炳智³

(1. 中国海洋大学 海洋地球科学学院, 山东 青岛 266100;

2. 中国海洋大学 环境科学与工程学院, 山东 青岛 266100;

3. 自然资源部 第一海洋研究所, 山东 青岛 266061)

摘要:为了研究渤海湾潮致余流,运用 Mike21 模拟了渤海湾潮流场,揭示出潮波运动的规律,得到渤海湾的潮流场,在涨潮时最大流速为 1.4 m/s,落潮时最大流速为 1.12 m/s。根据欧拉余流的定义计算了潮致欧拉余流场,其最大流速为 0.2 m/s,中值为 0.005 m/s,在渤海湾北部区域和南部东营附近存在环状结构。在渤海湾不同位置释放自由粒子,通过粒子的运移路径发现渤海湾拉格朗日余流呈现双环结构。运用欧拉方法和拉格朗日方法分析渤海湾潮致余流场,阐明了渤海湾潮致余流的精细结构,可为渤海湾营养盐、沉积物或者污染物质的长期输送以及浮游生物、鱼卵等的迁移和分布规律等提供动力学基础。

关键词:数值模拟;Mike21;潮流场;欧拉余流;拉格朗日余流

中图分类号:P731.2

文献标识码:A

文章编号:1002-3682(2019)03-0224-08

doi:10.3969/j.issn.1002-3682.2019.03.008

引用格式:LIU X C, LIU Y L, CHI W Q, et al. Numerical simulation of tide-induced residual current in the Bohai Bay[J]. Coastal Engineering, 2019,38(3): 224-231. 刘鑫仓, 刘艳玲, 迟万清, 等. 渤海湾潮致余流数值模拟研究[J]. 海岸工程, 2019,38(3): 224-231.

渤海湾位于渤海西部,属于典型的半封闭海域,其三面向陆,与河北、山东、天津两省一市相连,面积约 1.59 万 km²^[1],约占整个渤海面积的 1/7,平均水深 8 m,其潮流场为不正规半日潮流^[2]。潮流主要是由日月“引潮力”引起海水周期性的水平运动,潮流在各处是不同的,取决于潮汐性质、海底深度以及海岸的形态,由于摩擦、海底地形和边界条件等原因,潮流产生非线性现象所导致的余流称为潮致余流^[3]。因为潮致余流客观上的复杂性和人类活动的影响,直接观测需要大量的资金和时间,因此数值模拟成为一种研究潮致余流的有效手段。运用数值模拟,解决了许多重要问题,从渤海的环流变化和欧拉余流与拉格朗日余流的对比分析^[4-5]、印度曼多维河口环流特征^[6]、到象山湾的潮致余环流结构^[7]等不同地区、不同尺度的动力学方面的问题,再到阿尔法克斯湾风对水循环的影响^[8]、新加坡近海物质输送^[9]、亚得里亚海塑料碎片的漂浮运移^[10]、渤海的水交换^[11]等各方面物质运移和输送的研究中,都起到了重要作用。对于渤海湾的数值模拟,许多学者做了研究,如:王悦等^[12]利用 POM 模式采用嵌套的方法研究了渤海湾新旧地形下 M₂ 分潮潮致余流的变化和对污染物输入的影响;孙长青等^[13]采用不规则三角网格的分布杂交法建立渤海湾海域二维变边界潮流数值模型,计算得到 M₂ 和 K₁ 分潮的等迟角线、等振幅线和潮流场分布;张越美等^[14]根据 ECOM 模型,建立了渤海湾三维变动边界潮流模型,计算出渤海湾 M₂ 分潮潮流场的时空分布。在渤海湾余环流的观测方面,江文胜等^[15]运用人工水母观测得到渤海底层拉格朗日环流流速数值为几 cm/s,并发现在渤海湾有一处顺时针环流;匡国瑞等^[16]利用渤海中部海上平台进行了长期流的观测,并分析了余流的变化特征;江文胜

收稿日期:2019-04-24

资助项目:中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金资助项目——水面综合散热系数现场测定技术及其在温排水二维数学模型中的应用研究(2014T06)

作者简介:刘鑫仓(1993-),男,硕士研究生,主要从事数值模拟方面研究. E-mail: 461475568@qq.com

*** 通讯作者:**迟万清(1975-),男,教授级高级工程师,主要从事数值模拟方面研究. E-mail: chiwanqing@fio.org.cn

(李 燕 编辑)

等^[17]运用海流计在固定站位连续测流、漂流板轨迹观测和“人工水母”测底层流三种方法对渤海湾进行了海流观测,并得出渤海湾拉格朗日余流是顺时针的结论。整体来说,在渤海湾余环流的研究方面,已有许多工作。本文在较高空间分辨率网格的基础上,综合运用 2 种方法探讨了渤海湾余环流的细致结构,给出了均匀分布的自由粒子在潮流作用下的运移方向和轨迹。

本研究使用 Mike21 模型,对渤海湾潮波系统进行了模拟,由模拟结果计算了欧拉潮致余流,与已有的工作进行了对比,分析并阐明了渤海湾潮致欧拉余环流的精细结构。在此基础上,通过释放拉格朗日粒子的方法,分析了渤海湾拉格朗日余流的流向和结构。这 2 类余流的研究为渤海湾及其临近海域物质运输、环境保护、海洋自然资源的开发以及海岸工程的实施和防护等一系列重要活动阐明了动力学机制。

1 模型简介

Mike21 是由丹麦水利研究所开发的平面二维数学模型,模型是基于三维不可压缩和均匀 Reynolds 值的 Navier-Stokes 方程,并服从于 Boussinesq 假定和静水压力的假定。二维浅水方程组为:

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial h\bar{u}}{\partial x} + \frac{\partial h\bar{v}}{\partial y} = hS, \quad (1)$$

$$\frac{\partial h\bar{u}}{\partial t} + \frac{\partial \bar{u}^2}{\partial x} + \frac{\partial h\bar{u}\bar{v}}{\partial y} = f\bar{v}h - gh \frac{\partial \eta}{\partial x} - \frac{h}{\rho_0} \frac{\partial p_a}{\partial x} - \frac{gh^2}{2\rho_0} \frac{\partial \rho}{\partial x} - \frac{\tau_{bx}}{\rho_0} - \frac{1}{\rho_0} \left(\frac{\partial s_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial s_{xy}}{\partial y} \right) + \quad (2)$$

$$\frac{\partial}{\partial x}(hT_{xx}) + \frac{\partial}{\partial y}(hT_{xy}) + hu_s S,$$

$$\frac{\partial h\bar{v}}{\partial t} + \frac{\partial \bar{v}^2}{\partial y} + \frac{\partial h\bar{u}\bar{v}}{\partial x} = f\bar{u}h - gh \frac{\partial \eta}{\partial y} - \frac{h}{\rho_0} \frac{\partial p_a}{\partial y} - \frac{gh^2}{2\rho_0} \frac{\partial \rho}{\partial y} + \frac{\tau_{sy}}{\rho_0} - \frac{\tau_{by}}{\rho_0} - \frac{1}{\rho_0} \left(\frac{\partial s_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial s_{xy}}{\partial y} \right) + \quad (3)$$

$$\frac{\partial}{\partial x}(hT_{xy}) + \frac{\partial}{\partial y}(hT_{yy}) + hv_s S,$$

式中: t 为时间; x, y 分别为经向、纬向距离; η 为水位; d 为静止水深; $h = \eta + d$ 为总水深; u, v 分别为 x, y 方向上的速度分量; f 为科氏力系数, $f = 2\omega \sin \varphi$, ω 为地球自转角速度, φ 为当地纬度; g 为重力加速度; ρ 为水的密度; s_{xx}, s_{xy}, s_{yy} 分别为辐射应力分量; S 为源项,本文中源项为 0; (u_s, v_s) 为源项水流流速, $\bar{u}, \bar{v}$ 为沿水深平均的流速, T_{ij} 为水平黏滞应力项。

利用在渤海湾内一定位置释放拉格朗日自由粒子,并追踪粒子运移路径的方法表征拉格朗日余流,考虑了平流、水平扩散等因素,公式计算^[18]:

$$\begin{cases} dx(t) = U(x, y, t)dt + dx'(t) \\ dy(t) = V(x, y, t)dt + dy'(t) \end{cases}, \quad (4)$$

式中, $dx'(t), dy'(t)$ 是水平湍流扩散引起的自由位移, $U(x, y, t), V(x, y, t)$ 是 x, y 方向上的分速度, $x(t), y(t)$ 是跟踪粒子的坐标。欧拉余流是在固定位置上一个潮周期的平均速度^[19],可以定义为^[20]

$$u_{\text{Euler}} = \frac{1}{T} \int_0^T u dt, \quad (5)$$

式中, u_{Euler} 为欧拉余流的速度, t 为一个潮周期, u 为一个周期内某一位置潮流速度。

2 计算区域和模型设置

2.1 计算区域设置

本文计算模型选择平面二维数值模型,模拟区域选择整个渤海、黄海北部,以减小开边界的影响,计算区域见图 1。以北黄海和整个渤海区域组成的闭区域为模拟区域。模型闭边界以北黄海、渤海海域岸线作为

闭边界。水动力模型开边界设置为中国日照、韩国釜山两点的连线,开边界的水位是通过日照港等处长期潮位观测资料获得的主要的分潮(M_2 , S_2 , O_1 和 K_1)的调和常数并结合《黄渤海海洋水文图集》^[21]的同潮图来给定的。选择非结构三角网格剖分计算域,并在在渤海湾地区进行加密,最小空间步长约 500 m。

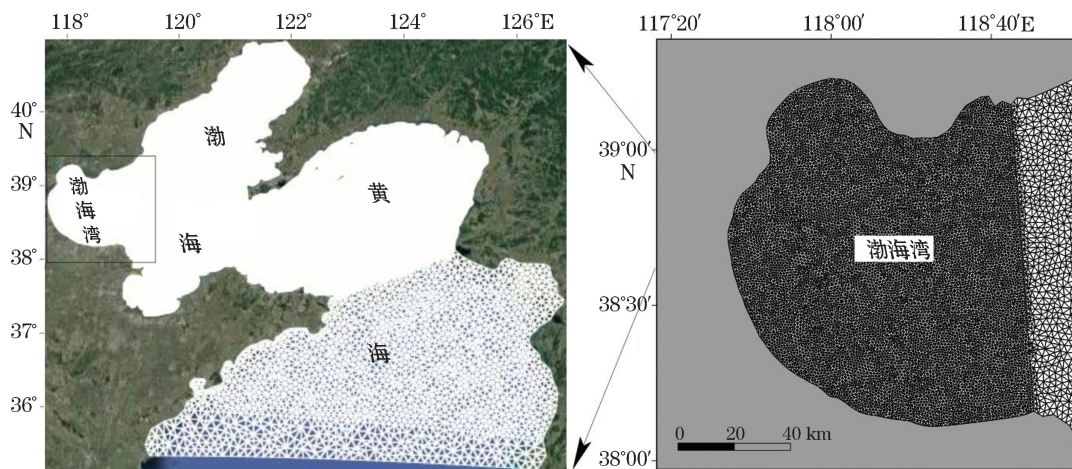


图1 模拟区域网格图

Fig.1 Grid map of the simulation area

2.2 水深、岸界和计算时间

研究区海岸线采用平均大潮高潮线,本研究收集来自于卫星 Landsat8 的 2010-01 空间分辨率为 15 m 的遥感影像^[22],对配准的卫片解译提取岸线。基于凸显潮致余环流主要结构和趋势的考虑,在 AutoCAD 中处理渤海湾部分岸线时,略过密集的人工建筑和河口,以期能得到在整个北黄海、渤海尺度下渤海湾潮致余环流的基本结构。水深资料由中国海洋大学开发的全球水深展示系统提取^[23]。模型计算时间为 240 d。

3 结果与讨论

3.1 模型验证

为了验证模型的正确性,本文采用 2004-08-15T17:00—16T17:00 A1, A2 和 A3 三站的测流资料与模拟结果进行对比,站位位置和具体对比结果见图 2。图中实测流向和模拟流向值符合较好,流速值略有偏差,但在同一量级上。总体来看,模拟值和实测值基本吻合,能较好地反映出渤海湾的流场。

3.2 潮流场

模型计算得到的渤海湾潮流场的分布见图 3。因为渤海湾区域较大,不存在统一的涨急和落急时刻,本文中图 3a,图 3b 所示的涨急和落急以滨州附近的潮流场为准。渤海湾潮流场在涨急时流向由东向西,由湾口向湾内流动,流速较大,流速值分布为外大内小,在唐山到天津之间区域附近流速最大,流速约为 1.4 m/s。而在落急时,流向由西向东,流速值则较小,南北湾口两侧流速较大,在唐山一带流速最大,流速最大值为 1.12 m/s。在涨急时海水整体向渤海湾湾内流动,在落急时,整体向湾外流动,流向相反,与孙长青等^[13]、张越美等^[14]模拟结果相似。

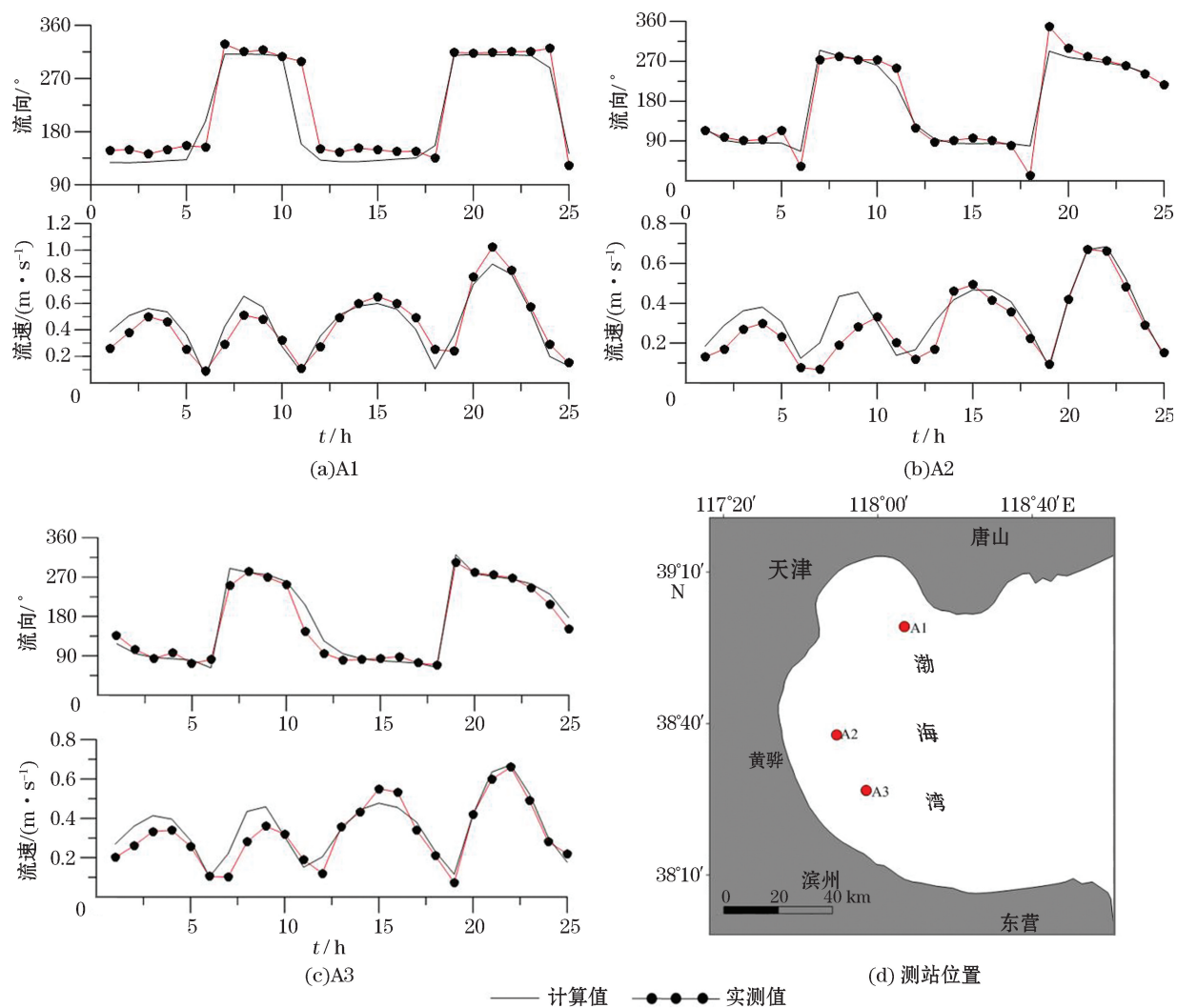


图2 计算值和实测值的对比

Fig.2 Comparison between calculated and the measured values

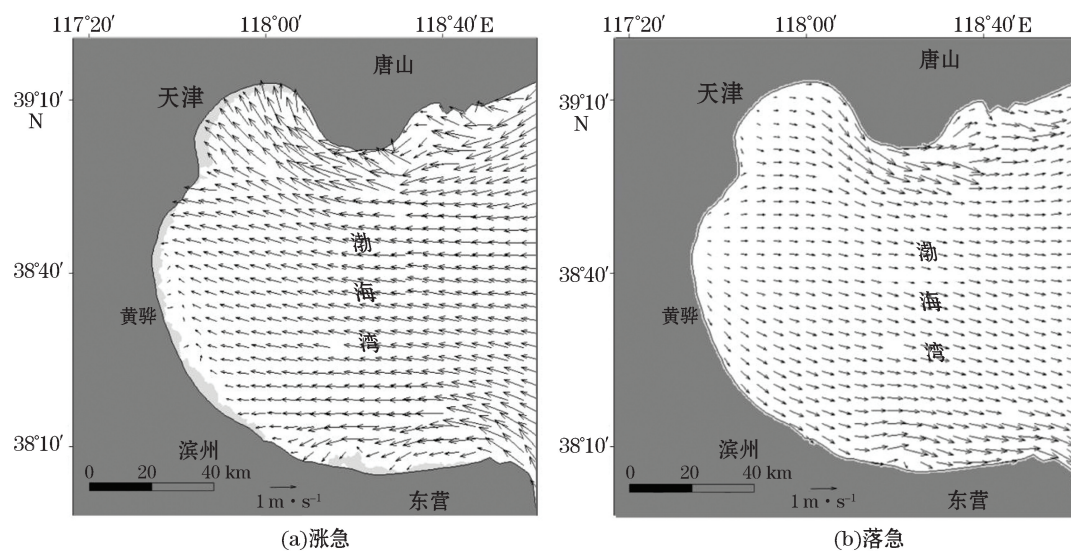


图3 渤海湾潮流场

Fig.3 The Tidal current field in the Bohai Bay

3.3 潮致欧拉余流场

由模拟得出的潮流结果,通过欧拉余流的定义公式(式(5))计算得到了潮致欧拉余流场(图4),渤海湾欧拉余流整体较弱,最大值为 0.2 m/s 。欧拉余流场图(图4)表明,渤海湾欧拉余流近岸较强,而渤海湾中央部分相比之下较弱,流速大小仅 0.005 m/s ,这和张越美等^[14]、万修全等^[24]的结果相似。近岸部分欧拉余流流向以天津和黄骅之间的凸出部分为分界线,两地分界以北部分欧拉余流沿着岸界在天津附近形成一个顺时针潮致余环流,分界以南部分欧拉余流沿着黄骅到滨州之间的区域形成一个逆时针潮致余环流,2个较大的环流在分界处又汇合,这和郑鹏的结果相同^[25]。北部余流沿着天津继续向东,在渤海湾北部唐山区域附近,形成一个半径较小,流速约为 0.1 m/s 的顺时针方向欧拉余环流,其环流流速在渤海湾各个欧拉余环流中最大。天津以南近岸余流除在天津到黄骅之间形成一个环流之外,余流沿着岸界继续向东,在渤海湾南部东营附近形成一个较强的逆时针潮致欧拉余环流,位置和北部唐山附近的余环流相对应,但是流向、流速和半径不同,两者都处于湾口处,郑鹏^[25]、张越美等^[14]、王悦等^[12]关于渤海湾欧拉余流的结果和本文相似。渤海湾潮致欧拉余环流总体是由天津、唐山区域分界以北的近岸余流沿岸流动形成的北部的2个顺时针余环流,以及近岸余流在南部区域沿岸流动形成的2个逆时针余环流,本文相比以往工作得到了更细致的欧拉余流结构。

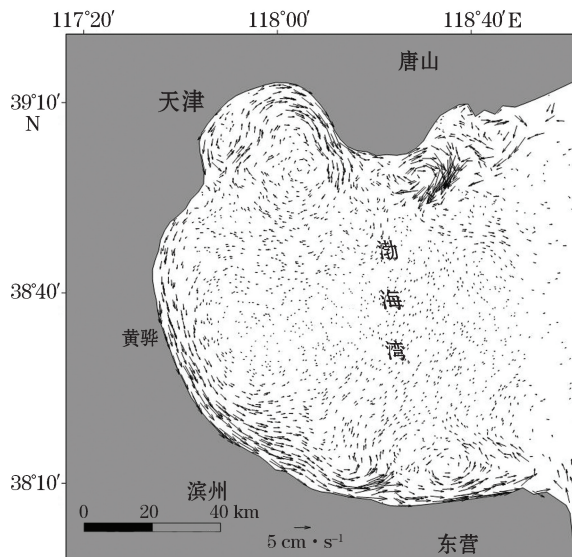


图4 潮致欧拉余流场

Fig.4 The tide-induced Eulerian residual current field in the Bohai Bay

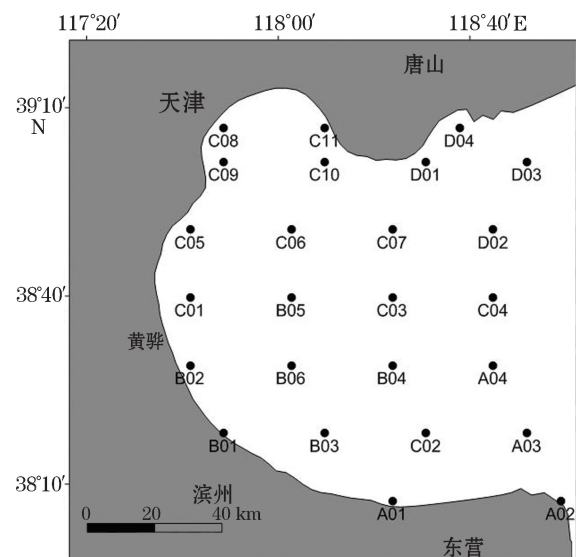


图5 渤海湾拉格朗日粒子释放位置

Fig.5 The releasing positions of Lagrange particles in the Bohai Bay

3.4 潮致拉格朗日余流场

本文在渤海湾不同位置释放拉格朗日粒子,由拉格朗日自由粒子运动的轨迹表征渤海湾拉格朗日余流的运动,从而揭示渤海湾拉格朗日余流的结构。自由粒子释放的位置如图5所示,粒子运移路径轨迹见图6。

拉格朗日粒子 B01, B02, B03, B04, B05 和 B06 的运动轨迹显示出在渤海湾西南部黄骅到东营区域之间,存在一较大拉格朗日余环流,余环流的方向为逆时针方向,郑鹏^[25]、王悦等^[12](旧地形)、Wei 等^[26](表层拉格朗日余流)的研究中也在此处有一个逆时针环流的相似结论。在渤海湾北部营城区域,拉格朗日粒子 C10, C11 的运动轨迹显示在天津到唐山一带存在一较小拉格朗日环流,其流向为顺时针方向,这和郑鹏^[25]、Wei 等^[26](表层拉格朗日余流)、毛新燕^[27]($T/2$ 时刻拉格朗日余流)在其研究中的结果一致。

在渤海湾中央,拉格朗日粒子运动轨迹显示的拉格朗日余流主要由渤海湾中央向天津、黄骅两地的海岸流动,来自渤海湾中央的拉格朗日余流到近岸区域之后,沿岸相对流动,在天津和黄骅两个区域凸出的分界位置,天津附近来自渤海湾中央的余流到近岸区域之后,沿岸向两地分界处流动,凸出的分界以南区域来自渤海湾中

央的拉格朗日余流靠近岸界之后则向北流动,两者在两界之间的分界处汇聚。在渤海湾东北部湾口区域附近,粒子 D01, D02, D03 的运动轨迹揭示出在唐山一带存在一较大的拉格朗日环流,其方向为逆时针方向,在此处王悦等^[12] (新地形下拉格朗日余流场)、Wei 等^[26] (表层拉格朗日余流)、毛新燕等^[27] 研究结果与本研究相似,本文以拉格朗日粒子运动的形式表征了渤海湾的拉格朗日余流,其意义不但在余环流的结构方面,对于鱼卵、悬浮砂、浒苔等具有相似性质的物质运移方面也有相当重要的意义。

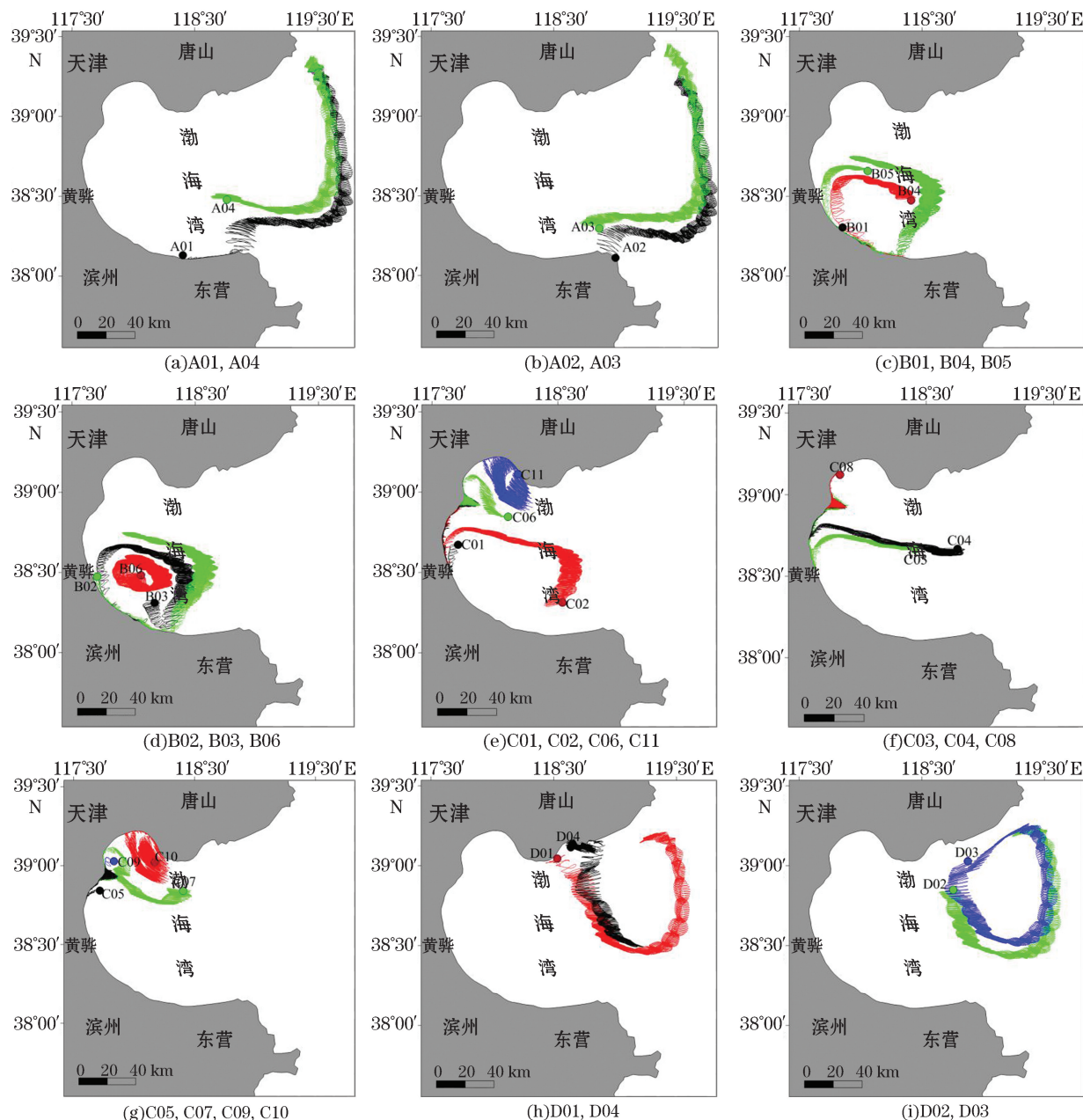


图 6 渤海湾拉格朗日粒子运动轨迹

Fig.6 Moving track of the Lagrangian particle in the Bohai Bay

4 结 语

通过 Mike21 研究渤海湾潮致余环流的结构,由模拟结果计算得到欧拉余流场,分析了欧拉余流场的结

构;为了阐明物质输送的水动力学基础,计算了拉格朗日余流场,并和已有的相关研究进行了对比。模拟结果能较好地反映出渤海湾的潮波系统,并且得到了渤海湾余环流的精细结构,为海洋工程的设计和修建、物质的迁移和输送等相关问题提供了直观、可靠的基础。本文主要结论如下:

1)渤海湾涨潮时流速值(最大值为 1.4 m/s)大于落潮时流速值(最大值为 1.12 m/s),涨潮时流向由东向西,落潮时由西向东。

2)欧拉潮致余流整体较小,最大值为 0.2 m/s;渤海湾潮致欧拉余流近岸区域流速较大,中央较小,湾口呈现出双环结构,分别为唐山附近的顺指针环流和东营附近逆时针环流;此外,在湾内天津附近存在一顺时针环流,黄骅到滨州之间存在一逆时针环流。

3)渤海湾拉格朗日余流呈现北部湾口和湾内黄骅到东营之间逆时针双环结构,并且在北部天津以东,存在一较小的顺指针拉格朗日环流;在湾内拉格朗日余流向近岸流动,之后在近岸区域沿岸流动。

参考文献 (References):

- [1] 涂晶. 围填海活动对渤海湾岸线及水动力环境的影响[D]. 天津: 天津大学, 2017: 15-20. TU J. Influence of reclamation activities on the shoreline and hydrodynamic environment of Bohai Bay[D]. Tianjin: Tianjin University, 2017: 15-20.
- [2] HAN T. The semi-diurnal tidal current (m_2+s_2) numerical modelling[J]. Ocean Technology, 1992, 11(3): 58-63. 韩天. 渤海湾半日潮平均大潮(m_2+s_2)潮流场数值模拟研究[J]. 海洋技术, 1992, 11(3): 58-63.
- [3] WANG Y H. Coastal dynamic geomorphology[M]. Beijing: Science China Press, 2012: 64-65. 王永红. 海岸动力地貌学[M]. 北京: 科学出版社, 2012: 64-65.
- [4] HAINBUCHER D, WEI H, POHLMANN T, et al. Variability of the Bohai Sea circulation based on model calculations[J]. Journal of Marine Systems, 2004, 44(3-4): 153-174.
- [5] WEI H, HAINBUCHER D, POHLMANN T, et al. Tidal-induced Lagrangian and Eulerian mean circulation in the Bohai Sea[J]. Journal of Marine Systems, 2004, 44(3-4): 141-151.
- [6] VIJITH V, SHETYE S R, BAETENS K, et al. Residual estuarine circulation in the Mandovi, a monsoonal estuary: a three-dimensional model study[J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 2016, 173: 79-92.
- [7] XU P, MAO X, JIANG W. Mapping tidal residual circulations in the outer Xiangshan Bay using a numerical model[J]. Journal of Marine Systems, 2016, 154: 181-191.
- [8] CERRALBO P, ESPINO M, GRIFOLL M. Modeling circulation patterns induced by spatial cross-shore wind variability in a small-size coastal embayment[J]. Ocean Modelling, 2016, 104: 84-98.
- [9] XU M, CHUA V P. A numerical study on circulation and volume transport in Singapore coastal waters[J]. Journal of Hydro-environment Research, 2016, 12: 70-90.
- [10] LIUBARTSEVA S, COPPINI G, LECCI R, et al. Regional approach to modeling the transport of floating plastic debris in the Adriatic Sea[J]. Marine Pollution Bulletin, 2016, 103(1-2): 115-127.
- [11] GUO W, WU G, LIANG B, et al. The influence of surface wave on water exchange in the Bohai Sea[J]. Continental Shelf Research, 2016, 118(2016): 128-142.
- [12] WANG Y, LIN X P. The Variation of M_2 constituent corresponding to the change of topography in Bohai Bay and its effects on the transport of pollutants[J]. Periodical of Ocean University of China, 2006, 36(1): 1-6. 王悦, 林霄沛. 地形变化下渤海湾 M_2 分潮潮致余流的相应变化及其对污染物输运的影响[J]. 中国海洋大学学报(自然科学版), 2006, 36(1): 1-6.
- [13] SUN C Q, GUO Y T, ZHAO K S, et al. Numerical computation of tidal current in Bohai Bay[J]. Marine sciences, 2004, 28(8): 33-37. 孙长青, 郭耀同, 赵可胜. 渤海湾海域潮流数值计算[J]. 海洋科学, 2004, 28(8): 33-37.
- [14] ZHANG Y M, SUN Y L. A three-dimensional numerical tidal model with a variable boundary for the Bohai Bay[J]. Periodical of Ocean University of Qingdao, 2002, 32(3): 337-344. 张越美, 孙英兰. 渤海湾三维变动边界潮流数值模拟[J]. 青岛海洋大学学报(自然科学版), 2002, 32(3): 337-344.
- [15] JIANG W S, WU D X, GAO H W. The observation and simulation of bottom circulation in the Bohai Sea in summer[J]. Periodical of Ocean University of Qingdao, 2002, 32(4): 511-518. 江文胜, 吴德星, 高会旺. 渤海夏季底层环流的观测与模拟[J]. 青岛海洋大学学报(自然科学版), 2002, 32(4): 511-518.
- [16] KUANG G R, ZHANG Q, DAI Y Z. Observation of long term current and analysis of residual current in central Bohai Sea[J]. Marine

- Lake and Marsh Bulletin, 1991(2): 1-11. 匡国瑞, 张琦, 戴煜芝. 渤海中部长期流的观测与余流分析[J]. 海洋湖沼通报, 1991(2): 1-11.
- [17] JIANG W S, WANG J Y, ZHAO J Z. An observation of current in Bohai Gulf and its analysis[J]. Periodical of Ocean University of Qingdao, 1997, 27(1): 25-34. 江文胜, 汪景庸, 赵建中. 渤海湾环流的一次观测和分析[J]. 青岛海洋大学学报(自然科学版), 1997, 27(1): 25-34.
- [18] LIUBARTSEVA S, COPPINI G, LECCI R, et al. Regional approach to modeling the transport of floating plastic debris in the Adriatic Sea[J]. Marine Pollution Bulletin, 2016, 103(2016): 115-127.
- [19] LEONARDI N, KOLKER A S, FAGHERAZZI S. Interplay between river discharge and tides in a delta distributary[J]. Advances in Water Resources, 2015, 80(2015): 70-75.
- [20] RODRIGUEZ P A, CARBAJAL N, RODRIGUEZ J H G. Lagrangian trajectories, residual currents and rectification process in the Northern Gulf of California[J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 2017, 194(2017): 263-275.
- [21] Editorial Board for Marine Atlas. Marine atlas of Bohai Sea, Yellow Sea, East China Sea climatology[M]. Beijing: Ocean Press, 1993. 海洋图集编委会. 渤海黄海东海海洋图集[M]. 北京: 海洋出版社, 1993.
- [22] Computer Network Information Center. Geospatial Data Cloud[DB/OL]. [2010-10] <http://www.gscloud.cn/search#dlv=Wzg4LFs4NzAsMTAsMTc3LDE3NjddLFtImRhdGFkYXRlIiwXV0sW10sOTld>. 中国科学院计算机网络信息中心. 地理空间数据云[DB/OL]. [2010-10] <http://www.gscloud.cn/search#dlv=Wzg4LFs4NzAsMTAsMTc3LDE3NjddLFtImRhdGFkYXRlIiwXV0sW10sOTld>.
- [23] 迟万清, 刘艳玲, 刘建强, 等. 不同风向作用下莱州湾水交换规律数值研究[J]. 海洋科学进展, 2018, 36(3): 384-393. CHI W Q, LIU Y L, LIU J Q, et al. Numerical simulation of water exchange in the Laizhou Bay under the influence of wind with different direction[J]. Advances in Marine Science, 2018, 36(3): 384-393.
- [24] WAN X Q, BAO X W, WU D X, et al. Numerical diagnostic simulation of summer tide-induced, wind-driven and thermohaline currents in the Bohai Sea [J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 2004, 35(1): 41-47. 万修全, 鲍献文, 吴德星, 等. 渤海夏季潮致-风生-热盐环流的数值诊断计算[J]. 海洋与湖沼, 2004, 35(1): 41-47.
- [25] ZHENG P. Numerical simulation to 3-D structure of water temperature, salinity and current field of the Bohai Sea[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2013: 29-32. 郑鹏. 渤海三维温盐流的数值模拟研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2013: 29-32.
- [26] WEI H, HAINBUCHER D, POHLMANN T, et al. Tidal-induced lagrangian and eulerian mean circulation in the Bohai Sea[J]. Journal of Marine Systems, 44(3-4): 141-151.
- [27] MAO X Y. Numerical study of lagrangian inter-tidal transports of salinity in the Bohai Sea[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2009: 116-123. 毛新燕. 渤海盐度的拉格朗日潮际输运数值研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2009: 116-123.

Numerical Simulation of Tide-Induced Residual Current in the Bohai Bay

LIU Xin-cang¹, LIU Yan-ling², CHI Wan-qing^{1,3}, LU Zhi-yong¹, HUANG Bing-zhi³

(1. College of Marine Geoscience, Ocean University of China, Qingdao 266100, China;

2. College of Environmental Science and Engineering, Ocean University of China, Qingdao 266100, China;

3. First Institute of Oceanography, MNR, Qingdao 266061, China)

Abstract: In order to study the tide-induced residual current in the Bohai Bay, MIKE21 is used for simulating the tidal current field in the Bohai Bay, through which the law of tidal wave movement is revealed and the tidal current field in the Bohai Bay is obtained. The maximum velocity of the tidal current in the Bohai Bay is 1.4 m/s during the rising tide and 1.12 m/s during the falling tide. According to the definition of Euler residual current, the tide-induced Euler residual current field is calculated. Its maximum value is 0.2 m/s and medium value is 0.005 m/s. An annular structure occurs both in the north of the Bohai Bay and near Dongying in the south of the bay. By releasing free particles at different positions in the Bohai Bay, we find that the Lagrangian circulation in the Bohai Bay has a double ring structure. Both the Eulerian method and the Lagrangian method are used to analyze the tide-induced residual current field in the Bohai Bay, and the structure of the tide-induced residual current in the Bohai Bay is clarified.

Key words: numerical simulation; Mike21; tidal current field; Eulerian residual current; Lagrangian residual current

Received: April 24, 2019