

北黄海北部海域潮余流的模拟研究

黄炳智¹, 胡泽建¹, 金永德¹, 迟万清^{1*}, 刘鑫仓², 刘 豪³

(1. 自然资源部 第一海洋研究所, 山东 青岛 266061; 2. 中国海洋大学 海洋地球科学学院, 山东 青岛 266100;
3. 南京大学 地理与海洋科学学院, 江苏 南京 210023)

摘 要:基于二维水动力模型,在仅考虑潮流作用条件下,通过计算欧拉余流和拉格朗日余流并结合粒子追踪方法研究了辽宁大连—朝鲜龙渊郡连线北侧的北黄海北部海域的潮余流结构和粒子运移的趋势。结果表明:欧拉余流和拉格朗日余流流速整体较小,呈现由南向北的流向,但在獐子岛及长山群岛的附近岛屿和朝鲜半岛沿岸的海域欧拉余流和拉格朗日余流流速较大。对比粒子追踪计算的结果与欧拉余流和拉格朗日余流的结果表明,流向与粒子运移路径基本一致。该海湾的余流及粒子运动规律特点对辽东半岛东岸及朝鲜半岛西侧海域的排污及污染控制有重要的借鉴意义。

关键词:北黄海;潮致余流;数值模拟;拉格朗日粒子追踪

中图分类号:P731.21

文献标识码:A

文章编号:1002-3682(2019)02-0134-10

doi:10.3969/j.issn.1002-3682.2019.02.006

引用格式:HUANG B Z, HU Z J, JIN Y D, et al. Simulation analysis of tidal residual currents in the northern part of the North Yellow Sea[J]. Coastal Engineering, 2019, 38(2): 134-143. 黄炳智, 胡泽建, 金永德, 等. 北黄海北部海域潮余流的模拟研究[J]. 海岸工程, 2019, 38(2): 134-143.

北黄海北部海域位于北黄海、以辽宁大连与朝鲜的龙渊郡之间连线的北侧,是介于辽东半岛和朝鲜半岛之间的海域。在北黄海北部海域,北侧有鸭绿江及其他河流的注入,南侧是渤海与黄海之间水交换的重要通道,在辽宁的东侧沿海,海洋资源丰富,是各种渔业生产的重要基地,在庄河附近目前正在筹划建设核电站,由于各种人类活动的影响,海洋环境的问题也逐渐凸显出来。北黄海水深由南往北逐渐变浅,等深线与岸线基本平行,平均水深 38 m^[1],由于海底地形的变化,结合该区域的潮流作用,使得该区域产生了一定的潮余流。分析余流的运动规律,对海洋污染调查和环境的研究有重要的意义,是研究海岸带物质运输方向的重要手段^[2-3]。

在大洋中,潮流对海水的运动影响较小,但到近岸的海湾地区,由于潮波及地形的影响,使得潮流成为近岸海流的主要运动形式。余流是指海流滤掉周期性潮流后的剩余部分,包括风海流、密度流、径流和潮余流等^[2]。潮余流产生机制稳定,对余流的贡献持续稳定,因此,潮余流对物质运输起着不可或缺的作用,如海水中的污染物、热量和营养盐等。潮余流的流速一般为每秒几厘米到几十厘米,是余流的重要组成部分^[4]。对潮余流的描述,可分为欧拉余流和拉格朗日余流^[5],对一个固定点的潮流流速进行潮周期平均得到的剩余流动为欧拉余流,而通过跟踪水质点的运动,在潮周期内的位移与时间的比得到的余流为拉格朗日余流^[6-7]。目前,对黄海余流的研究,主要考虑了黄海暖流^[8-9]及风海流^[10]的影响,虽然黄海暖流和风海流是影响余流的主要因素,但潮致余流在黄海也是一个不可忽视的因素^[11]。

通过直接观测较大尺度海域的余流比较困难,因此通过数值模拟手段可较好地计算出余流的运动规律。国内外许多学者^[12-22]通过数值模拟探讨了在不同海域的余流规律以及物质输运规律。在国外的 Ria De

收稿日期:2018-11-30

资助项目:国家自然科学基金项目——多重人为压力下莱州湾生态环境的演变趋势和调控原理(U1706215);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:黄炳智(1991-),男,硕士研究生,主要从事海岸动力方面研究. E-mail: 1322491902@qq.com

* **通讯作者:**迟万清(1975-),男,教授级高级工程师,硕士,主要从事数值模拟方面研究. E-mail: 350018185@qq.com

(王 燕 编辑)

Muros^[12]、曼多维河口^[13]、阿尔法克斯湾^[14]、亚得里亚海^[15]等不同地区的海湾,通过数值模拟的方法研究了余流结构以及物质输运规律,其研究结果解释了物质在海洋中的运动规律;在国内的象山港^[16]、北部湾^[4]、海南岛^[6]等海域,也有许多学者做了潮余流的研究,其中,象山港的研究主要是潮余流的结构及水体的交换时间,北部湾潮致余流的研究考虑了风海流的作用,海南岛附近海域主要研究了潮汐不对称。Yanagi 和 Takahashi^[17]、Le Kentang 等^[18]、Xia 等^[19]对黄渤海地区进行过数值模拟研究,但主要是关注季节和年平均的环流现象。余流是物质运输的主要动力,计算出余流的运动规律,也就能得到物质运输的运动规律。在北黄海北部海域,郝子宁等^[20]、龚煌等^[21]、王平和张宁川^[22]通过数值模拟同时耦合拉格朗日粒子追踪模块,计算了辽东半岛沿岸的庄河海域、大连湾和旅顺港的物质迁移分析,从局部地区分析了北黄海沿岸物质运移的特性,其结论也能反映出余流的运动规律。

目前,在北黄海北部海域,分析潮致余流的研究还比较少,本文利用二维水动力模型,在仅考虑潮流作用条件下,计算了该区域余流结构,通过计算欧拉余流并结合粒子追踪模块,能够更清晰地显示出研究区的余流结构和物质的运移趋势,突出潮致余流在北黄海北部海域的作用,对该海域因工程建设活动、渔业生产及交通运输产生的污染物运移轨迹具有借鉴意义。

1 研究方法

1.1 数学模型

Mike21 是由丹麦水利研究所开发的平面二维数学模型^[23],模型是基于三向不可压缩和 Reynolds 值均布的 Navier-Stokes 方程,并服从于 Boussinesq 假定和静水压力(hydrostatic pressure)的假定。二维非恒定浅水方程组为

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

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

$$\begin{aligned} \frac{\partial h\bar{v}}{\partial t} + \frac{\partial h\bar{u}\bar{v}}{\partial x} + \frac{\partial h\bar{v}^2}{\partial y} = -f\bar{u}h - gh \frac{\partial \eta}{\partial y} - \frac{h}{\rho_0} \frac{\partial p_a}{\partial y} - \frac{gh^2}{2\rho_0} \frac{\partial \rho}{\partial y} + \frac{\tau_{sy}}{\rho_0} - \frac{\tau_{by}}{\rho_0} - \\ \frac{1}{\rho_0} \left(\frac{\partial s_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial s_{yy}}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial x} (hT_{xy}) + \frac{\partial}{\partial y} (hT_{yy}) + hv_s S, \end{aligned} \quad (3)$$

式中, t 为时间; h 为总水深,且 $h = \eta + d$, η 为水位, d 为静水深; x 和 y 为经度和纬度; \bar{u} 、 \bar{v} 分别为沿水深平均的 x 和 y 方向上速度分量; S 为源汇项; f 为科氏力参数, g 为地球重力加速度; ρ 为水密度; ρ_0 为水的参考密度; p_a 为当地大气压; τ_{sx} 和 τ_{sy} 为风应力分量; τ_{bx} 和 τ_{by} 为底部应力分量; s_{xx} 、 s_{xy} 、 s_{yx} 和 s_{yy} 为辐射应力分量; u_s 和 v_s 为源汇项的水流速度分量; T_{xx} 、 T_{xy} 、 T_{yx} 和 T_{yy} 为横向应力分量,其表达式分别为 $T_{xx} = 2A \frac{\partial \bar{u}}{\partial x}$,

$T_{xy} = T_{yx} = A \left(\frac{\partial \bar{u}}{\partial y} + \frac{\partial \bar{v}}{\partial x} \right)$, $T_{yy} = 2A \frac{\partial \bar{v}}{\partial y}$, 其中 A 为水平涡流黏度系数。

1.2 拉格朗日粒子追踪模型

为了研究水体及污染物质的长期输移规律,在研究水域的周围空间水体设置追踪粒子,建立拉格朗日粒子追踪数值模式。拉格朗日余流计算公式可认为是欧拉余流与斯托克斯漂移相加的结果^[24],计算公式为

$$U_L = U_E + U_S, \quad (4)$$

式中, U_L 为拉格朗日平均速度, U_E 为欧拉余流, U_S 为斯托克斯漂移速度。

1.3 欧拉余流

海洋中的欧拉余流可简单定义为欧拉平均速度^[24], 具体计算方法为先构造 xoy 右手直角坐标系, 然后沿 x 轴和 y 轴分解流速, 分解流速后欧拉余流计算形式为

$$\begin{cases} U_E = \frac{1}{nT} \int_{t_0}^{t_0+nT} u(x_0, t) dt \\ V_E = \frac{1}{nT} \int_{t_0}^{t_0+nT} v(x_0, t) dt \end{cases}, \quad (5)$$

$$\begin{cases} U_E = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N u_i \\ V_E = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N v_i \end{cases}, \quad (6)$$

式中, U_E 和 V_E 分别为 x 和 y 方向的欧拉平均速度; t_0 为计算的起始时刻; T 为潮周期; $u(x_0, t), v(x_0, t)$ 为潮流计算所得某固定点在 x 和 y 方向的速度; n 为所取计算周期的个数; $N = nT/\Delta t$, Δt 为数值模拟的时间步长。

2 结果与分析

2.1 模型检验

本文中的二维水动力模型基于非等距网格技术对计算区域进行空间离散。模型中的计算区域为渤海和黄海的大部分海域, 模型中以中国日照和韩国的新安郡的连线作为开边界(图 1), 开边界的水位是通过对照《潮汐表》^[25] 中日照石臼所海洋站长期潮位资料并结合《渤海黄海东海海洋图集》^[26] 的同潮图确定的。通过非结构三角网格, 对北黄海北部海湾进行局部加密, 减少了锯齿岸线对计算结果的不利影响。模型中海岸线采用平均大

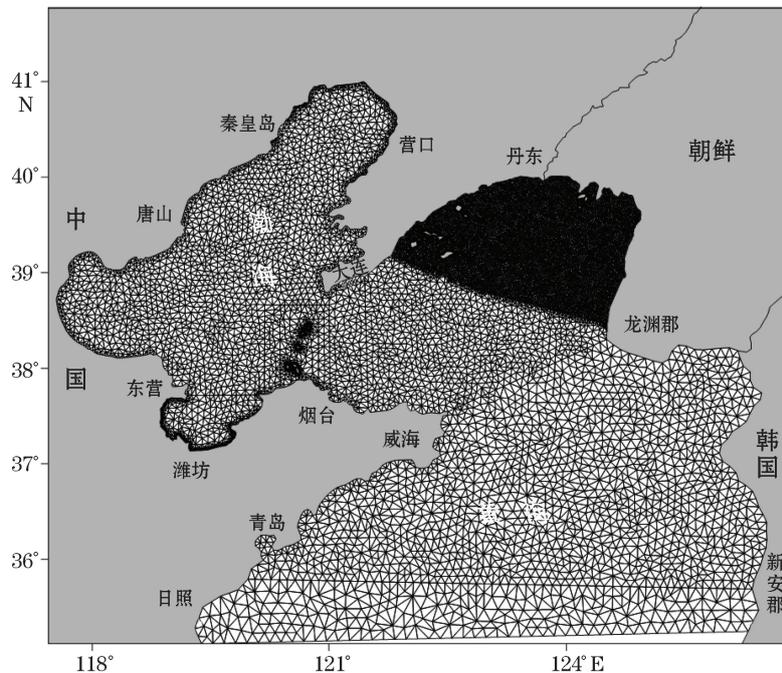


图 1 模型网格与边界

Fig.1 Grids and boundaries of the model

潮高潮线,本文利用卫星 Landsat 8 的 2016-01 空间分辨率为 15 m 的遥感影像,解译配准的卫片并提取岸线。水深资料来自中国人民解放军航海司令保证部制作的电子海图中的水深数据,模型计算时间为 240 d。

为检验模型计算的准确性,本文提取了大连和威海海洋验潮站中具有连续时间的潮位数据,对应模型计算的时间,进行潮位验证。同时,本文结合 A(123°17'26.1"E,38°42'29.4"N),B(123°36'51.66"E,39°11'8.64"N),C(124°00'10.32"E,38°55'58.98"N)和 D(123°48'0.24"E,38°29'25.2"N)四个具有流速流向实测资料的点位(图 2)进行验证。

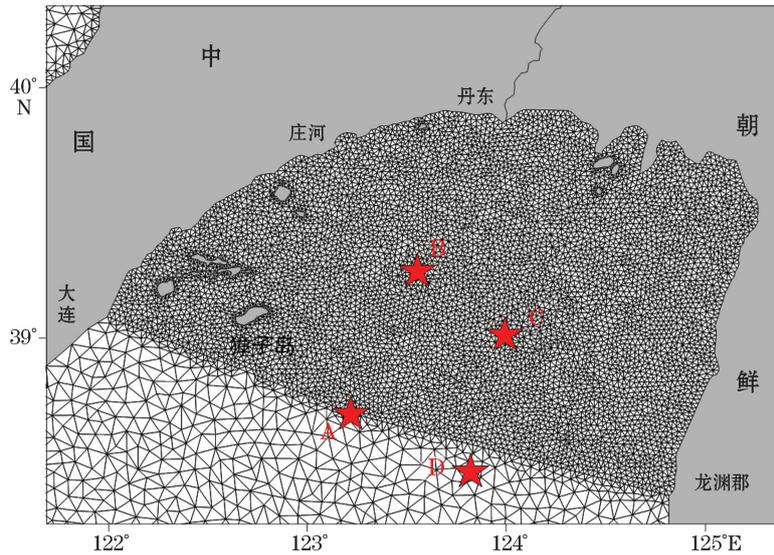


图 2 研究区网格与实测站位

Fig.2 Grids and location of measuring stations in the study area

2.1.1 潮位验证

从潮位验证结果(图 3)来看,潮位计算值与验证值基本一致。计算的高、低潮位出现的时间与实测高、低潮位出现的时间都吻合的较好。潮位平均偏差在 0.2 m 左右,满足模型计算要求。总体来看,潮位验证结果良好。

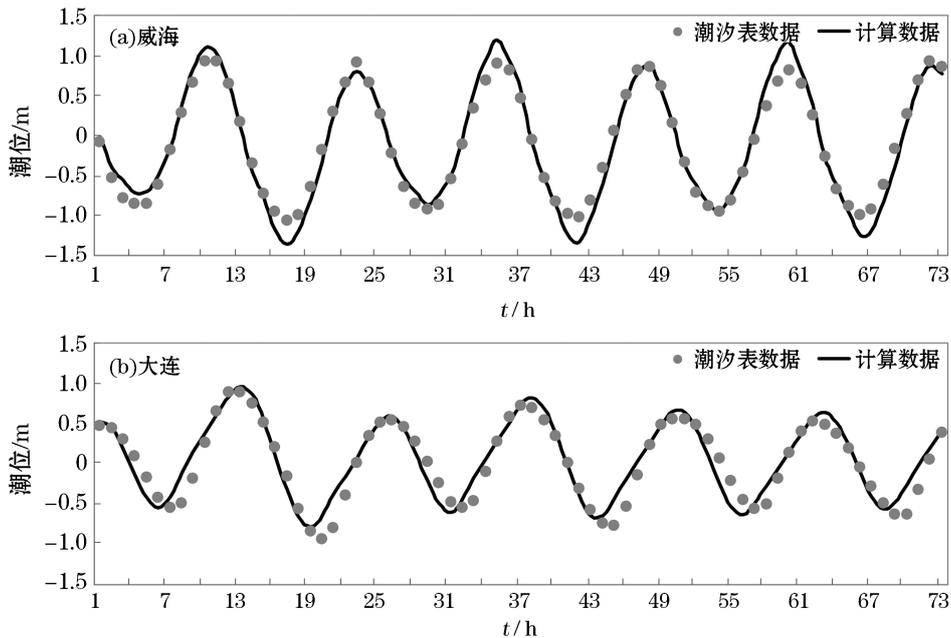


图 3 威海和大连潮位验证

Fig.3 Tide level validation in Dalian and Weihai

2.1.2 潮流验证

从流速、流向验证(图4和图5)结果来看,大、小潮各测点流速、流向计算值与实测值吻合较好,相位偏差较小,流速过程与现场基本一致,平均流速大小计算值与实测值偏差在10%左右,平均流向小于15°。总体来看,计算值和实测值吻合良好,模型能较好地反映出研究区的流场情况。

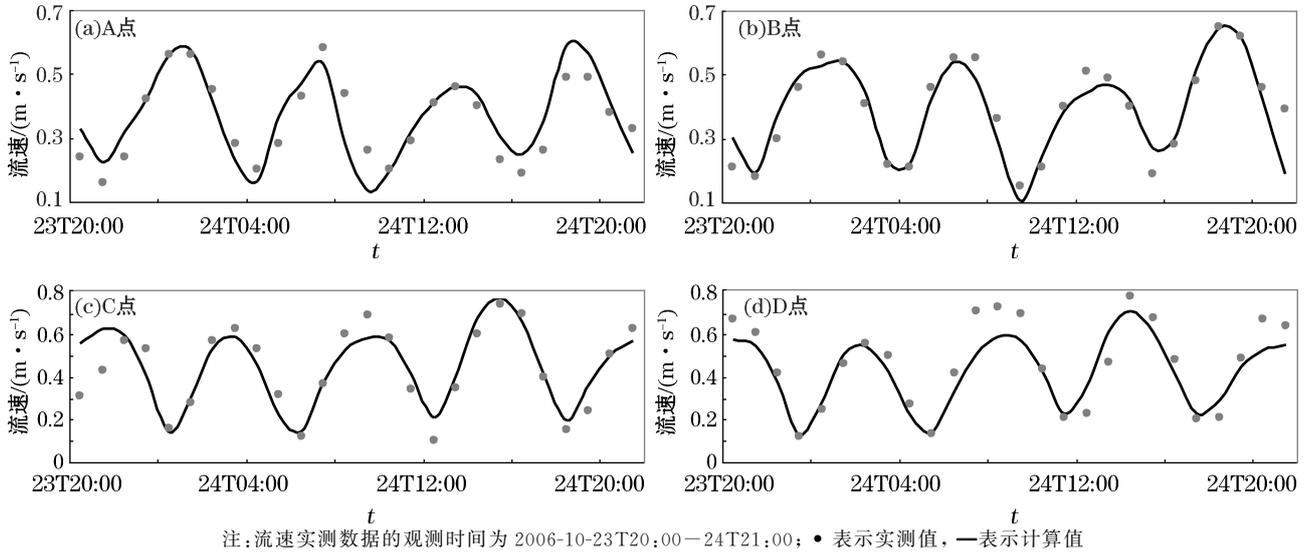


图4 A,B,C和D点流速验证

Fig.4 Verification of flow speeds at points A, B, C and D

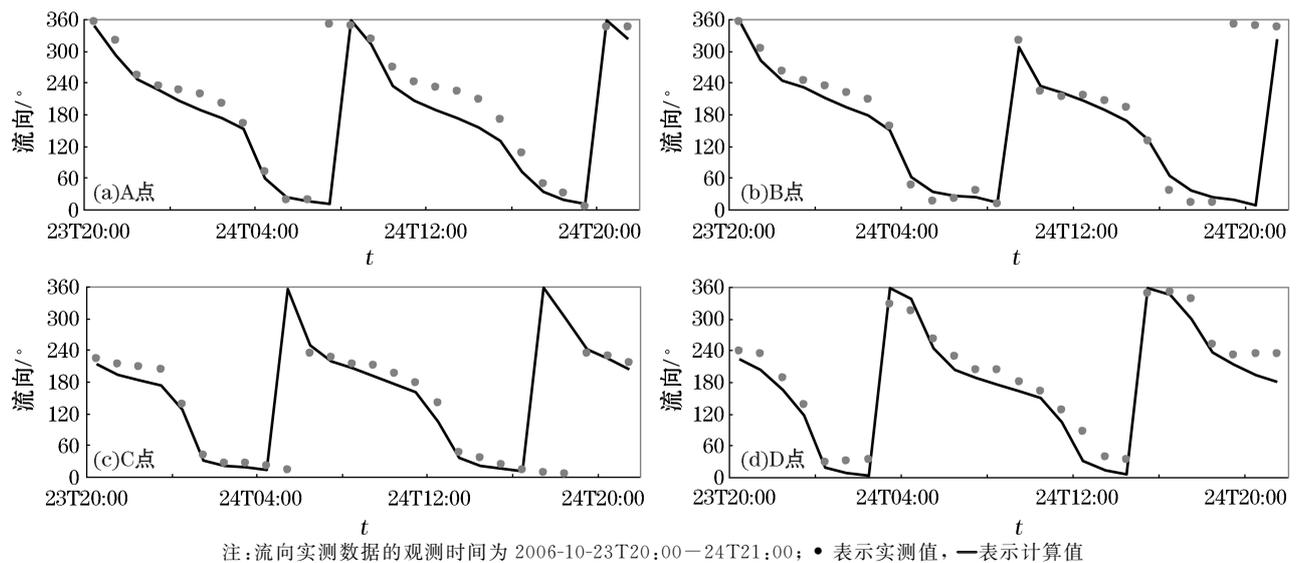


图5 A,B,C和D点流向验证

Fig.5 Verification of flow directions at points A, B, C and D

2.2 潮流场模拟结果

由利用模型计算获得的北黄海北部海湾潮流场分布(图6)可知,在北黄海北部海区,涨潮的最大流速为1.9 m/s,落急时最大流速为1.14 m/s,涨潮和落潮的最大流速都出现在朝鲜半岛附近海域。涨潮时,在靠近辽东半岛一侧的海域,海水为SW—NE流向,在辽东半岛与朝鲜半岛中间的海域,海水为S—N流向,在朝鲜半岛附近海域,海水为S—NE流向。落潮时,在靠近辽东半岛海域,海水为NE—SW流向,在辽东半岛与

朝鲜半岛中间的海域,海水为 N—S 流向,在靠近朝鲜半岛一侧海域,海水为 NE—S 流向。

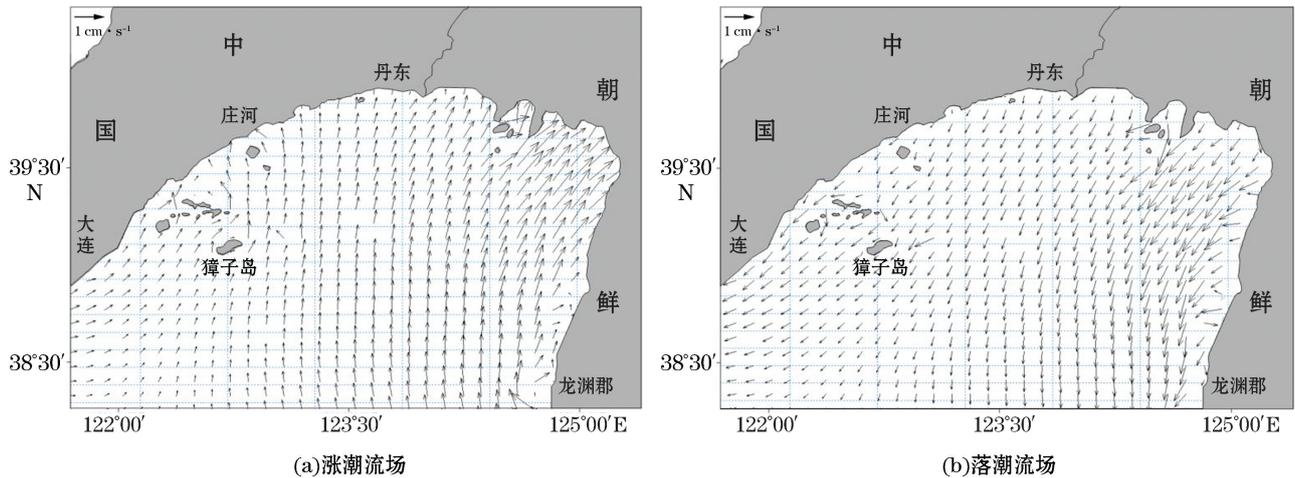


图 6 涨、落潮流场分布
Fig.6 Distributions of the flood tide and the ebb tide flow fields

2.3 欧拉余流计算结果

北黄海北部海域的欧拉余流如图 7 所示,大部分海域的欧拉余流流速较小,最大流速为 1.04 cm/s。计算结果显示,欧拉余流流速较大的区域主要是在朝鲜半岛近海海域、长山群岛等附近的海域以及辽东半岛南部沿岸海域。在獐子岛及长山群岛的附近岛屿,围绕海岛形成不规则的气旋式的绕岛环流,獐子岛东侧海域存在一个逆时针的环流。从研究海域的整体情况来看,在研究海域中间部分,流速比较小,呈现 S—N 的流向。在辽东半岛南部沿岸海域,欧拉余流的流速为 0.3~1.0 cm/s,欧拉余流的流向比较明显,整体沿着辽东半岛南部沿岸由 E—W 流动。在朝鲜半岛近岸海域,流速相对较大,在离岸稍远的海域,流向主要是 S—N,在沿岸海域,流向 N—S,形成一个反气旋环流。

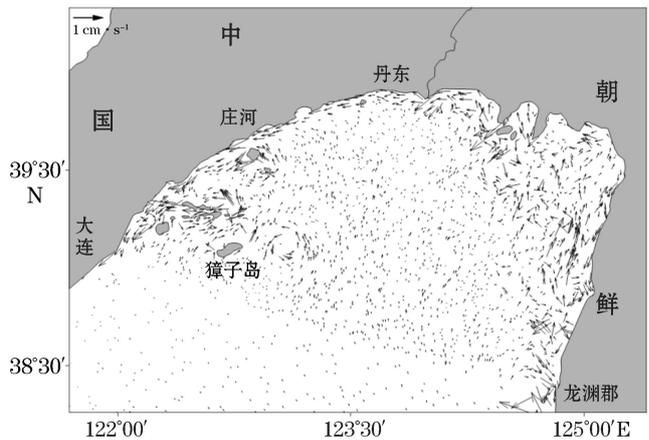


图 7 欧拉余流
Fig.7 Euler residual current

2.4 拉格朗日余流计算结果

在北黄海北部海域,拉格朗日余流的计算结果(图 8)显示,整体上流速较小,最大流速为 0.5 cm/s;在獐子岛及长山群岛的附近岛屿,围绕海岛形成不规则的气旋式的绕岛环流,獐子岛东侧海域存在一个逆时针的环流。从北黄海北部海域的整体情况来看,在朝鲜半岛近海海域、长山群岛等附近的海域以及辽东半岛南部沿岸海域拉格朗日余流流速较大。在辽东半岛与朝鲜半岛中间海域,流速比较小,呈现 S—N 流向。在辽东半岛南部沿岸海域,拉格朗日余

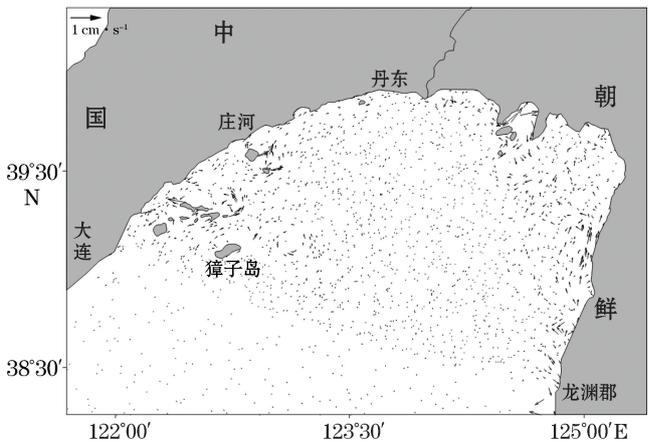
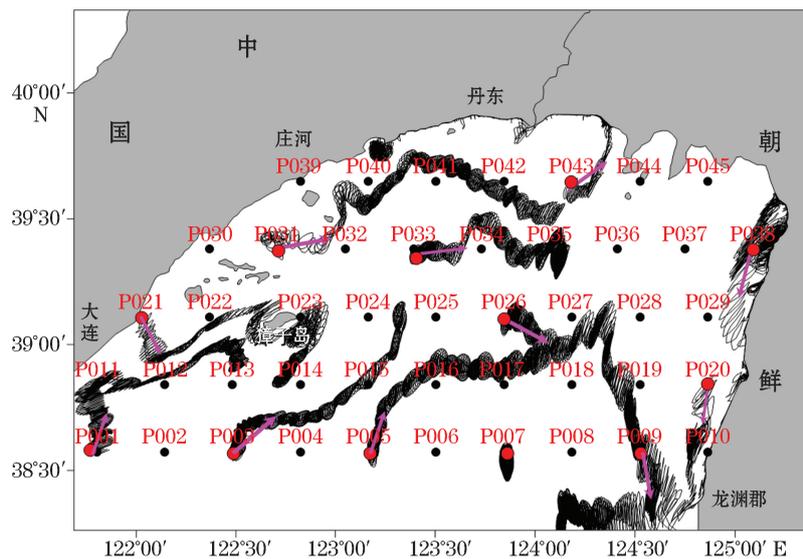


图 8 拉格朗日余流
Fig.8 Lagrangian residual current

流呈现出 E—W 流向,在朝鲜半岛近岸海域,流速相对较大,在离岸稍远的海域,流向主要是 S—N,在沿岸海域,流向 N—S,形成一个反气旋环流。由计算结果可知,拉格朗日余流的流向基本与欧拉余流一致。

2.5 粒子追踪计算结果

本文在研究区不同位置释放拉格朗日粒子,共设置了 45 个粒子释放点,粒子释放点之间相隔 30 km,计算了粒子 240 d 的运移轨迹,粒子点位置如图 9 所示。通过粒子追踪分析可知,在辽东半岛附近海域,粒子的运动轨迹由 SW—NE 运动,獐子岛北侧海域的粒子由 E—W 运动,在庄河沿岸区域粒子沿岸线由 NE—SW 运动。在獐子岛东侧的 P023 位置及西北侧 P030 位置,出现了一个滞留区,粒子几乎是在原地运动,在獐子岛东侧 P024 位置及南侧 P014 位置,粒子做逆时针运动,形成一个闭合的环状结构。研究区东侧区域,在 P006, P007, P029, P035 和 P045 附近点的粒子运动的位移很小,几乎处于原地运动,在大部分海域呈现出向东南或向南运动,在 P043 点的粒子向东北方向运动后有沿岸转向向西运动。



注:图中显示了具有代表性的粒子运动轨迹,箭头指向为粒子的运动方向

图 9 拉格朗日粒子运动轨迹

Fig.9 Lagrangian particle moving trajectory

3 讨论

本文仅考虑了潮流作用下北黄海北部海域的余流场,通过计算欧拉余流和拉格朗日余流及结合粒子追踪的方法计算了北黄海北部海域的潮致余流情况,结果表明,欧拉余流的计算结果和拉格朗日余流计算的结果具有一致性。

由于余流对物质运输起着不可或缺的作用,本文结合拉格朗日粒子追踪方法,验证了余流与物质运输的关系。在朝鲜半岛近海海域,欧拉余流和拉格朗日余流在沿岸海域流速较大,而且都显示流向向南,在此区域的粒子追踪也显示了同样的趋势(图 9 中 P038 点),而且在沿岸余流流速较大的地方,粒子也有较快的运动速度。在辽东半岛南部沿岸海域,欧拉余流的计算结果与拉格朗日余流的流向均为 E—W,粒子轨迹也同样显示了这一规律,P039 和 P043 点的粒子沿辽东半岛南部沿岸由东向西运动。在獐子岛东侧,欧拉余流和拉格朗日余流显示有一个气旋式的环流,P024 点的粒子同样有逆时针运输的规律。在獐子岛及长山群岛附近,欧拉余流和拉格朗日余流显示围绕岛屿附近,也会形成气旋式环流,在 P022 点虽然没有完整地显示出

有环流的运移轨迹,但仍有绕岛运移的趋势。

在獐子岛、长山群岛等附近的海域,余流相对较大,在这些岛屿的周围,整体上形成一个气旋式的绕岛流。而在这些岛屿的东侧和南侧地形相对平坦开阔的海域,潮余流相对比较弱。这与在獐子岛附近做过相关研究的结果^[27]类似,齐继峰等^[27]在獐子岛附近海域研究的潮余流的表层流速为 8~12 cm/s,底层潮余流的分布形态与表层基本类似,但流速偏小。而本研究中流速没有将海水分层,计算结果比齐继峰等^[27]的结果偏小,但流向基本相似。

Miao 和 Liu^[8]在研究北黄海和渤海冬季环流的时候,把黄海暖流加入到边界条件,风力场设置为零,其结果显示黄海暖流对北黄海具有一定的影响,流速值大约为 3 cm/s,与本文欧拉余流的流速相差不大,但黄海暖流具有季节性,在冬季的时候作用明显,而潮致余流的作用却是持续性的,所以对于物质的长期运输潮致余流仍起到了重要的作用,但也要考虑不同季节变化对余流造成的影响。

在对余流的研究中,风海流的影响相对来说还是比较大的。王宗山等^[28]认为黄渤海的风海流能达到每秒十几厘米的量级,这个量级比本研究的潮致余流流速大,所以在本研究区风海流也是余流产生的一个重要因素,但风海流同样受季节变化影响大,而计算潮致余流可以得出相对长期的物质运输规律。本文所得的结果对于研究北黄海的余流结构具有一定的借鉴意义。

4 结 论

通过运用二维水动力模型,在仅考虑潮流作用条件下,本文模拟计算了研究区域欧拉余流场和拉格朗日余流场,并对比了欧拉余流和拉格朗日余流的结果,同时结合粒子追踪的方法,研究了研究区域物质运输的趋势以及潮致余流在研究区域的作用,得出主要结论:

1)在北黄海北部海域,涨潮的最大流速为 1.9 m/s,落急时最大流速为 1.14 m/s,涨潮和落潮的最大流速都出现在朝鲜半岛附近。欧拉余流在北黄海北部大部分海域流速较小,但在獐子岛及长山群岛的附近岛屿和朝鲜半岛沿岸的欧拉余流流速较大,最大流速为 1.04 cm/s。拉格朗日余流除了在辽东半岛南部沿岸流向与欧拉余流相反外,其他海域基本相似,但整体流速比欧拉余流小,最大流速为 0.5 cm/s。

2)在辽东半岛与朝鲜半岛中间部分海域,欧拉余流和拉格朗日余流流速比较小,呈现 S—N 流向,在獐子岛及长山群岛的附近岛屿,围绕海岛形成不规则的气旋式的绕岛环流,獐子岛东侧海域存在一个逆时针的环流。在辽东半岛南部沿岸海域,欧拉余流与拉格朗日余流的流向均沿着辽东半岛南部沿岸由 E—W 流动。在朝鲜半岛附近海域,余流流向主要是 S—N,在沿岸海域,流向 N—S,形成一个反气旋环流。

3)在北黄海北部海域,通过粒子的运移轨迹与潮余流的流向对比结果显示,粒子的运移轨迹与潮余流的流向基本吻合,说明潮余流是影响物质运输的重要因素。

参考文献 (References):

- [1] FENG S Z, LI F Q, LI S J. Introduction to ocean science[M]. Beijing: Higher Education Press, 1999. 冯士筌, 李凤岐, 李少菁. 海洋科学导论[M]. 北京: 高等教育出版社, 1999.
- [2] JIANG H D, TANG H W. Dictionary of water conservancy[M]. Shanghai: Shanghai Lexicographical Publishing House, 2015. 姜弘道, 唐洪武. 水利大辞典[M]. 上海: 上海辞书出版社, 2015.
- [3] LI X W. Chinese pocket encyclopedia earth environmental science volume[M]. Beijing: The Great Wall Press, 2001. 李学文. 中国袖珍百科全书 地球 环境科学卷[M]. 北京: 长城出版社, 2001.
- [4] CHEN B, LI P L, SHI M C, et al. Numerical computation and analysis of observational data of tide-induced residual currents and wind-driven currents in Beibu Bay[J]. Guangxi Sciences, 2009, 16(3): 346-352. 陈波, 李培良, 侍茂崇, 等. 北部湾潮致余流和风生海流的数值计算与实测资料分析[J]. 广西科学, 2009, 16(3): 346-352.
- [5] LU Y, LI Z W, LI S J, et al. Subtidal current in the southeast offshore area of Hainan[J]. Advances in Marine Science, 2017, 35(1): 53-61. 卢燕, 李泽文, 李淑江, 等. 海南万宁近岸余流特征分析[J]. 海洋科学进展, 2017, 35(1): 53-61.

- [6] LIN G Y, GONG W P. Tidal asymmetry and tide-induced residual currents in the Yinggehai Coast, Hainan Island[J]. Haiyang Xuebao, 2017, 39(7): 36-42. 林国尧, 龚文平. 海南岛莺歌海近岸的潮汐不对称与潮致余流研究[J]. 海洋学报, 2017, 39(7): 36-42.
- [7] TEE T K. Tide-induced residual current, 1: 2-D nonlinear numerical tidal model[J]. Journal of Marine Research, 1976, 34(4): 603-628.
- [8] MIAO J B, LIU X Q. A numerical study of the wintertime circulation in the Northern Huanghai Sea and the Bohai Sea part I: basic characteristics of the circulation[J]. Chinese Journal of Oceanology and Limnology, 1988, 6(3): 216-226.
- [9] LIU X Q. Numerical simulation of the Yellow Sea wintertime circulation[J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 1996, 27(5): 546-555. 刘兴泉. 黄海冬季环流的数值模拟[J]. 海洋与湖沼, 1996, 27(5): 546-555.
- [10] LIU Z L, HU D X. Preliminary study on the Huanghai Sea coastal current and its relationship with local wind in summer[J]. Haiyang Xuebao, 2009, 31(2): 1-7. 刘志亮, 胡敦欣. 黄海夏季近岸海区环流的初步分析及其与风速的关系[J]. 海洋学报, 2009, 31(2): 1-7.
- [11] SUN W X, LIU G M, LEI K, et al. A numerical study on circulation in the Yellow and East China Sea II numerical simulation of tide and tide induced circulation[J]. Periodical of Ocean University of China, 2001, 31(3): 297-304. 孙文心, 刘桂梅, 雷坤, 等. 黄、东海环流的数值研究 II 潮及潮致环流数值模拟[J]. 中国海洋大学学报(自然科学版), 2001, 31(3): 297-304.
- [12] CARBALLO R, IGLESIAS G, CASTRO A. Residual circulation in the Ria de Muros (NW Spain): a 3D numerical model study[J]. Journal of Marine Systems, 2009, 75(1): 116-130.
- [13] 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.
- [14] 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.
- [15] 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.
- [16] WANG P, CHEN W B, ZOU W F, et al. Numerical study of the tidal residual current structure and the water halfexchange time in Xiangshangang bay[J]. Marine Environmental Science, 2018, 37(1): 107-115. 王平, 陈伟斌, 邹文峰, 等. 象山港潮余流结构及水体半交换时间数值研究[J]. 海洋环境科学, 2018, 37(1): 107-115.
- [17] TETSUO Y, SATORU T. Seasonal variation of circulations in the East China Sea and the Yellow Sea[J]. Journal of Oceanography, 1993, 49(5): 503-520.
- [18] LE K T, FENG M, WANG Y. A numerical study of the wintertime circulation in the Bohai and Huanghai Seas[J]. Chinese Journal of Oceanology and Limnology, 1993, 11(2): 149-160.
- [19] XIA C S, QIAO F L, YANG Y Z, et al. Three-dimensional structure of the summertime circulation in the Yellow Sea from a wave-tide-circulation coupled model[J]. Journal of Geophysical Research Oceans, 2006, 111(C11). DOI: 10.1029/2005JC003218.
- [20] HAO Z N, ZHANG M L, ZHANG Y P, et al. Numerical simulation of pollutant migration trajectories in Zhuanghe aquaculture sea area of North Yellow Sea[J]. Water Sciences and Engineering Technology, 2015(2): 41-46. 郝子宁, 张明亮, 张云鹏, 等. 北黄海庄河养殖海域污染物运动轨迹数值模拟[J]. 水科学与工程学报, 2015(2): 41-46.
- [21] GONG H, SUN D P, SUN Z G. Three-dimensional tidal-flow numerical study of impact of artificial island on pollutant movement in gulf [J]. Journal of Waterway and Harbor, 2013, 34(3): 263-271. 龚煌, 孙大鹏, 孙志国. 采用三维潮流模型分析人工岛对海湾污染物运动的影响[J]. 水道港口, 2013, 34(3): 263-271.
- [22] WANG P, ZHANG N C. Three-dimensional model of conservative pollutant migration and its application in the Dalian Bay[J]. Marine Science Bulletin, 2013, 32(3): 265-274. 王平, 张宁川. 大连湾保守污染物迁移三维模型及应用[J]. 海洋通报, 2013, 32(3): 265-274.
- [23] AN Y N, YANG K, WANG Y, et al. Application of MIKE21 model into marine engineering research[J]. Coastal Engineering, 2013, 32(3): 1-10. 安永宁, 杨鲲, 王莹, 等. MIKE21 模型在海洋工程研究中的应用[J]. 海岸工程, 2013, 32(3): 1-10.
- [24] LI F. Numerical simulation of tidal currents and tide-induced residual currents in Bohai Sea[D]. Tianjin: Tianjin University, 2009. 李斐. 渤海海域潮流及潮余流的数值模拟[D]. 天津: 天津大学, 2009.
- [25] National Marine Information Center. Tide tables[M]. Jinan: Shandong Map Publishing House, 2005. 国家海洋信息中心. 潮汐表[M]. 济南: 山东地图出版社, 2005.
- [26] 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.
- [27] QI J F, CAO S S, GUO K C, et al. 3-D numerical simulation of tidal field near Zhangzi Island, NE China[J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 2013, 44(6): 1469-1478. 齐继峰, 曹圣山, 郭可采, 等. 基于 FVCOM 的獐子岛附近海域三维潮汐潮流数值模拟[J]. 海洋与湖沼, 2013, 44(6): 1469-1478.
- [28] WANG Z S, GONG B, LI F H, et al. A numerical calculation for the wind-driven current in the Huanghai and Bohai Seas[J]. Advances in Marine Science, 1992, 10(1): 12-18. 王宗山, 龚滨, 李繁华, 等. 黄渤海风海流的数值计算[J]. 海洋科学进展, 1992, 10(1): 12-18.

Simulation Analysis of Tidal Residual Currents in the Northern Part of the North Yellow Sea

HUANG Bing-zhi¹, HU Ze-jian¹, JIN Yong-de¹, CHI Wan-qing¹, LIU Xin-cang², LIU Hao³

(1. *First Institute of Oceanography, MNR, Qingdao 266061, China;*

2. *College of Marine Geoscience, Ocean University of China, Qingdao 266100, China;*

3. *School of Geographic and Ocean Science, Nanjing University, Nanjing 210023, China*)

Abstract: Based on two-dimensional hydrodynamic model and by taking only the tidal current action into account, the structure of tidal residual currents and the trend of particle migration in the northern part of the North Yellow Sea, which lies on the north of the line from Dalian of Liaoning Province to Longyuan County of North Korea, are studied through calculating the Euler residual current and the Lagrangian residual current and by means of particle tracking method. The results show that both the Euler residual current and the Lagrangian residual current are generally small in flow speed and flow from south to north, while in the waters near the Zhangzi Island and the Changshan Islands and in the coastal waters of Korean Peninsula the two residual currents are both larger in flow speed. By comparing with the results from particle tracking calculations, the flow directions of the two tidal residual currents are basically coincidence with the particle migration path. The regulation and characteristics of the tidal residual current flowing and the particle migrating in the study area have important reference significance for the sewage discharge and pollution control in the waters along the eastern coast of Liaodong Peninsula and the western side of Korean Peninsula.

Key words: North Yellow Sea; tidal residual currents; numerical simulation; Lagrangian particle tracking

Received: November 30, 2018