

马晓歌, 褚忠信, 崔恩革, 等. 芝罘湾水动力与物质输运现状的数值模拟[J]. 海洋地质前沿, 2023, 39(5): 25-32.

MA Xiaoge, CHU Zhongxin, CUI Enping, et al. Numerical simulation of hydrodynamics and mass transport in Zhifu Bay[J]. Marine Geology Frontiers, 2023, 39(5): 25-32.

芝罘湾水动力与物质输运现状的数值模拟

马晓歌^{1,2}, 褚忠信^{1,2*}, 崔恩革¹, 祝琳^{1,2}

(1 中国海洋大学海洋地球科学学院, 青岛 266100; 2 海底科学与探测技术教育部重点实验室, 青岛 266100)

摘要:为海洋生态保护和海岸工程建设等工作提供参考, 基于 Mike21 模型水动力学 (HD) 模块, 得到最新岸线形态下芝罘湾的潮流场, 涨、落潮历时不均, 落急潮流流速大于涨急潮流; 东北岸流速最大, 向西南靠岸渐小; 湾北涨、落潮流向相反, 湾中、南部流向在涨急时刻为 SW 向, 落急时刻由南呈 NW 向向北顺时针逐渐转为 NE 向。计算了 15 个潮周期的欧拉余流场, 余流流向除湾南沿岸局部区域沿岸向南外, 整体为中心在湾东北的顺时针余环流, 余流流速整体较小, 大部分区域不超过 0.06 m/s。芝罘湾内等距离释放 16 个自由粒子, 据粒子运移轨迹得知: 湾以北外海的物质不易向湾内输运, 湾内自由粒子最终均运移出湾外, 湾内无聚集, 表明芝罘湾的水动力情况利于物质向外输运; 担子岛以北的粒子向东输出湾内后, 绕开担子岛等岛屿输运至东南外海; 担子岛以南的粒子经过在湾内回旋振荡, 以“∞”型轨迹最终南下。

关键词:Mike21; 芝罘湾; 水动力环境; 潮余流; 粒子追踪

中图分类号:P748

文献标识码:A

DOI:10.16028/j.1009-2722.2022.038

0 引言

在人类活动和全球气候变暖的双重压力下, 中国近海健康状况不容乐观^[1-3], 已成为制约海洋经济发展的关键因素^[4]。2022 年 2 月, 胶州湾贝类养殖区出现大量取食贝类的海星, 给当地养殖户造成重大经济损失, 因此, 对海湾环境的持续监测与现状研究具有重要意义。近年来, 海洋环境数值模拟手段在海洋环境影响评价中得到广泛应用, 本文采用数值模拟方法, 呈现了芝罘湾的潮、余流场与物质输运情况的现状, 对相关海域的生态保护与修复、污染防治及用海方式具有一定参考意义。

芝罘湾位于山东省烟台市正北, 为“U”字形东向开敞式海湾。口门北起芝罘岛东南角, 南至东炮台山, 南岸为山地, 北岸为芝罘岛, 东部湾口有崆峒列

岛环绕^[5], 海湾水深一般为 5~10 m, 最大水深 11 m (图 1)。前人对芝罘湾不同岸线形态下的潮流场、纳潮量、泥沙运移、水交换、沉积物粒度、重金属含量、海岸线变迁及生态环境作了大量的研究工作^[5-22]。王璐等^[8]利用 Mike21 水动力数值模型, 对芝罘湾 1985—2017 年间围填海工程引起的潮流场和纳潮量的变化情况开展研究, 发现围填海工程使芝罘湾潮流场发生明显变化, 纳潮量持续减少。朱金龙等^[9]对芝罘湾 1976—2016 年 40 a 间不同岸线形态下的水交换能力进行了对比研究, 指出湾西岸一突堤至四突堤的形成是造成湾内水交换能力变弱的主要原因。汤世凯等^[10]利用粒径趋势分析模型和沉积动力判别图解, 结合芝罘湾海域 110 个底质沉积物样品分析结果, 指出芝罘湾海域沉积水动力整体较弱。

本文基于芝罘湾 2021 年 11 月岸线数据, 建立了 Mike 21 模型 HD 模块, 得到潮流场、欧拉余流场为代表的水动力环境, 在水动力模拟结果与朱金龙等^[12]较为一致的前提下, 结合其对湾内水交换的研究^[9], 补充了粒子追踪模型, 以拉格朗日粒子轨迹的角度, 直观地展示了芝罘湾物质输运的现状, 旨在为海洋生态保护和海岸工程建设等工作提供参考。

收稿日期: 2022-02-10

资助项目: 国家自然科学基金(41376052)

作者简介: 马晓歌(1997—), 女, 在读硕士, 主要从事第四纪地质方面的研究工作. E-mail: mxg1214@foxmail.com

* 通讯作者: 褚忠信(1976—)男, 博士, 教授, 主要从事海洋地质方面的研究工作. E-mail: zhongxinchu@ouc.edu.cn

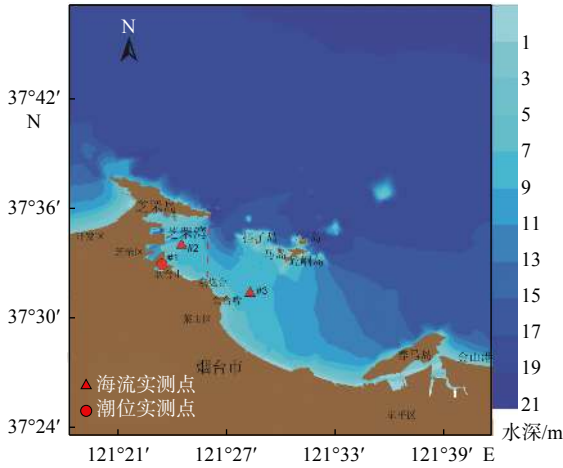


图1 研究区域地形与测站

Fig.1 Topography of the study area and position of measurement stations

1 模型介绍

Mike21 系列软件广泛应用于对河流、湖泊、河口、海湾、近海岸和海洋的水流、波浪、泥沙及环境的模拟^[7-10,12-13,21-27]。

1.1 控制方程

模型基于三向不可压缩和 Reynolds 值均布的 Navier-Stocks 方程,并服从 Boussinesq 假定和静水压力的假定^[27]。

二维非恒定浅水方程:

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

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

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

式中: t 为时间;

x, y 为 Cartesian 坐标系;

η 为水位;

d 为静水深;

h 为总水深;

\bar{u}, \bar{v} 分别为沿水深 x 和 y 方向上的平均速度分量;

f 为科氏力参数;

g 为地球重力加速度;

ρ 和 ρ_0 分别为水密度和水的参考密度;

τ_{sx}, τ_{sy} 为风应力分量;

τ_{bx}, τ_{by} 为底部应力分量;

$s_{xx}, s_{xy}, s_{yx}, s_{yy}$ 为辐射应力分量;

P_a 为当地大气压;

S 为源汇项;

u_s, v_s 为源汇项的水流速度分量;

$T_{xx}, T_{xy}, T_{yx}, T_{yy}$ 为横向应力分量。

1.2 边界条件

本次模型使用水位边界作为开边界。模型开边界调和常数根据 Mike21 全球潮汐模型获取,然后以此调和常数对开边界水位进行预报,公式如下:

$$\zeta = A_0 + \sum_{i=1}^{11} H_i F_i \cos[\sigma_i t - (v_0 + u)_i + g_i] \quad (4)$$

式中: A_0 为平均海面;

$F_i, (v_0 + u)_i$ 为天文要素;

σ_i 为角频率;

H_i, g_i 为某分潮调和常数,即振幅与迟角。

1.3 模型主要参数

模型所用岸线基于哨兵 2 号(Sentinel-2A)2021 年 11 月的遥感影像获取,影像空间分辨率 10 m,因为研究区范围相对较小,以目视解译方法获取岸线数据。水深数据来自基于中国人民解放军海军司令部航海保证部海图资料的电子海图。模型水文验证点位共 3 个, #1 是潮位测站,数据测量时间分为 3 期,分别是(#1a)2010 年 5 月 16 日 1 时—5 月 17 日 1 时^[9]、(#1b)2021 年 12 月 5 日 0 时—12 月 6 日 0 时(大潮期)和(#1c)2021 年 12 月 25 日 0 时—12 月 26 日 0 时(小潮期); #2、#3 是潮流测站,数据测量时间分别为 2013 年 7 月 8 日 8 时—7 月 9 日 8 时和 2017 年 4 月 13 日 12 时—4 月 14 日 12 时^[9],均为大潮期。开边界水位驱动是由模型内嵌的全球潮汐分潮数据通过潮汐模块计算得到。

如图 2 所示,模型计算域区间为 37°23'32"–37°47'12"N、121°18'18"–121°41'35"E,向研究区域的方向逐渐加密,研究区分辨率约达 30 m,模型计

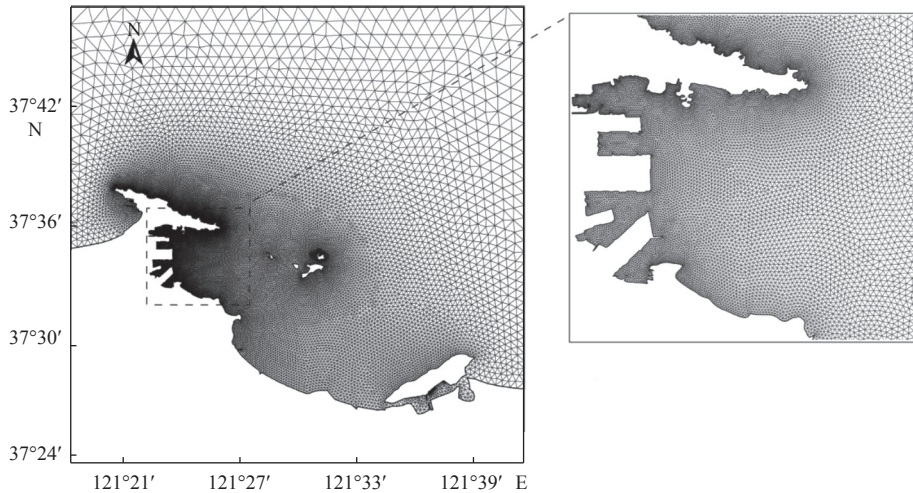


图 2 计算网格图

Fig.2 The computational grid

算网格共 22 208 个节点, 42 407 个三角网格。分区域设置糙率, 由曼宁系数(M)确定, 约水深 15 m 以内的区域, 设置 M=20, 其余区域 M=32。涡黏系数采用 Smagorinsky 常系数(Cs), 取 Cs=0.28。

1.4 模型验证

如图 3 所示, 高、低潮时间相位偏差不得超过 0.1 h, 高、低潮位偏差基本不超过 0.1 m, 潮位验证结果良好^[28]。

根据实测海流数据的具体时间, 分别将各站在 2 个模型中分时段进行流速、流向验证, 如图 4 所示, 除个别时刻外, 各站流速、流向的相位、最大值和最小值拟合较好, 模型基本合理, 满足本文研究需求。

2 结果与讨论

2.1 潮流场

整体来看, 芝罘湾潮流类型为不正规半日潮流, 潮流运动形式主要为往复流, 潮流场情况复杂, 下面选取大潮期间较有代表性的涨、落急时刻进行分析。涨急时刻的潮流场如图 5 所示, 涨潮流由芝罘岛和担子岛之间进入湾内时流向发生分歧, 靠近芝罘岛的潮流沿平行北岸的方向进入湾内, 流向近 W 向, 靠近担子岛一侧的潮流以 SW 向进入湾内后发生不同程度的逆时针偏转, 最后转为 SE 向流出湾外。除芝罘岛东南角的流速较大值区, 最大值 0.33 m/s 外, 流速整体分布特征为沿流向方向均匀递减(即流速等值线垂直于流向), 由湾口北侧约

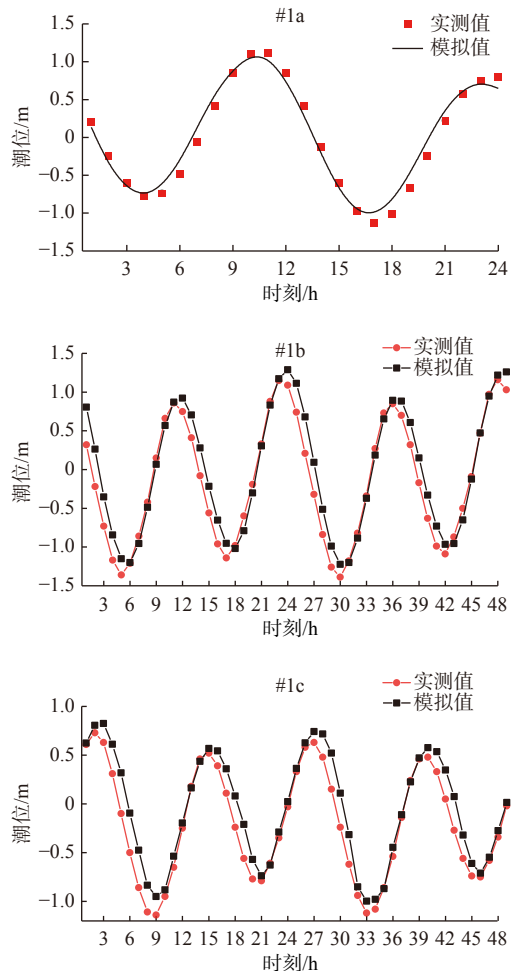


图 3 潮位验证

Fig.3 Verification of tide level

0.2 m/s 减小至岸流速 < 0.05 m/s, 三突堤两侧流速较大, 北侧最大值 0.1 m/s, 南侧最大值 0.15 m/s。

落急时刻的潮流场如图 6 所示, 落潮流向与涨潮流几乎处处相反, 湾北潮流呈 E 向流出湾内, 湾

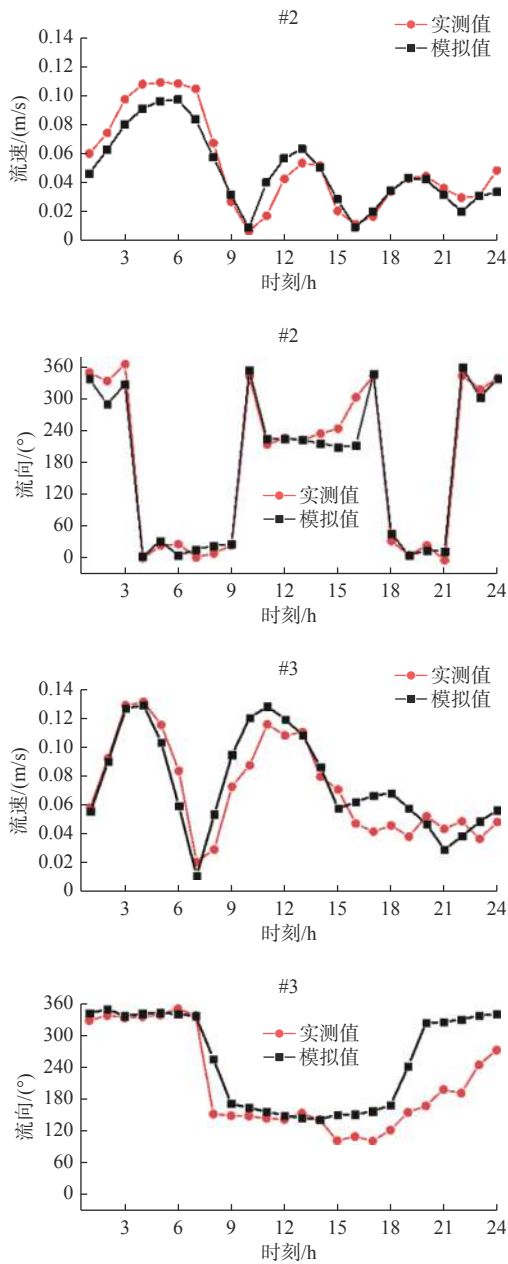


图4 流速、流向验证

Fig.4 Verification of flow velocity and direction

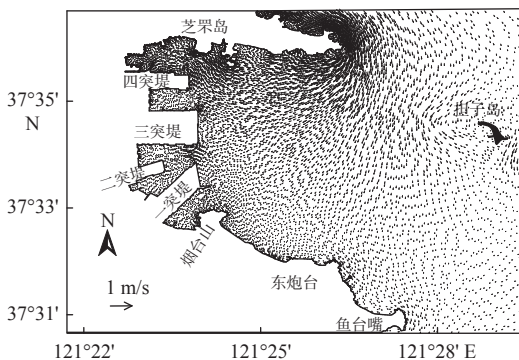


图5 涨急时刻潮流场

Fig.5 Tidal field at a time of rapid rise

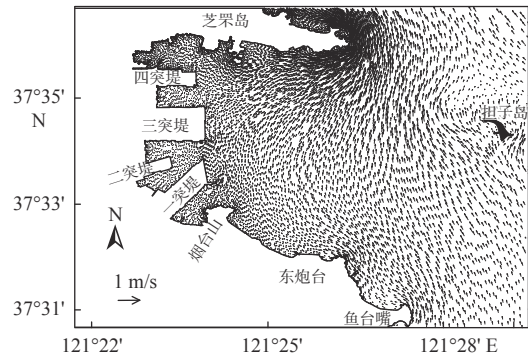


图6 落急时刻潮流场

Fig.6 Tidal field at a time of rapid decline

中、南部由近岸的NW向逐渐转为NE向流至湾外。流速分布特征与涨潮流也基本相似，由湾口平均0.28 m/s 逐渐均匀减小至湾底0.05 m/s，但流速不再是严格沿着流向阶梯递减，而是以平行于西岸的等值线形态分布。芝罘岛东南角的流速最大达0.5 m/s。

潮流场整体特征与赵迎春等^[11]的实测资料分析、朱金龙等^[12]的数值模拟特征结果相似，但整体流速值数值相较于朱金龙等2011年的模拟结果^[12]较小。2016年三突堤建成，西港阻浪堤拆除^[12]，工程建设进一步改变了岸线形态(图7)，三突堤的建成使得附近流速发生不同程度的变小，西南港池内流速由< 0.05 m/s 减小为< 0.03 m/s，三突堤与一突堤连线的港池口门处在涨急时流速变大，增长0.05~0.1 m/s，阻浪堤的拆除使得港池内环流消失。

2.2 余流场

本文选取15个潮周期的潮流计算欧拉余流场，计算方法见式(5)，欧拉余流可定义为所有经过某一空间点上质点的速度矢量和在某一时间段内的平均值，反映的是通过某一空间点的所有物质所表现出来的整体净输移趋势^[13]。

$$u_{Euler} = \frac{1}{T} \int_T u dt \quad (5)$$

式中： u_{Euler} 为欧拉余流的速度；

T 为计算潮周期；

u 为某一时刻潮流速度。

如图8所示，湾内余流场情况较复杂，余流流速整体较小，由湾东流入湾内后又从北部流出湾内，流向绕东北余环流中心呈顺时针，环流中心北部流向较统一，近E向，整体特征与姚兰芳^[14]的研究结果相似，但环流整体相对北移。三突堤以北的近岸余流出港池后沿岸向北汇入中央大环流北部后流

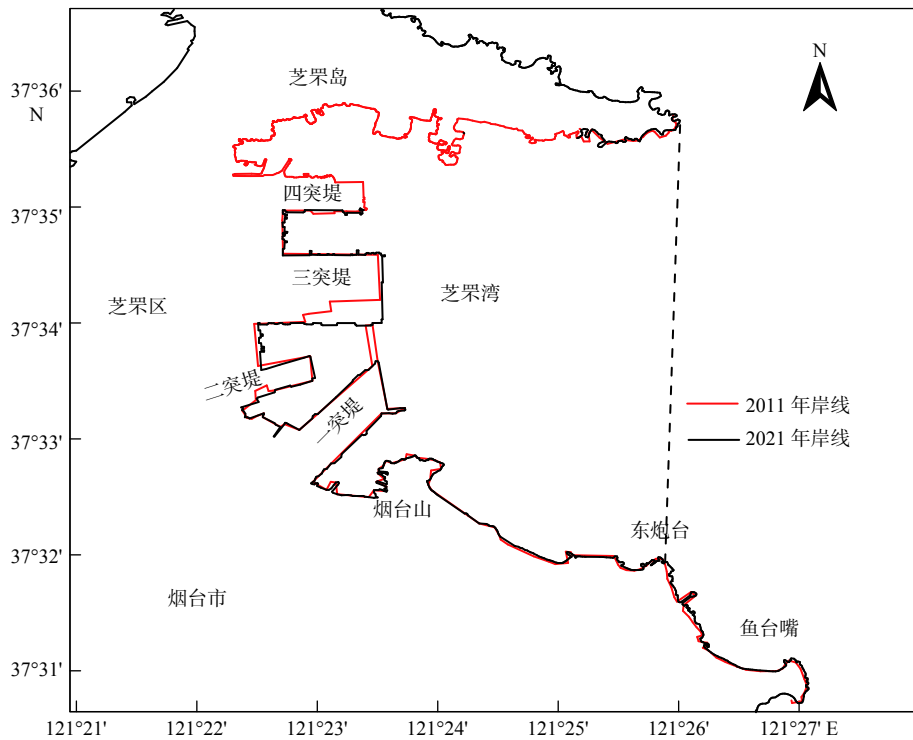


图 7 2011 年与 2021 年岸线对比

Fig.7 Comparison of coastline between 2011 and 2021

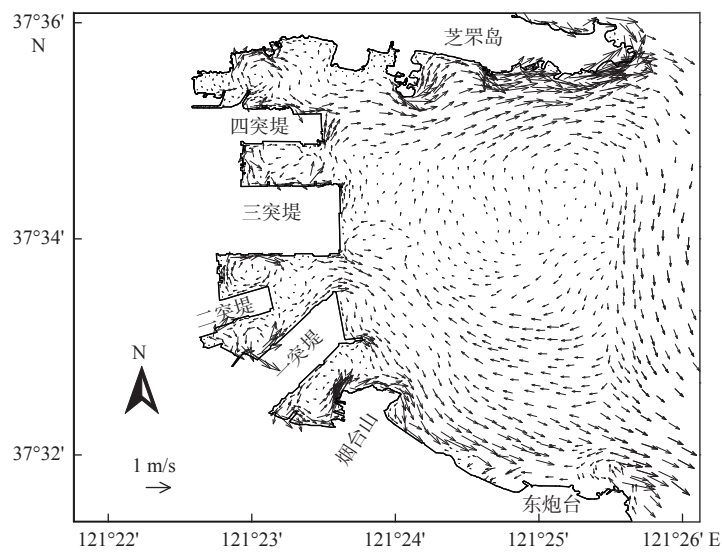


图 8 欧拉余流场

Fig.8 The Euler residual flow field

出湾内, 三突堤以南的近岸余流出港池后, 沿岸向南流出湾内。相较于朱金龙等^[12]基于 2011 年岸线的模拟结果, 西岸港池内各余环流特征较为一致, 全湾环流中心从湾西侧偏北的口门处转移至了湾中央, 中央出现多个余环流且流速较小, 湾中央多个余环流的出现表明了湾内水动力环境变得愈加复杂, 涨、落潮历时无较大变化的前提下, 涨、落潮的流速、流向均发生了区域性变化, 湾内物质的净运输趋势总体还是向外。

余流流速整体特征为: 顺时针大余环流中心处小, 南、北两侧大。中央开阔区域流速较小的中心区域, 平均约 0.03 m/s; 北岸近岸处流速较大, 东北岸余流最大值达 0.18 m/s; 南岸近岸处流速较小, 平均 < 0.02 m/s, 离岸较大, 一突堤以南的余流流速平均 0.06 m/s; 东炮台处有一逆时针余环流, 平均约 0.04 m/s, 该环流东部局部流速相对较大, 达 0.1 m/s; 西岸港池内部流速整体较小, 港池入口处和岸边均有程度不同的较大余流流速。

2.3 物质输运路径

在研究区海域内等距离释放 16 个拉格朗日自由粒子,并追踪粒子运移路径的方法表征拉格朗日余流。如图 9、10 所示,追踪了 15 个潮周期的粒子轨迹,考虑了平流、水平扩散等因素,计算公式^[29]:

$$\begin{cases} dx(t) = U(x, y, t)dt + dx'(t) \\ dy(t) = V(x, y, t)dt + dy'(t) \end{cases} \quad (6)$$

式中: $dx'(t)$ 、 $dy'(t)$ 为水平湍流扩散引起的自由位移;

$U(x, y, t)$ 、 $V(x, y, t)$ 分别为 x 、 y 方向上的分速度;
 $x(t)$ 、 $y(t)$ 为跟踪粒子的坐标。

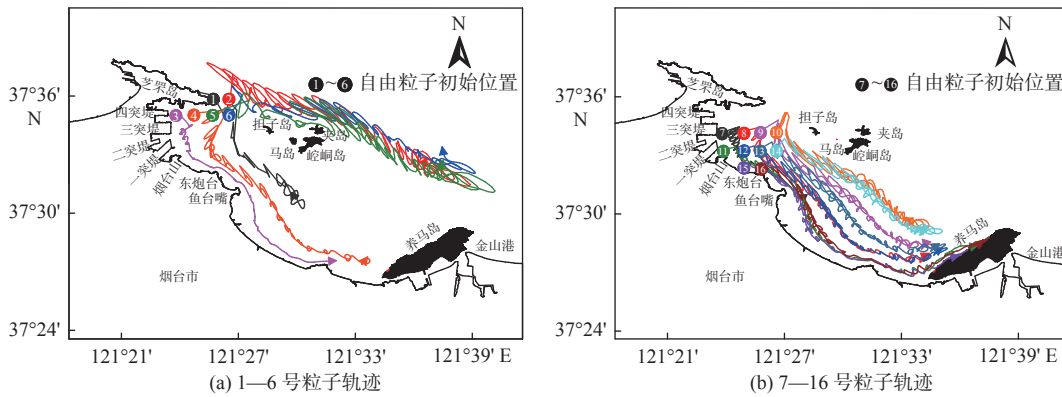


图 9 粒子轨迹

Fig.9 The particle trajectories

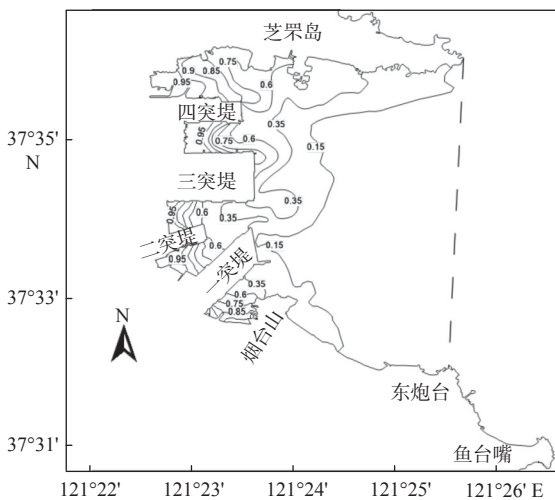


图 10 小潮期开始 16 d 后的浓度分布^[9]

Fig.10 Distribution of concentration 16 days after the beginning of neap^[9]

释放粒子的初始时刻潮流为小潮期落潮,北部研究海域释放的自由粒子 1—6 号运移轨迹如图 9a 所示,芝罘岛东北角北岸的 1 号粒子在初始位置沿岸绕一圈后,沿芝罘湾东侧震荡南下,离岸稍远的 2 号粒子回旋移动向担子岛、夹岛等岛屿的东南外海,这表明湾北外海的物质不易向湾内输运;3 号粒子较为近岸,运移轨迹为震荡较少的沿岸南下;4、5、6 号粒子离岸愈远向东运移的趋势愈明显,5、6 号粒子向东移动出海湾,并向北绕开担子岛等岛屿运移向东南外海,表明北部湾内物质易输运至外海,

有利于芝罘湾的排污。

中部和南部海湾的粒子输运情况如图 9b 所示,呈重复“∞”绳结状南下的共同特点。位于湾中部近岸的 7 号粒子在原地 E—W 向来回震荡较长时间后南下移出湾外;8—10 号先呈 NE—SW 向振荡运移,至湾南后与 11—16 号运移轨迹近一致,呈“∞”绳结状回旋南下。

根据朱金龙等^[9]的水交换情况(图 10)结合欧拉余流场对应区域的余环流及图 9 的粒子轨迹可见,三者较为呼应。湾整体余流方向为顺时针环流,湾北部余流流向湾外,携带湾内污染物质向外海,湾南则是以外海水进入湾内的净趋势冲淡污染物浓度,故北部污染物浓度高于南部。粒子运移轨迹与欧拉余流场的流速、流向有密切的关系,同时轨迹的形状也代表了区域块的向外输运物质能力,振荡徘徊的粒子轨迹经过区域的向外输运物质能力小于直线向外的轨迹经过区域。湾中央余流较小处水交换能力较小,8、9 号粒子在湾中央停留时间较长,可以推测,余环流中央造成物质的徘徊振荡运移,余流流速较小导致了水交换能力较弱,不利于物质输运。用 7、11 号粒子轨迹代表湾西部的物质运移情况,其轨迹路线在湾西区域进行 E—W 向来回振荡,物质不能及时向外输运,这是由于突堤和与之形成的半封闭港池减小了西岸沿岸流的流速,且打乱了流向。

此外可知,粒子运移轨迹绕开崆峒列岛,岛屿群周边不易受湾内物质污染,湾外南部粒子运移路径均相似,最后输向养马岛方向。据此推断,若芝罘湾受污染,养马岛景区则首当其冲受到影响。湾内北部粒子的运移趋势与相应区域的欧拉余流场整体E向的流向较为一致,其中,4、5号粒子的运移轨迹反映了这一规律,而中、南部海湾的欧拉余流场流向多变,呈顺时针旋转,粒子运移轨迹复杂,回旋徘徊,与欧拉余流场并无直接对应关系,该规律与刘鑫仓等^[13]的结论相似。

3 结论

本文基于 Mike21 模型 HD 模块,耦合粒子追踪模块,得到最新岸线形态下芝罘湾的潮流场,通过计算欧拉余流场,等距离释放自由粒子,以探讨芝罘湾目前的水动力环境与物质输运情况,得出以下结论:

(1)湾内潮流整体呈往复流,涨、落潮历时不均,落急潮流流速大于涨急潮流。湾内整体潮流流速较小,不利于湾内向外海的水交换及物质输运。东北岸流速最大,向西南靠岸渐小;湾北涨、落潮流向相反;湾中、南部流向在涨急时刻为SW向,落急时刻由南呈NW向,向北顺时针逐渐转为NE向。

(2)欧拉余流流向除湾南沿岸局部区域沿岸向南北,整体为一个中心在湾东北的顺时针余环流。余流流速整体较小,大部分区域不超过0.06 m/s,顺时针大余环流中心处小,平均约0.03 m/s,南、北两侧流速大,东北角最大达0.18 m/s。

(3)湾以北外海的物质不易向湾内输运,湾内自由粒子最终均运移出湾外,湾内无聚集,表明芝罘湾的水动力情况利于物质向外输运。受余环流影响,湾内物质输运能力区域差异性较大,环流尤其是中心流速较小的区域,粒子轨迹徘徊震荡,不利于物质的向外输运。

(4)担子岛以北的粒子向东输出湾内,与该区域欧拉余流场流向基本一致,出湾后绕开担子岛等岛屿,输运至东南外海,岛屿群不易受来自湾内物质污染;担子岛以南的粒子经过在湾内回旋振荡,以“∞”型轨迹最终南下运移向养马岛,海湾污染将对养马岛景区产生直接影响。

参考文献:

[1] 徐飞. 中国八成近海生态呈亚健康[J]. 生态经济, 2015, 31(8): 10-13.

[2] DAI Z F, ZHANG H B, ZHOU Q, et al. Occurrence of microplastics in the water column and sediment in an inland sea affected by intensive anthropogenic activities[J]. Environmental Pollution, 2018, 242(B): 1557-1565.

[3] 张善发, 王茜, 关淳雅, 等. 2001—2017年中国近海水域赤潮发生规律及其影响因素[J]. 北京大学学报(自然科学版), 2020, 56(6): 1129-1140.

[4] 王启栋, 宋金明, 袁华茂, 等. 基于“双核”新框架的烟台近岸海洋环境健康综合评价[J]. 应用生态学报, 2021, 32(11): 4068-4076.

[5] 陈宗镛, 刁焕祥, 孙湘平. 山东省志海洋志[M]. 北京: 海洋出版社, 1993.

[6] 邹春霞. 芝罘湾海港路共筑中心商业圈[N]. 烟台日报, 2011-02-21(5).

[7] 王璐, 夏瑞, 陈焰, 等. 围填海对芝罘湾生态环境的影响[J]. 环境科学研究, 2021, 34(2): 389-398.

[8] 王璐, 陈焰, 张鲁骏, 等. 围填海对芝罘湾潮流场和纳潮量的影响研究[J]. 海洋湖沼通报, 2021, 43(2): 32-39.

[9] 朱金龙, 徐艳东, 朱淑香, 等. 岸线变迁对芝罘湾海域水交换的影响研究[J]. 海洋环境科学, 2020, 39(1): 145-152.

[10] 汤世凯, 于剑峰, 李金鹏, 等. 烟台芝罘湾底质沉积物粒度特征和沉积动力环境研究[J]. 山东国土资源, 2020(1): 22-28.

[11] 赵迎春, 张瑞安. 芝罘湾港区泥沙与海流特征[J]. 海洋通报, 1990(1): 7-16.

[12] 朱金龙, 朱淑香, 魏潇, 等. 围填海影响下的芝罘湾水动力变化的数值研究[J]. 海洋湖沼通报, 2020, 42(6): 61-71.

[13] 刘鑫仓, 刘艳玲, 迟万清, 等. 渤海湾潮流致余流数值模拟研究[J]. 海岸工程, 2019, 38(3): 224-231.

[14] 姚兰芳. 烟台芝罘湾流场特征的分析[J]. 黄渤海海洋, 1991(3): 43-49.

[15] 杜逢超, 徐艳东, 于宁, 等. 近40年芝罘湾岸线时空演变及围填海活动评价[J]. 海洋科学, 2018, 42(4): 28-35.

[16] 余晓玲. 芝罘湾近期沉积物重金属污染记录与海洋环境变化[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2005.

[17] 孙贵芹, 徐艳东, 林蕾, 等. 基于遥感和GIS的烟台芝罘湾海岸线变迁研究[J]. 海洋科学进展, 2020, 38(1): 140-152.

[18] WANG Z H, LU X X, ZHANG K. Distribution and contamination of metals and biogenic elements in sediments from Zhifu Bay of the Yellow Sea, China[J]. Journal of Environmental Sciences, 2016, 41(3): 6-15.

[19] 刘苏静. 烟台近海海域典型污损生物调查及其防除研究[D]. 烟台: 中国科学院烟台海岸带研究所, 2016.

[20] 周敏. 烟台海岸带人类活动强度与近海大型藻类灾害关系研究[D]. 烟台: 鲁东大学, 2021.

[21] 袁帅, 袁鹏, 司先才, 等. 基于FVCOM的渤、黄海潮汐潮流数值模拟[J]. 海洋湖沼通报, 2020, 42(2): 10-18.

[22] 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.

[23] 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] 冯静. MIKE21FM数值模型在海洋工程环境影响评价中的应

- 用研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2011.
- [25] LI X J, HUANG M T, WANG R H. Numerical simulation of Donghu Lake hydrodynamics and water quality based on remote sensing and Mike21[J]. ISPRS International Journal of Geo-Information, 2020, 9(2): 94-113.
- [26] GOU H, LUO F, LI R, et al. Modeling study on the hydrodynamic environmental impact caused by the sea for regional construction near the Yanwo Island in Zhoushan, China[J]. *Water*, 2019, 11(8): 1674-1695.
- [27] DHI. Mike21 and Mike3 Flow Model FM Hydrodynamic and Transport Module Scientific Documentation[M]. Denmark: DHI Water and Environment, 2007.
- [28] 李孟国, 李蓓, 吴以喜, 等. JTS/T231-2-2010, 海岸与河口潮流泥沙模拟技术规程[S]. 北京: 人民交通出版社, 2010.
- [29] 程银才, 魏清顺, 赵树旗. 水力学[M]. 武汉: 华中科技大学出版社, 2019.

Numerical simulation of hydrodynamics and mass transport in Zhifu Bay

MA Xiaoge^{1,2}, CHU Zhongxin^{1,2*}, CUI Enping¹, ZHU Lin^{1,2}

(1 College of Marine Geosciences, Ocean University of China, Qingdao 266100, China; 2 Key Lab of Submarine Geosciences and Prospecting Techniques, Ministry of Education, Qingdao 266100, China)

Abstract: To provide a reference for marine ecological protection and coastal engineering construction, the tidal field of Zhifu Bay of Yantai, Shandong, was constructed using the Mike21 HD model and particle tracking under the newest shoreline pattern. Result shows that the duration of rising and falling tides is uneven, and the tidal current velocity of the maximum ebb is greater than that of the maximum flood. The velocity on the northeastern bank is the largest, and decreases gradually towards the southwestern bank. In the north of the bay, the flow direction is opposite. In the middle and south of the bay, the flow direction is SW at the moment of flood and gradually turns from south to NW then turns clockwise to NE at the moment of ebb. The Euler residual flow field of 15 tidal cycles was calculated. The residual flow direction is a clockwise residual circulation centered in the northeast of the bay except for some areas towards the south coast. The residual flow velocity is slow on the whole, less than 0.06 m/s in most areas. Sixteen free particles were released equidistantly. The particle migration trajectories show that materials in the north of the bay was hard to move into the bay, and the free particles in the bay eventually migrated out of the bay. There was no aggregation of particles in the bay, indicating that the hydrodynamic condition of Zhifu Bay was conducive to moving materials out of the bay. The particles to the north of Danzi Island were transported eastward to the bay and then bypassed Danzi Island and other islands to the open sea to the southeast. The particles to the south of Danzi Island whirled and oscillated in the bay, and finally moved southward in a ∞ -shaped trajectory.

Key words: Mike21; Zhifu Bay; hydrodynamic environment; tidal residual current; particle tracking