

DOI:10.13364/j.issn.1672-6510.20170110

## 渤海风暴潮过程的数值模拟研究

丁玉梅<sup>1</sup>, 丁磊<sup>2</sup>

(1. 天津科技大学理学院, 天津 300457; 2. 天津科技大学海洋与环境学院, 天津 300457)

**摘要:** 基于三维近海海洋模式——FVCOM (the finite volume coastal ocean model) 海洋动力学模型, 利用中尺度气象预报资料 WRF (the weather research forecasting model) 风场数据和网格嵌套方法, 通过潮汐和风场共同驱动, 建立了渤海风暴潮模型. 对 1997 年 8 月的 Winnie 台风风暴潮进行数值模拟, 研究了渤海风暴潮增减水及流场的时空变化特征. 研究表明, 渤海沿岸增水幅度较大, 水位变化明显, 潮流运动发生较大改变. 利用模拟结果, 研究了岸线变化对渤海湾风暴潮增水的影响. 岸线变化后, 曹妃甸港、天津港和黄骅港海域, 风暴潮增水有不同程度的增加, 渤海湾风暴潮灾害强度有增加的趋势.

**关键词:** 风暴潮; 数值模拟; 增减水过程; FVCOM

中图分类号: P731.23 文献标志码: A 文章编号: 1672-6510(2018)03-0057-06

## Numerical Simulation of Storm Surge in Bohai Sea

DING Yumei<sup>1</sup>, DING Lei<sup>2</sup>

(1. College of Science, Tianjin University of Science & Technology, Tianjin 300457, China;

2. College of Marine and Environmental Sciences, Tianjin University of Science & Technology, Tianjin 300457, China)

**Abstract:** Storm surge in Aug. 1997 was reproduced using a 3-D FVCOM nonlinear barotropic model. The hydrodynamic model was forced by using wind data obtained from the weather research forecasting model (WRF). The hindcast surge elevations agreed closely with in situ observations and the results showed the spatial-temporal features of the coastal water level fluctuation in Bohai Sea. The surge level increment became greater at the coast of Bohai Bay with an obvious water level fluctuation because of the Typhoon effects. The current changed in the storm surge. A series of numerical experiments were performed to study the impact of coastal engineering on storm surges. The results showed that the maximum surge level increased at Caofeidian Port, Tianjin Port and Huanghua Port, which could potentially cause severe damages.

**Key words:** storm surge; numerical simulation; water level fluctuation; FVCOM

我国是世界上海洋灾害最严重的国家之一, 海洋灾害给沿海经济发展和人民生命财产带来巨大威胁, 其中风暴潮灾害是各种海洋灾害之首. 我国海岸线漫长, 南北纵跨温带和热带. 在夏秋季节, 东南沿海由于频繁遭受台风的袭击, 容易发生台风风暴潮, 对黄渤海也会造成影响. 8509 号台风、9216 号台风、9711 号台风和 0509 号台风, 都引发了渤海风暴潮, 并对渤海沿岸经济造成一定的损失. 在春秋过渡季节, 渤海和黄海北部是冷暖空气交汇的地方, 冬季容易受冷空气和寒潮大风的袭击, 有利于温带风暴潮的

发展<sup>[1-3]</sup>. 近年来我国风暴潮的发生频率和强度都有所增加, 每年由于风暴潮灾害引起的经济损失高达上百亿元<sup>[4-5]</sup>.

为减少风暴潮灾害可能造成的损失, 国内外学者对风暴潮过程进行了大量研究. Zheng 等<sup>[6]</sup>应用 FVCOM 模型模拟了墨西哥湾飓风 Ike 风暴潮, 指出风暴潮主要是由于海面飓风和低气压引起, 也受大陆架的几何形状和水深的影响. 傅赐福等<sup>[7]</sup>利用改进的风场数据合成实验, 采用一套基于非结构网格的高分辨率风暴潮模式 (ADCIRC) 和温带风暴潮模式 (CES)

收稿日期: 2017-04-25; 修回日期: 2017-10-17

基金项目: 天津市应用基础与前沿技术研究计划资助项目 (15JCYBJC22400)

作者简介: 丁玉梅 (1972—), 女, 山东栖霞人, 副教授, dingym@tust.edu.cn

分别对几次典型温带风暴潮过程进行了数值模拟,模拟结果在增水趋势、峰值和峰值时间上与实测结果基本一致. Feng 等<sup>[8]</sup>模拟了各种典型台风过程,利用 ADCIRC 模型,研究了不同台风路径对天津港风暴潮的影响.

在渤海风暴潮研究中,对于温带和寒潮风暴潮研究较多,多数关注站位增水的研究,很少考虑增水分布和流场的分布. 目前多数风暴潮模拟过程局限于二维空间,研究风暴潮增水的变化,模拟岸线基于矩形网格或者正交网格,对岸线的拟合存在较大的误差,对台风风暴潮增水分布和流场变化研究不多,针对岸线变化对风暴潮影响的研究也较少. 本文基于 FVCOM 近岸海洋模型,建立了渤海风暴潮三维数值模型. 模型使用非结构化三角网格,能够更好地实现对复杂岸线的拟合. 采用大小网格嵌套模型,克服了由于计算区域的扩大带来的对空间步长的限制,对目标海域进行局部加密,提高了模型的分辨率. 利用该模型,研究了渤海台风风暴潮增水和流场的变化特征,以及岸线变化对风暴潮的响应.

### 1 计算区域及模型设置

FVCOM 模型是基于三角网格和有限体积法的三维近海海洋模式,目前广泛用于河口和复杂岸线的模拟. 模型所使用的有限体积法能够从通量的角度考虑水体的运动,保证水体动量、质量和能量的守恒. 模型的控制方程组参见文献[9]. 文中大区模型的计算区域包括黄渤海,开边界设在长江口北岸到韩国济州岛连线. 小区模型的计算区域为整个渤海海域,开边界设在渤海海峡的东部. 研究区域的地形、水深及 Winnie 台风路径如图 1 所示.

模型中水深数据采用 Choi 等<sup>[10]</sup>(Laboratory for Coastal and Ocean Dynamics Studies Sungkyunkwan University)提供的 1'×1'的东中国海的水深数据插值到网格点上. 渤海湾地区的岸线数据是通过卫星反演获得 2000 年高分辨率岸线<sup>[11]</sup>,分辨率为 0.001°.

采用 2000 年的渤海岸线,对渤海潮汐和风暴潮过程进行模拟. 大区模型在渤海近岸的分辨率为 1 000 m,逐渐向外增加到开边界 30 000 m. 网格节点数是 14 633 个,三角形单元个数是 28 236 个,开边界节点个数是 18 个. 对小区模型进行了精细网格划分,在渤海湾沿岸附近分辨率为 300 m,随着离岸距离的增加,分辨率依次变化为 1 000 m、2 000 m、4 000 m 和 8 000 m,到渤海海峡开边界区域,达到

10 000 m. 网格节点数为 66 040 个,三角形单元个数为 129 710 个,开边界节点个数为 27 个. 单元模型采用正压模型,温度和盐度分别为 10 °C 和 30. 外模时间步长为 3 s,内外模时间步长之比为 10 : 1. 采用 OTPS(the Oregon State University Tidal Prediction Software)潮预报模式预报的实时水位进行驱动,选取 8 个主要分潮 M<sub>2</sub>、S<sub>2</sub>、N<sub>2</sub>、K<sub>2</sub>、K<sub>1</sub>、O<sub>1</sub>、P<sub>1</sub>、Q<sub>1</sub> 合成大区模型开边界潮位,大区模型的计算结果为小区模型提供开边界水位条件. 大小区模型使用的风场均为中尺度气象预报模型(WRF)模拟的风场数据,时间分辨率是每 3 h 一次,空间分辨率是 0.1°×0.1°.

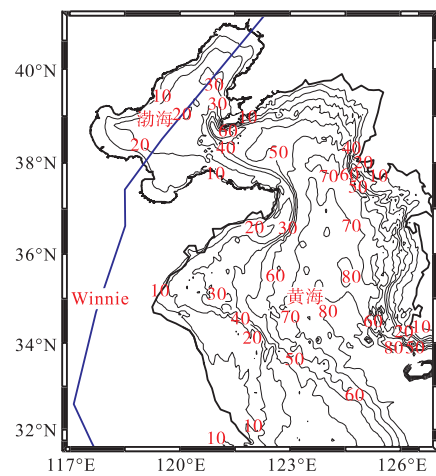


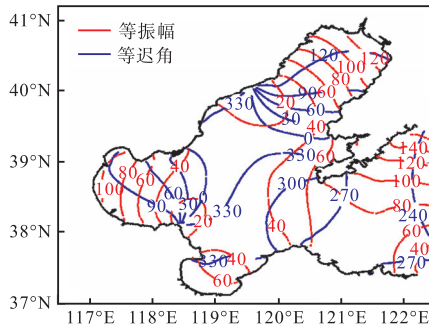
图 1 研究区域的地形及水深和 Winnie 台风路径  
Fig. 1 The terrain and water depth of the studied region and the tracks of Typhoon Winnie (Blue line)

### 2 模型验证

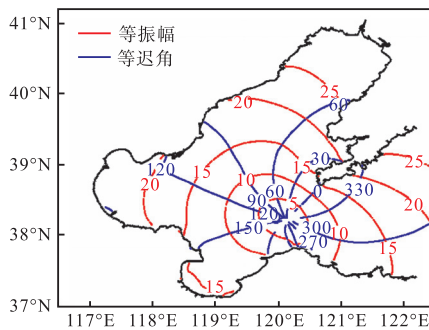
首先对渤海潮汐过程进行模拟,利用 T-tide 软件,对渤海各个主要分潮进行了调和分析,与海图和验潮站潮汐实测数据进行对比,对模型进行校正,使模型能够较好反映渤海潮汐过程. 调和分析得到的调和常数与海图对比基本一致,与实测数据也基本一致. 图2分别为模拟的渤海海域 M<sub>2</sub>、K<sub>1</sub>分潮的等振幅和等迟角图. 潮汐模拟及误差分析参见文献[12-13].

建立了渤海风暴潮模型,对 1997 年 8 月渤海 Winnie 台风风暴潮进行数值模拟,对天津港的风暴潮增水模拟和实测数据时间序列进行对比分析(图 3). 在风暴潮增水前期,模拟与实测数据增水趋势基本一致;在风暴潮中期,模拟天津港最大增水是 2.04 m,实测最大增水 1.99 m,相对误差为 0.025;在增水的后期,误差较大,相关系数为 0.78. 其原因可能是风场模拟或者底摩擦系数的影响. 模拟结果表

明,建立的渤海风暴潮模型对风暴潮增水极值及趋势的模拟结果与实测结果基本一致,可以用来研究渤海海域的风暴潮过程.



(a) M<sub>2</sub>分潮



(b) K<sub>1</sub>分潮

图2 模拟的渤海海域 M<sub>2</sub> 和 K<sub>1</sub> 分潮的等振幅和等迟角图

Fig. 2 Simulated co-amplitude (in meters) and co-phase (in degrees) maps of M<sub>2</sub> and K<sub>1</sub> tidal elevations in Bohai Sea

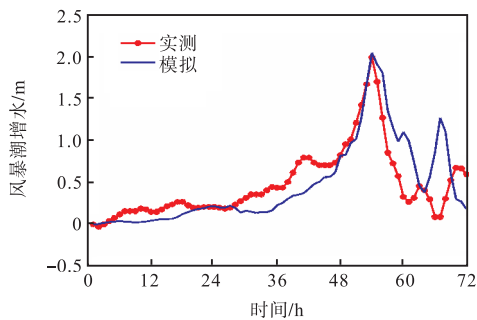


图3 天津港 1997年8月 Winnie 台风风暴潮增水模拟与实测数据对比

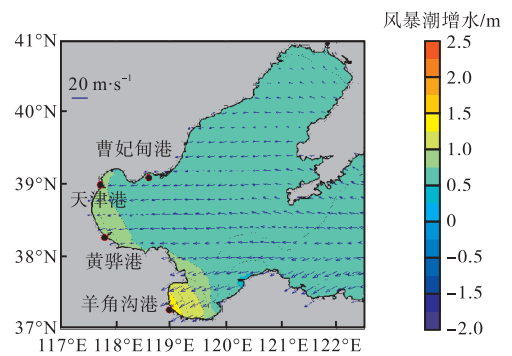
Fig. 3 Simulated and observed storm surge heights at Tianjin Port in August 1997

### 3 模拟结果分析

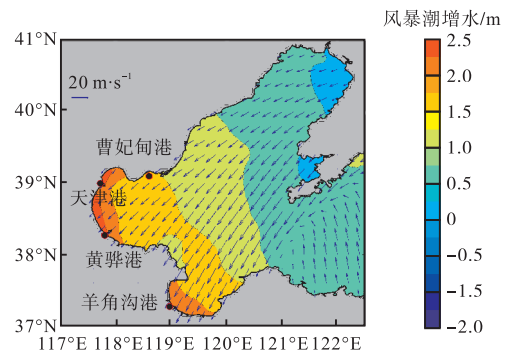
#### 3.1 渤海海域风暴潮增水变化

东北方向大风容易引发渤海风暴潮. 渤海风暴

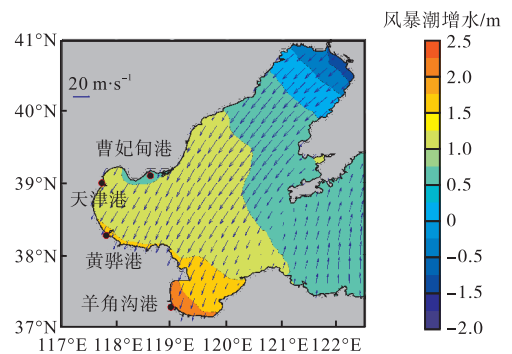
潮影响最大的区域为渤海湾, 其次是莱州湾(图4). 风暴潮初期, 由于受 Winnie 台风的影响, 黄海中部和北部的水体经渤海海峡进入渤海中西部. 初始阶段, 在东北风的作用下, 1997年8月19日23时, 莱州湾出现少量增水. 在激振阶段, 莱州湾增水逐渐增大, 随后, 渤海湾出现明显增水, 并逐渐增强. 增水幅度达到高峰, 维持在 2.0 ~ 2.5 m, 持续时间约 6 h. 余振阶段, 渤海湾和莱州湾的增水幅度下降, 受风向的影响, 莱州湾增水持续时间较长, 辽东湾呈现显著减水趋势. 此次台风风暴潮, 渤海湾和莱州湾呈现较大增水, 增水较大的是天津港、黄骅港和羊角沟港海域, 辽东湾减水明显(图4).



(a) 1997-08-19 23:00



(b) 1997-08-20 13:00



(c) 1997-08-20 21:00

图4 渤海3个典型时刻的风暴潮增水和风场图

Fig. 4 Simulated surge level and wind field at three typical times in Bohai Sea

### 3.2 渤海湾三大海域风暴潮增水变化

1997年8月曹妃甸港、天津港和黄骅港海域最大风暴潮增水分布如图5所示。

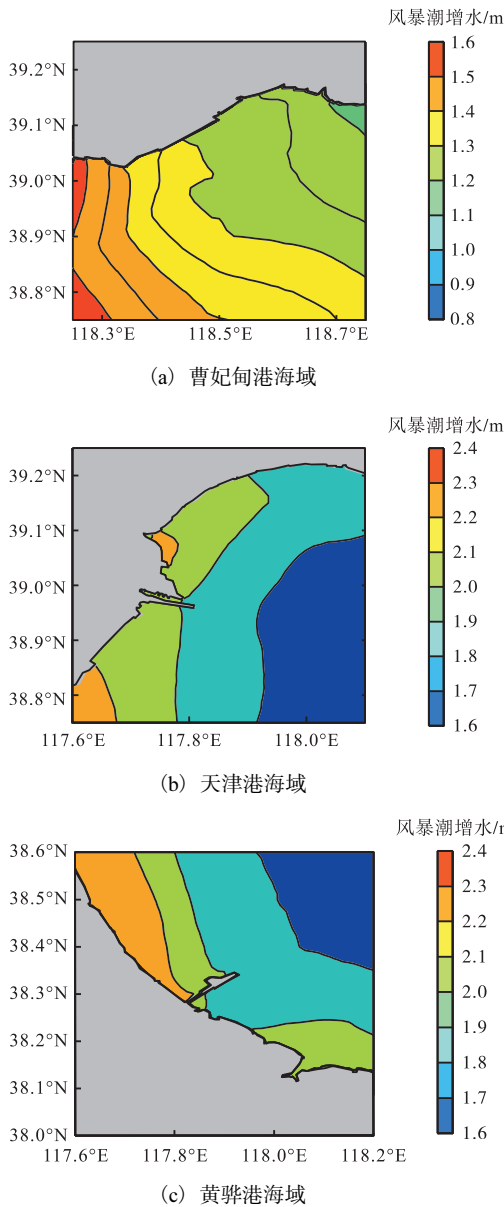


图5 1997年8月曹妃甸港、天津港和黄骅港海域最大风暴潮增水分布

Fig.5 Simulated maximum storm surge level in August 1997 at Caofeidian Port, Tianjin Port and Huanghua Port

曹妃甸港海域位于渤海湾湾口北侧, 风暴潮期间, 自东北向西南方向, 最大增水逐渐增加, 从 1.1 m 到 1.4 m。但是, 考虑到曹妃甸港海域整体水位不高, 因此, 危害程度不大。天津港海域位于渤海湾的最西端, 受风时、风区的影响, 港区自西向东风暴潮增水逐渐增加, 近岸海域最大增水达到 2.1 m。在海域北部和西南部局部最大增水达到 2.2 m。由于天津港海

域的最高水位平均在 5.0 m, 达到或者超过警戒水位 (警戒水位 4.8 m), 因此, 风暴潮灾害的危害程度较大。黄骅港海域位于古黄河冲积区, 与上述两个海域不同, 该港口附近海域水浅坡缓。风暴潮期间, 在港区的西北部和东南部, 风暴潮最大增水逐渐增加, 北部近岸达到 2.3 m 左右。考虑到黄骅港水位较高, 平均水位达到 5.0 m, 超过了警戒水位, 因此, 风暴潮灾害的危害程度较大。

### 3.3 渤海湾三大海域风暴潮流场的变化

利用模拟结果, 将潮汐和风生流总流场减去仅有潮流驱动流场, 研究了 Winnie 台风风暴潮过程中风暴潮流场的分布。其中, 流场分布选取的是风暴潮期间涨潮时的瞬时流场, 流速选取的是风暴潮期间 72 h 的平均流速 (图 6、图 7)。

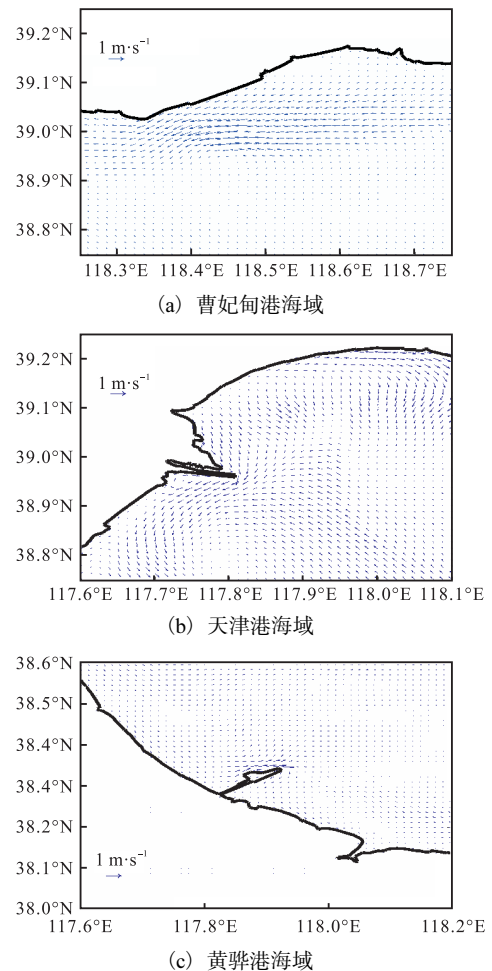


图6 1997年8月曹妃甸港、天津港和黄骅港海域风暴潮期间增水时的风暴潮流场分布 (总流场减去潮流)

Fig.6 Simulated stormy current field caused by typhoon in August 1997 at Caofeidian Port, Tianjin Port and Huanghua Port

大风作用使海区潮流动力失衡, 流场变化较大, 同时增加了水流沿堤、沿岸流动的趋势<sup>[14-16]</sup>。台风对

风暴潮流场的影响主要集中在海堤前沿附近, 流场受风场、地形及岸线的影响很大, 在海堤附近, 流速较大, 流场分布和平均流速的变化一致(图6和图7). 风暴潮平均流速沿着等深线呈带状分布, 与岸线和等深线基本平行, 影响范围主要集中在近岸附近. 在靠近岸线的附近, 流速减少; 在距离岸线一定距离的小范围内, 特别是在围堤附近, 流速增大; 随着离岸距离的增大, 流速逐渐减弱, 湾内开阔的海域, 流速的变化比较平缓<sup>[17-19]</sup>. 渤海湾水动力条件的变化将会导致近岸海域产生相应的冲淤变化, 导致工程海域附近的泥沙、污染物的运移规律发生变化.

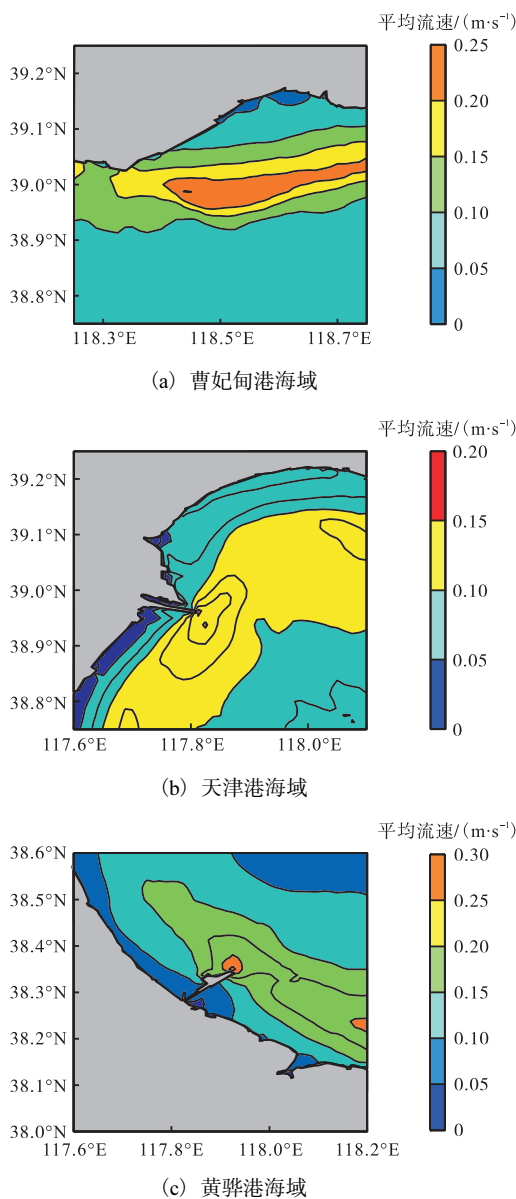


图7 1997年8月曹妃甸港、天津港和黄骅港海域风暴潮期间风暴潮平均流速分布

Fig. 7 Simulated mean stormy velocity (color shading, in meters per second) of typhoon in August 1997 at Caofeidian Port, Tianjin Port and Huanghua Port

在曹妃甸港海域, 大风对近岸影响较大, 水体基本呈自东向西流动. 在近岸南部, 近岸流速呈增加趋势, 平均流速在 0.1 ~ 0.2 m/s. 在北部近岸由于建筑物的阻水效应, 风暴潮潮流明显减弱.

在天津港海域, 水流呈现出沿建筑物边缘流动的特点. 由于黄海水体的作用以及港口建筑物的阻水效应, 对港口附近的流场要强于近岸流场. 港口附近流场平均流速在 0.1 ~ 0.15 m/s. 港口附近多为西向流和偏西南方向的沿岸流. 近岸流速基本表现为减少趋势.

黄骅港海域地形较为平坦, 受渤海西支逆时针旋转的潮波运动控制, 海域潮流为明显的逆时针旋转流, 东北方向大风作用下尤其突出. 港堤两侧的潮流呈现沿堤流特性, 流向几乎垂直岸线, 南北两侧近岸流速逐渐减少, 在门口处形成横流, 在北侧靠近门口处, 流速较大, 平均流速 0.15 ~ 0.2 m/s.

### 3.4 岸线变化对渤海湾风暴潮增水的影响

近年来, 渤海地区大力发展海洋经济, 兴起围填海的热潮. 从2000年到2010年的10年间, 渤海湾围填海面积多达 600 km<sup>2</sup>, 岸线增加 331.6 km<sup>[11]</sup>. 海堤建设改变局地海岸岸线、地形, 改变不同深度的海域面积和岸线长度, 会影响到海域的水动力环境, 并对风暴潮过程造成一定的影响<sup>[20-21]</sup>. 利用该模型, 研究了2000年和2010年岸线变化后, 渤海湾风暴潮增水的变化. 围填海工程后, 水深较浅的天津港和黄骅港东北部和西南部的风暴潮灾害风险在增加, 在水深较大的曹妃甸港海域, 受岸线变化的影响, 风暴潮增水明显. 曹妃甸港和天津港海域, 由原来的一般强度风暴潮灾害, 改变为较大强度的风暴潮灾害. 黄骅港海域, 由原来的较大强度的风暴潮灾害增加为大强度的风暴潮灾害<sup>[22-23]</sup>(表1). 这需要在围填海工程设计和堤防设计中引起重视.

表1 岸线变化前后对渤海湾台风风暴潮灾害强度级别的影响

Tab. 1 Effect of coastal engineering on the intensity of the storm surge disaster in Bohai Bay

海域	最大增水/m		风暴潮强度级别	
	2000年	2010年	2000年	2010年
曹妃甸港	1.1 ~ 1.4	1.2 ~ 1.6	2级 (一般强度)	3级 (较大强度)
天津港	1.8 ~ 2.2	1.8 ~ 2.4	2 ~ 3级 (一般强度)	3级 (较大强度)
黄骅港	1.8 ~ 2.3	1.8 ~ 2.5	3 ~ 4级 (较大强度)	4级 (大强度)

## 4 结 语

基于 FVCOM 海洋动力学模型, 建立了渤海三

维风暴潮模型. 采用大小网格嵌套的方法, 对渤海近岸区域进行加细模拟, 提高了模型的模拟分辨率和准确性. 对渤海 Winnie 台风风暴潮过程进行数值模拟, 分析了渤海风暴潮增水及流场的分布特征, 并研究了海岸工程对渤海湾台风风暴潮的影响.

东北向的大风容易引发渤海风暴潮增水. 风暴潮期间, 渤海湾增水明显, 莱州湾次之, 辽东湾出现显著减水. 在渤海湾, 曹妃甸港、天津港和黄骅港等近岸海域风暴潮增水较大, 流场发生较大改变, 沿岸流、沿堤流增强. 海岸工程的建设改变了岸线形态, 渤海湾海域近岸工程后风暴潮最大增水在增加. 特别是在风暴潮的中期, 海岸工程使渤海湾风暴潮水位增加, 曹妃甸港、天津港和黄骅港海域的风暴潮灾害强度都有不同程度的增大.

岸线变化对渤海湾海域风暴潮增水影响明显, 在海岸工程和堤防设计中, 需要考虑风暴潮增水对海堤防护的不利影响. 本文仅局限于个例进行了研究, 模拟结果也有待于改进. 今后将会深入研究风暴潮增水的动力学机制以及岸线变化对渤海风暴潮增水及流场变化的响应.

#### 参考文献:

- [ 1 ] 冯士筭. 风暴潮导论[M]. 北京: 科学出版社, 1982.
- [ 2 ] 冯士筭, 张经, 魏皓. 渤海环境动力学导论[M]. 北京: 科学出版社, 2007.
- [ 3 ] 吴少华, 王喜年, 宋珊, 等. 天津沿海风暴潮灾害概述及统计分析[J]. 海洋预报, 2002, 19(1): 29-35.
- [ 4 ] 董月娥, 左书华. 1989 年以来我国海洋灾害类型、危害及特征分析[J]. 海洋地质动态, 2009, 25(6): 32-37.
- [ 5 ] 李鑫, 章卫胜, 张金善, 等. 一次典型寒潮风暴潮过程的数值模拟研究[J]. 海洋科学进展, 2010, 28(1): 8-16.
- [ 6 ] Zheng L, Weisberg R H, Huang Y, et al. Implications from the comparisons between two- and three-dimensional model simulations of the Hurricane Ike storm surge[J]. Journal of Geophysical Research: Oceans, 2013, 118(7): 3350-3369.
- [ 7 ] 傅赐福, 董剑希, 吴少华, 等. 渤海典型温带风暴潮数值模拟及改进实验[J]. 海洋预报, 2011, 28(5): 1-8.
- [ 8 ] Feng X, Yin B, Yang D. Effect of hurricane paths on storm surge response at Tianjin, China[J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 2012, 106: 58-68.
- [ 9 ] Chen C S, Liu H D, Beardsley R C. An unstructured, finite-volume, three-dimensional, primitive equation ocean model: Application to coastal ocean and estuaries [J]. Journal of Atmospheric and Ocean Technology, 2003, 20: 159-186.
- [ 10 ] Choi B H, Kim K O, Eum H M. Digital bathymetric and topographic data for neighboring seas of Korea [J]. Journal of Korean Society of Coastal and Ocean Engineers, 2002, 14(1): 41-50.
- [ 11 ] 李秀梅, 袁承志, 李月洋. 渤海湾海岸带遥感监测及时空变化[J]. 国土资源遥感, 2013, 25(2): 156-163.
- [ 12 ] 陈波昌, 魏皓. FVCOM 模型在渤海湾潮流潮汐模拟中的应用[J]. 天津科技大学学报, 2013, 28(4): 40-43, 69.
- [ 13 ] Ding Y M, Wei H. Modeling the impact of land reclamation on storm surges in Bohai Sea, China [J]. Natural Hazards, 2017, 85(1): 559-573.
- [ 14 ] 陆永军, 左利钦, 季荣耀, 等. 渤海湾曹妃甸港区开发对水动力泥沙环境的影响[J]. 水科学进展, 2007, 18(6): 793-800.
- [ 15 ] 刘仲军, 刘爱珍, 于可忱. 围填海工程对天津海域水动力环境影响的数值分析[J]. 水道港口, 2012, 33(4): 310-314.
- [ 16 ] 匡翠萍, 刘鹏晨, 顾杰, 等. 黄骅港外航道整治工程对风暴潮流下泥沙运输的影响[J]. 泥沙研究, 2014(1): 39-46.
- [ 17 ] 陈春华, 侍茂崇, 孙士才, 等. 琼州海峡和海口湾台风引起的水交换研究[J]. 海洋环境科学, 1997, 16(3): 8-13.
- [ 18 ] 冯兴如, 杨德周, 尹宝树. FVCOM 在龙口海域潮汐潮流模拟中的应用研究[J]. 海洋科学, 2010, 34(6): 94-99.
- [ 19 ] 聂源, 羊天柱, 许雪峰. 基岩海岸围填海工程后的流场变化[J]. 海洋学研究, 2009, 27(4): 45-54.
- [ 20 ] 赵鹏. 渤海寒潮风暴潮增水风险的数值研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2010.
- [ 21 ] 赵鑫, 孙群, 魏皓. 围填海工程对渤海湾风浪场的影响[J]. 海洋科学, 2013, 37(1): 7-16.
- [ 22 ] 许启望, 谭树东. 风暴潮灾害经济损失评估方法研究[J]. 海洋通报, 1998, 17(1): 1-12.
- [ 23 ] 谢丽, 张振克. 近 20 年中国沿海风暴潮强度、时空分布与灾害损失[J]. 海洋通报, 2010, 29(6): 690-696.

责任编辑: 周建军