doi:10.3969/j.issn.1003-2029.2020.03.014

围填海工程对渤海寒潮风暴潮能量场的影响

刘 欣,邓晓卓,郑欣田,王敬烜,李泉杰,丁玉梅*
(天津科技大学,天津 300457)

摘 要:本文基于三维有限体积 FVCOM 海洋动力模型,通过潮汐和风场共同驱动,建立了渤海精细尺度寒潮风暴潮模型。利用 2000 年和 2010 年的渤海岸线,对 2003 年 10 月的渤海寒潮风暴潮过程进行数值模拟,研究了围填海工程前后,渤海寒潮风暴潮能量场的变化。研究结果表明,岸线变化后,渤海海域风暴潮能量场变化明显,曹妃甸港和黄骅港等站位的风暴潮水位相对有少量增加,对应的势能能量密度有增加的趋势,相反各站位风暴潮流速有所减弱,因此对应的动能能量密度有相对减少的趋势。在黄骅港站位,由于势能能量密度大于动能能量密度,总能量密度受势能能量密度的影响较大,总能量密度相对有增加的趋势;在曹妃甸港站位,风暴潮总能量密度受动能能量密度的影响较大,总能量密度相对有减少的趋势。

关键词:围填海;风暴潮;能量场;数值模拟;FVCOM 动力模型;渤海
中图分类号:P731.2 **文献标志码**:A **文章编号**:1003-2029(2020)03-0095-06

风暴潮是由热带气旋、温带气旋以及寒潮大风等大气扰动引起的局地海平面异常升高或降低的现象[1]。风暴潮灾害是全球范围内最严重的海洋灾害,在西北太平洋沿岸国家中,我国是风暴潮灾害发生次数最多、损失最严重的国家之一[2-3]。渤海地处中国大陆东部北端,属于半封闭浅海,平均水深只有 18 m,在春、秋季节,我国渤海和黄海北部容易遭受寒潮风暴潮的影响[1,4]。近年来,渤海地区大力发展海洋经济,兴起围填海造地、海堤和港口的热潮。统计数据显示,从 2000 年到 2010 年的 10 年间,渤海海域的围填海面积多达 600 km^2, 岸线增加了 331.6 km[5],其中天津滨海新区共围垦滩涂 108 km^2,曹妃甸新区共围垦滩涂 110 km^2。大规模的围填海工程在产生巨大社会经济效益的同时, 也给海洋生态环境造成了深远的影响[6]。海堤建设改变局地海岸岸线和地形,改变不同深度的海域面积和岸线长度,对于潮波和风暴潮等重力长波的传播、折射、反射和底能量耗散等产生很大影响, 围填海工程能够改变波动的相位和能量空间分布, 直接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[7-8]。

Xie Y 等[9]利用 Mike 软件建立了风暴潮模型,指出围填海引起的海平面边界改变是影响杭州湾风暴潮的主要因素,岸线变化使杭州湾风暴潮增水在增加。Guo Y 等[10]指出,海岸工程使杭州湾湾口局部变得狭窄,海底地形发生改变,限制了流场的运动,使风暴潮水位升高。赵鑫等[11]利用 SWAN 模型,研究了岸线变化对渤海湾风浪场的影响,指出围填海工程对波浪有效波高及波周期的影响程度不大。Ding Y 等[12]研究了围填海工程对渤海风暴潮增水的影响,使塘沽港等站位的风暴潮增水增加明显。本文利用 FVCOM 浅海动力模型[13],对渤海寒潮风暴潮过程进行数值模拟和动力机制分析,研究围填海工程对渤海寒潮风暴潮能量场的影响。

1 模型设置与评价

基于 FVCOM 浅海动力模型, 建立了渤海潮汐

收稿日期:2020-02-04
基金项目:国家级大学生创新训练资助项目(201910057265);天津市应用基础与前沿技术研究计划资助项目(19JCYBJC22000);天津市高等学校基本科研业务费资助项目(2018KJ12)
作者简介:刘欣(2000-),女,本科,主要从事数值计算研究。E-mail:1771693662@qq.com
通讯作者:丁玉梅(1972-),女,博士,副教授,研究方向为海洋灾害数值模拟。E-mail:dingym@tust.edu.cn

和风暴潮模型，对 2003 年 10 月的渤海潮汐过程和寒潮风暴潮过程进行数值模拟。模型采用 2000 年渤海岸线和围填海工程后的 2010 年岸线数据，模型中的水深数据采用 Choi B H 等[14]提供的东中国海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高分辨率岸线[5]，分辨率为 0.001°。

模型的研究区域为整个渤海海域，开边界设在渤海海峡的东部。模型研究区域的经纬度范围为北纬 37°~41°，东经 117°~123°。研究区域的地形及水深见图 1。

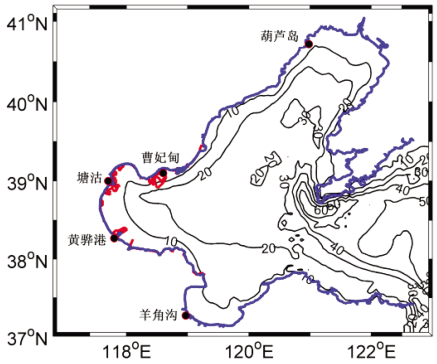


图 1 模型研究的渤海海域地形和水深图

（其中:蓝色实线是 2000 年岸线，红色实线是 2010 年岸线）

利用渤海 2000 年海岸线数据进行潮汐和风暴潮数值模拟，并对模拟数据进行验证分析。首先利用 SMS 软件，对模型研究海域进行三角形网格划分。在渤海湾塘沽港沿岸附近，模型设置的网格分辨率为 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。三角形网格节点数为 66 040 个，网格单元个数为 129 710 个，开边界节点个数为 27 个。在开边界，利用 OTPS 软件预报得到实时水位驱动，对 M_2、S_2 和 K_1 等 8 个主要分潮进行调和分析，提供海洋水边界条件。模型使用的风场数据来自中尺度气象预报模型 WRF 风场数据[15]，时间分辨率是每 3 小时一次，空间分辨率是 0.1°×0.1°，利用潮汐和风场共同驱动 FVCOM 模型。

结合渤海潮汐模型的输出数据，利用 T-tide 软件对渤海各个主要分潮进行了调和分析，调和分析得到的调和常数与验潮站的观测数据基本一致（表 1）。

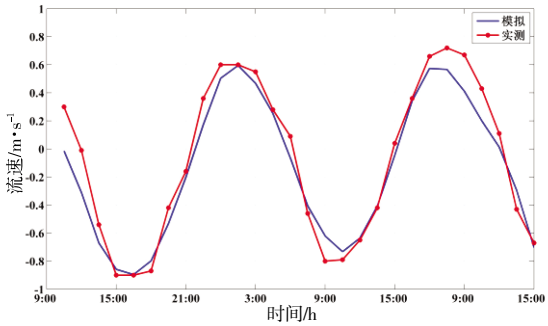
表 1 M_2 分潮调和常数观测值和模拟值的比较

验潮站	位置		振幅/cm			迟角/°		
	纬度(°N)	经度(°E)	模拟	观测	绝对误差	模拟	观测	绝对误差
塘沽	39.00	117.72	117.3	117.0	0.3	89.0	90.9	-1.9
大口河	38.25	117.85	115.0	112.0	3.0	109.5	109.0	0.5
洼拉沟	38.13	118.25	81.4	84.0	-2.6	113.9	127.0	-13.1
曹妃甸	39.95	118.52	66.1	73.0	-6.9	67.6	74.0	-6.4
秦皇岛	39.92	119.62	15.8	11.0	4.8	306.7	311.0	-4.3
龙口	37.65	120.32	36.8	40.0	-3.2	328.5	316.0	12.5
娘娘庙	40.18	120.33	24.2	25.0	-0.8	157.9	162.0	-4.1
蓬莱	37.83	120.73	55.5	53.0	2.5	286.3	292.0	-5.7
葫芦岛	40.72	120.98	96.9	96.0	0.9	145.0	150.0	-5.0
振幅差的平均值 -0.2			迟角差的平均值 -3.0					
振幅差的标准差 3.6			迟角差的标准差 6.9					

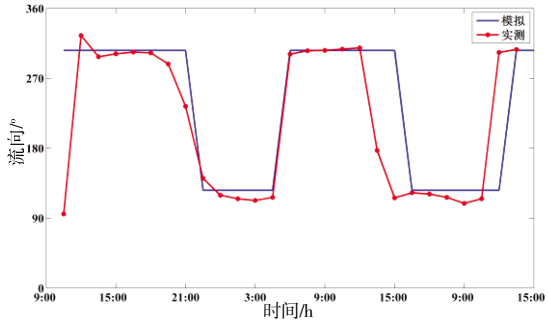
图 2 和图 3 分别是模拟得到的曹妃甸港和黄骅港的潮汐流速分量，图中显示潮汐最大流速在 0.4~0.6 m/s 之间，流向为明显的往复流，呈现明显的不正规半日潮特征，模拟的流速和流向数据与实测数据进行对比分析，结果和实测数据基本吻合。对 2003 年 10 月渤海寒潮风暴潮过程进行数值模拟，计算塘沽站风暴潮增水和风速时间序列，二者的相关系数为 0.95，成显著相关。气压场对渤海风暴潮的影响效应不明显。在渤海海域，和风场相比气压场是一个小量，可以不予考虑，风应力是渤海风暴潮的主要强迫动力[1]。对塘沽站等站位的风暴潮增水和实测增水数据的时间序列进行了对比，模型数据与实测数据在增水极值、过程、趋势都基本一致[12,16]。这说明本文建立的潮汐模型和风暴潮模型可以用来研究渤海海域的寒潮风暴潮过程及其动力学特征。

2 模拟结果分析

围填海工程对岸线影响较大的是渤海湾，其次

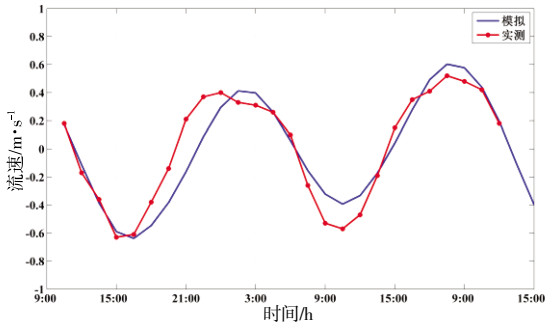


(a) 潮汐流速比较

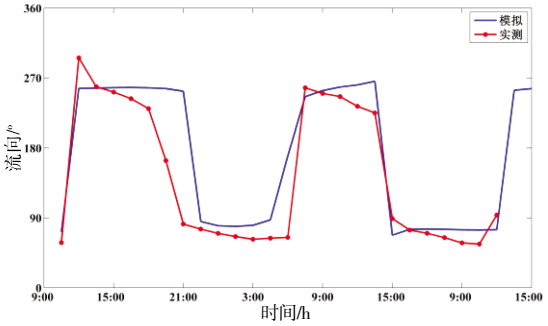


(b) 潮汐流向比较

图 2　模拟的曹妃甸港潮汐流速和流向与实测数据对比



(a) 潮汐流速比较



(b) 潮汐流向比较

图 3　模拟的黄骅港潮汐流速和流向与实测数据对比

是莱州湾，最后是辽东湾。为了进行对比，选取渤海湾海域的曹妃甸港、塘沽港和黄骅港以及莱州湾的羊角沟港、辽东湾的葫芦岛港作为五个主要站位（图 1），考察各站位能量密度的分布，研究岸线变化对渤海寒潮风暴潮能量场的影响。

风暴潮能量密度是指单位面积的水柱体所具有的动能能量密度与势能能量密度之和，自海底到海面单位面积水柱体所包含的能量密度如下[17-18]，

$$E=Ke+Pe=\frac{\rho}{2}[H(u^2+v^2)+g\zeta^2]$$

式中：E 表示总能量密度；Ke 表示动能能量密度，Pe 表示势能能量密度；ρ=1.025×10³ kg/m³ 表示海水密度；g=9.8 m/s² 表示重力加速度；H 表示海底到海面的总水深；ζ 表示水位；u 和 v 分别表示垂向平均的关于 x 方向和 y 方向的流速分量。

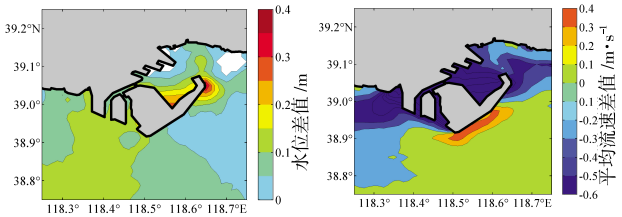
2.1　围填海工程对曹妃甸港能量密度的影响

曹妃甸港位于渤海湾湾口东北部，与 2000 年岸线相比，围填海工程使其岸线形状发生显著变化。图 4-a 显示，寒潮风暴潮期间，岸线变化使曹妃甸港风暴潮水位有少量增加，增幅大约在 0.2 m 左右。岸线变化后，曹妃甸港海域的风暴潮流速明显减少，特别是沿岸海域，风暴潮流速减幅在 0.2~0.6 m/s 左右（图 4-b）。

根据能量密度方程，计算了曹妃甸港围填海工程前后风暴潮期间的能量密度变化。如图 5 显示，如果不考虑岸线变化，在风暴潮中期，风暴潮能量密度有明显增加的趋势，这是由于风暴潮期间风应力的作用，使风暴潮流速和水位都有明显增加。考虑岸线变化后，在风暴潮初期，由于曹妃甸港水位较低，因此势能能量密度较小，岸线变化前后势能能量密度变化不大。随着风暴潮水位逐渐增加，曹妃甸港的势能能量密度逐渐增加，特别是在风暴潮中期，势能能量密度最大增加幅度大约是2×10³ kg/s²（图 5-a），在风暴潮期间，势能能量密度有明显的震荡，分析这与潮汐振幅的周期性有关。岸线变化后，在风暴潮初期，曹妃甸港动能能量密度变化不大。在风暴潮中期，相比 2000 年，由于受围填海工程阻水效应的影响，风暴潮流速有明显减少的趋势，水动力明显减弱直接导致曹妃甸港风暴潮动能能量密度显著减少（图 5-b）。图 5-c 显示，由于曹妃甸港沿岸水位较浅，势能能量密度与动能能量密度量阶相同，而动能能量密度变化较大，曹妃甸港的总能量密度变化受动能能量密度变化的影响，因此总能量密度相对有减弱的趋势。

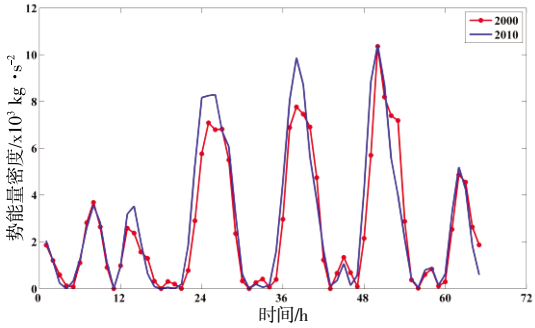
总之，围填海工程后，在风暴潮初期，曹妃甸港能量密度变化不大。在风暴潮中期，在寒潮大风以及潮汐和风暴潮的相互作用下，曹妃甸港的势能能量密度有增加的趋势，由于港口建筑物的阻水效应

和岸线形态的约束作用，水动力明显减弱，动能能量密度有减弱的趋势，曹妃甸港总能量密度受动能能量密度的影响，有明显减少的趋势。

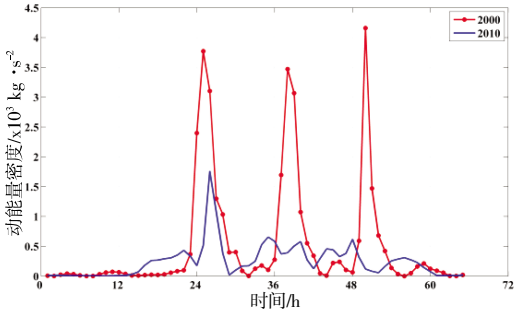


（a）风暴潮水位的比较 （b）风暴潮流速的比较

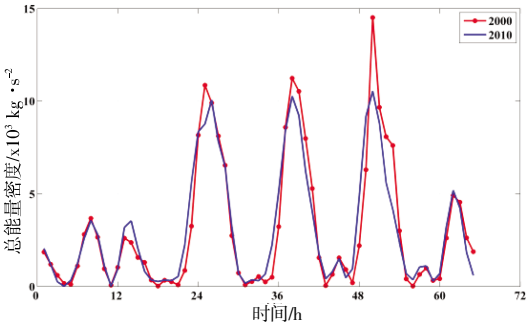
图 4 围填海工程前后曹妃甸港风暴潮水位和平均流速的比较



（a）势能能量密度的比较



（b）动能能量密度的比较



（c）总能量密度的比较

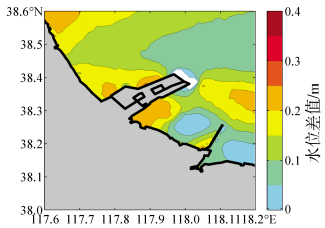
图 5 围填海工程前后曹妃甸港风暴潮能量密度的比较

2.2 围填海工程对黄骅港能量密度的影响

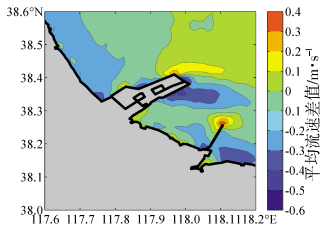
黄骅港位于环渤海经济圈的中部，是古黄河河口冲积区，港口附近水浅坡缓，是典型的人工大港，也是我国的主要煤炭输出港之一，港口建筑物向东北方向延伸，其形状和寒潮东北风向大致相同。围填海工程后，黄骅港南北两侧海域的风暴潮水位有少量增加，增幅在 0.1~0.3m 之间（图 6-a）。岸线变化后风暴潮流速有相对减少的趋势，模拟的风暴潮平均流速相对减少了 0.1~0.3 m/s（图 6-b）。

不考虑岸线的变化，在风暴潮中期，由于东北向寒潮大风的作用，黄骅港的风暴潮水位和流速都明显增加，因此对应的势能、动能和总能量密度有明显增加的趋势（图 7）。岸线变化后，在风暴潮初期，由于风暴潮水位较小，因此黄骅港势能能量密度变化不大。在风暴潮中期，随着风暴潮水位的增加，黄骅港势能能量密度逐渐增加，在峰值处增加较大，出现最大增幅大约在 6×10^3 kg/s^2，最大增加量出现的时间和趋势与风暴潮水位增加相一致（图 7-a）。在风暴潮初期和后期，黄骅港动能能量密度较小而且变化不大，这是由于风暴潮流速变化较小的原因。在风暴潮中期，由于受岸线变化和港口建筑物的影响，黄骅港海域南北两侧的风暴潮平均流速相对有减少的趋势，因此黄骅港风暴潮动能能量密度有相对减弱的趋势，最大减幅大约在 3×10^3 kg/s^2（图 7-b）。从总体趋势来看，由于黄骅港势能能量密度比动能能量密度相对较大，因此总能量密度受势能能量密度的影响较大，有相对增加的趋势，最大增幅大约在 5×10^3 kg/s^2（图 7-c）。

总之，围填海工程后，在寒潮风暴潮期间，由于寒潮大风的作用，黄骅港水位上升，风暴潮势能能量密度有所增加，由于港口建筑物的阻水效应，风暴潮流速有所减弱，对应的动能能量密度有相对减少的趋势，计算显示黄骅港的总能量密度受势能能量密度的影响较大，因此总能量密度有增加的趋势。

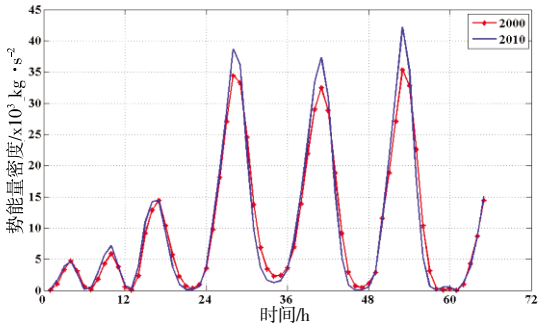


（a）风暴潮水位的比较

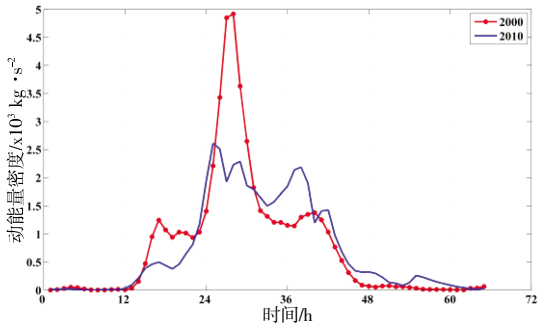


（c）风暴潮流速的比较

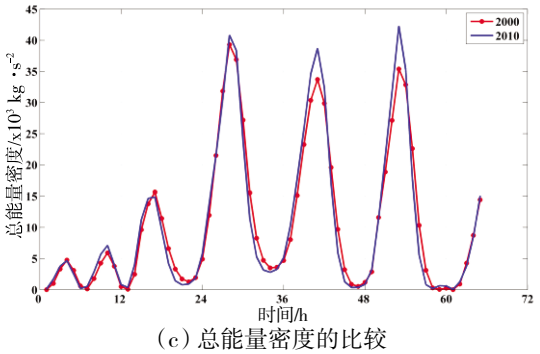
图 6 围填海工程前后黄骅港风暴潮水位和平均流速的比较



(a) 势能能量密度的比较



(b) 动能能量密度的比较



(c) 总能量密度的比较

图 7　围填海工程前后黄骅港风暴潮能量密度的比较

3　分析与结论

围填海工程改变渤海局地的岸线形态,改变波动传播过程,使渤海风暴潮能量场发生改变。在寒潮风暴潮期间,岸线变化后曹妃甸港和黄骅港等站位的风暴潮增水有增加的趋势,风暴潮流速有相对减弱的趋势,因此风暴潮势能能量密度有相对增加的趋势,其动能能量密度有相对减少的趋势。在曹妃甸港,由于岸线的变化和建筑物的影响,寒潮风暴潮期间的水位不高,动能能量密度相对减少,总能量密度受动能能量密度影响较大,有相对减弱的趋势。在黄骅港等站位,势能能量密度大于动能能量密度,因此岸线变化使风暴潮总能量密度受势能能量密度影响较大,总能量有增加的趋势。风暴潮能量密度的变化,将直接影响到能量通量输运和耗散过程。围填海工程后,风暴潮增水和风暴潮势能能量密度的增加,使风暴潮灾害的风险性有所增加,也对海堤防护产生不利的影响;同时,由于岸线变化,导致了风暴潮水动力的减弱和动能能量密度相对较少,会对近岸海域附近的泥沙冲淤、污染物输运造成不利影响。因此,建议相关部门应该保护海洋生态环境,适度评估和规范围填海工程,减少围填海工程对海洋环境的不利影响,构建自然化和生态化的海岸线。本文仅局限于风暴潮个例的研究,模拟结果也有待于进一步改进。后续将会继续研究黄渤海风暴潮能量通量变化以及能量耗散规律,对风暴潮灾害进行统计规律的预测研究。

参考文献:

[1] 冯士筰.风暴潮导论[M].北京:科学出版社,1982.

[2] 冯士筰,张经,魏皓.渤海环境动力学导论[M].北京:科学出版社,2007.

[3] 于福江,王喜年,宋珊,等. 渤海“9216”特大风暴潮过程数值模拟[J].海洋预报,2000,17(4): 9-15.

[4] Zhao P, Jiang W. A numerical study of the effects of coastal geometry in the Bohai Sea on storm surges induced by cold-air outbreaks [J]. Journal of ocean university of China, 2011, 10 (1): 9-15.

[5] 李秀梅,袁承志,李月洋.渤海湾海岸带遥感监测及时空变化分析[J].国土资源遥感,2013,25(2):156-163.

[6] 张明慧,陈昌平,索安宁,等.围填海的海洋环境影响国内外研究进展[J].生态环境学报,2012,21(8):1509-1513.

[7] 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.

[8] 章卫胜,陈晨,李鑫,等.海岸工程对渤海风暴潮高潮位影响分析[J].海岸工程,2012,20(2):72-78.

[9] Xie Y, Huang S, Wang R, et al. Numerical simulation of effects of reclamation in Qiantang Estuary on storm surge at Hangzhou Bay[J]. The Ocean Engineering, 2007, 25(3):61-67.

[10] Guo Y, Zhang J, Zhang L, et al. Computational investigation of typhoon-induced storm surge in Hangzhou Bay China [J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 2009, 85: 530-536.

[11] 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.

[12] Ding Y, Wei H. Modeling the impact of land reclamation on storm surges in Bohai Sea, China [J]. Natural Hazards, 2017, 85(1): 559-573.

[13] Chen C, Liu H, 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.

[14] 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 & Ocean Engineers, 2002, 14: 41-50.

[15] Gao S. Zhang X, Wu Z. A dynamical diagnosis method on obtaining surface wind field over the Bohai Sea [J]. Acta Oceanologica Sinica, 2001, 23(6): 51-58.

[16] 丁玉梅,丁磊,李玉峰.渤海风暴潮对沿岸增水的影响及灾害风险评估[J].海洋技术学报, 2018,37(3): 61-64.

[17] N B Bernier, K R Thompson. Tide and surge energy budgets for Eastern Canadian and Northeast US waters [J]. Continental Shelf Research, 2010, 30: 353-364.

[18] Yu H Q, Yu H M, Wang L, et al. Tidal propagation and dissipation in the Taiwan Strait [J]. Continental Shelf Research, 2017, 136: 57-73.

Reclamation Impact on the Energy Fields of Extratropical Storm Surge in Bohai Sea

LIU Xin, DENG Xiao-zhuo, ZHENG Xin-tian, WANG Jing-xuan, LI Quan-jie, DING Yu-mei

Tianjin University of Science & Technology, Tianjin 300457, *China*

Abstract: Based on the three-dimensional finite volume ocean model FVCOM, a fine scale extratropical storm surge model was established in Bohai Sea. The model was forced by tide and wind field data. Using the shoreline of 2000 and 2010, the energy fields of extratropical storm surge happened in October 2003 were studied. The results showed the energy fields changed significantly at Caofeidian Port and Huanghua Port et al after the land reclamation. The potential energy density had a relatively increasing trend because the storm surge elevation increased. However, the kinetic energy density was relatively weakened because the storm surge velocity was relatively reduced. At Huanghua Port, the potential energy density was much larger than the kinetic energy density and the total energy density was greatly affected by the potential energy density, so the total energy density tended to increase. At Caofeidian Port, the total energy density was greatly affected by the kinetic energy density, as a result the total energy density tended to decrease.

Key words: land reclamation; storm surge; energy fields; numerical simulation; model FVCOM; Bohai Sea