

南黄海水域风暴潮精细化数值模式研究

韩雪¹, 盛建明^{1,2}, 潘锡山^{1,2}, 刘仕潮³, 李春辉⁴

(1. 江苏省海涂研究中心, 江苏 南京 210036; 2. 港口航道泥沙工程交通行业重点实验室, 江苏 南京 210029; 3. 国家海洋环境预报中心, 北京 100081; 4. 南京信息工程大学, 江苏 南京 210044)

摘要: 基于目前国际上应用广泛的ADCIRC水动力模型在南黄海水域建立了重点岸段网格分辨率达到100 m的精细化风暴潮数值预报模型, 该模型采用非结构三角网格及并行计算技术, 能够准确地刻画出南黄海水域复杂的岸线分布和地形情况。通过对历史典型台风风暴潮和温带风暴潮的模拟、预报检验发现: 台风风暴潮的后报平均相对误差为14%, 温带风暴潮24 h预报平均相对误差为12.9%。

关键词: 风暴潮; ADCIRC; 数值预报; 南黄海水域

中图分类号: P731.23 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-0239(2019)01-0052-07

1 引言

风暴潮系指由于强烈的大气扰动——如强台风和气压骤变所导致的海面异常升高的现象^[1]。这种水面异常急剧升高, 往往引发灾害, 它不仅破坏海岸工程, 吞噬良田, 还会给沿海人民的生命财产造成巨大损失。我国是世界上风暴潮灾害最为严重的国家之一^[2], 近20 a造成的直接经济损失高达2 443.64亿元, 造成的死亡、失踪人数共为4 128人^[3]。

水深和潮波变化是风暴潮增水产生非线性效应的两个主要因素^[4-6]。南黄海沿岸人口稠密, 经济发达, 但地势低洼, 一旦风暴潮来袭可能会造成重大人员伤亡和经济损失。风暴潮作为我国沿海主要的海洋灾害, 一直是海洋防灾减灾的重要研究方向, 发展风暴潮数值预报技术是海洋防灾减灾的重要手段^[7-9]。因此, 针对南黄海水域特殊的地形地貌和复杂的潮汐环境特点, 开展南黄海风暴潮精细化数值预报研究, 了解和掌握台风作用下辐射沙洲海域风暴潮增水的特征和规律, 对南黄海区域的防灾减灾工作具有重要意义和必要性。

2 风暴潮数值模型介绍

2.1 控制方程

球坐标系下海水的连续方程为:

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{1}{R \cos \phi} \frac{\partial UH}{\partial \lambda} + \frac{1}{R} \frac{\partial VH}{\partial \phi} - \frac{VH \tan \phi}{R} = 0 \quad (1)$$

球坐标系下海水原始动量方程为:

$$\begin{aligned} \frac{\partial U}{\partial t} + \frac{U}{R \cos \phi} \frac{\partial U}{\partial \lambda} + \frac{V}{R} \frac{\partial U}{\partial \phi} - \left(\frac{U \tan \phi}{R} + f \right) V = \\ - \frac{1}{R \cos \phi} \frac{\partial}{\partial \lambda} \left[\frac{p_s}{\rho_0} + g(\zeta - \eta) \right] + \frac{\tau_{s\lambda} - \tau_{b\lambda}}{\rho_0 H} + D_\lambda \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial V}{\partial t} + \frac{U}{R \cos \phi} \frac{\partial V}{\partial \lambda} + \frac{V}{R} \frac{\partial V}{\partial \phi} + \left(\frac{U \tan \phi}{R} + f \right) U = \\ - \frac{1}{R} \frac{\partial}{\partial \phi} \left[\frac{p_s}{\rho_0} + g(\zeta - \eta) \right] + \frac{\tau_{s\phi} - \tau_{b\phi}}{\rho_0 H} + D_\phi \end{aligned} \quad (3)$$

式中: t 为时间; (λ, ϕ) 为经度和纬度; $H = \zeta + h$ 为海水水柱的总水深; ζ 为从平均海平面起算的自由表面高度; R 为地球的半径, 文中取6 378 135 m; (U, V) 为深度平均的海水水平流速; $f = 2\Omega \sin \phi$ 为

收稿日期: 2018-04-11; 修回日期: 2018-06-21。

基金项目: 港口航道泥沙工程交通行业重点实验室开放基金(Yn918003); 海岸灾害及防护教育部重点实验室开放研究基金; 江苏省自然科学基金青年基金(BK20180803, BK20170871); 国家科技支撑计划项目(2013BAB04B03)。

作者简介: 韩雪(1982-), 女, 高级工程师, 硕士, 主要从事海洋预报研究。E-mail: 48546703@qq.com

科氏参数, g 为重力加速度; ρ_0 为海水密度, 文中默认为 $1\,025\text{ kg/m}^3$; p_s 为海水自由表面的大气压强; η 为牛顿引潮势。

2.2 台风风场模型与风应力项

风暴潮模式计算必须给出格点的气压值和风应力值, 模式结果的精度在很大程度上依赖于气压场和风场模式的质量。本文选用 Holland 台风风场模型。台风气压场分布公式:

$$P(r, \theta) = P_c + (P_n - P_c) e^{-[R_{\max}(\theta)/r]^p} \quad (4)$$

式中: $P(r, \theta)$ 是距台风中心 r 的海表面气压值, 为径向距离 r 、方位角 θ 的函数。 P_c 为台风中心气压, P_n 为台风以外不受干扰的背景气压, 文中设为 $1\,012\text{ hPa}$ 。 R_{\max} 是台风最大风速半径, 为方位角 θ 的函数, 是随着 r 的变化而变化的。

3 风暴潮模型的构建

3.1 地形数据

外海区域地形采用美国 ETOPO-1 数据, 分辨率为 $1' \times 1'$, 其范围为 $115^\circ \sim 130^\circ\text{E}$ 、 $15^\circ \sim 45^\circ\text{N}$; 对于辐射沙脊群区域的江苏沿海, 为了保证计算的准确性, 采用分辨率较高的海图水深数据, 在近岸海域

地形融合了工程建设测量数据。

3.2 网格剖分

考虑到风暴潮的长波特性, 它生成和传播都要求计算区域需要足够大, 因此计算区域的外海开边界需要尽可能远离重点区域。在保证计算区域足够大和模式计算稳定的条件下, 将计算区域的外边界确定在水深变化较为平缓的区域。

根据确定的计算区域进行网格划分, 外海开边界的网格分辨率为 0.2° 左右, 对江苏沿海的网格进行加密, 分辨率控制在 100 m 左右。该高分辨率非结构网格的计算区域包括了 $305\,172$ 个三角形单元, 共计 $157\,475$ 个节点。计算网格和水深分布情况如图 1—2 所示。

3.3 模型参数设置

(1) 参数设置

ADCIRC (Advanced Circulation Model) 模型中主要包括两个必选输入文件: 网格地形文件 fort.14 和模型参数控制文件 fort.15, 还包括可选输入文件: 网格点属性文件 fort.13 和风场文件 fort.22, 其中 fort.15 文件中的参数设定主要为以下内容: 模式热启动选项 IHOT=0, 采用冷启动; 球面二维坐标; 底摩擦参数选项 NOLIBF=2 (混合非线性底摩擦), 混合底摩擦形式 ($C_f=0.002$, $H_{\text{break}}=1.0$); 有限振幅控

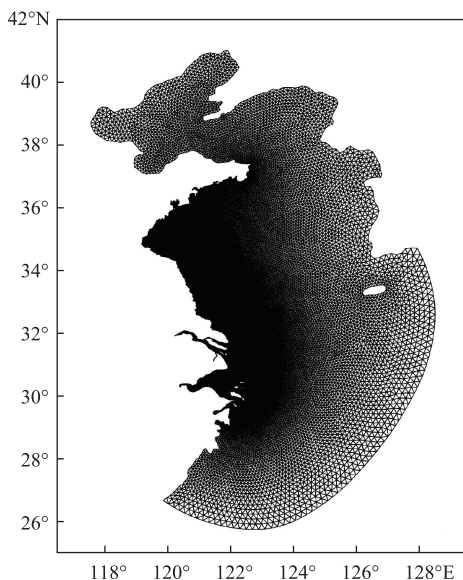


图1 计算区域边界和网格划分

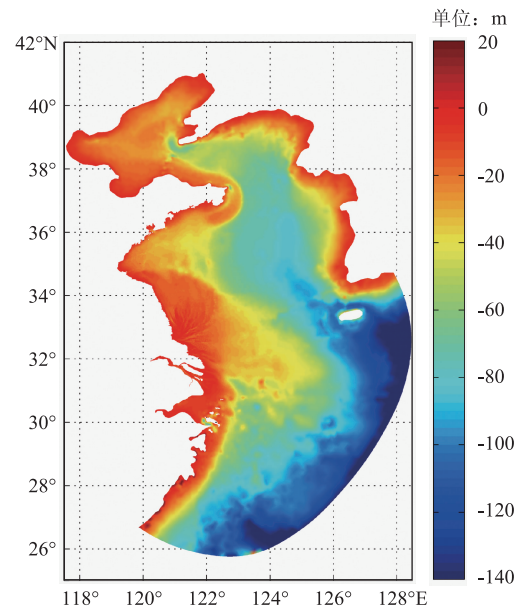


图2 计算区域水深分布

制参数NOLIFA=2(开启干湿计算);风场选项,对于台风风场采用NWS=8的Holland风场;对于温带风场采用NWS=6;连续方程的权重参数TAU0=-3(时间和空间均可变,在 $H>10$,TAU0=0.005,在 $H<10$,TAU0=0.02,并且随时间而变, $Tau0=0.03+1.5\times Tk$,Tk为时间参数);时间步长DT=4.0 s;时间权重参数为0.35,0.30,0.35;由于不考虑潮汐边界条件,因此不开启引潮力作用。

(2)边界条件

陆地、岛屿等陆边界,在边界上满足不可入射条件,即取法向流速为零;外海的开边界,指定水位边界条件为开边界控制量,其他物理量采用辐射边界条件。

(3)初始条件

模型采用冷启动方式,初始条件为水位为0的静水面,不考虑温度、盐度的时空分布,因此,所有格点上的初始水位和初始流速均为0。

3.4 风暴潮数值模型检验

3.4.1 台风风暴潮过程后报检验

对于台风风暴潮而言,台风路径的准确性、台

风特征对于台风风暴潮的模拟都起到至关重要的作用^[10],台风的强度、环流大小、风力分布都会对风暴潮产生显著影响^[11-15]。本节选取了影响南黄海沿海的5个典型台风(7708号、8114号、8509号、1109号、1210号)风暴潮过程进行后报模拟,以检验预报模型对于准确台风路径下风暴潮的模拟性能,下面具体列出7708号、8114号和1210号台风影响下站点增水过程曲线。

(1)7708号台风风暴潮过程

7708号台风“BABE”于9月2日14时(北京时,下同)生成于菲律宾以东洋面,之后沿偏西方向移动,强度逐渐加强。8日14时强度最强,中心气压907 hPa,近中心最大风速70 m/s。台风于9月11日(农历七月廿八)在上海崇明登陆,台风近中心最大风速25 m/s,最低气压969 hPa。

(2)8114号台风风暴潮过程

8114号台风“Agnes”于9月1日(农历八月初四日)靠近我国浙江省、上海市沿海之后逐渐转向东北行。转向前台风移动缓慢,上海市区最大风力10级,沿海达11~12级。9月1日02时台风近中心最大风速为45 m/s,中心气压950 hPa。

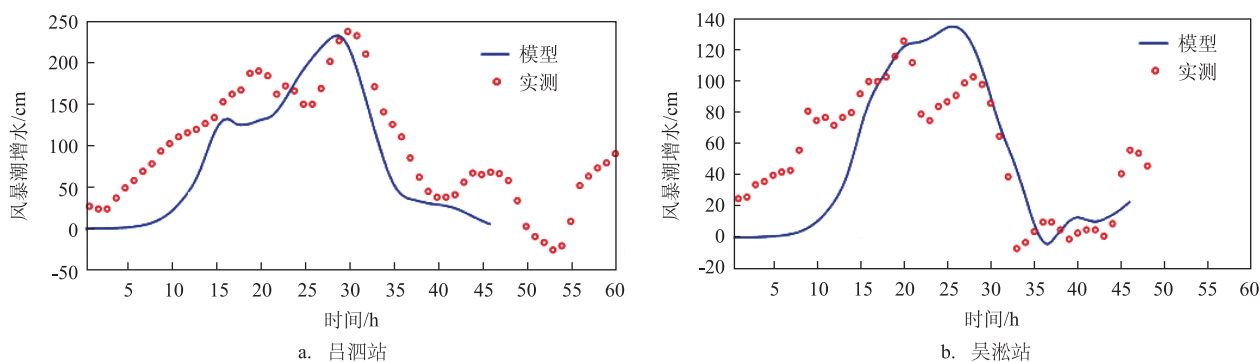


图3 7708号台风风暴潮增水过程曲线

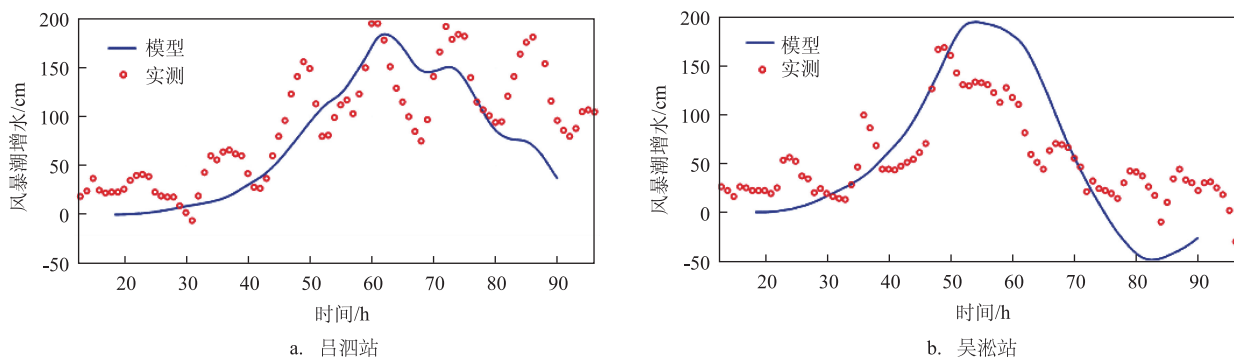


图4 8114号台风风暴潮增水过程曲线

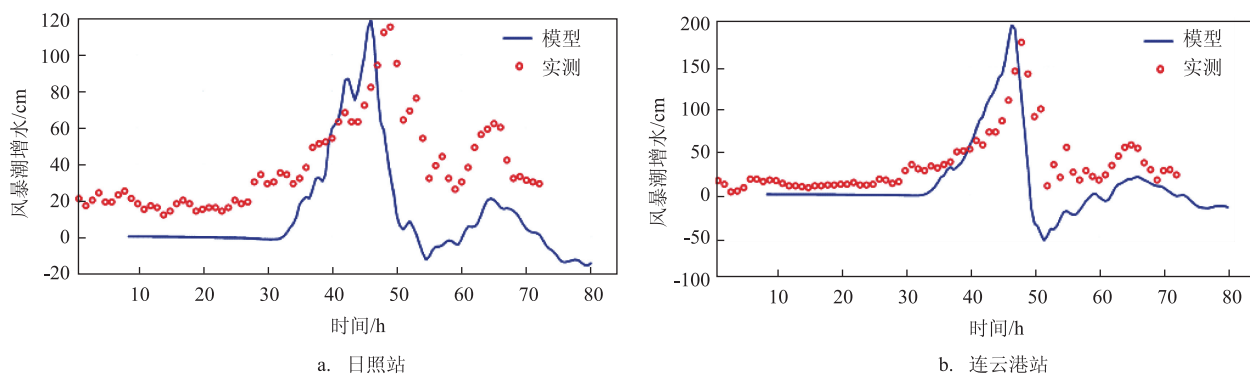


图5 1210号台风风暴潮增水过程曲线

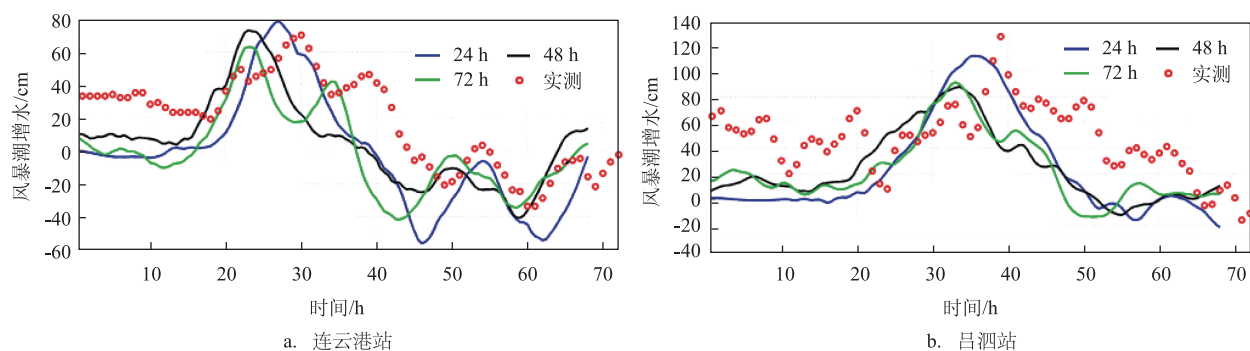


图6 20140203温带风暴潮增水过程曲线

表1 台风风暴潮过程最大增水计算值与实测值对比

过程	站名	实测最大 增水/cm	计算最大 增水/cm	绝对误差 /cm	相对 误差
7708号	吕泗	236	231.01	4.99	2.1%
	吴淞	126	135.14	9.14	7.3%
8114号	吕泗	195	184.08	10.92	5.6%
	吴淞	168	194	26	15.5%
8509号	日照	106	85.07	20.93	19.7%
	连云港	119	97.7	21.3	17.9%
	吕泗	92	112.65	20.65	22.4%
1109号	青岛	74	71.09	2.91	3.9%
	日照	84	59.13	24.87	29.6%
	连云港	89	64.88	24.12	27.1%
	吕泗	139	116.17	22.83	16.4%
1210号	日照	115	118.92	3.92	3.4%
	连云港	178	198.64	20.64	11.6%
平均	—	—	—	16.40	14.0%

(3)1210号台风风暴潮过程

1210号台风“Damrey”于7月28日20时生成于

西北太平洋上,之后一直向西北方向移动,于31日08时加强为强热带风暴,并继续向西偏北方向移动,强度继续加强,并于8月1日08时加强为台风,之后强度维持并略有加强,并于8月2日21时30分前后在江苏省响水县陈家港镇沿海登陆,登陆时附近最大风力达到12级。

通过对典型历史台风风暴潮过程的后报检验可以看出,对于迎面登陆江苏沿海的台风风暴潮模拟效果最好,其次是近海转向台风,最后是路径平行岸线北上的台风。该预报模型对于江苏沿岸台风风暴潮的后报相对误差为14%,能够较好地模拟出台风风暴潮过程的增水过程。

3.4.2 温带风暴潮过程预报检验

由于特殊的地理位置,该区域沿海同样会受到温带风暴潮的影响^[16-17]。温带风暴潮的预报采用与台风风暴潮相同的计算网格,而风场则采用国家海洋环境预报中心WRF风场。

温带过程的变化相对比较平稳,风场的预报也比较准确,因此为了检验温带风暴潮的预报效果,

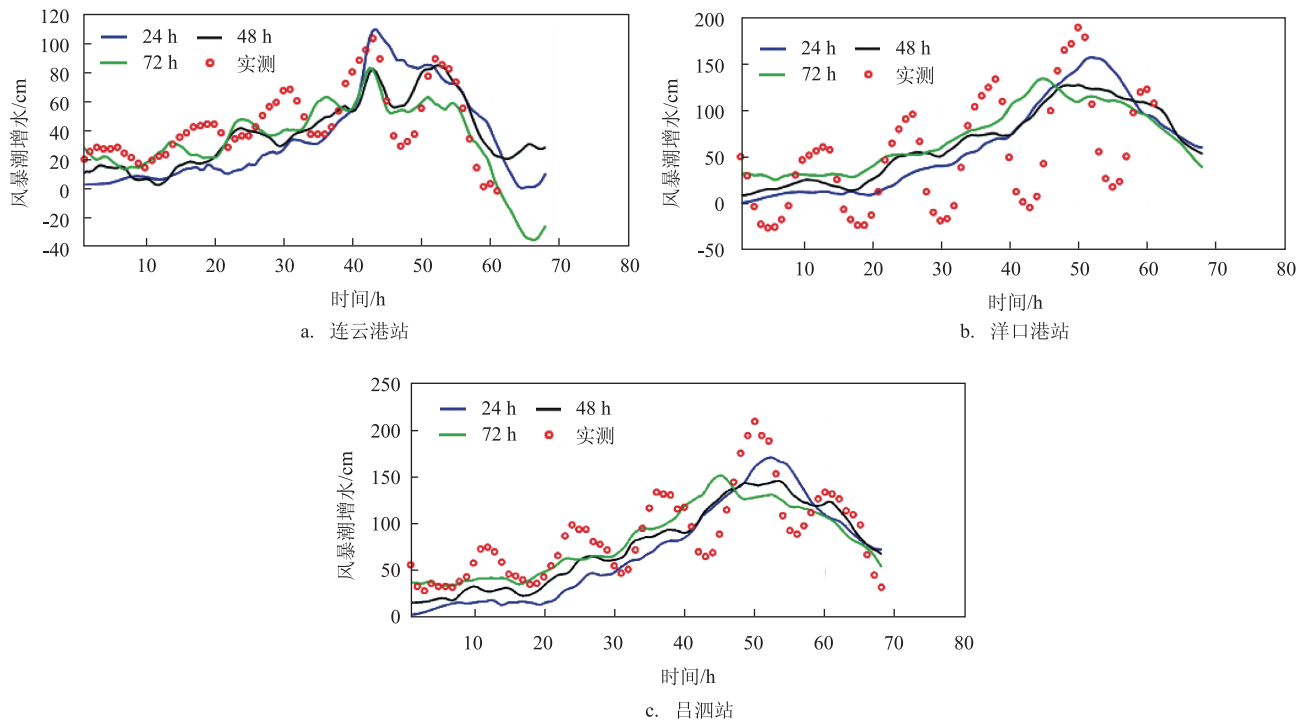


图7 20141008 温带风暴潮增水过程曲线

表2 温带风暴潮24 h预报最大增水值与实测值对比

过程	站名	实测最大增水/cm	计算最大增水/cm	绝对误差/cm	相对误差
20140203	连云港	70	78.6	8.6	12.3%
	吕泗	127	111.8	15.2	12.0%
20140217	连云港	92	95.9	3.9	4.2%
	吕泗	106	128.2	22.2	20.9%
20141008	连云港	103	109.1	6.1	5.9%
	洋口港	191	159.1	31.9	16.7%
	吕泗	211	172.2	38.8	18.4%
平均	—	—	—	18.1	12.9%

本节选取影响该海域沿岸的典型温带风暴潮过程(20140203过程、20140217过程、20141008过程)进行预报检验,预报时效分别为72 h、48 h和24 h,本文仅对24 h的预报精度进行检验。下面具体列出20140204、20141008温带风暴潮增水过程曲线。

(1) 20140203 温带风暴潮过程

受冷空气的影响,2014年2月2—3日,江苏沿海先后出现了一次明显的温带风暴增水过程。此次过程在3日凌晨至下午对江苏沿海影响最大,连云港潮位站出现了70 cm的最大风暴增水,吕泗潮

位站出现了127 cm的最大风暴增水。

(2) 20141008 温带风暴潮过程

受冷空气与1419号超强台风“黄蜂”的共同影响,11日上午到14日清晨,江苏沿海出现了50~220 cm的风暴增水,上述岸段内的江苏吕泗潮位站出现了略超过当地警戒潮位的高潮位。吕泗潮位最大增水211 cm,连云港潮位站最大增水103 cm,洋口港潮位站最大增水191 cm。

在温带风暴潮预报模拟中,通过对典型温带风暴潮过程的预报检验可以看出,该预报模型对于温带风暴潮的24h预报相对误差为12.9%,对于冷气南下、冷空气和温带气旋共同作用以及冷空气和台风共同作用的风暴潮模拟都能得到较好的结果。文中模拟误差的主要原因分析如下:两类风暴潮产生误差共同的原因是水深,由于模型水深数据来源于海图,而江苏沿海尤其是辐射沙脊群水深地形变化较快,与台风或者温带风暴潮过程发生时的水深地形存在差异;台风风暴潮模拟中,采用的是圆形的模型风场,与真实台风风场差别较大;温带风暴潮模拟中,采用的是国家海洋环境预报中心的预报风场,分辨率为 0.1° ,因此对某些极值的刻画较弱,并且预报风场本身也存在一定误差。

通过对这3次温带风暴潮过程的模拟可以看出,在吕泗和洋口港容易产生较大增水,这可能是受南黄海特殊的水下地形影响,南黄海辐射状沙脊区深槽呈口宽内窄的喇叭型,风暴潮在深槽向沙脊群顶端传播过程中,发生一定变形,从而产生较大的风暴增水。

4 结论

(1)本文建立了一套南黄海海域精细化风暴潮灾害预警报模型,该模型采用高精度地形和高分辨率网格,重点岸段的网格分辨率达到了100 m左右,较为准确地刻画出了南黄海海域复杂的水下地形和岸线情况;模型研究区域包括了渤海、黄海和东海部分海域,能够比较客观的反应长波的传递和变化;模型在保证精细化的同时,兼顾了计算效率,利用大型机的多节点并行技术,可满足业务化预报的需求;

(2)通过对该数值预报模型台风风暴潮的后报相对误差平均为14%,温带风暴潮的24h预报相对误差平均为12.9%,总体上能够满足预报相对误差要求,较好地完成风暴潮模拟。在台风风暴潮模拟中,对于迎面登陆江苏沿海的台风风暴潮模拟效果最好,其次是近海转向台风,最后是路径平行岸线北上的台风;在温带风暴潮预报模拟中,对于冷气南下、冷空气和温带气旋共同作用以及冷空气和台风共同作用的风暴潮模拟都能得到较好的结果;

(3)在风暴潮数值预报中,准确的预报风场和 underwater 地形对风暴潮模拟的准确性至关重要。在该预报模型中,采用的风场和地形数据仍然有可改进的空间,未来可采用更高分辨率、更加准确的风场和 underwater 地形,将进一步提高风暴潮预报的准确性。

参考文献:

- [1] 冯士筭. 风暴潮导论[M]. 北京: 科学出版社, 1982: 1-3.
- [2] 俞亮亮, 陆培东, 陈可锋. “梅花”台风期间江苏辐射沙洲海域风暴潮增水研究[J]. 海洋工程, 2013, 31(3): 63-69.
- [3] 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.
- [4] 李杰. 海平面变化及其对东中国海风暴潮的影响[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2011.
- [5] 高志刚. 平均海平面上升对东中国海潮汐、风暴潮影响的数值模拟研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2008.
- [6] 陈满春. 海平面变化及其对东中国海潮汐和工程水位的影响[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2009.
- [7] 王喜年. 全球海洋的风暴潮灾害概况[J]. 海洋预报, 1993, 10(1): 30-36.
- [8] 叶琳, 于福江. 我国风暴潮灾的长期变化与预测[J]. 海洋预报, 2002, 19(1): 89-96.
- [9] 傅赐福, 董剑希, 刘秋兴, 等. 1409号和1415号台风风暴潮预报的数值研究[J]. 海洋预报, 2016, 33(4): 26-33.
- [10] 王培涛, 于福江, 刘秋兴, 等. 福建沿海精细化台风风暴潮集合数值预报技术研究及应用[J]. 海洋预报, 2010, 27(5): 7-15.
- [11] Mueller K J, DeMaria M, Knaff J, et al. Objective estimation of tropical cyclone wind structure from infrared satellite data[J]. Weather and Forecasting, 2006, 21(6): 990-1005.
- [12] 曹越男, 张增海, 原野, 等. 南海台风风暴潮数值模拟及其对气象强迫场的敏感性试验[J]. 热带气象学报, 2014, 30(6): 1119-1126.
- [13] 张金善, 钟中, 胡铁佳. 热带气旋风暴潮模拟中的海面风场特征对比研究[J]. 水动力学研究与进展, 2008, 23(6): 687-293.
- [14] 高钦钦, 朱建荣, 端义宏, 等. 对称和非对称台风对东海南海风暴潮影响比较[J]. 华东师范大学学报(自然科学版), 2012, (6): 57-72.
- [15] 傅赐福, 于福江, 刘秋兴, 等. 四象限非对称风场对风暴潮的改进研究[J]. 海洋通报, 2013, 32(6): 626-632.
- [16] 周玲, 高焕臣, 沈佩玉. 渤、黄海沿岸潮灾性质分析[J]. 海洋预报, 1993, 10(1): 37-39.
- [17] 于福江, 王喜年, 戴明瑞. 影响连云港的几次显著温带风暴潮过程分析及其数值模拟[J]. 海洋预报, 2002, 19(1): 113-122.

Study on the refined storm surge numerical model in the Southern Yellow Sea

HAN Xue¹, SHENG Jian-ming^{1,2}, PAN Xi-shan^{1,2}, LIU Shi-chao³, LI Chun-hui⁴

(1. Jiangsu Marine Environment Monitoring and Forecasting Center, Nanjing 210036 China; 2. Key Laboratory of Port, Waterway and Sedimentation Engineering of Ministry of Transport, Nanjing 210029 China; 3. National Marine Environment Forecasting Center, Beijing 100081 China; 4. Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044 China)

Abstract: A refined storm surge numerical prediction model with spatial resolution up to 100m is established for the southern Yellow Sea based on the internationally widely used Advanced Circulation Model (ADCIRC). The model uses unstructured triangular mesh and parallel computing technology, which could accurately depict the complex underwater terrain and shoreline distribution of the southern Yellow Sea. Through numerical simulation and forecast validation of typical typhoon storm surges and extratropical storm surge in the history, it is shown that the relative error of typhoon storm surge hindcast and extratropical storm surge 24 forecast is 14% and 12.9% on average, respectively.

Key words: storm surge; ADCIRC model; numerical forecasting; Southern Yellow Sea