

长江口及其邻近海区无结构网格风暴潮 预报系统的研制与分析^{*}

赵长进, 葛建忠, 丁平兴^{*}

(华东师范大学 河口海岸学国家重点实验室, 上海 200062)

摘 要: 利用基于有限元方法的 ADCIRC 模式, 并耦合 SWAN 波浪模式, 建立了一个适用于长江口及其邻近海区风暴潮的数值预报模式。该模式采用对岸线有较好拟合能力的无结构网格, 综合考虑了波浪、天文潮、风暴潮、径流相互作用。利用该模型对长江口及其邻近海区一系列台风风暴潮进行后报检验, 计算结果与实测资料有较好的一致性。最后, 利用建立的模型, 针对影响长江口地区的两类典型路径台风——近转向型台风和登陆型台风, 讨论了气压、风应力、台风路径等因素对增水的贡献; 并对台风移动路径与外高桥实测增水强度进行统计分析, 给出了台风移动路径、气压梯度和增水强度的定量关系。

关键词: ADCIRC; 风暴潮; 台风路径

中图分类号: P732.4

文献标识码: A

文章编号: 1671-6647(2015)02-0182-13

风暴潮是导致全球生命财产损失最严重的自然灾害之一。在我国, 风暴潮灾害居海洋灾害之首^[1]。风暴潮的准确预报对沿海地区减灾防灾有着重要意义。

风暴潮数值预报模式的研究始于 20 世纪 50 年代。随着计算机技术的进步, 用数值模式对风暴潮进行模拟和预报的方法得到了快速发展。上世纪 70 年代, 美国建立了第一代风暴潮预报模式“SPLASH”^[2]; 同时期, 英国建立了温带气旋风暴潮预报模式“SEA MODEL”^[3]; 80 年代, 美国发展了第二代模式“SLOSH”^[4]。近 10 余 a, 风暴潮数值预报模式得到迅猛发展, 国际上有很多较为成熟的海洋数值模型如 POM, ECOM, FVCOM, ELCIRC, ADCIRC 等, 都可用于海洋风暴潮数值模拟和预报^[5]。

在我国, 冯士筴^[6]、刘凤树^[7]从 20 世纪 70 年代起较全面地开展了风暴潮机制和预报的研究工作。冯士筴在分析了浅海风暴潮动力学特征的基础上, 建立了超浅海风暴潮理论^[8], 依据此理论导出了相应的风暴潮位和潮流的预报方程, 并用数值方法对此进行了验证和应用^[9]。王喜年等建立了以 5 个子区域部分重叠覆盖整个中国海沿岸的台风风暴潮模式, 简称五区块(FBM)模型, 为实现风暴潮预报业务化运行, 做出了重要贡献^[10]。近年来, 国家海洋预报中心采用卡曼滤波数据同化^[11]、集合预报^[12]、融入中尺度气象模式^[13]等方法, 建立和改进了风暴潮预报模式, 并投入业务化运行。长江口及其邻近区域几乎每年都受风暴潮影响, 因而人们较早地开展了长江口地区风暴潮预报的研究。在 20 世纪 80 年代, 刘科成^[14]利用模式台风, 应仁方和羊天柱^[15]应用简单的数值模型计算上海市可能的最大增水和水位, 为上海市防洪工程提供了设计依据。从 20 世纪 90 年代以来, 张君伦等^[16]、周旭波和孙文心等^[17]、张金善等^[18]、陈华伟等^[19]分别从网格范围、潮汐与风暴潮非线性作用、河口动力、波浪与风暴潮相互作用等方面论证了适用于长江口地区的数值模式所应当考虑的因素。华东师范大学河口海岸学国家重点实验室建立了波浪、天文潮、风暴潮、径流相互作用的二

^{*} 收稿日期: 2014-12-06

资助项目: 国家海洋局, 海洋预报业务化系统模块化与应用示范——长江口咸潮, 泥沙数值预报系统研制(20120517-2)

作者简介: 赵长进(1989-), 女, 重庆永川人, 硕士研究生, 主要从事潮滩动力学与陆海相互作用方面研究。E-mail: wanghaishanren@aliyun.com

^{*} 通讯作者: 丁平兴(1954-), 男, 江苏无锡人, 教授, 博士生导师, 主要从事潮滩动力学与陆海相互作用方面研究。E-mail: pxding@sklec.ecnu.edu.cn

维预报模式,并进行了可视化集成^[20],该模式已在太湖流域管理局、东海海洋环境预报中心等单位投入业务化运行^[21]。

ADCIRC(An Advanced Circulation Model for Oceanic, Coastal and Estuarine Waters)^[22]是美国北卡罗来纳州大学开发的有限元海洋模式,是可应用于海洋、海岸、河口跨尺度区域的水动力计算数学模型。该模式采用无结构网格,易于拟合复杂岸线和岛屿的边界,并可以对所关心区域实现加密,因此适用于近岸地区高分辨率的数值模拟。长江口地区岸线曲折,水深变化复杂,以往的风暴潮数值模拟多使用正交曲线网格,在拟合该地区的水深和岸界方面有一定的局限性。本文拟利用有限元模式 ADCIRC,建立一套适合于长江口杭州湾地区的无结构高分辨率风暴潮数值预报模式,并应用该模式探讨不同路径的台风在长江口地区的增水特点。

1 高分辨率数值预报模式简介

本文采用 ADCIRC 二维模型中沿水深积分的时均连续方程和运动方程^[23],潮汐通过边界调和常数引入,不考虑引潮势,不考虑斜压效应。具体表达式为:

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial UH}{\partial x} + \frac{\partial VH}{\partial y} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial U}{\partial t} + U \frac{\partial U}{\partial x} + V \frac{\partial U}{\partial y} - fV = -\frac{\partial}{\partial x} \left[\frac{P_s}{\rho_0} + g\zeta \right] + \frac{\tau_{sx}}{\rho_0 H} - \frac{\tau_{bx}}{\rho_0 H} + T_x + D_x \quad (2)$$

$$\frac{\partial V}{\partial t} + U \frac{\partial V}{\partial x} + V \frac{\partial V}{\partial y} + fU = -\frac{\partial}{\partial y} \left[\frac{P_s}{\rho_0} + g\zeta \right] + \frac{\tau_{sy}}{\rho_0 H} - \frac{\tau_{by}}{\rho_0 H} + T_y + D_y \quad (3)$$

式中, ζ 为从海平面起算的水位高度; U, V 分别为 x 方向和 y 方向的平均流速; H 为总水深; f 为科氏参量; P_s 为水面大气压力; ρ_0 为水的密度; g 为重力加速度; τ_{bx} 和 τ_{by} 代表底部切应力; τ_{sx} 和 τ_{sy} 代表风应力; T_x 与 T_y 为波浪辐射应力项; D_x 与 D_y 为扩散项。

在数学处理上,该数值模型空间上使用有限元伽辽金方法离散,时间上采用有限差分。为克服伽辽金方法出现的数值问题,在求解连续方程时,采用 Kinnmark 的 GWCE(Generalized Wave Continuity Equation)方程,并与动量守恒方程一起作为控制方程进行求解,较好地消除了数值问题导致的震荡、不守恒性等问题,从而能准确求解有限元差分下的水位和流速^[24]。

2 模式设置与计算方法

2.1 模式设置

风暴潮数值预报模式由 3 部分构成,即复合流场模型、波浪模型和表征台风特征的风、气压模型。各个模型的选取如下:1)计算水位和流场的模型采用 ADCIRC 模型,模型开边界的调和常数由全球潮波模型 TPXO7.2^[25]推算求得,其中包含 8 个主要分潮($M_2, S_2, N_2, K_2, K_1, O_1, P_1, Q_1$);径流的边界条件由大通站逐日流量数据插值给出。2)波浪计算采用 SWAN 模型,在近岸地区的计算采用 ADCIRC 与 SWAN 双向耦合的方法。3)风场计算采用台风模型风场和背景风场相结合的办法,台风模型风场采用对称气压场模型,气压场由经典藤田公式给出;背景风场采用 QSCAT/NCEP Blended Ocean Winds from Colorado Research Associates 气象数值产品(<http://rda.ucar.edu/datasets/ds744.4/>),本文所用风场的具体设置参见文献 26。

2.2 计算区域及计算方法

由于考虑波流相互作用的双向耦合要消耗大量计算时间,以及波-流共同作用在近岸浅水地带较为显

著,本文风暴潮计算模式采用嵌套方法,仅在小区应用浪流耦合模式。模式计算区域及重要站位的位置见图 1。大区包含渤、黄、东海、对马海峡、菲律宾以东部分洋面,以及台湾岛以西部分南海,如图 1a。大区范围足够模拟大多数对长江口产生较大影响的台风风暴潮的整个发生发展及消亡过程^[27]。大区开边界及其附近陆域分辨率约为 25 km,随着向长江口地区的靠近,网格逐渐加密。小区网格实际为大区网格的一部分,大区与小区嵌套边界的网格点完全重合。小区范围为长江口,杭州湾区域,河流上界延伸至大通。为较好地拟合复杂的岸界和地形,到上海市及其附近区域分辨率达到 100 m。

小区的边界条件包括径流、余水位、潮汐调和常数和边界的波浪谱。余水位由大区域加气象条件计算给出;覆盖渤、黄、东海的 SWAN 模式在台风条件驱动下计算给出小区边界的波浪谱。风速输入 ADCIRC 模型后,通过计算得出风应力,并将风应力传递给 SWAN。ADCIRC 得出的水位和流速信息传递给 SWAN,用于水深及相关波浪过程(波浪传播,地形导致的破碎等)的计算;ADCIRC 的驱动因素中包含由 SWAN 计算得出的辐射应力梯度^[28]。

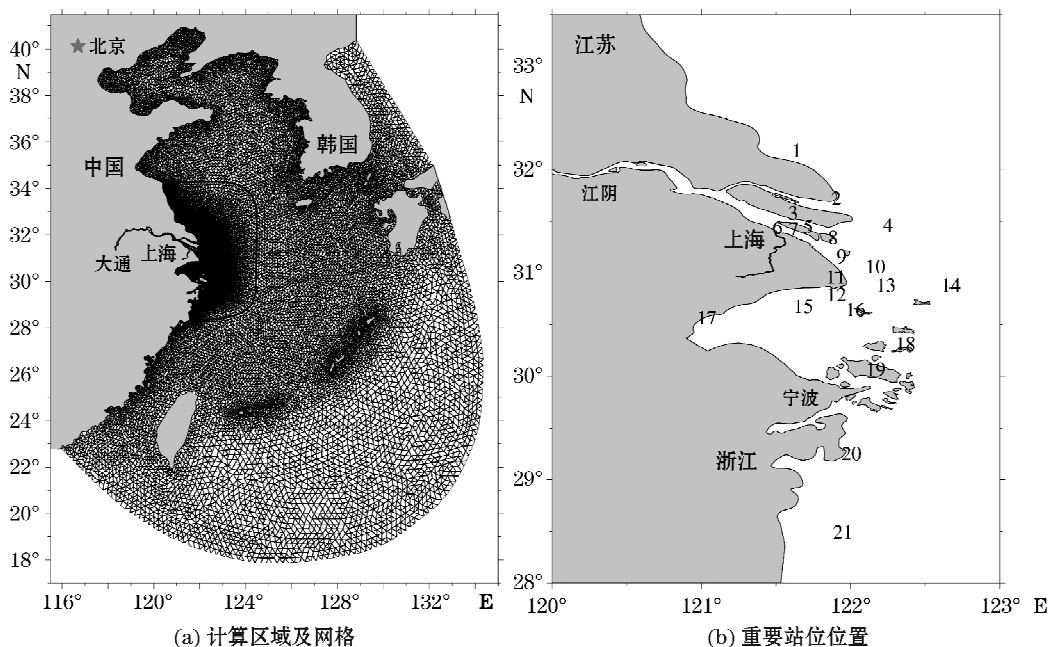


图 1 计算网格及站位

Fig. 1 Computational grids and sites

3 模式验证

3.1 潮汐验证

利用长江口、杭州湾测站的实测分潮调和常数及天文潮水位过程对模型进行率定,调整潮汐边界条件和底摩擦参数,使模型系统适用于长江口和杭州湾区域。然后利用实测台站资料进行系统验证,证实长江口及其邻近区域的潮汐模拟具有较高的精度。限于篇幅,本文仅给出影响长江口区域的主要分潮 M_2 , S_2 , K_1 , O_1 调和常数的对比验证(表 1)和长江口附近主要站位的潮汐验证均方根误差统计(表 2),表 1 和表 2 的编号标示相应站位的位置见图 1b。

表 1 模型结果与实测数据潮汐调和常数对比

Table 1 Error statistics of harmonic constants of simulated values and observed data at tidal gauges

站 号	站 名	振幅对比/m						迟角对比/°					
		分潮 M ₂			分潮 S ₂			分潮 K ₁			分潮 M ₂		
		模型	实测	误差	模型	实测	误差	模型	实测	误差	模型	实测	误差
1	吕泗	1.54	1.72	-0.18	0.19	0.21	-0.02	0.64	0.75	-0.11	0.10	0.11	-0.01
2	长兴港	1.19	1.55	-0.06	0.21	0.21	0.00	0.51	0.58	-0.07	0.10	0.11	-0.01
3	蔡镇	1.02	1.14	-0.12	0.27	0.24	0.02	0.45	0.50	-0.06	0.16	0.15	0.01
4	余山	1.20	1.14	0.06	0.24	0.20	0.05	0.56	0.64	-0.09	0.13	0.14	-0.01
5	长兴	1.06	1.08	-0.02	0.26	0.17	0.09	0.47	0.52	-0.04	0.16	0.17	-0.01
6	吴淞	0.92	1.01	-0.08	0.26	0.16	0.10	0.41	0.51	-0.10	0.17	0.14	0.03
7	高桥	1.06	1.04	-0.04	0.26	0.16	0.08	0.45	0.55	-0.10	0.16	0.16	0.00
8	横沙	1.15	1.11	0.03	0.26	0.16	0.07	0.52	0.53	-0.02	0.16	0.17	-0.02
9	中渡	1.29	1.15	0.14	0.26	0.19	0.07	0.53	0.59	-0.06	0.15	0.16	-0.01
10	南槽东	1.39	1.55	0.04	0.29	0.22	0.07	0.64	0.67	-0.03	0.16	0.19	-0.02
11	唐汇	1.54	1.46	0.08	0.35	0.39	-0.04	0.64	0.66	-0.02	0.19	0.21	-0.02
12	芦潮港	1.53	1.49	0.04	0.35	0.23	0.11	0.64	0.68	-0.05	0.19	0.21	-0.02
13	大戩	1.83	1.81	0.02	0.31	0.21	0.09	0.61	0.66	-0.05	0.17	0.19	-0.02
14	嵛华山	1.17	1.18	-0.02	0.29	0.21	0.08	0.55	0.64	-0.09	0.17	0.16	0.01
15	横沙	1.57	1.54	0.02	0.37	0.24	0.13	0.61	0.62	-0.01	0.19	0.22	-0.02
16	唐厝山	1.29	1.53	-0.04	0.34	0.25	0.09	0.55	0.69	-0.14	0.19	0.18	0.01
17	海盐	2.26	2.12	0.14	0.42	0.34	0.07	0.79	0.69	0.10	0.19	0.18	0.01
18	长涂	0.97	0.87	0.09	0.32	0.24	0.08	0.46	0.40	0.06	0.19	0.19	0.00
19	定海	1.05	0.94	0.11	0.34	0.31	0.02	0.50	0.37	0.13	0.21	0.19	0.03
20	石浦	1.43	1.46	-0.03	0.33	0.30	0.03	0.62	0.67	-0.05	0.24	0.22	0.02
21	大陈	1.40	1.59	-0.18	0.32	0.29	0.03	0.58	0.61	-0.03	0.25	0.22	0.03

表 2 长江口附近主要站位的潮汐验证均方根误差统计表

Table 2 RMS errors of tide validation at major tidal gauges near the Changjiang Estuary

站位号	站位名	RMSE/m
5	长兴	0.20
6	吴淞	0.45
7	高桥	0.21
8	横沙	0.20
9	中浚	0.21
10	南槽东	0.16
12	芦潮港	0.19
13	大戢	0.15
14	绿华山	0.09
15	滩浒	0.30
16	唐脑山	0.28

3.2 风速与波浪的验证

利用位于 $29^{\circ}17'24''\text{N}$, $123^{\circ}35'24''\text{E}$ 的外海浮标站的波高和风速数据验证风场模式和 ADCIRC+SWAN 模式。图 2 是 0215 号(鹿沙)和 0216 号(森拉克)台风期间计算风速、波高与实测资料的比较,据图可知风暴潮数值预报系统中的风场模式和波浪模式具有较高的精度。

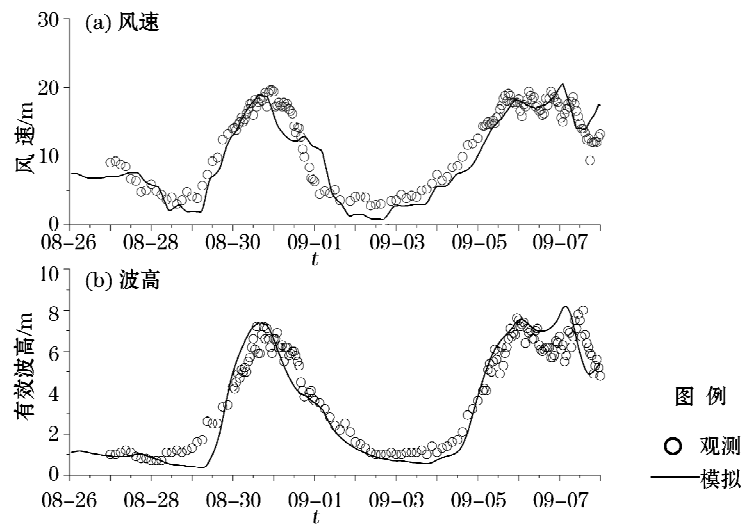


图 2 0215 和 0216 号台风期间风速及波高验证图

Fig. 2 Validation of significant wave height and wind speed at buoy site during TC0215 and TC0216

3.3 风暴潮后报检验

选取 1989—2008 年间,显著影响长江口杭州湾地区的 14 个不同路径的台风进行风暴潮后报检验,后报检验计算的起始时间是在台风登陆或影响长江口最大时期前 96 h。表 3 是滩浒岛、大戢山、外高桥站位的模型计算结果与观测水位对比结果。2005 年起,外高桥没有数据。

相对误差的计算式为:

$$Err = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{L_{mi} - L_{0i}}{L_{0max}} \right| \times 100\%$$

(4)

式中, n 为实测水位个数; L_a 为实测水位; L_{mi} 为模拟水位; L_{0max} 为实测水位的最高波峰与最低波谷的差值。就统计结果而言,后报水位过程时间序列的相对误差控制在 10% 左右。极值误差采用台风显著增水期间模拟水位序列的极值与实测水位序列极值的差值,极值水位误差控制在 0.5 m 以内。

表 3 各台风过程后报增水与水位误差统计表

Table 3 Error statistics of the simulated deviations during typhoon processes

台风号	大戢山		滩浒岛		外高桥	
	平均相对 误差/%	极值水位 误差/m	平均相对 误差/%	极值水位 误差/m	平均相对 误差/%	极值水位 误差/m
8913	9.8	0.39	10.1	0.19	7.5	0.14
8923	9.2	0.46	10.2	0.02	11.2	0.10
9216	8.1	0.34	9.9	0.20	13.6	0.30
9417	7.7	0.25	8.4	0.31	12.4	0.17
9711	0.8	0.02	7.6	0.53	8.5	0.49
0012	7.6	0.46	7.8	0.22	8.4	0.15
0205	12.0	0.16	10.8	0.37	1.37	0.36
0216	7.5	0.51	9.4	0.18	8.0	0.39
0414	11.7	0.14	8.51	0.00	17.4	0.01
0509	5.6	0.02	4.9	0.44	15.0	0.37
0515	14.2	0.29	7.5	0.29		
0713	10.3	0.11	7.2	0.12		
0716	11.9	0.02	9.6	0.12		
0807	7.0	0.32	5.9	0.14		

注:空白处无数据

由于篇幅所限,本文仅给出 0012 号台风期间大戢山测站的水位和增水时间序列验证图。从图 3 中可知,模拟的增水过程与实际一致,包括极值水位的峰值和发生的时间。

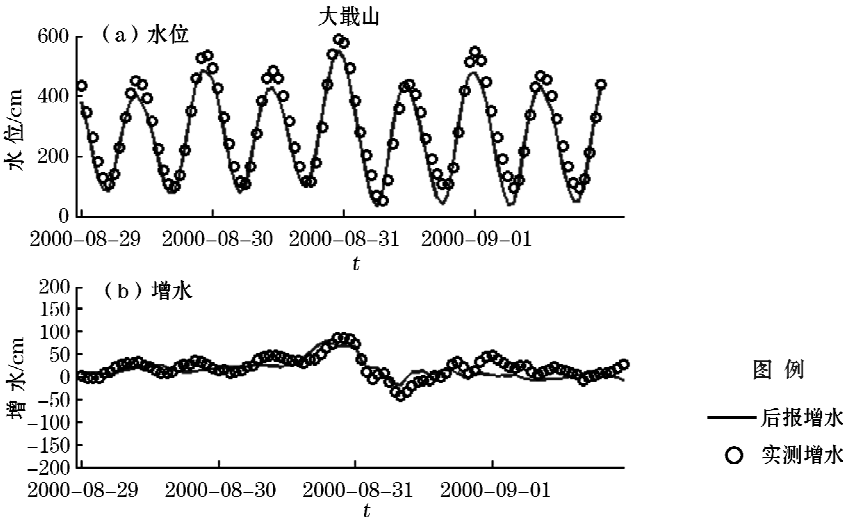


图 3 0012 号台风期间大戢山站水位与增水比较图

Fig. 3 Validation of total water level and surge at the Dajishan station during TC0012

综上所述,所建立的无结构风暴潮模型系统能较为准确地模拟影响长江口杭州湾地区的风暴潮增水过程、最高水位和最大增水的时间。

4 增水过程分析

影响长江口及其邻近海域的台风按照路径主要可分为两类,即近转向型(123°E 以东转向)和登陆型(台风在上海本地及以南沿海登陆,登陆后向西北方向移动,部分台风最后会北上转出)^[21]。利用本文所建立的长江口及其邻近海区无结构网格风暴潮模式,通过针对气压、风应力的数值实验,分析不同台风路径条件下,风力、气压作用对风暴增水的贡献。

4.1 气压、风应力增水贡献比较

9417 号和 0012 号台风可分别代表登陆型和近转向型台风,它们的路径如下图 4 所示。

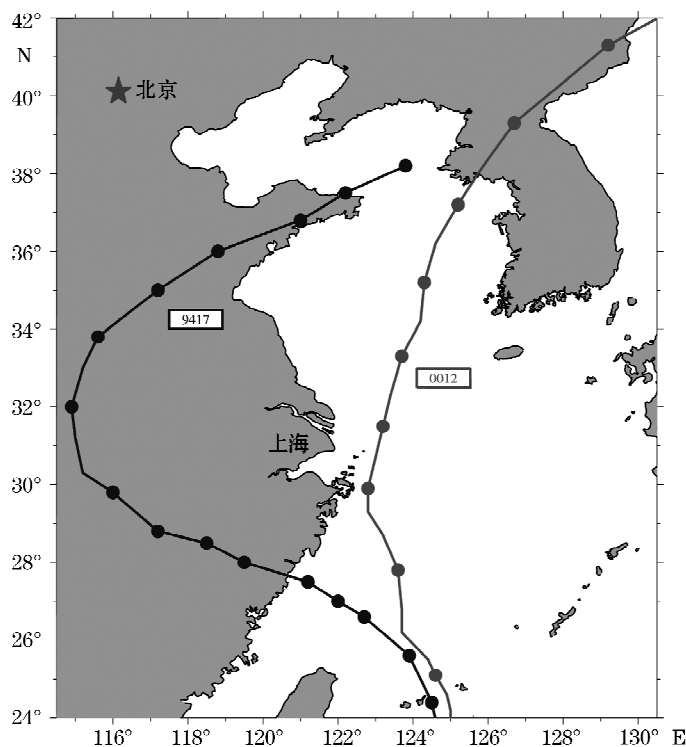


图 4 9417 号和 0012 号台风路径

Fig. 4 Typhoon tracks of TC9417 and TC0012

0012 号台风“派比安”(Prapiroon)是造成上海高桥验潮站出现历史上第二高潮位的台风,是影响长江口的近转向型台风的典型。2000-08-27,“派比安”台风在太平洋西北洋面生成后,于 08-30T17:00 到达离长江口最近的 $29^{\circ}18'\text{N}$, $123^{\circ}12'\text{E}$, 中心气压达到 965 hPa, 中心最大风速达到 60 m/s, 此时强度最大。31 日凌晨, 外高桥站达到了 5.97 m 的极值水位。在此之后, 台风向东北方向移动, 长江口、杭州湾区域出现了一定程度的减水现象。在 08-31T11:00, 外高桥出现了将近 1 m 的减水极值。9417 号台风“弗雷德”(Fred)于 1994-08-15 在关岛西北洋面上生成, 一直向西北方向移动, 并逐渐增强。近中心最大风速 55 m/s。该台风在 21 日晚从温州瑞安登陆, 登陆后向西北方向移动, 于 23 T14:00 转向东北, 减弱为温带气旋后, 在 25 日进入渤海。受台风外缘西南风影响, 在 21—22 日, 上海附近一些潮位站也出现了 50~100 cm 左右的增水, 杭州湾附近的增水值大于 100 cm。

图 5 给出的是 0012 号台风期间大戢山站位的增水过程、风矢量和气压序列,增水过程曲线中,黑色方块表示在模式中考虑风速和气压的综合作用输出的增水值,十字叉表示风应力作用得到的增水值,圆圈代表台风低压导致的增水值,黑色曲线代表实测数据;风矢量图中,浅色箭头代表观测值,深色箭头代表模拟值。

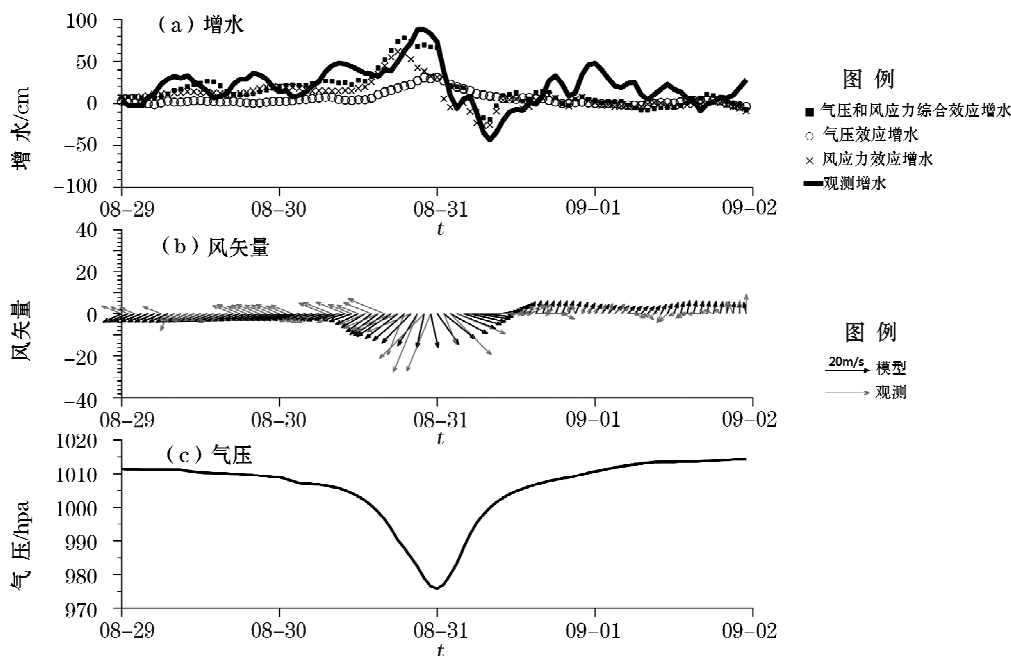


图 5 0012 号台风期间大戢山站增水、风矢量,气压时间序列图

Fig. 5 Time series of surge, wind vectors, and air pressure at the Dajishan station during TC0012

0012 号台风的增水过程从 08-30 中午开始,台风接近长江口区域时,受台风北缘的向岸东风影响,开始出现较显著增水。由风应力导致的增水和综合考虑气压和风应力的增水分别于 30 日 18:00,19:00 达到最大,量值达到 61 和 77 cm。实测数据的最大值 88 cm 出现在 08-30T21:00,时间上晚于模式计算结果,模拟量值也偏小。从风矢量比较图分析,这主要是由于风力模拟较小所致。随着台风进一步北上,08-31T00:00 低压效应引起的增水达到最大,达 31 cm;而此时台风中心离长江口最近,风向主要以北风为主,风力作用的增水效应开始减弱。在此之后,台风中心向东北方向移动,长江口地区远离台风中心,气压效应增水减弱,风向以西北离岸风为主,出现了减水。观测数据显示的最大减水时间为 08-31T08:00,考虑风应力和气压与只考虑风应力的数值实验时间结果一致,量值分别为 -43, -18, -25 cm。模拟的减水量值与实测相比偏小,主要是由于风力偏小所致。此时,考虑气压的模拟值比不考虑气压的减水量值小,因为低压效应仍然影响长江口,引起增水;气压与风力效应对增水的贡献相反。

上述分析可以看出,对于 0012 号台风,最大增水并非出现于台风离长江口最近的时刻,而取决于向岸风向(东南—东北风)的作用强度与持续时间。相对于风应力作用,气压的贡献较小。

图 6 是 9417 号台风期间大戢山站位的增水过程、风矢量和气压序列。模拟的增水过程可以较准确地刻画出从 21 日上午到 22 日,台风中心在浙江温州登陆期间,台风外缘影响上海引起的增水过程。不同于近转向型 0012 号台风,南登陆型 9417 号台风在登陆前后(21 日 12:00 登陆)台风北缘作用于长江口,东风和东北风对增水起主要作用。在 08-21,东风和东北风的风向和风速模拟较好,增水误差也比较小。到 22 日凌晨,台风中心移动到上海市西北方向的 $28^{\circ}\text{N}, 119^{\circ}30'\text{E}$ 位置。在台风登陆后,模拟的风速小于实际风速是造成增水值偏小的主要原因。这主要是由于台风登陆后,受到下垫面影响而发生变性和结构上的不对称;圆对称的台风模型风场不能很好刻画近岸风场的不对称性是造成这种误差的主要原因^[29]。

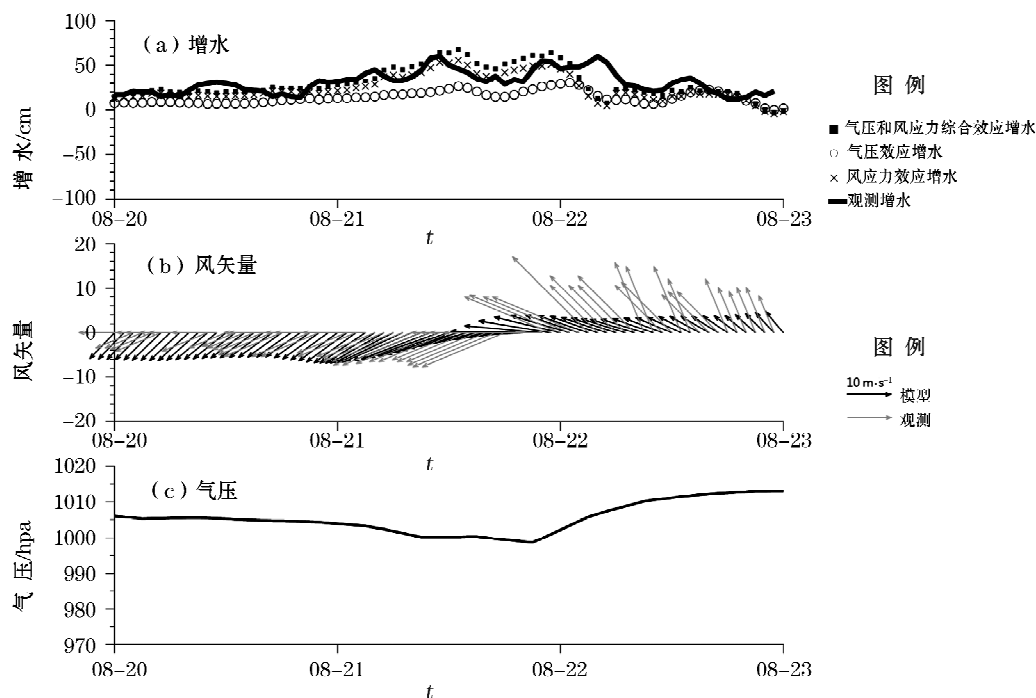


图6 9417号台风期间大戢山站增水、风矢量、气压时间序列图

Fig. 6 Time series of surge, wind vectors, and air pressure at the Dajishan station during TC9417

4.2 台风移动路径与外高桥增水关系统计分析

为了印证上述个例分析中,不同台风路径引起增水的特点,本文选择了1979年以来11次近转向型台风(0012,0014,7909,7910,0205,8019,8114,8211,8310,8519,8615)和9次登陆型台风(8913,8923,9015,9417,9711,0216,0414,0509,0515)进行了统计分析,表达了路径,气压梯度和增水强度的定量关系,结果如图7和图8。台风路径信息来自《CMA-STI西北太平洋热带气旋最佳路径数据集》^①。增水信息来自于国家海洋局东海预报中心。气压资料来自NOAA的网站^②,本文选取上海虹桥站逐时气压资料,时间跨度为1947—2012年。

在近转向型台风的分析中,以上海高桥站为圆心,建立极坐标,分别求出台风中心与高桥站之间的相对方向,距离,平均气压梯度。台风中心与高桥站的相对位置,以南取为负值,以北取为正值,正东方为 0° ,在图7中用角度表示;图中半径表示平均气压梯度,从圆心到圆周,由20 hPa/hkm到0 hPa/hkm递减。图7中展现了在高桥站以南 15° 和以北 15° 的资料。为了使得图示更清楚,图中的角度较标准极坐标有所放大。由台风中心气压和同时刻的虹桥站气压资料与台风中心与高桥站的距离相除得到平均气压梯度(体现台风强度,距离等综合因素,也是台风风场模型中计算速度的重要参量)^[30]。

从图7可以看出,高桥站增水达到100 cm以上,方位角在高桥以南 5° 以内,平均气压梯度在10~20 hPa/hkm,此时由于气压梯度大,风速强,且以向岸风为主,所以出现了较显著的增水(蓝紫色到紫红色点)。当方位角在 $-15^\circ \sim -5^\circ$ 时,由于台风往往距离外高桥站较远,台风边缘区域气压梯度较小,风速较小,增水多在30 cm以下。当台风转向,移动到外高桥以北 5° 以内的时候,相对于长江口地区的位置从东南转为东

① CMA-STI西北太平洋热带气旋最佳路径数据集,中国气象局上海台风研究所,2012,中国台风网;<http://www.typhoon.gov.cn/index.php?controller=spage&pid=169>

② <http://www7.ncdc.noaa.gov/CDO/cdo>

北,主要风向往往从 SE—NE 向岸风急剧变化到西北离岸风,出现减水(黄色点),此时的平均气压梯度,一般在 10 hPa/hkm 以下。当台风继续向北移行,远离长江口,气压梯度一般在 5 Pa/hkm 以内,此时长江口区域已不在台风主要影响的范围之内,几乎没有增减水出现。0012 台风过程中,08-30T21:00—31T01:00,高桥站增水在 $111 \sim 163 \text{ cm}$,台风中心与高桥的相对方位和平均气压梯度分别是 $-5^\circ \sim 0^\circ$, $14 \sim 16 \text{ hPa/hkm}$,正好落在图 7 的强烈增水区域内。

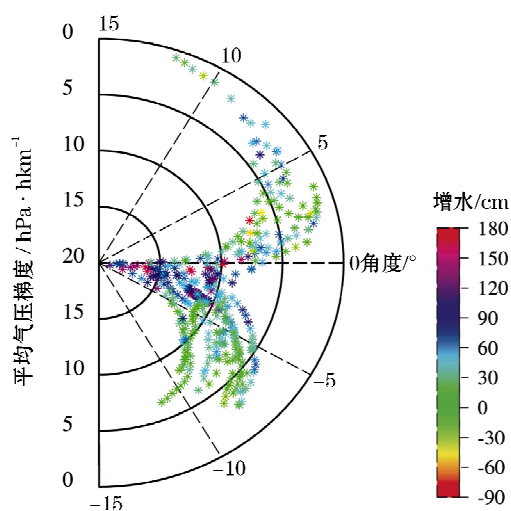


图 7 台风路径、平均气压梯度与高桥站增水关系图(近转向型)

Fig. 7 Relation graph of typhoon tracks, surge and averaged air pressure gradient (for direction-changing typhoon at near shore region)

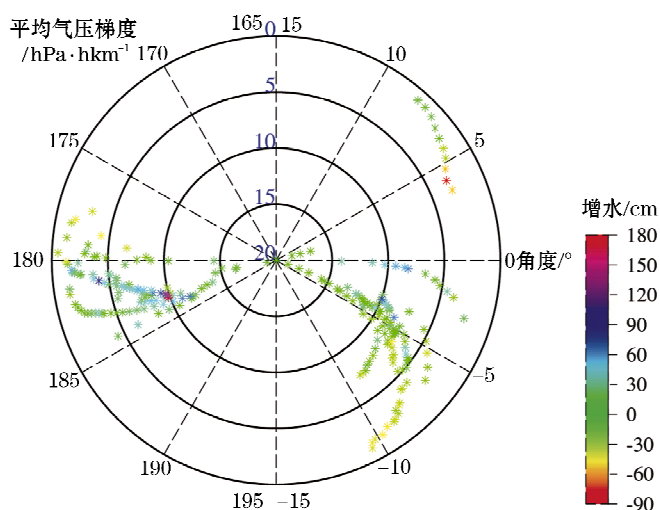


图 8 台风路径、平均气压梯度与高桥站增水关系图(登陆型)

Fig. 8 Relation graph of typhoon tracks, surge and averaged air pressure gradient (for landing typhoon)

图 8 中,在长江口以东的相对角度坐标和近转向台风一样。高桥站正西方定为 180° ,正北定为 15° ,正南定为 -15° 。位于高桥站西南方向的台风在 $175^\circ \sim 185^\circ$ 的范围内,位于高桥站东南方向的台风在 $-15^\circ \sim 0^\circ$ 范围内,位于高桥站东北方向的台风在 $0^\circ \sim 15^\circ$ 范围内。在所有影响长江口的台风当中,直接登陆长江口的非常少;大部分登陆型台风都在浙江一带登录,在登陆前后的时间内,台风中心位于长江口以南,台风右缘的东南向岸风持续影响长江口,会引起较强烈的增水。在图 8 中,角度在 $-10^\circ \sim 0^\circ$ 的点和部分在 $180^\circ \sim 185^\circ$ 的点代表了这种情形。当台风中心离上海较远,气压梯度不是非常大,以 $5 \sim 10 \text{ hPa/hkm}$ 居多,增水大都在 $60 \sim 120 \text{ cm}$ 。台风登陆后,大部分此类台风向西北方向移动。此时,长江口杭州湾区域位于台风东北部,受台风边缘东风影响,也会引起增水,增水程度受台风半径及强度影响,图 8 中方位角在 $180^\circ \sim 185^\circ$ 的部分点代表此类情形。在此之后,部分台风减弱消失,部分台风向北转向,在距离上再次接近长江口。图 8 中相对角度在长江口以北 $0 \sim 10^\circ$ 的几个点代表这一情况。此时,台风大都减弱为热带气旋或者温带气旋,强度较弱,平均气压梯度较小,均在 5 hPa/hkm 以下,增水值在正负 30 cm 以内。在 9417 号台风过程中,长江口杭州湾区域出现 50 cm 左右增水的时间在 21 日 21:00—22 日凌晨。台风相对于高桥站的方位为 183° 左右(西南方向),正好在位于长江口西南的温州登陆时,平均气压梯度为 $10 \sim 12 \text{ hPa/hkm}$,也在图 8 的增水区范围内。

5 结 论

本研究利用二维 ADCIRC 模式,耦合 SWAN 模式,建立了一个适用于长江口区域风暴潮的数值预报模式。模式采用对复杂岸线和地形有较好的拟合能力的三角网格,考虑了长江口径流量、天文潮和风暴潮非线性

性相互作用以及波浪对于风暴增水的影响;风暴潮模式的大气强迫场采用台风模型风场与背景风场相结合。利用所建立的模式对长江口区域一系列台风暴潮进行了后报检验,水位过程平均相对误差控制在 10%,说明模式精度较好。

利用本研究建立的模式,对分属两种典型路径的两类台风案例进行了分析,讨论了气压、风应力、台风路径等因素对增水的贡献,说明向岸风力的大小及持续时间对增水过程有着重要作用,东南向岸风的大小及持续时间的模拟精度对风暴潮模拟精度有重要影响。相对于气压,在近岸地区,风应力对增水的作用更显著。统计结果部分揭示了台风路径、强度与增水幅度的关系:当台风中心在外高桥以南,增水值基本与平均气压梯度呈正相关,平均气压梯度大于 5 hPa/km 时,增水较为显著;当台风移动到外高桥东北方向,则可能伴有减水过程。

气压与风力对于增水作用并非线性叠加,波浪、潮汐与风暴潮的非线性相互作用对增水也有一定的贡献,与之相关的研究将在后续工作中补充。另外,风场精度也限制了风暴潮后报精度的提高。本文所总结的增水规律分析,仍需要更多的实测资料分析和更精确模型结果加以佐证和补充。

参考文献(References):

- [1] 国家海洋局. 2008 年中国海洋灾害公报[R]. 北京: 国家海洋局, 2009. State oceanic administration People's Republic of china. communique of marine disasters in china seas of 2008[R]. Beijing: State Oceanic Administration People's Republic, 2009.
- [2] JELENIAŃSKI C P. Splash(Special Program to List Amplitudes of Surges from Hurricanes): 1. landfall storms[M]. Silver Spring, MD: US Department of Commerce, National Oceanic and Atmospheric Administration, National Weather Service, 1972.
- [3] HEAPS N S. Storm surges, 1967—1982[J]. Geophysical Journal International, 1983, 74(1): 331-376.
- [4] JELENIAŃSKI C P, CHEN J, SHAFFER W A, et al. Sea, lake, and overland surges from hurricanes[M]. Silver Spring, MD: US Department of Commerce, National Oceanic and Atmospheric Administration, National Weather Service, 1992.
- [5] GUO H L. A numerical prediction study of storm surge and floodplain on the delta of Oujiang[D]. Beijing: National Marine Environmental Forecasting Center, 2011. 郭洪琳. 瓯江口风暴潮漫滩数值预报研究[D]. 北京: 国家海洋环境预报中心, 2011.
- [6] FENG S Z. Introduction to storm surge. Beijing: Science Press, 1982, 148-187. 冯士筭. 风暴潮导论[M]. 北京: 科学出版社, 1982: 148-187.
- [7] LIU F S. An analysis of the Characteristics of Storm surge by typhoon[J]. Acta Oceanologica Sinica, 1982, 2(3): 12-33. 刘凤树. 台风暴潮某些特性的分析[J]. 海洋学报, 1980, 2(3): 12-23.
- [8] QIN Z H, FENG S Z. Preliminary study on dynamic mechanism of storm surge at shallow water[J]. Scientific Sinica, 1975, 1: 64-79. 秦曾灏, 冯士筭. 浅海风暴潮动力学机制的初步研究[J]. 中国科学, 1975, 1: 64-79.
- [9] SUN W X, FENG S Z, QIN Z H. Numerical modeling of an ultra-shallow water storm surge(1)[J]. Acta Oceanologica Sinica, 1979, 1(2): 1-11. 孙文心, 冯士筭, 秦曾灏. 超浅海风暴潮的数值模拟(一)[J]. 海洋学报, 1979, 1(2): 1-11.
- [10] WANG X N, YIN Q J, ZHANG B M. Research and applications of a forecasting model of typhoon surges in China Seas[J]. Advances in Water Science, 1991, 2(1): 1-10. 王喜年, 尹庆江, 张保明. 中国海台风风暴潮预报模式的研究与应用[J]. 水科学进展, 1991, 2(1): 1-10.
- [11] YU F J, ZHANG Z H, LIN Y H. A numerical storm surge forecast model with Kalman filter[J]. Acta Oceanologica Sinica, 2002, 24(5): 26-35. 于福江, 张占海, 林一骅. 一个稳态 Kalman 滤波风暴潮数值预报模式[J]. 海洋学报, 2002, 24(5): 26-35.
- [12] WANG P T, YU F J, LIU Q X, et al. Research on the ensemble forecast and its application at the Fujian Coast[J]. Marine Forecasts, 2010, 27(5): 7-15. 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.
- [13] XING J Y, SONG X J, YANG X L, et al. Numerical simulation experiments on typhoon kuanum[J]. Marine Forecasts, 2006, 23(2): 1-9. 邢建勇, 宋学家, 杨学联, 等. 台风“卡努”的数值模拟实验[J]. 海洋预报, 2006, 23(2): 1-9.
- [14] LIU K C. An Estimation for the probable maximum typhoon surges in shanghai harbour[J]. Coastal Engineering, 1984, 3(1): 21-29. 刘科成. 上海港可能最大风暴潮的估算[J]. 海岸工程, 1984, 3(1): 21-29.
- [15] YING R F, YANG T Z. Numerical simulation and analysis for maximum value of water levels at the wusong station[J]. Acta Oceanologica Sinica, 1986, 8(4): 423-428. 应仁方, 羊天柱. 上海防洪水位研究中吴淞台风暴潮数值计算与可能最高潮位分析[J]. 海洋学报, 1986, 8(4): 423-428.

- [16] ZHANG J L, CAO G P, SHENG G M. Numerical tests on typhoon set-up of yangtze estuary[J]. Journal of Hohai University, 1992, 20(6):17-25. 张君伦,曹国平,盛根明. 长江口台风增水的数值实验[J]. 河海大学学报, 1992, 20(6):17-25.
- [17] ZHOU X B, SUN W X. The non-linear interaction between storm surges and astronomical tides in the sea area off river changjiang's mouth[J]. Journal of Ocean University of Qingdao, 2000, 30(2): 201-206. 周旭波,孙文心. 长江口以外海域风暴潮与天文潮的非线性相互作用[J]. 青岛海洋大学学报, 2000, 30(2): 201-206.
- [18] ZHANG J S, KONG J, ZHANG W S, et al. Study of interaction between estuary dynamic and storm surge in the Yangtze River[J]. Hydro-Science and Engineering, 2008, 4:1-7. 张金善,孔俊,章卫胜,等. 长江河口动力与风暴潮相互作用研究[J]. 水利水运工程学报, 2008, (4):1-7.
- [19] CHEN H W, GE J Z, DING P X. Analysis of storm surge's process under the influence of waves[J]. Journal of East China Normal University: Natural Science, 2010, 4:16-25. 陈华伟,葛建忠,丁平兴. 波浪对台风风暴潮过程的影响分析[J]. 华东师范大学学报:自然科学版, 2010, (4):16-25.
- [20] GE J Z, HU K L, DING P X. Design and application of integrated visualized storm surge forecasting system[J]. Journal of East China Normal University: Natural Science, 2007, 4:20-25. 葛建忠,胡克林,丁平兴. 风暴潮集成预报可视化系统设计及应用[J]. 华东师范大学学报:自然科学版, 2007, (4):20-25.
- [21] DING P X. Research report for the surge-Tide analysis and prediction model in the taihu lake[R]. Shanghai: East China Normal University, 2006. 丁平兴. 太湖流域风暴潮与潮汐特性分析与预报模型研究报告[R]. 上海:华东师范大学, 2005.
- [22] LUETTICH R, WESTERINK J. Formulation and numerical Implementation of the 2D/3D ADCIRC finite element model version 44. XX. Chapel Hill[R]; University of North Carolina, 2004.
- [23] WESTERINK J J, LUETTICH JR R A, KOLAR R L. Advances in finite element modeling of coastal ocean hydrodynamics[M]. Southampton: Computational Mechanics Publications, 1996.
- [24] KOLAR R L, WESTERINK J J, CANTEKIN M E, et al. Aspects of nonlinear simulations using shallow-water models based on the wave continuity equation[J]. Computers & Fluids, 1994, 23 (3):523-538.
- [25] EGBERT G D, EROFEEVA S Y. Efficient inverse modeling of barotropic ocean tides[J]. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 2002, 19(2): 183-204.
- [26] ZHU S X, SHA W Y, DING P X, et al. An asymmetry wind field model of typhoon near shore[J]. Journal of East China Normal University: Natural Science, 2002, (3):66-71. 朱首贤,沙文钰,丁平兴,等. 近岸非对称台风风场模型[J]. 华东师范大学学报:自然科学版, 2002, (3):66-71.
- [27] HUANG H Q, ZHANG H Y, WEI L X, et al. Statistical analysis of source region for the typhoons forming at the western pacific[J]. Marine Forecasts, 2009, 26(3):59-61. 黄焕卿,张海影,魏立新,等. 西北太平洋台风发生个数及源地的统计分析[J]. 海洋预报, 2009, 26 (3):59-61.
- [28] DIETRICH J C, ZIJLEMA M, WESTERINK J J, et al. Modeling hurricane waves and storm surge using integrally-coupled, scalable computations[J]. Coastal Engineering, 2011, 58(1): 45-65.
- [29] GAO Q Q, ZHU J R, DUAN Y H, et al. Impacts of the symmetrical and unsymmetrical typhoons on the storm surge simulation in the east china and the south china sea[J]. Journal of East China Normal University: Natural Science, 2012, 11(6):57-72. 高钦钦,朱建荣,端义宏,等. 对称与非对称台风对东海南海影响比较[J]. 华东师范大学学报:自然科学版, 2012, 11(6):57-72.
- [30] LIN X L, XU Y W, WANG C H, et al. Analysis of the storm surge caused by the typhoon No. 8114[J]. Acta Oceanologica Sinica, 1985, 7(4):526-532. 林勋励,徐岳稳,王长海,等. 8114 长江口风暴潮特性的初步分析[J]. 海洋学报, 1985, 7(4):526-532.

An Unstructured Numerical Model for Storm Surge in the Changjiang Estuary and Its Application

ZHAO Chang-jin, GE Jian-zhong, DING Ping-xing

(*State Key Laboratory of Estuarine and Coastal Research, East China Normal University, Shanghai 200062, China*)

Abstract: A numerical model with unstructured grid and high resolution, which is based on ADCIRC and coupled with SWAN is developed to simulate the storm surges in the Changjiang Estuary and its adjacent areas. The effects of tide, wave and river discharge are considered in the numerical model. Hindcasts of the water surges induced by tropical cyclones are performed and the results are in good agreement with observations. The model is then utilized to study and analyze the patterns of surge caused classes of typhoons-landing and direction-changing typhoons. Influences on surge caused by air pressure, wind stress and typhoon tracks are investigated with numerical experiments. Quantitative relationships among surge range, pressure gradient and typhoon tracks are revealed by statistical analysis of typhoon tracks and observed surge records at the Waigaoqiao station.

Key words: ADCIRC; storm surge; typhoon tracks

Received: December 6, 2013