

# 福建沿岸台风暴潮数值实验

谢燕双<sup>1,2</sup>, 商少平<sup>1,2\*</sup>, 王代锋<sup>1</sup>

(1. 厦门大学海洋与环境学院, 2. 水声通信和海洋信息技术教育部重点实验室(厦门大学), 福建 厦门 361005)

**摘要:** 福建沿岸风暴潮灾害严重, 为研发具有快速预警能力的福建沿岸风暴潮漫堤预警辅助决策系统, 建立了福建沿岸台风暴潮数值模型, 并对 31 个历史台风引起的福建沿岸风暴潮进行了后报模拟, 结果与实际较为吻合. 进而分别就台风前期近中心最大风速、前期中心移动速度和前期中心移动方向对后期增水的影响进行了数值实验. 结果表明: 在预报的台风参数的可能变化幅度范围内, 前期台风参数对后期增水的影响较小. 实验获得的最大绝对差值均远小于一般的风暴潮后报误差.

**关键词:** 风暴潮; 福建沿岸; 台风参数; 数值实验

**中图分类号:** P 333

**文献标识码:** A

**文章编号:** 0438-0479(2009)05-0714-05

福建沿岸台风影响频繁, 是国内受风暴潮灾害最严重的区域之一. 因此在实践中做好台风暴潮的防灾预报具有重要意义.

根据以往数值计算和经验的分析可知, 台风移动路径、近中心最大风速、最大风速半径、移动速度、中心气压等台风参数是影响台风增水的主要因素. 为研发具有快速预警能力的福建沿岸风暴潮漫堤预警辅助决策系统, 本文通过数值实验, 分析在预报的台风参数的可能变化幅度范围内, 台风近中心最大风速、移动速度、移动路径等主要台风参数变化对福建沿岸台风增水的影响, 以期建立快速有效的台风增水计算方法.

## 1 风暴潮数值模拟

### 1.1 风暴潮全流方程组

模式采用全流表达的海水运动方程和连续性方程, 如下所示:

$$\frac{\partial U}{\partial t} + \frac{U}{h+\eta} \frac{\partial U}{\partial x} + \frac{V}{h+\eta} \frac{\partial U}{\partial y} = -\frac{(h+\eta)}{g} \frac{\partial p}{\partial x} - g(h+\eta) \frac{\partial \eta}{\partial x} + fV + \tau_x - \frac{2}{(h+\eta)^2} (U^2 + V^2)^{\frac{1}{2}} U \quad (1)$$

$$\frac{\partial V}{\partial t} + \frac{U}{h+\eta} \frac{\partial V}{\partial x} + \frac{V}{h+\eta} \frac{\partial V}{\partial y} = -\frac{(h+\eta)}{g} \frac{\partial p}{\partial y} - g(h+\eta) \frac{\partial \eta}{\partial y} - fU + \tau_y - \frac{2}{(h+\eta)^2} (U^2 + V^2)^{\frac{1}{2}} V \quad (2)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} + \frac{\partial U}{\partial x} + \frac{\partial V}{\partial y} = 0 \quad (3)$$

模式在准直角坐标系展开, 坐标的  $oxy$  面与静止海面重叠;  $x$  轴指向正东,  $y$  轴指向正北,  $z$  轴向上为正; 为以  $oxy$  面起算的海面上升高度;  $U$ 、 $V$  分别为全流沿  $x$ 、 $y$  方向的两个分量;  $h$  为水深;  $b$  为底摩擦系数, 为经验常数, 本模式取 0.002;  $f$  为科氏参量;  $\rho$  为海水密度, 取  $1\,025\text{ kg/m}^3$ ;  $p$  为海面处的大气压;  $(x, y)$  为风应力, 它与海面上 10 m 处风速  $\vec{W}$  的经验关系为

$$\vec{\tau} = \rho_a \frac{2}{a} |\vec{W}| \vec{W} \quad (4)$$

其中  $\rho_a$  为海面上空气密度, 取  $1.25\text{ kg/m}^3$ , 风应力系数  $\frac{2}{a}$  按下式取值<sup>[1-7]</sup>:

$$\frac{2}{a} \times 10^3 = \begin{cases} 1.052, & |\vec{W}| \leq 6\text{ m/s} \\ 0.638 + 0.069|\vec{W}|, & 6\text{ m/s} < |\vec{W}| < 30\text{ m/s} \\ 2.708, & |\vec{W}| \geq 30\text{ m/s} \end{cases} \quad (5)$$

### 1.2 初始条件和边界条件

初始条件: 当  $t=0$  时,  $U=V=0$ .

边界条件: 对于岸边界, 法向分量速度为零; 开边界, 取水位为零(水边界距离福建海岸足够远, 如图 1).

### 1.3 台风气压场和风场

台风风场采用考虑台湾海峡及台湾岛地形影响下的台风风场模型<sup>[8]</sup>, 该模型风场由台风圆对称风场、台风移行风场和附加风场 3 部分组成.

台风气压场采用 Holland<sup>[9]</sup> 公式近似计算. 台风参数中台风中心气压降和台风近中心最大风速都为台风强度的标志, 但对于海面上发展成熟的台风来说两

收稿日期: 2009-03-26

基金项目: 国家 863 计划重大项目(2006AA09A302-6)资助

\* 通讯作者: spshang@xmu.edu.cn

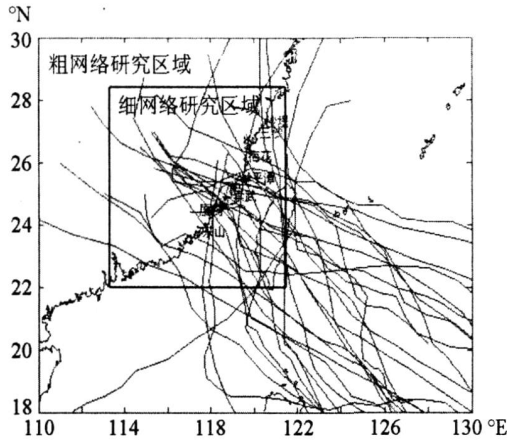


图 1 粗网格、细网格计算区域图和历史台风路径图  
Fig. 1 Model domains for the coarse and the fine mesh with typhoon track

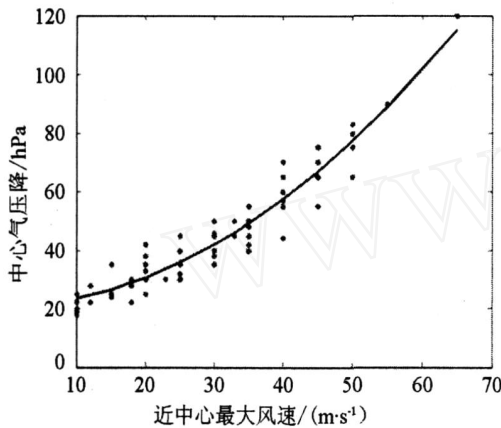


图 2 台风中心气压降和近中心最大风速拟合曲线  
Fig. 2 Fit curve of typhoon central pressure and maximum wind speed

者具有一定的相关性.为减少研发中的风暴潮漫堤预警辅助决策系统依赖的台风参数量,根据影响福建沿岸的 31 个历史台风的实测资料,对台风中心气压降和近中心最大风速进行统计和拟合,结果如图 2,得到相关关系式

$$P_0 = 0.021457W^2 + 0.05269W + 20.989 \quad (6)$$

### 1.4 差分方案

模式采用有限差分方法离散方程组,变量空间分布采用交替网格,即“Arakawa C”<sup>[10-11]</sup>,时间上采用可显式计算的隐显交替格式.模式采用粗细网格嵌套的方法,如图 1 所示,粗网格计算区域(110°~130°E, 18°~30°N),空间步长为 6,细网格计算区域(113.3°~121.5°E, 22.0°~28.4°N),空间步长为 2,计算时间步长为 30 s.

### 1.5 后报检验

本文收集了从 1969~2001 年影响台湾海峡的 31

个历史台风(路径如图 1 所示)资料及其影响期间福建沿海 6 个验潮站、水文站观测的水位资料,利用所建模式对这些台风引起的风暴潮进行了后报模拟和误差检验.用于对比检验的 6 000 个数据,均为台风风暴最大时前后共 2 d 内各站的逐时观测数据,表 1 为计算结果与实测值的对比检验统计结果.从误差统计结果看,后报是较为成功的.

表 1 风暴潮计算误差统计表

Tab. 1 Statistics of storm surge computation errors

验潮站	数据量	平均绝对误差/cm
三沙	1056	18.3
梅花	480	25.1
平潭	1440	19.2
崇武	192	23.1
厦门	1440	22.6
东山	1392	18.8
所有数据	6000	21.2

## 2 数值实验

为分析风暴潮随台风主要特征参数在预报的可能变化幅度范围内变化的情况,本文选取假想台风的近中心最大风速、中心移动速度和移动方向等 3 个主要参数开展数值实验.

### 2.1 前期近中心最大风速对后期增水影响的数值实验

设台风中心移动方向如图 3 所示路径 EGH,中心移动速度为 20 km/h,以近中心最大风速为实验参数,利用本数值模型计算台风中心到达岸上 O 点(如图 4 所示)时,O 点及其北侧海岸 A、B、C、D 点,南侧海岸 a、b、c、d 点的增水(两相邻增水点相距 50 km).

参数 1:近中心最大风速 W 恒为 40 m/s,结果如表 2 中<sub>40</sub>;

参数 2:登陆时 W 为 40 m/s,登陆前 6 h 以及此前 W 为 45 m/s,结果如表 2 中<sub>45-40</sub>;

参数 3:W 恒为 45 m/s,结果如表 2 中<sub>45</sub>;

参数 4:登陆时 W 为 45 m/s,登陆前 6 h 以及此前 W 为 40 m/s,结果如表 2 中<sub>40-45</sub>.

由表 2 中的<sub>2</sub>、<sub>4</sub>可知,前期最大风速变化对

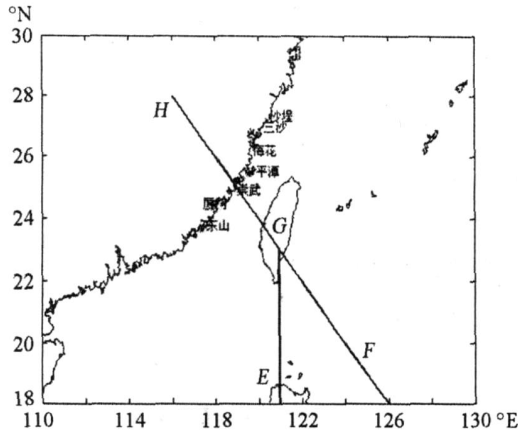


图3 台风路径图

Fig. 3 Typhoon track

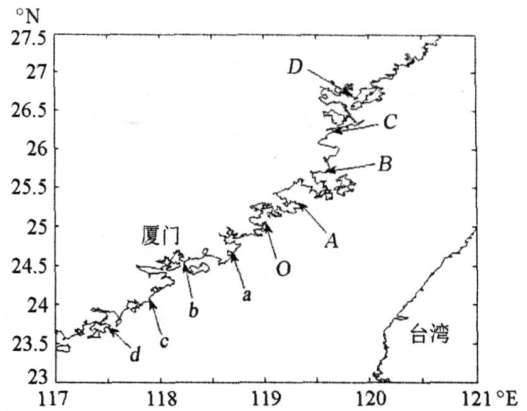


图4 水位点分布图

Fig. 4 Water level point distribution

表2 登陆前最大风速对登陆时福建沿岸水位点增水的影响

Tab.2 Storm surges along Fujian coast induced by typhoon landfalls with the variability of former maximum wind speed

水位点	各参数情况下水位点增水/cm								
	40	45 - 40	45	40 - 45	40 + 45	2	4	2	4
D	93	101	115	102	104	8	- 13	- 3	- 2
C	120	128	150	135	135	8	- 15	- 7	0
B	157	168	199	179	178	11	- 20	- 10	1
A	208	224	252	229	230	16	- 13	- 6	- 1
O	160	170	189	175	175	10	- 14	5	0
a	105	115	120	109	115	10	- 11	0	- 6
b	60	68	56	51	58	8	- 5	10	- 7
c	56	63	55	51	56	7	- 4	7	- 7
d	51	55	51	48	51	4	- 3	4	- 3

注: 2 = 45 - 40 - 40; 4 = 40 - 45 - 45; 2 = 45 - 40 - 40 + 45; 4 = 40 - 45 - 40 + 45.

登陆时福建沿岸水位点增水幅值的影响较大,最大差值接近风暴潮后报的误差范围.由表2中的 2、4 可知,实际情况中较常见的风速渐变时的增水计算结果与分别以渐变前和后两种风速为恒定风速所引起的风暴潮增水的平均值之差不大于 10 cm,差值显著减小,最大绝对差值仅为增水峰值的 4.4%.

### 2.2 前期台风中心移动速度对后期增水影响的数值实验

设台风中心移动方向如图3所示路径 EGH,近中心最大风速恒定为 40 m/s,以台风中心移动速度为实

验参数,计算台风中心到达 O 点时沿岸各点增水.

参数 1:台风中心移动速度为 V 恒定为 20 km/h,结果如表 3 中 20;

参数 2:登陆 12 h 前的 V 为 30 km/h,其后 V 为 20 km/h,结果如表 3 中 30 - 20;

参数 3:登陆 12 h 前的 V 为 15 km/h,其后 V 为 20 km/h,结果如表 3 中 15 - 20.

由表 4 中的 2、3 可知,两种前期中心移动速度对后期增水的影响都小于 5 cm,最大绝对差值仅为增水峰值的 1.9%.

表 3 登陆前中心移动速度对登陆时福建沿岸水位点的增水影响

Tab. 3 Storm surges along Fujian coast induced by typhoon landfalls with the variability of former typhoon velocity

水位点	各参数情况下水位点增水/cm				
	20	30 - 20	15 - 20	$\frac{2}{2}$	3
D	93	89	92	- 4	- 1
C	120	118	120	- 2	0
B	157	155	156	- 2	- 1
A	208	205	207	- 3	- 1
O	160	157	160	- 3	0
a	105	102	104	- 3	- 1
b	60	56	60	- 4	0
c	56	53	55	- 3	- 1
d	51	47	51	- 4	0

注:  $\frac{2}{2} = 30 - 20 - 20$ ;  $3 = 15 - 20 - 20$ .

### 2.3 前期台风中心移动方向对后期增水影响的数值实验

设台风近中心最大风速恒定为 40 m/s,台风中心移动速度为 20 km/h,以台风中心移动方向为实验参数,计算台风中心到达 O 点(图 4)时沿岸各点增水.

参数 1:台风沿图 3 所示 EGH 移动,结果如表 4 中 EGH;

参数 2:登陆前 12 h 及此前的中心移动方向由南向北,此后方向为西北(如图 3 所示路径 FGH),结果如表 4 中 FGH.

表 4 登陆前中心移动方向对登陆时福建沿岸水位点的增水影响

Tab. 4 Storm surges along Fujian coast induced by typhoon landfalls with the variability of former typhoon track

水位点	各参数情况下水位点增水/cm		
	EGH	FGH	$= EGH - FGH$
D	93	92	- 1
C	120	119	- 1
B	157	157	0
A	208	207	- 1
O	160	159	- 1
a	105	104	- 1
b	60	58	- 2
c	56	55	- 1
d	51	48	- 3

由表 4 中的 可知,前期中心移动方向对登陆时的增水的影响很小,最大绝对差值仅为增水峰值的 1.4%.

### 3 结 论

上述数值实验结果表明:

1) 台风登陆 6 h 前的最大风速和登陆时的最大风速保持恒定时,计算得到的登陆时福建沿岸增水的平均值,与最大风速变化时所计算的增水差值较小,实验获得的最大绝对差值仅为增水峰值的 4.4%,远小于一般的风暴潮数值后报误差.

2) 登陆 12 h 前的台风中心移动速度对登陆时福建沿岸的风暴潮增水的影响很小,实验获得的最大绝对差值仅为增水峰值的 1.9%,远小于一般的风暴潮数值后报误差.

3) 在登陆点相同的情况下,登陆 12 h 前的台风中心移动方向对登陆时福建沿岸的风暴潮增水影响很小,实验获得的最大绝对差值仅为增水峰值的 1.4%,远小于一般的风暴潮数值后报误差.

### 参考文献:

- [1] Garratt J R. Review of drag coefficients over oceans and continents[J]. Monthly Weather Review, 1977, 105 (7): 915 - 929.
- [2] Geernaert G L, Larsen S E, Hansen F. Measurements of the wind stress, heat flux, and turbulence intensity during storm conditions over the North Sea[J]. Journal of Geophysical Research, 1987, 92(C12): 13127 - 13139.
- [3] Large W G, Pond S. Open ocean momentum flux measurements in moderate to strong winds[J]. Journal of Physical Oceanography, 1981, 11(3): 324 - 336.
- [4] Powell M D, Vickery P J, Reinhold T A. Reduced drag coefficient for high wind speeds in tropical cyclones[J]. Nature, 2003, 422: 279 - 283.
- [5] Smith S D. Wind stress and heat flux over the ocean in gale force winds[J]. Journal of Physical Oceanography, 1980, 10(5): 709 - 726.
- [6] Wu J. Wind stress coefficients over sea surface from breeze to hurricane[J]. Journal of Geophysical Research, 1982, 87(C12): 9704 - 9706.
- [7] Yelland M J, Moat B I, Taylor P K, et al. Wind stress measurements from the open ocean corrected for airflow distortion by the ship[J]. Journal of Physical Oceanography, 1998, 28(7): 1511 - 1526.
- [8] 陈德文. 台湾岛周边海域台风海面风场及其模型化研究[D]. 厦门: 厦门大学, 2006.

- [9] Holland GJ. An analytic model of the wind and pressure profiles in hurricanes[J]. Monthly Weather Review, 1980, 108(8):1212 - 1218.
- [10] Arakawa A, Lamb V R. A potential enstrophy and energy conserving scheme for the shallow water equations [J]. Monthly Weather Review, 1981, 109(1):18 - 36.
- [11] Jakobsen F, Madsen H. Comparison and further development of parametric tropical cyclone models for storm surge modelling[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2004, 92(5):375 - 391.

## Numerical Experiments of Storm Surges Along Fujian Coast

XIE Yan-shuang<sup>1,2</sup>, SHANG Shao-ping<sup>1,2\*</sup>, WANG Dai-feng<sup>1</sup>

(1. College of Oceanography and Environmental Science, Xiamen University,

2. Key Laboratory of Underwater Acoustic Communication and Marine Information Technology  
(Xiamen University), Ministry of Education, Xiamen 361005, China)

**Abstract :** Storm surges induce heavily disaster along the Fujian coast. In order to develop a fast storm surge warning system for Fujian, a one-way nested coupled storm surge numerical model was established and used to simulate the storm surges induced by 31 typhoon landfalls along the Fujian coast. The results were satisfactory and numerical experiments were then performed to study the variability of storm surges induced by the cyclone parameters and which were different from those 6/12 hours before landing. Parameters such as the maximum wind speed, typhoon track, and typhoon velocity were considered in these experiments. The experiments demonstrate that these typhoon parameters, which varied in their possible ranges when they were forecasted, induced little effect on storm surges when typhoons land. And the maximum absolute discrepancy is far smaller than the error of general storm surge prediction.

**Key words :** storm surges; Fujian coast; typhoon parameters; numerical experiments