

## 姬厚德<sup>1</sup>, 潘伟然<sup>2</sup>, 张国荣<sup>2</sup>

(1.福建海洋研究所, 厦门 361012; 2.厦门大学, 厦门 361005)

**摘要:** 本文利用国际上先进的第三代海浪模式SWAN, 在充分考虑风能量输入、白浪效应、水深诱导的波浪破碎、底摩擦、波一波间的非线性相互作用等物理过程。以0604号台风“碧利斯”为例, 通过嵌套计算方式, 模拟了台湾海峡及厦门湾台风浪场的分布特征。将数值模拟结果与浮标测站实测资料对比分析, 结果表明台风浪高模拟值与实际台风资料相符较好, 可以为该海域台风浪的模拟提供较好的参考。

**关键词:** 台风海峡; 厦门湾; 风浪; SWAN

**中图分类号:** P731 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-0239(2010)01-0044-05

### 1 引言

海洋灾害常常给人们研究、开发海洋带来很大困难,给社会经济造成很大损失,同时很大程度上危害着人们的生命、生活。近代研究表明,海上自然破坏力的90%来自海浪,仅10%的破坏力直接来自于风,其中灾害性台风浪的破坏力尤其巨大。因此研究和开发高精度的海浪数值预报模式,提高对灾害性台风浪的预报和监测能力,对社会经济发展和人类生命、生活的安全,都有重要的意义<sup>[1]</sup>。

在中国海,每年都有6 m以上的灾害性海浪发生,年平均为28次,台风浪占41%左右,统计资料表明<sup>[2-3]</sup>,每年台风浪对我国海岸工程、海上交通运输以及海水养殖等造成的经济损失超过7亿元。

处于中国东、南沿海大陆架上的台湾海峡,地形起伏不平,海底冲刷剧烈,海底凹凸不平,多为隆起、沟槽等侵蚀海底形态<sup>[4]</sup>,是我国海域中风浪较大、受热带风暴和台风影响频繁、风暴潮灾害极为严重的海区。台湾海峡附近海域因地形狭管效应,极易出现5 m以上的巨浪。

本文在分析台风浪作用过程中考虑了风-浪相互作用、白浪耗散、底摩擦耗散、水深诱导的波浪破碎和波一波间的非线性相互作用等物理机制过程,利用海浪模式SWAN模拟了0604号“碧利斯”台风期间台湾海峡及厦门湾台风浪场的分布特征。计算流程图(见图1)。

### 2 SWAN模式简介

SWAN(Simulating Waves Nearshore)是第三代海浪数值模式,建立在波作用平衡方程的基础上,由荷兰Delft大学开发,它主要是为计算浅水与近岸的海浪而设计的,适用于海岸区、湖泊和河口区,它全面的考虑了波浪浅化、折射、底摩擦、破碎、白浪、风能输入、三相波及四相波非线性效应<sup>[5-6]</sup>。该模式采用全隐式有限差分格式,无条件稳定,但也有其局限性,即:模式不包含绕射,不适于模拟绕射效应显著的港湾波浪<sup>[7]</sup>。然而,台风期间,计算海域以风浪为主,因此选取SWAN模式对台湾海峡及邻近港湾的台风浪分布情况进行模拟,能够适于复杂的气象和地形条件,是较为合理的选择<sup>[8]</sup>。

收稿日期: 2009-01-08

作者简介: 姬厚德(1980-),男,研究实习员,主要从事河口海岸动力学研究。E-mail: applecoe@126.

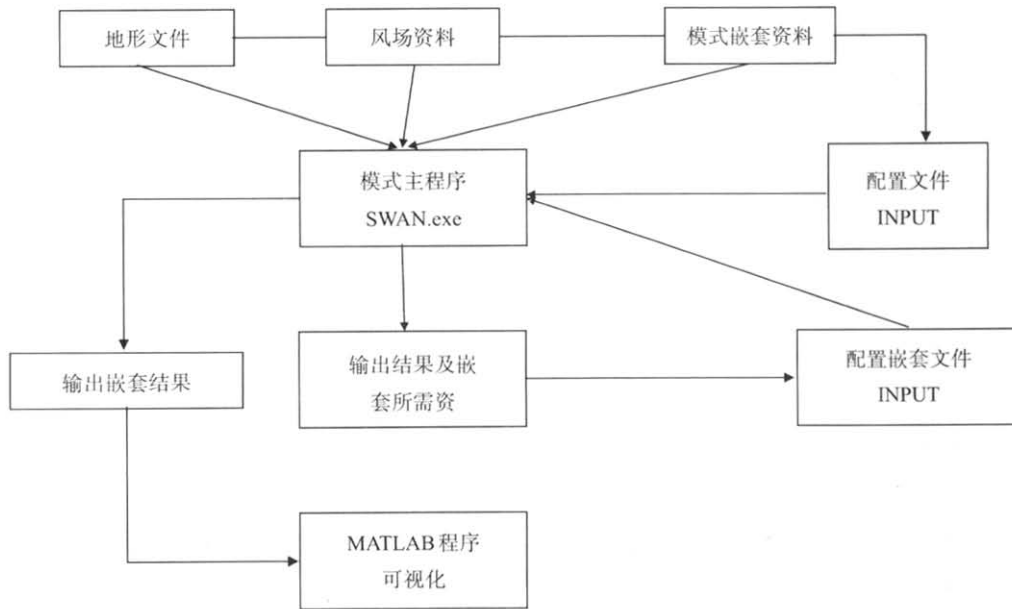


图1 计算流程图

在 SWAN 海浪模式中，用二维波作用量  $N(\sigma, \theta)$  来描述随机波浪场<sup>[9]</sup>，该模式采用波作用平衡方程，表达式如下：

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} C_x N + \frac{\partial}{\partial y} C_y N + \frac{\partial}{\partial \sigma} C_\sigma N + \frac{\partial}{\partial \theta} C_\theta N = \frac{S}{\sigma}$$

左边第一项是波作用量在时间上的变化；第二项和第三项是波作用量在空间上的传播；第四项是水深和流导致的波动相对频率的频移；第五项是水深和流产生的波浪折射；等式右边的  $S$  是源汇项，其中，源汇项  $S$  包括风摄入波动能量、白浪耗散、水深变化导致的波浪破碎、底摩擦耗散、波-波非线性相互作用等能量摄入机制和耗散过程<sup>[10-11]</sup>。

### 3 台风浪场模拟分析

#### 3.1 台风简介及台风风场模拟

##### 3.1.1 台风“碧利斯”简介

台风“碧利斯”于2006年7月9日下午在菲律宾南部的西北太平洋洋面上生成，7月11日下午加强为强热带风暴，7月13日23时前后在我国台湾省宜兰县沿海登陆，近中心最大风力有11级，风速30 m/s。7月14日12时50分，台风“碧利斯”在

福建省霞浦县北壁镇再次登陆，登陆时中心气压975 hPa，中心附近最大风力仍有11级，风速30 m/s，登陆后向偏西方向移动并于14日16时在福建省闽候县境内减弱为热带风暴。台风“碧利斯”强热带风暴于7月12~16日在台湾省以东洋面、东海、台湾海峡、南海和黄海形成6m~8m的台风浪。受台风“碧利斯”风暴潮与台风浪的共同影响，福建、浙江两省直接经济损失57.55亿元。

##### 3.1.2 台风风场的模拟

本文的模型风场采用的是 Jelesnianski (1965) 的飓风模型，即：

$$\vec{W} = \begin{cases} \frac{r}{R+r} (V_{ax} \vec{i} + V_{ay} \vec{j}) + W_R \left(\frac{r}{R}\right)^{\frac{3}{2}} \times \frac{1}{r} (A\vec{i} + B\vec{j}), & (0 < r \leq R) \\ \frac{R}{R+r} (V_{ax} \vec{i} + V_{ay} \vec{j}) + W_R \left(\frac{R}{r}\right)^{\frac{1}{2}} \times \frac{1}{r} (A\vec{i} + B\vec{j}), & (r > R) \end{cases}$$

$$P_r = \begin{cases} P_o + \frac{1}{4} (P_\infty - P_o) \left(\frac{r}{R}\right)^{\frac{3}{2}}, & (0 < r \leq R) \\ P_\infty - \frac{3}{4} (P_\infty - P_o) \left(\frac{R}{r}\right)^{\frac{3}{2}}, & (r > R) \end{cases}$$

式中： $A = -(y \cos \theta + x \sin \theta)$ ； $B = x \cos \theta - y \sin \theta$ ； $\vec{V}_o(V_{ax}, V_{ay})$ 为台风中心移动速度矢量； $W_R$ 为近台风

中心最大风速;  $R$ 为台风大风半径,  $r$ 为计算点至台风中心距离;  $\theta$ 为梯度风吹入角, 这里取 $\theta=15^\circ$ 。

为了行文方便, 文中只选取某个典型时刻的计算风场分析。图2为2006年7月14日05时风场分布图, 此时台风中心位于约 $121^\circ\text{E}$ ,  $25^\circ\text{N}$ , 从图上可以看出台风中心地区风速较小, 且呈圆状向外扩散, 与实际情况符合性较好。

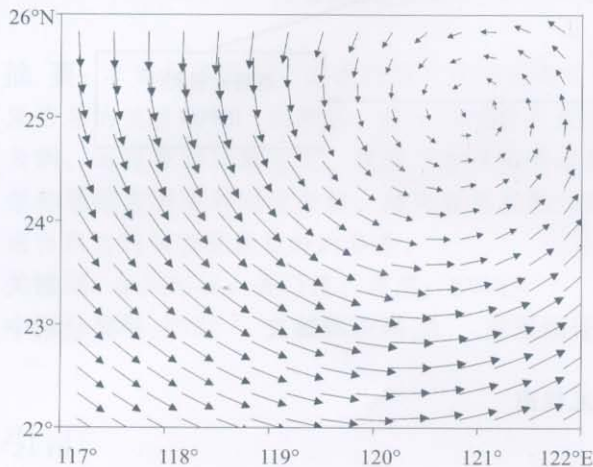


图2 2006年7月14日05时风场分布图

### 3.2 计算区域地形

台湾海峡大致呈SW-NE走向, 海峡内水深梯度较大; 厦门湾口门朝向东南, 面临台湾海峡, 大部分水深在5~20 m之间, 最大水深约为31 m, 厦门湾水深地形图(见图3)。

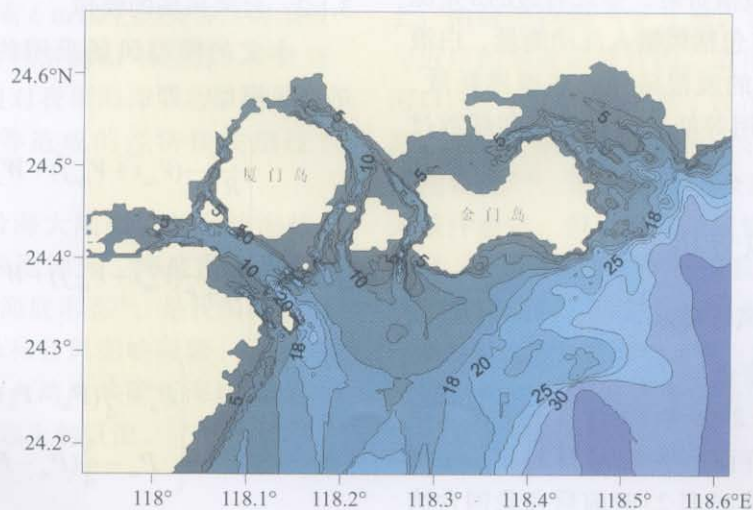


图3 台湾海峡的水深等值线分布图

### 3.3 模型控制参数

台湾海峡的波浪计算中, 计算海域选为 $117^\circ\sim 122^\circ\text{E}$ ,  $22^\circ\sim 26^\circ\text{N}$ 的海域, 网格分辨率为 $2.5'\times 2.5'$ , 模式的时间步长取为1200 s, 方向步长取为 $3^\circ$ 。

厦门湾的波浪计算中, 模式计算海域为 $117^\circ 58'\sim 118^\circ 37'\text{E}$ ,  $24^\circ 10'\sim 24^\circ 40'\text{N}$ , 网格分辨率为 $(1/4)\times (1/4)'$ , 模式的时间步长取为1200 s, 方向步长取为 $3^\circ$ 。

### 3.4 台风浪场模拟分析

#### 3.4.1 SWAN模式验证

为了验证SWAN模式对台湾海峡台风浪的模拟效果, 本文将模式计算结果与台风期间平潭和崇武海洋站的实测资料进行了对比分析(见图4)。

从图4中可以看出, swan模式的计算结果与浮标测站的波浪实测资料基本吻合, 证明该模式可用于台湾海峡海区台风浪场的模拟。

#### 3.4.2 台湾海峡台风浪场模拟

图5为对应于图3风场时刻台湾海峡附近海域的波浪场分布, 箭头表示波的传播方向, 图中表明台风中心位置由于风速较小, 对应的波高也较小, 这种现象与理论分析及实际观测结果是较为一致的。在台风中心的西南部, 最大有效波高约7m, 浪高模拟图还表明最大浪高中心位于台风中心西南部, 说明台风风场并不是均匀对称的, 且



受到台湾岛与大陆形成的“狭管效应”的影响,使得海峡内的波浪场分布较为复杂,但其大体特征与风场分布特征基本一致,这对于我们抗台减灾具有一定的指导意义。

### 3.4.3 厦门湾台风浪场模拟

为了进一步计算台风“碧利斯”台风对厦门湾海域的影响,将粗网格计算的厦门湾口的波谱特征作为进一步计算的边界条件,以节省计算时间,提高计算精度。图6为对应风场时刻厦门湾内台风浪场分布特征。

从图中可以看出,波向与风场变化一致,随着风向的改变而改变。当波浪传至近岸时,受到水深和底摩擦的影响加剧,波高迅速减小,成为制约波高增大的主要因素。同时,随着台风风速

的变化,波高也随着相应变化,台风风力减小时,波高也迅速减小。从整个厦门湾来看,台风期间,金门岛以北,受水深以及金门岛本身的阻挡影响,波高相对较小。厦门岛内侧,鼓浪屿以北受外海台风影响较小,整个台风期间波高较小,最大有效波高不超过1.0 m;岛的外侧直接受到外海风浪的影响,波高较大,在台风期间最大出现的有效波高约为2.0 m。

### 3.4.4 嵌套前后波浪场比较

利用粗网格SWAN模式计算结果,进一步细化网格计算,为了比较嵌套前后湾内波浪场计算结果的不同,我们选取厦门岛南部一点作为对比点,对其嵌套前后波浪场时空分布状况进行比较,结果见图7。

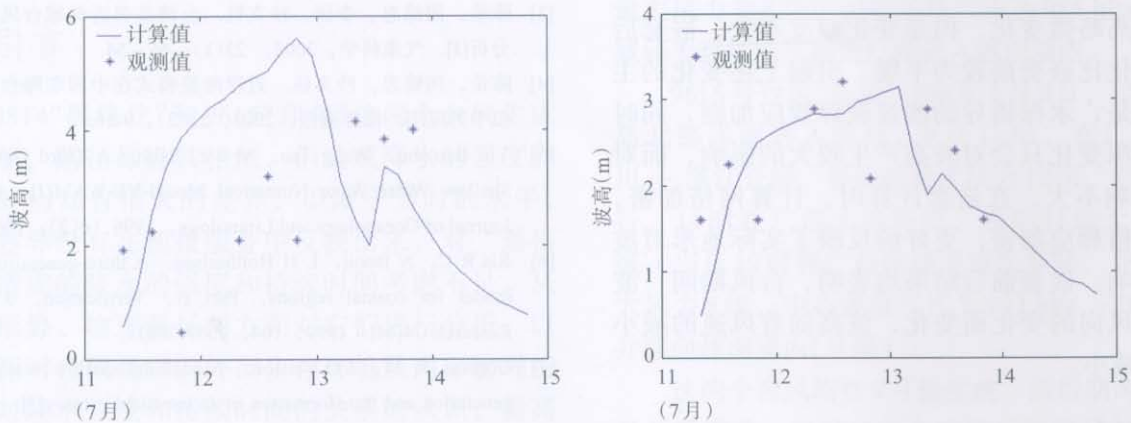


图4 波高对比图

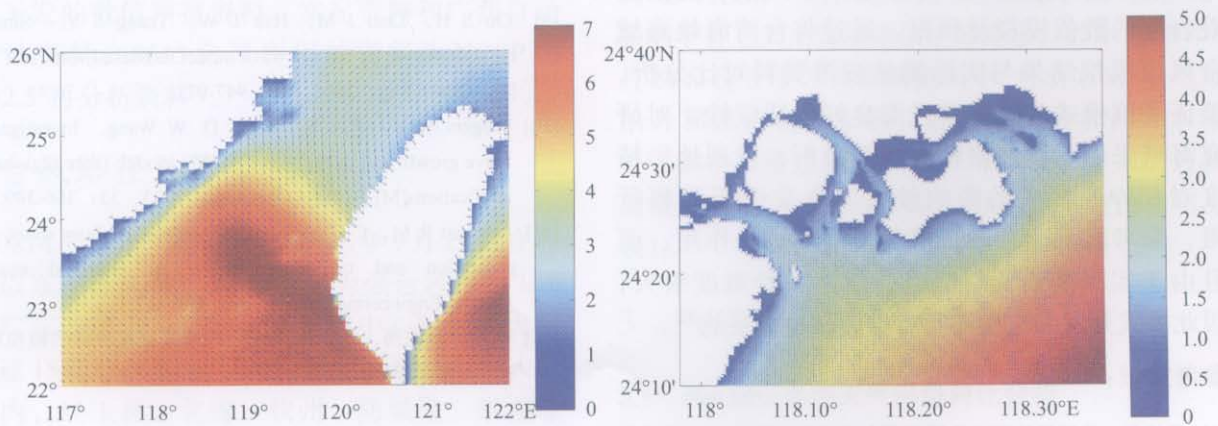


图5 2006年7月14日05时模式计算有效波高(m)和波向分布图

图6 2006年7月14日05时模式计算有效波高(m)和波向分布图

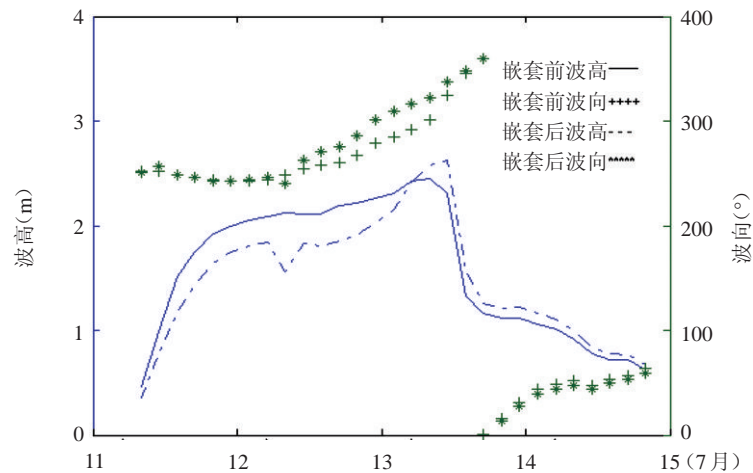


图7 嵌套前后波高对比图

从图中可以看出, 三站嵌套前后波向变化不大, 基本一致, 说明了嵌套前后数据的一致性。3个站波高略微变化, 但是变化幅度不大, 嵌套后波高变化比嵌套前较为平缓。引起上述变化的主要原因是, 水深诱导的波浪破碎效应加剧, 同时说明水深变化只会对波高产生较大的影响, 而对波向影响不大。在嵌套计算时, 计算网格加密, 地形网格相应加密, 更好的反映了实际地形对波高的影响。嵌套前后结果均表明, 台风期间, 波向随着风向的变化而变化, 波高随着风速的减小而迅速减小。

#### 4 结语

第三代海浪模式 SWAN 适用于风浪、涌浪及混合浪的数值模拟及预报。通过将台湾海峡海域台风浪模拟结果与实际测站波浪资料对比分析, 验证了该模式的在近岸浅海良好的适应性。对研究海域采用不同网格精度模拟分析, 发现地形精度对 SWAN 模式的影响较大。本文由于篇幅所限, 未考虑潮位、潮流等与波浪的耦合作用, 而且由于实测波浪资料匮乏, 误差校验难度很大, 因此模式开发和应用还具有很大潜力和挑战<sup>[12]</sup>。

#### 参考文献:

[1] 管长龙. 我国海浪理论及预报研究的回顾与展望[J]. 青岛海洋大学学报, 2000, 30(4): 549-556.

[2] 徐福敏, 张长宽. 一种浅水波浪数值模型的应用研究[J]. 水动力学研究与进展, 2000, 15(4): 429-434.

[3] 陈希, 闵锦忠, 李研, 沙文钰. 台湾岛邻近海域台风浪模拟分析[J]. 气象科学, 2003, 23(1): 46-54.

[4] 陈希, 闵锦忠, 沙文钰. 近岸海浪模式在中国东海台风浪模拟中的应用. 海洋通报. 2003, 22(2): 9-16.

[5] Yin Bao-shu, Wang Tao, M I El-Sabh. A Third Generation Shallow Water Wave Numerical Model-YE-WAM[J]. Chinese Journal of Oceanology and Limnology, 1996, 14(2): 106-112.

[6] Ris R C, N Booij, L H Holthuijsen. A third-generation wave model for coastal regions. Part II, Verification. J Geoph Research C4[M]. 1999, 104: 7667-7681.

[7] Gorman R M, CG.Neilson. Modelling shallow water wave generation and transformation in an intertidal estuary[J]. Coastal Engineering, 1999, 36: 197-217.

[8] 徐福敏, 张长宽, 陶建峰. 浅水波浪数值模型 SWAN 的原理及应用综述[J]. 水科学进展, 2004, 15(4): 538-542.

[9] Ou S H, Liao J M, Hsu T W, Tzang S Y. Simulating typhoon waves by SWAN wave model in coastal waters of Taiwan [J]. Ocean Eng. 2002, 29: 947-971.

[10] Rogers W E, P A H wang, D W Wang. Investigation of wave growth and decay in the SWAN model: three regional-scale applications[M]. J Phys Oceanogr. 2003, 33: 366-389.

[11] Gorman R M, C G Neilson. Modelling shallow water wave generation and transformation in an intertidal estuary[J]. Coastal Engineering, 1999, 36: 197-217.

[12] 李燕, 薄兆海. SWAN 模式对黄渤海海域浪高的模拟能力试验[J]. 海洋预报, 2005, 22(3): 75-82.