

DOI :10.3876/j.issn.1000-1980.2010.05.020

SWAN 模型风能输入项的改进与验证

贾 晓¹, 潘军宁¹, Bardur Niclasen²

(1. 南京水利科学研究院河流海岸研究所, 江苏 南京 210029;

2. 法罗大学科技工程学院, 丹麦 法罗群岛)

摘要: 为了分析第三代海浪数学模型——SWAN 模型的风浪模拟能力, 分别计算了恒定风场和台风时变风场下的波浪场。恒定风场中假定不同的风速及风区长度, 通过比较 SWAN 模型与 SMB 方法等经验风浪公式的计算结果, 得出 SWAN 模型风浪模拟的适用范围。针对大风速下计算波高偏大的情况, 通过分析参考波速引起的输入风速变小及拖曳力系数饱和等因素, 提出了风能输入项的修正方法, 并采用同步观测的风、浪资料对修正前后的计算结果进行了比较验证。结果表明, 在大风速情况下, 修正后的 SWAN 模型的模拟波高更接近于经验公式结果及实测数据。在 SWAN 模型风能输入项中引入参考波速引起输入风速减小及对拖曳力系数饱和因素的修正, 可以更好地模拟大风速下的波浪场。

关键词: 海浪模型; SWAN 模型; 台风浪; 风能输入; 风场修正; 拖曳力系数

中图分类号: P731 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-1980(2010)05-0585-07

近海波浪是海岸及近海工程、渔业养殖、海岸带开发建设中需要考虑的主要动力因素。海浪预报对于沿海地区的安全及经济发展有着重要的意义, 故海浪数值模拟技术得到了广泛重视。

1957 年, Gelci 等^[1]完成了基于二维谱传输方程的海浪数值模型的开发工作, 这是海浪数值预报的开创性工作。同年, Phillips 等^[2-3]提出了共振机制和切流不稳定机制, 海浪的生成和成长理论取得了突破性的进展。20 世纪 60 年代, 在海浪预报原理趋于完善的基础上, 诞生了第 1 代利用完整的能量平衡方程计算海浪谱的海浪数学模型。

其后 30 年间, 海浪数学模型经历了第 1 代到第 3 代的发展过程, 形成了以 WAM 模型^[4]、WAVEWATCH 模型^[5]为代表的第 3 代海浪数学模型。其后, Ris 等总结了第 3 代海浪数学模型能量输入、损耗、传递的成果, 对已有模型(主要是 WAM 模型)进行了改进, 提出了浅水波浪数值预报模型, 即 SWAN(simulating wave nearshore)模型^[6]。

SWAN 模型采用与 WAM 模型相同的方程及源汇项, 在算法上进行了改进并且加入了额外的浅水控制项。SWAN 模型对不同水深的适应性较好, 且较为全面地考虑了包括能量输入、损耗和非线性相互作用等在内的一系列源汇项。模型以不规则谱型的方向谱表示真实海浪的随机性特征, 模拟结果更接近真实海浪。SWAN 模型采用动谱平衡方程描述风浪生成及其在近岸区的演化过程。

Booij 等^[7-8]以波浪线性理论及荷兰、德国的一些现场观测资料对 SWAN 模型进行了验证, 表明 SWAN 模型对复杂地形下的波浪模拟能力较好。

SWAN 模型自发布伊始, 即被广泛运用于波浪的模拟与计算。Ris 等^[9]在 SWAN 模型之初, 即计算了 Lake George, Haringvliet 等水域的风浪, 并对 SWAN 模型进行了率定。其后, Gorman 等^[10-12]用 SWAN 模型模拟了美国、澳大利亚、葡萄牙等地海岸的风浪过程。徐福敏等^[13-14]用 SWAN 模型计算了海安湾和渤海湾的风浪场。计算结果表明, 在中等风速条件下, SWAN 模型计算结果与实测数据吻合较好。

近年来, Rogers 等^[15]采用 S&L 和 SORDUP 数值计算方法, 大幅度减小了计算中的数值耗散, 使得 SWAN

模型能够应用于大尺度的台风浪过程计算.利用 SWAN 模型, Wornom 等^[16-17]模拟了美国沿海及墨西哥湾的飓风浪, Chao 等^[18]模拟了北大西洋飓风浪, 胡克林等^[19-20]模拟了长江口的台风浪, 闵锦忠等^[21]模拟了北部湾的台风浪.由这些模拟结果可见, SWAN 模型基本能模拟近岸浅水区域的台风浪过程, 但计算波高总体略大于实测结果.

欧善惠等^[22]模拟了台湾几种典型台风的台风浪过程, 部分模拟结果与实测有较大出入, 原因可能在于风场模拟失真.

Jensen 等^[23]总结了第3代海浪数学模型在极端风速下的模拟情况, 并就第3代海浪数学模型的几种改进模式进行了比较分析.参考墨西哥湾深水石油平台的观测结果, Jensen 等认为第3代海浪数学模型在极端风速下的波高模拟失真.在 WAM 模型和 SWAN 模型的使用过程中, 一些学者亦得出类似的结论^[24-27].

本文主要研究大风速下 SWAN 模型模拟风浪的能力, 提出风能输入项的修正方法, 并将修正后的模型计算结果与经验公式计算结果及实测数据进行了比较.

1 SWAN 模型的风能输入项

第3代海浪数学模型在发展过程中, 引入了 Miles-Phillips(切流不稳定-共振)机制^[2-3], 使风能输入的模拟更加合理.在 WAM 模型中, Janssen 等^[28]引入了拟线性耦合的气海边界层假定, 考虑了风浪成长过程中海面粗糙度的增加过程. SWAN 模型采用了与 WAM 模型相同的风能输入形式^[6], 包含线性增长项和指数增长项:

$$S_{in}(\sigma, \theta) = A + BE(\sigma, \theta) \quad (1)$$

式中: $S_{in}(\sigma, \theta)$ ——风能输入项; σ ——频率; θ ——方向角; A ——Phillips 线性增长项系数; B ——指数增长项系数.

线性增长项在风浪成长初期占主要作用, 系数 A 表达式如下:

$$A = \frac{1.5 \times 10^{-3}}{g^2 2\pi} \{ U_* \max[0, \cos(\theta - \theta_w)] \}^4 H \quad (2)$$

$$\text{其中} \quad H = \exp(-(\sigma/\sigma_{PM}^*)^{-4}) \quad \sigma_{PM}^* = \frac{0.13g}{28U_*} 2\pi$$

式中: U_* ——摩阻风速; θ_w ——波向; H ——滤波参数; σ_{PM}^* ——完全成长海况下由摩阻风速表达的谱峰频率.

指数增长项在风浪成长后期起主要作用, 系数 B 有2种常用的表达方式.

a. 基于 Komen 的研究^[29], 系数 B 为 U_*/c_{ph} 的函数:

$$B = \max\left\{0, 0.25 \frac{\rho_a}{\rho_w} \left[28 \frac{U_*}{c_{ph}} \cos(\theta - \theta_w) - 1 \right] \right\} \sigma \quad (3)$$

式中: c_{ph} ——相位速度; ρ_a 、 ρ_w ——大气和海水的密度. 这种表达方式亦被用于 WAM Cycle3.

b. 基于 Janssen 的研究^[28], 即拟线性风浪理论, 表达式为

$$B = \beta \frac{\rho_a}{\rho_w} \left(\frac{U_*}{c_{ph}} \right)^2 \max[0, \cos(\theta - \theta_w)]^2 \sigma \quad (4)$$

式中 β 为 Miles 常数. 根据 Janssen 的研究, β 根据无因次临界高度 λ 确定:

$$\begin{cases} \beta = \frac{1.2}{\kappa^2} \lambda \ln^4 \lambda & (\lambda \leq 1) \\ \lambda = \frac{gz_e}{c_{ph}^2} e^r & (r = \kappa c / |U_* \cos(\theta - \theta_w)|) \end{cases} \quad (5)$$

式中: κ ——Von Karman 常数, $\kappa = 0.41$; z_e ——有效水面粗糙度参数. 如果 $\lambda > 1$, 则 $\beta = 0$. 这种表达方式亦被用于 WAM Cycle4.

2 SWAN 模型风浪模拟适用性分析

为分析 SWAN 模型风浪模拟的适用范围, 本文考虑一恒定水深(50 m)的矩形开敞水域, 计算域如图1所示.

采用的输入风场为定常风场,计算风速为 6 ~ 20 m/s;考虑 10 km、50 km 和 200 km 3 种风区长度。

SWAN 模型采用第 3 代计算模式,风能输入项及白帽破碎项采用 Janssen 格式(该风况下,Komen 格式计算结果与之相差很小),将其计算结果与经验 SMB 方法和海大公式、井岛武士公式(日本)的计算结果进行比较,有效波高(H_s)与平均周期(T_m)比较结果如图 2 所示。

由图 2 可以看出,SWAN 模型风浪计算结果与几种经验风浪公式计算的结果相比较,风速在 12 ~ 16 m/s 的情况下与经验风速吻合最好,而这基本对应于 SWAN 模型率定时所采用的 Lake George 等观测数据的风速范围(12 ~ 17 m/s)^[8-9]。此外可以看出,在风速小于 10 m/s 时,计算 H_s 略偏小,而风速接近 20 m/s 时,计算 H_s 偏大。

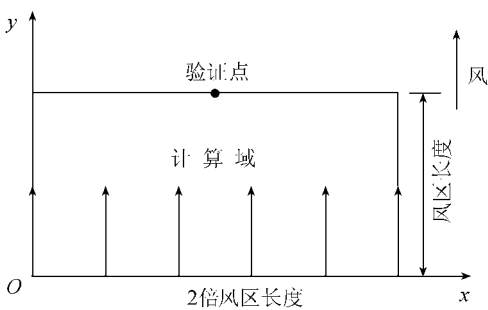


图 1 计算区域

Fig. 1 Computational domain

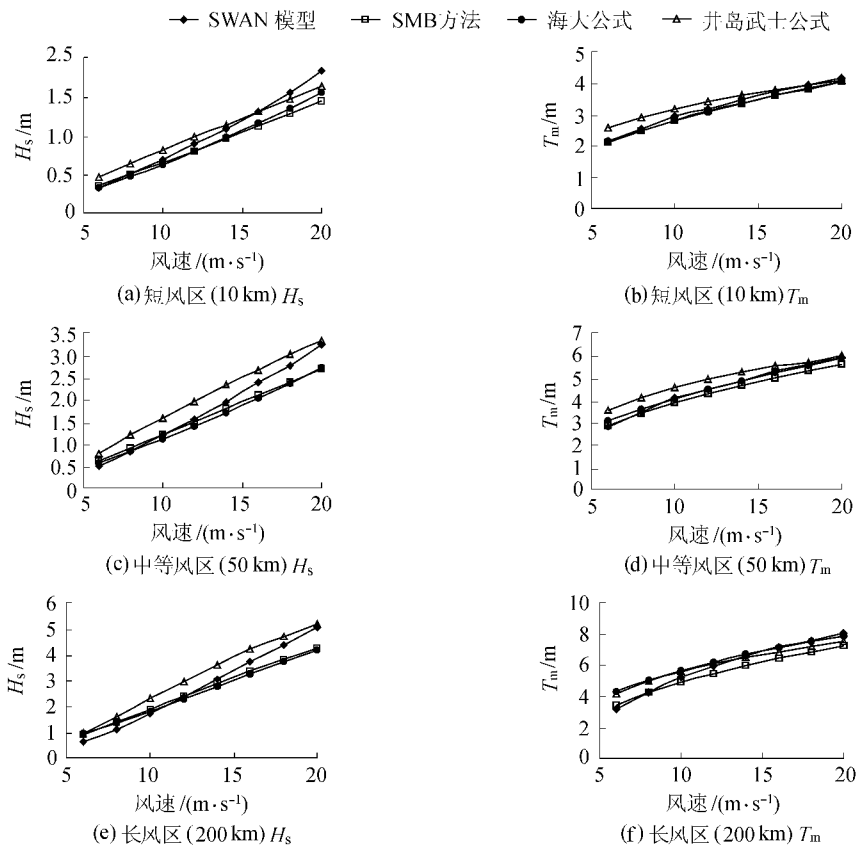


图 2 SWAN 模型计算结果与经验风浪公式计算结果比较

Fig. 2 Comparison of calculated results between SWAN model and empirical formulas

3 SWAN 模型的改进

在 SWAN 模型中,模型输入风速为海平面 10m 高度处风速 U_{10} 。在计算风能输入时,需将 U_{10} 转换为摩阻风速 U_* 。模型中采用的关系式为

$$U_*^2 = C_D U_{10}^2 \tag{6}$$

式中 C_D 称为拖曳力系数,表达式为

$$C_D = \begin{cases} 1.2875 \times 10^{-3} & (U_{10} < 7.5 \text{ m/s}) \\ (0.8 + 0.065 \text{ s/m} \times U_{10}) \times 10^{-3} & (U_{10} \geq 7.5 \text{ m/s}) \end{cases} \tag{7}$$

SWAN 模型采用式(6)表达 2 种风速的关系,其假定摩阻风速会随着风速增加而增加,且增加的速度大于风速的增加。在风浪的成长阶段,风速越大,海面粗糙程度增加越快,摩阻风速、切应力增加很快^[30-31],式

(6)表达合理.但在波浪大范围破碎之后,粗糙程度增加与风速增长的关系已经和成长状态完全不同,气海面假定失效^[32-33].同时,SWAN 模型在率定模型的时候,采用的观测模型都是中等风速情况,未考虑长风区、长风时、大风速情况下,因波速较大而引起风速相对变小的因素.

早在 WAM 预报模型中,很多研究者已经开始注意到极端风速(主要是热带风暴和飓风)情况下,基于第 3 代物理源汇项描述的谱波预报模型失真的现象^[23-24,26].

文献^[23]基于极端风速的拖曳力系数饱和原理,对 WAM 模型进行修正,并且采用了墨西哥湾地区一系列强热带风暴离岸测点的数据进行了验证.本文参考文献^[23,34-35],考虑大风速下拖曳力系数饱和的因素,对 SWAN 模型中风能输入项进行改进(仅针对 Komen 格式风能输入格式与白帽破碎项),将改进后的计算结果与经验风浪公式计算结果及实测结果进行比较验证.

3.1 考虑参照波速的风速折减(恒定风向且风时很长)

SWAN 模型在率定时观测数据采用的风速为 12~17 m/s(平均约 15 m/s),模型验证吻合较好.故假定,在该风况下,SWAN 模型的风速不需要修订.随着风速增大,波速增加,参考 SMB 方法计算的波速,考虑如下的折减计算:

$$U_{10_SWAN_1} = U_{10} - 0.0624(U_{10} - 15)\delta \quad (U_{10} \geq 15 \text{ m/s})$$

(8)

式中: $U_{10_SWAN_1}$ ——SWAN 模型第 1 阶段修正的 U_{10} ; δ ——与水深相关的参数(图 3),其表达式为

$$\delta = 7 \times 10^{-8}x^5 - 10^{-5}x^4 + 0.0008x^3 - 0.0249x^2 + 0.4086x + 0.1247$$

3.2 修正风能输入项

修正风能输入项考虑 2 种方法:

a. 修正拖曳力系数.风速增大到一定值,拖曳力系数 C_D 达到饱和状态^[23,33-34],其值约为 2.2×10^{-3} (此参数仍有争议,按照 Amorocho 和 DeVris 在 1980 年的研究结果^[34],此参数为 2.54×10^{-3}).可以在 SWAN 模型源代码中,加入 CAP 控制参数 C :

$$C = \max(U_* / U_{10_SWAN_1})$$

(9)

b. 修正风速.即考虑在输入的风速上乘以折减系数 F .即

$$U_{10_SWAN_2} = F U_{10_SWAN_1}$$

(10)

此时联立方程如下:

$$U_*^2 = C_D \times U_{10}^2 = (0.8 + 0.065 F U_{10_SWAN_1}) 10^{-3} (F \times U_{10_SWAN_1})^2$$
$$\max(U_* / U_{10_SWAN_1})^2 = 2.2 \times 10^{-3}$$

(11)

用牛顿迭代法求解,可以得到关于 F 的一元三次方程.

取 $F = \min(F, 1.0)$,即可得到最终需要的输入风速 $U_{10_SWAN_2}$.

上述 2 种方法意义等同,本文采用修正风场后的 Komen 格式进行计算.

4 修正后 SWAN 模型的验证与应用

4.1 大风速恒定风场的波浪验证

采用同上文相同的计算域与计算参数,风速为 40 m/s,风区为 200 km,参照波速的风速折减.修正后的 SWAN 模型计算结果与经验风浪公式计算结果的比较见图 4.

由图 4 可见,风速越大,未修正 SWAN 模型的计算结果与经验风浪公式差距愈大,而修正后的 SWAN 模型计算结果基本符合风浪成长的变化规律,其值比经验风浪公式计算值大 15%左右.因 SWAN 模型周期计算方法的原因,计算所得周期(T_{m01})要比实际观测周期小.修正

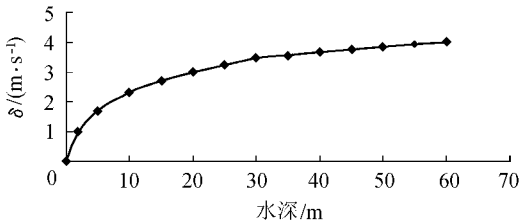


图 3 δ 参数选取

Fig. 3 Selection of coefficient δ

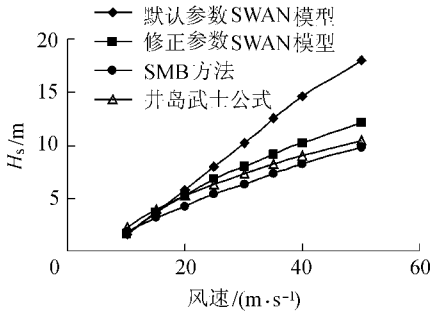


图 4 修正后的 SWAN 模型计算结果与经验风浪公式计算结果比较

Fig. 4 Comparison of calculated results between amended SWAN model and empirical formulas

后的 SWAN 模型的合理性,还需要根据同步的风、浪观测值进一步验证.因大风速情况下一般不存在恒定风场,故采用台风产生的台风浪来验证.

4.2 台风浪的验证

因台风风场时变性较强,故在此不考虑参照波速的风速折减.

本文台风气压场模拟采用 Fujita-Takahashi 混合气压场,移行风速采用 Veno Takeo 公式.台风风场可以表达为

$$\begin{bmatrix} W_x \\ W_y \end{bmatrix} = C_1 \frac{V_1}{r} \begin{bmatrix} -(x-x_c)\sin\beta - (y-y_c)\cos\beta \\ (x-x_c)\cos\beta - (y-y_c)\sin\beta \end{bmatrix} + C_2 V_2 \tag{12}$$

其中

$$V_1 = \begin{cases} r \left\{ -\frac{f}{2} + \sqrt{\frac{f^2}{4} + \frac{2\Delta P}{\rho_a R_0^2} \left[1 + 2 \left(\frac{r^2}{R_0^2} \right) \right]^{-3/2}} \right\} & (0 \leq r \leq 2R_0) \\ r \left\{ -\frac{f}{2} + \sqrt{\frac{f^2}{4} + \frac{\Delta P}{\rho_a (1 + r/R_0)^2 R_0 r}} \right\} & (2R_0 < r \leq \infty) \end{cases} \tag{13}$$
$$V_2 = V_d \exp \left(-\frac{\pi}{4} \frac{|r - R_0|}{R_0} \right)$$

式中 (x_c, y_c) ——台风中心坐标; f ——柯氏力参数; ΔP ——台风外围气压与台风中心气压的气压差; R_0 ——最大风速半径; r ——计算点至台风中心距离; ρ_a ——空气密度; V_d ——台风移动速度; β ——梯度风与海面风的订正角.取 $\beta = 20^\circ$; C_1, C_2 ——常数.取 $C_1 = 0.8, C_2 = 1.0$.

本文计算了中国南海及东海海域 5 次台风浪过程,均采用嵌套矩形规则网格,底摩阻等源汇项函数均采用默认设置.

以影响珠江口的 8621 台风为例,8621 台风风速验证见图 5,大万山海洋站波高最大时刻波浪场见图 6,5 次台风风速与波高模拟结果及其与实测值的比较见表 1.

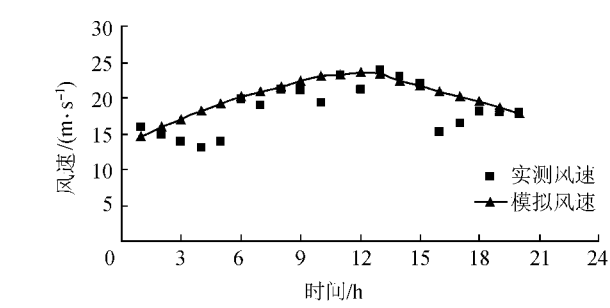


图 5 8621 号台风风速验证过程

Fig. 5 Wind speed process of Typhoon No. 8621

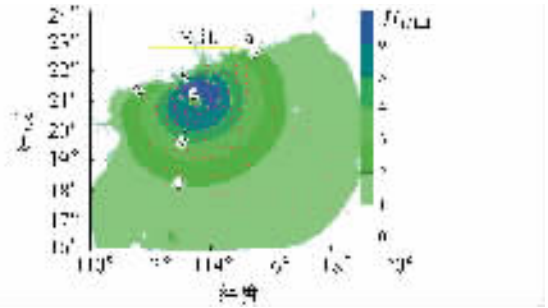


图 6 8621 号台风大万山站波高最大时刻大范围波浪场(风场修正后)

Fig. 6 Wind field under highest wave height at Dawanshan station during Typhoon No. 8621 (amended wind field)

表 1 台风风速与波高模拟结果与实测值比较

Table 1 Comparison between observed and calculated wind speeds/wave heights						
台风编号	测站	实测风速/ ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	模拟风速/ ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	测站实测 H_s/m	默认参数 SWAN 模型 模拟 H_s/m	修正参数 SWAN 模型 模拟 H_s/m
7209	南麂站	20.0	21.4	3.33	3.88	3.28
7209	大陈站	26.0	27.3	6.32	6.77	6.11
7910	南麂站	40.0	40.3	5.87*	8.78	7.47
8612	大万山站	24.0	22.8	4.57	4.97	4.66
0908	大陈站	18.9	18.8	5.38	5.29	5.24

注: * 表示该数值为报表最大值(最大值时刻缺测).

由图 5、图 6 及表 1 可见,近中心风速较小时,SWAN 模型计算结果与实测值十分接近,修正风场对计算结果影响很小,如表 1 中 0908 号台风;当近中心风速很大时,默认参数的 SWAN 模型计算结果大于实测结

果.通过比较可以看出,修正后的 SWAN 模型计算波高与实测值的验证情况优于默认参数的 SWAN 模型.

5 结 论

本文着重分析了第3代海浪数学模型——SWAN 模型的风能输入问题,分别在恒定风场和时变风场下计算了相应的波浪场,并与经验风浪公式结果及实测台风浪进行了比较.笔者认为:在风速 15 m/s 左右时,SWAN 模型模拟风浪能力较好.在大风速下 SWAN 模型气海面结构假定失效,计算波高偏大.使用本文的修正方法,参照波速的风速折减,考虑大风速情况下的拖曳力系数饱和等因素,对 SWAN 模型的风能输入项进行适当修正,能够更为合理地模拟大风速下的波高场.

但本文的研究还存在以下问题:(a)相对于文献[19-21]中水深相对较浅的观测点,本文选取的海洋站水深较深,但距离岛屿仍然较为接近,或有可能受到地形的影响.(b)在海洋站的实测数据中,一些较为特别的海浪情况(有可能是测量问题),SWAN 模型无法模拟.例如 7910 号台风过程中大陈海洋站最大风速仅 19 m/s,但是 $H_{1/10}$ 却达到 12.5 m.(c)因为深海近台风中心区域没有观测资料,所以无法验证深海台风近中心处模拟结果是否可靠.

参考文献:

- [1] GELCI R, CAZALE H, VASSAL J. Prevision de la houle. La method densite's spectroangulaires[J]. Bull Inf Comite-central Oceanography Etude Cotes, 1957, 9: 416-435.
- [2] PHILLIPS O M. On the generation of waves by turbulent wind[J]. Fluid Mech, 1957, 2: 417-445.
- [3] MILES J W. On the generation of waves surface waves by shear flow[J]. Fluid Mech, 1957, 2: 185-204.
- [4] WAMDI GROUP. The WAM model-a third generation ocean wave prediction model[J]. Phys Oceanogr, 1988, 18: 1775-1810.
- [5] TOLMAN H L. User manual and system documentation of WAVEWATCH III version 2.22, technology note[EB/OL]. [2009-05-18]. <http://polar.ncep.noaa.gov/waves>.
- [6] SWAN TEAM. Swan user & technical manual[40.72A][R]. Delft: Delft University of Technology, 2008.
- [7] BOOIJ N, HOLTHUIJSEN L H, RIS R C. The 'SWAN' wave model for shallow water[J]. Coastal Engineering, 1996, 1: 668-672.
- [8] BOOIJ N, RIS R C, HOLTHUIJSEN L H. A third-generation wave model for coastal regions 1: model description and validation[J]. Journal of Geophysical Research, 1999, 104(4): 7649-7666.
- [9] RIS R C, HOLTHUIJSEN L H, BOOIJ N. A third-generation wave model for coastal regions 2-Verification[J]. Journal of Geophysical Research, 1999, 104(4): 7667-7681.
- [10] GORMAN R M, NEILSON C G. Modeling shallow water wave generation and transformation in an intertidal estuary[J]. Coastal Engineering, 1999, 36: 197-217.
- [11] PADILLA-HEMANDES R, MONBALIU J. Energy balance of wind waves as a function of the bottom friction formulation[J]. Coastal Engineering, 2001, 43: 131-148.
- [12] PIRES-SILVA A A, MAKARYNSKY O, MONBALIU J, et al. WAM/SWAN simulations in an open coast: comparisons with ADCP measurements[C]//Littoral 2002, The Changing Coast EUROCOAST. Porto-Portugal: EUCC, 2002: 169-173.
- [13] 徐福敏, 张长宽, 茅丽华, 等. 一种浅水波浪数值模型的应用研究[J]. 水动力学研究进展: A 辑, 2000, 5(4): 429-434. (XU Fu-min, ZHANG Chang-kuan, MAO Li-hua, et al. Application of a numerical model for shallow water waves[J]. Journal of Hydrodynamics: A, 2000, 5(4): 429-434. (in Chinese))
- [14] 王殿志, 张庆河, 时钟. 渤海湾风浪场的数值模拟[J]. 海洋通报, 2004, 23(5): 10-17. (WANG Dian-zhi, ZHANG Qing-he, SHI Zhong. Modeling of wind waves in the Bohai Bay, China[J]. Marine Science Bulletin, 2004, 23(5): 10-17. (in Chinese))
- [15] ROGERS W E, KAIHATU J M, PETIT H A H, et al. Diffusion reduction in an arbitrary scale third generation wind wave model[J]. Ocean Engineering, 2002, 29: 1357-1390.
- [16] WORNOM S F, WELSH D J S, BEDFORD K W. An MPI quasi time-accurate approach for nearshore wave prediction using the SWAN code. Part I: method[J]. Coastal Engineering Journal, 2002, 44(3): 247-256.
- [17] WORNOM S F, ALLARD R, HSU Y L. An MPI quasi time-accurate approach for nearshore wave prediction using the SWAN code. Part II: applications to wave hindcasts[J]. Coastal Engineering Journal, 2002, 44(3): 257-280.
- [18] CHAO Y Y, ALVES J H G M, TOLMAN H L. An operational system for predicting hurricane-generated wind waves in the North Atlantic Ocean[J]. Weather and Forecasting, 2005, 20(4): 652-671.
- [19] 胡克林, 丁平兴, 朱首贤, 等. 长江口附近海域台风浪的数值模拟: 以鹿沙台风和森拉克台风为例[J]. 海洋学报, 2004, 26(4): 112-120. (HU Ke-lin, DING Ping-xing, ZHU Shou-xian, et al. Numerical simulation of typhoon waves around the waters of the Changjiang Estuary: a case study of Typhoon Rusa and Typhoon Sinlaku[J]. Acta Oceanologica Sinica, 2004, 26(4): 112-120. (in Chinese))

Chinese))

- [20] XU Fu-min ,PERRIE W ,ZHANG Jun-lun ,et al. Bechara toulany[J]. China Ocean Engineering ,2005 ,19(4) :613-624.
- [21] 闵锦忠 陈希 沙文钰. 湛江港台风浪分布特征与抗风浪能力分析[J]. 水动力学研究与进展 :A 辑 ,2005 ,22(4) :112-120.
(MIN Jin-zhong ,CHEN Xi ,SHA Wen-yu. A simulation of typhoon waves near the Zhanjiang port[J]. Journal of Hydrodynamics :A ,2005 ,22(4) :112-120. (in Chinese))
- [22] OU Shan-hwei ,LIAU Jian-ming ,HSU Tai-wen ,et al. Simulating-phoon waves by SWAN wave model in coastal waters of Taiwan[J]. Ocean Engineering ,2002 ,29 :947-971.
- [23] JENSEN R E ,CARDONE V J ,COX A T. Performance of third generation wave models in extreme hurricanes[R]. Vicksburg :USAE Waterways Experiment Station Coastal Engineering Research Center ,2006.
- [24] COX A T ,CARDONE V J. Operational system for the prediction of tropical cyclone generated winds and waves[C]//6th International Workshop on Wave Hindcasting and Forecasting. Monterey [s. n.] 2000 :158-166.
- [25] CARDONE V J , GREENWOOD C V , GREENWOOD J A. Unified program for the specification of tropical cyclone boundary layer winds over surfaces of specified roughness[R]. Vicksburg :Contract Rep ,U S Army Engrs Wtrwy , Experiment Station ,1992.
- [26] CARDONE V J ,JENSEN R E ,RESIO D T ,et al. Valuation of contemporary ocean wave models in rare extreme events : the “ Halloween Storm ” of October ,1991 and the “ Storm of the Century ” of March ,1993[J]. Atmos Oceanic Tech ,1996 ,13 :198-230.
- [27] TOLMAN H L ,ALVES J H G M ,CHAO Y Y. Operational forecasting of wind-generated waves by Hurricane Isabel at NCEI[J]. Weather and Forecasting ,2005 ,20 :544-557.
- [28] JENSEN P A E M. Quasi-linear theory of wind-wave generation applied to wave forecasting[J]. Journal of Physical Oceanography ,1991 ,21 :1631-1642.
- [29] KOMEN G J ,HASSELMANN S ,HASSELMANN K. On the existence of a fully developed wind-sea spectrum[J]. Phys Oceanogr ,1984 ,14 :1271-1285.
- [30] WU J. Wind-stress coefficients over the sea surface from breeze to hurricane[J]. Geophys Res ,1982 ,87 :9704-9706.
- [31] DONELAN M A ,HAUS B K ,REUL N ,et al. On the limiting aerodynamic roughness of the ocean in very strong wind[J]. Geophys Res ,2004 ,31 :L18306.
- [32] MOON I J ,GINNIS I ,HARA T. Effect of surface waves on air-sea momentum exchange ,part II :behavior of drag coefficient under tropical cyclones[J]. Atmospheric Sciences ,2004 ,61 :233-234.
- [33] BYE J A T ,JENKINS A D. Drag coefficient reduction at very high wind speed[J]. Geophys Res ,2006 ,111 :C03024.
- [34] 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.
- [35] AMOROCHO J ,DEVIRIS J J. A new evaluation of the wind stress coefficient over water surfaces[J]. Geophys Res ,1980 ,85(C1) :433-442.

Improvement and validation of wind energy input in SWAN model

JIA Xiao¹ , PAN Jun-ning¹ , NICLASSEN Bardur²

- (1. *River and Harbour Angering Department , Nanjing Hydraulic Research Institute , Nanjing 210029 , China ;*
- 2. Faculty of Science and Technology , University of the Faroe Island , Faroe Islands via Denmark)*

Abstract : In order to analyze the simulation capability of wind waves by the third-generation numerical wave model—SWAN model , the wave fields with constant wind and non-stationary typhoon wind were calculated separately. In the constant wind fields , different wind speeds and fetches were assumed , and the calculated results by the SWAN model were compared with those calculated by some empirical wind wave formulas , such as SMD method. Accordingly , the applicable range of simulating wave height properly by the SWAN model could be obtained. Aiming at the wave height overestimated by the SWAN model under high wind speed , an amended method for the wind energy input of the model was proposed by analyzing factors such as the decrease of input wind speed induced by the reference wave velocity and the saturation of drag coefficient. The calculated results before and after the amendment were compared and validated by use of the simultaneous observations of wind and wave data. The analysis shows that the calculated results by the amended SWAN model are quite close to those by the empirical formulas and to the observed data. By introducing factors such as the decrease of input wind speed induced by the reference wave velocity and the saturation of drag coefficient into the wind energy input term , the SWAN model can satisfactorily simulate wave heights under high wind speed.

Key words : wave model ; SWAN model ; typhoon wave ; wind energy input ; amended wind field ; drag coefficient