

基于 SWAN 模式的南海台风浪 推算的影响因素分析^{*}

梁书秀¹, 孙昭晨¹, 尹洪强¹, 牛海英^{1,2}

(1. 大连理工大学 海岸与近海工程国家重点实验室, 辽宁 大连 116024;

2. 大连海洋大学 海洋与土木工程学院, 辽宁 大连 116023)

摘要: 基于南海实际地形和真实的台风过程, 对影响 SWAN 模式在南海台风浪推算中的准确性的因素进行了较系统的研究。首先对不同的模型风场进行了对比分析, 结果表明一个准确的风场是正确推算台风浪的关键。同时对 SWAN 模式中的白冠耗散作用、风能输入与白冠耗散不同的组合方式和折射项作用等因素对台风浪推算的影响进行分析, 并对模式中的各影响因素给出了合理建议。使得 SWAN 模式在南海台风浪推算中具有更好的适用性。

关键词: 数值模拟; SWAN 模式; 台风浪; 南海; 影响因素

中图分类号: P731

文献标识码: A

文章编号: 1671-6647(2015)01-0019-12

波浪是海洋中最常见的现象之一, 是岸滩演变、海港和海岸工程重要的动力因素和作用力。海洋上自然破坏现象 90% 来自海浪影响, 尤其以台风浪为主。随着海洋资源开发活动不断向深水 and 自然环境恶劣海域等新领域推进, 面临着越来越恶劣的海洋作业环境, 风浪对海洋资源的开采造成了极大危害。南海纵跨热带和亚热带, 由于其水深、海面宽阔、地形错综、水文复杂、热带气旋活跃、季风盛行等因素造成南海台风极端动力现象频繁发生, 对深海工程开发构成严重威胁。因此, 深入研究南海深水水域台风浪极端环境因素, 通过分析实测数据和数值模拟等手段, 提供准确的环境动力参数, 从而满足南海深水工程设计、施工和安全运行的需要十分迫切。

第三代波浪数值模式 SWAN 是目前国际上较为通用的波浪数值模式之一, 可用于海岸、湖泊、河口水域的风浪、涌浪及混合浪的计算, 能得出计算域内的各种波要素, 如波高、波周期、波长、波陡、波浪行进方向和波能传播方向等海岸工程所需的重要参数。SWAN 模式自发布伊始, 即被广泛运用于波浪的模拟与计算。Ris 等^[1]在 SWAN 模式建立之初计算了 Lake George, Haringvliet 等水域的风浪。其后, Gorman 等^[2]和 Padilla-hernanadei 等^[3]用 SWAN 模式模拟了美国、澳大利亚和葡萄牙等地海岸的风浪过程。徐福敏等^[4]和王殿志等^[5]用 SWAN 模型计算了海安湾和渤海湾的风浪场, 计算结果表明, SWAN 模式计算结果与实测数据吻合较好。由于风浪成长模式中的参数校核采用的风速范围为 12~17 m/s^[6], 因此一些学者认为, SWAN 较适用于一般风浪的推算, 对于大尺度以及台风浪的推算通常采用 WWIII 等模型。WWIII 和 SWAN 两个海浪模式均在考虑非线性物理过程的情况下, 求解了方向谱的动谱密度平衡方程。WWIII 模式在运用 JONSWAP 谱的条件下, 主要考虑了风能输入、非线性波波相互作用、底摩擦作用、白冠耗散。SWAN 模式除了 WWIII 模式考虑的物理过程外, 更完善地考虑了深度诱导破碎引起的能量耗散及三波相互作用, 因其考虑了浅水效应, 计算效率略低。在 WWIII 模式中风能输入项未考虑线性增长项, 只考虑了与

^{*} 收稿日期: 2014-02-24

资助项目: 国家重点基础研究发展计划——我国南海极端环境的工程相关特征及其模拟方法(2011CB013701); 国家自然科学基金——基于台风过程的三维环流结构及水环境影响机制研究(51279028)

作者简介: 梁书秀(1972-), 女, 辽宁凤城人, 副教授, 博士, 主要从事海洋环境数学模型及海洋信息数字化方面研究. E-mail: sxliang@dlut.edu.cn

(李 燕 编辑)

SWAN 模式相同指数增长项。而海浪在生成初级阶段主要受线性增长项作用,在海浪成长阶段主要受指数项影响。同时在风速转化为摩阻风速时也有所不同。在 WWIII 模式中, $U_* = C_D \times U_{10}^2$, $C_D = (0.8 + 0.065 U_*) \times 10^{-3}$ 。在 SWAN 模式中,在风速大于 7.5 m/s 时取该值,而在风速小于 7.5 m/s 时, C_D 取为常数 $C_D = 1.2875 \times 10^{-3}$ 。为此,在风浪推算时,SWAN 模式较 WWIII 模式具有更广范围的风速适应性。

在实际模拟中,齐义泉等^[7]将 WWIII 移植到南海海域,模拟了 1996 年南海的海浪场,根据模式的输出结果与卫星高度计的对比分析,模式对冬季风期间的模拟效果要好于夏季风的结果,误差最大的模拟结果一般出现在夏季的极小风速附近,因为在夏季南海的风场不如冬季风场稳定,风向具有多变性,这说明 WWIII 模式对风向多变的低风速风场的适用性具有一定的局限性。梅婵娟等^[8]将 2 种模式对黄海浪高的模拟效果进行对比分析,发现 WWIII 模式相对于 SWAN 模式受水深地形影响较大,不同风速范围下的模拟结果也有所不同。比较而言,SWAN 模式对黄海的模拟能力较 WWIII 模式相对要好,模拟结果更具有代表性。国内有一些学者采用 SWAN 模型对台风浪也进行了推算^[9-10],取得了较好的模拟效果。实际上 SWAN 模式经过多年的改进^[11-12],能够比较合理地模拟大风速下的波高场。

本文基于 SWAN 海浪模式结合具体的台风过程进行南海台风浪推算,首先对比了不同风场的模拟效果,接着以理论风场作为模型的驱动风场对影响南海海域台风浪推算的各因素进行了分析和探讨,给出了更加合理的模型参数选取建议,使得 SWAN 模式在南海台风浪推算更具适用性。

1 SWAN 模式简介及模式的参数设定

1.1 SWAN 模式简介

SWAN 模式属于第三代海浪模式,由荷兰 Delft 理工大学土木工程系开发,采用线性随机表面重力波理论以及作用量谱平衡方程作为描述海浪的控制方程。考虑到在有流场的情况下,能谱密度不守恒,SWAN 模型采用二维作用量谱密度而非能谱密度表示随机波,作用量谱密度 $N(\sigma, \theta)$ 为能谱密度 $E(\sigma, \theta)$ 与相对频率 σ 之比。其控制方程为:

$$\frac{\partial}{\partial t} N + \frac{\partial}{\partial x} C_x N + \frac{\partial}{\partial y} C_y N + \frac{\partial}{\partial \sigma} C_\sigma N + \frac{\partial}{\partial \theta} C_\theta N = \frac{S}{\sigma} \quad (1)$$

式中, N 为作用量谱密度;方程左边第一项代表作用量谱密度随时间的变化率;第二项和第三项代表作用量谱密度在几何空间的变化;第四项代表水流和水深变化引起的频移;第五项代表水流和水深变化引起的折射和变浅作用。方程右边的 S 代表能量源项,包括风输入项、白冠耗散、底摩擦、变浅破碎引起的耗散作用、四波相互作用和三波相互作用, $S = S_{in} + S_{nl} + S_{dis}$, 其中 S_{in} , S_{nl} 和 S_{dis} 分别代表风能输入项、非线性波波相互作用项和由于波浪破碎及底部摩擦引起的波能耗散项。

SWAN 在陆架海域或者大洋上应用时,可以选用球坐标系下的作用平衡方程(本文即在球坐标系下计算):

$$\frac{\partial}{\partial t} N + \frac{\partial}{\partial \lambda} C_\lambda N + (\cos \varphi)^{-1} \frac{\partial}{\partial \varphi} C_\varphi \cos \varphi N + \frac{\partial}{\partial \sigma} C_\sigma N + \frac{\partial}{\partial \theta} C_\theta N = \frac{S}{\sigma} \quad (2)$$

由笛卡尔坐标系转换为球坐标系的过程中,需满足关系式 $NR^2 \cos \varphi d\sigma d\theta d\varphi d\lambda = Nd\sigma d\theta dx dy$, 式中, N 表示作用量谱密度; R 表示地球半径; λ 表示经度; φ 表示纬度。

1.2 SWAN 模式参数的设置

基于 SWAN 模式,建立了南海海域($100^\circ \sim 125^\circ E$, $0^\circ \sim 25^\circ N$)台风浪推算模型。模式选用规则网格,采用球坐标系下的非静态模式,时间和空间上的离散方法为 S&L 格式^[9],谱空间的离散为中心差分格式。模型的空间分辨率为 $1' \times 1'$,计算时间步长为 10 min。地形数据分辨率为 $1' \times 1'$,南海海域水深等值线如图 1

所示。在频率和方向的二维谱空间中,频率以对数分布分成 34 个频段,即 0.04~1.0 Hz。方向的分段数为 36,即 10°的分辨率。在模型的物理机制上,风能的输入考虑线性增长和指数增长两部分,其中线性增长采用 Caraler 和 Malanotte-Rizzoli 公式^[13],指数增长项采用 Komen 等^[14]提出的经验公式。其他参数均取模式默认值。

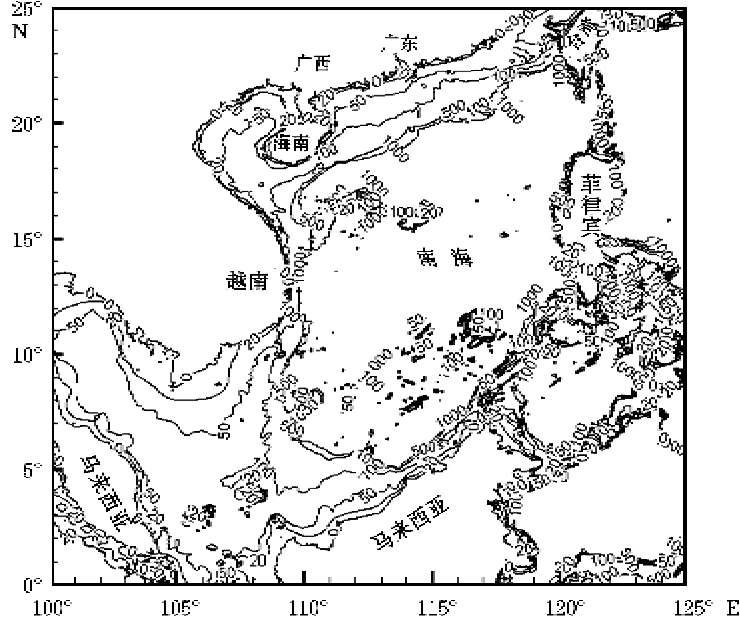


图 1 南海海域水深等值线(m)图

Fig. 1 Bathymetric contour(m) of the South China Sea

2 南海台风浪推算的影响因素分析

2.1 风场对台风浪推算的影响

2.1.1 台风风场

当前模拟台风用到的风场方法众多,本文的研究中分别采用了模型风场和再分析风场。其中的模型风场,是内域藤田^[15]和外域高桥^[16]的混合风场,2 倍最大风速半径以内是藤田风场,2 倍最大风速半径以外是高桥风场。将藤田气压公式^[15]和高桥气压公式^[16]结合起来,可以较好地描述台风气压场的分布。

若将坐标原点取在固定计算域,则台风域中的中心对称风场分布取以下形式:

$$W_x = \begin{cases} C_1 V_x \exp\left(-\frac{\pi}{4} \times \frac{|r-R|}{R}\right) - C_2 \left\{ -\frac{f}{2} + \sqrt{\frac{f^2}{4} + 10^3 \times \frac{2\Delta P}{\rho_a R^2} \left[1 + 2\left(\frac{r^2}{R^2}\right)^{-\frac{3}{2}}\right]} \right\} \\ \quad \times [(x-x_0)\sin\theta + (y-y_0)\cos\theta], (0 \leq r \leq 2R) \\ C_1 V_x \exp\left(-\frac{\pi}{4} \times \frac{|r-R|}{R}\right) - C_2 \left\{ -\frac{f}{2} + \sqrt{\frac{f^2}{4} + 10^3 \times \frac{\Delta P}{\rho_a (1+r/R)^2 \times r}} \right\} \\ \quad \times [(x-x_0)\sin\theta + (y-y_0)\cos\theta], (2R \leq r \leq \infty) \end{cases} \quad (3)$$

$$W_y = \begin{cases} C_1 V_y \exp\left(-\frac{\pi}{4} \times \frac{|r-R|}{R}\right) + C_2 \left\{ -\frac{f}{2} + \sqrt{\frac{f^2}{4} + 10^3 \times \frac{2\Delta P}{\rho_a R^2} \left[1 + 2\left(\frac{r^2}{R^2}\right)^{-\frac{3}{2}}\right]} \right\} \\ \quad \times [(x-x_0)\cos\theta - (y-y_0)\sin\theta], (0 \leq r \leq 2R) \\ C_1 V_y \exp\left(-\frac{\pi}{4} \times \frac{|r-R|}{R}\right) + C_2 \left\{ -\frac{f}{2} + \sqrt{\frac{f^2}{4} + 10^3 \times \frac{\Delta P}{\rho_a (1+r/R)^2 \times r}} \right\} \\ \quad \times [(x-x_0)\cos\theta - (y-y_0)\sin\theta], (2R \leq r \leq \infty) \end{cases} \quad (4)$$

式中, (W_x, W_y) 分别代表风速在 x 和 y 方向上的分量; (V_x, V_y) 为台风中心的移速在 x 和 y 方向上的分量; R 为最大风速半径; $\Delta P = P_\infty - P_0$, 代表台风中心气压差; ρ_a 为空气密度; θ 为流入角; C_1, C_2 为常数, $C_1 = 1.0$, $C_2 = 0.8$; f 表示科氏力; r 为距离台风中心距离, 表达式为: $r = [(x-x_0)^2 + (y-y_0)^2]^{1/2}$, 其中 x_0, y_0 代表台风中心位置。

最大风速半径 R 采用美国的格雷厄姆和纽恩^[17]提出的一个经验公式:

$$R = 28.52 \tanh[0.0873(\varphi - 28^\circ)] + 12.22 \times \exp\left(\frac{P_0 - 1013.2}{33.86}\right) + 0.2V_F + 37.22 \quad (5)$$

式中, V_F 为台风中心移动的速度, 以 km/h 计; φ 为地理纬度; P_0 为台风中心气压, 以 hPa 计。

再分析风场是国家海洋预报中心在收集和整理中国海区域 1981—2011 年 31 a 间的陆地观测资料、海洋观测资料、高空观测资料基础上, 根据 1981—2011 年 31 a 中央气象台台风实况 (BEST TRACK) 资料 (http://tedata.typhoon.gov.cn/zjljsjj_zlgq.html), 采用 WRF 海面风场 (www.wrf-model.org) 数值模式模拟并输出的标准化高分辨率重建风场。在台风中心偏弱的情况, 采用弱约束变分方法对重建后的高分辨率再分析风场和气压场进行调整, 从而改进再分析海面风场资料的台风强度和台风路径。最终获得与实况较接近的台风海面风场。结合没有台风的时段, 重建中国海高时空分辨率 (水平分辨率为 0.1° , 时间分辨率为 1 h)、长时间序列 (1981—2011 年) 的海面 10 m 风场再分析资料集。

2.1.2 两个不同台风经过南海海域时的对比分析

本文以 2011 年第 19 号台风“尼格”及 2012 年第 13 号台风“启德”为例, 研究其在中国南海引起的台风浪。其台风路径如图 2 所示。

1) 台风“尼格”

2011 年第 19 号台风“尼格”在菲律宾近海生成, 于 2011-09-30 凌晨加强为台风, 位于菲律宾马尼拉东偏北方向时中心附近最大风力为 12 级 (33 m/s), 中心最低气压为 975 hPa。于 2011-10-04T23:00 在海南乐东县西部沿海减弱为热带低压。

2) 台风“启德”

2012 年第 13 号台风“启德”于 2012-08-12 晚上在菲律宾以东洋面生成, 于菲律宾吕宋岛近海加强为强热带风暴, 在南海北部海面加强为台风, 于 2012-08-18T14:00 减弱为热带低压。

基于 SWAN 模式, 对以上两个台风进行台风浪的推算, 风场选用模型风场作为台风浪推算的驱动风场。测点位置如图 2 所示, 在测点处将理论风场值与实测值进行对比, 其对比如图 3 所示。

通过风速的对比, 发现台风“启德”及台风“尼格”模拟风速的变化趋势与实测十分相近, 很好地再现了测点处风速随时间的变化过程。分别以两个台风的模型风场作为驱动风场来推算测点处波高随时间的变化情况。测点处有效波高变化曲线如图 4 所示。

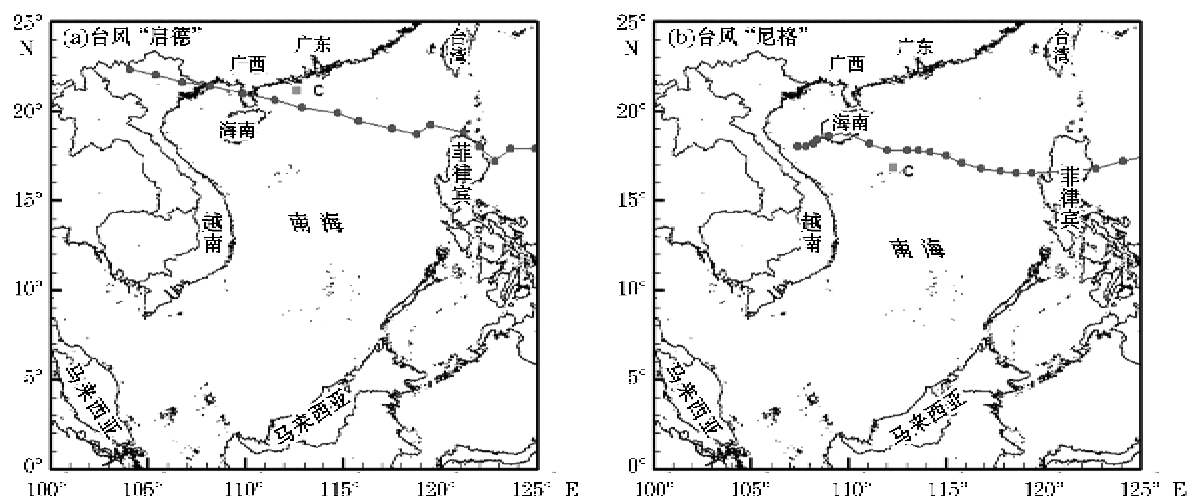


图 2 台风“启德”和台风“尼格”路径图

Fig. 2 Tracks of typhoon KAI-TAK and NALGAE

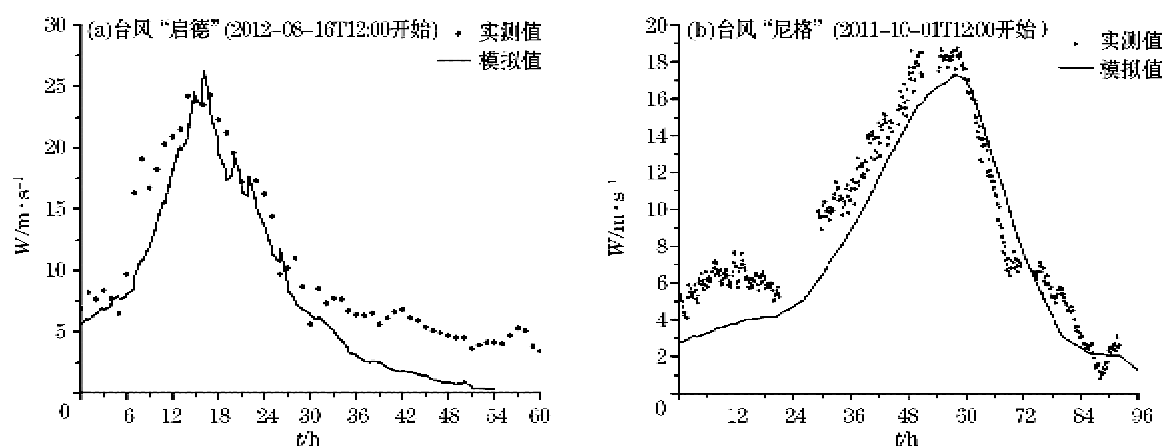


图 3 台风“启德”和台风“尼格”的风速对比图

Fig. 3 Comparisons of the simulated and measured wind speeds during KAI-TAK and NALGAE

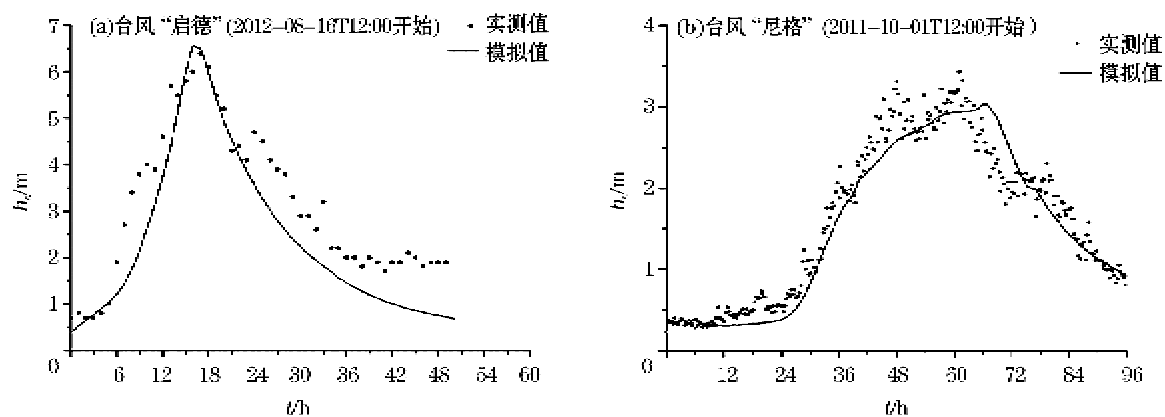


图 4 台风“启德”和台风“尼格”有效波高对比图

Fig. 4 Comparisons of the simulated and measured significant wave heights during KAI-TAK and NALGAE

通过对测点处波高的模拟值与实测值进行对比分析,发现台风“启德”及台风“尼格”实测值与模拟值吻合较好,很好地再现了测点处波浪的成长及衰退过程。但在局部某些时刻模拟值较实测值偏小,对比图 3 中相应的风速,可以发现这种误差主要由于驱动风场较实测值偏低所致。

研究中同时进行了在不同风场驱动下的台风浪的数值试验。图 5 为台风尼格测点处再分析风场模拟的风速及波高过程的对比。再分析风场与实测风速在最大风速处相差较大,因此用其作为驱动风场推算出的波高最大值与实测值亦相差较大。在风浪快速成长阶段,由于模拟的风速大于实测风速,模拟波高也较实测波高大得多。而在风速达到最大风速附近的波浪充分成长阶段,再分析风场模拟的风速和实测值差异较大,因此该阶段的波高和实测波高差异也较大。

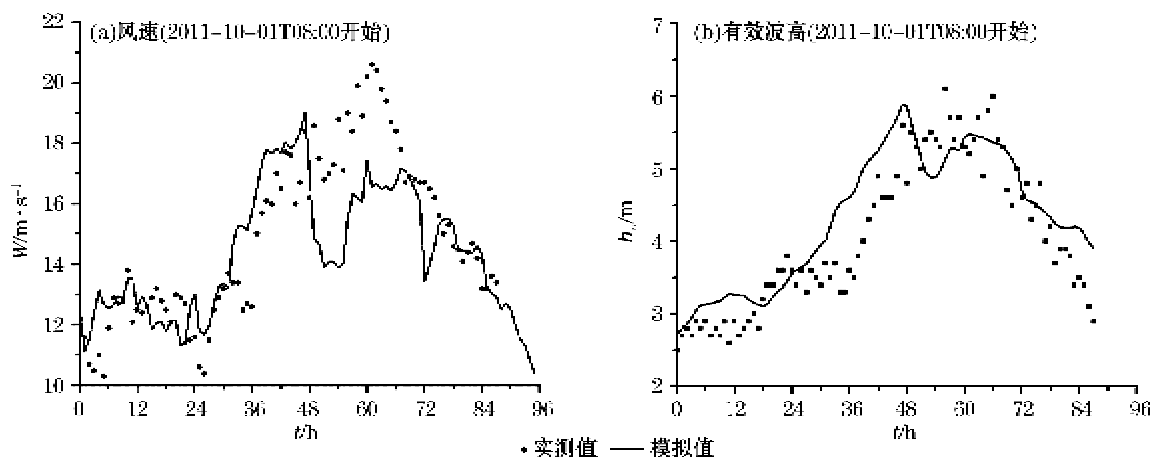


图 5 台风“尼格”风速及有效波高对比图

Fig. 5 Comparisons of the simulated and measured wind speeds and significant wave heights during NALGAE

由此可见,一个准确的风场是推算台风浪的关键。鉴于当前用于模拟台风的方法较多,有必要对各种方法进行对比分析,选取一个准确的风场作为台风浪的驱动风场。由于台风“启德”的风速和海浪的模拟能够很好地与实测吻合,故以下的影响因素分析均以台风“启德”为例。

2.2 SWAN 模式中模型参数选取对台风浪模拟的影响

2.2.1 SWAN 模式中白冠耗散及风能输入对台风浪推算的影响

海面在风的持续作用下,风浪不断产生、发展,并最终由于波陡变大而导致破碎。波浪破碎时将大量空气卷入水中形成白冠,与白冠伴生的还有海水中的气泡和空气中的水沫滴。研究表明,白冠在海—气交换中起着重要作用。白冠耗散是由于波浪破碎而引起的能量损失。在 SWAN 模式中作为一个源项存在,其性质等同于近岸波浪破碎能量耗散项,所不同的是近岸波浪的破碎通常是由于水深变浅而引起的。为了分析白冠耗散作用在 SWAN 模式中对能量平衡的影响,基于台风“启德”,分别模拟了考虑与不考虑白冠耗散作用的两种情况。两种情况下测点的波浪过程对比结果如图 6 所示。测点处的水深为 48 m,此时波浪可以近似地认为是深水波浪。

通过对比发现,在不考虑白冠耗散作用的情况下,SWAN 模式推算出的波高值明显大于实测值,而在考虑白帽耗散作用时,模拟值与实测值吻合较好。由此可见,SWAN 模式在模拟台风浪时白冠耗散对能量平衡作用非常重要。在 SWAN 模型中白冠耗散项的计算公式为:

$$S_{ds,w}(\sigma, \theta) = -C_{ds} \left(\frac{\tilde{S}}{\tilde{S}_{PM}} \right)^p \bar{\sigma} \left(\frac{k}{\bar{k}} \right)^n E(\sigma, \theta) \quad (6)$$

式中, $\bar{\sigma}$ 和 $\bar{k}$ 分别表示平均频率和平均波数; C_{ds} 为常数 ($C_{ds} = 2.36 \times 10^5$); $\tilde{S}$ 表示波陡; $\tilde{S}_{PM}$ 表示 PM 谱的 $\tilde{S}$ 值,其值为 $(3.02 \times 10^{-3})^{1/2}$; 系数 $p = 4$; n 为可调参数,模式默认 $n = 1$ 。研究中发现,模式中推算的周期普遍偏低,其原因是低频能量低估,高频能量高估。建议对 $(k/\bar{k})^n$ 中的指数项 n 进行调整。对 SWAN 的源程序进行修改,在波高吻合良好的情况下,进行 3 种工况 (n 分别为 1.0, 1.5 和 2.0) 推算结果对比,如图 7 所示。

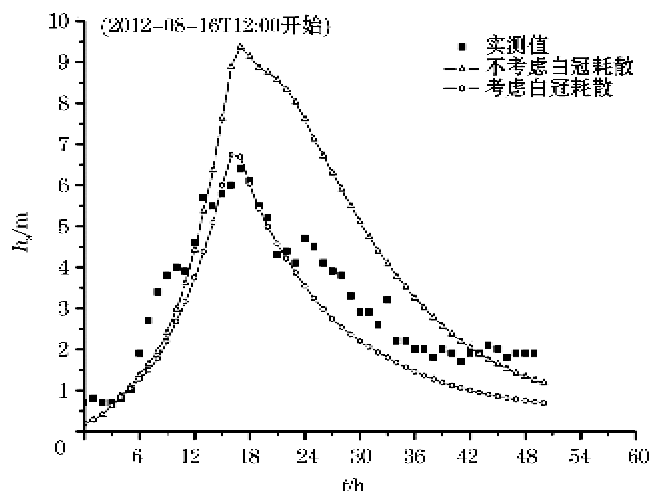


图 6 白冠耗散对有效波高的影响

Fig. 6 Effect of whitecap dissipation on significant wave height

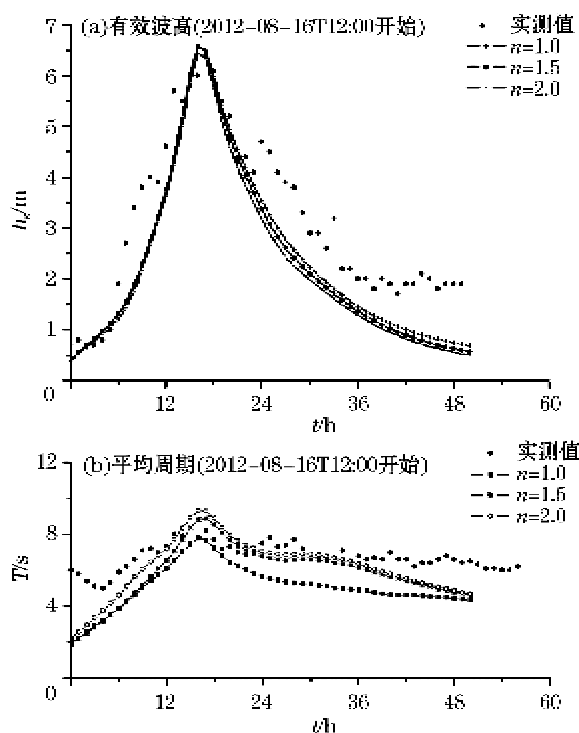


图 7 不同工况下有效波高及平均周期对比图

Fig. 7 Comparisons of the significant wave heights and periods for different values of the tunable parameter n

通过对比发现,当增大 n 值时,波高变化相对较小,周期能够有较大提高。比较 $n = 1.5$ 及 $n = 2.0$ 情况,当 $n = 2.0$ 时,在波高最大值处模拟值较实测值偏小,故建议 n 取 1.5。

在 SWAN 模式中,对风浪成长起主要作用的物理过程是白冠耗散和风能输入。其中,在海浪生成的初级阶段,由风向浪传输能量和动量时,考虑风湍流与海浪的共振相互作用,此时忽略了波生湍流的影响。而在波浪的成长阶段,主要考虑波生湍流与海浪的共振相互作用。而 SWAN 模式中的白冠耗散项由波陡控

制。鉴于模式计算时风能输入方式和白冠耗散项方式有多种选择。因此,为验证这些组合方案在南海的适用性,本文共做了 6 组实验,如表 1 所示。

表 1 风能输入与白冠耗散的不同组合方式

Table 1 Diverse combinations of wind input and whitecap dissipation

实验组别	风能输入	白冠耗散
1	Komen	Komen
2	Janssen	Janssen
3	Komen	Janssen
4	Janssen	Komen
5	WESTHuysen	AB
6	YAN	Komen

图 8 是不同风能输入与白冠耗散组合对波高的影响情况,从有效波高的对比可以看出,SWAN 模式在 Janssen+Janssen 与 Janssen+Komen 组合方式下推算出的有效波高在最大波高处较实测值明显偏大, Janssen 与 Komen 风能输入不同点在于指数增长项部分, Komen 是根据海上观测提出的经验公式, Janssen 是根据临界层机制提出的参数化。Komen 风能输入方式中的指数增长部分公式为:

$$B = \max\left[0, 0.25 \frac{\rho_a}{\rho_w} \left(28 \frac{U_*}{C_{ph}} \cos(\theta - \theta_w) - 1\right)\right] \sigma \quad (7)$$

Janssen 风能输入方式中指数增长部分公式为:

$$B = \beta \frac{\rho_a}{\rho_w} \left(\frac{U_*}{C_{ph}}\right) \max[0, \cos(\theta - \theta_w)]^2 \sigma \quad (8)$$

其中, β 为 Janssen 理论中的常数。

在其余的 4 种组合方式下,波高的模拟结果差异较小。相比之下, Komen+Komen 的组合方式的模拟效果与实测值吻合更好,在此次台风经过南海海域时选用此种组合方式。在其他台风推算时在风场较为准确的前提下,如果选用 Komen+Komen 推算出的波高相对较小,可尝试选用 Janssen+Janssen 的组合方式。

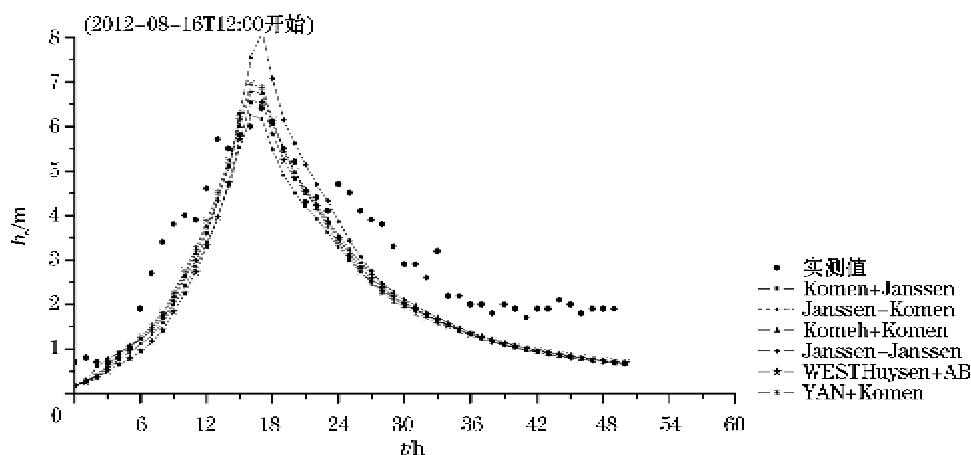


图 8 不同风能输入与白冠耗散组合对有效波高的影响

Fig. 8 Effect of diverse combinations of wind inputs and whitecap dissipation on significant wave height

2.2.2 SWAN 模式中的折射项对台风浪推算的影响

风生浪的过程中受强流及地形梯度的影响较大^[18],波浪的方向改变(折射作用)和频率的变化都可能会影响波浪要素推算的准确性。为了分析 SWAN 模式中的折射项对模拟效果的影响,对 2013 年经过海南岛附近的台风“海燕”进行数值模拟。建立(105°~112°E, 17°~22°N)的计算区域,采用 500 m×500 m 的地形

精度进行台风浪推算。台风“海燕”掠过海南南部时测点位置如图 9 所示,测点处的水深为 18 m,并将测点周围 1° 范围内的波浪场输出。对测点处有效波高的对比发现,不考虑折射作用时模拟极值要比考虑折射时大 0.19 m。图 10 是在 2013-11-10T18:00(即实测过程中最大波高发生时刻)测点周围小区域的波浪场图。通过统计分析,不考虑折射时,有效波高在 5.0 m 以上的面积是考虑折射情况面积的 2.18 倍,不考虑折射有效波高在 4.0 m 以上的面积是考虑折射情况面积的 1.07 倍。也就是说不考虑折射时,计算域内的极值波高要增大。

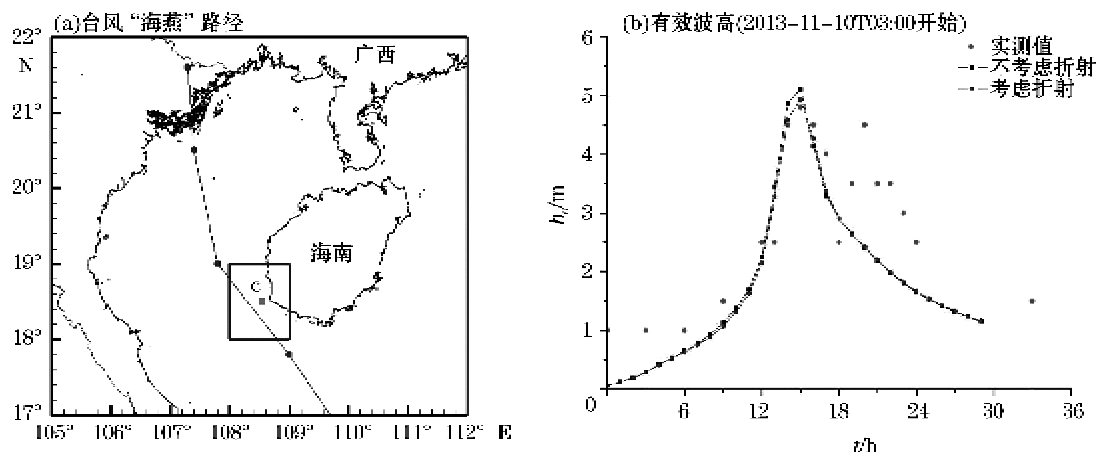


图 9 台风“海燕”路径和有效波高对比图

Fig. 9 Track of typhoon Haiyan and the comparison of the simulated and measured significant wave heights

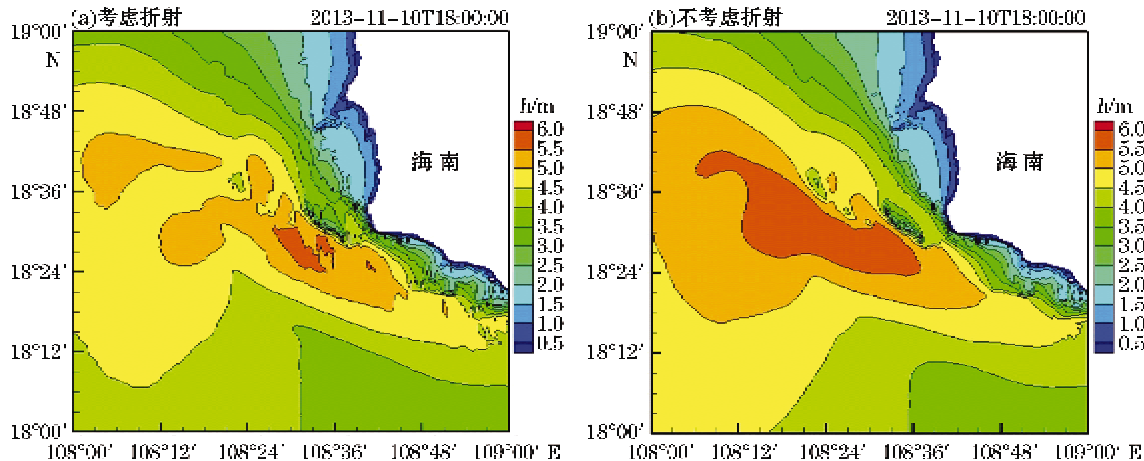


图 10 考虑折射作用与不考虑折射作用的波浪场图

Fig. 10 Wave fields with and without wave refraction effects

鉴于南海海域岛屿众多,存在大量的浅水礁盘,地形复杂,势必会对南海的台风浪产生一定的影响。图 11 分别给出 08-17T00:00,08-18T00:00 的台风场、考虑折射作用和不考虑折射作用时的波浪场分布图。计算时,模型和地形精度皆为 $1' \times 1'$ 。可以发现:在模拟大的计算区域时,当地形复杂、地形精度不够时考虑折射作用,将会导致能量在局部计算区域形成不符合实际情况的汇聚现象,引起局部的有效波高增大,如南沙群岛附近海域。鉴于此,在地形复杂的南海海域若计算范围比较大,在地形分辨率不高时,波浪折射项的选择与否要慎重。

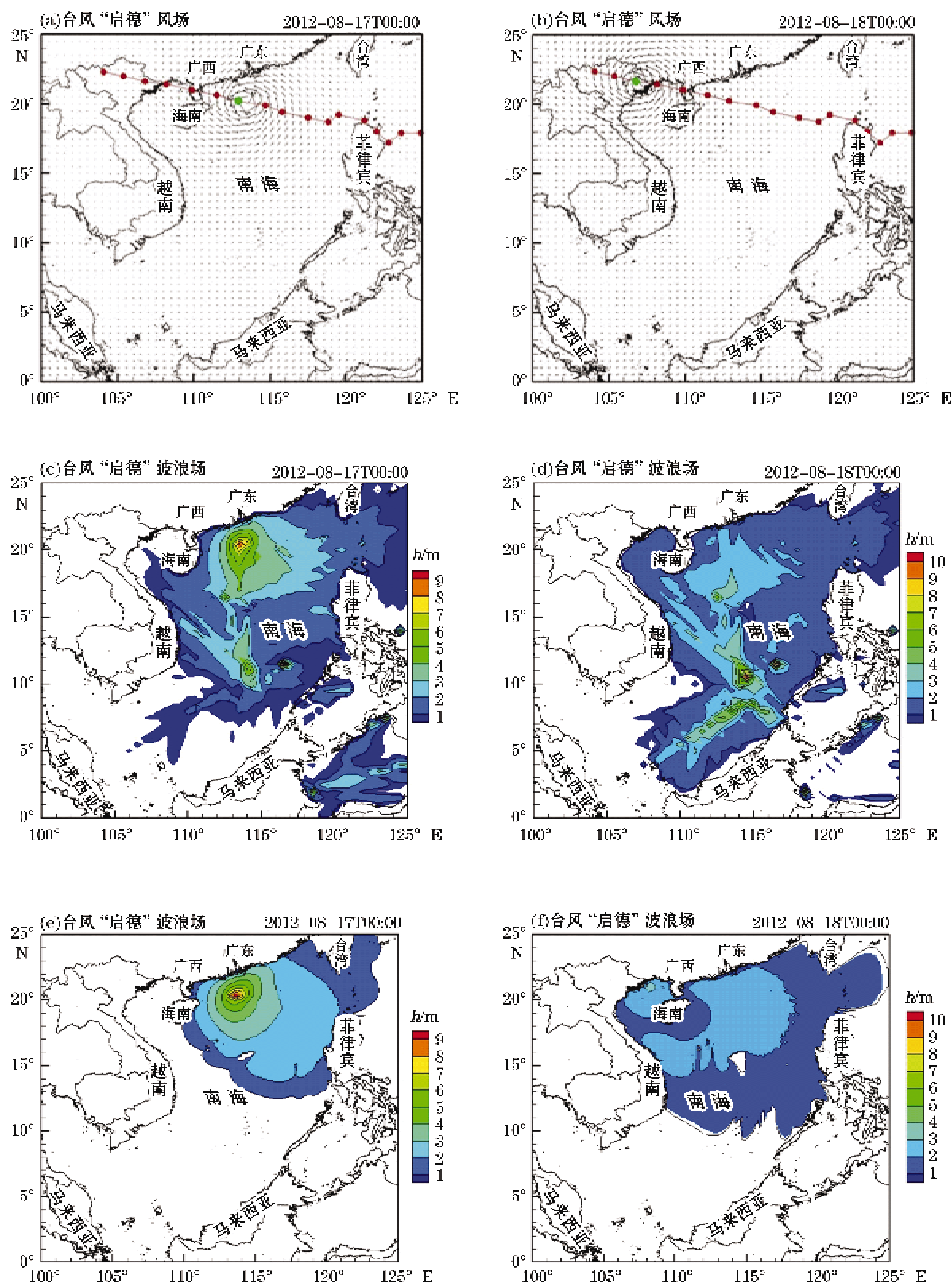


图 11 两个时刻的风场(a,b),考虑折射的波浪场(c,d)和不考虑折射的波浪场(e,f)

Fig. 11 Wind field snapshots (a,b), the simulated wave fields with (c,d) and without (e,f) wave fraction effects at two selected times

3 结 论

本文首先探讨了风场对台风浪模拟的影响。采用内域藤田和外域高桥的混合风场作为驱动风场,基于 SWAN 模式对经过南海海域的 2012 年第 13 号台风“启德”及 2011 年第 19 号台风“尼格”进行台风浪的模拟,同时采用再分析风场作为驱动风场对台风“尼格”进行波浪场模拟,并与实测数据进行对比。结果表明当提供一个准确的风场时,SWAN 模式推算出的有效波高值与实测吻合良好,能够很好地再现测点处的台风浪随时间发展的过程。本文几场台风浪的模拟结果表明,用再分析风场进行台风浪的模拟,波浪大值偏低。

以台风“启德”为例,通过分析 SWAN 模式中不同参数的选取对南海台风浪推算的影响,发现不同的风能输入与白冠耗散组合方式对模式模拟的有效波高有一定的影响。在推算台风启德时,选取 Komen 风能输入+Komen 白帽耗散的组合方式,推算的效果相对较好。在计算其他台风或者其他海域的风浪时,建议对这几种组合方式进行逐一验证,选取一种最为适合的组合方式。

SWAN 模式中,在深水区白冠耗散项对能量的耗散作用非常大。若在风场较为理想的情况下,SWAN 模式模拟出的波高值与实测值偏差较大,可尝试在白冠耗散项上对模式进行改进。针对 SWAN 模式模拟的波周期偏小,建议对公式(6)中 $(k/\tilde{k})^n$ 的指数项 n 进行调整,适当提高低频波浪的能量。

通过对模式中的折射项分析发现,是否考虑折射项在不同的地形精度下影响不同。浅水区地形精度较高时,考虑折射项更合理;而在地形复杂、地形精度不高的大计算区域,考虑折射会使得整个波浪场分布不合理。因此如需考虑折射作用,可在所关心的区域采用较高分辨率的地形及网格数据。

参考文献(References):

- [1] 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.
- [2] GORMAN R M, NEILSON C G. Modelling shallow water wave Generation and transformation in an intertidal estuary[J]. Coastal Engineering, 1999, 36(3): 197-217.
- [3] PADILLA-HERNANDEZ R, MONBALIU J. Energy balance of wind waves as a function of the Bottom friction formulation[J]. Coastal Engineering, 2001, 43(2): 131-148.
- [4] XU F M, ZHANG C K, MAO L H, et al. Application of a numerical model for shallow water waves[J]. Journal of Hydrodynamics; Series A, 2000, (4): 429-434. 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].水动力学研究与进展: A 辑,2000,(4): 429-434.
- [5] WANG D Z, ZHANG Q H, SHI Z. Modeling of wind waves in the Bohai Bay, China[J]. Marine Science Bulletin, 2004, (5): 10-17. 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,(5):10-17.
- [6] RIS R C, HOLTHUIJSEN L H, BOOIJ N. A third-generation wave model for coastal regions 1-Verification[J]. Journal of Geophysical Research, 1999, 104(4): 7667-7681.
- [7] QI Y Q, ZHU B C, SHI P, et al. Analysis of significant wave heights from WWATCH and TOPEX/Poseidon Altimetry[J]. Acta Oceanologica Sinica, 2003, (4): 1-9. 齐义泉,朱伯承,施平,等. WWATCH 模式模拟南海海浪场的结果分析[J].海洋学报,2003,(4):1-9.
- [8] MEI C J, ZHAO D L, SHI J. The analysis of Yellow Sea wave with WAVEWATCH and SWAN models[J]. Marine Forecasts, 2008, (2): 92-98. 梅娉娟,赵栋梁,史剑.两种海浪模式对中国黄海海域浪高模拟能力的比较[J].海洋预报,2008,(2):92-98.
- [9] ZHAO H J, SONG Z R, XU F M, et al. Numerical simulation of typhoon waves in the South China Sea—a case study of typhoon Chan-chu[J]. The Ocean Engineering, 2010, 28(3): 128-134. 赵红军,宋志亮,徐福敏,等.南中国海台风浪数值模拟研究—以台风珍珠为例[J].海洋工程,2010,28(3):128-134.
- [10] SONG W W, CHEN G P, YAN S C, et al. Wave parameters analysis of different return period in the open sea with a hindcast model of typhoon waves[J]. Port & Waterway Engineering, 2013, (1): 51-54. 宋伟伟,陈国平,严士常,等.基于台风浪后报模型的外海重现期波浪要素分析[J].水运工程,2013,(1):51-54.
- [11] JIA X, PAN J N, NICLASSEN B. Improvement and validation of wind energy input in SWAN model[J]. Journal of Hohai University, Natural Sciences, 2010, (5): 585-591. 贾晓,潘军宁, NICLASSEN B. SWAN 模型风能输入项的改进与验证[J].河海大学学报: 自然科

- 学版, 2010, (5), 585-591.
- [12] YANG D Z, YIN B S, XU Y Q, et al. Application of the SWAN wave model to Bohai Sea; Improvement of Phillips linear growth term [J]. *Advances in Water Science*, 2005, 05: 710-714. 杨德周, 尹宝树, 徐艳青, 等. SWAN 浅水波浪模式在渤海的应用-Phillips 线性增长比例系数的改进[J]. *水科学进展*, 2005, 16(5): 710-714.
- [13] CAVALERI L, RIZZOLI P M. Wind wave prediction in shallow water: Theory and applications[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*(1978-2012), 1981, 86(C11): 10961-10973.
- [14] KOMEN G J, HASSELMANN S, HASSELMANN K. On the existence of a fully developed wind-seaspectrum[J]. *Journal of Physical-Oceanography*, 1984, 14: 1271-1285.
- [15] FUJITA T. Pressure distribution in typhoon[J]. *Geophysical Magazine*, 1952, 23: 437-452.
- [16] TAKAHASHI K. Distribution of pressure and wind in a typhoon[J]. *Journal of the Meteorological Society of Japan*, 1939, 17(2): 417-421.
- [17] QIU D H. Hydrology engineering[M]. Beijing: China Communications Press, 2004: 88. 邱大洪. 工程水文学[M]. 北京: 人民交通出版社, 2004: 88.
- [18] DIETRICH J C, ZIJLEMA M, ALLIER P E, et al. Limiters for spectral propagation velocities in SWAN[J]. *Ocean Modelling*, 2013, 70: 85-102.

Influence Factors of Typhoon Wave Forecast in the South Sea by SWAN Model

LIANG Shu-xiu¹, SUN Zhao-chen¹, YIN Hong-qiang¹, NIU Hai-ying^{1,2}

(1. *Dalian University of Technology, State Key Lab of Coastal and Offshore Engineering*, Dalian 116024, China;

2. *Dalian Ocean University, School of Ocean and Civil Engineering*, Dalian 116023, China)

Abstract: This study has focused on investigating the factors influencing the accuracy of typhoon wave simulation in the South China Sea by SWAN model, based on the realistic bottom topography and actual typhoon processes. Firstly, a comparative analysis has been made on different models of wind fields, which shows that the accuracy of the wind field plays a key role in the typhoon wave simulation. Second, the factors that could affect the results of the typhoon wave simulation in SWAN model, such as the effect of whitecap dissipation, the different combinations of wind input and whitecap dissipations and the refraction term are further studied. Some reasonable recommendations have been proposed after an analysis of these factors respectively. SWAN model can be better suitable in the South China Sea for simulating typhoon waves when these factors are chosen properly.

Key words: numerical model; SWAN model; typhoon waves; the South China Sea; influence factors

Received: February 24, 2014