DOI: 10.16198/j.cnki.1009-640X.2017.04.005
杨万康, 尹宝树, 伊小飞, 等. 基于 Holland 风场的台风浪数值计算[J]. 水利水运工程学报, 2017(4): 28-34. (YANG Wankang, YIN Baoshu, YI Xiaofei, et al. Numerical calculation and research of typhoon waves based on Holland wind field[J]. Hydro-Science and Engineering, 2017(4): 28-34. (in Chinese))

基于 Holland 风场的台风浪数值计算

杨万康[1,2,3], 尹宝树[1], 伊小飞[4], 杨青莹[3], 施伟勇[3]

(1. 中国科学院 海洋研究所, 山东 青岛 266071; 2. 中国科学院大学, 北京 100049; 3. 国家海洋局 第二海洋研究所 工程海洋学重点实验室, 浙江 杭州 310012; 4. 广东海洋大学 海洋与气象学院, 广东 湛江 524088)

摘要: 在海岸工程中,台风浪的影响较大。为了提高台风风场模拟精度,基于 Holland 台风风场模型,选取不同的最大风速半径参数和 *B* 参数进行组合,将模型构造风场与实测浮标风速资料进行比较分析,误差统计表明,Willoughby 风速半径公式和 Vickery 的 Holland *B* 参数公式组合之后的计算误差最小,对风场的模拟效果最好。然后采用 SWAN 近岸波浪模型,选取最优风场参数,模拟了 1323 号"菲特"台风过境期间浙南地区的台风浪。模拟结果表明,最优组合参数生成的台风风场,对台风浪的模拟结果较好。当台风登陆时,温州地区的有效波高超过了 10 m,明显高于其他区域,近岸波高等值线分布较为密集,台风移动方向右侧有效波高相对较大。台风进入内陆以后,波高迅速减小至 4 m 左右。

关 键 词: Holland 风场模型; 最大风速半径; *B* 参数; SWAN 波浪模型

中图分类号: P731 **文献标志码:** A **文章编号:** 1009-640X(2017)04-0028-07

台风是浙江主要的海洋灾害之一,平均每年大约有 3 个台风影响浙江地区。浙江南部的温州、台州地区是最容易遭受台风灾害的区域,既受到浙江登陆台风的影响,又受到福建地区登陆台风的影响,且由于浙江南部位于福建登陆台风的危险右半圆区域,因此受到的台风破坏程度甚至比浙江登陆的更为严重。台风浪作为台风引起的海洋灾害之一,近岸的台风浪能够毁坏港口海岸工程,对海上交通和养殖业造成巨大威胁,因此深入研究台风浪的时空特征,对于港口运输、防灾减灾、海岸工程防护具有重要意义[1]。

在台风浪的数值模拟中,波浪场的模拟精度很大程度上依赖于海面风场的计算精度,常见的台风风场模型有藤田模型、Jelesnianski 模型、Holland 模型等。针对各个风场模型在台风浪计算中的适用性,许多学者进行了大量研究。黄文锋[2]利用中国东南沿海 1949—2012 年的台风历史数据进行香港地区台风关键参数概率分布的研究,提出了基于新的 Holland 径向气压分布参数 *B* 表达式的台风风场经验模型,提高了台风预报的时效性。张志旭[3]利用经验的 Holland 台风模型和 NCEP 再分析风场资料相结合构造出南海台风风场,结果较好地符合 TOPEX/Poseidon(T/P)卫星高度计观测的风速分布,以此作为第三代海浪模式的输入风场,模拟了 1999 年 York 台风经过南海海域的台风浪。梁连松等[4]将 Holland 台风风场模型与 CCMP 背景风场相叠加,构造合成风场来驱动 SWAN 模型,研究了台风"米雷"通过舟山海域的波浪场。齐庆辉等[5]采用 Jelesnianski 风场模式风速作为波浪模式 MIKE-SW 的驱动风场,再现 1210 号台风"达维"登陆连云港海域波浪变化过程。何倩倩等[6]基于 Jelesnianski 风场模型和 NCEP 风场,利用 SWAN 模型对台风达维过境江苏期

收稿日期: 2016-08-04

基金项目: 中央科研院所基本科研业务费专项资金(JG1408);广东海洋大学近海海洋变化与灾害重点实验室开放基金(GLOD1405)

作者简介: 杨万康(1987—), 男, 山东青州人, 工程师, 主要从事海洋预报和数值模拟工作。
E-mail: yangwankang@126.com

间的台风浪进行了研究。金罗斌[7]基于第三代海浪模式 SWAN，利用 Myers 理论模型风场、CCMP 风场以及两者的合成风场，分别作为台风驱动风场，对 2003—2010 年经过南海的 15 个台风浪过程进行数值模拟研究。通过与卫星高度计观测资料比较表明：Myers 理论模型风场模式在台风中心附近波高较大时与实测值吻合较好，CCMP 风场模式离台风中心较远处与实测值吻合较好。

总结前人研究成果可知，之前的研究实测资料多来自卫星数据，误差较大，而且对 Holland 风场模型各种参数缺乏比较分析，本文采用第三代海浪模型 SWAN，选取 Holland 风场模型，比较不同 Holland 风场模型中最大风速半径和 B 参数计算组合对风场模拟精度的影响，选取最优组合，以 1323 号台风“菲特”为例，分析浙江南部海域的风浪分布特征和时空规律。

1　台风模型介绍

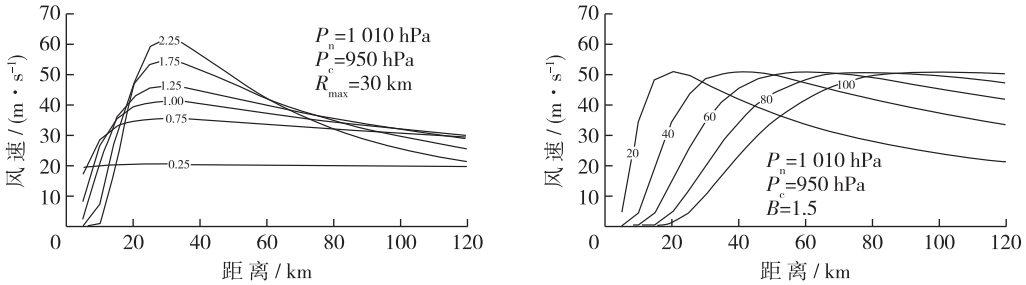
1980 年，Holland[8]在 Schloemer 指数气压分布模型基础上，引入 Holland B 参数，利用梯度风风场得到 Holland 台风风场如下：

气压方程：$$p(r) = p_c + (p_n - p_c)\left(-\frac{R_{max}}{r}\right)^B \tag{1}$$

风场方程：$$V_g(r) = \sqrt{(p_n - p_c)\frac{B}{\rho_a}\left(\frac{R_{max}}{r}\right)^B \exp\left(-\frac{R_{max}}{r}\right)^B + \left(\frac{rf}{2}\right)^2} - \frac{rf}{2} \tag{2}$$

式中：p_c 为台风中心气压；p_n 为外围气压；R_{max} 为最大风速半径；ρ_a 为空气密度；f 为科氏力参数；r 为与台风中心的距离；B 参数决定了台风的峰度和强度。

由式(1)和(2)可知，B 参数和 R_{max} 是决定 Holland 风场的两个关键参数。图 1(a)表明其他参数固定时，随着 B 参数的增加，最大风速半径处的风速也逐渐增加，而离台风中心较远位置的风速则变弱，风场能量更加集中。反之，风速大小则随距离分布比较平均。图 1(b)展示了其他参数固定时，风速随 R_{max} 变化示意图。由图 1(b)可知，风速由台风中心向外侧逐渐增大，在最大风速半径处达到最大，然后逐渐减小，随着 R_{max} 的增加，最大风速半径外的风速变化趋于平缓。



(a) 风速随B参数变化　　(b) 风速随R_{max}参数变化

图 1　风速随 B 参数和 R_{max} 参数变化曲线

Fig. 1　Change curves of wind speed with parameters B and R_{max}

关于 B 参数的取值，Holland 首先基于澳大利亚海域台风数据，给出 B 的合理取值范围为 1.0～2.5。Hubbert[9]提出了适用于澳大利亚海域的经验参数 B 的计算式：

$$B = 1.5 + (980 - P_c)/120 \tag{3}$$

Holland[10]考虑了台风过程中的气压、强度、所在纬度和移动速度等因素，重新改进了 B 参数计算式如下：

$$B_s = -4.4 \times 10^{-5}\Delta p^2 + 0.01\Delta p + 0.03\partial p/\partial t - 0.014\phi + 0.15V_t^x + 1 \tag{4}$$

$$x = 0.6(1 - \Delta p/215) \tag{5}$$

$$B = 1.6B_s \tag{6}$$

式中：Δp 为台风中心气压与外围气压之差(hPa)；ϕ 为纬度；V_t 为台风前进速度(m/s)。

Willoughby 等[11]基于丰富的飞机低空探测数据对台风模型的各个参数进行了最小二乘法拟合，研究显示随着风速增加，最大风速半径减小，而参数 B 则增大，拟合计算式如下：

$$R_{max} = 51.6\exp(-0.022\,3V_{max} + 0.028\,1\phi) \tag{7}$$

$$B = 1.003\,6 + 0.017\,3V_{max} - 0.031\,2\ln R_{max} + 0.008\,7\phi \tag{8}$$

式中：V_{max} 为最大风速。

Vickery 等[12]结合飞机探测和 HRD 观测数据对台风特征参数进行了统计分析，分别给出了最大风速半径和 B 参数的计算式如下：

$$R_{max} = \exp(3.015 - 6.291 \times 10^{-5}\Delta p^2 + 0.033\,7\phi) \tag{9}$$

$$B = 1.881 - 0.005\,57R_{max} - 0.012\,95\phi \tag{10}$$

综上所述，国内外学者对于 B 参数和 R_{max} 进行了详尽研究，但大部分都是基于飞机探空数据对特定海区的研究，专门针对中国海域的台风研究比较少，而且我国缺乏风廓线上层风速观测数据，难以直接利用统计方法拟合台风参数。因此，结合已有的风场模型参数，利用台风期间测站风、波浪数据进行验证，选择适用于我国海域的台风参数并进行误差分析。为减小台风登陆引起的风场结构改变以及复杂地形的影响，本研究选取海岛测站和海洋浮标测站数据进行验证。

2 风场参数组合试验

以 1323 号台风为例，分析模型风场与实测风速的误差。2013 年第 23 号热带风暴“菲特”于 2013 年 9 月 30 日 20:00 在菲律宾以东洋面生成，10 月 1 日20:00 增强为强热带风暴，4 日 17:00 增强为强台风，7 日 01:15 在福建省福鼎市沙埕镇沿海登陆，登陆时中心最低气压为 955 hPa，近中心最大风力 14 级，强度为强台风。“菲特”是建国以来 10 月份登陆我国大陆强度最强的台风，浙江、福建、江苏、上海紧急转移 139.8 万人，9 500余间房屋倒塌或严重损坏，直接经济损失高达 623.3 亿元，为近十年来单个台风直接经济损失最严重的一次。台风路径及各测站位置如图 2 所示，W1 为风、浪观测站，W2 为波浪测站。

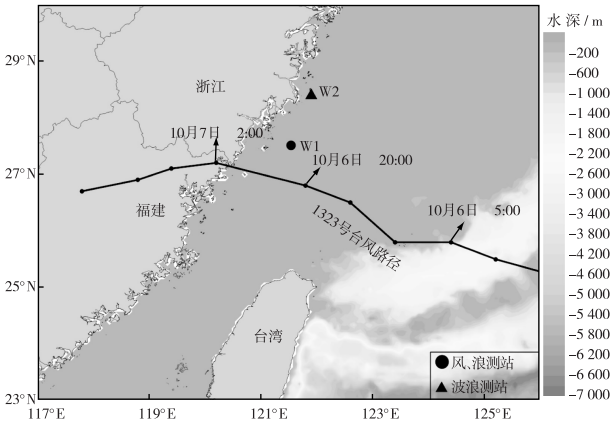


图 2 1323 号台风“菲特”路径

Fig. 2 Moving path of No. 1323 typhoon “Fitow”

为比较不同的 Holland B 参数和最大风速半径计算式构造出的台风风场对台风浪模拟精度的影响，设置了 6 组试验，试验设置如表 1 所示。模型对比所需的实测风速资料来自海洋浮标 W1 站。台风路径及中心气压来源于中国气象局热带气旋资料的 CMA 最佳路径数据集。

表 1 试验方案设置

Tab. 1 Schemes of experiments

试验方案编号	最大风速半径 R_{max}	Holland B 参数	试验方案编号	最大风速半径 R_{max}	Holland B 参数
T1		Hubbert	T4		Hubbert
T2	Willoughby	Willoughby	T5	Vickery	Willoughby
T3		Vickery	T6		Vickery

图 3 为模拟风速与实测风速的对比，总体上，散点基本分布在 $y = x$ 的两侧，表明模型风速计算结果较好，为了定量分析各个试验的模拟效果，寻找最优参数，我们采用均方根误差 *RSME* 对模型结果的准确性进

行比较。

$$RSME = \sqrt{\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}(x_i - y_i)^2} \tag{11}$$

式中：y_i 为模型计算结果；x_i 为实测值；N 为样本总数。各方案误差统计如图 4 所示。

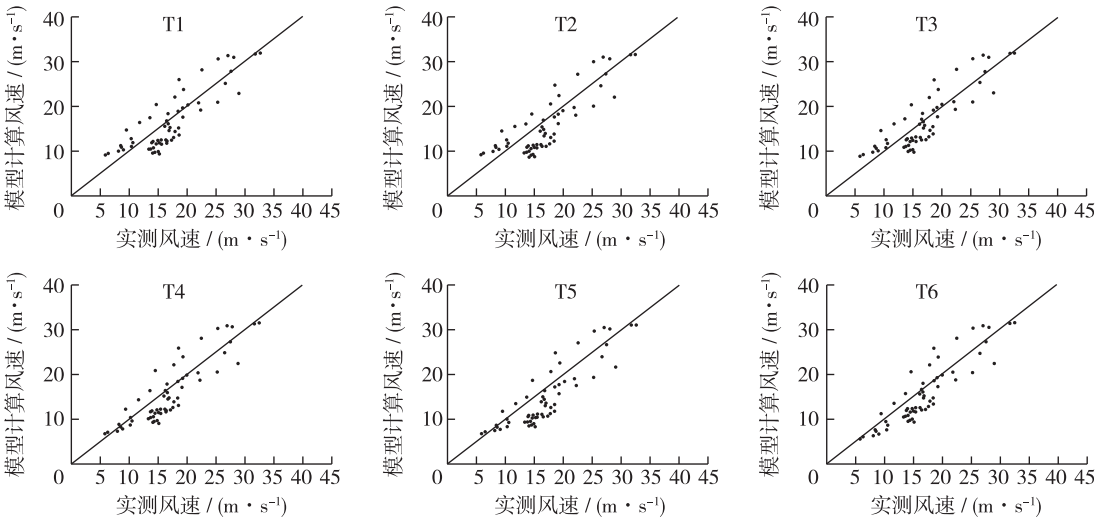


图 3　各方案模型风速与实测风速对比

Fig. 3　Comparison between simulated and measured wind speeds

经误差计算可知：基于 Holland 台风模型对 1323 号“菲特”台风风速的模拟较好，对比 6 个方案可知，不同风速半径和不同 B 参数对风场模拟精度有较大影响，T3 方案的模拟结果误差最小，优于其他方案，说明 Willoughby 提出的最大风速半径计算式和 Vickery 提出的 B 参数计算式组合对 1323 号台风的模拟误差最小。

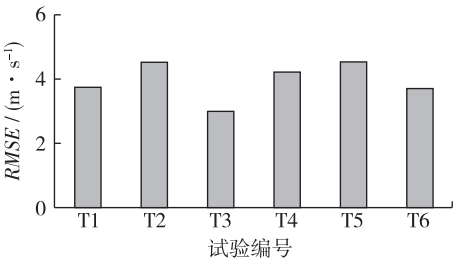


图 4　各方案试验误差统计

Fig. 4　Statistics of experiment errors

3　台风浪模拟研究

3.1　波浪数学模型

台风浪计算采用的波浪模型为 SWAN 模型，SWAN 模型是 Delft 大学提出的考虑了波浪破碎、波波相互作用和白帽耗散等影响的第 3 代海浪数值模式，适用于近岸海域的波浪计算[13]。SWAN 模型的控制方程为动谱密度守恒方程，在笛卡尔坐标下的表达式为：

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \frac{\partial C_x N}{\partial x} + \frac{\partial C_y N}{\partial y} + \frac{\partial C_\sigma N}{\partial \sigma} + \frac{\partial C_\theta N}{\partial \theta} = \frac{S}{\sigma} \tag{12}$$

式中：动谱密度函数 $N(\sigma,\theta) = \frac{E(\sigma,\theta)}{\sigma}$；$E(\sigma,\theta)$ 为能量密度函数；σ 为波浪频率；C_x 和 C_y 为在 x 和 y 空间的传播速度；C_σ 和 C_θ 为波浪在 σ 和 θ 方向传播速度；S 为动谱密度源项，包括风输入、底摩擦、白浪、波浪破碎导致的能量损失和波波相互作用等。

3.2　模型设置

模型采用非结构三角网格，外海分辨率较低，网格尺度为 5 000 m 左右，近岸网格进行加密（见图 5），最高可达 300 m，不同分辨率网格之间平滑过渡，既保证了计算效率又能保证岸线地形的准确性，也避免采用多重嵌套带来的计算误差。计算时间从 2013 年 10 月 5—8 日，时间步长取 60 s。模型中考虑了海底摩擦、

波浪破碎、三波和四波相互作用及绕射效应。模型所使用的地形资料来自于 GEBCO 全球地形数据集,近岸采用航保部海图水深数据。台风风场来自 Holland T3 方案参数生成的台风风场数据。

3.3 模型验证及计算结果

波浪验证资料选取 W1 和 W2 站的观测资料,模拟结果与实测结果对比曲线如图 6 所示。由图 6 可知,10 月6 日 8:00 以前模拟的有效波高偏小,但是有效波高的峰值拟合较好,两个站的波高峰值误差在 0.25 m 以内。总体而言,此次台风浪模拟结果良好,模型能够用于后续台风浪的特征分析。

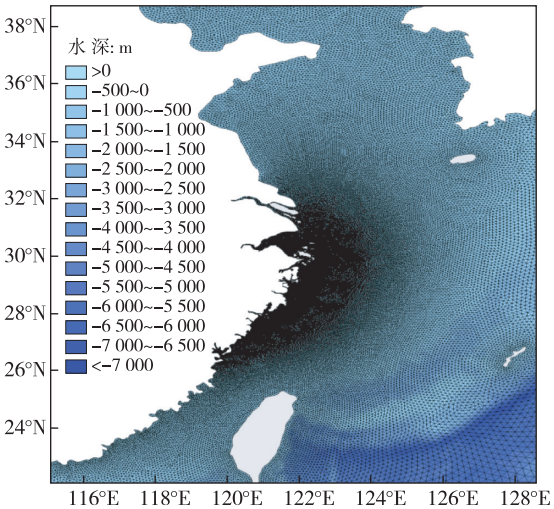
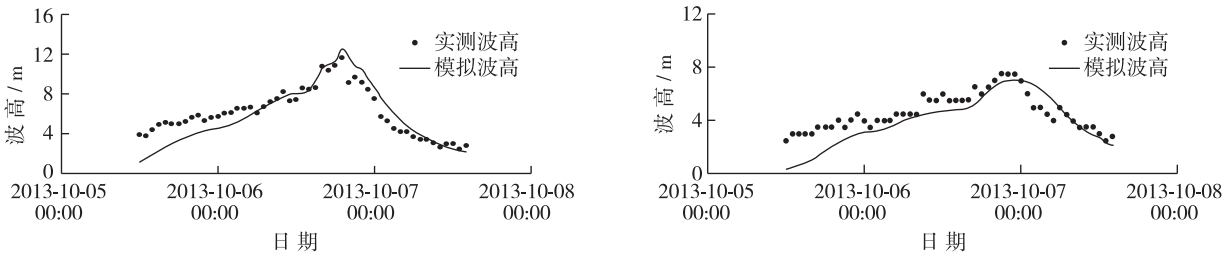


图 5 波浪模型计算范围和网格

Fig. 5 Model calculation area and grids

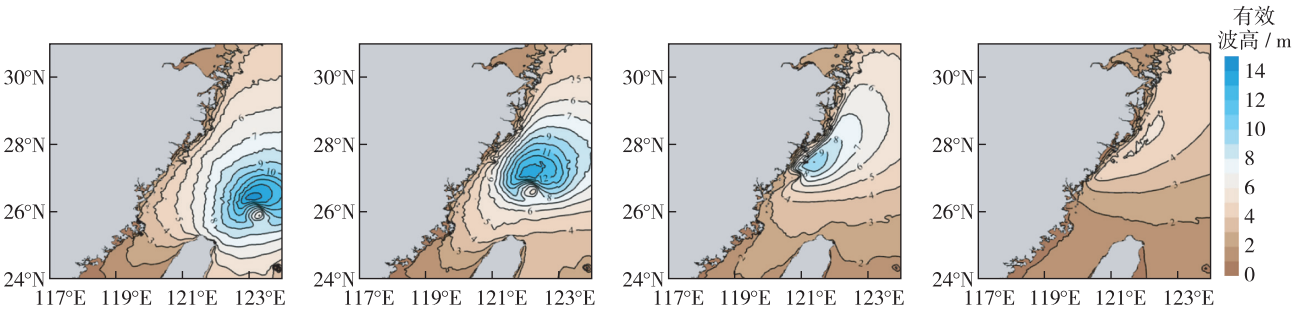
图 7 给出了“菲特”台风过境期间浙江海域波高分布,当台风在外海时,台风中心海域的台风浪要远大于周边,中心区域有效波高超过 12 m,随着台风的移动,最大波高位置也随之移动,越靠近岸边波高等值线分布越密集,与水下地形等深线分布基本一致,近岸浅水区域波浪衰减速度加快。当台风登陆时(图 7(c),温州海域的波高明显高于其他区域,有效波高最大达到 10 m 左右,当台风进入内陆以后,波高迅速减小至4 m左右。台风移动方向右侧有效波高相对较大,近岸地区受到地形、岛屿影响,分布和变化较外海更加复杂。



(a) W1站 (b) W2站

图 6 模型与实测有效波高验证

Fig. 6 Validation between model and measured avaliable wave heights



(a) 6日13:00有效波高 (b) 6日19:00有效波高 (c) 7日01:00有效波高 (d) 7日04:00有效波高

图 7 1323 号“菲特”台风期间有效波高分布

Fig. 7 Avaliable wave height distribution during No. 1323 typhoon “Fitow”

4 结 语

采用 Holland 台风模型,选取不同的最大风速半径和 B 参数进行组合,然后将模型构造风场与实测风速

资料进行比较分析。结果表明，Willoughby 风速半径公式和 Vickery 的 Holland *B* 参数经验公式组合后的计算误差最小。然后基于 SWAN 模型，模拟了 1323 号“菲特”台风过境期间浙江南部地区的台风浪。结果表明，最优组合参数生成的台风风场，对台风浪的模拟结果较好。外海台风中心有效波高超过 12 m，台风移动方向右侧有效波高相对较大。当台风登陆时，温州地区的波高明显高于其他区域，中心最大波高超过 10 m，当台风进入内陆以后，波高迅速减小至 4 m 左右。

参 考 文 献：

[1] 郑祥靖. 潮汐和潮流作用下 1323 号台风“菲特”台风浪数值模拟[J]. 海洋预报，2015，32(5)：8-13.（ZHENG Xiangjing. Numerical simulation of typhoon waves with tide during 1323 typhoon “Fitow”[J]. Marine Forecasts，2015，32(5)：8-13.（in Chinese））

[2] 黄文锋，周焕林，孙建鹏. 应用台风风场经验模型的台风极值风速预测[J]. 哈尔滨工业大学学报，2016，48(2)：142-146.（HUANG Wenfeng，ZHOU Huanlin，SUN Jianpeng. Prediction typhoon design wind speed with empirical typhoon wind field model[J]. Journal of Harbin Institute of Technology，2016，48(2)：142-146.（in Chinese））

[3] 张志旭，齐义泉，施平，等. 最优化插值同化方法在预报南海台风浪中的应用[J]. 热带海洋学报，2003，22(4)：34-41.（ZHANG Zhixu，QI Yiquan，SHI Ping，et al. Application of an optimal interpolation wave assimilation method in South China Sea[J]. Journal of Tropical Oceanography，2003，22(4)：34-41.（in Chinese））

[4] 梁连松，李瑞杰，丰青，等. 舟山海域台风浪数值模拟[J]. 水道港口，2014，35(6)：582-588.（LIANG Liansong，LI Ruijie，FENG Qing，et al. Numerical simulation of typhoon wave in Zhoushan[J]. Journal of Waterway and Harbor，2014，35(6)：582-588.（in Chinese））

[5] 齐庆辉，朱志夏，王志国，等. “达维”台风作用下连云港海域台风浪数值模拟[J]. 水利水运工程学报，2015(5)：60-66.（QI Qinghui，ZHU Zhixia，WANG Zhiguo，et al. Numerical simulation of storm surge induced by typhoon Dawei in Lianyungang seas[J]. Hydro-Science and Engineering，2015(5)：60-66.（in Chinese））

[6] 何倩倩，杨娟，王卫远. 台风“达维”影响期间江苏海域台风浪研究[J]. 海洋通报，2015，34(5)：592-599.（HE Qianqian，YANG Juan，WANG Weiyuan. Study on the simulated typhoon waves off Jiangsu coast during Typhoon Damrey[J]. Marine Science Bulletin，2015，34(5)：592-599.（in Chinese））

[7] 金罗斌，陈国平，赵红军，等. 合成风场在南海台风浪数值模拟中的研究[J]. 水道港口，2015，36(1)：12-20.（JIN Luobin，CHEN Guoping，ZHAO Hongjun，et al. Study of combined wind in simulating storm waves in the South China Sea[J]. Journal of Waterway and Harbor，2015，36(1)：12-20.（in Chinese））

[8] HOLLAND G. An analytic model of the wind and pressure profiles in hurricanes[J]. Monthly Weather Review，1980，108(8)：1212-1218.

[9] HUBBERT G D，HOLLAND G J，LESLIE L M，et al. A real-time system for forecasting tropical cyclone storm surges[J]. Weather and Forecasting，1991，6(1)：86-97.

[10] HOLLAND G. A revised hurricane pressure-wind model[J]. Monthly Weather Review，2008，136(9)：3432-3445.

[11] WILLOUGHBY H E，RAHN M E. Parametric representation of the primary hurricane vortex. Part I：Observations and evaluation of the Holland (1980) model[J]. Monthly Weather Review，2004，132(12)：3033-3048.

[12] VICKERY P J，SKERLJ P F，STECKLEY A C，et al. Hurricane wind field model for use in hurricane simulations[J]. Journal of Structural Engineering，2000，126(10)：1203-1221.

[13] 武海浪，陈希，陈徐均，等. 近岸港口风暴潮与台风浪相互作用的数值模拟[J]. 解放军理工大学学报(自然科学版)，2015，16(4)：360-367.（WU Hailang，CHEN Xi，CHEN Xujun，et al. Numerical simulation of interaction of storm surge and typhoon wave on near shore harbor[J]. Journal of PLA University of Science and Technology(Natural Science Edition)，2015，16(4)：360-367.（in Chinese））

Numerical calculation and research of typhoon waves based on Holland wind field

YANG Wankang[1, 2, 3], YIN Baoshu[1], YI Xiaofei[4], YANG Qingying[3], SHI Weiyong[3]

(1. *Institute of Oceanology*, *Chinese Academy of Sciences*, *Qingdao* 266071, *China*; 2. *University of Chinese Academy of Sciences*, *Beijing* 100049, *China*; 3. *Key Laboratory of Engineering Oceanography*, *Second Institute of Oceanography*, *State Oceanic Administration*, *Hangzhou* 310012, *China*; 4. *College of Ocean and Meteorology*, *Guangdong Ocean University*, *Zhanjiang* 524088, *China*)

Abstract: The typhoon waves play an important role in the coastal engineering. In order to improve the typhoon wind field simulation accuracy, different maximum wind speed radius formulae and *B* parameters are calculated based on Holland wind field model. Comparisons between the modeled and the observed data are made in this study. From the research results it is found that the Willoughby wind radius formula combined with Vickery *B* parameter formula has generated a minimum error, improving the accuracy of wind field. A SWAN wave model with optimal wind field parameters is applied to simulate the No. 1323 typhoon waves. Simulation results show a satisfactory qualitative agreement with the measured wave height. The analysis results show that when the typhoon landed, the significant wave height of the Wenzhou region was obviously higher than that of other areas. The value of the significant wave height exceeded 10 m. The wave height distribution contour lines near the shore was relatively dense. On the right side of the moving direction of the typhoon, the significant wave height was higher. After moving inland, the typhoon wave height decreased quickly and reduced to 4 m or so.

Key words: Holland wind field model; maximum wind radius; *B* parameter; SWAN wave model