

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2026.04.002

Yan Meng 风场模型的参数敏感性分析

逯智科¹, 洪俊玲², 周丽丹², 徐万海², 李 颀¹

(1. 中国华能集团清洁能源技术研究院有限公司; 2. 天津大学建筑工程学院)

摘要: 为了研究风场模型的特征,以 2024 年超强台风“摩羯”为例,通过数值模拟开展了 Yan Meng 风场模型的参数敏感性分析。研究结果表明:Yan Meng 风场模型的表面风速计算结果与压力分布常数、最大风速半径呈正相关关系,压力分布常数与最大风速半径呈正相关关系;等效粗糙高度越小,表面风速越大;Yan Meng 风场模型表面风速计算结果的相对误差可稳定在 20% 以内,平均绝对误差均值在 2 m/s 以内;Yan Meng 风场模型在我国沿海台风风场研究中具有较好的适应性,可用于我国沿海台风灾害的评估。

关键词: Yan Meng 风场模型;台风风场模拟;“摩羯”台风;敏感性分析;误差分析

Parameter sensitivity analysis of Yan Meng wind field model

Lu Zhike¹, Hong Junling², Zhou Lidan², Xu Wanhai², Li Sa¹

(1. Huaneng Clean Energy Research Institute Co., Ltd.; 2. School of Civil Engineering, Tianjin University)

Abstract: To explore the characteristics of wind field models, by taking Super Typhoon “Yagi” in 2024 as an example, a parameter sensitivity analysis of the Yan Meng wind field model was conducted via numerical simulation. The results show that the surface wind speed calculated by the Yan Meng wind field model is positively correlated with the pressure profile constant and the maximum wind speed radius, and the pressure profile constant is positively correlated with the maximum wind speed radius. A smaller equivalent roughness height leads to a higher surface wind speed. The relative error of the surface wind speed calculation results of the Yan Meng wind field model can be stabilized within 20%, and the average value of the mean absolute error is within 2 m/s. The Yan Meng wind field model exhibits good adaptability in the study of typhoon wind fields along the coast of China, and it can be applied to the evaluation of typhoon disasters along the coast of China.

Key words: Yan Meng wind field model; typhoon wind field simulation; Typhoon “Yagi”; sensitivity analysis; error analysis

中国拥有漫长的海岸线和辽阔的海洋面积,因此面临着复杂的海洋气候影响。台风是影响我国的最严重自然灾害之一,其带来的强风、暴雨、风暴潮严重威胁着人民生命财产安全^[1]。我国东南沿海超强台风频发,最大风力可达 17 级以上,海上设施备受影响,会造成重大生命财产损失,探索台风生成发展机理对台风灾害预测和海上设施设计与建造具有重要意义。

台风作为一种破坏性强、运动路径难以准确预测的气象灾害,20 世纪中叶就有气象学家开始对其进行研究。传统气象学中的台风数值模拟需要全面考虑多种复杂因素,模拟得到的风场更加精准,但计算周期长,计算效率低。随机理论被引入台风极值风速模拟后,兼顾计算精度和计算效率的台风风场模型应运而生。目前,工程领域常用 Batts、Yan Meng、Shapiro、CE 这 4 种台风风场模型,谢汝强等^[2]集中对比分析了 4 种台风风场模型在西北太平洋区域的风速计算结果与近地观测风速的误差,结果表明 Batts 风场模型适用性一般,Yan Meng 风场模型适用性较好,而 Shapiro 和 CE 风场模型适用性相对较好。Yan Meng 风场模型作为一种半经验半数值风场模型,引入了 Holland 气压模型和边界层摩擦力修正的梯度平衡方程,计算周期短且具有足够精度,被广泛应用在台风风场数值计算中^[3-4]。李涛等^[5]基于 Yan Meng 风场模型对台风“丹尼”进行数值模拟,研究了 Yan Meng 风场模型的适用性;孔莉莎等^[6]基于 Yan Meng 风场模型模拟台风“玛莉亚”的全过程分布,为计算海上风电场不同重现期风速提供了技术基础。此外,部分学者对不同台风风场模型开展了对比研究,如葛耀君等^[7]研究结果表明,Yan Meng 风场模型的计算结果与实际风速更加吻合,可以

基金项目: 华能集团总部科技项目(HNKJ22-H62)

作者简介: 逯智科(1985—),男,高级工程师,博士,主要从事风电机组定制化设计与开发工作。E-mail:zk_lu@qny.chng.com.cn

通信作者: 徐万海(1981—),男,教授,博士,主要从事海洋结构安全评价研究。E-mail:xuwanhai@tju.edu.cn

很好地模拟中国沿海台风,且计算简繁适当。因此,本文选取 Yan Meng 风场模型开展台风风场模拟。

Yan Meng 风场模型中关键参数的取值对风速计算结果具有不可忽视的影响,且关键参数取值具有区域特征,西北大西洋建立的参数统计模型不能直接应用于西北太平洋^[8-10]。本文以 2024 年 9 月发生在我国南海区域的超强台风“摩羯”为例开展研究,该台风因当年 9 月初弱冷空气南下和南海活跃季风共同作用增强了台风北侧低层流入,导致移动方向多次突变,曾 4 次登陆陆地,其中两次登陆我国,路径特征十分复杂,登陆时持续风速达 83 m/s,是 1949 年以来秋季登陆中国的最强台风,造成的经济损失近 600 亿元。本文重点研究最大风速半径 $R_{\max}$ 、压力分布常数 B 和等效粗糙高度 Z_0 这 3 个关键参数在 Yan Meng 风场模型中的敏感性,分析关键参数取值对风速计算结果的影响规律并给出参数取值建议,以期为西北大西洋台风灾害评估与工程防灾提供理论支撑。

1 Yan Meng 风场模型

1.1 风速计算

Yan Meng 风场模型采用的是 Holland 气压模型^[11],Holland 气压模型在国内外台风风场研究中也广泛应用^[12],该模型通过引入压力分布常数 B 简化了台风气压梯度。Yan Meng 风场模型将台风引起的表面风速 v_s 分解为气压梯度力引起的梯度风速 v_g 和地表摩擦力引起的摩擦风速 v_f ,通过迭代计算得到最终的表面风速,具体计算过程如图 1 所示,本文将求得的梯度风速作为表面风速的初始值。

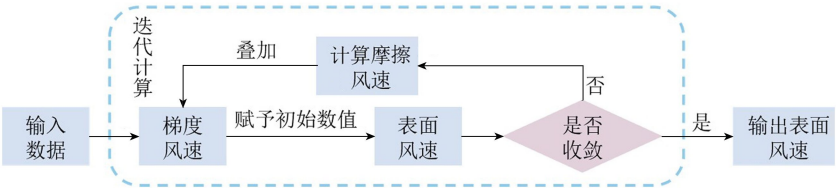


图 1 表面风速计算流程

Fig. 1 Calculation flow chart of surface wind speed

Yan Meng 风场模型得到的模拟风速相当于 1 h 平均风速^[13-14],而浮标站的监测风速为 3 s 平均风速,引入阵风系数的概念,将模拟风速转换为 3 s 平均风速,其表达式为:

$$G_{t,T_0} = v_{t,T_0} / v_{T_0} \tag{1}$$

式中; G_{t,T_0} 为 T_0 时间平均风速与 t 时间平均风速的转换系数,即阵风系数; v_{t,T_0} 为在 T_0 时间内的 t 时间平均风速; v_{T_0} 为 T_0 时间平均风速。在本文中, $t=3\text{ s}$, $T_0=1\text{ h}=3\,600\text{ s}$,根据世界气象组织(WMO)发布的建议标准(WMO/TD-No. 1555 *Guidelines for Converting Between Various Wind Averaging Periods in Tropical Cyclone Conditions*),位于沿海区域的浮标站风速转换系数取值为 1.60。

Yan Meng 风场模型计算得到的是 10 m 高度的模拟风速,采用对数定律对不同高度的风速进行转换,转换公式为:

$$\frac{v_H}{v} = \frac{\ln[(H+10)/Z_0]}{\ln(10/Z_0)} \tag{2}$$

式中: v 为 Yan Meng 风场模型计算的 10 m 高度的模拟风速; v_H 为浮标站 H 高度处的实际风速。

1.2 关键参数

在 Yan Meng 风场模型中,最大风速半径 $R_{\max}$ 、压力分布常数 B 和等效粗糙高度 Z_0 这 3 个参数的取值对模拟风速具有不可忽视的影响, $R_{\max}$ 与 B 的相关性也一直是学界的研究重点。表面风速受 3 个参数的影响情况如图 2 所示。本文考虑 $R_{\max}$ 与 B 的相关性,根据 Holland 气压模型推导压力分布常数 B ,选取不同的 Z_0 取值,开展 Yan Meng 风场模型的参数敏感性分析。

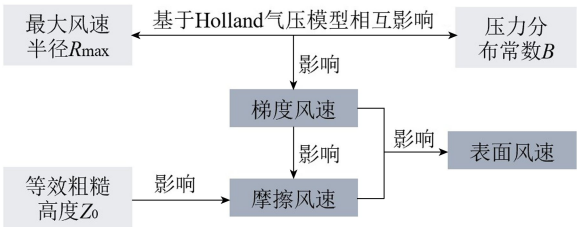


图 2 表面风速受 3 个参数的影响情况

Fig. 2 Influence of three parameters on surface wind speed

2 台风风场模拟试验

2.1 案例介绍

本文选取 2024 年的第 11 号超强台风“摩羯”作为研究对象,基于 Yan Meng 风场模型开展模拟试验。依据中央气象台台风网的资料,台风“摩羯”于 2024 年 9 月 1 日在菲律宾东南部形成,一路往西北方向移动,9 月 7 日登陆越南广宁省并于 9 月 8 日下午被中央气象台停止编号,期间进入我国南海区域时风力增强,最高风速达到了 68 m/s,造成的灾情遍及中国、菲律宾、越南和缅甸等国,影响范围十分广泛,具有重要的研究价值。

本文采用的台风中心位置、中心气压、移动速度等数据均来自中央气象台台风网。选取“摩羯”台风影响区域内的浮标站作为台风风场模拟风速的计算点,因浮标站数量有限且存在损坏情况,本文仅研究纬度为 20°53′53.39″N、经度为 112°06′33.15″E 的浮标站,该浮标站与“摩羯”台风运动路径的相对位置如图 3 所示。浮标站测风塔设置了多个测量高度层,最低测量高度为 50 m,数据记录的时间间隔为 10 min。



图 3 浮标站与台风相对位置

Fig. 3 Relative position map of buoy station and typhoon

2.2 数值模拟分析方案

试验前要对台风样本进行预处理,对数据进行标准化处理,依据台风行进位置筛选出影响浮标站的台风样本,本文设定模拟圆半径为 250 km。筛选后得到“摩羯”台风从 2024 年 9 月 5 日 23 时至 6 日 23 时共计 25 个逐时台风数据样本,为方便表述,将时间表示为从第 1 小时到第 25 小时。

在已有的大量最大风速半径经验公式中选取如表 1 所示的 7 个经验公式进行模拟分析。依据 Holland 气压模型,已知某时刻浮标站气压 P_r 、台风中心气压 P_c 、台风中心气压与外围气压的差值 ΔP 、台风中心与浮标站距离 r ,根据表 1 中的经验公式计算得到最大风速半径,进而推导得到压力分布常数。部分用于推导压力分布常数的浮标站数据如表 2 所示。

表 1 最大风速半径经验公式

Table 1 Empirical formulas of maximum wind speed radius

公式编号	来源文献	数据来源	公式
1	Fang 等 ^[15]	西北太平洋	$\ln R_{\max} = -38.36\Delta P^{0.025} + 46.75$
2	孔莉莎等 ^[16]	西北太平洋	$\ln R_{\max} = -0.1239\Delta P^{0.6003} + 5.1034$
3	江志辉等 ^[17]	中国沿海	$R_{\max} = 1.119 \times 10^3 \Delta P^{-0.805}$
4	Vickery 等 ^[18]	大西洋	$\ln R_{\max} = -7.7 \times 10^{-5} \Delta P^2 + 3.859$
5	Yasui 等 ^[19]	西北太平洋	$R_{\max} = 2.06 \times 10^4 \Delta P^{-1.27}$
6	李瑞龙 ^[20]	西北太平洋	$\ln R_{\max} = -0.163\Delta P^{0.555} + 5.212$
7	李泽培 ^[21]	中国沿海	$R_{\max} = -5.71 \times 10^{-4} \Delta P^3 + 0.137\Delta P^2 - 10.966\Delta P + 0.237C + 362.049$

注:李泽培^[21]经验公式包含两个公式,由于本文的台风样本处于台风增强阶段,因此只采用其增强阶段的公式,其中 C 为台风移动速度。

参考 Davenport^[22] 基于地形类别对 Z_0 取值的建议,基于地形特征的典型范围选取 0.000 2、0.005、0.01、0.05、0.1、1 m 共 6 个取值工况开展试验分析。因此共设置 25 个时刻、7 个最大风速半径经验公式、6 个等效粗糙高度取值共计 1 050 种试验工况,运用 Yan Meng 风场模型迭代计算不同工况下的表面风速,最大迭代次数设定为 50 次,最后的收敛判定精确到小数点后两位。基本分析流程如下:筛选台风样本→选择最大风速半径经验公式→Holland 气压模型推导压力分布常数→选择等效粗糙高度→Yan Meng 风场模型计算表面风速→结果分析。

表 2 推导压力分布常数的部分浮标站数据

Table 2 Partial buoy station data for deriving pressure profile constant

r/km	P_r/hPa	P_c/hPa	$\Delta P/\text{hPa}$
230.27	994	915	95
217.61	994	915	95
211.77	992	915	95
201.21	992	915	95
206.68	991	915	95
202.68	990	910	100
199.15	991	905	105
193.59	989	905	105
191.61	990	905	105
190.18	990	905	105

2.3 关键参数敏感性分析

2.3.1 最大风速半径和压力分布常数的影响

最大风速半径和压力分布常数的相关性不可忽略,采用 7 个最大风速半径经验公式,依据 Holland 气压模型计算得到对应的压力分布常数均值和最大风速半径均值,结果如图 4 所示。图 4 中数据点由左至右依次为经验公式 4、6、2、3、1、5、7 的结果,可看出压力分布常数的均值($\bar{B}$)随最大风速半径均值($\bar{R}_{\max}$)单调递增,两者之间存在明显的线性关系(式(3)),线性决定系数 R^2 达到 0.997。

$$\bar{B} = 0.33 + 0.02\bar{R}_{\max}$$

(3)

为研究最大风速半径和压力分布常数对表面风速的影响,固定等效粗糙高度 $Z_0 = 0.005\text{ m}$ 不变,计算得到不同经验公式下台风样本在浮标站的模拟风速值,结果如图 5 所示。可以发现,表面风速随着最大风速半径和压力分布常数的增大逐步升高,具有明显的正相关性,经验公式 7 的模拟风速最大,公式 4 最小。从图 5 可以发现 7 个经验公式得到的台风风速变化趋势基本与实际风速保持一致,验证了 Yan Meng 风场模型在我国东南沿海的适用性。

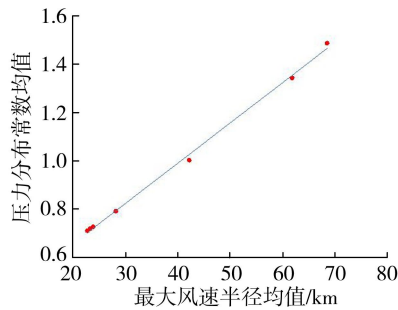


图 4 压力分布常数均值与最大风速半径均值关系

Fig. 4 Relationship between mean value of pressure profile constant and mean value of maximum wind speed radius

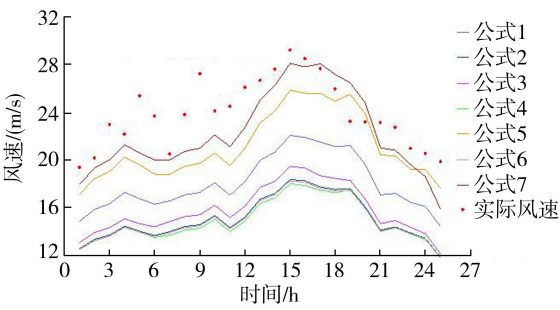


图 5 不同最大风速半径经验公式得到的模拟风速

Fig. 5 Simulated wind speed obtained from different empirical formulas of maximum wind speed radius

2.3.2 等效粗糙高度的影响

为判断等效粗糙高度对表面风速的影响,固定最大风速半径和压力分布常数的取值,选取经验公式 5 计算的最大风速半径和压力分布常数的均值作为固定参数,等效粗糙高度取值为 0.000 2、0.005、0.01、0.05、0.1、1 m 开展参数敏感性分析,得到浮标站模拟风速结果如图 6 所示。从图 6 可以看出,模拟风速随着等效粗糙高度的增大而减小,两者呈负相关关系。在第 17 小时之前,等效粗糙高度取值为 0.000 2 m 的工况计算结果更接近实际风速,在第 17 小时之后,实际风速骤降且更靠近等效粗糙高度取更大值对应的模拟风速,这是因为第 16 小时至第 17 小时“摩羯”台风开始登陆我国海南省,台风经过的地形地貌发生明显变化,台风强度开始衰减,实际风速降低明显,导致实际风速接近较大等效粗糙高度取值得到的模拟风速。因此,台风登陆之后的表面风速计算需要考虑更大的等效粗糙高度取值。

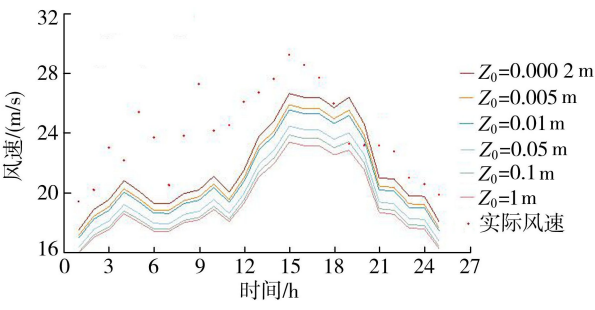


图 6 不同等效粗糙高度取值工况下的模拟风速

Fig. 6 Simulated wind speed under different values of equivalent roughness height

2.4 表面风速误差分析

由图 6 可以看出,台风登陆之前 $Z_0 = 0.000\text{ 2 m}$ 对应的模拟风速与实际风速更加接近,本文选取 $Z_0 = 0.000\text{ 2 m}$ 工况下不同最大风速半径经验公式得到的模拟风速与实际风速开展误差对比分析。

不同最大风速半径经验公式得到的模拟风速的相对误差如图 7 所示。可以看出,经验公式 6 的整体误差最大,相对误差集中在 30%~40%;而公式 7 的整体误差最小,相对误差基本集中在 20%以内。在气象预报领域,就随机性强、模拟尺度大的台风而言,20%的相对误差是可以接受的。7 种经验公式得到的大部分数据点都落在了图中右下部分,说明基于监测数据得到的最大风速半径经验公式在 Yan Meng 风场模型中的计算结果与实际结果相比偏小、偏保守。

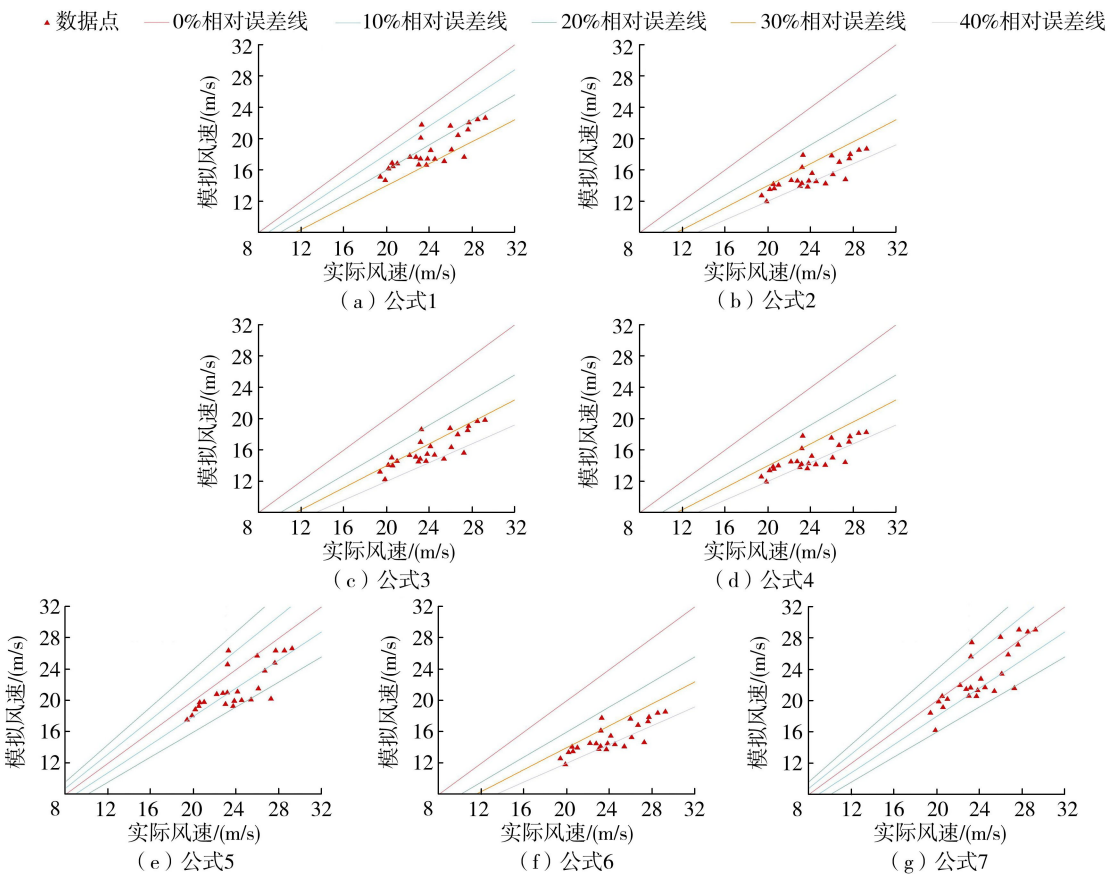


图 7 不同最大风速半径经验公式得到的模拟风速相对误差

Fig. 7 Relative errors of simulated wind speed obtained from different empirical formulas of maximum wind speed radius

纳什效率系数(NSE)可以衡量 Yan Meng 风场模型对实际台风风场风速的模拟精度,可用来验证模型的模拟结果的优劣,7 种最大风速半径经验公式对应的平均绝对误差(MAE)和 NSE 如表 3 所示。可以发现 NSE 越大,MAE 越小,两种指标呈现一个近似对称的趋势。经验公式 7 的 NSE 最接近于 1,其 MAE 也是最小的,低于 2 m/s,因此公式 7 计算的最大风速半径和压力分布常数更加接近实际情况,可信度最高。

3 结 论

a. Yan Meng 风场模型的表面风速计算结果与压力分布常数、最大风速半径呈正相关关系,压力分布常数与最大风速半径存在明显的正相关性,压力分布常数会影响风场结构和气压分布进而影响最大风速半径,其相关性不可忽略;最大风速半径主要受中心气压差影响,因此最大风速半径不同会显著影响 Yan Meng 风场模型的计算结果。

b. Yan Meng 风场模型的表面风速计算结果与等效粗糙高度呈负相关关系,台风登陆之后表面风速计算需要更大的等效粗糙高度取值。

c. 7 种最大风速半径经验公式得到的表面风速计算结果整体偏小,经验公式 7 更接近实际情况,可信度更高,对应的表面风速计算结果相对误差可以降低至 20% 以内,优于其他方法的 20% ~ 45%,MAE 值在 2 m/s 以内。

参考文献:

[1] 沈晓琳,胡艺,张恒德,等. 台风“美莎克”致洪暴雨精细化特征及成因分析[J]. 河海大学学报(自然科学版),2022,50(3):23-30. (Shen Xiaolin, Hu Yi, Zhang Hengde, et al. Analysis on refined characteristics and causes of flooding rainstorm

表 3 不同最大风速半径经验公式的误差
Table 3 Errors of different empirical formulas of maximum wind speed radius

公式编号	MAE/(m/s)	NSE
1	5.5764	-3.3326
2	8.7200	-9.0522
3	7.9404	-7.3535
4	8.9292	-9.5595
5	2.6532	-0.2086
6	8.8292	-9.2953
7	1.8812	0.2814

caused by typhoon MAYSAK[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2022,50(3):23-30. (in Chinese))

[2] 谢汝强,吴韬,王艳华. 台风风场模型适应性研究[J]. 合肥学院学报(自然科学版),2014,24(2):84-88. (Xie Ruqiang, Wu Tao, Wang Yanhua. Adaptability research on typhoon wind-field model[J]. Journal of Hefei University (Natural Sciences), 2014,24(2):84-88. (in Chinese))

[3] Meng Yan, Matsui M, Hibi K. An analytical model for simulation of the wind field in a typhoon boundary layer[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics,1995,56(2/3):291-310.

[4] Meng Yan, Matsui M, Hibi K. A numerical study of the wind field in a typhoon boundary layer[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics,1997,67-68:437-448.

[5] 李涛,雷鹰,徐志谦,等. 基于 Yan Meng 模型模拟台风的初步探索[J]. 厦门大学学报(自然科学版),2009,48(6):840-843. (Li Tao, Lei Ying, Xu Zhiqian, et al. Initiative research on typhoon simulation by Yan Meng wind field model[J]. Journal of Xiamen University (Natural Science), 2009,48(6):840-843. (in Chinese))

[6] 孔莉莎,张秀芝. 2018 年 8 号超强台风“玛莉亚”风场模拟[J]. 船舶工程,2021,43(增刊 1):61-65. (Kong Lisha, Zhang Xiuzhi. Wind field simulation of 8th super typhoon “Maria” in 2018[J]. Ship Engineering,2021,43(S1):61-65. (in Chinese))

[7] 葛耀君,赵林,项海帆. 基于极值风速预测的台风数值模型评述[J]. 自然灾害学报,2003,12(3):31-40. (Ge Yaojun, Zhao Lin, Xiang Haifan. Review for numerical typhoon models based on extreme wind velocity prediction[J]. Journal of Natural Disasters,2003,12(3):31-40. (in Chinese))

[8] 叶庚姣,余晖,方平治,等. 拖曳系数参数化方案对工程台风模拟风场的影响研究[J]. 热带气象学报,2018,34(2):188-197. (Ye Gengjiao, Yu Hui, Fang Pingzhi, et al. Effects of the parameterization scheme of drag coefficient on the simulation of typhoon wind field in engineering application[J]. Journal of Tropical Meteorology,2018,34(2):188-197. (in Chinese))

[9] 曾祥锋. 基于 WRF 中尺度数值模式台风风场模拟及验证[D]. 广州:广州大学,2018.

[10] 赵林,葛耀君,宋丽莉,等. 广州地区台风极值风特性蒙特卡罗随机模拟[J]. 同济大学学报(自然科学版),2007,35(8):1034-1038. (Zhao Lin, Ge Yaojun, Song Lili, et al. Monte-Carlo simulation analysis of typhoon extreme value wind characteristics in Guangzhou[J]. Journal of Tongji University (Natural Science Edition),2007,35(8):1034-1038. (in Chinese))

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

[12] 罗锋,汪忆,杨洁,等. 相似路径台风风暴潮过程对比[J]. 河海大学学报(自然科学版),2023,51(6):130-140. (Luo Feng, Wang Yi, Yang Jie, et al. Comparative study on storm surge processes caused by typhoons with similar tracks[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2023,51(6):130-140. (in Chinese))

[13] Cardone V J, Greenwood C V, Greenwood J A, et al. Unified program for the specification of hurricane boundary layer winds over surfaces of specified roughness[R]. Washington D. C. :US Army Corps of Engineers,1992:12-35.

[14] 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.

[15] Fang Genshen, Zhao Lin, Cao Shuyang, et al. A novel analytical model for wind field simulation under typhoon boundary layer considering multi-field correlation and height-dependency[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics,2018,175:77-89.

[16] 孔莉莎,张秀芝. 基于 Yan Meng 风场模型的台风风场模拟及参数敏感性分析[J]. 船舶工程,2020,42(增刊 1):581-585. (Kong Lisha, Zhang Xiuzhi. Typhoon wind field simulation and parameter sensitivity analysis based on Yan Meng wind field[J]. Ship Engineering,2020,42(S1):581-585. (in Chinese))

[17] 江志辉,华锋,曲平. 一个新的热带气旋参数调整方案[J]. 海洋科学进展,2008,26(1):1-7. (Jiang Zhihui, Hua Feng, Qu Ping. A new scheme for adjusting the tropical cyclone parameters[J]. Advances in Marine Science,2008,26(1):1-7. (in Chinese))

[18] Vickery P J, Wadhera D. Statistical models of holland pressure profile parameter and radius to maximum winds of hurricanes from flight-level pressure and H* Wind Data[J]. Journal of Applied Meteorology and Climatology,2008,47(10):2497-2517.

[19] Yasui H, Ohkuma T, Marukawa H, et al. Study on evaluation time in typhoon simulation based on Monte Carlo method[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics,2002,90(12/13/14/15):1529-1540.

[20] 李瑞龙. 基于改进的台风关键参数的台风极值风速预测[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2007.

[21] 李泽培. 中国东南沿海地区台风数值模拟与关键参数研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2023.

[22] Davenport A G. The relationship of reliability to wind loading[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics,1983,13(1/2/3):3-27.