

# 考虑大气环境影响的台风极值风速研究

孙建鹏<sup>1</sup>, 吕冠军<sup>1</sup>, 黄文锋<sup>2</sup>, 赵 健<sup>3,4</sup>

(1. 西安建筑科技大学 土木工程学院, 陕西 西安 710055; 2. 合肥工业大学 土木工程学院, 安徽 合肥, 230009;  
3. 中国铁建大桥工程局集团有限公司, 天津 300300; 4. 中铁建大桥工程局集团第四工程有限公司, 黑龙江 哈尔滨 150000)

**摘要:** 随着全球环境的不断变化, 台风的发生也有着较大的影响。为了考虑大气环境对台风极值风速的影响, 以起点模型、路径模型和强度模型构成台风模型, 该模型的三个组成部分是由研究点的相对海平面温度、绝对涡度、250 hPa 和 850 hPa 垂直风切以及 600 hPa 相对湿度等大气环境所决定。首先, 详细阐述起点模型、路径模型和强度模型的理论基础; 然后, 以香港为研究点, 进行了台风关键参数相关性分析和不同重现期下的台风极值风速预测, 并将研究结果与历史数据计算结果进行对比。研究结果发现: 本模型的模拟结果与历史观测数据结果有着较好吻合度, 表明此模型的可靠度; 模拟结果略大于历史观测数据表明, 在全球变暖的大环境下, 台风极值风速较以往略有提高。

**关键词:** 大气环境; 台风极值风速; 台风关键参数; 数值模拟

**中图分类号:** TU312.1; P444

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1006-7930(2023)03-0342-08

## Research on extreme wind speed of typhoon considering the influence of atmospheric environment

SUN Jianpeng<sup>1</sup>, LÜ Guanjun<sup>1</sup>, HUANG Wenfeng<sup>2</sup>, ZHAO Jian<sup>3,4</sup>

(1. School of Civil Engineering, Xi'an Univ. of Arch. & Tech., Xi'an 710055, China;

2. School of Civil Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China;

3. China Railway Construction Bridge Engineering Bureau Group Co., Ltd., Tianjin 300300, China;

4. China Railway Construction Bridge Engineering Bureau Group Fourth Engineering Co., Ltd., Harbin 150000, China)

**Abstract:** With the continuous changes in the global environment, the occurrence of typhoons also has a greater impact. In order to consider the influence of atmospheric environment on the extreme wind speed of typhoon, this study constructs a typhoon model consisting of a starting point model, a path model and an intensity model. The three components of the model are determined by atmospheric conditions such as relative sea surface temperature, absolute vorticity, 250 hPa and 850 hPa vertical wind shear, and 600 hPa relative humidity at the study site. Firstly, the theoretical basis of the starting point model, the path model and the intensity model is described in detail; then, taking Hong Kong as the research point, the correlation analysis of key typhoon parameters and the prediction of typhoon extreme wind speed under different return periods are carried out, and the research results are compared with historical data calculation results. The research results show that the simulation results of this model are in good agreement with the historical observation data, indicating the reliability of the model; the simulation results are slightly larger than the historical observation data, indicating that in the context of global warming, the typhoon extreme wind speed is slightly higher than before.

**Key words:** atmospheric environment; typhoon extreme wind speed; typhoon key parameters; numerical simulation

中国地处亚洲东部, 西北与亚欧大陆接壤, 东南与太平洋毗邻, 在拥有 960 万 km<sup>2</sup> 领土的同时, 也有着 300 万 km<sup>2</sup> 领海。在我国拥有的将近 3.2 万 km 的海岸线中, 主要分布在我国的东南沿

海地区。有记录显示, 每年登陆我国的台风将有 8 个之多, 而 2021 年 7 月的台风“烟花”足足在我国内陆停留了 95 h 之久, 造成了极大的经济损失和人员伤亡。台风作为极为频繁的自然灾害, 对我

收稿日期: 2022-01-14 修回日期: 2023-05-09

基金项目: 国家自然科学基金项目(51408453); 陕西省自然科学基金项目(2020JM-475); 西安市科技创新人才服务企业项目(2020KJRC0047)

第一作者: 孙建鹏(1981—), 男, 博士, 副教授, 研究方向为新型桥梁结构分析及抗震、工程结构防灾减灾。E-mail: sunjianpeng2001@163.com

通信作者: 黄文锋(1982—), 男, 博士, 副教授, 研究方向为结构风振相应分析、风灾危险性分析。E-mail: wfhuang@hfut.edu.cn

国的东南沿海城市造成了极为严重的经济损失。因此,对我国东南沿海城市进行台风极值风速研究极其重要。

事实上,目前对于台风极值风速研究的方法主要为模拟圆法<sup>[1-2]</sup>和台风的合成路径模拟方法<sup>[3-4]</sup>。模拟圆法首先利用台风历史数据资料确定台风关键参数的概率分布,然后利用 Monte Carlo 模拟进行大量抽样,结合台风模型进行足够多次数的台风模拟。由于此方法操作方便,得到了众多学者的广泛使用和发展<sup>[5-6]</sup>。然而,该方法需要有大量的台风历史观测数据才能有着较好的模拟效果,因此对于历史观测数据较少的地区模拟效果误差较大。为了解决模拟圆法存在的不足,VICKERY 等<sup>[4]</sup>2000 年提出了台风的合成路径模拟方法,该方法通常由起点模型、路径模型和强度模型模拟台风从生成到消亡的台风全寿命周期。之后,大量的国内外学者对其进行改进与发展,并利用各种改进后的模型进行了台风极值风速的研究。自此之后,有很多学者针对台风危险性分析做了大量研究,LI 和 HONG<sup>[7]</sup>对 VICKERY 等提出的方法利用回归加权进行了改进,并验证该模型的可靠性。肖玉凤等<sup>[9]</sup>通过调整中国东南沿海地区最大风速半径的计算方法来提高计算精度。刘大伟<sup>[8]</sup>则是利用路径分类的方法将台风路径分为 5 类,对该 5 类的台风路径分别进行研究,来提高台风极值风速计算的准确性。姚博等<sup>[10]</sup>则通过考虑地区的混合气候来改进台风极值风速研究方法。王宁娟<sup>[11]</sup>通过对 CE 风场的改进来提高对中国东南沿海台风的模拟精度。吴甜甜<sup>[12]</sup>通过构建阻滞增长模型对台风的强度模型进行改进。虽然以上方法的模拟精度相比于以往的台风研究方法有了一定的提高,但是其并没有解决对台风历史数据的依赖性这个问题。对于那些历史观测数据较少,但存在较大台风发生概率的地区,该方法同样模拟误差较大。

现如今,全球气候变化日益加剧,气候的变化不仅对室内设计条件、建筑物使用条件等有着较大的影响,而且对自然灾害的发生也有着极为关键的影响<sup>[13]</sup>。国内外学者做了许多研究发现,台风的发生以及强度与大气环境的改变有着较大的关联。GARY 等<sup>[14]</sup>首先提出了关于大气海洋环境的经验生成指数,并被不断的发展完善。随后 EMANUEL 和 NOLAN<sup>[15]</sup>为了解决 GARY 的经验指数无法适应气候变化缺点,对 GARY 经验指数进行了适当的改进,提出了台风潜在生成指数

(Genesis Potential Index, GPI),而 TIPPETT<sup>[16]</sup>为了降低模型计算的复杂性,利用海平面温度代替了 GPI 中的潜在强度。中国学者赵军平<sup>[17]</sup>则是利用 GPI 针对南海海域以及西北太平洋海域进行了特定的改进,提升了 GPI 的模拟效果。KNUTSON 等<sup>[18]</sup>对大西洋热带气旋活动进行了研究,研究发现在全球大气环境的变化下,20 世纪后期热带气旋的发生频次有着一定幅度的下降。MURAKAMI 等<sup>[19]</sup>为了研究全球气候变化下的热带气旋活动,利用日本气象研究所的大气环流模式研究发现 20 世纪 70 年代后的台风发生总数有着明显的降低,而不同的海域有着不同的变化形式,西北太平洋和南太平洋有所降低,中太平洋将有所增长。尽管以上研究表明在全球气候变化下,台风的发生数量有所减少,但是 MEI 等<sup>[20]</sup>研究发现,由于海水表面温度提高以及一些其他大气环境的变化,导致强台风的发生频次大大增加。钟维军等<sup>[21]</sup>利用统计确定性模型并结合 4 种不同的预测模型对全球气候变化对台风极值风速的影响进行了研究,研究发现未来台风极值风速可能超过 20 世纪末,并且在重现期 100 a 下的台风极值风速呈增长趋势。

为了考虑全球环境变化对台风的影响,并且摆脱台风模拟对历史观测数据的影响,本文将采用由大气环境参数构成的台风模型,并以香港地区为研究对象台风极值风速进行计算,同时将其与历史观测数据结果进行比较分析,从而验证模型的有效性。

## 1 考虑大气环境的台风模型

台风的生成与发展是一个极为复杂的过程,期间受到很多大气环境参数的影响,例如海洋表面温度、涡度、湿度、垂直风切等等。为了能够充分考虑大气环境参数对台风的影响,本文将采用起点模型、路径模型以及强度模型对台风的全寿命周期进行模拟。本研究全过程采用 MATLAB 编程进行数值模拟,利用大气环境参数对台风的生成与发展进行分析预测。

### 1.1 台风起点模型

台风的起点模型对于台风合成路径模型起着至关重要的作用,它是模拟一个台风全路径的起点,只有确定一个较为准确的起点位置及起点个数,才能确保台风在行进过程中能有一个较好的行进路线,从而才能确保一个台风的成功模拟。以往台风起点模型多采用三维高斯核密度函数对

台风历史起点数据进行拟合得到台风起点时空概率分布模型<sup>[21-22]</sup>, 而本文将采用 Tippet 等<sup>[16]</sup>提出的热带气旋生成指数(TCGI)对西北太平洋地区的台风起点数量进行模拟, 同时利用 TCGI 对每个台风位置和时间进行随机分配, 从而形成一个完整的台风模型. 具体实现方法如下所示.

泊松分布被常常应用在统计数据的建模中, 假如随机变量  $N$  满足泊松分布, 设  $N=0, 1, 2, \dots$ , 则有概率

$$P(N=n)=e^{-\mu}\mu^n/n! \quad (1)$$

式中:  $N$  是台风起点数量. 台风起点预测期望值是通过气候变量的向量  $x$  得到. 由于预测期望值  $\mu$  线性依赖于气候变量  $x$  会使得  $\mu$  出现负值, 因此通过对数线性模型来解决这个问题, 其中  $\log(\mu)$  与变量  $x$  是线性相关的, 即

$$\log(\mu)=b^T x \quad (2)$$

式中,  $b$  是系数的向量, 上式也可转换为

$$\mu=\exp(b^T x) \quad (3)$$

气候变量和台风起点历史数据都被定义在  $2.5^\circ \times 2.5^\circ$  网格中. 为了能够更好的区分不同纬度的区域不同, 将公式 3 修改为

$$\mu=\exp(b^T x+\log(\cos\varphi)) \quad (4)$$

式中:  $\varphi$  为纬度.  $\log(\cos\varphi)$  的系数为 1, 使得单位指数  $b^T x$  代表每个区域的台风起点数量.

本文将利用 Tippet<sup>[16]</sup> 在 2011 年提出的 TCGI 起点模型, 对台风的起点进行模拟, 具体公式如下.

$$TCGI=\exp(b+b_{\eta}\eta_{850}+b_{rh}RH_{600}+b_{sst}SST_R+b_{shrd}SHRD+\log(\cos\varphi)) \quad (5)$$

式中: TCGI 为起点数量的期望值;  $\eta_{850}$ ,  $RH_{600}$ ,  $SST_R$  和  $SHRD$  分别是 850 hPa 的绝对涡度, 600 hPa 的相对湿度, 相对海平面温度( $SST$  相对于热带平均  $SST$ )和 850 和 200 hPa 之间的垂直风切;  $b$  是截距,  $b_x$  是变量  $x$  相对应的系数;  $\varphi$  为纬度. 利用 1961~2000 年的 40 年台风历史起点数据和气象数据在  $2.5^\circ \times 2.5^\circ$  网格下对公式 5 进行拟合得到截距  $b$  和系数  $b_x$ .

## 1.2 台风路径模型

本文路径模型采用 Marks<sup>[23]</sup> 在 1992 年提出的  $\beta$  漂流模型(BAM), BAM 结合了 Li 和 Wang<sup>[24]</sup> 在 1994 年提出的  $\beta$  漂流和基于大尺度低层(850 hPa)以及高层(250 hPa)风线性组合的平均平流为

$$V=aV_{850}+bV_{250}+V_{\beta} \quad (6)$$

式中,  $V_{850}$  和  $V_{250}$  是 850 hPa 和 250 hPa 两个气压层纬向风( $u$ )和经向风( $v$ )时间序列的矢量和;  $a$ 、

$b$  是两个气压层加权系数, 其中  $a+b=1$ ;  $V_{\beta}$  是  $\beta$  漂流项,  $V_{\beta}=[u_{\beta}, v_{\beta}]$ .

$$\frac{dx}{dt}=V \quad (7)$$

产生台风起点数量和起点位置后, 路径模型将以 1 h 为步长向前推进台风. 本研究只研究西北太平洋地区, 即东经  $80^\circ$  到西经  $120^\circ$ , 北纬  $0^\circ$  到北纬  $70^\circ$  之间的海域. 超出此区域的, 台风将自动终止.

对于台风动力路径模型公式 6, 我们取  $a=0.8$ , 则  $b=0.2$ , 同时  $V_{\beta}=[2.5\cos\theta, 1.0\cos\theta]$ ,  $\theta$  为纬度.  $V$  的组成由下列公式表示, 即

$$\begin{cases} u_{250}(x, y, t)=\bar{u}_{250}(x, y, t)+A_{11}F_1(t) \\ v_{250}(x, y, t)=\bar{v}_{250}(x, y, t)+A_{21}F_1(t)+A_{22}F_2(t) \\ u_{850}(x, y, t)=\bar{u}_{850}(x, y, t)+A_{31}F_1(t) \\ \quad +A_{32}F_2(t)+A_{33}F_3(t) \\ v_{850}(x, y, t)=\bar{v}_{850}(x, y, t)+A_{41}F_1(t) \\ \quad +A_{42}F_2(t)+A_{43}F_3(t)+A_{44}F_4(t) \end{cases} \quad (8)$$

式中:  $\bar{u}$  和  $\bar{v}$  是根据月平均场线性插值得到的日分辨率风;  $F_i(t)$  ( $i=1, 2, 3, 4$ ) 是具有随机相位的傅里叶级数变量, 用来表示小于月的时间尺度的风的随机性<sup>[25]</sup>.  $F_i(t)$  表示为

$$F_i(t)=\sqrt{\frac{2}{\sum_{n=1}^N n^{-3}}} \sum_{n=1}^N n^{-3/2} \sin\left[2\pi\left(\frac{nt}{T}+X_n\right)\right], \quad i=1, 2, 3, 4 \quad (9)$$

式中:  $T$  是时间序列中的最低频率(15 d);  $N$  为总波数, 这里取 10,  $X_n$  是均匀分布在 0 和 1 之间的随机数;  $A_{i,j}$  是下三角矩阵  $A$  第  $i$  行, 第  $j$  列的元素,  $A$  矩阵满足

$$A^T A=\text{cov} \quad (10)$$

式(9)中采用  $n^{-3/2}$  来对观测到的地转湍流谱进行模拟, 那是因为合成风动能的功率谱接近频率的立方倒数. 总而言之, 利用公式(8)和公式(10)可得到 850 hPa 和 250 hPa 的合成风, 其月平均值、方差和协方差与再分析数据集中的一致.

## 1.3 台风强度模型

台风移动过程中, 除了起点以外的其他各点强度与其前一步的强度有着很大的关联性, 我们都可以用前一步台风强度计算得到当前步的台风强度, 因此, 本文将利用相对强度的自回归模型来表示台风强度的变化, 公式如下.

$$\ln(I_{R_{i+1}})=\alpha_1+\alpha_2\ln(I_{R_i})+\alpha_3SST_i$$

$$+\alpha_4(SST_{i+1}+SST_i)+\varepsilon \quad (11)$$

式中:  $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4$  为模型中的参数;  $I_R$  为相对强度, 计算公式见公式(12);  $SST$  为海平面温度;  $\varepsilon$  为在  $2.5^\circ \times 2.5^\circ$  分辨率下, 每个网格的平均误差.

$$I_R = (P_a - P_c + E_s) / (P_a - P_{c_{\min}}) \quad (12)$$

$$P_a = 1010 - RH \times E_s \quad (13)$$

$$P_{c_{\min}} = x P_a \quad (14)$$

$$E_s = 6.112 \times e^{\frac{17.67 \times (SST - 273)}{SST - 29.5}} \quad (15)$$

式中:  $P_a$  为外围气压;  $P_c$  为中心气压;  $E_s$  为饱和蒸汽压;  $P_{c_{\min}}$  为中心气压最小表面值;  $RH$  为相对湿度.  $x$  为  $P_a$  和  $P_{c_{\min}}$  之间的系数, 其可以由公式(16)计算得到.

$$\ln(x) = -A \left[ \frac{1}{x} - B \right] \quad (16)$$

具体的推导公式 *Emanuel* 在文献[26]给出.

## 2.4 风场模型

台风风场模型在台风极值风速预测中起着极其重要的作用, 它将直接影响到台风极值风速预测的精确度. Yan Meng<sup>[27]</sup> 台风风场模型有着较高的计算效率和准确性, 因此本文采用 Yan Meng 台风风场模型.

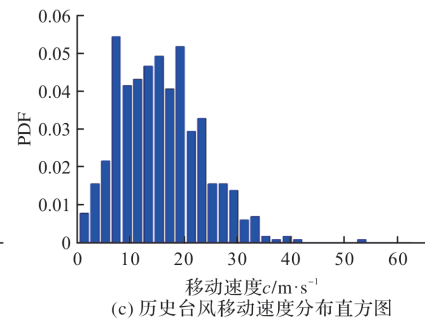
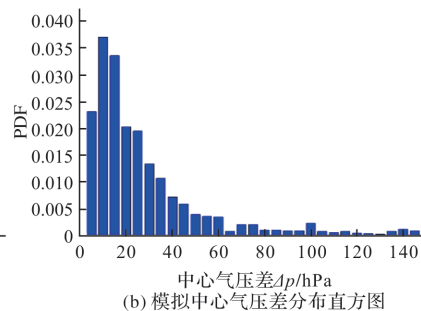
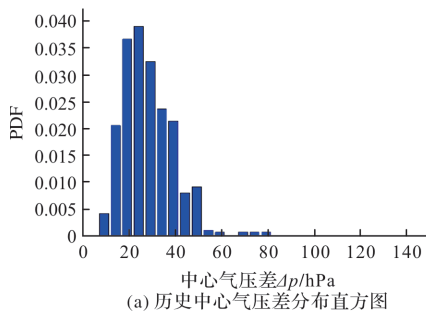
Yan Meng 台风风场模型的模型基本理论形式如下所示.

$$\frac{\partial V}{\partial t} + V \cdot \nabla V = -\frac{1}{\rho} \nabla p - f k \times V + F \quad (17)$$

式中:  $V$  为台风风速,  $V = V_G + V_F$ ,  $V_G$  代表梯度风速, 如公式(18),  $V_F$  代表地表摩擦阻力风速, 如公式(19);  $F$  为科式力系数;  $f$  为代表摩擦阻力;  $\rho$  为空气密度;  $\nabla$  为二维倒数算子符号,  $\nabla = \frac{\partial}{\partial x} i + \frac{\partial}{\partial y} j$ ;  $P$  为 Holland 气压, 如公式(20)表示.

$$\frac{\partial V_G}{\partial t} + V_G \cdot \nabla V_G = -\frac{1}{\rho} \nabla p - f k \times V_G \quad (18)$$

$$\frac{\partial V_F}{\partial t} + V_F \cdot \nabla V_F + V_F \cdot \nabla V_G = -f k \times V_F + F \quad (19)$$



$$p = p_c + \Delta p \cdot \exp \left[ - \left( \frac{r_{\max}}{r} \right)^B \right] \quad (20)$$

式中:  $P_c$  为台风中心气压, hPa;  $\Delta p$  为台风中心气压差, hPa;  $r_{\max}$  为台风最大风速半径, km;  $r$  为到台风中心的距离, km;  $B$  为 Holland 气压参数, 计算公式如下.

$$B = \frac{(v_{\max}^2 + v_{\max} r_{\max} f) \rho e}{\Delta p} \quad (21)$$

$$\rho = (P_c + \frac{\Delta p}{3.7}) / R T_{vs} \quad (22)$$

$$T_{vs} = (T_s + 237.15)(1 + 0.81 q_m) \quad (23)$$

$$T_s = 28 - \frac{3(\text{lat} - 10)}{20} \quad (24)$$

$$q_m = 0.9 \frac{3.080}{p_c + \frac{\Delta p}{3.7}} \exp \left( \frac{17.67 T_s}{243.5 + T_s} \right) \quad (25)$$

式中:  $v_{\max}$  为台风最大风速, m/s;  $e$  为欧拉常数, 通常取 2.718;  $R$  为普适气体常数, 通常取 286.9 J · K · mol;  $T_{vs}$  为虚表面温度, K;  $T_s$  为空气表面温度, K;  $q_m$  为蒸气压(相对湿度 90%);  $\text{lat}$  为纬度.

本文将以香港为研究对象, 利用本文的方法对该地区的大气环境变化下的台风进行模拟, 并对未来不同重现期下的台风极值风速进行计算. 本文将采用的天台风历史观测数据来自于中国台风网, 大气环境数据来自于欧洲中期天气预报中心(ERA-Interim)再分析数据集, 该数据集记录了1979年到2019年的相关大气海洋环境数据.

## 2 台风关键参数计算

为了能够准确地描述出台风的特征等级, 国内外学者一般采用台风关键参数对台风进行描述, 目前常见的台风关键参数有台风中心气压差  $\Delta p$ 、台风移动速度  $c$ 、台风移动方向  $\theta$ 、台风最小距离  $d_{\min}$  以及台风最大风速半径  $r_{\max}$  等. 利用上述台风模型对香港地区的台风关键参数并计算并绘制直方图如下图1所示.

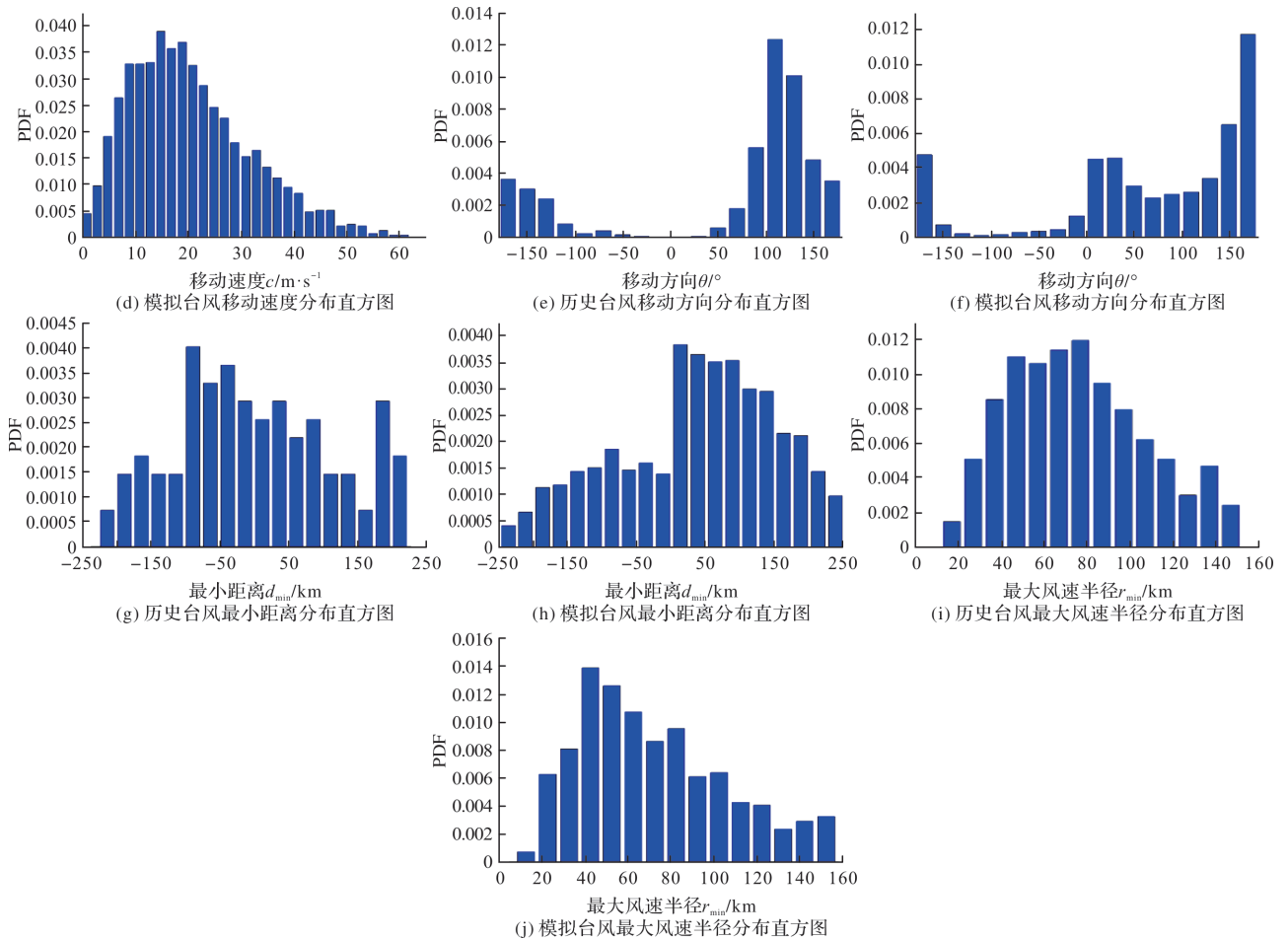


图 1 台风关键参数分布直方图

Fig. 1 Distribution histogram of key typhoon parameters

为了能够更加理性的分析台风各关键参数模拟的可靠性, 本文将会利用  $\chi^2$  检验法和 K-S 检验法对台风关键参数的模拟效果进行检验。

$\chi^2$  检验法:

$$\chi^2(F_1, F_2) = \sum_{i=1}^N \frac{(f_{1i} - f_{2i})^2}{f_{1i} + f_{2i}} \quad (26)$$

K-S 检验法:

$$D_{K-S}(F_1, F_2) = \max |f_{1i} - f_{2i}| - K_N^a \quad (27)$$

上式中,  $F_1$  和  $F_2$  为历史观测数据和模拟结果的直方图;  $N$  为直方图所分的组数,  $K_N^a = 1.36/\sqrt{N}$ ;  $f_{1i}$  和  $f_{2i}$  为历史观测数据和模拟结果的直方图在第  $i$  组的频率;  $\max |f_{1i} - f_{2i}|$  为历史观测与模拟结果差值绝对值的最大值。

当计算得到的  $\chi^2$  越大, 说明历史观测数据和模拟结果的误差较大;  $\chi^2$  越小说明历史观测数据和模拟结果的误差较小; 若  $\chi^2$  等于 0, 这表明历史观测数据和模拟结果完全吻合。  $D_{K-S}(F_1, F_2)$  为历史观测与模拟结果差值绝对值的最大值与  $K_N^a$  的差值, 若  $D_{K-S}(F_1, F_2)$  大于零, 则历史观测与模拟结果的误差较大;  $D_{K-S}(F_1, F_2)$  小于零, 则

历史观测与模拟结果的误差较小, 检验结果如下表所示。

表 1  $\chi^2$  检验法和 K-S 检验法检验数值

Tab. 1 Chi-square test and K-S test for testing values

检验方法	台风关键参数				
	$\Delta p$	$c$	$\theta$	$d_{\min}$	$r_{\max}$
$\chi^2$ 检验法	0.05	0.09	0.07	0.01	0.03
K-S 检验法	-0.17	-0.16	-0.18	-0.19	-0.18

通过将香港地区的历史观测数据的台风关键参数与模拟路径的台风关键参数数据进行对比发现, 模拟得到的结果与历史观测数据非常相似, 验证了台风路径模型的可靠性。香港地区台风关键参数经过  $\chi^2$  检验值均不大于 0.09, 可以推断出由模拟路径提取得到的台风关键参数与台风历史路径的台风关键参数有着较小的误差, 模拟效果较好; K-S 检验法得到的香港地区的台风关键词参数检验值均小于 0, 亦可知模拟路径得到台风关键参数与历史路径的台风关键参数的误差较小。

### 3 台风极值风速计算

将获得的台风关键参数结合台风风场模型获得台风在 200 m 高度和梯度风高度的台风风速和风向,从而结合台风年发生率计算得到台风的最大风速序列,并利用极值 I 型(Gumbel)分布公式(28)计算得到台风在不同重现期下的台风极值风速.

$$F_G = \exp \left\{ -\exp \left[ -\frac{(X-\gamma)}{\alpha} \right] \right\} \quad (28)$$

式中:  $\alpha$  尺度参数;  $\beta$  形状参数;  $\gamma$  位置参数.

台风风速的重现期是对台风极值风速预测很重要的数据,它是指每  $T$  年内发生一次台风最大风速  $v$  大于在一定范围内(通常取模拟圆半径 250 km)某一台风路径在特定研究点的最大风速值  $V_T$ ,那么就称时间  $T$  为最大风速值  $V_T$  的重现期.

如果在一个台风行进过程中,台风最大风速  $V$  小于某一特定风速  $v$  的概率记为  $F_v$ ,这在  $n$  个台风行进过程中,每一个台风最大风速  $V$  小于某一特定风速  $v$  的概率可记为

$$p((V < v) | n) = (F_v)^n = F_v^n \quad (29)$$

$\tau$  年内,每一个台风最大风速  $V$  小于某一特定风速  $v$  的概率可记为

$$p(V < v, \tau) = \sum_{n=0}^{\infty} p(V < v | n) p(n, \tau) \quad (30)$$

如果某一台风研究点的年发生率  $\lambda$  满足参数为  $\lambda$  的泊松分布,则将公式(29)和公式(30)相结合即可得到公式为

$$p(V < v, \tau) = \sum_{n=0}^{\infty} F_v^n \frac{(\lambda \tau)^n e^{-\lambda \tau}}{n!} = e^{-\lambda \tau (1 - F_v)} \quad (31)$$

为了得到任意一年内每一个台风最大风速  $V$  小于某一特定风速  $v$  的概率,我们取  $\tau$  为 1,即可得到

$$p(V < v, 1) = e^{-\lambda(1 - F_v)} \quad (32)$$

又因为重现期为  $T$  时,任意一年内每一个台风最大风速  $V$  小于某一特定风速  $v$  的概率为

$$p(V < v, 1) = 1 - \frac{1}{T} \quad (33)$$

将公式(32)和公式(33)相结合即可得到

$$1 - \frac{1}{T} = e^{-\lambda(1 - F_v)} \quad (34)$$

利用模拟获得  $m$  次台风路径,将每次模拟台风过程的最大风速进行由小到大排列,即可得到模拟台风的最大风速序列,记为  $v_1, v_1, \dots, v_i, \dots, v_m$ . 取其中任一风速  $v_i$ ,则在整个台风移动

过程,任意时刻的台风风速  $U$  小于  $v_i$  的概率可记为

$$F_{v_i} = \frac{i}{m+1} \quad (35)$$

将公式(35)代入公式(34)即可得:

$$1 + \frac{1}{T} = e^{-\lambda \left(1 - \frac{1}{m+1}\right)} \quad (36)$$

将公式(36)等号两边同时取对数并变形可得重新期  $T$  为

$$T = \frac{1}{1 - \exp \left[ -\lambda \left(1 - \frac{1}{m+1}\right) \right]} \quad (37)$$

则重现期  $T$  下的台风最大风速为

$$V_i \left\{ i = (m+1) \left[ 1 + \frac{\ln(1 - 1/T)}{\lambda} \right] \right\} \quad (38)$$

将公式(36)和公式(38)与台风极值风速概率分布结合,可得到重现期  $T$  下的台风最大分速  $V_i$  为

$$V_i = \gamma - \frac{1}{\alpha} \ln \left\{ -\ln \left[ 1 + \frac{\ln(1 - 1/T)}{\lambda} \right] \right\} \quad (39)$$

利用上述方法即可计算得到香港地区在 20 a、50 a、100 a 以及 200 a 重现期下的台风极值风速,并将历史数据计算结果与模拟计算结果进行对比,对比结果如图 2 和表 2.

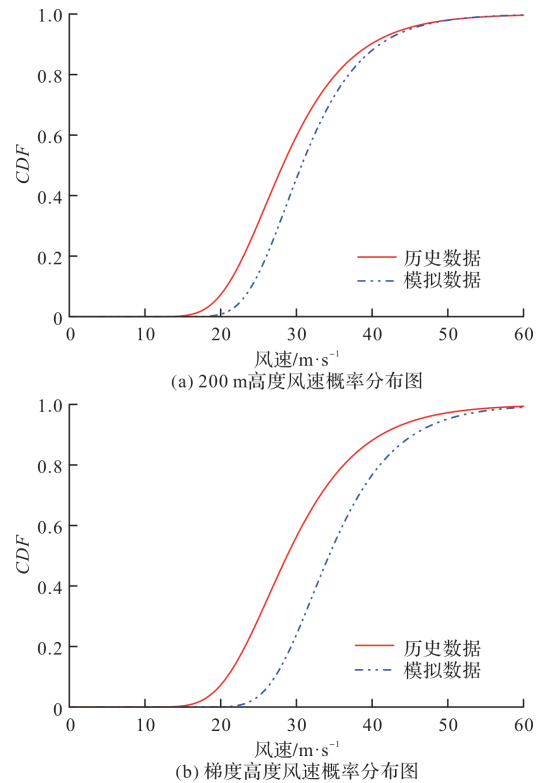


图2 台风风速概率分布对比图

Fig. 2 Comparison chart of typhoon wind speed probability distribution



表2 台风不同重现期极值风速(m/s)  
Tab. 2 Extreme wind speed in different return periods  
of typhoon (m/s)

路径 类型	高度分类	重现期/a			
		20	50	100	200
历史	200 m	44.26	50.00	54.31	58.60
路径	梯度高度	45.95	52.10	56.71	61.303
模拟	200 m	45.65	50.91	54.85	58.78
路径	梯度高度	49.76	55.29	59.44	63.57

从图2看出,历史路径和模拟路径的台风风速概率分布较为一致;从表2可以看出,利用模拟路径得到的香港地区的台风在不同重现期下的极值风速要大于历史路径模拟得到的台风极值风速,在200 m高度和梯度高度下,差值最大分别可达1.389 8 m/s和3.807 8 m/s,由于本文的台风模型是利用海洋大气环境因素所构成的,因此随着全球的气候变暖,不仅超强台风的发生率会有一定的提升,而且每次台风的强度也会有着不同程度的增强,主要体现在台风极值风速的提高;相反利用历史路径对台风极值风速进行模拟则是对以往的台风极值风速的模拟,无法对台风未来的发生率以及台风极值风速做出准确的预测,也无法更好的考虑到大气环境变化对台风的影响,而且利用历史路径对台风极值风速的模拟结果与模拟路径的模拟结果的差值会随着重现期的不断增大而不断地增大。

## 4 结论

主要对中国香港地区的台风极值风速进行计算。利用考虑大气环境的台风模型,其中包括起点模型、路径模型以及强度模型,模拟得到若干个台风路径,从而得到各个台风路径的台风关键参数;然后将台风关键参数带入台风模型并结合台风年发生率和极值I型(Gumbel)分布计算得到台风在不同重现期下的台风极值风速。将本研究的计算结果与历史数据进行对比,得到以下结论:

(1)考虑大气环境的台风模型对台风关键参数的模拟结果与历史数据结果有着较高的相似度,表明了考虑大气环境的台风模型的可靠性;

(2)模拟得到的台风风速概率分布与历史观测结果相似度较高;模拟路径不同重现期下的极值风速要大于历史路径台风极值风速,在200 m高度和梯度高度下,差值最大分别可达1.39 m/s和3.81 m/s。由于台风模型是利用海洋大气环境因素所构成的,因此随着全球的气候变暖,不仅超强台风

的发生率会有一定的提升,而且每次台风的强度也会有着不同程度的增强,主要体现在台风极值风速的提高。

## 参考文献 References

- [1] 谢汝强. 基于CE风场和Yan Meng风场的台风数值模拟与危险性分析[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2008.  
XIE Ruqiang. Typhoon numerical simulation and risk analysis based on CE wind field and Yan Meng wind field[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2008.
- [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. Typhoon extreme wind speed prediction using empirical model of typhoon wind field[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2016, 48(2):142-146.
- [3] 郭云霞, 侯一筠, 齐鹏. Monte-Carlo模拟与经验路径模型预测台风极值风速的对比[J]. 海洋学报, 2020, 42(7):64-77.  
GUO Yunxia, HOU Yijun, QI Peng. Comparison of Monte-Carlo simulation and empirical path model for predicting extreme wind speed of typhoon[J]. Oceanographic Journal, 2020, 42(7):4-77.
- [4] VICKERY P J, SKERLJ P F, TWISDALE L A. Simulation of Hurricane risk in the U. S. using empirical track model[J]. Journal of Structural Engineering, 2000, 126(10):1222-1237.
- [5] 欧进萍, 段忠东, 常亮. 中国东南沿海重点城市台风危险性分析[J]. 自然灾害学报, 2002, 11(4):9-17.  
OU Jinping, DUAN Zhongdong, CHANG Liang. Analysis of typhoon risk in key cities along the southeast coast of China[J]. Journal of Natural Disasters, 2002, 11(4):9-17.
- [6] 赵林, 葛耀君, 项海帆. 台风随机模拟与极值风速预测应用[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2005, 33(7):885-889.  
ZHAO Lin, GE Yaojun, XIANG Haifan. The application of typhoon stochastic simulation and extreme wind speed prediction[J]. Journal of Tongji University (Natural Science Edition), 2005, 33(7):885-889.
- [7] LI S H, HONG H P. Observations on a Hurricane wind Hazard model used to map extreme Hurricane wind speed[J]. Journal of Structural Engineering, 2014(10):04014238.1-04014238.2.
- [8] 刘大伟. 基于全路径模型的台风极值风速预测[D].

- 合肥:肥工业大学, 2019.
- LIU Dawei. Prediction of typhoon extreme wind speed based on full track model[D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2019.
- [9] 肖玉凤. 基于数值模拟的东南沿海台风危险性分析及轻钢结构风灾易损性研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学, 2011.
- XIAO Yufeng. The typhoon risk analysis of the south-east coast and the vulnerability of light steel structures based on numerical simulation[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2011.
- [10] 姚博, 全涌, 顾明, 等. 混合气候地区极值风速分析方法研究[J]. 工程力学, 2018, 35(5): 86-92.
- YAO Bo, QUAN Yong, GU Ming, et al. Research on analysis method of extreme wind speed in mixed climate region[J]. Engineering Mechanics, 2018, 35(5): 86-92.
- [11] 王宁娟. 基于CE风场数值模拟的台风危险性分析方法研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学, 2013.
- WANG Ningjuan. Research on typhoon risk analysis method based on CE wind field numerical simulation [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2013.
- [12] 吴甜甜. 基于统计动力学—全路径合成的台风危险性分析方法的优化与验证[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学, 2020.
- WU Tiantian. Optimization and verification of typhoon risk analysis method based on statistical dynamics-full path synthesis[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2020.
- [13] 杨柳, 齐静妍, 霍旭杰, 等. 气候变化对室外设计条件和冷负荷峰值的影响[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版), 2021, 53(4): 463-471.
- YANG Liu, QI Jingyan, HUO Xujie, et al. The impact of climate change on outdoor design conditions and peak cooling load[J]. J. of Xi'an Univ. of Arch. & Tech. (Natural Science Edition), 2021, 53(4): 463-471.
- [14] GRAY W M. Hurricanes: their formation, structure and likely role in the tropical circulation; Meteorology over the tropical oceans[J]. Roy. Meteor. Soc, 1979; 155-218.
- [15] EMANUEL K, NOLAN D S. Tropical cyclone activity and global climate[J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 2004(5): 85-86.
- [16] TIPPETT M K, CAMARGO S J, SOBEL A H. A poisson regression index for tropical cyclone genesis and the role of large-scale vorticity in genesis [J]. Journal of Climate, 2011, 24(9): 2335-2357.
- [17] 赵军平, 吴立广, 赵海坤. 西北太平洋热带气旋潜在生成指数的改进 [J]. 气象科学, 2012, 32 (6): 591-599.
- ZHAO Junping, WU Liguang, ZHAO Haikun. Improvement of the potential generation index of tropical cyclones in the Northwest Pacific[J]. Meteorological Science, 2012, 32(6): 591-599.
- [18] KNUTSON T R, SIRUTIS J J, VECCHI G A, et al. Dynamical downscaling projections of twenty-first-century atlantic hurricane activity: CMIP3 and CMIP5 model-based scenarios[J]. Journal of Climate, 2013, 26(17): 6591-6617.
- [19] MURAKAMI H, WANG B, KITO H A. Future change of western north pacific typhoons: Projections by a 20-km-Mesh global atmospheric model[J]. Journal of Climate, 2011, 24(4): 1154-1169.
- [20] SHAN-PN W M. Intensification of landfalling typhoons over the northwest Pacific since the late 1970s [J]. Nature Geoscience, 2016: 753-757.
- [21] 钟维军, 徐海巍, 郭高鹏, 等. 考虑气候变化影响的台风设计风速研究[J]. 建筑结构, 2020, 50(14): 68-72.
- ZHONG Weijun, XU Haiwei, GUO Gaopeng, et al. Research on typhoon design wind speed considering the impact of climate change [J]. Building Structure, 2020, 50(14): 68-72.
- [22] 陈煜. 基于统计动力学—全路径合成的台风危险性分析方法研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学, 2020.
- CHEN Yu. Research on typhoon risk analysis method based on statistical dynamics-full path synthesis [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology.
- [23] MARKS D G. The Beta and advection model for hurricane track forecasting [M]. Washington: NOAA Tech. Memo, 1992.
- [24] LI X, WANG B. Barotropic dynamics of the beta gyres and beta drift[J]. Journal of the Atmospheric Sciences, 1994, 51(5): 746-756.
- [25] LEE C Y, TIPPETT M K, SOBEL A H, et al. An Environmentally forced tropical cyclone hazard model [J]. Journal of Advances in Modeling Earth Systems, 2018, 10(1): 223-241.
- [26] EMANUEL K A. The maximum intensity of hurricanes[J]. J. Atmos, 1988, 45(7): 1143-1155.
- [27] YAN Meng, MATSUI M, HIBI A. An analytical model for simulation of the wind field in a typhoon boundary layer[J]. Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics, 1995, 56(2-3): 291-310.