

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.20230914001

基于 Vickery 模型的气候变暖台风路径模拟*

陈清河¹, 袁赛杰², 李瑞华², 罗海生², 陈旭骏², 谭俊峰^{3,4}

(1. 广东省公路建设有限公司, 广东 广州 510623; 2. 上海振华重工(集团)股份有限公司, 上海 200125;
3. 同济大学土木工程防灾减灾全国重点实验室, 上海 200092; 4. 重庆交通大学土木工程学院, 重庆 400074)

摘要: 为探讨不同气候变暖模式下对未来台风路径的潜在影响, 基于 CCCma 提供的在三种气候变暖假设下未来百年间海平面温度的预测值, 完成了西北太平洋的全路径台风模拟。每年台风发生的次数按照历史观测值的 PDF (时不变的负二项分布) 随机模拟。台风模拟的路径、强度模型沿用 Vickery 模型, 对于台风梯度风场的模型, 在 Georgious 梯度风场模型的基础上进行改进, 基于神经网络模型(ANN)重新拟合了最大风速半径的关系式, 模型输入有台风中心压差、纬度和海平面温度, 可以将气候变化的影响也纳入到时变台风年极值风速 PDF 中。揭示了气候变化导致的海平面温度升高对台风登陆频率、台风移动速度、台风移动方向和台风中心压差的可能影响。结果表明, 气候变暖对年极值风速 PDF 的影响具有地域性, 大部分地区年极值风速 PDF 均值会变大, 离散性也会更大, 少数地区的长期趋势未受气候变暖影响。采用 Gumbel 分布对年极值风速 PDF 进行拟合, Gumbel 分布的位置参数和形状参数具有时变特性并通过正态分布量化线性拟合的误差, 并称之为估计不确定性。

关键词: 台风危害; 气候变化; 路径模拟; 海平面温度; 负二项分布

中图分类号: P429 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2025)02-0365-10

Typhoon Track Simulation under Global Warming Scenarios Based on Vickery Model

CHEN Qinghe¹, YUAN Saijie², LI Ruihua², LUO Haisheng², CHEN Xujun², TAN Junfeng^{3,4}

(1. Guangdong Provincial Highway Construction Co., Ltd., Guangzhou 510623, China;

2. Shanghai Zhenhua Heavy Industries Co., Ltd., Shanghai 200125, China;

3. State Key Lab of Disaster Reduction in Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China;

4. School of Civil Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China)

Abstract: To investigate the potential effect of different global warming scenarios on future typhoon track, this study utilized the predicted values of sea surface temperature (SST) over the next century under three global warming scenarios provided by CCCma to conduct full-track typhoon simulations in the Northwest Pacific. The annual frequency of typhoons was randomly simulated according to the probability density function (PDF) of historical observations, which followed a time-invariant negative binomial distribution. Typhoon tracks and intensities were simulated using the Vickery model. For the gradient wind field model of typhoons, improvements were made based on the Georgious gradient wind field model. An artificial neural network (ANN) was used to refit the relation for the radius of

* 收稿日期: 2023-09-14; 修回日期: 2024-01-03

基金项目: 国家重点研发计划(2022YFC3004105)、国家自然科学基金项目(52078383, 52008314)资助

作者简介: 陈清河(1987—), 男, 工程师。主要从事桥梁工程研究。E-mail: 158297598@qq.com

通信作者: 谭俊峰(1998—), 男, 硕士研究生。主要从事桥梁工程研究。E-mail: tanjunfeng@mails.cqjtu.edu.cn

maximum wind speed, with typhoon central pressure deficit, latitude, and SST as inputs. This enabled the integration of climate change effects into the time-varying PDF of annual extreme wind speeds. It revealed the potential effects of SST increases caused by climate change on the frequency of typhoon landfalls, typhoon movement speed, typhoon movement direction, and typhoon central pressure deficit. The results showed that the effect of global warming on annual extreme wind speed PDF exhibited regional variability. In most regions, the mean and dispersion of the annual extreme wind speed PDF tend to increase, while in a few regions, the long-term trend remained unaffected by global warming. The Gumbel distribution was employed to fit the annual extreme wind speed PDF. Both the location and shape parameters of the Gumbel distribution exhibited time-varying characteristics. The errors in linear fitting were quantified using a normal distribution and were referred to as estimation uncertainty.

Keywords: typhoon hazard; climate change; track simulation; sea surface temperature; negative binomial distribution

0 引言

风致灾害是目前自然界对人类设施危害最大、发生最频繁的灾害之一。对于海岸线绵长的国家,台风(西北太平洋地区名为台风,大西洋地区名为飓风,又名热带气旋)等强风过程会给沿海地区基础设施带来不可估量的损失,造成交通不便,影响民众的正常生活。灾害流行性研究中心(Centre for Research on the Epidemiology of Disasters)统计了全球范围内历史上各类风灾导致的经济损失比例^[1],台风造成的经济损失始终位居各类风灾榜首,因此有大量科研人员聚焦于台风风灾量化方面的研究。

气候变化是目前地球遇到的严峻挑战之一^[2],而对于结构工程师来说,全球气候变暖更值得关注,因为它会改变台风活动的频率和强度,进而对局部地区的风环境产生影响^[3]。近几年,随着我国桥梁建造技术的不断进步,大量的大跨度桥梁沿海而建,它们大多都会受到台风过境的挑战^[4]。对于重要的基础设施,通过概率方法可以利用当地的风速记录来估计极值风速^[5],或者也可以利用随机模拟来估计极值风速^[6-7]。利用风速记录估计的一个重要方法就是母样风速分布法,它是利用从历史数据库中每一小时的风速来估计的(选取基础设施邻近的气象站数据)。随机模拟的一个重要方法就是随机生成虽偶发但强烈的热带气旋(Tropical Cyclones, TC)/台风/飓风过程。P. J. Vickery等^[8-9]首先提出了基于历史TC路径和强度观测值的全路径TC模拟方法。受到Vickery的启发,许多学者进一步发展了全路径TC模拟方法。G. Fang等^[10]将地

势的影响考虑到TC模拟中,从方向粗糙度长度和地形加速因子两方面引入了下垫面地形对TC风速的影响。G. Fang等^[11]建立了基于地理加权回归的TC前向轨迹模型,综合考虑了空间异质性对TC路径和强度的影响。F. Wu等^[12]采用一种增强的圆形分区域方法进行TC模拟,引入Nataf变换考虑台风关键参数之间的相关性。J. Li等^[13]采用广义密度演化方程来计算台风年极值风速的PDF,其中台风路径由beta-advection模型模拟,台风风速通过一个三维非线性边界层风场模型计算。Z. Shen等^[14]引入了海洋反馈对TC强度的影响,从而提高了TC模拟的精度。还有一些学者将气候变化的影响纳入风灾评估中^[15-17],其中海平面温度(Sea Surface Temperature, SST)作为代表因素来反馈气候变化的影响。例如,J. Y. Lee等^[16]基于Vickery的模型,将各种气候变暖模式考虑其中,推断出了飓风强度和发生频率的非平稳特性。Y. Chen等^[18]的研究结果表明,气候变暖将改变TC路径,增加超强台风的发生比例,从而增强东亚大部分沿海地区的极值风速。

未来气候变暖已经成为不可避免的事实,因此对于大跨度桥梁来说研究不同气候条件下风荷载的变化,并对其量化就显得极为重要。本文为探讨不同气候变暖假设对台风路径的影响,选取海平面温度作为气候变暖的代表性因素纳入台风模拟中。基于Vickery全路径台风模拟模型考虑不同气候变暖模式对未来台风路径的潜在影响;并基于海平面温度对台风梯度风场的影响,采用Gumbel台风年极值风速分布模型,分析Gumbel分布参数的变化规律。

1 气候变暖及其影响

1.1 气候变暖特征

政府间气候变化专门委员会(International Panel on Climate Change, IPCC)是联合国的政府间合作组织,负责提供有关人为气候变化的客观和全面的科学信息,包括自然、政治、经济影响和风险,以及可能的应对方案。代表性浓度路径(Representative Concentration Pathway, RCP)是IPCC采用的温室气体浓度(而非排放)轨迹^[19]。2014年IPCC第五次报告(AR5)使用了四种路径进行气候建模和研究,如图1所示。这些路径描述了不同的气候未来,所有这些都认为是可能的,具体取决于未来几年排放的温室气体的数量^[2]。RCP最初分为RCP2.6, RCP4.5, RCP6.0和RCP8.5四种,代表2100年可能的辐射强迫值范围分别为2.6, 4.5, 6.0和8.5。目前可以找到的公开数据库^[20],基本只包含RCP2.6, RCP4.5和RCP8.5三种,因此本文采用的气候变暖假设只取这三种,它们跨越的辐射强迫值较为广泛,可以充分说明问题。

目前全世界的政府组织达成的共识是气候变暖已经来临,更温暖的气候对全球范围内各大洋海水的温度有着较大的影响。在RCP8.5气候变暖假

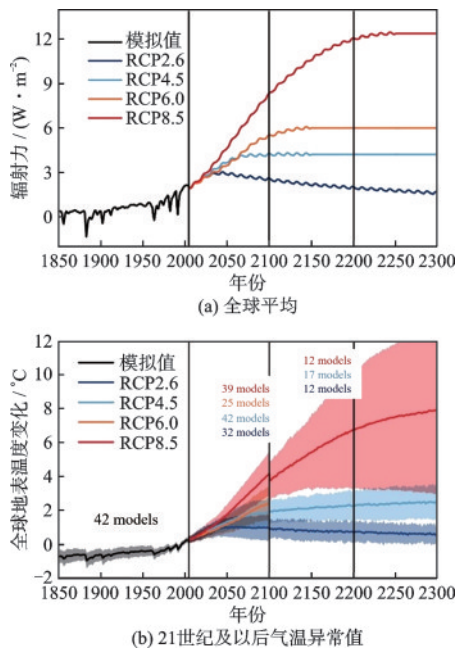


图1 全球年平均表面的预测,参考平均值1986~2005年期间的温度

Fig.1 Predictions of global mean surface temperatures relative to 1986~2005 reference period

设下,大西洋海平面温度(SST, Sea Surface Temperature)的增量会达到 $4^{\circ}C$,并且只出现在局部地区^[15]。然而,同样是RCP8.5假设,在太平洋海平面温度的增量会达到 $7^{\circ}C$,这将对北大西洋的飓风活动/西北太平洋的台风活动产生巨大的影响。

1.2 台风频度和强度

海平面温度是热带气旋的能量源。已经有学者做过相关研究证实,海平面温度的改变会对台风生成频率和强度有重大影响^[21]。对于强度来说,L. Mudd等^[22-23]已经总结过在未来更温暖的气候下,会有更剧烈的热带气旋生成。另一方面,升高的海平面温度似乎会加剧热带气旋的生成频率。通过检验历史飓风数据库,W. Cui等^[15]发现,最近几年北大西洋飓风发生的频率一直在增加。然而,P. J. Webster等^[24]却认为,气候变暖对全球范围内的热带气旋活动发生的频率并没有明显影响。许多学者研究了过去几十年西北太平洋区域台风发生频率的变化^[18, 25-26]。T. C. Lee等^[25-26]的研究表明,在1945年~2007年间,台风发生频率增加了,但并没有分析统计特性的规律。而Y. Chen等^[18]的研究却表明台风发生频率有减小趋势。如图2所示,根据IBTrACS台风路径数据库^[27],我们可以发现在1884~1970年间西北太平洋台风发生频次总体上是逐渐增加的,在1970年之后又逐渐减小。增加的可能原因有很多,比如由于气候变暖导致海平面温度增高,也可能是更多更先进的观测设备(例如卫星等)。然而1970年之后减少的原因还尚未可知,这与北大西洋的规律恰恰相反^[15]。W. Cui等^[15]还指出,北大西洋的飓风发生频次有总体上升趋势,但是北美东海岸局部地区仍有下降的趋势。所以,总的来说,热带气旋随着时间的增长到底是增长还是减小目前还未可知。

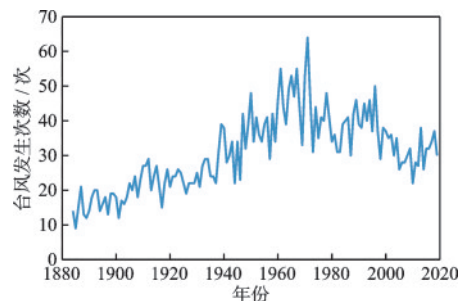


图2 西北太平洋台风发生频次历史观测值

Fig.2 Historical observed frequency of typhoons in North-western Pacific

基于上述原因,在本次研究中,每年台风发生频率的PDF暂且认为服从时不变的分布,待有更精确的台风频次估计模型的时候这个问题再重新讨论。通常来说,自然灾害的发生频次都用Poisson过程模拟^[28]。然而,P. J. Vickery等^[8-9]采用了负二项分布来拟合发生频次的PDF。在本文中,如图3所示,Poisson分布和负二项分布都被用来拟合历史台风年发生频次,图中历史台风年发生频次统计的时间年跨度为1884~2019。本文采用Kolmogorov-Smirnov检验(ks-test)^[29]来验证拟合分布的选择是否合理。在0.05的置信区间上,对于负二项分布和Poisson分布来说, p 值分别是0.672 2和 5.76×10^{-7} 。因此,在本文中,负二项分布是更合适的。

关于台风的生成模型,台风的“生成地”采用IBTrACS数据库^[27]中的历史值,随机选择生成^[15]。

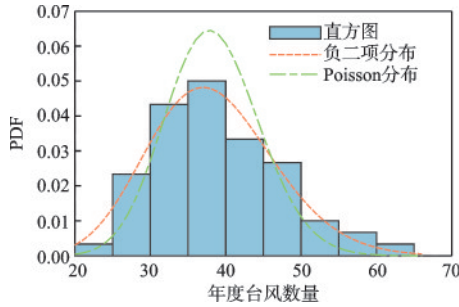


图3 台风年发生频次PDF

Fig.3 PDF of annual typhoon frequency

2 台风全路径模拟模型

通过台风模拟,可以获得西北太平洋台风的全路径结果,进一步用于估计台风年极值风速。

2.1 Vickery台风路径模型

台风模拟是获得特定位置的设计风速的一个很好的方法^[8-9]。Vickery经验路径模型^[8]是广泛采用的一个热带气旋全路径模拟模型,通过采用台风过程历史观测值的统计特性来重现台风路径,并获

$$V_g = \frac{1}{2} (c \sin \alpha - fr) + \sqrt{\frac{1}{4} (c \sin \alpha - fr)^2 + \frac{100B\Delta p}{\rho} \left(\frac{R_{\max}}{r}\right)^B \exp\left[-\left(\frac{R_{\max}}{r}\right)^B\right]} \quad (6)$$

式中, c 是平移速度; α 是台风平移风向和径向位置的相对夹角; R_{\max} 是最大风速半径; B 是Holland系数^[33]。

观察公式(6),可以发现 R_{\max} 和 B 是Vickery台风模拟无法获得的, R_{\max} 获取通常是通过IBTrACS

得相应的台风统计特性。

Vickery的路径模型模拟了台风平移速度,台风风眼平移方向,以及相对强度,方程如下:

$$\Delta \ln c = a_1 + a_2 \psi + a_3 \lambda + a_4 \ln c_i + a_5 \theta_i + \epsilon_c \quad (1)$$

$$\Delta \theta = b_1 + b_2 \psi + b_3 \lambda + b_4 \ln b_i + b_5 \theta_i + b_6 \theta_{i-1} + \epsilon_\theta \quad (2)$$

$$\ln(I_i + 1) = c_0 + c_1 \ln(I_i) + c_2 \ln(I_i - 1) + c_3 \ln(I_i - 2) + c_4 T_s + c_5 (\Delta T_s) + \epsilon_I \quad (3)$$

式中, $a_i (i=1, 2, \dots, 5)$ 和 $b_i (i=1, 2, \dots, 6)$ 分别是通过历史数据回归分析得到的参数; ψ 和 λ 分别是台风风眼处的纬度和经度; c_i 是时间步 i 处的台风平移速度; θ_i 是时间步 i 处的台风风眼平移风向,范围为 $-180^\circ \sim 180^\circ$, $\theta=0$ 时代表台风向北移动;台风相对强度 I 是一个无量纲量,用来联系实际的台风压差 Δp 和最大的可能中心压差^[30]; T_s 是在时间步 $i+1$ 时海平面温度; $\Delta T_s = T_{s,i+1} - T_s$; $\epsilon_c, \epsilon_\theta$,和 ϵ_I 是线性回归的残差,服从特定的概率分布。

2.2 台风强度衰减模型

一旦台风登陆,就无法再从海平面得到能量输入,台风就会因此衰减。强度衰减模型^[8]如下:

$$\Delta p(t) = \Delta p_0 \cdot \exp(-at_h) \quad (4)$$

$$a = a_0 + a_1 \Delta p + \epsilon_a \quad (5)$$

式中, $\Delta p(t)$ 是中心压差; Δp_0 是台风登陆时的压差; a 是随着时间 t_h (单位是小时)的指数衰减率; a_0 和 a_1 是和地点相关的参数; ϵ_a 是线性回归的残差,服从特定的概率分布。

需要说明的是,由于Coriolis力的影响,向东前进的台风和向西前进的台风的统计特性需要分开分析^[14-15]。公式(1)~(5)中的回归参数通过四分树分解算法^[31]获得。

2.3 台风梯度风场模型

梯度风场模型通常将台风的涡旋简化为风眼平移的速度 V_T 和漩涡旋转速度 V_R 的叠加,如图4所示为Georgious梯度风场模型^[32]。 V_R 的大小取决于离风眼的距离 r ,总风速 V_g 的大小如公式(6)所示:

数据库^[27]的实测数据拟合得到,而该数据库并未提供 B 的相关参数。因此本文利用人工神经网络(ANN, Artificial Neural Network)来拟合 R_{\max} 的关系式,而 B 仍然采用P. J. Vickery等^[8-9]提出的模型:

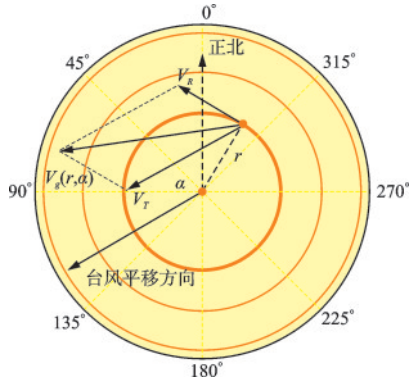


图4 Georigious梯度风场模型

Fig.4 Georigious gradient wind field model

$$B = 1.38 + 0.00184\Delta p - 0.00309R_{\max}, \quad r^2 = 0.026 \quad (7)$$

式中, Δp 为台风中心压差。

以往的研究^[15]通常采用 P. J. Vickery 等^[8-9]提出的 R_{\max} 模型, 是 Δp 和 ψ 的函数, 有着比较弱的非线性:

$$\ln R_{\max} = 2.636 - 0.00005086(\Delta p)^2 + 0.0394899\psi, \quad r^2 = 0.2765 \quad (8)$$

原有的 R_{\max} 模型有缺陷, 拟合优度只有 $r^2 = 0.2765$ 。为了提高拟合优度, 并引进更多的非线性, 如图5所示, 本文提出了 ANN 模型, 采用 sigmoid 激活函数, 采用线性输出层, 数据集采用图2统计的 IBTrACS 数据库中统计的台风数据。模型输入除了有以往的 Δp 和 ψ , 本文还将海平面温度 SST 作为输入纳入考虑。进而, 由于气候变暖引起的 SST 变化也可以考虑到风场模型中。

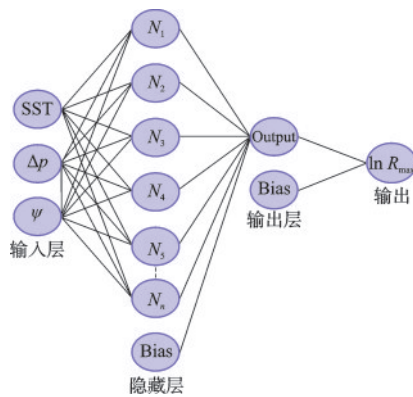


图5 两层正向传播神经网络

Fig.5 Two-layer feedforward neural network

通过超参数调优, 可以发现6个隐藏神经元对本次算例有着较好的拟合优度。图6展示了三个输入层的 ANN 模型对应的性能(拟合优度 $r^2 = 0.4341$): 70% 的数据用于训练, 15% 的数据用于验

证, 15% 的数据用于测试。可以发现拟合优度要好于传统模型, 并且将 SST 纳入考虑当中。图6中, Target Value 代表了从历史数据库^[27]中得到的真实 R_{\max} 值, Output Value 代表了本模型预测得到的值。如果预测完全正确, 那么紫色的点应该完全落在对角线上(此时 $r^2 = 1$)。

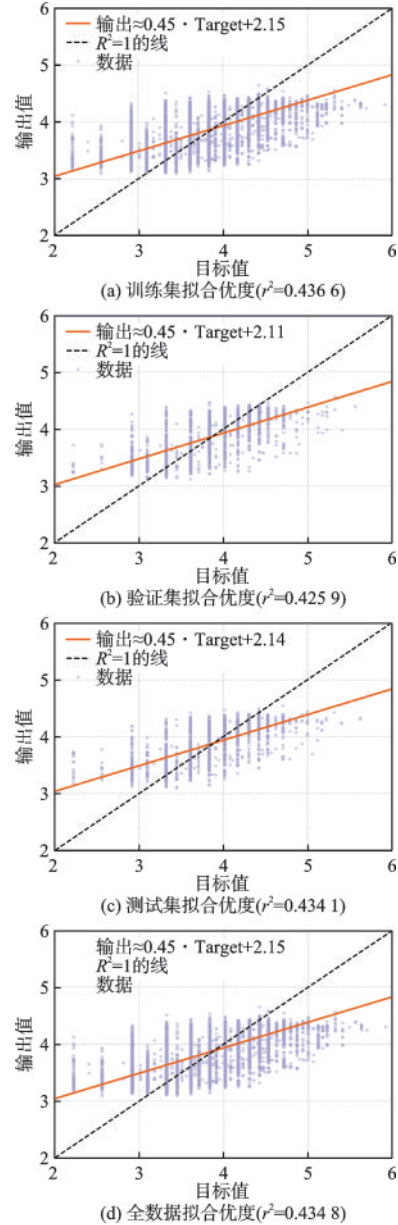


图6 两层正向传递神经网络的性能

Fig.6 Performance of two-layer feedforward neural network

3 台风全路径模拟验证

通过台风模拟, 可以获得西北太平洋台风的全路径结果, 进一步用于估计台风年极值风速。

3.1 台风路径控制点

通常,每年的台风登陆频率,移动速度,移动方向,和压差是台风模拟重要的统计特性。通常定义一系列台风路径控制点(Kilometer-Posts, KPs),观察KPs位置处台风统计特性的模拟值与历史观测值,来判断台风模拟的准确性。在本文中,沿中国东南沿海海岸线的KPs北从中国-朝鲜边界开始,南至中国-越南边界。每两个KPs之间的距离是500 km。

3.2 气候变暖对台风特性影响

为了更好地体现本研究的模拟结果,图7展示的是IBTrACS数据库统计的太平洋中国沿岸的台风登陆频率的平均值^[34],图8比较了没有气候变化和有气候变化假设时台风登陆频率、台风移动速度、台风移动方向、气压差四个关键参数,以2010年的台风统计特性作为无气候变化的基准进行比较。模拟时,气候变暖假设下每一年的SST条件,通过采样100年而不是1年进行台风模拟,来获得稳定的台风统计特性^[8]。对于每一种气候变暖假设,从2010年到2100年(共90年),共采样 $90 \times 100 = 9\,000$ 年。

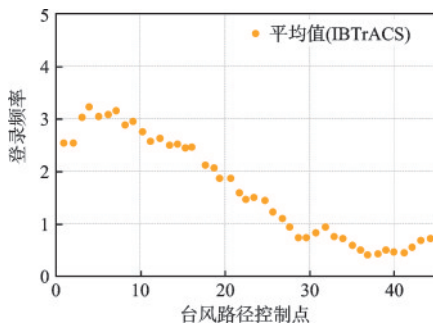


图7 太平洋沿岸台风登陆频率(IBTrACS数据库)

Fig.7 Frequency of typhoon landfalls along Pacific coast of China (IBTrACS dataset)

如图8(a)所示,台风年登陆频率在不同气候变暖假设下总体上看是不变的。这是因为本文中的假设,即台风年发生频率(图4)采用时不变的PDF。然而,KP1~KP20的台风年登陆频率在气候变暖假设下会比无气候变暖时略高,这是因为即使台风年发生频率采用了时不变PDF,增加的海平面温度会延长每次台风的路径(导致本应该在海洋上衰减消失的台风却在陆地上登陆)。所以,KP1~KP20区域的台风登陆频率在气候变暖假设下会变大。并且根据公式(3),由于气候变暖下,海平面温度变大并且增加量分布更加不均匀,这将导致更大且变化

更缓慢的台风强度。

如图8(b)和图8(c)所示,对于台风移动速度和台风移动方向来说,气候变暖对它们的影响并不明显,这是因为在公式(1)和公式(2)中,并不包含海平面温度项,因此海平面温度升高对它们也并不会有影响,这也是Vickery全路径台风模拟模型的弊端^[8]。

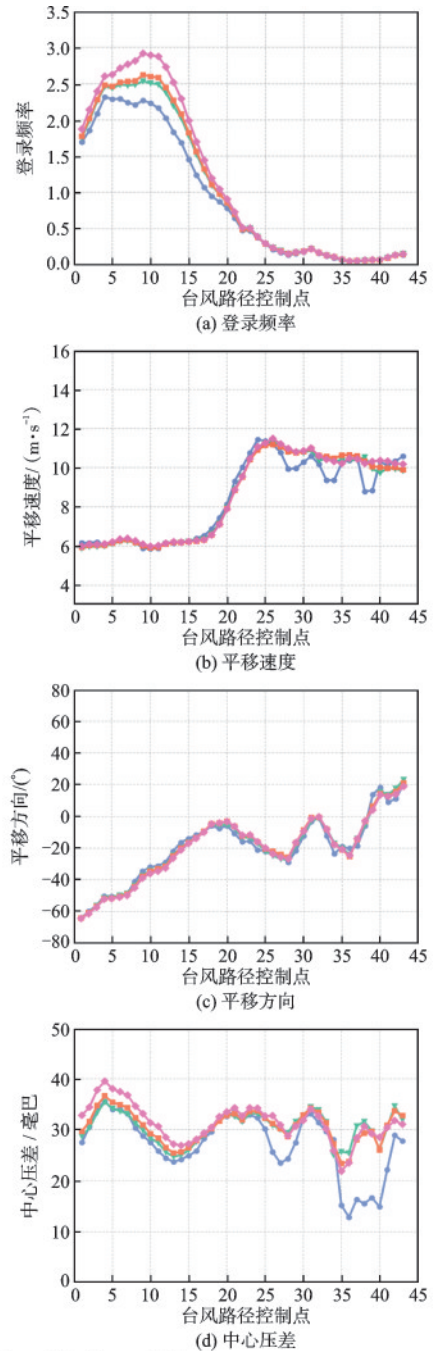


图8 无气候变暖假设(2010年气候条件),RCP2.6,RCP4.5,RCP8.5气候变暖假设下台风模拟结果对比
Fig.8 Comparison of typhoon simulation results under no global warming scenario (climate condition in 2010), RCP2.6, RCP4.5, and RCP8.5 scenarios

如图8(d)所示,气候变暖对台风中心压差(也就是台风相对强度)有着很明显的影 响,这就意味着海平面温度升高会加剧台风强度(与以往研究结果相吻合^[20])。台风中心压差的增量在KP35~KP43更明显,这是因为海平面温度在这些位置附近升高量更大。由于西北太平洋海平面温度在气候变暖下的升高量并不是均匀分布的,这就导致了台风中心压差(即台风相对强度)在整个KPs上增量不是均匀的。并且气候变暖对于台风中心压差的影响也是局部的,比如KP33这个点,气候变暖的影响就不明显。

3.3 台风年极值风速时变特性

通过公式(6)和2.3节中提出的基于ANN的隐式 R_{\max} 模型,结合台风全路径模拟的结果,我们就可以得到某个特定位置处台风风速风向联合PDF,如图9所示。以舟山市为例,图10展示了无气候变暖假设下梯度风高度处台风年极值风速PDF(偏保守地,每年的台风最大风速选取各个方向上台风风速的最大值),采用 Gumbel 分布对其拟合(通过 ks-test),如公式(9)所示:

$$f(v|\mu(t),\sigma(t)) = \left(\frac{1}{\sigma(t)}\right) \exp\left(-\exp\left(-\frac{v-\mu(t)}{\sigma(t)}\right) - \frac{v-\mu(t)}{\sigma(t)}\right) \quad (9)$$

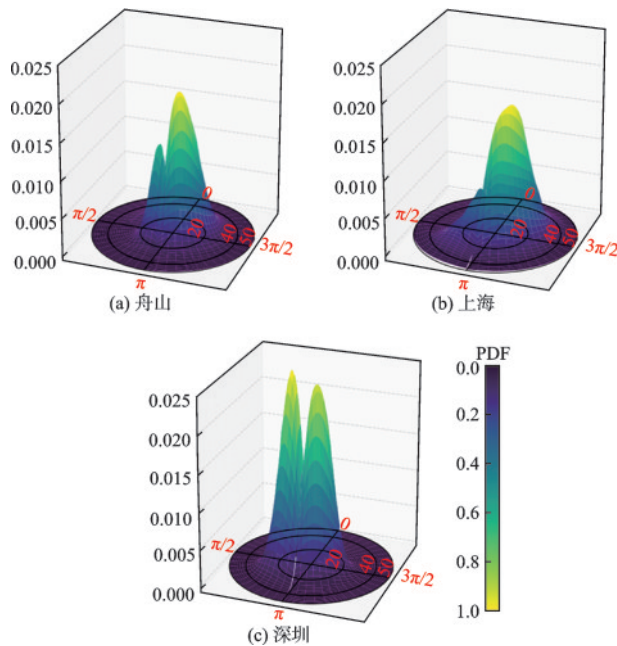


图9 中国沿海代表城市台风风速风向联合PDF
Fig.9 Joint PDF of typhoon wind speed and direction for representative coastal cities in China

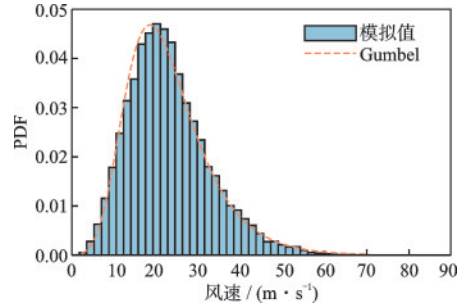


图10 舟山市梯度风高度处年极值风速PDF(无气候变暖假设)

Fig.10 Annual extreme wind speed PDF at gradient height in Zhoushan (no global warming scenario)

式中, $\mu(t)$ 为 Gumbel 分布的位置参数; $\sigma(t)$ 为 Gumbel 分布的形状参数; t 为时间(年)。如果 Gumbel 分布的参数是非平稳的, $\mu(t)$ 和 $\sigma(t)$ 会随着时间 t 而改变^[15]。

本文研究发现,对于中国东南沿海的城市,台风年极值分布采用 Gumbel 分布可以较好地进行拟合^[1]。因此,在各气候变暖假设下,我们同样采用 Gumbel 分布拟合气候变暖下台风年极值分布,此时 $\mu(t)$ 和 $\sigma(t)$ 将会是时变参数。比如,图11展示了深圳市在 RCP8.5 气候变化假设下,台风年极值分布的时变特性。本文采用线性回归拟合 $\mu(t)$ 和 $\sigma(t)$ 随时间的变化规律。

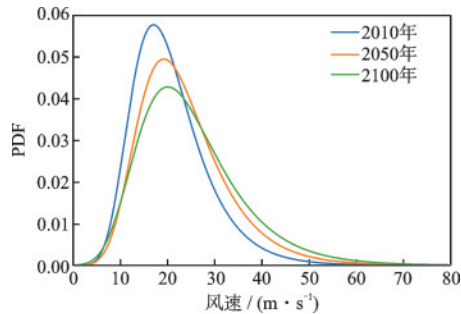
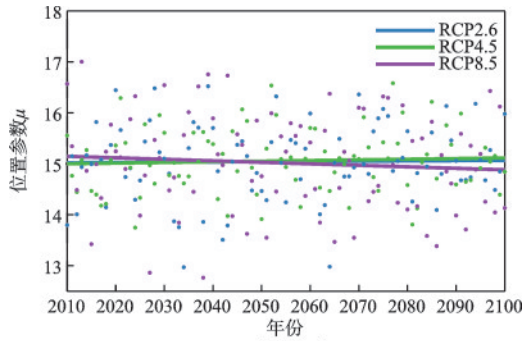


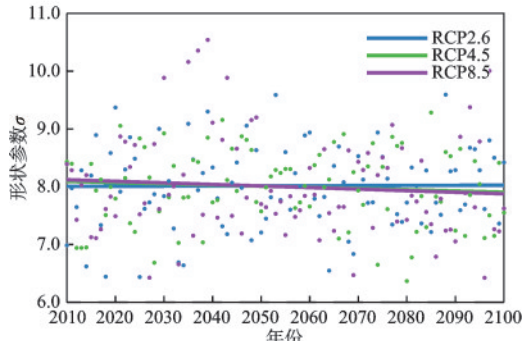
图11 年极值风速PDF在RCP8.5气候变化假设下的时变特性(深圳市为例)

Fig.11 Time-varying characteristics of annual extreme wind speed PDF under RCP8.5 global warming scenario (a case study of Shenzhen)

舟山市位于 KP21 附近, (30.06°N, 121.92°E)。图12展示了舟山市 $\mu(t)$ 和 $\sigma(t)$ 在不同气候变暖假设下的时变特性。通过线性回归分析,可以发现舟山市的台风年极值分布对于气候变化(本文只考虑海平面温度)不敏感。这个结果是合理的,因为图8(d)的结果表明 KP21 附近台风中心压差和台风年登陆频率在



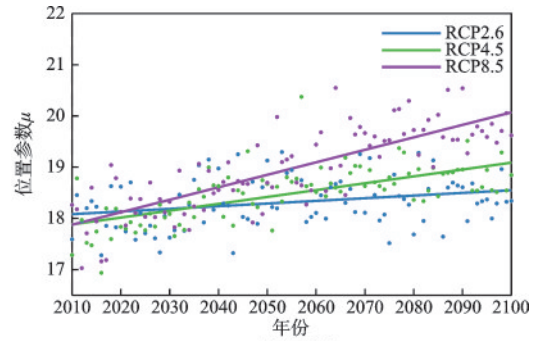
(a) 位置参数 μ



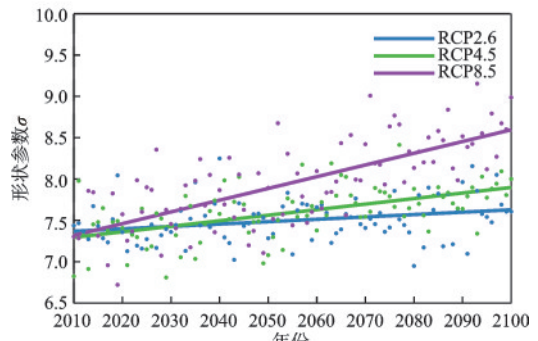
(b) 形状参数 σ

图12 舟山市年极值风速在气候变暖假设下 Gumbel 分布的时变参数

Fig.12 Time-varying parameters of Gumbel distribution for annual extreme wind speeds under global warming scenarios in Zhoushan



(a) 位置参数 μ



(b) 形状参数 σ

图13 深圳市年极值风速在气候变暖假设下 Gumbel 分布的时变参数

Fig.13 Time-varying parameters of Gumbel distribution for annual extreme wind speeds under global warming scenarios in Shenzhen

不同气候变暖假设下的模拟结果几乎不变,这就意味着 KP21 附近的台风活动没有被加强。

深圳市位于 KP10 附近。图 13 展示了深圳市在不同气候变暖假设下的时变特性,它们的时变特性是很明显的(平均风速随时间增加)。同样根据图 8(d)的结果,KP10 附近台风中心压差在气候变暖下增加比较明显,这就导致了更剧烈的台风过程。

3.4 Gumbel 分布参数估计误差

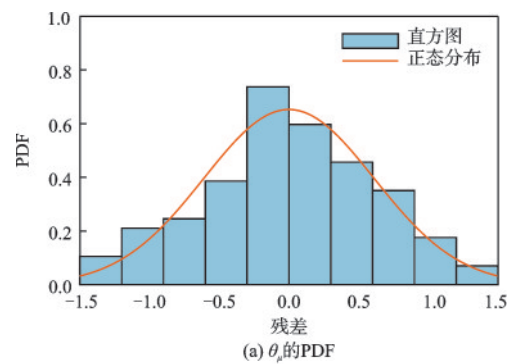
根据图 12 和图 13,我们可以发现 $\mu(t)$ 和 $\sigma(t)$ 都是离散分布的。离散的海平面温度变化导致了 Gumbel 分布参数的离散性。因此,有必要量化由于线性拟合 $\mu(t)$ 和 $\sigma(t)$ 导致的估计误差。

如公式(10)和(11)所示,我们将由于线性拟合导致的残差 θ_μ 和 θ_σ 考虑进来,将其当作一个随机量:

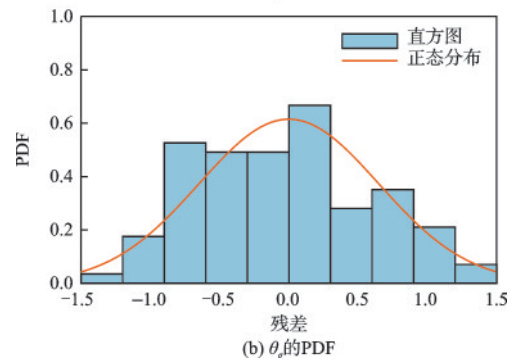
$$\mu(t|\theta_\mu) = a_\mu t + b_\mu + \theta_\mu \quad (10)$$

$$\sigma(t|\theta_\sigma) = a_\sigma t + b_\sigma + \theta_\sigma \quad (11)$$

式中, a_i 和 b_i ($i = \mu, \sigma$) 是线性回归得到的常数; θ_μ 和 θ_σ 服从正态分布(图 14); 记 $\Theta = \Theta(\theta_\mu, \theta_\sigma)$, Θ 即为线性拟合带来的估计不确定性。



(a) θ_μ 的 PDF



(b) θ_σ 的 PDF

图14 Gumbel 分布线性拟合残差的 PDF(正态分布)

Fig.14 PDF of residuals from Gumbel parameter linear fitting (normal distribution)

4 结 论

本文主要探讨了基于 Vickery 经验路径模型的西北太平洋全路径模拟方法;拟合历史台风年发生次数得到每年台风发生频数服从时不变的负二项分布;台风初始生成位置采用 IBTrACS 数据库提供的历史位置值,根据模拟得到的年台风发生频数,在历史位置处随机取点。路径模型和强度衰减模型仍然采用 Vickery 等最初提出的模型,未作修正,而气候变暖影响下海平面温度的变化在路径强度模型公式(3)中得以体现。对于台风梯度风风场的模型,仍以 Georgious 梯度风风场模型为基础进行讨论;与传统的 Georgious 梯度风风场模型相比,本章基于 ANN 模型重新拟合了最大风速半径 R_{\max} 的关系式,除了台风中心压差 Δp 和纬度 ϕ 以外,本文还将海平面温度 SST 纳入关系式,进而将气候变化的影响也纳入到台风风速估计的结果中。并通过对比无气候变暖假设时和有气候变暖假设时在不同 KPs 处台风模拟结果的统计特征,得出以下结论:

(1) 揭示了气候变化导致海平面温度升高时台风登陆频率、台风移动速度、台风移动方向以及中心压差的可能影响。

(2) 气候变暖对年极值风速的影响具有地域性,例如长期来看对于舟山市的影响不大,而会增大深圳市的年极值风速。

(3) 通过线性拟合得到年极值风速的 Gumbel 分布参数在不同气候变暖假设下的非平稳关系式,并利用正态分布量化了线性拟合带来的残差影响(本文称之为估计不确定性)。

参考文献:

[1] 方根深. 基于地理加权回归三维台风模型的大跨度桥梁颤振易损性分析[D]. 上海: 同济大学, 2020.
Fang G S. Flutter fragility analysis of long-span bridges based on 3D typhoon model using geographically weighted regression[D]. Shanghai: Tongji University, 2020. (in Chinese)

[2] Stocker T. Climate change 2013: the physical science basis: working group I contribution to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change[M]. Cambridge: Cambridge University Press,

2014.

[3] Xu H, Lin N, Huang M, et al. Design tropical cyclone wind speed when considering climate change[J]. Journal of Structural Engineering, 2020, 146(5): 04020063.

[4] Zhao L, Cui W, Ge Y. Measurement, modeling and simulation of wind turbulence in typhoon outer region [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2019, 195: 104021.

[5] Cui W, Ma T, Zhao L, et al. Data-based windstorm type identification algorithm and extreme wind speed prediction[J]. Journal of Structural Engineering, 2021, 147(5): 04021053.

[6] Hong X, Kareem A, Li J. Validation of the fast intensity model for typhoon and its application to the estimation of typhoon wind hazard for the southeast coast of China [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2020, 206: 104379.

[7] Hong X, Li J. A beta-advection typhoon track model and its application for typhoon hazard assessment [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2021, 208: 104439.

[8] Vickery P J, Skerlj P F, Twisdale L A. Simulation of hurricane risk in the US using empirical track model[J]. Journal of Structural Engineering, 2000, 126 (10) : 1222-1237.

[9] Vickery P J, Skerlj P F, Steckley A, et al. Hurricane wind field model for use in hurricane simulations [J]. Journal of Structural Engineering, 2000, 126 (10) : 1203-1221.

[10] Fang G, Pang W, Zhao L, et al. Toward a refined estimation of typhoon wind hazards: parametric modeling and upstream terrain effects [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2021, 209: 104460.

[11] Fang G, Pang W, Zhao L, et al. Extreme typhoon wind speed mapping for coastal region of China: geographically weighted regression-based circular subregion algorithm [J]. Journal of Structural Engineering, 2021, 147(10): 04021146.

[12] Wu F, Huang G, Zhou X. Enhanced circular subregion method in typhoon hazard analysis [J]. Journal of Structural Engineering, 2021, 147(6): 06021003.

[13] Li J, Hong X. Typhoon hazard analysis based on the probability density evolution theory [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2021, 219: 104796.

[14] Shen Z, Wei K. Stochastic model of tropical cyclones along China coast including the effects of spatial hetero-

- geneity and ocean feedback[J]. *Reliability Engineering & System Safety*, 2021, 216: 108000.
- [15] Cui W, Caracoglia L. Exploring hurricane wind speed along US Atlantic coast in warming climate and effects on predictions of structural damage and intervention costs[J]. *Engineering Structures*, 2016, 122: 209-225.
- [16] Lee J Y, Ellingwood B R. A decision model for inter-generational life-cycle risk assessment of civil infrastructure exposed to hurricanes under climate change[J]. *Reliability Engineering & System Safety*, 2017, 159: 100-107.
- [17] Snaiki R, Wu T. Revisiting hurricane track model for wind risk assessment[J]. *Structural Safety*, 2020, 87: 102003.
- [18] Chen Y, Duan Z, Yang J, et al. Typhoons of western North Pacific basin under warming climate and implications for future wind hazard of East Asia[J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2021, 208: 104415.
- [19] Van Vuuren D P, Edmonds J, Kainuma M, et al. The representative concentration pathways: an overview[J]. *Climatic Change*, 2011, 109(1): 5-31.
- [20] Mcfarlane N. Canadian centre for climate modelling and analysis[J]. *Numerical Modeling of the Global Atmosphere in the Climate System*, 2000, 550: 221.
- [21] Emanuel K A. The dependence of hurricane intensity on climate[J]. *Nature*, 1987, 326(6112): 483-485.
- [22] Mudd L, Wang Y, Letchford C, et al. Assessing climate change impact on the US East Coast hurricane hazard: temperature, frequency, and track [J]. *Natural Hazards Review*, 2014, 15(3): 04014001.
- [23] Mudd L, Wang Y, Letchford C, et al. Hurricane wind hazard assessment for a rapidly warming climate scenario[J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2014, 133: 242-249.
- [24] Webster P J, Holland G J, Curry J A, et al. Changes in tropical cyclone number, duration, and intensity in a warming environment[J]. *Science*, 2005, 309(5742): 1844-1846.
- [25] Lee T C, Knutson T R, Kamahori H, et al. Impacts of climate change on tropical cyclones in the western North Pacific basin. Part I: Past observations[J]. *Tropical Cyclone Research and Review*, 2012, 1(2): 213-235.
- [26] Lee T C, Y Leung C Y, Kok M H, et al. The long term variations of tropical cyclone activity in the South China Sea and the vicinity of Hong Kong[J]. *Tropical Cyclone Research and Review*, 2012, 1(3): 277-292.
- [27] Knapp K R, Kruk M C, Levinson D H, et al. The international best track archive for climate stewardship (IBTrACS) unifying tropical cyclone data[J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2010, 91(3): 363-376.
- [28] Zhang X, Zhong S, Wu Z, et al. Seasonal prediction of the typhoon genesis frequency over the Western North Pacific with a Poisson regression model[J]. *Climate Dynamics*, 2018, 51(11): 4585-4600.
- [29] Massey Jr F J. The Kolmogorov-Smirnov test for goodness of fit[J]. *Journal of the American statistical Association*, 1951, 46(253): 68-78.
- [30] Darling R. Estimating probabilities of hurricane wind speeds using a large-scale empirical model[J]. *Journal of Climate*, 1991, 4(10): 1035-1046.
- [31] Cui W, Zhao L, Cao S, et al. Bayesian optimization of typhoon full-track simulation on the Northwestern Pacific segmented by QuadTree decomposition [J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2021, 208: 104428.
- [32] Georgiou P N. Design wind speeds in tropical cyclone-prone regions[D]. Ontario: The University of Western Ontario, 1986.
- [33] 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.
- [34] Cui W, Zhao L, Cao S, et al. Bayesian optimization of typhoon full-track simulation on the Northwestern Pacific segmented by QuadTree decomposition [J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2021, 208: 104428.

(本文编辑:池营营)