

# 中国东南沿海区域台风数值模拟与危险性分析

郭云霞<sup>1, 2, 3, 5</sup>, 侯一筠<sup>1, 2, 3, 4, 5</sup>, 齐鹏<sup>1, 2, 4, 5</sup>

(1. 中国科学院海洋研究所, 山东 青岛 266071; 2. 中国科学院海洋环流与波动重点实验室, 山东 青岛 266071; 3. 中国科学院大学, 北京 100049; 4. 青岛海洋科学与技术试点国家实验室海洋动力过程与气候功能实验室, 山东 青岛 266237; 5. 中国科学院海洋大科学中心, 山东 青岛 266071)

**摘要:** 通过网格定点法对我国东南沿海区域性台风危险性进行了分析。利用对各网格点有影响的历史台风数据, 建立了各网格点的台风关键参数的最优概率模型。利用 Monte-Carlo 方法产生每个网格点 1 000 年间的虚拟台风事件。采用 Yan Meng(YM)风场模型模拟了 100 个历史台风的最大风速, 通过这些最大风速与观测的最大风速误差和最小, 建立了一组新的计算最大风半径  $R_{\max}$  和 Holland 气压参数  $B$  的公式, 结果表明新的台风参数计算方案效果良好。利用新的参数计算方案、YM 风场模型、特定地点的台风衰减模型以及合适的极值分布模型, 预测了各个网格点不同重现期的极值风速, 进而绘制了台风多发区域的设计风速图。最后研究了不同  $B$  模型、 $R_{\max}$  模型和极值分布模型对预测的极值风速的影响。可以为结构抗风设计和台风防灾减灾提供新的参考。

**关键词:** Monte-Carlo 模拟; 风场模型; 台风参数; 极值风速

中图分类号: P732.3

文献标识码: A

文章编号: 1000-3096(2020)04-0001-12

DOI: 10.11759/hyxx20190826001

中国东南沿海区域经济发达、人口稠密, 同时也是遭受台风灾害最为严重的地区之一。统计表明台风灾害造成的损失是所有自然灾害中最多的。历史上台风给我国沿海各省造成了重大经济损失和严重伤亡。在这些地区, 分析台风灾害风险并预测台风的设计风速对于结构抗风设计和台风防灾减灾至关重要。

在中国东南沿海台风多发区域, 由于缺乏足够的台风观测数据, 采用传统的统计方法不能准确预测台风不同重现期的极值风速。为了克服这个问题, Monte-Carlo 方法应运而生, 成为一种可替代而且可行的台风危险性分析方法。它利用台风风场模型和台风关键参数统计模型, 采用数值模拟方法进行台风影响区极值风速的预测(又称为台风危险性分析)。美国<sup>[1]</sup>和澳大利亚<sup>[2]</sup>使用该方法编制设计风速图。

美国的 Russell<sup>[3-4]</sup>最早采用经验台风模型模拟计算台风产生的极值风速, 并用来估计墨西哥湾的台风风速。自此以后, Batts 等<sup>[5]</sup>、Shapiro<sup>[6]</sup>、Georgiou<sup>[7]</sup>、Vickery 等<sup>[8]</sup>、Meng 等<sup>[9]</sup>、Simiu 等<sup>[10]</sup>、Thompson 等<sup>[11]</sup>都对该模拟方法进行了扩展和改进。正如 Vickery 等<sup>[12]</sup>所指出的那样, 尽管这些研究的方法是类似的, 但是在风场模型以及衰减模型方面仍然存在比较大

的差异。此外在使得台风的气候态特征保持一致的研究区域的大小上以及提取对特定地点有影响的台风事件方法上也存在差异, 有的采用沿岸分段方法<sup>[4-5]</sup>, 有的采用模拟圆方法<sup>[7, 12-14]</sup>。

Vickery 等<sup>[15]</sup>开发了一种新的台风模拟方法-经验路径模型, 该方法对台风的整个路径进行建模, 成为首个可以产生美国沿岸连续变化的台风气候的研究。自此以后, 对于该研究也有很多的改进, 主要包括改进的 Holland 气压参数  $B$  模型、最大风速半径  $R_{\max}$  模型<sup>[16-17]</sup>以及新的台风衰减模型<sup>[18]</sup>。Mudd 等<sup>[19]</sup>、Lee 等<sup>[20]</sup>、Rosowsky 等<sup>[21]</sup>都对经验路径模型进行了一些其他的衍生研究。

在过去的几十年, 我国在台风风险分析领域也有许多的研究。欧进萍等<sup>[22]</sup>利用 Batts<sup>[5]</sup>模型对我国东南沿海重点城市台风风险进行了研究。Xiao 等<sup>[23]</sup>

收稿日期: 2019-08-26; 修回日期: 2019-12-05

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFC1402000, 2018YFC1407003); 国家自然科学基金(U1606402, 41421005)

[Foundation: National Key Research and Development Program of China, No. 2016YFC1402000, No. 2018YFC1407003; National Natural Science Foundation of China, No. U1606402, No. 41421005]

作者简介: 郭云霞(1986-), 山东泰安人, 博士研究生, 主要从事海洋灾害研究, E-mail: guoyunxia14@mails.ucas.edu.cn; 侯一筠, 通信作者, 研究员, E-mail: yjhou@qdio.ac.cn

结合 Thompson<sup>[11]</sup>台风模型和 Monte-Carlo 模拟方法对我国东南沿海地区 11 个重点城市进行台风风灾分析。Hong 等<sup>[24]</sup>基于 Monte-Carlo 模拟, 绘制了中国沿海地区台风极值风速等值线图。Li 等<sup>[25-26]</sup>使用全路径模型分析了我国台风灾害, 并对全路径模型进行了简化。这些研究为沿海重点城市的抗风设计提供了有益的参考。然而, 不同的风场模型、台风衰减模型、 $R_{max}$  模型、 $B$  模型以及极值风速概率分布模型会导致风速预测存在差异。

在本文中, 我们采用了不同的风场模型、极值分布模型以及新拟合的  $R_{max}$  模型和  $B$  模型来研究中国东南沿海区域的台风危险性。整个中国东南沿海区域被分成  $0.25^\circ \times 0.25^\circ$  的网格, 对每个网格点采用前人<sup>[8, 10, 12]</sup>构建的 Monte-Carlo 模拟方法预测相应的极值风速, 最后编制整个沿海区域的结构设计风速图, 这将会为结构抗风设计提供新的参考。尽管台风引起的风暴潮和洪水也会造成灾害, 但是我们在这里只考虑了最直接的风灾(最大风速)。

## 1 数据与方法

我们将中国东南沿海台风多发区域作为本文的研究区域。参考 Hong 等<sup>[24]</sup>, 我们采用网格法来确定研究点, 网格的分辨率是  $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ , 一共有 579 个网格点覆盖整个研究区域(如图 1 所示)。

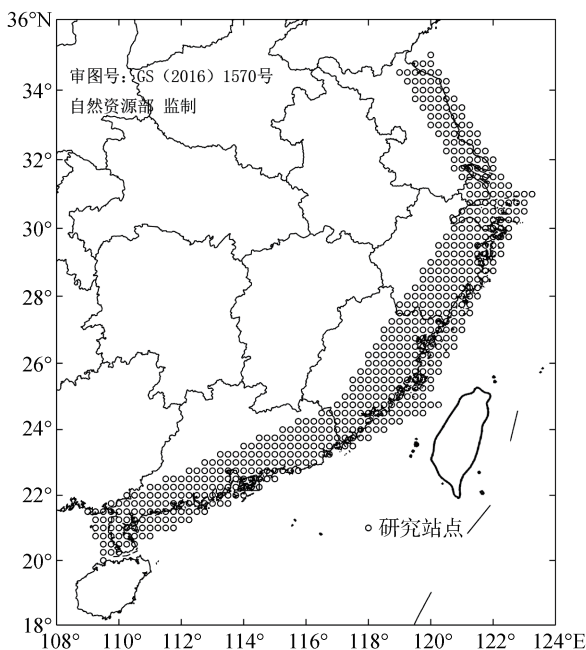


图 1 中国东南沿海区域网格研究站点分布图

Fig. 1 Distribution of grid sites in southeast coastal region of China

本研究的基本台风数据来自 CMA-STI 西北太平洋热带气旋最佳路径数据集(1949—2015 年)。数据集包括台风每 6 h 间隔的位置与强度信息, 具体包括台风名称、编号、台风中心位置(经度与纬度)、中心压强、近台风中心的 2 min 平均最大风速。

为了解决台风风速观测数据匮乏的问题, Monte-Carlo 方法作为可替代以及可行的方法被广泛用来分析台风的危险性, 采用此方法可以产生大量虚拟台风事件。

## 2 结果与讨论

### 2.1 台风关键参数与概率分布

台风模型通常用一组参数进行参数化, 称之为台风关键参数, 主要包括台风年发生率  $\lambda$ , 台风中心气压差  $\Delta p$ , 最大风速半径  $R_{max}$ , 台风中心移动速度  $V_T$ , 台风中心移动方向  $\theta$ , 台风移动路径与研究点间的最小距离  $D_{min}$ , 这些参数表征了台风的结构和强度。对于某一站点, 当台风距该站点的距离满足特定的要求时(模拟圆法), 台风被提取出来, 以这些提取的台风信息为基础建立台风关键参数的概率模型。Li 等<sup>[25-26]</sup>和 Vickery 等<sup>[17]</sup>通过参数化实验, 建议模拟圆半径采用 250 km。通过统计分析, 每个网格点有 25~267 个历史台风样本。Vickery 等<sup>[12]</sup>、Simiu 等<sup>[10]</sup>、Yasui 等<sup>[27]</sup>介绍了各个台风关键参数可能符合的概率模型, 如表 1 所示。本文采用卡方检验与 Kolmogorov-Smirnov (KS) 检验两个非参数检验方法对台风关键参数统计特征的拟合优度进行检验, 检验的显著性水平设置为 5%。如果理论分布没有通过检验, 则采用经验分布。通过拟合分析, 我们确定了每个网格点各个台风关键参数的最优概率模型, 这可以为其他学者的研究提供一些有益的参考。

表 1 台风关键参数备选概率模型

Tab. 1 Alternative probability distributions of typhoon key parameters

关键参数	备选概率分布
$\lambda$	泊松分布, 二项分布, 负二项分布
$\Delta p$	对数正态分布, 伽马分布, 威布尔分布
$V_T$	对数正态分布, 正态分布, 伽马分布
$\theta$	正态分布, 双峰分布, Von Mises 分布
$D_{min}$	均匀分布, 梯形分布

#### 2.1.1 年发生率

台风年发生率  $\lambda$  是指一年中某地受台风侵袭或

影响的次数, 这些台风发生在以研究站点为中心的模拟圆里面或是与模拟圆相交。该参数用来决定 Monte-Carlo 方法抽取样本的容量。年发生率通常用均匀泊松分布、二项分布或者负二项分布来描述。我们对每一个研究站点的年发生率分别用 3 个概率模型进行拟合, 通过拟合优度检验我们得出每个网格点的最优概率模型如图 2 所示。在 31°N 以北区域, 经验分布比较适用, 而在 23°N 以南区域, 泊松分布是适用的。二项分布主要适用于 23°—31°N 之间的区域。

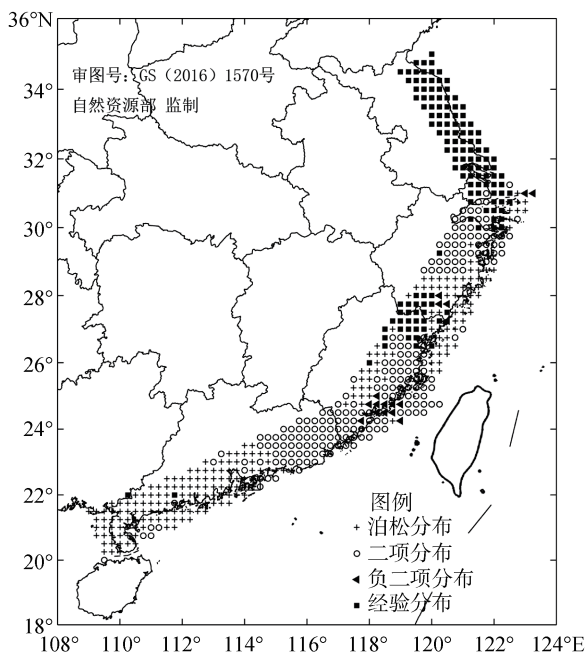


图 2 每个网格点台风年发生率的最优概率分布

Fig. 2 The optimal probability distribution of the typhoon annual occurrence rate for each grid

### 2.1.2 中心压差

台风中心压差  $\Delta p$  定义为台风系统最外围一条闭合等压线的气压值(Holland<sup>[28]</sup>建议西北太平洋区域是 1 010.0 hPa)与台风中心最低气压值之差, 是描述台风强度的主要参数。通常用对数正态分布、伽马分布和三参数威布尔分布来进行描述。KS 检验方法用来检验每个研究点概率模型的拟合优度。图 3 给出了每个网格点台风中心压差的最优概率模型。由图 3 可以看出对数正态分布适合 28°N 以北的区域, 而 28°N 以南的区域主要采用经验分布。

### 2.1.3 移动速度

台风中心移动速度  $V_T$  可根据 CMA 数据集中台风 6 h 间隔的前后中心位置计算得到。备选概率分布有正态分布、对数正态分布和伽马分布。通过拟合优

度检验, 我们发现伽马分布主要是适合 24°N 以北的区域, 经验分布适合剩余的大部分区域, 如图 4 所示。

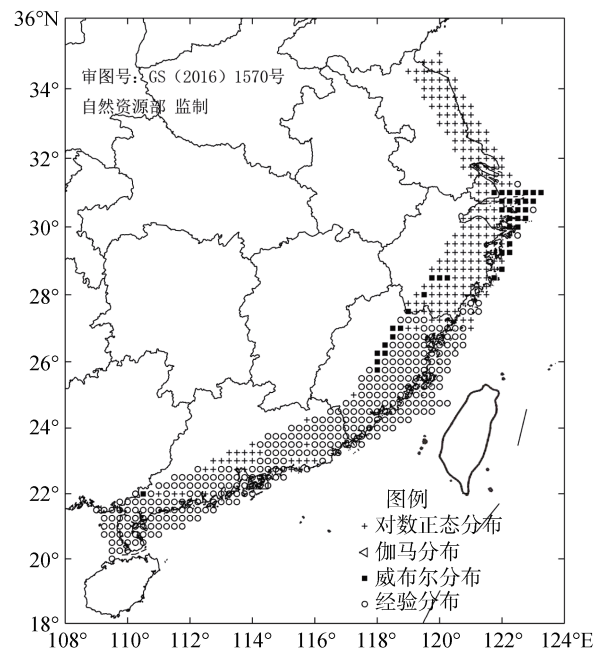


图 3 每个网格点台风中心压差的最优概率分布

Fig. 3 The optimal probability distribution of central pressure difference for each grid

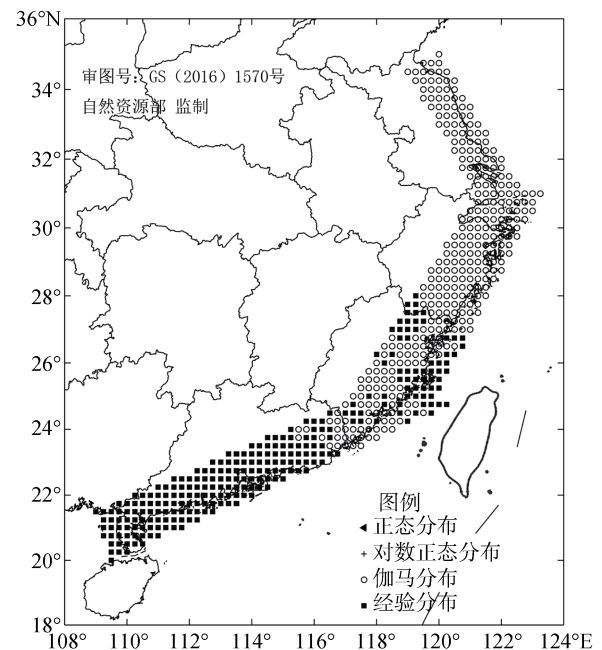


图 4 每个网格点台风移动速度的最优概率分布

Fig. 4 The optimal probability distribution of translation speed for each grid

### 2.1.4 移动方向

台风移动方向  $\theta$  由台风数据中台风相邻的两个

中心位置(经纬度)连线计算得到,规定取正北方向为 $0^\circ$ ,顺时针方向旋转为正。我们检验了正态分布、双峰分布和 Von Mises 分布对每个网格点台风移动方向的拟合优度。图 5 展示了每个网格点台风移动方向最优的概率分布模型。对大多数的研究点的台风移动方向都有双峰分布的特征,这也许是因为台风来自不同的热带气旋种群<sup>[12]</sup>。剩下的极少数的研究点适合用经验分布来描述。

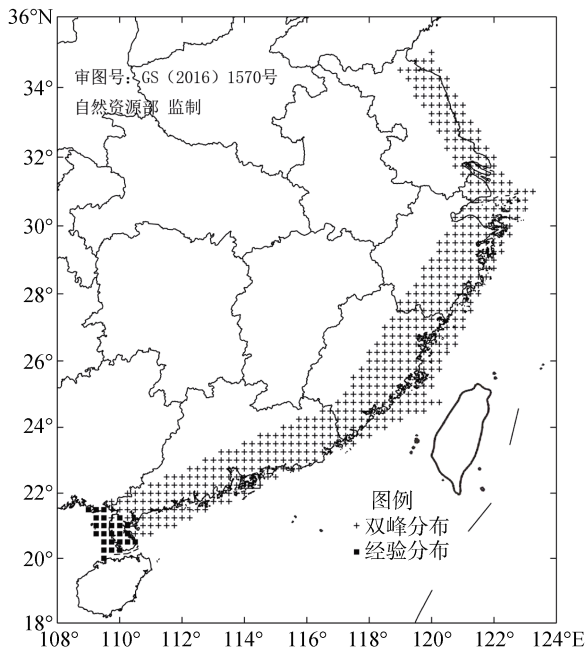


图 5 每个网格点台风移动方向的最优概率分布

Fig. 5 The optimal probability distribution of storm heading for each grid

### 2.1.5 最小距离

台风移动路径与研究点间的最小距离  $D_{\min}$  是台风直线路径与研究点之间的垂直距离,是基于台风中心每 6 h 间隔的台风记录计算得到。当台风中心的移动方向在研究点的左侧时取正值,在右侧时取负值。 $D_{\min}$  取值的限值是模拟圆半径。 $D_{\min}$  可以用均匀分布或梯形分布来建模。基于拟合优度检验,每个网格点的最小距离的最优概率分布模型如图 6 所示。24°N 以北区域适合采用均匀分布,24°N 以南区域适合采用梯形分布。

## 2.2 Monte-Carlo 模拟

### 2.2.1 虚拟台风的生成

本文对每个网格点模拟了 1 000 年的台风事件,在此期间台风发生数目由各网格点的年发生率概率分布(图 2)来确定。首先采用 Monte-Carlo 方法对

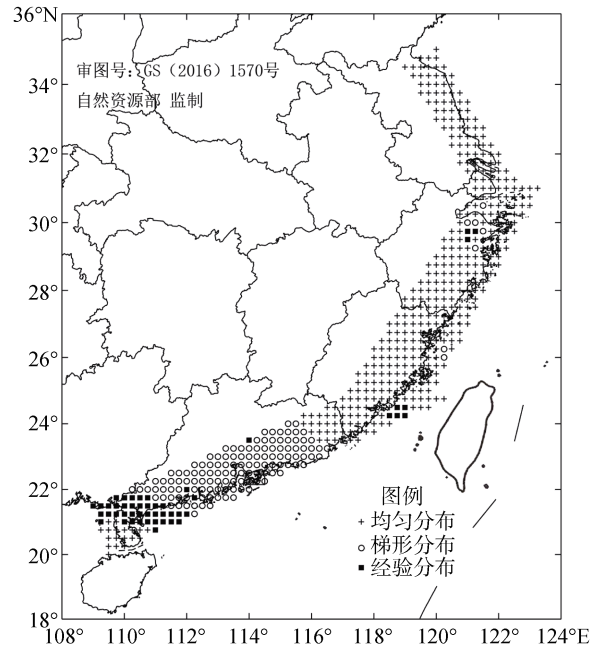


图 6 每个网格点台风最小距离的最优概率分布

Fig. 6 The optimal probability distribution of the minimum approach distance for each grid

每个研究点的  $\Delta p$ 、 $V_T$ 、 $\theta$  和  $D_{\min}$  的概率分布(图 3—图 6)进行随机抽样,以此来产生虚拟台风起始点的关键参数。从最优概率分布随机抽取的关键参数需要在合理的范围内: $\Delta p$  为  $[0, 135]$  hpa,  $V_T$  为  $[2, 65]$  km/h,  $\theta$  为  $[-180^\circ, 180^\circ]$ ,  $|D_{\min}| \leq 250$  km。然后确定台风的起始点,此点是台风路径与模拟圆的交点,用  $D_{\min}$ 、 $\theta$ 、模拟圆半径以及网格点的位置来确定。接着用移动速度  $V_T$  与移动方向  $\theta$  来确定台风每小时间隔的中心位置,在此过程中台风路径被假定为直线,由抽取的  $D_{\min}$  和  $\theta$  确定。在台风登陆前,中心压强保持不变,登陆后采用衰减模型来描述中心压差  $\Delta p$  的变化。最后当台风中心离开模拟圆范围则认为台风消失。该过程示意图如图 7 所示。

### 2.2.2 衰减模型

一旦台风登陆,强度将会减弱,台风的中心压差和风速都会减小。台风衰减的速率与台风本身、登陆的位置以及登陆时的中心压差有关。采用合适的衰减模型描述台风的衰减规律,对于预测台风登陆后的风速有重要影响。Batts 等<sup>[5]</sup>、Georgiou<sup>[7]</sup>以及 Vickery 等<sup>[8]</sup>采用中心气压差的衰减来描述台风的衰减。他们利用台风中心气压差和登陆时间或登陆以后向内陆移动的距离的相关性表述衰减规律。在这些衰减模型中应用最广泛的是 Vickery 等<sup>[8]</sup>发展的衰减函数。本文采用了类似的衰减模型,基于 CMA 数

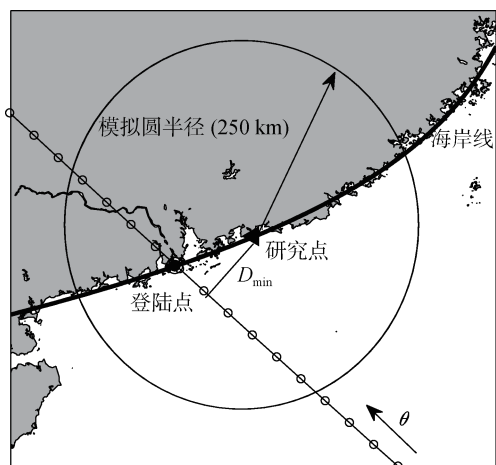


图 7 虚拟台风过程示意图

Fig. 7 A schematic graph for simulation of the virtual typhoon

据来描述每个网格点的台风衰减规律。衰减率模型如公式(1)所示:

$$\Delta p(t) = \Delta p_0 \exp(-at), \quad a = a_0 + a_1 \Delta p_0 + \varepsilon, \quad (1)$$

式中  $\Delta p(t)$  是台风登陆后  $t$  时刻的中心压差(hPa),  $\Delta p_0$  是登陆时刻的中心压差(hPa),  $a$  是特定点衰减系数,  $\varepsilon$  是正态分布的误差项, 均值为 0, 标准偏差为  $\sigma_\varepsilon$ 。

通过拟合登陆的台风数据, 我们得到了每个网格点的台风衰减模型的系数。对于每个网格点, 用于拟合衰减模型的台风数量从 16 到 118 不等。对于个别的在回归分析中没有通过显著性检验(显著性水平是 5%)或是登陆的台风数目非常少的网格点采用离它最近的网格点的衰减模型来代替。每个网格单元衰减模型的系数分布如图 8 所示, 作为个例, 文中给出了福州、汕头、广州、湛江的衰减模型拟合示意图, 如图 9 所示。

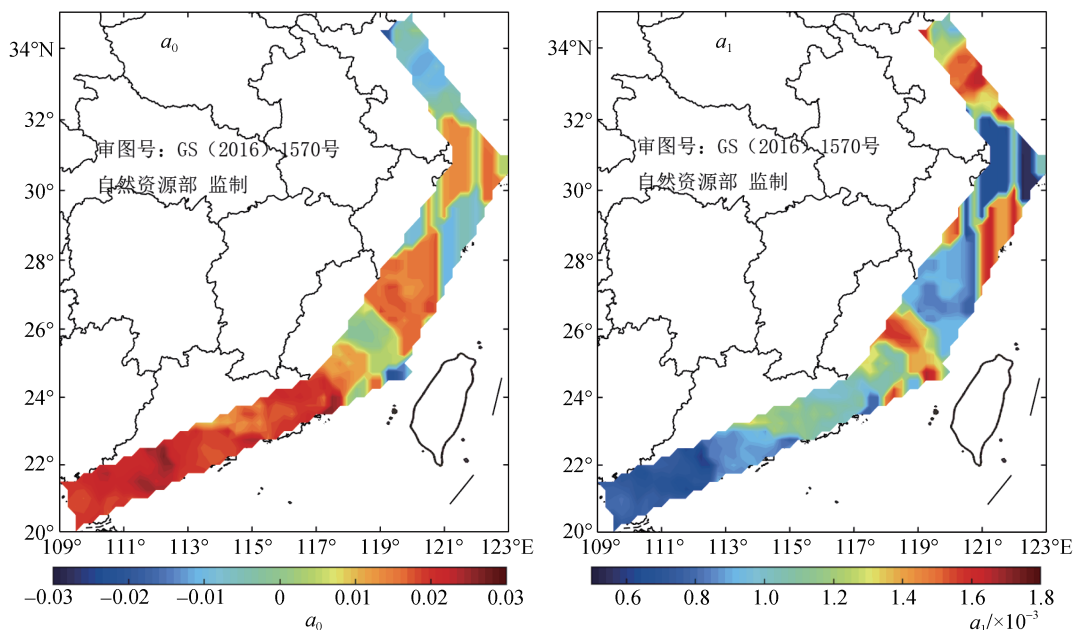


图 8 衰减模型中衰减系数  $a_0$  和  $a_1$  的分布图

Fig. 8 Illustration of obtained coefficients  $a_0$  and  $a_1$  for decay model

### 2.3 风场模型与新的台风参数计算方案

台风风场模型是进行台风数值求解的关键。一般来说, 台风数值模拟精度高, 但是计算量也相应变大, 目前还不适合与随机路径结合使用进行风险评估。而参数化风场模型计算简便, 精度也可以达到要求, 在台风灾害风险评估领域有广泛的应用<sup>[29]</sup>。本文采用了 Yan Meng(YM)风场模型, 是由 Meng 等<sup>[9]</sup>提出的解析模型, 该模型是半经验半数值的风场模型, 其数值形式如下:

$$\frac{\partial \mathbf{V}}{\partial t} + \mathbf{V} \nabla \mathbf{V} = -\frac{1}{\rho} \nabla p - f \mathbf{k} \mathbf{V} + \mathbf{F}, \quad (2)$$

式中,  $\mathbf{V}$  代表台风风速;  $\rho$  代表空气密度;  $\mathbf{k}$  代表垂向单位向量;  $f$  代表科氏参数;  $\mathbf{F}$  代表边界层摩擦力。该模型以扰动平衡方程和经过边界层摩擦力修正的压力梯度平衡方程为基础, 引入了可以考虑地貌等复杂因素的“等效粗糙长度”, 能够很好地表示出台风风场中各种力之间的相互关系, 并且能够比较直观地求解梯度风方程, 得到完整的解析解, 这种方法相对简单易解, 而且对于分析台风危险性具有足够的

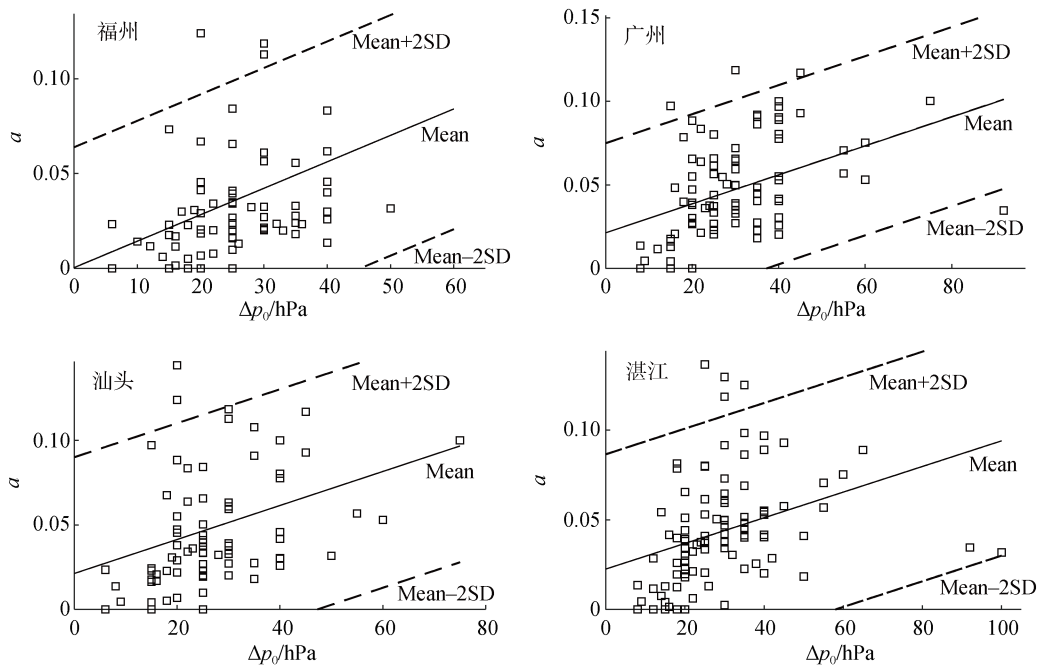


图9 衰减常数  $a$  与登陆时中心压差  $\Delta p_0$  的回归关系

Fig. 9 Decay constant  $a$  versus the central pressure difference  $\Delta p_0$  at landfall

注: Mean 表示均值; SD 表示标准偏差

精度, 该模型得到了广泛应用, 如 Matsui 等<sup>[30]</sup>、Okazaki 等<sup>[31]</sup>、谢汝强等<sup>[32]</sup>、赵林等<sup>[33]</sup>。关于风场模型更详细的内容请参考文献 Meng 等<sup>[9]</sup>。

### 2.3.1 新的台风参数计算方案

气压是台风风场模型的重要输入参数, YM 风场模型采用 Holland<sup>[28]</sup>气压模型, 其形式如下:

$$p(r) = p_0 + \Delta p \exp \left[ - \left( \frac{R_{\max}}{r} \right)^B \right], \quad (3)$$

式中,  $p(r)$  是距台风中心径向距离为  $r$  处的海平面压强;  $p_0$  是台风中心的气压值;  $\Delta p$  是台风中心的气压差。式中有两个未知的参数, 分别是最大风速半径  $R_{\max}$  和气压剖面参数  $B$ 。它们对台风风场的模拟起重要作用, 但是由于缺乏相应的观测数据, 很难得到它们的精确值, 在我国目前还没有统一的计算它们的公式。本文中我们提出了一个新的计算台风参数  $R_{\max}$  和  $B$  的方案。基于之前的研究<sup>[12, 16-17, 34]</sup>,  $R_{\max}$  与  $\Delta p$  和纬度  $\psi$  相关,  $B$  与  $R_{\max}$  和  $\Delta p$  相关, 或是与  $R_{\max}$  和  $\psi$  相关。我们总结这些关系列出了 4 类计算台风风场参数的方案, 每个方案都带有需要进一步确定的系数, 如公式(4)–(7)所示:

$$\ln R_{\max} = b_1 + c_1 \Delta p + d_1 \psi, \quad B = e_1 + f_1 \Delta p + g_1 R_{\max}, \quad (4)$$

$$\ln R_{\max} = b_2 + c_2 \Delta p^2 + d_2 \psi^2, \quad B = e_2 + f_2 \Delta p + g_2 R_{\max}, \quad (5)$$

$$\ln R_{\max} = b_3 + c_3 \Delta p^2 + d_3 \psi^2, \quad B = e_3 + f_3 R_{\max} + g_3 \psi, \quad (6)$$

$$\ln R_{\max} = b_4 + c_4 \Delta p^2 + d_4 \psi, \quad B = e_4 + f_4 \Delta p + g_4 R_{\max}. \quad (7)$$

基于前人的研究可以给定每一个未知系数 ( $b, c, d, e, f, g$ ) 合理的变化范围。我们提取了不同气象站观测得到的 100 个台风风速的最大值, 通过使其模拟值与观测值的误差和最小来确定各个待定系数在其变化范围内的最优值。关注最大风速的误差是因为最大风速模拟的准确性直接影响我们预测的极值风速的准确性。100 个观测台风的最大风速主要来自“中国热带气旋气候图集”<sup>[35]</sup>和香港天文台(<http://www.hko.gov.hk/contentc.htm>)。每个观测台风的路径以及相应观测站点的信息如图 10 所示。

我们采用 YM 风场模型模拟每一个观测台风的风速, 并且计算模拟风速与观测风速最大值之间的误差。以公式(4)为例, 我们首先对每一个系数  $b_1, c_1, d_1, e_1, f_1, g_1$  设定了一个合理的变化范围。然后利用六层嵌套循环来依次描述各系数值的变化, 最里面的循环是  $g_1$  的变化, 最外面的循环是  $b_1$  的变化。这样我们可以得到 20 多万组  $b_1, c_1, d_1, e_1, f_1, g_1$  的不同值的组合。接下来, 我们将各组合值依次代入公式(4)结合 YM 风场模型计算各个台风的最大风速, 并与观测的最大风速对比得到相对误差, 进而计算 100 个观测台风的相对误差之和, 由此我们可以得到二十多万台风的最大风速误差和, 从中选取误差和

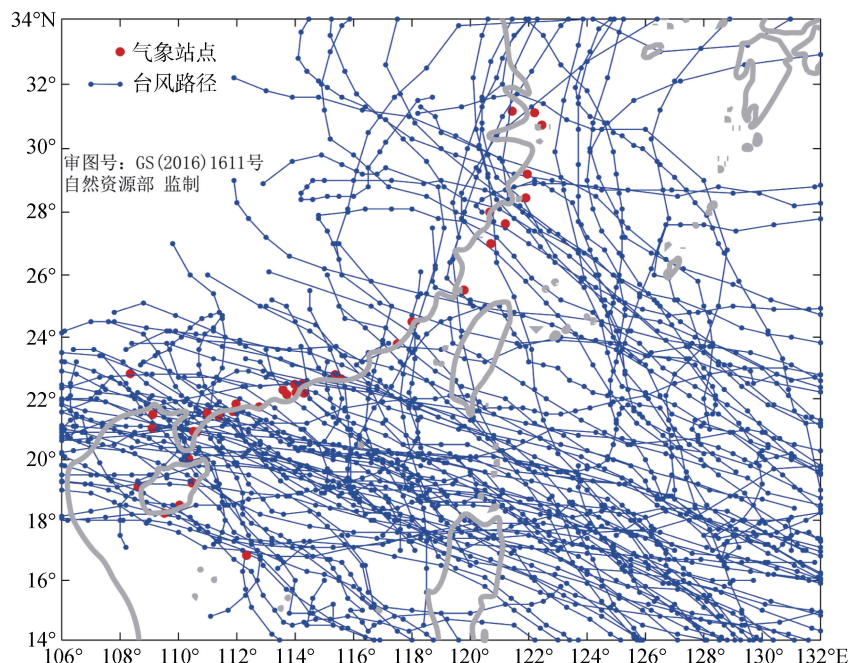


图 10 100 个观测台风的路径和观测气象站点的位置

Fig. 10 The tracks of 100 observed typhoons and the locations of meteorological stations

最小的那一组系数( $b_1, c_1, d_1, e_1, f_1, g_1$ )作为公式(4)中各个系数的最优值。以此类推,我们得到了公式(4)–(7)的系数的最优值,结果如下:

$$\begin{aligned} \ln R_{\max} &= 2.8 - 0.002\Delta p + 0.034\psi, \\ B &= 1.2 + 0.001\Delta p - 0.002R_{\max}, \end{aligned} \quad (8)$$

$$\begin{aligned} \ln R_{\max} &= 3.4 - 4 \times 10^{-5} \Delta p^2 + 4 \times 10^{-4} \psi^2, \\ B &= 1.2 + 0.001\Delta p - 0.002R_{\max}, \end{aligned} \quad (9)$$

$$\begin{aligned} \ln R_{\max} &= 3.4 - 4 \times 10^{-5} \Delta p^2 + 4 \times 10^{-4} \psi^2, \\ B &= 1.4 - 0.003R_{\max} - 0.007\psi, \end{aligned} \quad (10)$$

$$\begin{aligned} \ln R_{\max} &= 3.5 - 3 \times 10^{-5} \Delta p^2 + 0.02\psi, \\ B &= 1.4 + 0.001\Delta p - 0.002R_{\max}. \end{aligned} \quad (11)$$

确定公式(4)–(7)中系数最优值时 100 个台风的模拟最大风速误差和的最小值分别是 29.33、28.16、28.18、26.06。由此可知,在公式(8)–(11)中,采用公式(11)计算的 100 个台风的最大风速误差和最小。因此我们选取公式(11)作为计算台风参数的最优方案,这为计算气压剖面参数以及最大风速半径提供了新的参考。为了进一步验证这个新的参数计算方案,我们还采用了  $R_{\max}$  和  $B$  的另外两个常用的模型,一个来自 Vickery 等<sup>[15]</sup>,模型形式如下:

$$\begin{aligned} \ln R_{\max} &= 2.636 - 0.000\,050\,8\Delta p^2 + 0.039\,4\psi, \\ B &= 1.38 + 0.001\,84\Delta p - 0.003\,09R_{\max}, \end{aligned} \quad (12)$$

另一个模型来自 Vickery 等<sup>[16]</sup>,形式如下:

$$\begin{aligned} \ln R_{\max} &= 3.015 - 6.291 \times 10^{-5} \Delta p^2 + 0.033\,7\psi + \varepsilon_{\ln R_{\max}}, \\ B &= 1.833 - 0.326\sqrt{1000f_c R_{\max}} + \varepsilon_B, \end{aligned} \quad (13)$$

式中  $\Delta p$  单位是 hPa,  $\varepsilon_{\ln R_{\max}}$  是标准偏差,当  $\Delta p \leq 87$  hPa,  $\sigma_{\ln R_{\max}} = 0.448$ ; 当  $87$  hPa  $< \Delta p \leq 120$  hPa,  $\sigma_{\ln R_{\max}} = 1.137 - 0.007\,92\Delta p$ , 当  $\Delta p > 120$  hPa,  $\sigma_{\ln R_{\max}} = 0.186$ ;  $\psi$  是纬度(单位是度);  $f_c$  是科氏参数;  $\sigma_B = 0.221$ 。同样我们采用公式(12)与(13)结合 YM 风场模型计算了 100 个台风的最大风速误差和,分别为 29.06、27.88。可以看出采用公式(12)或(13)得到的误差和也大于采用

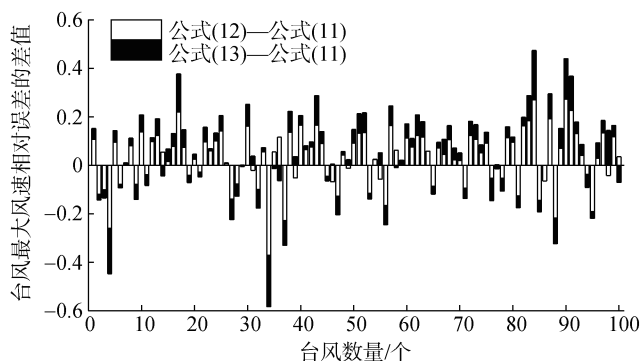


图 11 公式(12)与公式(11),公式(13)与公式(11)计算的各台风最大风速相对误差的差值

Fig. 11 The difference of relative error of maximum wind speed for each typhoon between the Eq. (12) and Eq. (11) and that between the Eq. (13) and Eq. (11)

公式(11)的结果。在图 11 中, 我们绘制了采用公式(12)计算得到的每个台风最大风速的相对误差与采用公式(11)所得结果的差值以及公式(13)和公式(11)所得结果的差值。可以看出, 对于大多数台风, 采用公式(12)或公式(13)计算的最大风速的相对误差大于公式(11)的结果, 说明我们的新方案可以有效的降低台风最大风速的模拟误差。

为了对公式(11)进行进一步验证, 我们将其带入 YM 模型, 模拟了上述 100 个台风中 York(1999)、Usagi(2013)、Hagupit(2008)、Hato(2017)的风速, 模拟和实测风速的对比结果如图 12 所示。由此可见, 新的台风参数计算方案效果良好。

### 2.3.2 粗糙度的确定

在 Meng 等<sup>[9]</sup>的研究中, 地形效应等效地面粗糙度来代替。粗糙度对于风场模型也是非常重要的参数。基于之前的研究<sup>[2, 36-37]</sup>不同地形地貌的粗糙度

的取值如表 2 所示。我们根据实际地形标记了每个网格点的粗糙度, 如图 13 所示。

## 2.4 台风危险性分析

基于本文得到的台风关键参数概率分布, 采用 Monte-Carlo 模拟方法得到的虚拟台风事件, 结合采用最优台风参数计算方案的 YM 风场模型, 可以计算得到每个网格点的台风极值风速序列。YM 风场模型计算的风速为 10 m 高度处每小时平均风速, 采用因子 1.06 将其转换成 10 min 平均的风速。极值风速序列通常会用理论分布来进行描述, 本文中采用了应用广泛的 Weibull 分布和 Gumbel 分布, 并进行了 KS 拟合优度检验, 检验显著性水平为 5%。如果某个研究点的理论分布都没有通过显著性检验则采用经验分布。如果两个理论分布都通过了显著性检验则根据  $p$  值选择最优的理论分布。

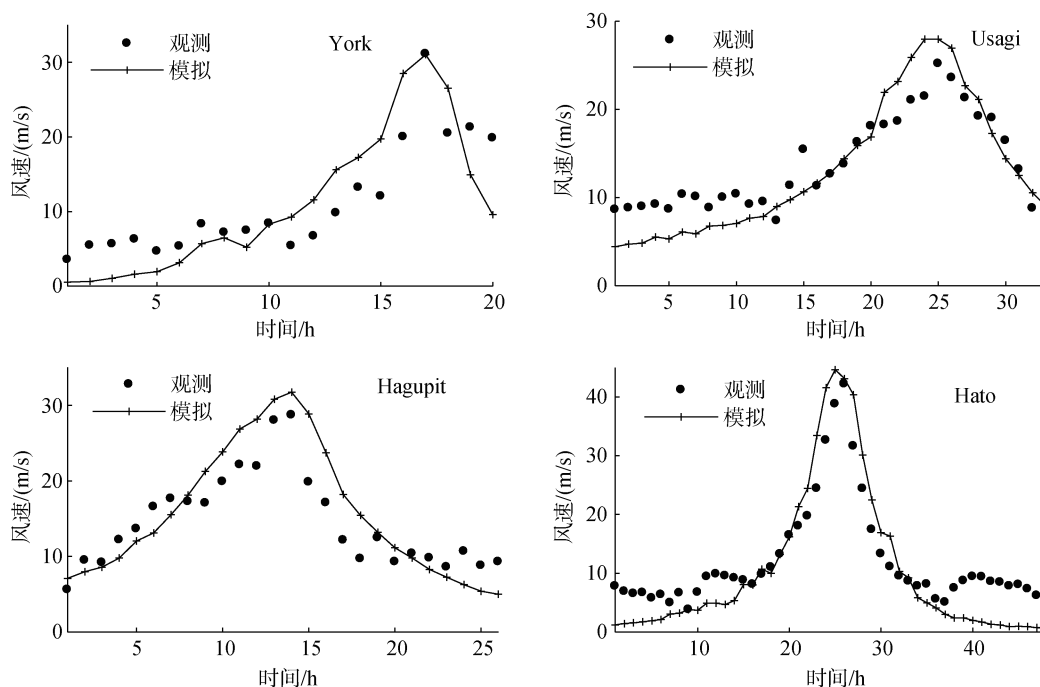


图 12 将式(11)代入 YM 模型时, 台风 York、Usagi、Hagupit 以及 Hato 的模拟风速和实测风速的对比

Fig. 12 The simulated and measured wind speeds for typhoons York, Usagi, Hagupit, and Hato when Eq. (11) was brought into the Yan Meng (YM) model

首先, 我们利用经验分布来预测每个网格单元不同重现期的极值风速。图 14 显示了预测的每一个网格点 50 年及 100 年重现期的极值风速。从风速等值线可以看出, 预测的极值风速从沿海地区到内陆地区逐渐减小。在浙江南部、广东中部和南部沿海地区、珠江三角洲和长江三角洲地区预测的极值风

速普遍比较大, 我们需要对这些地区的台风灾害给予更多的关注, 并投入更多的资源研究这些地区高层建筑的抗风性能。

在我国《建筑结构荷载规范》<sup>[38]</sup>中, 将许多地方的参考风压列制成表。Hong 等<sup>[24]</sup>对设计规范中给出的等值线图进行数字化处理, 得到了 50 年重现期的



表 2 不同地形地貌的粗糙度的值

地形等级	下垫面特征	粗糙度/m
I	海面、泥滩、冰雪覆盖的平原, 无障碍海岸地区等	0.000 5~0.003
II	平坦开阔的田野、乡村及丛林等(气象学标准)	0.003~0.2
III	丘陵和房屋比较稀疏的乡镇及城市郊区	0.2~1.0
IV	密集建筑群的城市	1.0~2.0
V	密集建筑群且房屋较高的城市	2.0~4.0

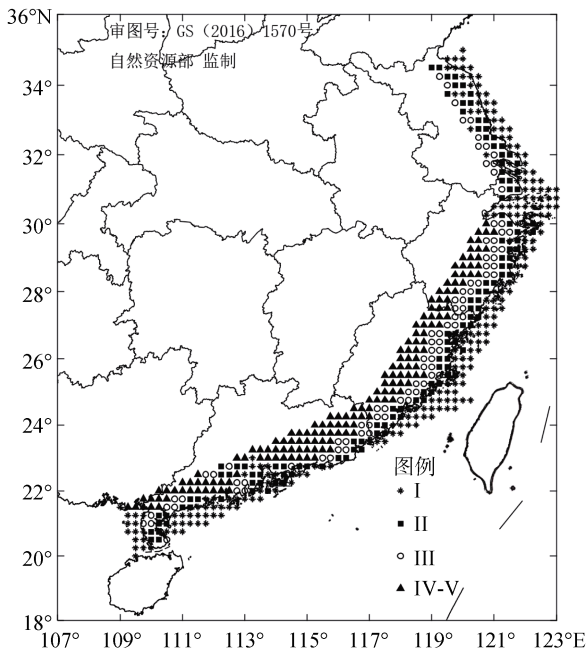


图 13 不同研究点的粗糙度

Fig. 13 The roughness length for each site of interest

极值风速图, 并通过 Monte-Carlo 模拟预测了中国大陆沿海地区年最大风速的 50 年重现期值。然而 Hong 等<sup>[24]</sup>使用的是改进的 Thompson 风场模型<sup>[11]</sup>以及 Vickery 等<sup>[16]</sup>发展的  $R_{max}$  模型和  $B$  模型。将 Hong 等<sup>[24]</sup>提出的等值线与图 14 所示的等值线进行对比, 可以看出设计规范、Hong 等<sup>[24]</sup>和本研究得到的设计风速的空间趋势是相似的。本研究预测风速比 Hong 等<sup>[24]</sup>的结果大 1~2 m/s。与设计规范的结果相比, 本研究预测风速在沿海地区比规范值大 1~2 m/s, 在内陆地区比规范值大 4~5 m/s。从海岸到内陆, 本研究预测的极值风速的下降速度要低于设计规范中风速的下降速度, 这与 Hong 等<sup>[24]</sup>的结果相似。由于设计规范不仅考虑了台风, 还考虑了其他较弱的风场, 所以很容易低估极值风速。

其次, 为了研究不同  $R_{max}$  模型和  $B$  模型对预测风速的影响, 我们也采用了 Vickery 等<sup>[15]</sup>和 Vickery 等<sup>[16]</sup>中的  $R_{max}$  模型和  $B$  模型来计算台风风场, 如公式(12)和(13)。基于公式(12)和(13)计算的风速, 我们预测了中国东南沿海区域 50 年重现期的极值风速。图 15a 是基于式(12)预测的极值风速减去基于式(11)预测的风速的结果。图 15b 是基于式(13)预测的风速减去基于式(11)预测的风速的结果。由图 15a 可以看出, 采用式(12)预测的沿海地区风速比采用式(11)预测的风速大 0~2 m/s。在内陆地区, 采用式(12)预测风速略小于采用式(11)预测的风速。从图 15b, 可以看出 30°N 以北区域, 采用式(13)预测的风速通常比用式(11)预测的风速小 0~3 m/s, 而 26°N 以南区域, 采用式(13)预测风速通常比用式(11)预测的风速大 0~2 m/s。

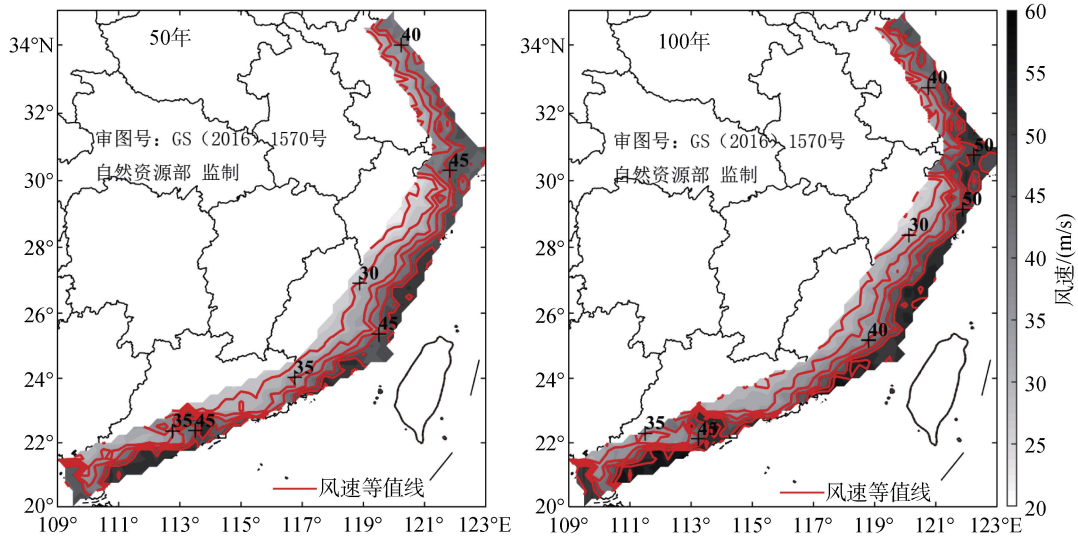


图 14 采用经验分布预测的 50 年与 100 年重现期的极值风速

Fig. 14 The predicted extreme wind speed of the 50a and 100a return period using empirical distribution

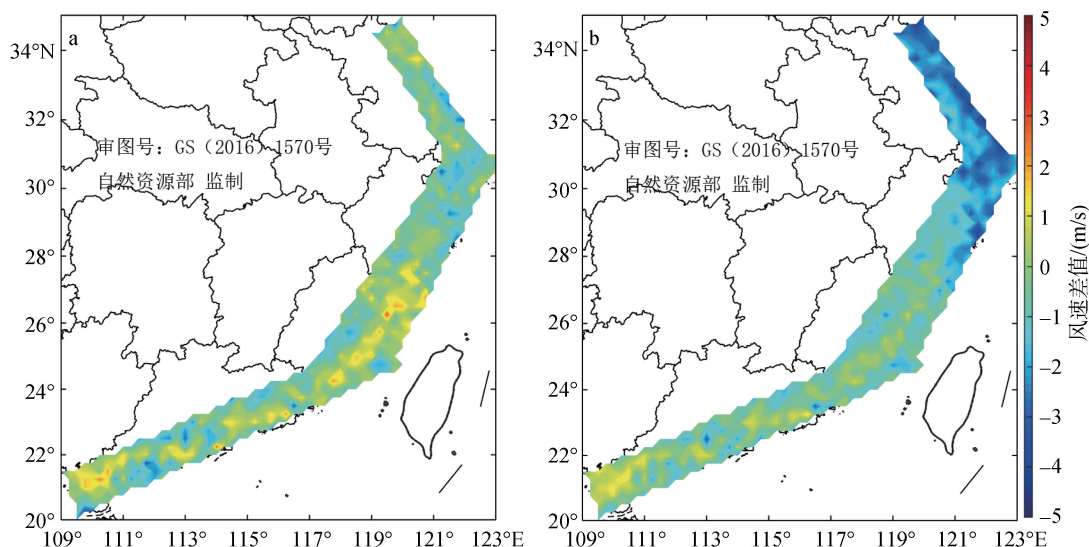


图 15 基于公式(12)和(13)预测的 50 年重现期极值风速减去基于式(11)预测的风速的差值分布图(a, b)

Fig. 15 The results that the predicted-wind-speeds of 50-year return period based on the Eq. (12) (a) and Eq. (13) (b) minus those based on the Eq. (11)

最后, 我们研究了不同极值分布对预测风速的影响。通过拟合最优极值分布, 我们发现每个网格研究点的最优极值分布不是 Weibull 分布就是 Gumbel 分布。因此, 我们比较了理论分布与经验分布预测风速的差异, 如图 16 所示。图 16 中正值表示理论分布预测风速大于经验分布预测风速。我们可以看到, 在中间区域(24°—30°N, 主要是 Gumbel 分布)用理论分布预测的风速通常比使用经验分布预测的结果大

0~2 m/s。在两边区域(主要是 Weibull 分布), 使用理论分布预测的风速通常比使用经验分布预测的结果小, 尤其是在 23°N 以南的区域。

### 3 结论

采用基于新的台风参数计算方案的 YM 风场模型以及 Monte-Carlo 模拟我们分析了我国东南沿海区域台风的危险性。整个东南沿海台风多发区被分成  $0.25^\circ \times 0.25^\circ$  的网格, 每个网格点作为我们的研究点。基于历史数据, 我们对每个研究点的每个台风关键参数建立了最优概率模型。基于每个研究点台风关键参数的概率模型, 我们用 Monte-Carlo 方法产生了每个研究点 1 000 年的虚拟台风事件。通过使模拟与观测的台风最大风速的误差和达到最小, 我们确定了台风参数计算的新方案。采用 YM 风场模型结合台风参数计算的新方案、特定点的台风衰减模型以及最优的极值分布, 我们预测了每个研究点不同重现期的极值风速, 并绘制了新的中国东南沿海区域的设计风速图。最后我们研究了不同  $B$  模型、 $R_{max}$  模型和极值分布对极值风速预测的影响, 为抗风结构设计提供了新的参考。

#### 参考文献:

- [1] ASCE/SEI 7-05, Minimum Design Loads for Buildings and other Structures[S].
- [2] AS/NZS 1170.2: 2002, Structural Design Actions part2: Wind Actions[S].

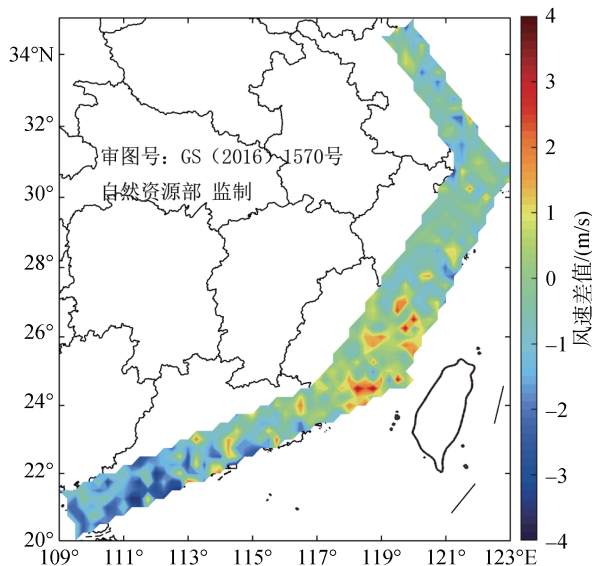


图 16 采用理论分布预测的 50 年重现期极值风速减去经验分布预测的风速的差值分布图

Fig. 16 The results that the predicted-wind-speeds of 50-year return period using theoretical distribution minus those using empirical distribution

- [3] Russell L B. Probability distributions for Texas gulf coast hurricane effects of engineering interest[D]. Stanford: Stanford University, 1969.
- [4] Russell L R. Probability distributions for hurricane effects[J]. *Journal of the Waterways, Harbors and Coastal Engineering Division*, 1971, 97(1): 139-154.
- [5] Batts M E, Simiu E, Russell L R. Hurricane wind speeds in the United States[J]. *Journal of the Structural Division*, 1980, 106(10): 2001-2016.
- [6] Shapiro L J. The Asymmetric boundary layer flow under a translating hurricane[J]. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 1983, 40(8): 1984-1998.
- [7] Georgiou P N. Design wind speeds in tropical cyclone-prone regions[D]. London, Canada: University of Western Ontario, 1986.
- [8] Vickery P J, Twisdale L A. Wind-field and filling models for hurricane wind-speed predictions[J]. *Journal of Structural Engineering*, 1995b, 121(11): 1700-1709.
- [9] Meng Y, 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.
- [10] Simiu E, Scanlan R H. Wind Effects on Structures: Fundamental and Applications to Design[M]. New York: John Wiley & SONS, INC., 1996.
- [11] Thompson E F, Cardone V J. Practical modeling of hurricane surface wind fields[J]. *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*, 1996, 122(4): 195-205.
- [12] Vickery P J, Twisdale L A. Prediction of hurricane wind speeds in the United States[J]. *Journal of Structural Engineering*, 1995, 121(11): 1691-1699.
- [13] Georgiou P N, Davenport A G, Vickery B J. Design wind speeds in regions dominated by tropical cyclones[J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 1983, 13(1-3): 139-152.
- [14] Neumann C J. The National Hurricane Center Risk Analysis Program (HURISK) [R]. Miami: U.S. Department of Commerce, National Oceanic and Atmospheric Administration, National Hurricane Center, 1987.
- [15] 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.
- [16] Vickery P J, Wadhwa 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.
- [17] Vickery P J, Wadhwa D, Twisdale L A, et al. U.S. hurricane wind speed risk and uncertainty[J]. *Journal of Structural Engineering*, 2009, 135(3): 301-320.
- [18] Vickery P J. Simple empirical models for estimating the increase in the central pressure of tropical cyclones after landfall along the coastline of the United States[J]. *Journal of Applied Meteorology*, 2005, 44(12): 1807-1826.
- [19] Mudd L, Wang Y, Letchford C, et al. Assessing climate change impact on the U.S. east coast hurricane hazard: Temperature, frequency, and track[J]. *Natural Hazards Review*, 2014, 15(3): 04014001.
- [20] Lee K H, Rosowsky D V. Synthetic hurricane wind speed records: development of a database for hazard analyses and risk studies[J]. *Natural Hazards Review*, 2007, 8(2): 23-34.
- [21] Rosowsky D V, Mudd L, Letchford C. Assessing climate change impact on the joint wind-rain hurricane hazard for the northeastern U.S. coastline[C]//Gardoni P, Murphy C, Rowell A. Risk Analysis of Natural Hazards: Interdisciplinary Challenges and Integrated Solutions. Cham: Springer, 2016: 79-92.
- [22] 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. Typhoon risk analysis for key coastal cities in southeast China[J]. *Journal of Natural Disasters*, 2002, 11(4): 9-17.
- [23] Xiao Y F, Duan Z D, Xiao Y Q, et al. Typhoon wind hazard analysis for southeast China coastal regions[J]. *Structural Safety*, 2011, 33(4-5): 286-295.
- [24] Hong H P, Li S H, Duan Z D. Typhoon wind hazard estimation and mapping for coastal region in mainland China[J]. *Natural Hazards Review*, 2016, 17(2): 4016001.
- [25] 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, 141(10): 04014238.
- [26] Li S H, Hong H P. Typhoon wind hazard estimation for China using an empirical track model[J]. *Natural Hazards*, 2016, 82(2): 1009-1029.
- [27] 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(12-15): 1529-1540.
- [28] Holland G J. An Analytic model of the wind and pressure profiles in hurricanes[J]. *Monthly Weather Review*, 1980, 108(8): 1212-1218.
- [29] 方伟华, 林伟. 面向灾害风险评估的台风风场模型研究综述[J]. *地理科学进展*, 2013, 32(6): 852-867.  
Fang Weihua, Lin Wei. A review on typhoon wind field modeling for disaster risk assessment[J]. *Progress in Geography*, 32(6): 852-867.
- [30] Matsui M, Ishihara T, Hibi K. Directional characteristics of probability distribution of extreme wind speeds by typhoon simulation[J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2002, 90(12-15): 1541-1553.

- [31] Okazaki T, Watabe H, Ishihara T. Development of typhoon simulation model for insurance risk estimation[C]//International Association for Wind Engineering (IAWE). The Sixth Asia-Pacific Conference on Wind Engineering. Seoul, Korea: IAWE, 2005: 1790-1802.
- [32] 谢汝强, 李利孝, 王艳华, 等. 广东省台风数值模拟与危险性分析[J]. 安徽建筑大学学报, 2015, 23(4): 51-55.  
Xie Ruqiang, Li Lixiao, Wang Yanhua, et al. Typhoon wind numerical simulation and hazard analysis for Guangdong Province[J]. Journal of Anhui Jianzhu University, 2015, 23(4): 51-55.
- [33] 赵林, 朱乐东, 葛耀君, 等. 上海地区台风风特性 Monte-Carlo 随机模拟研究[J]. 空气动力学学报, 2009, 27(1): 25-31.  
Zhao Lin, Zhu Ledong, Ge Yaojun, et al. Monte-Carlo simulation about typhoon extreme value wind characteristics in Shanghai region[J]. Acta Aerodynamica Sinica, 2009, 27(1): 25-31.
- [34] Powell M, Soukup G, Cocke S, et al. State of Florida hurricane loss projection model: Atmospheric science component[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2005, 93(8): 651-674.
- [35] 中国气象局上海台风研究所. 中国热带气旋气候图集 (1951-2000)[M]. 北京: 科学出版社, 2007.  
Shanghai Typhoon Institute, China Meteorological Administration. Climatological Atlas for Tropical Cyclones Affecting China (1951-2000)[M]. Beijing: Science Press, 2007.
- [36] Counihan J. Adiabatic atmospheric boundary layers: A review and analysis of data from the period 1880-1972[J]. Atmospheric Environment, 1976, 9(10): 871-905.
- [37] Choi H, Kanda J. Characteristics of the vertical wind profile for wind load estimation[J]. Journal of Wind Engineering, 2010, 1990(45): 23-43.
- [38] GB50009-2012, 建筑结构荷载规范[S].  
GB 50009-2012, Load code for the design of building structures[S].

## Typhoon wind numerical simulation and risk analysis for southeast coastal region of China

GUO Yun-xia<sup>1, 2, 3, 5</sup>, HOU Yi-jun<sup>1, 2, 3, 4, 5</sup>, QI Peng<sup>1, 2, 4, 5</sup>

(1. Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Qingdao 266071, China; 2. CAS Key Laboratory of Ocean Circulation and Waves, Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Qingdao 266071, China; 3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 4. Laboratory for Ocean and Climate Dynamics, Pilot National Laboratory for Marine Science and Technology (Qingdao), Qingdao 266237, China; 5. Center for Ocean Mega-Science, Chinese Academy of Sciences, Qingdao 266071, China)

**Received:** Aug. 26, 2019

**Key words:** Monte-Carlo simulation; wind field model; typhoon parameters; extreme wind speed

**Abstract:** In this paper, the grid fixed-point method was used to analyze the typhoon risk in the southeast coastal region of China. Using the historical typhoon data for each grid, we established the site-specific statistical distributions of typhoons key parameters. A Monte-Carlo method was used to generate virtual typhoons of 1000 years for each grid. Yan Meng (YM) wind field model was adopted to simulate the maximum wind speeds of 100 historical typhoons. By minimizing the errors between these maximum wind speeds and the observed maximum wind speeds, a new set of formulas was established to calculate the radius to maximum winds ( $R_{\max}$ ) and Holland pressure profile parameter ( $B$ ). The results show that the new parameter calculation scheme works well. Using the new scheme, YM wind field model, region-specific statistical models for the decay rate of typhoons after reaching land, and the extreme value distribution, we predicted the site-specific extreme wind speeds associated with various return periods and proposed a map of design wind speeds for the typhoon-prone coasts of China. Finally we investigated the effects of different  $B$  model,  $R_{\max}$  model, and extreme value distributions on the predicted wind speed, which can provide a new reference for wind-resistant structural design and typhoon disaster prevention and mitigation.

(本文编辑: 刘珊珊)