

DOI:10.3969/j.issn.1003-5060.2024.03.019

基于 TCR 模型的台风极值降雨强度预测

王 荣, 黄文锋

(合肥工业大学 土木与水利工程学院, 安徽 合肥 230009)

摘 要: 近些年台风带来的强降雨与洪水灾害给沿海城市造成严重的经济损失和人员伤亡, 极端降雨环境多数是在台风作用下产生的, 且极值降雨强度是城市防洪排涝、排水规划和工程设计的雨量计算依据。为更加合理准确地预测极值降雨, 文章引入热带气旋降雨(tropical cyclone rainfall, TCR)模型, 利用蒙特卡罗(Monte Carlo)技术模拟香港地区的极值降雨强度。对比相关规范与历史数据, 该方法能较好地预测极值降雨强度, 为后续台风降雨灾害危险性分析和排水工程建设研究提供一定的参考。

关键词: 台风; 热带气旋降雨(TCR)模型; 极值降雨强度; 蒙特卡罗(Monte Carlo)技术

中图分类号: X43 **文献标志码:** A **文章编号:** 1003-5060(2024)03-0406-06

Extreme rainfall intensity prediction for typhoons based on TCR model

WANG Rong, HUANG Wenfeng

(School of Civil and Hydraulic Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

Abstract: In recent years, heavy rainfall and flood disasters brought by typhoons have caused serious economic losses and casualties to coastal cities. Most extreme rainfall environments are generated under the action of typhoons, and the extreme rainfall intensity is the rainfall calculation basis for urban flood control and drainage, drainage planning and engineering design. In order to predict the extreme rainfall more reasonably and accurately, this paper introduces the tropical cyclone rainfall(TCR) model and simulates the extreme rainfall intensity in Hong Kong by Monte Carlo technique. Compared with the relevant norms and historical data, this method can better predict the extreme rainfall intensity, and provide reference for the subsequent typhoon rainfall hazard analysis and drainage engineering construction research.

Key words: typhoon; tropical cyclone rainfall (TCR) model; extreme rainfall intensity; Monte Carlo technique

0 引 言

台风是影响我国的重大自然灾害之一, 且台风带来的强降雨和洪水已经造成了大量的人员伤亡和巨大的经济损失。文献[1]表明, 在台风造成的人员伤亡中, 有 27% 的人员死亡归因于洪水, 而风灾只造成了 11% 的人员死亡, 故强降雨是进行台风安全性分析中不可忽略的一部分; 文献[2-

3]提出由于大气水分含量增加和风暴活动的潜在变化, 未来台风降雨可能会显著增加。而极值降雨强度是城市防洪、排涝及排水规划和工程设计的雨量计算依据, 其精确度会直接影响工程设计的安、经济和合理性。因此台风极值降雨强度预测是一项十分重要的任务。

目前在城市排水工程的设计中, 极值降雨强度又称暴雨强度。暴雨强度计算公式的确定一般

收稿日期: 2022-09-08; 修回日期: 2022-10-14

基金项目: 陕西省自然科学基金资助项目(2020JM-475)

作者简介: 王 荣(1998—), 男, 安徽马鞍山人, 合肥工业大学硕士生;

黄文锋(1982—), 男, 山东莱芜人, 博士, 合肥工业大学副教授, 硕士生导师。

基于该地区多年的降雨数据,通过多种方法进行数据拟合,最后根据误差分析择优选择。这种方法也是目前室外排水设计标准^[4]中提倡使用的,优点在于基于大量地区降雨数据情况下,可以较准确地拟合出当地的极值降雨强度,但缺点在于其依赖于历史数据的准确性与样本数量。在我国沿海诸多城市中,许多城市的降雨观测站点少且有效历史数据年限低,无法满足当地城市排水设计。采用台风降雨模型结合蒙特卡罗(Monte Carlo)技术推测出各地区的极值降雨强度的方案在缺乏历史数据的情况下更具有参考价值。

目前模拟台风降雨有多种方案。台风降雨模型可分为基于统计和基于物理的模型。文献[5]基于卫星观测数据建立用于模拟台风降雨的降雨气候学和持续性概率统计模型;文献[6]通过考虑地形和剪切效应造成的降雨不对称性进一步改进此模型,建立参数飓风降雨模型。在这些统计模型中,降雨对台风特征的依赖是粗糙的,只适合简单的海洋环境,无法适用于复杂的环境,而且通常无法捕捉到降雨极值。除了概率统计学方法,文献[7]基于基本热力学和台风边界层理论开发改进史密斯降雨(Smith for rain, MSR)模型,MSR模型解释与风暴运动相关的表面摩擦的方位不对称,但没有考虑风暴与风切变、地形等环境的相互作用,并不适用于复杂的内陆环境。

热带气旋降雨(tropical cyclone rainfall, TCR)模型是一种基于物理的台风降雨模型。TCR最初是文献[8]估计台风危害的综合方法的一部分开发的,但并未给出计算公式;文献[9]首先描述降雨算法,并研究模型捕获台风降雨总体统计数据的能力,TCR模型通过将降水效率与净垂直水汽通量相乘来计算台风沿合成路径的降雨率,解释主要的降雨产生机制,包括摩擦、地形、斜压(剪切)和涡旋拉伸效应。与上面讨论的所有模型不同,TCR模型进一步从原理上解释了降雨的产生。文献[10]发展TCR模型,采用梯度风、风暴平移和表面粗糙度的径向剖面估计摩擦收敛的影响,类似于MSR,但具有简化的参数化。通过直接加入风切变解释风暴与大尺度斜压性的相互作用,通过考虑地面高程解释风暴与地形的相互作用;文献[11]在其基础上改进关于表面阻力的表述,考虑背景降雨率、不同风场的输入,不同地区的模型响应等其他降雨影响因素。TCR模型已经在降雨模拟中展现良好的性能,具有很好的研究前景。本研究拟采用TCR模型预测台风极

值风速。

在台风降雨灾害评估方面,TCR模型也表现的格外突出,文献[11]比较3种不同估算降雨强度的方法,评估TCR模型在降雨灾害评估的优越性和适用性,并利用TCR模型估计美国大西洋热带气旋区域的降雨频率;文献[12]对TCR模型进行评估,对比分析美国393个历史台风数据中TCR模拟降雨与卫星记录降雨的差异,表明TCR模型可以产生台风降雨的主要特征,比纯统计模型表现得更好;文献[13]利用生成的合成台风事件和TCR模型模拟了风暴潮和降雨径流的复合洪水,制作了开普菲尔河的复合洪水灾害图以及重现期曲线。

极值降雨强度一直与降雨灾害联系紧密。与日降雨量相比,每小时降雨强度更准确地表示降雨强度和降雨过程,因此更适用于极端降雨事件的研究。文献[14]强调未来城市发展在每小时极端降雨量预测中的重要性,城市发展在整个强度范围内增加城市降雨概率,特大降雨的频率明显增加。在城市现代化发展中,极值降雨强度对城市防灾建设起到重要的指导作用,故预测城市的极值降雨强度至关重要。

本文首先对TCR模型及使用到的台风风场模型、台风全路径模型、极值降雨概率分布模型进行简单的介绍,然后利用Monte Carlo技术随机生成若干次台风并运用以上模型进行计算,最后预测香港地区的极值降雨强度。

1 模型分析

为准确预测研究地点的极值降雨强度,选取合适的降雨模型、台风风场模型、台风全路径模型和极值降雨概率分布模型是必不可少的。以下为本研究使用的各个模型。

1.1 TCR模型

基于物理的TCR模型的详细推导可参考文献[10]。在TCR模型中,降雨是由5种物理机制产生的,分别是地形强迫、摩擦效应、涡流拉伸、斜压效应和辐射冷却。每个物理分量产生1个垂直速度,总垂直速度简单地计算为从5个分量估计的垂直速度之和。然后可通过将总垂直速度乘以比湿度来计算垂直蒸汽通量。降雨率是通过将垂直蒸汽通量与降水效率相乘来计算的。降雨强度的计算公式为:

$$R = \epsilon_p \frac{\rho_{\text{air}}}{\rho_{\text{liquid}}} q_s w \quad (1)$$

其中: R 为降雨强度,也称为降雨率; ε_p 为沉淀效率,一般取 0.9; 水蒸气与液态水的密度之比 $\rho_{\text{air}}/\rho_{\text{liquid}}$ 一般取 0.001 2; q_s 为饱和比湿,是指湿空气达到时水汽质量与湿空气的总质量之比; w 为垂直风速,具体计算公式由文献[10]给出。

在各组成部分中,摩擦效应在模型产生的降雨中占主导地位,地形强迫在模拟山区降雨中起着重要作用。该模型以台风位置、台风风速、台风平移速度、低空比湿度和风切变作为输入。本研究中 TCR 模型的其他参数设置与文献[10]相同,阻力系数由地面粗糙度推导得到。

1.2 台风风场模型

台风风场的风速输入是 TCR 模型中非常关键的部分,在工程应用中,台风风场的计算仅限于边界层高度以内。本研究使用的风场模型来自 Meng 台风风场模型^[15]。

台风边界层中,风场的控制方程为:

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

其中: \mathbf{v} 为风速; t 为时间; f 为科里奥利参数; \mathbf{k} 为垂直方向的单位向量; ρ 为空气密度; \mathbf{F} 为摩擦力; p 为 Holland 气压,计算公式为:

$$p = p_c + \Delta p \exp\left[-\left(\frac{r_{\text{max}}}{r}\right)^B\right] \quad (3)$$

其中: p_c 为中心气压; Δp 为中心气压差; r_{max} 为最大风速半径; r 为距台风中心的距离; B 为 Holland 气压参数,可根据文献[16]提出的模型进行计算。

在梯度风高度不考虑摩擦力,建立坐标原点为台风中心的圆柱坐标系,假定梯度风 v_g 的径向分量 v_{rg} 远小于切向分量 $v_{\theta g}$,梯度风速可表示为:

$$v_{\theta g} = -\frac{c \sin(\theta - \beta) + fr}{2} + \sqrt{\left[\frac{c \sin(\theta - \beta) + fr}{2}\right]^2 + \frac{r}{\rho} \frac{\partial p}{\partial r}} \quad (4)$$

$$v_{rg} = -\frac{1}{r} \int_0^r \frac{\partial v_{\theta g}}{\partial \theta} dr \quad (5)$$

其中: c 为台风移动速度; θ 为方位角,规定正东方向为 0° ,逆时针旋转为正; β 为移动方向,方向规定同移动方向; r 为研究点到台风中心的距离。

在边界层内,文献[15]充分考虑大气涡流对风速剖面的影响,大气边界层内任意高度 z 处的风速 v 与风向 θ 的计算公式为:

$$v(z) = v_g \left(\frac{z}{z_g}\right)^{\alpha_u} \quad (6)$$

$$\theta(z) = \theta_g + \theta_s \left(1.0 - 0.4 \frac{z}{z_g}\right)^{1.1} \quad (7)$$

$$\alpha_u = 0.27 + 0.09 \lg z_0 + 0.018 (\lg z_0)^2 + 0.001 6 (\lg z_0)^3 \quad (8)$$

$$z_g = 0.06 \frac{v_g}{f_\lambda} (\lg R_0)^{-1.45} \quad (9)$$

$$\theta_s = (69 + 100\xi) (\lg R_0)^{-1.13} \quad (10)$$

$$f_\lambda = \left(\frac{\partial v_{\theta g}}{\partial r} + \frac{v_{\theta g}}{r} + f\right)^{1/2} \left(2 \frac{v_{\theta g}}{r} + f\right)^{1/2} \quad (11)$$

$$\xi = \frac{\left(2 \frac{v_{\theta g}}{r} + f\right)^{1/2}}{\left(\frac{\partial v_{\theta g}}{\partial r} + \frac{v_{\theta g}}{r} + f\right)^{1/2}} \quad (12)$$

其中: v_g 、 θ_g 分别为梯度风的风速与方向角; α_u 为指数风速剖面指数; z_g 为梯度风高度; θ_s 为流入角; z_0 为粗糙长度; R_0 为 Rosby 数; f_λ 为绝对涡旋系数; ξ 为绝对涡度。

1.3 台风全路径模型

台风全路径模型可生成足够多的台风关键参数信息,随着研究的深入和更大范围内风险评估的需要,多种基于整个海域范围内的全路径模拟技术被先后提出。台风经验统计模型是一种精度较高的台风预测模型,该模型建立一种非参数化的具体数学模型。文献[17]开发基于分类统计的台风移动路径模型,包括起点模型、行进模型和终点模型的台风全路径模拟技术。起点模型包含发生数量和发生位置 2 个部分,年发生量根据核密度函数随机抽样得到,核密度估计属于非参数化的数值估计方法;行进模型是基于台风历史数据,对台风的移动在经纬度 2 个方向进行控制,建立基于平均距离加方差扰动的行进模型;终点模型也可以称之为强度模型,用终止概率控制台风的终点。该模型能较好地模拟大西洋地区的台风路径,本研究采用该模型用于生成台风关键参数信息。

1.4 极值降雨概率分布模型

极值风速概率分布模型的选择是合理预测台风极值风速的前提,本研究选用极值 I 型 Gumbel 分布与极值 III 型 Weibull 模型进行极值降雨强度的估计,其中,极值 I 型概率分布如下:

$$F(x) = \exp\{-\exp[-\alpha(x - \gamma)]\} \quad (13)$$

其中: α 为尺度参数; γ 为位置参数,可由参数估计方法计算,即

$$\gamma = E(x) - 0.577 2\alpha \quad (14)$$

$$\alpha = \pi/(\sqrt{6}\sigma_x) \quad (15)$$

其中, $E(x)$ 、 σ_x 分别为样本的数学期望和均方差。

参考极值风速领域对极值风速的计算,可以得到对于极值 I 型 Gumbel 分布,重现期为 T 的

最大降雨强度 $R_T^{[18]}$:

$$R_T = E(x) + \psi \sigma_x \quad (16)$$

$$\psi = -\frac{\sqrt{6}}{\pi} \{0.577 2 + \ln[-\ln(1-1/T)]\} \quad (17)$$

极值 III 型 Weibull 概率分布如下:

$$F(x) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{x-\gamma}{\alpha}\right)^\beta\right] \quad (18)$$

其中, β 为形状参数。Weibull 分布的参数有多种计算方法,本研究拟采用矩法进行估计^[19]。三参数 Weibull 分布的可靠性矩为:

$$\mu_k = \int_0^\infty [R(x)]^k dx = \gamma + \left(\frac{\alpha}{k^\beta}\right) \Gamma\left(1 + \frac{1}{\beta}\right) \quad (19)$$

其中: $R(x) = 1 - F(x)$; $k = 1, 2, 4$; $\hat{\mu}_k$ 的估计值为:

$$\hat{\mu}_k = \sum_{i=1}^{n-1} \left(1 - \frac{i}{n}\right)^k (x_{i+1} - x_i) \quad (20)$$

其中: n 为样本总数; x_i 为样本中第 i 个值。

将 μ_k 的估计值代入到公式中可以得到 Weibull 分布的 3 个参数值,具体公式如下:

$$\hat{\alpha} = \frac{\mu_1 - \gamma}{\Gamma\left(1 + \frac{1}{\beta}\right)} \quad (21)$$

$$\hat{\beta} = \frac{\ln 2}{\ln \frac{\mu_1 - \mu_2}{\mu_2 - \mu_4}} \quad (22)$$

$$\hat{\gamma} = \frac{\mu_1 \mu_4 - \mu_2^2}{\mu_1 - 2\mu_2 + \mu_4} \quad (23)$$

同理,对于极值 III 型(Weibull)分布,重现期为 T 的最大降雨强度 $R_T^{[20]}$:

$$R_T = \gamma + \alpha \left\{ -\ln \left[-\frac{\ln\left(1 - \frac{1}{T}\right)}{\lambda} \right] \right\}^{\frac{1}{\beta}} \quad (24)$$

其中, λ 为台风年发生率。

台风年发生率可以通过平稳泊松分布表示^[18],并通过极大似然估计计算, t 内发生 N 次台风的概率模型为:

$$P(N, t) = \frac{(\lambda t)^N}{N!} e^{-\lambda t} \quad (t > 0, N = 0, 1, 2, \dots) \quad (25)$$

故需知道台风年发生率的数学期望 λ , 可通过样本总量 N 及记录的总年数 t , 得:

$$\lambda = \frac{N}{t} \quad (26)$$

2 模拟与分析

对于台风作用下极值降雨强度的计算,采用

的方法为利用台风全路径模型合成并模拟大量的台风事件,然后利用 Monte Carlo 数值模拟方法不断进行抽样,每一组抽样数据当作一次台风过程并放入台风风场模型及降雨模型进行台风降雨数值模拟,每次模拟过程可以得到一个最大降雨强度,经过多次模拟后可以得到一组最大极值降雨强度,称之为最大极值降雨强度序列。最后,根据最大时极值降雨序列,利用极值降雨概率分布模型完成特定研究地区不同重现期下台风时极值降雨的预测。

本研究选定香港地区(22. 3°N, 114. 17°E)为研究点,以研究点为中心,半径 250 km 内模拟圆为研究区域。通过统计得出 73 a 间,经过香港地区模拟圆内台风出现 206 次,即 $\lambda = 206/73 = 2.82$ 。所用数据来自中国气象局提供的《热带气旋年鉴》从 1949—2021 年共计 73 a 的西北太平洋海域热带气旋检测数据。

首先由台风全路径模型^[17]生成 15 000 次大陆沿海西北太平洋区域台风事件,其中,香港地区模拟圆内有效台风次数 1 450 次,由台风全路径模型生成的台风关键参数包括:台风的经纬度、中心压差、移动速度、移动方向(正东为 0°,逆时针为正)、最大风速半径。

其中,台风关键参数数据间隔为 6 h,每次台风的步数由强度模型^[17]控制,取值不等,某次随机模拟台风关键参数见表 1 所列。

表 1 随机模拟台风关键参数

纬度/ (°)	经度/ (°)	中心压 差/hPa	移动速 度/(km/h)	移动方 向/(°)	最大风速 半径/km
22.2	115.8	17	9.1	170.5	137.8
22.3	115.3	14	10.1	146.8	78.8
22.6	114.8	12	11.7	142.0	70.0
23.0	114.3	9	16.6	137.2	162.5
23.6	113.7	7	14.7	99.4	100.1
24.4	113.5	7	33.6	83.4	135.6

将 1 450 次台风的关键参数依次代入到上文提到的台风风场模型与降雨模型中,分别计算研究点的风速与降雨强度,从而得到研究点的极值降雨强度序列,根据极值降雨强度序列拟合得到极值 I 型分布的模型参数: α 为 0.060 6, γ 为 31.444 9;极值 III 型分布的模型参数: α 为 56.405 8, β 为 2.575 0, γ 为 -9.112 6。通过拟合从而得到各极值类型的累计分布函数(cumulative distribution function, CDF)。香港地区极值降雨强度

累计概率分布如图 1 所示。由图 1 可知,极值 III 型 Weibull 概率分布比极值 I 型 Gumbel 分布于经验分布更相似。

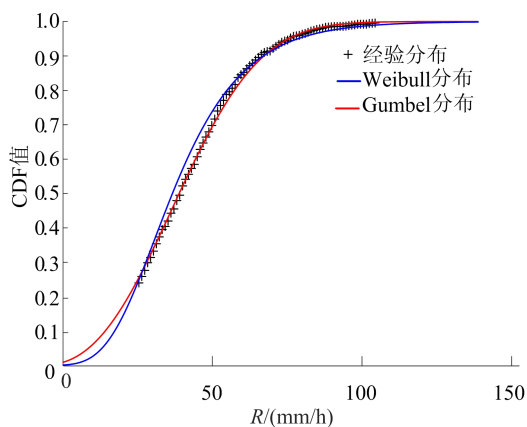


图 1 香港地区极值降雨强度累计概率分布

根据极值降雨概率分布模型推算出重现期分别为 20、50、100、200 a 的极值降雨强度。

同时由于深圳与香港地区地域相近,虽然并不能以深圳地区的规范公式作为香港地区的暴雨计算指导公式,但可以为该模型预测结果做评估比较。参考由深圳市气象局发布的最新暴雨强度公式,公式根据深圳国家基本气象站 1961—2014 年共 54 a 的降水记录进行曲线拟合并根据误差分析选择最优得到。计算公式如下:

$$R = \frac{8.701(1+0.594\lg P)}{(t+11.13)^{0.555}} \quad (27)$$

其中: R 为暴雨强度; P 为重现期; t 为累计时间。

香港地区不同重现期下的极值降雨强度见表 2 所列。

表 2 香港地区不同重现期下的极值降雨强度 单位:mm/h

数据类型	分布类型	重现期			
		20 a	50 a	100 a	200 a
数值模拟	极值 I 型	80.48	95.85	107.38	118.86
数值模拟	极值 III 型	87.58	95.76	101.29	106.39
暴雨公式(深圳)	极值 I 型+最小二乘法	84.00	93.12	99.48	115.55

数值模拟计算得到的极值降雨强度与深圳地区暴雨公式的计算结果整体一致。参考历史数据,上海台风研究所出版的热带气旋图集中记录了 1949—2000 年共 52 a 极值降雨强度观测数据统计结果,52 a 来香港地区极值降雨强度在 95 mm/h 左右,与模拟预测值基本一致。同时,由

模拟计算结果可以看出,极值 III 型概率分布模型下的极值降雨强度模拟结果在低重现期时表现更好,极值 I 型在高重现期时表现更好。

3 结 论

本文主要研究台风作用下的极值降雨强度预测方案。采用 TCR 模型结合蒙特卡罗技术推测出地区的极值降雨强度。以香港地区为算例,分别计算不同极值分布下的极值降雨强度,对比深圳地区室外排水规范中的暴雨强度计算公式。同时,查询中国气象局上海台风研究所发布时极值降雨强度数据,结果与方案模拟的极值降雨强度基本一致。结果表明,该模型可以较好地预测台风作用下的极值降雨强度,且不需要大量历史降雨数据,能够为沿海地区台风降雨灾害危险性分析、城市室外排水系统工程的规划与设计提供一定的参考。

[参 考 文 献]

- [1] RAPPAPORT E N, BLANCHARD B W. Fatalities in the United States indirectly associated with Atlantic tropical cyclones[J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 2016, 97(7): 1139-1148.
- [2] KNUTSON T R, TULEYA R E. Impact of CO₂-induced warming on simulated hurricane intensity and precipitation: sensitivity to the choice of climate model and convective parameterization[J]. Journal of Climate, 2004, 17(18): 3477-3495.
- [3] EMANUEL K A. Downscaling CMIP5 climate models shows increased tropical cyclone activity over the 21st century[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences, 2013, 110(30): 12219-12224.
- [4] 上海市政工程设计研究总院(集团)有限公司. 室外排水设计标准: GB 50014—2021[S]. 北京: 中国计划出版社有限公司, 2021: 104.
- [5] TULEYA R E, DEMARIA M, KULIGOWSKI R J. Evaluation of GFDL and simple statistical model rainfall forecasts for US landfalling tropical storms[J]. Weather and Forecasting, 2007, 22(1): 56-70.
- [6] LONFAT M, ROGERS R, MARCHOK T, et al. A parametric model for predicting hurricane rainfall[J]. Monthly Weather Review, 2007, 135(9): 3086-3097.
- [7] LANGOUSIS A, VENEZIANO D. Theoretical model of rainfall in tropical cyclones for the assessment of long-term risk[J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2009, 114(D2): D02106.
- [8] EMANUEL K, SUNDARARAJAN R, WILLIAMS J. Hurricanes and global warming: results from downscaling IPCC AR4 simulations[J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 2008, 89(3): 347-368.

(下转第 427 页)

- netometry using nitrogen-vacancy center in diamond integrated with optical vortex beam[J]. *Nano Letters*, 2020, 20(11):8267-8272.
- [4] 宁伟光, 张扬, 李中豪, 等. 金刚石 NV⁻色心系自旋相干动力学解耦[J]. *量子光学学报*, 2019, 25(2):215-220.
- [5] GAEBEL T, DOMHAN M, WITTMANN C, et al. Photochromism in single nitrogen-vacancy defect in diamond[J]. *Applied Physics B*, 2006, 82(2):243-246.
- [6] SHIELDS B J, UNTERREITHMEIER Q P, LEON N D, et al. Efficient readout of a single spin state in diamond via spin-to-charge conversion [J]. *Physical Review Letters*, 2015, 114(13):400-409.
- [7] SIYUSHEV P, NESLADEK M, BOURGUOIS E, et al. Photoelectrical imaging and coherent spin-state readout of single nitrogen-vacancy centers in diamond [J]. *Science*, 2019, 363(6428):728-731.
- [8] LI D, DU B, CHEN X, et al. Low power charge state depletion nanoscopy of the defect in diamond with a pulsed laser excitation[J]. *Optics Letters*, 2020, 45(3):730-733.
- [9] DHOMKAR S, HENSHAW J, JAYAKUMAR H, et al. Long-term data storage in diamond[J]. *Science Advances*, 2016, 2(10):e1600911.
- [10] GEISELMANN M, MARTY R, ABAJO F, et al. Fast optical modulation of the fluorescence from a single nitrogen-vacancy centre[J]. *Nature Physics*, 2013, 9:785-789.
- [11] JENSEN K, LEEFER N, JARMOLA A, et al. Cavity-enhanced room-temperature magnetometry using absorption by nitrogen-vacancy centers in diamond[J]. *Physical Review Letters*, 2014, 112(16):160802.
- [12] MEIRZADA I, HOVAV Y, WOLF S A, et al. Negative charge enhancement of near-surface nitrogen vacancy centers by multicolor excitation[J]. *Physical Review B*, 2018, 98(24):245411.
- [13] MEIRZADA I, WOLF S A, NAIMAN A, et al. Enhanced spin state readout of nitrogen-vacancy centers in diamond using IR fluorescence [J]. *Physical Review B*, 2019, 100(12):125436.
- [14] ZHANG Q, GUO Y, JI W, et al. High-fidelity single-shot readout of single electron spin in diamond with spin-to-charge conversion [J]. *Nature Communications*, 2021, 12(1):1529.
- [15] QIAN P, LIN X, ZHOU F, et al. Machine-learning-assisted electron-spin readout of nitrogen-vacancy center in diamond[J]. *Applied Physics Letters*, 2021, 118(8):084001.
- [16] ROBLEDO L, BERNIEN H, SAR T, et al. Spin dynamics in the optical cycle of single nitrogen-vacancy centres in diamond[J]. *New Journal of Physics*, 2011, 13(2):119-126.
- [17] JI P, DUTT M. Charge state dynamics of the nitrogen vacancy center in diamond under 1064-nm laser excitation [J]. *Physical Review B*, 2016, 94(2):024101.

(责任编辑 胡亚敏)

(上接第 410 页)

- [9] ZHU L, QUIRING S M, EMANUEL K A. Estimating tropical cyclone precipitation risk in Texas[J]. *Geophysical Research Letters*, 2013, 40(23):6225-6230.
- [10] LU P, LIN N, EMANUEL K, et al. Assessing hurricane rainfall mechanisms using a physics-based model: hurricanes Isabel (2003) and Irene (2011)[J]. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 2018, 75(7):2337-2358.
- [11] FELDMANN M, EMANUEL K, ZHU L, et al. Estimation of Atlantic tropical cyclone rainfall frequency in the United States[J]. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 2019, 58(8):1853-1866.
- [12] XI D, LIN N, SMITH J. Evaluation of a physics-based tropical cyclone rainfall model for risk assessment [J]. *Journal of Hydrometeorology*, 2020, 21(9):2197-2218.
- [13] GORI A, LIN N, SMITH J. Assessing compound flooding from landfalling tropical cyclones on the North Carolina coast[J]. *Water Resources Research*, 2020, 56(4):e2019WR026788.
- [14] HU C X, TAM C Y, LI X W, et al. The importance of future urban development in hourly extreme rainfall projections-comparing global warming and urbanization forcing over the Pearl River Delta region[EB/OL]. (2021-06-23). <http://doi.org/10.2103/rs.3.rs-622932/v1>.
- [15] YAN M, 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, 67:437-448.
- [16] HOLLAND G J. An analytic model of the wind and pressure profiles in hurricanes [J]. *Monthly Weather Review*, 1980, 108(8):1212-1218.
- [17] HUANG W, LIU D, SHAO M. Stochastic simulation of tropical cyclone tracks in the northwest pacific region with classification model[J]. *Journal of Tropical Meteorology*, 2020, 26(1):47-56.
- [18] 周华. 基于边界层模型的台风降水模拟与危险性分析[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学, 2017.
- [19] 李晓雨. 三参数 Weibull 分布参数估计方法研究[D]. 北京:北京交通大学, 2012.
- [20] BATTIS 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.

(责任编辑 胡亚敏)