

DOI:10.13232/j.cnki.jnju.2026.02.007

台风“山竹”过程中阵风因子特征

李 丹, 张 宁*, 贾恒墨, 胡冰雁, 开塞尔·可热米拉

(南京大学大气科学学院, 南京, 210023)

摘要:阵风因子作为表征阵风强度的指标之一,常用于分析台风过程中的阵风特性.基于深圳石岩气象探测基地 356 m 高塔 13 层的二维超声风数据,对台风“山竹”过程的阵风因子的特征进行分析.结果表明,阵风因子主要分布在 1~1.75,且随着高度的增加,阵风现象逐渐消失.阵风因子在台风登陆过程中有明显的时间变化特征,在强台风阶段,因台风中心距梯度塔较远、平均风速较低,阵风因子表现相对较大,台风登陆前后明显减小,转为热带风暴后明显增大.阵风因子随风速的增大而减小,在大风背景下,阵风因子趋近于 1;不同高度层的阵风因子与十分钟平均风速均呈显著负相关,而同层相关性更强.此外,在低层、低风速背景下阵风现象更显著.在主导风向(偏北和偏东)下阵风因子较小,而偏南风 and 偏西风背景下,阵风出现频数少但强度大,风向在 157.5°~292.5°范围内,低层的阵风因子占比约 55%,并且阵风因子较大时,在 10 m 和 20 m 高度层有明显的风向转变.

关键词:阵风因子,台风“山竹”,深圳梯度塔,风向特征

中图分类号:P404

文献标志码:A

Characteristics of gust factors during typhoon Mangkhut

Li Dan, Zhang Ning*, Jia Huanmo, Hu Bingyan, Kaisar·Kirmilla

(School of Atmospheric Sciences, Nanjing University, Nanjing, 210023, China)

Abstract: The gust factor, an indicator of gust intensity, is widely used to analyze gust characteristics during typhoon events. This study analyzes the gust factors during typhoon Mangkhut using 13-level two-dimensional ultrasonic wind data obtained from the Shenzhen Meteorological Gradient Tower. The results show that the gust factor primarily ranges from 1 to 1.75, and the gust intensity gradually decreases with increasing height. The gust factor is larger during the severe typhoon due to the low mean wind speed resulting from the typhoon center being located at a considerable distance from the tower, decreases significantly with the approach of landfall, and increases again after transitioning into a tropical storm. The gust factor decreases with increasing wind speed and approaches 1 under high wind speed conditions. It is also negatively correlated with the 10-minute mean wind speed across layers, with stronger correlations within the same layer. The gust factor is more pronounced in the lower layers and under low wind speed conditions. The gust factor is lower under the dominant wind directions (northerly and easterly), but higher under southerly and westerly winds, despite their lower frequency. In the wind direction range of 157.5° to 292.5°, the values in the lower layers account for approximately 55% of the total. At higher gust factor values, the wind direction shifts noticeably at 10 m and 20 m.

Keywords: gust factor, typhoon Mangkhut, the Shenzhen Meteorological Gradient Tower, wind direction characteristics

基金项目:国家自然科学基金(42275065)

收稿日期:2025-09-03

* 通信联系人, E-mail: ningzhang@nju.edu.cn

台风是影响我国最严重的气象灾害之一^[1]. 随着全球气候变化的加剧,台风发生的频率和强度均有所增加^[2]. 台风带来的强风、暴雨和风暴潮不仅直接威胁人民的生命财产安全,而且对受灾地区的农业、工业、交通、电力等各个领域都会造成巨大影响^[3-4]. 近年来,我国广东、浙江受台风影响严重^[5],造成了严重的直接经济损失,并威胁生命安全^[6].

台风中的强阵风的瞬时性和不规则性,进一步加剧了台风灾害的复杂性、不可预测性和破坏力. 大气科学名词审定委员会(2009)将阵风定义为风速在短时间内(通常为几秒至几十秒)突然增大或减小的现象,诸多纪录表明,阵风对台风的灾害性影响突出. 台风“米雷”(1991)造成的人员死亡中,31%死于风力冲击,30%死于建筑物倒塌或被风吹倒的障碍物^[7],直接威胁生命安全. 台风“海燕”(2013)期间,超强阵风导致菲律宾塔克洛班近90%的建筑受损^[8],严重破坏基础设施. 台风“杜苏芮”对福建省晋江市的园林绿化造成毁灭性破坏,进一步影响了生态环境和城市交通^[9].

阵风因子是瞬时风和平均风的比值,是常用的表征阵风强度的指标之一. 作为风的阵性特征的数学统计参数,阵风因子常用于研究台风的风阵性,而不同台风过程的阵风特性存在着一定的差异. 肖辉等^[10]对台风“妮姐”登陆期间的近地层风特性进行分析发现,阵风因子与风速呈负相关关系,尤其是在风速小于 $10 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时;风速达到六级之后,阵风因子不随风速大小产生趋势变化^[11-12]. 在垂直方向上,Zhou et al^[13]分析“天鸽”和“山竹”台风过程,发现阵风因子在不同高度层上呈现高斯分布. Cao et al^[14]对台风“鸣蝉”影响期间的边界层数据进行分析后指出,东风的阵风因子大于西风. Fang et al^[15]发现,台风“凡亚比”和“鲇鱼”影响期间,风向为 200° 左右的阵风因子小于其他风向. Chen et al^[16]发现,在不同类型的下垫面上,阵风因子随高度的变化规律存在差异,在光滑下垫面上,幂函数拟合效果更优,而在粗糙下垫面上,对数拟合更具适用性. Zhou et al^[17]对比台风“天鸽”和“雷伊”不同站点的观测数据,发现近海地区的阵风因子明显高于沿海地区. 蔡菊珍等^[18]发现台风“利奇马”过程中,阵风因子在台

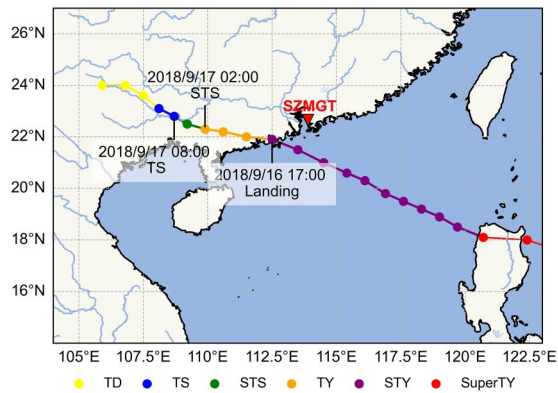
风前期和大风期较小,在后期增大. 除了基于实际观测数据的分析,学者们也通过模式模拟风场,进一步分析局部区域内的阵风因子特征. Yang et al^[19]基于WRF-PALM模式,发现狭窄的街道和密集的建筑物的复杂化会增大阵风因子. Liu et al^[20]发现龙卷尺度涡旋盛行区域的地面阵风因子普遍高于其他区域,尤其在眼墙区域. Li et al^[21]通过风洞试验,揭示了不规则抬升建筑在不同风向下对行人高度处阵风风环境的复杂影响.

当前,阵风的研究大多基于历史气象数据和单点观测实验. 各类观测平台的资源是有限的,台风实际观测资料也较少,相关研究大多依托气象卫星和东南沿海的常规观测站^[22],特别是对台风的多层观测数据更稀缺. 深圳国家气候观象台石岩气象观测梯度塔的高度为356 m,设置了常规气象要素、雷电、温室气体、通量等观测^[23],其探测资料弥补了各种探测设备在近地层探测精度不足的缺点.

2018年9月台风“山竹”正面登陆深圳地区,石岩基地的高塔探测获取了第一手的台风登陆数据,为通过观测资料研究台风的阵风特性提供了帮助. 本研究有助于深入认知台风的阵风特征,进一步理解台风风灾的形成机理,为沿海地区防灾减灾工作提供有力支持,提升对极端气象事件应对能力、减小潜在损失和灾害影响.

1 数据与方法

1.1 台风“山竹”概况 台风“山竹”于2018年9月7日在西北太平洋洋面上生成,迅速增强为超强台风,中心最大风速达到 $65 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. 9月16日“山竹”在中国广东沿海登陆并继续向内陆深入,强度逐渐减弱,9月17日停止编号. 图1展示了台风“山竹”的路径,数据来自CMA最佳路径数据集(tcdata.typhoon.org.cn)^[24-25],图中倒三角标记为深圳气象观测梯度塔(Shenzhen Meteorological Gradient Tower, SZMGT)的位置. 台风“山竹”给中国、菲律宾等多个国家和地区带来了严重的灾害. 在中国,它造成至少五人死亡,一人失踪,经济损失高达136.8亿元. 农作物受灾面积广,房屋倒塌和损坏严重,交通、电力和通信等基础设施也受到不同程度的破坏. 此外,台风还引发了风暴



TD: Tropical Depression (热带低压); TS: Tropical Storm (热带风暴); STS: Severe Tropical Storm (强热带风暴); TY: Typhoon (台风); STY: Severe Typhoon (强台风); SuperTY: Super Typhoon (超强台风)

图1 台风“山竹”路径

Fig. 1 Track of typhoon Mangkhut

潮、洪水等次生灾害,进一步加剧了灾害的严重程度.

1.2 资料背景 观测数据来源于SZMGT (22°38′59″N, 113°53′36″E),图2展示了观测塔的地理位置和本研究中所用数据的观测仪器布局,塔高356 m,其中有13个梯度层进行常规气象要素观测,16个梯度层进行大气环境观测,7个梯度层进行雷电观测,3个梯度层进行温室气体监测,4个梯度层进行通量观测,3个梯度层进行天气实景观测等.

1.3 数据及其质量控制 运用SZMGT 13层高度的二维超声风每10 s的数据,阵风因子通过10 s瞬时风速 V_{10s} 除以十分钟平均风速 V_{10min} 得到,如下式所示:

$$G = \frac{V_{10s}}{V_{10min}}$$

由于强天气过程台风“山竹”的影响,仪器设备的观测记录可能存在失真或延迟,因此需要对使用的数据进行质量控制.具体措施包括:(1)缺测值处理——基于大气运动的连续性,将研究时段内的缺测值替换为相邻两个时次非零观测值的平均值;(2)异常值处理——根据阵风因子的定义,阵风因子应大于1,但经过式(1)的处理后,个别结果出现小于1的情况,其误差主要来源于数据传输延迟,因此,对阵风因子小于1的值,同样采用相邻两个时次的值取平均进行插补.

2 结果与分析

2.1 阵风因子随时间的变化 图3展示了各高度层阵风因子随时间的变化,其中红色虚线为9月16日17:00,即台风登陆时,蓝色虚线为9月17日02:00,即转变为热带风暴时.由图可见,阵风因子在整个台风过程中呈现明显的波动特征.其中,海上强台风阶段,虽然台风的强度大,但台风中心距梯度塔较远,观测到的平均风速不大,因此阵风因子相对较大.台风登陆前后,观测点附近风速显著增大,湍流相对贡献减小,导致阵风因子明显减小.当台风减弱为热带(强)风暴后,平均风速减小,湍流占比增大,阵风因子明显增大.阵风因子在不同高度层的变化趋势是相同的,变化幅度不同.热带(强)风暴阶段的阵风因子增大幅度随着高度的升高而减小,但海上强台风阶段的阵风因子增大幅度在中高层是显著的.

2.2 阵风因子随风速的变化 根据《风力等级》国家标准对风速进行划分,分析整体和每层的阵风因子随风速的变化,考虑风速大于 $32.7 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的风频数较小,将其划分到12级.下表为不同风级的频数和占比,可以看出,风速主要在2~6级.

图4为阵风因子在不同风速等级上的分布,其中横坐标参照下表中的风速等级划分.图4a为整体的阵风因子在不同风速等级上的分布,图4b~n分别表示各高度层的阵风因子在不同风速等级上的分布.整体来看,阵风因子随着风速的增大而减小,较大值出现在1级和2级风背景下;大风背景下,阵风因子分布更加稳定,趋近1,



图2 (a)地理位置(Google地图);(b)观测布局
Fig. 2 (a) The geographical location (Google Maps), (b) the observation layout

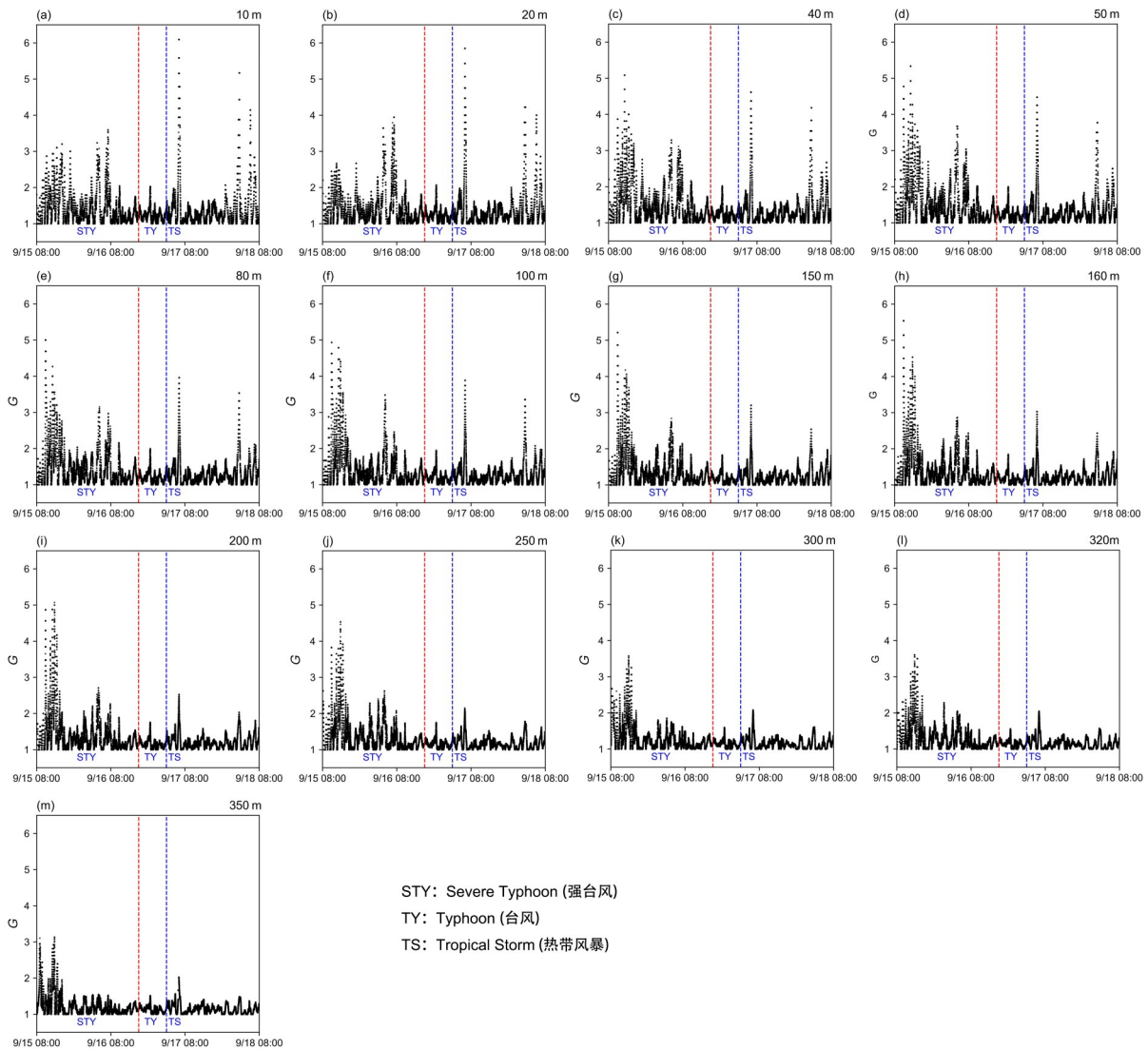


图 3 各高度层阵风因子的时间变化

Fig. 3 Time series of gust factors at different height levels

与王志春等^[11]的研究结果一致. 在低层(10, 20, 40和50 m), 阵风因子大值多出现在1级和2级风背景下, 说明在低层和低风速条件下, 相对湍流强度较高, 阵风现象更显著. 在中高层(80 m及以上), 阵风因子大值多出现在2级风背景下, 但其值相较于低层较小. 总体上, 中低风速条件下, 低层受粗糙下垫面影响, 湍流强度相对较高, 阵风现象显著; 随着高度升高, 下垫面摩擦减弱, 平均风速增大, 相对湍流强度降低, 阵风因子存在大值, 但整体幅度小于近地层.

接着分析阵风因子与十分钟平均风速之间的关系, 将两个数据集进行标准化, 观察两者的变化

趋势. 图 5a 为三个高度层(10, 100, 350 m)的阵风因子与十分钟平均风速在台风不同阶段的分布. 在台风登陆前, 观测塔记录的风速处于较小值, 但阵风因子相对较大; 在台风登陆前后风速较大时, 阵风因子较小; 在台风减弱为强热带风暴后, 风速出现极小值, 阵风因子出现极大值.

针对上述特点, 绘制如图 5b 所示的阵风因子与十分钟平均风速之间的相关系数. 可以发现, 每层之间的阵风因子与十分钟平均风速的相关系数都为负值, 即不同层之间的十分钟平均风速也会对阵风因子的变化产生相反作用; 对角线上的值大多为每行的最小值, 即同层的阵风因子与十

表 各风级频数及占比

Table Frequency and proportion of each wind force level

风级	频数	占比
1	12649	3.76%
2	44310	13.16%
3	52447	15.58%
4	74201	2.04%
5	62209	18.48%
6	36484	10.84%
7	22366	6.64%
8	14689	4.36%
9	7971	2.37%
10	5953	1.77%
11	2794	0.83%
12及以上	632	0.19%

分钟平均风速间存在明显的负相关关系。

2.3 阵风因子随风向的变化 将风向按八个方位划分为北、东北、东、东南、南、西南、西和西北,分析整体和每层的阵风因子的分布情况.图6a为整体阵风因子在八个风向上的分布,其中橙色线为每组的中位数,蓝线为平均值线(图6b同).由图可知,台风“山竹”过程中,梯度塔的主导风向为偏北和偏东,即西北风、北风、东北风、东风和东南风的风频较高,占比约为99.55%.在这五个风向上,阵风因子主要分布在1~2.在偏南风 and 偏西风背景下,阵风因子出现频数极低,但数值较大,即在偏南至偏西风背景下阵风现象显著.基于此,进一步分析风向在157.5°~292.5°的阵风因子分布情况,图6b为该风向上的阵风因子分布.可以发现,风向在157.5°~292.5°时,低层(10, 20, 40, 50 m)的阵风因子占比约为55%,且其值

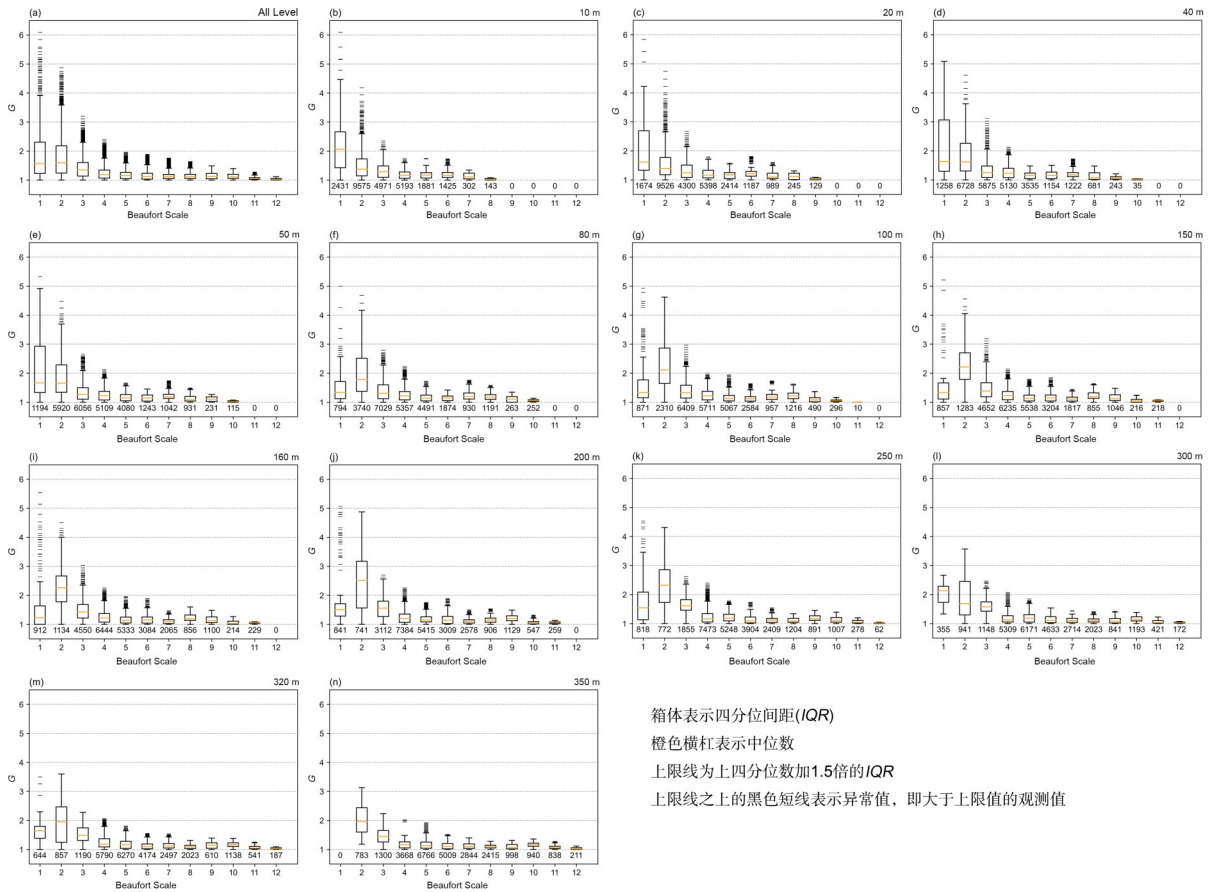


图4 阵风因子在风速上的分布:(a)整体阵风因子的风速分布,(b~n)各高度层阵风因子的风速分布

Fig. 4 Distribution of gust factors with wind speed:(a) the overall distribution of gust factors with wind speed, (b~n) the gust factors distribution with wind speed at different height levels

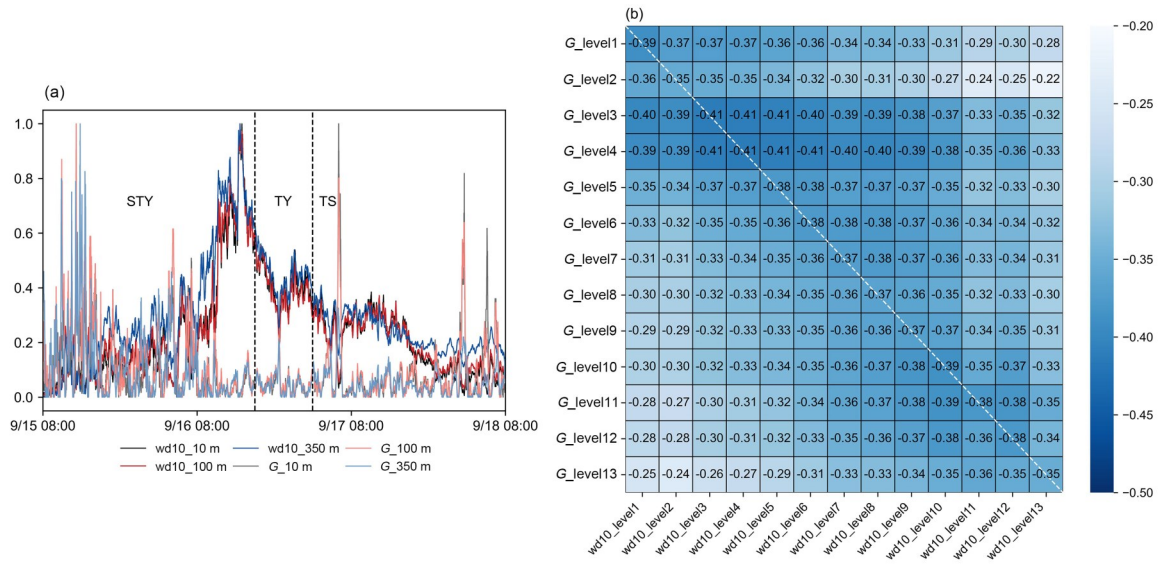


图 5 (a) 阵风因子与十分钟平均风速随时间的分布; (b) 阵风因子与十分钟平均风速的线性相关系数
 Fig. 5 (a) Distribution of gust factor and 10 min average wind speed over time, (b) linear correlation coefficient between gust factor and 10 min average wind speed

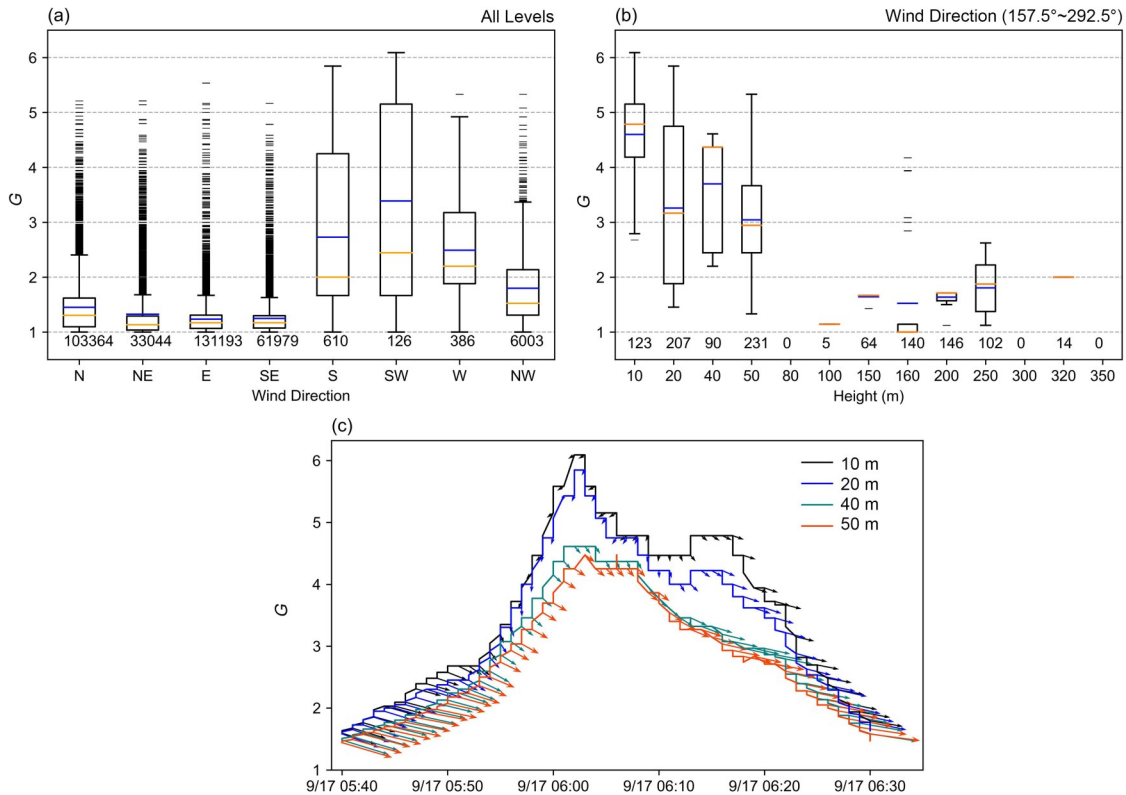


图 6 (a) 阵风因子在八个风向上的分布, (b) 阵风因子在 157.5°~292.5° 的分布, (c) 低层阵风因子和风场
 Fig. 6 (a) Distribution of gust factors in eight wind directions, (b) distribution of gust factors in the wind direction range 157.5°~292.5°, (c) gust factors and wind field at lower levels

较大,表明该风向下低层的阵风现象较为显著.观测塔西侧及南北两侧存在建筑群,在台风“山竹”由观测塔东南侧移动至西侧的过程中,低层风速受到建筑群阻挡和绕流的影响,局地湍流增强,从而增强阵风现象.

进一步分析低层风场,图6c为9月17日05:40—06:30的低层风场和阵风因子的分布,其中箭头表示当前时刻的风速.结合台风过程,该时段处于热带风暴阶段,可以发现,阵风因子较大(>4)时是偏南风.值得注意的是,在10 m和20 m阵风因子突增前后出现明显的风向转化,从偏东风转为偏西风,再转为偏南风;随后,风向转为偏东风,伴随阵风因子的减小.这表明低层阵风峰值的出现与局地风向波动和湍流扰动密切相关.低层风场受局地扰动、建筑群绕流和台风风场的影响,局地扰动的出现导致风向快速转换,增强瞬时风速波动,导致阵风强度增强;局地湍流扰动减弱或平均风速增加,相对湍流强度下降,阵风峰值

被“稀释”,阵风因子减小.

2.4 阵风因子随高度变化特征 阵风因子反映了风速波动的强度,是《建筑结构荷载规范》GB50009-2012中用于计算风载荷的重要参数之一,因此,不同高度层的阵风因子能够为建造建筑物提供有效的参考.图7a为阵风因子在各高度层上的概率密度图像,其中,绿线是每一层密度峰值的连线.可以发现,阵风因子主要分布在1~1.75,并且随着高度的增加,阵风因子逐渐趋近于1,同时,其分布密度也增大.此外,每层的阵风因子呈现右偏态,与Zhou et al^[26]关于阵风的偏度系数S为正值的研究结果一致.进一步分析阵风因子随高度的变化特征,图7b展示了各高度层阵风因子的平均值、中位数和平均值在高度上的变化率.可以发现,平均值和中位数的变化幅度不同,但趋势相似.对于平均值,在150 m及以下高度层的垂直变化率更大,量级为 10^{-3} ,在150~250 m高度层,垂直变化率相对较小,量级为 10^{-4} .

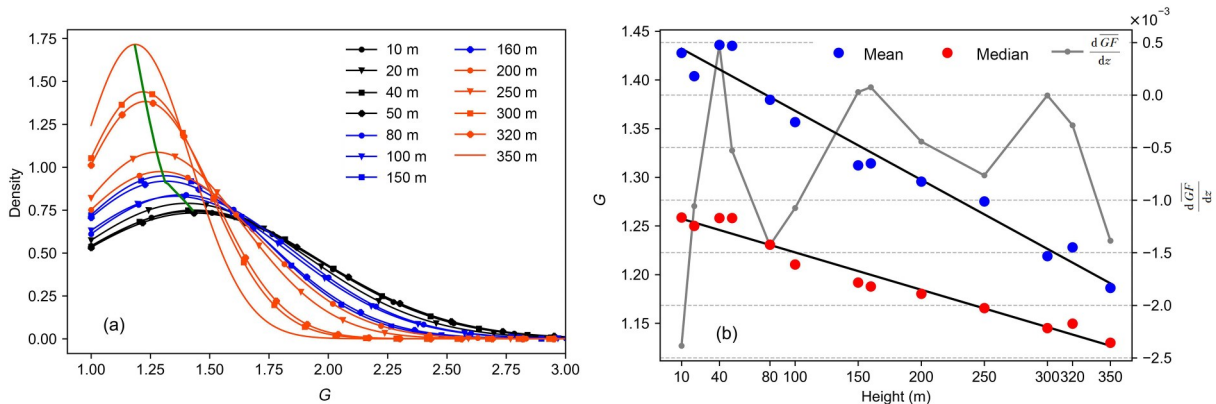


图7 (a)各高度层阵风因子的概率密度函数;(b)各高度层阵风因子的平均值、中位数和平均值对高度的变化率
Fig.7 (a) Probability density functions of gust factors at each height layer, (b) mean and median gust factors and the vertical gradient of the mean gust factors

3 结论

本研究运用深圳气象梯度观测塔13层二维超声风数据,针对台风“山竹”过程中的阵风因子特征进行了分析,得出以下主要结论.

(1)阵风因子在强台风阶段较大,台风登陆前后明显减小,热带(强)风暴后明显增大.在热带风暴阶段,阵风因子大值时是偏南风,且在10 m和20 m阵风因子突增前后出现明显的风向转化,

从偏东风转为偏西风,再转为偏南风;随后风向转为偏东风,伴随阵风因子的减小.

(2)阵风因子随着风速的增大而减小,在大风背景下,阵风因子更加稳定,趋近于1.在低层和低风速背景下,阵风因子较大,阵风现象显著;在中高层(80 m及以上),阵风因子在2级风背景下较大,但小于低层.

(3)阵风因子在主导风向(偏北和偏东)数值

较小,而在偏南风 and 偏西风背景下,频数极低,但数值较大.当风向在 $157.5^{\circ}\sim 292.5^{\circ}$ 时,低层的阵风因子占比约55%,且其值较大.

(4)不同层之间的阵风因子与十分钟平均风速的相关系数都为负值,且线性相关系数热力图的对角线的值大多为每行的最小值,即同层的阵风因子与十分钟平均风速间存在明显的负相关.

(5)阵风因子主要分布在1~1.75,呈现右偏态分布,在150~250 m,平均值的变化率相对较小.

参考文献

- [1] Liu D F, Pang L, Xie B T. Typhoon disaster in China: Prediction, prevention, and mitigation. *Natural Hazards*, 2009, 49(3): 421—436.
- [2] 周波涛,钱进. IPCC AR6 报告解读: 极端天气气候事件变化. *气候变化研究进展*, 2021, 17(6): 713—718.
- [3] 田慧丽,张鼎茂,周荣生,等. 台风灾害下配电系统受损评估研究. *电网与清洁能源*, 2021, 37(12): 16—24.
- [4] 牛海燕,刘敏,陆敏,等. 中国沿海地区近20年台风灾害风险评价. *地理科学*, 2011, 31(6): 764—768.
- [5] Wang J, Zhu S R, Liu J M, et al. Frequency, intensity and influences of tropical cyclones in the Northwest Pacific and China, 1977—2018. *Sustainability*, 2023, 15(5): 3933.
- [6] 卢莹,赵海坤,赵丹,等. 1984—2017年影响中国热带气旋灾害的时空特征分析. *海洋学报*, 2021, 43(6): 45—61.
- [7] Yang Q S, Gao R, Bai F, et al. Damage to buildings and structures due to recent devastating wind hazards in East Asia. *Natural Hazards*, 2018, 92(3): 1321—1353.
- [8] Daniell J, Mühr B, Girard T, et al. Super Typhoon Haiyan/Yolanda-Report. CEDIM Forensic Disaster Analysis Group, 2015.
- [9] 福建省晋江市林业和园林绿化局. 台风“杜苏芮”对城市行道树的破坏及应对措施. *福建林业*, 2023(5): 15—17.
- [10] 肖辉,万齐林,刘显通,等. 台风“妮妲”(1604)登陆期间近地层风特性分析. *海洋气象学报*, 2017, 37(2): 42—50.
- [11] 王志春,植石群,丁凌云. 强台风“纳沙”(1117)近地层风特性观测分析. *应用气象学报*, 2013, 24(5): 595—605.
- [12] Wang X, Yao Z L, Guo Y, et al. Analysis of the near-ground wind field characteristics during Typhoon Soulik. *Applied Sciences*, 2024, 14(10): 4001.
- [13] Zhou Q J, Li L, Chan P W, et al. Vertical distribution characteristics of the typhoon gust factor based on a 356 m high meteorological gradient tower. *Atmospheric Research*, 2024, 304: 107360.
- [14] Cao S Y, Tamura Y, Kikuchi N, et al. A case study of gust factor of a strong typhoon. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2015, 138: 52—60.
- [15] Fang P Z, Huo T, Pan J J, et al. Variations in gust factor with wind direction and height based on the measurements from a coastal tower during three landfalling typhoons. *Tropical Cyclone Research and Review*, 2024, 13(3): 187—195.
- [16] Chen W C, Song L L, Zhi S Q, et al. Analysis on gust factor of tropical cyclone strong wind over different underlying surfaces. *Science China Technological Sciences*, 2011, 54(10): 2576—2586.
- [17] Zhou Q J, Li L, Fan S J, et al. Comparative study on characteristics of typhoon gusts in the coastal and offshore areas of the South China Sea. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 2023, 132: 103498.
- [18] 蔡菊珍,徐集云,邵鑫,等. 利奇马台风风场与湍流特征分析. *南京大学学报(自然科学)*, 2021, 57(5): 896—903.
- [19] Yang D H, Zhang N, Tang J. Impacts of urban morphology on typhoon-induced wind hazards at the pedestrian level. *Urban Climate*, 2025, 60: 102351.
- [20] Liu Q Y, Wu L G, Qin N N, et al. Wind gusts associated with tornado-scale vortices in the tropical cyclone boundary layer: A numerical simulation. *Frontiers in Earth Science*, 2022(10): 945058.
- [21] Li W X, Mak C M, Cai C Z, et al. Wind tunnel measurement of pedestrian-level gust wind flow and comfort around irregular lift-up buildings within simplified urban arrays. *Building and Environment*, 2024, 256: 111487.
- [22] 雷小途,张雪芬,段晚锁,等. 近海台风立体协同观测科学试验. *地球科学进展*, 2019, 34(7): 671—678.

- [23] 张春生,卢超,钟晓勇,等. 深圳气象梯度观测塔近地层通量数据初步分析. 气象科技进展,2019,9(3): 149—152.
- [24] Ying M, Zhang W, Yu H, et al. An overview of the China meteorological administration tropical cyclone database. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 2014, 31(2): 287—301.
- [25] Lu X Q, Yu H, Yu M, et al. Western North Pacific Tropical cyclone database created by the China meteorological administration. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2021, 38(4): 690—699.
- [26] Zhou Q J, Li L, Chan P W, et al. Observational study of wind velocity and structures during super typhoons and convective gales over land based on a 356 m high meteorological gradient tower. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 2023, 62(1): 103—118.

(责任编辑 杨可盛)