

强台风纳沙(1117)登陆过程的湍流特性分析

蒋承霖 黄浩辉 陈雯超 张光宇

(广东省气象防灾技术服务中心, 广州 510080)

摘要: 利用广东徐闻测风塔观测到的1117号强台风纳沙的三维超声测风数据, 采用三维分析法, 分析台风在登陆过程的近地层湍流特性, 得出以下结论: 1) 台风风速时程曲线呈明显“M”型双峰分布, 台风8级以上大风的风向按顺时针最大连续偏转了219°, 台风过程10 min最大风速为25.2 m/s, 0.1 s极大风速为36.2 m/s; 2) 台风过程8级以上强风的平均风攻角为0.9°; 3) 8级大风样本的湍流强度纵向为0.14、横向为0.12、垂直向为0.07, 三维方向的湍流强度之比 $lu : lv : lw = 1 : 0.86 : 0.5$; 4) 8级以上强风的 u 、 v 、 w 三维湍流积分空间尺度平均值分别为132、51、28 m; 5) 台风过境前后的大风区与台风中心的小风区的湍流谱样本均不满足-5/3律和各向同性假设。

关键词: 台风, 风攻角, 湍流特性

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2019.03.020

Turbulence Characteristics of the Landing Process of Severe Typhoon Nesat (1117)

Jiang Chenglin, Huang Haohui, Chen Wenchao, Zhang Guangyu

(Guangdong Meteorological Disaster Prevention Service Center, Guangzhou 510080)

Abstract: Based on the ultrasonic pulse data of the 1117 typhoon Nesat observed in Xuwen, Guangdong, we analyzed the surface layer turbulence characteristics of its landing using the vector analysis method. Results obtained are as follows: 1) the wind speed versus time curve of the typhoon showed “M” shape distribution. Direction of wind with velocity greater than 17.2 m/s could be altered up to 219° clockwise. The 10 min maximum velocity was 25.2 m/s and the 0.1 s maximum velocity was 36.2 m/s. 2) The average wind attack angle with velocity greater than 17.2 m/s was 0.9°. 3) Turbulence intensity of the samples with velocity greater than 17.2 m/s was 0.14 longitudinally, 0.12 horizontally, and 0.07 vertically, with three-dimensional turbulent intensity ratio being $lu : lv : lw = 1 : 0.86 : 0.5$. 4) u , v , w three-dimensional turbulence integral scale of the strong wind with velocity greater than 17.2 m/s was 132 m, 51 m, 28 m, respectively. 5) the turbulence spectrum samples of the strong wind before and after typhoon crossing, and the weak wind in the typhoon center, did not meet the -5/3 law and the assumption of isotropy.

Keywords: typhoon, wind attack angle, turbulence characteristics

0 引言

台风的破坏力极大, 是最严重的自然灾害之一。台风挟带狂风、暴雨, 导致大批房屋、建筑被毁, 城镇、农田受淹, 电力、交通、通讯中断, 并造成大量的人员伤亡和财产损失。我国是世界上受台风危害最甚的国家之一, 随着经济的快速发展, 近海和沿海大型工程结构朝着超长、高耸、大跨和柔性的方向发展, 这些建筑在设计、施工及营运各阶段均对抗风有着非常高的要求。因此, 摸清台风在近地层的湍流特性对建筑结构的设计及预防台风灾害等方面具有至关重要的意义。

国内外学者对台风进行了各方面的研究, 取得了

大量的成果。胡尚瑜等^[1]研究了不同时矩下近地台风的实测风特性; 谭晓伟等^[2]对超强台风桑美(2006)登陆前后低层风廓线进行了数值模拟分析; 肖仪清等^[3]基于4个台风过程中的长时间序列风速、风向观测数据, 分析研究了近地台风的湍流积分尺度和脉动风速谱等脉动特性; 宋丽莉等^[4]研究了“鹦鹉”台风经过澳门友谊大桥的湍流特性; 史文海等^[5]基于2008年影响温州的台风海鸥、凤凰和蔷薇的实测风场资料, 分析了不同平均时距下近地台风的湍流特性; 王蓉等^[6]利用广东省沿海海洋站及近海浮标的实测资料, 对1208号台风韦森特的特性进行了分析和探讨; 许雯等^[7]利用1011号台风凡亚比高分辨率数值模拟资料及合力散度方程, 诊断分析了台风凡亚比的合力散度水平分布及演变过程; 王旭等^[8]研究了台风梅花的近地层脉动风速功率谱及相干性; 钱燕珍等^[9]利用雷达资

收稿日期: 2018年11月12日; 修回日期: 2019年3月12日

第一作者: 蒋承霖(1985—), Email: 47261975@qq.com

料对强台风海葵登陆前后强度变化进行了分析。

由于台风路径的不确定性，要探测到台风中心附近的强风数据并不容易，华南地区用三维超声测风仪观测到的完整台风样本仍然较少，本文基于捕捉到的1117号强台风纳沙登陆过程的三维超声测风数据，从三维方向探讨强台风登陆过程的近地层湍流脉动特性，观测塔距离台风中心最近时仅有18 km，取得了台风登陆过程较为完整的记录，观测数据对台风特有的强风代表性较好，有利于摸清华南沿海登陆台风的风环境和风特性参数，从而保障沿海的工程安全，为工程抗风设计、施工及营运各阶段所需的关键参数提供依据。

1 观测设置和台风过程

1.1 观测位置和仪器

观测塔设置在广东省湛江市徐闻县南山镇三塘村，塔基海拔4 m，塔高112 m，90 m高度安装了英国Gill公司生产的WindmasterPro三维超声测风仪。

WindMasterPro超声测风仪最大风速量程为65 m/s，最大采样频率为32 Hz，本观测以10 Hz采样频率进行三维瞬时风速数据记录。

1.2 台风过程概况

1117号强台风纳沙于2011年9月25日05时（北京时间，下同）加强为强热带风暴级，于25日夜间加强为台风级，并于27日07时在菲律宾吕宋岛沿海地区登陆，登陆时中心附近最大风力为14级（45.0 m/s），随后台风继续向西北偏西方向移动，于27日下午进入南海东部海面，于29日早晨加强为强台风级，并于29日14时30分在海南文昌翁田镇沿海地区登陆，登陆时中心附近最大风力达14级（42.0 m/s）、中心最低

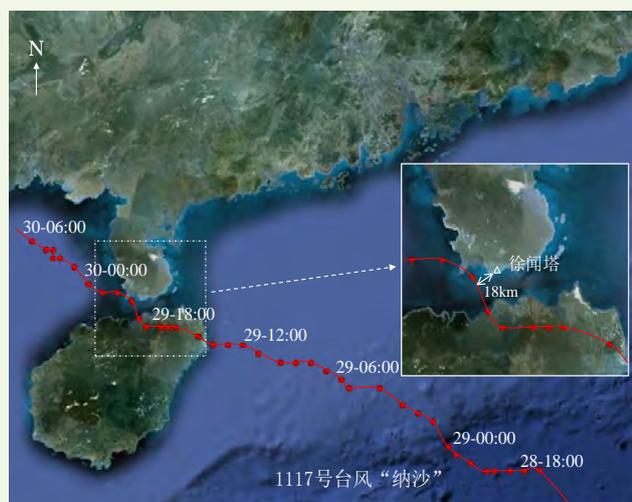


图1 台风纳沙过程路径示意图
Fig. 1 The track of Typhoon Nesat

气压为960 hPa（图1）。徐闻观测塔距离台风中心的最近距离约18 km，实测到的最大10 min平均风速为25.2 m/s，0.1 s极大风速为36.2 m/s。

根据该台风过程持续时间，在此筛选台风纳沙过程的分析数据样本开始于2011年9月29日06时10分—30日06时，共24 h的记录数据，重点分析8级及以上大风（10 min平均风速 ≥ 17.2 m/s）时段出现在2011年9月29日10时30分—30日02时10分。

2 数据处理和分析方法

2.1 基础数据处理

- 1) 子样划分：将超声风速仪记录的所有原始数据按10 min时距分割成多个子样本，每个子样本均有10 Hz \times 600 s=6000组三维风速风向记录。
- 2) 剔除无效和异常数据。
- 3) 有效数据完整率达95%的样本作为一个子样本。

2.2 平均风速和风向

如果实测三维风速 $u_x(t)$ 、 $u_y(t)$ 和 $u_z(t)$ 是定义在超声风速仪坐标下的三个实数序列，以10 min为基本时距分析，则水平平均风速 U 和风向角 Φ 分别为

$$U = \sqrt{\overline{u_x(t)^2} + \overline{u_y(t)^2}}, \quad (1)$$

$$\cos \Phi = \frac{\overline{u_x(t)}}{U}. \quad (2)$$

垂直风速方向与风速仪坐标 z 轴相同，因此垂直平均风速 W 为

$$W = \overline{u_z(t)}, \quad (3)$$

式中， $\overline{u_x(t)}$ 、 $\overline{u_y(t)}$ 和 $\overline{u_z(t)}$ 分别表示10 min时距样本的三维风速平均值。

在10 min时距内，纵向脉动风速分量 $u(t)$ 、横向脉动风速分量 $v(t)$ 和垂直脉动风速 $w(t)$ 可根据以下公式计算，结果作为脉动风速统计分析的数据基础

$$u(t) = u_x(t) \cos \Phi + u_y(t) \sin \Phi - U, \quad (4)$$

$$v(t) = -u_x(t) \sin \Phi + u_y(t) \cos \Phi, \quad (5)$$

$$w(t) = u_z(t) - W. \quad (6)$$

2.3 风攻角

风攻角指风的来流方向与水平面的夹角。风攻角对建筑结构物特别是柔性结构物的影响比较突出，其长时间作用会加速或加重结构的疲劳损坏。强风时，风攻角的改变可能对结构造成突然损伤甚至破坏。

2.4 湍流强度

湍流度反映了风的脉动强度，是确定结构脉动风荷载的关键参数，定义湍流度为10 min时距的脉动风

速均方根与水平平均风速的比值

$$I_i = \frac{\sigma_i}{U}, \quad i=u,v,w, \quad (7)$$

式中, σ_i 分别表示对应于脉动风速 $u(t)$ 、 $v(t)$ 和 $w(t)$ 的均方根, σ_i^2 相当于湍流脉动风速在 i 方向上的动能。

2.5 湍流积分尺度

湍流积分尺度的定义和计算根据Taylor冷冻假设^[10]

$$L_i = U \int_0^{\tau_{0.05}} r_i(\tau) d\tau, \quad i=u,v,w, \quad (8)$$

式中, L_i 、 r_i 分别表示 u 、 v 和 w 分量的积分长度和自相关系数, $\tau_{0.05}$ 表示自相关系数从1单调减小至0.05时对应的延迟时间。

2.6 湍流功率谱密度

湍流功率谱密度函数的工程模型有很多表达形式,我国桥梁抗风设计规范^[11]采用了用摩阻速度归一化的Simiu谱和Panofsky谱,根据Simiu谱和能量归一化原理应当存在 $\sigma_u^2 = 6u_*^2$ 。从大气边界层理论分析,摩阻速度只有在接近地面有限高度(约30 m)内基本为常数,而且前提条件是“纯机械湍流”,即浮力的作用可以忽略^[12]。桥梁结构高度一般超过30 m,因此不宜用摩阻速度无量纲化湍流功率谱密度函数模型。从表达“脉动能量”的角度出发,功率谱密度函数在全频段的积分等于脉动风速能量的总合,用脉动风速的方差对湍流功率谱密度归一化更合适,Simiu谱和Panofsky谱的脉动速度方差无量纲化形式^[13],其公式如下

$$\text{Simiu谱: } \frac{nS_u(f)}{\sigma_u^2} = \frac{200f}{6(1+50f)^{5/3}}, \quad (9)$$

$$\text{Panofsky谱: } \frac{nS_w(f)}{\sigma_w^2} = \frac{4f}{(1+4f)^2}, \quad (10)$$

式中, S_u 、 S_v 、 S_w 分别为三个脉动分量的功率谱密度函数; f 为莫宁坐标,定义为 $f=nZ/U$; σ_u 和 σ_w 分别表示脉动风速 $u(t)$ 和 $w(t)$ 对应于 U 的均方根; n 为频率; Z 为高度。

3 台风的湍流特性实测分析

3.1 台风测风数据的代表性判别

研究台风边界层脉动风场对大型结构建筑的影响主要是研究台风过程的强风时段的脉动风场特性。根据热带气旋等级划分标准和台风系统的风场结构特点,判断台风核心强风区域是否经过观测点的条件为同时满足以下两点: 1) 台风过程8级及以上大风(10 min平均风速 ≥ 17.2 m/s)的风向角连续偏转大于 120° ; 2) 台风过程出现8级及以上大风(10 min平均风速 ≥ 17.2 m/s)的风速时程曲线呈“M”型双峰分布,双峰之间的底部出现小于11 m/s(5级)的风速

(近地层),为台风眼区^[14]。

在徐闻测风塔观测的强台风纳沙8级(17.2 m/s)以上的大风时段出现在2011年9月29日10时30分—9月30日02时10分,台风8级以上大风的风向按顺时针连续偏转了 219° ,台风风速时程曲线呈明显“M”型双峰分布,双峰之间的底部风速小于11 m/s;由此可以判断台风核心强风区域经过徐闻测风塔观测点,其观测数据对台风特有的强风特性代表性较好。

3.2 平均风速、风向

徐闻测风塔记录的强台风纳沙过程在台风过境前的10 min最大风速为25.2 m/s,台风过境后的最大风速为22.3 m/s,台风中心小风期(风速小于11 m/s)持续时间达90 min,最小风速为4.9 m/s,0.1 s极大风速为35.2 m/s,出现在台风过境前(2011年9月29日11时50分)(图2)。

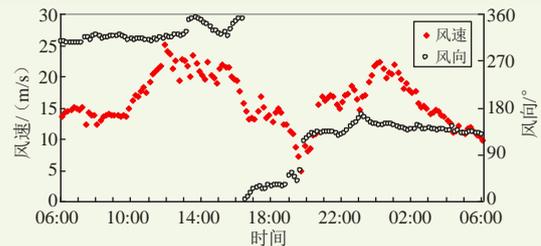


图2 台风纳沙过程的风速和风向
Fig. 2 Wind speed and direction of Typhoon Nesat process

台风8级以上大风过程的风向由登陆前的 307° ,沿顺时针方向偏转,最大时转为登陆后的 166° ,风向最大转换幅度达 219° 。

3.3 风攻角

从图3可见,强台风纳沙过境前后风攻角差异较大,其中表1给出了台风8级强风样本的平均风攻角,整个台风过程8级以上强风的平均风攻角为 0.9° 。台风过境前8级以上强风样本的风攻角均为负值,在 $-2.5^\circ \sim -0.11^\circ$ 范围内变化,平均值为 -1.4° ,最大风攻角为 -2.5° ,对应的风速为18.3 m/s,风向为 311° ;台风过境后8级以上强风样本的风攻角均为正

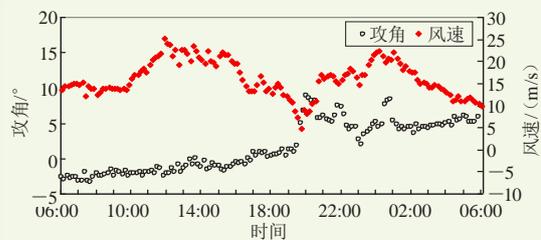


图3 台风纳沙过程的风速和风攻角
Fig. 3 Wind speed and wind attack angle of Typhoon Nesat process

表1 纳沙8级强风样本的平均风攻角
Table 1 Average wind attack angle with the velocity greater Than 17.2 m/s of Typhoon Nesat

风速等级	风况类型	样本个数	风攻角/°
≥8级	整个台风过程	55	0.9
	台风过境前	35	-1.4
	台风过境后	20	4.9

注：8级≥17.2 m/s，下同。

值，风攻角在3.5°~8.2°范围内变化，平均值为4.9°，最大风攻角为8.2°，对应的风速为20.4 m/s，对应的风向为149°。

3.4 湍流强度

图4给出强台风纳沙在纵向、横向和垂直向三维方向的湍流强度变化过程，湍流强度时程变化与风速时程变化有一定的相似性，在台风中心最小，在台风眼壁强风区附近出现最大值。8级大风样本的湍流强度纵向为0.14、横向为0.12、垂直向为0.07，三维方向的湍流强度之比为 $I_u : I_v : I_w = 1 : 0.86 : 0.5$ 。

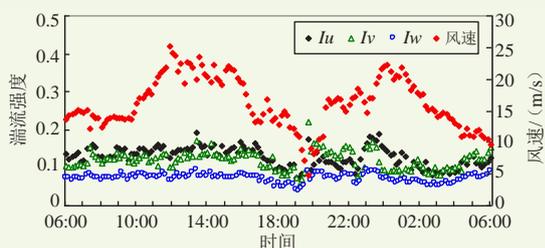


图4 台风“纳沙”过程的风速和三维方向湍流强度
Fig. 4 Wind speed and three-dimensional turbulence intensity of Typhoon Nesat process

3.5 湍流积分尺度

强台风纳沙三维湍流积分尺度在台风期间的时程变化呈“风期型双峰分布，与风速时程变化较为相似，但湍流积分尺度的变化要稍微滞后于风速变化，最低值出现在台风中心过后2 h（图5）。

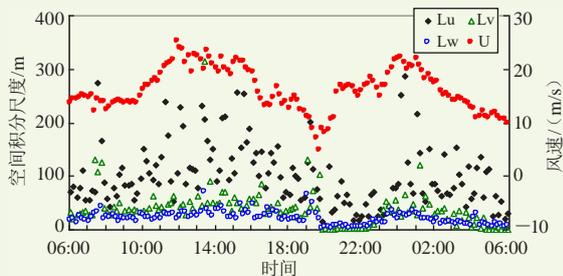


图5 台风“纳沙”过程的风速和三维方向湍流积分尺度
Fig. 5 Wind speed and three-dimensional turbulence integral scale of Typhoon Nesat process

强台风纳沙过程8级以上大风的湍流积分空间尺度平均值及比值见表2。8级以上强风的 u 、 v 、 w 三维湍流积分空间尺度平均值分别为132、51、28 m，比

值为1 : 0.38 : 0.21。在台风过程中，横向的湍流积分尺度最大，数值也很不稳定，纵向和垂直向的湍流积分尺度较小，数值相对稳定。

表2 台风纳沙过程的三维方向湍流积分尺度
Table 2 Three-dimensional turbulence integral scale of Typhoon Nesat process

风速等级	样本个数	L_u	L_v	L_w	比值
≥8级	55	132 m	51 m	28 m	1 : 0.38 : 0.21

3.6 功率谱密度

根据强台风纳沙三维超声风速资料，分别选取台风过境前、台风过境时以及台风过境后的大风样本，计算各向脉动风功率谱（图6）。

根据强台风纳沙的大风湍流谱样本，拟合区间1~4 Hz频率范围内，分析惯性子区（图中拟合区域）的湍流谱特征，可以发现，台风过境前大风样本的横

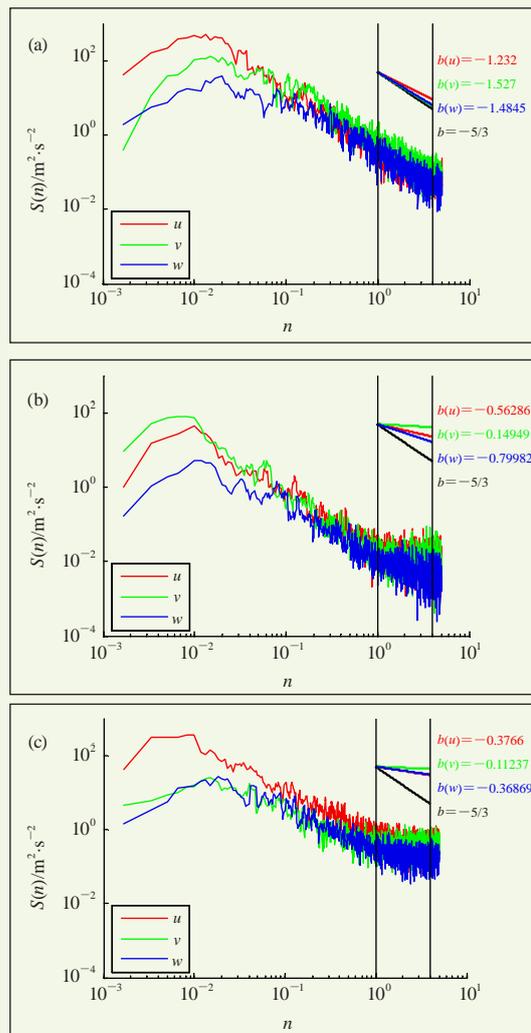


图6 台风纳沙过境前 (a)、过境时 (b) 与过境后 (c) 的大风湍流功率谱

Fig. 6 The turbulence spectrum of the strong wind of Typhoon Nesat before (a), during (b), and after crossing (c)

向和纵向的湍流谱接近于 $-5/3$ 律，不满足各向同性假设，而台风过境后的大风样本与台风中心的小风样本的湍流谱样本均不满足 $-5/3$ 律和各向同性假设。

4 结论

徐闻测风塔观测到的强台风纳沙过程的超声脉动数据，台风核心强风区域经过了观测点，具有非常好的代表性，对沿海的建筑抗风设计有非常好的指导作用，经分析研究后得到如下结论：

1) 台风风速时程曲线呈明显“M”型双峰分布，台风过境前的10 min最大风速为25.2 m/s，台风过境后的最大风速为22.3 m/s，在沿海登陆的台风中并不算强，但风向最大转换幅度达 219° ，转向幅度大，对建筑结构有很强的破坏力。

2) 台风过程8级以上强风的风攻角平均为 0.9° ，台风过境前8级以上强风的风攻角平均值为 -1.4° ，台风过境后8级以上强风的风攻角平均值为 4.9° ，沿海建筑抗风设计时应考虑风攻角的正负转换。

3) 8级大风样本的湍流强度纵向为0.14、横向为0.12、垂直向为0.07，三维方向的湍流强度之比为 $I_u : I_v : I_w = 1 : 0.86 : 0.5$ ，与胡尚瑜等^[1]观测的0601号台风“珍珠”的湍流强度基本一致^[1]。

4) 8级以上强风的 u 、 v 、 w 三维湍流积分空间尺度平均值分别为132、51、28 m。横向的湍流积分尺度数值很不稳定，相对于肖仪清等计算的四个台风^[3]，台风纳沙过程的横向湍流积分尺度偏小。

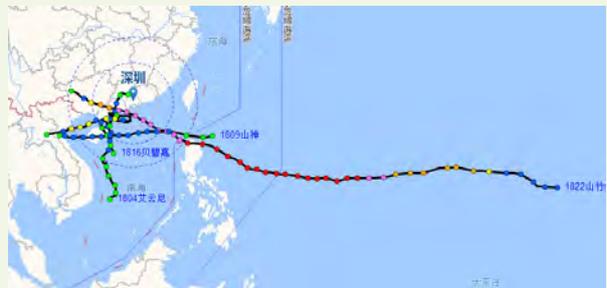
5) 台风过境前大风样本的横向和纵向的湍流谱接近于 $-5/3$ 律，不满足各向同性假设，而台风过境后的大风样本与台风中心的小风样本的湍流谱样本均不满足 $-5/3$ 律和各向同性假设。

参考文献

- [1] 胡尚瑜, 李秋胜, 李正农, 等. 不同平均时距下近地台风实测风特性研究// 全国结构风工程学术会议. 2007.
- [2] 谭晓伟, 端义宏, 梁旭东. 超强台风桑美(2006)登陆前后低层风廓线数值模拟分析. 气象学报, 2013, 71(6): 1020-1034.
- [3] 肖仪清, 孙建超, 李秋胜. 台风湍流积分尺度与脉动风速谱——基于实测数据的分析. 自然灾害学报, 2006, 15(5): 45-53.
- [4] 宋丽莉, 庞加斌, 蒋承霖, 等. 澳门友谊大桥“鸚鵡”台风的湍流特性实测和分析. 中国科学(技术科学), 2010, 53(10): 2647-2657.
- [5] 史文海, 李正农, 张传雄, 等. 温州地区不同时距下近地台风特性观测研究. 空气动力学学报, 2011, 29(2): 211-216.
- [6] 王蓉, 姚小娟, 肖瑜璋, 等. 1208号台风“韦森特”特征分析. 海洋预报, 2013, 30(6): 13-20.
- [7] 许雯, 高守亭, 崔晓鹏, 等. 登陆台风“凡亚比”(1011)合力散度分布及演变特征研究. 大气科学, 2014, 38(1): 110-120.
- [8] 王旭, 黄鹏, 顾明. 基于台风“梅花”的近地层脉动风速功率谱及相干性研究. 空气动力学学报, 2013, 31(6): 776-782.
- [9] 钱燕珍, 高拴柱, 黄思源, 等. 强台风海葵登陆前后强度变化的观测分析. 气象, 2013, 39(10): 1265-1274.
- [10] Xu Y L, Zhan S. Field measurements of Diwang Tower during typhoon York. Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics, 2001, 89(1): 73-93.
- [11] 项海帆, 林志兴, 鲍卫刚, 等. 公路桥梁抗风设计指南. 北京: 人民交通出版社, 1996.
- [12] Panofsky H A, Dutton J A. Atmospheric turbulence: models and methods for engineering applications// Matrix Methods for Engineering. Prentice-Hall, 1984.
- [13] Simiu E, Scanlan R H. Wind effects on structures: fundamentals and applications to design (3rd Ed). New York: John Wiley & Sons. Inc.
- [14] Liu H. Wind engineering: a handbook for structural engineering. Prentice Hall. Englewood Cliffs. New Jersey, 1991.

2018年深圳受台风影响大，“山竹”风灾最严重

2018年共有8个台风进入深圳市500 km范围内，包括：1804“艾云尼”、1806“格美”、1809“山神”、1816“贝碧嘉”、1822“山竹”、1823“百里嘉”、1826“玉兔”以及7月24日热带低压。其中有4个对深圳市造成明显或严重风雨影响（气候平均年影响个数为3.5个），分别是1804号“艾云尼”（热带风暴级，严重影响）、1809号“山神”（热带风暴级，明显影响）、1816号“贝碧嘉”（强热带风暴级，明显影响）、1822号“山竹”（超强台风级，严重影响）。



2018年对深圳造成明显或严重风雨影响的4个台风

——摘自《2018年深圳市气候变化公报》，
深圳市气象局，2019年1月