

DOI:10.13232/j.cnki.jnju.2021.05.022

利奇马台风风场与湍流特征分析

蔡菊珍¹, 徐集云¹, 邵鑫², 彭珍², 张宁^{2*}, 张育慧¹, 何月¹

(1. 浙江省气候中心, 杭州, 310052; 2. 南京大学大气科学学院, 南京, 210023)

摘要: 由于台风的风速大、湍流活跃, 台风过境时会对房屋、桥梁等建筑物造成严重危害。利用 2019 年 8 月 8 日至 11 日利奇马台风过境浙江时的近地层湍流资料, 对利奇马台风的风速、风向、攻角、湍流强度、阵风因子、湍流积分尺度、湍流功率谱特征进行了分析。结果表明: (1) 在台风前期和大风期, 随着台风接近, 慈溪观测场附近的风速急剧增大, 流场主要为偏东气流; 在台风后期, 随着台风远离观测场, 风速迅速减小, 风向逐渐由偏东风转为西南风。(2) 在台风前期和大风期, 攻角、湍流强度和阵风因子都比较小; 而在台风后期, 攻角、湍流强度和阵风因子都明显增大, 同时湍流积分尺度突然变小, 说明了利奇马台风内部流场非常复杂, 不同区域会出现不同的中小尺度结构, 表现出不同的湍流特征。(3) 在台风前期和大风期, 惯性子区湍流能谱基本满足 $-2/3$ 律, 而大风期的湍流能谱与 $-2/3$ 律偏离比较大, 同时由于台风内部存在大量的中小尺度系统, 在大尺度和湍流尺度涡旋之间, 顺风方向的湍流能量贡献仍然很大。

关键词: 近地层, 攻角, 湍流强度, 阵风因子, 湍流积分尺度, 湍流功率谱, 利奇马台风

中图分类号: P404

文献标志码: A

Wind and turbulence characteristics of typhoon Lekima

Cai Juzhen¹, Shao Xin¹, Peng Zhen², Zhang Ning^{2*}, Xu Jiyun², Zhang Yuhui¹, He Yue¹

(1. Zhejiang Climate Center, Hangzhou, 310052, China;

2. School of Atmospheric Sciences, Nanjing University, Nanjing, 210023, China)

Abstract: The passage of typhoon could be harmful to buildings and bridges due to strong wind and active turbulence in typhoon. This study analyzes wind speed, wind direction, attack angle, turbulence intensity, gust factor, turbulent integral length, and turbulent spectrum of typhoon Lekima using observations collected in Zhejiang province from 8 to 11 August 2019. The results show as following. (1) Wind speed dramatically increases at the early stage and strong wind stage of typhoon, where easterly wind dominants. At the final stage of typhoon, wind speed decreases and wind direction turns to southwest. (2) The attack angle, turbulence intensity, and gust factor are small at the early stage and strong wind stage of typhoon. However, these three parameters increase and the turbulent integral length suddenly decreases at the final stage of typhoon, indicating complex flow field in typhoon Lekima. Meso-micro scale structures changes with quadrants in typhoon. (3) The turbulent spectrum nearly follow Kolmogorov's $-2/3$ law at the early stage and strong wind stage of typhoon, however at the final stage, they do not have such a relationship. For the range between mesoscale and turbulence scale, along-wind component contributes largely to the total turbulent energy since a large amount of meso-micro scale eddies exist in typhoon.

Key words: surface layer, attack angle, turbulence intensity, gust factor, turbulent integral length, turbulent energy spectrum, typhoon Lekima.

基金项目: 国家自然科学基金(41975006), 浙江省自然科学基金(LGF18D050001)

收稿日期: 2021-03-09

通讯联系人, E-mail: ningzhang@nju.edu.cn

边界层是大气最底部的一层空气,平均高度大约为1~2 km,它能够迅速有效地感知下垫面的影响.湍流是边界层中最主要的运动形态,表现为偏离长周期平均运动的小尺度脉动.边界层湍流研究一直是边界层研究的重要内容,多年来,在 Monin-Obukhov 相似理论的指导下,对定常、均匀平坦的下垫面的大气边界层湍流研究取得了丰富的观测资料和十分有意义的科研成果,边界层湍流的理论也已比较成熟;但对非定常、复杂下垫面的边界层研究的成果还较少,尤其是对台风这样的强风天气形势下的边界层湍流特征研究还相对缺乏.

在风工程中,湍流可对建筑物施加额外的应力,同时湍流涡旋,如卡门涡街等可对建筑物造成涡振,对大楼、桥梁等建筑物产生潜在的隐患^[1-2].我国是世界上受台风影响最为严重的国家之一.每年夏秋季节,我国东南沿海地区会受到台风灾害的影响.近年研究表明,气候变化导致过去三十年间强度高、持续时间长的台风发生频次增加^[3-4],台风往往伴随着复杂的天气现象,如大风^[5-7]、强风切变^[8]、大暴雨、大海潮等,对其影响地区的建筑物和人民生命财产安全产生重大影响.因此台风天气形势下的边界层湍流特征研究不仅对研究地气间物质能量输送具有重要意义^[9-11],而且对准确估计建筑结构上的台风荷载具有重要参考价值^[12-13].

杭州湾是大风多发区域,风荷载是作用于通苏嘉甬高速铁路杭州湾跨海大桥这样的大型结构的主要荷载之一.为了给通苏嘉甬高速铁路杭州湾跨海大桥的防风设计提供基础数据,2019年7月浙江省气候中心在浙江省宁波市慈溪市杭州湾公路桥西南侧的滩涂建立了野外观测场地,目前已经积累了一年的湍流资料.由于跨海大桥所在地理位置的特殊性,其最大风速主要受台风的影响,本文利用利奇马台风经过浙江省期间观测场的湍流观测资料,评估杭州湾跨海大桥四周的湍流特征.

1 观测实验及资料处理

浙江省气候中心于2019年7月下旬在浙江省宁波市慈溪市杭州湾公路桥西南侧的十二塘海

堤附近(30.462°N, 120.964°E)的滩涂建立了野外观测场地(图1).那里地势平坦,视野开阔,四周以低矮的杂草为主,观测场里除一座高100 m的测风铁塔外,没有其他影响观测的高大建筑物.分别在塔上30和60 m高度处架设了两台英国 Gill 公司生产的三维超声风速仪(WindMaster Pro),超声风速仪的采样频率为10 Hz,目前已积累了一年的高频观测资料.

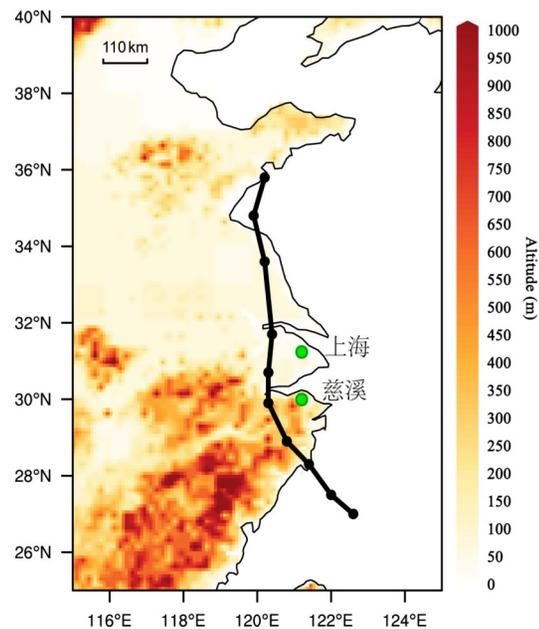


图1 台风“利奇马”的移动路径

Fig. 1 Tracking maps of typhoon Lekima

台风“利奇马”是2019年登陆中国的最强台风,具有登陆强度强、陆上滞留时间长、风雨强度大、影响范围广和灾害影响重等特点.该台风于北京时间2019年8月10日01:45在浙江省温岭市城南镇沿海登陆,登陆时中心最大风力16级($52 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$),最低气压930 hPa,给中国东部地区带来了大量的降水.台风登陆后,强度迅速减弱,并逐渐转向偏北方向移动(图1),并于当日22:00由浙江转入江苏境内.在利奇马台风经过浙江省期间,慈溪市观测场位于台风东侧的云墙区^[14],因此观测站很好地抓住了这次台风经过时杭州湾地区近地层的湍流特征.

由于仪器的系统误差、故障,或者降水、传感器上水汽凝结等原因,资料中会存在一些问题数据(不符合一般气候统计特征或者是物理上解释

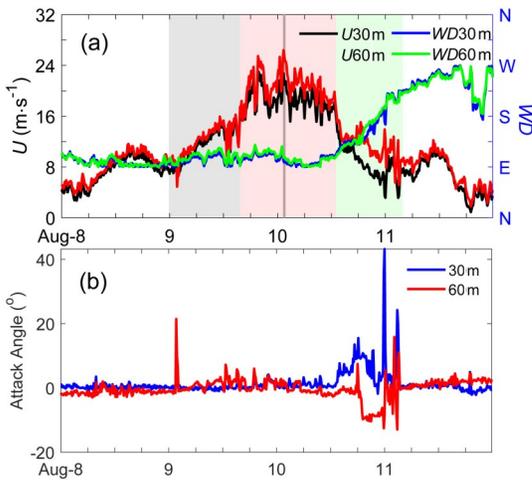
不通的数据)或者直接数据缺失,这给进一步的湍流特征研究带来很大的不确定性,因此湍流资料的质量控制是使用湍流资料的前提. 本文主要参考 Vickers and Mahrt^[14]的方案,首先查找出不符合一般气候统计特征以及物理上解释不通的数据,或者是明显超出合理范围的不合理数据,然后利用 Højstrup^[15]提出的 b 模式插值方案订正前面查找出的问题数据,得到质量可靠的可供进一步使用的数据.

2 利奇马台风的湍流特征分析

2.1 风速、风向和风攻角 图 2a 为利奇马台风经过慈溪观测站前后 30 和 60 m 两个高度上 10 min 平均风速风向随时间的变化. 从图 2 可见,两层的风速风向变化趋势非常一致:风向由台风在温岭登陆(8月10日 01:45)前的偏东风转为离开浙江移入江苏(8月10日 22:00)以后的西南风,风速由小变大再变小. 为便于分析,根据慈溪观测站所测风速风向随时间的变化,将8月9日 00:00 时至8月11日 04:00 这 54 h 慈溪站的观测资料分为三个时段进行讨论. 在台风前期(8月9日 00:00 至 15:40,图 2 中灰色透明方框所示),风速相对较小且平稳,30 m 高度上的平均风速为 $11.3 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,60 m 高度的平均风速为 $12.0 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ (表 1),风向为偏东方向. 在大风期

(8月9日 15:50 至 10日 13:10,图 2 红色透明方框所示,这期间台风在温岭登陆,台风对慈溪站的影响最强),风速整体也是比较平稳的,两层风速都大于 $15 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,其中 30 m 高度上平均风速为 $18.4 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,最大风速达到 $23.0 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,出现时间为 8月9日 19:50;60 m 高度上平均风速为 $20.6 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,最大风速为 $26.4 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,出现在 8月10日 01:30,此时台风即将登陆. 在台风后期(10日 13:20 至 11日 04:00,图 2 绿色透明方框所示),观测点周围的流场发生了急剧的变化,流场逐渐从此前的偏东气流转为西南风,表明此时慈溪站逐渐由位于台风的东北方向转为位于台风的东南方向,即这期间的观测表征了台风东部的流场结构. 根据《公路桥梁抗风设计规范》^[16],按照风险区域 R1($U_{10} < 24.5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$)的规定,观测站的抗风风险都在 R1 的范围. 由于慈溪观测站位于台风移动路径的东侧,因此实验未测到台风眼的风速特征,即高风速段并未出现静风期.

风攻角指风的来流方向与水平面的夹角,其计算公式为 $\alpha = \arctg(w/U)$,这里 α 为风攻角, w 为平均垂直风速, U 为平均水平风速. 风攻角为正时代表大气存在系统性上升气流,为负时则代表大气存在系统性下沉气流. 攻角对建筑结构特别是柔性结构的影响比较突出,其长期作用会加速或加重结构的疲劳损坏. 强风时,攻角的变化会对建筑造成突然损伤甚至破坏. 在桥梁的抗风设计中,攻角是非常重要的参数,设计规范指出高风速时风的平均攻角在 -3° 至 3° 之间^[16]. 姚伟等^[17]利用有限元法研究了不同风攻角下斜拉桥的抖振响应,结果表明,当来流风速为 $25.6 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时,主梁的横桥向、竖桥向和扭转抖振位移随着攻角的变化有较大变化,而位移响应基本无变化. 图 2b 所示为利奇马台风期间两个高度层上的攻角变化情况. 在台风前期,30 m 高度上存在上升气流,攻角整体为正,平均值为 0.1° (表 1);60 m 高度上气流整体也是为正,平均值为 1.3° . 在大风期,30 m 高度上的平均攻角增加到 0.9° ,60 m 高度上的平均攻角略微减小,为 0.1° . 而在台风后期,上下两层的攻角突然改变,且波动剧烈,结合台风风速风向进行分析,可以看到利奇马台风的东部存在较强的中小尺度天气系统,因而产生



(a)中的灰色实线为台风在温岭登陆时刻8月10日 01:45
 图 2 “利奇马”台风经过慈溪观测站前后(a)风速风向和 (b)风攻角随时间的变化
 Fig. 2 Time series of wind speed and wind direction (a), and attack angle (b)

表1 台风过境不同时期的湍流特征对比

Table 1 The comparison of turbulence at different stage during the passage of typhoon

	台风前期		大风期		台风后期	
	30 m	60 m	30 m	60 m	30 m	60 m
平均风速(m·s ⁻¹)	11.3	12.0	18.4	20.6	8.4	11.4
风攻角(°)	0.05	1.29	0.92	0.12	6.55	-3.36
顺风方向的湍流强度 I _u	0.14	0.11	0.15	0.12	0.19	0.22
侧向湍流强度 I _v	0.10	0.10	0.10	0.09	0.14	0.22
垂直方向湍流强度 I _w	0.07	0.06	0.07	0.07	0.11	0.13
I _v /I _u	0.71	0.91	0.67	0.75	0.74	1.00
I _w /I _u	0.50	0.55	0.47	0.58	0.58	0.59
阵风因子 G	1.30	1.25	1.31	1.26	1.46	1.69
顺风方向积分尺度 IS _u (m)	266.5	344.1	163.3	198.0	121.6	112.9
侧向积分尺度 IS _v (m)	213.0	273.9	275.4	347.0	122.7	126.6
垂直方向积分尺度 IS _w (m)	15.7	49.6	38.4	50.0	88.3	88.7

了强烈的上升气流与下沉气流,也使得两层的攻角存在明显的区别.整体上30 m高度上的攻角仍为正值,平均值达到了6.6°;60 m高度上的攻角为负,平均值为-3.4°.显然,这段时间的风攻角明显大于设计规范^[16]推荐的攻角范围,与肖仪清等^[18]对台风黑格比的研究类似,流场可能会对周围的建筑物造成损坏,桥梁设计时需要考虑.

2.2 湍流强度和阵风因子 湍流强度是湍流风速标准差与平均风速之比: $I_i = \frac{\sigma_i}{U}$ (i = u, v, w).

湍流强度的大小反映了风的脉动强度,是计算建筑结构风荷载的关键参数.图3a和图3b为利奇马台风期间两高度层上的湍流强度时间序列.在利奇马台风影响的前期和大风期,两高度层上的三个方向的湍流强度都较小,其中顺风方向和侧向的平均湍流强度大约介于0.10~0.15,垂直方向的平均湍流大约在0.07(见表1),表明这期间气流比较平稳.而在台风后期,三个方向的湍流强度都显著增加了,其中60 m上水平方向的湍流强度达到了0.22,垂直方向达到了0.12,30 m高度上的湍流强度较60 m的偏小.从两层上侧方向湍流强度和垂直方向湍流强度分别与顺风方向湍流强度的比值 I_v/I_u和 I_w/I_u可以看到:两层上的 I_v/I_u都与我国《建筑结构荷载规范》给出的比值0.88^[19]相近, I_w/I_u也与规范规定的比值0.52较为接近.结合图2可知,在台风后期,观测站风速不

但逐渐较小,风向也发生了从偏东气流到偏西气流的转变,风速切变较大,因而机械湍流较大,相应的湍流强度也相对较大.

阵风因子也是用来表征风脉动强度的物理量.其定义为持效期3 s内风速的最大值与

$$10 \text{ min 平均风速之比: } G(t_g) = \frac{u(t_g)_{\max}}{U}$$

较大的阵风因子表明台风对建筑物如房屋、桥梁等的冲击较大,在桥梁设计的过程中需特别考虑对于阵风的防护.与湍流强度随时间的变化一致(图3c),在台风前期和大风期间,两层上的阵风因子较小,为1.25~1.31;但在台风后期,阵风因子明显增大,30 m上为1.46,60 m上为1.69.

由湍流强度和阵风因子的定义可知,湍流强度和阵风因子与风速存在一定的关系,我们的拟合结果表明:湍流强度和阵风因子与风速存在反函数的关系(见图4),在低风速段,三个方向的湍流强度和阵风因子均会随着风速的增高而下降;当风速大于15 m·s⁻¹时,湍流强度和阵风因子都不再随风速变化.

2.3 湍流积分尺度 湍流积分尺度是用来表示湍流尺度的物理量,其值越大代表湍流的空间尺度越大,是湍涡结构的重要参数.图5为利奇马台风期间两个高度层上湍流积分尺度随时间的变化.由图5可见,由于8月10日17:00至11日00:00的水平湍流积分尺度显著低于其他时候,

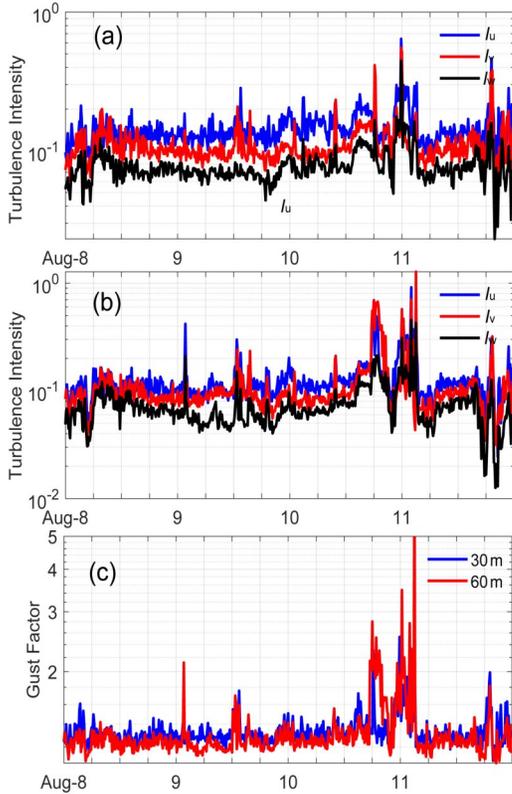


图 3 (a)30 m 和(b)60 m 两高度层的湍流强度以及(c)阵风因子随时间的变化

Fig. 3 Time series of turbulence intensity at 30 m (a) and 60 m (b), and gust factor (c)

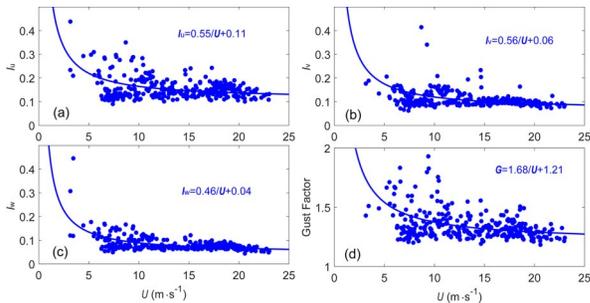


图 4 30 m 高度上三个方向的湍流强度:(a) I_u 、(b) I_v 、(c) I_w 和阵风因子 (d) 与风速的关系(所用数据与图 2 一致)

Fig. 4 Variation of turbulence intensity:(a) I_u 、(b) I_v 、(c) I_w , and gust factor (d) with wind speed

使得台风后期水平方向的平均积分尺度明显小于台风前期和大风期(表 1). 事实上,去除这几个时次的影响,三个方向上的湍流积分尺度整体上都随着风速的增加而增大(图 6),这与“梅花”^[20]和“海葵”^[21]台风的研究一致. 除此之外,在台风前期,也与“梅花”和“海葵”的结论一致,存在顺风方

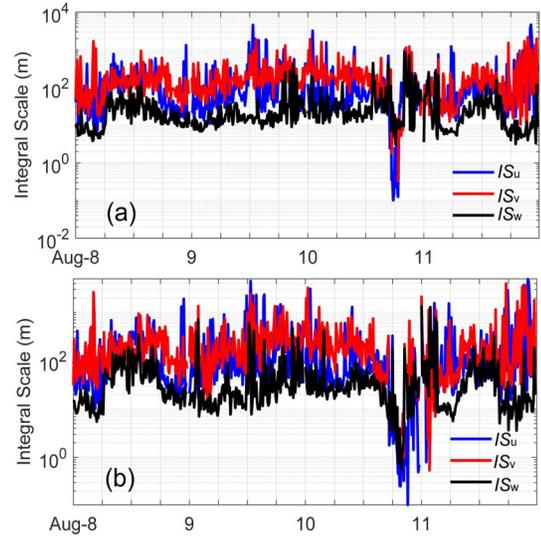


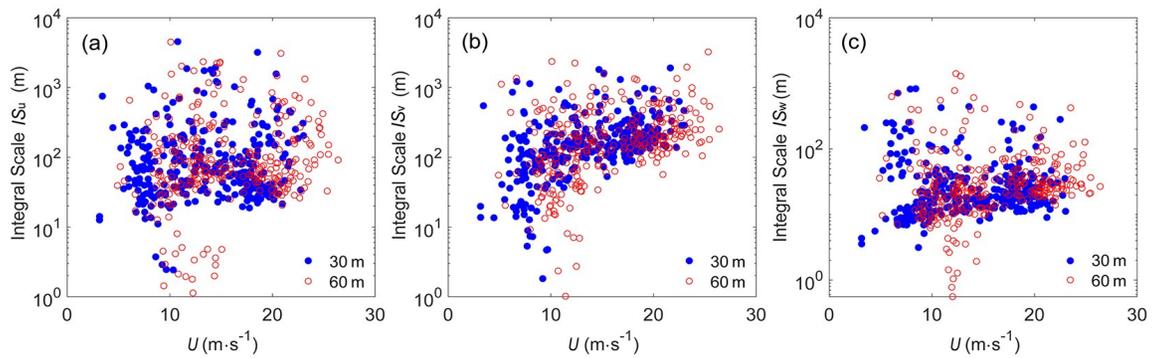
图 5 30 m (a)和 60 m (b) 两个高度层的湍流积分尺度随时间的变化

Fig. 5 Time series of turbulence integral scale at 30 m (a) and 60 m (b)

向湍流积分尺度最大,侧向次之,垂直方向最小的规律;但在大风期和台风后期,则是侧向湍流积分尺度最大(表 1). 台风后期湍流积分尺度明显小于其他时候,表明台风东部湍流空间尺度较小. 但由于台风内部流场非常复杂,不同区域会出现很多中小尺度天气系统,因此湍流积分尺度变化很大,离散度也很大.

2.4 湍流能谱 本文选取了 8 月 9 日 00:00 至 15:00、8 月 9 日 18:00 至 10 日 09:00、8 月 10 日 14:00 至 11 日 04:00 共三个时间段的超声数据,分别对应利奇马台风经过观测场地前后的台风前期、大风期和台风后期三个阶段,并利用小波变换进行湍流风速能谱计算(图 7).

由图 7 可见,不同阶段惯性子区湍流能谱的差异较大,台风前期和大风期的湍流能谱基本满足 $-2/3$ 律,而台风后期的湍流能谱与 $-2/3$ 律偏离较大,这可能与台风后期湍流资料不平稳、台风内部流场复杂有关系. 此外,大尺度涡旋和湍流尺度涡旋都具有较大的能量贡献,分别在 f 为 6×10^{-5} Hz 和 f 为 0.02 Hz 附近具有两个峰值;而在大尺度和湍流尺度涡旋之间,顺风方向的湍流能量贡献仍然很大,这是因为在台风天气形势下,系统中存在很强的中小尺度对流湍涡,这与“珍珠”



所用数据为8月9日00:00时至8月11日04:00慈溪站的观测数据

图6 u (a),v (b)和 w (c)方向的湍流积分尺度随风速的变化

Fig. 6 Variation of turbulence integral scale of u (a), v (b) and w (c) with different wind speed

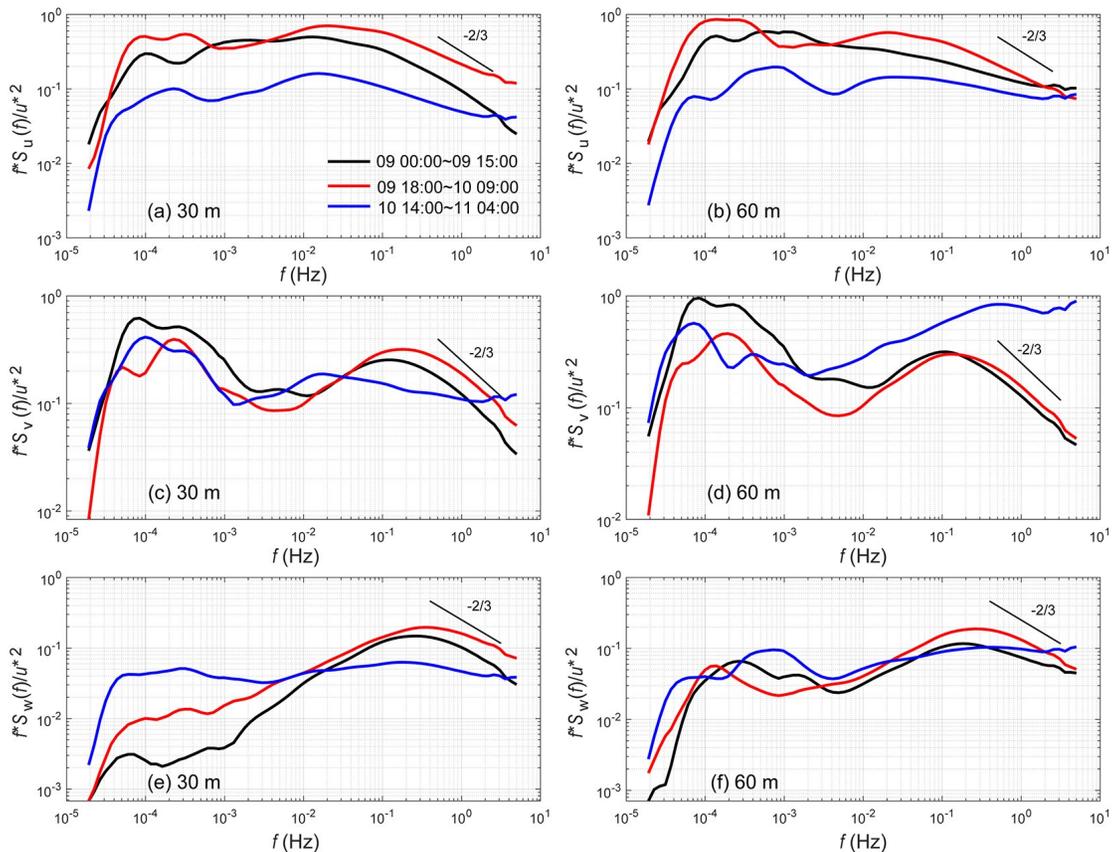


图7 不同时期近地面风速的能谱分布:30 m上的u (a),v (c),w (e)谱和60 m上的u (b),v (d),w (f)谱

Fig. 7 Comparison of u (a), v (c), and w (e) spectra during typhoon Lekima at 30 m and u (b), v (d), w (f) spectra at 60 m

台风^[22]的研究结果相同。

台风天气形势下的能谱具有多峰结构,在天气尺度和中小尺度上都具有峰值,表明在这些尺度上平均运动的能量贡献都较大,而一般暴雨天气过程^[23]的能谱在天气尺度附近的能量贡献很

小,但在中小尺度上有较大的能量贡献;平稳天气形势下^[24]的湍流能谱在大尺度和中小尺度的能量贡献都很小,湍流能谱呈现单峰结构.对于惯性区,不同天气形势的影响较小,湍流能谱都基本满足-2/3律.

3 结论与讨论

本文利用利奇马台风在 2019 年 8 月 8 日至 11 日过境浙江时,浙江省气候中心在慈溪观测场两层湍流观测资料(30 和 60 m),讨论了利奇马台风经过观测场前后的边界层湍流特征,得到了以下结论:

在台风前期和大风期,随着台风接近,慈溪观测场附近的风速急剧增大,其中 60 m 高度上台风前期和大风期平均风速分别为 12.0 和 $20.6 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, 30 m 高度上的平均风速分别为 11.3 和 $18.4 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, 流场为偏东气流. 在台风后期,随着台风远离观测场,风速迅速减小,两层平均风速分别为 11.4 和 $8.4 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, 风向也逐渐由偏东风转为西南风,表明这期间观测场从台风的东北方向转为台风的东南方向,这期间的观测主要为台风东部的流场情况.

在台风前期和大风期,攻角、湍流强度与阵风因子这三个参数都比较小,这是因为这期间气流较为平稳. 而在台风后期,三个参数都明显增大,且波动剧烈,这是因为这期间观测场处于台风东侧,慈溪观测场的流场从偏东气流转为西南气流,气流非常不平稳. 此外,湍流强度和阵风因子与风速存在反函数的关系,在低风速段,三个方向的湍流强度和阵风因子均会随着风速的增高而下降,而当风速大于 $15 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时,湍流强度和阵风因子都不再随风速变化.

湍流积分尺度表现出随着风速的增加而增大的特征. 但在台风后期,在风攻角、湍流强度和阵风波动剧烈的时段,湍流积分尺度突然变小,这进一步说明了利奇马台风内部流场非常复杂,不同区域会出现不同的中小尺度结构,表现出不同的湍流特征.

湍流能谱分析表明台风前期和大风期的湍流能谱基本满足 $-2/3$ 律,而台风后期的湍流能谱与 $-2/3$ 律偏离比较大,这可能与台风后期湍流资料不平稳有关系. 此外,台风内部存在大量的中小尺度系统,因此在大尺度和湍流尺度涡旋之间,顺风方向的湍流能量贡献仍然很大.

参考文献

- [1] Xie H Y, Chai D D, Zhang X. Investigation in rural buildings' damage caused by local strong wind in Suihua. *Applied Mechanics and Materials*, 2012 (174-177): 2160-2164.
- [2] Von Karman T. *Aerodynamics. Selected Topics in the light of their historical development*. Ithaca, NY, USA: Cornell University Press, 1954.
- [3] Mohammadi A, Azizinamini A, Griffis L, et al. Performance assessment of an existing 47-story high-rise building under extreme wind loads. *Journal of Structural Engineering*, 2019, 145(1): 04018232.
- [4] Emanuel K. Increasing destructiveness of tropical cyclones over the past 30 years. *Nature*, 2005, 436 (7051): 686-688.
- [5] Xu Y L, Zhan S. Field measurements of Di Wang tower during typhoon York. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2001, 89(1): 73-93.
- [6] Hui M C H, Larsen A, Xiang H F. Wind turbulence characteristics study at the Stonecutters Bridge site: Part I: Mean wind and turbulence intensities. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2009, 97(1): 22-36.
- [7] Hui M C H, Larsen A, Xiang H F. Wind turbulence characteristics study at the Stonecutters Bridge site: Part II: Wind power spectra, integral length scales and coherences. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2009, 97(1): 48-59.
- [8] Giammanco I M, Schroeder J L, Powell M D. GPS dropwindsonde and WSR-88D observations of tropical cyclone vertical wind profiles and their characteristics. *Weather and Forecasting*, 2013, 28(1): 77-99.
- [9] Powell M D, Vickery P J, Reinhold T A. Reduced drag coefficient for high wind speeds in tropical cyclones. *Nature*, 2003, 422(6929): 279-283.
- [10] Moon I J, Ginis I, Hara T. Effect of surface waves on air-sea momentum exchange. Part II: Behavior of drag coefficient under tropical cyclones. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 2004, 61(19): 2334-2348.
- [11] Takagaki N, Komori S, Suzuki N, et al. Mechanism of drag coefficient saturation at strong wind speeds. *Geophysical Research Letters*, 2016, 43(18): 9829-9835.

- [12] Bartoli G, Ricciardelli F, Saetta A, et al. Performance of wind exposed structures: Results of the PERBACCO project. Firenze, Italy: Firenze University Press, 2006.
- [13] Ciampoli M, Petrini F, Augusti G. Performance-based wind engineering: Towards a general procedure. *Structural Safety*, 2011, 33(6): 367–378.
- [14] Vickers D, Mahrt L. Quality control and flux sampling problems for tower and aircraft data. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 1997, 14(3): 512–526.
- [15] Højstrup J. A statistical data screening procedure. *Measurement Science and Technology*, 1993, 4(2): 153–157.
- [16] 交通运输部. 公路桥梁抗风设计规范. JTG/T 3360-01-2018. (Ministry of Transport. Wind-resistant Design Specification for Highway Bridges. JTG/T 3360-01-2018.)
- [17] 姚伟, 唐煜, 李英森. 风攻角对斜拉桥抖振的影响. *交通科技*, 2013(3): 9–12. (Yao W, Tang Y, Li Y S. Influence of the wind attack angle on the cable-stayed bridge buffeting. *Transportation Science & Technology*, 2013(3): 9–12.)
- [18] 肖仪清, 李利孝, 宋丽莉等. 基于近海海面观测的台风黑格比风特性研究. *空气动力学报*, 2012, 30(3): 380–387. (Xiao Y Q, Li L X, Song L L, et al. Study on wind characteristics of typhoon Hagupit based on offshore sea surface measurements. *Acta Aerodynamica Sinica*, 2012, 30(3): 380–387.)
- [19] 中华人民共和国建设部, 国家质量监督检验检疫总局. 建筑结构荷载规范(2006版). GB 50009-2001. (Ministry of Construction, General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. Load code for the design of building structures. GB50009-2001).
- [20] 王旭, 黄鹏, 顾明. 基于台风“梅花”的近地层湍流积分尺度实测分析. *同济大学学报(自然科学版)*, 2012, 40(10): 1491–1497. (Wang X, Huang P, Gu M. Field measurements about integral scales of near-ground turbulence during typhoon ‘Muifa’. *Journal of Tongji University (Natural Science)*, 2012, 40(10): 1491–1497.)
- [21] 王旭, 黄超, 黄鹏等. 台风“海葵”近地风脉动特性实测研究. *振动与冲击*, 2017, 36(11): 199–205, 241. (Wang X, Huang C, Huang P, et al. Field measurements for characteristics of near ground fluctuating wind during typhoon ‘HAIKUI’ blowing. *Journal of Vibration and Shock*, 2017, 36(11): 199–205, 241.)
- [22] 彭珍, 宋丽莉, 胡非等. 台风“珍珠”登陆期间动量通量的多尺度分析. *热带气象学报*, 2012, 28(1): 61–67. (Peng Z, Song L L, Hu F, et al. Multi-scale analysis on momentum flux of typhoon Chanchu during its landfall. *Journal of Tropical Meteorology*, 2012, 28(1): 61–67.)
- [23] 杜云松, 彭珍, 张宁等. 南京地区一次降水过程湍流特征研究. *南京大学学报(自然科学)*, 2011, 47(6): 703–711. (Du Y S, Peng Z, Zhang N, et al. Turbulent characteristics of surface layer during a heavy precipitation event over the Nanjing area, eastern China. *Journal of Nanjing University (Natural Science)*, 2011, 47(6): 703–711.)
- [24] 王国羽, 孙鉴泞. 城市粗糙子层湍流能谱特征分析. *南京大学学报(自然科学)*, 2014, 50(6): 820–828. (Wang G Y, Sun J N. Characteristics of turbulence spectra in the urban roughness layer. *Journal of Nanjing University (Natural Sciences)*, 2014, 50(6): 820–828.)

(责任编辑 杨贞)