

登陆台风近地层湍流特征观测分析^{*}

宋丽莉

(中国气象局热带海洋气象研究所, 广州, 510080)

毛慧琴 黄浩辉 刘锦銮 植石群 刘爱君

(广东省气候与农业气象中心, 广州, 510080)

摘 要

在对多个登陆台风实地观测的基础上, 选取出较有代表性的实验观测个例: “黄蜂”、“杜鹃”和“黑格比”3 个登陆台风, 分析探讨在登陆台风的中心、靠近中心位置的强烈影响区域和台风外围环流影响地区近地层湍流特征, 以期对登陆台风的边界层湍流过程有所认识。观测资料分析显示, 在登陆台风的中心及其强烈影响的区域: (1) 风速和湍流强度均有强烈的变化; (2) 水平湍流积分尺度明显增大, 越靠近中心位置, 增大越明显, 而垂直方向没有明显变化; (3) 在湍流谱的低频和高频区, 湍能均可增大 1~2 个量级, 其中垂直方向湍能增大的幅度略小于水平方向; (4) 湍谱在惯性子区 u, v, w 3 个方向的分布均不满足 $-5/3$ 次方律, 存在较大偏移, 而在台风外围环流影响区和无台风影响时, 则无上述的 4 个特征。

关键词: 登陆台风, 近地层观测, 湍流。

1 引 言

边界层湍流特征的研究不仅对于研究大气的物质、能量交换、大气输送及边界层与自由大气的相互作用有重要意义, 而且对结构风工程的研究及设计应用都具有重要影响。多年来, 对近地层湍流结构的理论和实验研究已相当成熟, 在 Monin-Obukhov 相似理论指导下, 对定常、水平均匀及平坦地形条件下的近地层湍流特征研究取得了很多有价值的结果^[1], 如在城市、高原、戈壁等多种下垫面的大气边界层进行观测研究, 取得了丰富的实测资料和十分有意义的科研成果^[2~5], 但对非定常、非均匀的复杂下垫面的边界层研究尚不多见, 尤其针对剧烈天气过程如: 热带气旋登陆点及其强烈影响地区近地层湍流特征的观测研究, 在国内鲜见报道。台风是给中国沿海地区带来巨大灾害的主要天气系统, 登陆台风近地层的湍流运动特征对研究台风内部结构、运动及台风生命周期十分重要, 更对其影响地区的

建筑物及人民生命财产安全产生重大影响。本文在对多个登陆台风实地观测的基础上, 选取较有代表性的实验观测个例: 黄蜂 (Vongfong)、杜鹃 (Dujuan) 和黑格比 (Hagupit) 3 个登陆台风, 分析探讨在登陆台风的中心、靠近中心位置的强烈影响区域和台风外围地区近地层湍流特征, 以期对登陆台风的边界层湍流过程有所认识。

2 观测目标、环境和仪器

2.1 观测目标和测点环境

本文涉及的登陆台风观测目标有 3 个: 0104 号强热带风暴——“黄蜂” (Vongfong); 0313 号台风——“杜鹃” (Dujuan); 0218 号强热带风暴——“黑格比” (Hagupit)。观测目标背景和测点环境状况见表 1。

2.2 观测仪器

本文涉及的台风观测实例, 系采用美国 Campbell Science 公司生产的 CSAT3D 型超声风速仪 (图

* 初稿时间: 2004 年 9 月 21 日; 修改稿时间: 2005 年 3 月 10 日。

资助课题: 国家社会公益研究专项资金项目 (2001DIA20026), 中国气象局业务推广资助项目 (19000003S003)。

作者简介: 宋丽莉, 女, 1963 年生, 山东人, 正研级高工, 主要从事工程气象应用研究。email: llsong@grmc.gov.cn。

表 1 登陆台风观测实例
Table 1 Landing typhoons

实例	观测地点	观测环境	仪器安装高度(m)	样本观测时间	天气背景	登陆时间	登陆地点	观测点 0.1 s 极大风速(m/s)
黄蜂	吴川, 吉兆湾	海边度假村, 20 m 以外有低于 10 m 的稀疏建筑物	15	2002. 8. 19, 19:10~20:06:30	登陆台风中心观测, 以及台风过后的晴朗天气。	2002. 8. 19, 19:30	吴川, 吉兆湾	41.8
杜鹃	深圳, 石岩气象站	低于 3 m 高的果园林地中的标准气象观测场。	8	2003. 9. 1, 20:10~2:06:30	登陆后经过的中心地带, 有持续的强降水。	2003. 9. 2, 8:50	深圳东部沿海	35.8
黑格比	广州气象站	城市地貌, 20~60 m 以外周围有低矮树木、建筑物。	10	2002. 9. 12, 22:00~13:06:50	受台风外围环流影响。	2002. 9. 13, 03:00	阳江, 海陵岛	12.4

注:表中观测与登陆时间均指北京时。

1), 该仪器被广泛应用于边界层湍流和结构风工程的测量, 仪器在输出数据的同时, 能自动给出判别码, 以识别观测数据的有效性。该仪器使用环境温度 $-30\sim 50^{\circ}\text{C}$, 水平方向风速量程 $\pm 60\text{ m/s}$, 测量精度 $< 0.3\text{ m/s}$, 垂直方向量程 $\pm 8\text{ m/s}$, 测量精度 $< 4\text{ mm/s}$, 其最大动态响应频率 60 Hz , 并通过 PC 机串口程序实时存储, 从而获得长时间不间断的风速记录^[7]。本文采用 10 Hz 采样频率进行三维瞬时风速数据采集。

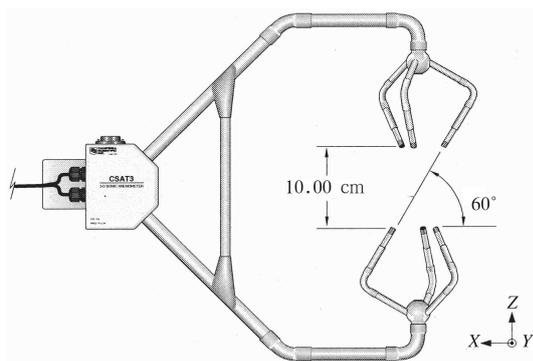


图 1 CSAT3D 超声风速仪探头
Fig1 CSAT3D supersonic anemometer

3 资料处理

3.1 无效数据和野点数据处理

由于台风登陆时, 常伴有强降水, 本文采用的超声风速仪能够自动判别由于降水影响而产生的无效数据, 故在选取计算样本时, 首先根据超声风速仪的数据判别码, 剔除无效数据, 然后采用文献[4, 8]中的方法剔除数据样本中的其他野点(因电源不稳定

和其他不明原因造成的可疑数据), 并采用线性插值法进行插补。为了使每个样本尽量满足平稳随机过程的要求, 对时间序列采用多项式(二阶)拟合方法去掉序列的趋势项, 以得到一个平稳随机序列。

对每个台风个例, 取多个样本进行分析, 样本长度可取为 10 或 30 min ^[2, 6], 在此取样本长度 30 min , 每个样本包含 18000 组数据, 每个样本的无效数据小于 30 s , 即有效数据大于 98% 。

3.2 基础数据样本处理

实测三维风速 $u(t)$, $v(t)$ 和 $w(t)$ 是超声风速仪坐标下 x, y, z 方向的 3 个实数序列, 以某一时间间隔为基本时距进行分析, 则水平平均风速 U 和风向角 Φ 由下式计算^[9]

$$U = \sqrt{u(t)^2 + v(t)^2} \quad (1)$$

$$\Phi = \arctg(v(t)/u(t)) \quad (2)$$

垂直方向与仪器坐标 z 轴相同, 因此垂直平均风速为

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

将仪器坐标旋转 Φ 角, 使仪器所测 u 与主风向一致。所得坐标 x, y, z 轴分别代表主风 $u(t)$ 、侧风 $v(t)$ 和垂直风向 $w(t)$ (与仪器坐标相同), 则 $u(t)$ 、 $v(t)$ 在 x, y 轴的投影 $u'(t)$ 即为纵向(主风向)脉动风速、 $v'(t)$ 为横向(侧风向)脉动风速, 由下式计算:

$$u'(t) = u(t)\cos\Phi + v(t)\sin\Phi - U \quad (4)$$

$$v'(t) = -u(t)\sin\Phi + v(t)\cos\Phi \quad (5)$$

垂直脉动风速 $w'(t)$ 由式(6)给出:

$$w'(t) = w(t) - W \quad (6)$$

$u'(t)$, $v'(t)$, $w'(t)$ 即为本文湍流统计分析的数据基础。

4 计算分析

4.1 登陆台风的风速变化特征

本文对“黄蜂”、“杜鹃”和“黑格比”在登陆过程中的三维风速进行分析(由于篇幅所限在此只给出

垂直方向 1 min 平均风速变化曲线),结果显示,“黄蜂”和“杜鹃”的观测点,分别位于登陆台风的中心位置和靠近中心位置的强烈影响区域, x, y 方向的风速和风向均发生剧烈变化,由图 2 和 3 可以看出,台风中心经过时,垂直方向出现明显的下沉气流,而

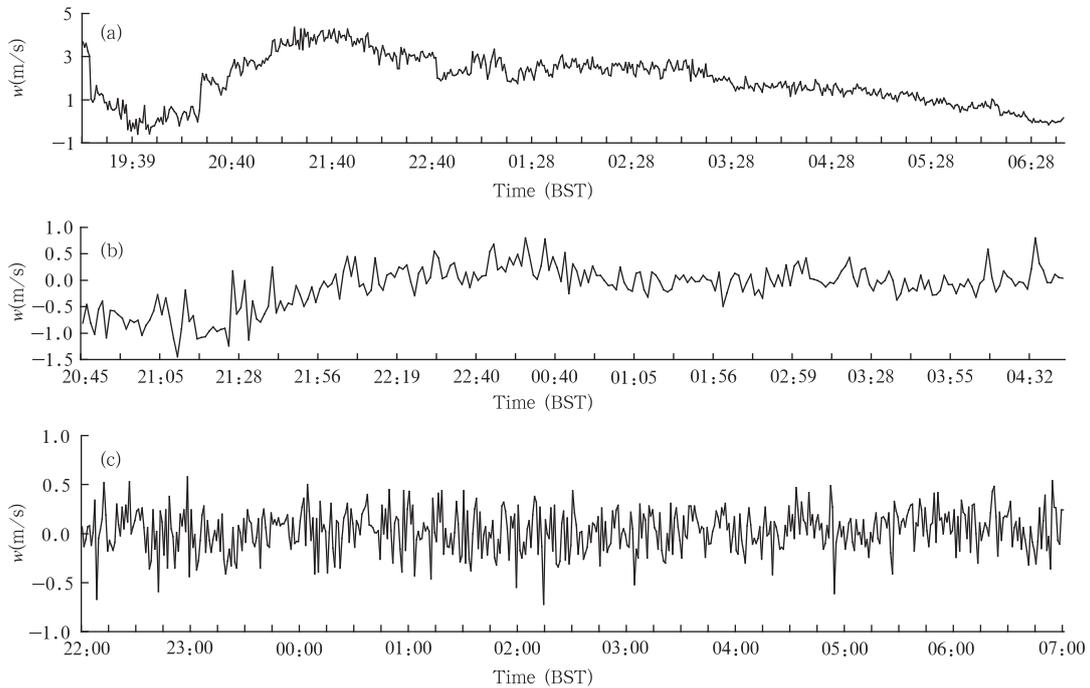


图 2 登陆过程观测点垂直方向(1 min 平均)风速曲线(横坐标为时间的时、分)(a. 黄蜂, b. 杜鹃, c. 黑格比)
Fig. 2 1 minute mean velocities of 3 typhoons (vertical direction)(a. Vongfong, b. Dujuan, c. Hagupit)

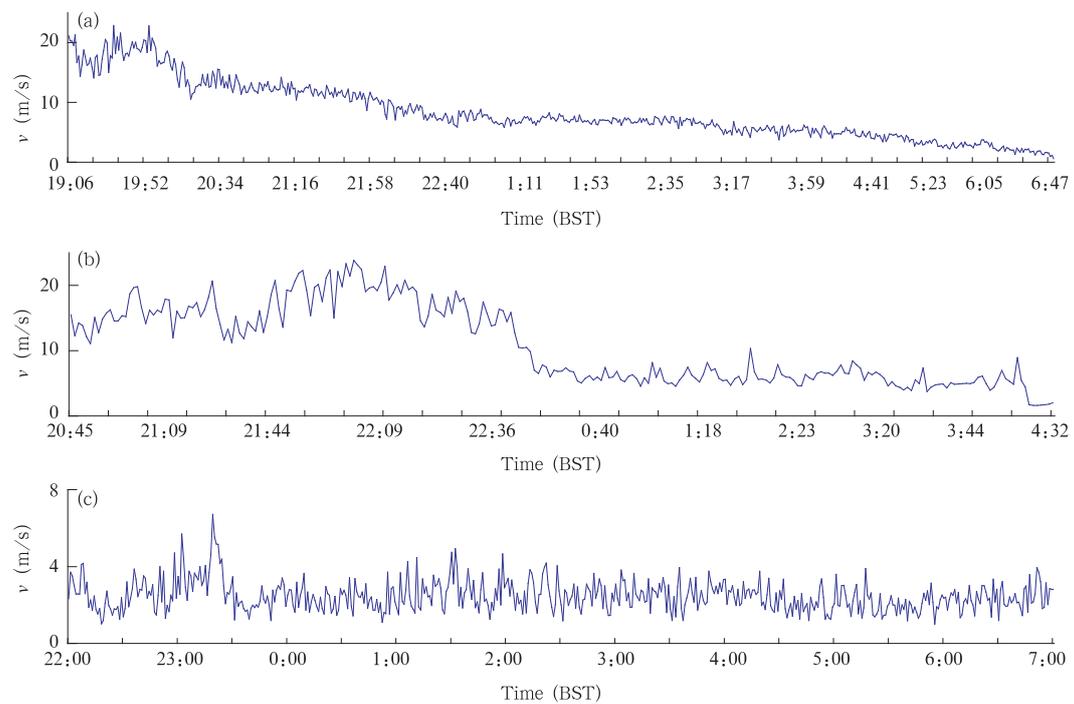


图 3 登陆过程观测点水平方向 1 min 平均风速曲线(a. 黄蜂, b. 杜鹃, c. 黑格比)
Fig. 3 1 min mean velocities of 3 typhoons (horizontal direction)(a. Vongfong, b. Dujuan, c. Hagupit)

“黑格比”的观测点位于台风外围,除风向缓慢改变外,其各向风速变化不明显。

4.2 湍流强度

湍流强度反映了风的脉动特征,定义湍流强度为某时距(本文取 30 min)的脉动风速标准方差与平均风速的比值:

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

其中 σ_i 表示脉动风速 $u'(t), v'(t), w'(t)$ 的均方根, σ_i^2 为脉动风速在 i 方向的动能。以垂直方向出现下沉气流以及紧随其后的强风(最大风速大于 10 级)为“台风中心”或“台风中心区域”经过观测点的实测指标,则强热带风暴“黄蜂”的中心于 19 日

19:00~20:30 经过本观测点,台风“杜鹃”的中心区域在 2 日 20:00~22:30 前后经过本观测点。

从图 4 可以看出,在“黄蜂”中心和靠近“杜鹃”台风中心的区域内,主风向、侧风向以及垂直方向的湍流强度均剧烈增大,其中主风向湍流强度可增大 2 倍以上,达到 0.75~0.87,且呈 $I_u > I_v > I_w$;而追踪观测台风“黑格比”的测点位置设在离该台风中心登陆点约 200 km 的广州,当时只受到台风的外围环流影响,图 4c 的计算结果显示,受台风外围环流影响,三维各向的湍流度变化不明显,但由于受城市下垫面影响,其平时的湍流度都较大,并且仍满足 $I_u > I_v > I_w$ 的规律。

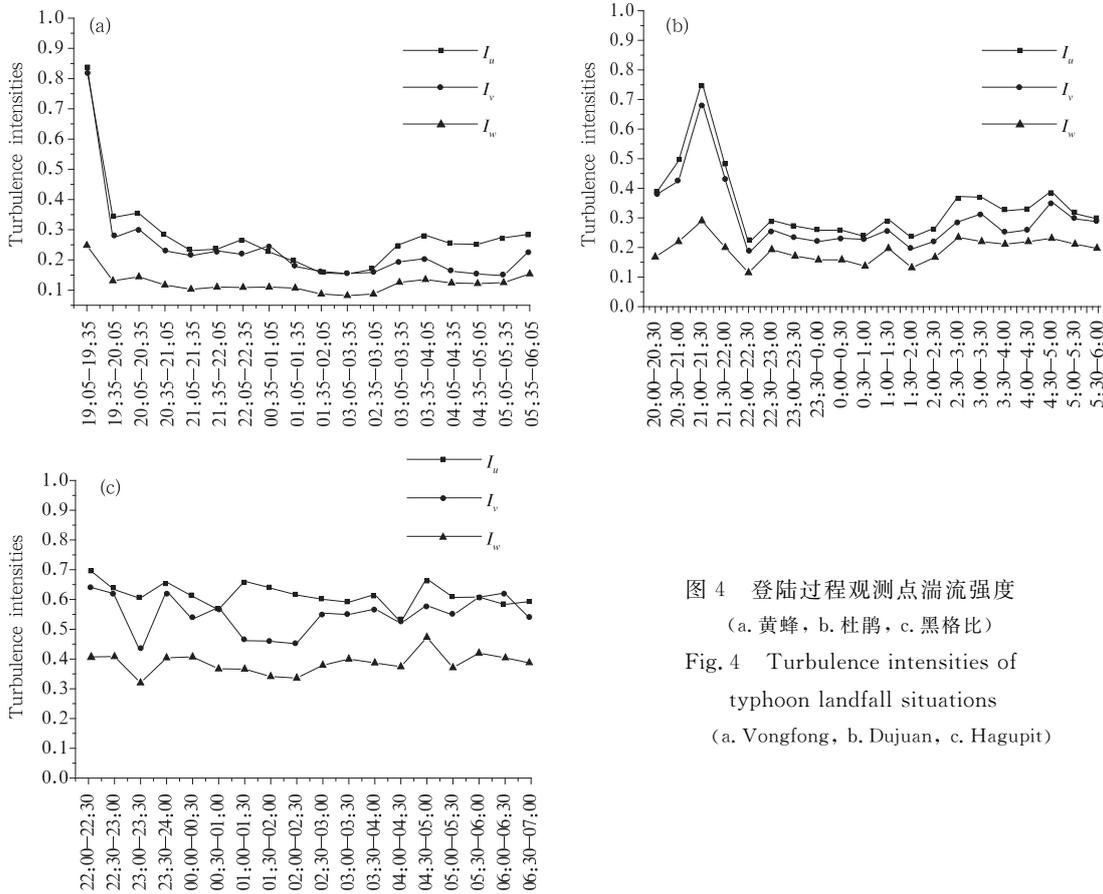


图 4 登陆过程观测点湍流强度 (a. 黄蜂, b. 杜鹃, c. 黑格比)
Fig. 4 Turbulence intensities of typhoon landfall situations (a. Vongfong, b. Dujuan, c. Hagupit)

4.3 湍流积分尺度

湍流积分尺度表示的是湍流的平均空间尺度和平均寿命,它表示总体湍流的平均大小。湍流积分长度分析方法的选择对结果的稳定性非常重要,比较有效的方法包括利用 Taylor 假设自相关函数积分法和稳态随机信号自拟合的方法等^[10,11],这里采

用前者,即

$$L = U \int_0^{\infty} R_x(\tau) / \sigma_x^2 d\tau \quad (8)$$

其中 $x(t)$ 为平稳随机信号, $R_x(\tau)$ 为 $x(t)$ 的自相关函数,定义为

$$R_x(\tau) = E[x(t)x(t+\tau)] \quad (9)$$

表 2 台风登陆时与其他小风天气的平均湍流积分尺度比较

Table 2 Turbulence integral length of landing typhoons

台风名称	尺度参量	L_u (m)	L_v (m)	L_w (m)	T_u (s)	T_v (s)	T_w (s)
杜鹃	中心区域经过时	125	80	11	7.3	4.8	2.8
	无台风影响时	44	26	8	7.2	2.0	0.6
黄蜂	中心登陆时	454	288	15	36.2	23.0	1.2
	其他时次	32	56	17	4.8	7.7	2.5
黑格比	台风外围影响时	27	10	5	11.9	4.8	2.3
	无台风影响时	17	9	4	9.2	4.7	2.2

湍流积分的时间尺度定义为

$$T = \int_0^{\infty} R_x(\tau) / \sigma_x^2 d\tau \quad (10)$$

选取 2002 年 8 月 19 日 19:05~20:05 的实测资料为“黄蜂”中心经过的基础数据,选取 2003 年 9 月 2 日 20:30~22:00 的实测资料为“杜鹃”中心区域经过的基础数据,湍流积分尺度计算结果表 2 中可以看出,登陆台风中心和中心区域,其水平湍流积分尺度在主风方向明显增大,其中“黄蜂”的观测点正处于该台风的中心,其台风中心主风向湍流积分长度较平时增大了一个量级,由几十米变为几百米的量级,侧风向的湍流积分长度也十分显著地增大。在靠近“杜鹃”台风的中心区域(并不是在正中心),其湍流积分长度在主、侧风方向也明显增大,但增大的幅度远小于“黄蜂”,湍流的时间积分尺度也有相应的变化,作者初步分析认为,至少在登陆台风系统中,越靠近其中心位置,水平湍流积分尺度增大幅度越显著,垂直方向则没有明显变化。

4.4 湍流功率谱密度函数

湍流功率谱密度函数 $S_i (i = u, v, w)^{[12]}$ 能够更准确地描述脉动风的特性,它们在频域上的全积分等于脉动对应方向上的湍流动能,即 $\int_0^{\infty} i S_i(n) dn = \sigma_i^2 (i = u, v, w; n$ 为频率), S_i 在频域上的分布可以描述湍流动能在不同尺度水平上的比例。本文采用快速傅立叶变换的方法计算功率谱,同时对 0.2~

5.0 Hz 频率范围内湍流谱,用函数 $y = ax^b$ 进行非线性拟合。由于篇幅的限制,只给出每个测试台风中的 3 个代表样本(见 914 页彩图 5~7)。

对观测数据计算分析发现:

(1) 拟合区间 0.2~5.0 Hz 内,分析惯性子区(图中的拟合区间)的湍流谱特征,可以发现,台风中心经过时,湍谱在惯性子区不能满足各向同性的假设,无台风影响时,则基本满足各向同性的假设。

(2) 惯性子区是平均尺度(小时量级)能量向湍流尺度(秒量级)能量转化的区间,一般满足 $-5/3$ 律(约 1.67),而台风中心经过时的实际观测资料计算结果显示,在台风中心惯性子区内, u, v, w 3 个方向湍谱斜率均不能满足 $-5/3$ 律而发生较大偏移,其偏移幅度呈垂直向 > 侧风向 > 主风向,即惯性子区湍谱斜率垂直风向在 0.6~0.8,侧风向在 0.9~1.0,主风向在 1.0~1.4(图中的拟合区间)。

(3) “黑格比”外围环流影响区(彩图 7),湍谱惯性子区仍然满足各向同性的假设,且湍谱斜率也符合“ $-5/3$ ”律。

(4) 对比“黄蜂”、“杜鹃”中心经过时(彩图 5a, 6a)和无台风影响时(彩图 5c)纵坐标的量级可以发现,不论是低频区还是高频区,在台风中心经过时,各个方向的湍能都较无台风影响时发生了量级的改变——显著增大。在此分别计算了台风中心经过时与无台风影响时高频区(2.0~5.0 Hz)和低频区(0.001~0.1 Hz)的湍流谱密度平均值,从表 3 的计

表 3 台风中心经过时与无台风影响时的湍流谱密度比较

Table 3 Comparison of mean turbulence spectra density with different frequency

台风名称	湍流谱密度平均值	高频部分(2~5 Hz)			低频部分(0.001~0.1 Hz)		
		S_u	S_v	S_w	S_u	S_v	S_w
杜鹃	台风中心经过时	1.473	1.496	0.677	152.988	58.109	6.468
	无台风影响时	0.002	0.002	0.002	0.688	0.340	0.229
黄蜂	台风中心经过时	4.305	3.401	0.868	130.245	47.684	9.907
	无台风影响时	0.015	0.015	0.014	3.199	2.612	0.484
黑格比	台风中心经过时	0.035	0.038	0.032	11.095	9.855	2.998
	无台风影响时	0.036	0.043	0.038	9.756	9.033	3.604

算结果可以看出,“杜鹃”和“黄蜂”中心经过时,其各向的湍流谱密度值在高频区和低频区普遍增大了 1~2 个量级,其中垂直方向增大的幅度略小于水平方向。而只受台风外围环流影响的“黑格比”则变化不明显。

5 讨论

通过对登陆台风“黄蜂”、“杜鹃”和“黑格比”实地观测数据的计算分析得出以下初步结论:

(1) 登陆台风的中心位置和靠近中心位置的强烈影响区域,水平方向的风速、风向均发生剧烈变化,垂直方向出现明显的下沉气流。台风环流的外围区,各向风速变化不明显。

(2) 登陆台风中心或中心影响的区域,湍流强度剧烈增大,其中主风向湍流强度可增大 2 倍以上。

(3) 登陆台风的湍流积分尺度在主风方向可明显增大,越靠近中心位置,增大越明显,在登陆台风的中心,水平向湍流积分尺度可增大一个量级,而湍流积分尺度垂直方向没有明显变化。

(4) 登陆台风的中心和靠近中心位置的强烈影响区域,湍谱在惯性子区不满足各向同性的假设, u, v, w 3 个方向湍谱斜率也不能满足 $-5/3$ 律,其偏移幅度呈垂直向 $>$ 侧风向 $>$ 主风向,惯性子区湍谱斜率,垂直风向在 $0.6 \sim 0.8$,侧风向在 $0.9 \sim 1.0$,主风向在 $1.0 \sim 1.4$ 。而在台风环流外围影响区域,湍谱在惯性子区仍基本满足各向同性的假设,且其斜率也符合“ $-5/3$ ”次方律。

(5) 登陆台风的中心和靠近中心位置的强烈影响区域,湍能在低频区和高频区均可增大 1~2 个量级,其中垂直方向增大的幅度略小于水平方向,而在台风外围环流影响下,湍能的变化不明显。

(6) 本文涉及的登陆台风个例不多,且在登陆台风的不同位置的观测仍较少,所以,以上结论为初步观测事实。

参考文献

- [1] 赵松年,洪钟祥,胡非. 大气边界层湍流的综合观测实验及其动力学特征的研究. 自然科学进展,1992,2:104~111
Zhao Shongnian, Hong Zhongxiang, Hu Fei. Observation test on turbulence the boundary layer and its dynamic characteristic research. Progress Natural Science (in Chinese), 1992,2:104~111
- [2] 许丽人,李宗恺,张宏昇. 不同下垫面上近地层湍流的多尺度属性研究. 气象学报,2000,58(1):83~94
Xu Liren, Li Zhongkai, Zhang Hongshen, A study on multi-scale characteristic of the surface-layer turbulence on different underlying surface. Acta Meteor Sinica (in Chinese), 2000, 58(1):83~94
- [3] 王存忠,曹文俊. 天津市效大气边界层湍流特征分析. 气象学报,1994,52(4):484~491
Wang Cunzhong, Cao Wenjun. Spectral characteristics of surface layer turbulence over the suburbs of Tianjin. Acta Meteor Sinica (in Chinese), 1994,52(4):484~491
- [4] 卞林根,陆龙骅等. 青藏高原南部昌都地区近地层湍流输送的观测研究. 应用气象学报,2001,12(1):1~13
Bian Lingen, Lu Longhua. An observation and study on the turbulence transportation over surface layer of Changdou. J App Meteor Sci (in Chinese), 2001,12(1):1~13
- [5] 高会旺,管玉平,陈长和等. 河谷城市小风条件下的近地层湍流特征. 大气科学,1998,22(6):896~904.
Gao Huiwang, Guang Yuping, Chen Changhe. Atmospheric turbulence features in the surface-layer over valley city with light wind speed. Scientia Atmospherica Sinica (in Chinese), 1998,22(6):896~904.
- [6] 项海帆等. 公路桥梁抗风设计指南. 北京:人民交通出版社,1996. 10
Xiang Haifan, Lin Zhixing. Anti-wind design introduction of road and bridge. Beijing: People Traffic Press, 1996. 10
- [7] Campbell Scientific, Inc., Instruction Manual; CSAT3 Three Dimensional Sonic Anemometer.
- [8] 陈红岩等. 处理时间序列提高计算湍流通量的精度. 气候与环境研究, 2000, 5(3): 304~311
Chen Hongyan, et al. Dealing with imperfect data of improve estimation precision of turbulence flux. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 2000, 5(3): 304~311
- [9] Xu Y L, Zhan S. Field measurements of Diwang tower during Typhoon York. J Wind Engi and Indus Aerodynamics, 2001, 89: 73~93
- [10] Flay R G J, Stevenson D C. Integral length scales in strong winds below 20 m. J Wind Engi and Indus Aerodynamics, 1984,28: 21~30
- [11] Pang J B, Ge Y J, Lu Y. Analysis methods for integral length of turbulence. Proceeding of the 2nd International Symposium on Advances in Wind and Structures. Techno-Press, Korea, 2002. 8
- [12] Roland B Stull. 杨长新等译. 边界层气象学导论. 北京:气象出版社,1991. 334~338
Roland B Stull. Boundary Layer Meteorology. Beijing, China Meteorology Press, 1991. 334~338

ANALYSIS ON BOUNDARY LAYER TURBULENT FEATURES OF LANDFALLING TYPHOON

Song Lili

(*Guangzhou Institute of Tropical and Marine Meteorology, CMA, Guangzhou, 510080*)

Mao Huiqin Zhi Shiqun Huang Haohui Liu Jinluan Liu Aijun

(*Guangdong Climate and Agrometeorology Center, Guangzhou 510080*)

Abstract

Typhoons are one of severe weather systems inducing severe catastrophe in the coastal regions in China. Investigation on characteristics of near-surface turbulence of landfalling typhoons is vitally important for better understanding of inner structure and movement of typhoons, characters of disasters so arisen, as well as sustaining period of typhoons. Furthermore, near-surface turbulence activities of landfalling typhoons have enormous impact on buildings, safety of lives and properties in the typhoon affected regions. Based on a number of observations on landfalling typhoons, three representative cases of “Vonfong”, “Dujuan” and “Hagupit” were chosen in the article to analyze near-surface turbulence characteristics in the typhoon center, severely affected areas near typhoon center and their peripheral areas of typhoon. It is expected through this study to improve our understanding of near-surface turbulence characteristics of landfalling typhoons.

In-situ observations were carried out using CSAT3d type of three dimensional supersonic anemometer manufactured by Campbell Science in USA, with data sampling frequency of 10Hz. The supersonic anemometer is capable of automatically providing data quality codes to eliminate invalid data. Therefore, interference on data accuracy by rainfall can be avoided. In this study, multiple samples were chosen to analyze for each typhoon processes with each sampling length of 30 minutes, and over 98% valid data for each sample. Each sample is processed to satisfy the requirement of stable stochastic process by applying linear interpolation technique to interpolate at data void points, and second order polynomials fitting to remove trend in the time series.

Through computational analysis on the observational data of typhoons “Vonfong”, “Dujuan” and “Hagupit”, Preliminary results may be obtained as following: (1) In the center and its adjacent areas of a landfalling typhoon, horizontal wind speeds and directions change dramatically, with significant downdraft in the vertical. (2) In the center or its adjacent areas of a landfalling typhoon, turbulence intensities increase enormously, and may increase over two times in the principal wind direction. (3) In the center area of a landfalling typhoon, the turbulence integral scale can be expanded significantly in the principal wind direction, closer to the center, more significant the scale expansion. In the center of a landfalling typhoon, the turbulence integral scale l may be expanded by one order in horizontal, while no evident change of turbulence integral scale can be manifested in vertical. (4) In the centre or its adjacent areas of a landfalling typhoon, the turbulence spectral in the inertial range does not satisfy the assumption of isotropy. Neither do the slope rates of turbulence spectra in u , v and w directions satisfy the $-5/3$ law. The deviation amplitude generally exhibits in vertical $>$ side $>$ principal wind direction, i. e. the slope rates in the inertial range were 0.6—0.8 in vertical wind direction, 0.9—1.0 in side wind direction and 1.0—1.4 in principal wind direction. However, in the peripheral circulation of typhoon, the assumption of isotropy is basically satisfied, with the slope rates in accordance with the rule of “ $-5/3$ ” power. (5) In the centre or its adjacent areas of a landfalling typhoon, turbulent energy can increase by 1 to 2 orders in both low and high frequency domains. The amplitude of increase is less in vertical than in horizontal. However, in the periphery of typhoon circulation, no evident change of turbulent energy was observed.

Key words: Landfalling typhoon, Boundary layer observation, Turbulence features.