

程雪玲, 房小怡, 卢俐, 等. 2016. 强风天气下边界层结构特征 [J]. 气候与环境研究, 21 (1): 99–106. Cheng Xueling, Fang Xiaoyi, Lu li, et al. 2016. The characteristics of boundary layer structure under strong wind weather [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 21 (1): 99–106, doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2015.15000.

强风天气下边界层结构特征

程雪玲¹ 房小怡² 卢俐³ 胡天洁³ 洪钟祥¹ 曾庆存¹

1 中国科学院大气物理研究所大气边界层物理和大气化学国家重点实验室, 北京 100029

2 北京市气候中心, 北京 100089

3 北京市气象信息中心, 北京 100089

摘要 近地层观测的强风运动表明, 叠加在平均流动之上的脉动通常有两种, 一种是随机的湍流脉动, 还有一种具有相干结构的阵风扰动。分析表明, 上层强风的剪切运动产生阵风, 并向下传递能量, 对近地层的通量传输起到重要作用。本文利用北京 325 m 气象塔、位于海拔 1257 m 的妙峰山测风塔和位于海拔 1688 m 的灵山测风塔的资料, 分析了强风天气下, 边界层上层出现阵风并向下传递的过程, 进一步证实无论在近地层还是边界层上层, 强风期间, 叠加在平均流动上除了高频湍流脉动之外, 还有周期为 1~10 分钟的阵风, 即相干结构。阵风峰期有下沉运动, 阵风谷期有上升运动。这些相干结构在边界层上层产生, 向下运动和传播过程中受到平均气流梯度的切变作用和地面摩擦, 破碎为湍流结构。边界层上层的阵风和湍流产生的动量通量向下传递, 使得强风期间, 边界层中阵风和湍流对通量具有同样的输送能力, 对边界层中沙尘、污染物等气溶胶的传输具有重要作用。本研究为模式中进行通量输送参数化方案的修正提供了观测和理论依据。

关键词 湍流 阵风 相干结构 强风 大气边界层

文章编号 1006-9585(2016)01-0099-08

中图分类号 P404

文献标识码 A

doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2015.15000

The Characteristics of Boundary Layer Structure under Strong Wind Weather

CHENG Xueling¹, FANG Xiaoyi², LU li³, HU Tianjie³, HONG Zhongxiang¹, and ZENG Qingcun¹

1 State Key Laboratory of Atmospheric Boundary Layer Physics and Atmospheric Chemistry, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029

2 Beijing Climate Center, Beijing 100089

3 Beijing Meteorological Information Center, Beijing 100089

Abstract Observation of surface-layer strong winds shows there are two kinds of velocity fluctuations superimposed on the average flow: random turbulent fluctuations, and coherent gusty wind disturbances. Studies on the boundary-layer structure under strong wind weather infer that the shear effect of strong wind in the upper layer produces gusty wind disturbances and transports energy downward. This is important for flux transportation in the surface layer. In this study, data were obtained from the Beijing 325 m meteorological tower, the wind tower at a height of 1257 m on Miaofengshan Mountain, and the tower at a height of 1688 m on Lingshan Mountain. Based on these data, the gusty wind disturbances in the upper layer and the downward transportation under strong wind weather were analyzed. Results showed that there were gusty wind disturbances in both the surface and upper layers (coherent structures whose periods were between one

收稿时间 2013-12-18; 网络预出版日期 2015-09-17

作者简介 程雪玲, 1971 年出生, 研究员, 主要从事大气边界层湍流理论与流场数值模拟的研究。E-mail: chengxl@mail.iap.ac.cn

资助项目 国家自然科学基金项目 41375018, 国家重点基础研究发展计划 (973 计划) 项目 2010CB951804

Funded by National Natural Science Foundation of China (Grant 41375018) and National Basic Research Program of China (973 Program, Grant 2010CB951804)

and ten minutes), superimposed on the average flow, as well as high-frequency turbulent fluctuations during strong wind periods. The coherent structures showed that the vertical velocity was downward when the horizontal velocity was in its peak phase, and vice versa. Furthermore, they were produced in the upper part of the boundary layer, and affected by the shear of the average flow and friction of the ground during their downward movement and transport process, before being broken up to form turbulence. The momentum fluxes of windy gusts and turbulence in the upper layer transported downward. During strong wind periods, the downward fluxes of momentum by windy gusts and turbulence were the same, both being important for the transportation of sand, dust, pollution, and other aerosols. This study provides an observational and theoretical basis for the development of flux transportation parameterization in models.

Keywords Turbulence, Windy gust, Coherent structure, Strong wind, Atmospheric boundary layer

1 引言

影响北京春季的沙尘天气通常受蒙古气旋的影响,冷锋后部较强的西北气流将蒙古、甘肃等地的沙尘输送到华北地区。在沙尘传输的过程中,阵风相干结构对起沙扬尘有重要作用。通过分析北京 325 m 气象塔的沙尘天气资料,揭示出强风天气的阵风是叠加在平均风上的周期为 1~10 分钟的相干结构,即阵风峰期有下沉运动,阵风谷期有上升运动(程雪玲等, 2007; Zeng et al., 2010; Cheng et al., 2011, 2012)。这些相干结构在边界层上层产生,并向下传递与地表局地湍流涡旋相互作用,Top-down(自上而下)模型对该过程进行了解释(Hunt and Morrison, 2000; Hunt and Carlotti, 2001; Högström et al., 2002; Morrison, 2007; Fesquet et al., 2009; Horiguchi et al., 2010),该模型指出高雷诺数的近中性边界层分为三个次层,三个次层中下垫面阻碍(blocking)、风切变(shear)和近地面风切变(surface shear)对相干结构起到不同的作用:在混合层(ML)风切变和能量耗散占主要地位;在近地层(SL)风切变和下垫面阻碍都起到显著的作用;在冠层(CL)下垫面的阻碍起到主要作用。大尺度结构向下运动和传播过程中同时受到地表的阻碍和平均气流梯度的切变作用;在近地面,这些扭曲、变形的涡旋与地面摩擦破碎为随机的湍流脉动。以往的观测资料多是在近地层的气象塔上获得的,分析表明,强风期间近地层风场中存在阵风相干结构,但在边界层上层是否同样存在阵风相干结构,使动量下传,加强近地层通量输送,还需要结合边界层上层的观测资料进行进一步分析。

本文利用位于北京德胜门外的 325 m 气象塔、位于海拔 1257 m 的妙峰山测风塔和位于海拔 1688 m 的灵山测风塔,分析了强风天气下边界层上层出

现阵风并向下传递的过程。

2 观测试验

本文利用设在北京周边山区的风能测风塔的观测资料,结合北京 325 m 综合气象观测塔的资料,选择大风时段,特别是一次北京沙尘天气的资料,分析了强风期间,近地层一直到边界层上层的风场结构特征。观测资料为 2010 年 1 月、3 月,2012 年全年,2013 年 1~4 月期间的大风天气资料,特别是 2010 年 3 月 19~22 日覆盖华北地区的沙尘暴过程的风场资料。

北京灵山江水河测风塔(40.04°N, 115.49°E, 记作 L)位于海拔 1688 m 处,塔高 100 m。塔上有五层平均场,分别位于 10 m、30 m、50 m、70 m 和 100 m;有一层超声测量,位于 70 m,采样频率为 10 Hz。北京妙峰山涧沟测风塔(40.0781°N, 116.0453°E, 记作 M),位于海拔 1257 m 处,塔高 70 m,塔上有四层平均场,分别位于 10 m、30 m、50 m 和 70 m。北京 325 m 综合气象观测塔(39°58'N, 116°22'E, 记作 B),地处海拔 49 m 处。塔上有 15 层平均场,分别位于 8 m、15 m、32 m、47 m、65 m、80 m、102 m、120 m、140 m、160 m、180 m、200 m、240 m、280 m 和 320 m;有三层 Campbell CSAT3 型超声风速温度仪,分别位于 47 m、140 m 和 280 m,采样频率为 10Hz;在其附近有一座 10 m 测风塔,塔上有两层超声测量,分别是位于 2 m 的 Gill R3 型超声风速温度仪,和位于 10 m 的 Gill Windmaster 型超声风速温度仪,采样频率为 10 Hz。图 1 为三座测风塔的位置。灵山测风塔与北京 325 m 气象塔的海拔高差为 1639 m,妙峰山测风塔与北京 325 m 气象塔的海拔高差为 1208 m。

2010 年 3 月 20 日,大风扬起的沙尘袭击京城。受沙尘影响,空气质量下降至五级重度污染。这是一

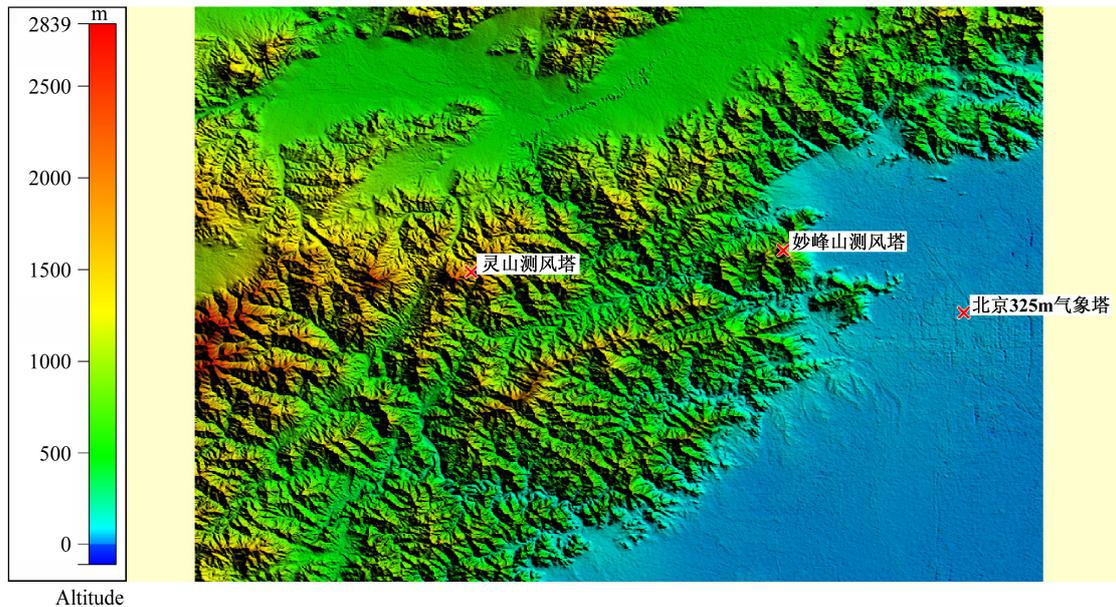


图 1 三座测风塔的位置

Fig. 1 Locations of the three wind towers

次典型的外来沙尘严重影响北京的事件。在大风的输送下，沙尘从高空飘到北京来，而源头在蒙古国和内蒙古中部包头一带。3月18日，冷空气在蒙古国造成了沙尘天气，并在3月19日南下到内蒙古中部，在包头一带继续卷起当地沙尘，形成了沙尘暴，并再次南下影响北京。从19日到20日，中国16个省市自治区经历了近年来最强的一次沙尘暴天气。与此同时，中国的邻国韩国和日本，也遭遇了这场沙尘暴。韩国气象厅称，自2005年开始仪器观测沙尘浓度以来，20日席卷韩国全境的沙尘暴是最严重的。

图2是2010年3月19~21日在灵山测风塔、妙峰山测风塔和北京325m气象塔各层获得的10分钟平均风速和风向。从图2b和图2d可以看到，上层风向从19日开始为西北风，直到21日凌晨；而图2f显示近地层的风向从20日凌晨3点才开始转变为稳定的西北风，对应的风速也在此时开始增大，并且出现阵性波动。

图3是2010年3月19~21日各层高度上的超声风速仪得到的水平风速和垂直风速，这里给出的是10分钟平均的风速，且水平风速为经过一次坐标旋转合成的顺风风速。图3a显示，20日2点左右灵山上的风速开始持续增大，随后下层风速逐渐增大，到凌晨3点左右，近地层10m层风速开始增大，到6点，2m层风速开始增大。图3b显示垂直风速有明显的上升下沉运动，在20日，近地层2

m和10m高度基本上为下沉气流，47m和140m高度上则为上升气流，在近地层出现平均流分离的剪切运动。而更上层280m和灵山上的气流则出现了先上升，后下沉的运动，平均垂直风速非常小。

图4是大风期间获得的风速资料进行10分钟平均后得到的水平风速和垂直风速廓线，其中每个黑色方点是10分钟平均风速，红色圆点是所有风速的平均值。图4a是北京325m气象塔测得的近地层水平风速，图4b和图4c是灵山测风塔和妙峰山测风塔测得的边界层上层的水平风速。从图上可以看到，水平风速为指数分布，山上风速随高度增加迅速增大。图4d为北京325m气象塔和其附近10m测风塔所测得的垂直风速，平均垂直风速在2m和10m高度显示有下沉气流，在47m和140m高度气流上升，而灵山测风塔测得的边界层上层的平均垂直风速接近为零（图中未显示）。

3 阵风与湍流特征

我们对风速 (u, v, w) 的时间序列 $f(t)$ 做分析。一般是把 $f(t)$ 分为两部分，低频信号 $\bar{f}(t)$ 和叠加在低频信号上的脉动值 $f'(t)$ ：

$$f(t) = \bar{f}(t) + f'(t). \quad (1)$$

周期介于湍流和平均风速之间的扰动称为阵风，一般为一至数分钟一次 (WMO, 2006)。以往的研究

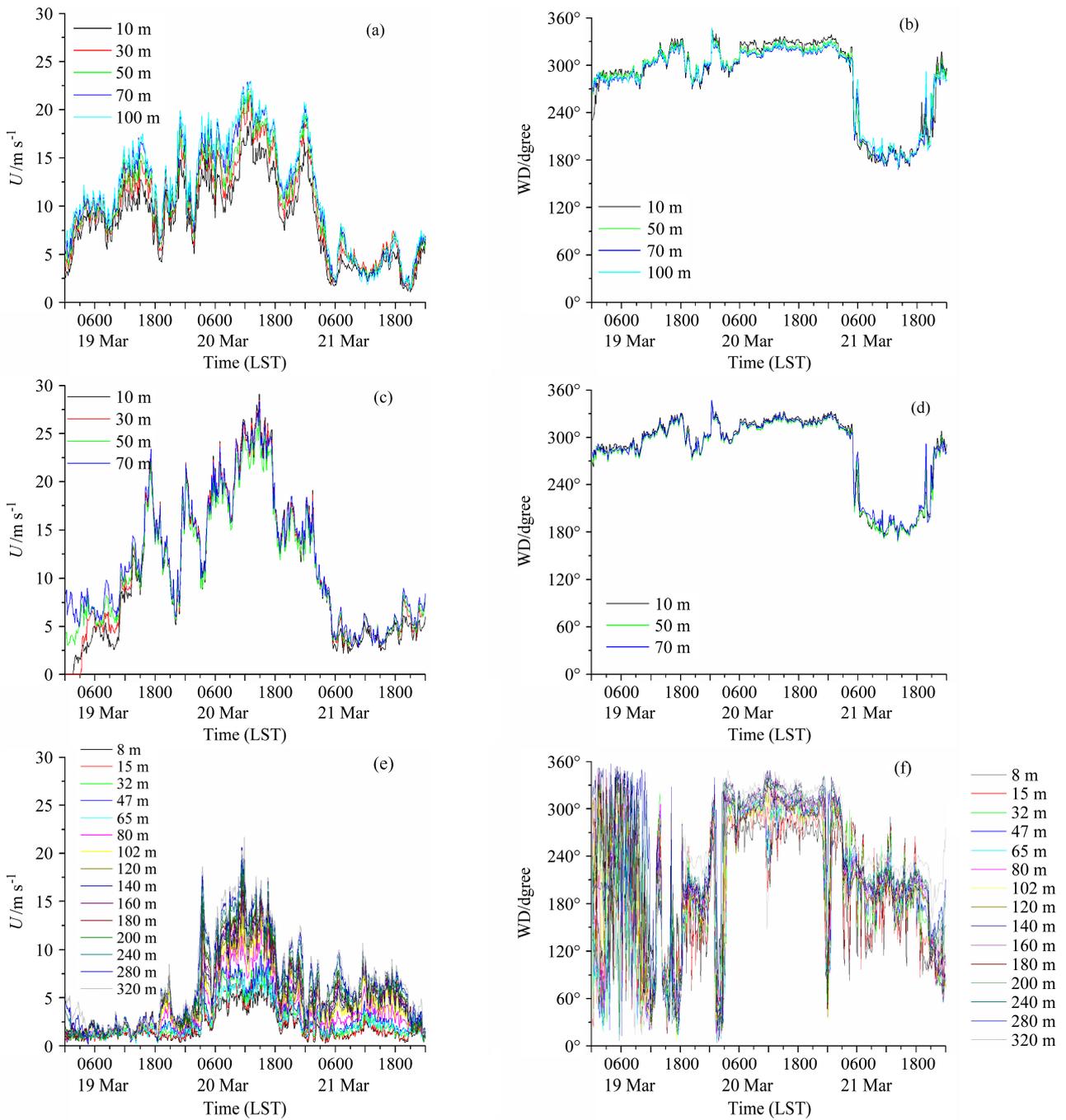


图2 2010年3月19~22日三座塔各层平均风速 U (左列) 和风向 (WD; 右列): (a、b) 灵山测风塔; (c、d) 妙峰山测风塔; (e、f) 北京 325 m 气象塔

Fig. 2 Average wind speed (U , left) and wind direction (WD, right) at various levels of (a, b) Lingshan tower, (c, d) Miaofengshan tower, and (e, f) Beijing 325 m tower, during 19–22 March 2010

(程雪玲等, 2007; Zeng et al., 2010; Cheng et al., 2011, 2012) 也表明, 强风期间, 叠加在平均流动上除了高频湍流脉动之外, 还有周期为 1~10 分钟的阵风相干结构。因此, 我们再将 $f'(t)$ 分为两部分: 周期小于一分钟的脉动 (称为湍流) $f_t(t)$, 和

周期大于 1 分钟小于 10 分钟的脉动 (称为阵风) $f_g(t)$, 按周期 (或频率) 将 f 傅氏展开为三部分:

$$f(t) = \bar{f}(t) + f_g(t) + f_t(t), \quad (2)$$

其中, $\bar{f}(t)$ 就是所谓的“基流”或者“平均流”, 它的周期大于 10 分钟; $f_g(t)$ 是“阵风”, 其周期介

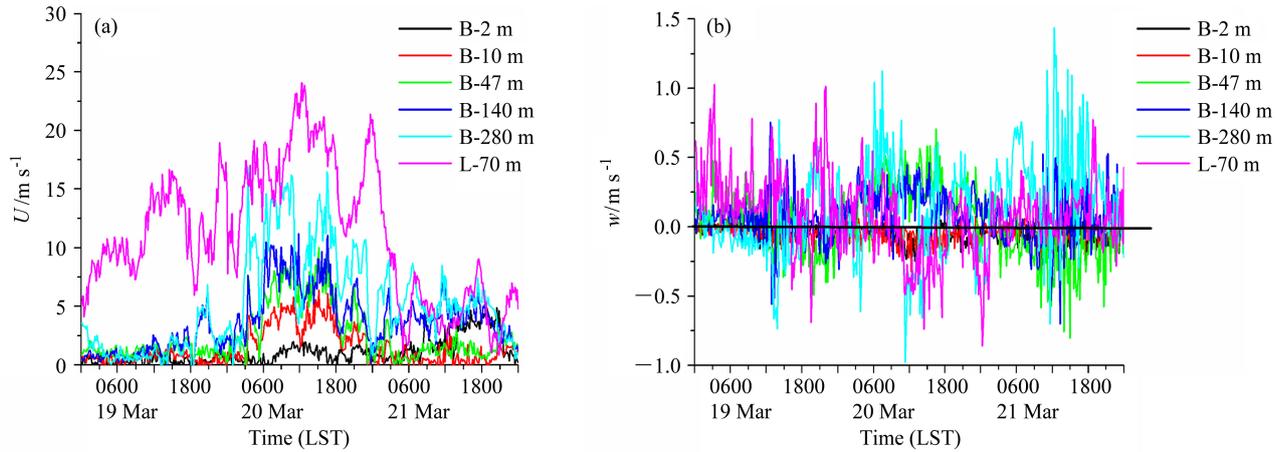


图 3 2010 年 3 月 19~22 日各层的 10 分钟平均的 (a) 水平超声风速和 (b) 垂直超声风速

Fig. 3 The 10 min averaged (a) horizontal ultrasonic velocity (U) and (b) vertical ultrasonic velocity (w) at various levels during 19–22 March 2010

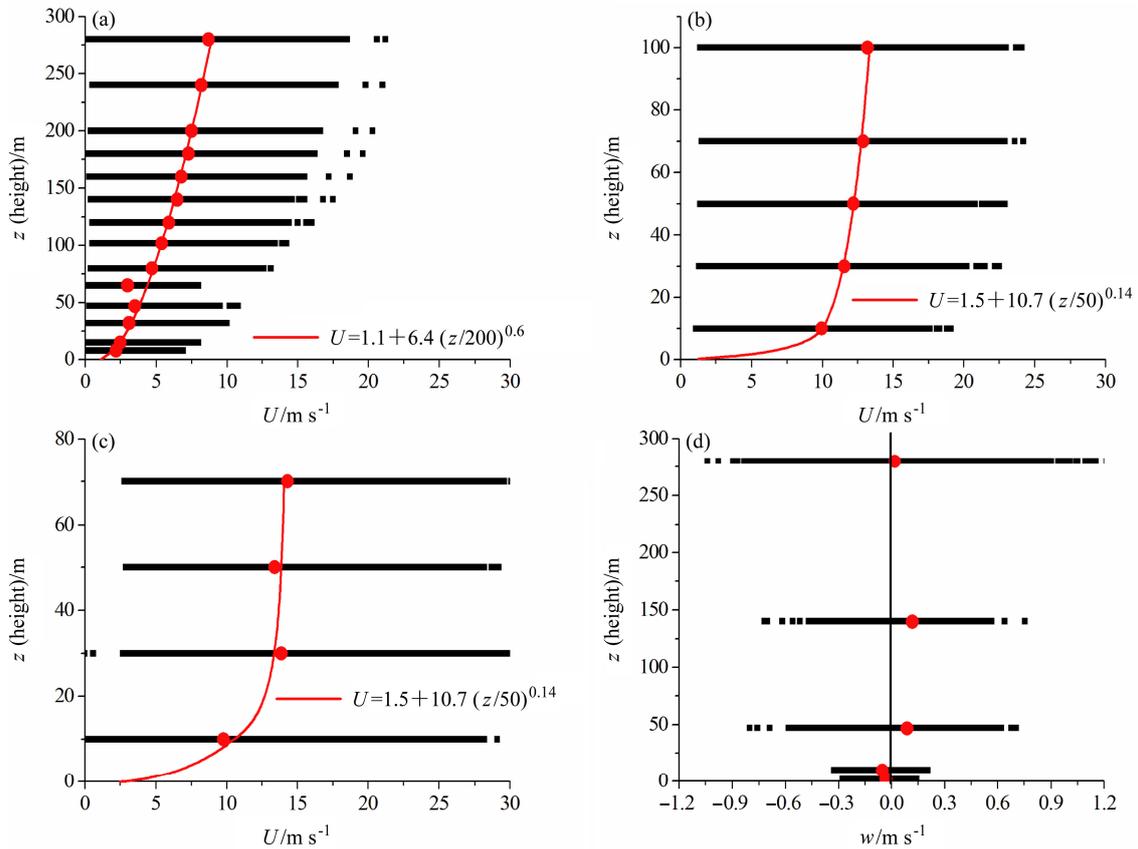


图 4 (a) 北京 325 m 气象塔、(b) 灵山测风塔和 (c) 妙峰山测风塔所测得的水平风速。(d) 北京 325 m 气象塔和 10 m 测风塔的平均垂直风速廓线

Fig. 4 The averaged horizontal velocity profiles of (a) Beijing 325 m tower, (b) Lingshan tower, (c) Miaofengshan tower. (d) Vertical velocity averaged for Beijing 325 m tower and 10 m tower

于 1 到 10 分钟之间； $f_t(t)$ 是“湍流”，它是周期小于 1 分钟的高频脉动。

因此，对于水平风速有

$$u(t) = \bar{u}(t) + u_g(t) + u_t(t), \quad (3)$$

$$v(t) = \bar{v}(t) + v_g(t) + v_t(t), \quad (4)$$

对于比较稳定的基流来说， $\bar{u}(t)$ 为水平风速，而 $\bar{v}(t) = 0$ ， $u_g(t)$ ， $v_g(t)$ ， $u_t(t)$ ， $v_t(t)$ 分别为顺风方向和垂直于顺风方向的阵风扰动或湍流脉动。

对于垂直风速有

$$w(t) = \bar{w}(t) + w_g(t) + w_t(t), \quad (5)$$

其中, 一般 $\bar{w}(t) = 0$, $w_g(t)$, $w_t(t)$ 分别为垂直风速的阵风扰动和湍流脉动。图 5 为 2010 年 3 月 20 日 10:00 沙尘暴爆发后, 北京 325 m 气象塔 47 m 高度

(海拔 96 m) 和灵山塔 70 m 高度 (海拔 1758 m) 的水平风速分解 (图 5a 和图 5c) 和垂直风速分解 (图 5b 和图 5d), 以及阵风水平、垂直分量相干时间序列 (图 5e 和图 5f)。

从图 5 中可以看到, 在强风期间, 无论近地层

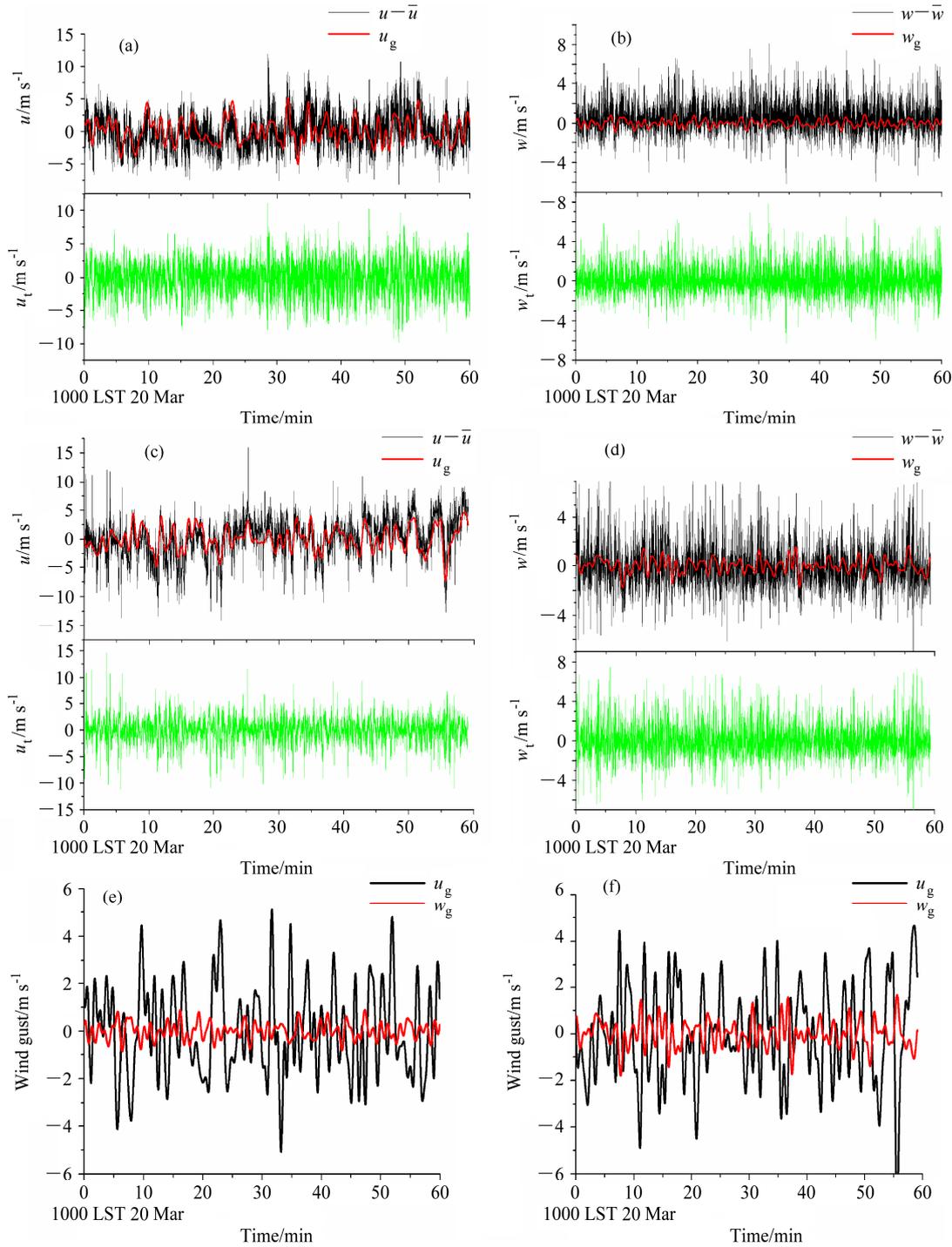


图 5 2010 年 3 月 30 日 10 时开始海拔 96 m 高度处的 (a) 水平风速分解、(b) 垂直风速分解, 海拔 1758 m 高度处的 (c) 水平风速分解、(d) 垂直风速分解, (e) 海拔 96 m 高度处的阵风相干序列, (f) 海拔 1758 m 高度处阵风相干序列

Fig. 5 The wind speed components at (a, b, e) 96 m altitude and (c, d, f) 1758 m altitude from 1000 LST 30 March 2010: (a, c) horizontal velocity components; (b, d) vertical velocity components; (e, f) windy gusts

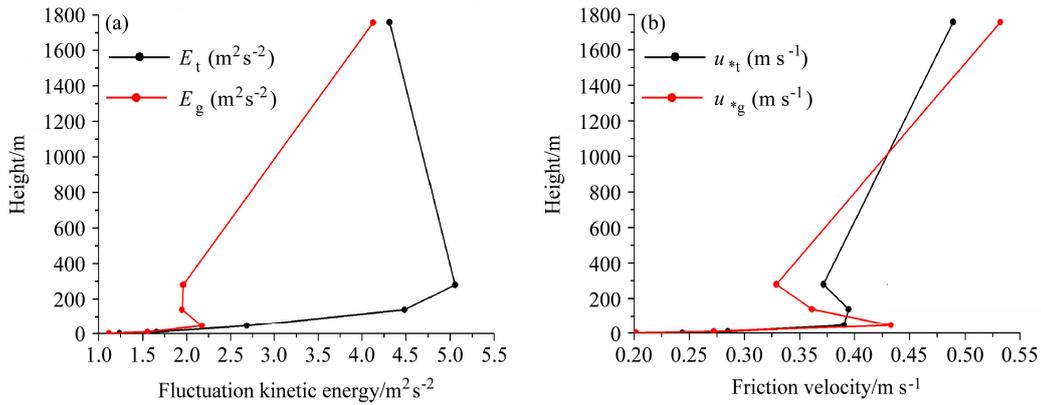


图6 各层的 (a) 脉动动能和 (b) 摩擦速度

Fig. 6 The profiles of (a) fluctuation kinetic energy and (b) friction velocity

还是边界层上层，都具有明显的相干结构。我们定义阵风扰动动能 $E_g = u_g^2 + v_g^2 + w_g^2$ 、湍流脉动动能 $E_t = u_t^2 + v_t^2 + w_t^2$ 以及水平动量通量：

$$\tau_x = -\overline{\rho u w}, \quad (6)$$

$$\tau_y = -\overline{\rho v w}, \quad (7)$$

其中， ρ 为空气密度， u 为顺风方向风速， v 为垂直于顺风方向的横向风速， w 为垂直风速。从而，

$$-\frac{\tau_x}{\rho} = \overline{u w} = \overline{u} \cdot \overline{w} + \overline{u' w'} \approx \overline{u} \cdot \overline{w} + \overline{u_g w_g} + \overline{u_t w_t}, \quad (8)$$

$$-\frac{\tau_y}{\rho} = \overline{v w} = \overline{v} \cdot \overline{w} + \overline{v' w'} \approx \overline{v} \cdot \overline{w} + \overline{v_g w_g} + \overline{v_t w_t}, \quad (9)$$

式中， $\overline{u_g w_g}$ ， $\overline{v_g w_g}$ 为阵风对动量通量的贡献。 $\overline{u_t w_t}$ ， $\overline{v_t w_t}$ 为湍流对动量通量的贡献。定义

$$u_{*g} = \left[\left(\overline{u_g w_g} \right)^2 + \left(\overline{v_g w_g} \right)^2 \right]^{\frac{1}{4}}, \quad (10)$$

$$u_{*t} = \left[\left(\overline{u_t w_t} \right)^2 + \left(\overline{v_t w_t} \right)^2 \right]^{\frac{1}{4}} \quad (11)$$

分别为阵风的摩擦速度和湍流的摩擦速度。图6是用上述方法计算得到的强风期间提取的湍流和阵风的脉动动能和摩擦速度垂直廓线。图6a给出了从地面到高空的湍流动能和阵风动能分布，图6b是湍流摩擦速度和阵风摩擦速度的分布。强风期间，高空产生阵风相干结构、湍流等不同尺度的结构，从图6a可见，阵风动能在高空最大，湍流动能虽然在高空不是最大值，但与阵风动能量级相当，大尺度结构向下运动和传播过程中由于受平均气流梯度的切变作用和地表摩擦，扭曲、变形、破碎为湍流，使得下层湍动能要大于阵风动能。图6b表明二者的摩擦速度即向下传递的动量通量在高

空都最大，说明动量通量是由高空向下传递的。这些都与通常天气条件下的传输过程有所不同。

4 结论

本文利用强风期间，特别是一次沙尘暴过程期间，北京 325 m 气象塔、妙峰山测风塔和灵山测风塔的平均场及超声观测资料，分析了强风天气下从近地层到边界层上层的风场结构特征。分析表明，无论在近地层还是边界层上层，强风期间，叠加在平均流动上除了高频湍流脉动之外，还有周期为一至 10 分钟的阵风相干结构，即阵风峰期有下沉运动，阵风谷期有上升运动。这些相干结构在边界层上层产生，向下运动和传播过程中受到平均气流梯度的切变作用和地面摩擦，破碎为湍流结构。边界层上层的阵风和湍流产生的动量通量向下传递，使得强风期间，边界层中阵风和湍流对通量具有同样的输送能力，对边界层中沙尘、污染物等气溶胶的传输具有重要作用。本研究为模式中进行通量输送参数化方案的修正提供了理论依据。

参考文献 (References)

程雪玲, 曾庆存, 胡非, 等. 2007. 大气边界层强风的阵性和相干结构[J]. 气候与环境研究, 12 (3): 227–243. Cheng Xueling, Zeng Qingcun, Hu Fei, et al. 2007. Gustiness and coherent structure of strong wind in the atmospheric boundary layer[J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 12 (3): 227–243, doi:10.3969/j.issn.1006-9585.2007.03.003.

Cheng X L, Zeng Q C, Hu F. 2011. Characteristics of gusty wind disturbances and turbulent fluctuations in windy atmospheric boundary layer behind cold fronts [J]. J. Geophys. Res., 116 (D6): D06101,

- doi:10.1029/2010JD015081.
- Cheng X L, Wu L, Hu F, et al. 2012. Parameterizations of some important characteristics of turbulent fluctuations and gusty wind disturbances in the atmospheric boundary layer [J]. *J. Geophys. Res.*, 117 (D8): D08113, doi:10.1029/2011JD017191.
- Fesquet C, Drobinski P, Barthlott C, et al. 2009. Impact of terrain heterogeneity on near-surface turbulence structure[J]. *Atmospheric Research*, 94 (2): 254–269, doi:10.1016/j.atmosres.2009.06.003.
- Högström U, Hunt J C R, Smedman A S. 2002. Theory and measurements for turbulence spectra and variances in the atmospheric neutral surface layer [J]. *Bound.-Layer Meteor.*, 103 (1): 101–124, doi:10.1023/A:1014579828712.
- Horiguchi M, Hayashi T, Hashiguchi H, et al. 2010. Observations of coherent turbulence structures in the near-neutral atmospheric boundary layer [J]. *Bound.-Layer Meteor.*, 136 (1): 25–44, doi:10.1007/s10546-010-9500-5.
- Hunt J C R, Morrison J F. 2000. Eddy structure in turbulent boundary layers [J]. *European Journal of Mechanics-B/Fluids*, 19 (5): 673–694, doi:10.1016/S0997-7546(00)00129-1.
- Hunt J C R, Carlotti P. 2001. Statistical structure at the wall of the high Reynolds number turbulent boundary layer [J]. *Flow, Turbulence and Combustion*, 66 (4): 453–475, doi:10.1023/A:1013519021030.
- Morrison J F. 2007. The interaction between inner and outer regions of turbulent wall-bounded flow [J]. *Philos. Trans. Roy. Soc. London*, 365(1852): 683–698, doi:10.1098/rsta.2006.1947.
- WMO. 2006. Guide to meteorological instruments and methods of observation, 7th edition [M]. Switzerland: World Meteorological Organization, 681pp.
- Zeng Q C, Cheng X L, Hu F, et al. 2010. Gustiness and coherent structure of strong winds and their role in dust emission and entrainment [J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 27 (1): 1–13, doi:10.1007/s00376-009-8207-3.