

张宏升, 刘新建, 朱好, 等. 2010. 北京北郊冬季大风过程湍流通量演变特征的分析研究 [J]. 大气科学, 34 (3): 661–668. Zhang Hongsheng, Liu Xinjian, Zhu Hao, et al. 2010. Characteristics of turbulent transfer during the strong wind period in the northern suburbs of Beijing [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 34 (3): 661–668.

北京北郊冬季大风过程湍流通量演变特征的分析研究

张宏升¹ 刘新建^{2, 1} 朱好¹ 刘辉志³ 胡非³

1 北京大学物理学院大气科学系, 北京 100871

2 中国核电工程有限公司, 北京 100840

3 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

摘 要 利用中国科学院大气物理研究所 325 m 气象观测塔 1993 年 12 月~1994 年 1 月大气边界层实验资料, 计算分析了大风过境过程中 47 m 和 120 m 高度湍流通量演变特征及其影响因子, 以及与风速、稳定度等参数的关系。结果表明: 大风过程对近地面层的物质能量输送有着重要影响, 大风之前出现短时间动量上传和热量下传; 大风过程中的湍流通量数值明显高于过境后, 水平方向湍流通量数值和能量增加幅度大于垂直方向; 当风速大于临界值 5 m/s 时, 湍流通量与风速、湍流动能的相关迅速增大; 湍流谱特征表现为湍流能量的低频部分增加、湍流谱曲线变宽; 大风能强烈影响近地面层的能量收支。

关键词 大风 湍流结构 感热通量 动量通量

文章编号 1006-9895 (2010) 03-0661-08

中图分类号 P425

文献标识码 A

Characteristics of Turbulent Transfer during the Strong Wind Period in the Northern Suburbs of Beijing

ZHANG Hongsheng¹, LIU Xinjian^{2, 1}, ZHU Hao¹, LIU Huizhi³, and HU Fei³

1 Department of Atmospheric Sciences, School of Physics, Peking University, Beijing 100871

2 China Nuclear Power Engineering Co., Ltd., Beijing 100840

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

Abstract Based on the data collected from the 325-m meteorological tower operated by the Institute of Atmospheric Physics of Chinese Academy of Sciences in the northern suburbs of Beijing during the period from December 1993 through January 1994, the characteristics of the turbulent fluxes measured at the heights of 47 m and 120 m, and their variations with respect to the wind speed and stability parameters during the passage of strong wind are analyzed. The results indicated that the strong wind has great influence on the turbulent transfer in the near surface layer. There is a short period before the strong wind when the momentum flux is upward, and the heat flux is downward. The turbulent fluxes during the strong wind episode are obviously larger than those after the passage of

收稿日期 2009-06-11, 2009-08-18 收修定稿

资助项目 国家自然科学基金资助项目 40775013, 教育部博士点专项基金 20060001025, 财政部-科技部公益专项 GYHY200806007, 国家高技术研究发展计划 (863 计划) 2006AA06A306

作者简介 张宏升, 男, 1964 年出生, 教授, 主要从事大气物理与环境研究。E-mail: hsdq@pku.edu.cn

strong wind. The horizontal turbulent fluxes and the energy increment are larger than the vertical values. The correlations between the turbulent fluxes and the wind speed, and turbulent kinetic energy increase rapidly when the wind speed exceeds the threshold value. The low-frequency component in the spectrum of turbulence rises, and the turbulent spectral curve widens. The energy budget in the surface layer can be strongly influenced by the strong wind.

Key words strong wind, turbulent structure, sensible heat flux, momentum flux

1 引言

20 世纪 60 年代以来,随着大气探测手段和计算机能力的不断提高,人们对大气湍流特征的分析越来越深入,大量试验观测使我们对平坦均一下垫面的湍流结构有了系统的了解(Kaimal et al., 1972; Panofsky and Dutton, 1984; Roth and Oke, 1993; Bian et al., 2003; Gao et al., 2003; 李跃清等, 2009; 李煜斌等, 2009)。近年来,对复杂地形下的湍流结构也作了一定的试验研究,得到了许多有益的结论。如: Kaimal et al. (1972) 认为风速和温度的低频段谱曲线随稳定度参数 z/L 呈规则变化; Roth and Oke (1993) 却认为,温度谱的低频段集中在一个相对窄的范围内; 苏红兵和洪钟祥 (1994) 在北京城郊的温度脉动观测中也发现了与 Roth and Oke (1993) 类似的规律。大风天气过程是北方地区冬季经常发生的天气现象,大气湍流运动与大风过程有着深刻的联系,大风过程使整个大气边界层的动力学和热力学结构发生变化(赵德山等, 1982),进而又影响湍流的发展。研究大风天气条件下近地面层湍流及其通量特征,有助于理解大风过程能量输送与传输过程,有助于正确理解相应的气象灾害的防灾减灾。很多学者从微气象学的角度研究大风结构,沃鹏和张霁琛(1999)曾研究了大风过程的湍流谱特征;陈陟等(2000)对冷锋过程中尺度通量进行了系统的观测研究。但由于资料等的限制,目前关于大风过程的湍流结构研究的报道相对较少。同时,湍流通量的获取一直是备受关注的微气象学问题。其中,动量通量与大气的运动状态直接相关;感热通量与大气的热状态与地球表面的加热/冷却相关联。从微尺度的角度讲,各种湍流通量直接影响相关气象要素在边界层内的垂直廓线分布,进而使之产生明显的日变化,并直接调节人类生存的微尺度环境。特殊天气条件下的天气预报、气候预测中,下垫面湍流通量参数化是十分关键的敏感问题,并直接决定模式的模拟能力。

本文利用 1993 年 12 月~1994 年 1 月在北京中国科学院大气物理研究所 325 m 气象观测塔(简称气象塔)开展的大气边界层实验资料,以相似理论为基础,对大风过程中湍流特征和湍流输送与风速、湍流动能等参数的关系进行分析研究。

2 资料获取和数据处理

1993 年 12 月至 1994 年 1 月,北京大学和中国科学院大气物理研究所在北京北郊 325 m 气象塔联合开展了大气边界层实验观测(Zhang et al., 2001)。洪钟祥(1983)对该气象铁塔进行了详细介绍。与本文有关的主要实验内容有:分别在 47 m 和 120 m 高度安装了日本海上电机生产的 DAT-300-TR-61C 型超声风温仪,获取两层风速和温度快速涨落资料,采样频率为 16 Hz,24 小时连续采集(Zhang et al., 2001)。考虑气象塔以及超声风温仪支架对气流的干扰、定常和平稳假设条件等因素,所用资料的剔除原则为:(1) 风向与超声风温仪垂直感应探头指向的夹角大于 60° ;(2) 风向与水平面夹角大于 3° ;(3) 平均风速小于 1.5 m/s;(4) 摩擦速度 u_* 小于 0.01 m/s;(5) 感热通量 H 小于 5 W/m^2 。去除符合上面任何条件以及非定常、数据明显存在错误的数组。作为资料质量控制手段之一,超声风温仪的风速测量值经过 30 分钟平均后,与相同高度上的常规风杯风速计观测结果吻合(图略),验证了超声风温仪观测资料的可靠性。本文选取观测期间的三个时间段进行分析,即:(1) 时段 1: 1993 年 12 月 29 日 16:00 至 12 月 31 日 15:00 (北京时,下同);(2) 时段 2: 1994 年 1 月 1 日 16:00 至 1 月 3 日 14:00;(3) 时段 3: 1994 年 1 月 15 日 10:00 至 1 月 20 日 13:00。其中,大风过境期间(1993 年 12 月 30 日 04:00 至 30 日 22:00)降温达 $6\sim 7^\circ\text{C}$,最大风速达 13 m/s。作为对比,本文选取 1994 年 1 月 1 日至 3 日寒潮过境后风速较小,以及 1 月 15 日至 20 日风速较大的过程进行对比分析。

3 结果分析及讨论

3.1 大风过境前后动量通量与感热通量变化特征

图1和图2分别给出两个时间段47 m高度的湍流动量通量、感热通量和风速随时间的变化关系。取坐标系与平均主导风向一致，忽略下沉，假设水平均匀，动量通量方程可以写为：

$$\frac{\partial (\overline{u'w'})}{\partial t} = -\overline{w'^2} \frac{\partial \bar{U}}{\partial z} - \frac{\partial (\overline{u'w'w'})}{\partial z} + \frac{g \overline{u'\theta_v'}}{\bar{\theta}_v} + \frac{\bar{p}'}{\bar{\rho}} \left(\frac{\partial \bar{u}'}{\partial z} + \frac{\partial \bar{w}'}{\partial x} \right) - 2\epsilon_{uw}, \quad (1)$$

为了简化，这里仅仅给出水平纵向剪切的方程。类似地，有感热变化方程：

$$\frac{\partial (\overline{\theta'w'})}{\partial t} = -\overline{w'^2} \frac{\partial \bar{\theta}}{\partial z} - \frac{\partial (\overline{\theta'w'w'})}{\partial z} + (\overline{\theta'\theta_v'}) \left(\frac{g}{\bar{\theta}_v} \right) + \left(\frac{1}{\bar{\rho}} \right) \left(\bar{p}' \frac{\partial \bar{\theta}'}{\partial z} \right) - 2\epsilon_{w\theta}. \quad (2)$$

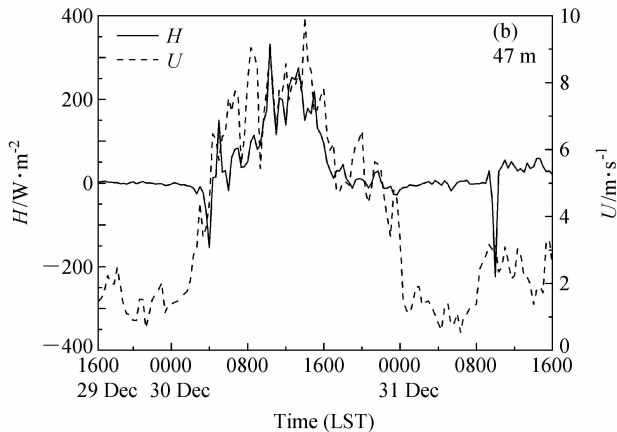
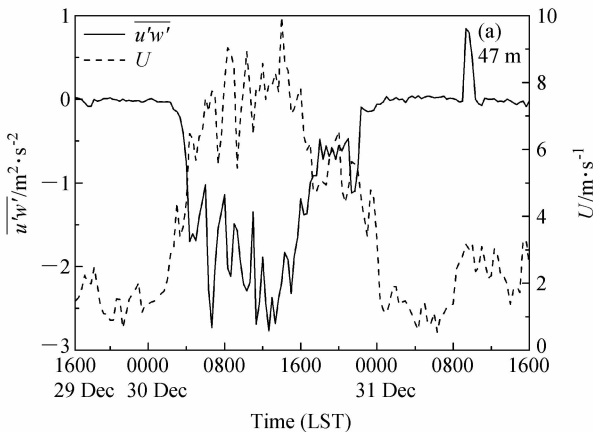


图1 1993年12月29~31日北京北郊地区47 m高度的通量和风速随时间变化曲线 (a) 动量通量；(b) 感热通量 (H)

Fig. 1 Time series of turbulent fluxes and wind speed at 47 m in the northern suburbs of Beijing during 29–31 Dec 1993; (a) Momentum flux; (b) sensible heat flux (H)

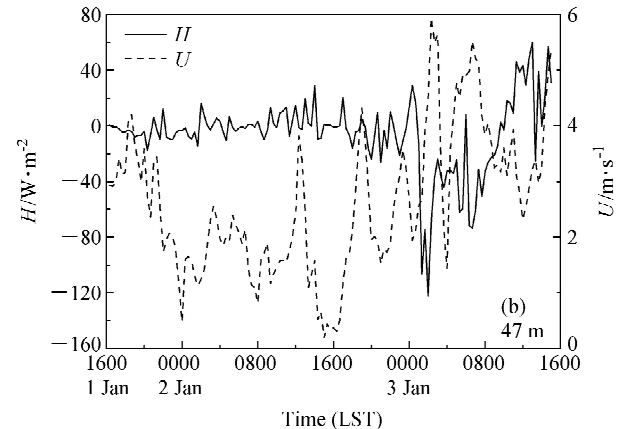
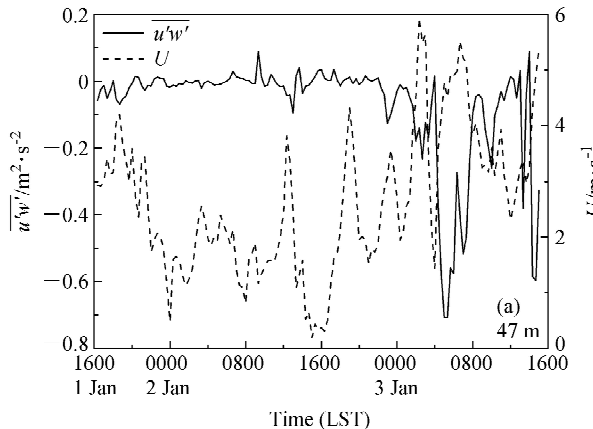


图2 同图1，但为1994年1月1~3日

Fig. 2 The same as Fig. 1, except for 1–3 Jan 1994

方程(1)右边五项分别代表：平均纵向剪切产生的动量通量、湍流运动对动量通量的输运、浮力产生或消耗、由恢复各向同性项引起的再分配和粘性耗散项(豪根, 1984)。

一般地，风剪切产生的湍流通量的输送方向几乎总是与动量从高空向下输运的过程相适应(苏红兵和洪钟祥, 1994)，且纵向剪切大于横向剪切作用。对于横向剪切，Mason and Thomson (1987)指出：在近地面层， $\overline{v'w'}$ 是负值，当到达300 m高度以上时才转为正值，在数值上小于纵向剪切，本文47 m和120 m计算结果与之相符合(图3)。

由图1a和图2a可见，动量通量变化与风速呈相反的关系，即方程(1)中的平均风剪切产生的动量通量占主导地位。相应的稳定度、感热通量等参数规律表明浮力等项作用有限。风速越大，剪切越

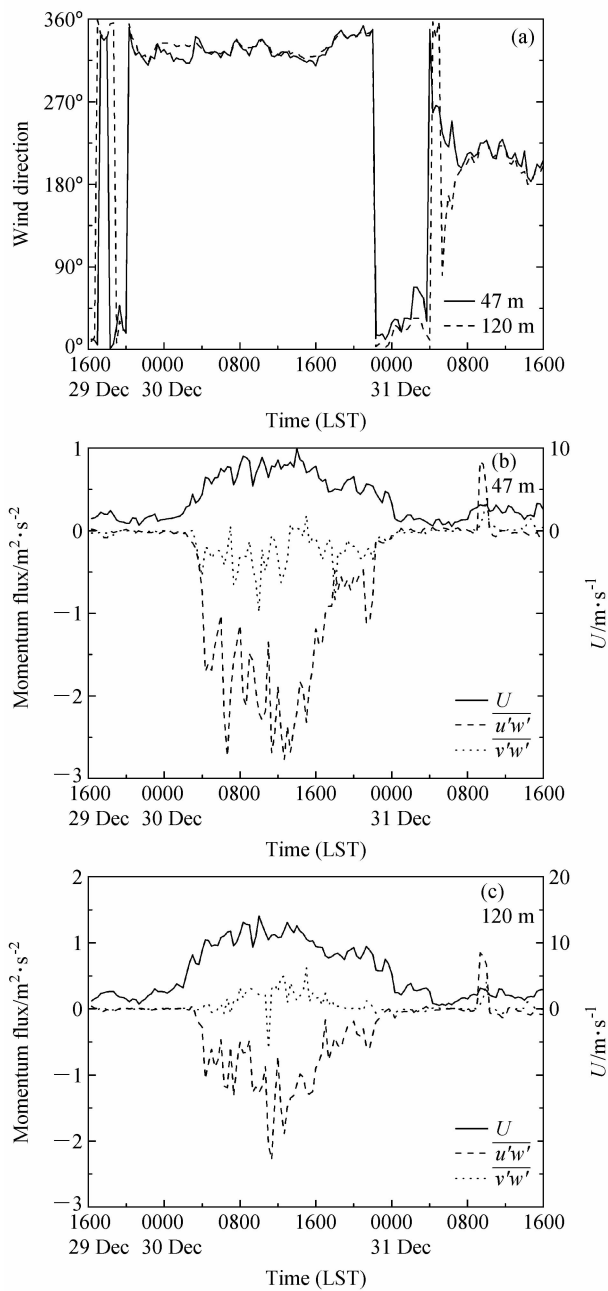


图3 1993年12月29~31日北京北郊地区 (a) 47 m和120 m风向, (b) 47 m风速和 u, v 方向动量通量, (c) 120 m风速和 u, v 方向动量通量随时间的变化关系

Fig. 3 Time series of (a) wind directions at 47 m and 120 m, (b) wind speed and u, v components of momentum fluxes at 47 m, and (c) wind speed and u, v components of momentum fluxes at 120 m in the northern suburbs of Beijing during 29-31 Dec 1993

强, 对应的动量输运能力越明显。12月29日下午到30日凌晨04:00, 31日00:00到下午16:00两个时间段, 低风速对应很小的动量通量, 大风过境过程中, 动量通量数值最大值达到了 $2.8 \text{ m}^2/\text{s}^2$,

可见风速对湍流输运能力的影响。大风过程过境后的1994年1月1~3日的湍流特征与12月29日~31日差别很大, 动量通量没有明显的变化, 与风速波动较大有关, 并显示出大风过程后动量通量绝对值与风速的相关关系。

图1a还显示: 大风来临前, 垂直方向的动量通量基本维持负值, 即由上层向下层传输动量, 而大风后却变为正值。在这次的大风过境过程中, 280 m高度的风速最大瞬时值接近 20 m/s , 时间是12月30日中午左右。到了12月31日, 不同高度风速数值均迅速变小, 整体上高层的风速下降快于低层, 并且一度出现高层的风速值低于低层风速值。动量通量异常时刻, 正是上下层风速几乎相同的时刻。可见, 在大风过程中, 高层风速先增大, 然后从上层向下层传递 (苏红兵和洪钟祥, 1994)。而大风过程后, 由于高层的风速降低较快, 出现短时间的动量由下向上传递。动量通量方向的改变, 对大气气溶胶粒子的向上运动具有很大影响。大风过程中, 风速的突然减小, 向下的动量输运也会突然变小。这些异常和突变会对动量、热量以及物质的输送起着很重要的作用, 这与陈陟等 (2000) 的结论吻合。

一般地, 感热通量在空间上随高度递减, 在时间上呈现明显的日变化。然而, 在较大风力情况下, 热量通量表现出一些特殊性。近地面层的风速梯度很大, 强剪切使湍流的作用更加突出。各种湍流属性随高度的梯度变化不大。由图1b可见, 1993年12月30日至31日的感热通量存在一个明显的高值区, 时间为12月30日凌晨04:00到下午16:00, 与寒潮过境时间 (04:00~22:00) 基本吻合。1994年1月1日至3日的感热通量变化很小, 仅在1月3日凌晨至白天有相对明显的日变化。1994年1月15日至20日的感热通量变化与前文提到的通常情况下相近, 出现了明显的日变化 (图略)。

另外, 不同高度的感热通量变化不明显。1993年12月29~31日、1994年1月1~3日, 120 m的感热通量比47 m数值略小; 1月15~20日120 m的垂直感热通量与47 m相比则较大。可能的原因: 大风条件下, 较高高度的冷平流较强, 垂直方向的温度梯度较大, 使得感热通量数值相对较大。1993年12月29~31日的大风过境期间, 由于冷气团沿主导风向方向向前推进, 造成很强的冷平流,

水平热通量明显增大。12 月 30 日凌晨 02:00 到 04:00 以及 31 日的上午 10:00, 水平和垂直热通量都出现了异常的现象。12 月 29 日 18:00 大风来临前, 高层温度回升较快, 12 月 30 日 00:30 时逆温层开始形成, 02:30 时 280 m 高度温度达到极大值后迅速降温, 同时逆温层也随之减弱, 2 小时后近地层温度也达到峰值, 气象观测塔的观测数据显示逆温层已消失, 表明在大风到来前空中有暖平流。自上而下传递形成逆温。而后, 大风过程后的冷空气自上而下地将该逆温层压缩并最终使之消失。这一过程和冷锋的垂直环流模型相符合(陈陟等, 2000)。负热通量的成因, 类似于动量通量异常。由于高层风速的迅速下降, 并且风向由偏北突然转为偏南风, 南方地区的下垫面温度较高, 导致了水平热通量突变为正值, 感热通量变为负值。

3.2 风速与湍流动能、动量通量的关系

取坐标系与平均风向一致, 假设水平均匀, 忽略下沉, 得到湍流动能(Turbulence Kinetic Energy, 简称为 TKE)方程的简化形式:

$$\frac{\partial \bar{e}}{\partial t} = \frac{g(\overline{w'\theta_v'})}{\theta_v} - \overline{u'w'} \frac{\partial \bar{U}}{\partial z} - \frac{\partial(\overline{w'e})}{\partial z} - \frac{1}{\bar{\rho}} \frac{\partial(\overline{w'p'})}{\partial z} - \epsilon, \quad (3)$$

右边第一项表示浮力产生或消耗项, 取决于热通量的垂直传输方向; 第二项表示机械剪切产生或损失项; 第三项表示 TKE 的湍流输运; 第四项为压强相关项, 常常与大气中的振荡有关; 第五项代表 TKE 的粘性耗散(Stull, 1988)。

图 4 和图 5 分别给出两个时段 120 m 和 47 m 高度风速和 TKE 随时间的变化。在平均风剪切存在的条件下, 湍流动量通量和动能的相互作用使湍流增强。显然, 大风天气条件下近地面层剪切产生项最大。考虑强风和阴天属于强迫对流型, 如果地面温度低于空气温度, 则剪切几乎成为唯一的湍流产生项。即: 大风条件下风速对湍流动能起着决定性的作用。

研究物质输送的湍流作用时, 经常用临界摩擦速度和临界风速表征地表物质向上输送的难易程度, 二者又通过地表粗糙度联系在一起。图 6 给出动量通量随风速的变化关系, 图 7 给出了不同条件下的风速与湍流动能的关系。可见, 随着风速增加, 湍流动能 TKE 增加; 风速小于 5 m/s 时,

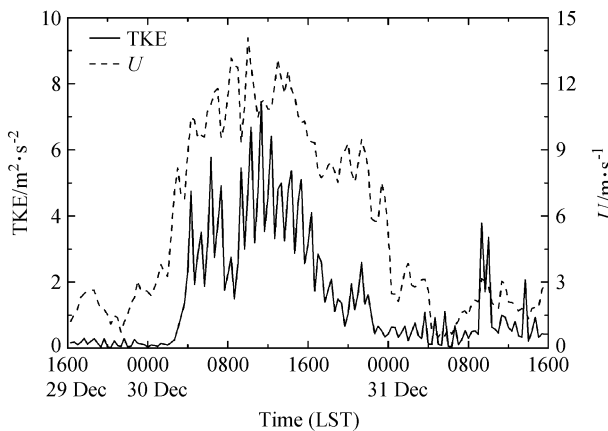


图 4 1993 年 12 月 29~31 日 120 m 高度风速和 TKE 随时间变化
Fig. 4 Time series of wind speed and TKE at 120 m during 29 - 31 Dec 1993

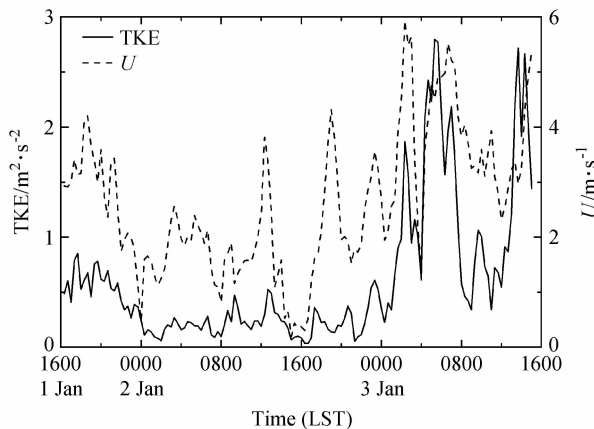


图 5 1994 年 1 月 1~3 日 47 m 高度风速和 TKE 随时间变化
Fig. 5 Time series of wind speed and TKE at 47 m during 1 - 3 Jan 1994

TKE 呈现较小的数值; 风速大于 5 m/s 时, TKE 数值迅速增大。TKE 的非线性增加, 再次验证临界速度的问题。

根据 Clark et al. (2004) 的方法, 在讨论边界层输送能力时, 大多采用摩擦速度 u_* , 而摩擦速度 u_* 又通过地表粗糙度与地面风速 V 相联系。当风速小于 14 m/s 时, 有效风能与风速的关系可表示为:

$$T = K (V_i - V_1)^\alpha, \quad V_i > V_1, \quad (4)$$

其中, V_i 为近地层风速; V_1 为临界风速, 这里取为 5 m/s; K 和 α 分别为拟合系数和拟合指数。Clark et al. (2004) 给出的拟合值为 $K=0.012$, $\alpha=2$ 。

类似于有效风能, 动量通量、湍流动能与风速的拟合关系式可分别表示为:
动量通量:

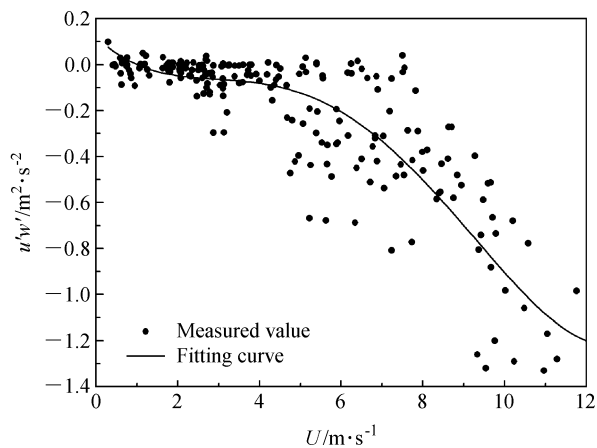


图6 动量通量与风速的拟合关系

Fig. 6 The relationship between momentum flux and wind speed

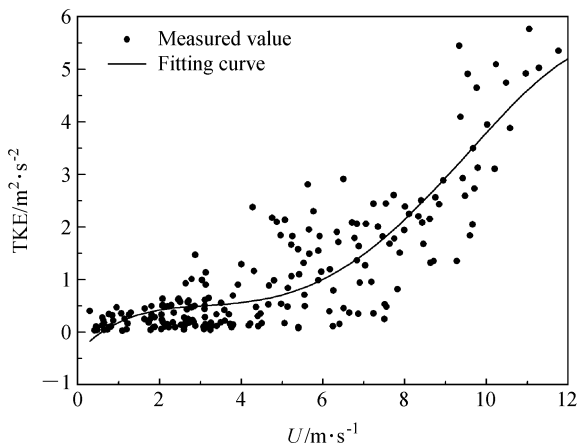


图7 TKE 与风速的拟合关系

Fig. 7 The relationship between TKE and wind speed

$$F_1 = K_1 (V_i - V_1)^a, \quad (5)$$

湍流动能:

$$e = K_2 (V_i - V_1)^\beta. \quad (6)$$

选择较大通量值和湍流动能对应的 47 m 高度摩擦速度 u_* , 利用最小二乘法拟合, 得到拟合指数及拟合系数分别为:

$$\alpha = 0.503, K_1 = 0.593,$$

$$\beta = 0.340, K_2 = 5.59.$$

由图 1、2、4、5 和公式 (5)、(6) 可知, 大风过程中湍流动能和动量通量变化规律相似。1993 年 12 月 29~31 日、1994 年 1 月 1~3 日和 1994 年 1 月 15~20 日 47 m 高度动量通量和湍流动能的相关系数分别为 0.95、0.85 和 0.87。计算中, 采用了全部的测量数据, 如果选取风速较大 (例如大于 4 m/s) 的数据, 相关系数会更高。可见两者之间的确存在

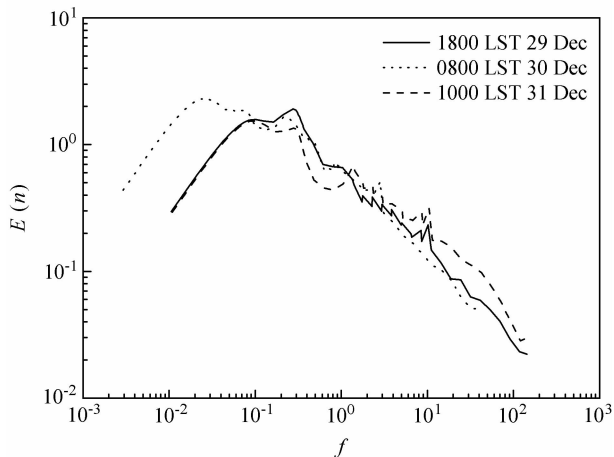


图8 1993 年 12 月 29~31 日 47 m 高度大风过境前后水平纵向风速谱

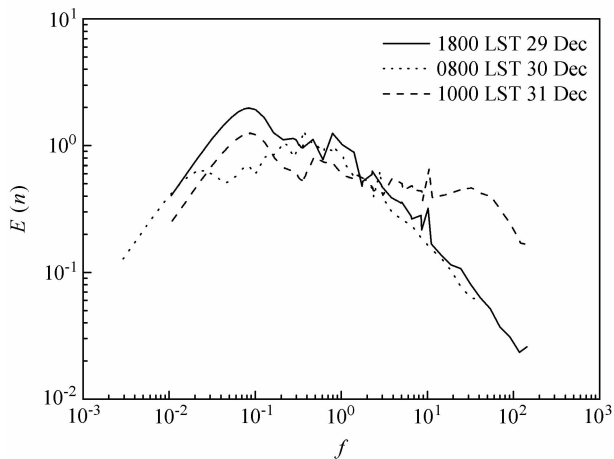
Fig. 8 The u -component spectra at 47 m during 29–31 Dec 1993

图9 同图 8, 但为水平横向风速谱

Fig. 9 The same as Fig. 8, except for the v -component spectra

密切关系, 特别是在大风条件下应予以重视。

3.3 大风前后湍流谱变化

图 8~11 分别给出 1993 年 12 月 29~31 日大风过程 47 m 高度三方向风速和温度的湍流功率谱曲线。横坐标为无因次频率 $f = nz/U$, 纵坐标为湍流功率谱密度 $E(n)$ 。其中, n 为自然频率, z 为高度, U 为水平风速。可见, 大风过程前后, 水平风速分量湍流谱曲线在惯性区始终满足 $-2/3$ 幂次方, 含能涡区的斜率接近于 1, 大风过程中的谱密度与大风前相比, 低频能量明显提高, 湍流谱的惯性副区明显往低频延伸。而垂直速度谱和温度谱情况相对复杂一些: 温度谱的高频端明显上翘, 其异常的原因是超声风速仪的测温灵敏度不够以及白噪

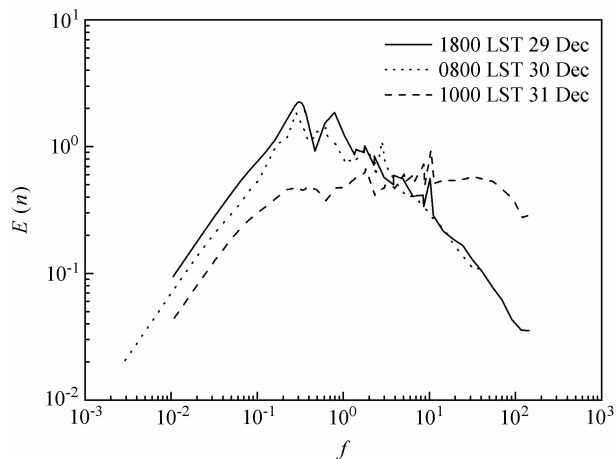


图 10 同图 8, 但为垂直方向风速谱

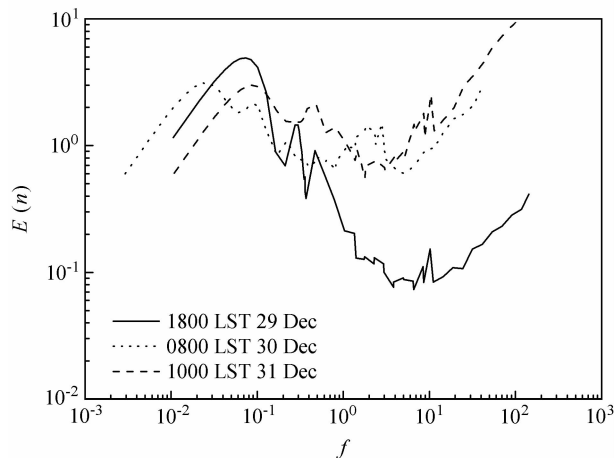
Fig. 10 The same as Fig. 8, except for the w -component spectra

图 11 同图 8, 但为温度谱

Fig. 11 The same as Fig. 8, except for the temperature spectra

声干扰所致(苏红兵和洪钟祥, 1994; Zhang et al., 2001), 也说明大风过程中温度涨落较小。与水平速度谱不同, 12月29日大风过境前和12月30日大风过境过程中, 垂直速度谱的惯性副区明显, 但峰值频率无明显变化; 而大风过后的31日, 垂直速度谱曲线没有明显的惯性区, 高频段能量增加, 低频段能量变小。类似地, 水平横向速度谱和温度谱中也显示了类似特征。考虑观测地点周围5 km内存在高度为20~50 m的建筑物, 受此影响, 垂直速度在大风条件下容易适应地形变化, 而此后风速较小、风向突变的情况下, 热力对流作用加强, 地形的影响凸现出来, 谱曲线呈现不规则特征, 与感热通量异常相对应。

4 结论

本文利用1993年12月~1994年1月在北京北郊325 m气象塔开展的大气边界层实验资料, 分析研究了大风过程47 m和120 m两个高度的动量通量与感热通量特征, 对湍流能量与输运关系进行了初步探讨。结果表明: 作为剧烈的天气系统, 大风过程中大气边界层的湍流输送呈现特殊性; 大风过程对近地面层的能量输送有着重要影响。大风过程中, 风速存在一个阈值, 数值为5 m/s (47 m高度), 当风速大于该阈值时, 湍流动量通量和感热通量增加迅速, 湍流通量与风速、湍流动能的相关迅速增大; 水平方向湍流通量数值和能量增加大于垂直方向; 湍流动能也随风速迅速增加; 湍流谱特征表现为湍流能量的低频部分增加、湍流谱曲线变宽。湍流能量和湍流通量的增加, 意味着湍流输送能力的增强。

致谢 本研究工作得到中国科学院大气物理研究所洪钟祥研究员和李爱国高级工程师的指导和帮助, 特此感谢!

参考文献 (References)

- Bian L G, Xu X D, Lu L H, et al. 2003. Analyses of turbulence parameters in the near-surface layer at Qamdo of the southeastern Tibetan Plateau [J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 20 (3): 369–378.
- 陈陟, 李诗明, 钱粉兰, 等. 2000. 一次冷锋过境过程的中尺度通量观测 [J]. *地球物理学报*, 43 (6): 754–761. Chen Zhi, Li Shiming, Qian Fenlan, et al. 2000. Observation of mesoscale flux of a cold front passage [J]. *Chinese Journal of Geophysics (in Chinese)*, 43 (6): 754–761.
- Clark I, Assamoi P, Bertrand J, et al. 2004. Characterization of potential zones of dust generation at eleven stations in the southern Sahara [J]. *Theor. Appl. Climatol.*, 77 (3): 173–184.
- Gao T, Su L, Ma Q X, et al. 2003. Climatic analyses on increasing dust storm frequency in the springs of 2000 and 2001 in Inner Mongolia [J]. *Int. J. Climatol.*, 23: 1743–1755.
- 豪根 D A. 1984. 微气象学 [M]. 北京: 科学出版社, 397pp.
- Haugen D A. 1984. Workshop on Micrometeorology (in Chinese) [M]. Beijing: Science Press, 397pp.
- 洪钟祥. 1983. 北京325米气象塔的测量系统 [M]. 北京: 科学出版, 69pp. Hong Zhongxiang. 1983. Observation System of the 325-m Meteorological Tower in Beijing (in Chinese) [M]. Beijing: Science Press, 69pp.
- Kaimal J C, Wyngaard J C, Izumi Y, et al. 1972. Spectral characteristics of surface-layer turbulence [J]. *Quart. J. Roy. Meteor.*

- Soc., 98: 563–589.
- 李跃清, 刘辉志, 冯健武, 等. 2009. 高山草甸下垫面夏季近地层能量输送及微气象特征 [J]. 大气科学, 33 (5): 1003–1014. Li Yueqing, Liu Huizhi, Feng Jianwu, et al. 2009. Characteristics of energy transfer and micrometeorology in the surface layer of the atmosphere in summer over the Alpine meadow of the Tibetan Plateau [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 33 (5): 1003–1014.
- 李煜斌, 高志球, 袁仁民, 等. 2009. 湍流通量参数化方案的非迭代方法研究 [J]. 大气科学, 33 (4): 760–770. Li Yubin, Gao Zhiqiu, Yuan Renmin, et al. 2009. Non-iteration methods of turbulent flux parameterization [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 33 (4): 760–770.
- Mason P J, Thomson D J. 1987. Large eddy simulations of the neutral-static stability planetary boundary layer [J]. Quart. J. Roy. Meteor. Soc., 113: 413–443.
- Panofsky H A, Dutton J A. 1984. Atmospheric Turbulence: Models and Methods for Engineering Applications [M]. New York: John Wiley & Sons, 156–173.
- Roth M, Oke T R. 1993. Turbulent transfer relationships over an urban surface. I: Spectral characteristics [J]. Quart. J. Roy. Meteor. Soc., 119: 1071–1104.
- Stull R B. 1988. An Introduction to Boundary Layer Meteorology [M]. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 666pp.
- 苏红兵, 洪钟祥. 1994. 北京城郊近地面层湍流实验观测 [J]. 大气科学, 18 (6): 739–750. Su Hongbing, Hong Zhongxiang. 1994. An experimental study of turbulence in northern suburban surface layer of Beijing [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (Scientia Atmospherica Sinica) (in Chinese), 18 (6): 739–750.
- 沃鹏, 张霭琛. 1999. 寒潮冷锋过境期间湍流特征量及其谱分析 [J]. 大气科学, 23 (3): 369–376. Wo Peng, Zhang Aichen. 1999. Analysis of turbulent characteristics and spectrum during the cold wave [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 23 (3): 369–376.
- Zhang H S, Chen J Y, Park S-U. 2001. Turbulence structure in unstable conditions over various surfaces [J]. Boundary-Layer Meteorology, 100: 243–261.
- 赵德山, 王立治, 洪钟祥. 1982. 冷风过境时的边界层阵风结构分析 [J]. 大气科学, 6 (3): 325–331. Zhao Deshan, Wang Lizhi, Hong Zhongxiang. 1982. Analysis on the structure of gust in boundary layer when a cold front passing [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (Scientia Atmospherica Sinica) (in Chinese), 6 (3): 325–331.