

北京地区一次特大强风过程边界层结构的研究*

刘小红 洪钟祥

(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 利用北京 325 m 气象塔资料对 1993 年 4 月 9 日北京地区出现的一次特大强风过程的边界层结构(风、温、风切变及阵风特征)进行了分析。随着该次大风的过境, 边界层内风场出现数个风速高值中心, 高度位于 200~300 m, 时间间隔 1~3 h。伴随上层风速垂直切变和阵风特性。湍流能谱的计算结果表明了大尺度涡旋对边界层湍流微结构的影响。

关键词 强风 边界层结构 湍谱

1 引言

由于强风过程给国民经济各个部门造成的巨大影响, 强风条件下大气边界层结构及其湍流特性的研究一直得到许多气象学者的关注^[1~2]。我国赵德山等^[3]研究了冷锋过境时的边界层阵风结构, 指出了强风条件下, 风荷载问题的重要性。赵德山和洪钟祥^[4]分析了一次雷暴密度流的风场结构。虽然已取得了许多进展, 但是异常天气条件下大气边界层结构的研究尚有许多不成熟之处, 其中一个重要原因在于资料的获取及完整性方面。

1993 年 4 月 9 日北京地区遭遇到一次特大强风过程, 不仅强度很大(铁塔记录的最大瞬时风速达 33.8 m s^{-1}), 而且持续时间较长(十几小时), 曾给北京地区造成了很大的经济损失。本文利用大气物理研究所 325 m 气象塔的连续观测资料(20s 记录一次), 对该次大风过程中边界层风、温结构及其演变规律进行了分析, 并讨论了风速垂直切变、阵风系数及阵风谱的特征, 探讨了强天气过程对边界层结构及湍谱的影响。

2 天气形势

在地面天气图上, 1993 年 4 月 9 日 02:00, 北京北部有一弱低压中心, 冷锋位于包头、呼和浩特以北, 锋面附近风速 4~6 级, 同时, 在蒙古国乌兰巴托附近还有一高压中心, 此时, 北京仍盛行南风。08:00, 北京北部的低压中心向东移动, 强度加强, 锋面移至北京附近, 北京地面风向已转为北风。14:00, 北京北部的低压中心已移至渤海北部, 环流加强并形成气旋, 低压中心气压值 1013.9 hPa, 此时冷锋已过北京, 锋后

1995-03-13 收到, 1995-07-07 收到修改稿

* 国家自然科学基金、国家博士后基金资助项目

的冷高压中心(中心气压达 1033.3 hPa)位于河套北部,高、低压中心的配合及较大的气压梯度与该次北京地区强风的形成有关。同时,在高空图上,北京附近也有槽线活动。

当冷空气来临和过境时,气象塔测量的整层空气的风向、风速和温度依次发生明显的变化。首先发生剧烈变化的是风向,在 07:20 左右由西南风急转为西北风,而此时风速小于 5 m s^{-1} 。风速的明显增加是从 08:30 左右开始的,此时空气温度尚处于由于太阳辐射加热而增温的阶段。最后是空气温度在 09:00~09:30 由增加急转为递减,上层转换时间早于低层,冷空气自上而下影响大气边界层。这些特征可作为人们监测大风的重要依据。

3 强风过程中边界层风、温及风速垂直切变

3.1 风场的时空特征

风场是大风过程最重要的部分,我们利用 325 m 铁塔的观测资料,分析了 325 m 以下风场的时空特征(10 min 平均),见图 1。由图可知,以上午 9:00 左右开始,一直到晚上 22:30 结束,风速出现了 6 个高值中心,中心位于

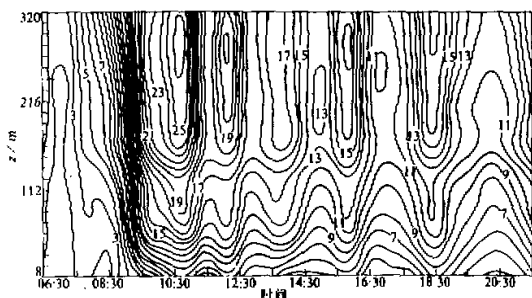


图 1 强风条件下,大气边界层风速的时空分布
等值线间隔为 1 m s^{-1}

性并伴随很强的水平风速加速度,即阵风浪涌。在低层(100 m 以下),随着时间的推移,风速出现增加—减少—再增加的波动,并与高层的风速中心相呼应,但总的变化趋势是逐渐减弱的。

图 2 给出大风过程中几个时段平均风速的高度变化。从图中可以看出平均风速偏离对数分布的程度,在塔层上部,伴随冷空气的入侵及强的湍流混合,风速的高度变化已不很明显,且会出现随高度递减的趋势,使得风速随高度明显偏离对数分布。

3.2 风速垂直切变

由于低层强风切变给飞机起飞和降落造

到了 6 个高值中心,中心位于 200~300 m 之间,出现的时间间隔为 1~3 h。最强的一次是 9:30~10:40,平均风速极大值可在 26 m s^{-1} 以上,其后几次强度减弱,分别出现于 11:30~12:00, 13:00~14:00, 15:30~16:30, 17:30~19:00 和 21:00~22:30。可见强天气过程是一股股从上至下入侵大气边界层,其间具有明显的间歇

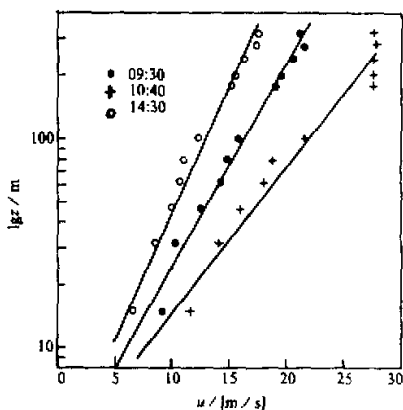


图 2 强风条件下,风速随高度的分布廓线
包括 10:40 出现最大瞬时风速及其前后时段

成的危害, 该问题的重要性一直得到人们的关注。研究表明: 在贴地 100 m 高度内风速垂直切变大于 0.1 s^{-1} 对于大型飞机就很危险。为此, 我们计算了此次大风过程中塔层风速垂直切变的时空剖面 (图 3)。由图可以看出, 贯穿整个大风过程高度位于 130 m 至 150 m 的二条等值线 (0.02 和 0.04 s^{-1}) 将塔层分为上下两个区域。上半部 (150 m 以

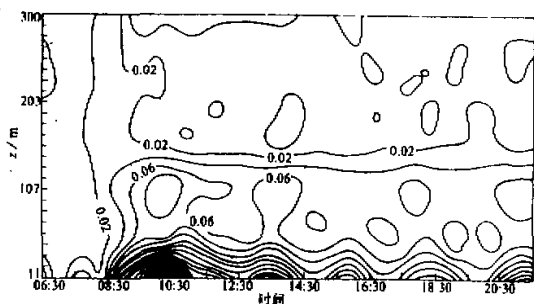


图 3 强天气过程中, 塔层风速垂直切变的时空变化
等值线间隔为 0.02 s^{-1}

上) 为天气系统造成的风速高值中心区, 强的湍流混合使该区域风速切变很小。下半部 (100 m 以下) 为风速强切变区, 正的强切变在大风过程中始终存在于近地层, 并以地面附近为最强, 近地层强切变中心的出现与塔层上部风速高值中心在时间上相吻合, 这可以用下面式子说明: 大风过程中近地面风速可近似用对数分布描述, 即

$$\frac{\partial u}{\partial z} = \frac{u_*}{kz} \quad (1)$$

该式表明了近地层风速切变随高度增加而降低, 当上层强冷空气风速中心来临时, 近地层 u_* 增加, 使得近地层风速切变得以加强。10:40 这股最强风速中心的出现, 造成地表附近风切变可达 0.56 s^{-1} 。

3.3 温度场的时空特征

注意到该次大风开始于 4 月 9 日上午 9:00 左右, 白天整个过程是晴空少云天气。由于冷空气的降温与湍流热输送的共同影响, 使得大风过程中边界层温度场随时间出现数次不连续的变化, 并且, 边界层风、温的时空变化是密切相关的。整个温度的时间变化可大致分成三个阶段。

第一阶段: 从 9:00 冷空气开始降临, 至 12:00, 冷空气的降温较湍流热输送占主导地位, 温度随时间呈降低的趋势。其间由于冷空气中心强度的不同, 温度降低的速率又有变化。

第二阶段: 12:00 以后至 17:00 左右, 由于湍流热输送增强, 而冷空气强度较前几次减弱, 此阶段边界层温度随时间增加。

第三阶段: 17:00 以后, 湍流热输送作用降低乃至变成负值, 辐射冷却及冷空气的作用又使整层温度降低。整个大风过程于 22:30 左右结束。

4 阵风特性

在考虑风荷载问题时, 人们最关心的问题之一是计算不同高度上的最大风速。正如前面所述, 在强风条件下大气湍流运动十分强烈, 风速的阵性很大, 因而不能用平均风

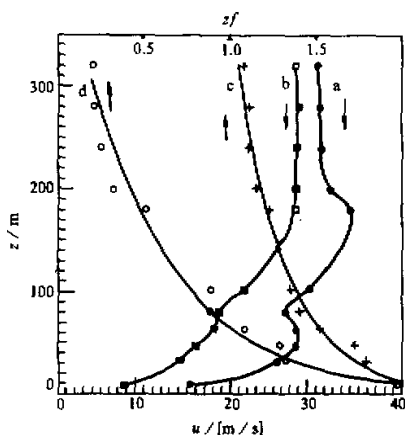


图4 10 min 内最大风速瞬时值(a)、
该时段内平均风速(b)、阵风系数(c)
以及阵风强度(d)随高度的变化
(10 时 41 分 25 秒出现最大纪录
瞬时风速时段)

内阵风系数的高度分布, 阵风系数在地面附近较大 (达 2 倍), 并随高度呈负指数函数递减, 这与文献[3]对于不同的观测个例得到的分析结果相一致。图 4d 表明阵风强度随高度也呈负指数函数递减, 由地表附近约 2.0 减至 320 m 处 0.2 左右。图 5 进一步给出了该次大风过程中, 阵风系数的时空演变。除了上述阵风系数的高度变化规律外, 伴随塔层

上部冷空气风速高值中心的出现, 地表附近阵风系数也出现了高值区, 阵风强度的时空演变也与阵风系数有类似的规律, 这些说明了平均风速愈大, 地面附近的阵风系数和阵风强度也愈大, 风的阵性也愈强。因此, 大风过程中, 除了平均风速外, 由于较强的湍流活动, 风速脉动值可明显加大, 这些在建筑设计等方面是必须加以考虑的。另外, 本文观测分析表明, 大风过程中瞬时风向的阵性却不明显。

5 阵风谱

在强风条件下, 研究阵风能谱分布和涡旋尺度, 是风荷载和风能问题所不可缺少的

速廓线代替最大风速随高度的分布。为了在实际应用中给出最大风速的高度分布, 通常采用“阵风系数”的概念, 定义为给定时段内的最大风速 $u_{\max}$ 与该时段内平均风速 $\bar{u}$ 之比。同样, 为了更明确地反映风的阵性, 本文定义“阵风强度”, 为给定时段内最大风速 $u_{\max}$ 与最小风速 $u_{\min}$ 之差与该时段内平均风速 $\bar{u}$ 之比。文献[3]指出在计算阵风系数时采用的时距必须大于 3 min 才具有代表性, 并采用 10 min 的时距与平均风速采用的时距统一起来。

图 4 给出了 10 时 41 分 25 秒出现最大记录瞬时风速 (33.8 m s^{-1}) 时, 10 min 内的最大风速瞬时值廓线(a)及该时段内平均风速廓线(b)。由图可以看出, 最大风速瞬时值明显不符合平均风速廓线所遵循的规律, 并在 63 m 和 180 m 分别出现了两个极大值, 显然瞬时风速的阵性是很明显的。图 4c 给出该时段

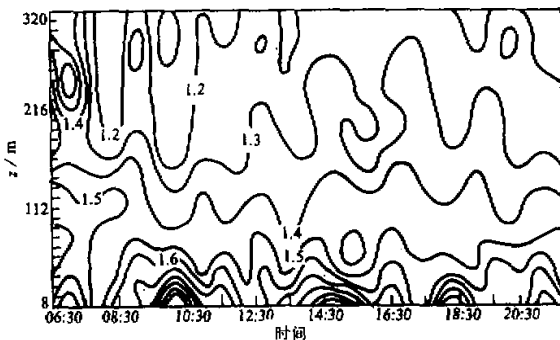


图5 大风过程中, 阵风系数的时空演变
等值线间隔为 0.1

内容。本文利用快速傅立叶变换计算了阵风能谱曲线, 资料长度取为约 3 h, 资料间隔为 20 s。我们计算了大风过程中 4 月 9 日 9:00~12:00 各层的能谱曲线 $nS(n)-n$ 。为清楚起见, 我们只选用 32 m 和 280 m 作为上下两层的代表, 见图 6。为了说明大风对边界层谱的影响, 我们还与大风结束后 (4 月 10 日 8:00~11:00) 280 m 高度上的能谱曲线进行了对比。

由图可见, 大风过程中无论在高层还是低层, 在低频区频率为 2×10^{-4} Hz 处, 能量都出现了峰值, 其相应的时间尺度为 5×10^3 s, 反映了该次大风中大尺度涡旋的贡献, 而且该大尺度涡旋的时间尺度与冷空气风速高值中心出现的时间间隔是一致的, 该大尺度涡旋的空间尺度在几十公里至一百公里左右。当频率在 $4 \times 10^{-4} \sim 2 \times 10^{-2}$ Hz 范围内, 低层 (32 m) 能量随着频率的增加呈近似线性增加的趋势, 即低层小涡占有的能量逐渐增加, 而高层 (280 m) 此频率段含有的能量差别不很明显。比较上下层能谱曲线可以看出: 在低层 (32 m) 高频区 (约 $2 \times 10^{-3} \sim 2 \times 10^{-2}$ Hz) 含有的能量较多, 而在高层 (280 m) 低频区 (约 $1 \times 10^{-4} \sim 4 \times 10^{-4}$ Hz) 含有的能量增加, 表明了由于地面摩擦作用使低层起主要作用的涡旋尺度较小, 随着高度的增加, 天气尺度的涡旋占主导地位。中间频率区 ($5 \times 10^{-4} \sim 2 \times 10^{-3}$ Hz) 含有的能量在上下层差别不明显, 都出现了数个峰值。

再看大风后 280 m 高度上的能谱曲线, 可以看出, 大风后该层各个尺度涡旋含有的能量差别已非大风过程中那么明显, 而且各个高度上的湍强也较均匀。与大风时 280 m 能谱曲线进行比较发现, 大风结束后, 虽然各个频率含有的能量都有一定的减少, 但低频区能量减少最为明显 (低频区峰值已不存在), 这显然是由于天气系统造成的。高频区能量减少也很明显, 而中间频率段能量的减少相对最少。这说明了大风过程中, 不同尺度的涡旋对边界层湍流能量贡献的差异。

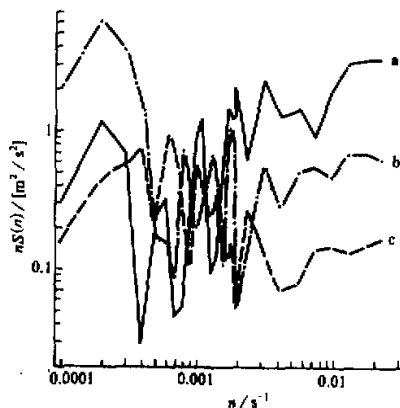


图 6 水平风速功率谱 $nS(n)$ 随频率 n 的分布
图中 a、b、c 分别表示大风时 32 m、280 m 和
大风后 280 m 高度上的功率谱曲线

6 结语

(1) 由于这次强风过程的来临, 边界层内风场在 200~300 m 之间出现了数个风速高值中心, 时间间隔 1~3 h, 因此, 冷空气的入侵具有明显的间歇性并造成了边界层温度随时间变化的不连续现象。

(2) 大风过程中, 在空间上塔层可分成上下两个区域, 上层 (150 m 以上) 为风速高值中心区, 该区域风切变较小。下层存在很强的风切变和风速阵性, 并与上层的风速高值中心相呼应。

(3) 湍谱的分析结果表明, 该次强风过程的来临造成了各层低频区的能量峰值。随着高度的增加, 天气尺度的涡旋占主导地位。大风后, 低频区能量减少最为明显, 而中间段频率 ($4 \times 10^{-4} \sim 2 \times 10^{-3}$ Hz) 减少相对最少, 反映了大风过程中, 不同尺度涡旋对边界层湍流能量贡献的差异。

参 考 文 献

- 1 Iwatani, Y., 1977, Some features of the spatial structures of the surface layer turbulence in high wind condition, *J. Meteor. Soc. Japan*, **55**, 130~138.
- 2 Shiotani, M., Iwatani, Y. and Ruroha, K., 1978, Magnitudes and horizontal correlations of vertical velocities in high winds, *J. Meteor. Soc. Japan*, **56**, 35~42.
- 3 赵德山、王立治、洪钟祥, 1982, 冷锋过境时的边界层阵风结构分析, *大气科学*, **6**(3), 324~332.
- 4 赵德山、洪钟祥、马惠英, 1982, 一次雷暴密度流的风场结构的研究, *大气科学*, **6**(2), 157~164.
- 5 叶卓佳等, 1983, 强雷雨云边界层小尺度结构和谱特征, *大气科学*, **7**(2), 162~170.

A Study of the Structure of a Strong Wind Event in the Atmospheric Boundary Layer in Beijing Area

Liu Xiaohong and Hong Zhongxiang

(LAPC, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029)

Abstract Using the data of the 325 m Beijing Meteorological Tower, the structures of wind and temperature of a strong wind event occurred in the Beijing area on April 9, 1993 are analyzed. During the passage of the strong wind, the wind field in the boundary layer appeared several maximum regions at the 200~300 m level with time intervals of 1~3 h. Accompanying those at the upper level, there appeared very strong wind vertical shear and wind gustiness in the lower layer, which also fluctuated with time. The temperature field appeared several inconsistent "turning" with time. All these reflect the special structure in the boundary layer during the approaching of a severe weather. The result of turbulent spectra shows that during the strong wind, the contributions of vortexes on different scales to turbulent energy at different heights are not the same, which reflects the influence of large scale vortex on the fine structure of turbulence in the atmospheric boundary layer.

Key words strong wind structure of atmospheric boundary layer turbulent spectra