

天津塔层风切变的研究

赵 鸣 唐有华

刘学军

(南京大学大气科学系, 210008) (天津气象科学研究所, 300074)

提 要

根据天津气象铁塔 1990—1992 年冬季 8 个月的风速、风向、温度等资料的分析, 得到了天津 250m 以下边界层中风切变的若干特征, 如风垂直分布幂次律中指数 p 的时空变化及频数分布, 各层各时段风切变的频数分布, 风切变与温度梯度、稳定度的关系。这些特征有助于对城市下垫面塔层中风垂直分布的了解。还分析了冷锋过境前后风切变及温度状况的分布情况。

关键词: 塔层 风切变 冷锋

引 言

边界层中风垂直切变对航空、建筑、大气污染等方面均有重要影响, 因此它引起了气象工作者的注意, 若干年来, 围绕它进行了一些研究, 国外工作见文献[1][2]。国内还没有很完整的工作。本文根据天津气象塔积累的冬季 8 个月的风、温资料进行分析, 试图从中找出天津 250m 以下风切变的主要特征。这特征代表了典型城市下垫面上低层大气风垂直切变的一些性质。

1 资料处理

本文资料全部取自天津气象铁塔, 塔高 250m, 有 15 个高度可安置观测仪器, 关于铁塔概况可见文献[3]。我们用的数据文件是每小时开始 10 分钟内(代表该小时)的平均风、温铅直廓线。这些数据分布在 1990 年 11 月, 1991 年 1 月, 2 月, 3 月, 4 月和 12 月, 1992 年 1 月, 2 月, 3 月。这几个月都在冬季或初春, 除正常日变化外, 发生的主要天气过程是冷锋。一般情况下有 10 层风温资料, 即 5, 10, 20, 30, 40, 60, 100, 140, 180, 220, 250m, 此外 1m 处还有温度资料。但不同观测时间有的层次未予观测, 因此实际可用的资料层次比这少。由于缺测或故障造成数据错误, 因此我们分析时只能选择风、温同时都正确的资料, 使选用的数据及高度受了一定的限制。

本文选取用以分析风的各层为 5—20m, 20—60m, 100—140m, 140—180m, 180—220m, 220—250m, 20—250m 等 7 层。由于资料所限, 且考虑到能与风资料相匹配, 温度只选了 3 层, 即 5—20m, 20—60m, 100—140m。分析工作全部利用微机进行。

风速, 风向, 风矢的梯度分别定义为 $\frac{\Delta V}{\Delta z}$,

$|\frac{\Delta \alpha}{\Delta z}|, |\frac{\Delta \vec{V}}{\Delta z}| = \sqrt{(\frac{\Delta V}{\Delta z})^2 + V^2 (\frac{\Delta \alpha}{\Delta z})^2}$, 单位分别为 s^{-1} , 弧度 $\cdot m^{-1}$, s^{-1} , 风矢梯度中 V 为两个高度上的平均风速, α 为风向。温度梯度 $\frac{\Delta T}{\Delta z}$ 的单位为 $^{\circ}C \cdot m^{-1}$, 分析时只做温度和风速, 且风速随高度增加的。

2 风幂次律的 p 值分析

实用中常用的风随高度分布的幂次律

$$\frac{V_1}{V_2} = \left(\frac{z_1}{z_2}\right)^p \quad (1)$$

式中的幂指数 p 反映了风随高度变化的快慢, 知道两个高度的风速, 即可求该两高度之间适用的 p 值。除 20—250m 的整层 p 外, 其他 6 层 p 均按

$$p = \frac{\ln(\frac{V_2}{V_1})}{\ln(\frac{z_2}{z_1})} \quad (2)$$

算得。而20—250m的 p 值则由各高度上的风速用最小二乘法求得。计算 p 时只取风速风向资料均有且风速随高度增加的。对本文取的各层讲 $\ln(z_2/z_1)$ 愈向上愈小,故在相同的 V_2/V_1 情况下 p 值应愈向上愈小,即各层间 p 没有比较性,这与下节讲的风切变本身不同。

在求 p 的频数分布时,为了有足够的资

料,没有做逐时的 p 频数分布,而是将一天分为6个时段:02—05,06—09,10—13,14—17,18—21,22—01时,在这几个时段中求各层 p 的频数分布,这个工作就是就8个月的全部 p 值做的,为节省篇幅,图1只给出了20—60m的 p 频数分布直方图, p 间隔为0.1,图题中还给出各时段所用的数据总数 n 。

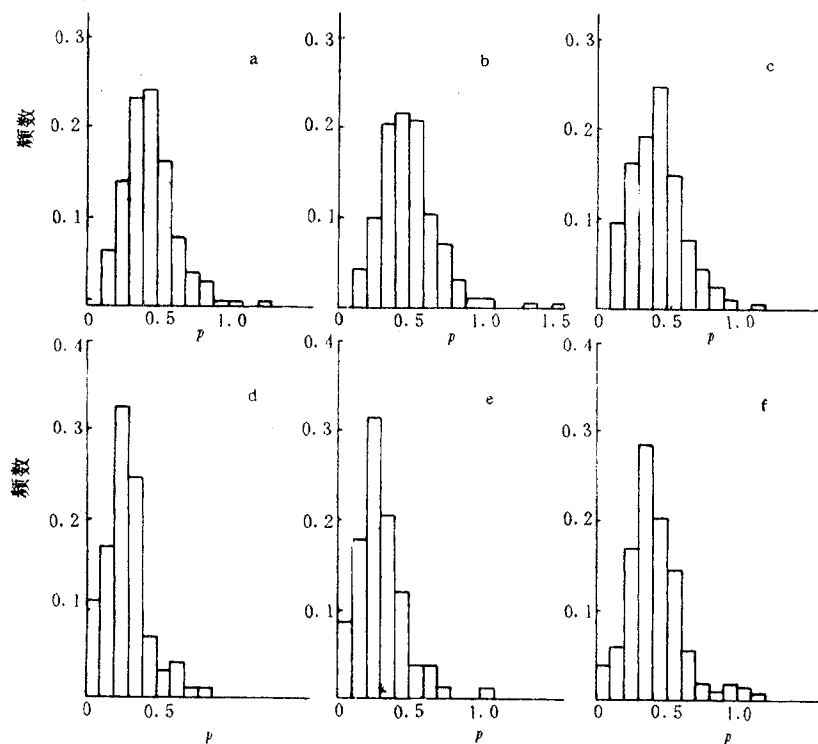


图1 20—60m 各时段 p 的频数分布

a:22—01 $n=175$ b:02—05 $n=178$ c:06—09 $n=160$
d:10—13 $n=86$ e:14—17 $n=74$ f:18—21 $n=128$

各高度分析结果是:5—20m和20—60m的 p 频数极大值出现于0.3—0.6之间,大的 p 值出现频数夜间较白天大。这符合一般规律。100—140m和140—180m p 频数分布极大值在夜间不明显,在 $p < 0.6$ 时较均匀分布,而白天突出地出现在0—0.1之间,这说明白天规律性更明显些,且 p 值比夜晚小得多,这也与上述结论一致。对180—220m, p 值夜间频数极大值出现于 p 为

0.5—0.7之间,白天为0—0.3之间。220—250m的 p 频数分布相当离散,极大值不突出,数据少的时段更是如此,但总的趋势仍是 p 值夜间大值出现多,白天小值频数高。白天 p 值小于夜间这一普遍性结论完全符合层结对湍流影响的物理解释。各时段20—250m的 p 频数分布极大值在 p 为0.4—0.5间,除14—17时的极大值不很突出外,其他各时段都很明显。在0.3—0.5以外的 p 出现频率

不超过 30%，各时段均如此。

用 1991 年 2 月的资料对 p 的平均日变化进行了分析，见图 2，可见 p 夜间大，白天小，且越往高处越明显，说明层结对风的影响愈向上愈大，这完全符合边界层湍流理论的结果。

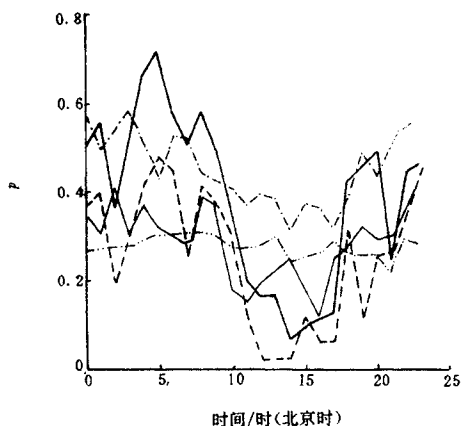


图 2 p 值的平均日变化

图中点划线为 5—20m，虚线为 20—60m，
实线为 100—140m，断线为 140—180m，
双点划线为 20—250m

表 1 给出了各层次全天的平均 p 值，可供大致估计各高度风速参考。

表 1 各高度层次平均 p 值

层次	p 值
5—20m	0.55
20—60m	0.42
100—140m	0.36
140—180m	0.39
180—220m	0.54
220—250m	0.63
20—250m	0.40

3 风切变的频数分布

主要分析风矢梯度 $|\frac{\Delta \vec{V}}{\Delta z}|$ ，其频数分布的分析方法与 p 类似，也是取上述 6 个时段和 7 个高度层，其值分布在 $0-1.9s^{-1}$ 之间。

$|\frac{\Delta \vec{V}}{\Delta z}|$ 的频数分布随时间变化不明显，这是由于 $|\frac{\Delta \vec{V}}{\Delta z}|$ 中含风向影响，而风向影响时间

变化不明显，后面将见到 $\frac{\Delta V}{\Delta z}$ 随时间变化还是很明显的。 $|\frac{\Delta \vec{V}}{\Delta z}|$ 下面各层频数分布较集中，频数分布极大值出现在 $0.05-0.15s^{-1}$ 之间，呈偏态分布，上面各层则较离散。20—250m 的整层 $|\frac{\Delta \vec{V}}{\Delta z}|$ 频数分布最集中，极大值出现在 $0-0.05s^{-1}$ 处，随 $|\frac{\Delta \vec{V}}{\Delta z}|$ 的增大，频数迅速减小至 0，如图 3。20—250m 的 $|\frac{\Delta \vec{V}}{\Delta z}|$ 值比其他各层都小，说明 250m 以下各层风向变化比较复杂，不象风速那样单调随高度变化，造成各层的 $|\frac{\Delta \vec{V}}{\Delta z}|$ 比整层的大。除 20—250m 以外， $|\frac{\Delta \vec{V}}{\Delta z}|$ 的频数分布要比相应的 p 频数分布离散，这也说明风向扰动的作用大。

用 Pearson III 型曲线拟合 $|\frac{\Delta \vec{V}}{\Delta z}|$ 频数分布直方图的公式是：

$$y = \frac{\beta^{\alpha_1}}{\Gamma(\alpha_1)} (x - \delta)^{\alpha_1 - 1} e^{-\beta(x - \delta)} \quad \delta < x < \infty \quad (3)$$

其中 $\alpha_1 = \frac{4}{C_s^2}$, $\beta = \frac{2}{a C_v C_s}$, $\delta = a(1 - 2 \frac{C_v}{C_s})$ ，这里 a 为平均值， C_v 是离差系数， C_s 为偏倚系数。

$$C_v = \frac{\sigma}{a} = \frac{1}{a} \sqrt{\frac{\sum (x_i - a)^2}{n}}$$

$$C_s = \frac{1}{n} = \frac{\sum (x_i - a)^3}{\sigma^3}$$

n 为数据数， σ 是标准差。计算出的各层各时段的 α 、 β 、 δ 见表 2。

$|\frac{\Delta \vec{V}}{\Delta z}|$ 中包含两个因素，即 $\frac{\Delta V}{\Delta z}$ 和 $V \frac{\Delta \alpha}{\Delta z}$ 。这两个因子那个对 $|\frac{\Delta \vec{V}}{\Delta z}|$ 的值起主要作用？为此分别画出 $\frac{\Delta V}{\Delta z}$ 和 $|\frac{\Delta \alpha}{\Delta z}|$ 频数分布图（图略）， $\frac{\Delta V}{\Delta z}$ 在 $0-0.56s^{-1}$ 之间， $|\frac{\Delta \alpha}{\Delta z}|$ 在 $0-0.21$ 弧度 $\cdot m^{-1}$ 之间。

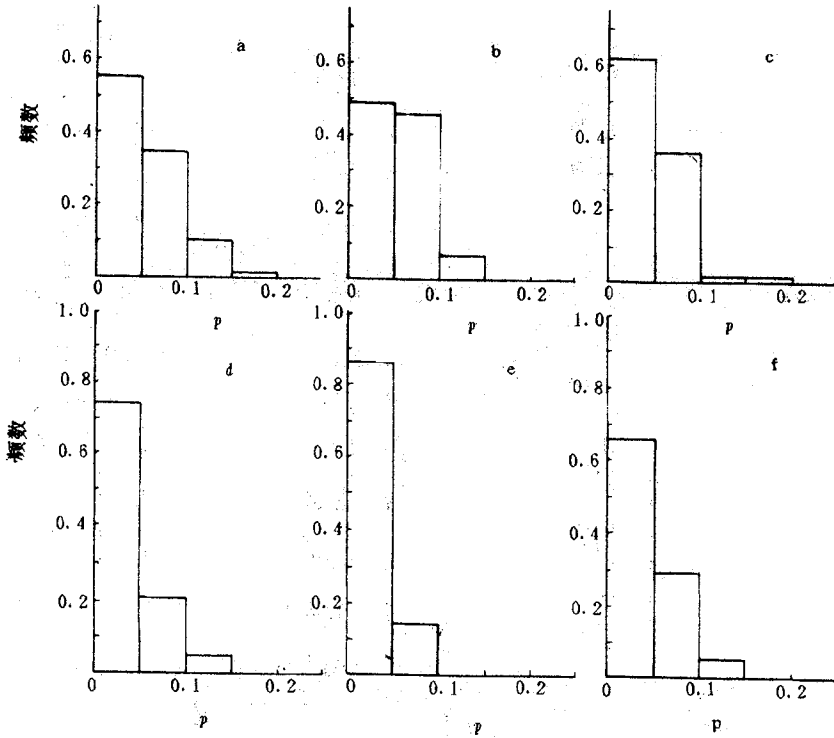


图3 20—250m $\left| \frac{\Delta \bar{V}}{\Delta z} \right|$ 的频数关系

a: 22—01 $n=170$ b: 02—05 $n=173$ c: 06—09 $n=158$
d: 10—13 $n=86$ e: 14—17 $n=72$ f: 18—21 $n=127$

表2 $\left| \frac{\Delta \bar{V}}{\Delta z} \right|$ 分布中的各参数

高度 /m	22—01 时				02—05 时				06—09 时				10—13 时				14—17 时				18—21 时			
	n	α_1	β	δ	n	α_1	β	δ	n	α_1	β	δ	n	α_1	β	δ	n	α_1	β	δ	n	α_1	β	δ
5—20	225	1.517	6.099	0.025	239	3.216	7.740	-0.100	218	3.228	8.127	-0.085	111	1.606	5.663	0.022	96	0.942	3.880	0.051	183	1.845	7.176	0.010
20—60	209	2.797	9.622	-0.082	224	3.769	10.951	-0.115	202	3.668	10.726	-0.120	101	3.296	11.687	-0.073	81	1.976	9.264	-0.041	170	2.156	9.751	-0.021
100—140	236	0.526	5.794	0.019	252	0.474	5.170	0.022	220	0.613	5.935	0.020	116	3.050	22.417	-0.039	107	1.206	13.003	0.005	195	0.318	3.735	0.035
140—180	236	1.085	5.910	-0.013	252	1.712	8.060	-0.043	220	1.715	7.464	-0.036	116	3.673	16.660	-0.083	107	2.022	13.556	-0.031	196	0.334	2.989	0.028
180—220	144	1.033	5.528	0.045	168	1.921	8.477	0.028	134	2.043	7.196	0.020	59	1.687	10.114	-0.024	49	0.476	6.531	0.017	125	0.413	2.950	0.049
220—250	89	2.752	4.332	-0.254	102	4.285	4.711	-0.423	74	2.363	4.061	-0.069	34	5.649	10.988	-0.254	25	2.685	8.627	-0.182	69	1.451	4.065	-0.096
20—250	170	3.339	57.954	-0.005	173	18.696	156.884	-0.067	158	1.689	50.372	0.013	86	2.196	48.497	-0.009	172	4.001	95.229	-0.015	127	3.581	70.191	-0.008

$\frac{\Delta \bar{V}}{\Delta z}$ 的频数分布在低层较离散,在高层较集中,且小值频数大,除 5—20m 及 20—60m 外,各层 $\frac{\Delta \bar{V}}{\Delta z}$ 很少超过 $0.2s^{-1}$,高低层频数分布的差别说明高层风随高度分布规律性较好些。低层由于下垫面扰动大,规律不如上层

好。 $\frac{\Delta \bar{V}}{\Delta z}$ 日变化很明显,白天小值频数大,夜间大值出现多,这与 p 值一致,甚至更明显。 $\left| \frac{\Delta \alpha}{\Delta z} \right|$ 日变化不明显,但其频数分布的高度变化明显,低层离散而高层集中,这也证明了低层由于下垫面影响风向扰动较大。20—250m

的 $|\frac{\Delta\alpha}{\Delta z}|$ 最小,再次说明风向随高度分布较复杂。 $|\frac{\Delta\alpha}{\Delta z}|$ 一般在 $0-0.08$ 弧度 $\cdot m^{-1}$ 之间,可取 0.02 为代表值,若风的代表值为 $10 m \cdot s^{-1}$, $\frac{\Delta V}{\Delta z}$ 代表值为 $0.1 s^{-1}$,则 $V|\frac{\Delta\alpha}{\Delta z}|$ 的值是对应的 $\frac{\Delta V}{\Delta z}$ 的两倍,平方后就是 4 倍,所以风向变化在 $|\frac{\Delta\vec{V}}{\Delta z}|$ 中起主要作用,因此 $20-250m$ $|\frac{\Delta\vec{V}}{\Delta z}|$ 值小的原因是 $|\frac{\Delta\alpha}{\Delta z}|$ 小了,风向在各层中来回变化,这与前面分析一致。

我们还分析了切变 $\Delta V/\Delta z$ 与 $\Delta T/\Delta z$ 的关系,上层两者明显正相关,而低层因地面动力条件影响而变得不明显。

4 冷锋相应的风切变与温度特征

我们所分析的 8 个月基本上处于冬季和初春,主要天气系统是冷锋,冷锋过境的标志是温度剧降,就华北地区而言,冷锋过境往往伴随大风天气,这一点应在风切变上有所反映,并引起温度梯度的变化。

一般情况下,近地层由于受地面加热影响,温度及其梯度有明显日变化,温度在午后达到最大,而温度梯度 $\Delta T/\Delta z$ 在午后达最小,为负值。而当冷锋过境时,平流引起的温度变化远大于地面加热作用,温度日变化不明显,平流使温度骤降。这时近地面温度变化不再主要由地面加热或冷却所控制,从而使 $|\frac{\Delta T}{\Delta z}|$ 变小。冷锋大风加强了湍流交换作用,

更使 $|\frac{\Delta T}{\Delta z}|$ 变得很小。因此,理论上冷锋过境时 $\Delta T/\Delta z$ 应在零附近波动。下面分析个例。

图4—6是起始时间为1991年11月27日00时的温度、风切变和温度梯度变化图。温度为 $20m$ 处的温度、风切变为 $20-250m$ 的 $\frac{\Delta V}{\Delta z}$, 温度梯度三层都取了。从图4—6中可看出,大约从28日04时始,风切变就不断增大,说明有大风天气,而温度却是从29日20时左右开始下降的,即温度场有大的落后,其

波动也较风切变为小,从图6中还可看出风切变开始增大时, $\Delta T/\Delta z$ 开始趋于零,当温度下降时, $\Delta T/\Delta z$ 已在零附近波动。这说明 $\Delta T/\Delta z$ 的变化与大风有密切关系,即风生湍流产生的交换作用是 $\Delta T/\Delta z$ 趋于零的重要原因。

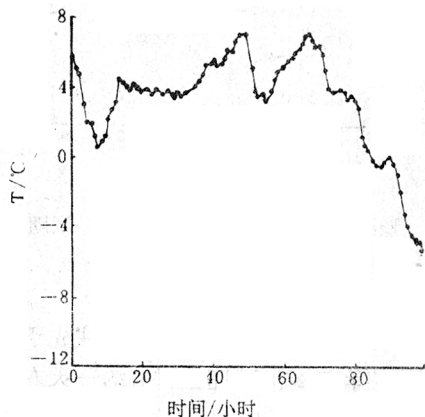


图4 1991.11.27.00时开始的温度时间变化

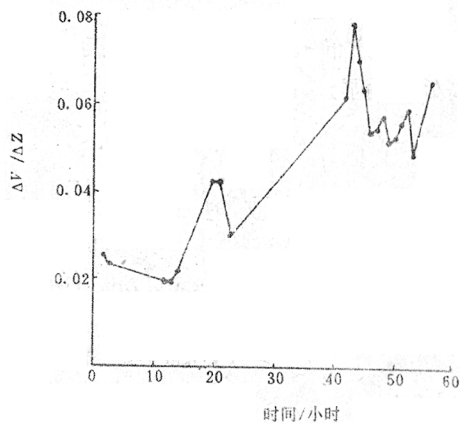


图5 1991.11.27.00时开始的风切变随时间变化

对1991年3月的两次冷锋个例分析也有类似结论。结论是天津地区冷锋过境时的大风都持续不长。 $20m$ 温度开始下降的时间至少要滞后一天,降温的持续时间比较长,一般 $2-4$ 天。温度梯度 $\Delta T/\Delta z$ 由通常的明显日变化变为在零附近波动,是冷锋过境的一个显著标志,和温度下降一样,可以明显地判

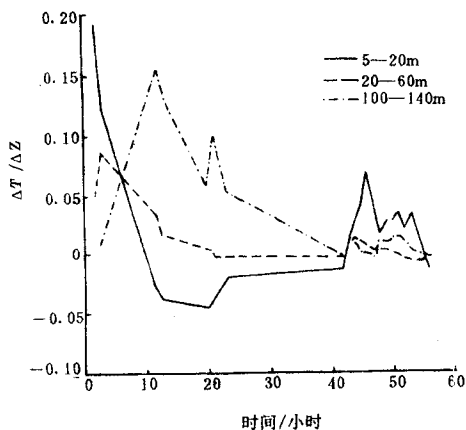


图6 1991.11.27.00时开始的温度梯度随时间变化

别冷锋过境。而 $\Delta T/\Delta z$ 趋于零往往先于20m的温度下降,持续时间也短些,约一天左右。

5 结 语

由冬季半年天津气象塔资料的分析,可有下列初步结论。

5.1 p 值分布一般是夜间大,白天小,且越往高处越明显。

5.2 就20—250m整层风矢梯度而言,比各层次的风矢梯度小,这主要是由于250m以下风向随高度变化并非单调,即各高度风向扰动较大造成的。

5.3 本文求出的各层次风切变频数分布及大小可为需要这些数据的有关工作提供参考。

5.4 风速切变随 $\Delta T/\Delta z$ 增加而增加的现象,愈高愈明显。

5.5 冷锋过境时大风持续时间不长,降温落后于大风,而冷锋过境时温度梯度趋于零。

由于资料限制,本文主要分析了冬半年,且层次上未能包括所有层次,但塔层风切变的主要特征已可看出。在资料积累足够多时,可以做进一步的工作。

参考文献

- 1 Wittich, K. P., J. Hartman, R. Roth. Shear statistics based on nocturnal wind profiles. J. App. Mete., 1988, 25:1507—1517.
- 2 Орленко, Л. Р. Строение планетарного пограничного слоя атмосферы. Гидрометеоиздат. 1979.
- 3 刘学军, 吴丹朱, 马富春. 天津市250m低层大气风廓线模式的试验研究. 大气科学, 1991, 15, (15): 33—39.

A Study of Wind Shear in Tower Layer over Tianjin

Zhao Ming Tang Youhua

(Dept. of Atmospheric Science, Nanjing University 210008)

Liu Xuejun

(Tianjin Research Institute of Meteorological Science 300074)

Abstract

Based on the data analysis of the wind speed, wind direction and temperature observed on Tianjin tower during 8 months in the winter season of 1990—1992, the characteristics of wind shear in the boundary layer below 250m in Tianjin are given, such as the temporal and spatial variations of the index pin the power law of the wind profile, the frequency distribution of the wind shear in different layers and different time intervals, the relation between the wind shear and stability. The vertical distribution of wind in the tower layer over the city is presented. The variations of the wind shear and temperature during the passage of cold front are also analysed.

Key Words: tower layer wind shear cold front