

稳定大气边界层中风向脉动的特征·

吕乃平 李兴生

(中国科学院大气物理研究所)

提 要

本文对稳定大气边界层中风向脉动的特征进行了讨论。用美国波德大气观测台(BAO)气象塔上超声风速仪的观测资料,计算了三种不同稳定大气结构条件下垂直风向 $\sigma_w/\bar{U}$ 和横截风向 $\sigma_v/\bar{U}$ 随时间的变化。结果表明 $\sigma_w/\bar{U}$ 和 $\sigma_v/\bar{U}$ 随平均时间的变化分别与垂直风速和横向风速的能谱分布有关。 $\sigma_w/\bar{U}$ 和 $\sigma_v/\bar{U}$ 随平均时间变化的峰值与能谱峰值的时间尺度相当。

在重力内波的情况下,边界层大气中往往伴随有风向切变。由于稳定大气边界层的结构十分复杂,通常,风向脉动参数和 Ri 数及高度之间无简单规律。只有在—层逆温时,在风速和 Ri 数均随高度增加的情况下才有一定的简单关系。

一、引 言

大气中的风切变,风速和风向脉动的特征在风能和航行问题中都是十分重要的。R. C. Heald^[1]用 wangara 的观测资料分析了 16 米至 100 米之间的风切变。他指出,边界层大气中的风切变多数出现在夜间,往往伴随着低空急流。J. C. Kaimal^[2]分析了波德大气观测台(以下简称BAO)的风场统计特征。由此看来,低空风切变是一项引人关注的问题。

此外,大气中烟羽的扩散与风向脉动有密切的关系。S. R. Hanna 等^[3](1977)指出,污染物在垂直和横截风方向的扩散可以用垂直和横截风向脉动的标准偏差来进行估计。J. C. Doran等^[4](1978)分析了无因次扩散参数 $\sigma_{z,y}/x\sigma_{\theta,\phi}$ ($\sigma_{z,y}$ 是垂直和横截风方向上烟羽宽度的标准差, $\sigma_{\theta,\phi}$ 是垂直和横截风方向上风向脉动的标准差, x 是下风方向的距离)随平均时间和采样速率而变化。H. A. Panofsky 等^[5](1979)讨论了不稳定层结条件下风向脉动的特征。本文用 BAO 的观测资料分析了稳定大气边界层中风向脉动的特性,并对三种不同稳定边界层结构的情况进行了比较。对重力内波条件下的风向切变问题进行了讨论。

二、观测资料和计算方法

BAO 铁塔上的平均风速、风向是采用螺旋桨风速仪和超声风速仪的平均值两种方法

求出的。在本文计算中均采用后者。风向脉动参数¹⁾ $\sigma_w/\bar{U}$ 和 $\sigma_v/\bar{U}$ 是用超声风速仪的资料计算得出的。 σ_w 和 σ_v 分别是垂直和横截风向脉动的标准差, $\bar{U}$ 是平均水平风速。仪器分别安装在铁塔的8个高度上,详见文献[6]。平均风速、风向的采样速率为0.1赫,超声风速仪的采样速率为10 HZ。为计算简便起见,先将超声风速仪的观测资料进行10秒平均,再计算 $\sigma_w/\bar{U}$ 和 $\sigma_v/\bar{U}$ 的值。

风速脉动的方差 $\overline{W'^2}$ 和 $\overline{V'^2}$ 用下式计算:

$$\overline{W'^2} = \frac{\sum W^2}{n} - \left(\frac{\sum W}{n} \right)^2 \quad (1)$$

$$\overline{V'^2} = 2 \sin \bar{\theta} \cos \bar{\theta} (\bar{u}\bar{v} - \overline{uv}) \quad (2)$$

其中, W 和 u, v 分别为垂直和水平方向上的三个风速分量, $\bar{\theta}$ 是平均风向, v' 是与合成的水平风速垂直的横向风速脉动量, n 是平均的点数。在计算风向脉动参数 $\sigma_w/\bar{U}$ 和 $\sigma_v/\bar{U}$ 随时间的变化时,为了得到一个稳定的值,采用多次平均的方法。即在30分钟内,取不同的时间间隔平均,(如1分,2分……直至20分),每次顺延1分钟,得出相应时间间隔内的平均值,平均次数分别为30,29,……10次。由此得出风向脉动参数随时间的变化。我们还用超声风速仪的原始资料计算了1小时的能谱分布。

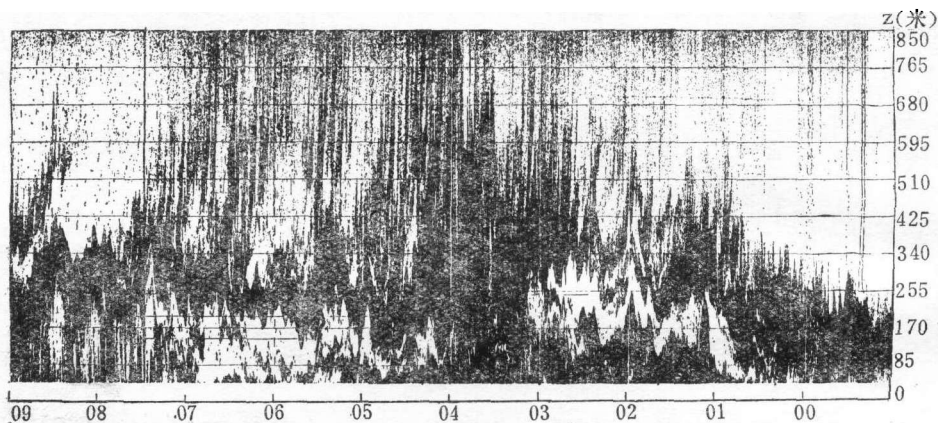


图1(a) 声雷达回波
(1981年3月27日)

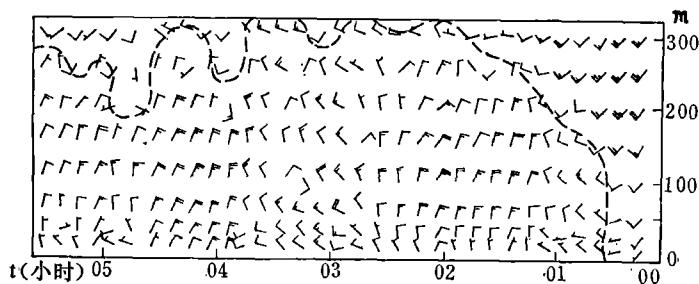


图1(b) 平均风向分布
(1981年3月27日)

1) $\sigma_w/\bar{U}$ 和 $\sigma_v/\bar{U}$ 是大气中湍流度的量度。 $\sigma_w/\bar{U}$ 和 $\sigma_v/\bar{U}$ 近似地与垂直方向和横截风方向的摆动角度相当。

三、风向脉动特性

从声雷达和铁塔的观测资料可以看出, 稳定大气边界层的结构十分复杂。近地面的辐射逆温高度常常出现在 100 米以下。经常可以观测到重力内波和多层逆温的结构。以下我们将分析这三种结构的风向脉动特征。

1. 重力内波

1) 平均风向分布的某些特征。

图 1 给出了 1981 年 3 月 27 日声雷达回波和平均风向分布。从声雷达回波图象上看

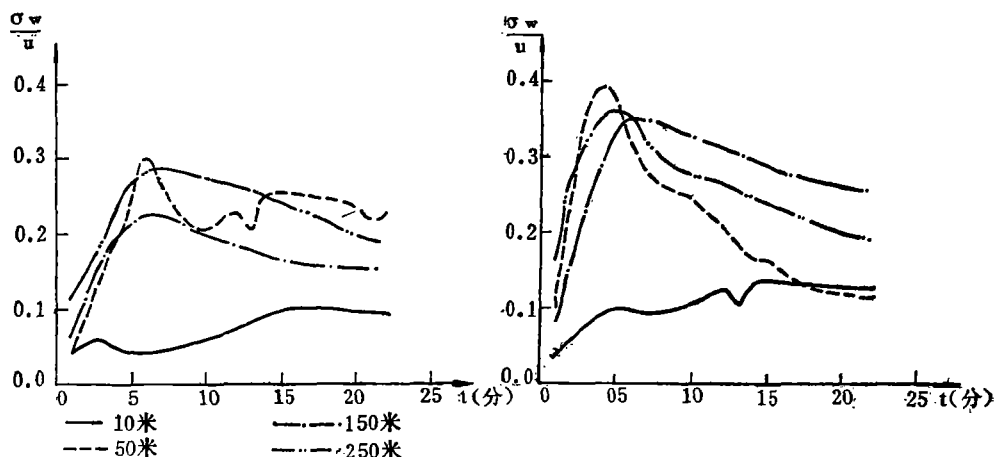


图 2(a) 出现波动时垂直风向脉动随时间的变化
(1981 年 10 月 28 日 0545—0615)

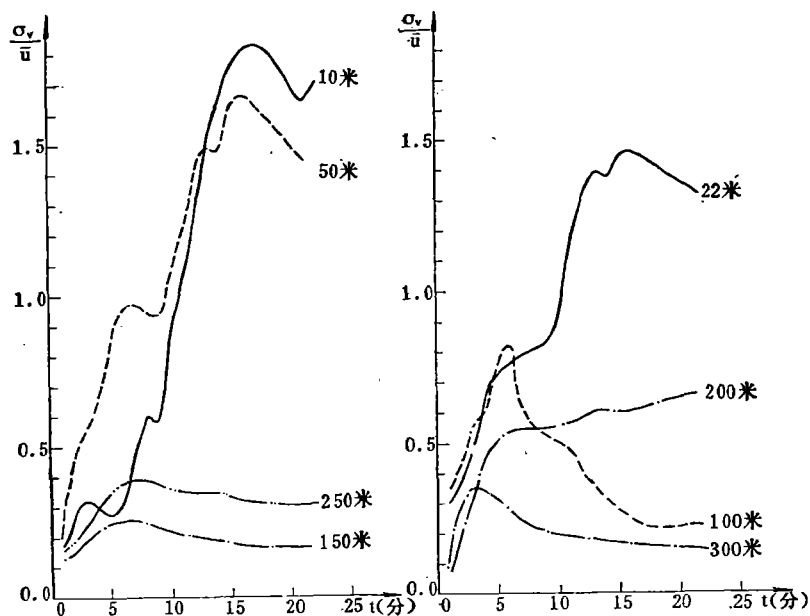


图 2(b) 出现波动时水平风向脉动随时间的变化
(1981 年 10 月 28 日 0545—0615)

出,在 150 米以上和近地面有两层具有明显波动结构的逆温层,在 100 米高度附近为弱的回波区。图 1(b) 中的虚线为风向切变线,在 100 米高度附近风速最大,达 10 米/秒左右,是在夜间稳定条件下形成的低空急流。这与 R.C.Henld^[1]的分析结果一致。

我们还分析了 1981 年 10 月 28 日和 11 月 13 日的两个例子(图略)。从声雷达回波图片和垂直风速及微压计的记录中均可看出明显的波动结构。得到和上例类同的结果。

2) 风向脉动随平均时间的变化

图 2 为 1981 年 10 月 28 日 0545—0615 垂直风向脉动和横截风向脉动随平均时间的变化。从 $\sigma_w/\bar{U}$ 的一组曲线中看出,在 50 米高度以上, $\sigma_w/\bar{U}$ 的最大值出现在 5—6 分钟。在开始的几分钟内, $\sigma_w/\bar{U}$ 随平均时间的增加而增加,然后逐渐减小,趋于一个稳定值。在 10 米和 22 米高度上, $\sigma_w/\bar{U}$ 的数值较小,没有明显的峰值。类似地,在 10, 22 和 50 米高度上,横截风向脉动 $\sigma_v/\bar{U}$ 随平均时间变化的最大值出现在 16 分钟左右,此后随平均时间的增加而减少。注意到在 200 米高度上开始的几分钟内, $\sigma_v/\bar{U}$ 随平均时间的增加而增加得较快,而后继续缓慢地增加,不出现峰值。在边界层大气中,风向脉动是受各种不同尺度涡旋运动的支配,平均时间短时,对风向脉动起作用的涡旋尺度也较小,平均时间愈长,则对风向脉动起作用的涡旋尺度也大。为了说明这一点,我们计算了 0520—0620 时段内的垂直风速脉动谱和横向风速脉动谱。

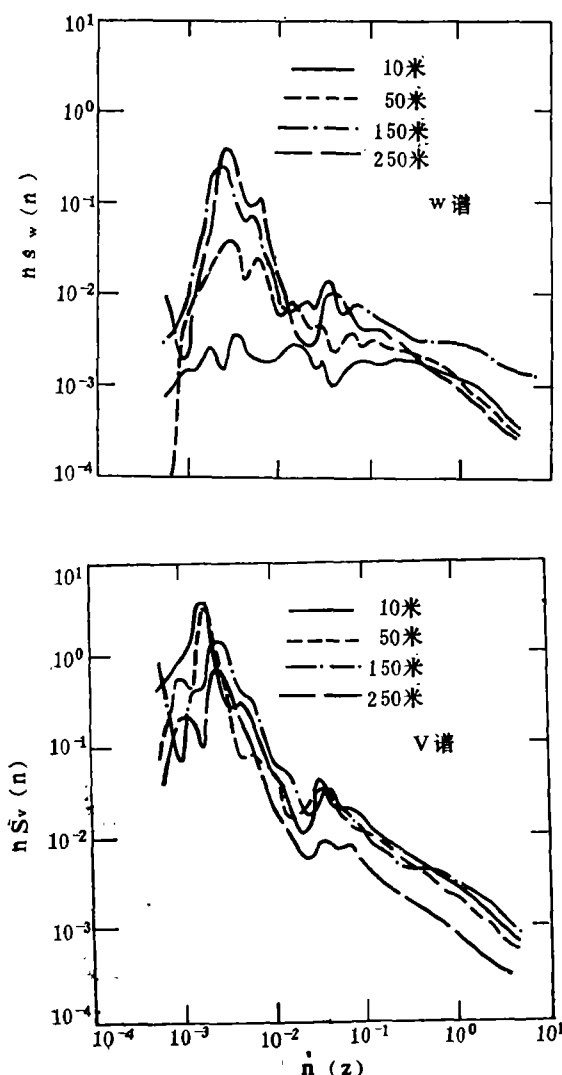


图 3 出现波动时垂直风速和横向风速脉动谱
(1981 年 10 月 28 日 0520—0620)

如图 3 所示,其频谱分布具有明显的波动结构特征^[7](Lu Naiping 等)。能谱分布的峰值频率相应于主要的波动频率。由于地面的抑制作用,愈接近地面,波动对垂直风速的能量贡献愈小,所以在 10 米高度上的垂直速度谱没有明显的峰值,在 50 米以上, w 谱的峰值频率接近 2.4×10^{-3} 赫,相应的时间尺度为 7.0 分钟。这与 $\sigma_w/\bar{U}$ 曲线上出现最大值的时间相近。我们将 8 个高度上的计算结果综合列于表 1。表中列出谱峰值对应的时间尺度与风向脉动随时间变化曲线上出现最大值的时间比较一致。在波动条件下,风向脉动参数主要受波的运动的

表 1 w, v 谱上峰值频率对应的时间尺度和 $\sigma_w/\bar{U}, \sigma_v/\bar{U}$ 随平均时间变化出现最大值的时间之比较(1981 年 10 月 28 日 0520—0620 MST)出现最大值的时间尺度(分)

高 度 (米)	w 谱	$\sigma_w/\bar{U}$ 曲线	v 谱	$\sigma_v/\bar{U}$ 曲线
10	—	—	11.5	16.0
22	—	—	11.5	15.0
50	5.6	6.0	11.5	16.0
100	7.0	5.0	11.5	7.0
150	7.0	6.5	7.9	7.0
200	7.0	6.0	增加	增加
250	7.0	7.0	7.9	7.0
300	7.0	7.0	5.6	4.0

控制, 即与波动周期相应的平均时间对应的风向脉动值大。当风速脉动谱在低频部分不出现峰值, 即随频率的减小能谱值增加时, 相应的 $\sigma_v/\bar{U}$ 曲线随平均时间的增加而加大, 如表 1 中列出的 200 米高度的例子。通常, 在初始的几分钟内, $\sigma_w/\bar{U}$ 和 $\sigma_v/\bar{U}$ 随时间的增加而迅速增加, 并满足下面的关系:

$$\sigma_w/\bar{U} = at^b \text{ 和 } \sigma_v/\bar{U} = ct^d$$

其中 a, b, c, d 是由实验决定的常数。 b 和 d 的值在 0.4 至 1.2 之间变化。在有风向切变的层次, 其数值较大。风向脉动参数随时间的变化主要取决于重力内波的特性, 与稳定度参数 R_i 之间无简单关系。

2. 多层逆温

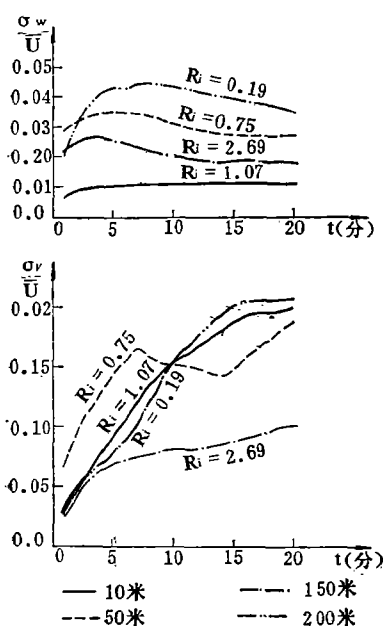


图 4 多层逆温时, $\sigma_w/\bar{U}, \sigma_v/\bar{U}$ 随平均时间的变化
(1981 年 4 月 24 日 03:00—03:30)

Li Xingsheng 等^[8]的分析指出, 在 BAO 的观测资料中, 经常观测到多层逆温。多层逆温中, 每层的厚度往往只有几十米, 有时伴随有波动, 有时呈现为稳定的片状薄层, 我们分析了 1981 年 4 月 24 日多层逆温的例子, 声雷达回波图片和温度及风速分布可参看文献^[8]。50 米以下是一层强逆温, 200—300 米是第二个逆温层。李兴生等^[9]的分析指出, 在边界层中与多层逆温相应, 往往伴随有多极值风速。该例中的风速和温度廓线也反映了这种结构。在 150 米附近有一个风速极大值, R_i 最大。300 米以下无风向切变, 声雷达回波图象上在 03:00—04:00 时段内没有明显的波动。

图 4 为 1981 年 4 月 24 日 $\sigma_w/\bar{U}$ 和 $\sigma_v/\bar{U}$ 随平均时间的变化。从相应高度上的风速脉动谱(图略)看出, 在低频区, 横向风速脉动谱在 4 个高度上都没有明显的峰值, 能量随频率的减小而增加, 相应地图 4 中 $\sigma_v/\bar{U}$ 的值随平均时间的增加而加大。这里不能得出 $\sigma_v/\bar{U}$ 和 R_i 之间的明确关系, 但稳定度很大时, 如 150 米高度上 $R_i = 2.69$, $\sigma_v/\bar{U}$ 的值比其它各高度小,

这与该高度上平均风速 $\bar{U}$ 最大显然是有关的。在垂直能谱分布图中和湍流的含能涡区对应的峰值(如 10 米高度上出现在 8.6×10^{-1} Hz 的峰值), 在 $\sigma_w/\bar{U}$ 曲线上无对应的最大值, 其对应关系在谱的低频部分出现峰值时较为明显。250 米高度上的垂直速度谱在 8 分钟周期处有一个小的峰值, 相应地在 $\sigma_w/\bar{U}$ 曲线上, 在 7 分钟时达最大值。在 50 和 150 米高度上在 2—5 分钟周期之内有较小的峰值, 总的变化较小。注意到 150 米高度上 R_i 最大, $\sigma_w/\bar{U}$ 的值比近地面 10 米高度上的值大, 但小于其它几个高度上的值。这说明垂直风向脉动一方面受地面边界的抑制, 同时又受稳定度等因子的影响。

3. 近地面一层逆温

图 5 给出了 1981 年 3 月 26 日 1840—1940 和 4 月 23 日 2120—2220 两个 W 和 V 谱

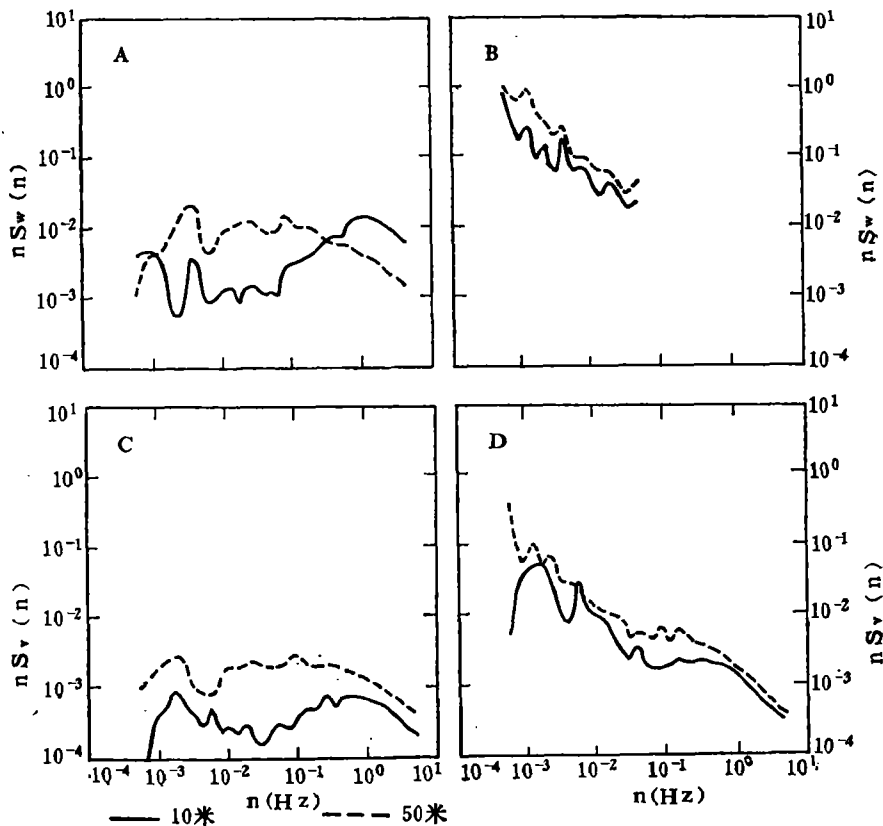


图 5 一层逆温时 W 和 V 谱的分布

A, B: 1981 年 3 月 26 日 1840—1940,

C, D: 1981 年 4 月 23 日 2120—2240

分布的例子。表 2 列出了在相应时段内 20 分钟平均的风速、风向和 R_i 的平均值。这两个例子中 R_i 均随高度增加, 逆温较强, 差异是 3 月 26 日平均风速大, 风速随高度增加, 4 月 23 日的风速较小, 50 米高度上风速最大。图 5 A 和 B 中高频部分的能谱值随高度的增加而减小, 而图 5 C 和 D 中变化的趋势正好相反。如前所述, 能谱高频部分的峰值频率与风向脉动参数随时间的变化曲线无明显的对应关系。而低频部分能谱分布的特性

与 $\sigma_w/\bar{U}$ 和 $\sigma_v/\bar{U}$ 之间的关系和前面分析的规律一致。如图 5 D 中 10 米高度上 V 谱的峰值出现在 $1.85 \times 10^{-3} \text{HZ}$, 时间尺度为 9 分钟, 相应的 10 米高度上的 $\sigma_v/\bar{U}$ 随时间增加到 7 分钟, 然后减小。其它三个高度上 V 谱的值均随频率的减小而增加, 反映在 $\sigma_v/\bar{U}$ 曲线中其值随平均时间的增加而增加。(图略)。

表 2 一层逆温时平均风速、温度和 R_i 的分布

时 间	1981.3.26 日 1840—1900			1981.4.23 日 2200—2220		
高 度	V (米/秒)	$\theta^\circ\text{C}$	R_i	V (米/秒)	$\theta^\circ\text{C}$	R_i
10	5.14	14.94	0.505	3.30	13.25	0.250
22	5.75	16.75	1.144	4.17	14.13	0.891
50	6.59	17.76	1.278	5.02	14.74	1.669
100	7.60	17.73		4.08	15.33	

如上所述, 在边界层大气的结构呈现为重力内波和多层逆温时, 风向脉动参数和稳定度之间没有简单的关系。即使对一层逆温的情况也是复杂的。表 2 中的二个例子, 在 BAO 的观测资料中并非特殊的个例。下面我们对一层逆温的情况作进一步分析。

根据声雷达和铁塔的温度观测资料对逆温层的结构进行分类。为了避免地形和塔体

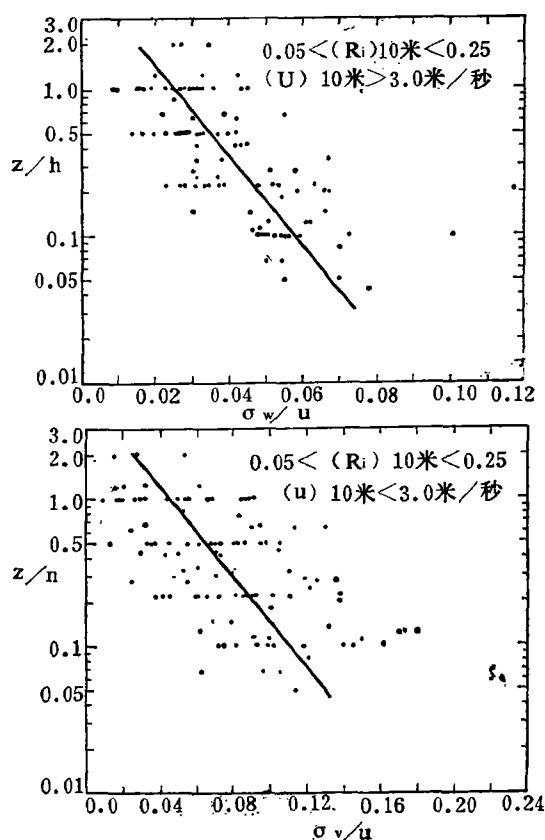


图 6 $\sigma_w/\bar{U}$ 和 $\sigma_v/\bar{U}$ 与无因次高度 z/h 的关系

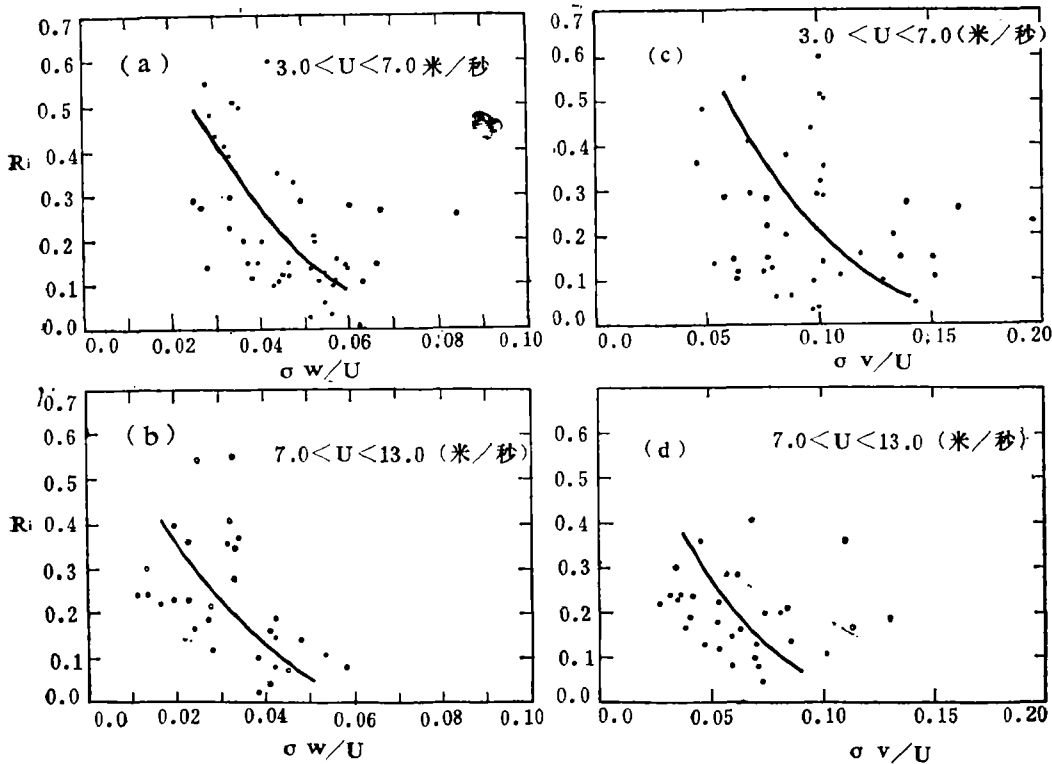


图 7 $\sigma_w/\bar{U}$ 和 $\sigma_v/\bar{U}$ 与 R_i 的关系

的影响,采用平均风向为 $225^\circ - 315^\circ$ 范围内的 20 分钟平均的 130 组资料^[10]。对一层逆温按风速和 R_i 的分布分为四类。(1) 风速和 R_i 均随高度增加,(2) 风速随高度增加, R_i 随高度减小,(3) 风速随高度增加, R_i 随高度的变化无规律,(4) 在 100 米高度以下有风速极值存在。我们定义 $\partial\theta/\partial z \rightarrow 0$ 的高度为逆温层顶 h 的高度,多数情况下 $h \leq 100$ 米。

在 BAO 的观测资料中,近地面为一层逆温时,10 米高度上的风速通常大于 3.0 米/秒。其中有 33 组资料属于第(1)类情况,计算了 $\sigma_w/\bar{U}$ 和 $\sigma_v/\bar{U}$ 与 z/h 和 R_i 的关系,分别示于图 6 和图 7。从图中看出,点子十分离散。当 $3.0 \text{ 米/秒} < U_{10\text{米}} < 12 \text{ 米/秒}$ 和 $0.05 < (R_i)_{10\text{米}-22\text{米}} < 0.25$ 时,可以得到下述关系:

$$\sigma_w/\bar{U} = 0.0251 - 0.0348 \ln z/h$$

$$\sigma_v/\bar{U} = 0.0455 - 0.0276 \ln z/h$$

图 7 是按风速范围分类后作出 $\sigma_w/\bar{U}$ 和 $\sigma_v/\bar{U}$ 与 R_i 的关系。在风速和 R_i 随高度分布都有规律的前提下,图中的点子仍很分散。但总的趋势是 R_i 愈大,风向脉动参数值愈小。对一层逆温的其它三类情况,尚不能得到上述的简单关系。

四、结 论

稳定大气边界层的结构比较复杂,经常可以观测到重力内波,多层逆温和近地面一层逆温三种结构。在这三种情况下,风向脉动参数 $\sigma_w/\bar{U}$ 和 $\sigma_v/\bar{U}$ 随时间的变化与垂直风

速和横向风速谱有关。能谱上峰值频率相应的时间尺度与 $\sigma_w/\bar{U}$ 和 $\sigma_v/\bar{U}$ 达到最大值的时间相近。即风向脉动特性受不同尺度涡旋运动的影响。在重力内波的情况下, 明显地受波动的影响。

在有重力内波情况下, 边界层大气中经常伴随有风向切变。多层逆温出现时, 往往有多个风速极值存在。在风速出现最大值的层次上, R_i 最大, 风向脉动参数值最小。

对近地面一层逆温而言, 只有在风速和 R_i 均随高度增加时, 能够得到 $\sigma_w/\bar{U}$ 和 $\sigma_v/\bar{U}$ 与无因次高度之间的简单函数关系, 及其与 R_i 的变化关系。即使在这种条件下, 点子仍较分散。值得注意的是, 在 R_i 相近的条件下, 有重力内波存在时, 其风向脉动参数的值远比一层逆温和多层逆温时的值大。因此, 研究稳定大气边界层的物理问题时, 需要分清并了解各种不同大气结构时的特性, 这将有助于得出合理的结论。

参 考 文 献

- [1] Heald, R. C., Boundary layer wind shear, Conference and workshop on wind energy characteristics and wind energy siting, 343, 1979.
- [2] Kaimal, J. C., Wind statistics at the boulder atmospheric observatory tower, Conference and workshop on wind energy characteristics and wind energy siting, 81, 1979.
- [3] Hanna, S. R., G. A. Briggs, T. Deardorff., B. A. Egan, F. A. Gifford, and F. Pasquill, Summary of recommendations made by the AMS workshop on stability classification schemes and sigma curves, *Bull. Amer. Meteorol. Soc.*, **58**, 1305—1309, 1977.
- [4] Doran, J. C., T. W. Horst, and D. W. Nickola, Variations in measured value of lateral diffusion parameters, *J. Appl. Meteorol.*, **17**, 825—831, 1978.
- [5] Panofsky, H. A., R. Lipschutz, and J. Norman, On the characteristics of wind direction fluctuations in the surface layer, Fourth Symposium on Turbulence, Diffusion and Air Pollution, January 15—18, Amer. Meteorol. Soc., 1—4, 1979.
- [6] Kaimal, J. C., NOAA instrumentation at the boulder atmospheric observatory, Proc. 4th Symp. on Meteorol. Observations and Instrumentation, April 10—14, Amer. Meteorol. Soc., 35—40 1978.
- [7] Lu Naiping, D. W. Neff., and J. C. Kaimal., Wave and turbulence structure in a disturbed nocturnal inversion, *Boundary Layer Meteorol.*, **26**, 141—155, 1983.
- [8] Li Xingsheng, J. E. Gaynor, and J. C. Kaimal, A study of multiple stable layers in the nocturnal boundary layer, *Boundary Layer Meteorol.*, **26**, 157—168, 1983.
- [9] 李兴生、朱翠娟、刘林勤、郑爱英、周明煜, 行星边界层中多极值风速廓线的研究, *大气科学*, **6**, No. 3, 308—314, 1982.
- [10] Korrell, A., H. A. Panofsky and P. J. Rossi, Wind profiles at the boulder tower, *Boundary Layer Meteorol.*, **22**, 295—312, 1982.

THE CHARACTERISTICS OF WIND DIRECTION FLUCTUATIONS IN THE STABLE BOUNDARY LAYER

Lu Naiping, Li Xingsheng

(Institute of Atmospheric Physics, Academia Sinica)

Abstract

The relation between wind direction fluctuations and the structure of the stable atmospheric boundary layer are described. Using data from the sonic anemometers on the atmospheric observatory tower in Boulder, Colorado, the variations of the vertical and lateral wind direction fluctuations with averaging time are calculated. The results indicate that variations of $\sigma_w/\bar{U}$ and $\sigma_v/\bar{U}$ with averaging time are correlated with the vertical and lateral energy spectra. The peaks in the curves of $\sigma_w/\bar{U}$ and $\sigma_v/\bar{U}$ with averaging time correspond to the time scales of the peaks in the energy spectra.

The wind shear usually appear with internal gravity wave. The functional dependence with height and Ri of the wind direction parameters are described for the simplest ground-based inversion case with only limited success. The more complicated stable layers can not be properly described with simple empirical functions.