

边界层大气水平风速低频谱的 垂直分布特征

章小平 吕乃平 周明煜

(中国科学院大气物理研究所)

提 要

本文根据 320 米气象塔上水平风速的观测资料,分析了不同天气条件下边界层大气中湍流的宽谱特性及其垂直分布结构。

结果表明,大气边界层水平风速低频谱的垂直分布是很复杂的,在不同的天气条件下,这种垂直分布特征具有明显的差异。边界层温度和风速的垂直结构也会影响到水平风速低频谱的垂直分布。

在水平风速低频谱中,除了与天气过程有关的 4 天周期峰值和反映气象要素日变化频率的峰值外,在十几分钟到几十分钟频率范围内还存在着几个峰值,而且有时在不同的高度上,峰值频率有所不同。这可能反映了一些中尺度系统的特征,也可能是这些中尺度系统与局地地形的综合作用所引起的。

一、引 言

大气的运动通常是处在充分发展的湍流状态中,大气中湍流谱的尺度很宽,从几厘米到几千公里以上,揭示和了解这种宽谱的特性,对于研究各种不同尺度大气运动的物理过程及其相互耦合作用是十分重要的。

对天气尺度以及行星波的大气运动已作了许多研究。此外,对近地面层小尺度湍流的理论和观测也取得了较好的结果。五十年代以来,由于新的探测手段如气象雷达、飞机、卫星和稠密的地面网的应用,促进了中尺度大气运动的分析和研究。Fujita^[1], Tepper^[2]和 Fiedler^[3]等人指出了大尺度大气运动和局地天气之间相联系的中尺度气象的重要性。

Panofsky^[4]和 Van der Hoven^[5]等人对大气中的宽谱特性进行了观测研究,分析了两个月到 4 秒时间范围的水平风速脉动谱。其结果表明,大气湍流谱中存在着数十秒和 4 天左右的两个峰区。在这两个峰区之间是中尺度的低值区,其最小能量的中心位置处在 30 分钟左右的时间尺度上,称为“谱间隙”。这一结果得到了许多学者的支持,并得到了类似的观测事实^[6], Колесникова 和 Монин^[7]对上述观测结果进行了综合分析。然而近年来的一些观测表明^[8-15],在大气边界层内,不论是稳定或不稳定层结的情况,经常存在着几分钟到十几分钟的周期活动。这意味着,在“谱间隙”区,中尺度湍流运动并非如此

“平静”。这种十几分钟周期的湍流运动,会对中尺度湍流能量作出贡献。

本文根据 320 米气象塔上水平风速的观测资料,分析了不同天气条件下边界层大气中湍流的宽谱特性及其垂直分布结构。从而进一步分析中尺度湍流谱的特性,更好地了解中尺度大气运动与局地天气过程的关系。

二、观测资料和数据处理方法

本文分析的资料取自北京 320 米气象塔上杯式风速仪测量的水平风速连续观测的模拟记录。风杯风速仪安装在铁塔的 15 个层次上,为避免塔体对风速测量的影响,每层有二个伸臂,根据风向选取迎风方向伸臂的记录(见文献[14])。连续观测是采用笔尖式记录器依次在 15 个高度上划线,每分钟在每个高度上采样三次。我们分析了 1981 年 11 月 20 日至 12 月 13 日和 1982 年 8 月 16 日 00:00 至 17 日 00:09 期间的连续观测资料。计算并分析了 47、80、140、280 和 320 米五个高度上的水平风速湍流能谱,读数时间间隔为 20 秒。此外,还分析了上述观测期间,47 米高度上超声风速仪取得的风速资料^[5]。

湍流能谱是用 FFT 方法计算的,为了增加数据序列的平稳性,在数据处理过程中用二次曲线拟合的方法消除数据序列中的低频分量的倾向性影响。用数字滤波方法对数据进行低通滤波,以减少折频效应对谱计算的影响。用“十分之一余弦钟”窗函数消除有限采样对谱估计的影响。

为了获得较宽频带范围上的水平风速湍流能谱,我们分别取三个不同采样间隔和取样时间长度的数据段所计算的谱相接而成,表 1 给出了塔层内五个高度上取样时间间隔,各时段相应的频率范围,平均风速和采样时间长度。

表 1 气象塔上五个高度上水平风速湍流能谱资料

区 段	高度(米)	平均风速 (米/秒)	采样时间	采样间隔	频率范围(周/秒)
1	47	4.3	1981 年 11 月 20 日— 12 月 13 日	8 小时	$5.4 \times 10^{-3} - 1.7 \times 10^{-2}$
	80	5.3			
	140	6.2			
	280	7.6			
	320	7.7			
2	47	4.2	1981 年 11 月 20 日— 11 月 29 日	1 小时	$1.1 \times 10^{-2} - 1.4 \times 10^{-2}$
	80	5.1			
	140	5.8			
	280	7.1			
	320	7.3			
3	47	6.2	1981 年 11 月 30 日 16:30 —12 月 2 日 02:09	160 秒	$1.2 \times 10^{-4} - 3.1 \times 10^{-3}$
	80	7.1			
	140	8.3			
	280	10.6			
	320	10.9			

三、低频水平风速湍流能谱的垂直分布

为了获得较宽频率范围内的能谱分布曲线,并减少计算时间,我们按表 1 中列出的三个不同的取样间隔和取样时间计算的能谱相接而成。

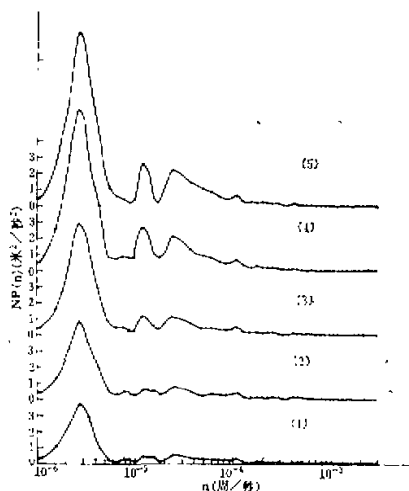


图 1 气象塔层内低频水平风速湍流能谱的垂直分布

(1)47 米, (2)80 米, (3)140 米,
(4)280 米, (5)320 米

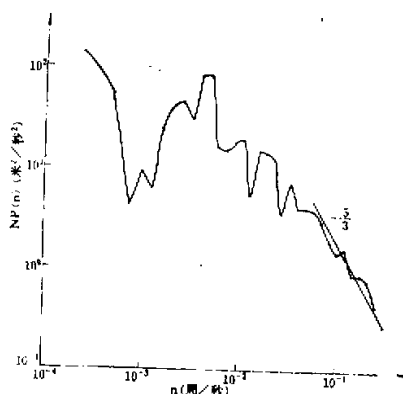


图 2 超声风速仪测量的水平风速能谱分布

(1981 年 12 月 1 日 17:10—
18:18, $z = 47$ 米)

水平风速 u 的功率谱可以由下式表示:

$$\overline{u'^2} = \int_0^\infty P_u(n) dn = \int_0^\infty n P_u(n) d \ln n \quad (1)$$

式中 n 是频率, $P_u(n)$ 是水平风速 u 的湍流能量密度, $\overline{u'^2}$ 是水平风速的脉动能量。用 FFT 方法计算了 $P_u(n)$ 。图 1 中给出了气象塔层内 47、80、140、280 和 320 米五个高度上水平风速湍流能谱 $nP_u(n) \sim \ln n$ 的垂直分布图。

由图 1 看出, 在 2.7×10^{-6} 、 1.2×10^{-5} 和 2.4×10^{-5} (周/秒) 三个频率上存在着能量的峰值, 在 1.1×10^{-4} 和 4.2×10^{-4} (周/秒) 频率上有较小的起伏。频率为 2.7×10^{-6} 周/秒对应的涡旋时间尺度约为 4 天, 这表明在我们分析的资料中, 存在着 4 天周期的天气过程, 这与 Van der Hoven 和 Fiedler^[3,5] 等人得到的结果类似。注意到在气象塔的 47、80、140、280 和 320 米高度上, 这种天气尺度的能量分别为 3.74、4.84、6.91、10.02 和 10.86 米²/秒³, 即能量随着高度的增加而明显增加。这说明天气尺度的涡旋能量来源于上层, 由于湍流作用向下层输送, 下层水平风速的湍流能量由于受到地面摩擦力的作用而减小。与 Van der Hoven 和 Fiedler 在相应高度上的天气尺度的涡旋能量相比较, 我们计算的水平风速湍流能量值比他们的大 1 倍左右。这可能是我们的水平风速资料是在北京

冬季比较大的水平风速下取得的。在 1.2×10^{-3} 和 2.4×10^{-3} 周/秒的两个频率上,在塔层范围内的几个高度上都存在着明显的峰值,相应的时间尺度分别为 1 天和半天,这可能与温度场的日变化有关,因为它可以使局地地形引起的环流有相应的变化。在塔层内,这些周期的涡旋能量随高度增加而增大,但它们在各个高度上的能量只有周期为 4 天的天气尺度涡旋能量在相应高度上的四分之一左右。大于 7.0×10^{-3} 周/秒的较高频段范围,塔层内水平风速的湍流能量相对较小,这就相应于通常称为“谱间隙”区。值得注意的是,在 1.1×10^{-4} 周/秒和 4.2×10^{-4} 周/秒存在着小的峰值,虽然,这种频率的峰值能量比天气尺度的峰值能量小一个数量级左右,实际上这种中尺度涡旋的能量仍然是与某些天气过程或某些特定的条件相联系的。下面我们将对此作进一步分析。

由于风杯风速仪的惯性较大,频响效应差,不能测量风速的脉动量。为此,我们分析了超声风速仪的测量结果。图 2 是 1981 年 12 月 1 日 17:10—18:18 在气象塔的 47 米高度上超声风速仪测量得到的水平风速能谱分布。采样时间间隔为 2 秒,水平平均风速为 6.5 米/秒。由图可见,在惯性副区上,水平风速的湍能密度 $P(n)$ 随频率的 $-\frac{5}{3}$ 次幂变化,这与柯尔莫哥洛夫关于局地各向同性湍流相似理论的分析结果一致。由于仪器的限制,在相应的观测时段内,未能同时在塔层其他高度上进行超声风速仪的测量。值得注意的是, Van der Hoven 得出的 125 米高度上的水平风速高频谱($n \approx 0.017$ 周/秒)的最大值达 $3.1 \text{ 米}^2/\text{秒}^2$,比本文在 47 米高度上得到的相应高频谱上的水平风速湍能大一个数量级左右,其原因除了取样高度不同的因素外,可能由于 Van der Hoven 的结果是在有飑风条件下得到的,关于这一点 Goldman^[6] 等人也作过讨论。许多作者^[8-11] 对高频湍流能量谱的分析表明,水平风速湍能谱的最大值小于 Van der Hoven 给出的结果。

四、不同天气条件下中尺度水平风速湍流能谱特征

(一) 冬季寒潮大风期间中尺度水平风速湍流能谱特征

我们分析了一次北京地区冬季寒潮大风的天气过程。1981 年 11 月 30 日 16:30—12 月 2 日 02:00,从气象塔的水平风速观测资料看出,在上述时段内冷锋过境期间,有两次西北大风浪涌,时间分别是 11 月 30 日 19:00—12 月 1 日 06:00 和 12 月 1 日 12:30—2 日 02:00。在两次大风期间有一段风速较小的“缓和区”,我们分别计算了大风期间以及“缓和区”的水平风速能谱。

1981 年 12 月 1 日 05:00—11:00 这段时期处在二次大风期间的“缓和区”,从水平风速湍流能谱的垂直分布(图略)可以看出,水平风速的湍流能量在塔层范围内均较小,其能量的最大值小于 $0.05 \text{ 米}^2/\text{秒}^2$,在我们所分析的频谱区上分布比较均匀。在 47 米、80 米、140 米三个高度上的湍能明显大于 280 米和 320 米上的能量,如表 2 中计算的该时段五个高度上水平风速湍流能量分别为 0.169, 0.143, 0.127, 0.051 和 $0.046 (\text{米}^2/\text{秒}^2)$,即随高度的增加而减少,140 米以上的能量比低层的约小三倍以上。其原因与该时段内边界层大气中的温度垂直分布有关。如图 3(b) 所示,在 140 米高度附近,存在着一个厚度约 50 米的稳定层。计算得到,140 米高度上的理查孙数 Ri 为 1.87,80 米和 280 米高度上的 Ri 分

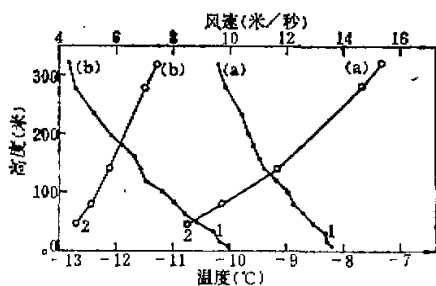


图3 水平风速和温度廓线

(a) 1981年11月30日21:30—12月1日03:30

(b) 1981年12月1日05:00—11:00

(1) 温度, (2) 平均风速

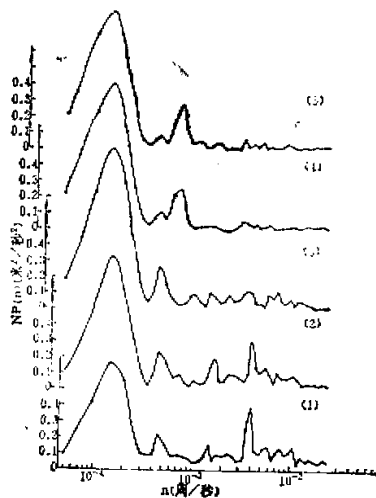


图4 寒潮大风条件下水平风速湍谱的分布

(1981年11月30日21:30—12月1日03:30)

(1) 47米, (2) 80米, (3) 140米, (4) 280米,

(5) 320米

别是一0.35和-2.82。这意味着稳定层抑制了湍流能量的垂直输送,因此,在稳定层下部的水平风速湍流能量值较大。

此外,我们计算了寒潮大风期间的水平风速湍流能谱。图4给出1981年11月30日21:30—12月1日03:30寒潮大风的能谱分布。与前述“缓和区”的特征明显不同的是水平风速的湍能在各个频段上的分布很不均匀,并具有以下几个含能峰区:

1. 主要的含能峰值频率是在 1.5×10^{-4} 周/秒, 相应于涡旋的时间尺度为2小时左右。该含能区在塔层的五个高度上都存在, 与47米、80米、140米、280米和320米五个高度相应的能量分别为0.66, 0.83, 1.03, 0.87和0.91 $\text{米}^2/\text{秒}^3$ 。这种中尺度湍流能量来源于大尺度天气系统, 从图3(a)可以看出, 塔层的风切变很大, 湍流的垂直交换较强。表2的计算表明, 该时段各个高度上的湍流总能量的垂直分布比较均匀。事实上, 该含能峰区与图1中频率为 1.1×10^{-4} 周/秒的含能峰区是对应的, 只是由于采样时间的不同, 峰值频率略有差异。需要指出, 这一中尺度含能峰区的能量比4天周期天气尺度的含能峰区大致相差一个量级。

2. 第二个含能峰区频率为 4.5×10^{-4} 周/秒, 周期约为35分钟, 其水平尺度相当于二十多公里。图1中对应于这一频率也存在一个小的峰值。在280米和320米高度上, 在 7×10^{-4} 周/秒的频率附近也有峰值。估计这种尺度的涡旋运动与北京地区西北山区局地地形有关。

3. 在47米和80米高度上还存在着 4×10^{-3} 周/秒频率上的湍能峰值, 其水平尺度为几公里, 这可能与当地下垫面的起伏有关。

为了便于了解边界层大气中水平风速的湍流能量的垂直分布特征, 我们计算了五个

表 2 气象塔五个高度上的水平风速湍流特征表

时 间	高度(米)	平均风速 (米/秒)	湍流能量 (米 ² /秒 ²)				湍流强度
			$4.9 \times 10^{-5} - 2 \times 10^{-4}$ (周/秒)	$2.0 \times 10^{-4} - 1.0 \times 10^{-3}$ (周/秒)	$1.0 \times 10^{-3} - 2.4 \times 10^{-2}$ (周/秒)	总能量	
1981 年 11 月 30 日 21:30—12 月 1 日 03:30	47	8.5	0.659	0.166	0.315	1.140	0.134
	80	9.7	0.805	0.159	0.256	1.220	0.126
	140	11.6	1.190	0.200	0.190	1.580	0.136
	280	14.8	0.970	0.160	0.070	1.200	0.081
	320	15.3	0.938	0.162	0.090	1.190	0.078
1981 年 12 月 1 日 05:00—11:00	47	4.6	0.059	0.034	0.076	0.169	0.031
	80	5.1	0.048	0.035	0.060	0.143	0.028
	140	5.7	0.039	0.032	0.056	0.127	0.022
	280	7.0	0.024	0.012	0.015	0.051	0.007
	320	7.4	0.019	0.008	0.019	0.046	0.006

高度上不同频段范围内的湍流能量和总能量以及湍流强度值,其结果也列于表 2。

由表 2 可见,寒潮大风时,边界层大气中的水平风速湍流能量主要集中在 $4.9 \times 10^{-5} - 2 \times 10^{-4}$ 周/秒的频段上,其能量来源于大尺度天气系统,从上层往低层输送。在两次大风浪涌的小风速区,水平风速的湍流能量比大风时小几倍至一个数量级。从图 1 和图 4 的分析中表明,在通常称为“谱间隙”区,同样存在着含能峰区,虽然,中尺度含能峰区的能量比天气尺度含能峰区的能量小得多,但是这种中尺度湍流活动仍然是十分活跃的,并且与天气过程等有着密切联系。

(二) 夏季雷暴期中尺度水平风速湍流能谱特征

我们选取 1982 年 8 月 16 日 00:00—17 日 00:09 资料作为雷暴天气过程的例子。8 月 16 日 05:25—09:00 出现雷暴天气,降水量约 23 毫米。图 5 是 1982 年 8 月 16 日 02:00—08:00 的塔层内五个高度上水平风速的湍能谱曲线图。由图 5 可以看到,塔层内水平风速湍流能谱的垂直分布是比较复杂的。图 6 是对应于图 5 中时间的塔层内水平风速和温度廓线图,从图 6 也可以看出,这时的边界层结构也很复杂。在塔的低层的二、三十米和中部的 100 米至 120 米分别有两层逆温层,风速廓线也出现多个拐点。

图 5 的水平风速谱显示,在雷暴天气过程中,存在着不同尺度的大气运动。在低于 1×10^{-3} 周/秒频率范围内,存在三个峰值频率。峰值频率 1×10^{-4} 周/秒存在于 140 米、280 米和 320 米高度上,这峰值频率相应于涡旋时间尺度为 2.8 小时。在高度 47 米、80 米、140 米高度上出现峰值频率 3.5×10^{-4} 周/秒,其对应的涡旋时间尺度为 47.6 分钟。相应于涡旋时间尺度为 23.2 分钟的峰值频率 7.2×10^{-4} 周/秒在 47 米、80 米、140 米、280 米和 320 米五个高度上都出现。在频率大于 1×10^{-3} 周/秒的高频部分,各层有不同尺度的湍流。这种水平风速的能谱垂直分布特征主要决定于雷暴本身的特点和边界层的风场和温度场结构,也可能与北京西北郊的山区地形和城市的动力与热力作用所引起的局地环流有关。

从表 3 所列出的计算结果可看出,这次雷暴过程塔层内水平风速的湍能在各频区上的分布也是比较复杂的。47 米和 80 米高度上 $4.9 \times 10^{-5} - 2.0 \times 10^{-4}$ 周/秒频段上的湍

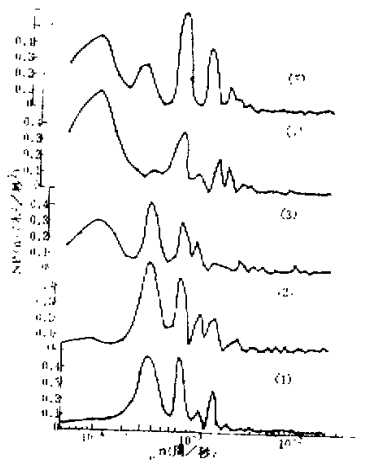


图5 1982年8月16日02:00—08:00
气象塔层内水平风速能谱的垂直分布
(1)47米, (2)80米, (3)140米, (4)280米,
(5)320米

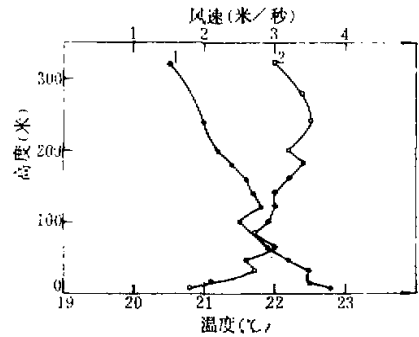


图6 1982年8月16日02:00—08:00 气象
塔层内水平风速和温度廓线图
(1)温度, (2)平均风速

表3 气象塔五个高度上的水平风速湍流特征表

时 间	高度(米)	平均风速 (米/秒)	湍流能量(米 ² /秒 ³)				湍流强度
			$4.9 \times 10^{-7} - 2.0 \times 10^{-6}$ (周/秒)	$2.0 \times 10^{-6} - 1.0 \times 10^{-5}$ (周/秒)	$1.0 \times 10^{-5} - 2.4 \times 10^{-5}$ (周/秒)	总能量	
1982年8月16日 02:00—08:00	47	2.4	0.125	0.404	0.122	0.651	0.270
	80	2.9	0.101	0.456	0.168	0.725	0.250
	140	2.8	0.335	0.302	0.088	0.725	0.259
	280	3.1	0.637	0.231	0.118	0.986	0.318
	320	2.6	0.471	0.332	0.161	0.954	0.367

能小于 $2.0 \times 10^{-4} - 1.0 \times 10^{-3}$ 周/秒频段上的湍能,而在140米、280米和320米高度上的情况却与之相反。这现象与图5的水平风速的能谱分布也是相适应的。另外还可以看到,在塔层范围内,这次雷暴期的水平风速湍流的总能量和平均湍流强度都是随高度增大而增加的。

五、结 束 语

从上述分析结果可以看出,大气边界层水平风速低频谱的垂直分布是很复杂的。在不同的天气条件下,这种垂直分布特征具有明显的差异。边界层温度和风速的垂直结构也会影响到水平风速低频谱的垂直分布。

在水平风速低频谱中,除了与天气过程有关的4天周期峰值和反映气象要素日变化频率的峰值外,在十几分钟到几十分钟频率范围内还存在着几个峰值,而且有时在不同高

度上,峰值频率有所不同。这可能反映了一些中尺度系统的特征,也可能是这些中尺度系统与局地地形的综合作用所引起的。

参 考 文 献

- [1] Fujita, T., Newstein, H., and Tepper, M., 1956, Mesoanalysis—an important scale in the analysis of weather data, U. S. Weather Bureau, Research Paper, No. 39.
- [2] Tepper, M., 1959, Mesometeorology—the link between macro-scale atmospheric motions and local weather, *Bull. Am. Met. Soc.*, 40, 56—72.
- [3] Fiedler, F., and Panofsky, H. A., 1970, Atmospheric scales and spectral gaps, *Bull. Am. Met. Soc.*, 51, 1114—1119.
- [4] Panofsky, H. A., 1955, Meteorological applications of power-spectrum analysis, *Bull. Am. Met. Soc.*, 36, 163—166.
- [5] Van der Hoven, J., 1957, Power spectrum of horizontal wind speed in the frequency range from 0.0007 to 900 cycles per hour, *J. Met.*, 14, 160—164.
- [6] Atkinson, B. W., 1981, *Mesoscale Atmospheric Circulations*, Academic Press, New York, 495 pp.
- [7] Колесникова, В. Н., Монин, А. С. 1965, Спектрах Колебаний метеорологических полей, Физика атмосферы и океана, № 7.
- [8] Caughey, S. J., and Readings, C. J., 1975, An observation of wave and turbulence in the Earth's Boundary Layer, *Boundary-Layer Meteorology*, 9, 279—286.
- [9] Kaimal, J. C., Eversole, R. A., Lenschow, D. H., Stankov, B. B., Kahn, P. H., and Businger, J. A., 1982, Spectra characteristics of the convective Boundary Layer over Kneven Terrain, *J. Atmos. Sci.*, 39, 1098—1114.
- [10] Kaimal, J. C., 1973, Turbulence spectra, Length Scale, and structure Parameters in the Stable Surface Layer, *Boundary Layer Meteorol.* 4, 289—309.
- [11] Lu Naiping, Neff, D. W., and Kaimal, J. C., 1983, Wave and turbulence structure in a disturbed nocturnal inversion, *Boundary Layer Met.* 26, 141—155.
- [12] 吕乃平、范锡安等, 1979, 边界层大气湍流特征的声雷达探测, 气象学报, Vol. 37, No. 3.
- [13] 李兴生等, 1984, 大气边界层强风结构的研究, 科学通报, 第 14 期.
- [14] 李兴生等, 1981, 320 米气象塔的自动遥测系统, 气象学报, 39, 70—81.
- [15] 王立治、章小平等, 1985, 城郊近地层大气湍流特征的初步研究, 大气科学, Vol. 9, No. 1.
- [16] Goldman, J. L., The power spectrum in the atmosphere below macroscale, Institute of storm research, University of St. Thomas, Houston, Texas.

THE CHARACTERISTICS OF VERTICAL DISTRIBUTION OF LOW-FREQUENCY SPECTRA FOR HORIZONTAL WIND VELOCITY IN THE ATMOSPHERIC BOUNDARY LAYER

Zhang Xiaoping Lu Naiping Zhou Mingyu

(Institute of Atmospheric Physics, Academia Sinica)

Abstract

The characteristics of turbulent wide-range spectra and the structures of vertical distribution in the atmospheric boundary layer under different weather conditions are analyzed in this paper by means of processing the data of horizontal wind velocity observed on the 320 m meteorological tower.

The results show that the vertical distribution of low-frequency spectra in the atmospheric boundary layer is quite complicated. Under different weather conditions, these characteristics of vertical distribution are obviously different. The vertical structures of temperature and wind in the boundary layer also have an effect on the vertical distribution of low-frequency spectra of horizontal wind velocity.

Except the energy maxima corresponding to a 4-day cycle related to the synoptic course and those reflecting the diurnal variation frequency of meteorological elements, there are several energy maxima, which are sometimes present at different levels with different corresponding frequencies, in the frequency ranging from more than ten minutes to several ten minutes in the low-frequency spectra of horizontal wind velocity. This fact probably reflects the characteristics of meso-scale system or results from the comprehensive action of meso-scale system and local terrain.

勘 误 表

对本刊11卷1期作下列勘误:

页	误	正
33 图2的纵坐标单位	$np_{(u)}(m^2/s^2)$	$p_{(u)}(m^2/s^2)$