

寒潮冷锋过境期间湍流特征量及其谱分析*

沃 鹏 张霁琛

(北京大学地球物理系, 北京 100871)

摘 要 利用两台超声风速温度仪于1992年12月至1993年1月间, 在中国科学院大气物理研究所气象观测塔47 m和120 m两个高度观测到的风速三个正交分量以及温度的湍流脉动资料, 计算分析寒潮冷锋过境时局地湍流特征量的日变化以及风速分量和温度的归一化湍流能谱。它们都在不同程度上反应出较大尺度湍流的特征。

关键词 寒潮 中尺度湍流 湍流能谱

1 引言

大气湍流结构与大气边界层的热力和动力状况有关, 而对湍流进行谱分析也是了解湍流结构的一种有效方法。由于寒潮冷锋是东亚地区冬季季风气候的一个重要特征, 多年来对于其物理过程和中短期预报研究已经取得了许多成果, 但从微气象学角度对寒潮冷锋过境过程物理特性的研究尚不多见。对于寒潮冷锋过境这一天气状况, 虽然气象要素变化显著, 但处于较大风速条件的近中性条件下, 单纯考虑其一般频谱特性将会忽略许多重要的信息。因此, 对这种天气条件下的湍流特征量的研究和谱分析方面的一些特殊处理, 也许能展示出它的某些特殊信息。

本文对寒潮冷锋过境时风速、温度脉动资料进行处理, 主要目的是为了研究这一特定天气条件下的湍流谱结构、湍流特征尺度和稳定度参数之间的关系。

2 资料状况

1992年12月到1993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气象塔联合组织了冷锋过境时的大气湍流观测, 利用当时在气象观测塔47 m和120 m高度所安装的日本海上电机生产DAT-300-TR-61C型超声风速温度仪测得的两层三分量风速和温度脉动资料(采样频率16 Hz), 着重处理了1992年12月29日16:00至31日16:00之间48 h的资料, 因为这一时段包含一个寒潮冷锋过境的过程。寒潮冷锋过境期间(30日04:00至30日22:00)降温达6~7°C, 最大风速达13 m/s, 且风向为西北风(寒潮过境后又转为东北风), 如图1所示。

文献[1]为1986年在同样地点上湍流观测结果, 在此用来作为主要的对照参考。

1998-01-07收到, 1998-03-27收到修改稿

* 国家自然科学基金资助项目 49170297

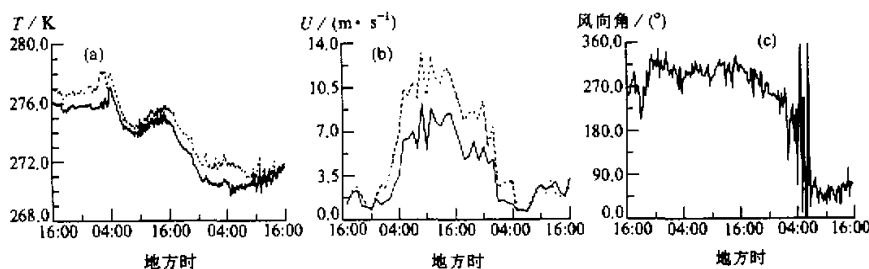


图1 大气湍流观测 (a) 温度曲线; (b) 风速变化曲线; (c) 风向角变化曲线
实线代表 47 m 的高度; 点线代表 120 m 的高度

3 数据处理方法

(1) 读取 u 、 v 、 w 、 T 数据, 剔除野点, 野点标准为

$$|dx(i)| \geq 2 \cdot \sigma_{x(i)}, \quad (1)$$

其中, $dx(i) = x(i) - \overline{x(i)}$, $\overline{x(i)} = \sum_{i=1}^n x(i) / n$, $\sigma_{x(i)} = \sqrt{\sum_{j=i-(n-1)/2}^{i+(n-1)/2} dx(j)^2 / n}$, 本文中 $n=31$ 。

(2) 以多项式展开系数为权重, 对数据进行平滑处理。

(3) 利用最小二乘法进行多次项回归, 从而得到 w 、 T 的变化趋势以及风速模量 $\overline{U} = \sqrt{u^2 + v^2}$ 和风向角 $\alpha = \arctan(u/v)$ 变化趋势。

(4) 由原始 w 、 T 资料去除趋势, 从而得到脉动量 w' 、 T' 。

(5) 将 $\overline{U}$ 和 α 变化趋势做为主导风向和风速, 把 u 、 v 数据向主导风方向投影, 得到主导风方向的 u' 、 v' 。

(6) 由以上得到的 u' 、 v' 、 w' 、 T' 求得局地摩擦速度 u_* 和温度特征尺度 T_* , 进而求得局地 Obukhov 长度尺度 L

$$u_* = (u'^2 w'^2 + v'^2 w'^2)^{1/4}, \quad (2)$$

$$T_* = -\overline{T'w'} / u_*, \quad (3)$$

$$L = -\frac{u_*^3}{k_a \frac{g}{T} \overline{w'T'}}, \quad (4)$$

$$\zeta = (z - d) / L. \quad (5)$$

(7) 将 u' 、 v' 、 w' 、 T' 分别乘以下面的钟型窗口函数滤波, 得

$$y = \begin{cases} \sin^2(5\pi i / n), & i \leq 0.1n, \\ 1, & 0.1n < i < 0.9n, \\ \sin^2(5\pi i / n), & i \geq 0.9n, \end{cases} \quad (6)$$

其中, n 为 FFT 的数据个数。

(8) 对滤波后的 u', v', w', T' 做 FFT, 求得其能谱密度。

(9) 利用下面通行的湍流特征量分别归一化 u 谱、 v 谱、 w 谱、 T 谱, 得

$$ns_u(n)/u_*^2 \varphi_\varepsilon^{2/3}, \quad (7)$$

$$ns_v(n)/u_*^2 \varphi_\varepsilon^{2/3}, \quad (8)$$

$$ns_w(n)/u_*^2 \varphi_\varepsilon^{2/3}, \quad (9)$$

$$ns_T(n)/T_*^2 \varphi_h \varphi_\varepsilon^{-1/3}. \quad (10)$$

在第三步去倾中, 针对处理资料的长短, 可以选择多次项的系数。本文处理 1 h 的湍流资料时, 考虑到天气系统在 1 h 内不会有太大的变化, 选用二次项回归; 而处理 15 h 的湍流资料时, 考虑到在这一时间尺度内, 需要比较细致地去除日变化趋势, 故选用三次项回归。

4 分析结果与讨论

通过对 29 日 16:00 至 31 日 16:00 之间 48 h 的稳定度参数变化规律的分析, 由图 2a 可以明显发现, 寒潮冷锋期间 (30 日 04:00 至 30 日 22:00) 稳定度参数趋近于零, 结果是, 此间 ζ 不论是白天、夜晚始终保持为小于零的负值, 说明在较强冷平流的情况下, 导致较暖的下垫面始终维持一个向上输送的感热通量。图 2a 中, 120 m 的 ζ 在寒潮冷锋过境前后有很大跳动, 但是在寒潮冷锋过境期间, ζ 仍然为接近于零偏负值的近中性情况。从图 2b 中还可看出寒潮冷锋过境期间的另一特征: φ_ε 值在此期间小于 1。这一结果与 Kaimal 的公式结果相差较大, 为此有必要分析湍流动能收支方程。

$$\frac{\partial \bar{\varepsilon}}{\partial t} = \underbrace{\frac{g}{\theta_v} (\overline{w'\theta_v'})}_{\text{I}} - \underbrace{\overline{u'w'} \frac{\partial \bar{U}}{\partial z}}_{\text{II}} - \underbrace{\frac{\partial (\overline{w'e})}{\partial z}}_{\text{III}} - \underbrace{\frac{1}{\rho} \frac{\partial (\overline{w'p'})}{\partial z}}_{\text{IV}} - \underbrace{\varepsilon}_{\text{V}} \quad \text{VI}$$

式中, 第 I 项代表湍流动能的局部存储或变化倾向, 第 II 项是浮力产生或消耗项, 第 III 项是机械或切变的产生或损失项, 第 IV 项代表湍流动能的湍流输送, 第 V 项是描述湍流动能的气压相关项, 第 VI 项代表耗散项。通常情况下, IV、V 两项的贡献在 17% 左右^[2], 湍流动能方程中仅考虑了 II、III、VI 三项。归一化的方程可简化为 $\varphi_\varepsilon = \varphi_m - \zeta$ 。从该公式推断, φ_ε 仅在近中性略偏不稳定时略小于 1; 不稳定时由于湍能的增强将大于 1; 而在稳定条件下, 由于涡的高切变条件, φ_ε 也将大于 1。根据 Kaimal 实验结果, φ_ε 在中性等于 1, 在不稳定和稳定时均大于 1^[3]。但本文的结果, φ_ε 值在寒潮入侵期间明显低于 1。而在寒潮冷锋过境这一大尺度过程中, IV、V 两项在方程中的作用, 即湍能在垂直方向再分配以及通过压力脉动项在各个方向上的相互转换作用不可忽略, 导致耗散项比重降低, 归一化的 φ_ε 会小于 1。由于这两项的测量精度始终没有能很好地解决, 从而在学术界是一大争论焦点。

寒潮冷锋过境期间的另一湍流特征量 u_* 在寒潮冷锋过境期间的变化趋势如图 3a 所示, 伴随着寒潮冷锋过境 u_* 也相应增加, 且随寒潮冷锋过境后 u_* 减小。但 47 m 与

120 m 之间的 u ，有较大的差别，超过了边界层内 u ，随高度的变化率。估计其原因可能是：(1) 上下两层气流处在不同下垫面所控制的边界层内；(2) 受到比较大尺度的湍流动量贡献的影响，这种影响也随高度变化，但本文取了相同的时段长度计算 u 的数值；(3) 垂直气流对 u 的影响。

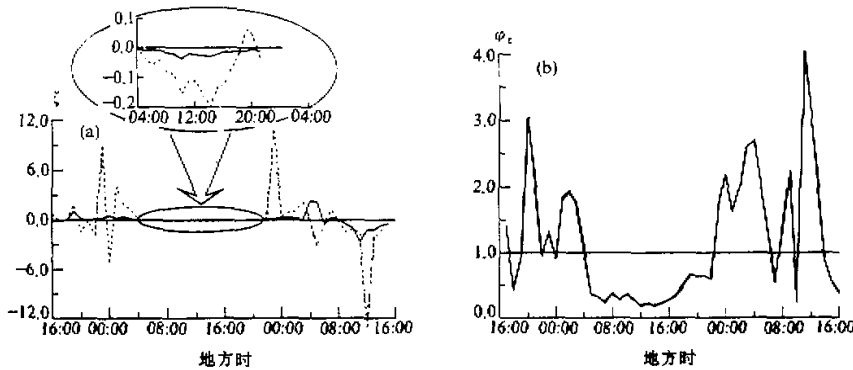


图2 ζ 及 ϕ_e 随时间变化曲线图
(a) 中的实线代表 47 m 的高度，点线代表 120 m 的高度

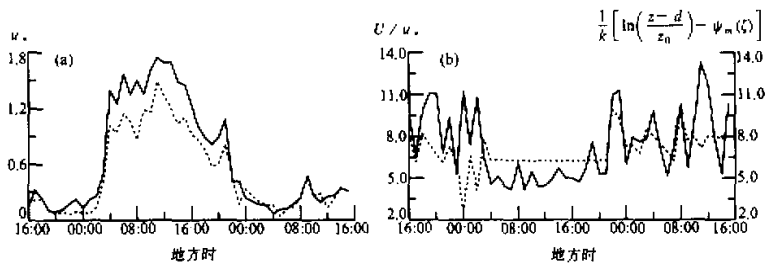


图3 u 、 U/u 和 $1/k[\ln((z-d)/z_0) + \psi_m(\zeta)]$ 随时间变化曲线
(a) 中实线代表 47 m 的 u 值，点线代表 120 m 的 u 值；(b) 中实线代表 U/u 值，点线代表 $1/k[\ln((z-d)/z_0) + \psi_m(\zeta)]$ 值

由近地面层的风速廓线公式为

$$\frac{U}{u_*} = \frac{1}{k} \left[\ln \left(\frac{z-d}{z_0} \right) + \psi_m(\zeta) \right]. \quad (11)$$

由上式可知，当下垫面的粗糙度值“ z_0 ”以及零值位移“ d ”保持不变时，固定高度上的 $1/k[\ln((z-d)/z_0) + \psi_m(\zeta)]$ 应为一定值。因此，当 d 和 z_0 一定时 U/u_* 的值还需考虑稳定度的影响。根据张宏升博士论文^[4]的结果，其 d 和 z_0 值结果如表 1。图 3b 给出实测的 U/u_* 值，以及利用 (11) 式右边代入 d 和 z_0 值求得的 U/u_* 值，对比两者的结果还是比较一致的。表 1 中唯一值得关注的数值为偏西 (292.5 度) 方向的数值。此时气流走向恰好沿东西向较宽的街道，其 d 和 z_0 值较低是相当合理的。

表 1 z_0 、 d 与风向角的关系

风向角 / ($^{\circ}$)	22.5	67.5	112.5	157.5	202.5	247.5	292.5	337.5
z_0 / m	0.90	0.61	0.80	1.05	0.80	0.50	0.20	1.10
d / m	7.5	10.0	12.0	13.0	12.5	7.5	0.5	8.0

图 4 是寒潮冷锋前、中、后期 1 h 的 u 、 v 、 w 、 T 谱。由图 4 可以看出, 风速的三分量谱, 无论是寒潮冷锋前后, 高频段始终满足 $-2/3$ 次方, 而低频端的斜率接近于 $1^{[3,5]}$; 而寒潮冷锋入境期间同寒潮冷锋入侵之前的谱相比, 低频能量明显地提高, 且谱的惯性副区也明显地往低频延伸。另外, 温度谱的高频段具有上翘的异常现象, 在其他的文献中亦有发现^[4,6], 这是由于超声风速温度仪的测温灵敏度不够以及白噪声干扰所致^[1]。由超声风速温度仪测温原理可知, 空气湿度和水平风速影响超声风速仪对温度的测量, 需要进行相应的误差订正, 尤其是在近中性条件下^[4]。由图 4 还可看出, 速度谱的谱线差异主要集中在低频段, 这因为寒潮是一大尺度系统, 谱分析的尺度偏小则无法显示其大尺度湍流脉动特征。

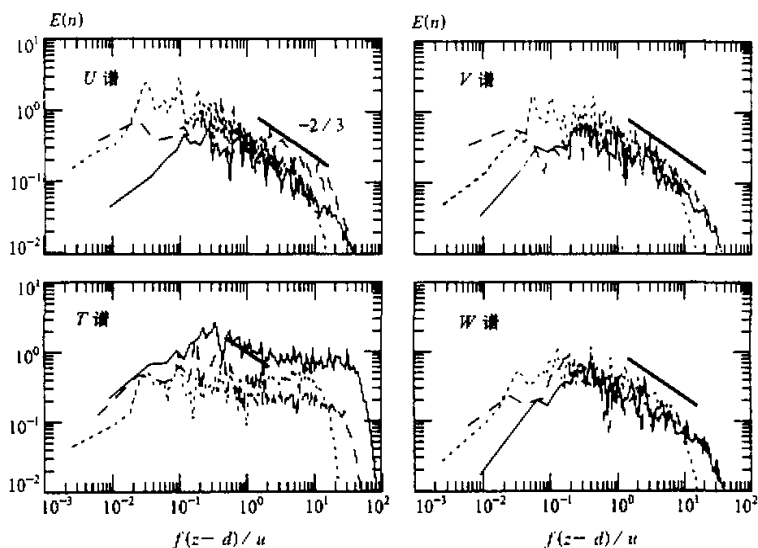


图 4 1 h 的 u 、 v 、 w 、 T 谱, 图中纵坐标 $E(n)$ 的归一化因子为 (3~9) 中的各式
实线代表 29 日 17:00; 点线代表 30 日 12:00; 长虚线代表 31 日 15:00

由图 1 可知, 这次寒潮冷锋的时间尺度大约为一天, 为了突出低频特征, 显示整个寒潮冷锋过境过程的谱线变化规律, 本文计算了其低频谱, 如图 5 所示。数据长度取 15 h, 并将原 16 Hz 的采集频率按每隔 800 个数据取样一次。取样时, 将相邻 7 个点取三角窗权重进行平均。这样, 新的数据取样频率为 0.02 Hz, FFT 的数据个数取为 1 024。由于 15 h 的跨度, 大气湍流的各种特征量, 特别是惯用于频谱的纵坐标无量纲化特征量, 如 u_* 、 φ_ϵ , 以及稳定度因子 ζ 有较明显的起伏。故而谱密度的归一化

因子采用了方差 σ^2 。通过对风速分量和温度脉动量的谱分析可以发现:寒潮冷锋入侵期间(谱线 2)同寒潮冷锋入侵之前(谱线 1)的谱相比,低频能量有明显地提高;而在寒潮冷锋过境之后(谱线 3),大尺度的低频能量,其跨越的尺度范围明显变窄,说明由平均运动输入湍流的能量限制在较低的尺度范围内。图 5 中的谱线 4 是寒潮冷锋过境三天后的谱,看得出,此时的谱与寒潮冷锋过境前后期的谱均无重大差异,说明谱线 2 是寒潮冷锋过境所特有的。图中的结果证实,在大尺度天气系统之下,通过雷诺应力做功,平均运动在低频段较宽的区域内获取了湍流能量。

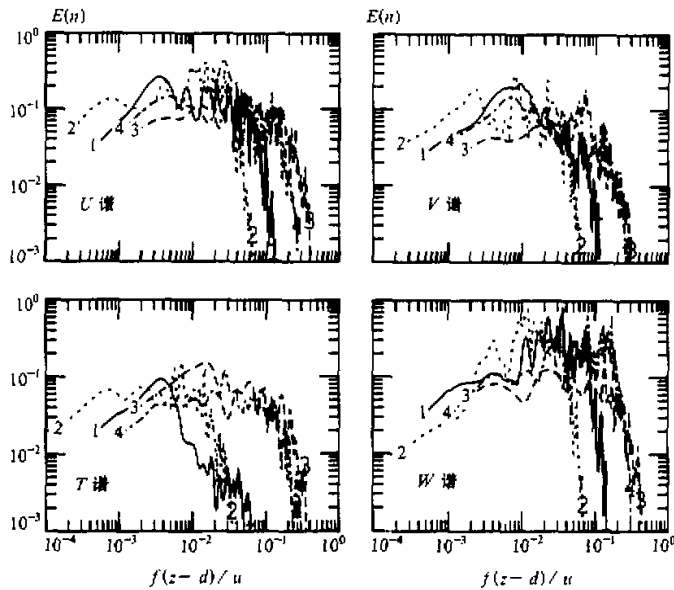


图 5 寒潮冷锋过境前、中、后期的 u 、 v 、 w 、 T 谱

纵坐标 $E(n) = n s_\theta(n) / \sigma_\theta^2$, 其中 θ 分别代表 u 、 v 、 w 、 T

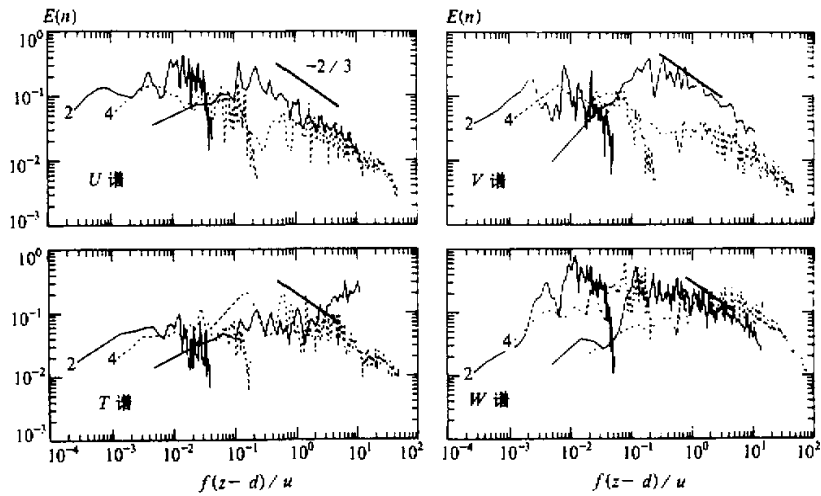
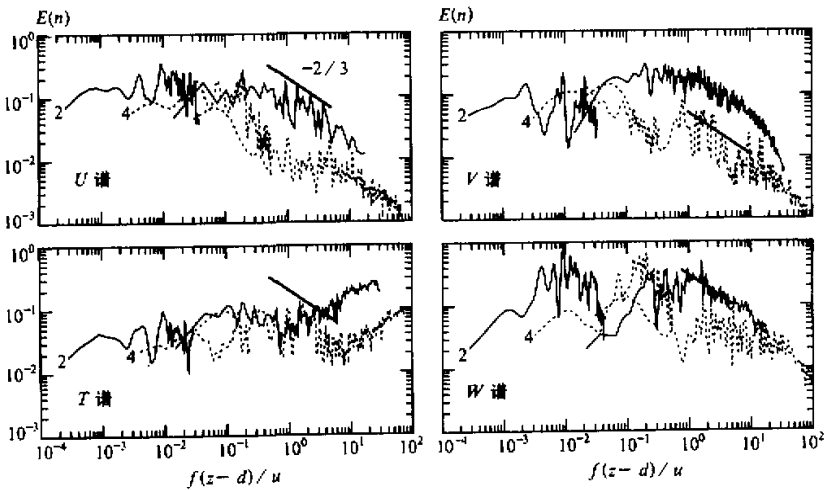
实线代表 12 月 29 日 17:00~12 月 30 日 07:00 期间的谱; 点线代表 12 月 30 日

03:00~12 月 30 日 17:00 期间的谱; 长虚线代表 12 月 30 日 21:00~12 月 31 日

11:00 期间的谱; 点划线代表 01 月 01 日 17:00~01 月 02 日 07:00 期间的谱

从湍流能量的分析可知, 雷诺应力在水平风剪切条件下做功, 产生的湍流能量将主要体现在水平方向, 而受浮力作功影响产生的湍能 will 主要输入到垂直方向, 再经过湍能扩散项和压力脉动项向其他方向实施再分配。另外, 在比较接近地面的高度, z 的制约作用也限制了 w 方向大尺度脉动的发展。图 5 中的 w 和 T 谱明确地说明了这一点。

为了对寒潮冷锋过境过程中的低频和高频谱线有一个全面了解, 图 6、图 7 分别给出了 47 m 和 120 m 两层高度上, 将两个频段的谱线拼接起来后的谱型(归一化因子为方差, 为了突出寒潮冷锋与正常天气条件下的谱线差异, 仅给出了两根谱线)。可以更清晰地看出寒潮冷锋过境期间的整根谱线相对正常天气条件的谱线向低频方向移动, 比较幸运的结果是, 47 m 的温度谱高频段在正常天气条件下得到较为理想的结果。一方

图 6 47 m 的寒潮冷锋过境与三天后正常天气条件下宽频带 u 、 v 、 w 、 T 谱图中纵坐标 $E(n) = ns_\theta(n) / \sigma_\theta^2$, 其中 θ 分别代表 u 、 v 、 w 、 T 图 7 120 m 的寒潮冷锋过境与三天后正常天气条件下宽频带 u 、 v 、 w 、 T 谱图中纵坐标 $E(n) = ns_\theta(n) / \sigma_\theta^2$, 其中 θ 分别代表 u 、 v 、 w 、 T

面, 这组资料受到了较低的噪音干扰; 另一方面, 非常接近中性的温度谱, 其 T_z 值趋近于零, 无量纲归一化时可得到近于无穷大值, 温度谱的计算在中性条件下, 对 T_z 和 σ_T 的计算精度的要求将高于其他有层结的天气条件, 在 ζ 值非常接近于零值时, 其温度谱的计算和无量纲化是一个有待进一步探讨的问题。同时段 120 m 的温度谱仍然没能得到较好的结果。

5 结论

通过寒潮冷锋入境期间及正常天气条件下,对 u 、 v 、 w 、 T 的低、高频谱的分别比较及宽频带的 u 、 v 、 w 、 T 谱整体分析,结合此期间湍流特征量的变化规律,可以得出如下结论:

(1) 寒潮冷锋入境期间,天气状况为近中性偏向不稳定层结($\zeta \rightarrow 0$), u 值在寒潮冷锋过境期间则明显高于寒潮冷锋过境前后期。

(2) 在寒潮冷锋过境期间,湍流能量的再分配作用不同于一般状况下可以忽略,耗散项的比重减弱导致 φ_z 将小于1。

(3) 在寒潮冷锋过境期间,谱曲线的低频段能量明显增加,频率区间跨度加大,其惯性区也往低频段有一定的延伸。

(4) 在寒潮冷锋过境期间,仍可从谱曲线中分析得到经典的惯性区间。

(5) 由于 w 谱受高度尺度的限制,以及雷诺应力做功对湍流能量的贡献倾向于首先输入水平方向,低频段的湍流交换仅在水平方向表现得明显。

参 考 文 献

- 1 张霄琛、吕杰、张兵、刘树华, 1991, 北京市郊区及城区边缘的大气湍流结构特征, 大气科学, 15(4), 87~96.
- 2 Frenzen, P. and C. A. Vogel, 1992, The Turbulent Kinetic Energy Budget in The Atmospheric Surface Layer: A Review and An Experimental Reexamination in The Field, *Boundary-Layer Meteor.*, 60, 49~76.
- 3 Kaimal, J. C., J. C. Wyngaard, Y. Izumi and O. R. Cote, 1972, Spectral Characteristics of Surface Layer Turbulence, *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 98, 563~589.
- 4 张宏升, 1995, 近地面层湍流输送观测仪器和方法研究, 北京大学博士学位论文.
- 5 Panofsky, H. A., 1969, Spectral of Atmospheric Variables in the Boundary Layer, *Radio. Sci.*, 4, 1101~1109.
- 6 苏红兵、洪钟祥, 1994, 北京城郊近地层湍流实验观测, 大气科学, 18(6), 739~750.

Analysis of Turbulent Characteristics and Spectrum during the Cold Wave

Wo Peng and Zhang Aichen

(Department of Geophysics, Peking University, Beijing 100871)

Abstract Based upon the data of three orthogonal wind velocity components and temperature with two ultrasonic anemometer/thermometers at the height of 47 m and 120 m of the IAP Meteorological Tower, this paper calculates and analyses the diurnal variations of turbulent characteristics and the normalized spectrum of the wind velocity components and temperature during the cold front weather. They play specified large-scale turbulence characteristics.

Key words cold wave meso-scale turbulence turbulent spectrum