

在 EBEX-2000 实验资料中湍流耗散率、长度尺度和结构参数特征

刘树华^{1, 3} 刘和平¹ 李 洁¹ 梁福明¹ 王建华¹

Johnny C. L. CHAN² Andrew Y. S. CHENG² 胡 非³ 刘辉志³

1 北京大学物理学院大气科学系, 教育部暴雨与旱涝灾害实验室大气边界层和湍流研究组, 北京 100871

2 香港城市大学物理和材料科学系大气科学研究组, 香港九龙

3 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 采用 2000 年 8 月在美国加州棉花地两个高度上应用超声三分量仪、快速响应温度和湿度仪进行的 EBEX-2000 (International Energy Balance Experiment, 2000, 简称 EBEX-2000) 风速三分量、温度和湿度湍流实验观测数据, 计算分析了在不同稳定度下的湍流能量和热量耗散率和湍流结构参数特征。并与 Kansas 和长白山原始森林湍流实验得到的结果进行了比较, 得到了一些湍流特征量在不同下垫面情况下的一些有意义的特征。

关键词 EBEX-2000 (International Energy Balance Experiment, 2000) 湍流能量耗散率 湍流热量耗散率 湍流结构参数

文章编号 1006-9895(2005) 03-0475-07

中图分类号 P452

文献标识码 A

Characteristics of Turbulence Dissipation Rates, Characteristic Length Scales and Structure Parameters in EBEX-2000

LIU Shu-Hua^{1, 3}, LIU He-Ping¹, LI Jie¹, LIANG Fu-Ming¹, WANG Jian-Hua¹,
Johnny C. L. CHAN², Andrew Y. S. CHENG², HU Fei³, and LIU Hui-Zhi³

1 *Group of Atmospheric Boundary Layer and Turbulence, Ministry Laboratory of Storm and Drought / Flood Damages, Department of Atmospheric Sciences, School of Physics, Peking University, Beijing 100871*

2 *Department of Physics and Materials Science, City University of Hong Kong, Kowloon, Hong Kong*

3 *State Key Laboratory of Atmospheric Boundary Layer Physics and Atmospheric Chemistry, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029*

Abstract Three velocity components, temperature and humidity are measured by using three-dimensional sonic anemometers, krypton hygrometer and fast thermometers at two levels above a cotton field in California, U. S. A. in August 2000 (International Energy Balance Experiment, EBEX-2000). Turbulence characteristic length scales for momentum and heat, turbulence momentum and heat dissipation rates and turbulence structure parameters are calculated and analyzed under different stability, and discussed and compared with Kansas Experiment and Changbai Mountains Experiment results.

Key words EBEX-2000 (International Energy Balance Experiment, 2000), turbulence momentum and heat dissipation rate, turbulence characteristic length scales for momentum and heat, turbulence structure parameter

收稿日期 2003-12-19, 2004-02-03 收修定稿

资助项目 国家自然科学基金资助项目 40275004, 香港城市大学战略研究基金 8780046、7001038 和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基金项目

作者简介 刘树华, 男, 1952 年出生, 教授, 博士生导师, 从事大气边界层物理和大气湍流研究。E-mail: lshuhua@pku.edu.cn

1 引言

大气边界层 (ABL) 中的湍流运动, 不仅是地球表面与大气层之间物质、能量交换的动力, 而且在土壤圈、生物圈与大气圈的相互作用, 中小尺度大气环流、灾害性天气的形成, 空气污染物的扩散等研究中具有重要意义。另外, 在大气层的微波通讯、电磁波、声波等的传输应用研究中也尤为重要, 例如, 在大气微波遥感、声达 (Sodars), 雷达 (Radars) 和光达 (Lidar) 的传输方程中都需要给出大气边界层湍流结构参数 C_v^2 和 C_T^2 , 因此, 人们对大气边界层湍流结构参数、湍流尺度和湍流耗散率的研究尤为重视。

由于理论的复杂性和仪器观测的难度, 到目前为止, 对大气边界层湍流能量耗散率、热量耗散率和结构参数研究的深度还远远不够。早期的大气湍流观测实验主要受快速响应探测仪器和数据存储的限制, 快速响应探测设备的出现, 为探测研究湍流结构奠定了基础。1968 年, AFCRL (Air Force Cambridge Research Laboratories) 的 Kansas 实验是第一次大规模地使用快速响应探测器, 并用可移动计算机进行实时的数据处理^[1, 2], 实验得到了在平坦均一的地表情况下, 大量的风速和气温波动的完整的时间序列数据。许多科学家对 Kansas 实验的数据进行了处理和分析, 并得到了大量的具有代表性的结果, 其中包括大气边界层湍流能量耗散率、热量耗散率和结构参数^[3]。刘树华等^[4, 5]利用 1995 年 8 月至 9 月在长白山原始森林自然保护区, 使用先进的三维超声风速/温度仪进行的森林冠层上下湍流观测资料, 在研究了森林冠层空气动力学参数, 森林冠层上下不同稳定度层结条件下的湍流谱结构、局地各向同性及耗散率的基础上, 又进一步对森林冠层上的湍流长度尺度、湍流耗散率和湍流结构参数进行了计算分析, 并与著名的美国 Kansas 试验的研究结果进行了比较。

本文的目的是利用 EBEX-2000 的湍流观测资料, 计算棉花植被下垫面不同稳定度大气边界层湍流尺度、能量耗散率、热量耗散率和结构参数特征, 并与 Kansas 草原和长白山原始森林湍流实验得到的规律进行比较。

2 实验场地、观测时间及观测仪器等

实验场地、观测时间及观测仪器等详见文献 [6, 7] 的介绍。

3 方法及资料处理

3.1 湍流动量和湍流热量耗散率及特征长度的计算方法

近地面层湍流动量和湍流热量耗散率及特征长度很难直接测量。利用湍流谱方法计算湍流动量和湍流热量耗散率及特征长度, 是基于在惯性副区计算风速分量和温度的湍流谱密度的方法。根据 Kolmogorov-Obukhov 的湍流谱理论, 在惯性副区湍流能量谱密度与耗散率之间的关系得到^[8]:

$$fS_{u,v,w}(f) = a_{u,v,w}\epsilon^{2/3}\left(\frac{2\pi f}{\bar{u}}\right)^{-2/3}, \quad (1)$$

$$fS_T(f) = a_T\epsilon^{-1/3}N_T\left(\frac{2\pi f}{\bar{u}}\right)^{-2/3}, \quad (2)$$

式中, f 为湍流的自然频率; $\bar{u} = (u^2 + v^2 + w^2)^{1/2}$ 是平均风速; $a_{u,v,w}$ 和 a_T 在惯性副区为一普适常数 (Kolmogorov 常数)。因为在惯性副区内, v 和 w 分量湍流谱密度是 u 分量的 $4/3$ 倍, 由湍流各向同性理论预测, 相应的 Kolmogorov 常数也应有相同的比值。根据最近的研究, 取 $a_u = 0.51$ ^[9], $a_v = a_w = (4/3)a_u$ ^[10], $a_T = 0.8$ ^[11], ϵ 是湍流动量耗散率 (单位: $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-3}$); N_T 是湍流热量耗散率 (单位: $\text{K}^2 \cdot \text{s}^{-1}$)。

湍流动量和热量湍流的特征长度, 可应用风速分量和温度时间序列的均方差、湍流动量和湍流热量耗散率计算,

$$L_a = \frac{\sigma_a^3}{\epsilon}, \quad (3)$$

$$L_T = \frac{\sigma_T^3 \epsilon^{1/2}}{N_T^{3/2}}, \quad (4)$$

式中, L_a 和 L_T 为湍流动量和热量湍流的特征长度; σ_a 为风速分量时间序列的均方差 (单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$), σ_T 是温度时间序列的均方差 (单位: K)。具体计算步骤详见文献 [5]。

3.2 湍流结构函数参数的计算方法

在大气中, 湍流结构函数参数 C_v^2 和 C_T^2 由于对波传播的影响而受到大气科学、空间科学等学科的重视。例如, 声波在大气中的折射率的结构参数

C_n^2 是由 C_v^2 和 C_T^2 的共同影响, 而光波主要受 C_T^2 的影响。 C_T^2 与气象变量的半经验关系已由 Panofsky^[12]、Tsvany^[13] 和 Wyngaard 等^[14] 给出。对于时间序列 $D_u(\tau)$, 可用 $r=u\tau$ 转换得到 C_v^2 。

在惯性副区, 大气要素的结构函数可由大气要素的半点时间序列求得。湍流结构参数是在湍流波传播研究中描述小尺度湍流结构时被广泛应用的指标。对于风速 u 分量和温度的二阶结构函数可分别写成如下形式^[2, 15]:

$$D_u(r) = \overline{[u(x) - u(x-r)]^2} = C_v^2 r^{2/3}, \quad (5)$$

$$D_T(r) = \overline{[T(x) - T(x-r)]^2} = C_T^2 r^{2/3}, \quad (6)$$

(5), (6) 式主要反映小湍涡的特征, 可看成是各向同性的。由相关函数的 Fourier 变换导出惯性副区谱的形式^[3]为

$$fS_u(f) = 0.25C_v^2 \left(\frac{2\pi f}{\bar{u}} \right)^{-2/3}, \quad (7)$$

与(1)式比较, 取 $a_u=0.51$ ^[9], 得

$$C_v^2 = 2\epsilon^{2/3}. \quad (8)$$

一维温度谱和结构函数参数 C_T^2 的类似关系式^[3]为

$$fS_T(f) = 0.25C_T^2 \left(\frac{2\pi f}{\bar{u}} \right)^{-2/3}, \quad (9)$$

与(2)式比较, 取 $a_T=0.8$ ^[11], 得

$$C_T^2 = 3.2N_T\epsilon^{-1/3}. \quad (10)$$

根据 Monin-Obukhov 相似性理论^[14], 有

$$C_v^2 = u_*^2 z^{-2/3} f_1\left(\frac{z}{L}\right), \quad (11)$$

$$C_T^2 = T_*^2 z^{-2/3} f_2\left(\frac{z}{L}\right). \quad (12)$$

把 $\Phi_\epsilon = \epsilon k z / u_*^3$ 和 $\Phi_{N_T} = k z N_T / (u_* T_*^2)$ 带入, 结构参数 C_v^2 和 C_T^2 还可以表达成 Φ 函数的形式^[2, 16]:

$$\frac{C_v^2 z^{2/3}}{u_*^2} = 2.2k^{-2/3} \Phi_\epsilon^{2/3} = 4\Phi_\epsilon^{2/3}, \quad (13)$$

$$\frac{C_T^2 z^{2/3}}{T_*^2} = 3.2k^{-2/3} \Phi_{N_T} \Phi_\epsilon^{-1/3} = 5.9\Phi_{N_T} \Phi_\epsilon^{-1/3}. \quad (14)$$

公式(13)和(14)给出的是无量纲化湍流结构函数参数 $C_v^2 z^{2/3} / u_*^2$ 、 $C_T^2 z^{2/3} / T_*^2$ 与相似性函数 Φ_ϵ 、 Φ_{N_T} 之间的关系, 其中 k 为卡曼常数。在近地面层, Φ_ϵ 和 Φ_N 的通量廓线关系^[2]为

$$\Phi_\epsilon = \begin{cases} \left(1 + 0.5 \left| \frac{z}{L} \right|^{2/3} \right)^{3/2}, & -2 \leq \frac{z}{L} < 0 \\ 1 + \frac{5z}{L}, & 0 \leq \frac{z}{L} \leq 1 \end{cases} \quad (15)$$

$$\Phi_{N_T} \approx \Phi_h = \begin{cases} \left(1 + 16 \left| \frac{z}{L} \right| \right)^{-1/2}, & -2 \leq \frac{z}{L} < 0 \\ 1 + \frac{5z}{L}, & 0 \leq \frac{z}{L} \leq 1 \end{cases} \quad (16)$$

由此得式(11)、(12)和(13)、(14)式中 $f_1(z/L)$ 和 $f_2(z/L)$ 的函数关系^[2]为

$$\frac{C_v^2 z^{2/3}}{u_*^2} = f_1\left(\frac{z}{L}\right) = \begin{cases} 4 \left(1 + 0.5 \left| \frac{z}{L} \right| \right)^{2/3}, & \frac{z}{L} < 0, \\ 4 \left(1 + \frac{5z}{L}\right)^{2/3}, & \frac{z}{L} \geq 0, \end{cases} \quad (17)$$

$$\frac{C_T^2 z^{2/3}}{T_*^2} = f_2\left(\frac{z}{L}\right) = \begin{cases} 5 \left(1 + 6.4 \left| \frac{z}{L} \right| \right)^{-2/3}, & \frac{z}{L} < 0, \\ 5 \left(1 + \frac{3z}{L}\right), & \frac{z}{L} \geq 0. \end{cases} \quad (18)$$

4 结果分析

4.1 湍流耗散率和特征长度特征

利用湍流能谱惯性副区的值, 通过(1)式和(2)式求出湍流能耗率 ϵ 和温度脉动耗散率 N , 并进一步利用(8)式和(10)式计算出速度和温度的湍流结构函数参数 C_v^2 和 C_T^2 。为了分析湍流能耗率和结构函数参数的性质, 图 1 给出的是 8.7 m 和 2.7 m 处湍流能耗率随稳定度的变化; 图 2 是 8.7 m 和 2.7 m 处温度脉动能耗率随稳定度的变化; 图 3 是 8.7 m 处的湍流特征长度随稳定度的变化; 图 4 和图 5 是 8.7 m 和 2.7 m 处速度和温度的湍流结构函数参数 C_v^2 和 C_T^2 随稳定度的变化; 图 6 和图 7 是归一化速度和温度结构参数与稳定度的关系。

从图 1a、b 可以看出, 湍流能耗率在近中性条件下值最大, 在稳定和不安定条件下值相对较小, 而不稳定时又比稳定时的值要大。由 $\Phi_\epsilon = \epsilon k z / u_*^3$, 得 $\epsilon = \Phi_\epsilon u_*^3 / (k z)$, 我们知道 Φ_ϵ 在近中性条件下其值最小, 等于 1; 在不稳定条件下随着不稳定度的增加缓慢增加, 值在 1~2 之间; 在稳定条件下随着稳定度的增加数值增加较快, 一般在 1~10 之间。 ϵ 正比于 u_*^3 , 所以 u_*^3 对 ϵ 的变化起主导作用。因此, 虽然 Φ_ϵ 在近地面层稳定时值最大, 但由于此时 u_*^3 较小, 导致 ϵ 也在此时最小; 而在近中性条件下, 情况则恰恰相反。将图 1a 和 b 进行比较, 8.7

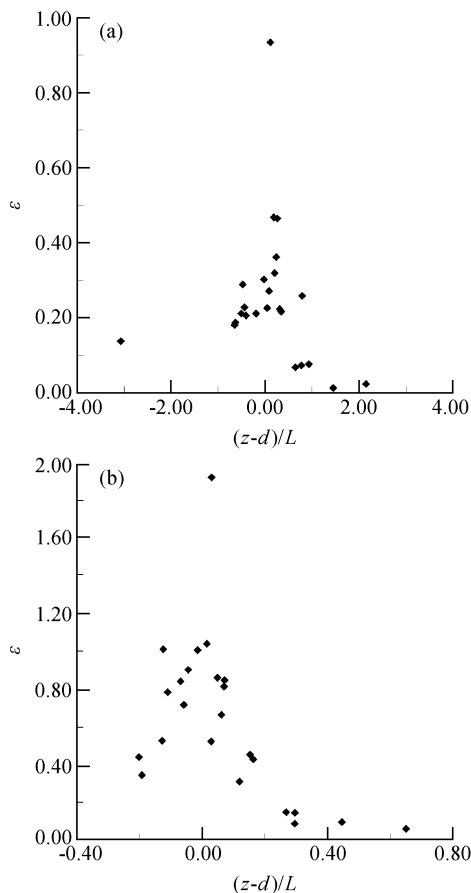


图 1 湍流能量耗散率 ϵ 随稳定度的变化: (a) 8.7 m; (b) 2.7 m. 横坐标“(z-d)/L”中的“d”是零平面位移, “L”是 Monin-Obukhov 长度

Fig. 1 Variations of turbulence energy dissipation rates ϵ with atmospheric stability: (a) 8.7 m; (b) 2.7 m

m 处的能量耗散率在各种稳定度时的值都明显小于 2.7 m 处, 这符合 ϵ 与 z 成反比的规律。另外, 虽然 2.7 m 约是 8.7 m 的三分之一, 但 2.7 m 的 ϵ 却只约为 8.7 m 处的两倍, 这是因为 2.7 m 处的 u_* 相对较小的缘故。从比较直观的角度来看, 越接近地面, 地表和植被的摩擦作用越强, 湍流能量耗散率越大。

从图 2a、b 可以看出, 温度脉动耗散率 N_T 在中性条件下值最小, 随着不稳定度的增大值在增大, 随着稳定度的增加先增大后又减小, 这一规律在 2.7 m 处的结果显示得更为清楚。由 $\Phi_{N_T} = kzN_T/(u_* T_*^2)$, 可得 $N_T = \Phi_{N_T} u_* T_*^2 / (kz)$, 对它的影响因子比 ϵ 多了一个 T_* 。 Φ_N 随稳定度的变化规律与 Φ_ϵ 相似, 假设 $\Phi_N = \Phi_h$, Φ_h 为温度普适函数^[2]。 T_* 的绝对值在边界层最不稳定时值最大,

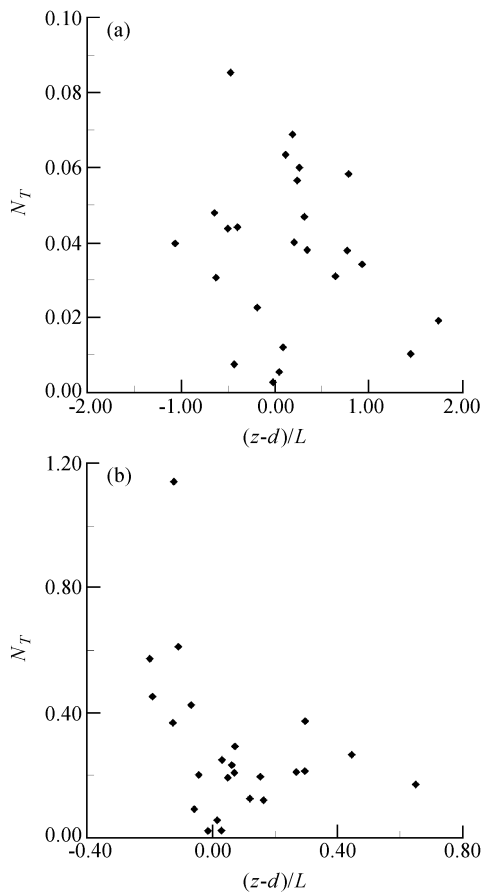


图 2 温度热量耗散率 N_T 随稳定度的变化: (a) 8.7 m; (b) 2.7 m
Fig. 2 Variations of temperature heat dissipation rates N_T with atmospheric stability: (a) 8.7 m; (b) 2.7 m

在中性和最稳定时值最小, 而且 ϵ 正比于 T_*^2 , 因此, T_* 对 N_T 的变化规律起着重要作用, 这与图 2 中的规律是一致的。将两个高度的值进行比较, 发现 2.7 m 的值要比 8.7 m 的大一个量级, 这除了一部分由 z 贡献以外, 还有一部分原因是因为 2.7 m 处的 T_* 较大。

大气中由于地形、地表特征及大气稳定度的影响, 存在着不同尺度的湍流。近地面的湍流尺度特征与地表特征和大气稳定度有关。在均匀地表下垫面近地面层, 湍流尺度较均匀, 大尺度湍流主要取决于大气运动和稳定度, 而在非均匀森林下垫面, 还受地形和森林冠层的扰动作用, 因而湍流尺度较复杂^[5]。本文计算的横向和纵向风速动量湍流长度尺度随着不稳定度的增强有减小的趋势。横向和纵向的湍流尺度大于垂直方向的湍流尺度。从图 3 (见彩图) 中可看出, 热力湍流长度尺度则是在不稳定大气中, 随着不稳定度的增强而迅速减小, 在

稳定大气中随着稳定度的增强而减小缓慢。

4.2 湍流结构调整参数特征

由(8)式可知 C_v^2 实际上就是体现 ϵ 的规律, 它随稳定度的变化规律同 ϵ 一致, 规律性更明显一些。数值上, 2.7 m 处的值约是 8.7 m 的 1.5~2 倍。从图 4a、b 可见, 湍流结构函数在中性时最大, 随着稳定度的增大而减小。

由(10)式可知 $C_T^2 \propto N_T \epsilon^{-1/3}$, 它的变化规律主要由 N_T 决定, 与 N_T 的变化规律相同, 与 ϵ 的变化规律相反。中性条件下温度结构函数参数的值最小, 随着不稳定度的增加而增大, 随着稳定度的增加而减小, 最大值出现在最不稳定的条件下。由图 5a、b 比较可见, 2.7 m 处的规律性较好, 数值上 2.7 m 的值约是 8.7 m 处的 8 倍左右, 可见随高度变小的斜率要比速度结构函数参数要大。这与 Waughy 和 Palmer 得到的结果^[17]一致。

图 6(见彩图)和图 7(见彩图)给出了本次试验

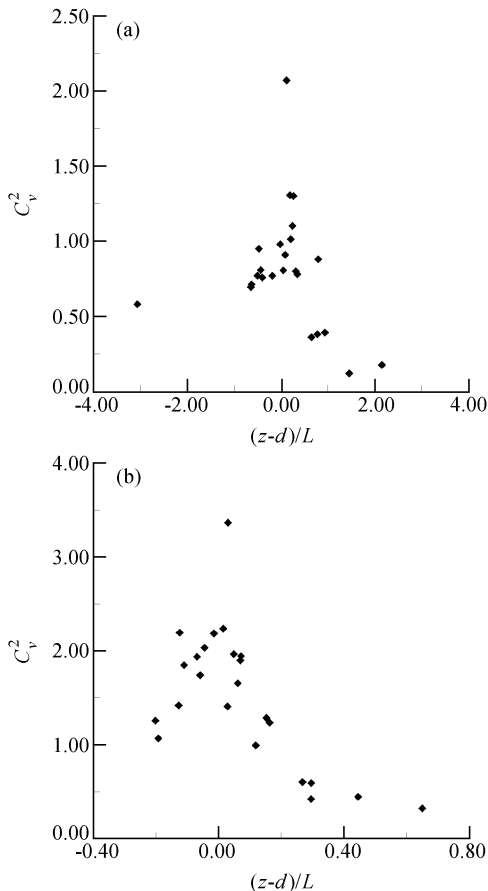


图 4 湍流结构参数 C_v^2 随稳定度的变化: (a) 8.7 m; (b) 2.7 m

Fig. 4 Variations of turbulence velocity structure parameters

C_v^2 with atmospheric stability: (a) 8.7 m; (b) 2.7 m

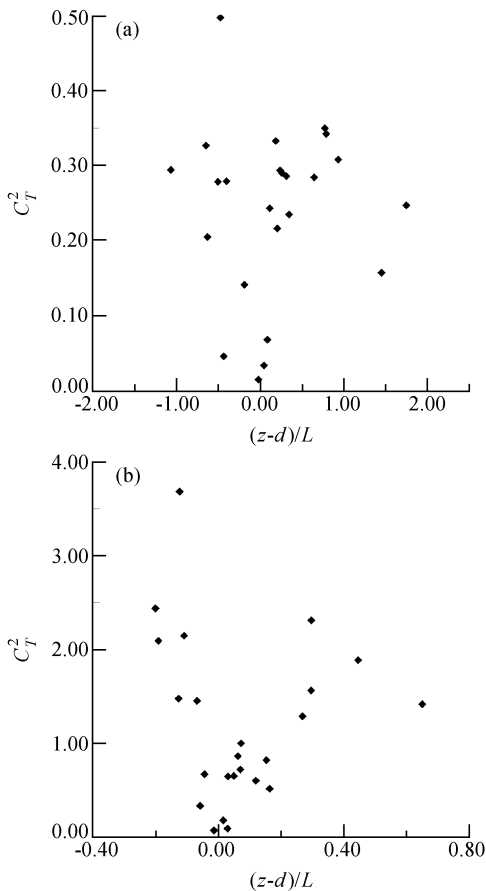


图 5 温度结构函数 C_T^2 随稳定度的变化: (a) 8.7 m; (b) 2.7 m

Fig. 5 Variations of turbulence temperature structure parameters C_T^2 with atmospheric stability: (a) 8.7 m; (b) 2.7 m

无量纲化的速度和温度结构参数 $C_v^2 \approx^{2/3} / u_*^2$ 、 $C_T^2 \approx^{2/3} / T_*^2$ 与稳定度的函数关系图, 图中实线是 Kaimal 等^[2]给出的(17)和(18)式的结果。图 6 中速度结构参数与稳定度参数的关系同文献^[2]公式的趋势是一致的, 不同的是本文得到的结果在近中性条件下的最小值稍小, 而且在不稳定条件下的变化斜率更小。图 7 中温度结构参数与稳定度参数的关系在不稳定和近中性条件下都同文献^[2]的结果吻合得较好, 稳定时本文结果的斜率显然要比 15 大。

5 结论

本文利用 EBEX-2000 的实验观测数据对湍流速度、温度耗散率、湍流尺度和结构参数进行了综合计算和分析, 得出以下结论:

(1) 湍流能耗率在近中性条件下值最大, 随着

稳定和不安定条件的增大而减小,而且越接近地面,地表和植被的摩擦作用越强,湍流能量耗散率越大。

(2) 地面的湍流尺度特征与地表特征和大气稳定度有关。在均匀地表下垫面近地面层,湍流尺度较均匀,大尺度湍流主要取决于大气运动和稳定度,横向和纵向风速动量湍流长度尺度随着不稳定度的增强有减小的趋势,横向和纵向的湍流尺度大于垂直方向的湍流尺度,热力湍流长度尺度则是在不稳定大气中,随着不稳定度的增强而迅速减小,在稳定大气中随着稳定度的增强而减小缓慢。

(3) 温度脉动耗散率 N_T 在中性条件下值最小,随着不稳定度的增大而增大,随着稳定度的增加先增大后又减小,这一规律在 2.7 m 处的结果显示得更为清楚。

(4) 湍流速度结构参数 C_z^v 实际上就是体现湍流能耗率 ϵ 的规律,它随稳定度的变化规律同 ϵ 一致,规律性更明显一些;数值上,2.7 m 处的值约是 8.7 m 的 1.5~2 倍。

(5) 温度结构参数 C_z^T 在中性条件下温度结构函数参数的值最小,随着不稳定度的增加而增大,随着稳定度的增加而减小,最大值出现在最不稳定的条件下;两个高度进行比较,2.7 m 处的规律性较好。

参考文献

- [1] Kaimal J C, Wyngaard J C. The Kansas and Minnesota experiments. *Boundary-Layer Meteor.* 1990, **50**: 31~47
- [2] Kaimal J C, Finnigan J J. *Atmospheric Boundary Layer Flows: Their Structure and Measurement*. New York: Oxford University Press, 1994. 51~53
- [3] Kaimal J C. Turbulent spectra, length scales, and structure parameters in the stable surface layer. *Bound.-Layer Meteor.*, 1973, **4**: 289~309
- [4] Liu S H, Liu H P, Xu M, et al. Turbulence spectra and dissipation rates above and within a forest canopy. *Boundary Layer Meteor.*, 2001, **98**: 83~102
- [5] 刘树华, 胡非, 刘辉志, 等. 森林冠层上湍流尺度、耗散率和湍流结构参数. 北京大学学报(自然科学版), 2003, **39**(1): 73~82
- [6] Liu Shuhua, Hu Fei, Liu Huizhi, et al. Turbulence length scales, dissipation rates and structure parameters above the forest canopy. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis* (in Chinese), 2003, **39** (1): 73~82
- [7] Li Jie, Liu S H, Liu H P, et al. Surface imbalance energy calculated and analyzed with the data of EBEX-2000. *Acta Meteorologica Sinica*, 2003, **17**: 448~464
- [8] 刘树华, 李洁, 刘和平, 等. 在 EBEX-2000 实验资料中湍流谱和局地各向同性特征. 大气科学, 2005, **29** (2): 213~224
- [9] Liu Shuhua, Li Jie, Liu Heping, et al. Characteristics of turbulence spectra and local isotropy in EBEX-2000. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 2005, **29** (2): 213~224
- [10] Champogne F H, Friehe C A, Larue J C, et al. Flux measurements, flux estimation techniques and fine-scale turbulence measurements in the unstable surface layer over land. *J. Atmos. Sci.*, 1997, **34**: 515~530
- [11] Hogstrom U. Analysis of turbulence structure in the surface layer with a modified similarity formulation for near neutral conditions. *J. Atmos. Sci.*, 1990, **47**: 1949~1972
- [12] Garratt J R. *The Atmospheric Boundary Layer*. Cambridge: Cambridge University Press, 1992, 71~84
- [13] Kaimal J C. The atmospheric boundary layer—its structure and measurement. NOAA/ERL/Wave Propagation Laboratory, 1988, 49~56
- [14] Panofsky H A. The structure constant for the index of refraction in relation to the gradient of index of refraction in the surface layer. *J. Geophys. Res.*, 1968, **73**: 6047~6049
- [15] Tsvang L R. Microstructure of temperature fields in the free atmosphere. *Radio Sci.*, 1969, **4**: 1175~1177
- [16] Wyngaard J C, Izumi Y, Collins S A. Behavior of the refractive index structure parameter near the ground. *J. Opt. Soc. Amer.*, 1971, **61**: 1646~1650
- [17] Andreas E L. Estimating C_z^v over snow and sea ice from meteorological data. *J. Opt. Soc. Amer.*, 1988, **5** (4): 481~495
- [18] Wyngaard J C. On surface layer turbulence. Workshop on Micrometeorology, Haugen D A, et al. American Meteorological Society, Boston, Mass, 1973, 101~149
- [19] Waughey S J, Palmer S G. Some aspects of turbulence structure through the depth of the convective boundary layer. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 1979, **105**: 811~827

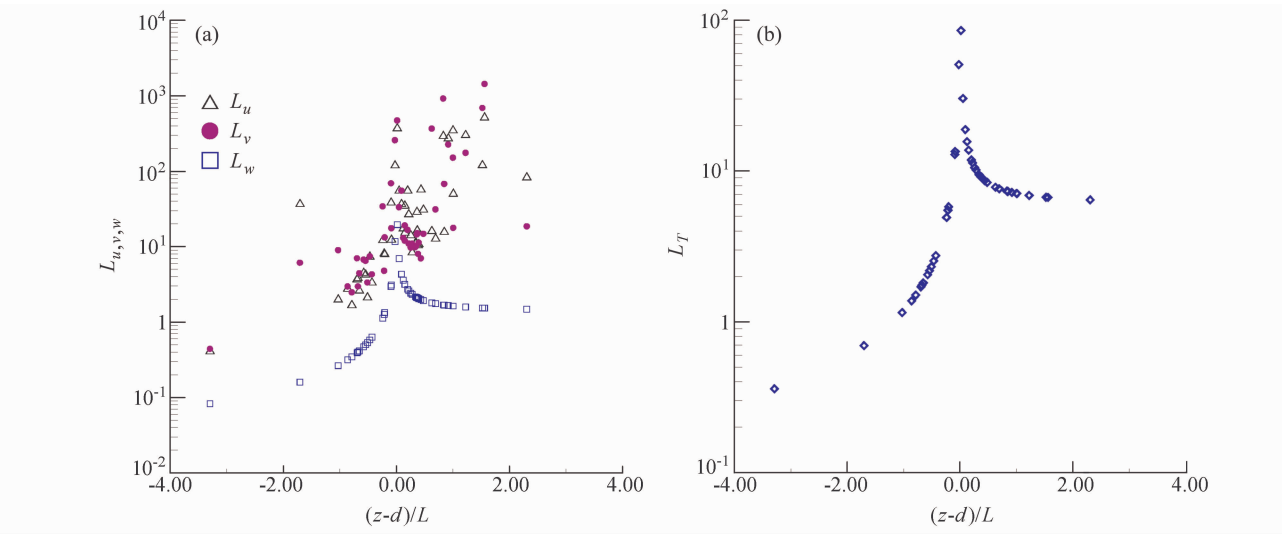


图 3 8.7 m 处湍流动量和热量特征尺度随稳定度的变化
Fig. 3 Variations of turbulence characteristic length scales for momentum and heat with atmospheric stability at 8.7 m

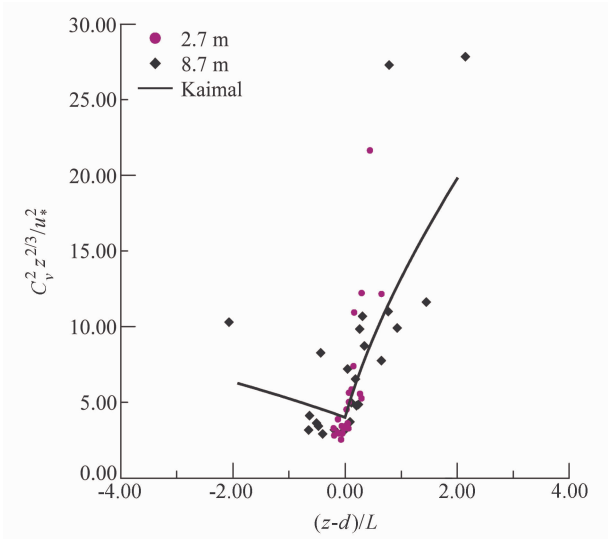


图 6 无量纲化速度结构参数与稳定度的关系
Fig. 6 Relationship of normalized turbulence velocity structure parameters with atmospheric stability

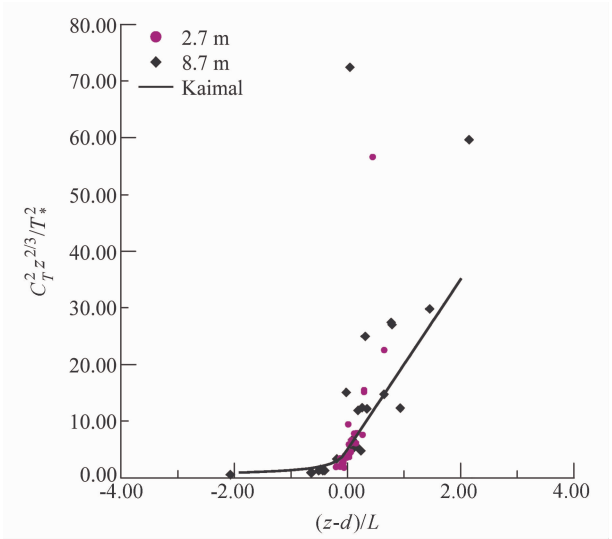


图 7 无量纲化温度结构参数与稳定度的关系
Fig. 7 Relationship of normalized temperature structure parameters with atmospheric stability