

在 EBEX-2000 实验资料中的湍流宏观量特征

刘树华^{1,3} 李 洁¹ 刘和平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实验组, 香港 九龙达之路

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) 风速三分量、温度和湿度湍流实验观测数据, 计算分析了湍流宏观量(即 u_* , T_* , σ_u/u_* , σ_v/u_* , σ_w/u_* 和 σ_T/T_* 等), 湍流动能和感热通量等的特征, 并与其他湍流实验得到的结果进行了比较。

关键词 EBEX-2000 (International Energy Balance Experiment, 2000) 湍流宏观量 湍流动能 感热通量

文章编号 1006-9895(2005) 04-0503-07

中图分类号 P425

文献标识码 A

Characteristics of Macroturbulence Variables in EBEX-2000

LIU Shu-Hua^{1,3}, LI Jie¹, LIU He-Ping¹, LIANG Fu-Ming¹, WANG Jian-Hua¹,

Johnny C. L. CHAN², Andrew Y. S. CHENG², HU Fei³, and LIU Hui-Zhi³

1 *Group of Atmosphere 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, Tat Chee Avenue 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 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). Macroturbulence variables (i. e. u_* , T_* , σ_u/u_* , σ_v/u_* , σ_w/u_* , and σ_T/T_* etc.), turbulence kinetic energy and sensible heat flux are calculated and their characters are analyzed under different stability and compared with the results of other experiments.

Key words EBEX-2000 (International Energy Balance Experiment, 2000) macroturbulence variables, turbulence kinetic energy, sensible heat flux

1 引言

大气湍流是由许多不同大小的湍涡相互叠加而成, 与大气稳定度层结、大气层动力、热力及其地

形植被扰动有着直接的关系, 对研究近地面层物质、能量的输送机制具有重要的意义。湍流宏观量、动能和感热通量等是描述大气湍流运动机理和结构的重要方法, 因此, 对其观测实验研究一直得

收稿日期 2003-12-19, 2004-02-23 收修定稿

基金项目 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

到大气科学家的重视。但是,由于它理论的复杂性和仪器观测的难度,到目前为止,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^[1]。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^[2,3]。实验得到了在平坦均一的地表(草原)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,其中包括湍流宏观量、动能和感热通量等^[4]。刘树华等^[5,6]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涡长度尺度、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条件下的湍流宏观量、动能和感热通量特征,并与Kansas草原湍流实验结果进行比较。

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[7,8]的介绍。

3 计算方法

在大气边界层中观测到的湍涡是包括不同时间和空间尺度的结构,湍流宏观量、湍流动能和通量特征是描述湍流结构的重要参数。统计学方法是研究这些湍流统计量的有利工具。通过把一系列观测资料进行统计量的计算分析,就可发现湍流统计量直接与大气运动及扩散能力有关, σ_u/u_* , σ_v/u_* , σ_w/u_* 和 σ_T/T_* 还直接反映了大气的湍流强度。

湍流宏观量的计算公式如下:

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

$$T_* = \frac{\overline{w'T'}}{u_*}, \quad (2)$$

$$q_* = \frac{\overline{w'q'}}{u_*}, \quad (3)$$

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

$$\sigma_\alpha = \left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\alpha'_i)^2 \right]^{1/2}, \quad (5)$$

$$i_\alpha = \frac{\sigma_\alpha}{u_*}, \quad (6)$$

式中, u' , v' , w' , T' 和 q' 分别为风速分量、温度和湿度的脉动值; u_* , T_* 和 q_* 分别是摩擦速度、温度尺度和湿度尺度; L 是Monin-Obukhov长度; σ_α 是变量的标准差($\alpha=u, v, w, T, q$), i_α 表示了大气湍流的强度。

4 结果分析

本文对湍流宏观量 u_* , T_* , σ_u/u_* , σ_v/u_* , σ_w/u_* 和 σ_T/T_* 等进行了计算和分析,并与其他大气湍流实验结果进行了比较。正如Monin-Obukhov相似性理论指出的那样,下垫面平坦实验场地的实验结果显示表面层的湍流结构由很少的几个关键参数决定。Monin-Obukhov相似性理论假设:各种大气参数和统计量,例如湍流宏观量、动能和通量等,都可能是稳定度参数 $(z-d)/L$ (z 为观测高度, d 为零平面位移)的函数。

图1是8.7 m和2.7 m处 u_* 和 T_* 随稳定度的变化规律,从图中可以看出 u_* 在近中性条件下值最大,随着稳定程度和不稳定程度的增加而减少,在不稳定大气边界层中随着不稳定度的增强近似线性减小;在稳定边界层中随着稳定度的增强先迅速而后缓慢地减小,近似曲线变化。风速和温度的通量廓线关系为

$$\Phi_m = \frac{kz}{u_*} \frac{\partial \bar{u}}{\partial z}, \quad (7)$$

$$\Phi_h = \frac{kz}{T_*} \frac{\partial \bar{T}}{\partial z}, \quad (8)$$

式中 Φ_m , Φ_h 为风速和温度通量廓线函数。从(7)式可得 $u_* = (kz/\Phi_m)(\partial \bar{u}/\partial z)$ 。1988年,Högström^[9]用Kansas实验与其他实验结果进行比较得到 Φ_m 的结果,显示 Φ_m 在不稳定时值最小($\Phi_m < 1$),随着层结由不稳定向近中性过渡增加缓慢,稳定时增加迅速(斜率=5)。不稳定时,虽然此时 Φ_m 最小, u_* 却并非最大,因为风速梯度很小;近中性边界层风速

梯度较大, 所以, 此时 u_* 最大; 稳定边界层中, 虽然风速梯度也很可观, 但是随着稳定度的增加 Φ_m 迅速增大, 导致 u_* 很快减小^[9]。本文两个高度上 u_* 变化规律与 Kansas 实验结果变化趋势一致, 由图 1 可见, 在大气层结不稳定时, 随着不稳定度的增加 u_* 近似线性减小; 而在大气层结稳定时, 随着稳定度的增加 u_* 先迅速减小, 然后缓慢减小, 并逐渐趋于一个常数, 近似曲线线性关系。

由图 1 可见, 两个高度上的 T_* 在不稳定边界层为负值, 随着不稳定程度的增加负值迅速增大, 然后缓慢减小, 近似曲线关系; 在稳定层结, 先增大然后缓慢减小。近中性时, T_* 约为 0; 稳定边界层中 T_* 是正值, 随着稳定度的增加先增大, 后又减小。从(8)式可得 $T_* = (kz/\Phi_h)(\partial\bar{T}/\partial z)$, 1988 年 Höglström 的结果^[9] 显示 Φ_h 变化规律和 Φ_m 相似, 只是在不稳定时略有不同(Φ_h 在层结由不稳定向近中性过渡时增加得更快一些, 即在不稳定时值比 Φ_m 稍小)。边界层不稳定时, 位温梯度为负值, 随着地面温度不断升高近地面层的位温梯度不断增大, 同时 Φ_h 的值在减小, 导致 T_* 迅速增大(负值); 近中性层结 $\partial\bar{T}/\partial z = 0$, 所以 $T_* = 0$; 层结稳定时, 近地面层 $\partial\bar{T}/\partial z > 0$, $T_* > 0$, 随着稳定度的增加位温梯度增大, 同时 Φ_h 也在增大。

图 2 是 8.7 m 和 2.7 m 两个高度处 u_* 和 T_* 的日变化特征, 从图中可以看出两个高度的变化规律和数值都相差不大, 2.7 m 处摩擦速度 u_* 略大于 8.7 m 处的值; 2.7 m 处 u_* 和 T_* 曲线相对较光滑。由图 2 可明显看出, 在两个高度上 u_* 和 T_* 存在着明显的日变化特征。

图 3 是两个高度上感热通量随稳定度的变化特征, 它的变化规律与 T_* 相似, 在大气层结稳定时, 相似性更好; 在大气层结不稳定时, 存在明显差异, 稳定度对 2.7 m 的影响明显大于 8.7 m。与图 1 比较分析可见 u_* 在不稳定情况下的随不稳定程度增加而变小的规律并没有影响到感热通量的变化规律, 因此 T_* 对感热通量的变化起着主导作用。

图 4 给出的是湍流动能(Turbulent Kinetic Energy, 用 E 表示)随稳定度的变化特征。由图 4 可见, 两个高度上的湍流动能均明显随不稳定度增加而增加。不稳定时湍流动能最大, 而且越不稳定值越大; 近中性条件下湍流动能也相对较大; 稳定

边界层中湍流动能随着稳定度的加强迅速减小, 而且 2.7 m 处的值比 8.7 m 处的值减少得更快。为了更好地比较, 图 5 给出了两个高度处湍流动能的日变化, E 的最大值约为 $1.6 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$, 出现在 13:00(北京时间, 下同)左右, 最小值约 $0.3 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$, 出现在早上 6:00 和晚上 22:00 左右。Louis 等^[10] 在 1983 年得到的 11 月湍流动能最大值约为 $1 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$, 最小值只有 $0.01 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$, 可见夏季湍流动能的变化范围要比冬季小很多。将两个高度的值进行比较可以看出 8.7 m 的 E 比 2.7 m 偏大, 这在除了凌晨以外的其他时段都比较明显。为了更清楚起见, 图 6 给出了两个高度上湍流动能比较的结果。由图 6 可见, 8.7 m 出的湍流动能比 2.7 m 处偏大 10% 左右。

图 7 是 8.7 m 和 2.7 m 处速度分量(u, v, w)无量纲标准差 σ_u/u_* , σ_v/u_* 和 σ_w/u_* 随稳定度($z-d$)/ L 的变化特征。由图 7 可见, 在 8.7 m 处 σ_u/u_* , σ_v/u_* 随稳定度变化明显, 而 σ_w/u_* 随稳定度变化没有 σ_u/u_* , σ_v/u_* 明显。 σ_u/u_* , σ_v/u_* 都是在中性条件下值最小, 随着稳定和不确定程度的增加向两边增大, 在不稳定时 σ_u/u_* 最大值达到 10, σ_v/u_* 在稳定时达到 8, 近中性时的最小值约为 2, 而 σ_w/u_* 的最小值约为 1, 而且变化范围较小, 在 $-4 < (z-d)/L < 2$ 范围内随稳定度变化明显减小。在 2.7 m 处, σ_u/u_* , σ_v/u_* 随稳定度变化较明显, 在近中性时值最小, 最小值约为 2, 随着稳定和不确定程度的增加向两边增大, 但增大量没有 8.7 m 处大, σ_w/u_* 的最小值约为 1, 随着稳定度的变化基本不变, 这可能是近地面层的湍流特征。Dyer^[11] 总结的 σ_w/u_* 与稳定度 $(z-d)/L$ 经验公式为

$$\frac{\sigma_w}{u_*} = \begin{cases} 1.25 \left(1 + 3 \left| \frac{z}{L} \right| \right)^{\frac{1}{3}}, & -2 \leq \frac{z}{L} < 0, \\ 1.25 \left(1 + 0.2 \frac{z}{L} \right), & 0 \leq \frac{z}{L} \leq 2, \end{cases} \quad (9)$$

与本实验的观测结果基本一致。

图 8 是两个高度无量纲温度标准差 σ_T/T_* 随稳定度的变化情况。由图 8 可见, 不稳定时 σ_T/T_* 小于 0, 层结越不稳定负值越小, 越接近中性负值越大; 稳定时 σ_T/T_* 随着稳定度的增加先减小后增大。由于 T_* 在近中性时接近 0, 所以 σ_T/T_* 的绝对值在此时较大。1974 年, Dyer 总结的 σ_T/T_* 的经验公式为

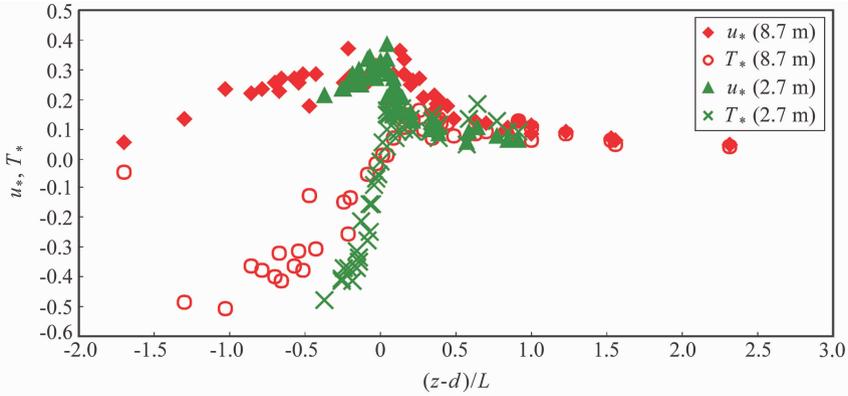


图 1 在 8.7 m 和 2.7 m 两个观测高度上 u_* (单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$) 和 T_* (单位: K) 随稳定度的变化特征

Fig. 1 Variation features of u_* (units: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$) and T_* (units: K) with atmospheric stability at 8.7 m and 2.7 m

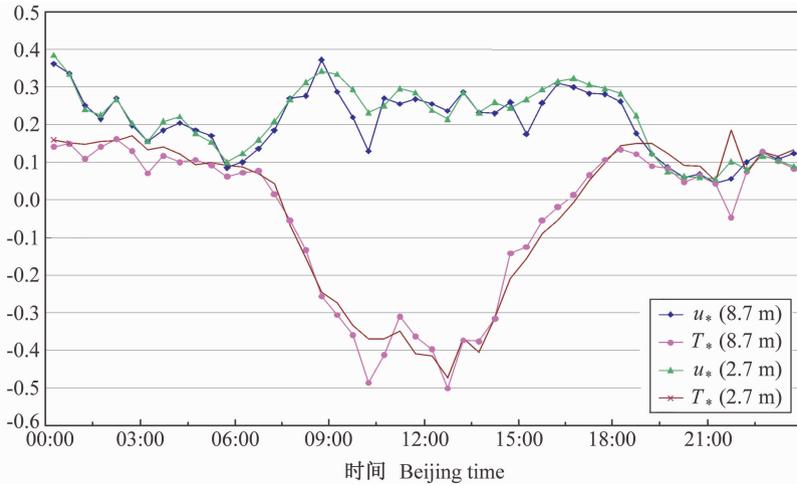


图 2 在 8.7 m 和 2.7 m 两个观测高度上摩擦速度 u_* (单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$) 和摩擦温度 T_* (单位: K) 的日变化特征

Fig. 2 Diurnal variation features of friction velocity u_* (units: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$) and friction temperature T_* (units: K) at 8.7 m and 2.7 m

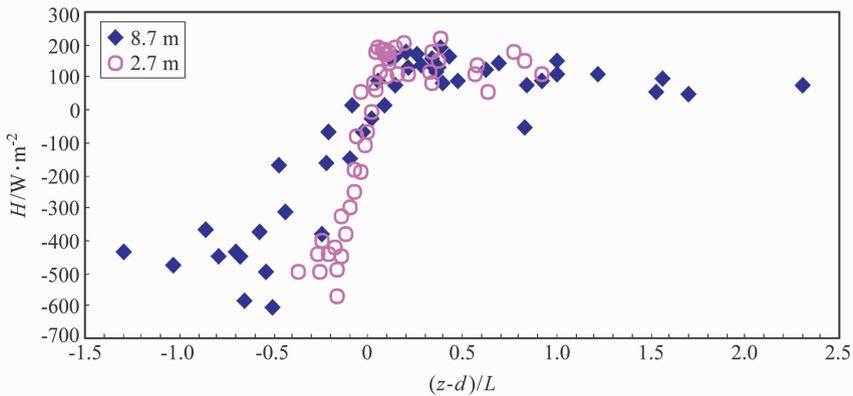


图 3 在 8.7 m 和 2.7 m 两个观测高度上感热通量 H (单位: $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$) 随稳定度的变化特征

Fig. 3 Variation features of sensible heat flux H (units: $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$) with atmospheric stability at 8.7 m and 2.7 m

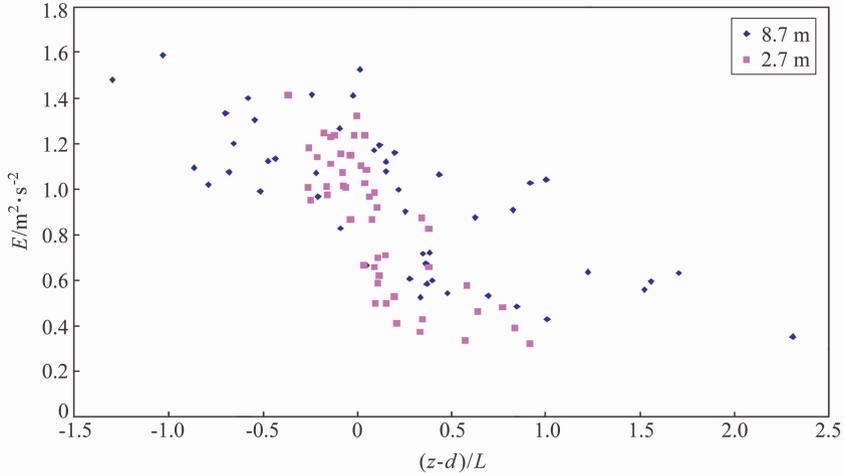


图 4 在 8.7 m 和 2.7 m 两个观测高度上湍流动能 E (单位: $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$) 随稳定度的变化特征

Fig. 4 Variation features of turbulence kinetic energy E (units: $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$) with atmospheric stability at 8.7 m and 2.7 m

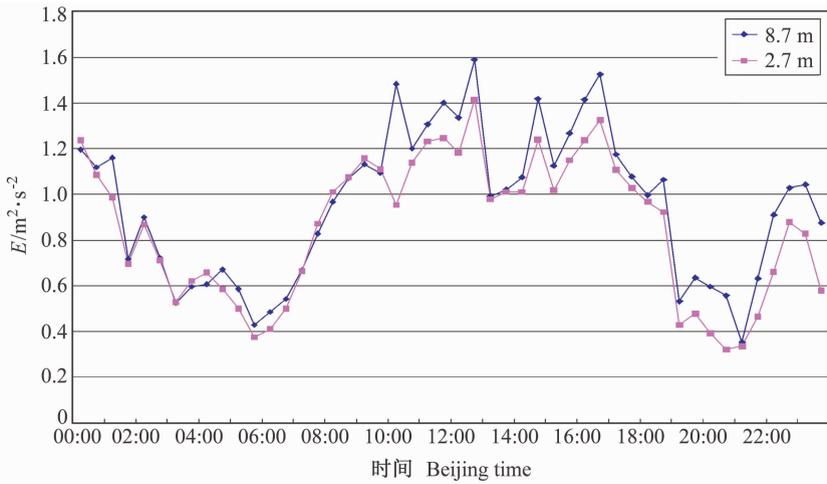


图 5 在 8.7 m 和 2.7 m 两个观测高度处湍流动能 E (单位: $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$) 的日变化特征

Fig. 5 Diurnal variation features of turbulence kinetic energy E (units: $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$) at 8.7 m and 2.7 m

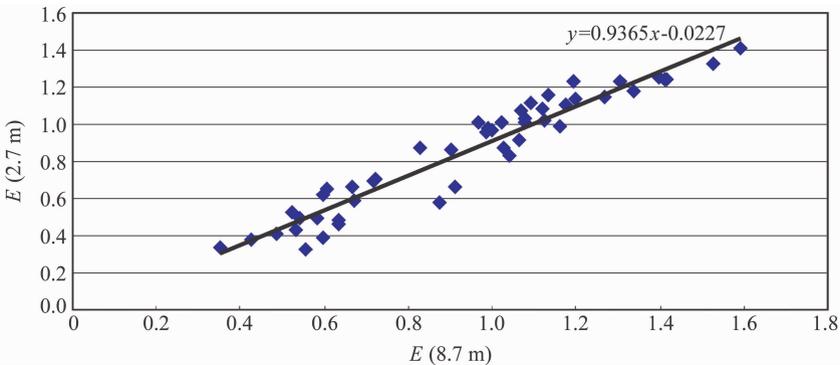


图 6 在 8.7 m 和 2.7 m 两个观测高度处湍流动能 E (单位: $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$) 的比较

Fig. 6 Comparison between turbulence kinetic energy E (units: $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$) at 8.7 m and 2.7 m

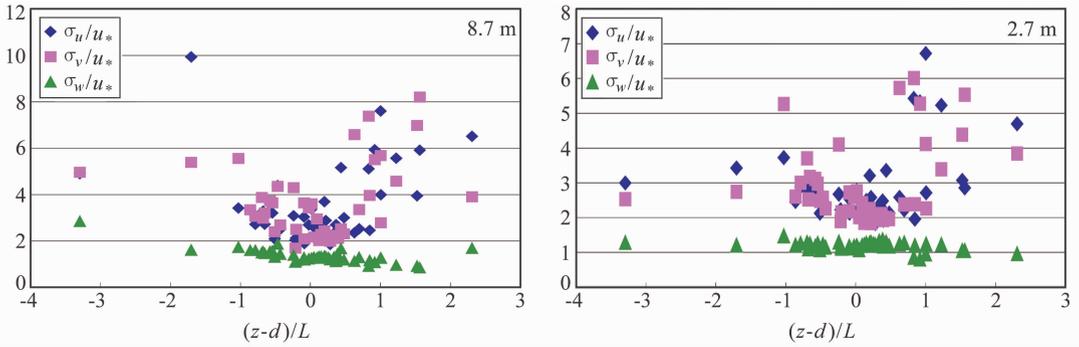


图 7 8.7 m 和 2.7 m 处 σ_u/u_* , σ_v/u_* , σ_w/u_* 随稳定度的变化特征

Fig. 7 Variation features of σ_u/u_* , σ_v/u_* , σ_w/u_* with atmospheric stability at 8.7 m and 2.7 m

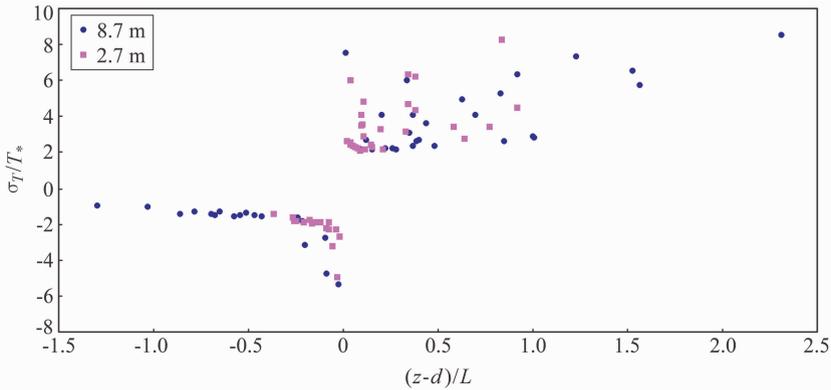


图 8 在 8.7 m 和 2.7 m 两个观测高度处 σ_T/T_* 随稳定度的变化特征

Fig. 8 Variation features of σ_T/T_* with atmospheric stability at 8.7 m and 2.7 m

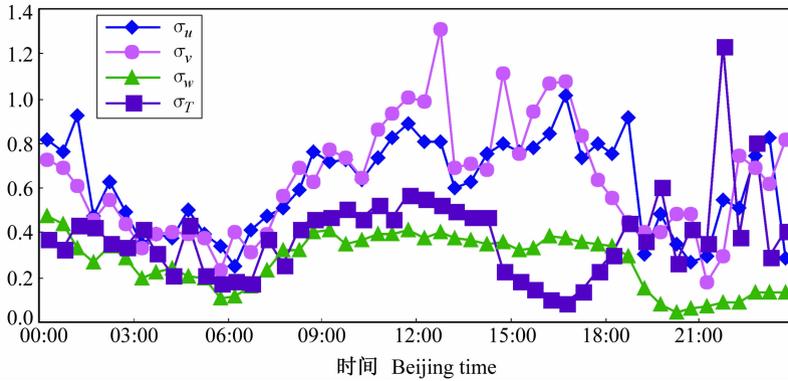


图 9 8 月 10 日 8.7 m 处 σ_u 、 σ_v 、 σ_w 和 σ_T 的日变化特征

Fig. 9 Diurnal variation features of σ_u 、 σ_v 、 σ_w and σ_T at 8.7 m on 10 Aug

$$\frac{\sigma_T}{T_*} = \begin{cases} 2\left(1 + 9.5 \left|\frac{z}{L}\right|\right)^{-\frac{1}{3}}, & -2 \leq \frac{z}{L} < 0, \\ 2\left(1 + 0.5 \frac{z}{L}\right)^{-1}, & 0 \leq \frac{z}{L} \leq 2, \end{cases} \quad (10)$$

不稳定时与本文规律较接近; 稳定时差别较大, 本文结果在强稳定条件下, σ_T/T_* 较大, 而与式(10)给出的变化规律相差较大^[3]。

为了对 σ_u 、 σ_v 、 σ_w 和 σ_T 的日变化特征有进一步的了解, 图 9 给出了 8 月 10 日晴天无云时 8.7 m 处 σ_u 、 σ_v 、 σ_w 和 σ_T 的日变化。由图 9 可看出, 宏观量日变化明显。午后到夜间 σ_v 涨落较大, σ_w 日变化曲线最光滑。

5 结论

本文利用 EBEX-2000 的实验湍流观测数据, 计算分析了 u_* 、 T_* 、 σ_u/u_* 、 σ_v/u_* 、 σ_w/u_* 和 σ_T/T_* 等湍流宏观量、湍流动能和感热通量等的日变化特征及随稳定度参数 $(z-d)/L$ 的变化规律, 并与其他湍流实验得到的规律进行了比较。计算结果能较好地反映低植被下垫面的湍流宏观量、湍流动能和感热通量特征, 并与平坦草原下垫面所得结果有较好的相似性。

参考文献(References)

[1] Högström U, Hunt J C R, Smedman A S. Theory and measurements for turbulence spectra and variances in the atmospheric neutral surface layer. *Bound.-Layer Meteor.*, 2002,

103: 101~124
 [2] Kaimal J C, Wyngaard J C. The Kansas and Minnesota experiments. *Bound.-Layer Meteor.*, 1990, **50**: 31~47
 [3] Kaimal J C, Finnigan J J. *Atmospheric Boundary Layer Flows*. New York: Oxford University Press, 1994. 1~65
 [4] Kaimal J C. Turbulence spectra, length scales, and structure parameters in the stable surface layer. *Bound.-Layer Meteor.*, 1973, **4**: 289~309
 [5] Liu S H, Liu H P, Xu M, et al. Turbulence spectra and dissipation rates above and within a forest canopy. *Bound.-Layer Meteor.*, 2001, **98**: 83~102
 [6] 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
 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] 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): 213~225
 Liu Shuhua, Li Jie, Liu Heping, et al. Characteristics of turbulence spectra and local isotropy in EBEX-2000. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 2005, **29** (2): 213~225.
 [8] Li Jie, Liu Shuhua, Liu Heping, et al. Surface imbalance energy calculated and analyzed with the data of EBEX-2000. *Acta Meteorologica Sinica*, 2003, **17**: 448~464
 [9] Högström U. Nondimensional wind and temperature profiles. *Bound.-Layer Meteor.*, 1988, **42**: 55~78
 [10] Louis J F, Weil A, Vidal-Madjar D. Dissipation length in stable layers. *Bound.-Layer Meteor.*, 1983, **25**: 229~243
 [11] Dyer A J. A review of flux profile relationships. *Bound.-Layer Meteor.*, 1974, **7**: 363~372