

城市边界层动量和保守物通量的特征

全利红 胡非

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 利用2005年1~5月北京325 m气象塔47 m高度的湍流脉动资料(风速、温度、水汽和CO₂),对城市边界层冠层内的湍流运动统计特征(相似关系、高阶矩、通量和谱等)进行了分析。其中,谱分析的结果表明,城市冠层内稳定度对湍流谱的影响比较小,而水平风速的影响比较大。因此,速度和温度的相似关系在夜间稳定条件下也成立。但是,由于水汽和CO₂还受其他因素的影响,相似关系并不适用。更高阶矩的研究表明它们的陡峭度与偏斜度之间存在平方关系。而水汽和CO₂之间也存在差异,它们的通量日变化特征明显不同,CO₂通量的日变化更能体现人类活动的影响。同时,感热通量、潜热通量和CO₂通量存在季节变化,尤其是潜热通量季节差异很大。

关键词 城市边界层 湍流 保守物 通量

文章编号 1006-9585 (2007) 01-0029-08 **中图分类号** P404 **文献标识码** A

Characteristics of Momentum and Scalar Flux in the Urban Boundary Layer

QUAN Li-Hong and HU Fei

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

Abstract Turbulent statistics (normalized standard deviations, higher order moments, fluxes and spectra and co-spectra) in the urban boundary layer are analyzed with data collected from the Beijing 325 m meteorological tower from January to May, 2005. Characteristics of spectra and cospectra indicate little influence of stability and more influence of horizontal wind speed on turbulent spectra. Therefore, the similarity relationships of velocity components and temperature is suitable for stable conditions. However, the similarity theory seems not to be fit for water vapor and carbon dioxide for they are affected by other factors. There are square relationships between their kurtosis and skewness. Furthermore, as for daily fluxes, carbon dioxide is different from water vapor, and daily carbon dioxide fluxes reflect the influence of human behavior. Furthermore, sensible heat fluxes, latent heat fluxes and carbon dioxide fluxes change with season. In particular, variance of latent heat fluxes can be very significant.

Key words urban boundary layer, turbulence, scalar, flux

1 引言

城市边界层结构,特别是其湍流运动特性,对于研究城市大气环境和城市下垫面条件下的地

气相互作用等是十分重要的。像北京这样的大城市,近几年发展迅速,城市建设扩张不仅改变了下垫面的性质,空气污染问题也日益严重。而下垫面的变化通过湍流运动影响近地层大气,污染物的扩散也要通过湍流输送来实现,因此城市边

收稿日期 2005-09-30 收到, 2006-10-30 收到修定稿

资助项目 国家自然科学基金资助项目 40233030 和北京城市气象科学研究基金 UMRF200509

作者简介 全利红,女,1980年出生,博士研究生,主要从事大气边界层物理和大气湍流研究。E-mail: qlh@mail.lapc.ac.cn

界层湍流研究是非常必要的。

位于北京市北三环路北的北京 325 m 气象塔多年来在 3 个高度 (47、120 和 280 m) 上进行超声风温仪观测, 提供了丰富的风场和温度场的湍流脉动资料。这些资料用于研究城市边界层的结构特征、湍流运动特征^[1~7] 以及湍流机理^[8~11]。其中, 47 m 高度的湍流脉动资料受城市冠层的影响显著, 较好地反应了城市冠层内湍流运动特征。但是, 受实验条件的限制, 没有对水汽和 CO₂ 等标量的湍流脉动特征的研究。过去人们一直认为水汽的湍流运动与温度类似, 而对 CO₂ 的湍流运动却很少关注。实际上, 保守标量除了自身运动 (如扩散、浮力强迫上升等) 以外, 还受速度场的影响 (湍流混合、平流输送等), 因此, 他们的统计性质和动力学性质与速度场并不完全一致 (例如非高斯分布和相干结构), 比较复杂^[12]。因此, 为了研究城市冠层中这些保守标量的湍流特征以及城市碳通量, 2005 年在塔的 47 m 高度上安装了水汽 CO₂ 脉动仪 (LI-COR7500), 用来观测水汽和 CO₂ 脉动。本文利用这些资料分析了城市边界层湍流运动的一些统计特征, 重点研究 3 个标量的湍流运动特征。

2 资料及其处理

北京 325 m 气象塔 47 m 高度上的水汽 CO₂ 脉动仪 (Licor7500) 采样频率为 10 Hz, 同高度的超声风温仪 (UAT-II 型) 的采样频率与之相同。这两个仪器在 2005 年 1~5 月的观测结果作为本文分析的资料。

去掉一些不合理和不完整的资料, 总共获得的数据是 3 333 组。每组数据按照文献 [13] 的方法对数据去除野点和趋势。谱分析按照 Kaimal 推荐的方法^[14], 首先将时间序列分成 n 个 4 096 点段, 采用 Hamming 窗求平均值后通过快速傅立叶变换得到高频谱, 然后按 n 个邻近点平均得到 4 096 个数据点做低频分析, 再做谱连接, 最后在每个谱段按对数平均成 10 个点。

3 结果和分析

3.1 标准差

相似理论和大量研究结果表明不稳定条件下

速度和温度归一化标准差与稳定度 z/L 之间存在幂律关系^[3,5,14~18]。速度归一化标准差与稳定度的关系可表示为

$$\sigma_{u,v,w}/u_* = C_1(1 - C_2 z/L)^{1/3}, \quad (1)$$

其中, L 是 Monin-Obukhov 长度, z 是观测高度, u 、 v 、 w 分别表示 3 个风速分量, $\sigma_{u,v,w}$ 表示 3 个风速分量的方差, u_* 是摩擦速度, C_1 和 C_2 是拟合系数。根据 Monin-Obukhov 相似理论, 温度归一化标准差与稳定度的关系与 (1) 式相似, 但幂指数为 $-1/3$ 。一些研究得到的关系式为

$$\sigma_T/T_* = C(-z/L)^{-1/3}, \quad (2)$$

其中, σ_T 是温度方差, T_* 是温度尺度, C 是拟合系数。关于水汽和 CO₂ 的归一化标准差研究得很少。

由于城市下垫面的高度复杂性和城市人类活动的影响, 湍流通量特征量比较离散, 尤其是 CO₂ 和水汽, 离散程度更大。尽管如此, 风速和温度归一化标准差与稳定度之间仍然存在 $1/3$ 幂律关系, 如图 1a~d 所示。不稳定条件下, 3 个风速和温度归一化标准差与稳定度关系的拟合结果为

$$\sigma_u/u_* = 2.03(1 - 0.50z/L)^{1/3}, \quad (3)$$

$$\sigma_v/u_* = 1.70(1 - 1.50z/L)^{1/3}, \quad (4)$$

$$\sigma_w/u_* = 1.33(1 - 1.27z/L)^{1/3}, \quad (5)$$

$$\sigma_T/T_* = -1.5(-z/L)^{-1/3}. \quad (6)$$

尽管一些关于稳定条件下相似理论的研究表明, 归一化标准差与稳定度之间的幂律关系中幂指数不一定是 $1/3$, 但是, 本文用 $1/3$ 幂律关系拟合还是合适的。拟合结果为

$$\sigma_u/u_* = 1.96(1 + 2.07z/L)^{1/3}, \quad (7)$$

$$\sigma_v/u_* = 1.80(1 + 1.78z/L)^{1/3}, \quad (8)$$

$$\sigma_w/u_* = 1.42(1 + 0.54z/L)^{1/3}, \quad (9)$$

$$\sigma_T/T_* = 3.0(z/L)^{-1/3}. \quad (10)$$

稳定和不稳定条件下, 水汽和 CO₂ 归一化标准差 (图 1e、f) 均可能是正值或者负值, 而且随着稳定度绝对值的增大趋于 0。用 $1/3$ 幂律关系拟合不稳定条件下负的水汽和 CO₂ 归一化标准差与稳定度 z/L 之间的关系, 分别为

$$\sigma_c/c_* = 2.22(1 - 1.52z/L)^{-1/3}, \quad (11)$$

$$\sigma_q/q_* = 1.07(1 - 2.71z/L)^{-1/3}, \quad (12)$$

其中, σ_c 和 σ_q 分别是 CO₂ 和水汽的方差, c_* 和

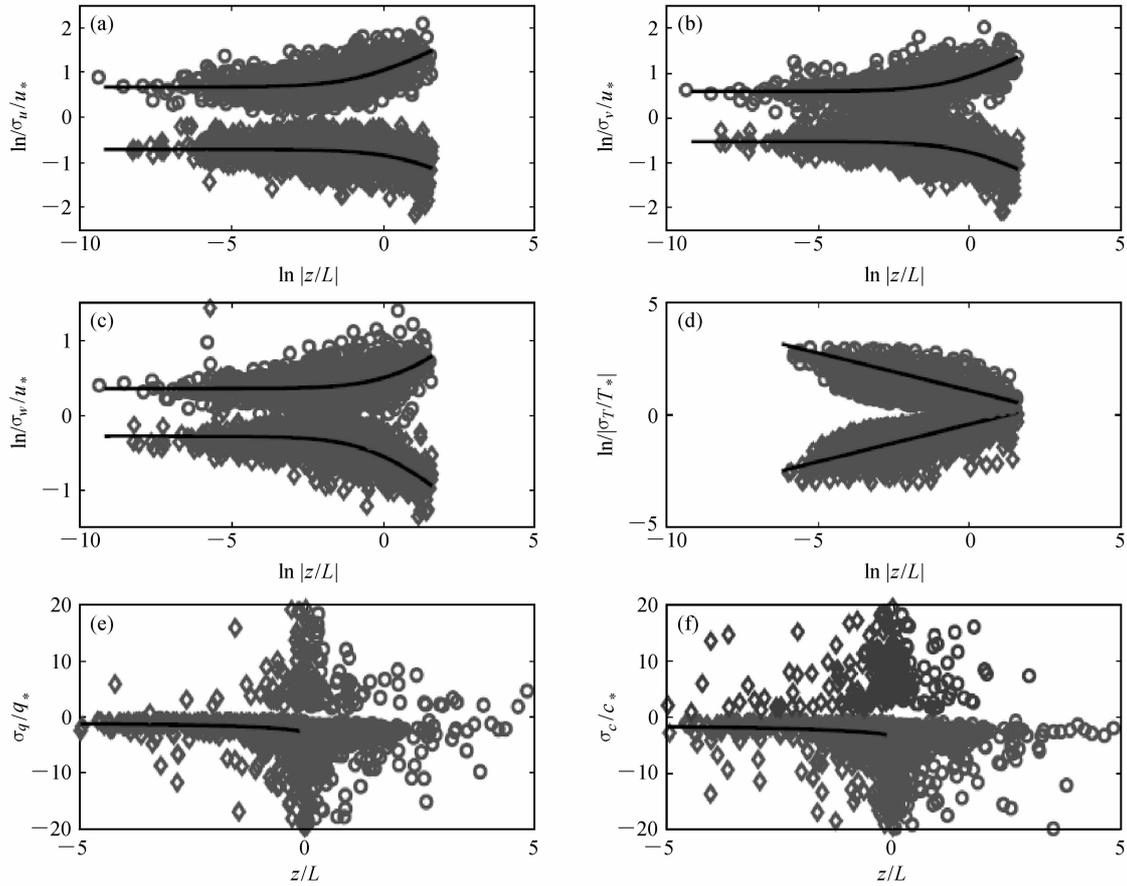


图1 风速 (a) u 、(b) v 、(c) w 、(d) 温度、(e) 水汽和 (f) CO_2 归一化标准差与稳定度 z/L 的关系 (其中, 对于 3 个风速和温度, 不稳定条件下的稳定度取绝对值, 各个归一化标准差的数值乘-1。○: 稳定, ◇: 不稳定)

Fig. 1 Relationships between normalized standard deviations of wind velocity components (a) u , (b) v , (c) w , (d) temperature, (e) water vapor, (f) carbon dioxide and stability z/L (logarithm normalized standard deviations of wind velocity components and temperature are multiplied by -1 , and absolute value of stability are used in unstable condition. ○: stable, ◇: unstable)

q_* 分别是 CO_2 和水汽尺度。从图 1e、f 看, 不稳定度比较大时拟合结果比较好。稳定条件下 $1/3$ 幂律关系拟合的效果不好。由此可见, 相似关系并不适用于水汽和 CO_2 这样的保守物。另一方面, 水汽和 CO_2 通常不符合高斯分布, 对他们的统计特征的研究可以考虑高阶矩。

3.2 陡峭度和偏斜度

湍流场的概率分布对于 Reynolds 方程的封闭和湍流运动的统计特性研究具有重要意义。一般认为, 速度场符合高斯分布, 而标量场中存在相干结构和间歇性, 其概率分布往往不符合高斯分布^[19]。这些相干结构和间歇性对高阶统计矩影响非常显著, 并且导致了异常标度律。由于通常前三阶矩和四阶矩就能比较完整地描述概率分布特征, 而更高阶矩的研究需要更高精度的资料。因

此, 本文只分析 3 个标量的三阶矩和四阶矩, 即偏斜度 S 和陡峭度 K 。它们分别定义为

$$S = \overline{u^3} / \sigma^3, \quad (13)$$

$$K = \overline{u^4} / \sigma^4. \quad (14)$$

一些研究结果^[20,21]和我们之前对温度、水汽和 CO_2 的偏斜度和陡峭度的研究表明, 标量的偏斜度随稳定度变化, 而陡峭度与稳定度之间的关系不明显。更多的文章指出, 标量的偏斜度和陡峭度之间存在一定的关系, 即 $K \geq S^2 + 1$ 。Mole 和 Clare^[22]曾给出扩散标量的陡峭度与偏斜度的关系为

$$K = AS^2 + B, \quad (15)$$

其中, A 、 B 是拟合系数。Schopklocher 和 Sullivan^[23]用实验数据分析得到点源扩散时浓度的陡峭度与偏斜度的关系符合 (15) 式。Lewis 等^[24]认

为低浓度部分符合指数分布、高浓度部分符合 Pareto 分布时, 偏斜度和陡峭度之间的关系可用 (15) 式描述。大气中的 CO_2 、水汽和温度的概率分布都可以用指数分布来描述, 其通量的概率分布尾部衰减比指数分布慢, 因此, 我们推测 CO_2 、水汽和温度的陡峭度和偏斜度之间存在类似 (15) 式的平方关系。本文资料的拟合结果如图 2 所示, 3 个标量的拟合曲线分别为

$$K_c = 1.637S_c^2 + 0.667S_c + 3.793, \quad (16)$$

$$K_q = 1.809S_q^2 + 0.485S_q + 3.498, \quad (17)$$

$$K_T = 1.6244S_T^2 - 0.368S_T + 3.297. \quad (18)$$

从 (16) ~ (18) 式可知, $K_{c,q,T} > 3$ 。与 (15) 式相比, (16) ~ (18) 式右边多了第二项, 而且温度的符号与水汽和 CO_2 的相反。这与不同标量的偏斜度随稳定度变化不同有关。

3.3 通量

前面的分析表明, 水汽和 CO_2 的统计特征具有相似性, 与温度的统计特征具有明显的区别。但是, 这并不意味着在城市边界层像水汽和 CO_2 这样的保守物具有相同的运动规律。实际上, 对通量长期统计的结果表明了他们之间的差异。

感热通量 H 、潜热通量 F_q 和 CO_2 通量 F_c 分别用下列公式计算:

$$H = \rho c_p \overline{w'T'}, \quad (19)$$

$$F_q = \rho L_v \overline{w'q'}, \quad (20)$$

$$F_c = \overline{w'c'}, \quad (21)$$

其中, ρ 是空气密度, c_p 是空气的定压比热, L_v

是水汽相变潜热。虽然通量受各种因素的影响, 变化很大, 但是, 较长时间统计的平均日变化趋势只受较少因素的影响, 能够反映一个地区的通量日变化特征。图 3 是感热通量、潜热通量和 CO_2 通量的平均日变化。其中, 每个点表示 5 个月每天该时刻前 1 h 的通量平均值 (例如, 09:00 对应的点是每天 08:00~09:00 的通量平均值)。感热通量、潜热通量和 CO_2 通量在后半夜比较小, 早上 04:00~05:00 (北京时间, 下同) 最小。但是, 感热通量和潜热通量在午间最大, 而 CO_2 在早上和晚上各有一个极值, 这可能与城市居民生活有关。这也意味着在城市冠层内, 水汽的日变化特征与温度更接近, 因此, 城市中存在热岛效应时通常湿度也存在相应的变化。而 CO_2 受人因因素的影响比较大。同时, 通量存在明显的季节差异。平均而言, 4~5 月的感热通量略大于 1~3 月, 而潜热通量却远大于 1~3 月的潜热通量, CO_2 通量则是 1~3 月大于 4~5 月。

3.4 谱特征

湍流谱可以区分各尺度或周期的涡对整体方差的贡献, 而协谱可以描述各种尺度的涡对湍流通量的贡献。

选取稳定和不稳定条件下比较平稳的时间序列计算湍流谱和协谱, 然后分别取其平均值, 结果如图 4。其中, 谱用方差归一化, 协谱用通量归一化。为了将各个量的谱区分开来, 风速分量 v 、 w 、 CO_2 (c)、水汽 (q) 和温度 (T) 的谱依次向

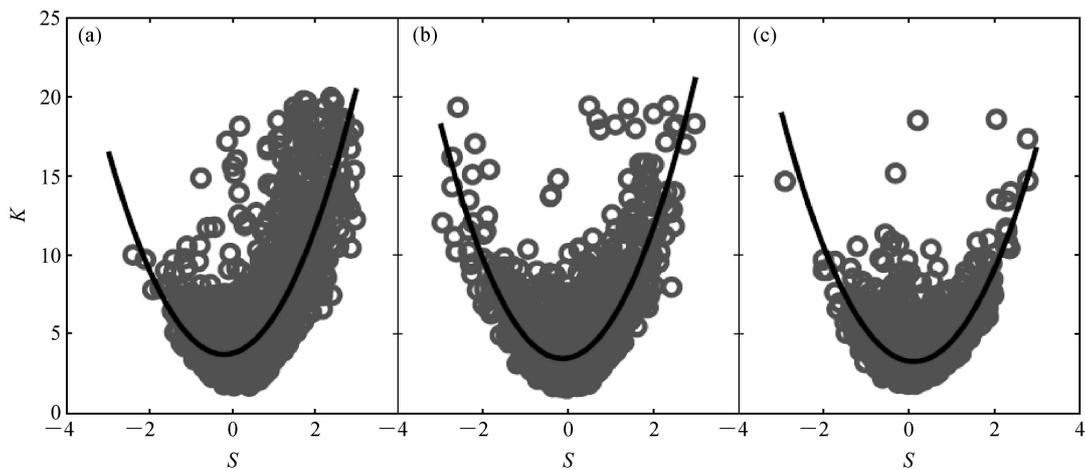


图 2 3 个标量的陡峭度 K 与偏斜度 S 的关系: (a) CO_2 ; (b) 水汽; (c) 温度

Fig. 2 The relationships between skewness and kurtosis of three scalars: (a) carbon dioxide; (b) water vapor; (c) temperature

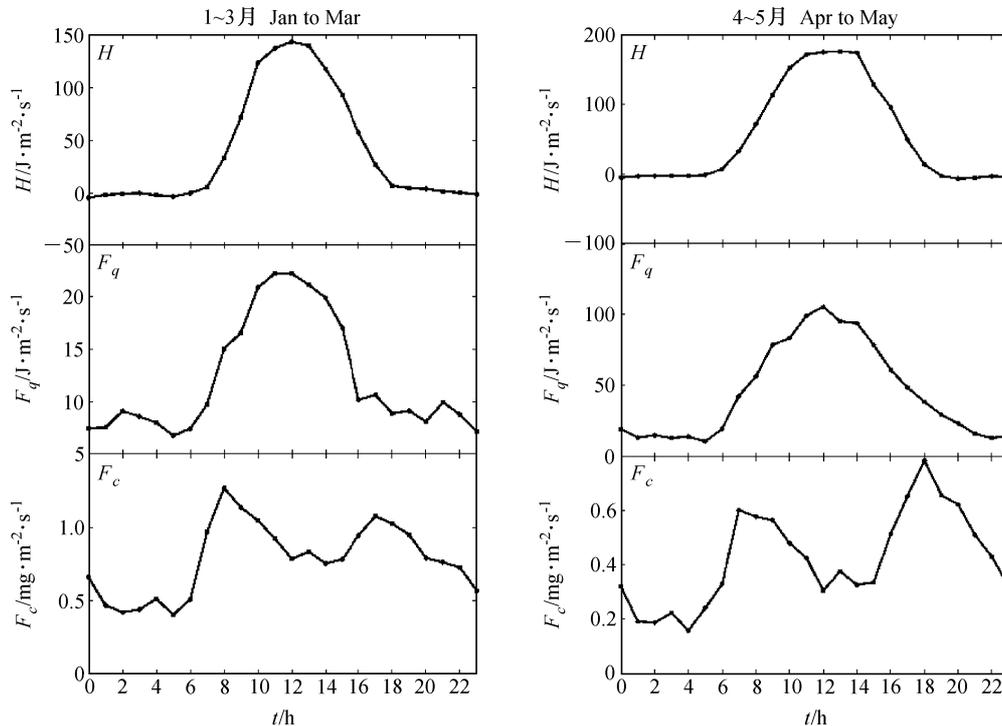


图3 (a) 1~3月和 (b) 4~5月通量的平均日变化 (从上到下依次是感热通量 (H)、潜热通量 (F_q) 和 CO_2 (F_c) 通量, 每个时刻的值为5个月该时刻前1h的通量的平均值)

Fig. 3 (a) 1-3 month and (b) 4-5 month daily variation of mean sensible heat fluxes (H , top), latent heat fluxes (F_q , medium), carbon dioxide fluxes (F_c , bottom), each of which is calculated by averaging 5-month flux for one hour before each hour corresponding to the point

上平移一个单位。

稳定和不稳定条件下, 水平速度谱的峰值频率比较一致; 垂直速度谱峰值频率比其他量的峰值频率大, 表明垂直运动受小尺度涡旋的影响比较大。受稳定层结的抑制, 湍流能量向小尺度的级串略小, 因此, 垂直速度谱的峰值频率比不稳定条件下也略小。相应地, 稳定条件下湍流垂直输送比较小, 3个标量谱的峰值频率在稳定条件下比不稳定条件下略小, 而3个标量与垂直速度的协谱峰值频率比较大 (图 4c、d)。这些结果与 Feigenwinter^[25]对城市边界层的研究结果一致, 表明城市冠层内即使夜间湍流运动也比较活跃。因此, 夜间稳定边界层速度和温度也存在相似关系。

但是, 在一些极端天气条件下湍流运动存在很大的变化。以一次大风过程 (2005年4月19日 13:00~19:00, 平均风速大于 $10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$) 为例, 这次大风过程中风速、温度、水汽和 CO_2 的谱和协谱如图 5 所示 (谱和协谱计算方法与图 4

相同)。由于水平风速很大, 湍流运动很弱, 主要是很小尺度的脉动, 因此, 垂直速度谱的峰值频率很大, 约为 0.06 Hz, 比图 4a、b 中垂直速度谱的峰值频率大; 3个标量与垂直速度的协谱的峰值频率也比较大, 约为 0.02~0.05 Hz。

4 结论

城市边界层由于其高度复杂的下垫面和人类活动的影响, 湍流运动及其对物质运动影响的研究非常重要。本文利用 2005 年 1~5 月北京 325 m 气象塔 47 m 高度的湍流风速、温度、水汽和 CO_2 资料, 分析了城市边界层的湍流运动特征。其中谱分析的结果表明城市冠层内稳定度对湍流谱的影响比较小, 而水平风速的影响比较大。因此, 速度和温度的相似关系在夜间稳定条件下也成立。但是, 由于水汽和 CO_2 还受其他因素的影响, 相似关系并不适用。更高阶矩的研究表明他们的陡

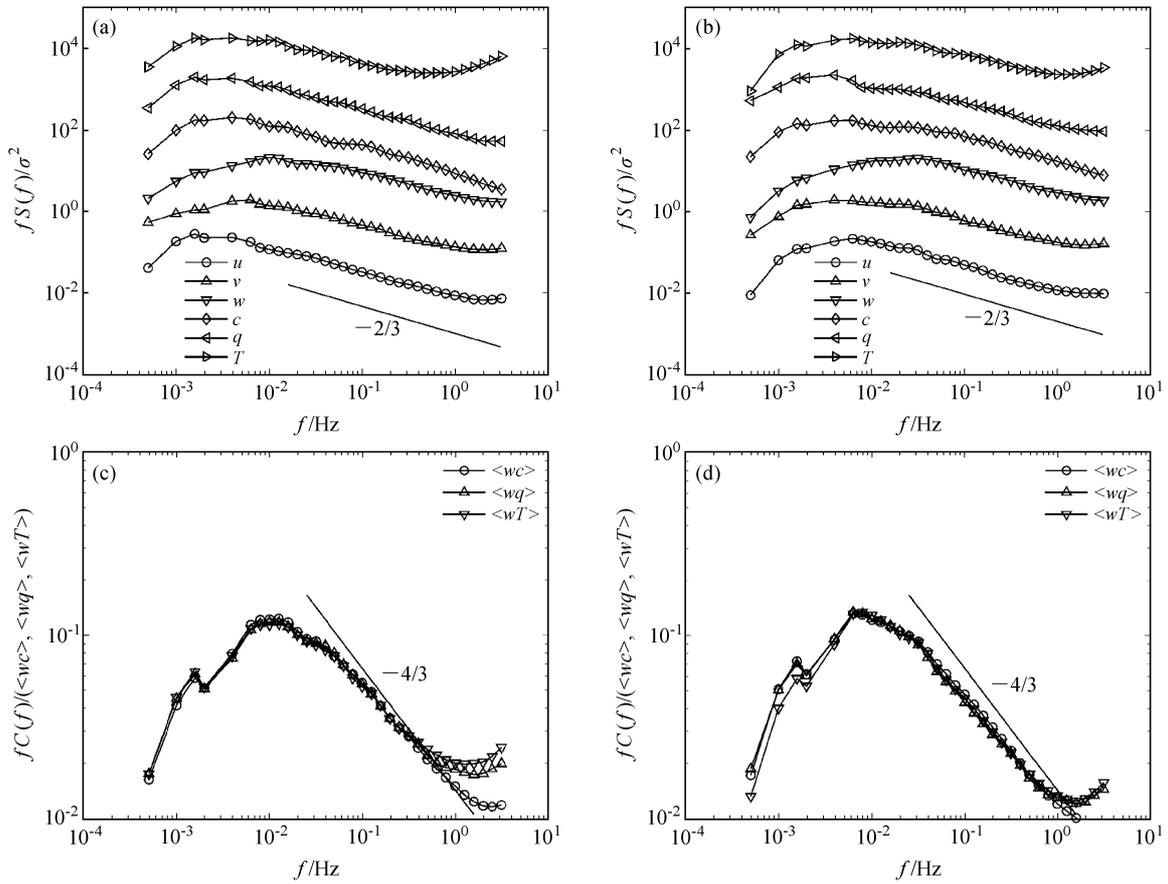


图 4 稳定和不安定条件下较平稳时间序列的谱和协谱: (a) 和 (c) 分别是稳定条件下风速分量 u 、 v 、 w 、 CO_2 (c)、水汽 (q) 和温度 (T) 的平均谱和 CO_2 、水汽和温度与垂直速度的平均协谱; (b) 和 (d) 分别与 (a) 和 (c) 意义相同, 但为不稳定条件的情况
Fig. 4 (a), (b) Mean spectra of three wind velocity components u , v , w , carbon dioxide (c), water vapor (q) and temperature (T) and (c), (d) mean cospectra of wc , wq and wT in stable and unstable condition for comparably stable time series. (a), (c); stable, (b), (d); unstable

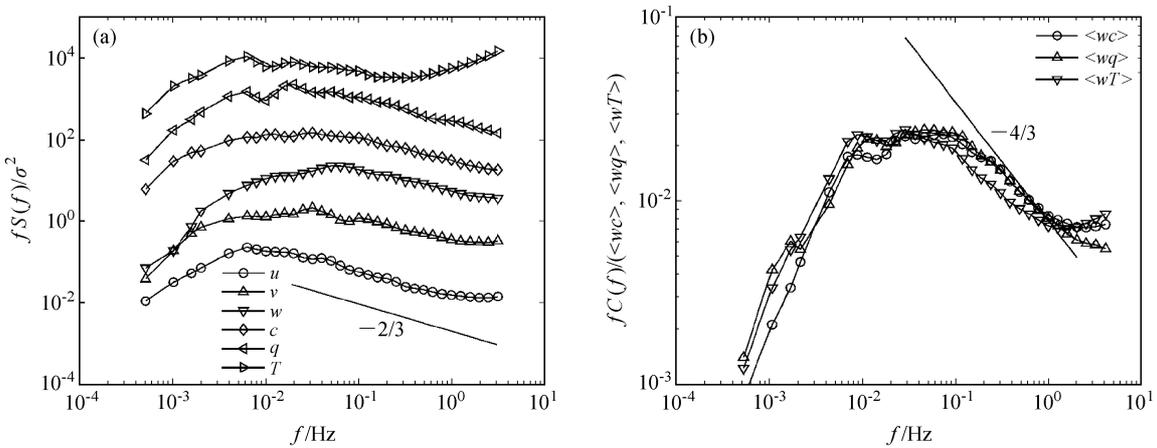


图 5 大风条件下 (2005 年 4 月 19 日 13:00~19:00, 平均风速大于 $10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$) 风速分量 u 、 v 、 w 、 CO_2 (c)、水汽 (q) 和温度 (T) 的谱 (a) 以及 CO_2 、水汽和温度与垂直速度的平均协谱 (b)
Fig. 5 (a) Mean spectra of wind velocity components u , v , w , carbon dioxide (c), water vapor (q) and temperature (T) and (b) mean cospectra of wc , wq and wT obtained from data of 13:00—19:30 LST, Apr 19, 2005, when mean wind velocity is larger than $10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$

峭度与偏斜度之间存在平方关系。而水汽和 CO₂ 之间也存在差异, 他们的通量日变化特征明显不同, CO₂ 通量的日变化特征受人类活动的影响很大。同时, 感热通量、潜热通量和 CO₂ 通量还存在季节差异, 尤其是潜热通量差异很大。因此, 对这些保守物的研究需要综合考虑各种因素, 尤其是在模式中, 不能简单地用温度做类比来描述这些保守物质的特征, 甚至也不能用一种保守物类比另一种保守物。

参考文献 (References)

- [1] 苏红兵, 洪钟祥. 北京城郊近地层湍流实验观测. 大气科学, 1994, **18** (6): 739~750
Su Hongbing, Hong Zhongxiang. An experimental study of turbulence in northern suburban surface layer of Beijing. *Scientia Atmospherica Sinica* (in Chinese), 1994, **18** (6): 739~750
- [2] 张宏升, 陈家宜. 非单一水平均匀下垫面空气动力学参数的确定. 应用气象学报, 1997, **8** (3): 310~315
Zhang Hongsheng, Chen Jiayi. Estimation of aerodynamic parameters on non-single horizontal homogeneous underlying surface. *Quarterly Journal Applied Meteorology* (in Chinese), 1997, **8** (3): 310~315
- [3] 胡非, 李昕, 陈红岩, 等. 城市冠层中湍流运动的统计特征. 气候与环境研究, 1999, **4** (3): 252~258
Hu Fei, Li Xin, Chen Hongyan, et al. Turbulence characteristics in the rough urban canopy layer. *Climatic and Environmental Research* (in Chinese), 1999, **4** (3): 252~258
- [4] 沃鹏, 张霭琛. 寒潮冷锋过境期间湍流特征及其谱分析. 大气科学, 1999, **23** (3): 369~376
Wo Peng, Zhang Aichen. Analysis of turbulence characteristics and spectrum during the cold wave. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 1999, **23** (3): 369~376
- [5] 刘辉志, 洪钟祥. 北京城市下垫面边界层湍流统计特征. 大气科学, 2002, **26** (2): 241~248
Liu Huizhi, Hong Zhongxiang. Turbulent statistical characteristics over the urban surface. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 2002, **26** (2): 241~248
- [6] 李倩, 刘辉志, 胡非, 等. 大风天气下北京城市边界层阵风结构特征. 中国科学院研究生院学报, 2004, **21** (1): 40~44
Li Qian, Liu Huizhi, Hu Fei, et al. Characteristic of the urban boundary layer under strong wind condition in Beijing city. *Journal of the Graduate School of the Chinese Academy of Sciences* (in Chinese), 2004, **21** (1): 40~44
- [7] Monim H, Hu Fei. Surface roughness around a 325-m meteorological tower and its effect on urban turbulence. *Adv. Atmos. Sci.*, 2005, **22** (4): 595~605
- [8] 胡非. 大气边界层湍流涡旋结构的小波分解. 气候与环境研究, 1998, **3** (2): 97~105
Hu Fei. Atmospheric boundary layer eddy structure identification by orthonormal wavelet expansion. *Climatic and Environmental Research* (in Chinese), 1998, **3** (2): 97~105
- [9] 李昕, 胡非, 刘罡. 大气湍流的混沌吸引子特征. 气候与环境研究, 2001, **6** (1): 58~66
Li Xin, Hu Fei, Liu Gang. Reconstructing the attractors of atmospheric turbulence. *Climatic and Environmental Research* (in Chinese), 2001, **6** (1): 58~66
- [10] 陈炯, 郑永光, 胡非. 用连续子波变换提取城市冠层大气湍流的相干结构. 大气科学, 2003, **27** (2): 182~190
Chen Jiong, Zheng Yongguang, Hu Fei. Isolating the coherent structure in atmospheric turbulence in the rough urban canopy layer by using continuous wavelet transform. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 2003, **27** (2): 182~190
- [11] 马晓光, 胡非. 大气湍流能谱的精细结构及其能量级串. 地球物理学报, 2004, **47** (2): 195~199
Ma Xiaoguang, Hu Fei. Refined structure of energy spectrum and energy cascade in atmospheric turbulence. *Chinese Journal of Geophysics* (in Chinese), 2004, **47** (2): 195~199
- [12] Shraiman B I, Siggia E D. Scalar turbulence. *Nature*, 2000, 405: 639~646
- [13] 陈红岩, 胡非, 曾庆存. 处理时间序列提高计算湍流通量的精度. 气候与环境研究. 2000, **5** (3): 304~311
Chen Hongyan, Hu Fei, Zeng Qingcun. Dealing with imperfect data to improve estimation precision of turbulence flux. *Climatic and Environmental Research* (in Chinese), 2000, **5** (3): 304~311
- [14] 陈红岩, 陈家宜, 胡非, 等. HUBEX 试验区近地面层的湍流输送. 气候与环境研究, 2001, **6** (2): 221~227
Chen Hongyan, Chen Jiayi, Hu Fei, et al. The turbulent transfer in atmospheric surface layer in HUBEX. *Climatic and Environmental Research* (in Chinese), 2001, **6** (2): 221~227
- [15] 张宏升, 李富余, 陈家宜. 不同下垫面湍流统计特征研究. 高原气象, 2004, **23** (5): 598~604
Zhang Hongsheng, Li Fuyu, Chen Jiayi. Statistical characteristics of atmospheric turbulence in different underlying surface conditions. *Plateau Meteorology* (in Chinese), 2004, **23** (5): 598~604
- [16] 马耀明, 马伟强, 胡泽勇, 等. 青藏高原草甸下垫面湍流强度相似性关系分析. 高原气象, 2002, **21** (5): 514~

- 517
Ma Yaoming, Ma Weiqiang, Hu Zeyong, et al. Similarity analysis of atmospheric turbulent intensity over grassland surface of Qinghai-Xizang Plateau. *Plateau Meteorology* (in Chinese), 2002, **21** (5): 514~517
- [17] 李英年, 师生波, 曹广民, 等. 祁连山海拔高寒草甸地区微气候特征的观测研究. *高原气象*, 2000, **19** (4): 512~519
- Li Yingnian, Shi Shengbo, Cao Guangmin, et al. The observational studies on characteristics of microclimate in Hai-bei alpine meadow regions of Qilian Mountain. *Plateau Meteorology* (in Chinese), 2000, **19** (4): 512~519
- [18] Sorbian Z. *Structure of the Atmospheric Boundary Layer*. New Jersey: Prentice Hall, Englewood Cliffs, 1989. 79~81
- [19] Chu C R, Parlange M B, Katul G G, et al. Probability density functions of turbulent velocity and temperature in the atmospheric surface layer. *Water Resour. Res.*, 1996, **32** (6): 1681~1688
- [20] Thoroddsen S T, Van Atta C W. Exponential tails and skewness of density-gradient probability density functions in stably stratified turbulence. *J. Fluid Mech.*, 1992, **244**: 547~566
- [21] Belmonte A, Libchaber A. Thermal signature of plumes in turbulent convection: The skewness of the deviate. *Phys. Rev. E*, 1996, **53** (5): 4893~4897
- [22] Mole N, Clare L. Relationships between higher moments of concentration and of dose in turbulent dispersion. *Bound.-Layer Meteor.*, 1995, **73**: 35~52
- [23] Schopklocher T P, Sullivan P J. The relationship between skewness and kurtosis of a diffusing scalar. *Bound.-Layer Meteor.*, 2005, **115**: 341~358
- [24] Lewis D M, Chatwin P C, Mole N. Investigation of the collapse of the skewness and kurtosis exhibited in atmospheric dispersion data. *Il Nuovo Cimento*, 1997, **20**: 385~397
- [25] Feigenwinter C. The vertical structure of turbulence above an urban canopy. Ph. D. dissertation, Institut für Meteorologie, Klimatologie und Fernerkundung Departement Geographie der Universität Basel, Basel. 1999, 53~54