# 大气边界层湍流标量场的概率分布及其特征分析*

全利红　胡　非　程雪玲

中国科学院大气物理研究所大气边界层物理与大气化学国家重点实验室，北京，100029

**摘　要**

利用 2004 年 11 月在白洋淀地区和 2005 年 1 月在中国科学院大气物理研究所北京 325 m 气象塔的 47 m 高度由超声风温仪和水汽二氧化碳分析仪观测的湍流脉动资料，分析了大气边界层不同下垫面湍流标量场（温度、水汽和二氧化碳）的概率分布及其特征。标量场的概率分布通常不同于高斯分布，而且还会产生偏斜，可以用指数分布描述。因此，标量的偏斜度通常不为 0，陡峭度也往往比 3 大。非 0 偏斜度的出现可能是由湍流时间序列中的相干结构和间歇性部分造成的。其中，相干结构的存在使概率分布偏斜，但是，它们对偏斜度的贡献相对较小，而与概率分布的长尾现象有关的间歇性则会使偏斜度大大增加。温度、水汽和二氧化碳的平均偏斜度和陡峭度反应了标量场与稳定度、下垫面、天气条件、源汇等因素之间的关系。在不同下垫面，温度和感热通量的偏斜度随稳定度变化比较一致；水汽通量的偏斜度在稳定和不稳定条件下都为正，而水汽本身在不稳定条件下可能出现负的偏斜度；二氧化碳和二氧化碳通量的偏斜度受下垫面影响很大，在不同下垫面，偏斜度与稳定度之间的关系并不一致；而 3 个标量的陡峭度随稳定度的变化不显著，它们与相应的偏斜度之间存在平方关系。

**关键词：** 大气湍流，大气边界层，概率分布。

## 1　引　言

Reynolds 方程的不封闭问题一直是困扰湍流研究工作者的难题，而 Reynolds 方程求解困难的关键在于不知道湍流场普适的概率分布。因此，几十年来，湍流统计理论研究的核心问题之一就是湍流场的统计分布特征。到目前为止，关于湍流速度场的统计特征已经了解得较深入，但是对于标量场（如温度场）的统计特征了解得还不够。过去，人们一直认标量场应具有与速度场相同的概率分布，但是后来很多观测事实和数值模拟都表明两者之间存在很大差别。标量场除了自身的运动之外，还受到速度场的影响，在很大时空尺度上呈现出复杂的、混沌变化的结构，因而标量场的概率分布远比速度场的复杂[1]。例如，1989 年芝加哥实验发现在高 Rayleigh 数的热对流湍流中温度场的概率分布随湍流类型的不同而不同：当 $Ra<4\times10^7$，即软湍流时，温度场的概率密度分布非常接近高斯分布；而当 $Ra>4\times10^7$，即硬湍流时，温度场的概率密度分布远离高斯分布，更接近指数分布[2]。之后，人们一直很关注标量场的概率分布。1993 年 Ching 等[3-4]用流体的平流方程和连续性方程推导出了概率密度函数的通用形式

$$P(x)=\frac{C}{q(x)}\exp\left[-\int_0^x\frac{x'\mathrm{d}x'}{q(x')}\right] \tag{1}$$

其中，常数 $C$ 由 $\int P(x)\,\mathrm{d}x=1$ 确定。这个公式远比高斯分布和指数分布复杂，高斯分布和指数分布只是两种特殊情况：当 $q(x)$ 与 $x$ 无关时，$P(x)$ 是高斯分布的；当 $q(x)\sim x$，$P(x)$ 是指数分布的。

受到各种动力和热力因素的影响，大气湍流多是高 Rayleigh 数高 Reynolds 数运动，因此我们推测大气中也存在非高斯分布[5]。但是，这方面的研究很少。普遍认为速度场近似为高斯分布。而关于温度场，Chu 等[6]分析得到，在不稳定条件下温度场概率分布偏离高斯分布，Katul[7]认为在弱稳定和中

* 初稿时间：2005 年 8 月 30 日；修改稿时间：2006 年 3 月 3 日。
资助课题：国家自然科学基金重点项目“地表通量参数化与大气边界层过程的基础研究”（40233030）和自然科学基金面上项目青年科学基金项目“大气湍流能量级串机理及其格子气数值模拟的研究”（40405004）。
作者简介：全利红，女，1980 年生，在读博士，主要从事大气边界层物理和大气湍流方面的研究。Email：qlh@mail.lapc.ac.cn

性条件下温度场符合高斯分布，并以此分析感热通量的概率分布。最近，胡非等[8]用100 Hz超声风温仪资料对城市冠层温度脉动的概率分布的分析得出温度脉动符合指数分布。其他如速度和温度梯度、耗散率等的概率分布也不符合高斯分布[9-11]。而关于其他标量，如水汽、二氧化碳的概率分布，几乎没有人研究过。如果大气湍流标量场不符合高斯分布，那么很多基于高斯分布假设的理论在应用到标量场时就需要修正或者重新考虑。另一方面，随着探测技术的发展，标量场的数据越来越丰富。利用这些数据，本文分析了大气边界层湍流标量场的概率分布及其统计特征。

## 2 资料来源及处理

本文用到3组资料，分别来自2004年11月在白洋淀地区的水陆观测实验和2005年1月北京325 m气象塔的观测记录（以下记白洋淀地区水上的观测资料为a组资料，陆地上的资料为b组资料，气象塔观测资料为c组资料）。

其中，白洋淀地区的观测实验是2004年11月，在国家自然科学基金重点项目“地表通量参数化与大气边界层过程的基础研究”资助下，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”及北京大学大气科学系联合开展的一次非均匀大气边界层综合观测实验，包括风廓线雷达、系留汽艇、近地面观测塔、以及能量平衡观测系统（辐射和鲍恩比观测）。观测场在河北保定的白洋淀地区，其中近地面湍流观测选在两个不同的代表点，即雄县观测点和白洋淀中观测点，分别代表了陆地和水体下垫面特征。雄县观测点（38°56.910′N，116°01.812′E）在白洋淀东边离雄县气象局不远的低矮果树地里，已经没有树叶。白洋淀岛上的观测点（38°55.233′N，115°58.530′E）在水边，观测点三面环水。两个观测点测量湍流量用的超声风温仪和水汽二氧化碳脉动仪（LiCor7500）分别架在3.5和8 m高的小塔上，采样频率为10 Hz。本文主要分析的是2004年11月16—22日的温度、水汽和二氧化碳湍流脉动数据，共计有150多个小时的资料，这段观测时期华北地区处于高压控制下，天气形势平稳。

北京325 m气象塔（39°58′N，116°22′E）在中国科学院大气物理研究所LAPC院内，位于北京市北三环路以北约1 km处，周围有大量高层建筑物。2005年在塔的47 m高度上安装了水汽二氧化碳脉动仪（LiCor7500），用来观测城市冠层内的水汽和二氧化碳脉动，采样频率与这一层的超声风温仪相同，为10 Hz。本文分析的是2005年1月1—4日的温度、水汽和二氧化碳湍流脉动数据。

为了尽量减小天气条件的影响，从每小时数据记录中选取比较平稳的长度为10 min的一段，共计6000个数据点，并且对数据进行了去野点和去趋势处理[12]。

## 3 分析结果

### 3.1 标量场的概率分布

几乎所有资料的分析结果表明二氧化碳、水汽和温度的概率分布偏离高斯分布（图1中$b_1$，$b_2$，$b_3$），通常中间部分比高斯分布陡，尾部比高斯分布衰减慢，而且概率分布并不对称。根据众多关于温度的实验和数值模拟研究的结果，本文也用指数分布拟合这3个标量的概率分布。可见，二氧化碳、水汽和温度的概率分布更符合指数分布。

### 3.2 偏斜度和陡峭度

概率分布函数的特征可以用各阶中心矩来定量描述。除了一阶矩（均值）和二阶矩（方差）外，三阶矩（偏斜度$S$）和四阶矩（陡峭度$K$）也具有非常重要的意义，它们是定量描述一个独立随机过程与高斯分布的偏离程度的两个最基本的量，分别定义为：

$$S = \overline{u'^3}/\sigma^3 \tag{2}$$

$$K = \overline{u'^4}/\sigma^4 \tag{3}$$

其中，偏斜度表明了对称性，实际上对于对称分布奇次阶矩应该恒为零；陡峭度表明了概率分布的平坦程度，若某一分布为非高斯分布，那么一定比高斯分布更陡峭或更平坦。$S$和$K$合起来就描述了实际概率分布对高斯分布的偏离程度。对于高斯分布，偏斜度$S$为0，陡峭度$K$为3。

对于大气中的温度、水汽和二氧化碳等标量而言，由于概率分布不符合高斯分布，一阶矩和二阶矩就不足以描述这些标量的特征，需要更高阶矩。例如图1中水汽和二氧化碳的概率分布均向正的一侧偏斜，它们的偏斜度均为负，温度的概率分布向负的一侧偏斜，其偏斜度为正，而且3个标量的陡峭度也都大于3（表1）。在实际情况中，前三阶矩或四阶矩

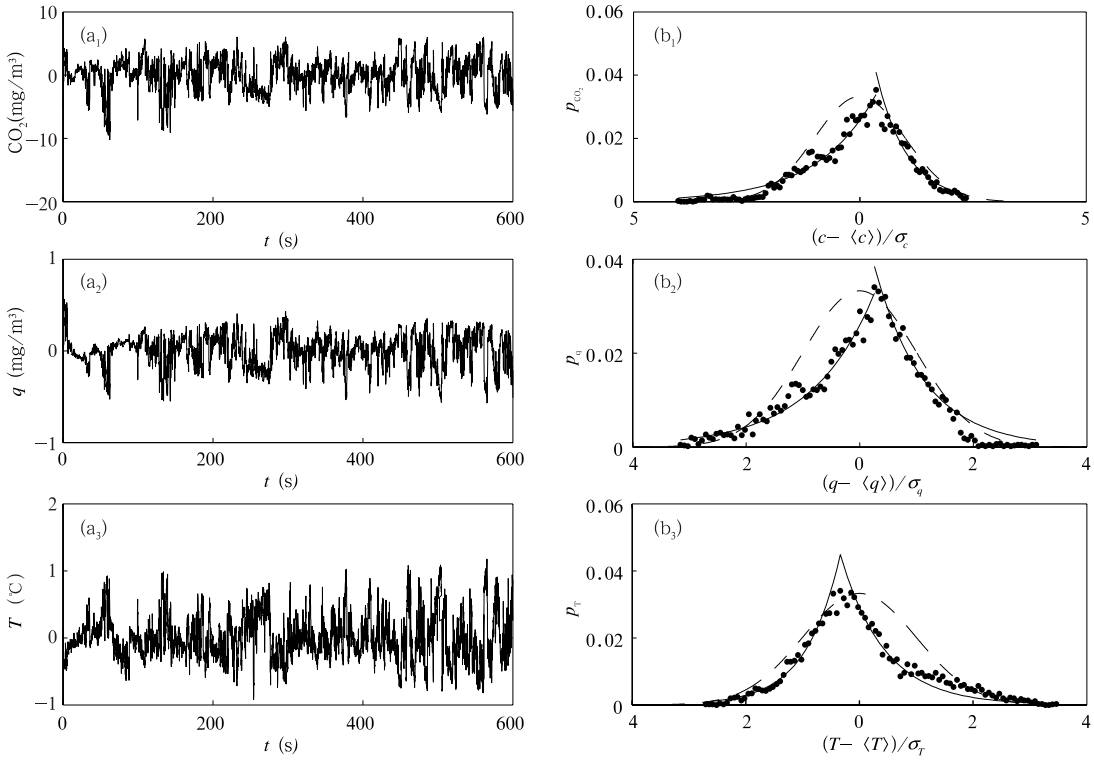


图 1　白洋淀地区水上资料 11 月 19 日 23 时二氧化碳($CO_2$)、水汽($q$)和温度($T$) 10 min 时间序列($a_1$，$a_2$，$a_3$)的概率($p$)分布($b_1$，$b_2$，$b_3$)

($b_1-b_3$ 的横坐标取 3 个量的归一化值，其中〈〉表示取平均，$\sigma$ 表示标准差；实线是指数函数拟合的结果，虚线是高斯分布)

Fig. 1　Ten-minute time series ($a_1$, $a_2$, $a_3$) of carbon dioxide ($CO_2$), water vapor ($q$) and temperature ($T$) measured at 23:00 BST 19 November 2004 at an island in the Baiyangdian region and their probability distributions ($b_1$, $b_2$, $b_3$)

(The abscissas in the right panels are three normalized scalars, respectively, wherein 〈〉 means average, and $\sigma$ is standard deviation; and solid lines are fitted exponential distributions, and dash lines represent Gaussian distributions)

表 1　图 1 中 3 个标量及其通量的偏斜度($S$)和陡峭度($K$)

Table 1　Skewness ($S$) and kurtosis ($K$) of the three scalars and their fluxes in Fig. 1

| | $CO_2$ | $q$ | $T$ | $w_{CO_2}$ | $w_q$ | $w_T$ |
|---|---|---|---|---|---|---|
| $S$ | −0.5148 | −0.4560 | 0.5969 | 2.4672 | 1.9388 | −1.5890 |
| $K$ | 3.4311 | 3.1486 | 3.2921 | 17.3872 | 12.5285 | 12.9965 |

注：$q$：水汽，$T$：温度，$w$：垂直速度。

已足以描述概率分布函数的大部分特征[13]。而且，偏斜度和陡峭度能反应标量场的一些结构特征和运动规律。因此，本文对 3 个标量的偏斜度和陡峭度以及偏斜度和陡峭度之间的关系进行了分析。为了更清楚地理解标量场偏斜度和陡峭度的意义，还分析了标量通量的偏斜度和陡峭度。由于通量的间歇性，它们的偏斜度和陡峭度比标量本身大(表 1)。

表 2 给出了 3 组资料的 3 个标量及其通量在稳定和不稳定条件下偏斜度和陡峭度的平均值。从表中可以看到，3 个标量的平均陡峭度(〈$K$〉)都大于 3，相同条件下，$\langle K\rangle_{CO_2}>\langle K\rangle_q>\langle K\rangle_T$，因此，二氧化碳的间歇性最强；但是，平均偏斜度(〈$S$〉)的变化则比较复杂，稳定和不稳定条件下差异较大。

不稳定条件下，温度和感热通量的平均陡峭度比较小，因而温度间歇性较弱；平均偏斜度都为正。而稳定条件下，感热通量和两种陆地下垫面(b、c 两组)温度的平均偏斜度为负，只有水上(a 组)温度的平均偏斜度略大于 0。由于观测期间天气平稳，温度的变化主要受热量垂直输送的影响，而在不同的下垫面，感热通量的平均偏斜度和陡峭度变化一致，

表 2 二氧化碳、水汽和温度及其通量的偏斜度($S$)和陡峭度($K$)的平均值

Table 2 Average skewness ($S$) and kurtosis ($K$) of carbon dioxide, water vapor, temperature, and their fluxes

| | | $CO_2$ | | $q$ | | $T$ | | $w_{CO_2}$ | | $w_q$ | | $w_T$ | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | $D<0$ | $D>0$ | $D<0$ | $D>0$ | $D<0$ | $D>0$ | $D<0$ | $D>0$ | $D<0$ | $D>0$ | $D<0$ | $D>0$ |
| a | $\langle S\rangle$ | 0.05615 | −0.1835 | −0.0169 | 0.4386 | 0.0190 | 0.4826 | 1.0518 | −1.0288 | 1.6223 | 2.0389 | −1.8426 | 1.5521 |
| | $\langle K\rangle$ | 4.4373 | 4.2383 | 4.0480 | 4.2382 | 3.8107 | 3.5662 | 14.9454 | 12.3514 | 16.5118 | 13.4754 | 16.4708 | 11.3725 |
| b | $\langle S\rangle$ | −0.1312 | 0.1335 | 0.1512 | 0.4077 | −0.0015 | 0.3992 | 1.2788 | −0.7911 | 1.2991 | 1.5514 | −0.7866 | 1.6217 |
| | $\langle K\rangle$ | 4.1471 | 4.0237 | 4.0120 | 3.8854 | 3.9413 | 3.4965 | 18.3028 | 13.3034 | 16.8640 | 13.1439 | 13.2605 | 12.8283 |
| c | $\langle S\rangle$ | 0.0781 | 0.3696 | −0.0845 | −0.1897 | −0.1594 | 0.1729 | 0.8385 | 0.4156 | 1.8729 | 1.8079 | −1.4677 | 1.0691 |
| | $\langle K\rangle$ | 4.8339 | 5.6573 | 4.3282 | 4.3000 | 4.0374 | 3.9767 | 15.5812 | 15.6471 | 16.0686 | 13.4333 | 16.9227 | 12.6051 |

注:$D=z/L$:稳定性函数,其中,$L$ 是 Monin-Obukhov 长度;〈 〉表示取平均;第一列的 a,b,c 表示 3 组资料。

因此,温度平均偏斜度的差异明显地体现了水陆下垫面的差异。

水汽通量的平均陡峭度随下垫面的变化很小,但是稳定条件下比不稳定条件下大,因而间歇性较弱;而平均偏斜度都为正。这可能是因为水汽在稳定和不稳定条件下都会蒸发的缘故。但是,水上(a 组)与陆地上(b,c 两组)的水汽平均陡峭度与稳定性的关系不同,反应了水汽在源汇区性质的差异。由于白洋淀地区的两个观测点处的水陆风,平流对水汽输送的影响很大,因此,水汽的平均偏斜度随下垫面各不相同,而且两种陆地下垫面(b,c 两组)的情况正好相反。

由于二氧化碳受源的影响很大,因此,二氧化碳及其通量的平均陡峭度和偏斜度随稳定性和下垫面的不同而不同。在白洋淀地区的两组资料(a,b 两组)中,二氧化碳及其通量的平均陡峭度与稳定性的关系一致,前者在稳定和不稳定条件下比较一致,而后者差异较大,这可能与水陆下垫面性质差异有关;二氧化碳通量的平均偏斜度随稳定性变化一致,而二氧化碳的平均偏斜度随稳定性变化却相反。在气象塔资料(c 组)中,二氧化碳的平均陡峭度与稳定性的关系与前两组资料的结果相反;二氧化碳及其通量的平均偏斜度均为正。

### 3.3 相干结构和间歇性对偏斜度的影响

受到各种因素的影响,标量场常常存在不同尺度的相干结构。由于相干结构具有非对称性,它可能会导致概率分布发生偏斜[14-15]。但是,从下面的例子(图 2,3)可知,这不是产生非零偏斜度的唯一因素。

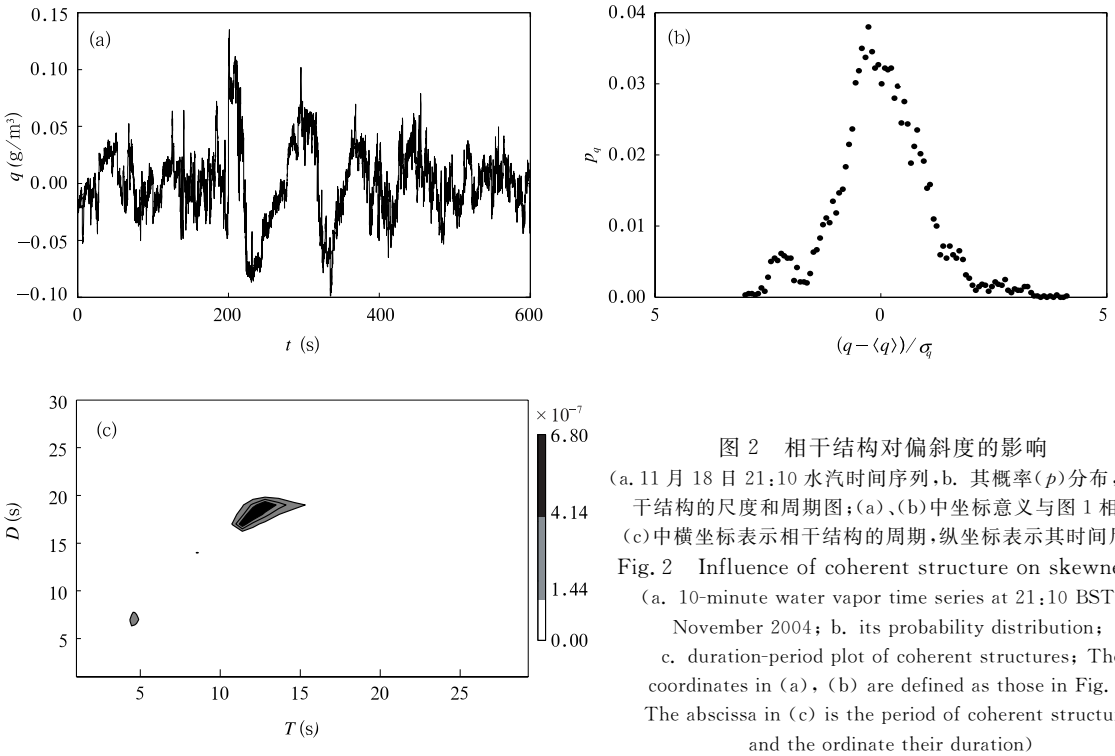


图 2 相干结构对偏斜度的影响

(a. 11 月 18 日 21:10 水汽时间序列,b. 其概率($p$)分布,c. 相干结构的尺度和周期图;(a)、(b)中坐标意义与图 1 相同,(c)中横坐标表示相干结构的周期,纵坐标表示其时间尺度)

Fig. 2 Influence of coherent structure on skewness

(a. 10-minute water vapor time series at 21:10 BST 18 November 2004; b. its probability distribution; c. duration-period plot of coherent structures; The coordinates in (a), (b) are defined as those in Fig. 1; The abscissa in (c) is the period of coherent structures and the ordinate their duration)

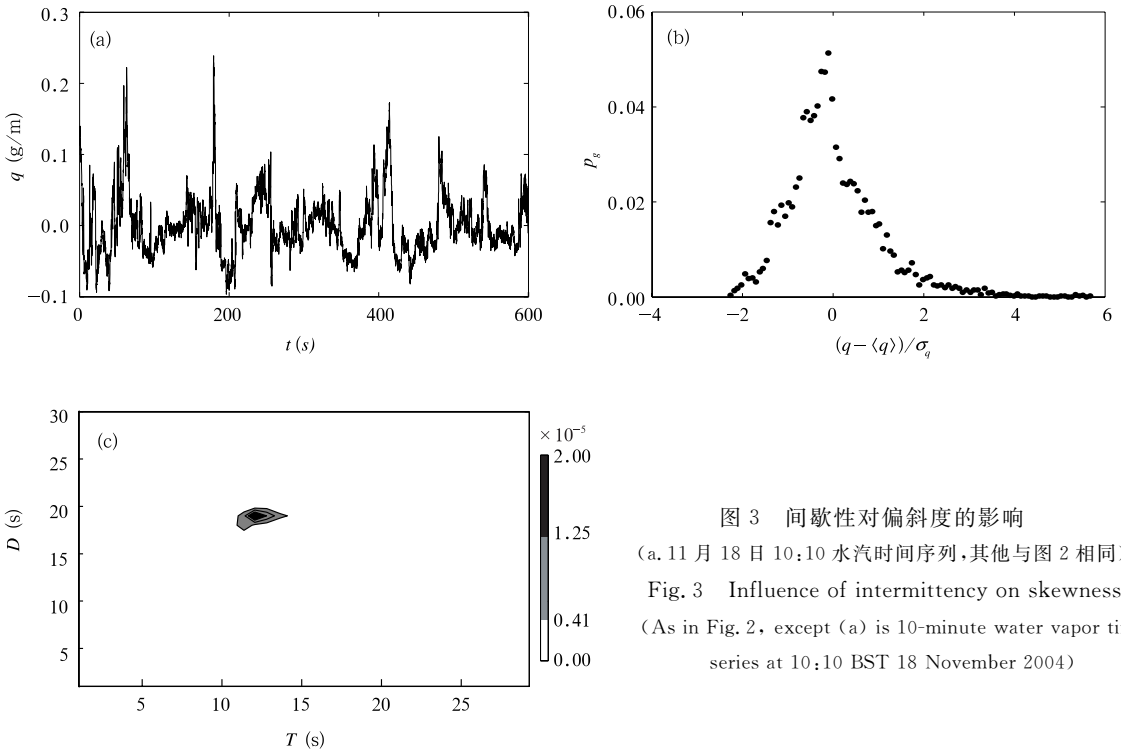


图 3　间歇性对偏斜度的影响

（a. 11 月 18 日 10:10 水汽时间序列，其他与图 2 相同）

Fig. 3　Influence of intermittency on skewness

（As in Fig. 2, except (a) is 10-minute water vapor time series at 10:10 BST 18 November 2004）

图 2 中时间序列的偏斜度为 0.1057，相干结构的尺度为 20 s 左右。图 3 的时间序列也存在一个尺度为 20 s 左右的相干结构，但是这个时间序列的偏斜度是 1.0690，远大于图 2 中时间序列的偏斜度。

比较图 2 和图 3 中时间序列和概率分布可以发现，图 2a 中时间序列的相干结构很明显，但是图 3a 中显著的是一些极值。这些极值使概率分布出现长尾现象，表明标量场中存在间歇性。正是这些极值的存在，偏斜度才变得很大。也就是说，由于存在间歇性，标量的概率分布会出现很大的偏斜度，而相干结构本身虽然会导致概率分布偏斜，但对偏斜度的贡献不大。

### 3.4　偏斜度和陡峭度的关系

虽然偏斜度和陡峭度描述的是概率分布函数的不同特征，但是，对于并非完全随机过程，它们之间往往存在一定的关系。从前两节的分析可知，偏斜度和陡峭度已经很清楚地反映了标量场与一些因素（稳定性、下垫面、源汇等）之间的关系。如果已知偏斜度和陡峭度之间的关系，也将非常有利于对标量场进行深入研究。

Mole 等[18]曾给出湍流场中扩散标量（污染物）陡峭度与偏斜度的关系

$$K = AS^2 + B \tag{4}$$

其中 $A$ 和 $B$ 是拟合参数。由于描述湍流现象的方程是不封闭的，概率分布函数及其各阶矩变化的控制方程也很难求解。而且由于没有足够的观测资料，难以确定这些方程的近似解是否正确。因此，用固定点的观测结果来验证式（4）是非常重要的。Schopflocher 等[19]用实验数据分析得到点源扩散时的陡峭度与偏斜度的关系符合式（4）。Lewis 等[20]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满足式（4）。关于两个参数的值，不同的作者得出不同的结果，普遍认为 $K \geqslant S^2+1$。

3 组数据中，二氧化碳、水汽和温度符合指数分布，它们的垂直通量概率分布尾部变化缓慢，与 Lewis 等分析的概率分布特征一致，因此，本文也用式（4）拟合 3 组资料的偏斜度和陡峭度的关系，结果如图 4 所示（图中公式是各个标量拟合直线的表达式）。与其他作者得到的结果相似，所有拟合直线的斜率和截距都大于 1。而且，不同下垫面不同稳定性条件下，不同标量拟合结果之间存在很大差异。其中，白洋淀地区陆地上的这组资料（b 组）拟合直线

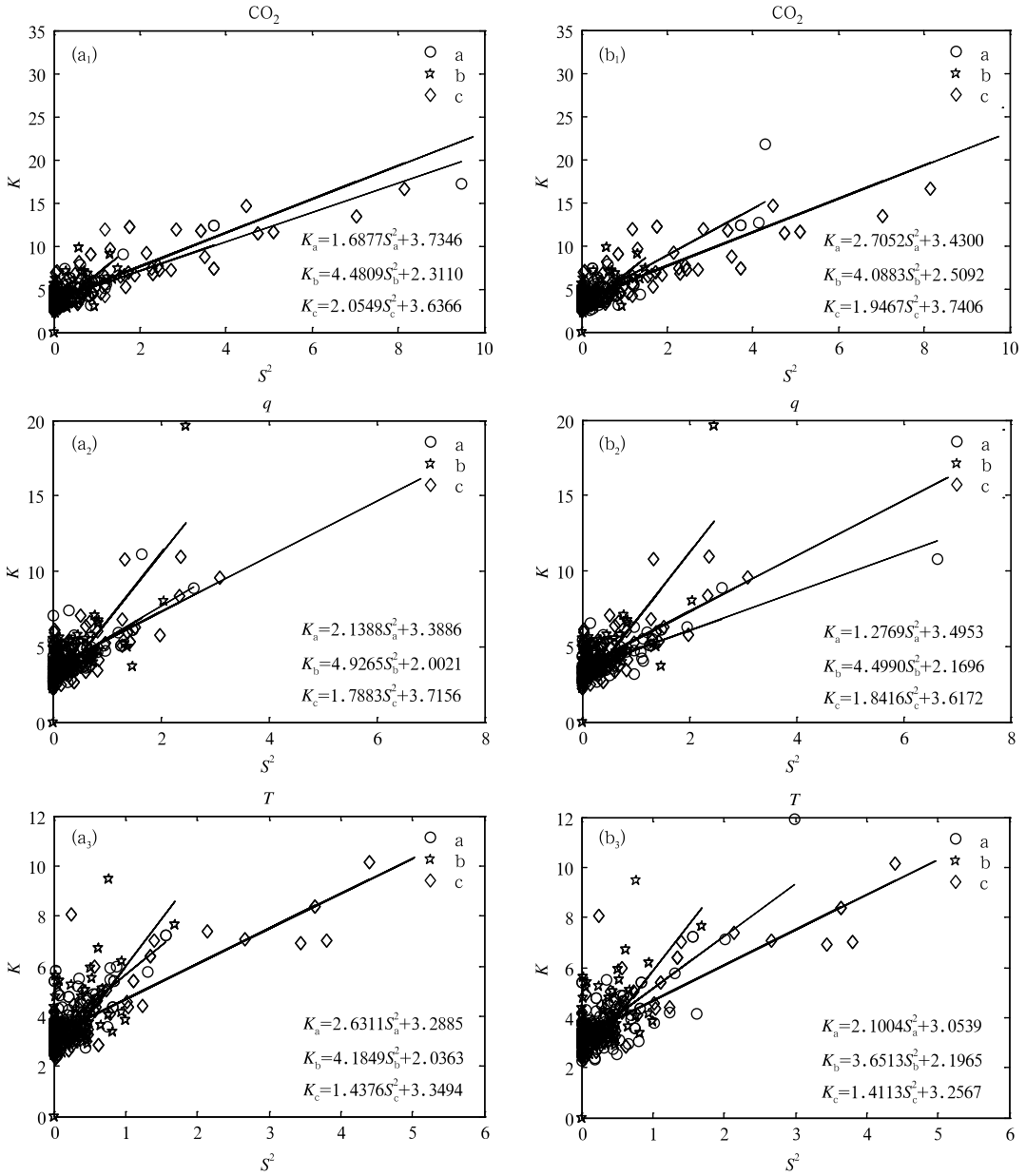


图 4 稳定(a)和不稳定(b)条件下 3 组资料 3 个标量的陡峭度 $K$ 和偏斜度的平方 $S^2$ 关系图

($a_1$,$b_1$. $CO_2$; $a_2$,$b_2$. $q$; $a_3$,$b_3$. $T$)

Fig. 4 Relationships between $K$ and $S^2$ of three scalarsfor three sets of data understable (a) and unstable (b) conditions

($a_1$,$b_1$. $CO_2$; $a_2$,$b_2$. $q$; $a_3$,$b_3$. $T$)

的斜率最大,均大于 4,而截距最小,均小于 3。白洋淀地区水上(a 组)和气象塔(c 组)两组资料拟合直线的斜率都小于 3,截距都大于 3。

## 4 结 论

利用 2004 年冬季在白洋淀地区获得的观测资料和中国科学院大气物理研究所北京 325 m 气象塔的观测资料,分析了大气边界层标量场(温度、水汽和二氧化碳)的概率分布和统计特征,结论如下

大气边界层湍流标量场的概率分布与速度场的概率分布不同,具有非高斯分布特性,可以用指数分布来描述。

二氧化碳、水汽和温度及其通量的平均陡峭度和偏斜度反应了标量场与稳定性、下垫面、天气条件、源汇等因素之间的关系以及标量场的结构特征。而且,3 个标量的陡峭度和偏斜度之间也呈平方关系。因此研究偏斜度和陡峭度的变化可以加深对标量统计特性的理解,从而可以更好地描述标量运动特征,为改善和建立更加合理的湍流模型或参数化方案提供科学参考。

标量场概率分布的偏斜与标量的相干结构和间歇性有关。其中,相干结构会使概率分布不对称,但对偏斜度的贡献不大;而标量的间歇性,即标量时间序列中的极值,会使偏斜度大大增加。由于标量通量中经常出现这种极值,间歇性比较强,所以这也解释了为什么标量通量的偏斜度和陡峭度往往比标量本身大。

## 参考文献


[1] Shraiman B I, Siggia E D. Scalar turbulence. Nature, 2000, 405: 639-646

[2] Castaing B, Gunaratne G, Heslot F, et al. Scaling of hard thermal turbulence in Rayleigh-Bénard convection. J Fluid Mech, 1989, 204: 1-30

[3] Ching E S C. Probability density of turbulent temperature fluctuations. Phys Rev Lett, 1993, 70(3): 283-286

[4] Pope S B, Ching E S C. Stationary probability density functions: an exact result. Phys Fluids A, 1993, 5(7): 1529-1531

[5] 胡非. 湍流、间歇性和大气边界层. 北京:科学出版社,1995: 288pp

[6] 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

[7] Katul G G. A model for sensible heat flux probability density function for near-neutral and slightly-stable atmospheric flows. Bound Layer Meteor, 1994, 71: 1-20

[8] 胡非,程雪玲,赵松年等. 城市冠层中温度脉动的硬湍流特性和相似性级串模型. 中国科学 D 辑,2005,35(增刊):66-72

[9] Kailasnath P, Sreenivasan R, Stolovitzy G. Probability density of velocity increments in turbulent flows. Phys Rev Lett, 1992, 68(18): 2766-2769

[10] Katul G G, Parlange M B, Chu C R. Intermittency, local isotropy, and non-Gaussian statistics in atmospheric surface layer turbulence. Phys Fluids A, 1994, 6(7): 2480-2492

[11] Krehlich R, Meillier Y, Jensen M L, et al. A statistical description of small-scale turbulence in the low-level nocturnal jet. J Atoms Sci, 2004, 61: 1079-1085

[12] 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

[13] Derksen R W, Sullivan P J. Moment approximations for probability density functions. Combust Flame, 1990, 81: 378-391

[14] 陈红岩. 大气边界层湍流输送特性与相干结构研究[D]. 北京:中国科学院大气物理研究所,1999: 142pp

[15] Jacobs A F G, Wiel B J H, Holtslag A A M. Daily course of skewness and kurtosis within and above a crop canopy. Agric For Meteor, 2001, 110: 71-84

[16] Peteno I V, Bezverhnii V A. Temporal scales of convective coherent structures derived from sodar data. Meteor Atmos Phys, 1999, 71: 105-116

[17] Peteno I V. Advanced combination of spectral and wavelet analysis ('spavelet' analysis). Bound Layer Meteor, 2001, 100: 287-299

[18] Mole N, Clare L. Relationships between higher moments of concentration and of dose in turbulent dispersion. Bound Layer Meteor, 1995, 73: 35-52

[19] Schopflocher T P, Sullivan P J. The relationship between skewness and kurtosis of a diffusing scalar. Bound Layer Meteor, 2005, 115: 341-358

[20] Lewis D M, Chatwin P C, Mole N. Inverstigation of the collapse of the skewness and kurtosis exhibited in atmospheric dispersion data. Il Nuovo Cimento, 1997, 20:385-397

# ANALYSES OF PROBABILITY DISTRIBUTION AND ITS STATISTICAL CHARACTERS OF TURBULENT SCALARS IN ATMOSPHERIC BOUNDARY LAYER

Quan Lihong Hu Fei Cheng Xueling

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

**Abstract**

With the three sets of data collected by the ultrasonic anemometers (UAT-II) and infrared gas analyzers (Licor 7500) on the towers at the land (land overlying surface) and island (water body overlying surface) in the Baiyangdian region in November 2004, and on a beam at the 47 m level of the Beijing 325 meter meteorological tower of the Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences (urban overlying surface), probability distributions of three turbulent scalars (temperature, water vapor and carbon dioxide) over the different characteristic overlying surfaces in the atmospheric boundary layer and their characteristics are analyzed. Probability distributions of temperature, water vapor and carbon dioxide are usually different from Gaussian distribution. In fact, they are skew, steep in middle and long tailed in both ends in most cases, each side of which can be described by exponential distribution. Therefore, the skewness of the three scalars is often not zero and the kurtosis of them is often larger than 3. From the point of view of structures in turbulent time series, non-zero skewness could result from coherent structures and intermittency in scalar time series. Though coherent structures in scalar time series can make probability distributions skew due to their asymmetry, they contribute a little to skewness; while the intermittency related to long tails of probability distributions can increase the skewness a lot. It is in the same way to kurtosis for intermittency. Since scalar fluxes are much more intermittent than scalars themselves, the skewness and kurtosis of scalar fluxes are larger than those of scalars themselves. From the point of view of atmospheric motion, variations of skewness and kurtosis of scalars and their fluxes are complicated due to various mechanical and thermal factors in the atmosphere. On average, the skewness and kurtosis of temperature, water vapor, carbon dioxide and their fluxes describe the relationship of the scalars with stability, overlying surface, weather condition, sources and sinks, etc. The relationships of skewnesses of temperature and sensible heat fluxes with stability are similar over various overlying surfaces, and the skewness is positive under unstable condition and negative under stable condition. That is to say, the skewness of temperature change mainly with stability, and the influence of overlying surface is not very important. The skewness of water vapor fluxes are positive in both stable and unstable conditions, while the skewness of water vapor itself can be either positive or negative in unstable condition, which means that other factors may affect the motion of water vapor, such as transportation of horizontal wind caused by different overlying surfaces. The relationships of the skewnesses of carbon dioxide and carbon dioxide fluxes with stability are more complicated due to the significant influence of overlying surfaces and sources, especially, human behavior. Kurtosises of three scalars change insignificantly with stability, and they are functions of corresponding skewnesses squared, i. e. $K=AS^2+B$. In general, the kurtosis of carbon dioxide is larger than that of water vapor, and the kurtosis of temperature is the smallest.

**Key words**: Atmospheric turbulence, Atmospheric boundary layer, Probability distribution.