

刘磊, 胡非, 程雪玲. 2012. 夜间稳定边界层中间歇性湍流热通量的提取及其谱特征 [J]. 大气科学, 36 (6): 1280–1288, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2012.12065. Liu Lei, Hu Fei, Cheng Xueling. 2012. Extraction of intermittent turbulent heat fluxes and their spectrum characteristics in the nocturnal stable boundary layer [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 36 (6): 1280–1288.

夜间稳定边界层中间歇性湍流热通量的 提取及其谱特征

刘磊 胡非 程雪玲

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 在夜间稳定边界层中, 湍流热通量往往具有间歇性特征。在一阵阵出现的强度较大的湍流热通量之间, 混杂着弱噪声或其他微弱的难以辨识的高频脉动信号。为了研究间歇性湍流热通量的特征, 必须将这些无关信号剔除, 以提取出干净的湍流热通量。本文提出了一种新的提取间歇性湍流热通量的方法, 该方法通过分析湍流热通量的概率密度函数, 并与稳定分布进行比较, 湍流热通量的概率密度函数开始偏离稳定分布的位置, 即是间歇性湍流热通量开始出现的阈值。本文通过夜间稳定边界层外场试验数据的验证, 发现利用稳定分布确定的阈值可有效地提取出间歇性湍流热通量。在此基础之上, 本文对比了提取前后湍流热通量的功率谱, 发现提取后低频信号的方差所占比重下降, 而高频信号略有上升。此外, 间歇性湍流热通量在高频区的功率谱满足“ $-7/6$ ”律。

关键词 夜间边界层 湍流热通量 间歇性 稳定分布 功率谱

文章编号 1006-9895(2012)06-1280-09

中图分类号 P425

文献标识码 A

doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2012.12065

Extraction of Intermittent Turbulent Heat Fluxes and Their Spectrum Characteristics in the Nocturnal Stable Boundary Layer

LIU Lei, HU Fei, and CHENG Xueling

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

Abstract In the nocturnal stable boundary layer, turbulent heat fluxes are not continuous but rather intermittent. Intermittent heat fluxes are characterized by brief episodes of turbulent heat flux with intervening periods of relatively weak noise or immeasurably small fluctuations. Their characteristics should be studied by extracting them from experimental data with weak noise and other small fluctuations. In this paper, we propose a new method of extracting intermittent heat fluxes. In this method, the probability density function of intermittent turbulent fluxes is analyzed and compared with the stable distributions. A threshold is defined by the position at which the probability density function begins to deviate from the stable distribution. We find that intermittent turbulent heat fluxes can be effectively extracted from experimental data. On the basis of our results, we compare the power spectra of turbulent heat fluxes before and after extraction. We found that after extraction, the proportion of variance of the low-frequency signal decreases, but that of the high-frequency

收稿日期 2012-04-19, 2012-06-7 收修定稿

资助项目 国家自然科学基金资助项目 41105005, 国家重点基础研究发展计划资助项目 2010CB951804, 国家科技支撑计划资助项目 2008BAC37B02

作者简介 刘磊, 男, 1981 年出生, 助理研究员, 主要从事大气边界层物理和湍流理论方面的研究。E-mail: liulei@mail.iap.ac.cn

通讯作者 胡非, E-mail: hufei@mail.iap.ac.cn

signal increases slightly. In addition, the power spectra follow a $-7/6$ power law at higher frequencies.

Key words nocturnal stable boundary layer, intermittent turbulent heat flux, stable distribution, power spectrum

1 引言

间歇性湍流是一阵阵出现的高强度湍流, 在高强度湍流之间, 则是弱噪声或其他难以辨识的微弱高频脉动信号。大气湍流速度、湍流通量、湍流动能以及耗散率, 均可表现出间歇性特征 (Coulter, 1990)。间歇性湍流往往出现在晴空、微风的夜间稳定边界层中。当稳定度较低时, 只有在边界层顶部才会出现间歇性湍流。随着稳定度的增加, 间歇性湍流会逐步向边界层底部发展 (Holtslag and Nieuwstadt, 1986)。此外, 间歇性湍流的发生频率随高度的增加而减少 (Nakamura and Mahrt, 2005)。

湍流热通量反映了地表与大气之间以及大气层结间的热量交换特征, 是研究海气、陆气和大气层结之间相互作用的重要物理量。间歇性湍流热通量的研究, 对改进大气数值模式中地表湍流参数化方案具有重要意义。在一些大气数值模式中, 地表湍流热通量的参数化方案通常采用拖曳系数法 (赵鸣, 2006)。研究表明, 这种参数化方案, 在强稳定条件下模拟得到的地表通量比实际观测值小 (van de Wiel et al., 2002)。如果地表向下传递的热通量估计过小, 地表会比实际情况冷却更快, 大气层结更加稳定, 湍流向下传递的感热热通量会更小。上述过程一直持续下去, 直到地表辐射冷却与大气向下的长波辐射平衡, 边界层内的湍流消失。此时, 模式模拟得到的地表温度会比实际温度低许多。拖曳系数法中的地表湍流热通量参数化方案, 未能反映稳定边界层中间歇性湍流热通量的贡献, 这是模拟与观测不符的原因之一 (Mahrt, 1998)。

在利用外场试验资料分析间歇性湍流的特征时, 需要将间歇性出现的强湍流信号与夹杂其间的弱噪声或其它微弱的高频脉动信号区分开。象限法是较为常用的提取间歇性湍流信号的一种方法 (Nappo, 1991; Duncan and Schuepp, 1992; Doran, 2004)。这种方法认为强度超过某一阈值的湍流信号是间歇性湍流。然而, 阈值的选取存在很大的人为性, 不同研究者选取阈值的方式也不相同。例如提取间歇性湍流热通量时, 有研究者将阈值设为整个夜晚平均通量的 10% (Nappo, 1991) 或取为 0.015

K m s^{-1} (Doran, 2004), 也有研究者认为选取的阈值应该使得提取出的间歇性湍流通量占总湍流通量的 50% (Coulter and Doran, 2002)。阈值选取中的人为因素会影响分析结果的客观性。为了避免这个缺陷, Katul et al. (1994) 提出了一种确定阈值的方案。该方案认为间歇性强湍流与弱噪声或微弱的高频脉动信号之间的统计特征不同, 后者满足高斯分布。因此, 通过分析试验资料的概率密度函数, 与高斯分布进行比较, 找出概率密度函数开始偏离高斯分布的位置, 即为判别间歇性湍流热通量是否出现的阈值。

本文研究发现, 弱噪声或微弱的高频脉动信号往往不满足高斯分布, 而是满足一类称为稳定分布的分布, 高斯分布只是这类分布的特例。因此, 本文将利用稳定分布来确定阈值, 并用于提取间歇性湍流热通量。此外, 本文还对比了提取前后湍流热通量的功率谱, 发现提取后低频信号的方差占总方差的比重下降, 而高频信号略有上升。在高频区, 间歇性湍流热通量的功率谱满足 “ $-7/6$ ” 律。

2 间歇性湍流热通量的提取方案

为了克服象限法人为选取阈值的缺陷, Katul et al. (1994) 设计了一种确定阈值的方案。该方案的基本思想是: 如果间歇性湍流与夹杂其间的弱噪声或高频脉动信号之间的物理机制不同, 那么两者之间的统计分布也会不同。受仪器分辨率的限制, 微弱的高频脉动信号往往与观测噪声混杂在一起, 难以辨识。Katul et al. (1994) 认为这些难以辨识的高频信号或弱噪声, 只对湍流热通量概率密度函数的中心区域有贡献, 并且满足高斯分布。此外, 间歇性出现的强湍流通量只对概率密度函数的尾部有贡献。因此, 通过分析湍流通量的概率密度函数, 并与高斯分布进行比较, 找出概率密度函数开始偏离高斯分布的位置, 设为阈值。绝对值大于阈值的湍流热通量认为是间歇性湍流热通量。

认为弱噪声或微弱的高频脉动信号满足高斯分布的理论依据是中心极限定理和高斯分布的线性变换不变性。中心极限定理认为, 将多个方差有限的独立同分布随机变量相加, 其和分布趋近于高斯分布 (盛骤等, 2001)。产生弱噪声或微弱高频

信号的因素有多种, 如果认为每种因素的作用是独立的并且统计特征相同, 根据中心极限定理, 这些因素叠加作用产生的信号满足高斯分布。线性变换不变性指的是将多个独立的具有相同高斯分布的随机变量进行线性组合, 组合后的随机变量仍然满足高斯分布。将弱噪声或者微弱的高频信号进行线

性叠加, 如果这些信号具有相同的高斯分布, 叠加后的信号也必然满足高斯分布。

本文通过外场试验数据的分析, 发现湍流热通量概率密度函数的中心区域, 往往不满足高斯分布, 但是满足一类称为稳定分布的分布(图 1)。实际上, 如果去掉中心极限定理中方差有限的限制, 多

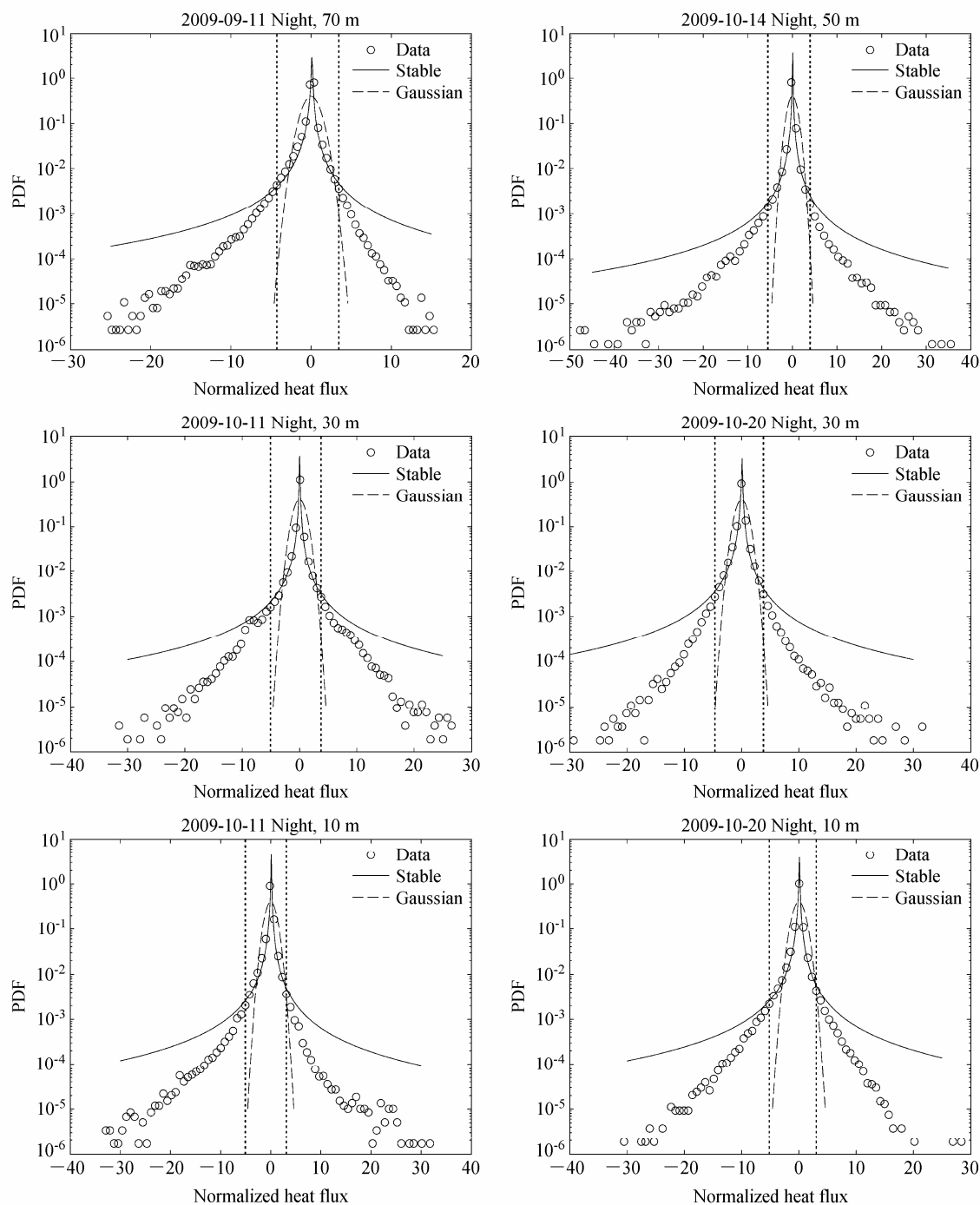


图 1 湍流热通量的概率密度函数 (PDF)。圆圈: 试验数据的概率密度函数; 实线: 稳定分布; 虚线: 均值为 0, 方差为 1 的高斯分布; 点线: 数据点开始偏离稳定分布的位置

Fig. 1 Probability density functions (PDFs) of turbulent heat fluxes. Circles: PDFs of experimental data; solid lines: PDFs of stable distributions; dashed lines: normal distributions; dotted lines: the positions where data begin to deviate from stable distributions

个独立同分布随机变量的和分布仍会趋近于一类分布, 这类分布就是稳定分布 (Uchaikin and Zolotarev, 1999)。显然, 高斯分布是稳定分布在方差有限情况下的特例。与高斯分布一样, 稳定分布也具有线性变换不变性, 保证了满足相同稳定分布的随机信号线性叠加后仍然满足该稳定分布。

除少数几种情况外, 稳定分布本身没有解析的概率密度函数形式, 然而将概率密度函数经过傅里叶变换后得到的特征函数却具有解析形式 (Uchaikin and Zolotarev, 1999):

$$\ln \Phi(k) = \begin{cases} -\gamma^\alpha |k|^\alpha \left[1 - i\beta \tan\left(\frac{\pi\alpha}{2}\right) (\text{sign } k) \right] + i\delta k & \alpha \neq 1 \\ -\gamma |k| \left[1 + i\beta \frac{2}{\pi} (\text{sign } k) \ln |k| \right] + i\delta k & \alpha = 1 \end{cases}, \quad (1)$$

其中, $\Phi(k)$ 是稳定分布的特征函数, 参数 β 和 α 称为形状参数, 且有 $\alpha \in (0, 2]$, $\beta \in [-1, 1]$, γ 称为尺度参数, δ 称为位置参数, 且有 $\gamma \in [0, \infty)$, $\delta \in (-\infty, \infty)$ 。当 $\alpha = 2$ 时, 稳定分布就是均值为 δ , 方差为 $2\gamma^2$ 的高斯分布。当 $\alpha \neq 2$ 时, 稳定分布的方差发散, 且当 $\alpha \leq 1$ 时, 稳定分布的平均值发散。稳定分布可用来描述自然和社会科学领域广泛存在的复杂性随机现象, 例如股票价格的波动 (Mantegna and Stanley, 2000)、高能物理中强子的碎裂分布 (Liu and Meng, 2004) 以及大气湍流的风速脉动 (Liu et al., 2010, 2011) 等。本文将利用稳定分布取代高斯分布来确定提取间歇性湍流热通量的阈值, 具体分析步骤如下:

第一步: 设 $w'T'_v$ 是垂直湍流热通量, 按下述方式进行归一化处理:

$$x = \frac{w'T'_v - \overline{w'T'_v}}{\sigma_{w'T'_v}}, \quad (2)$$

其中, x 是归一化后的湍流热通量, $\overline{w'T'_v}$ 是平均湍流热通量, $\sigma_{w'T'_v}$ 是湍流热通量的方差;

第二步: 计算归一化热通量的概率密度函数, 并与稳定分布进行比较。找出热通量概率密度函数的尾部开始偏离稳定分布的位置, 记为 $H_{\pm}$ (正号表示右尾的偏离值, 负号表示左尾的偏离值)。因此, 提取间歇性热通量的阈值为:

$$H_{c\pm} = \sigma_{w'T'_v} H_{\pm} + \overline{w'T'_v}. \quad (3)$$

第三步: 满足 $w'T'_v > H_{c+}$ 以及 $w'T'_v < H_{c-}$ 的通量认为是间歇性湍流热通量。

3 实验数据

本文分析的数据来自中国气象局国家气候中心主持开展的锡林浩特草原地区边界层梯度观测试验。试验场地位于锡林浩特市东北约 30 公里, 是典型的均匀平坦草原下垫面。试验设置了两座 70 m 高的观测塔和一座 100 m 高的观测塔。其中, 100 m 高的观测塔配备了四层湍流观测仪器 (分别是 10 m、30 m、50 m 和 70 m), 用于观测湍流风速、温度、水汽和二氧化碳脉动。测量水汽和二氧化碳脉动的仪器是 LICOR7500 型水汽和二氧化碳脉动观测仪, 观测频率是 20 Hz。测量湍流风速脉动的仪器是 Campbell CSAT-3 型超声风速温度仪, 观测频率也是 20 Hz。本文所用的数据来自 CSAT-3 型超声风速温度仪, 其主要性能参数如表 1 所示, 更为详细的性能参数可参看 Campbell Scientific 网站上的技术报告 (<http://www.campbellsci.com/csats3> [2012-06-05])。

表 1 Campbell CSAT-3 型超声风速仪的主要性能参数

Table 1 Parameters of Campbell CSAT-3 sonic anemometer

性能	规格
输出	水平风速 (u, v)、垂直风速 (w)、声速 (C)
测量频率	20 Hz
分辨率	u, v 为 1 mm/s, w 为 0.5 mm/s, C 为 15 mm/s (0.025%)
偏置误差	$<\pm 8.0$ cm/s (u, v), $<\pm 4.0$ cm/s (w)
输出范围	± 30 m/s (u), ± 60 m/s (v), $300 \sim 366$ m/s (C , $-50^\circ\text{C} \sim +60^\circ\text{C}$)

为了检验新方案的提取效果, 本文随机挑选了六组 100 m 塔上的湍流垂直风速和温度观测资料进行分析, 分别是 2009 年 10 月 11 日夜间 10 m 和 30 m 高的观测资料、2009 年 10 月 20 日夜间 10 m 和 30 m 高的观测资料、2009 年 10 月 14 日夜间 50 m 高的观测资料以及 2009 年 9 月 11 日夜间 70 m 高的观测资料。夜间指的是当日 20:00 至次日凌晨 06:00 共 10 个小时的连续观测时段。随机选取的六组观测资料处于不同的观测时间和观测高度, 这有助于检验新方案的提取效果是否与观测时间和观测高度有关。

4 间歇性湍流热通量的提取结果

根据涡动相关法, 利用超声风温资料计算湍流热通量, 首先要对观测到的垂直风速 w 和温度 T_v 分别进行分段雷诺平均, 以求出两者的湍流脉动量 w' 和 T'_v , 然后将脉动量相乘, 得到湍流热通量 $w'T'_v$ 。

(Stull, 1988)。雷诺平均时间的长短会影响湍流通量的大小。过短的雷诺平均时间会过滤掉部分湍流热通量信号，而过长的雷诺平均时间又会混入中尺度信号的影响，并导致通量采样的随机误差增大。按 Howell and Sun (1998) 的建议，本文所用的雷诺平均时间为 5 min。

按照第二节介绍的提取间歇性湍流热通量步骤，首先将湍流热通量进行归一化处理，并求出归一化后湍流热通量的概率密度函数，如图 1 所示。利用极大似然法，估计稳定分布的形状参数 α 和 β 、尺度参数 γ 和 δ (表 2)。将稳定分布与湍流热通量的概率密度函数和高斯分布进行比较，结果表明，六组数据的概率密度函数，在中心区域均不满足高斯分布，但能较好地与非高斯的稳定分布拟合。稳定分布的形状参数 α 多集中在 0.7 附近，与高斯分布 ($\alpha=2$) 相差较大。 β 值较小，且均小于 0，说明热通量的中心分布略微向左偏斜。数据开始偏离稳定分布的位置即为阈值 $H_{\pm}$ ，如图 1 点线所示。可以看出，如果选用高斯分布，挑选出来的阈值往往过小，特别是对于向下的热通量，差别较为明显。

表 2 稳定分布的参数及提取间歇性湍流热通量的阈值
Table 2 Parameters of stable distributions and thresholds for extracting intermittent turbulent heat fluxes

观测 时间	观测 高度/m	α	β	γ	δ	H_+	H_-	H_{c+} (K m s ⁻¹)	H_{c-} (K m s ⁻¹)
09-11	70	0.75	-0.14	0.10	0.16	3.47	-4.25	0.16	-0.21
10-14	50	0.70	-0.11	0.05	0.08	3.97	-5.51	0.16	-0.22
10-20	30	0.76	-0.13	0.11	0.11	3.81	-4.67	0.11	-0.18
10-20	10	0.76	-0.09	0.09	0.10	3.03	-5.16	0.16	-0.28
10-11	30	0.67	-0.06	0.05	0.04	3.76	-5.05	0.15	-0.20
10-11	10	0.75	-0.13	0.08	0.13	3.12	-5.06	0.15	-0.20

确定阈值后，保留绝对值大于阈值的通量，将绝对值小于阈值的通量设为 0 K m s⁻¹，提取效果如图 2 所示。结果表明，本文所采用的提取方案可提取出具有明显间歇性特征的湍流热通量。此外，对于本文所分析的六组试验数据，间歇性湍流热通量出现的时间虽然只占整个夜晚的 0.7%~1.2%，并且整个夜晚的平均湍流热通量也非常小，然而瞬时出现的间歇性湍流热通量强度可达到平均通量的 100 倍之多。因此，在数值模式中不能忽略间歇性湍流在短时间内输送大量热量的能力。

5 间歇性湍流热通量的谱特征

在大气边界层研究中，常利用协谱分析通量的频率特征。然而，本文仍将利用功率谱来分析间歇性湍流热通量的频率特征，原因如下：其一，协谱在全频域的积分等于平均湍流热通量 (Kaimal and Finnigan, 1994)。然而，平均湍流热通量不足以反映间歇性湍流的强度特征。无论间歇性湍流强度有多大，整个夜晚的平均湍流热通量仍可能很小。功率谱在全频域的积分等于湍流热通量的方差。相比于平均量，方差更能反映间歇性湍流的强度特征。相应地，相比于协谱，功率谱能更好地描述间歇性湍流的频率特征。其二，计算热通量协谱，需要确定垂直速度和温度脉动的时间序列。在提取后的湍流热通量时间序列中，非间歇时间段内的热通量设为 0 K m s⁻¹ (如图 2 所示)。与之相对应的速度脉动可以是 0 m/s，温度脉动可以是任何值，或者温度脉动是 0 K，速度脉动可以是任何值。所以，无法确定非间歇时间段内垂直速度和温度脉动的时间序列，从而也就无法计算间歇性湍流热通量的协谱。

图 3 比较了提取前后湍流热通量的功率谱，纵轴 $A_{w'T'}$ 表示具有某一频率的湍流热通量的方差占总湍流热通量方差的比重，即：

$$A_{w'T'} = \frac{\Delta f \times S_{w'T'_v}(f)}{(w'T'_v)^2}, \quad (4)$$

其中， $S_{w'T'_v}$ 是湍流热通量的功率谱， $\overline{(w'T'_v)^2}$ 是湍流热通量的方差， Δf 是功率谱的频率间隔。结果表明，提取后低频信号 ($f < 10^{-3}$ Hz) 的方差所占比重下降。功率谱的低频成分，反映了湍流热通量在小时尺度上有时无的间歇性波动特征。提取过程滤掉了这种间歇性波动中强度较弱 (含有弱噪声或微弱高频信号) 的部分，这可能是导致低频信号方差所占比重下降的原因。此外，提取后高频信号 ($f > 1$ Hz) 的方差所占比重略有上升。比较提取前后的时间序列，可以发现原来通量连续不为零值的时间段内出现了许多零值，从而产生了许多高频的间歇性波动，这可能是导致高频信号方差所占比重上升的原因。

研究表明，惯性子区内 (高频部分) 的湍流热通量协谱满足 “-7/3” 律 (Wyngaard and Coté, 1972; Kaimal and Finnigan, 1994)：

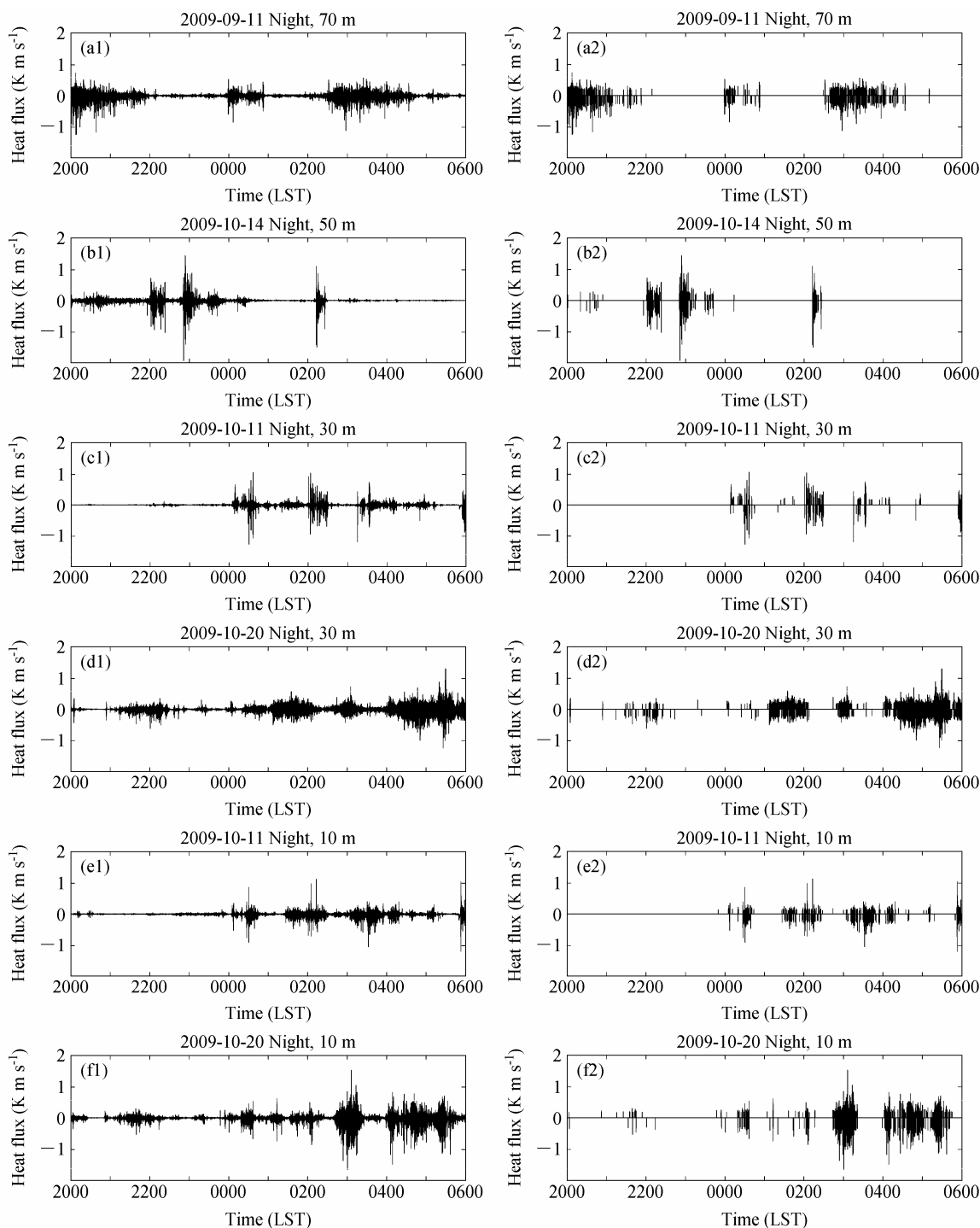


图2 间歇性湍流热通量的提取。(a1、b1、c1、d1、e1、f1) 提取前的湍流热通量；(a2、b2、c2、d2、e2、f2) 相应的提取后的间歇性湍流热通量
Fig. 2 Extraction of intermittent turbulent heat fluxes. (a1, b1, c1, d1, e1, f1) Turbulent heat fluxes before extraction; (a2, b2, c2, d2, e2, f2) intermittent turbulent heat fluxes after extraction

$$Co_{w'T_v}(f) \sim f^{-7/3}. \quad (5)$$

根据量纲分析，惯性子区内的湍流热通量功率谱应满足“ $-7/6$ ”律：

$$S_{w'T_v}(f) \sim f^{-7/6}. \quad (6)$$

图4是提取前后热通量功率的高频部分与

“ $-7/6$ ”律的比较，纵轴 $A_{w'T}$ 表示具有某一频率的湍流热通量的方差占总湍流热通量方差的比重，其定义见(4)式。结果表明，提取前后的高频部分均近似满足“ $-7/6$ ”律，但是提取后的数据离散程度以及偏离“ $-7/6$ ”律的程度较低。

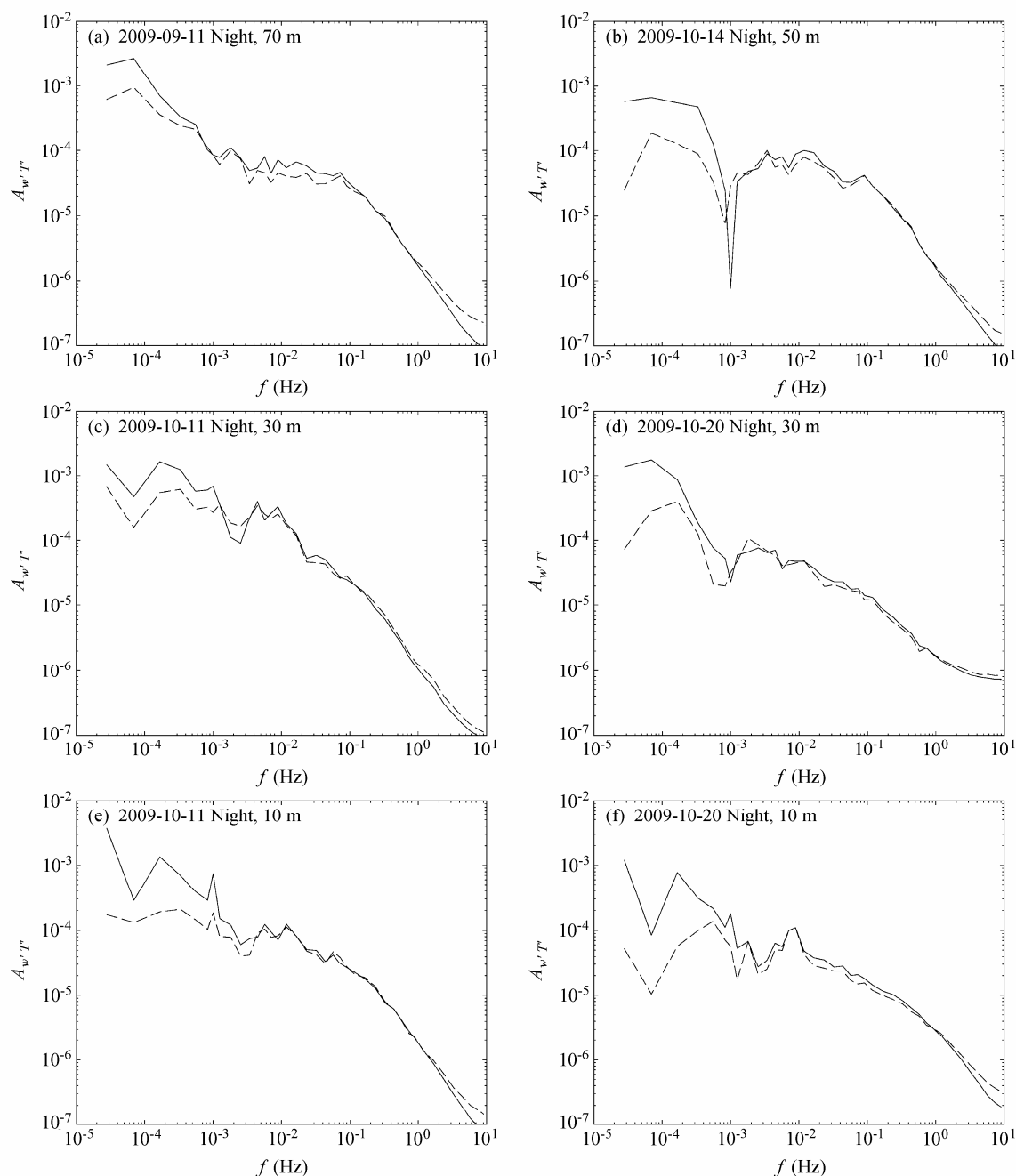


图3 提取前后湍流热通量的功率谱。(a-f) 分别是2009年9月11日晚70 m高处、10月14日晚50 m高处、10月11日晚、10月20日晚30 m高处以及10月11日晚、10月20日晚10 m高处观测数据的功率谱。实线: 提取前的功率谱; 虚线: 提取后的功率谱

Fig. 3 Power spectra of turbulent heat fluxes before (solid lines) and after extraction (dashed lines) at (a) 70 m on 11 Sep, (b) 50 m on 14 Oct, (c) 30 m on 11 Oct, (d) 30 m on 20 Oct, (e) 10 m on 11 Oct, and (f) 10 m on 20 Oct

6 结论

本文提出了一种新的提取稳定边界层间歇性湍流热通量的方案。不同于已有的提取方案, 新方案利用稳定分布取代高斯分布来拟合热通量概率密度函数的中心区域, 找出概率密度函数开始偏离高斯分布的位置, 进而得到判别间歇性湍流热通量

是否出现的阈值。用稳定分布取代高斯分布的原因是: 其一, 湍流热通量概率密度函数的中心区域往往不能用高斯分布拟合, 从而也就无法准确判定数据开始偏离高斯分布的位置。其二, 去掉中心极限定理中方差有限的限制, 多个独立同分布的随机变量的和分布会趋近于稳定分布。因此, 稳定分布是比高斯分布更为广泛的一类极限分布, 后者是前者

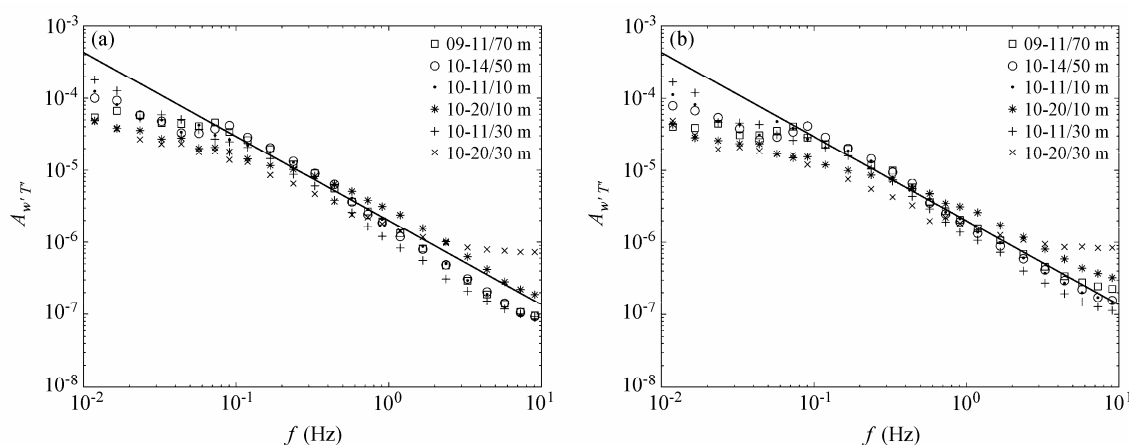


图4 提取前后湍流热通量的功率谱与“-7/6”律的比较。(a)提取前的功率谱;(b)提取后的功率谱。在双对数坐标中,实线的斜率是-7/6
Fig. 4 Comparison “-7/6” law with power spectra of turbulent heat fluxes before (a) and after extraction (b). Slope of solid lines is -7/6 in log-log plot

取某些特定参数时的特例。本文通过外场试验数据的验证,发现新方案可有效地提取出间歇性湍流热通量。在此基础上,本文对比了提取前后湍流热通量的功率谱,发现提取后低频信号的方差所占比重大下降,而高频信号略有上升。此外,间歇性湍流热通量在高频区的功率谱满足“-7/6”律。

尽管稳定分布的应用比高斯分布广泛,然而也存在一些稳定分布不能拟合的情况。这可能是数据受到大尺度天气过程或局地稳定度等因素的影响。因此,在以后的研究中,有必要对热通量的概率密度函数按天气过程、稳定度以及地表粗糙度等指标进行聚类分析,找出每种情况下可用于拟合的概率密度形式。此外,对于湍流热通量的概率密度函数偏离稳定分布的物理原因也可进行深入地研究,这将有助于拓展对间歇性湍流的认识。

致谢 感谢中国科学院大气物理研究所曾庆存院士提出的宝贵意见。感谢中国气象局公共气象服务中心朱蓉研究员在数据方面提供的支持和帮助。感谢 John P. Nolan 教授提供的稳定分布计算程序,该程序可在 <http://academic2.american.edu/~jpnolan/> [2012-06-05]下载

参考文献 (References)

- Coulter R L. 1990. A case study of turbulence in the stable nocturnal boundary layer [J]. *Bound-Layer Meteor.*, 52: 75–91.
- Coulter R L, Doran J C. 2002. Spatial and temporal occurrences of intermittent turbulence during CASES-99 [J]. *Bound-Layer Meteor.*, 105: 329–349.
- Doran J C. 2004. Characteristics of intermittent turbulent temperature fluxes in stable conditions [J]. *Bound-Layer Meteor.*, 112: 241–255.
- Duncan M R, Schuepp P H. 1992. A method to delineate extreme structures within airborne flux traces over the FIFE site [J]. *J. Geophys. Res.*, 97:

- 18487–18498.
- Holtslag A A M, Nieuwstadt F T M. 1986. Scaling the atmospheric boundary layer [J]. *Bound-Layer Meteor.*, 36: 201–209.
- Howell J F, Sun J. 1998. Surface-layer fluxes in stable conditions [J]. *Bound-Layer Meteor.*, 90: 495–520.
- Kaimal J C, Finnigan J J. 1994. *Atmospheric Boundary Layer Flows: Their Structure and Measurement* [M]. New York and Oxford: Oxford University Press, 289pp.
- Katul G G, Albertson J, Parlange M, et al. 1994. Conditional sampling, bursting, and the intermittent structure of sensible heat flux [J]. *J. Geophys. Res.*, 99: 22869–22876.
- Liu Q, Meng T C. 2004. Fluctuation studies at the subnuclear level of matter: Evidence for stability, stationarity and scaling [J]. *Phys. Rev. D*, 69: 054026.
- Liu L, Hu F, Cheng X L, et al. 2010. Probability density functions of velocity increments in the atmospheric boundary layer [J]. *Bound-Layer Meteor.*, 134: 243–255.
- Liu L, Hu F, Cheng X L. 2011. Probability density functions of turbulent velocity and temperature fluctuations in the unstable atmospheric surface layer [J]. *J. Geophys. Res.*, 116: D12117.
- Mahrt L. 1998. Stratified atmospheric boundary layers and breakdown of models [J]. *Theoretical and Computational Fluid Dynamics*, 11: 247–264.
- Mantegna R N, Stanley H E. 2000. *An Introduction to Econophysics: Correlations and Complexity in Finance* [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 148pp.
- Nakamura R, Mahrt L. 2005. A study of intermittent turbulence with CASES-99 tower measurements [J]. *Bound-Layer Meteor.*, 114: 367–387.
- Nappo C J. 1991. Sporadic breakdowns of stability in the PBL over simple and complex terrain [J]. *Bound-Layer Meteor.*, 54: 69–87.
- 盛骤, 谢式千, 潘承毅. 2001. 概率论与数理统计 [M]. 北京: 高等教育出版社, 478pp. Sheng Zhou, Xie Shiqian, Pan Chengyi. 2001. *Probability Theory and Statistics (in Chinese)* [M]. Beijing: Higher Education Press, 478pp.
- Uchaikin V V, Zolotarev V M. 1999. *Chance and Stability: Stable Distributions and Their Applications* [M]. Utrecht and Tokyo: VSP, 570pp.

- Stull R B. 1988. An Introduction to Boundary Layer Meteorology [M]. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 666pp.
- Wyngaard J C, Coté O R. 1972. Cospectral similarity in the atmospheric surface layer [J]. Quart. J. Roy. Meteor. Soc., 98: 590–603.
- van de Wiel B J H, Ronda R J, Moene A F, et al. 2002. Intermittent turbulence and oscillations in the stable boundary layer over land. Part I: A bulk model [J]. J. Atmos. Sci., 59: 942–958.
- 赵鸣. 2006. 大气边界层动力学 [M]. 北京: 高等教育出版社, 350pp.
- Zhao Ming. 2006. Dynamics of Atmospheric Boundary Layer (in Chinese)[M]. Beijing: Higher Education Press, 350pp.