

大气近地层湍流能谱特征的再分析*

卞建春 乔劲松 吕达仁 P42 A

(中国科学院大气物理研究所中层大气和全球环境探测开放实验室, 北京 100029)

摘 要 根据 Kolmogorov 局地均匀性湍流假设, 大气近地层湍流能谱在惯性副区符合“-5/3 律”。但是作者通过翻阅大量文献以及实测资料分析发现, 大气近地层湍流能谱符合“-5/3 律”的频率范围比较狭窄, 而用幂函数+指数函数形式“ $fS(f) \propto f^{-a} e^{-bf}$ ”拟合更恰当一些, 这种能谱函数形式是连续时间混沌系统所特有的。利用 HEIHE 实验湍流观测资料分析结果表明, 对于径向风分量, $a=0.447$, $b=0.228$; 切向风分量: $a=0.489$, $b=0.190$; 垂直风分量: $a=0.551$, $b=0.124$; 温度: $a=0.588$, $b=0.123$ 。

关键词: 湍流; 大气近地层; 混沌系统

1 引言

一般认为大气边界层湍流运动能谱包括三个区: (1) 含能区 (即大尺度湍流), 该区内浮力和切变产生湍流动能; (2) 惯性副区 (小尺度湍流), 该区内湍流动能既不产生也不耗散, 而是传递给越来越小尺度的运动; (3) 耗散区, 该区内由于流体分子粘性的作用湍流动能转变为内能^[1]。在本文中, 我们只讨论惯性副区能谱。根据 Kolmogorov^[2,3]假设, 在 Reynolds 数足够大时存在一个高波数区, 其中湍流满足局地均匀各向同性, 湍流特性仅仅决定于湍能耗散率和分子粘性系数; 在局地各向同性区中还存在一个惯性副区, 湍流特性只由湍能耗散率决定, 其尺度 l 满足 $\eta \ll l \ll L$, 其中 η 为 Kolmogorov 耗散尺度, L 为最大涡旋的特征尺度。根据此假设, 可得到惯性副区的一维湍流能谱, 即

$$S_{S,x}(k) \propto k^{-5/3}, \quad (1)$$

这里 x 代表风速分量 (u, v, w) 或温度 (t) 等变量; k 为波数; S_S 表示波数谱, 公式 (1) 就是著名的“-5/3 律”。根据 Taylor 冻结湍流假设, 波数谱等价于频率谱, 即

$$kS_{S,x}(k) = fS_{T,x}(f),$$

从而有

$$fS_{T,x}(f) \propto f^{-2/3}, \quad (2)$$

其中 f 为频率, S_T 为频率谱。

1962 年, Kolmogorov 考虑到湍能耗散率空间分布的不均匀性^[4], 对上面的结果作了如下修正:

2000-11-07 收到, 2001-04-13 收到修改稿

* 国家自然科学基金资助项目 49790020 和中国科学院大气物理研究所创新基金共同资助

$$S_x(k) \propto k^{-5/3-\mu/9},$$

这里 μ 为间歇性参数, 实验测量值在 0.20 到 0.85 之间^[5]。可见修正项对湍流能谱的改变不大, 故下文仍采用“-5/3 律”。

1971 年, Ruelle 和 Takens 首次将湍流问题与混沌联系起来^[6]。在从拓扑动力学观点探究湍流时, 他们指出只需经过有限次 Hopf 分叉, 系统即由平庸吸引子转入混沌状态; 他们称这种状态的解为奇怪吸引子, 并且认为这就是湍流。尽管该理论还远不能算是湍流理论, 但是奇怪吸引子的混沌动态是造成至少某些湍流现象的原因, 这一思想业已确立。对于来自(连续时间)混沌系统的时间序列来说, 其功率谱在 $f \rightarrow \infty$ 时呈指数衰减, 这一观点已被普遍接受^[7]。就目前所知, 这种指数衰减($f \rightarrow \infty$)谱特征为确定性混沌所特有, 因为周期或准周期动力过程产生尖谱特征, 而噪音谱呈幂函数衰减。

由上面分析可以发现, 根据 Kolmogorov 局地均匀性假设由量纲分析得到的谱函数形式为幂函数(“-5/3 律”), 而由混沌理论得到的谱函数形式为幂函数+指数函数:

$$fS_T(f) \propto f^{-a} e^{-bf}, \quad (3)$$

其中 a 和 b 分别为幂参数和指数衰减率, Sigeti 认为 b 与系统的最大 Lyapunov 指数有关^[7], 量纲为 s 。很显然, 这两个谱函数之间存在着差异。为此我们查阅了大量文献, 尽管大多数作者认为湍流谱曲线符合 Kolmogorov 的“-5/3 律”^[8], 并在谱曲线的旁边给出了“-5/3”幂函数曲线作为参考; 但是我们仔细分析谱曲线可以发现“-5/3 律”存在的频率范围非常狭窄, 很多谱曲线更加符合幂函数+指数函数形式^[9~17]。

本文的目的就是想通过实测资料, 重新分析大气近地层湍流能谱(惯性副区)的结构特征。第 2 节介绍湍流资料的测量和能谱计算方法, 第 3 节分析大气近地层惯性副区湍流能谱结构, 最后给出结论和讨论。

2 湍流测量和能谱计算

这一节包括两个部分, 一是介绍湍流实验场地、观测仪器和数据采集方法, 二给出湍流能谱估算方案和谱特征参数的确定方法。

2.1 实验场地和湍流观测

本文所用资料选自 HEIHE 实验的 IOP-C 观测(1992 年 8 月 3 日至 20 日)。此次观测选在戈壁测点, 该测点位于(100°06'E, 39°09'N), 在黑河流域的西南部; 南距祁连山麓 20 km, 向北和东北向 1.2 km 则到达绿洲, 测站周围地形比较平坦。该测点的粗糙度为 1.1×10^{-3} m 至 1.5×10^{-3} m^[18]。在 IOP-C 中, 北京大学使用了日本海上电机公司生产的 DAT-300 型三维超声风温仪, 感应探头型号为 TR-61C, 声程 20 cm; 另外为准确观测温度湍流信号, 还安装了一个白金丝温度探测仪。湍流测量仪器的探头位置主要在 4.9 m 高度上。对湍流信号的数据采集系统采用 IBM 微机, 采集测点的风速、温度和湿度, 采样频率为 16 Hz, 每组共采样 45 min。整个 IOP-C 实验共获得 100 组有效数据: 第一阶段(8 月 3 日至 9 日) 40 组, 第二阶段(8 月 13 日至 17 日) 60 组。张宏升^[19]和乔劲松^[20]分别在他们的博士论文中, 说明了这些资料的可靠性。

2.2 能谱计算

本文主要分析四个变量(风速三个分量 u , v , w 和温度 t)的能谱结构。对于水平风速,我们作如下处理:设 U 为平均水平风速,则 u 为 U 方向分量(径向风分量),即 $\Sigma u/N = \|U\|$ (欧氏距离), N 为资料数量; v 为垂直于 U 方向风量(切向风分量),即 $\Sigma v = 0$ 。我们在分析湍流资料时,修正了数据野点,并剔除数据中的趋势项。

我们采用最常用的快速 Fourier 变换(FFT)方法来得到大气近地层湍流谱的估计值。对于湍流资料,直接采用 FFT 方法得到的功率谱在高频部分一般比较粗糙离散。因此对于一个很长的时间序列($N \gg 2^{10}$),通常将时间序列分解成 r 个不交叉的短时间序列(每一个序列长度为 N/r)分别计算功率谱,这 r 个功率谱的平均即为湍流能谱的估计。本文所用湍流资料序列长度为 $N=32768$, $r=16$ 。高频谱由 r 个短序列功率谱的平均得到,低频谱则由长序列直接得到,这样可以得到比较光滑的谱^[1]。由于我们只关心惯性副区的谱结构,所以只求高频谱。然后用最小二乘法,由功率谱来确定公式(3)中的参数 a 和 b ,即求解下面的极小值问题:

$$E = \sum_f \{c - a \lg(f) - bf - \lg[fS_x(f)]\}^2,$$

其中 c 为回归常数;这里 S_x 为归一化谱密度,即

$$S_x = S_{T,x} / \sigma_x^2,$$

其中 σ_x^2 为时间序列的方差。

需要说明的是,耗散区的空间尺度为 Kolmogorov 长度,量级为 10^{-3} m^[2],对应频率量级为 10^3 Hz(假定风速为 10^0 m s⁻¹量级),显然,现有采样频率不可能分析耗散区能谱,而只能分析惯性副区以及含能区。

3 结果分析

对于湍流风速资料,共有 100 组有效数据;而湍流温度资料,我们只采用了白金丝探测的 55 组有效数据。首先分别计算每组数据的功率谱密度,并用公式(3)来拟合,求得谱参数 a_i 和 b_i ($i=1, 100$;或 $i=1, 55$),最后求这 100 个(或 55 个) a_i 和 b_i 的平均值 $\bar{a}$ 和 $\bar{b}$ 。为了分析参数 $\bar{a}$ 和 $\bar{b}$ 对频谱拟合区域的依赖性,我们分别选取了三个低频截止频率(0.2、0.3、0.4 Hz)和两个高频截止频率(6、8 Hz)。我们还分析了谱参数 a_i 和 b_i 与大气近地层稳定度的关系,结果发现两者与稳定度关系不明显。

表 1 和表 2 分别给出了在高频截止频率为 6 Hz 和 8 Hz 时,谱参数的平均值随低频截止频率的变化情况。可以发现在高频截止频率为 6 Hz 时,低频截止频率的变化对 $\bar{a}$ 和 $\bar{b}$ 的影响不大;而当高频截止频率为 8 Hz 时,则产生比较大的影响。另外,对于同样的低频截止频率,高频截止频率的变化对 $\bar{a}$ 和 $\bar{b}$ 的影响比较显著。由于资料的采样频率为 16 Hz,则所求谱的最高频率为 8 Hz。由于数据采集误差等因素的干扰,造成高频部分谱向上偏移,因此当高频截止频率为 8 Hz 与 6 Hz 相比较时指数衰减系数 $\bar{b}$ 要小得多。当剔除这部分高频的影响,则谱参数 $\bar{a}$ 和 $\bar{b}$ 对低频截止频率的选取不是很敏感。因此当高频截止频率为 6 Hz 时给出的结果更准确一些。由表 1 发现,水平风分量平均幕

表 1 当高频截止频率为 6 Hz 时各能谱参数的平均值 $\bar{a}$ 和 $\bar{b}$

变量	低频截止频率					
	0.2 Hz		0.3 Hz		0.4 Hz	
	$\bar{a}$	$\bar{b}$	$\bar{a}$	$\bar{b}$	$\bar{a}$	$\bar{b}$
u (100)	0.447	0.228	0.447	0.229	0.445	0.229
v (100)	0.489	0.190	0.510	0.183	0.522	0.178
w (100)	0.551	0.124	0.569	0.118	0.584	0.113
t (55)	0.588	0.123	0.594	0.121	0.593	0.121

注: 括号内数字为参与计算参数 $\bar{a}$ 和 $\bar{b}$ 的能谱数目

表 2 当高频截止频率为 8 Hz 时各能谱参数的平均值 $\bar{a}$ 和 $\bar{b}$

变量	低频截止频率					
	0.2 Hz		0.3 Hz		0.4 Hz	
	$\bar{a}$	$\bar{b}$	$\bar{a}$	$\bar{b}$	$\bar{a}$	$\bar{b}$
u (100)	0.539	0.178	0.558	0.173	0.575	0.169
v (100)	0.586	0.137	0.620	0.127	0.647	0.120
w (100)	0.653	0.069	0.686	0.059	0.715	0.051
t (55)	0.698	0.062	0.724	0.055	0.746	0.049

注: 括号内数字为参与计算参数 $\bar{a}$ 和 $\bar{b}$ 的能谱数目

参数 $\bar{a}$ 在 0.45 至 0.50 之间, 指数衰减率 $\bar{b}$ 为 0.20 左右; 对于垂直风分量和温度而言 $\bar{a}$ 在 0.55 至 0.59 之间, $\bar{b}$ 大致为 0.12。图 1a 为四个变量在拟合频率区间[0.2 Hz, 6 Hz]内的平均谱曲线, 作为比较图中还给出了 $-2/3$ 幂函数曲线, 可见实测资料求得的谱曲线用公式 (3) 拟合更接近。为再次说明这一点, 我们给出 8 月 15 日 15:45 时和 23:45 时四个变量的谱密度曲线, 它们分别代表不稳定和稳定条件下的谱结构。图中实线为拟合公式 (3) 给出的谱曲线, 点画线为公式 (2) 给出的幂函数曲线, 可以发现无论是稳定还是不稳定条件下的湍流谱曲线都更加符合公式 (3)。

4 总结和讨论

我们根据实测湍流资料分析了大气近地层湍流能谱特征, 发现: 与 Kolmogorov 的“ $-5/3$ 律”相比较, 用幂函数+指数函数“ $fS(f) \propto f^{-a} e^{-bf}$ ”能够更好地拟合惯性副区谱曲线。计算结果显示: 对于水平风速分量, 幂系数 a 在 0.45 至 0.50 之间, 指数衰减率 b 为 0.20 左右; 对于垂直风分量和温度而言 a 在 0.55 至 0.59 之间, b 大致为 0.12。

就目前所知, 这种幂函数+指数函数谱曲线为连续时间混沌系统所特有。本文计算结果似乎给人们以这样的启示: 大气近地层湍流过程可以用混沌模型来描述。我们认为下这样的结论为时尚早, 首先本文结果只是从有限频率区域内拟合得到的, 对于更高频率的情况是否合适不得而知。另外如何用混沌理论来理解大气湍流能谱结构尚无很好的模型, 对于谱函数中指数衰减率 b 也没有恰当的理论解释。

另外, Kaimal 和 Kristensen^[14]以及 Walklate^[21]注意到, 由于超声仪探测过程自动进行的声程内空间点的平均, 可能会造成谱曲线在高频部分出现大于“ $-5/3$ 律”的幂函数衰减。同时, Kaimal 和 Kristensen^[14]还基于“ $-5/3$ 律”提出一些补救的方法。一方

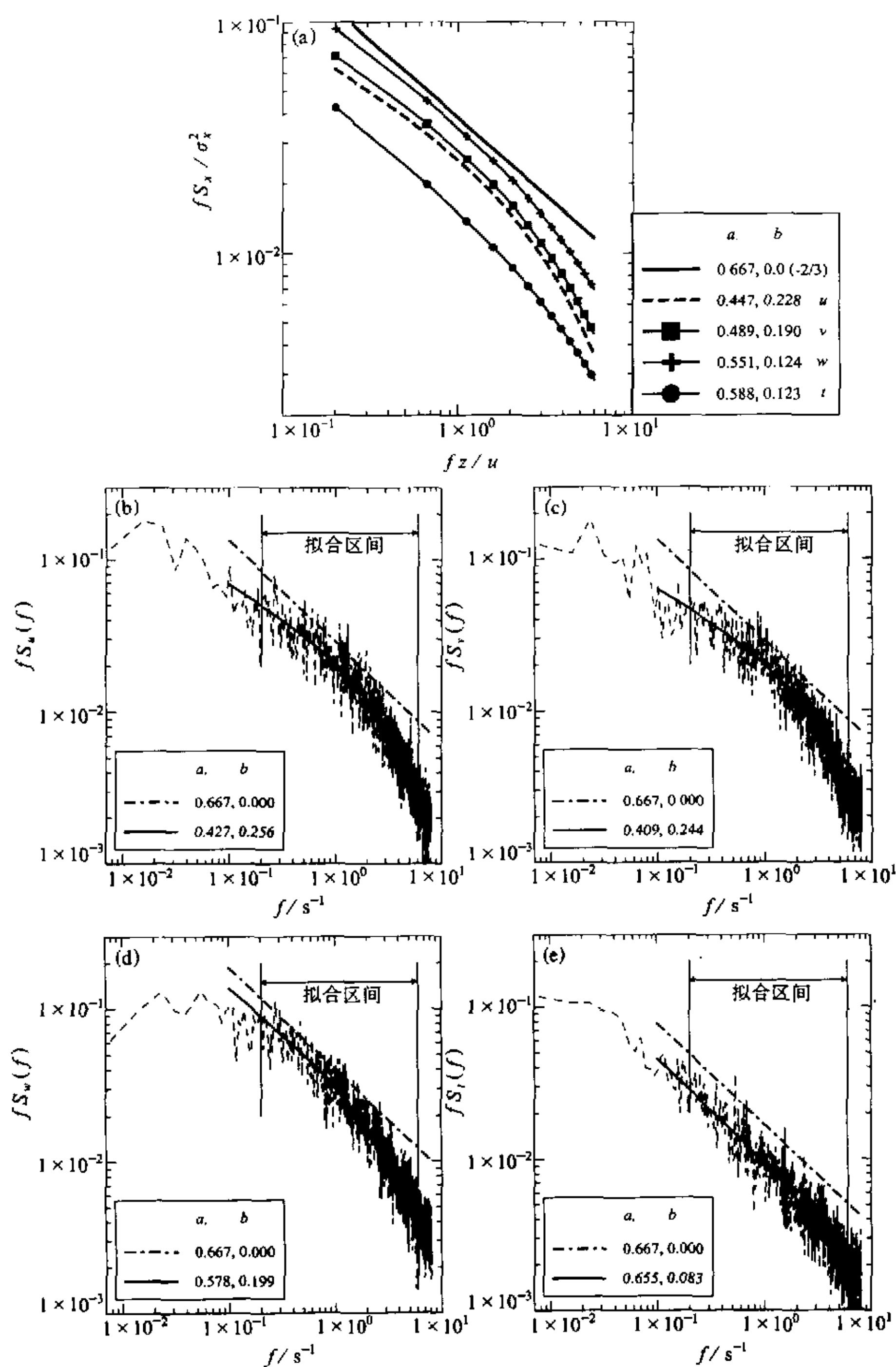


图1 三个风速分量和温度的归一化能谱

(a) 为四个物理量平均能谱; (b) ~ (e) 8月15日15:45时四个物理量的能谱;

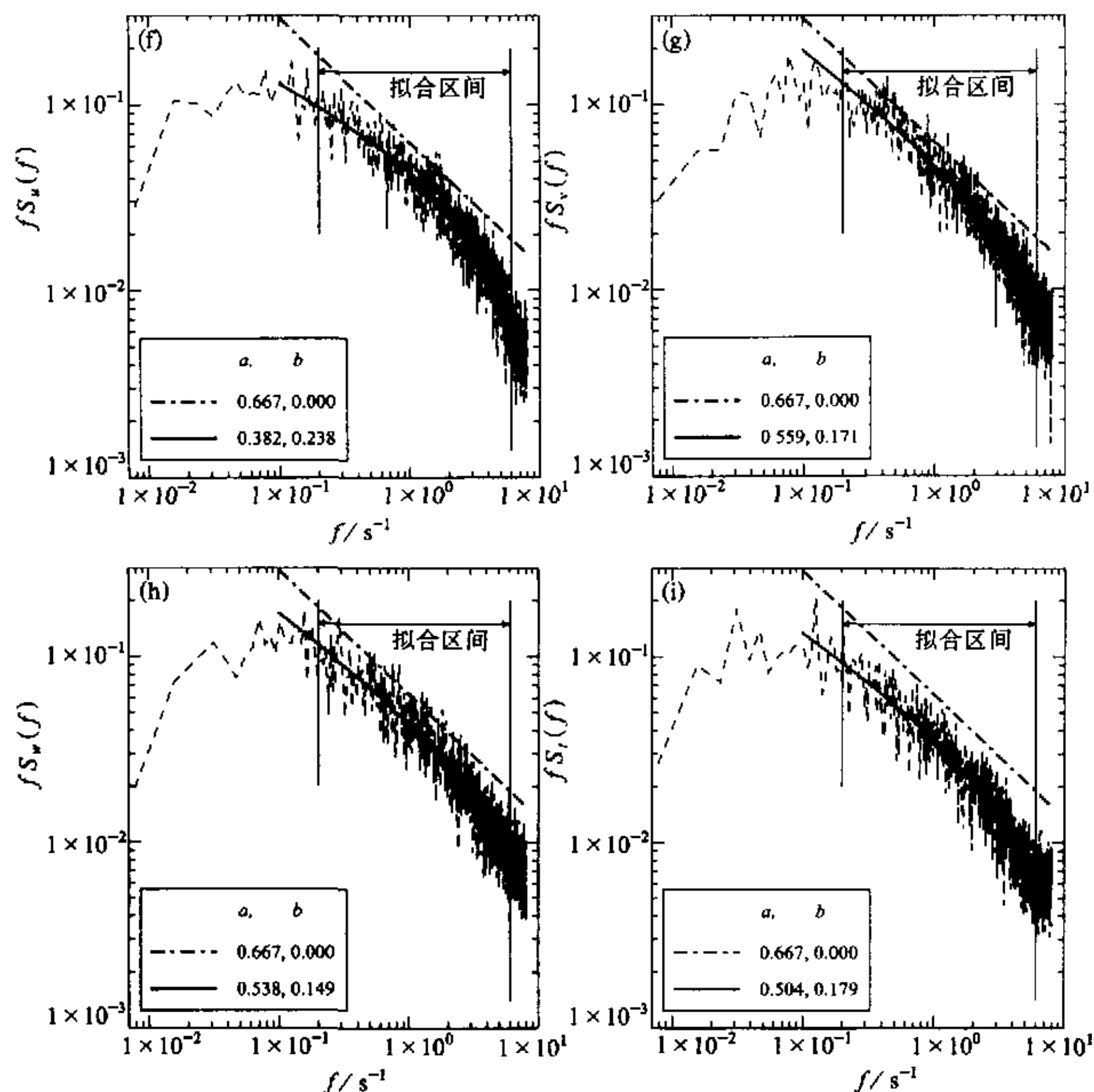


图 1 (续) 三个风速分量和温度的归一化能谱

(f) ~ (i) 8 月 15 日 23:45 时四个物理量的能谱。(b) ~ (i) 中实线为公式 (3) 在拟合频域内的拟合曲线, 点划线为“-2/3”幂函数曲线

面由于这种空间平均是由探测原理决定、不可避免的, 另一方面人们还没有正确认识到考虑空间平均对于湍流能谱结构特征影响的程度, 因此本文结论的证实还需做许多理论分析和实测资料分析。

致谢: 杨培才研究员提出了一些有意义的建议, 谨致谢意。

参 考 文 献

- 1 Kaimal, J. C. and J. J. Finnigan, *Atmospheric Boundary Layer Flows: Their Structure and Measurement*, Oxford University Press, 1994, 1~279.
- 2 Kolmogorov, A. N., The local structure of turbulence in incompressible viscous fluid for very large Reynolds number, *C. R. Acad. Sci. URSS*, 1941, 30, 301~305.
- 3 Kolmogorov, A. N., Dissipation of energy in the locally isotropic turbulence, *C. R. Acad. Sci. URSS*, 1941, 32, 16.
- 4 Kolmogorov, A. N., A refinement of previous hypotheses concerning the local structure of turbulence in a

- viscous incompressible fluid at high Reynolds number, *J. Fluid Mech.*, 1962, **13**, 82~85.
- 5 Wang, L. P., S. Chen, J. G. Brasseur and J. C. Wyngaard, Examination of hypotheses in the Kolmogorov refined turbulence theory through high-resolution simulations. Part 1. Velocity field, *J. Fluid Mech.*, 1996, **309**, 113~156.
 - 6 Ruelle, D. and F. Takens, On the nature of turbulence, *Commun. Math. Phys.*, 1971, **20**, 167~192.
 - 7 Sigeti, D. E., Exponential decay of power spectra at high frequency and positive Lyapunov exponents, *Physica D*, 1995, **82**, 136~153.
 - 8 Kaimal, J. C., J. C. Wyngaard, Y. Izumi and O. R. Cote, Spectral characteristics of surface layer turbulence, *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 1972, **98**, 563~589.
 - 9 Martin, H. C., Humidity and temperature microstructure near the ground, *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 1972, **98**, 440~446.
 - 10 Pasquill, F., Some aspects of boundary layer description, *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 1972, **98**, 469~494.
 - 11 McBean, G. A., Microscale temperature fluctuations in the atmospheric surface layer, *Bound.-Layer Meteor.*, 1982, **23**, 185~196.
 - 12 Mousley, T. J., D. N. Asimakopoulous, R. S. Cole, S. J. Caughey and B. A. Crease, Temperature structure parameter measurements using differential temperature sensors, *Bound.-Layer Meteor.*, 1982, **23**, 307~315.
 - 13 Browne, L. W. B., R. A. Antonia and A. J. Chambers, Effect of the separation between cold wires on the spatial derivatives of temperature in a turbulent flow, *Bound.-Layer Meteor.*, 1983, **27**, 129~139.
 - 14 Kaimal, J. C. and L. Kristensen, Time series tapering for shorting data samples, *Bound.-Layer Meteor.*, 1991, **57**, 187~194.
 - 15 Antonia, R. A. and M. R. Raupach, Spectral scaling in a high Reynolds number laboratory boundary layer, *Bound.-Layer Meteor.*, 1993, **65**, 289~306.
 - 16 Yee, E., R. Chan, P. R. Kosteniuk, G. M. Chandler, C. A. Biltoft and J. F. Bowes, The vertical structure of concentration fluctuation statistics in plumes dispersing in the atmospheric surface layer, *Bound.-Layer Meteor.*, 1995, **76**, 41~67.
 - 17 Katul, G. and B. Vidakovic, The partitioning of attached and detached eddy motion in the atmospheric surface layer using Lorentz wavelet filtering, *Bound.-Layer Meteor.*, 1996, **77**, 153~172.
 - 18 Chen, J. Y., J. M. Wang and Y. Misuta, An independent method to determine the surface roughness parameter, *Bull. of the Disaster Prevention Research Institute, Kio Univ.*, 1991, **41**, 121~127.
 - 19 张宏升, 近地面层湍流输送观测仪器和方法研究, 北京大学博士学位论文, 1995.
 - 20 乔劲松, 不稳定大气近地面层湍流的精细结构, 北京大学博士学位论文, 1996.
 - 21 Walklate, P. J., The effect of orchard crop structure on the integral length-scale of turbulence, *Bound.-Layer Meteor.*, 1993, **63**, 1~22.

Reanalysis of the Turbulent Spectra in the Atmospheric Surface Layer

Bian Jianchun, Qiao Jinsong and Lu Daren

(Laboratory for Middle Atmosphere and Global Environment Observation, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029)

Abstract According the locally isotropic turbulent hypotheses of Kolmogorov, the turbulent spectra of the atmospheric surface layer obey the well-known $-5/3$ power law in the inertial subrange. However, many literatures and analyses of observed data show that the frequency range where the $-5/3$ power law exists in the turbulent spectra of the atmospheric surface layer is very narrow, but that the form of power law + exponential law " $fS(f) \propto f^{-a} e^{-bf}$ " which is the proper spectrum of time-continuous chaotic system is more suitable. Turbulent data observed in the HEIHE experiment are analyzed, and results show that $a=0.447$ and $b=0.228$ for the radial component of wind; $a=0.489$ and $b=0.190$ for the tangent component; $a=0.551$ and $b=0.124$ for the vertical component; and $a=0.588$ and $b=0.123$ for the temperature.

Key words: turbulent; atmospheric surface layer; chaotic system