

文章编号: 1000-0534(2005)01-0038-05

大气边界层湍流温度序列的信息熵分析

汪景焯^{1,2}, 付遵涛¹, 张霖¹, 刘式达¹

(1. 北京大学 物理学院, 北京 100871; 2. 中国电波传播研究所青岛分所, 山东 青岛 266071)

摘要: 利用大气边界层内近地面的大气湍流温度时间序列, 运用功率谱分析、信息熵分析等方法, 分析了大气边界层内近地面的大气湍流特点, 并对稳定层和不稳定层的大气湍流进行了对比。结果表明, 信息熵和功率谱指数是区别稳定层结和不稳定层结大气边界层湍流特征的指标, 对造成两者之间的差别做出了对应的解释。

关键词: 大气边界层; 温度; 时间序列; 信息熵; 功率谱

中图分类号: P425.21 **文献标识码:** A

1 引言

大气边界层内运动的主要特点是其湍流性, 湍流分布在很宽的尺度上, 小到毫米尺度, 大到百米尺度的涡旋均可能存在, 因此非常有利于研究不同尺度涡旋的运动规律^[1]。大气边界层湍流的复杂之处在于: 经常存在风速剪切(湍流不是均匀各向同性的)、密度分层(或温度层结)、地球旋转效应(科氏力作用)、下垫面不均匀性和地表的热力影响等。许多气象研究和应用与大气边界层的湍流结构, 特别是与近地层湍流的特征有密切关系^[1]。因此, 对边界层湍流场的统计分析和规律研究, 有助于进一步了解大气边界层湍流的结构和性质。

研究表明^[1], 在水平方向, 层结的影响不明显; 而在垂直方向上, 层结的影响比较大, 这是由于浮力项的主要影响在垂直方向上。由于热力作用导致的强烈日变化, 夜间的稳定边界层比起白天的对流边界层来说有显著的不同, 在大气边界层中, 白天湍流发展很旺盛, 平均风速梯度被削弱很多; 而在夜间, 由于大气温度层结的稳定作用使得湍流受到抑制, 风速梯度很大并维持到很高的高度^[1]。

对于大气边界层湍流的研究已经有很多, 由开始关注大气边界层湍流的相干结构(coherent structures)^[1,2], 到研究其所具有的统计特性^[3~8], 再到探求其表现出的混沌特性^[4]和不变性^[5~8]。研究发现^[5~14], 大气边界层湍流由于其所受边界条件和外

部强迫等众多因子的影响, 在不同的条件下会表现出不同的特点。研究者希望找到更多的区分不同性质的大气边界层湍流的表征参数或指标。Li 等^[5]发现动力变量(速度和湍动能)与非动力变量(温度和湿度)的低维吸引子维数不一样, 而且大气稳定性对低维吸引子维数的影响很大; Callego 等^[6]则用动力系统理论分析了大气边界层湍流垂直速度场的相关维数, 发现对流大气边界层湍流的相关维数(6 左右)要比机械大气边界层湍流的相关维数(7~9)小。虽然温度场和垂直速度场不同, 在温度场中存在很多明显的斜坡结构和迅速转变的结构, 这对温度场的统计分析有很大的影响, 在很多文献中已经指出了这一点。可以预期温度场具有自己特有的统计特点, 同时, 由于温度场与垂直速度场的密切关系, 两者之间也必然有很多相似的地方。文献[7, 8]指出, 标度指数和层次参数是两个可以区分不同性质大气边界层湍流的两个指标。为了更好地区分不同性质的大气边界层湍流的其他方面的性质, 本文从另外的侧面出发, 给出大气边界层湍流演化的特性, 同时解释带来差别的原因。

2 资料说明

本文所用资料是由中国科学院大气物理研究所的大气边界层与大气化学国家重点实验室提供的。所得到的数据(包括速度场的 3 个分量 w , v , u 和温度 T)是 1998 年 6 月 9~22 日不间断测得的, 所

收稿日期: 2004-01-20; 改回日期: 2004-04-18

基金项目: 科技部科研院所社会公益专项基金(2002DIB20070); 国家自然科学基金项目(40305006)共同资助

作者简介: 汪景焯(1982—), 男, 江西婺源人, 主要从事时空序列的非线性分析和无线电波在对流层中的传播研究

E-mail: leon1821@sohu.com

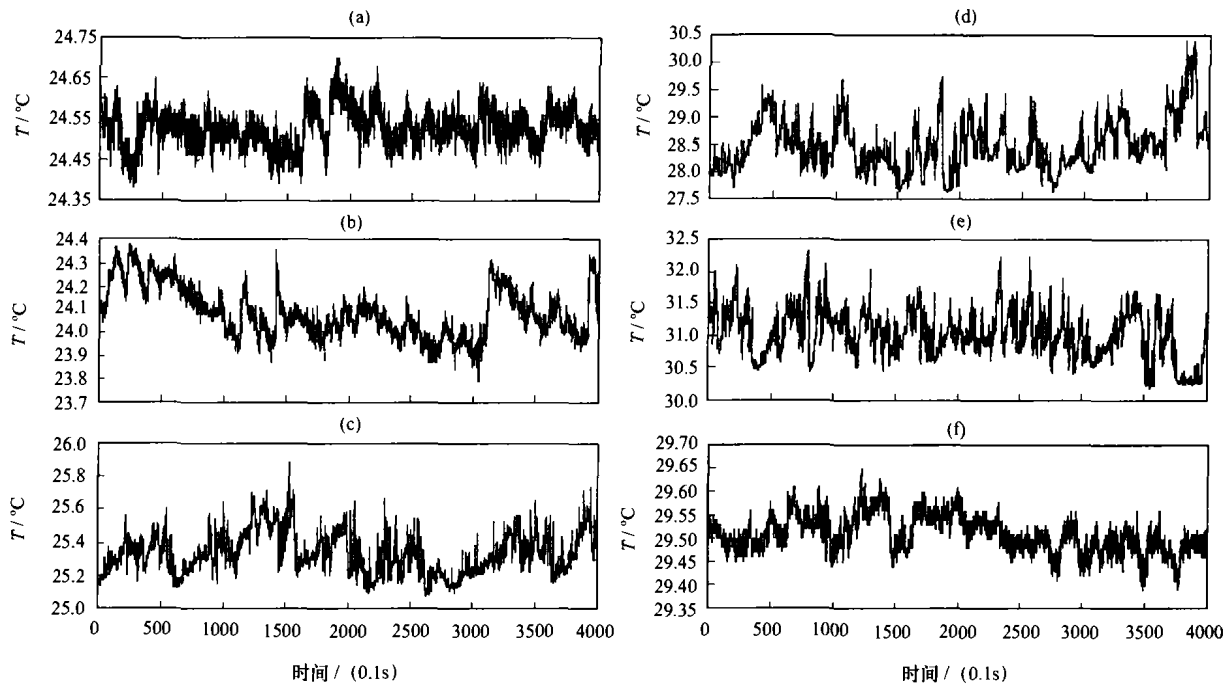


图 1 1998 年 6 月 15 日温度时间序列

(a) 01:00, (b) 04:00, (c) 08:00, (d) 11:00, (e) 15:00, (f) 21:00

Fig. 1 Temperature time series on June 15, 1998

用仪器为美国生产的超声风速温度仪(型号为 SAT-211/3K), 采样频率为 20 Hz。测量的下垫面为较平坦的稻田, 仪器距离地面 4 m。因此, 可以认为所得到的数据为大气边界层内近地面的大气湍流数据。

3 分析方法

3.1 信息熵分析

信息熵^[15, 16]的定义为

$$S = - \sum_i P_i \log P_i, \quad (1)$$

其中, P_i 为该事件可能结果的概率。信息熵表示对一个事件奇异性的测度。从定义可以看出, 如果对一个事件事先知道得越少, 那么就包含有更多的信息。如果有完全确定的结果(即 $P_i = 1$), 即信息量为 0。如果系统的信息越多就难以对它的目标进行预测。

3.2 功率谱分析

1941 年原苏联著名科学家 Kolmogorov 提出, 在高雷诺数条件下, 大涡旋串级到小涡旋的过程要经历许许多多级, 以至到惯性区非各向同性的大尺度的影响可以忽略, 而认为小尺度涡旋是局地均匀各向同性的, 此时湍流的统计特征与粘性已无关,

而主要决定于平均能量耗散率^[17]。用量纲分析法得到著名的能谱的 $-5/3$ 方定律, 即:

$$S(k) \sim \epsilon^{2/3} k^{-5/3}, \quad (2)$$

功率谱 $S(k) \sim k^\beta$ 中的指数, $\beta = -5/3 \approx -1.67$ 。

4 结果分析

4.1 不同时段温度时间序列对比

大气边界层湍流温度场的差别从不同时段的时间序列中就可以看出来, 在白天的对流大气边界层条件下, 温度脉动可以被充分地激发, 在各个尺度上的脉动都得到充分地发展, 这使得在不稳定层结下大气边界层湍流温度的间歇性减小, 各种涡可以尽最大可能地充满空间(图 1c, d, e)。

与此相反, 在稳定层结下, 温度时间序列具有明显的大尺度结构存在, 同时存在很多迅速转变的结构。这使得稳定层结下的湍流温度场的间歇性增大, 各种尺度的涡旋不能得到充分地发展(图 1a, b, f)。

4.2 不同时段温度时间序列的概率密度分布

大气边界层湍流温度序列在不同层结下的不同行为在其概率密度分布上体现得更为明显。在稳定层结下, 不同幅值的脉动分布基本上是均匀的和左右对称的, 没有明显的偏向性(图 2a, b, f)。同时

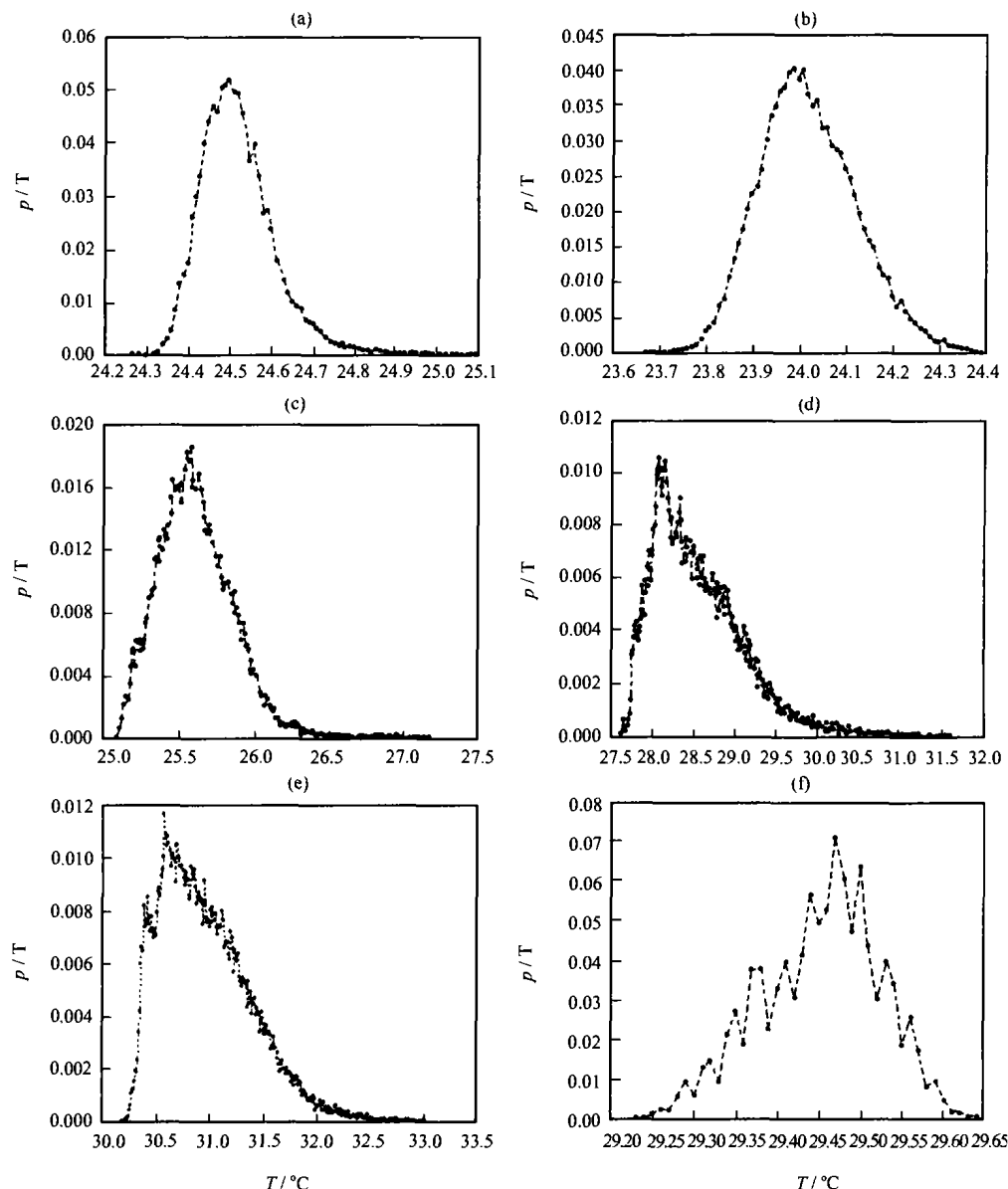


图 2 1998 年 6 月 15 日温度时间序列的 PDF

(a)01:00, (b) 04:00, (c) 08:00, (d) 11:00, (e) 15:00, (f) 21:00

Fig. 2 PDF of temperature time series on June 15, 1998

各种幅值脉动分布看上去很不连续。这说明在稳定层结下,各种幅值的脉动并不是都可以被激发出来。与此不同的是,在不稳定层结下,各种幅值的脉动分布是很不均匀的和左右不对称的。这说明脉动的激发是不对称的,具有明显的偏向性(图 2c, d, e)。同时,我们可以看出,在不稳定层结下,各种幅值脉动的分布看上去相对连续,特别是在高幅值端。这说明在不稳定层结下,各种幅值的脉动都可以被激发出来,涡旋可以尽可能地充满空间。

4.3 信息熵分析

对所用资料中的每日不同时刻的温度时间序列作信息熵分析,算出每个时刻的信息熵的平均值,

做出平均值随时间变化的图像(图 3)。图 4 是特定的一天(6 月 10 日)信息熵的日变化特征。可以看出,两者具有很相似的变化特征。信息熵分析的结果表明,信息熵的日变化具有双峰—双谷结构。信息熵的平均最高值在 14:00 左右,而信息熵的平均最低值在凌晨 05:00 左右和下午 17:00 左右。这是因为凌晨 05:00 左右,大气刚刚受太阳辐射影响,温度逐步升高,对流活动增大,垂直切变减弱,热力湍流增强,各种尺度的涡旋都尽可能充分地发展,因此,信息熵逐渐增加。

14:00 左右,信息熵达到最高值。随后太阳辐射开始减弱,大气温度也随之降低,浮力湍流减

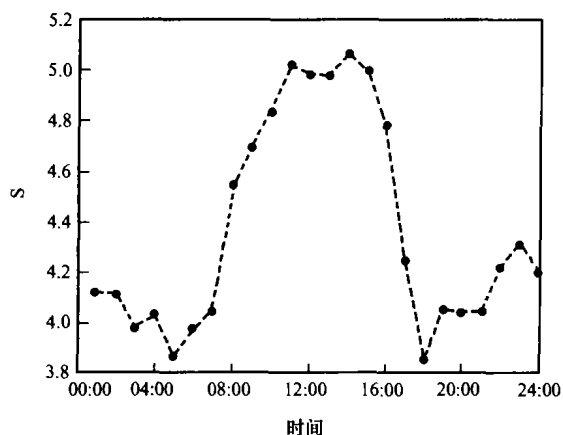


图 3 信息熵平均值日变化

Fig. 3 Daily variation of averaged information entropy

弱,边界层下垫面的影响逐渐变大,信息熵逐渐减小。到了17:00左右,低层大气受太阳辐射的影响变小,受地面长波辐射的影响较大,浮力湍流有所增强,信息熵稍微增大。但是这种作用比太阳辐射使湍流增强的效果要小,所以增强的效果没有中午时明显,幅度也没有中午时大。而到了午夜时,地面辐射也逐渐减弱,边界层的机械影响占据主导地位,边界层内的垂直切变逐步变大,信息熵也逐渐减小。凌晨05:00左右,信息熵减至最低。

4.4 功率谱分析

实际上温度场的功率谱指数一般 $\neq -1.67$,说明涡旋是不完全充满空间的,具有明显的间歇性结构。同时也表明,大气边界层湍流温度场并不是充分发展的,来自地面等的大尺度结构对湍流温度场的影响是不可忽略的。对功率谱指数的日变化进行统计分析,其结果如图5所示。

从功率谱指数随时间变化的图中可以看出,功

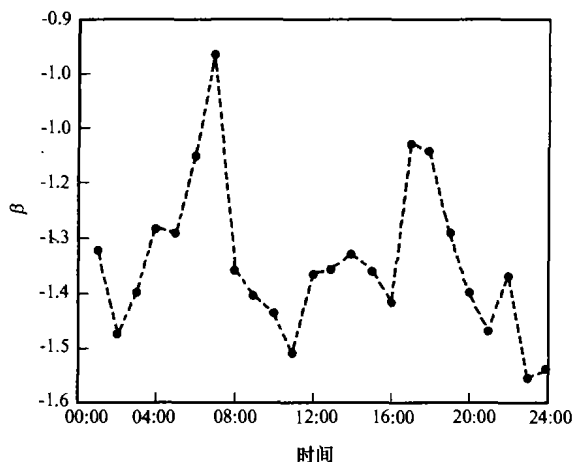


图 5 功率谱指数日变化

Fig. 5 Daily variation of power spectrum exponent

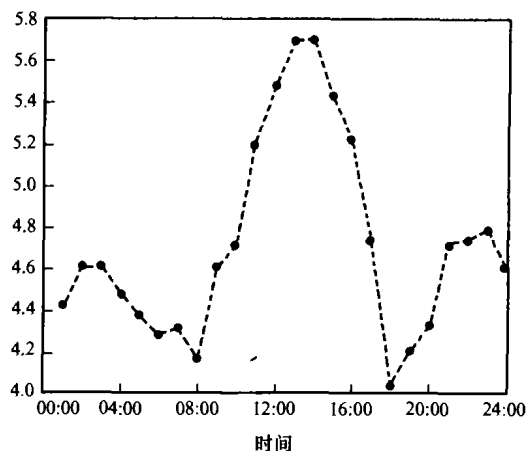


图 4 6月10日信息熵日变化

Fig. 4 Daily variation of information entropy on June 10

率谱指数的日变化具有双峰—双谷结构(需要说明的是,这里得到的功率谱指数主要是高频端的结果)。功率谱指数的最高值出现在07:00和17:00,最低值出现在11:00和21:00,功率谱指数的日变化结果与信息熵日变化结果趋势基本相反,这和理论上的分析是一致的。对于高频端的功率谱指数来说,只有满足在各向均匀同性的条件下,功率谱指数才等于 -1.67 。这时各种尺度的湍流运动被充分地激发,也就是说系统内的信息更多,体现在信息熵上就是高值。相反,在稳定层结下,由于各种大尺度结构的存在,确定性的信息占据优势地位,因此,这时各向均匀同性满足的情况比较差,功率谱指数偏离 -1.67 较大,信息熵较小。值得指出的是,在由稳定层结转向不稳定层结和由不稳定层结转向稳定层结时,即约为中性层结的时候,情况比较复杂,功率谱指数和信息熵的对应关系不是很好,这需要进行进一步的研究。

5 小结

对温度场的分析说明,在大气边界层湍流中存在多尺度结构。在稳定层结中,大气边界层湍流的间歇性更强,而在不稳定层结下,各个尺度都发展得比较均衡,间歇性比较弱。通过信息熵的分析,发现在稳定层结和稳定层结下,温度序列的信息熵明显不同。在稳定层结下,大气边界层湍流的层次比稳定层结下的要多,并且湍流得到更加充分的激发。所以不稳定层结下的信息熵比较大,我们更难对它进行预测。功率谱指数的分析说明,大气层结不稳定时,功率谱指数偏离 -1.67 较小,更加接近于各向同性充分发展湍流。而其他时间,功率

谱指数偏离 -1.67 较大。说明在稳定层结中, 湍流的间歇性更强。

由前面的分析可以看出, 大气边界层湍流温度场在稳定层结和不稳定层结下有明显不同的性质。造成这种显著差异的可能原因是在稳定层结下大气边界层的重力波活动强烈, 感受到地面的大尺度影响更大; 而在不稳定层结下, 大尺度运动的能量会很快被频散掉, 大气边界层的重力波活动被抑制^[7]。当然, 更为具体的影响因子需要在未来的工作中进一步考虑。

参考文献

- [1] 胡非, 湍流、间歇性与大气边界层[C]. 北京: 科学出版社, 1995
- [2] 胡非. 大气边界层湍流涡旋结构的小波分解[J]. 气候与环境研究, 1998, 3(2): 97-105
- [3] 胡非, 李昕, 陈红岩等. 城市冠层中湍流运动的统计特征[J]. 气候与环境研究, 1999, 4(3): 252-258
- [4] 李昕, 胡非, 刘罡. 大气湍流的混沌吸引子特征[J]. 气候与环境研究, 2001, 6(1): 58-66
- [5] X Li, F Hu, G Liu. Characteristics of chaotic attractors in atmospheric boundary-layer turbulence[J]. Boundary-Layer Meteorol, 2001, 99: 335-345
- [6] Callego M C, J A Garcia, M L Cancillo. Characterization of atmospheric turbulence by dynamical systems techniques[J]. Boundary-Layer Meteorol, 2001, 100: 375-392
- [7] Qian M W, S D Liu. Scale exponent of atmospheric turbulence under different stratifications[J]. Fractals, 1996, 4: 45-48
- [8] 付遵涛, 李昕, 刘式达等. 大气边界层湍流速度场的层次结构分析[J]. 地球物理学报, 2002, 45(增刊): 30-36
- [9] 薛具奎, 胡隐樵. 对流边界层的 Lyapounov 稳定性分析[J]. 高原气象, 2000, 19(2): 235-243
- [10] 刘衡, 蒋维楣. 近地层湍流特征及其在扩散模型中的应用[J]. 高原气象, 1998, 17(4): 390-394
- [11] 高志球, 王介民. HEIFE 绿洲和沙漠地区大气边界层湍流混沌特性研究[J]. 高原气象, 1998, 17(4): 397-402
- [12] 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[J]. 高原气象, 2002, 21(5): 514-517
- [13] 王介民, 刘晓虎, 祁永强. 应用涡旋相关方法对戈壁地区湍流输送特征的初步研究[J]. 高原气象, 1990, 9(2): 120-129
- [14] 张宏升, 李富余, 陈家宜. 不同下垫面湍流统计特征研究[J]. 高原气象, 2004, 23(5): 598-604
- [15] 刘式达, 刘式适. 分形和分维引论[M]. 北京: 气象出版社, 1993
- [16] 周发琇, 陈永华, 胡瑞金等. 南海表层水温信息熵的分析[J]. 海洋学报, 1997, 19(5): 29-34
- [17] Frisch U. Turbulence: The legacy of A. N. Kolmogorov[C]. Cambridge: Cambridge University Press, 1995

Information Entropy Analysis on Turbulent Temperature Series in the Atmospheric Boundary-Layer

WANG Jing-ye^{1,2}, FU Zun-tao¹, ZHANG Lin¹, LIU Shi-da¹

(1. School of Physics, Peking University, Beijing 100871, China; 2. China Institute of Electric Wave Transmission Research, Qingdao Division, Qingdao 266071, China)

Abstract: The turbulent temperature time series in the atmospheric boundary layer close to ground surface are applied to analyze the characteristics of turbulence in this paper. And comparison between stable stratification and unstable stratification is shown with the method of power spectrum analysis and information entropy analyses. It is found that the information entropy and exponent of power spectrum are two powerful indexes to distinguish the atmospheric turbulence in boundary layer and the explanation for difference between stable and unstable stratifications is presented.

Key words: Atmospheric boundary layer; Temperature time series; Information entropy; Power spectrum