

大气边界层湍流速度场的层次结构分析

付遵涛^{1,2,4)} 李昕⁴⁾ 刘式达^{1,2)} 余振苏^{1,3)}

1) 北京大学湍流研究国家重点实验室, 北京 100871

2) 北京大学物理学院, 北京 100871

3) Department of Mathematics, UCLA, Los Angeles, CA 90095, USA

4) 大气边界层物理和大气化学国家重点实验室, 中国科学院大气物理研究所, 北京 100029

[摘要] 对大气边界层的速度脉动时间序列进行了统计分析, 发现在大气边界层湍流场中存在 She-Leveque (SL) 层次相似律, 以及在水平速度场、垂直速度场和不同条件下垂直速度场的层次相似律所满足的情况不同, 并给出了对应的可能解释. 结果指出大气边界层自组织结构的复杂性以及层次相似律对大气边界层湍流脉动描述的有效性.

[关键词] 标度律, 层次结构, 大气边界层, 层结.

1 引言

大气边界层内运动的主要特点是其湍流性, 同时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, 因此非常利于研究不同尺度涡旋的运动规律. 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, 有助于进一步了解大气边界层湍流的结构和性质, 分析出其中确定性和随机性成分间的自组织特性.

已有的研究表明(详见文献[1]给出的综述), 速度场3个方向的谱特征在高频时很相似, 在低频段则存在差异, 分析认为这是热力条件和地表特征作用的结果. 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. 下垫面粗糙度的增加使得低层大气的主导涡旋尺度减小, 能量向高频方向转移, 这可能是由于高粗糙度下垫面使得动力作用增大, 大尺度涡旋难以发展; 而小尺度湍涡则增多, 峰值频率较大, 低粗糙度下垫面的热力作用要比动力作用大, 大尺度湍涡得以发展, 主导涡旋尺度较大, 峰值频率较小. 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].

[收稿日期] 2000-10-17 收到, 2001-07-17 收到修定稿.

[基金项目] 国家自然科学基金委员会杰出青年科学基金(19825503)、自然科学基金(49975024)、教育部优秀回国人员基金和北京大学校长基金资助.

[作者简介] 付遵涛, 1970年生, 2000年于北京大学获博士学位, 目前从事大气动力学和非线性动力学研究. E-mail: fuzt@pku.edu.cn.

大气中除了速度场外,还存在着温度场、湿度场等被动标量场,和速度场各种尺度的涡旋对应,温度场也存在着多尺度结构.文献[2—5]对不同尺度的气温状态提出了大小尺度相互作用动力学,并用子波变换分析温度场的多尺度多层次特征.气温在不同尺度上均存在随机涨落,这些涨落是更大范围的大气环流运动的产物,因此这些涨落中蕴含着一定的自组织性.近年来,余振苏与其合作者^[6-9]提出的层次结构理论,将湍流的确定性和随机性联系起来,认为湍流运动不仅在不同尺度上形成层次,也在不同涨落幅度上形成层次.最近,陈炯等^[11]和余振苏等^[12]已经将层次结构理论运用到月平均气温涨落信号的分析,揭示了不同尺度、不同温度的气温涨落之间的内在相关性¹⁾以及中国气温变化的区域性特征²⁾,取得了很好的结果.

本文运用层次结构理论来分析大气边界层湍流速度场的涨落统计性质,验证层次相似律的存在性,并确定相应的层次结构参数,比较它们与一般湍流所得结果的异同.所用资料是由中国科学院大气物理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 u, v, w 和温度 T)是1998年6月9日—22日不间断测得的,所用仪器为超声风速仪(型号 SAT-211/3K),采样频率为10Hz,每个数据文件的大小为1h左右.测量的下垫面为较平坦的稻田,仪器距离地面4m.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.

2 层次相似律简介

本文分析基于 She 和 Leveque 针对湍流统计结构提出的层次结构模型^[6],以及最近发展的层次结构理论^[7-9],下面对这一理论进行简单介绍.

湍流统计结构分析一般从分析速度结构函数入手,即考虑速度差 $\delta v_l = v(x+l) - v(x)$ 的 p 阶统计矩 $S_p(l) = \langle |\delta v_l|^p \rangle$,这里 $\langle \cdot \rangle$ 代表系综平均.理论分析认为,速度差 $|\delta v_l|$ 刻画空间尺度为 l (这里应用了 Taylor 冰冻假设,把时间序列的时间间隔转化为空间间隔)的涨落结构,而 $S_p(l)$ 刻画阶数为 p 的涨落运动的幅度.根据标度律假设,存在尺度区间,使 p 阶统计矩与尺度成幂次关系: $S_p(l) \propto l^{\zeta_p}$, ζ_p 为标度指数,它反映了 p 阶涨落(涡旋)运动随尺度 l 变化的规律.

层次结构理论首先引入 p 阶层次结构量 $F_p(l)$, 定义为:

$$F_p(l) = \frac{\langle |\delta v_l|^{p+1} \rangle}{\langle |\delta v_l|^p \rangle} = \frac{\int |\delta v_l|^{p+1} p(\delta v_l) d(\delta v_l)}{\int |\delta v_l|^p p(\delta v_l) d(\delta v_l)} = \int |\delta v_l| Q_p(\delta v_l) d(\delta v_l),$$

$$p = 1, 2, \dots \quad (1)$$

其中, $p(\delta v_l)$ 是 δv_l 的概率密度函数. $Q_p(\delta v_l) = \frac{\delta v_l^p p(\delta v_l)}{\int (\delta v_l)^p p(\delta v_l) d(\delta v_l)}$ 是 δv_l 的 p 阶加权概率密度函数,它反映了强振幅涨落结构的概率分布特征.随着 p 的不断增大, $Q_p(\delta v_l)$ 的峰值不断向大振幅涨落方向移动.

层次结构理论引入一个重要假设^[6]:不同尺度上的无量纲层次结构量之间存在着统计自相似性(“隐藏的”对称性)

1)陈炯,余振苏,梁爽等.气温涨落中的层次相似律.(已经被南京气象学院学报接收待发表).2002.

2)余振苏,陈炯,梁爽等.中国气温涨落的层次结构的区域特征(已经被气候与环境研究刊物接收待发表).2002.

$$\frac{F_{p+1}(l)}{F_{\infty}(l)} = A_p \left(\frac{F_p(l)}{F_{\infty}(l)} \right)^{\beta}, \quad (2)$$

其中, $0 < \beta < 1$ 是与 p, l 无关的普适常数, 称为间歇参数; A_p 仅依赖于 p , 与 l 无关; $F_{\infty}(l)$ 定义为: $F_{\infty}(l) = \lim_{p \rightarrow \infty} F_p(l)$, $F_{\infty}(l)$ 称为脉动量的最高激发态(或最强间歇结构). 在标度律成立的一般情况下, $F_{\infty}(l) \propto l^{\gamma}$, γ 称为最强间歇结构的标度指数或最奇异标度指数.

根据(2)式与标度律假设^[6], 可得标度指数所满足的递推关系式

$$\zeta_{p+2} - (1 + \beta)\zeta_{p+1} + \beta\zeta_p - \gamma(1 - \beta) = 0, \quad (3)$$

利用 $\zeta_0 = 0$, 容易得到标度指数全集:

$$\zeta_p = \gamma p + C(1 - \beta^p), \quad (4)$$

其中, $C = \frac{\zeta_1 - \gamma}{1 - \beta}$ 包含待定常数 ζ_1 . 这就是描述湍流脉动结构的 She-Leveque(SL)标度律.

层次相似律表明, 各层次多尺度脉动强度之间存在相似递推不变律. 由此不变律可以从低层次脉动强度推出高层次脉动强度. 层次不变律反映了系统内部的自组织性. 层次相似参数 β 反映了各层次脉动结构之间的相似度. $\beta = 1$ 时, 各层次应该是严格相似的; $\beta = 0$ 时, 最高激发态结构成为唯一结构; $0 < \beta < 1$ 时, 各层次脉动结构的性质具有不均匀性, 相邻层次间的性质差异随层次提高而逐渐缩小, 当 p 很大时, 所对应的高层次结构具有一定的稳定性, 因此, 所谓的最高激发态结构成为系统的特征结构.

层次结构理论提出后, 已经得到来自实验和数值模拟方面的广泛支持. 事实上, 对于许多非湍流的复杂系统, 层次结构理论也同样适用^[10-14], 这时层次结构理论为刻画系统自组织性的时空变化提供了一个有效的途径.

同样, 可以定义垂直速度涨落的结构函数:

$$S_p(s) = \langle |\delta W_s|^p \rangle, \quad (5)$$

$\delta W_s = W(x+s) - W(x)$ 为相隔空间间隔为 s 的垂直速度差, 层次结构定义涨落结构:

$$F_p(s) = S_{p+1}(s)/S_p(s), \quad (6)$$

按层次相似律假设, 不同幅度的统计结构满足下列关系:

$$F_{p+1}(s) = A_p F_p(s)^{\beta} F_{\infty}(s)^{1-\beta}, \quad (7)$$

其中 F_{∞} 称为最高激发态结构, β 为层次结构参数.

为了消除 A_p 的影响, 作归一化处理, 定义

$$H_{p+1}(l) = \left(\frac{F_{p+1}(l)}{F_2(l)} \right) \cdot \left(\frac{F_{p+1}(l_0)}{F_2(l_0)} \right)^{-1}, H_{p+1}(s) = \left(\frac{F_{p+1}(s)}{F_2(s)} \right) \cdot \left(\frac{F_{p+1}(s_0)}{F_2(s_0)} \right)^{-1}, \quad (8)$$

从而得到

$$H_{p+1}(l) = H_p(l)^{\beta}, H_{p+1}(s) = H_p(s)^{\beta}. \quad (9)$$

于是, 根据(9)式, 可以由数据直接得到 H_p 和 H_{p+1} . 只要两边取对数后, 分别作为横、纵坐标, 再使用最小二乘法拟合, 即可得斜率 β . 这一过程, 就是所谓 β 检验³⁾.

值得指出的是, 这里所考虑的标度律都是相对标度律, 即由 ESS(Extended Self-Similarity)^[15]方法定出的标度律. 所谓 ESS 方法, 简单地讲就是湍流实验数据分析发现任意阶次为 p 的速度结构函数对 q 阶(通常取为 3 阶)结构函数的依赖关系是很好的幂次关系,

3) SHE Zhen - Su, LIU Li. Quantifying intermittent structures in turbulence. *Acta. Mech. Sin.* (to appear), 2001.

即

$$S_p(l) \propto (S_q(l))^{\zeta(p,q)}, S_p(s) \propto (S_q(s))^{\zeta(p,q)} \quad (10)$$

$\zeta(p, q)$ 称为 S_p 对 S_q 的相对标度指数. 这种现象可以理解为: 在标度律不适用的范围内, 不同阶的速度结构函数都表现出对幂次同样的偏离, 而它们的相对函数依赖关系却保持不变. 在充分发展的湍流的惯性区, $S_p(l) \propto l^{\zeta(p)}$, $S_p(s) \propto s^{\zeta(p)}$, 由于 $S_3 \propto l$ 和 $S_3 \propto s$, 因此

$$\zeta(p, 3) = \zeta(p), \quad (11)$$

即相对标度指数可以看作绝对标度指数的一种近似. 而在其他系统中, 这种近似不一定成立, 求得的只是相对标度指数.

3 大气边界层湍流速度场的层次结构分析

通过对大量数据分析发现, 大气边界层的速度场的垂直分量满足很好的层次相似律, 稳定层结下的垂直速度场的层次性不如不稳定层结下垂直速度场的层次性. 图 1—图 3

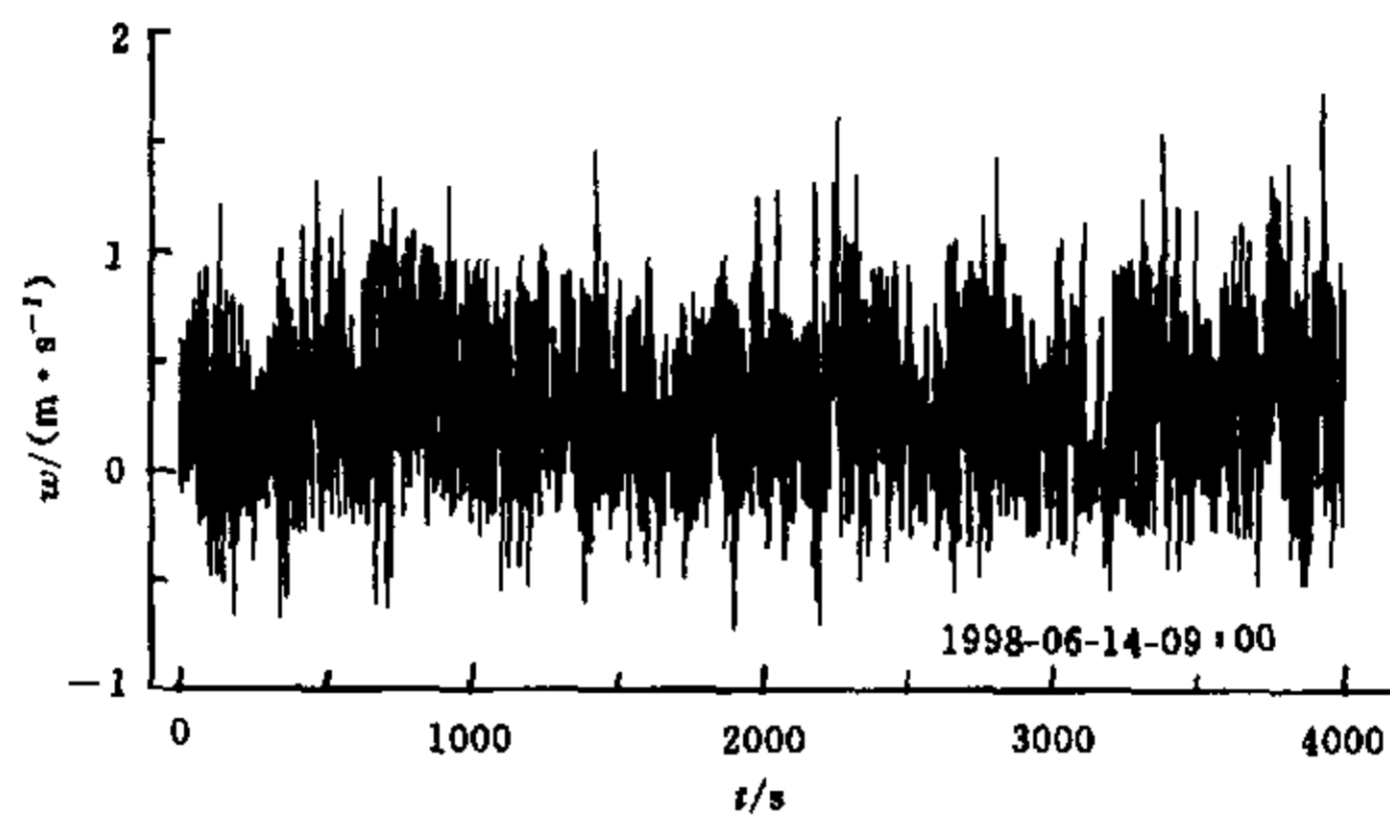


图 1 垂直速度序列的一段

Fig. 1 A segment of vertical velocity time series

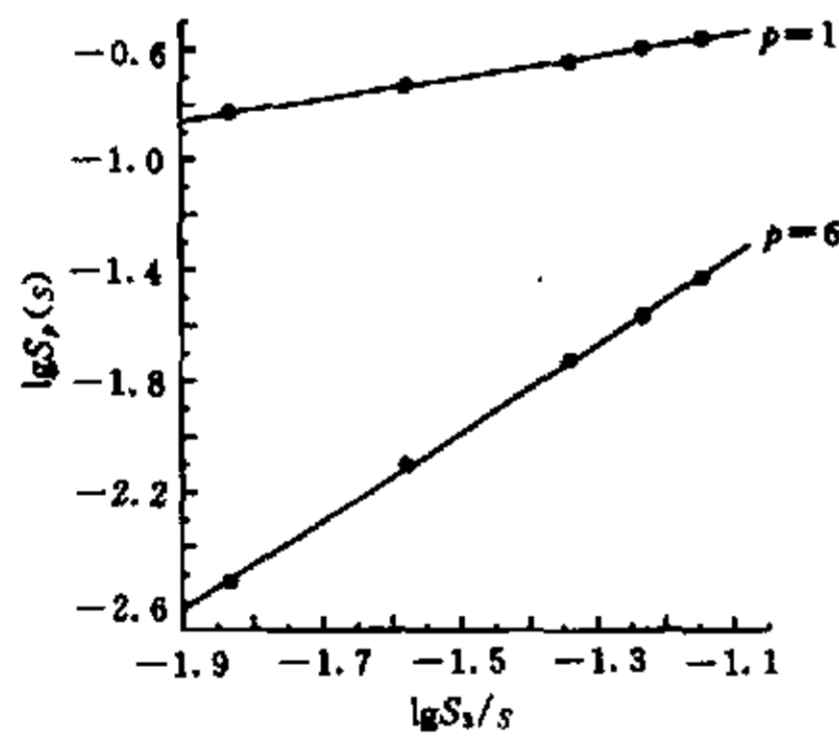


图 2 不稳定层结下垂直速度脉动的扩展自相似分析
实线为线性拟合.

Fig. 2 ESS analysis of vertical velocity, unstable stratification solid line is its linear fit.

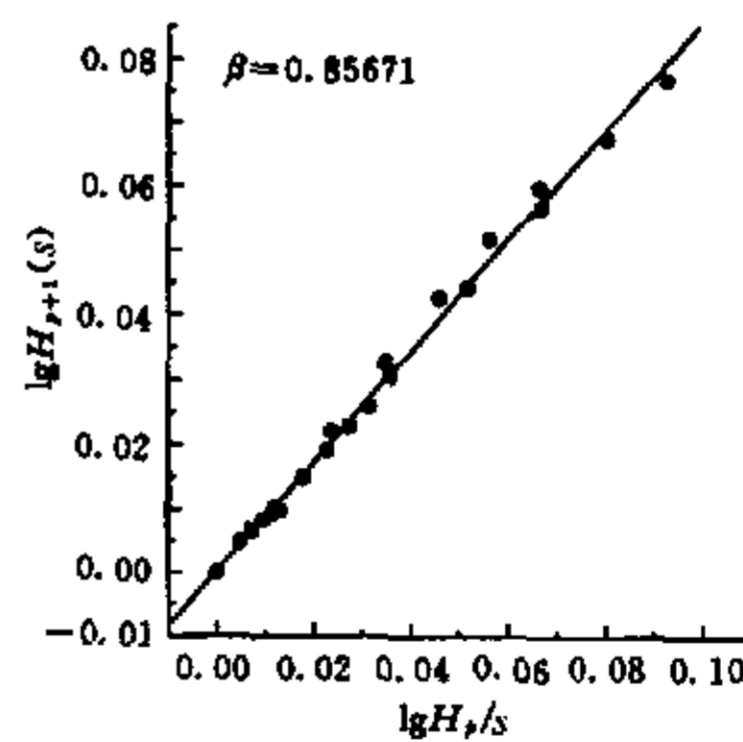


图 3 不稳定层结下垂直速度脉动 β 的检验
实线为线性拟合.

Fig. 3 β -test of vertical velocity, unstable stratification solid line is its linear fit.

中给出的是 1998 年 6 月 14 日 09:00(不稳定层结)的结果分析. 图 1 为垂直速度序列的一段, 很明显其中的脉动存在多尺度结构; 图 2 是扩展自相似(FSS)分析, 从中可以看出低阶矩和高阶矩都有很好的扩展自相似性; 图 3 为 β 检验, 很好的线性关系验证了层次相似律的存在, 说明不稳定层结下的大气边界层垂直速度存在多尺度、多层次的结. 其他不稳定层结下的数据分析也有相似的结论.

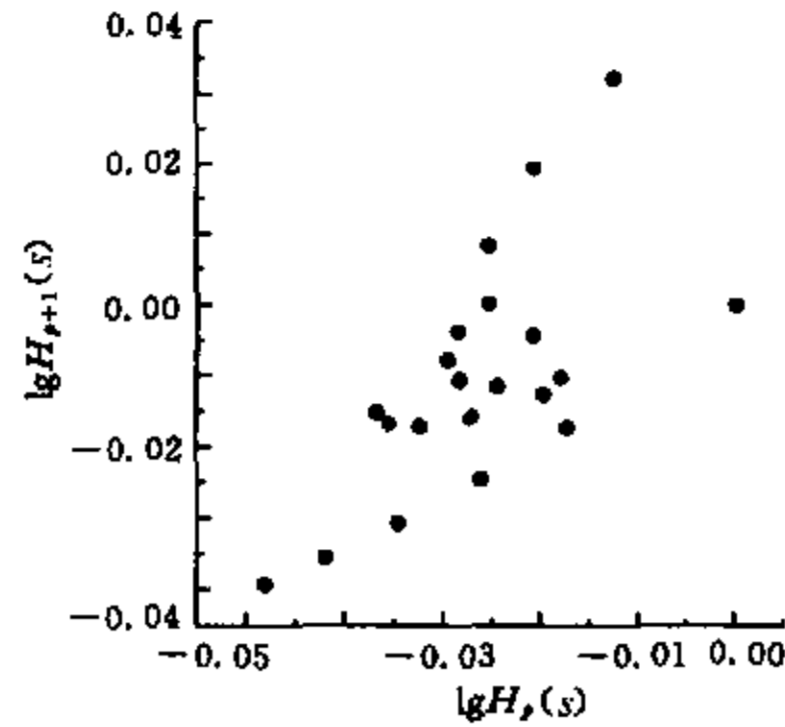


图 4 稳定层结下垂直速度脉动的 β 检验

Fig. 4 β -test of vertical velocity, stable Stratification

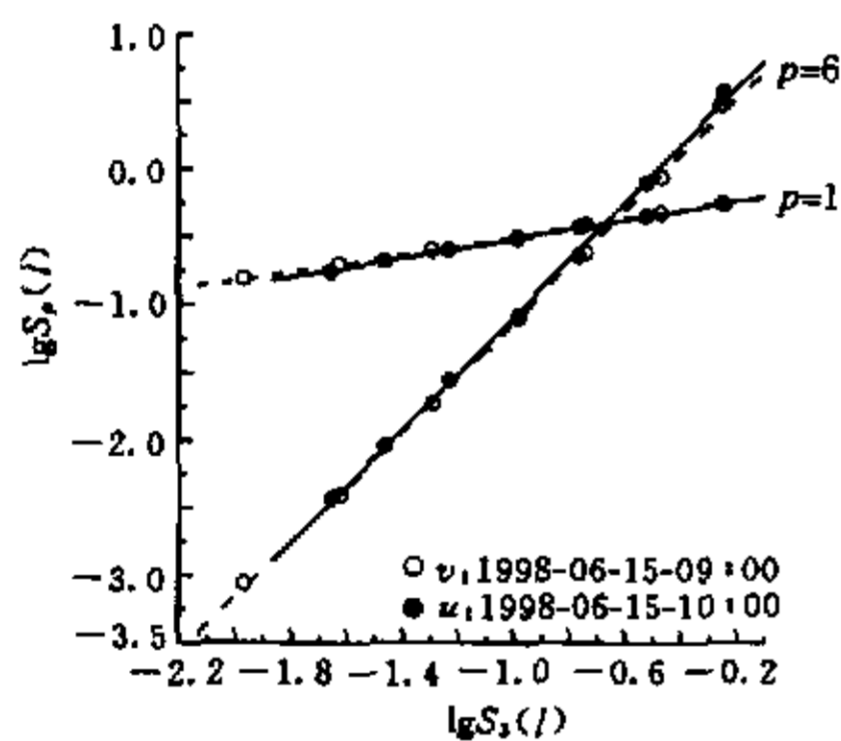


图 5 不稳定层结下水平速度脉动的扩展自相似分析

实心圆和实线、空心圆和虚线分别代表水平速度场沿纬圈和经圈分量的结果即线性拟合.

Fig. 5 ESS analysis of horizontal velocity, unstable stratification

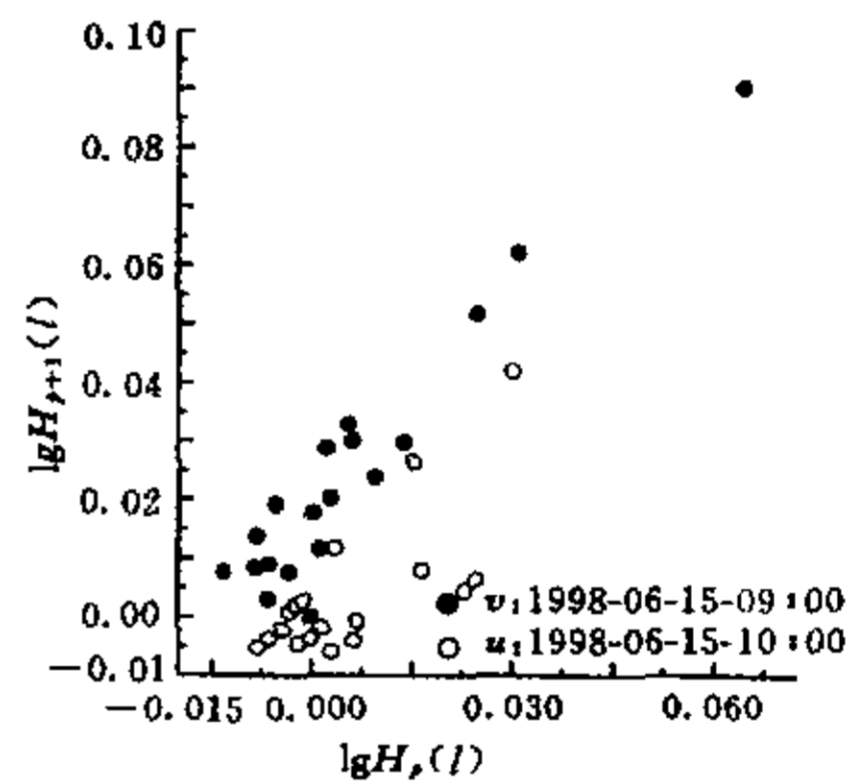


图 6 不稳定层结下水平速度脉动的 β 检验

实心圆和空心圆分别代表水平速度场沿纬圈和经圈分量的结果.

Fig. 6 β -test of horizontal velocity, unstable stratification

对于不稳定(或稳定)层结下垂直(或水平)速度脉动 β 检验(图 4、图 6)以及不稳定层结下水平速度脉动(图 4)的扩展自相似分析如下. 与不稳定层结下大气边界层垂直速度场的良好层次律不同的是, 在现有数据的分析基础上, 稳定层结下的大气边界层垂直速度场的层次律很差或不存在层次律(见图 4, 1998-06-14-01:00 稳定层结下的对应 β 检验). 初步分析认为造成两者不同的原因是在稳定层结下逆温层的存在使得大气的对流活动被抑制, 边界层风速梯度大, 边界层湍流的非各向均匀性强, 边界层的能量在垂直方向

得不到很好的传输,从而造成垂直速度场不能在多种尺度被激发。

进一步分析表明,水平风速场通常有很好的扩展自相似标度性(图5),但根据现有的数据未发现有层次相似律(图6),在 β 检验中没有发现很好的线性拟合。根据层次结构理论分析,水平风速场没有很好的自组织性。 ζ_p 随 p 的变化有时基本上是线性的,因此更多体现出一种(分数)随机布朗运动。有时水平速度场的脉动中会出现一些高振幅的离散点,它们将破坏扩展自相似性,这些高振幅的脉动,可能来自水平运动的一些动力效应。由于大气边界层水平风向变化的多样性,这种无组织性是可以理解的,表现在测得的水平风速序列更像一种随机信号。

4 结论与讨论

与实验湍流相比,大气边界层湍流是一种自然环境条件下的复杂运动,其中的层次相似性体现了复杂运动中多层次多涨落的自组织特性。层次相似律适用性在其他各种湍流场已经得到了广泛的验证,本文是作为在近地面大气边界层速度脉动场中的检验。大气边界层垂直速度场的层次结构参数计算说明,大气边界层中垂直速度具有较强的间歇性和自组织性,这是由于垂直速度场主要来源于热动不稳定性造成,而垂直涡旋运动具有良好的空间局域性,使得能量级串过程可以得到充分的发展,大小尺度的结构具有良好的相关性。其次,在现有数据的基础上,对速度场水平分量序列的层次结构分析说明,速度场的水平分量的自组织性要比垂直分量的差。大气边界层湍流场的层次相似性受到更多因素影响,除了层结因子的影响比较显著外,当时的天气条件对层次相似性的影响可能更显著。分析发现层次相似性并不是在每天的每个时段都能很好地满足,经常是在某天很多时段都有很好的层次相似关系,而在另外的某一天则几乎没有很好的层次相似关系;而且,在每个时段,满足很好的层次相似关系的尺度范围也是不一样的,这说明在不同时间不同时间段的湍流多尺度激发是不同的。

由于存在数据样本数和采样频率的限制,现有的分析只是初步的,对大气边界层湍流层次相似性起主要影响的具体原因尚需进一步分析。

吴介之教授、苏卫东博士、邹正平博士和任奎同学同作者进行过多次有益的讨论,在此深表谢意。

参 考 文 献

- [1] 胡非. 湍流间歇性与大气边界层. 北京: 科学出版社, 1995.
HU Fei. Turbulence, intermittency and atmospheric boundary layer. Beijing: Scientific Press, 1995.
- [2] 刘式达, 陈炯, 刘式适. 近百年中国、北半球和南半球气温内在结构的比较(1). 应用气象学报, 1999, 增刊: 9—15.
LIU Shi-Da, CHEN Jiong, LIU Shi-Kuo. The comparison for temperature hierarchaical structure in the past 100 years among China, North hemisphere and South hemisphere(1). *Quarterly journal of Applied Meteorology* (in Chinese). 1999, supplement: 9—15.
- [3] 陈炯, 刘式达, 刘式适. 近百年中国、北半球和南半球气温内在结构的比较(2). 应用气象学报, 1999, 增刊: 142—147.
CHEN Jiong, LIU Shi-Da, LIU Shi-Kuo. The comparisom for temperature hierarchaical structure in the past 100 years among China, North hemisphere and South hemisphere(2). *Quarterly Journal of Applied Meteorology* (in Chinese). 1999, supplement: 142—147.

- [4] 刘式达, 郑祖光, 林振山. 气候层次动力学初探. 见: 气候变化若干问题研究. 北京: 科学出版社, 1992, 1—5.
LIU Shi-Da, ZHENG Zhu-Guang, LIN Zhen-Shan. Primary studies of climatic hierarchical dynamics. In: Studies of Several Questions in Climatic Variability. Beijing: Scientific Press, 1992, 1—5.
- [5] 荣平平, 刘式达. 不同时间尺度下气候变化基本特征的探索. 气候与环境研究, 1997, 2(1): 77—82.
RONG Ping-Ping, LIU Shi-Da. An investigation of climate change on different time scales. *Climatic and Environmental Research* (in Chinese). 1997, 2(1): 77—82.
- [6] SHE Zhen-Su, Leveque E. Universal scaling laws in fully developed turbulence. *Phys. Rev. Lett*, 1994, 72: 336.
- [7] SHE Zhen-Su, Waymire E. Quantized energy cascade and log-Poisson statistics in fully developed turbulence. *Phys. Rev. Lett*, 1995, 74: 262.
- [8] SHE Zhen-Su. Hierarchical Structures and scaling in turbulence. *lecture Notes in Physics*, 1997, 491: 28.
- [9] 余振苏, 苏卫东. 湍流脉动的层次结构描述. 见: 湍流研究新进展, 北京: 中国科学技术出版社, 1999.
SHE Zhen-Su, SU Wei-Dong. Hierarchical prescription of turbulent fluctuations. In: *New Advances in Turbulence Research*. Beijing: Chinese Sci. and Tech. Press, 1999.
- [10] Eidelman A, Branover H, Moiseev H H, et al. Large-scale turbulence universality and the study of extreme weather events. *Phys. Chem. Earth* (B). 2000, 25(1): 35—38.
- [11] Politano H, ouquet A. Model of intermittency in magnetohydrodynamic turbulence. *Phys. Rev. E*. 1995, 52(1): 636—641.
- [12] Ruiz-Chavarria G, Baudet C, Ciliberto S. Scaling laws and dissipation scale of a passive scalar in fully developed turbulence. *Physica D*, 1996, 99: 369—380.
- [13] Queiros-Conde D. Geometrical extended self-similarity and intermittency in diffusion-limited aggregates. *Phys. Rev. Lett*. 1997, 78(23): 4426—4429.
- [14] Turiel A, Mato G, Parga. Self-Similarity properties of natural images resemble those of turbulent flows. *Phys. Rev. Lett*. 1998, 80(5): 1098—1101.
- [15] Benzi R, Ciliberto S, Tripiccone R, et al. Extended self-similarity in turbulent flows. *Phys. Rev. E*, 1993, 48: R29—R32.

ANALYSIS FOR HIERARCHICAL STRUCTURES OF THE VELOCITYFIELD IN THE ATMOSPHERIC BOUNDARY LAYER

FU ZUN-TAO^{1,2,4)} LI XIN⁴⁾ LIU SHI-DA^{1,2)} SHE ZHEN-SU^{1,3)}

1) State Key Laboratory of Turbulence Research, Peking University, Beijing 100871, China

2) School of physics, Peking University, Beijing 100871, China

3) Department of Mathematics, UCLA, Los Angeles, CA 90095, USA

4) LAPC, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Science, Beijing 100029, China

[Abstract] A statistical analysis is made for the velocity time series in an atmospheric boundary layer. The She-Leveque hierarchical symmetry is found in the vertical velocity fluctuations, but it does not exist in horizontal velocity fluctuations. Further analysis shows that the results are different under varied physical conditions, and possible explanation is given. The result suggests that the She-Leveque hierarchical structure model gives a good indication of the self-organization in the complex atmospheric boundary layer.

[Key words] Scaling law, Hierarchical structure, Atmospheric boundary layer, Stratification.