

李 敏, 蒋维楣, 李 昕等. 大气边界层湍流的动力非平稳性的验证. 地球物理学报, 2005, 48(3): 493 ~ 500

Li M, Jiang W M, Li X, et al. A test of the dynamical nonstationarity in atmospheric boundary layer turbulence. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2005, 48(3): 493 ~ 500

大气边界层湍流的动力非平稳性的验证

李 敏¹, 蒋维楣¹, 李 昕^{2,3}, 浦一芬²

1 南京大学大气科学系, 南京 210093

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

3 北京市环境保护局, 北京 100044

摘 要 首次用验证时间序列中是否存在动力非平稳性的一种简单图示方法——space time-index 法来分析大气边界层湍流的动力平稳性特征. 本文以取自淮河流域和威斯康星森林下垫面条件下的三维高精度风速和温度、湿度湍流脉动资料对大气边界层湍流的平稳性特征进行了分析. 结果表明 space time-index 方法能有效地检验大气边界层湍流信号中是否存在动力平稳性. 另外, 均匀下垫面条件(水稻田)及复杂下垫面条件(森林)下的大气边界层湍流信号中几乎都存在动力非平稳性, 大气湍流动力学非平稳性可能是边界层湍流信号相当普遍具有的一种特性. 大气边界层湍流中的间歇性和相干结构使得其非平稳性图形的特征不同于一般时间序列非平稳性图形的“V”型特征; 森林下垫面条件下的湍流信号比相对均匀下垫面(水稻田)下的湍流信号更有组织性, 相干结构更强.

关键词 Space time-index, 非平稳性, 大气边界层湍流, 间歇性, 相干结构

文章编号 0001-5733(2005)03-0493-08 **中图分类号** P404 **收稿日期** 2003-10-20, 2004-12-28 收修定稿

A test of the dynamical nonstationarity in atmospheric boundary layer turbulence

LI Min¹, JIANG Wei-Mei¹, LI Xin^{2,3}, PU Yi-Fen²

1 Department of Atmospheric Sciences, Nanjing University, Nanjing 210093, China

2 LAPC, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China

3 Beijing Municipal Environmental Protection Bureau, Beijing 100044, China

Abstract A graphical method, named space time-index plots for testing dynamical nonstationarity in general time series is addressed. In this method, the graph is V-shaped due to nonstationarity. The method is used to test dynamical nonstationarity in atmospheric boundary layer turbulence. The high resolution temperature, humidity and three components of wind speed under various land surface obtained from HUBEX (Study of Energy and Water Cycle Over Huaihe River Basin) and PFRD (Park Falls Ranger District of the Chequamegon National Forest, about 15km east of Park Falls, Wisconsin, U. S. A.) are analyzed. The results show that the space time-index plots method can test whether dynamical nonstationarity exists in atmospheric boundary layer turbulence signal. There is almost few dynamical stationarity in atmospheric boundary layer turbulence signal both under rice from HUBEX and under forest from PFRD. Dynamical nonstationarity is likely one common property of atmospheric boundary layer turbulence signal. The intermittency and coherent structures in atmospheric boundary layer turbulence lead to some differences in the nonstationarity graph shape between atmospheric boundary layer turbulence and general time series. The results show that the turbulence signal over forest from PFRD is dominated by more distinct coherent structures and intermittency than that over rice from

基金项目 国家自然科学基金项目(40333027 和 40205003)资助.

作者简介 李 敏, 女, 1978 年生, 博士, 主要从事大气边界层湍流结构及边界层数值模拟方面的研究. E-mail: limin@huafeng.cma.gov.cn

HUBEX.

Key words Space time-index plots, Nonstationarity, Atmospheric boundary layer turbulence, Intermittency, Coherent structure

1 引言

有关非平稳复杂系统的研究,是目前具有非常重要的科学意义的前瞻性课题.对于大气边界层来说,大气边界层湍流是一个复杂系统.也正是由于它的复杂性,大气边界层湍流现象是目前研究最多的复杂现象之一.对于选择合适的大气扩散模式并确切地估计模式参数来说,湍流数据分析是重要的.绝大多数的非线性数据分析技术要求被分析的时间序列是动力平稳的^[1],然而,湍流观测数据中有许多是动力非平稳的,这就导致许多研究结果产生了一定程度的异议.探讨大气边界层湍流数据中动力非平稳性是否存在是必要的.同时,我们期望对大气边界层湍流数据的平稳性分析能对研究边界层湍流中的层次结构提供一个好的数据质量控制方法^[2].许多类型的大气边界层湍流都显示具有混沌的特性^[3-5],在其中发现了低维的奇怪吸引子,但这并不能表明大气边界层湍流就是平稳的.所以,还需要进一步对此作确切的检验.

本文应用验证时间序列中是否存在动力非平稳性的一种简单图示方法——space time-index (STI) 法^[6,7]来对大气边界层湍流信号进行分析,判别其是否有效地检验复杂的大气边界层湍流信号的动力非平稳性特征的存在以及不同下垫面条件下的动力非平稳性特征的区别.

2 观测数据

本文的观测资料取自淮河流域试验 (Study of Energy and Water Cycle Over Huaihe River Basin,简称 HUBEX) 的湍流观测资料和美国威斯康星州北部的国家森林大塔 WLEF 观测资料.详细的试验描述见下文.一些统计特征量,如平均速度 \bar{U} 、摩擦速度 u^* 、Obukhov 长度 L 以及感热通量 H (向上为正) 计算如下,即

$$u^* = [\overline{uw^2} + \overline{vw^2}]^{1/4}, \quad (1)$$

$$H = \overline{w\theta}, \quad (2)$$

$$L = - \frac{C_p \overline{w\theta^3}}{kg \overline{w\theta}}, \quad (3)$$

其中 $\overline{uw^2}$ 和 $\overline{vw^2}$ 为湍流量, ρ 是空气密度, C_p 为定压比热, g 为重力加速度, k 为卡门常数,大气层结稳定度由 $\sigma = z/L$ 定义,这里 $z = z_m - d$, z_m 是观测高度, d 是位移高度.本文以取自 HUBEX 和 WLEF 的半小时观测资料来分析不同下垫面条件下的大气边界层湍流的非平稳特性.表 1 是本文选取 HUBEX 和 WLEF 的若干观测时段的湍流资料的平均气象参数,表中的 \bar{T} 为平均温度.在资料的选取原则上,我们主要考虑数据系列中野点尽量少的数据组.此外,为了对不同层结条件的湍流资料作对比分析,文中选用三种层结条件下的数据组进行对比分析.

表 1 非平稳性分析中的平均气象参数

Table 1 Mean meteorological variables used in the nonstationarity analysis

观测场所	试验	时间	z/L	$\bar{U}/(\text{m s}^{-1})$	$u^*/(\text{m s}^{-1})$	$H/(\text{W m}^{-2})$	$\bar{T}/(\text{ }^\circ\text{C})$
HUBEX (1998 - 06 - 10)	1	10:00 ~ 10:30	- 2.74	1.46	0.09	46.4	25.6
	2	14:00 ~ 14:30	- 0.74	4.38	0.20	121.6	28.6
	3	18:00 ~ 18:30	- 0.03	2.84	0.14	2.0	28.1
	4	21:00 ~ 21:30	12.12	0.92	0.02	- 3.1	25.1
	5	24:00 ~ 24:30	1.51	1.06	0.05	- 4.5	24.6
WLEF (1999 - 08 - 20)	6	12:00 ~ 12:30	- 3.92	1.90	0.30	284.6	22.5
	7	14:00 ~ 14:30	- 0.39	1.80	0.47	112.6	23.6
	8	18:00 ~ 18:30	- 0.02	2.20	0.20	1.2	21.2
	9	21:00 ~ 21:30	3.98	0.99	0.09	- 10.1	17.6
	10	24:00 ~ 24:30	5.66	0.73	0.08	- 9.4	16.2

2.1 HUBEX 观测

淮河流域观测试验(HUBEX)是1997~2001年期间的国家自然科学基金重大项目.本文试验数据采自HUBEX加密观测期间(1998-06-05~1998-07-30)的湍流观测资料.观测场地设在安徽省寿县气象局的气象站内,场地的东面是大片开阔的麦田;南部麦田延伸超过2km.仪器设置高度约4m.使用三分量超声风温仪(SAT-211/3K,采样频率20Hz,声程15cm)和红外湿度脉动仪(M100,采样频率10Hz,光程15cm).

2.2 WLEF 观测

WLEF大塔位于美国威斯康星州北部的国家森林地区(Chequamegon).大塔高447m,周围为常绿林和落叶林的混合地带.冠层高度为20m.大塔上设置的通量测量仪器包括三轴超声风速表(Applied Technologies Inc., Boulder, Colorado, 型号SAT-11/3K; or Campbell Scientific Inc., Logan, Utah, 型号CSAT3,具体用哪种视数据而定),用以测量湍流风场和虚温;红外气体分析仪(IRGA)(Li-Cor, Incorporated, Lincoln, Nebraska, 型号LF6262),用以测量水汽混合比.仪器安装高度为30m,采样频率为5Hz.

3 Space time-index 法

Space time-index (STI)法是验证时间序列动力非平稳性的简单的图示方法,是通过检查相点在相空间中的不同空间尺度上的时间分布特征来检验该时间序列是否为非平稳的^[6,7].对于一个采样间隔给定且相等的时间序列,首先将它归一化为 $[0,1]$ 范围里的时间序列,并将它记为 $\{s_i; i=1, 2, \dots, N_s\}$.然后,按下面的步骤处理:

(1)把一维时间序列嵌入到 m 维相空间中: $\{x_i = [s_i, s_{i+1}, \dots, s_{i+(m-1)}]; i=1, 2, \dots, N\}$,这里 τ 为延滞时间, $N = N_s - (m - 1)$, N 为相空间中相点的个数.

(2)定义相空间中两点 x_i 和 x_j ($i \neq j$)间的时间指数 D 为

$$D = T(x_j) - T(x_i) = j - i, \quad \text{如果 } j > i;$$

$$D = N - T(x_i) + T(x_j) = N - i + j, \quad \text{如果 } j < i.$$

(4)

这里 $T(x_i) = i$,表示 x_i 在相空间中轨道的时间定位.

(3)对于任一给定的距离 ϵ :当 $|x_j - x_i| < \epsilon$,计算所有 x_i 和 x_j ($i \neq j$)两点间的时间指数.对于计算出的每一个时间指数,我们以 $N(D)$ 表示相同 D 的累计量:

$$N(D) = N(D) + 1. \quad (5)$$

(4)最大和最小的时间指数之间分成 $K+1$ 个间距相等的时间指数,将 $N(D)$ 在这些等间距的时间指数之间重新分配,并归一化为

$$f(D) = \frac{N(D)}{N_t}, \quad (6)$$

这里 $N_t = \sum_{D=0}^K N(D)$; $[0, K]$ 是归一化的时间指数.

(5)作图:归一化的密度分布 $f(D)$ 对归一化的时间指数 D .

在第(3)步搜寻相邻两点时应排除时间相关的点.在STI法中,如果一时间序列是完全平稳的,则对任一 ϵ ,所有的密度分布是严格重合的水平直线.对有限的时间序列来说,平稳性表现为有着弱小幅度脉动的接近于水平直线的密度分布.对于非平稳来说,密度分布为“V”型.

4 计算与分析

本项研究中,我们对取自HUBEX和WLEF的多组观测数据进行了分析.这里仅将表1中的数据和Lorenz方程生成的混沌数据^[8]进行分析说明.鉴于篇幅的限制,本文仅给出能代表典型特征的STI分布图,对于表现重复特征的图,本文不再给出.对试验2和试验5,这里仅给出 w 的STI分布图.

4.1 Lorenz 方程

Lorenz方程可以被认为是混沌研究的起源,它表述了最简单的三维混沌方程组.本文使用的Lorenz方程为

$$\begin{aligned} \dot{x} &= -x + y, \\ \dot{y} &= rx - y - xz, \\ \dot{z} &= -bz + xy, \end{aligned} \quad (7)$$

其中 $\sigma = 10$, $b = 3$, $r = 20$,初始值取为 $(10, 0, 0)$.我们使用由Lorenz方程输出的10000个点生成嵌入维数为2、延滞时间 $\tau = 3$ 的相空间中的相点进行分析.相点的距离从0.001取到0.01,步长为0.001.图1为Lorenz方程的STI图.由图可见,STI分布非常接近于一条直线,脉动幅度的大小不超过1%,说明分析的时间序列是平稳的.由此可得出结论,类似确

定性的混沌信号是动力平稳的.

4.2 HUBEX 湍流数据

对表 1 中的 HUBEX 湍流观测资料的三维风速 u 、 v 、 w 和温度 T 、湿度 q 进行分析. 图 2~图 6 为各

观测时段的 STI 分布图, 参数 $m=2$, $n=20$, $K=100$, 从 0.10 变化到 0.15. 由表 1 可知, 图 2 和图 3 的湍流观测资料为不稳定的, 图 4 的湍流观测资料为近中性的, 图 5 和图 6 为稳定的.

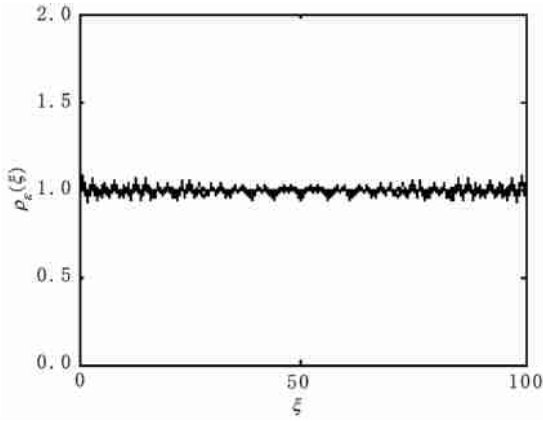


图 1 Lorenz 方程时间序列的 STI 分布 $m=2$, $n=3$, $K=100$, 从 0.001 变化到 0.010, $N_s=10000$.

Fig. 1 Density distributions () of a time series from the Lorenz equations

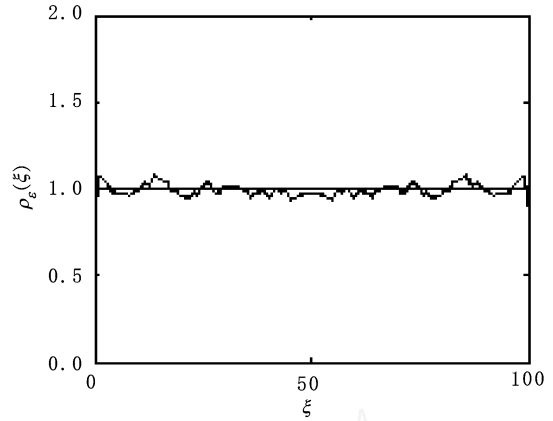


图 3 试验 2 中速度 w 的 STI 分布 ($N_s=36000$)

Fig. 3 Density distributions () of time series of component w of wind speed in Experiment 2

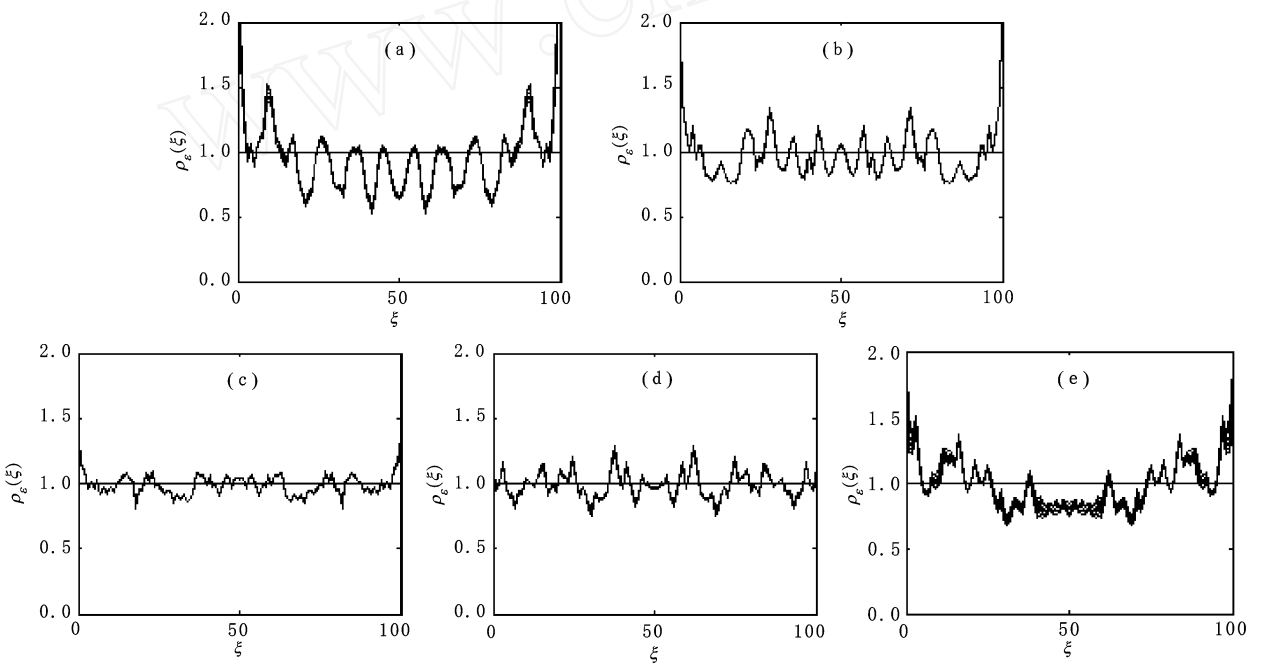


图 2 试验 1 的 STI 分布

(a) 速度 u ; (b) 速度 v ; (c) 速度 w ; (d) 温度; (e) 湿度. (a~d) 中 $N_s=36000$, (e) 中 $N_s=18000$.

Fig. 2 Density distributions () of time series in Experiment 1

(a) component u of wind speed; (b) component v of wind speed; (c) component w of wind speed; (d) temperature; and (e) humidity.

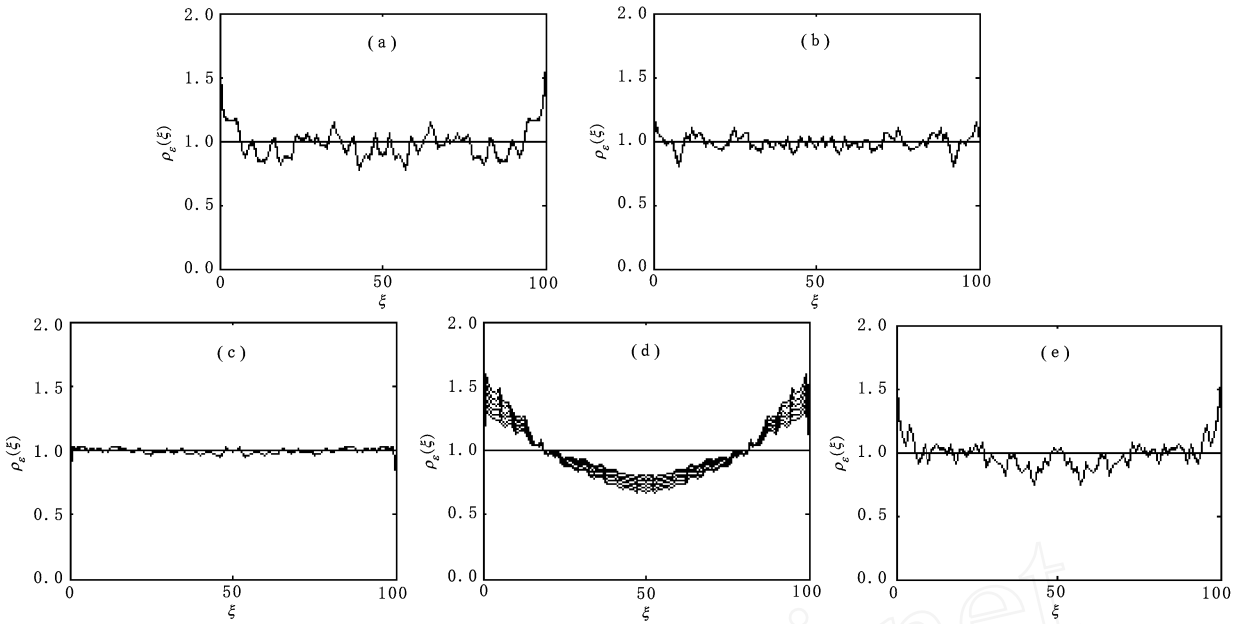


图4 试验3的STI分布

(a)速度 u ; (b) 速度 v ; (c) 速度 w ; (d) 温度; (e) 湿度. (a ~ d) 中 $N_s = 36000$, (e) 中 $N_s = 18000$.

Fig. 4 Density distributions () of time series in Experiment 3

(a) component u of wind speed; (b) component v of wind speed; (c) component w of wind speed; (d) temperature; and (e) humidity.

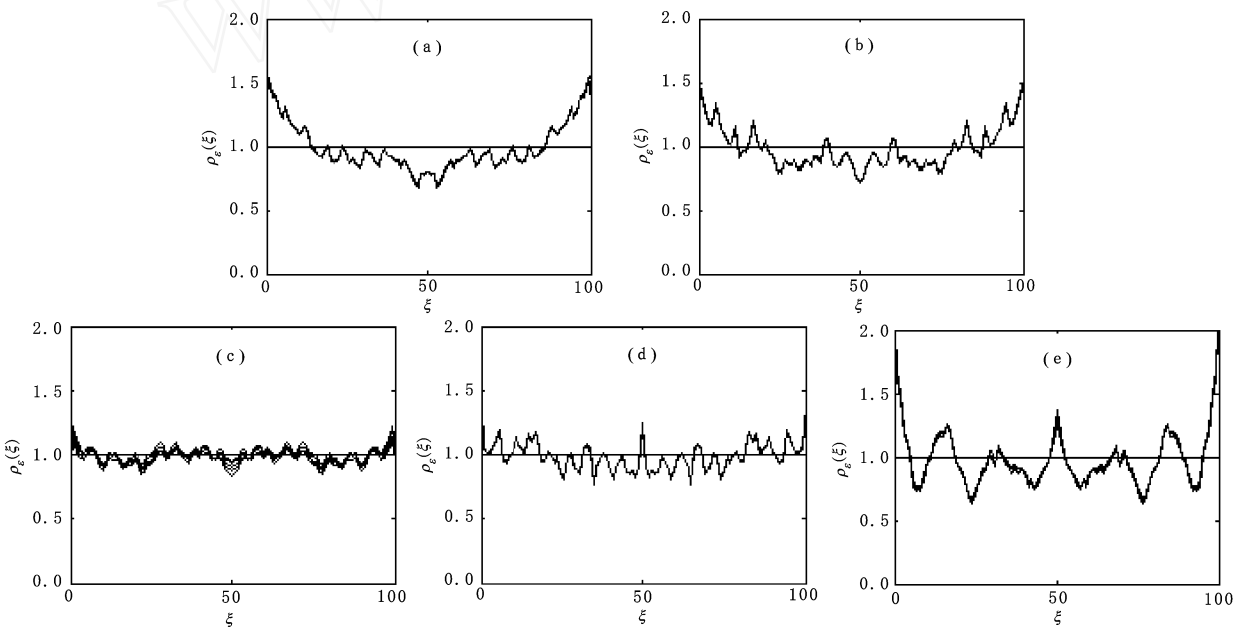


图5 试验4的STI分布

(a)速度 u ; (b) 速度 v ; (c) 速度 w ; (d) 温度; (e) 湿度. (a ~ d) 中 $N_s = 36000$, (e) 中 $N_s = 18000$.

Fig. 5 Density distributions () of time series in Experiment 4

(a) component u of wind speed; (b) component v of wind speed; (c) component w of wind speed; (d) temperature; and (e) humidity.

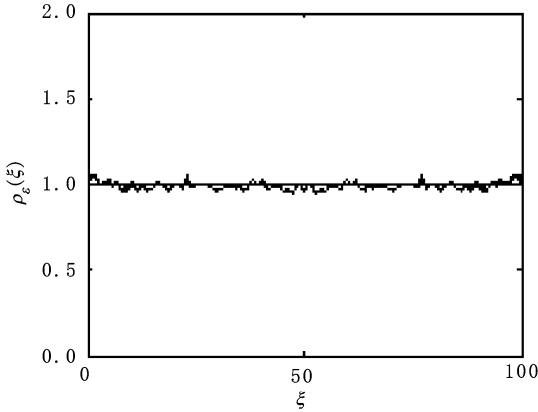


图6 试验5中速度 w 的 STI 分布 ($N_s = 36000$)
 Fig. 6 Density distributions () of time series of component w of wind speed in Experiment 5

显而易见, HUBEX 湍流观测资料中所有的 u , v , T 和 q 的 STI 分布图都是非线性的. 这表明所分析的时间序列都为动力非平稳的. 而且除了图 4d 中温度 T 的 STI 分布图呈现“V”字型外, 其余所有的非线性分布都不呈“V”字型. 对此可以通过检查吸引子的几何结构和 STI 算法本身来理解这一现象. 分析发现 STI 分布图的多样性是由于湍流相干结构和间歇性的存在而引起的. 当湍流间歇性很强时, 分布图趋向于叠加着明显脉动幅度的直线或叠加着明

显脉动幅度的“V”型的曲线. 前者如图 2(c, d), 图 4b, 图 5(c, d); 后者如图 4e, 图 5(a, b). 当湍流中存在强相干结构时, 分布图形中趋向于为叠加着大幅度脉动的“V”型曲线的, 如图 2(a, b, e), 图 4a, 图 5e. 但是湍流中的相干结构和脉动结构总是共存的^[9]. 因此叠加着大幅度脉动的“V”型曲线也总是叠加着明显的较小幅度的脉动.

同时注意到 w 的分布图并不总是有着明显脉动幅度的曲线, 例如图 3c, 图 4c 和图 6c. 它们的分布比较接近于叠加着微小脉动幅度的直线. 如果要求不是那么严格的话, 可以把它们作为准平稳的.

4.3 WLEF 湍流数据

对于森林下垫面条件的分析表明, 很容易把大气边界层划分为森林冠层和森林冠层以上的两层气流^[10]. 从地面到 2~3 倍的冠层高度被认为是受冠层影响的森林冠层; 在此区域以上则连接大气近地层气流. 对表 1 中的森林冠层时间序列 u, v, w, T 和 q 进行分析. 图 7~图 9 为它们的 STI 分布图, 参数 $m=2, N=20, K=100$, 从 0.10 变化到 0.15, $N_s=9000$.

易见, 所有的分布都是非线性的. 对 HUBEX 资料的分析表明, 该下垫面条件下的大气湍流资料中, 存在准平稳的时间序列; 但对森林冠层的分析中, 几

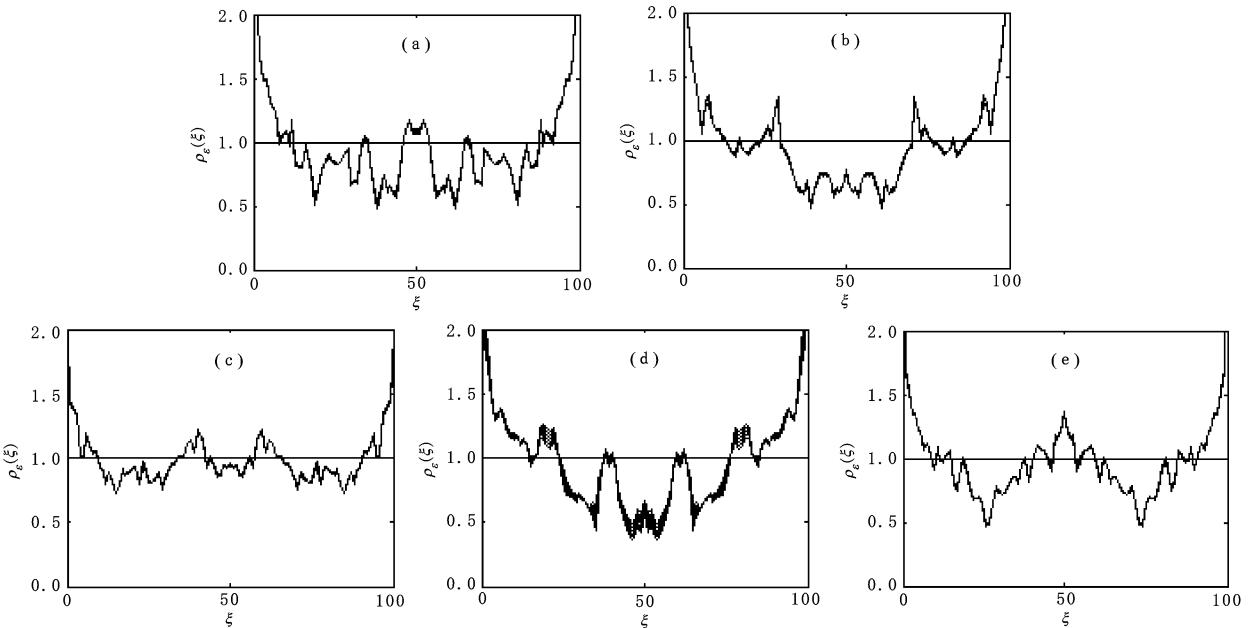


图7 试验6的 STI 分布

(a) 速度 u ; (b) 速度 v ; (c) 速度 w ; (d) 温度; (e) 湿度.

Fig. 7 Density distributions () of time series in Experiment 6

(a) component u of wind speed; (b) component v of wind speed; (c) component w of wind speed; (d) temperature; and (e) humidity.

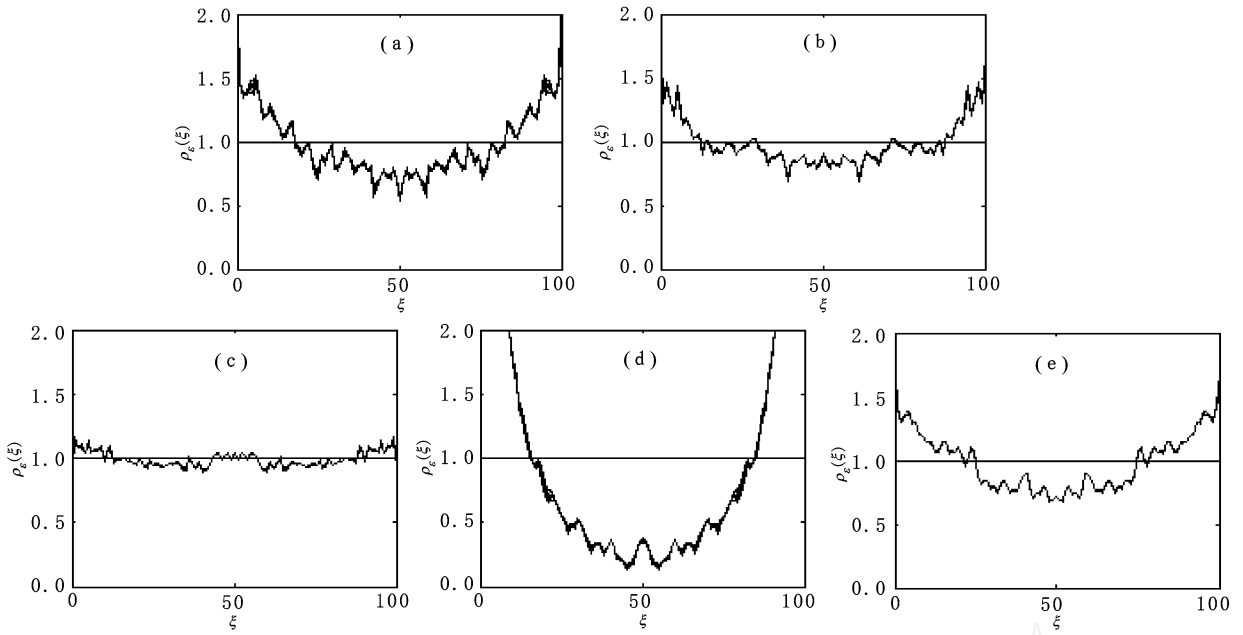


图 8 试验 8 的 STI 分布

(a) 速度 u ; (b) 速度 v ; (c) 速度 w ; (d) 温度; (e) 湿度.

Fig. 8 Density distributions () of time series in Experiment 8

(a) component u of wind speed; (b) component v of wind speed; (c) component w of wind speed; (d) temperature; and (e) humidity.

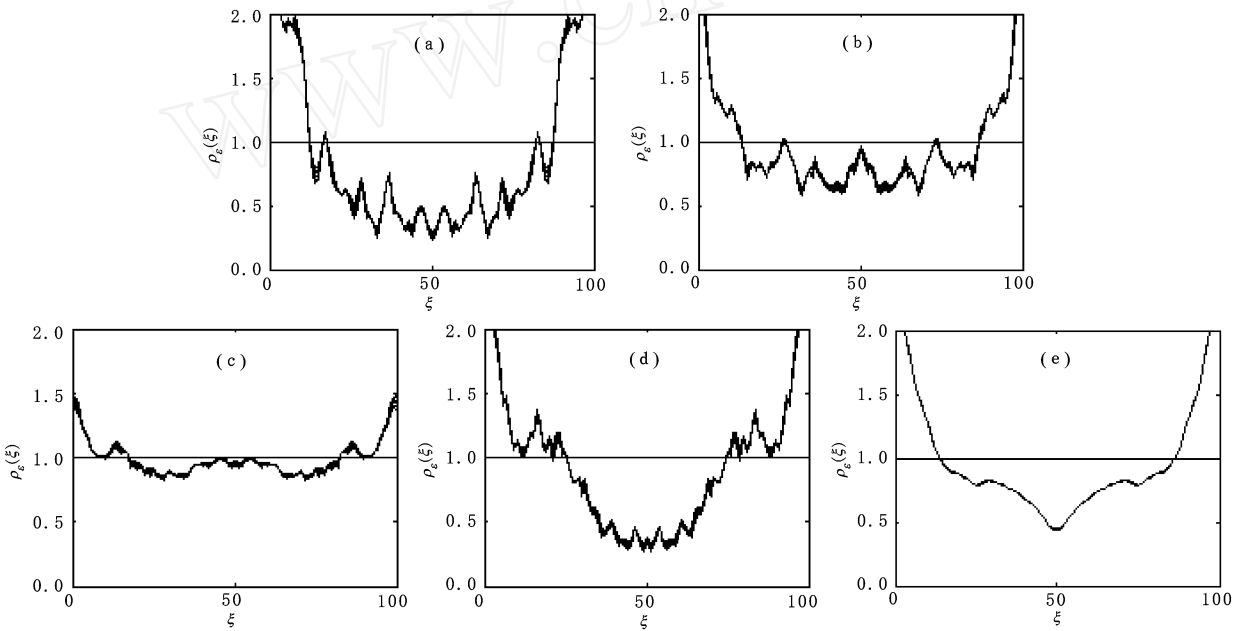


图 9 试验 10 的 STI 分布

(a) 速度 u ; (b) 速度 v ; (c) 速度 w ; (d) 温度; (e) 湿度

Fig. 9 Density distributions () of time series in Experiment 10

(a) component u of wind speed; (b) component v of wind speed; (c) component w of wind speed; (d) temperature; and (e) humidity.

乎不存在准平稳的时间序列. 在不稳定层结状况下 (图 7), 所有的分布都呈现为叠加有大幅度脉动的“V”型曲线. 这和 HUBEX 的分析结果不同. 在不稳

定层结状况下, HUBEX 的 STI 分析图中存在着有微小脉动幅度的直线、叠加着明显脉动幅度的直线和叠加着大幅度脉动的“V”型曲线. 这表明不稳定条

件下,森林冠层的湍流脉动信号比平坦下垫面的 HUBEX 湍流脉动信号更有组织性,存在更强的相干结构^[10,11]. 对于近中性和稳定层结状况下,森林冠层的湍流信号同样存在着更强的相干结构.

5 结果与讨论

(1) 应用 STI 法对不同下垫面的大气边界层湍流信号的非平稳性特征进行了分析. 分析表明,STI 法能有效地对复杂的大气边界层湍流信号的非平稳性特征进行验证.

(2) 从我们的这两份资料,即一份是相对均匀下垫面条件(水稻田),另一份相对复杂下垫面条件(森林)来看,大气边界层湍流信号中几乎都存在动力非平稳性. 由此我们推测大气湍流动力学非平稳性可能是边界层湍流信号相当普遍具有的一种特性,而湍流中的间歇性和相干结构使得获得的 STI 分布图比一般时间序列的 STI 分布图更为复杂.

(3) 森林冠层的湍流信号比 HUBEX 的湍流信号更有组织性,相干结构更强,STI 分布图更多地表现为叠加着大幅度脉动的“V”型曲线.

(4) 虽然大气边界层湍流具有混沌的特性,但由分析结果可见,大气边界层湍流几乎都为非平稳的. 这对数据分析技术提出了更高的要求. STI 法验证大气边界层湍流信号非平稳性的有效性使得我们能为湍流信号的层次相似性建立一个合适的控制方法.

致谢 感谢美国宾西法尼亚州立大学的 Dr. K. J. Davis 和 D. Ricciuto 提供森林下垫面湍流资料.

参考文献(References)

- [1] Huang N E, Shen Z, Long S R, et al. The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for nonlinear and non-stationary time series analysis. *Proceeding of the Royal Society of London Series A*, 1998, 454: 903 ~ 995
- [2] 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. *地球物理学报*,2002, 45(增): 30 ~ 36
Fu Z T, Li X, Liu S D, et al. Analysis for hierarchical structures of the velocity field in the atmospheric boundary layer. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2002, 45(Suppl.): 30 ~ 36
- [3] Jaramillo G P, Puente C E. Strange attractors in atmosphere boundary-layer turbulence. *Boundary-Layer Meteorol.*, 1993, 64: 175 ~ 197
- [4] Li X, Hu F, Liu G. Characteristics of chaotic attractors in atmospheric boundary-layer turbulence. *Boundary-Layer Meteorol.*, 2001, 99: 335 ~ 345
- [5] Gallego M C, Garcia J A, Cancillo M L. Characterization of atmospheric turbulence by dynamical systems techniques. *Boundary-Layer Meteorol.*, 2001, 100: 375 ~ 392
- [6] Yu D J, Lu W P, Harrison R G. Space time-index plots for probing dynamical nonstationarity. *Phys. Lett. A.*, 1998, 250: 323 ~ 327
- [7] Yu D J, Lu W P, Harrison R G. Detecting dynamical nonstationarity in time series data. *Chaos*, 1999, 9: 865 ~ 870
- [8] Lorenz E N. Deterministic nonperiodic flow. *J. Atmos. Sci.*, 1963, 20: 130 ~ 141
- [9] Farge M, Girard E, Meyer Y, et al. Improved predictability of two-dimensional turbulent flows using wavelet packet compression. *Fluid Dyn. Res.*, 1992, 10: 229 ~ 250
- [10] Finnigan J. Turbulence inside plant canopies. *Annu. Rev. Fluid Mech.*, 2000, 32: 519 ~ 571
- [11] Wesson K H, Katul G G, Siqueira M. Quantifying organization of atmospheric turbulent eddy motion using nonlinear time series analysis. *Boundary-Layer Meteorol.*, 2003, 106: 507 ~ 525