

Lorenz 系统长程相关性研究^{*}

王启光^{1)†} 支 蓉^{3)‡} 张增平^{1)‡}

1) 扬州大学物理科学与技术学院, 扬州 225002)

2) 中国科学院大气物理研究所东亚区域气候-环境重点实验室, 北京 100029)

3) 兰州大学大气科学学院, 兰州 730000)

4) 国家气候中心, 中国气象局气候研究开放实验室, 北京 100081)

(2008 年 1 月 6 日收到, 2008 年 4 月 25 日收到修改稿)

以典型的混沌系统——Lorenz 系统为研究对象, 运用去趋势涨落分析方法对不同初值和不同参数条件下系统的长程相关性进行研究. 结果表明: 系统长程相关性与系统初值所处相空间位置有关, 初值越靠近不稳定平衡点, 系统长程相关性越强, 其标度指数 α 就越大, 系统可预测性也就越好. 当系统完全处于混沌状态时, 随着控制参数 r 逐步增大其动力学结构的混沌特性更加明显, 标度指数 α 都呈下降趋势, 系统长程相关性逐渐减弱, 系统可预测性也随之减弱. 这揭示了长程相关性与系统可预测性的对应关系. 对系统进行扰动后发现, 当加入随机噪声后系统长程相关性随噪声强度增大而逐渐减弱. 这进一步表明 Lorenz 系统长程相关性(标度指数 α)是表征其可预测性的极其有效的物理量之一.

关键词: Lorenz 系统, 长程相关性, 去趋势涨落分析, 可预测性

PACC: 9260X

1. 引 言

1963 年, 美国著名气象学家 Lorenz^[1]在研究天气预报问题时, 发现确定性方程中会出现混沌现象. 他从流体的运动方程出发, 通过简化方程获得了具有三个自由度的系统, 并在计算机上用他所建立的微分方程模拟气候变化, 意外地发现初始条件的微小差别可以引起模拟结果的巨大变化. 这表明天气过程以及描述它们的非线性方程是如此的不稳定, 以至巴西热带雨林中的一只蝴蝶偶然拍动一下翅膀, 几星期后可能在美国德克萨斯州引起一场龙卷风, 这就是天气的“蝴蝶效应”. 大气系统是一个典型的非线性系统, 具有混沌特性. 这种特性使得对天气系统的可预测性研究具有可能性和复杂性^[2-6]. 基于大气系统的非线性性质, 对于其可预测性的探究一直是人们关注的重点. Lorenz 通过数值实验阐述了天气系统具有短期可预测性, 长期不可预测的特点. Epstein^[7]首先在理论上提出了动力随机预报,

随后 Leith^[8]提出了一个比较适合于实际应用的蒙特卡罗预报. 封国林和董文杰^[9, 10]对集合预报的物理基础进行了研究, 给出了集合预报能提高预测准确率的物理机制上的解释. 大气系统的混沌特性使得任何数值积分模式的预测能力都存在着一定的极限, 而且在不同区域的初值所对应的可预测性也可能各不相同. 当系统状态的主要影响因素发生变化时, 其预测时效很可能发生较大变化. 因此, 研究系统可预测性的内在规律, 对提高实际预测效率有着重要意义.

1994 年, 为分析 DNA 长程分子链结构的幂函数相关特征, Peng 等^[11]提出了去趋势涨落分析 (detrended fluctuation analysis, 简记为 DFA) 方法. 作为一种标度分析工具, 它可以有效滤去各阶趋势成分, 能够很好地处理非平稳数据并消除其中的伪相关现象, 检测非平稳时间序列中的相关性. 因而通过 DFA 方法获得的标度指数较传统的方法更为可靠. DFA 方法近几年已成功地应用于噪声分析、生理医学、地质学以及经济学等领域^[12-16]. DFA 方法是基

^{*} 国家自然科学基金(批准号:40675044)、国家重点基础研究发展规划(批准号:2006CB400503)和国家科技支撑计划(批准号:2007BAC03A01)资助的课题.

[†] E-mail: qiguangw@sina.com

于随机过程理论和混沌动力学新发展的一种分析方法. 本文用 DFA 方法来分析 Lorenz 系统的长程相关性, 探讨其长程相关性与可预测性的联系, 发现了系统初值和控制参数改变时其可预测性的变化规律. 这为长程相关性在非线性系统中的应用提供了一定的理论基础.

2. 系统及方法

2.1. Lorenz 系统

Lorenz 系统的一般形式为

$$\begin{aligned} \frac{dx}{dt} &= -\delta(x - y), \\ \frac{dy}{dt} &= -xz + rx - y, \\ \frac{dz}{dt} &= xy - bz, \end{aligned} \quad (1)$$

其中 x, y, z 分别代表对流速度、上升流与下降流的温差、垂直方向温度分布的非线性强度; δ, r, b 分别为普朗特数、瑞利数、外形比. Lorenz 系统是一个耗散系统, 耗散系统代表整体上的不稳定性. 若再加上局部不稳定性, 就构成了出现混沌的基础. 考虑到物理背景, 取 $\delta = 10.0, b = 8/3, 0 < r < \infty$, 令系统(1)左端为零, 得 Lorenz 系统的定常解

$$\begin{aligned} x &= 0, \\ y &= 0, \\ z &= 0; \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} x &= \sqrt{b(r-1)}, \\ y &= \sqrt{b(r-1)}, \\ z &= r-1; \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} x &= -\sqrt{b(r-1)}, \\ y &= -\sqrt{b(r-1)}, \\ z &= r-1. \end{aligned} \quad (4)$$

显然, 当 $r \leq 1$ 时系统只有一组实根, 即 $x = y = z = 0$. 这意味着无对流状态. 当 $r > 1$ 时系统(1)有三组实根. 经稳定性分析, 当 $1 < r < 24.74$ 时, 系统有两个对称稳定的平衡态解(3)(4)式, 此时(2)式是不稳定的解. 数值计算表明, 几乎任意选取的初值最终都趋于上述两个稳定的平衡态之一. 当 $r > 24.74$ 时, 在整个相空间内不存在任何稳定的平衡态, 这就是所谓的混沌状态. 该状态仍然存在着一定的时空结构, 即存在不同尺度的准周期特征.

2.2. 非线性系统长程相关性及 DFA 方法

时间序列 $\{x_i, i = 1, N\}$ 的持续性通常可以通过计算序列的自相关系数 $C(s)$ 来确定,

$$C(s) = \frac{1}{(N-s)\sigma^2} \times \sum_{i=1}^{N-s} (x_i - \bar{x})(x_{i+s} - \bar{x}) \propto s^{-\gamma}, \quad (5)$$

其中 \bar{x} 为序列 $\{x_i, i = 1, N\}$ 的平均值, σ 为序列标准偏差, γ 为相关指数. 若序列 $\{x_i\}$ 中不存在持续性, 则 $\{x_i\}$ 不具有相关性, 自相关系数 $C(s) = 0$. 若持续性在尺度 s 内存在, 当尺度 s 小于临界尺度 s_c 时, 自相关系数 $C(s) > 0$, 当尺度 s 超过临界尺度 s_c 后, 这种持续性消失. 但是大多数实际序列中存在着非平稳性, 如时间序列的各种尺度的趋势和噪声, 这严重影响了直接通过(5)式来计算自相关系数的可靠性. 因此对于非平稳时间序列, DFA 方法得到了广泛的应用. 对于非线性时间序列 $\{x_i, i = 1, N\}$, 首先计算序列的累积量 y_n ,

$$y_n = \sum_{i=1}^n \Delta x_i. \quad (6)$$

然后将累积量序列 $\{y_i, i = 1, N\}$ 分成长度为 s 的不重合的序列. 对于 n 阶 DFA 过程, 在每一段长度为 s 的累积量序列中, 对其局部趋势采用 n 阶多项式进行拟合, 去掉局部拟合趋势后可得到波动序列 $\{y_i, i = 1, N\}$. 最后, 平均所有各段波动函数可得到累积量序列的均方波动函数

$$F_n(s) = \frac{1}{N_s} \sum_{i=1}^{N_s} y_s^2(i)^{1/2}. \quad (7)$$

若 $F_n(s)$ 与窗口长度 s 存在标度关系, 则

$$F_n(s) \propto s^\alpha, \quad (8)$$

其中 α 为标度指数, 可通过线性拟合均方波动函数 $F_n(s)$ 和窗口长度 s 的双对数曲线得到. 根据随机游走理论, 对于给定的窗口长度 s , 累积序列的均方波动函数 $F_n(s)$ 与原序列的自相关系数 $C(s)$ 有关. 当序列存在长程相关性时,

$$\alpha = 1 - \frac{\gamma}{2}. \quad (9)$$

Lee 等^[17]关于白噪声、 $1/f$ 噪声、布朗噪声的分析结果表明, DFA 方法能够很好估计它们的标度指数, 刻画各自的相关性特征. 当 $0 < \alpha < 0.5$ 时, 表示原序列是反相关的; 当 $\alpha = 0.5$ 时, 表示原序列是白噪声; 当 $0.5 < \alpha < 1.0$ 时, 表示序列具有长程相关特

征 ,即当前发生的事件和未来事件之间存在长程相关性 ,当 $\alpha = 1.0$ 时 ,表示序列不具有长程相关性 ,为 $1/f$ 噪声 ;当 $\alpha = 1.5$ 时 ,表示序列为布朗噪声 .基于以往数值实验^[11,14,17] ,本文采用二阶 DFA 方法对序列进行分析 .

3. Lorenz 系统长程相关性及其影响因素

3.1. 初值变化对系统 x 分量长程相关性的影响

相关研究表明 ,Lorenz 系统具有初值敏感性、短期可预测性、长期不可预测性以及相空间遍历性 .由于混沌系统对初值极其敏感 ,随着时间的演化 ,初值的微小差异会逐渐被放大 ,直至引起系统未来状态的显著不同 ,甚至得到完全相反的结论^[18-22] .文献[18]中利用 EMD 方法对 Lorenz 系统的各个分量进行分解 ,对分解得到的不同尺度层次的信息分别进行比较分析 ,研究了系统对初值的敏感性 ,得到了系统 x 分量的可预测时长相对初值所处相空间位置不同而有很大差异的结论 .

本文选取 $\delta = 10.0$, $b = 8/3$, $r = 27.74$,此时 Lorenz 系统存在 $(0, 0, 0)$, $(8.4443, 8.4443, 26.74)$ 和 $(-8.4443, -8.4443, 26.74)$ 三个不稳定平衡点 .由

系统(1)可知 ,Lorenz 系统对于 z 轴具有对称性 ,同时根据初值与不稳定平衡态的远近程度 ,选取的初值分别为 $(0.5, 0.5, 0.5)$, $(1.0, 1.0, 1.0)$, $(5.0, 5.0, 14.0)$, $(7.0, 7.0, 25.0)$, $(8.0, 8.0, 26.0)$.运用数值计算的方法 ,采用积分步长为 0.01 ,积分 200 个时间单位 ,得到样本量为 20000 的 x 分量时间序列 .在此基础上对 x 分量初值分别加上 0.0001 和 0.001 的微小扰动 ,考查系统初值及其扰动对其长程相关性的影响 .图 1 为初值在 $(0.5, 0.5, 0.5)$ 附近时的系统 x 分量长程相关性 .从图 1 可以看出 ,对于 Lorenz 系统 x 分量 ,当系统初值选取在 $(0.5, 0.5, 0.5)$ 附近时 ,存在明显的长程相关性 .当系统初值靠近不稳定平衡点 $(0, 0, 0)$ 时 ,标度指数 α 介于 0.76 与 0.80 之间 .系统初值未加扰动时 ,标度指数 $\alpha \approx 0.766$;当系统初值 x 分量加上 0.001 扰动量时 ,标度指数 $\alpha \approx 0.775$;当扰动量为 0.0001 时 ,标度指数 $\alpha \approx 0.797$.由此可见 ,系统初值的微小扰动对于其长程相关性存在较明显影响 ,这与 Lorenz 系统本身的演化对初值的敏感性是相联系的 .当系统初值发生微小变化时 ,混沌吸引子在相空间中的演化路径就可能发生较大变化 ,从而导致了长程相关性的不同 .对于图 1 中标度指数 α 似乎随外加扰动而呈现增大趋势 ,但是通过进一步研究发现 ,实际情况并非皆是如此 .

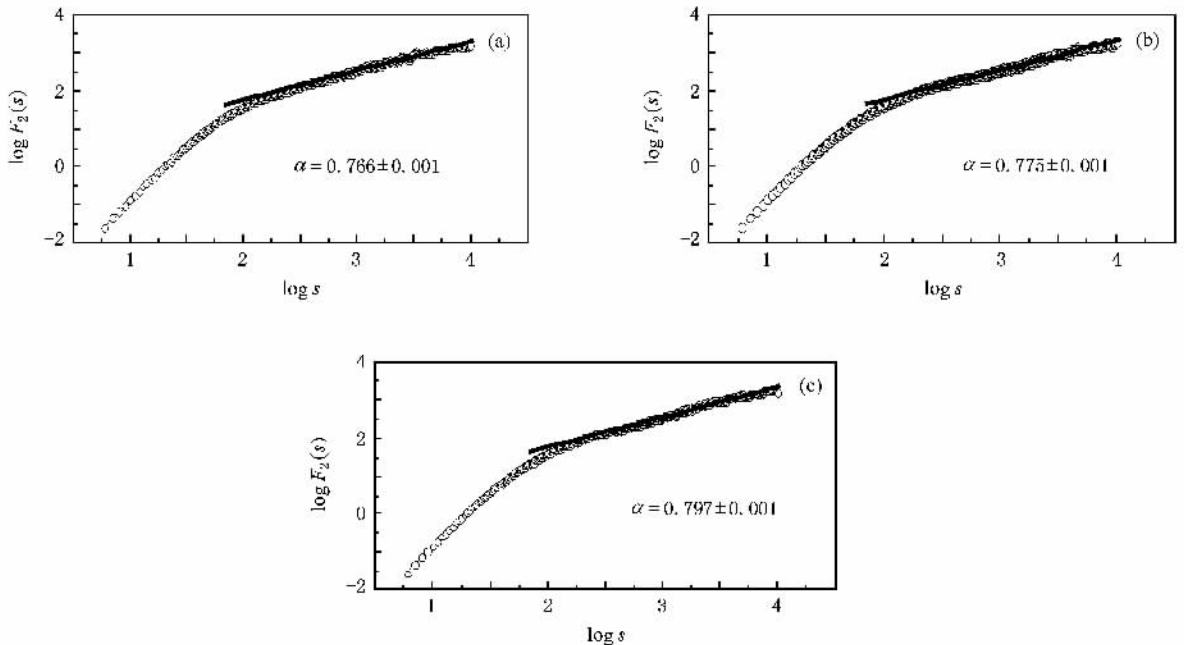


图 1 Lorenz 系统初值在 $(0.5, 0.5, 0.5)$ 附近时 x 分量长程相关性 (a)初值未加扰动 (b)初值中 x 分量加扰动量为 0.001 (c)初值中 x 分量加扰动量为 0.0001

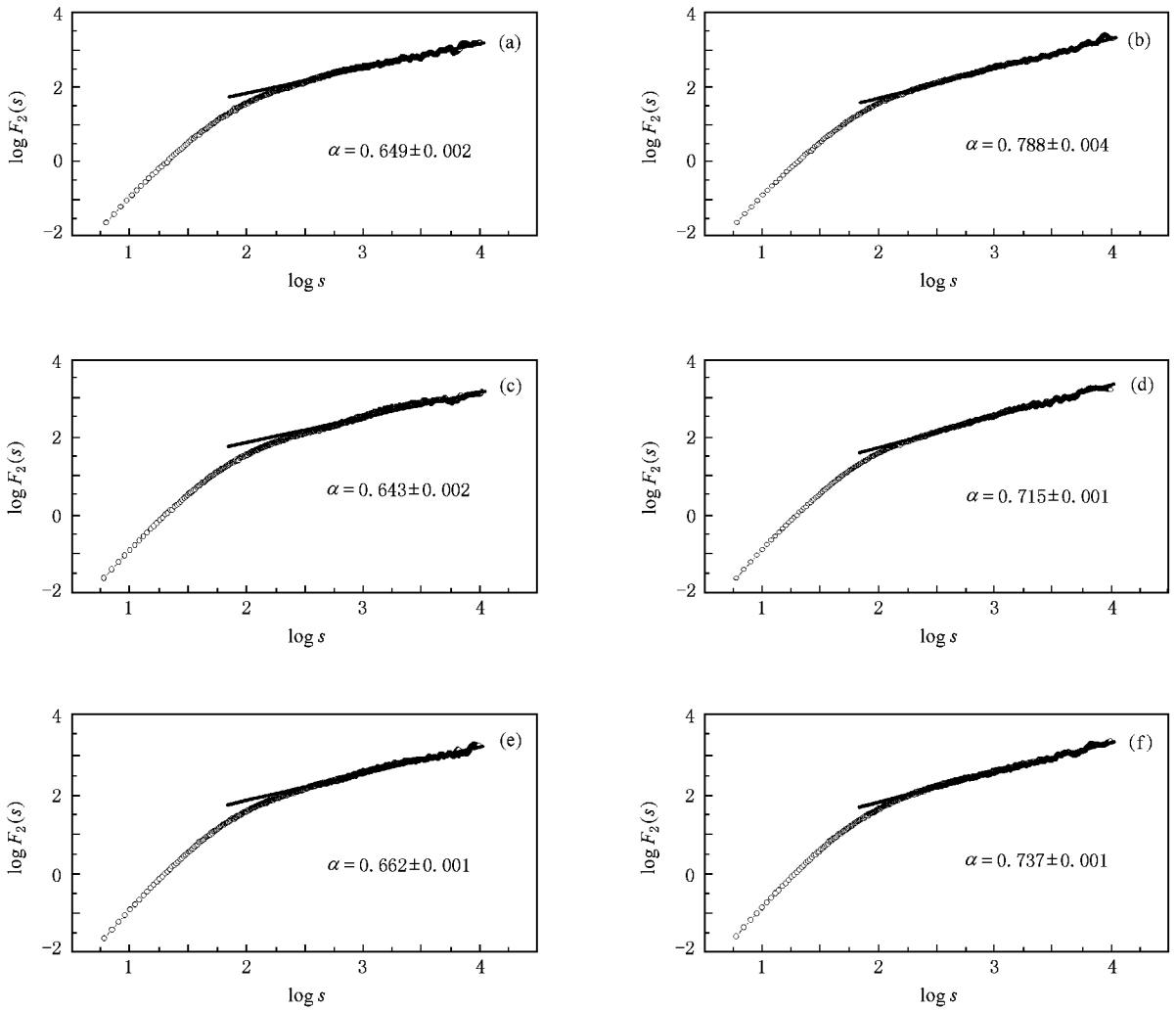


图 2 Lorenz 系统初值在(5.0, 5.0, 14.0)和(8.0, 8.0, 26.0)时系统 x 分量长程相关性 (a)(c)和(e)分别对应初值(5.0, 5.0, 14.0)及 x 分量加扰动量为 0.001 和 0.0001 (b)(d)和(f)分别对应初值(8.0, 8.0, 26.0)及 x 分量加扰动量为 0.001 和 0.0001

图 2 为选取了远离不稳定平衡点的初值(5.0, 5.0, 14.0)和靠近不稳定平衡点的初值(8.0, 8.0, 26.0)时系统 x 分量的长程相关性. 从图 2 可以看出, 当初值为(5.0, 5.0, 14.0)以及系统 x 分量加上扰动量为 0.001 和 0.0001 的情况下, 标度指数 α 分别约为 0.649, 0.643, 0.662, 具有长程相关性, 但标度指数 α 较图 1 中有所减小; 当初值为(8.0, 8.0, 26.0)以及系统 x 分量加上扰动量为 0.001 和 0.0001 的情况下, 标度指数 α 分别约为 0.788, 0.715, 0.737. 此时系统 x 分量长程相关性明显, 并且比初值为(5.0, 5.0, 14.0)时有所增大. 比较图 1、图 2 可知, 初值扰动量对时间序列的长程相关性都存在不同程度的影响, 但标度指数 α 的变化与微小扰动量的大小并无明显潜在规律性. 初值位于(1.0, 1.0, 1.0)和(7.0, 7.0, 25.0)附近时也有以上类似情

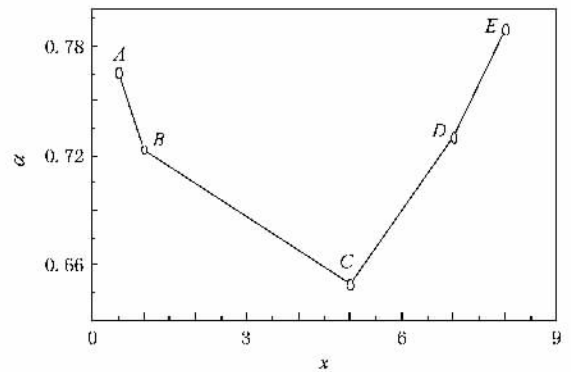


图 3 初值不同的各 x 分量标度指数 α 比较 A, B, C, D 和 E 分别对应初值为(0.5, 0.5, 0.5), (1.0, 1.0, 1.0), (5.0, 5.0, 14.0), (7.0, 7.0, 25.0)和(8.0, 8.0, 26.0)时 x 分量的标度指数 α (横轴为系统 x 分量的初值)

况(图略)。

从图 1、图 2 中均可发现,对于 Lorenz 系统,当控制参数 r 取 27.74 时,系统 x 分量标度指数约在 0.6 与 0.8 之间,具有明显的长程正相关性.同时发现初值在相空间中的位置不同,系统分量长程相关性的标度指数 α 有明显变化.为研究初值位置与其长程相关性间的可能关系,将以上选取的 5 个初值所对应的时间序列的标度指数 α 进行了比较,结果如图 3 所示.通过图 3 可知,Lorenz 系统 x 分量的长程相关性与系统初值距不稳定平衡点远近程度有关.当

初值靠近不稳定平衡点时,序列标度指数 α 较大,其长程相关性较强.当初值远离不稳定平衡点时,序列标度指数 α 相对减小,其长程相关性相对减弱.文献[18]指出,Lorenz 系统越靠近不稳定平衡点时系统可预测时效越长,而远离不稳定平衡点时预测时效较短.综上可知,系统长程相关的标度指数 α 越大($0.5 < \alpha < 1$)时对应的可预测性越好,系统可预测时长越长.标度指数 α 可作为衡量 Lorenz 系统可预测时长有效的物理量,同时对于其他非线性时间序列也可能有很好的应用价值.

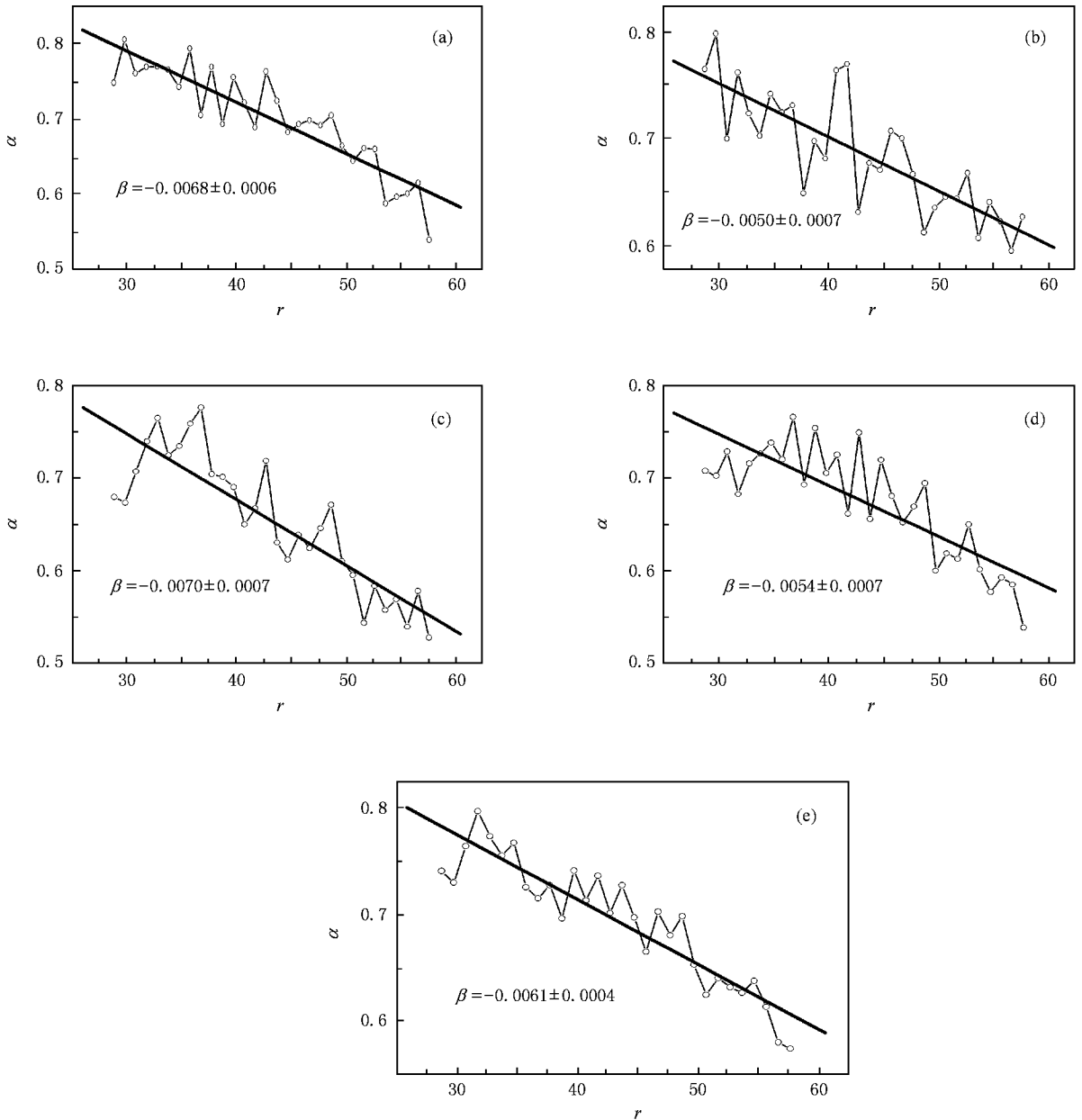


图 4 Lorenz 系统 x 分量标度指数 α 随控制参数 r 的变化 (a)初值为(0.5,0.5,0.5)(b)初值为(1.0,1.0,1.0)(c)初值为(5.0,5.0,14.0)(d)初值为(7.0,7.0,25.0)(e)初值为(8.0,8.0,26.0)

3.2. 控制参数变化对系统 x 分量长程相关性的影响

为进一步研究 Lorenz 系统长程相关性的影响因素, 将系统参数 r 从 28.74 到 57.74 以 1 为步长逐渐增大, 分别计算了系统初值为 $(0.5, 0.5, 0.5)$ $(1.0, 1.0, 1.0)$ $(5.0, 5.0, 14.0)$ $(7.0, 7.0, 25.0)$ $(8.0, 8.0, 26.0)$ 对系统 x 分量标度指数 α 的变化情况, 结果如图 4 所示. 由图 4 可以看出, 当系统控制参数 r 增大时, 系统标度指数 α 都呈下降趋势. 对于 Lorenz 系统而言, 当系统控制参数 r 变化, 其混沌特征将随之发生改变, 系统动力学结构的混沌特性将更加明显. 图 5 所示的系统 x 分量最大 Lyapunov 指数的倒数呈衰减趋势, 正说明此时系统可预测性减弱 (取其他初值时也有类似规律). 比较图 4 中不同初值情况下标度指数 α 的衰减, 发现远离不稳定平衡点所对应初值的标度指数衰减相对稍快些, 衰减率 β 约为 -0.007 , 而其两侧初值对应的标度指数衰减率相对较小, 且呈现对称性. 图 4 中出现的一定涨落现象, 很可能是由于不同 r 所对应的系统不稳定平衡点不同而初值距该不稳定平衡点距离发生变化引起的. 但 5 个不同初值情况所对应的完全相同的变化趋势, 表明 Lorenz 系统长程相关性受控制参数 r 的影响, 且随 r 的增大其长程相关性总体为减弱趋势, 与此时系统可预测性的变化是一致的.

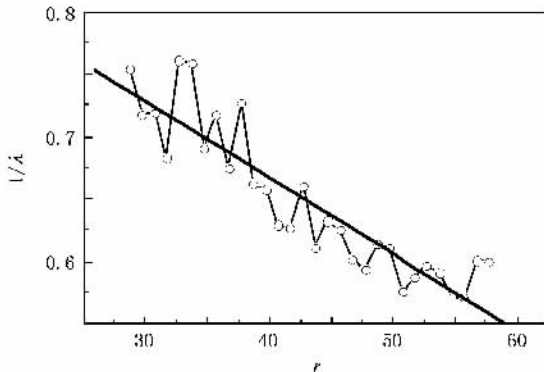


图 5 Lorenz 系统 x 分量最大 Lyapunov 指数的倒数随控制参数 r 的变化 (初值为 $(0.5, 0.5, 0.5)$)

3.3. 外加强迫对系统 x 分量长程相关性的影响

为进一步确定系统长程相关性与可预测性之间的关系, 依次将系统 x 分量加入随机噪声 $\omega(l) = u_{\text{rand}}$, 其中 $l = 1, 2, \dots, 30$, u_{rand} 是值域为 $[-0.5, 0.5]$ 长度为 20000 的随机高斯白噪声序列. 选取初值为 $(0.5, 0.5, 0.5)$ 时的情况进行考查, 所获得的系

统 x 分量标度指数 α 演化图像如图 6 所示. 由图 6 可以看出, 系统长程相关性随外加强迫的强度增大呈减弱趋势, 当噪声强度足够大时, 其标度指数 α 趋于 0.5, 当 $\alpha = 0.5$ 时, 系统长程相关性完全被破坏 (选取其他初值时有相同规律). 显而易见, 当外部噪声增强时系统原有动力学结构将被逐渐扭曲, 可预测性逐渐降低, 很强的噪声可使系统可预测性基本不再存在. 图 5 所示的变化规律说明 Lorenz 系统长程相关性的标度指数 α 是表征系统可预测性的重要指标.

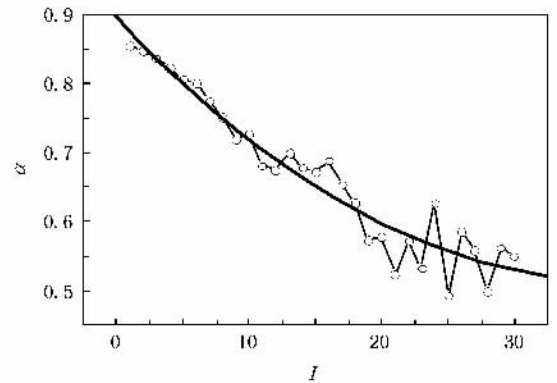


图 6 Lorenz 系统 x 分量标度指数 α 随噪声强度 I 的变化

4. 结 论

本文利用 DFA 方法对典型的 Lorenz 系统进行了分析. 研究发现, 对于初值扰动时系统长程相关性所反映的标度指数 α 的变化与微小扰动量的大小并无明显的潜在规律性. 但是, 系统标度指数 α 变化与初值所在相空间位置的变动和系统控制参数变化有很好的对应关系, 具体变化规律是和系统的可预测性相对应的. 当系统可预测时长较长时, 其长程相关性的标度指数 α 就较大; 当系统可预测时长较短时, 其长程相关性的标度指数 α 就较小. 这意味着系统长程相关性变化可以很好反映出其可预测性的变化情况, 从而为混沌系统乃至与之相关的大气等非线性系统的可预测性研究提供可靠的判断依据. 基于以上特点, 在分析众多复杂的实际非线性系统时, 可以通过标度指数 α 有效地探寻其潜在的可预测性. 例如, 在气象资料中可根据 α 值的异同, 探究影响可预测性的潜在因素, 划分区域气候范围, 比较不同预测模式的信度等. 还可由标度指数 α 所反映的系统非线性动力学结构特征, 区分各种非线性系统对应的不同状态, 以利于对系统演化作出正确

诊断. 对于定量地确定标度指数与系统可预测时长的关系, 还有待于进一步研究.

- [1] Lorenz E N 1963 *J. Atmos.* **20** 130
- [2] Lorenz E N 1965 *Tellus* **17** 321
- [3] Lorenz E N 1976 *Quat. Res.* **6** 495
- [4] Casdagli M 1989 *Physica D* **35** 335
- [5] Feng G L , Dai X G , Wang A H , Chou J F 2001 *Acta Phys. Sin.* **50** 606 (in Chinese) [封国林、戴新刚、王爱慧、丑纪范 2001 物理学报 **50** 606]
- [6] Ren H L , Dai X G , Chou J F 2003 *J. Lanzhou Univ. (Nat. Sci.)* **39** 93 (in Chinese) [任宏利、戴新刚、丑纪范 2003 兰州大学学报(自然科学版) **39** 93]
- [7] Epstein E S 1969 *Tellus* **21** 739
- [8] Leith C E 1974 *Mon. Wea. Rev.* **102** 409
- [9] Feng G L , Dong W J 2003 *Acta Phys. Sin.* **52** 2347 (in Chinese) [封国林、董文杰 2003 物理学报 **52** 2347]
- [10] Feng G L , Dong W J 2003 *Chin. Phys.* **12** 1076
- [11] Peng C K , Buldyrev S V , Havlin S , Simons M , Stanley H E , Goldberger A L 1994 *Phys. Rev. E* **49** 1685
- [12] Buldyrev S V , Goldberger A L , Havlin S , Mantegna R N , Matsa M E , Peng C K , Simons M , Stanley H E 1995 *Phys. Rev. E* **51** 5084
- [13] Gilberto E P , Jose A R , Alejandro V 2006 *Ann. Nucl. Energy* **33** 1309
- [14] Kantelhardt J W , Bunde E K , Rego H A , Havlin S , Bunde A 2001 *Physica A* **295** 441
- [15] Zhuang X T , Huang X Y , Zhen Y Z 2001 *J. Donghua Univ. (Nat. Sci.)* **27** 28 (in Chinese) [庄新田、黄小原、郑翼舟 2001 东华大学学报(自然科学版) **27** 28]
- [16] Yuan J W , Wu Y Z , Shen J 2007 *J. Zhejiang Univ. (Sci. Ed.)* **34** 43 (in Chinese) [袁蒋伟、吴伊自、沈杰 2007 浙江大学学报(理学版) **34** 43]
- [17] Lee J M , Kim D J , Kim I Y , Park K S , Kim S I 2002 *Comp. Biol. Medic.* **32** 37
- [18] Zou M W , Feng G L , Gao X Q 2006 *Chin. Phys.* **15** 1384
- [19] He W P , Feng G L , Dong W J , Li J P 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 969 (in Chinese) [何文平、封国林、董文杰、李建平 2006 物理学报 **55** 969]
- [20] Feng G L , He W P 2007 *Chin. Phys.* **16** 2825
- [21] Mullen S L 1994 *Mon. Wea. Rev.* **122** 1548
- [22] Feng G L , Dong W J , Jia X J 2004 *Chin. Phys.* **13** 413

The research on long range correlation of Lorenz system^{*}

Wang Qi-Guang^{1,2)†} Zhi Rong^{3)‡} Zhang Zeng-Ping^{1,4)}

¹ *College of Physics Science and Technology, Yangzhou University, Yangzhou 225002, China*

² *Key Laboratory of Regional Climate-Environment for Temperature East Asia, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China*

³ *College of Atmospheric Science, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China*

⁴ *Laboratory for Climate Studies of China Meteorological Administration, National Climate Center, Beijing 100081, China*

(Received 6 January 2008 ; revised manuscript received 25 April 2008)

Abstract

This paper takes the typical chaotic system, the Lorenz system, as the subject. We use the detrended fluctuation analysis method to study the system's long-range correlation for different initial values and parameters. It turns out that the system's long range correlation is related with its initial value's phase space position. When the initial value is close to the unstable equilibrium points, the system's long range correlation is strengthened, the scaling exponents α are bigger, and the predictability of the system is better. When the system is in complete chaotic state, its long range correlation becomes weak with the parameters increasing, and the scaling exponents α are decrease, the predictability of the system becomes weaker. This reveals the relationship between the system's long range correlation and its predictability. We disturbed the system equation with random noise and found that the system's long range correlation decreases with the increase of random noise intensity. This result further signifies out that the Lorenz system's long range correlation is a physical parameter that may serves as an effective predictability criterion.

Keywords : Lorenz system, long range correlation, detrended fluctuation analysis, predictability

PACC : 9260X

^{*} Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 40675044), the State Key Development Program for Basic Research of China (Grant No. 2006CB400503) and the State Key Program of Science and Technology of China (Grant No. 2007BAC03A01).

[†] E-mail: qiguangw@sina.com