

不同趋势对滑动移除近似熵的影响*

金红梅¹⁾ 何文平^{2)†} 侯威²⁾ 章大全²⁾

1) (兰州大学大气科学学院, 兰州 730000)

2) (国家气候中心, 北京 100081)

(2011年5月6日收到; 2011年7月10日收到修改稿)

许多观测资料中存在着各种各样的趋势, 如季节变化引起的周期性趋势、全球变暖所造成的线性趋势、多项式趋势等. 鉴于此, 本文研究了各种趋势对滑动移除近似熵的影响. 数值试验结果表明, 周期性趋势、线性趋势及非线性趋势均对滑动移除近似熵的突变检测结果影响较小, 论证了滑动移除近似熵方法检测突变的可靠性, 为该方法在实际观测资料中的广泛应用提供了实验基础.

关键词: 滑动移除近似熵, 趋势, 突变检测

PACS: 92.60.Wc

1 引言

气候突变现象是普遍存在于气候系统中的一个重要现象, 是指气候从一种稳定态 (或稳定持续的变化趋势) 跳跃式地转变到另一种稳定态 (或稳定持续的变化趋势) 的现象, 表现为气候在时空上从一种统计特征到另一种统计特征的急剧变化^[1]. 气候系统是一个复杂的非线性动力系统, 对其复杂性进行度量有助于认识气候变化的内在本质^[2]. 气候突变的发生除了有自然原因外, 也可能是由一些危险的人为因素干扰所致^[3]. 气候突变的检测与归因具有重要的现实意义, 一方面气候突变检测可以提供气候系统已经或正在发生的明显或缓慢的改变的信号, 另一方面气候突变检测和归因研究可以为未来可能的气候转折或突变的预测预警提供丰富的参考信息^[4,5].

从20世纪60年代Thom^[6]创立突变理论以来, 有关气候突变的研究得到了广泛的开展, 先后发展了多种突变检测方法. 继传统检测方法滑动 t -检验、Cramer 方法、Mann-Kendall 检验、Yamamoto 方法、Pettitt 方法、Lepage 法之后^[7], 近年来又涌现出了很多突变检测新方法, 如粒子滤波方法、小波分析法、差分方法、向量自回归方法、MCMC 方法、扭结点分析法、ARCH 模型方法以及 Fisher

信息熵等^[8-18]. 我国学者也开展了大量的研究, 封国林等^[19-25]引进并发展了很多突变检测新方法, 如条件熵、动力学相关因子指数 (Q 指数)、启发式分割算法 (BG 算法)、复杂度、幂律指数、高阶矩、排列熵等. 何文平等^[26-29]基于自然界中大量时间序列具有标度行为这一特征, 提出了滑动去趋势波动分析法、滑动移除去趋势波动分析法和滑动移除重标极差法. 王启光、何文平等^[30,31]基于可以度量时间序列复杂性的近似熵^[32-34](approximate entropy, ApEn) 先后提出了滑动近似熵和滑动移除近似熵 (moving cut data-approximate entropy, MC-ApEn) 两种突变检测新方法. 这些突变检测新方法的出现在很大程度上丰富了突变检测的手段, 提供了突变检测的多种途径, 其中基于 ApEn 发展起来的 MC-ApEn 方法可以很好地度量气候系统的复杂性, 能有效地检测各种时间序列中存在的动力学结构突变. 但是文献仅仅研究了理想突变检测的情况, 而许多观测资料中存在着各种各样的趋势, 如季节变化引起的周期性趋势、全球变暖所造成的线性趋势、多项式趋势等. 因此, 研究各种趋势和噪声对 MC-ApEn 的定量影响对于该方法在实际观测资料中的广泛应用非常重要^[35].

鉴于此, 本文利用非线性理想时间序列研究了

* 全球变化重大研究计划 (批准号: 2012CB9552037)、国家自然科学基金 (批准号: 40930952, 41175067 和 40905034) 和国家科技支撑计划 (批准号: 2007BAC29B01, 2009BAC51B04) 资助的课题.

† E-mail: wenping_he@163.com

周期趋势、线性趋势、二阶多项式趋势以及更高阶非线性趋势对于 MC-ApEn 的影响, 重点考察了周期性趋势以及不同强度的线性趋势和二阶多项式趋势对其的影响. 通过大量数值试验发现, 周期性趋势、线性趋势和非线性趋势对 MC-ApEn 方法的突变检测结果影响较小, 表明 MC-ApEn 方法适用于具有周期和各种非线性趋势特征的观测资料的突变检测, 进而证实了 MC-ApEn 方法突变检测的可靠性, 展示了该方法的潜在应用前景.

2 MC-ApEn 方法

ApEn 是一种基于边缘概率分布统计量化时间序列复杂程度的方法, MC-ApEn 是在 ApEn 方法的基础上形成的一种突变检测方法, 其具体计算过程如下 [34]:

- 1) 选择滑动移除数据的窗口长度 L ;
- 2) 从待分析时间序列的第 i ($i = 1, 2, \dots, N - L + 1$, N 为时间序列中的总记录个数) 个数据开始连续移除 L 个数据, 再将剩余 $N - L$ 个数据直接连在一起得到一个新的时间序列;
- 3) 计算新序列的 ApEn 值;
- 4) 保持移除数据的窗口长度不变, 以步长 L 逐步移动窗口, 重复 2)—3) 步操作, 直到原序列结束为止;
- 5) 通过 1)—4) 步操作可得到一个随着窗口移动的 ApEn 序列;
- 6) 基于不同动力学性质的数据其复杂性大小不相同, 而具有相同动力学性质的数据的复杂性差异不大这一特点, 结合步骤 5) 中得到的 ApEn 序列判断突变点或突变区间.

3 不同趋势对 MC-ApEn 的影响研究

3.1 理想时间序列的构建

为了模拟气候系统的非线性特征, 类似于文献 [34] 构建了非线性理想时间序列 IS0, 序列总长为 2000, 前 1000 个数据由 Logistic 模型产生, 后 1000 个数据由正态分布的随机数模拟产生. 其 Logistic 方程如 (1) 式所示

$$x_{n+1} = ux_n(1 - x_n) \quad (x \in [0, 1]). \quad (1)$$

在 (1) 式中, 初值 $x_0 = 0.8$, 参数 $u = 3.8$, IS0 及其标准化后的序列 IS1 随时间的演化曲线已由图 1 给出. 从该时间序列的构造过程来看, 两段子序列分

别具有不同的动力学特征, 在 $t = 1001$ 时, 序列由确定性模型——Logistic 方程转变成了随机行为, 即系统在该点发生了动力学结构突变.

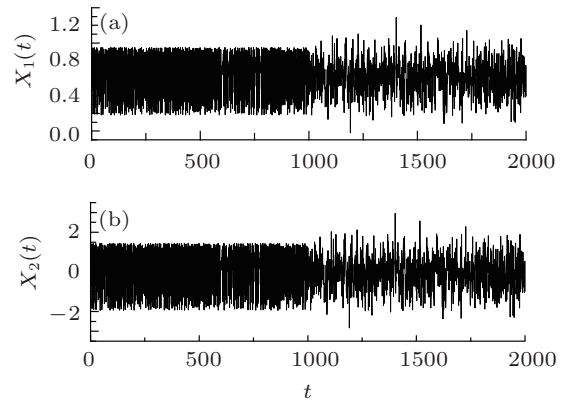


图 1 存在动力学结构突变的理想时间序列 (a) 非线性时间序列 IS0 随时间的演变情况, 序列总长为 2000, 前 1000 个数据由 Logistic 模型产生, 后 1000 个数据由正态分布的随机数模拟产生; (b) 非线性时间序列 IS0 经标准化后得到的新序列 IS1 随时间的演变情况

3.2 周期趋势对 MC-ApEn 方法的影响

周期是时间序列的重要特征之一, 任何复杂信号, 都可以近似地看成是由各种频率不同、振幅不等的正弦波叠加而成, 周期信号只是该复杂信号的分量之一 [36,37]. 为了测试周期信号对 MC-ApEn 的影响, 在理想时间序列 IS1 中叠加了各种正弦周期信号, 以便探究 MC-ApEn 对具有周期趋势性质的时间序列突变检测结果的影响程度. 本文分别考虑了周期 (T) 大小和振幅 (A) 大小对 MC-ApEn 的影响.

3.2.1 周期大小对 MC-ApEn 的影响

图 2 给出了 IS1 叠加振幅为 1、周期大小分别为 2π , π , 0.5π , 0.25π 的正弦周期信号后的理想时间序列. 图 3 展示了滑动子序列长度 $L = 40$ 时, 具有不同周期性趋势的理想时间序列 IS1 的 MC-ApEn 检测结果. 从图 3 中可知, 对于不同周期大小的理想序列, 尽管得到的 ApEn 大小略有差异, 但 MC-ApEn 检测得到的突变开始时间完全相同, ApEn 随时间的演变趋势几乎一致, 在突变点前后都呈现出了与序列结构改变前截然不同的状态. 即以 $t = 1000$ 作为分界点, 序列 IS1 前半部分是由确定性动力学方程 Logistic 映射产生的, 其复杂性要小于随机数. 众所周知, 时间序列随机性越大, 可预测性越低, 其 ApEn 值就越大, 这正符合图 3 中所呈现的情况, 即被移除的时间序列的复杂性越低, 得到的 ApEn 值越大, 反之亦然. 据此可以判断序列从

一种稳定状态跳跃式地转变到了另一种稳定状态, 并从图 3 中可以非常明显地看到突变的开始时间, ApEn 在突变点前后发生的这种明显的均值跃变可以通过滑动 t - 检验、Crammer 法等传统的检测方法对其进行识别.

此外, 本文还对子序列长度取任意值时含周期信号的 IS1 进行了测试. 作为一个分析试验的例子, 图 4 给出了子序列长度 $L = 20$ 时图 2 中四种理想时间序列的 MC-ApEn 突变检测结果, 发现周期信号对于子序列长度较小时的影响仍然可以忽略, 而且对于子序列长度更

长时的情形也做了大量试验, 得到了同样的结果. 为了进一步验证结果的可靠性, 本文对类似于 IS1 的众多理想时间序列进行了检测, 与 IS1 时得到的结论完全一致. 同时, 试验中也任意选择了大量更大时间尺度的周期性趋势进行了数值试验, 与图 2 中四种周期性趋势得到的结果无异. 在取不同长度的原序列和滑动子序列进行数值试验的过程中发现, 当原序列长度一定时, 滑动子序列越长, MC-ApEn 方法检测得到的突变点的位置越清晰. 这可能主要在于样本量的增加改善了 ApEn 计算结果的稳定性.

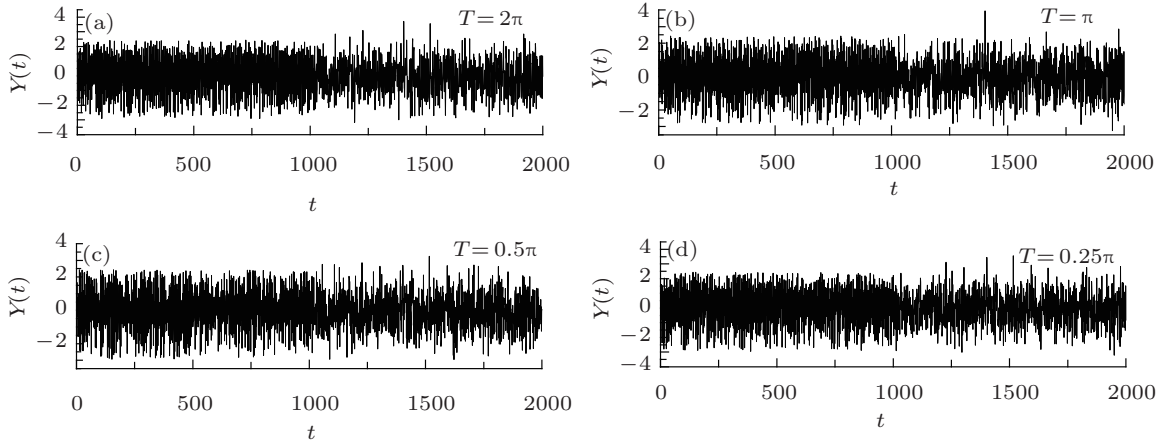


图 2 含正弦周期性趋势的理想时间序列 IS1 (a) 正弦周期大小 $T = 2\pi$; (b) $T = \pi$; (c) $T = 0.5\pi$; (d) $T = 0.25\pi$

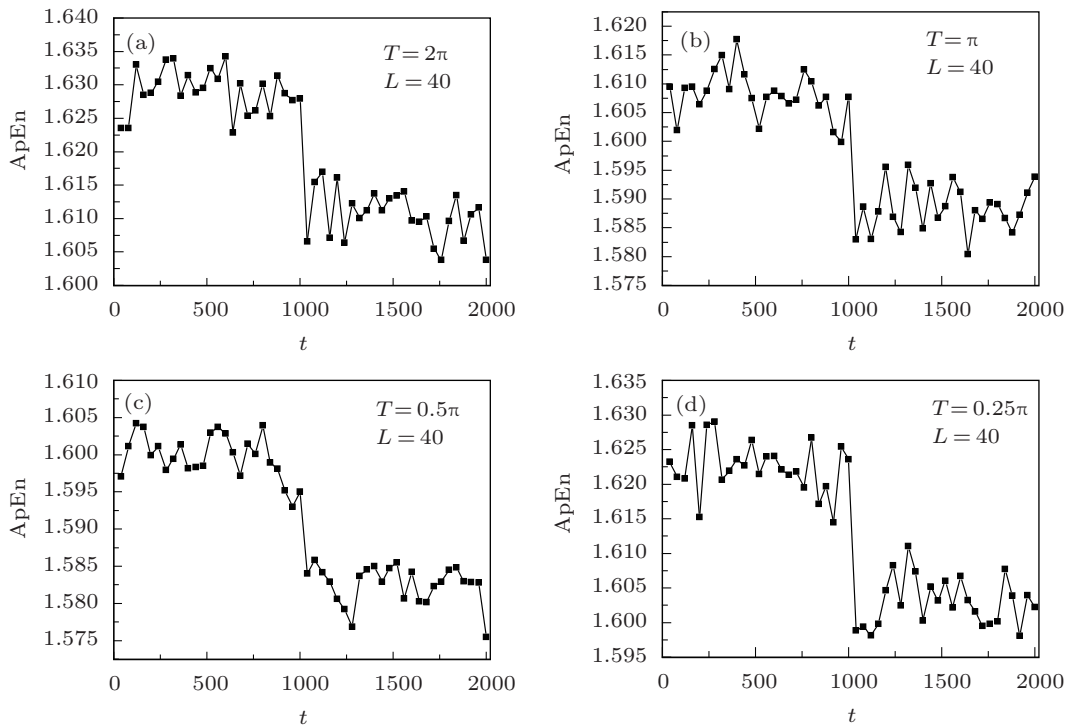


图 3 MC-ApEn 对含不同周期性趋势的理想序列 IS1 的突变检测, 子序列长度 $L = 40$ (a) 周期 $T = 2\pi$; (b) $T = \pi$; (c) $T = 0.5\pi$; (d) $T = 0.25\pi$

3.2.2 周期趋势的振幅对 MC-ApEn 的影响

上小节讨论了周期大小对 MC-ApEn 方法的影响, 为了测试不同振幅的时间序列对 MC-ApEn 检测的影响程度, 以 IS1 中所存在的正弦信号的周期大小为 2π 时为例进行了研究. 图 5 给出了原序列长度为 2000、滑动子序列长度为 50 时 MC-ApEn 方法的四组检测结果 (其他不同长度子序列

的试验结果与此类似). 图 5(a) 和 5(b) 表征了振幅取较小值时 MC-ApEn 的检测情况, 从中可以发现, 其 ApEn 值随时间的演变趋势基本一致, 都是以 $t = 1001$ 为界, 从一种相对较大值的稳定演变状态突然转变到一种较小值的稳定演变状态, 即在 IS1 动力学结构改变的同时, ApEn 值随时间的演变情况发生了跃变, 标志着突变的发生.

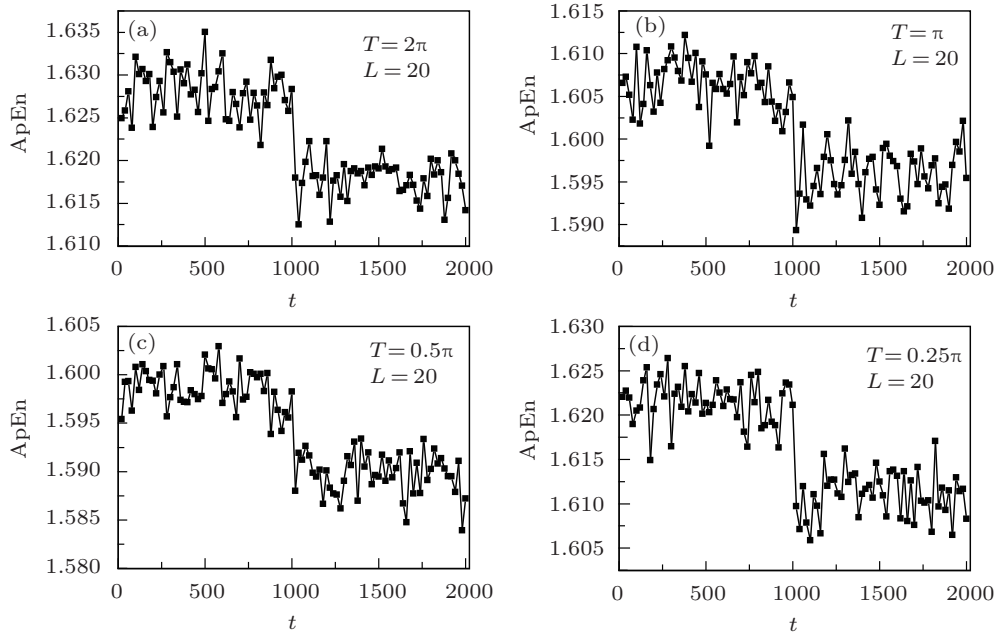


图 4 MC-ApEn 对含不同周期性趋势的理想序列 IS1 的检测结果, 子序列长度 $L = 20$ (a) 周期 $T = 2\pi$; (b) $T = \pi$; (c) $T = 0.5\pi$; (d) $T = 0.25\pi$

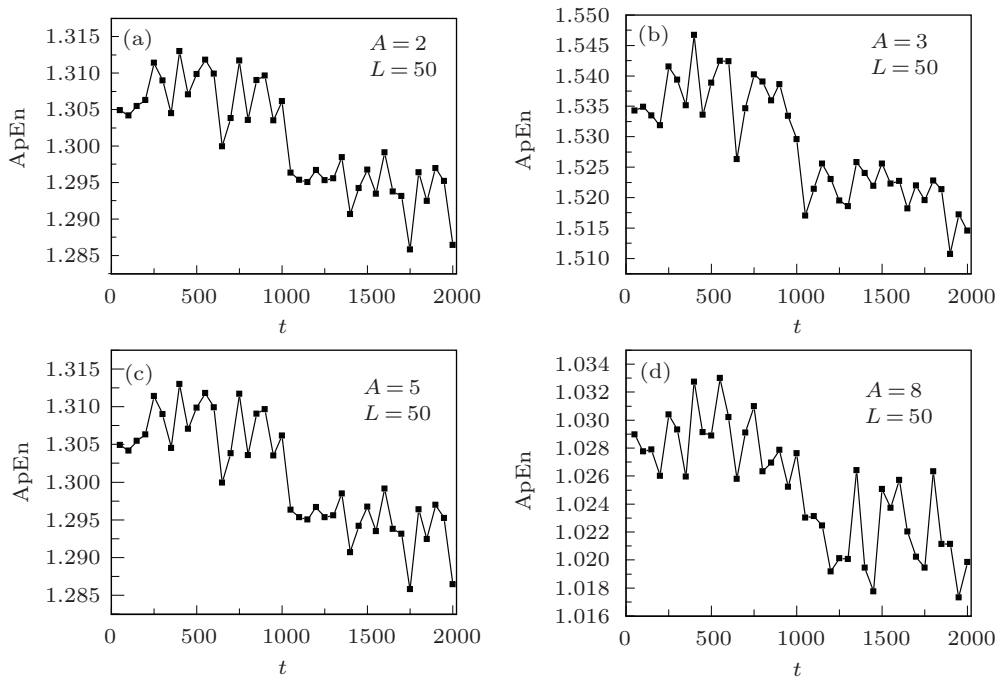


图 5 理想序列 IS1 中存在周期大小为 2π 的正弦信号时, 不同振幅对于 MC-ApEn 突变检测的影响 (a) 振幅 $A = 2$; (b) $A = 3$; (c) $A = 5$; (d) $A = 8$

从图 5(c) 和 5(d) 可知, 当振幅取相对较大值 5 和 8 时, 与具有较小振幅时的情形相比, 无论是 ApEn 值的大小, 还是其演变趋势, 均呈现惊人的一致性. 此外, 还考虑了振幅取其他各种不同值时的情形, 同时对于任意周期大小类似的时间序列进行了分析, 大量的试验结果得到的结论与图 5 中完全一致, 不再赘述. 因此, 这表明周期信号的振幅大小对 MC-ApEn 方法的突变检测结果不会造成明显影响.

简而言之, 周期性趋势不会对 MC-ApEn 方法突变检测结果产生显著的影响, 即无论周期大或小、周期信号的振幅强或弱, 均对 MC-ApEn 检测

结果的准确性影响较小.

3.3 线性趋势和非线性趋势对 MC-ApEn 方法的影响

观测资料中通常展现出各种线性趋势、多项式趋势等^[38-40], 为此, 这里考虑了在理想时间序列 IS0 中分别叠加了不同线性趋势和二阶多项式趋势的情形, 尝试通过理想数值试验来测试 MC-ApEn 方法对具有趋势特性的时间序列突变检测结果的稳定性, 图 6 给出了 IS0 叠加不同线性趋势后随时间的演变情况.

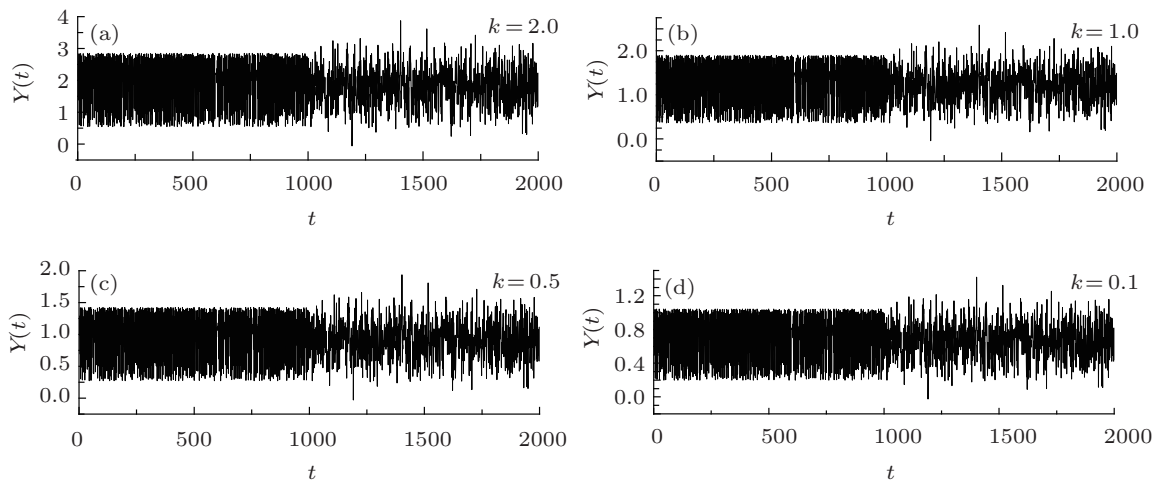


图 6 叠加不同线性趋势的理想时间序列 IS0 随时间的演变曲线, k 为线性趋势的斜率 (a) $k = 2.0$; (b) $k = 1.0$; (c) $k = 0.5$; (d) $k = 0.1$

对比不同周期趋势存在时理想序列 IS0 的 MC-ApEn 检测结果发现, 无论线性趋势强弱与否, MC-ApEn 检测结果与周期性趋势存在时几乎一致, 仍然能够准确地检测到理想时间序列中的突变点 (图 7). 对其他不同斜率时的情形以及更多类似于 IS0 的时间序列进行了试验, 结果均显示线性趋势对 MC-ApEn 方法的影响较小.

实际观测资料中更多的是不同阶的多项式趋势, 为了测试其对 MC-ApEn 方法的影响, 这里首先研究了对序列 IS0 任意添加了不同系数的二阶多项式趋势的情形. 为了计算方便, 二阶多项式的二次项与一次项系数取相同值, 如表 1 所示的是 4 组取不同值的二阶多项式系数, a, b 分别表示其二次项与一次项系数.

表 1 二阶多项式二次项与一次项系数

系数	Case1	Case2	Case3	Case4
a	0.1	0.5	1.0	2.0
b	0.1	0.5	1.0	2.0

图 8 给出了滑动子序列长度取 10 时 MC-ApEn 方法的检测结果, 从图中可以看出, 在二阶多项式系数取各种不同值时, 得到的 ApEn 值的演变趋势非常一致, 均是在 $t = 1001$ 前后, 由于确定性方程 Logistic 模型产生的数据其复杂性要明显低于随机数, 因此, 容易理解对于移除等长度的数据, 移除随机数后所获取的 ApEn 值更小一些, 即部分随机数的移除导致剩余数据的复杂性减小. 当取不同的二阶多项式系数和滑动子序列长度进行数值试验时, 得到了类似结论, 不再赘述. 这说明二阶多项式趋势类似于线性趋势, 对 MC-ApEn 方法检测突变影响较小. 不仅如此, 试验中还研究了三阶和四阶以及更高阶多项式趋势对于 MC-ApEn 检测结果的影响, 大量试验分析得到的结果与信号中存在线性趋势和二阶多项式趋势时完全相同. 因此, 线性趋势和二阶多项式趋势对 MC-ApEn 方法的检测结果没有本质影响, 而且更高阶趋势的影响仍然可以忽略不计, 这使得该方法能够很好地适用于实际观测资料的突变检测.

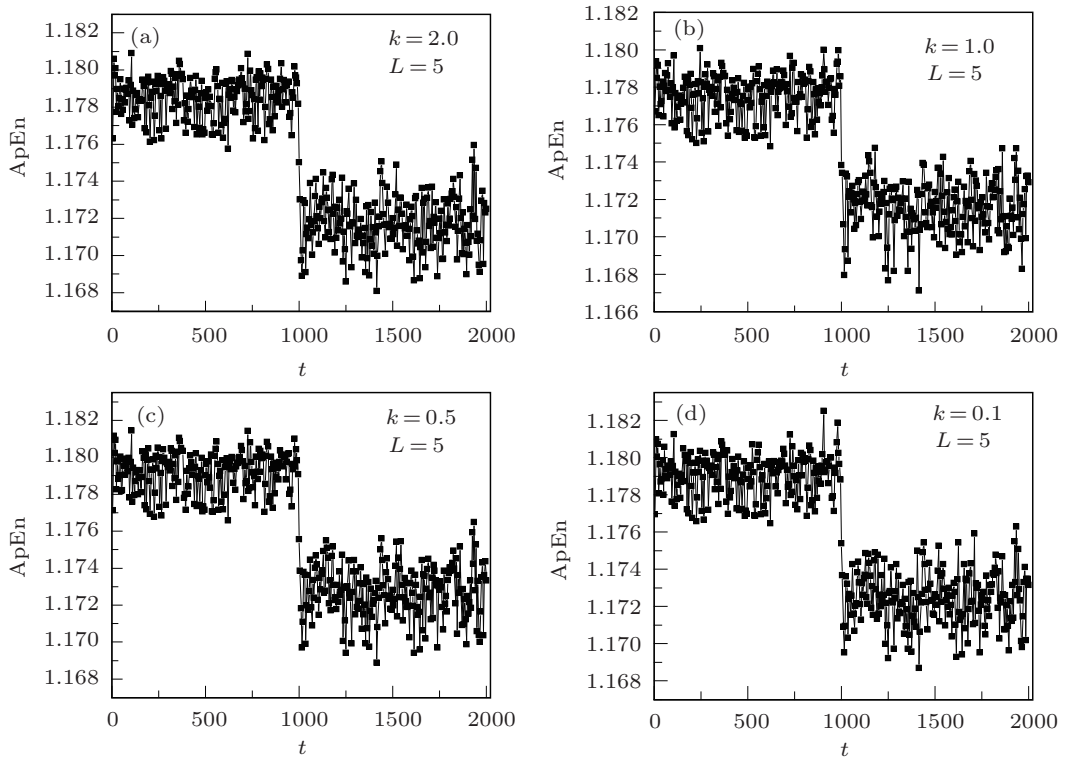


图 7 MC-ApEn 对叠加不同线性趋势的理想时间序列 ISO 的检测结果, k 为线性趋势的斜率 (a) $k = 2.0$; (b) $k = 1.0$; (c) $k = 0.5$; (d) $k = 0.1$

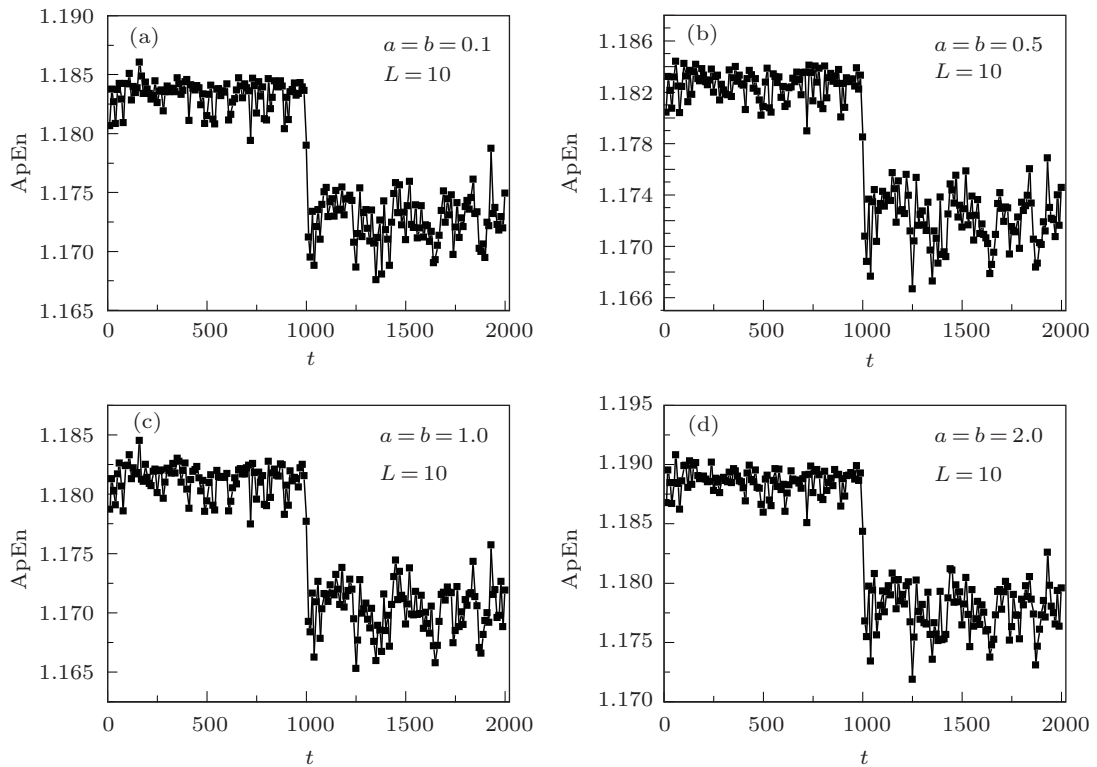


图 8 MC-ApEn 对叠加不同二阶多项式趋势的理想时间序列 ISO 的检测结果, a, b 分别为二阶多项式趋势的二次项系数和一次项系数 (a) $a = b = 0.1$; (b) $a = b = 0.5$; (c) $a = b = 1.0$; (d) $a = b = 2.0$

3.4 模拟应用实例

为了更好地模拟实际资料, 根据温度资料序列所具有的长程相关性, 利用 Hurst 指数构造了一组非线性时间序列. 当 Hurst 指数 H 满足 $0.5 < H < 1.0$ 时, 其构成的统计序列具有长程相关性, 据此利用分形布朗运动构造序列总长为 10000, 前 5000 个数据 Hurst 指数 $H = 0.7$, 后 5000 个数据 Hurst 指数 $H = 0.9$. 由于 Hurst 指数的变化导致分形布朗运动产生的时间序列差异过于明显, 因此对突变前后的时间序列进行了标准化, 经标准化后的时间序列如图 9(a) 所示, 必须指出的是这种标准化不会改变时间序列的长程相关性及其他动力学演变特征. 为了更形象地模拟逐日温度序列, 图 9(c) 给出了加正弦周期为 365、振幅为 30 的时间序列 IS2 随时间的演变情况, 即模拟了大约 27.4 年的逐日温度资料. 图 10 展示了 MC-ApEn 对模拟数据的突变检测结果, 可以看到, 不论滑动子序列长度取多大, 其 ApEn 值随时间的演变趋势基本一致, 均以 $t = 5001$ 为界, 从一种稳定状态突然转变到了另一种稳定状态, 可以很容易地判断突变点的开始时间, 说明 MC-ApEn 方法可以准确地检测具有周期性趋势的长程相关性时

间序列的突变, 这为该方法能够很好地适用于实际观测资料的突变检测提供了充分的依据.

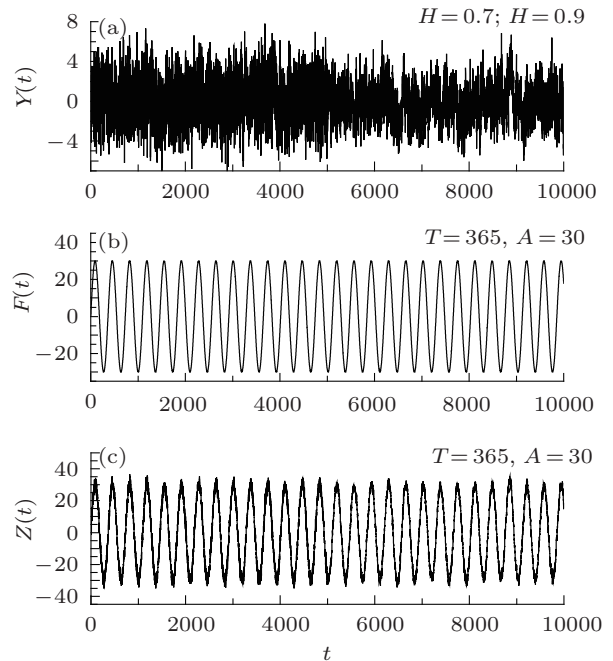


图 9 利用分形布朗运动产生的类似于温度资料的理想时间序列 (a) 具有 Hurst 统计特性的非线性时间序列 IS2 随时间的演变情况, 序列总长为 10000, 前 5000 个数据 Hurst 指数 $H = 0.7$, 后 5000 个数据 Hurst 指数 $H = 0.9$; (b) 周期大小为 365, 振幅大小为 30 的正弦信号; (c) 由 (a) 和 (b) 叠加后的合成序列

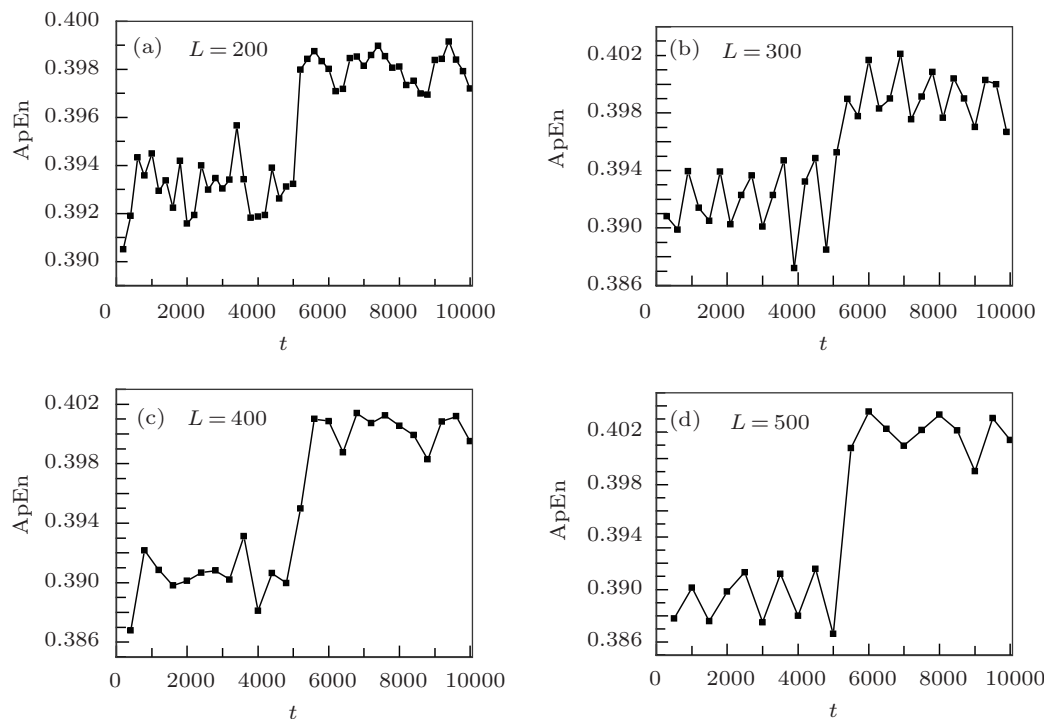


图 10 MC-ApEn 对叠加正弦周期大小为 365、振幅为 30 的非线性时间序列 IS2 的突变检测结果, L 是滑动子序列长度 (a) $L = 200$; (b) $L = 300$; (c) $L = 400$; (d) $L = 500$

4 结论

基于最近新发展的突变检测方法——MC-ApEn, 本文通过大量数值试验, 测试了非线性理想时间序列中的周期趋势、线性趋势、二阶多项式趋势以及更高阶多项式趋势信号对于 MC-ApEn 方法突变检测结果的影响程度, 发现这些平稳和非平稳趋势信号对 MC-ApEn 检测结果的影响较小. 这表明, MC-ApEn 的检测结果表明具有相当强的稳定性、可靠性以及适用性, 同时, MC-ApEn 在模拟逐日温度资料中的成功应用进一步为该方法在实际

观测资料中的应用提供了实验基础, 展示了其在时间序列突变检测中的广阔应用前景. 诚如引言中所提到的, 实际观测中不可避免地存在着另一种非平稳现象——噪声, 它的存在可能会对时间序列中的信息的提取造成一些负面的影响. 因此, 非常有必要研究其对 MC-ApEn 方法的影响, 限于篇幅, 将在后续工作中对此进行系统地研究. 值得指出的是, 由于计算 ApEn 值需要一定的样本量, MC-ApEn 对于样本量较小的情况可能不能够有效检测, 因而其对样本量的要求还需要通过大量数值试验进一步地深入研究.

- [1] Fu C B, Wang Q 1992 *Chinese J. Atmos. Sci.* **16** 482 (in Chinese) [符淙斌, 王强 1992 大气科学 **16** 482]
- [2] Li S C, Liu F C, Zhao Z Q 2008 *Clim. Environ. Res.* **13** 31 (in Chinese) [李双成, 刘逢媛, 赵志强 2008 气候与环境研究 **13** 31]
- [3] Alley R B, Marotzke J, Nordhaus W D, Overpeck J T, Peteet D M, Pielke J R A, Pierrehumbert R T, Rhines P B, Stocker T F, Talley L D, Wallace J M 2003 *Science* **299** 2005
- [4] Nicholls N 2006 *Aust. Met. Mag.* **55** 199
- [5] Zwiers F 2005 *American Meteorological Society* **18** 1291
- [6] Thom R 1992 *Structural Stability and Morphogenesis* (Sichuan: Sichuan Education Press) pp54–59 (in Chinese) [雷内·托姆 1992 结构稳定性与形态发生学 (四川: 四川教育出版社) 第 54–59 页]
- [7] Wei F Y 1999 *The Technologies of Statistics Diagnosis and Forecast in Modern Climate* (Beijing: The Weather Publishing Company) pp63–76 (in Chinese) [魏凤英 1999 现代气候统计诊断与预测技术 (北京: 气象出版社) 第 63–76 页]
- [8] Babak A S, Krishnaprasad P S 2004 *EURASIP J. Appl. Signal Processing* **15** 2295
- [9] Abhisek U, Rastko Z 2006 *Electric Power Systems Research* **76** 815
- [10] Liu S D, Chen J, Liu S K 1999 *J. Appl. Meteor. Sci. (Suppl.)* **10** 10 (in Chinese) [刘式达, 陈炯, 刘式适 1999 应用气象学报 (增刊) **10** 10]
- [11] Liu S D, Rong P P, Chen J 2000 *Acta Meteor. Sin.* **58** 111 (in Chinese) [刘式达, 荣平平, 陈炯 2000 气象学报 **58** 111]
- [12] Marko P, Mika R, Mika R 2005 *Control Engimeering Laboratory* **26** 1
- [13] Elsner B J, Niu X, Jagger T 2004 *J. Cliamte* **4** 2652
- [14] Solow A R, Beet A R 2005 *Fish. Oceanoger* **14** 236
- [15] Herron M M, Langway C C 1985 *Greenland Ice Core: Geophys. Geochem. Envir.* **33** 77
- [16] Audrey L M, Christopher W P, Heriberto C 2006 *Ecological Modelling* **95** 72
- [17] István M 2011 *Theor. Appl. Climatol.* **401** 4
- [18] Brian D F, Heriberto C, Christopher W P 2003 *J.Theoretical Biology* **222** 517
- [19] Wan S Q, Feng G L, Dong W J, Li J P 2005 *Acta Phys. Sin.* **54** 5487 (in Chinese) [万仕全, 封国林, 董文杰, 李建平 2005 物理学报 **54** 5487]
- [20] Feng G L, Gong Z Q, Dong W J, Li J P 2005 *Acta Phys. Sin.* **54** 5494 (in Chinese) [封国林, 龚志强, 董文杰, 李建平 2005 物理学报 **54** 5494]
- [21] Gong Z Q, Feng G L, Wan S Q, Li J P 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 477 (in Chinese) [龚志强, 封国林, 万仕全, 李建平 2006 物理学报 **55** 477]
- [22] Feng G L, Hou W, Dong W J 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 962 (in Chinese) [封国林, 侯威, 董文杰 2006 物理学报 **55** 962]
- [23] Zhang W, Gao X Q, Dong W J, Li J P 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 2657 (in Chinese) [张文, 高新全, 董文杰, 李建平 2006 物理学报 **55** 2657]
- [24] Gong Z Q, Feng G L, Dong W J, Li J P 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 3180 (in Chinese) [龚志强, 封国林, 董文杰, 李建平 2006 物理学报 **55** 3180]
- [25] Wan S Q, Feng G L, Dong W J, Li J P, Gao X Q, He W P 2005 *Chin. Phys. Soc. and IOP Publishing Ltd* **14** 628
- [26] He W P, Wu Q, Zhang W, Cheng H Y 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 8264 (in Chinese) [何文平, 吴琼, 张文, 成海英 2010 物理学报 **59** 8264]
- [27] He W P, Wu Q, Zhang W, Wang Q G, Zhang Y 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 2862 (in Chinese) [何文平, 吴琼, 张文, 王启光, 张勇 2009 物理学报 **58** 2862]
- [28] He W P, Feng G L, Wu Q, He T, Wan S Q, Chou J F 2011 *International Journal of Climatology*, DOI: 10.1002/joc.2367
- [29] He W P, Feng G L, Wu Q, Wan S Q, Chou J F 2008 *Nonlin. Processes Geophys.* **15** 601
- [30] Wang Q G, Zhang Z P 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 1976 (in Chinese) [王启光, 张增平 2008 物理学报 **57** 1976]
- [31] He W P, He T, Cheng H Y, Zhang W, Wu Q 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 049202 (in Chinese) [何文平, 何涛, 成海英, 张文, 吴琼 2011 物理学报 **60** 049202]
- [32] Pinus S M 1991 *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* **88** 2297
- [33] Pincus S M, Goldberger A L 1994 *Am. J. Physiol.* **266** H1643
- [34] Pinus S M 1995 *Chaos* **5** 110
- [35] He W P 2008 *Ph. D. Dissertation* (Lanzhou: Lanzhou University) p45 (in Chinese) [何文平 2008 博士学位论文 (兰州: 兰州大学) 第 45 页]
- [36] Peng J B, Jiang X Q 2010 *Natural Science J. Xiangtan Univ.* **32** 123 (in Chinese) [彭景斌, 姜小奇 2010 湘潭大学自然科学学报 **32** 123]
- [37] Shi X H 2008 *Plateau and Mountain Meteor. Res.* **28** 22 (in Chinese) [施晓晖 2008 高原山地气象研究 **28** 22]
- [38] Wang B X, Shi Z K 2004 *Mathematics in Practice and Theory* **34**

104 (in Chinese) [王炳雪, 史忠科 2004 数学的实践与认识 34
104]
[39] Wang Y, Gao X D, Wu S, Chen M 2009 *Computer Engineering*
35 32 (in Chinese) [王闯, 高学东, 武森, 陈敏 2009 计算机工程

35 32]
[40] Chen Z, Ivanov P C, Hu K, Stanley H E 2002 *Physical Review E*
65 041107

Effects of different trends on moving cut data-approximate entropy*

Jin Hong-Mei¹⁾ He Wen-Ping^{2)†} Hou Wei²⁾ Zhang Da-Quan²⁾

1) (Department of Atmospheric Sciences, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China)

2) (National Climate Center, China Meteorological Administration, Beijing 100081, China)

(Received 6 May 2011; revised manuscript received 10 July 2011)

Abstract

Various trends exist in many observation data, such as periodical trend caused by seasonal variation, linear trend and polynomial trend brought about by global warming. In the present paper, the effects of different trends on moving cut data-approximate entropy are investigated. The numerical tests on model time series indicate that the detection results of moving cut data-approximate entropy are little affected by periodical trend, linear trend and nonlinear trend. The reliability of abrupt change detection of moving cut data-approximate entropy is demonstrated, which provides an experimental basis for the wide applications of the present method in real observation data.

Keywords: moving cut data-approximate entropy, trends, abrupt change detection

PACS: 92.60.Wc

* Project supported by the National Basic Research Program of China (Grant No. 2012CB955203), the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 40930952, 41175067, 40905034), and the National Key Technology Research and Development Program of the Ministry of Science and Technology of China (Grant Nos. 2007BAC29B01, 2009BAC51B04).

† E-mail: wenping_he@163.com