

非线性动力学方法在气候突变检测中的应用

刘群群 何文平 顾斌

Application of nonlinear dynamical methods in abrupt climate change detection

Liu Qun-Qun He Wen-Ping Gu Bin

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 64, 179201 (2015) DOI: 10.7498/aps.64.179201

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.179201>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2015/V64/I17>

---

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

滑动移除重标方差在动力学结构突变检验中的应用

Application of moving cut data-rescaled variance analysis in dynamic structure mutation testing

物理学报.2014, 63(20): 209203 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.209203>

试用 Lyapunov 指数探讨气候突变及其前兆信号

Try to use Lyapunov exponent to discuss the abrupt climate change and its precursory signals

物理学报.2013, 62(12): 129204 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.129204>

集合经验模态分解在区域降水变化多尺度分析及气候变化响应研究中的应用

The application of ensemble empirical mode decomposition method in multiscale analysis of region precipitation and its response to the climate change

物理学报.2013, 62(10): 109203 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.109203>

一种基于 Logistic 模型的突变过程性分析方法及其应用

A method of abrupt change process analysis based on Logistic model and its applications

物理学报.2013, 62(7): 079202 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.079202>

中国不同区域气候突变的前兆信号

The early warning signals of abrupt climate change in different regions of china

物理学报.2013, 62(5): 059202 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.059202>

## 非线性动力学方法在气候突变检测中的应用\*

刘群群<sup>1)2)3)</sup> 何文平<sup>3)†</sup> 顾斌<sup>1)2)4)</sup>

1)(南京信息工程大学, 物理系, 南京 210044)

2)(南京信息工程大学, 空间天气研究所, 南京 210044)

3)(国家气候中心, 北京 100081)

4)(南京信息工程大学, 中国气象局气溶胶与云降水重点开放实验室, 南京 210044)

(2015年3月18日收到; 2015年4月28日收到修改稿)

快速、准确的检测气候突变, 对于我们认识气候系统的变化和对未来气候系统演变趋势的预测有着重要的现实意义和社会经济价值. 本文主要回顾了近年来非线性突变检测技术的主要研究进展及其在实际观测资料中的应用, 其中包括基于气候系统长程相关性的检测方法, 如滑动去趋势波动分析方法、滑动移除去趋势波动分析方法、滑动移除重标极差方法和指纹法等; 以及基于时间序列复杂性的检测方法, 如近似熵方法, Fisher 信息和小波 Fisher 信息等. 此外, 本文还指出发展针对空间场的突变检测技术是未来一个可能的发展方向. 由于空间场所包含的气候系统的演变信息远高于单点时间序列, 空间场的突变检测技术将会使得对气候突变的检测时间大大缩短, 从而使得人们有足够的时间去采取行动, 以便为适应气候突变所带来的新挑战做好准备.

关键词: 气候突变, 动力学结构突变, 场的突变

PACS: 92.70.Aa

DOI: 10.7498/aps.64.179201

## 1 引言

气候突变是气候系统演变过程中的一种重要的表现形式, 对气候突变现象及其理论的研究是气候变化研究中一个重要的领域<sup>[1-6]</sup>. 准确的识别和检测气候突变对于预测气候系统未来的演变趋势具有重要的意义, 鉴于此, 国内外学者已经开展了大量气候突变检测技术的研究<sup>[7-14]</sup>. 近年来, 随着非线性科学的发展, 气候突变检测技术亦得到了快速的发展, 涌现出许多新方法和新技术. 如针对时间序列概率密度的突变检测, He 等<sup>[15]</sup> 基于 Box-Cox 变换中定量表征时间序列偏态性特征的物理量-偏态指数, 提出了一种滑动偏态指数方法. 数值试验和实际资料中的应用表明了该方法具有很好的检测性能. 针对系统的动力学结构突变检测

问题, 基于气候系统演变的长程相关性、气候系统的复杂性等特征以及相空间重构技术, 国内外学者先后发展了一系列新的方法和新技术, 如滑动去趋势波动分析<sup>[16]</sup>、滑动移除去趋势波动分析<sup>[17]</sup>、滑动移除重标极差方法<sup>[18]</sup>、滑动移除重标方差方法<sup>[19]</sup>、滑动近似熵<sup>[20]</sup>和滑动移除近似熵<sup>[21]</sup>、基于去趋势波动分析的指纹法<sup>[22]</sup>、Fisher 信息<sup>[23]</sup>、动力学相关因子指数<sup>[24]</sup>等.

产生气候状态转换或突变的可能原因有二: 一是气候系统的动力学方程在演化过程中并没有发生改变, 仅仅是气候系统冷暖位相的自然更替, 即系统的位相突变, 如春、夏、秋、冬四季的变迁; 二是由于外强迫或者气候系统子系统相互间作用的加强(或减弱)等原因使得气候系统的动力学方程的参数、边界条件或者结构等发生了改变, 导致气

\* 全球变化研究国家重大科学研究计划(批准号: 2012CB955902)、国家自然科学基金(批准号: 41275074 和 41175067)、中国气象局气溶胶与云降水重点开放实验室开放课题(批准号: KDW1304)资助的课题.

† 通信作者. E-mail: wenping\_he@163.com

候状态偏离了原有的吸引子, 进而造成气候系统的状态变量具有统计意义上的显著改变. 因此, 检测是否有气候突变, 也应该从气候演变过程的差异出发, 而不是仅仅从某个(或某些)气候统计量(如平均值等)出发.

鉴于此, 气候突变按照其成因可以分为两类, 第一类气候突变仅仅是指气候系统的位相(如冷、暖)的显著改变, 但气候系统的动力学方程并未发生改变; 第二类气候突变则是由于气候系统的动力学方程的改变所引发的. 由于造成第二类气候突变的直接原因是由于气候系统的动力学方程(包括参数、边界条件等)发生了改变或重大调整所引起, 因此, 称这类气候突变为气候动力学结构突变. 显然, 气候动力学结构突变与特定的时间尺度没有必然的联系.

传统的气候突变检测方法大多基于状态变量在统计意义上的显著变化来判断突变的发生, 如滑动t-检验、Cramer法、Yamamoto法以及Mann-Kendall法等, 其检测结果严重依赖于时间尺度的选取, 因而检测到的突变点具有多时间尺度特征. 因此, 系统位相突变检测技术并不适用于气候动力学结构突变. 鉴于此, 本文主要回顾了近年来发展的若干新的气候动力学结构突变检测方法及其在实际观测资料中的应用, 这些方法和技术主要是基于气候系统演变的长程相关性、时间序列的复杂性、相空间重构理论等发展起来的. 在本文的最后简要探讨了气候突变检测技术中存在的问题及未来可能的发展方向.

## 2 基于长程相关性的突变检测技术

气候系统的演变具有长程相关性特征, 例如地表温度、气压、降水等气象要素的演变、极端事件的重现时间、地震的发生、心率的变化等<sup>[25-31]</sup>都具有长程相关性. 长程相关性可以通过一些非线性分析方法来提取, 具有长程相关性的时间序列常展现出分形特征, 即标度不变性. 这种标度不变性的一个重要的量化指标是标度指数, 它可以作为表征系统动力学结构特征的一个有效的物理量. 已有研究表明, 系统动力学的改变会导致其长程相关性发生相应的变化<sup>[32]</sup>. 基于这一特征, 可以通过检测时间序列长程相关性的变化来判断系统的动力学结构是否发生了变化. 目前, 这类突变检测方法主要有滑动去趋势波动分析、滑动移除去趋势波动

分析、滑动移除重标极差法、滑动移除重标方差法、基于去趋势波动分析的指纹法、红噪声检验法等.

去趋势波动分析(detrended fluctuation analysis, DFA)是1994年由Peng等<sup>[33]</sup>提出的一种研究时间序列长程相关性的标度指数估算方法. DFA方法能够很好地处理非平稳数据, 通过其获得的标度指数较传统的方法更为可靠. 因此, 该方法已经得到了广泛的应用. DFA方法的算法如下:

对于时间序列 $\{x_i, i = 1, 2, \dots, N\}$ , 首先计算序列的累积量

$$y_n = \sum_{i=1}^n \Delta x_i,$$

然后将累积量序列 $\{y_i, i = 1, 2, \dots, N\}$ 分成不重合的等长度为 $s$ 的子序列. 对于 $p$ 阶DFA方法分析过程(DFA<sub>p</sub>), 在每一段长度为 $s$ 的累积量子序列中, 对其局部趋势采用 $p$ 阶多项式进行拟合, 去掉局部拟合趋势后可得到波动序列 $\{y_s(i), i = 1, 2, \dots, N\}$ . 最后, 平均各段波动函数可得到累积量序列的均方波动函数

$$F_p(s) = \left\langle \frac{1}{s^{[N/s]}} \sum_{i=1}^{s^{[N/s]}} y_s^2(i) \right\rangle^{1/2},$$

$\langle \cdot \rangle$ 表示对所有的窗口取平均. 若 $F_p(s)$ 与窗口长度 $s$ 存在标度关系, 则有

$$F_p(s) \propto s^\gamma,$$

其中 $\gamma$ 为标度指数, 可通过线性拟合波动函数 $F_p(s)$ 和窗口长度 $s$ 的双对数曲线得到. 由于累积量 $y_n$ 可以看成一维随机行走经过 $n$ 步后的位置, 在第 $i$ 步, 如果 $\Delta x_i$ 为正, 则向左走一步; 反之, 则向右走一步. 根据随机行走理论<sup>[34]</sup>, 对于给定的窗口长度 $s$ , 累积序列的波动函数 $F_p(s)$ 与原列序的自相关函数 $C(s)$ 有关. 对于序列存在长程相关性的情况,

$$C(s) \propto s^{-\alpha}, \quad \gamma = 1 - \alpha/2.$$

若 $\gamma > 1/2$ , 序列具有长程相关性, 表明过去一个增加的趋势暗含着未来极有可能仍然保留这种增加的趋势, 反之亦然; 如果 $\gamma < 1/2$ , 表明序列具有反相关;  $\gamma = 1/2$ 则表明序列不具有相关性.

基于DFA方法, He等<sup>[16]</sup>提出了滑动去趋势波动分析方法(moving detrended fluctuation analysis, MDFA), 并考察了该方法在系统动力学方程的参数和方程形式分别发生改变时的检测性能. 结

果表明, MDFA 能够很好的对参数突变、方程形式发生改变的情况进行有效的识别和检测, 且其检测结果对于子序列的依赖性较小, 且抗噪效果好. MDFA 的主要步骤如下: 首先选择一定长度的子序列, 采用 DFA 方法计算该子序列的标度指数, 随后逐步移动该子序列, 但保持其长度不变, 再采用 DFA 方法计算新子序列的标度指数. 如此重复操作, 直至子序列移动至所分析序列的末端. 根据已有的研究结果<sup>[16,32]</sup>可知, 如果时间序列中不存在动力学结构突变, 通过 MDFA 方法得到的标度指数序列的变化较平缓, 标度指数的波动幅度在一个较小的范围内, 这种波动的原因主要在于子序列长度过短; 若存在动力学结构突变, 标度指数序列将在突变点附近剧烈的波动, 其幅度远大于由于子序列长度过短所引起的波动. Costas 等<sup>[35]</sup>分析了 1900—2012 年海表温度的突变情况, 发现 1925/1926 年和 1987/1988 年分别发生了两次均值突变, 同时他们利用 DFA 方法分别计算了突变前后海表温度的标度指数, 发现无论是突变前, 还是突变后, 其标度指数没有显著性的差异. 这表明, 海表温度的两次均值突变仅仅是其冷暖状态(位相)的自然变化, 支配海表温度变化的潜在的力学方程并未发生改变.

Chen 等<sup>[36]</sup>和 He 等<sup>[17]</sup>发现对于来源于同一个动力学系统的相关性时间序列而言, 即使在序列中数据被移除 50% 的情况下, 在计算误差范围内, 剩余序列的标度指数与原序列基本相同. 因此, 通过考察时间序列中不同时段内的数据对于计算整个序列标度指数贡献的大小, 可以尝试对系统的动力学结构突变进行检测. 鉴于此, He 等<sup>[17]</sup>提出了滑动移除去趋势波动分析(moving cut data-detrended fluctuation analysis, MC-DFA). MC-DFA 不仅受滑动窗口大小和强噪声的影响较小, 而且能够可靠地检测出相关性时间序列的动力学结构突变. 与 MDFA 方法相比, MC-DFA 能够更加准确的识别突变. MC-DFA 的计算过程如下:

- 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) 利用 DFA 方法计算新序列的标度指数值;
- 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标度指数序列;

6) 计算标度指数的方差贡献, 进而确定突变点或突变区间.

图 1 给出了 MC-DFA 的详细计算过程.

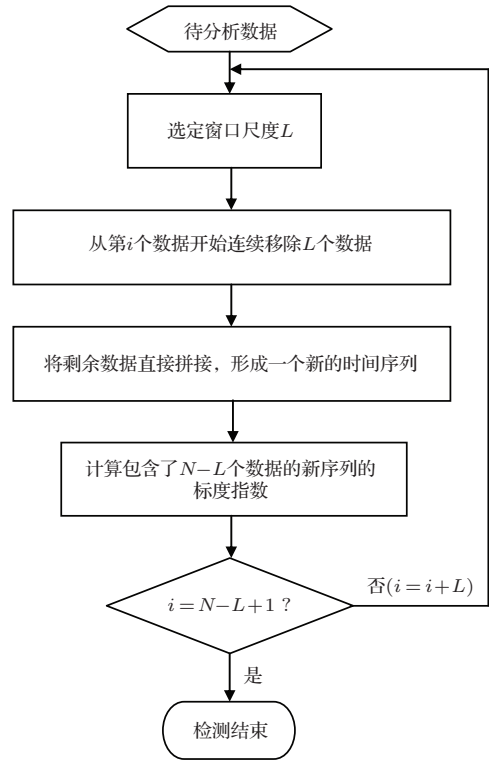


图 1 MC-DFA 算法的流程图

Fig. 1. The flow chart of MC-DFA.

类似于 MC-DFA 方法, 基于重标极差<sup>[37]</sup>和重标方差法<sup>[38]</sup>, 先后还发展了滑动移除重标极差分析法<sup>[18]</sup>和滑动移除重标方差法<sup>[19]</sup>. He 等<sup>[39]</sup>对滑动移除重标极差分析法和滑动移除方差法的性能进行全面的比较, 发现滑动移除重标极差方法的运算效率要远远高于重标方差法. 二者除了在算法的运行效率上有差异外, 算法的其他检测性能没有本质的区别. 同时还发现, 滑动移除重标极差分析法和滑动移除重标方差法在窗口尺度较小的时候常常会检测到虚假的突变点, 在实际应用的过程中, 可以将二者结合起来应用, 并改变窗口尺度的大小, 验证突变检测结果的可靠性.

此外, 基于气候系统演变的长程相关性, Held 等<sup>[22]</sup>在 DFA 方法的基础上还发展了指纹算法(degenerate fingerprinting)来检验动力学分岔, 从系



统中提取出最小衰减指数作为早期预警信号, 当 EOF 分解的空间场或者时间序列最小衰减指数接近零时表明系统临近阈值, 此时就可以判定系统接近分岔点. 将此方法应用于检验北大西洋温盐环流的时空变换, 还发现在预估温盐环流停滞的时间时适当的使用代用资料可以显著地减小系统的不稳定性.

红噪声检验法是合成颜色噪声时间序列来模拟气候数据, 可以是一阶自回归方程  $x_t = ax_{t-1} + \varepsilon_t$ , 其中  $0 < a < 1$ ,  $\varepsilon$  是白噪声, 方程的相关性和频率都由系数  $a$  决定. Daniel 等 [40] 合成与 PDO 周期相同, 随机、独立、均匀分布的傅里叶系数噪声序列, 发现上世纪 70 年代北太平洋的 PDO 突变点只是高斯随机红噪声, 而非气候系统的动力学突变.

### 3 基于时间序列复杂性的突变检测技术

基于时间序列的复杂性的突变检测方法有近似熵 (approximate entropy, ApEn) 法和信息熵. 近似熵是 20 世纪 90 年代由 Pincus [41-43] 从衡量时间序列复杂度的角度提出的, 它表示相似向量在由  $m$  维增加至  $m+1$  维时继续保持其相似性的条件概率. 当维数变化时, 时间序列中产生新模式的概率越大、序列越复杂, 相应的近似熵也就越大. 近似熵方法是一个理想的非线性动力学检测方法, 它具有所需数据点较少、有较好的抗噪和抗干扰能力且适用于随机信号、确定性信号或两种混合信号等特点. 王启光等 [20] 将 ApEn 方法引入到气候突变检测中, 提出了滑动近似熵方法, 理想试验证实了其具有区分不同动力学结构的能力. 但发现滑动近似熵的检测结果依赖于子序列长度, 且不能够准确的定位突变点的位置, 只能给出一个大致突变区域. 借鉴于 MC-DFA 中的滑动移除数据的思想, 何文平等 [21] 发展了滑动移除近似熵 (moving cutting data-approximate entropy, MC-ApEn), 数值试验结果验证了 MC-ApEn 对滑动移除窗口尺度的依赖性较小, 并能够更精确地检测突变开始的时间. MC-ApEn 算法的检测流程图与 MC-DFA 类似, 所不同的是 MC-DFA 是要计算时间序列的标度指数, 而 MC-ApEn 计算的是时间序列的近似熵. 金红梅等 [44,45] 分析了噪声和趋势对 MC-ApEn 检测结果的影响, 发现周期性趋势、线性趋势及非线性趋势

对 MC-ApEn 的检测结果影响较小, 且 MC-ApEn 受尖峰噪声和高斯白噪声的影响也较小, 进一步验证了该方法的可靠性.

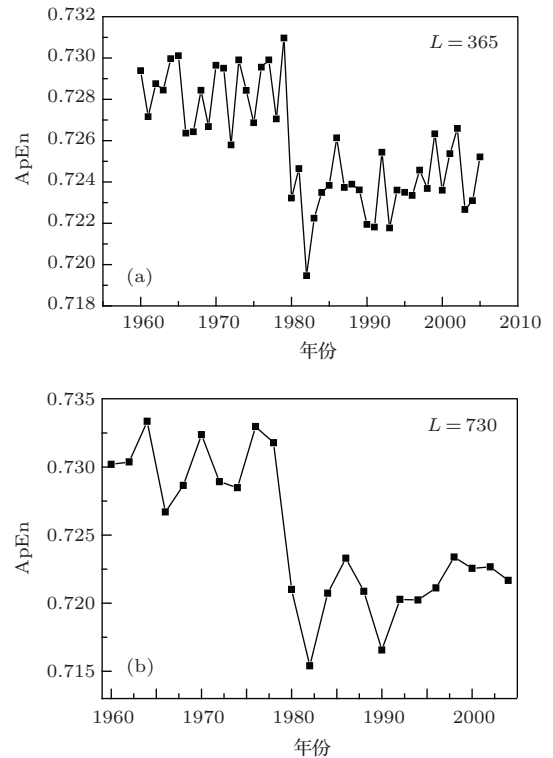


图 2 呼玛气象观测站逐日降水资料的 MC-ApEn 检测 (资料记录了 1960 年 1 月 1 日至 2006 年 12 月 31 日呼玛站的逐日降雨量) (a) 滑动移除窗口长度为 1 年, 这里取  $L = 365$  天; (b)  $L = 730$  天 [21]

Fig. 2. The MC-ApEn results for daily precipitation records (from 1 January to 31 December 2006) in Huma observational stations: (a) the sample size of sliding window is 1 year,  $L = 365$  days; (b)  $L = 730$  days [21].

图 2 给出了呼玛气象观测站 1960—2006 年逐日降水资料的 MC-ApEn 检测, 逐日降水资料的 ApEn 序列可以分为明显不同的两个稳定变化阶段, 1979 年以前的 ApEn 值普遍大于 1980 年以后, 这意味着自 1980 年后至 2006 年期间内, 降水的复杂性突然增大了, 其可预测性相对于 1960—1979 年而言减小了. 基于此, 可以判断 1980 年呼玛气象观测站发生了气候突变. 增大滑动移除窗口尺度至 2 年, 检测到的突变时间与窗口尺度为 1 年时完全一致. 表明了 MC-ApEn 的检测结果对窗口尺度的依赖性较小, 而且 MC-ApEn 的检测结果与已有的研究基本一致 [20]. 同时, 我们利用 Box-Cox 变换计算呼玛站逐年降水的偏态指数也发现, 其值在 1979 年有一个突然增大的变化, 即

1979/1980年前后, 逐日降水资料的偏态指数呈现两个相对稳定的变化. 这表明, 此次降水突变可能与气候系统的动力学的变化有关.

熵的概念最早起源于物理学, 用于度量热力学系统的无序程度. 在信息论里面, 熵是对不确定性的测量, 被用来衡量随机量出现的期望值. 它表示在被接收之前, 信号传输过程中损失的信息量, 又被称为信息熵. 但是在信息世界, 熵越高能传输的信息就越多, 熵越低就意味着传输的信息量越少. 1922年, Fisher<sup>[23]</sup>发展了一种测量不确定性的统计量, 称为Fisher信息(Fisher information). Fisher信息可用于衡量评估参数的能力, 还可以用于检验系统或现象的状态<sup>[46]</sup>.

Fisher信息的表达式为

$$I = \int \frac{1}{p(\varepsilon)} \left( \frac{dp(\varepsilon)}{d\varepsilon} \right)^2 d\varepsilon,$$

其中,  $p(\varepsilon)$ 是偏差 $\varepsilon$ 的概率密度函数. Brian等<sup>[47]</sup>将Fisher信息应用于生态系统的动力学突变检测中, 并在两个生态系统模型中验证了其可以检测出系统突变. Audrey等<sup>[48]</sup>同样运用Fisher信息对生态系统突变做了进一步的研究, 结果显示Fisher信息可以敏锐地检测出系统突变. Julio等<sup>[49]</sup>

在Fisher信息的基础上发展了一种小波Fisher信息方法(wavelet Fisher's information measure, Wavelet FIM), 该方法主要适用于 $1/f^\alpha$ 信号, 即正相关和反相关性信号的突变检测.

Julio等<sup>[49]</sup>基于分形布朗运动产生了不同的相关性信号, 并在信号中设置了单个和多个均值突变点, 测试了小波Fisher信息的突变检测性能. 图3分别给出了有单个和四个均值突变点的理想的反相关信号(Hurst指数为0.1), 检测结果表明, 该方法能够有效的对这些突变点进行识别. 同时, Julio等对于Hurst指数大于0.1的情形进行了类似的试验, 发现无论对单个突变点, 还是多个突变点的情况, 都能进行较为准确的检测. 但发现, 对于强相关信号(Hurst指数大于0.8), 小波Fisher信息除了能检测到真正的突变点外, 还会给出一些虚假的突变检测结果. 如果对这种强相关信号增加其均值突变的幅度, 小波Fisher信息的检测能力会随之增强. 因此, 尽管小波Fisher信息对于Hurst指数小于0.8的相关性序列能够进行有效的检测, 但其对强相关信号中的较弱的突变信号识别能力稍差, 这也是小波Fisher信息法中存在的一个主要的不足.

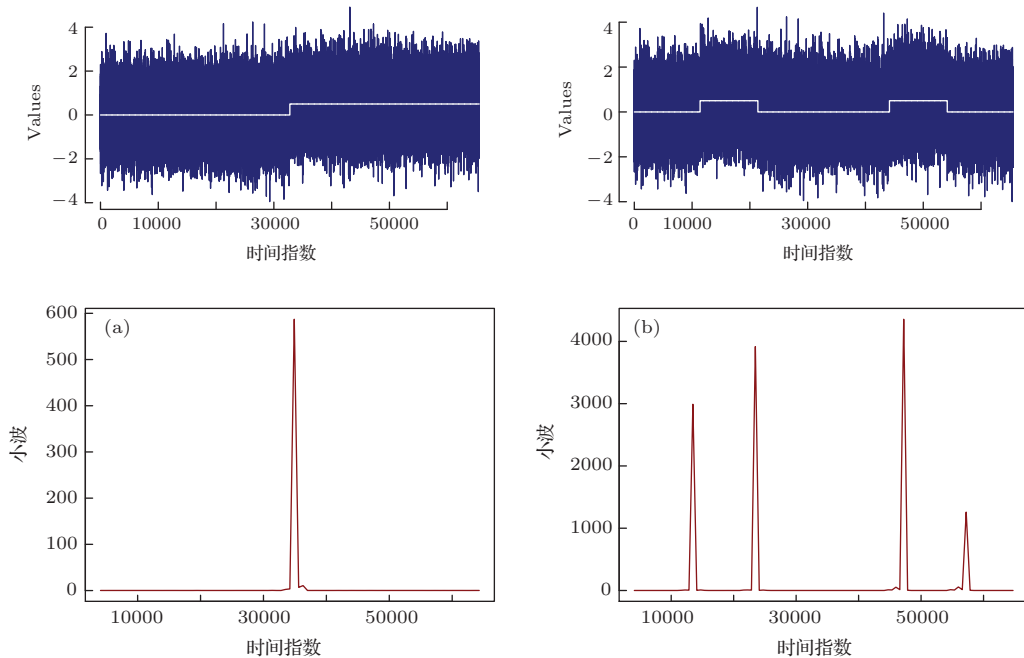


图3 (网刊彩色) 小波Fisher信息的性能测试 (a)分形布朗运动产生的反相关信号, Hurst指数为0.1, 时间序列长度为 $2^{15}$ , 在 $t = 32678$ 处有一个均值突变, 其中突变的幅度为其时间序列标准差的0.5倍; (b)同图(a), 但分别在 $t_1 = 11384, t_2 = 21384, t_3 = 44152$ 以及 $t_4 = 54152$ 时刻发生了均值突变<sup>[49]</sup>

Fig. 3. (color online) A test for Wavelet Fisher's information: (a) A fractional Gaussian noise with  $H = 0.1$  and embedded jumps. Top left plot displays the fGn signal with a single level-shift and top right plot with more elaborate combination of jumps; (b) Corresponding wavelet Fisher's information, there are mean value jumps at  $t_1 = 11384, t_2 = 21384, t_3 = 44152$  and  $t_4 = 54152$ <sup>[49]</sup>.

## 4 基于相空间理论的突变检测技术

Packara 于 1980 年提出了时间序列的相空间重构理论和方法. 相空间是指用  $n$  个状态变量建立起来的抽象的物理空间. 基于相空间理论的检测方法有: 复原图及复原量化分析方法<sup>[50,51]</sup>、时空分离图及与之相关的概念分布方法<sup>[52,53]</sup>、非线性相干预测分析法<sup>[54]</sup>等, 这些检测方法都是基于相空间中最近邻点的性质识别时间序列中动力结构的异同, 但是计算过程非常复杂而且计算量巨大.

动力学指数分割算法<sup>[55]</sup>(简称  $Q$  指数) 是一个基于相空间重构理论的突变检测方法.  $Q$  指数的主要算法如下: 对一长度为  $N$  的时间序列进行嵌入空间动力学轨迹重构, 其嵌入向量<sup>[56]</sup>表达式为

$$X_i = \{x(t_i), x(t_i + \tau), \dots, x(t_i + (m - 1)\tau)\},$$

其中  $\tau = a\Delta t$  是时间延迟,  $a$  是延迟参数,  $\Delta t$  是采样时间间隔,  $m$  是嵌入空间维数. 重构后组成的向量矩阵为

$$X = \{X_i, i = 1, 2, \dots, N - \alpha(m - 1)\},$$

它的自关联和<sup>[57]</sup>定义为

$$\begin{aligned} C_{xx}(\varepsilon) &= P(\|X_i - X_j\| \leq \varepsilon) \\ &= \frac{2}{(N - am)[N - a(m - 1)]} \\ &\quad \times \sum_{i=1}^{N-am} \sum_{j=i+1}^{N-a(m-1)} \Theta[\varepsilon - \|X_i - X_j\|], \end{aligned}$$

这里,  $\Theta$  是 Heaviside 阶跃函数.

对于两个时间序列  $\{x_i\}, \{y_i\}$ ,  $Q$  指数定义为

$$Q_{xy} = \lim_{\varepsilon \rightarrow 0} \left| \ln \frac{C_{xx}(\varepsilon)}{C_{yy}(\varepsilon)} \right|.$$

当  $Q_{xy}$  统计上足够小时, 序列集  $\{x_i\}, \{y_i\}$  至少具有相近的动力学结构, 否则就不具有相近的动力学特征.

李春贵<sup>[58]</sup>提出了  $Q$  指数, 并将其用于定量的判断不同时间序列的属性和复杂性. 万仕全<sup>[59]</sup>将  $Q$  指数应用于分析几种典型代用资料的动力学结构, 发现它们的演化特征基本相似, 区域和全球的气候同步变化, 区域气候受全球气候系统制约. 龚志强等<sup>[60]</sup>应用滑动  $Q$  指数方法, 利用理想时间序列验证了该算法能够检验系统的动力学结构, 并探讨了噪声对滑动  $Q$  指数检测结果的影响, 发现少量尖峰噪声对其检测结果的影响较小, 但是连续分布

的随机白噪声对其影响较大. 因此, 在应用滑动  $Q$  指数法进行突变检测的过程中需考虑信号中噪声强度的影响.

## 5 空间场的突变检验方法

气候系统是一个高度复杂的、非线性的、时空变化的动力系统, 其在时空演变上均具有连续性和相关性(即时空关联特征), 气候系统的各个子系统间存在着各种不同强度的耦合作用. 目前对气候突变的研究主要是单点时间序列的相关性分析, 忽视了气候系统是一个时空演变的整体. 因此, 对气候突变的研究需要从空间场的角度来分析. 已有学者针对复杂时空模态的识别开展了一些相关研究, 如模态相关法(pattern correlation methods)<sup>[61,62]</sup>是气候变化研究中一种广泛使用的方法, 其主要作用是通过分析各种影响因子在大尺度空间模态上的响应差异, 来判断导致气候变化的可能原因(如区分人类活动与自然变率在气候变化中的作用); Bernacchia 等<sup>[63,64]</sup>基于累积量函数(cumulant function)提出了一种空间模态的检测方法, 但方法实质上与空间自相关函数相同, 主要是用于识别空间模态上的一致性区域. Mocenni 等<sup>[65]</sup>的研究表明, 基于空间递归图方法可有效地提取时空动力学系统中的动力结构变化信号, 并定量地刻画出空间分布的变化, 此方法在数据量很少的情况下也适用, 不受数据量大小的影响. 尽管空间模态的识别技术取得了一定的成绩, 但这些方法还存在着不同程度的缺陷, 从空间模态的角度来检测气候突变的方法和技术几乎还是空白.

## 6 结 论

非线性科学中新理论和新方法的提出, 极大地促进了气候突变检测技术的发展, 尤其是在气候动力学结构的检测技术方面, 近年来涌现出一系列新方法<sup>[10,66]</sup>, 主要可以分为三类, 第一类主要从时间序列的长程相关性的变化出发来检测系统的动力学结构是否发生了变化, 比如 MDFA, MC-DFA、滑动移除重标极差方法、滑动移除重标方差方法、以及基于 DFA 的指纹法. 第二类方法主要是基于时间序列的复杂性发展起来的, 包括基于近似熵方法、Fisher 信息等提出的一些新的突变检测方法. 第三类方法主要由时间序列的相空间重构理论发



展而来,例如动力学 $Q$ 指数法,递归图法等.由于篇幅有限,部分算法没有进行详细的介绍.

气候系统是一个高度复杂的、时空变化的动力系统<sup>[67,68]</sup>,其在时空演变上具有时空关联的特征,空间场数据包含了气候系统在时空上的演变特征,其所蕴藏的气候系统的动力学信息远远超过单点时间序列.因此,除了发展基于时间序列的气候突变检测技术外,迫切需要进一步发展空间场的气候突变检验方法.目前,国内外对气候系统空间场突变的检测技术几乎处于空白,这也是气候突变检测技术未来发展的一个方向.

### 参考文献

- [1] Liu S D, Liu S K 1997 *Chin. Sci. Bull.* **42** 1565 (in Chinese) [刘式达, 刘式适 1997 科学通报 **42** 1565]
- [2] Liu S D, Liu S K, Liang S, Ren K, Fu Z T 2002 *Prog. Nat. Sci.* **12** 1 (in Chinese) [刘式达, 刘式适, 梁爽, 任奎, 付遵涛 2002 自然科学进展 **12** 1]
- [3] Feng G L, Wang Q G, Hou W, Gong Z Q, Zhi R 2009 *Acta. Phys. Sin.* **58** 2853 (in Chinese) [封国林, 王启光, 侯威, 龚志强, 支蓉 2009 物理学报 **58** 2853]
- [4] Fu C B, Wang Q 1992 *Chinese J. Atmos. Sci.* **16** 483 (in Chinese) [符淙斌, 王强 1992 大气科学 **16** 483]
- [5] Feng G L, Dong W J 2003 *Chin. Phys.* **12** 1072
- [6] Feng G L, Dong W J, Li J P 2004 *Chin. Phys.* **13** 1582
- [7] Li J P, Chou J F, Shi J E 1996 *Journal of Beijing Meteorological college* **2** 16 (in Chinese) [李建平, 丑纪范, 史久恩 1996 北京气象学院 **2** 16]
- [8] Li J P, Shi J E 1993 *Chinese J. Atmos. Sci.* **17** 132 (in Chinese) [李建平, 史久恩 1993 大气科学 **17** 132]
- [9] Xiao D, Li J P 2007 *J. Geophys. Res.* **112** D24S22
- [10] Feng G L, Dong W J, Gong Z Q, Hou W, Wan S Q, Zhi R 2006 *Nonlinear theories and methods on spatial-temporal distribution of the obserbational data* (Beijing: Metrological press) p27-89 [封国林, 董文杰, 龚志强, 侯威, 万仕全, 支蓉 2006 观测数据非线性时空分布理论和方法 (北京: 气象出版社) 第27—第89页]
- [11] Feng G L, Dong W J, Jia X J, Cao H X 2002 *Acta Phys. Sin.* **51** 1181 (in Chinese) [封国林, 董文杰, 贾晓静, 曹鸿兴 2002 物理学报 **51** 1181]
- [12] Kendall M G 1970 *Rank Correlation Methods* (London: Charles Griffin)
- [13] Mann H B, Whitney D R 1947 *Annals of Mathematical Statistics* **18** 50
- [14] Lepage 1971 *Biometrika* **58** 213
- [15] He W P, Wan S Q, Jiang Y D, Jin H M, Zhang W, Wu Q, He T 2013 *Int. J. Climatol.* **33** 2713
- [16] He W P, Feng G L, Wu Q, Wan S Q, Chou J F 2008 *Non. Proc. Geophys.* **15** 601
- [17] He W P, Feng G L, Wu Q, He T, Wan S Q, Chou J F 2012 *Int. J. Climatol.* **32** 1604
- [18] He W P, Deng B S, Wu Q, Zheng W, Cheng H Y 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 8264 (in Chinese) [何文平, 邓北胜, 吴琼, 张文, 成海英 2010 物理学报 **59** 8264]
- [19] Sun D Y, Zhang H B, Huang Q 2014 *Acta Phys. Sin.* **63** 209203 (in Chinese) [孙东永, 张洪波, 黄强 2014 物理学报 **63** 209203]
- [20] Wang Q G, Zhang Z P 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 1996 (in Chinese) [王启光, 张增平 2008 物理学报 **57** 1996]
- [21] 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]
- [22] Held H, Kleinen T 2004 *Geophysical Research Letters* **31** L23207
- [23] Fisher R A 1922 *Philos. Trans. R. Soc. Lond. Ser. A* **222** 309
- [24] Savit R, Green M 1991 *Phys. D* **50** 95
- [25] Abaimov S G, Turcotte D L, Shcherbakov R, Rundle J B 2007 *Non. Proc. Geophys.* **14** 455
- [26] Blender R, Fraedrich K, Sienz F 2008 *Non. Proc. Geo.* **15** 557
- [27] Bunde A, Havlin S, Kantelhardt J W, Penzel T T, Peter J H, Voigt K 2000 *Phys. Rev. Lett.* **85** 3736
- [28] Bunde A, Eichner J F, Kantelhardt J W, Havlin S 2005 *Phys. Rev. Lett.* **94** 048701
- [29] Bunde E K, Bunde A, Havlin S, Roman H E, Goldreich Y, Schellnhuber H J 1998 *Phys. Rev. Lett.* **81** 729
- [30] Eichner J F, Koscienczy-Bunde E, Bunde A 2003 *Phys. Rev. E* **8** 046133-1
- [31] Govindan R B, Vjushin D, Brenner S, Bunde A, Havlin S, Schellnhuber H J 2001 *Phys. A* **294** 239
- [32] He W P 2008 *Ph. D. Dissertation* (Lanzhou: Lanzhou Unibersity) p13 (in Chinese) [何文平 2008 博士论文 (兰州: 兰州大学) p13]
- [33] Peng C K, Buldyrev S V 1993 *Phys. Rev. E* **49** 1685
- [34] Shiesinger M F, West B J, Klafter J 1987 *Phys. Rev. Lett.* **58** 1100
- [35] Costas A Varotsos, Christian L E Franzke, Maria N Efstathiou, Andrei G Degermendzhi 2014 *Theor. Appl. Climatol.* **116** 51
- [36] Chen Z, Ivanov P, Hu K, Stanley H E 2002 *Physical Review E* **65** 041107
- [37] Hurst H 1951 *Transactions of the American society of civil engineers* **116** 770
- [38] Giraitis L, Kokoszka P, Leipus R, Teyssiere G 2003 *J. Econometrics* **112** 265
- [39] He W P, Liu Q Q, Jiang Y D, Lu Y 2015 *Chin. Phys. B* **24** 049205
- [40] Daniel L R, Russ E D 2003 *Deep-Sea Reaearch Part I* **50** 691
- [41] Pincus S M 1991 *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* **88** 2297
- [42] Pincus S M 1995 *J. Chaos* **5** 110
- [43] Pincus S M, Goldberger A L 1994 *Am. J. Physiol.* **266** H1643
- [44] Jin H M, He W P, Hou W, Zhang D Q 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 069201 (in Chinese) [金红梅, 何文平, 侯威, 章大全 2012 物理学报 **61** 069201]
- [45] Jin H M, He W P, Zhang W, Feng A X, Hou W 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 129202 (in Chinese) [金红梅, 何文平, 张文, 冯爱霞, 侯威 2012 物理学报 **61** 129202]



- [46] Frieden B R 1998 *Physics from Fisher Information: A Unification* (Cambridge: Cambridge University Press) pp319
- [47] Brian D F, Heriberto C, Christopher W P 2003 *J. Theor. Biol.* **222** 517
- [48] Audrey L M, Christopher W P, Heriberto C 2006 *Ecological Modelling* **95** 72
- [49] Julio R P, Deni T R, Luis R D, Joel T S, Francisco M P 2011 *Entropy* **13** 1648
- [50] Yrulla L L, Giuliant A, Zbilut J P 1996 *Phys. Lett. A* **223** 255
- [51] Gao J B, Cai H Q 2000 *Phys. Lett. A* **270** 75
- [52] Provenzale A, Smith L A, Vio R, Murante G 1992 *Physica D* **58** 31
- [53] Yu D J, Lu W P, Harrison R G 1999 *J. Chaos* **9** 865
- [54] Schreiber T 1994 *Phys. Rev. Lett.* **78** 843
- [55] Savit R, Green M 1991 *Phys. D* **50** 95
- [56] Sauer T 1994 *Phys. Rev. Lett.* **72** 3811
- [57] Grassberger P 1983 *Phys. D* **9** 189
- [58] Li C G, Pei L Q 2003 *Acta Phys. Sin.* **52** 2114 (in Chinese) [李春贵, 裴留庆 2003 物理学报 **52** 2114]
- [59] 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]
- [60] 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]
- [61] Santer B D, Taylor K E, Wigley T M L, Penner J E, Jones P D, Cubasch U 1995 *Clim. Dynam.* **12** 77
- [62] Santer B D, Taylor K E, Wigley T M L, Johns T C, Jones P D, Karoly D J, Mitchell J F B, Oort A H, Penner J E, Ramaswamy V, Schwarzkopf M D, Stouffer R J, Tett S 1996 *Nature* **382** 39
- [63] Bernacchia A, Naveau P 2008 *Nonlin. Processes Geophys.* **15** 159
- [64] Bernacchia A, Naveau P, Vrac M, Yiou P 2008 *Nonlin. Processes Geophys.* **15** 169
- [65] Mocenni C, Facchini A, Vicino A 2010 *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* **107** 8097
- [66] Feng G L, Gong Z Q, Dong W J, Li J P 2005 *Acta Phys. Sin.* **54** 5494 (in Chinese) [封国林, 王启光, 侯威, 龚志强, 支蓉 2005 物理学报 **54** 5494]
- [67] 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]
- [68] Feng G L, Dong W J, Jia X J 2004 *Chin. Phys.* **13** 413

# Application of nonlinear dynamical methods in abrupt climate change detection\*

Liu Qun-Qun<sup>1)2)3)</sup> He Wen-Ping<sup>3)†</sup> Gu Bin<sup>1)2)4)</sup>

1) (College of Physics, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China)

2) (Institute of Space Weather, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China)

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

4) (The Key Laboratory for Aerosol-Cloud-Precipitation of CMA-NUIST, Nanjing 210044, China)

( Received 18 March 2015; revised manuscript received 28 April 2015 )

## Abstract

The research of abrupt climate change is an important field in the climate change. The rapid and accurate detection of the abrupt climate change has important practical significance and major economic-social costs, which will help us understand climate change and forecast the future evolutionary trend of the climate system. The detection results of most traditional abrupt climate change depend on the selection of the time scale concerned, which may result in the fact that we cannot identify an abrupt climate change until the event has been past for a long time. Moreover, these detection methods cannot extract the dynamical changes from the observational data of the climate system. As the rapid development in nonlinear science, the abrupt climate change detection technology has also been improved gradually. This article briefly reviews several new progresses in abrupt dynamical detection methods developed on the basis of recent nonlinear technologies, and some applications in the real observational data. These new methods mainly contain the technologies based on the long-range correlation of climate systems, such as moving detrended fluctuation analysis, moving cut data-detrended fluctuation analysis, moving cut data-R/S analysis, degenerate fingerprinting, and red noise. Moreover, some abrupt dynamical detection methods developed by the complexity of the time series, namely, entropy, such as approximate entropy, moving cutting data-approximate entropy, Fisher information, and wavelet Fisher's information measure. Furthermore, there are some other abrupt dynamical detection methods based on the theory of phase space, such as the dynamics exponent  $Q$ . Climate system is a complex dynamical system with nonlinear and interactive nature, which has long-range persistence in spatio-temporal variation, thus the abrupt detection method on spatial field change is pointed out to be a promising direction for further research in future. Because the spatial field contains abundance of information about the evolution of climate system which is much more than that in a time series in single meteorological station, the detecting methods on spatial field will greatly help us detect an abrupt climate change as soon as possible. And then we will have enough time to take action and make preparations for the new challenges due to the abrupt climate change.

**Keywords:** abrupt climate change, abrupt dynamical change, abrupt spatial field change

**PACS:** 92.70.Aa

**DOI:** 10.7498/aps.64.179201

\* Project supported by the National Basic Research Program of China (Grant No. 2012CB955902), the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 41275074, 41175067), the Program of the Key Laboratory for Aerosol-Cloud-Precipitation of CMA-NUIST (Grant No. KDW1304).

† Corresponding author. E-mail: [wenping\\_he@163.com](mailto:wenping_he@163.com)