

基于临界慢化现象的气候突变前兆信号的初步研究*

吴浩^{1)2)†} 侯威²⁾ 颜鹏程³⁾ 封国林²⁾

1) (扬州大学物理科学与技术学院, 扬州 225002)

2) (国家气候中心, 北京 100081)

3) (西北师范大学物理与电子工程学院, 兰州 730070)

(2012年3月15日收到; 2012年4月13日收到修改稿)

近年来, 临界慢化现象在揭示复杂动力系统是否趋于临界性灾变方面展示了重要潜力. 基于临界慢化的理念, 研究了气候突变的早期预警信号. 针对 20 世纪 70 年代末 80 年代初的气候突变, 对全国月平均温度资料和太平洋年代际振荡 (PDO) 指数进行分析, 分别计算了表征临界慢化现象的方差和自相关系数. 结果表明, 气候发生突变前, 全国月平均温度和 PDO 指数都存在明显的临界慢化现象, 这表明临界慢化现象可能是气候突变发生前的一个早期信号. 将临界慢化理论用于气候突变前兆信号的研究, 对深入认识气候突变和捕捉气候突变前兆信号都具有重要的现实意义和科学价值.

关键词: 气候突变, 临界慢化, 前兆信号

PACS: 92.70.Aa

1 引言

气候突变是指气候从一种稳定态 (或稳定持续变化趋势) 跳跃式地转变到另外一种稳定态的现象^[1]. 气候系统是一个庞大的、耗散的混沌系统, 突变的产生具有很大的复杂性, 如何对这些突变进行准确的识别、检测乃至预测一直以来都是气象学家们面临的重大难题^[2]. 气象学家普遍认为在 20 世纪 60 年代初和 70 年代末 80 年代初可能存在两次重大的气候突变^[3-5], 其中对后者的气候突变认识的比较普遍, 并对之进行了大量的研究^[6-9], 不少学者也对气候突变发生原因和机理都提出了不同解释, 也给出了很多有意义的结论^[11-15]. 但是对这一起突变事件的前兆信号研究甚少, 能否证实并找到确实存在的能够预示这一突变的前兆信号, 作为一个非常值得深思的命题被提出来, 吸引了众多的气象工作者.

近年来, 科学家们发现临界慢化现象 (critical

slowing down) 在揭示复杂动力系统是否趋于临界性灾变方面展示了重要潜力^[16-18]. 临界慢化是统计物理学中的概念, 它指的是动力系统由一种相态向另一种相态发生转变之前, 系统趋近临界点附近, 尤其是临界点上会出现有利于新相形成的分散涨落现象, 这种分散涨落不仅表现为幅度的增大, 而且还表现为涨落的持续时间拉长、扰动的恢复速率变慢以及恢复到旧相位的能力变小等现象, 这种时间的拉长、恢复速率的变慢及恢复能力的变小称为慢化^[19]. 2009 年 Scheffer 等^[16] 指出系统向分岔点趋近时, 临界慢化现象导致动力学中的 3 个可能的早期预警信号: 扰动的恢复变慢、自相关系数增大、方差增大. 这为气候突变的预测提供了一个新思路. 文献 [20] 将临界慢化理论用于 2008 年汶川地震前兆预警信号的研究, 这对深入认识地震所处活跃阶段以及提高地震预测水平都具有重要的现实意义和科学价值.

本文将临界慢化理论用于气候突变前兆信号的研究, 利用能体现临界慢化特征的方差和自相

* 国家重点基础研究发展计划 (批准号: 2012CB955902) 和国家自然科学基金 (批准号: 41175067, 41105033) 资助的课题.

† E-mail: wuhaophy@163.com

关系系数两个判定指标对计算序列进行分析, 通过方差和自相关系数增大研究气候突变前兆信号的可捕捉性, 并探讨这两种信号对突变预警的有效性和适用性, 进一步检验 20 世纪 70 年代末 80 年代初的气候突变事件是否存在前兆信号. 研究中首先用 Mann-Kendall 方法对序列中的气候突变点的位置进行确定.

2 资料及方法

2.1 资料

本文所用资料为中国气象局公布的中国 614 个台站 1961—2010 年日平均温度资料 (计算过程中处理成月平均温度资料) 和美国国家海洋与大气管理局 (NDAA) 网站和国家环境预报中心 (NCEP) 公布的太平洋年代际振荡 (PDO) 指数的月资料 (1950 年 1 月—2010 年 12 月). 实际计算中以 1981—2010 年作为参考气候态, 原始观测资料与参考气候态的距平作为计算序列.

2.2 研究方法

1) Mann-Kendall 方法 [6,21]

Mann-Kendall (M-K) 是一种非参数统计检验方法, 常用于突变检测.

对序列为 x_1, x_2, \dots, x_N , 定义统计量:

$$d_k = \sum_{i=1}^k m_i \quad (2 \leq k \leq N) \quad (1)$$

表示样本 x_i 大于 x_j ($1 \leq j \leq i$) 的累计数. 假定原序列随机独立, d_k 的均值、方差分别为

$$\begin{cases} E[d_k] = k(k-1)/4, \\ \text{var}[d_k] = k(k-1)(2k+5)/72 \quad (2 \leq k \leq N). \end{cases} \quad (2)$$

将 d_k 标准化:

$$u(d_k) = (d_k - E[d_k]) / \sqrt{\text{var}[d_k]}, \quad (3)$$

这里 $u(d_k)$ 为标准正态分布, 其概率 $\alpha_1 = \text{prob}(|u| > |u(d_k)|)$ 可以通过计算或查表获得. 给定一显著性水平 α_0 , 当 $\alpha_1 < \alpha_0$ 时, 它表示此序列将存在一个强的增长或减少趋势. 所有 $u(d_k)$ ($1 \leq k \leq N$) 将组成一条曲线 C1, 通过信度检验可知其是否有变化趋势.

进而对反序列同样进行这样的操作, \bar{m}_i 表示第 i 个样本 x_i 大于 x_j ($1 \leq j \leq i$) 的累计数, 当 $i' = N + 1 - i$ 时, 如果 $\bar{m}_i = m_i$, 则反序列的 $\bar{u}(d_i)$ 由下式给出:

$$\begin{cases} \bar{u}(d_i) = -u(d_i), \\ i' = N + 1 - i \quad (i, i' = 1, 2, \dots, N), \end{cases} \quad (4)$$

$\bar{u}(d_i)$ 用 C2 表示.

当曲线 C1 超过信度线, 即表示存在明显的变化趋势时, 如果曲线 C1 和 C2 的交叉点位于信度线之间, 这点便是突变点的开始.

2) 方差是描述样本中数据对均值 \bar{x} 偏离程度的特征量, 记为 s^2 , s 称为均方差, 计算公式分别为

$$s^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2, \quad (5)$$

$$s = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}. \quad (6)$$

3) 自相关系数是描述同一变量不同时刻之间相关性的统计量. 将滞后长度为 j 的自相关系数记为 $r(j)$. 不同滞后长度的自相关系数可以帮助了解前 j 时刻的信息与其后时刻变化间的联系. 由此判断由 x_i 预测 x_{i+j} 的可能性. 对变量 x , 滞后长度为 j 的自相关系数为

$$r(j) = \frac{1}{n-j} \sum_{i=1}^{n-j} \left(\frac{x_i - \bar{x}}{s} \right) \left(\frac{x_{i+j} - \bar{x}}{s} \right), \quad (7)$$

s 为 n 长度时间序列的均方差, s 由 (6) 式求出.

4) 临界慢化、自相关增大以及方差增大的关系

随机作用的系统在一个控制参量趋近于阈值处 (分岔点) 时, 临界慢化往往导致自相关和涨落方差增大现象 [16,17]. 首先假定状态变量存在周期为 Δt 的受迫扰动 (附加噪声). 在扰动过程中, 平衡的回归呈近似指数关系, 恢复速度为 λ . 在一个简单的自回归模型中, 可以描述为

$$y_{n+1} = e^{\lambda \Delta t} y_n + s \varepsilon_n, \quad (8)$$

其中 y_n 是系统状态变量到平衡态的偏离量, ε_n 为符合正态分布的随机量 (系统白噪声), s 为均方差. 如果 λ 和 Δt 不依赖于 y_n , 此过程可简化为一阶的自回归模型 (AR(1))

$$y_{n+1} = \alpha y_n + s \varepsilon_n, \quad (9)$$

其中, 自相关系数 $\alpha = e^{\lambda \Delta t}$, 对于白噪声, 相关系数恒为 0, 红噪声的相关系数接近 1.

对 AR(1) 过程通过方差来分析:

$$\text{var}(y_{n+1}) = E(y_n^2) + (E(y_n))^2 = \frac{s^2}{1 - \alpha^2}. \quad (10)$$

一般来讲, 当系统在向临界点趋近的过程中, 小幅度扰动的恢复速率会越来越慢 [22,23], 当系统趋近于临界点时, 恢复速率 λ 将趋于零且自相关项 α 趋近于 1, 方差趋近于无限大. 因此可以将方差和自相关系数增大作为系统趋近临界点的前兆信号.

3 计算结果与讨论

3.1 方差信号

3.1.1 全国月平均温度突变预警研究

图 1 是利用全国的 1961 年 1 月到 2010 年 12 月 600 个月的平均温度资料通过方差的增大来寻找气候突变的前兆信号. 其中图 1(a) 是 M-K 的突

变检测. 正向序列曲线 C1 和反向序列曲线 C2 的交叉点 (1993 年) 位于信度线 (通过 95% 信度检验) 之间, 表明该年份开始出现突变. 图 1(b), (c), (d) 是改变滑动窗口及滞后步长, 求序列方差随时间的变化, 分别表示滞后 6 个月, 3 个月, 1 个月. 图 1(b), (c), (d) 中曲线的变化趋势基本相同, 从图中箭头标识处容易看出, 在 1987 年左右方差出现变大的趋势. 前述理论分析可知, 临界慢化导致系统内在变化速率降低, 系统在任意时刻的状态与它之前的状态越来越相似, 因此自相关系数将趋近于 1, 根据 (10) 式, 方差将趋近于无穷大. 原则上, 临界慢化将降低系统跟踪涨落的能力, 从而对方差产生相反的效果. 因此气候系统趋近临界点时表现出来的方差增大等临界慢化现象可以作为气候系统发生突变的前兆信号, 即 1987 年左右出现了气候突变的前兆信号. 由此可知, 气候突变的前兆信号出现的时间与气候突变发生的时间相差 6 年, 对气候突变的预测具有很好的指示作用. 通过全国月平均温度资料利用方差信号来寻找气候突变的前兆信号具有很好的可行性.

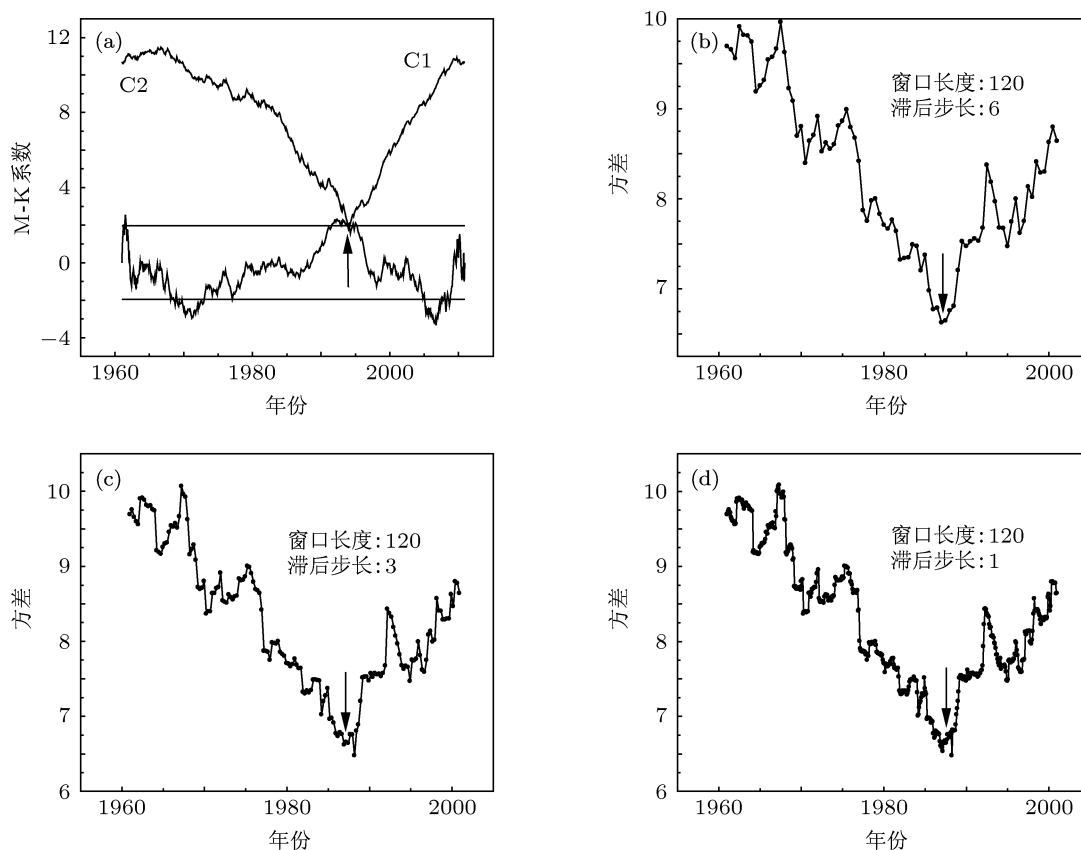


图 1 全国月平均温度资料的 M-K 检测及不同窗口长度、不同滞后步长的方差检测 (a) M-K 突变检测; (b) 方差检测, 窗口为 120, 滞后步长为 6; (c) 方差检测, 窗口为 120, 滞后步长为 3; (d) 方差检测, 窗口为 120, 滞后步长为 1

从图 1(b), (c), (d) 还可以获知, 在窗口大小一定的前提下, 滞后步长对结果稳定性有影响. 可以清晰地发现, 图 1(d) 的方差的波动最大, 结果稳定性不高. 相比较而言图 1(b) 的方差的波动较小, 结果稳定性更好. 因此, 在数据量一定的情况下, 滞后步长大些有利于结果的稳定性, 更方便寻找气候突变的前兆信号.

3.1.2 PDO 月资料突变预警研究

图 2 是利用 PDO 的月尺度资料通过方差增大寻找气候突变的前兆信号. PDO 的资料长度是从 1950 年的 1 月至 2010 年 12 月. PDO 资料在 20 世纪 60 年代以及 20 世纪 70 年代末 80 年代初存在两次突变 [24,25]. 图 2(a) 是 M-K 方法的突变检测, 正向序列曲线 C1 和反向序列曲线 C2 的交叉点位于信度线 (通过 95% 信度检验) 之间, 这点便是突变点的开始. 检测结果表明在 1966 年左右 (箭头标识) 气候系统存在一次突变.

值得注意的是, 图 2(a) 中 M-K 对 20 世纪 70 年代末 80 年代初的突变检测效果并不明显, 因此利用滑动移除近似熵 [11,26] 对之进行突变检测 (图 3),

检测结果表明 1980 年左右 PDO 指数存在一次突变. 与图 1 相似, 图 2(b), (c), (d) 针对不同窗口、滞后不同步长得到的方差随时间分布图, 整体曲线变化趋势基本相同, 呈现明显的年代际变化, 图中 1960, 1976 年左右呈现两个明显的方差增大的信号. 此前理论分析可知, 系统方差增大表明系统趋近临界点, 预示气候系统可能发生突变. 从图 2 中气候突变的前兆信号出现的时间也大致相同并对突变时间有着很好的指示表明, 利用该方法判断 PDO 资料气候突变的来临, 并作为前兆信号具有一定的可行性. 对 1966 年的突变, 前兆信号要早于突变发生约 6 年; 1980 年左右的突变, 前兆信号早于突变发生约 4 年. 由此可见方差增大作为较可靠的前兆信号对突变事件的发生有着较好的指示作用. 同样可以发现, 窗口大小以及滞后步长都对结果稳定性有一定的影响. 图 2(b) 中方差的波动最大, 结果的稳定性不高. 而图 2(c) 的方差的波动较小, 结果稳定性更好. 因此, 在数据量一定的情况下, 窗口长度长些、滞后步长大些有利于结果的稳定性, 更方便寻找气候突变的前兆信号.

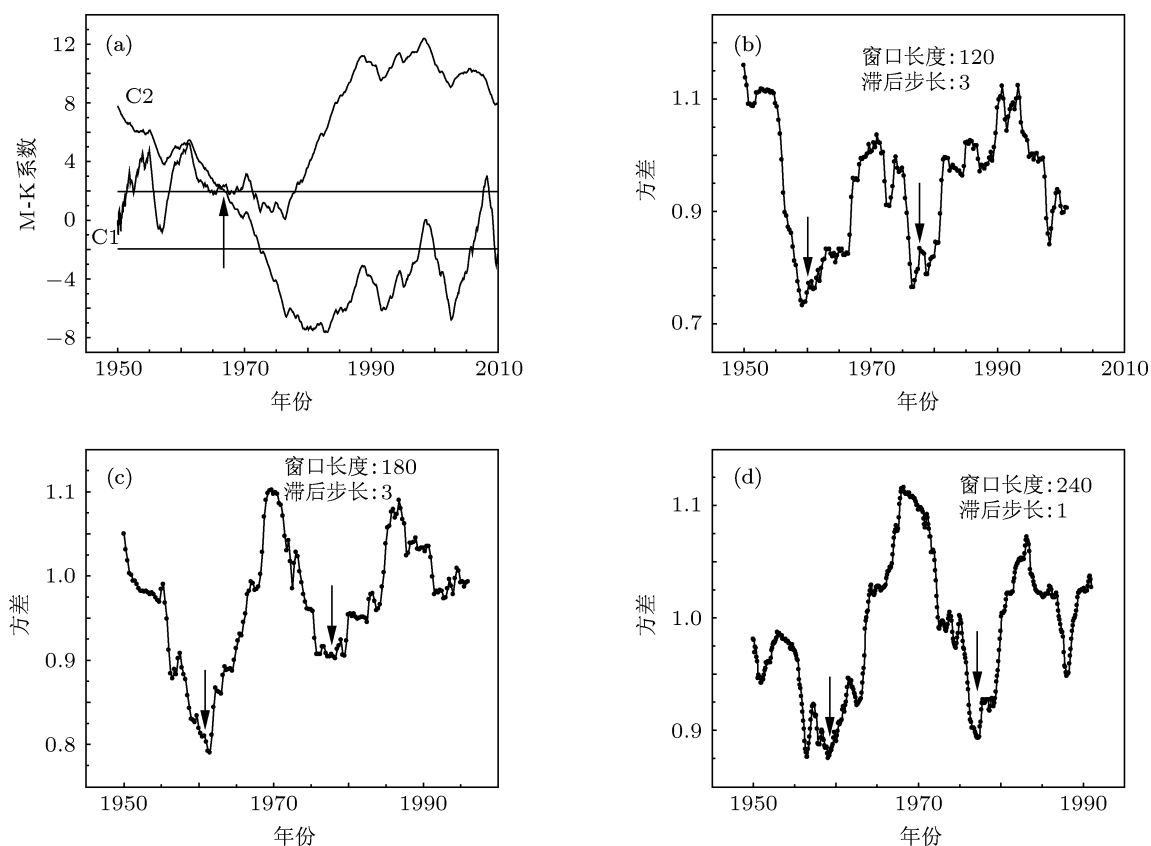


图 2 PDO 资料的 M-K 检测及不同窗口长度、不同滞后步长的方差检测 (a) M-K 突变检测; (b) 方差检测, 窗口为 120, 滞后步长为 3; (c) 方差检测, 窗口为 180, 滞后步长为 3; (d) 方差检测, 窗口为 240, 滞后步长为 1

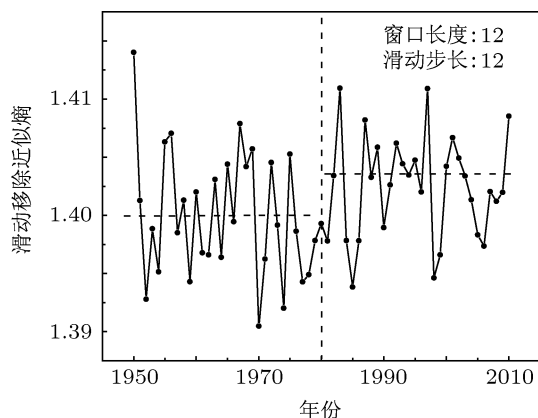


图3 PDO资料的滑动移除近似熵突变检测

此前分析可知, 通过方差的增大来寻找气候突变的前兆信号, 效果显著. 不同资料、不同区域突

变时间有差异, 但是前兆信号与气候突变发生的时间基本符合, 具有很好的指示作用. 对于数据量一定的情况下, 一般而言计算窗长越长, 统计样本数越多, 结果就越稳定; 相反, 窗长越小, 统计样本数越少, 计算结果会变得不稳定.

3.2 自相关信号

3.2.1 全国月平均温度突变预警研究

图4是利用全国月平均温度资料通过自相关系数的增大寻找气候突变的前兆信号. 图4中的滞后步长与方差信号里面的滞后不同. 对于方差滞后是固定窗口向后滑动一定间隔求新序列的方差, 这里的滞后是得到另一个序列, 用得到的序列与前面的序列求相关, 也就是自身的滞后相关.

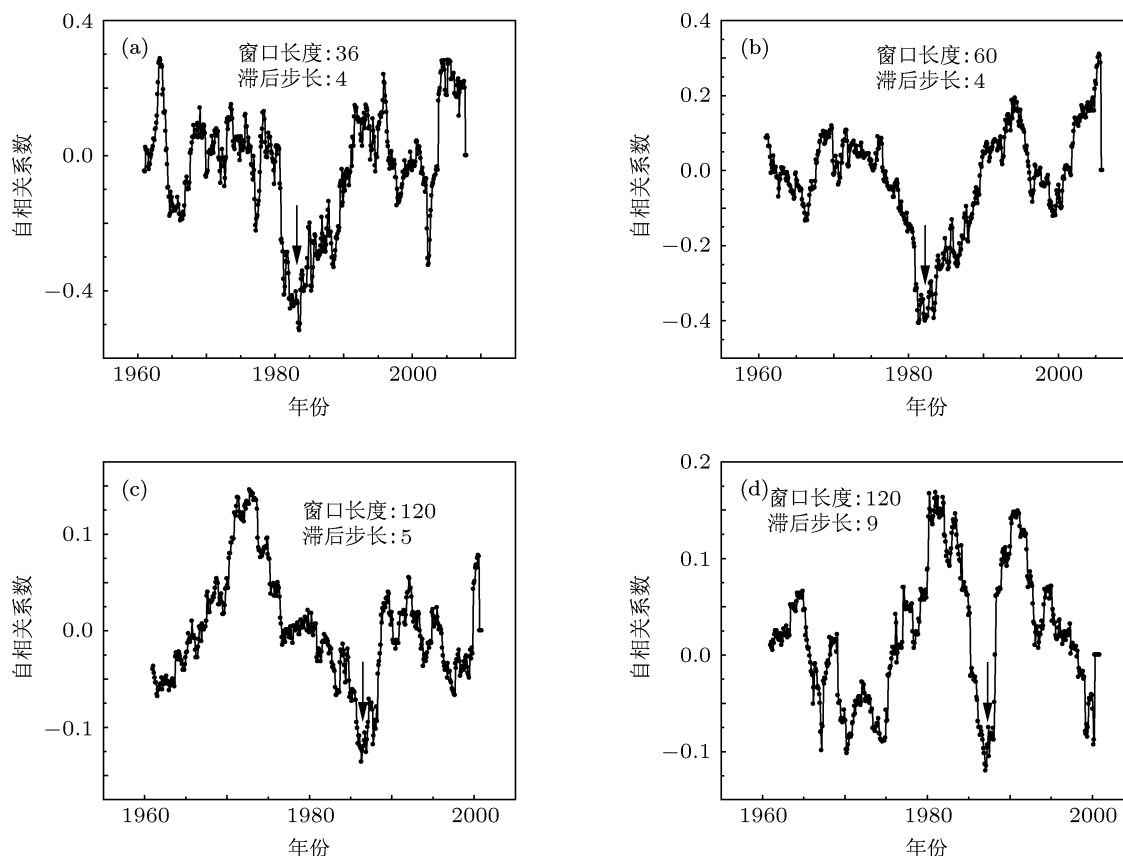


图4 不同窗口长度和滞后步长时的全国月平均温度资料的自相关系数检测

由图1可以知道, 全国月平均温度在1993年左右存在一次突变. 图4(a)和(b)中箭头标识处自相关系数开始增大, 此前分析可知, 临界慢化导致系统内在变化速率降低, 系统在任意时刻的状态与

其之前的状态越来越相似, 因此自相关系数将趋近于1. 所以气候系统趋近临界点时, 方差增大、自相关系数增大等临界慢化现象表明气候系统即将发生突变. 因此可以认为前兆信号出现在1984年

左右. 这个前兆信号与突变发生的时间相差 9 年, 这样的信号指示作用不那么明显了. 很容易发现图 4(a) 和 (b) 的结果不稳定, 波动很明显, 这对于前兆信号的寻找影响较大. 对于如何辨别出现的伪信号, 文中采用选取不同的窗口、不同的滞后步长, 检查信号存在情况. 气候突变的前兆信号不会因为窗口的不同而消失, 窗口只会影响结果的稳定性. 通过图 4(c) 和 (d) 同样可以发现前兆信号, 箭头标识的位置为 1987 年左右, 这与突变发生时间相差仅 6 年. 图 4(c) 和 (d) 的前兆信号较图 4(a) 和 (b) 的指示作用好. 这直接说明在数据长度一定的情况下, 窗口越大, 结果越稳定.

3.2.2 PDO 月资料突变预警研究

从前面的分析知道, PDO 资料在 20 世纪 60 年代初和 70 年代末 80 年代初发生过两次突变 (冷暖相位的转变). 由图 5 可以通过自相关系数检测找出这两次突变的前兆信号, 图 5 中的滞后步长的意义同图 4. 图 5(a) 显示 1960 年和 1976 年左右 (箭头标识) 存在两次自相关系数的增大, 根据系统趋近临界点时表现出来的方差增大、自相关系数增

大等临界慢化现象可以作为气候系统发生突变的前兆信号的理论, 可以认为这是 PDO 资料的 20 世纪 60 年代初和 70 年代末 80 年代初两次气候突变的前兆信号. 与之类似, 对于不同的窗口, 不同的滞后步长, 图 5(b) (1960 年和 1977 年左右)、(c) (1955 年和 1977 年左右)、(d) (1955 年和 1977 年左右) 都能通过自相关系数增大而找出两次突变的前兆信号. 同样选取不同的窗口、不同的滞后步长来辨别信号的真伪. 虽然针对不同的窗口、不同的滞后步长得到的结果有一定的差异, 不过对于突变检测仍有一定指示意义. 这表明自相关系数一定程度上能够作为气候突变的前兆信号.

综上所述, 与方差信号相比, 自相关信号的波动性大; 同样可以通过自相关系数的增大来找气候突变的前兆信号, 效果显著; 前兆信号出现的时间与气候突变发生的时间基本符合; 自相关信号同样受计算窗口大小的影响; 自相关信号的稳定性同时还与滞后的步长有关系; 一般而言, 窗口尽量大一点, 滞后步长应根据窗口大小适当调整; 方差信号和自相关信号各有优劣, 应该根据资料适当选择.

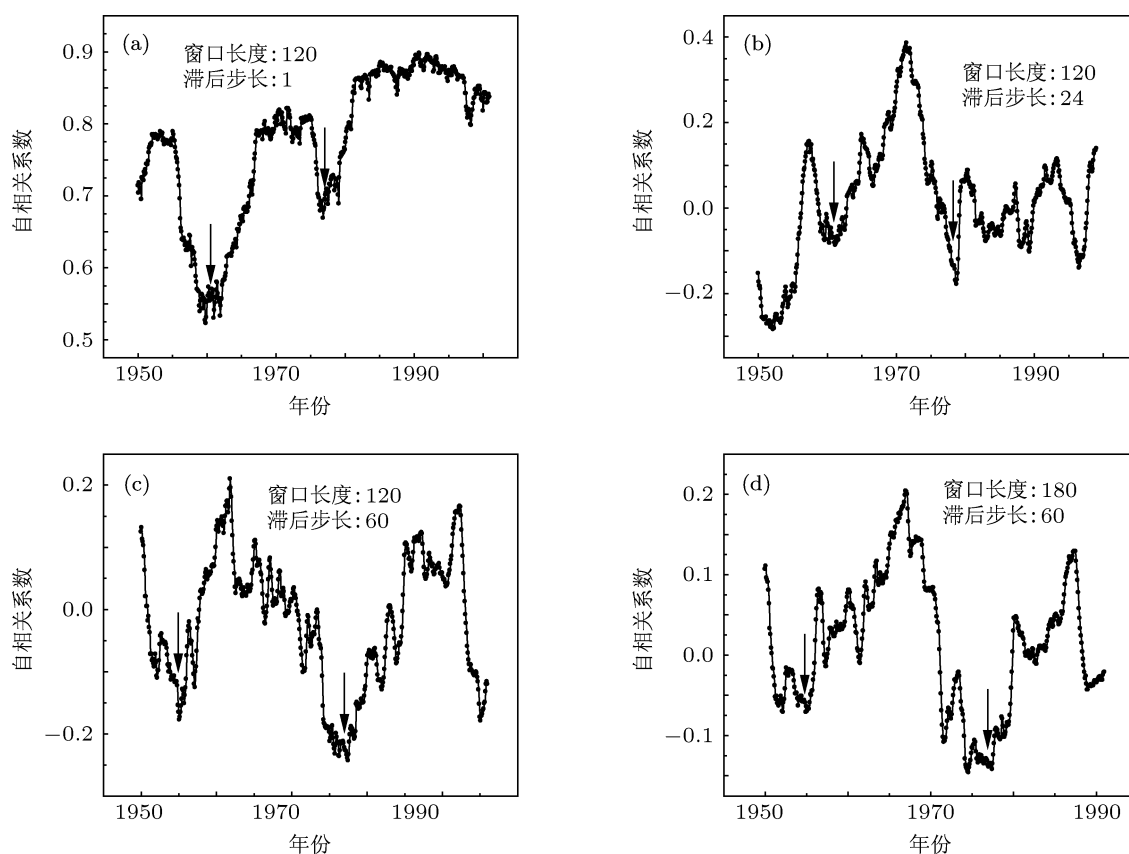


图 5 不同窗口长度和滞后步长时的 PDO 资料的自相关系数检测

3.3 窗口大小与滞后步长对结果稳定性的影响

从前面的分析可知,窗口大小以及滞后步长对结果稳定性有影响.针对方差信号,窗口大一点,结果稳定性要好.这里以全国月平均温度资料的自相关系数为例,进一步探讨窗口大小以及滞后步长对结果稳定性的影响.

图 6 反映的是窗口大小对结果稳定性.对比

分析图 6(a), (b), (c) 容易发现,图 6(b), (c) 的波动很大,而且出现很多自相关系数增大的信号,图 6(a) 的结果更为稳定.换言之,对于数据量一定的情况下,窗口越大,结果越稳定.文献 [26—28] 也有类似的结论.从图 6(a) 中的 6 个图还能得知,对于同一窗口不同滞后步长对结果也有影响,大部分信号出现在 1986 年左右,这与前面的分析一致.当需要寻找最优解时,需要选择合适的窗口和滞后步长.

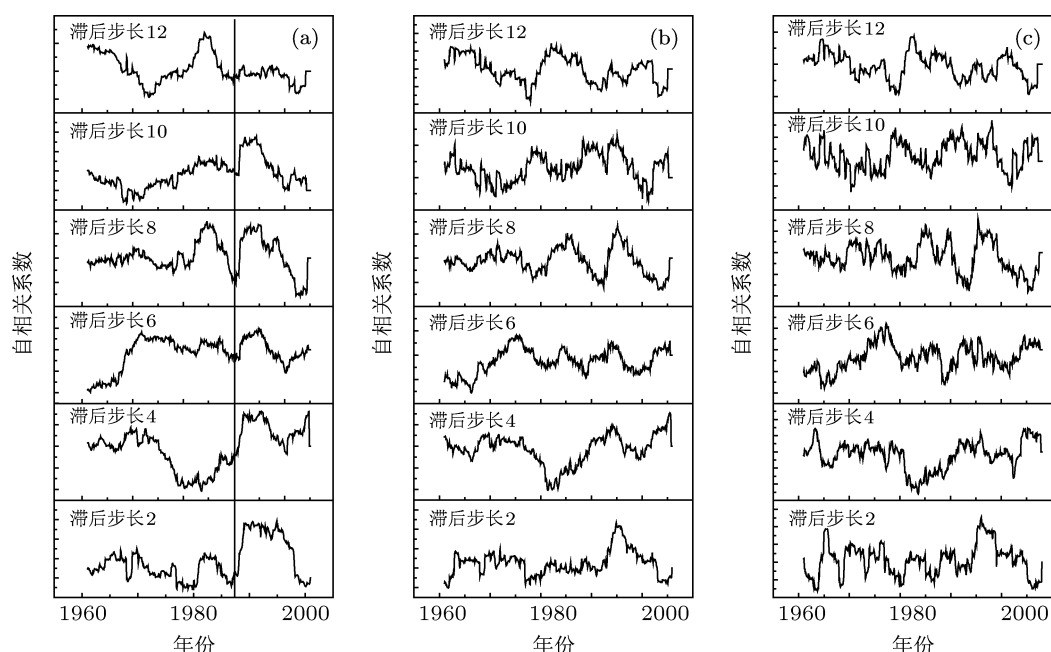


图 6 全国月平均温度资料的不同窗口大小、不同滞后步长的自相关系数检测 (a) 窗口大小为 120; (b) 窗口大小为 60; (c) 窗口大小为 36

4 结论

复杂动力系统发生突发性灾变前观察到的临界慢化现象可能是标志灾变发生的早期预警信号.将能体现临界慢化现象的方差和自相关系数用于 PDO 指数和温度前兆观测资料的研究,不仅能加深对前兆观测资料波动信息的认识,而且对异常可靠性的判断等提供了新的方法.

本文在分析了临界慢化现象的物理基础和统计学意义后,基于 20 世纪 60 年代初和 70 年代末 80 年代初的两次气候突变,对 PDO 资料 and 全国月平均温度资料的突变预警信号进行研究.结果表明,在统计样本数一定的情况下,选择不同的窗口、不同的滞后步长对计算结果的稳定性有影响,一般而言,窗口取大一点有利于结果的稳定性.因

此,为准确考察观测资料是否出现慢化现象,根据观测资料存在的可能影响因素,合理地选择窗口和滞后步长可以提高计算结果的质量.

对 PDO 资料 and 全国月平均温度观测资料去除年代际的变化趋势后,考察序列的方差和自相关系数,进而对气候突变发生前的临界慢化现象进行了回溯性检验.结果表明,无论是 PDO 资料还是全国月平均温度资料,在气候突变发生前出现了不同程度的方差和自相关系数增大的现象,这表明临界慢化现象可以作为气候突变的前兆信号.尽管选择的不同的观测资料均出现了慢化现象,但慢化现象出现的时间并不完全一致.总体而言, PDO 指数资料的检测结果比全国月平均温度资料的检测结果优越;方差信号和自相关信号各有优劣,应该根据资料适当选择.尽管本研究是对气候突变前兆信号的

初步研究,但结果显示,临界慢化现象对提高前兆观测资料的认识、判断异常是否趋于临界阶段以及提高灾变预测水平提供了可能.将临界慢化理论引入气候突变前兆信号的研究,对深入认识气候突变和寻找气候突变前兆信号都具有重要的现实意义和科学价值.

需要指出的是,尽管对 PDO 资料 and 全国月平

均温度资料的研究表明临界慢化现象导致的动力学的方差增大、自相关系数增大可能是气候突变发生前的一个前兆信号.但由于仍是初步研究,对气候突变发生前临界慢化现象出现的空间范围、临界慢化现象与气候突变强度之间的关系、不同区域的不同影响因子的情况下临界慢化的特征等问题仍然需要进一步研究.

- [1] Fu C B, Wang Q 1992 *Chin. J. Atmos. Sci.* **16** 482 (in Chinese) [符淙斌,王强 1992 大气科学 **16** 482]
- [2] Alley R B, Marotzke J, Nordhaus W D, Overpeck J T, Peteet D M, Pielke R A, Pierrehumber R T, Rhines P B, Stocker T F, Talley L D, Wallace J M 2005 *Science* **299** 5615
- [3] Fu C B 1994 *Chin. J. Atmos. Sci.* **18** 3 (in Chinese) [符淙斌 1994 大气科学 **18** 373]
- [4] Wang S W, Ye J L 1995 *Chin. J. Atmos. Sci.* **19** 545 (in Chinese) [王邵武,叶瑾琳 1995 大气科学 **19** 545]
- [5] Feng G L, Gong Z Q, Zhi R 2008 *Acta Meteorol. Sin.* **66** 892 (in Chinese) [封国林,龚志强,支蓉 2008 气象学报 **66** 892]
- [6] 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 Observational Data* (Beijing: the Weather Publishing Company) p5-8 (in Chinese) [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 5—8 页]
- [7] Feng G L, Gong Z Q, Dong W J 2005 *Acta Phys. Sin.* **54** 5494 (in Chinese) [封国林,龚志强,董文杰 2005 物理学报 **54** 5494]
- [8] Wan S Q, Feng G L, Dong W J 2005 *Acta Phys. Sin.* **54** 5487 (in Chinese) [万仕全,封国林,董文杰 2005 物理学报 **54** 5487]
- [9] 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]
- [10] Gong Z Q, Feng G L 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 3619 (in Chinese) [龚志强,封国林 2007 物理学报 **56** 3619]
- [11] 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]
- [12] He W P, Deng B S, Wu Q, Zhang 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]
- [13] He W P, Wu Q, Cheng H Y, Zhang W 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 029203 (in Chinese) [何文平,吴琼,成海英,张文 2011 物理学报 **60** 029203]
- [14] He W P, Feng G L, Wu Q, He T, Wan S Q, Chou J F 2012 *Int. J. Climatol.* **32** 1604
- [15] He W P, Feng G L, Wu Q, Wan S Q, Chou J F 2008 *Nonlinear Proc. Geophys.* **15** 601
- [16] Scheffer M, Bascompte J, William A 2009 *Nature* **461** 53
- [17] Carpenter S R, Brook W A 2006 *Ecol. Lett.* **9** 311
- [18] Guttal V, Jayaprakash C 2008 *Ecol. Lett.* **11** 450
- [19] Yu L, Hao B L 1984 *Phase Transitions and Critical Phenomena* (Beijing: Science Press) (in Chinese) [于禄,郝柏林 1984 相变和临界现象 (北京:科学出版社)]
- [20] Yan R, Jiang C S, Zhang L P 2011 *Chin. J. Geophys.* **54** 1817 (in Chinese) [晏锐,蒋长胜,张浪平 2011 地球物理学报 **54** 1817]
- [21] Wei F Y 1999 *Modern Climatic Statistical Diagnosis and Forecasting Technology* (Beijing: China Meteorological Press) pp62-76 (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 62—76 页]
- [22] Bence J R 1995 *Ecology* **76** 628
- [23] Dakos V, Scheffer M, van Nes E H II 2008 *Proc. National Acad. Sci. USA* **105** 14308
- [24] Gong Z Q, Zhi R, Feng G L, Zhang Q 2009 *Acta Meteorol. Sin.* **67** 307 (in Chinese) [龚志强,支蓉,封国林,张强 2009 气象学报 **67** 307]
- [25] Xiao D, Li J P 2007 *Chin. J. Atmos. Sci.* **31** 839 (in Chinese) [肖栋,李建平 2007 大气科学 **31** 839]
- [26] 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]
- [27] Gong Z Q, Feng G L 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 3920 (in Chinese) [龚志强,封国林 2008 物理学报 **57** 3920]
- [28] 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]

The preliminary research about the precursory signals of abrupt climate change based on critical slowing down phenomenon*

Wu Hao^{1)†} Hou Wei²⁾ Yan Peng-Cheng³⁾ Feng Guo-Lin²⁾

1) (College of Physical Science and Technology, Yangzhou University, Yangzhou 225002, China)

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

3) (College of Physics and Electronic Engineering, Northwest Normal University, Lanzhou 730070, China)

(Received 15 March 2012; revised manuscript received 13 April 2012)

Abstract

In recent years, critical slowing down phenomenon has shown great potentials in the area of disclosing whether complex dynamic system tends to critical cataclysm. Based on the concepts of critical slowing down, the observed data of pacific decadal oscillation (PDO) index and the national average monthly temperature are processed in this article to study the precursory signals of abrupt climate change. Take the abrupt climate change in a period from the late 1970s to the early 1980s for example, the variances and autocorrelation coefficients which can characterize critical slowing down are calculated separately. The results show that the PDO index and the national average monthly temperature both have obviously a critical slowing down phenomenon before the abrupt climate change takes place, which indicates that critical slowing down phenomenon is a possible early warning signal for abrupt climate change. The introduction of critical slowing down theory into abrupt climate change precursory signals and study on it have practical significance and important scientific value for thoroughly understanding the abrupt climate change and for catching the precursory signals of abrupt climate change.

Keywords: abrupt climate change, critical slowing down, precursory signals

PACS: 92.70.Aa

* Project supported by the National Basic Research Program of China (Grant No. 2012CB955902) and the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 41175067, 41105033).

† E-mail: wuhaophy@163.com