

# 中国不同区域气候突变的前兆信号\*

吴浩<sup>1)†</sup> 封国林<sup>1)</sup> 侯威<sup>2)</sup> 颜鹏程<sup>3)</sup>

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9月25日收到; 2012年10月11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向于临界性突变方面展示了重要潜力. 在此基于临界慢化的理念, 对含有不同噪声的中国一级气象地理区划的11大区域的气温观测资料进行处理, 研究气候突变的前兆信号. 首先利用Mann-Kendall (M-K) 方法准确的找出各个区域的突变位置, 然后计算了表征临界慢化现象的自相关系数以此寻找气候突变前兆信号, 并研究了不同噪声对气候突变前兆信号的影响. 结果表明, 针对不同的信噪比、不同区域的气温资料在气候突变发生前5—10年均出现了自相关系数增大的临界慢化现象, 临界慢化现象可能是气候突变发生前的一个前兆信号; 噪声对气候突变前兆信号的检测结果影响较小, 论证了临界慢化现象检测突变前兆信号的可靠性, 为该方法在实际观测资料中的应用提供了实验基础.

**关键词:** 气候突变, 临界慢化, M-K方法, 前兆信号**PACS:** 92.70.Aa**DOI:** 10.7498/aps.62.059202

## 1 引言

已有的研究<sup>[1,2]</sup>表明, 气候系统的演化并不总是渐进的, 而是有可能在较短的时间内从一种相对稳定的状态跃变到另一种稳定的状态, 称为气候系统的突变, 这样的突变可能在不同的时间尺度上发生<sup>[3-5]</sup>. 气候突变对社会政治、经济环境有着重要的影响<sup>[2,6-10]</sup>, 并且对社会经济发展和人民生活造成重大影响. 因此, 开展类似于20世纪20年代、70年代末80年代初这种年代际时间尺度上发生的气候突变的机理、预测技术和理论的研究<sup>[11-18]</sup>很有现实意义和科学价值. 当前, 气候系统突变的研究工作主要集中于气候突变检测方法以及各种可能机理的研究<sup>[19-26]</sup>, 而如何通过捕捉与识别前兆信号来判断气候突变发生的研究涉及甚少, 然而这恰恰是预测未来气候突变的关键所在.

突变现象在自然界中是广泛存在的, 尤其是复杂混沌系统. 其在有序演变过程中, 往往面临着不同状态之间的转换, 这种转变有时是巨大的, 甚至是灾难性的. 而气候系统在发生突变前, 总是先演化到某个临界阈值附近, 在一次微小事件的扰动下, 系统发生突变. 因此, 系统在临界阈值附近的一些特征可以作为判断系统临近突变的前兆信号<sup>[2]</sup>.

当气候系统趋近于临界点、发生突变之前能否找到其前兆信号是当今气候预测的一个重要问题. 近年来, 科学家们发现临界慢化现象在揭示复杂动力系统是否趋于临界性突变方面展示了重要潜力<sup>[27-29]</sup>. 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

\* 全球变化研究国家重大科学研究计划 (批准号: 2012CB955902) 和国家自然科学基金 (批准号: 41175067, 41105033, 41275074) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: wuhaophy@163.com

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<sup>[30]</sup>. 一般情况下, 系统趋近临界值时, 其当前状态变得不稳定而过渡到另外一个状态, 此时系统扰动的恢复速率变慢. 2009年, Scheffer等<sup>[27]</sup>指出系统向临界点趋近时, 临界慢化现象导致动力学中的3个可能的前兆信号: 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<sup>[31]</sup>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. 吴浩, 侯威, 颜鹏程等<sup>[32-34]</sup>将临界慢化理论引用至气候突变前兆信号的研究, 初步探讨了利用临界慢化现象研究气候突变前兆信号的可能性, 研究了方法针对不同资料的适用性, 得出选择不同的窗口、不同的滞后步长对计算结果的稳定性有影响等结论, 为更深层次了解气候突变、寻找气候突变前兆信号奠定一定的基础.

为了更深层次的研究临界慢化理论针对不同区域的有效性, 探讨气候突变前兆信号的时空分布, 本文将临界慢化理论用于中国11个气候分区的气候突变前兆信号的研究. 文中首先使用M-K方法准确的找出各个区域的突变时间, 进而利用能体现临界慢化特征的自相关系数判定指标对计算序列进行分析, 通过自相关系数的增大研究气候突变前兆信号的可捕捉性, 并探讨这种前兆信号对信噪比不同的月平均气温资料的有效性和适用性.

## 2 资料及方法

### 2.1 资料

本文所用资料为中国气象信息中心提供的中国614个台站(分布如图1所示) 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, 并求得各个区域的月平均气温). 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.

根据研究需要, 本文所用的11个地理区域划分<sup>[35]</sup>如图2所示. 本文利用区域平均计算方法计算各个区域的月平均气温. 所使用的区域平均气温计算方法采用Jones网格面积加权平均法<sup>[36]</sup>, 如下式所示:

$$S_k = \frac{\sum_{i=1}^n \cos(w_i) S_{ik}}{\sum_{i=1}^n \cos(w_i)}, \quad (1)$$

(1) 式中  $S_{ik}$  表示第  $i$  个站点第  $k$  月的值;  $x_i$  表示第  $i$  站点上的纬度值;  $S_k$  表示某区域第  $k$  月的区域平均值;  $n$  为某区域包含的站点数目.

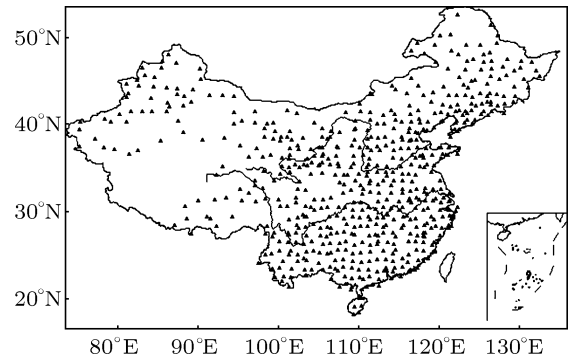


图1 614台站分布图

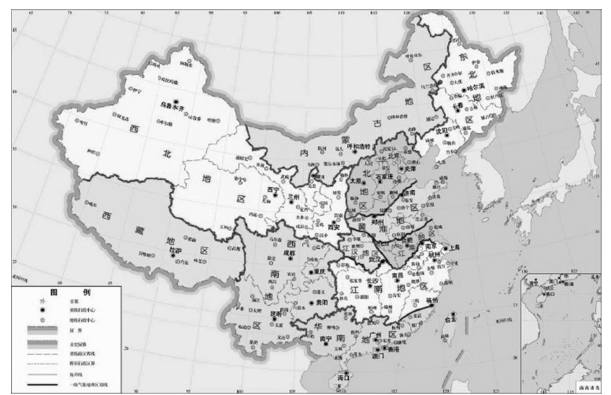


图2 一级气象地理区划图

### 2.2 研究方法

1) 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(式中  $x_i$  表示第  $i$  个数据,  $n$  为样本中数据个数.):

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

$$s = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}. \quad (3)$$

2) 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  $c(j)$ . 不同滞后长度的自相关系数可以帮助了解当前时刻信息与其前  $j$  个时刻信息变化间的联系, 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

$$c(j) = \frac{1}{n-j} \sum_{i=1}^{n-j} \left( \frac{x_i - \bar{x}}{s} \right) \left( \frac{x_{i+j} - \bar{x}}{s} \right), \quad (4)$$

$s$  为  $n$  长度时间序列的均方差,  $s$  由 (3) 式求出.

3) 临界慢化与自相关系数增大的关系. 随机作用的系统在一个控制参量趋近于临界阈值时, 临界慢化往往导致自相关和涨落方差增大现象<sup>[27,28]</sup>. 首先假定状态变量存在周期为  $\Delta t$  的受迫扰动(附加噪声), 扰动过程中, 平衡的回归呈近似指数关系, 恢复速度为  $\lambda$ . 在一个简单的自回归模型中, 可以这样描述:

$$x_{n+1} = e^{\lambda\Delta t}x_n + s\varepsilon_n, \quad (5)$$

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

$$x_{n+1} = cx_n + s\varepsilon_n, \quad (6)$$

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

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<sup>[37-40]</sup>, 当系统趋近于临界点时, 恢复速率  $\lambda$  将趋于零则自相关项  $\alpha$  趋近于 1. 因此可以将自相关系数增大作为系统趋近临界点的前兆信号.

4) 信噪比-方差分析法. 方差分析法是计算信噪比的常用的方法<sup>[41]</sup>, 温度以及气候指数数据的年际方差有多少是由天气噪声引起的, 可以用时间域的方差分析来估计. 以温度资料为例, 在逐日气温相互独立的情况下, 月平均温度 ( $x_{st}$ ) 的年际方差的无偏估计是 ( $n$  表示年内的月数或季内天数,  $j$  为总年数)

$$\sigma_m^2 = \frac{1}{j-1} \sum_{s=1}^j (\bar{x} - \bar{x})^2, \quad (7)$$

其中  $\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{t=1}^n x_{st}$ ;  $\bar{x} = \frac{1}{j} \sum_{s=1}^j \bar{x}$ , 气候噪声估计是

$$\sigma_{N_V}^2 = \frac{1}{nj(n-1)} \sum_{s=1}^j \sum_{t=1}^n (x_{st} - \bar{x})^2. \quad (8)$$

定义信噪比为

$$F_V = \sigma_m^2 / \sigma_{N_V}^2. \quad (9)$$

对于文中所用的温度序列: 每年包含 12 个月数据, 所以  $n = 12$ ; 序列从 1961—2010 年共 50 年, 所以  $j = 50$ .

5) Mann-Kendall 方法<sup>[6,42,43]</sup>. Mann-Kendall (M-K), 是一种非参数统计检验方法, 其计算简便且可以明确突变开始时间, 常用于突变检测.

对序列  $x_1, x_2, \dots, x_N$ , 定义统计量:

$$s_k = \sum_{i=1}^k m_i, \quad (k = 2, 3, \dots, N), \quad (10)$$

$m_i$  表示样本  $x_i$  大于  $x_j (j = 1, 2, \dots, i)$  的累计数. 首先假定原序列  $x_1, x_2, \dots, x_N$  随机独立, 则  $s_k$  的均值、方差可分别表示为

$$E[s_k] = k(k-1)/4, \\ \text{var}[s_k] = k(k-1)(2k+5)/72, \quad (2 \leq k \leq N), \quad (11)$$

对  $s_k$  标准化处理:

$$u(s_k) = (s_k - E[s_k]) / \sqrt{\text{var}[s_k]}, \quad (12)$$

$u(s_k)$  为标准正态分布, 可以通过计算或查表获得  $\alpha_1 = \text{prob}(|u| > |u(s_k)|)$  的概率. 给定一个显著性水平  $\alpha_0$ , 当  $\alpha_1 < \alpha_0$  时, 它表示此序列将存在一个明显的增长或减少趋势. 所有  $u(s_k) (1 \leq k \leq N)$  将组成一条曲线  $C_1$ , 通过信度检验可知其是否有变化趋势.

进而对反向序列同样进行上面的操作,  $\bar{m}_i$  表示第  $i$  个样本  $x_i$  大于  $x_j (j = 1, 2, \dots, i)$  的累计数, 当  $i' = N + 1 - i$  时, 如果  $\bar{m}_i = m_i$ , 则反序列的  $\bar{u}(s_i)$  由下式给出:

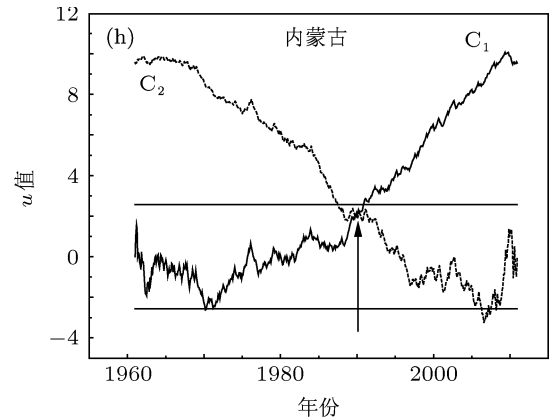
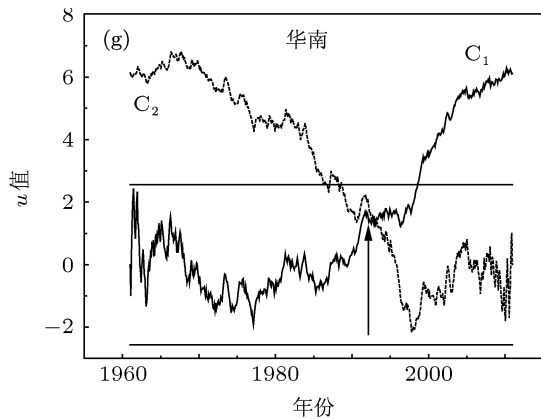
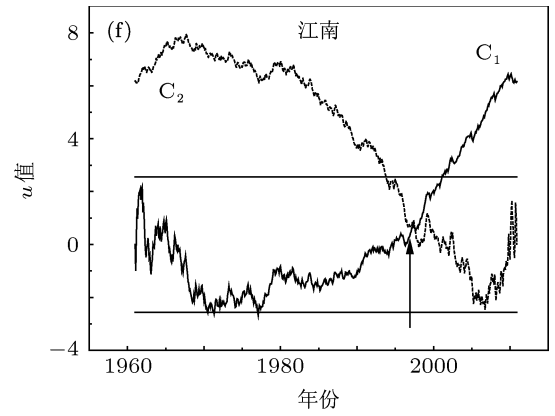
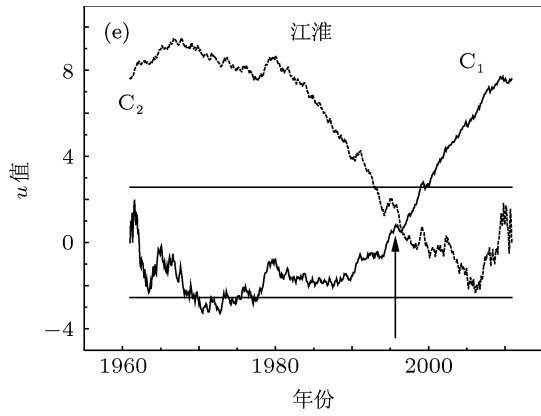
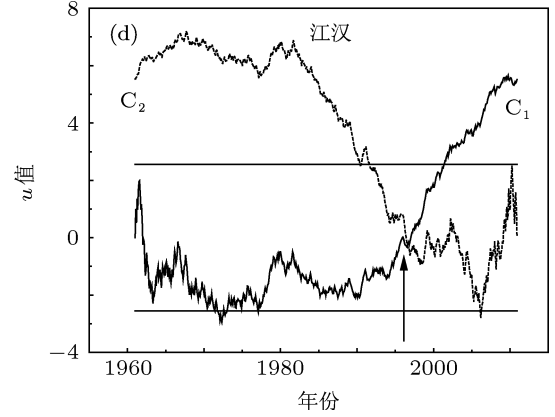
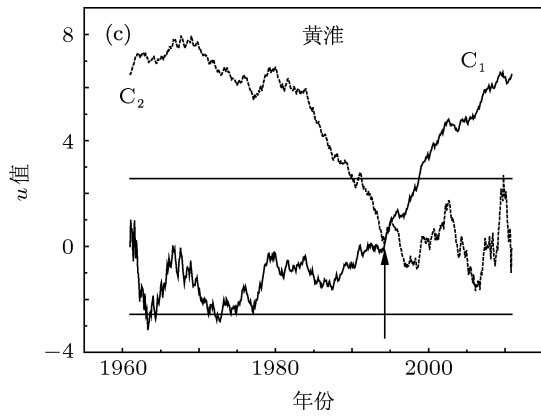
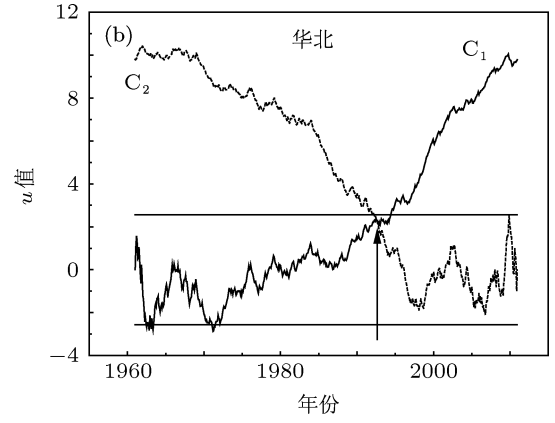
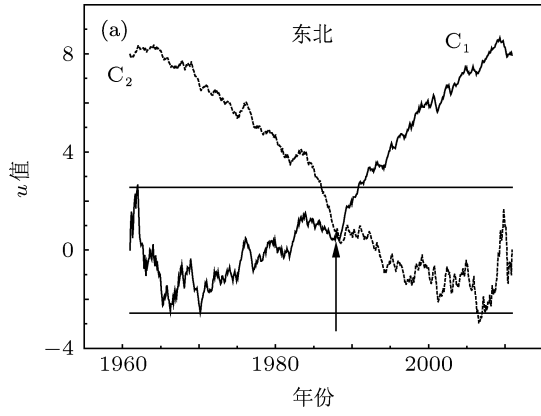
$$\bar{u}(s_i) = -u(s_i), \\ i' = N + 1 - i. \quad (i, i' = 1, 2, \dots, N), \quad (13)$$

$\bar{u}(s_i)$  用  $C_2$  表示. 如果曲线  $C_1$  和  $C_2$  的交叉点位于信度线之间, 这点便是突变的开始点.

### 3 计算结果与讨论

#### 3.1 各区域突变检测

图 3 所示为中国各区域月平均气温的突变检测. 从 M-K 方法知, 如果曲线  $C_1$  和  $C_2$  的交叉点位于信度线 ( $\alpha_0 = 0.01$ ) 之间, 这点便是突变的开始点, 由此得到表 1. 对于 M-K 方法需要补充说明的是: 当曲线  $C_1$  超过信度线, 而  $C_1$  与  $C_2$  的交点位于信度区间之外时, 既不能贸然地认定它是突变点, 也不能立即说它不是突变点. 在作突变检测时, 若能配合其它方法同时使用会防止错误的产生<sup>[1]</sup>. 图 3(k) 所示的西藏地区的 M-K 检测的曲线  $C_1$  和  $C_2$  的交叉点位于信度线之外, 因此无法准确的给出突变点. 在这里使用滑动的  $T$  (Moving T-test) 检测方法再次检验此区域突变点的真伪, 检测结果如图 3(l) 所示. 从图 3(l) 可以获知: 西藏地区在 1993 年左右的确存在一次突变, 从而佐证了前面的结论.





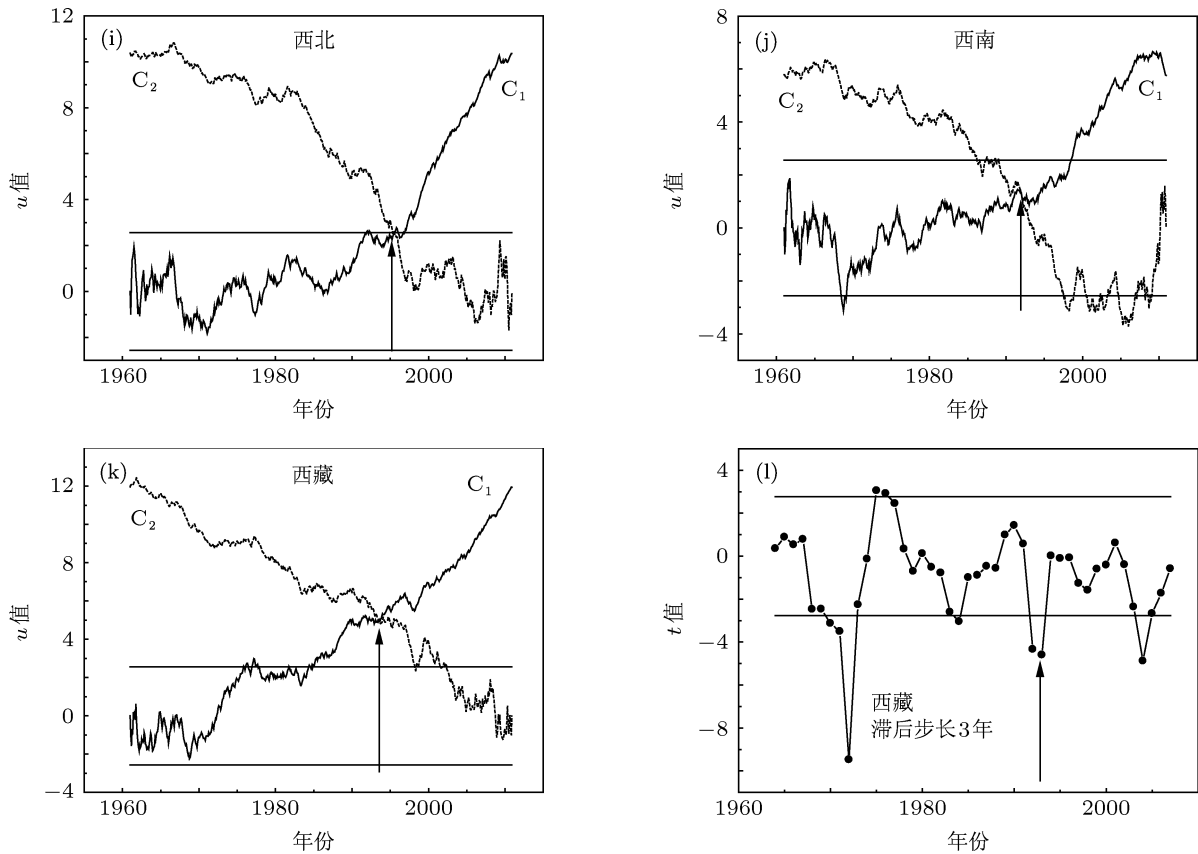


图 3 中国各区域月平均气温的突变检测 (a) 东北 M-K 检测; (b) 华北 M-K 检测; (c) 黄淮 M-K 检测; (d) 江汉 M-K 检测; (e) 江淮 M-K 检测; (f) 江南 M-K 检测; (g) 华南 M-K 检测; (h) 内蒙古 M-K 检测; (i) 西北 M-K 检测; (j) 西南 M-K 检测; (k) 西藏 M-K 检测; (l) 西藏滑动 t 检测

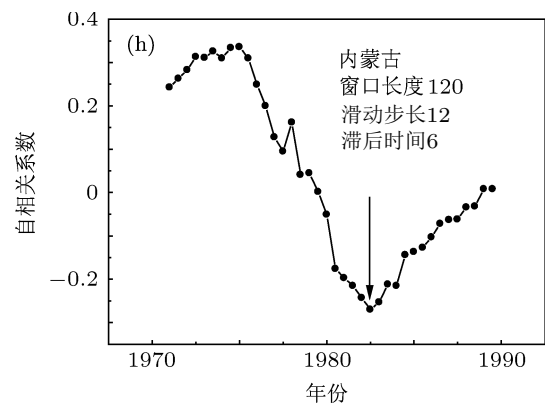
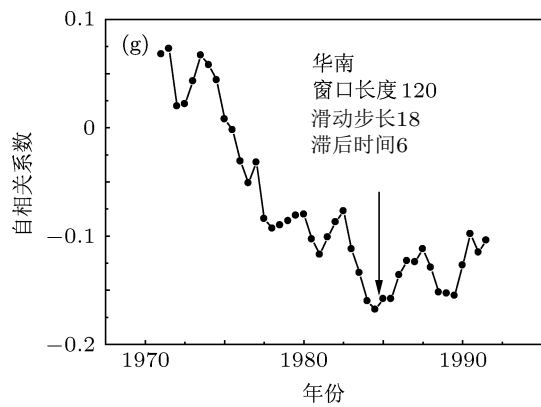
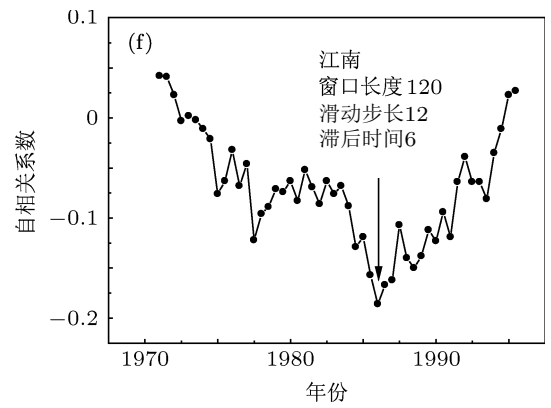
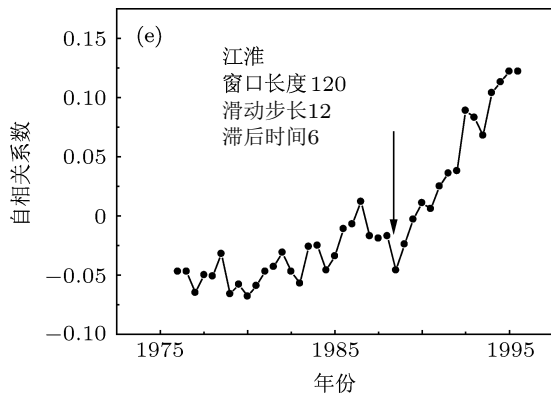
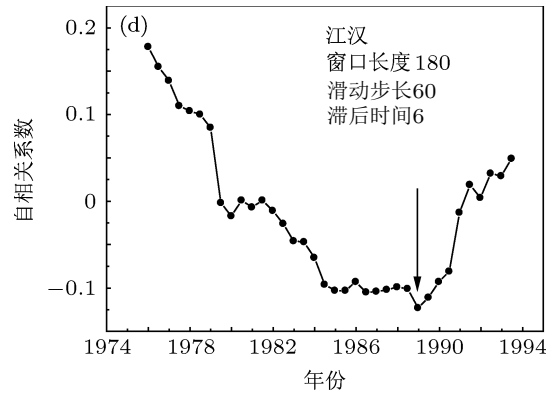
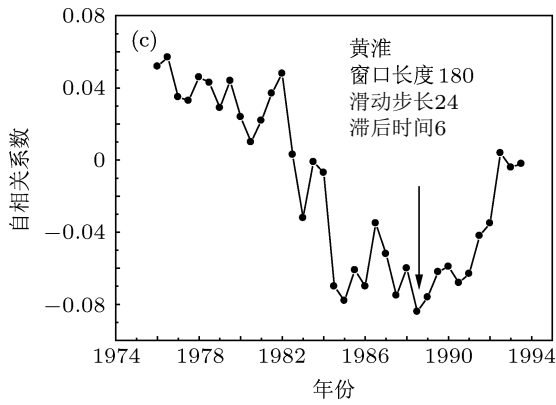
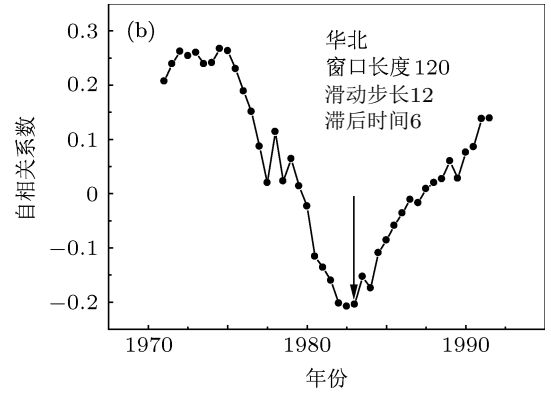
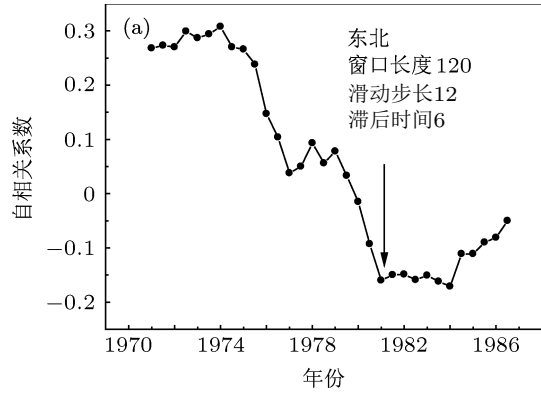
表 1 中国各区域月平均气温突变时间

区域	东北	华北	黄淮	江汉	江淮	江南	华南	内蒙古	西北	西南	西藏
突变时间/年	1987	1992	1994	1994	1995	1996	1992	1990	1995	1992	1993

### 3.2 自相关系数前兆信号

如图 4 所示为中国各区域月平均气温的自相关系数信号检测. 值得一提的是图中的滞后时间和滑动步长含义不一样: 滞后时间表示将选定窗口大小的原始序列滞后一个选定步长得到另一个相同大小的序列, 用得到的序列与前面的序列求相关, 即自身的滞后相关; 滑动窗口表示将选定窗口大小的序列滑动固定步长得到新序列并求对新序列求自相关系数. 研究表明, 合理的选择窗口和滞后时间可以提高计算结果的质量<sup>[32,33]</sup>. 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. 所以气候系统趋近临界点时的自相关系数增大等临界慢化现象表明气候

系统可能即将发生突变. 图 4(a)—(k) 中箭头标识处出现自相关系数增大的现象, 可以认为此时出现了气候突变的前兆信号. 从图 4(a)—(k) 的分析得到图 4(l), 从图 4(l) 容易获知: 尽管不同分区月均温突变时间有差异, 不过中国各区域的自相关系数信号检测显示在气候突变发生前 5—10 年均出现了自相关系数增大的临界慢化现象即气候突变的前兆信号, 这对突变的发生具有指示意义. 验证了基于自相关系数的气候突变前兆信号的有效性. 分析图 4, 容易看出基于自相关系数的气候突变前兆信号针对中国的东北、华北、内蒙古、江南等区域的检测结果较中国西北、西藏地区优越, 这可能与中国东西部站点东多西少的分布, 气候特征差异等存在莫大的关系.



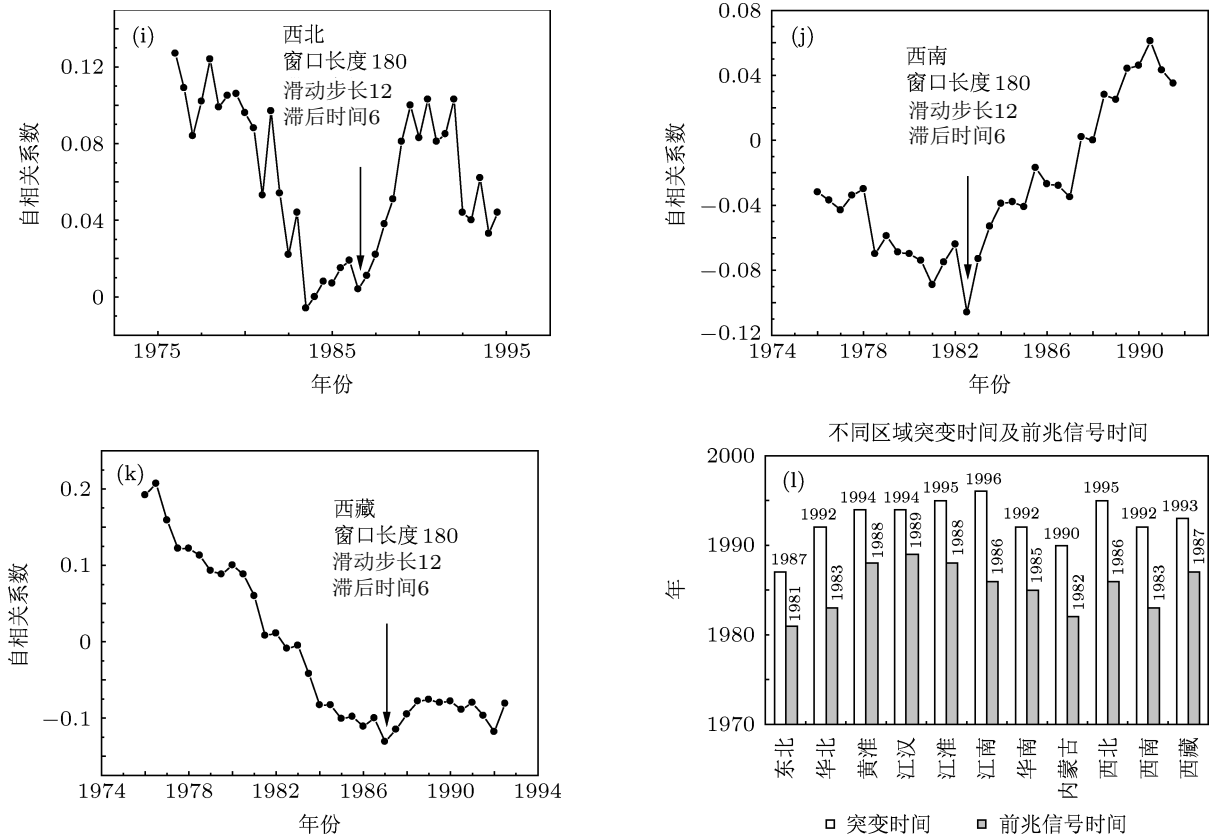


图 4 中国各区域月平均气温的自相关系数信号检测及结果对比 (a) 东北; (b) 华北; (c) 黄淮; (d) 江汉; (e) 江淮; (f) 江南; (g) 华南; (h) 内蒙古; (i) 西北; (j) 西南; (k) 西藏; (l) 各区域结果对比

### 3.3 不同信噪比对气候突变前兆信号的影响

表 2 为中国各区域月平均气温的信噪比、突变时间及前兆信号时间. 首先利用方差分析法得到中国各区域月平均气温的气候噪声及信噪比, 对比分析针对不同的信噪比, 自相关系数信号作为气候突变的前兆信号的适用性和普适性. 由表 2 可知,

中国各区域的气候噪声各不相同, 东北和内蒙古地区含有较大的气候噪声, 华北和西南地区信噪比较大, 华南地区信噪比最小; 所有的信噪比介于 1-6 之间, 也属于比较正常的范围. 从前面的分析, 针对含有这样噪声的中国各区域的月平均气温的检测可知, 自相关系数可以作为气候突变的前兆信号,

表 2 中国各区域月平均气温的信噪比、突变时间及前兆信号时间

区域	突变时间/年	自相信号时间/年 (提前时间/年)	年际方差 $\sigma_m^2$	气候噪声方差 $\sigma_{NV}^2$	信噪比 $F_V = \sigma_m^2 / \sigma_{NV}^2$
东北	1987	1981(6)	54.86	16.61	3.30
华北	1992	1983(9)	18.01	10.60	4.53
黄淮	1994	1988(6)	30.21	9.86	3.06
江汉	1994	1989(5)	26.03	10.52	2.47
江淮	1995	1988(7)	37.49	10.20	3.68
江南	1996	1986(10)	22.70	10.01	2.27
华南	1992	1985(7)	16.62	8.38	1.98
内蒙古	1990	1982(8)	63.28	16.21	3.90
西北	1995	1986(9)	37.11	8.75	4.24
西南	1992	1983(9)	46.81	7.89	5.87
西藏	1993	1987(6)	14.00	4.60	3.04

适用性很好. 针对不同的信噪比的资料, 临界慢化现象表现出的自相关系数增大信号同样适用, 噪声对信号影响不大, 验证了方法的普适性.

## 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前兆信号. 将能体现临界慢化现象的自相关系数用于中国各区域的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M-K的突变检测方法寻找各个分区的突变位置, 对中国各区域的月平均温度资料的突变前兆信号进行研究. 首先对中国各区域的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, 中国各区域的月平均温度资料在气候突变发生前均出现不同程度的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. 针对不同的信

噪比, 自相关系数信号同样适用, 证明了噪声对气候突变前兆信号影响不大, 同时验证了方法的普适性. 尽管选择的不同分区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, 中国的东北、华北、内蒙古地区的检测结果比西北、西藏地区的检测结果优越, 这可能与中国东西部站点分布, 气候特征等存在一定的关系. 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的前兆信号的研究, 对深入认识气候突变和寻找气候突变的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, 尽管中国各区域的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, Pierrehumbert 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** 373 (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] Chou J F 1997 *Bulletin of Chinese Academy of Sciences* **5** 325 (in Chinese) [丑纪范 1997 中国科学院院刊 **5** 325]
- [8] Yang P C, Bian J C, Wang G L, Zhou X J 2003 *Chinese Science Bulletin* **48** 1470 (in Chinese) [杨培才, 卞建春, 王革丽, 周秀骥 2003 科学通报 **48** 1470]
- [9] Mu M, Duan W S 2005 *Chinese Science Bulletin* **24** 2695 (in Chinese) [穆穆, 段晚锁 2005 科学通报 **24** 2695]
- [10] Wu H, Hou W, Qian Z H, Hu J G 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 149205 (in Chinese) [吴浩, 侯威, 钱忠华, 胡经国 2012 物理学报 **61** 149205]
- [11] Thompson R 1992 *Structural stability and Morphogenesis* (Sichuan: Sichuan Education Press) p54-59 (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]
- [12] 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]
- [13] 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]
- [14] 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]
- [15] 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]
- [16] 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]
- [17] 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]
- [18] Zhang L, Zhang D Q, Feng G L 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 5896 (in Chinese) [张璐, 章大全, 封国林 2010 物理学报 **59** 5896]
- [19] Dong W J, Feng G L, Gong Z Q, Li J P 2005 *Acta Phys. Sin.* **54** 5494 (in Chinese) [董文杰, 封国林, 龚志强, 李建平 2005 物理学报 **54** 5494]



- [20] 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]
- [21] Hou W, Zhi R, Yang P 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 2097 (in Chinese) [侯威, 支蓉, 杨萍 2009 物理学报 **58** 2097]
- [22] 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]
- [23] 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]
- [24] 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]
- [25] He W P, Feng G L, Wu Q, He T, Wan S Q, Chou J F 2012 *Int. J. Climatol.* **32** 1604
- [26] He W P, Feng G L, Wu Q, Wan S Q, Chou J F 2008 *Nonlinear Proc. Geoph.* **15** 601
- [27] Scheffer M, Bascompte J, William A 2009 *Nature* **461** 53
- [28] Carpenter S R, Brook W A 2006 *Ecology Letters* **9** 311
- [29] Guttal V, Jayaprakash C 2008 *Ecology Letters* **11** 450
- [30] Yu L, Hao B L 1984 *Phase Transitions and Critical Phenomena* (Beijing: Science press) (in Chinese) [于淦, 郝柏林 1984 相变和临界现象北京: 科学出版社]
- [31] Yan R, Jiang C S, Zhang L P 2011 *Chinese J. Geophys.* **54** 1817 (in Chinese) [晏锐, 蒋长胜, 张浪平 2011 地球物理学报 **54** 1817]
- [32] Wu H, Hou W, Yan P C, Feng G L 2012 *Acta Phys. Sin.* **612** 09202 (in Chinese) [吴浩, 侯威, 颜鹏程, 封国林 2012 物理学报 **612** 209202]
- [33] Wu H, Hou W, Yan P C *Acta Phys. Sin.* (in Chinese) [吴浩, 侯威, 颜鹏程 2013 物理学报] (已接收)
- [34] Yan P C, Hou W, Hu J G 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 189202 (in Chinese) [颜鹏程, 侯威, 胡经国 2012 物理学报 **61** 189202]
- [35] China Meteorological Administration forecast Disaster Reduction Division, National Meteorological Center 2006 *China Meteorological geographical divisions Manual* (Beijing: China Meteorological Press) 12–16 (in Chinese) [中国气象局预测减灾司, 中国气象局国家气象中心 2006 中国气象地理区划手册 (北京: 气象出版社) 第12—16页]
- [36] Jones P D, Groisman P Y, Coughlan M, Plummer N, Wang W C, Karl T R 1990 *Nature* **347** 169
- [37] Lenton T M 2011 *Nature climate change* **2** 201
- [38] Bence J R 1995 *Ecology* **76** 628
- [39] Dakos V, Scheffer M, Van Nes E H, Brovkin V, Petoukhov V, Held H 2008 *P. Natl. Acad. Sci. USA* **105** 14308
- [40] Lenton T M, Livina V N, Dakos V, Van Nes E H, Scheffer M 2012 *Phil. Trans. R. Soc. A* **370** 1185
- [41] Zhao X C, Wu H B, He L 2008 *J. Nanjing Inst. Meteor.* **31** 819 (in Chinese) [赵晓川, 吴洪宝, 何浪 2008 南京气象学院学报 **31** 819]
- [42] Mann H B 1945 *Econometrika* **13** 245
- [43] Wei F Y 1999 *Modern Climatic Statistical Diagnosis and Forecasting Technology* (Beijing: China Meteorological Press) **62** 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) **62** 76]

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

Wu Hao<sup>1)†</sup> Feng Guo-Lin<sup>1)</sup> Hou Wei<sup>2)</sup> Yan Peng-Cheng<sup>3)</sup>

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 25 September 2012; revised manuscript received 11 October 2012 )

## Abstract

In recent years, critical slowing down phenomenon has shown great potentials in disclosing whether a complex dynamic tends toward critical cataclysm. Based on the concept of critical slowing down, the observed data of temperature in different regions in China which have different noises are processed in this article to study the precursory signal of abrupt climate change. First, Mann-Kendall(M-K)method is used to find the locations of the abrupt climate change in different regions, then the autocorrelation coefficient which can characterize critical slowing down is calculated; the appearance-time moments of early warning signals of abrupt climate change under the influence of different noises are also studied. The results show that for different signal-to-noise ratios, the critical slowing down phenomenon has appeared in the data 5–10 years before the abrupt climate change took place, which indicateds that critical slowing down phenomenon is a possible early warning signal for abrupt climate change and the noise has less influence on the test results for early warning signals of abrupt climate change. Accordingly, it demonstrates the reliability of critical slowing down phenomenon to test the precursory signals of abrupt climate change, which provideds an experimental basis for the wide applications of the present method in real observation data.

**Keywords:** abrupt climate change, critical slowing down, M-K method, precursory signals

**PACS:** 92.70.Aa

**DOI:** [10.7498/aps.62.059202](https://doi.org/10.7498/aps.62.059202)

---

\* 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, 41275074).

† Corresponding author. E-mail: [wuhaophy@163.com](mailto:wuhaophy@163.com)