

# 试用临界慢化原理探讨气候突变\*

吴浩<sup>1)2)†</sup> 侯威<sup>2)</sup> 颜鹏程<sup>2)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7月7日收到; 2012年9月2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灾变方面展示了重要潜力. 本文基于临界慢化的理念, 着重研究不同噪声影响下, 气候突变前兆信号出现的时间; 对含有不同噪声的气温观测资料、太平洋年代际振荡指数以及阿留申低压强度资料进行处理, 研究突变的前兆信号. 以20世纪70年代末80年代初这次气候突变为例, 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, 临界慢化现象出现在具有不同信噪比的资料中, 这表明临界慢化现象可能是气候突变发生前的一个前兆信号, 并且噪声对气候突变前兆信号的检测结果影响较小, 从而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广泛应用提供了实验基础.

**关键词:** 气候突变, 临界慢化, 前兆信号, 噪声

**PACS:** 92.70.Aa

**DOI:** 10.7498/aps.62.039206

## 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>[2,6-9]</sup>, 并且对社会经济发展和人民生活造成重大影响, 因此, 亟需开展类似于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>[10-13]</sup>. 当前, 对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>[14-18]</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, 而这恰恰是预测未来气候变化的关键所在.

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>.

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灾变方面展示了重要潜力<sup>[19-21]</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>[22]</sup>. 2009年, Scheffer等<sup>[19]</sup>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[23]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

\* 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) 资助的课题.

† 通讯作者. E-mail: wuhaophy@163.com

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关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, 并探讨这两种前兆信号对信噪比不同的资料的有效性和适用性, 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. 文中首先使用方差分析法计算不同资料的信噪比.

## 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), 美国国家海洋与大气管理局 (NOAA) 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) 以及阿留申低压强度冬季月平均资料 (1948 年冬季—2010 年冬季, 40°N—60°N, 160°E—160°W 范围内的所有格点的月平均气压值累加, 再除以区域内总格点数, 得到阿留申低压强度资料 [24,25]). 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) 方差是描述样本中数据对均值  $\bar{x}$  偏离程度的特征量 [26], 记为  $s^2$ ,  $s$  称为均方差, 计算公式分别为

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

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

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 [26]. 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

$$r(j) = \frac{1}{n-j} \sum_{i=1}^{n-j} \left( \frac{x_i - \bar{x}}{s} \right) \left( \frac{x_{i+j} - \bar{x}}{s} \right), \quad (3)$$

$s$  为  $n$  长度时间序列的均方差,  $s$  由 (2) 式求出.

3) 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临界阈值时 (分岔点), 临界慢化往往导致自相关和涨落方差增大现象 [19,20]. 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:

$$x_{n+1} = e^{\lambda \Delta t} x_n + s \varepsilon_n, \quad (4)$$

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)):

$$x_{n+1} = \alpha x_n + s \varepsilon_n, \quad (5)$$

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:

$$\text{Var}(x_{n+1}) = E(x_n^2) + (E(x_n))^2 = \frac{s^2}{1 - \alpha^2}. \quad (6)$$

一般, 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 [27,28], 当系统趋近于临界点时, 恢复速率  $\lambda$  将趋于零且自相关项  $\alpha$  趋近于 1, 由 (6) 式知方差趋近于无限大. 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.

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 [29], 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为

$$\sigma_m^2 = \frac{1}{J-1} \sum_{s=1}^J (X_{S\bullet} - X_{\bullet\bullet})^2, \quad (7)$$

其中

$$X_{S\bullet} = \frac{1}{N} \sum_{t=1}^N X_{st}; \quad X_{\bullet\bullet} = \frac{1}{J} \sum_{s=1}^J X_{S\bullet};$$

气候噪声估计是

$$\sigma_{N_V}^2 = \frac{1}{NJ(N-1)} \sum_{s=1}^J \sum_{t=1}^N (X_{st} - X_{S\bullet})^2; \quad (8)$$

定义信噪比为

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

对于温度序列,  $N = 12, J = 50$ .

### 3 计算结果与讨论

#### 3.1 华北四台站分析

##### 3.1.1 不同信噪比对方差信号的分析

华北地区是人们最关心的地区之一, 华北地区气候突变的问题也一直是研究的重点. 鉴于此, 本文选取了含有不同信噪比的华北四个典型站研究分析气候突变前兆信号, 分析不同噪声对气候突变前兆信号的影响. 20 世纪 70 年代末 80 年代初发生了一次全球 (行星) 尺度的突变, 与之相对应, 华北地区的气温在 1985 年左右出现了一次陡然的增暖 [30–33].

表 1 北京、天津、石家庄、太原四站的月平均气温的气候噪声及信噪比

	年际方差 $\sigma_m^2$	气候噪声方差 $\sigma_{N_V}^2$	信噪比 $F_V = \sigma_m^2 / \sigma_{N_V}^2$
北京	80.56	12.09	6.66
天津	31.36	10.99	2.85
石家庄	60.17	13.73	4.38
太原	61.21	10.81	5.66

表 1 所示为利用方差分析法得到的华北四台站的月平均气温的气候噪声及信噪比, 四个站点的气候噪声各不相同, 所有的信噪比介于 2—7 之间, 四站点中北京站信噪比最大, 气候噪声次大.

图 1 给出了对含有不同噪声的华北四个典型站点的气候突变的方差信号检测结果. 滞后步长表示将选定窗口大小的序列滞后固定步长得到新序列并对新序列求方差. 图 1(a), 1(b) 为石家庄站的不同窗口下的方差分析, 箭头标识处 (1980 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 (6) 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, 即在气候突变发生前 5 年的 1980 年左右出现了气候突变的前兆信号.

从图 1(a), 1(b) 可以看出, 窗口大小对检测结果影响较小, 仅仅影响结果的稳定性, 一定情况下, 窗口越大, 结果波动性越小. 从表 1 可知, 石家庄站月平均气温的信噪比为 4.38, 从图 1(a), 1(b) 的结果可见, 方差信号适用性很好, 对于华北地区的气温突变具有较好的指示作用. 图 1(c), 1(d) 为北京站的方差分析, 同理箭头标识处出现方差增大的现象, 可以认为北京站在 1979 年左右出现了气候突变前兆信号, 即在气候突变发生前 6 年出现了前兆信号. 从表 1 获知, 北京站月平均气温的信噪比 6.66, 同样, 方差信号对华北地区的气温突变适用性也较好. 图 1(e), 1(f) 反映了天津站的方差随时间的变化, 1978 年左右出现了方差增大的现象, 即在气候突变发生前 7 年出现了前兆信号. 图 1(g), 1(h) 反映的是太原站的方差随时间的变化, 1975 年左右出现了方差增大的现象, 即在气候突变发生前 10 年出现了前兆信号. 从表 1 获知, 天津站月平均气温的信噪比为 2.85, 太原站月平均气温的信噪比为 5.66, 方差信号同样具有较好的适用性, 其中太原站的方差信号出现了小的波动, 不过依然能够指示突变的发生.

##### 3.1.2 不同信噪比对自相关系数信号的分析

图 2 所示为不同噪声比的华北四个典型站点的气候突变的自相关系数信号检测. 值得一提的是图 2 中的两个滞后步长有不同的含义, 第一个滞后步长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, 也就是自身的滞后相关; 第二个滞后步长跟方差信号相同. 其中图 2(a), 2(b) 为石家庄站的自相关系数分析, 从图中箭头标识处容易看出, 在 1980 年左右自相关系数出现变大的趋势. 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. 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可能即将发生突变. 因此可以认为前兆信号出现在 1980 年左右, 即在气候突变发生前 5 年出现了前兆信号. 从图中同样可以看出, 不同的窗口和滞后步长影响结果稳定性. 从表 1 可知, 石家庄站月平均气温的信噪比为 4.38, 自相关系数信号适用性较好. 图 2(c), 2(d) 为北京站的方差分析, 同理箭头标识处出现方差增大的现象,

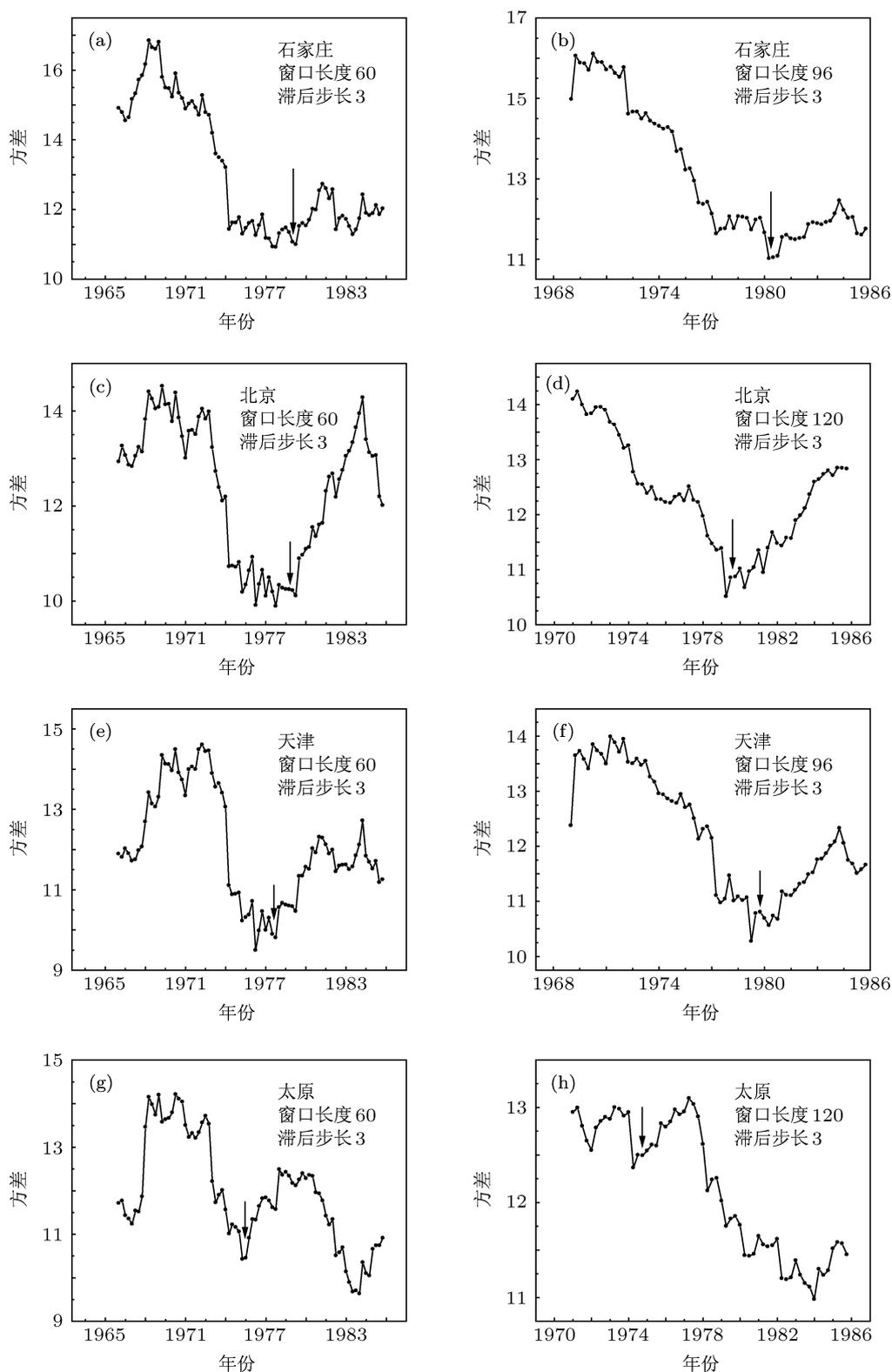


图1 华北四个典型站点的不同窗口长度,不同滞后步长的方差检测 (a),(b)石家庄站的方差检测;(c),(d)北京站的方差检测;(e),(f)天津站的方差检测;(g),(h)太原站的方差检测

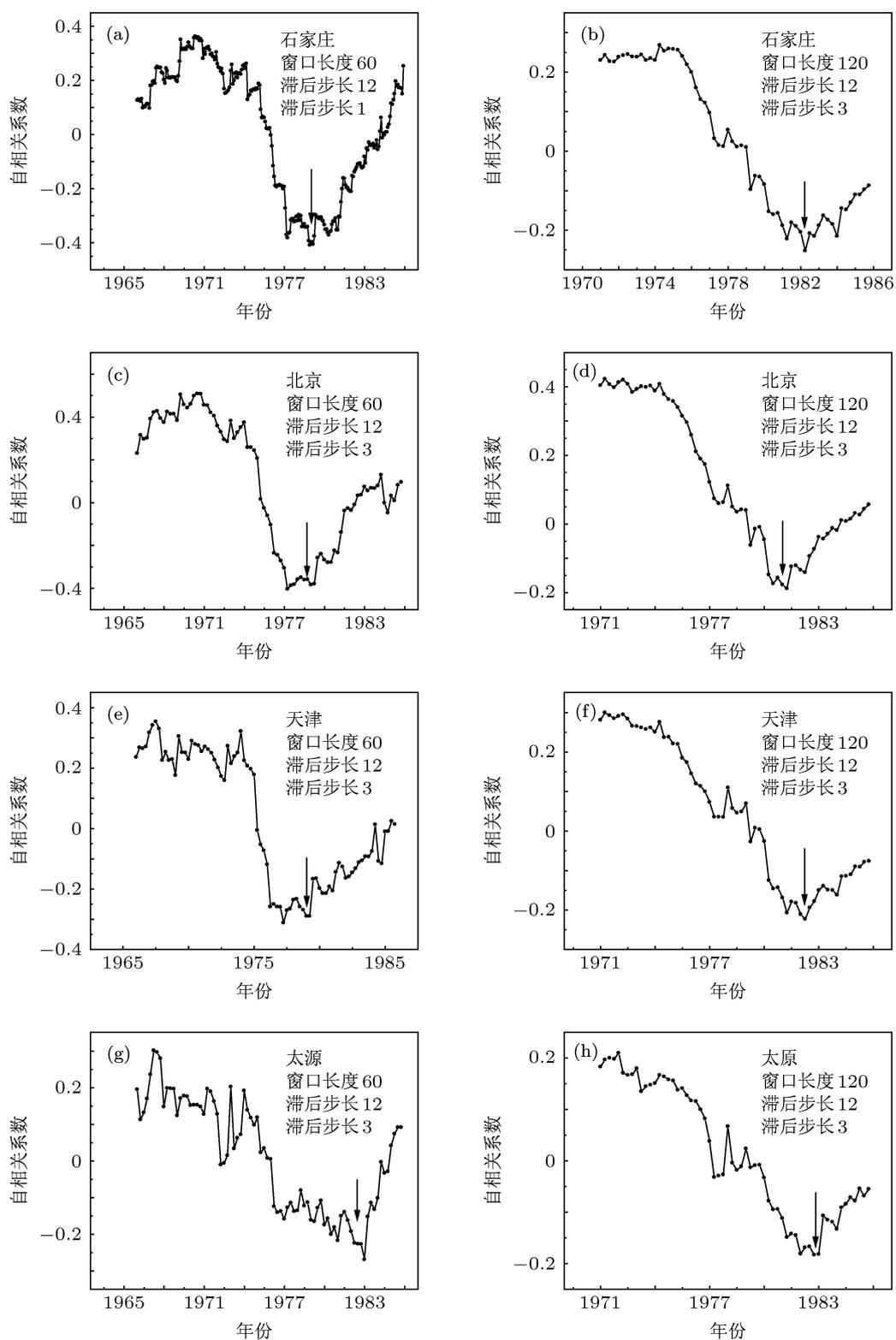


图2 华北四个典型站点的不同窗口长度,不同滞后步长的自相关系数检测 (a), (b) 石家庄站的自相关系数检测; (c), (d) 北京站的自相关系数检测; (e), (f) 天津站的自相关系数检测; (g), (h) 太原站的自相关系数检测

可以认为北京站在 1980 年左右出现了气候突变前兆信号,即在气候突变发生前 5 年出现了前兆信号.与方差信号相比,北京站自相关系数前兆信号出现较方差信号要迟.图 2(e), 2(f) 反映的是天津站的自相关系数随时间的变化.在 1981 年左右出现了方差增大的现象,即在气候突变发生前 4 年出现了前兆信号.图 2(g), 2(h) 反映的是太原站的方差随时间的变化.在 1983 年左右出现了自相关系数增大的现象,即在气候突变发生前 2 年出现了前兆信号.从表 1 获知,北京站月平均气温的信噪比为 6.66,天津站月平均气温的信噪比为 2.85,太原站月平均气温的信噪比为 5.66.针对不同信噪比,虽然自相关信号会出现了微小的波动,且自相关信号的出现时刻较方差信号有所滞后,但并不影响对突变发生的指示作用.

从图 1 和图 2 的分析可知,通过求方差和自相关系数的两种方法可以作为气候突变的前兆信号;针对不同的信噪比,方差信号和自相关系数信号适用性都较好,虽然不同站点信号的出现时间有稍许波动,不过在气候突变发生前 5—10 年出现前兆信号都是符合情理的,反映出噪声对方差信号和自相关系数信号影响较小,说明了方差信号和自相关系数信号作为气候突变前兆信号的适用性.

### 3.2 气候指数数据分析

#### 3.2.1 不同信噪对方差信号的分析

前面的分析可知,方差和自相关系数两种方法可以作为气候突变的前兆信号,并且获知噪声对气

候突变前兆信号的影响较小.下面我们从气候指数数据的角度再次来论证这一观点.本文选取的是阿留申低压资料(冬季月平均资料)和 PDO 指数的月平均资料.之所以选取这两个气候指数数据,是由于这两个资料在 1976 年存在一次明显的并得到大家公认的突变<sup>[30,34,35]</sup>.并且 PDO 是全球年代际变率最强、最重要的信号之一,是气象学者研究的焦点.

图 3 为含有不同噪声的气候指数数据突变的方差信号检测.图 3(a), 3(b) 为阿留申低压资料的方差信号检测,从图中可以看出 1975 年左右出现了方差增大的现象,这对 1976 年阿留申低压强度的突变具有较好的指示,因此可以认为是这次突变的前兆信号.图 3(c), 3(d) 为 PDO 指数资料的方差信号检测,从图中可以看出 1970 年左右出现了方差增大的现象,同样对 1976 年 PDO 指数的突变具有指示意义,从而认为是这次突变的前兆信号(提前 6 年).表 2 中,阿留申低压资料的信噪比为 1.49, PDO 指数资料的信噪比为 15.27,对于不同的信噪比数据,方差信号能够指示突变的发生,噪声对方差信号影响很小.

图 3 可知,方差信号能够作为气候突变的前兆信号,并且 PDO 资料的检测结果较阿留申低压强度资料优越(这是由于 PDO 指数资料较阿留申低压强度资料数据量大,统计到的样本多,结果稳定.)针对不同信噪比的气候指数数据,方差信号都能够指示突变的发生,说明噪声对方差信号影响很小,验证了方法的普适性.

表 2 阿留申低压资料及 PDO 资料的气候噪声及信噪比

	年际方差 $\sigma_m^2$	气候噪声方差 $\sigma_N^2$	信噪比 $F_V = \sigma_m^2 / \sigma_N^2$
阿留申低压资料	14.24	9.54	1.49
PDO 指数资料	0.70	0.046	15.27

#### 3.2.2 不同信噪比对自相关系数信号的分析

图 4 所示为含有不同噪声的气候指数数据的突变的自相关系数信号检测.图 4(a), 4(b) 为阿留申低压资料的自相关系数信号检测,从图中可以看出在 1970 年左右出现了自相关系数增大的现象,根据前面的理论分析可知,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自相关系数增大的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 1970 年左右,即在气候突变发生前 6 年出现了前兆信号.由此同样可以看出,噪声基本没有影响到自相关系数信号.图 4(c), 4(d) 为 PDO 指数资料的自相关系数信号检测,从图中可以看出在 1970 年左右出现了自相关系数增大的现象,根据前面的理论分析可知,这可以作为突变的前兆信号.相对于 1976 年 PDO 指数资料的突变,1970 年这次自相关系数增大的现象可以认为是这次突变的前兆信号,即提前 6 年出现了突变的前兆信号,这与方差信号完全一致.

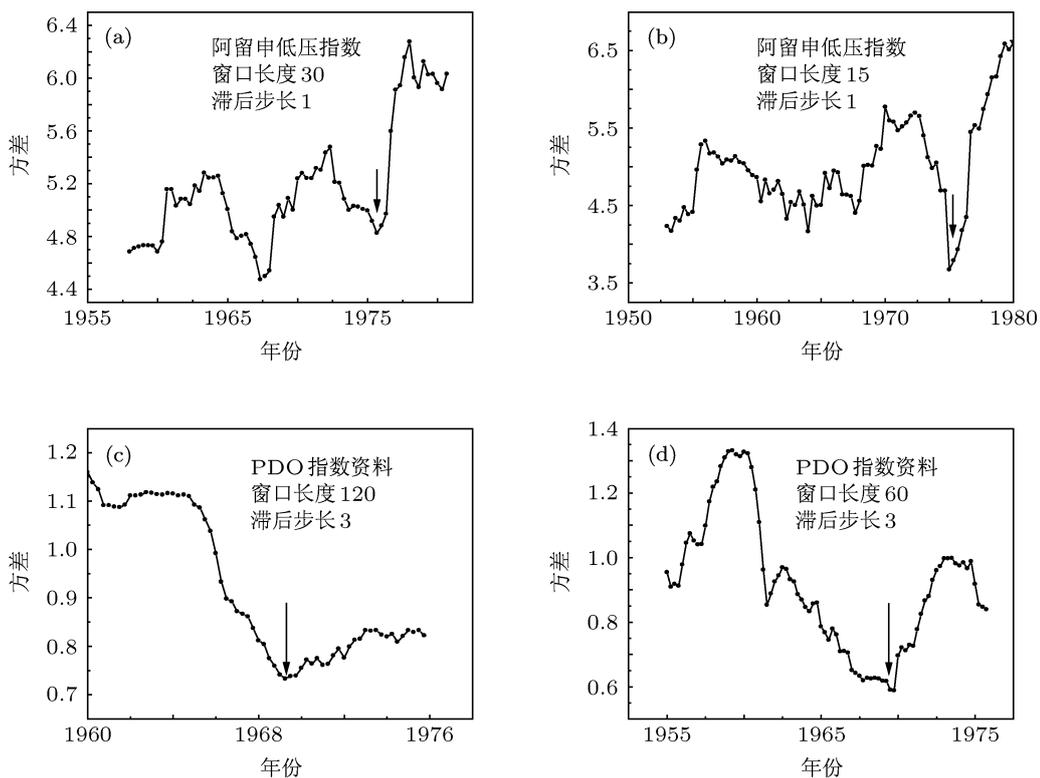


图3 不同气候指数数据的不同窗口长度,不同滞后步长的方差信号检测 (a), (b) 阿留申低压资料的方差信号检测; (c), (d) PDO 指数的方差信号检测

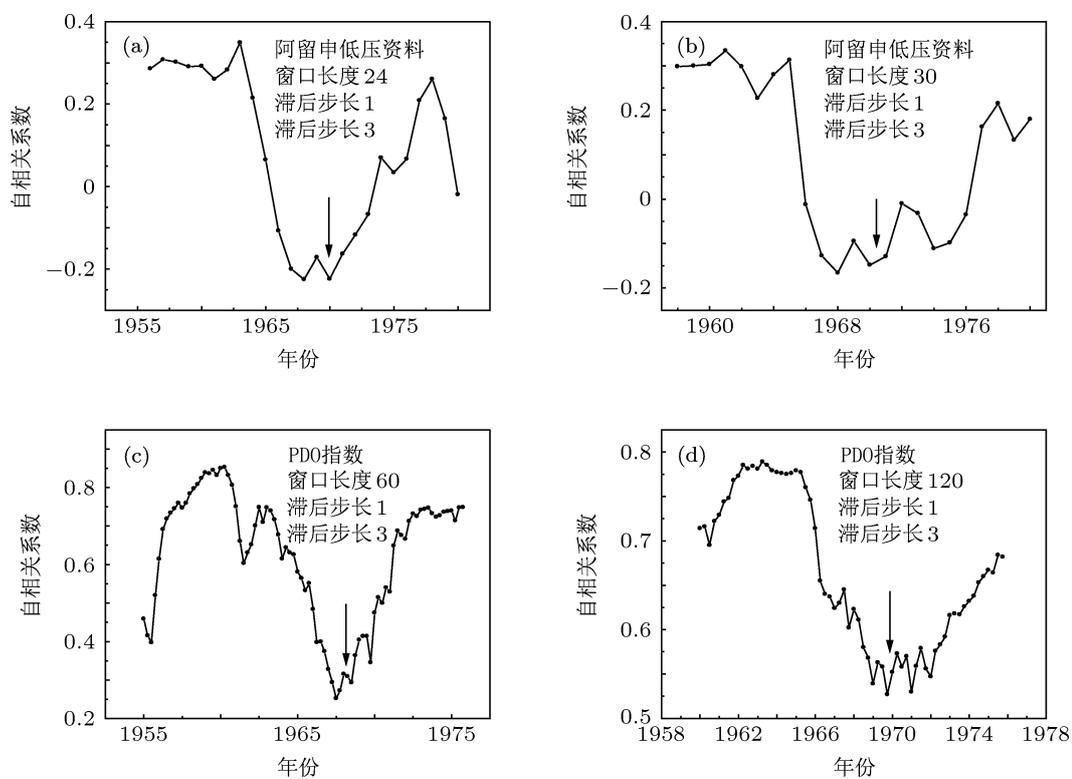


图4 不同气候指数数据的不同窗口长度,不同滞后步长的自相关系数信号检测 (a), (b) 阿留申低压资料的自相关系数信号检测; (c), (d) PDO 指数的自相关系数信号检测

PDO 指数和阿留申低压强度在 1976 年存在一次明显的突变, 这与 20 世纪 70 年代末 80 年代初气候突变的大背景是相符合的. 首先, PDO 和阿留申都位于海温年代际变化敏感区, 而 PDO 是全球海表温度场年代际突变的重要成员之一, 阿留申是一个永久活动中心<sup>[30]</sup>. PDO 的突变与太平洋海温以及厄尔尼诺现象都有很好的相关性, 而阿留申低压强度受太平洋副高以及 500 hPa 东亚大槽影响较大<sup>[35]</sup>. 一定程度上 PDO 和阿留申低压强度相互影响, 突变以及突变前兆信号也呈现一定的同步性<sup>[34,36]</sup>, 这与本文的结论非常的符合.

对图 3 和图 4 的分析可以获得以下结论: 1) 方差信号和自相关系数信号对气候指数数据的突变前兆信号的检测效果很好; 2) 针对不同的信噪比的气候指数资料, 方差信号和自相关系数信号同样适用, 噪声对自相关系数信号影响不大, 验证了方差信号和自相关系数信号的适用性; 3) 与前面的分析类似, 在统计样本数一定情况下, 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、统计到的样本量大一些有利于结果的稳定.

## 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方差和自相关系数用于不同信噪比的温度、PDO 指数以及阿留申低压观测资料序列的研究, 不仅能加深对前兆观测资料波动信息的认识, 了解噪声对方法的影响, 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, 对含有不同信噪比的温度、PDO 指数资料以及阿留申低压观测资料的序列在 70 年代末 80 年代初的气候突变的突变前兆信号进行研究, 结果表明, 在统计样本数一定情况下, 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, 合理的选择窗口和滞后步长可以提高计算结果的质量.

对温度、PDO 指数资料以及阿留申低压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回溯性检验. 结果表明, 无论是温度资料还是 PDO 指数等气候指数数据, 在气候突变发生前均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. 针对不同的信噪比, 方差和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. 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, 气候指数数据的检测结果比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识别、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, 同时能够获知这样的方法对噪声响应很小, 具有普适性. 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, 尽管对温度和 PDO 指数等气候指数数据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, 并且获知此种方法具有普适性. 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** 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 *Non-linear Theories and Methods on Spatial-Temporal Distribution of the Observational Data* (Beijing: the Weather Publishing Company) pp5-

- 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 *Chin. Sci. Bull.* **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 *Chin. Sci. Bull.* **24** 2695 (in Chinese) [穆穆, 段晚锁 2005 科学通报 **24** 2695]
- [10] 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]
- [11] 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]
- [12] 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]
- [13] 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]
- [14] 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]
- [15] 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]
- [16] 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]
- [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, Feng G L, Wu Q, Wan S Q, Chou J F 2008 *Nonlinear Proc. Geoph.* **15** 601
- [19] Scheffer M, Bascompte J, William A 2009 *Nature* **461** 53
- [20] Carpenter S R, Brook W A 2006 *Ecology Lett.* **9** 311
- [21] Guttal V, Jayaprakash C 2008 *Ecology Lett.* **11** 450
- [22] 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)]
- [23] 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]
- [24] Overland J E, Adams J M, Bond N A 1999 *J. Climate* **12** 1542
- [25] Sun X J, Wang P X, Zhi H, Guo D 2011 *Tran. Atmos. Sci.* **34** 74 (in Chinese) [孙晓娟, 王盘兴, 智海, 郭栋 2011 大气科学学报 **34** 74]
- [26] 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]
- [27] Bence J R 1995 *Ecology* **76** 628
- [28] Dakos V, Scheffer M, van Nes E H, Brovkin V, Petoukhov V, Held H 2008 *P. Natl. Acad. Sci. USA* **105** 14308
- [29] 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]
- [30] 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]
- [31] Hou W, Feng G L, Dong W J, Li J P 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 2663 (in Chinese) [侯威, 封国林, 董文杰, 李建平 2006 物理学报 **55** 2663]
- [32] Guo Z H, Liao Q L, Li X 2005 *Arid Land Geogr.* **28** 176 (in Chinese) [郭志海, 缪启龙, 李雄 2005 干旱区地理 **28** 176]
- [33] 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]
- [34] Zeng H L, Gao X Q, Dai X G 2002 *Plateau Meteor.* **21** 66 (in Chinese) [曾红玲, 高新全, 戴新刚 2002 高原气象 **21** 66]
- [35] Wang L Q, Li C Y, Tan Y K, Yan D 2010 *Plateau Meteor.* **29** 23 (in Chinese) [王力群, 李崇银, 谭言科, 严冬 2010 高原气象 **29** 23]
- [36] Ren G C 1991 *Acta Meteorol. Sin.* **49** 249 (in Chinese) [任广成 1991 气象学报 **49** 249]

# Using the principle of critical slowing down to discuss the abrupt climate change\*

Wu Hao<sup>1)2)†</sup> Hou Wei<sup>2)</sup> Yan Peng-Cheng<sup>2)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 7 July 2012; revised manuscript received 2 September 2012)

## Abstract

In recent years, critical slowing down phenomenon has shown great potentials in disclosing whether a complex dynamic tends to critical cataclysm. Based on the concepts of critical slowing down, the observed data of temperature and the pacific decadal oscillation (PDO) index and the intensity of Aleutian low pressure, which have different noises are processed in this article to study the precursory signals of abrupt climate change. Take the abrupt climate change in the late 1970s–early 1980s as an example, then variances and autocorrelation coefficients which can characterize critical slowing down will be calculated separately; the occurring time of precursory signal of abrupt climate change under the noises influence is studied. The results show that the critical slowing down phenomenon appears in the data with different signal-to-noise ratios before the abrupt climate change takes place, which indicates 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 precursory 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 provides an experimental basis for the wide applications of the present method in real observation data.

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

**PACS:** 92.70.Aa

**DOI:** 10.7498/aps.62.039206

---

\* 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).

† Corresponding author. E-mail: wuhaophy@163.com