

# 气候突变的完备定义和类型

李建平<sup>1)</sup> 丑纪范<sup>2)</sup> 史久恩<sup>2)</sup>

(1) 兰州大学大气科学系, 兰州 730000; 2) 北京气象学院, 北京 100081)

**摘要** 本文是气候突变统计方法研究的第一部分, 主要讨论气候、气候突变的定义和气候突变的类型。本文给出了一个完备的气候突变的定义, 将气候突变分为7种类型: 均值突变、方差突变、回归突变、概率突变、空间型突变、分布突变和混合型突变, 并给出了相应类型突变的数学提法, 从而为下一步研究打下基础。

**关键词** 气候; 气候突变; 尺度; 统计量

当代气候学研究把气候看作是不不断变化的<sup>[1]</sup>, 这是与经典气候学研究的根本不同。这导致了新的气候概念的产生, 新的研究方法的提出, 新的研究事实的发现, 新的认识和思想的诞生。从历史资料看, 全球气候已经历了各种时间尺度的巨大变化<sup>[1-3]</sup>。可以预料, 未来还将变化不息。气候不是一成不变的, 它的变化具有阶段性。气候从一个阶段到另一个阶段的变化有两种基本形式: 突变和渐变。气候的渐变表现在相当一段时间内在某一相对稳定态附近振动, 气候处于同一性质中; 突变则是相对稳定态的不连续跳跃, 气候性质发生了根本的改变。气候突变的研究对认识气候变化的性质及气候预报有重要意义。所以, 气候突变作为非线性气候变化的一个重要规律, 越来越受到人们的重视。

自从叶笃正等<sup>[4]</sup>指出大气环流存在6月和10月的突变现象, 大气中存在突变现象便成定论。近年来, 许多学者<sup>[5-8, 13-15]</sup>对气候突变作了大量研究, 获得了一些结果。然而, 目前气候突变的研究还存在许多问题: (1) 还没有一个较完备的气候突变定义; (2) 气候突变的检测方法还不完善, 有待于进一步改进; (3) 有些方法存在严重问题; (4) 目前对均值突变的研究较多, 而对其它气候突变的讨论较小; (5) 气候突变的事实还有待于进一步揭露; (6) 气候突变的内部机理还不完全清楚, 等等。所以对气候突变的进一步研究是很有意义的, 也是必要的。

气候突变的研究一般从如下两个角度: 一是动力角度; 一是统计角度。本工作主要是从统计角度进行评述和研究的。本文是这一工作的第一部分, 试图给出一个较完备的气候突变的定义, 较全面地对气候突变的类型进行划分, 为下一步研究打下基础。

## 1 气候突变的一个完备定义

### 1.1 气候的定义

要定义气候突变, 首先要弄清什么是气候。按照Lorenz<sup>[9]</sup>和Leith<sup>[10]</sup>的观点, 真实的气候是按照无穷时间长度中的平均所表示的一种理想极限, 这样气候是固定不变的。显然这还停留在经典气候的研究, 不能适应当代气候研究的特点和要求。按照《中国大百科全书: 大气科学》<sup>[11]</sup>中的定义: 气候是“地球上某一地区多年间大气的基本状态, 它既反映平均情况, 也反

映极端情况,是多年间各种天气过程的综合表现。气象要素的各种统计量是表述气候的基本依据”。这个定义比前述定义全面完整,但仔细推敲一下它也存在如下两个问题:(1)“多年间”究竟是多少年?统计量是对多长的时间长度进行的?时间长度不同,天气的统计特征也不同。因此,气候这个概念隐含着—个时间尺度作为基础<sup>[12]</sup>;(2)“某一地区”究竟有多大范围?空间范围不同,天气的统计特征也不同。因此,气候这个概念也隐含着—个空间尺度作为基础。考虑到这两点,我们试图给出如下的气候定义。

气候概念是建立在时间域和空间域上的。所谓时间尺度为  $T$ 、空间尺度为  $L$  的气候是指地球上空间尺度为  $L$  的某一特定地区在时间尺度为  $T$  内的大气的一般状态,记为  $(T, L)$  气候(为了简单,以下均简称为气候)。它既反映空间尺度为  $L$  和时间尺度为  $T$  内的平均状况,也反映极端状况,是时空尺度为  $T, L$  内各种天气过程的综合表现。这个时空尺度内,气象要素的各种统计量是表述这种时空尺度气候的基本依据。这里空间尺度  $L$  是三维的,即水平方向和垂直方向,  $L = (L_x, L_y, L_z)$ 。

从气候的定义可以看出,气候是随时空尺度  $T, L$  而不同的,即气候的多时间尺度性(时间层次)和多空间尺度性(空间层次)。这样,从时间尺度  $T$  上说,就有了短期气候(如月气候、季气候);中期气候(如半年气候、年际气候);长期气候(如十年际气候、百年际气候);地质气候等;从空间尺度  $L$  的水平方向上讲,就有了小气候、局地气候、区域气候、半球气候、全球气候等;从空间尺度  $L$  的垂直方向上讲,就有了地面气候、对流层气候、平流层气候等。因此,变换时空尺度  $T, L$ , 即可到不同层次的气候。与气候相伴随的概念是气候变化和气候变率,它们的定义通常是只考虑气候的时间尺度,而较少涉及其空间尺度。所谓  $(T, L)$  气候变化是指各个基本时间尺度段  $T$  之间  $(T, L)$  气候的差异。 $(T, L)$  气候变率是在基本时间尺度段  $T$  内的  $(T, L)$  气候的振动。值得注意的是  $(T, L)$  气候的时间尺度  $T$  与  $(T, L)$  气候变化的时间尺度  $T$ , 是不同的两个概念,此处所述气候的层次与气候变化的层次也是不同的,气候的多时间尺度性和多空间尺度性与气候变化的多时间尺度性和多空间尺度性是不同的。

## 1.2 气候突变的一个完备定义

常见的气候突变的定义是气候从一个平均值到另一个平均值的急剧变化或定义为从一个性质的气候状态(或称一个相对稳定态)到另一个性质的气候状态的(或称另一个相对稳定态)的不连续跳跃现象。这两种定义都是不完全的。对于前者,由于描述气候状态的基本统计特征量有多个,单以其中的某一个量的变化来定义气候突变是不全面的;对于后者,什么是同一性质的气候状态,什么是不同性质的气候状态没有给出。因此,要给出一个完备的气候突变定义,应该先定义如下几个概念:

1. 一定时期(其长度为  $\tau$ )内的气候是关于某一统计量  $\xi$  在时间尺度  $a$  ( $a < \tau$ ) 下同一性质的,如果其中任一尺度为  $a$  的子时期之间的气候统计量  $\xi$  都无显著性差异。同一性质的气候所延续的时间  $\tau$  称为它的维持时间。

2. 两个不同时期(长度分别为  $\tau_1, \tau_2$ )内的气候是关于某一统计量  $\xi$  在时间尺度  $a$  ( $a < \min(\tau_1, \tau_2)$ ) 下不同性质的,如果其—个中的任一以尺度为  $a$  的子时期与另一个中的任一以尺度为  $a$  的子时期之间的气候统计量  $\xi$  都有显著性差异。

注记:一般地,在气候统计量  $\xi$  下,同一性质或不同性质的气候具有半单调性,即如果一定时期(长度为  $\tau$ )内的气候是  $a$  ( $a < \tau$ ) 尺度下同一性质的,则对于尺度  $b > a$  ( $a < b < \tau$ ),它也是  $b$  尺度下同一性质的;如果两个不同时期(长度分别为  $\tau_1, \tau_2$ )内的气候是  $a$  ( $a < \min(\tau_1, \tau_2)$ )

尺度下不同性质的, 则对于尺度  $b > a$  ( $a < b < \min(\tau_1, \tau_2)$ ), 它们也是  $b$  尺度下不同性质的。反过来, 则上述结论不一定成立。

3. 一定时期内的气候是关于某一统计量  $\xi$  是中间性质或过渡性质的, 如果其前后两个不同时期的气候是不同性质的, 而且其与前后两个不同时期的气候统计量  $\xi$  都无显著性差异。

有了上述概念, 就可以给出一个较完备的气候突变定义: 在气候统计量  $\xi$  下, 一个性质的气候状态变化到另一个性质的气候状态, 如果其间的过渡时期远小于它们各自状态的维持时间, 则称为关于气候统计量  $\xi$  的气候突变。

显然, 气候突变的概念除了要针对的气候的时空尺度  $(T, L)$ , 还要考虑何种统计量  $\xi$ , 何种尺度  $a$ 。这里所述气候统计量  $\xi$  既可以针对单要素情形, 也可以是多要素的向量情形。从最一般的角度, 它应当是考虑气候突变的各个成份因子(即向量情形), 但由于问题的复杂性, 通常只是针对某一气候要素而研究的。在后面的检测方法中将对每类气候突变都进行这两种情形分别研究。

另外, 对于气候突变的问题, 还要考虑气候突变的变化强度, 即所谓跳跃度。一般可定义为前后两个性质气候的统计量的差  $\xi_2 - \xi_1$ , 这是点估计; 当然对此还可用区间估计。

## 2 气候突变的类型及数学提法

以下所述模型既是针对一元情形, 也是针对多元情形。为了简单, 数学符号采用熟悉的一元情况。

### 2.1 均值突变

在气候突变中, 如果考察的气候统计量  $\xi$  是气候均值, 则这种气候突变即为均值突变。存在一次均值突变的提法是: 在样本  $x_1, x_2, \dots, x_n$  独立且服从方差为  $\sigma^2$  的正态分布的前提下

原假设  $H_0: Ex_1 = Ex_2 = \dots = Ex_n$

对立假设  $H_1$ : 对某个  $m, 1 \leq m \leq n$ , 及  $a_1 \neq a_2$ , 有

$$Ex_1 = \dots = Ex_{m-1} = a_1, Ex_m = \dots = Ex_n = a_2 \quad (1)$$

(其中  $m$  未知)。给定信度  $\alpha$ , 如果检验肯定了  $H_1$ , 则  $m$  即为突变点。

对多个均值突变点的离散模型提法是:

$$\begin{aligned} x_i &= a_i + e_i, & i &= 1, \dots, n \\ a_1 &= \dots = a_{(m_1-1)} = b_1, \\ a_{m_1} &= \dots = a_{(m_2-1)} = b_2, \dots, \\ a_{m_q} &= \dots = a_n = b_{q+1}. \end{aligned} \quad (2)$$

此处  $1 < m_1 < m_2 < \dots < m_q \leq n$ 。如果  $b_{j+1} \neq b_j$ , 则  $m_i$  (未知) 即是一个突变点。随机误差  $e_1, \dots, e_n$ , 假定为独立同等方差  $\sigma^2$  且有期望值 0。

### 2.2 方差突变

在气候突变中, 如果考察的气候统计量  $\xi$  是气候变率, 则这种气候突变即为方差突变。

存在一次方差突变的提法是: 样本  $x_1, x_2, \dots, x_n$  独立且服从正态分布下

原假设  $H_0: x_i \sim N(\mu_i, \sigma^2)$

对立假设  $H_1$ : 对某个  $m, 1 \leq m \leq n$ , 及  $s_1 \neq s_2$ , 有

$$x_i \sim N(\mu_i, s_1^2), i = 1, \dots, m-1;$$

$$x_i \sim N(\mu_i, s_i^2), i = m, \dots, n. \quad (3)$$

(其中  $m$  未知)。给定信度  $\alpha$ , 如果检验肯定了  $H_1$ , 则  $m$  即为突变点。

### 2.3 回归突变

在气候突变中, 如果考察的气候统计量  $\xi$  是回归系数, 则这种气候突变即为回归突变。

存在一次回归突变的提法是: 有自变量  $x_1, x_2, \dots, x_n$  和因变量  $Y$ , 它们服从一线性回归方程, 但回归系数在  $m$  处有一次突变, 即:

$$y(i) = \begin{cases} a_0 + a_1 x_1(i) + \dots + a_p x_p(i) + e_i, & 1 \leq i \leq m \\ b_0 + b_1 x_1(i) + \dots + b_p x_p(i) + e_i, & m < i \leq n \end{cases} \quad (4)$$

如两向量

$$A = (a_0, a_1, \dots, a_p)', \quad B = (b_0, b_1, \dots, b_p)'$$

不相等(其中符号'为转置), 则  $m$  (其中  $m$  未知) 为一个回归突变点(当变成连续化模型时, 将式(4)中的  $i, m$  分别换成  $t, t_0$ )。

回归突变中也不限于线性的, 即也可以是非线性的。回归突变较为复杂, 文献[13]中所述的翘翘板突变和转折突变均属于这一类, 对于这两种特殊情况自变量即为时间  $t$ , 则相应的提法为(连续化的模型): 有变量  $y$ , 它是时间  $t$  的函数, 在区间  $[0, T]$  上观测量  $y(t)$  满足:

$$y(t) = \begin{cases} a_0 + a_1 t + e_i, & 0 \leq t \leq T_0 \\ b_0 + b_1 t + e_i, & T_0 < t \leq T \end{cases} \quad (5)$$

如两向量

$$A = (a_0, a_1)', \quad B = (b_0, b_1)'$$

不相等(其中符号'为转置), 则  $T_0$  (未知) 为一个翘翘板突变或转折突变点。另外, 对于两个气候变量之间存在一种特殊的回归突变, 称为相关突变, 即这两个变量的相关关系从一定时期到另一个时期突然发生倒转的现象。

### 2.4 概率突变

在气候突变中, 如果考察的气候统计量  $\xi$  是事件的概率, 即某一事件发生的概率在某一时刻有了突然的变化, 则称为概率突变。

存在一次概率突变的提法是: 有独立样本  $x_1, x_2, \dots, x_n$  ( $x_i$  是第  $i$  次观察中事件发生次数, 为 0 或 1)。如果其分布

$$\begin{cases} P(x_i = 1) = 1 - P(x_i = 0) = p_1, & i = 1, \dots, m-1; \\ P(x_i = 1) = 1 - P(x_i = 0) = p_2, & i = m, \dots, n. \end{cases} \quad (6)$$

而  $p_1 \neq p_2$ , 则  $m$  (未知) 即为概率突变点。

概率突变在实际中很有用而且很常见, 它与灾害性天气事件如旱涝概率变化等有联系。

### 2.5 空间型突变

在气候突变中, 如果考察的是气象要素空间结构分布某一时刻有了突然的变化, 则称为空间型突变。例如, 王绍武等<sup>[13]</sup>分析的我国过去 2000 年以来的旱涝分布类型的变化时, 发现旱涝型有在某一时期内的一种类型突然变化到另一类型的现象。这就是空间型突变。空间型突变是针对要素的空间场即针对多变量而进行的, 令空间场的网格点为  $p$ , 空间场样本序列为  $X_i (i=1, \dots, n)$  (如果要考虑一个气象要素, 则  $X$  为  $p$  维向量; 若考虑  $q$  个气象要素, 则  $X$  为

$p \times q$  维向量), 存在一次空间型突变的数学提法:

原假设  $H_0: EX_1 = EX_2 = \dots = EX_n$ ,

对立假设  $H_1$ : 对某个  $m, 1 \leq m \leq n$ , 及  $A_1 \neq A_2$ , 有

$$EX_1 = \dots = EX_{m-1} = A_1, \quad EX_m = \dots = EX_n = A_2 \quad (7)$$

(其中  $m$  未知)。给定信度  $\alpha$ , 如果检验肯定了  $H_1$ , 则  $m$  (未知) 即为突变点。此提法与多变量的均值突变的提法无异, 但它们的物理意义却是不同的。

## 2.6 分布突变

在气候突变中, 如果考察的是气象要素观测值同一时刻的分布某一时刻有了突然的变化, 则称为分布突变。比如说, 在一定时期内全球各测站的某要素的同一时刻的观测值遵循某种分布, 而在某一时刻突然变成另一分布。均值、方差等突变模型中与此不同的是观测值的分布在突变点前后都保持不变。

## 2.7 混合型突变

即上述几种突变型的两种或两种以上的复合形式。如某次气候突变, 其均值和方差都发生了突变。

以上类型可按几种方式分为两大类: 按联系分为(1)只考虑同一变量自身的情况, 如均值、方差、概率等突变; (2)考虑不同变量之间的关系发生了突变的情况, 如回归突变、相关突变等。按分布变化情况分为(1)突变前后变量的分布没有改变, 如均值、方差、概率等突变; (2)突变前后变量的分布发生改变, 如回归、分布等突变。另外, 还可以按空间尺度将气候突变分为局地性突变和非局地性突变<sup>[3]</sup>。所谓局地性突变指的是仅仅在某个局地内发生的突变, 而在其它地区无显著的变化。所谓非局地性突变是指许多不同地区同时发生了根本性的变化。

## 3 结 语

气候突变的研究无疑对气候系统的了解、对气候变化规律的认识及气候建模有重要意义。本文从统计角度对气候、气候突变的完备定义作了讨论, 给出一个完备的气候突变的定义, 将气候突变分为7种类型: 均值突变、方差突变、回归突变、概率突变、空间型突变、分布突变和混合型突变, 并给出了相应类型突变的数学提法。在后面几部分中, 将讨论各种类型突变的检测方法。

## 参 考 文 献

- [1] 叶笃正、曾庆存、郭裕玉福主编. 当代气候研究. 北京: 气象出版社, 1991
- [2] Lamb H. H. Climate: Present, Past and Future, Vol. 2, Climate History and the Future, Methuen and Co., LTD, London, 1977
- [3] 叶笃正. 中国的全球变化预研究. 北京: 气象出版社, 1992
- [4] 叶笃正、陶诗言、李彦村. 在6月和10月大气环流的突变现象. 气象学报, 1958, 29(3): 249~263
- [5] Goossens Ch, Berger A. Annual and seasonal climatic variations over the Northern Hemisphere and Europe during the last century. Annales Geophysicae series B, 1986, 4: 385~400
- [6] 符淙斌、王强. 气候突变的定义和检测方法. 大气科学, 1992, 16(4): 482~493
- [7] Yamamoto R, Iwashima T, Sanga N K. Climatic jump, a hypothesis in climate diagnosis. J. Met. Soc. Japan, Ser. II, 1985, 63: 1157~1160

- [8] Berger W H, Labeyrie L D. Abrupt Climatic Change—Evidence and Implication, NATO ASL Series, Series C., Mathematical and Physical Sciences, 1987, Vol. 216
- [9] Lorenz E N. 气候的可预报性,《气候的物理基础及其模拟》(曹鸿兴等译). 北京:科学出版社,1982,249~260
- [10] Leith C E. 全球气候研究,《全球气候》(J. T. Houghton 主编,金奎译). 北京:气象出版社,1986,24~49
- [11] 中国大百科全书出版社编. 中国大百科全书, 大气科学、海洋科学、水文科学. 北京:中国大百科全书出版社,1987
- [12] 丑纪范. 气候模拟——大气科学面临的战略任务,《大气数值模拟》(程麟生、丑纪范 编著). 北京:气象出版社,1991,38~69
- [13] Wang Shaowu, Zhao Zongci, Chen Zhenhua, Tang Zhongxin. Drought/flood variations for the last 2000 years in China and comparison with global climatic change, THE CLIMATE OF CHINA AND GLOBAL CLIMATE, Proceedings of the Beijing International Symposium on Climate Oct. 30—Nov. 3, 1984 Beijing, China, China Ocean Press, 1987, 20~29
- [14] 李建平、史久恩. 一百年来全球气候突变的检测与分析. 大气科学(增刊), 1993, 17, 132~140
- [15] 李建平. 非线性气候动力学的若干研究. [硕士学位论文] 兰州:兰州大学大气科学系, 1994

## COMPLETE DEFINITION AND TYPES OF ABRUPT CLIMATIC CHANGE

Li Jianping<sup>1)</sup>      Chou Jifan<sup>2)</sup>      Shi Jiuen<sup>2)</sup>

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

2) Beijing Meteorological College, Beijing 100081)

**Abstract** This paper is the part I of the series on the statistical methods for the abrupt climatic change. Its major motivation is to discuss definition and types of the abrupt climatic change. A complete definition of the abrupt climatic change is presented, and the abrupt climatic change is classified as seven types: mean value jump, variability jump, regression jump, probability jump, space—pattern jump, distribution jump and mixed type jump, and the mathematic formulations of the corresponding types are given.

**Key words** Climate; Abrupt Climatic Change; Scale; Statistic