颜鹏程,封国林,侯威,等. 2014. 500 hPa 温度场时间序列的年代际突变过程统计特征 [J]. 大气科学, 38 (5): 861-873, doi:10.3878/j.issn.1006-9895. 1403.13106. Yan Pengcheng, Feng Guolin, Hou Wei, et al. 2014. Statistical characteristics on decadal abrupt change process of time sequence in 500 hPa temperature field [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 38 (5): 861-873.

# 500 hPa 温度场时间序列的年代际突变过程统计特征

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

1 兰州大学大气科学学院,兰州 730000
 2 中国气象局国家气候中心,北京 100081
 3 扬州大学物理科学与技术学院,扬州 225002

摘 要 本文利用 Logistic 模型,推导出描述均值突变的分段函数,用该函数对可能存在突变的时间序列进行拟合,并结合概率分布理论,确定突变幅度最大的时段即为发生突变的过程,由此确定并分析序列中突变的开始时刻、突变幅度、突变变率、突变持续时间、系统不稳定特性等参数。对全球 500 hPa 温度场单点时间序列的突变持续过程展开研究:(1)对突变过程的开始时刻进行统计,发现 1956~1959、1970~1979、1986~1994、1994~2004 年开始的突变所占比重较大,几次突变过程中,平均来看除了 1986~1994 年开始的突变表现为降温,其余几次突变均表现为增温;并且每次突变时,增温幅度比较大的突变,其变率也较大;(2)从突变先后的空间分布上看,1956~1959、1970~1979 年检测到发生突变的格点在海洋上空的突变偏早、欧亚大陆上空偏晚,而 1986~1994 和 1994~2004 年突变期间这一情况正好相反;(3)针对每次突变过程中的突变幅度,低纬度区域温度发生突变的变化幅度较小、高纬度区域较大;(4)对突变持续时间的检测结果表明,在全球增暖背景下,完成一次突变的持续时间正在逐渐变短;(5)当系统突变正在进行时,系统的不稳定性较强。

关键词 气候突变 500 hPa 温度场 突变过程 持续时间 不稳定性
 文章编号 1006–9895(2014)05–0861–13 中图分类号 P467 文献标识码 A
 doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1403.13106

## Statistical Characteristics on Decadal Abrupt Change Process of Time Sequence in 500 hPa Temperature Field

YAN Pengcheng<sup>1, 2</sup>, FENG Guolin<sup>2, 3</sup>, HOU Wei<sup>2</sup>, and WU Hao<sup>2, 3</sup>

College of Atmospheric Sciences, Lanzhou University, Lanzhou 730000
 National Climate Center, China Meteorological Administration, Beijing 100081

3 Department of Physics, Yangzhou University, Yangzhou 225002

**Abstract** In this paper, we fit the time series, which likely has abrupt change processes (ACP), with piecewise function deducing for describing the mean abrupt change from the logistic model. Thus combined with the theory of probability distribution formed the basis for considering the process in which abrupt change amplitude is maximum, as is the ACP. The parameters reflecting the beginning moment of the abrupt change, abrupt change amplitude, abrupt change rate, persistence time, and instability are determined and analyzed. By testing the time series in a 500 hPa temperature field during the period 1948–2012, we determine the following results: (1) Abrupt changes started in 1956–1959, 1970–1979, 1986–1994, and 1994–2004. We considered more probabilities by testing the start moment of the ACP. In these changes,

资助项目 国家自然科学基金项目 41175067,国家重点基础研究发展计划项目 2012CB955901、2013CB430204

通讯作者 封国林, E-mail: fenggl@cma.gov.cn

收稿日期 2013-01-10, 2014-03-05 收修定稿

作者简介 颜鹏程,男,1987年出生,博士研究生,主要从事气候突变早期预警信号研究。E-mail: pch.yem@gmail.com

the temperatures of all changes in the means show increases except for that in 1986–1994, and the rate increases if the abrupt change amplitude is large. (2) In spatial distribution of the abrupt change moment, the moment of the grid points in which the abrupt change occurred in 1956–1959 and 1970–1979 above the sea occurred earlier than that in the grid points above Eurasia, whereas the abrupt changes in 1986–1994 and in 1994–2004 show opposite behavior. (3) The abrupt change amplitude of temperature occurring in low latitudes is lower than that occurring in high latitudes. (4) Under the context of global warming, the statistics distribution of the persistence time shows that an increasing number of grid points require shore time to complete an abrupt change. (5) During the abrupt change process, the instability of the system was enhanced significantly.

Keywords Abrupt climate change, 500 hPa temperature field, Abrupt change process, Persist time, Instability

## 1 引言

IPCC 第四次评估报告(IPCC, 2007)指出, 过去一百年(1906~2005年),全球温度升高 0.56~ 0.92°C;海平面自 1961 年以来以平均速度 1.8 mm a<sup>-1</sup> (1993 年以来是 3.1 mm a<sup>-1</sup>) 速度抬升; 而北极海 冰面积自 1993 年以来也正以 2.7% (10a)<sup>-1</sup> 的速度消 融。与此同时,越来越多有关地球气候系统的突变 证据正逐渐被发现(Overpeck and Cole, 2006)并 引起了各国决策者的密切关注(Will and Patrick., 2007)。有证据表明全球气候突变正在改变北半球 冰盖的格局 (Clark et al., 1999; Post et al., 2009), 气候突变还对海洋生态系统产生重大影响(Hoegh-Guldberg and Bruno, 2010), 而全球性的气候增暖 还引起了区域性干旱程度的增加(符淙斌和马柱 国, 2008)。因此开展全球增暖背景下的气候突变 的研究显得急切而重要(封国林等, 2001, 2002)。 季飞等(2011)对全球环流场关联分析后,认为存 在1978~1982 和1996~1998 两次明显的跃变;肖 栋和李建平(2007)在对海表温度(sea surface temperature, SST)的研究中发现, 1867~2005 年 存在七次较为明显的突变,并且突变的发生具有明 显的空间分布特征;严中伟等(1990a, 1990b), 严中伟(1992)在分析了 60 年代的 500 hPa 高度 场、SLP (Sea-Level Pressure)等要素后认为突变存 在一定的空间分布,并且不同要素突变的发生有一 定的超前滞后特性; 江志红等(2004a, 2004b)分 析了温度场的趋势变化同样具有一定的时空区域 分布特征; 丁一汇和张莉(2008)发现我国青藏高 原与其他地区气候突变时间相比具有明显滞后现 象,此外全球温度突变背景下还引发了极端事件的 频繁发生(龚志强等,2009)。

目前学术界对于气候突变尚无统一的定义 (Thom, 1972; 符淙斌和王强, 1992; 李建平等,

1996),加之突变的原因错综复杂,对于时间序列 突变点位置的确定也有不同的方法(封国林等, 2006, 2008, 2011), 传统的检测方法有: 低通滤 波法、Mann-Kendall (M-K)、滑动 T-检验 (MTT)、 Cramer、Yamamoto 等(魏凤英, 1999) 检测方法: 随后一些基于启发式分割(BG)算法(封国林等, 2005)、复杂度(侯威等, 2005)、去趋势波动分析 (杨萍等, 2008; 侯威等, 2011a, 2011b)、滑动移 除重标极差分析(MC-R/S)(何文平等, 2010)、滑 动移除近似熵(MC-ApEn)(金红梅等, 2012a, 2012b)等发展的突变检测新方法被有效地应用于 不同类型的突变检测。近几年, Scheffer et al. (2009), 吴浩等(2012, 2013)等进一步研究了 突变的早期预警信号。然而,对突变的认识,绝大 部分研究还仅仅认为气候突变是时间序列上的一 个"点",没有考虑突变事件的发生、发展乃至消 亡的过程,忽略了突变事件应有的过程性。

一个关于气候突变的完备性定义(李建平等, 1996) 描述为:对于某气候统计量,一个性质的气 候状态变化到另一个性质的气候状态,期间的过渡 期远小于它们各自状态的维持时间,则该统计量发 生突变。注意到气候系统在不同状态间跃变时的 "过渡期"是存在的,通过缩小观察窗口可以捕捉 到这一过渡期(突变持续过程)。对气候突变过程 的研究,尤其对突变幅度、突变变率(单位时间系 统变化幅度) 以及突变持续时间在全球区域分布的 研究,有助于认识气候突变的发生、发展直至消亡 的过程,也将大大有益于气候突变事件的前兆信号 捕捉研究和确定重点监测的区域。本文提出一种对 气候突变过程进行分析的方法,该方法从 Logistic 模型推导出满足突变的分段函数, 拟合出均值突变 过程,并结合统计概率,对气候突变的开始时刻、 突变幅度、突变变率、突变持续时间、系统不稳定 性等参数进行估计,以此为基础,系统考察了

1948~2012年500hPa温度场上突变时间序列的时空分布特征及突变过程中的规律性。

## 2 资料与方法

#### 2.1 资料

本文使用的是美国国家海洋与大气管理局 (NOAA, http://www.esrl.noaa.gov/)公布的 500 hPa 月平均温度场再分析资料,长度为 1948 年 1 月至 2012 年 9 月,分辨率为 2.5°×2.5°,空间格点分布 为经向 144 个,纬向 73 个 (其中±90°的 2 个极点 数值在实际计算中不参与计算)。

对 500 hPa 温度场各个格点上的资料进行去除 季节趋势预处理(距平化),处理后的数据不包含 月尺度的季节震荡信号。处理方法为序列上的数据 减去对应月份的平均,可用方程描述为:  $z'_{ym} = z_{ym} - \overline{z}_m$ ,其中 $z_{ym} \pi z'_{ym}$ 是预处理前后的数据, 角标 $y \pi m$ 分别表示年和月,显然有 $y \in [1948, 2009]$ ,  $m \in [1, 12], \overline{z}_m$ 是序列中第m月 62 年的平均。

#### 2.2 方法介绍

#### 2.2.1 Logistic 模型推导下的分段拟合函数

Logistic 模型被用来描述虫口数量由一个状态 扩张(收缩)至另一个状态的非线性过程(May, 1976;刘秉正和彭建华,2004),该模型的类似形 式出现在诸多气候、生物学模型中(Carpenter and Brock,2006,Guttal and Jayaprakash,2008),可用 方程表述如下:

$$\dot{x} = \kappa (x - \mu)(v - x), \qquad (1)$$

其中, *x* 是系统变量 *x* 对时间 *t* 的导数, 参数 *v*, *µ* 分 别表示虫口数量扩张(收缩)前后的两个状态, *κ* 被认为与阻碍虫口增长有关的不稳定性参数(颜鹏 程等, 2012; 闫冠华等, 2012)。方程的解如图 1 (加粗曲线)所示。

各参数分别如图 1 所示,其中 7 是数值计算中 的积分步长。显然这是一个均值突变过程,大量数 值计算结果表明,不同参数条件下,Logistic 模型 下的系统在两种状态之间转变的持续时间和转变 前后系统变量的变化幅度是不同的。为此,定义表 征系统突变过程的参量(颜鹏程等,2012):

$$h = \frac{x_{\beta} - x_{\alpha}}{t_{\beta} - t_{\alpha}}, \qquad (2)$$

h 称之为突变变率,其物理意义在于,系统在两个 状态(α,β)之间转换时系统状态变量的变化幅度 与持续时间的比,即单位时间系统的变化幅度,突 变变率越大表明系统变化幅度越大,持续时间越 短。方程(1)的解析解为

$$x = \frac{(x_0 - \mu)\nu e^{(\nu - \mu)(t - t_0)\kappa} - \mu(x_0 - \nu)}{(x_0 - \mu)e^{(\nu - \mu)(t - t_0)\kappa} - (x_0 - \nu)}, \quad (3)$$

将式 (3) 带入定义式 (2), 得到:  $h = (\mu - \nu)^2 \kappa \gamma$ ,

$$= (\mu - \nu)^2 \kappa \chi , \qquad (4)$$



图 1 Logistic 模型系统状态的演化曲线。虚线将曲线分为三段,其中斜线代表突变过程,  $\alpha$ , $\beta$ 分别是过程开始和结束状态 Fig. 1 Evolution curve of the Logistic model. The curve has been divided into three sections by the dashed lines, the diagonal represents the abrupt change process,  $\alpha$  represent the start state and  $\beta$  represent the end state

公式 (4) 中,  $\chi = (\beta - \alpha)/\ln[\beta(\alpha - 1)/\beta(\alpha - 1)]$ , 定 义  $\alpha = (x_{\alpha} - \nu)/(\mu - \nu)$ ,  $\beta = (x_{\beta} - \nu)/(\mu - \nu)$ , 其中  $x_{\alpha}, x_{\beta}$ 表示系统分别处于 $\alpha, \beta$ 处的状态。数值试验 表明 $\alpha, \beta$ 在一定范围内选取时对系数  $\chi$ 影响较小, 因此给定 $\alpha = 0.2, \beta = 0.8$  (闫冠华等, 2012)。公式 (4) 中的( $\mu - \nu$ )表示系统变量在突变过程中的变 化幅度。

据式 (4),则可以将时间序列划分三段,用函 数表示为

$$x' = \begin{cases} v & t \in [1, n_1) \\ h(t - n_1) + e, t \in [n_1, n_1 + n_2), \\ \mu & t \in [n_1 + n_2, n] \end{cases}$$
(5)

如图 1 虚线所示, x'表示拟合函数值, v, μ, h 为 前述参数, n<sub>1</sub>, n<sub>2</sub>, n<sub>3</sub>分别表示系统在暂态停留时间、 突变持续时间以及在稳态停留时间。标记这三段序 列分别为 l<sub>1</sub>, l<sub>2</sub>, l<sub>3</sub>, 利用如下方法实现参数提取:

(1) 对序列 *l*<sub>1</sub> 和 *l*<sub>3</sub>,分别求平均并标记为系统的两个状态*V*,*µ*,则

$$\nu = \sum_{t=1}^{n_1} x_t / n_1 , \quad \mu = \sum_{t=n_1+n_2+1}^{n_1+n_2+n_3} x_t / n_3 . \tag{6}$$

(2) 对序列 l<sub>2</sub>,用最小二乘法(黄嘉佑,1990) 近似求解斜率,即得突变变率

$$h = \sum_{t=n_1+1}^{n_1+n_2} t \cdot x_t / \sum_{t=n_1+1}^{n_1+n_2} t^2 .$$
 (7)

2.2.2 观察窗口的选取和突变识别标准

由于气候突变在不同时间尺度上有不同的表现

形式(李建平等,1996),需要选取合适的时间长 度作为观察窗口以考察该气候尺度下突变的发生 情况。设定原序列长度为*m*,取观察窗口 $\omega_i$ ,长度 为 $n(n \le m)$ ,对该观察窗口下的序列进行方法2.2.1 的参数提取,标记拟合得到的突变幅度为 $(\mu - \nu)_i$ , 并对之进行统计。图2是任意选取格点(10,110) 的温度序列,观察窗口长度取n=120,统计突变幅 度 $(\mu - \nu)_i$ 概率分布图,黑色曲线是高斯拟合结果, 可以看出对于温度序列的突变幅度近似满足正态 分布。

由于突变事件属于小概率事件,则可以对图 2 所对应的概率分布函数进行积分,认为落点在积分 区间 Ω 之外(如图中虚线标记的位置外侧)的 (μ-ν)<sub>i</sub>属于突变事件。查正态分布函数表(黄嘉 佑,1990)发现当 Ω >98%时,即有

 $|((\mu - \nu)_i - E(\mu - \nu)_i)/S(\mu - \nu)_i| > 2.35$  (8) 成立,此时通过式(8)可以给出判断突变是否发 生的标准,式(8)中*E*,*S*分别表示突变幅度序列 ( $\mu - \nu$ )<sub>*i*</sub>的数学期望和标准差。

## 3 500 hPa 温度场突变分布特征研究

对全球 500 hPa 温度场 1948 年 1 月到 2012 年 9 月的温度再分析资料,利用第 2.2 节方法进行气候 突变过程的识别,并估计得到突变开始时刻、突变 幅度、突变变率、突变持续时间等参量,考察 500 hPa 温度场全球范围内的温度突变事件在时间和空间



图 2 突变幅度 (µ-v); 概率的统计分布, 横坐标是突变幅度大小, 纵坐标是其统计概率

Fig. 2 Statistics distribution of probability of the abrupt change amplitude. x-axis is the amplitude of the abrupt change, and y-axis is statistics probability

上的分布情况。

#### 3.1 全球格点突变开始时刻统计规律及空间分布

考察突变持续时间小于 10 年的突变,本文取观 察窗口为 10 年,对每个格点的温度序列进行突变 识别,统计所有格点上检测到的突变开始时刻,其 空间分布如图 3 所示。在 1948 年 1 月到 2012 年 9 月,存在 1956~1959、1970~1979、1986~1994、 1994~2004 年四次(图 3 中加粗部分)较为明显的 气候突变(为分析方便,1970~1979 和 1986~1994 年两次突变没有进一步细化),这与针对 SST 和 SLP 资料(肖栋和李建平,2007;肖栋,2008; Xiao and Li, 2007; Xiao et al., 2012)的气候突变检测结果 是相一致的。

对 500 hPa 温度场的四次突变,图 4 分别给出 检测到发生突变格点的温度平均序列,并进行突变 过程拟合。从温度平均来看,发现开始于 1956~ 1959、1970~1979、1994~2004 的突变前后平均温 度升高,上升幅度分别为 0.37、0.16 和 0.23°C;而 开始于 1986~1994 年的突变,全球温度降低了 0.37°C。从突变变率来看,1986~1994 和 1994~2004 年的两次突变变率分别为 0.220 和 0.759°C a<sup>-1</sup>,明 显要大于 1956~1959(0.060°C a<sup>-1</sup>)和 1970~1979 (0.034°C a<sup>-1</sup>)的两次突变。就序列平均温度而言, 1986~1994 和 1994~2004 年的两次突变,序列平 均温度分别为 0.10°C a<sup>-1</sup> 和 0.18°C a<sup>-1</sup>,要高于 1956~1959(-0.20°C a<sup>-1</sup>)和1970~1979(-0.23 °C a<sup>-1</sup>),表明在增暖背景下的突变变率是增加的。 值得注意的是1970~1979和1986~1994年突变过 程中,在整体性均值突变的基础上还存在明显的转 折型突变。

图 5 是前述四次突变开始时刻的空间分布图, 整体上来看中高纬区域突变开始时刻偏早,低纬度 区域突变开始时刻偏晚。

1956~1959年开始的突变,海洋上发生偏早的 区域主要在北太平洋中北部、南太平洋中东部区 域、印度洋西南部、大西洋西南部以及北冰洋西半 球(为便于描述,本文涉及下垫面区域,均指对应 的500 hPa 温度层上的情况),陆地上主要以在南美 洲中东部、北美洲北部部分区域以及亚洲中东部和 欧洲西部偏早(1956~1957年)。发生突变偏晚 (1958~1960年)的区域主要在海洋上,北太平洋 东部、太平洋中东部、大西洋中部以及北冰洋东半 球。

1970~1979年开始的突变,海洋上北太平洋东 北部和中部、南太平洋南部、印度洋南部北冰洋西 半球突变发生均偏早(1970~1974年),突变发生 偏晚区域集中在太平洋中东部、印度洋北部和陆地 上的非洲中部、南美洲北部、欧亚大陆部分区域突 变发生偏晚(1976~1979年)。

1986~1994年开始的突变,突变偏早(1986~



图 3 全球格点突变开始时刻统计分布, *x* 坐标是突变开始时刻, *y* 坐标是依据极端阈值法(公式 6)识别出来的突变的统计概率 Fig. 3 Statistics distribution of the global grid points' abrupt change start moment, *x*-axis is the start moment of the abrupt change, *y*-axis is the statistical probability of the abrupt change detected by the extreme threshold value method (Eq. 6)



图 4 对四次突变过程平均温度序列的拟合,横坐标是年份,纵坐标是温度 Fig. 4 Fitting of the average temperature in four abrupt change processes, *x*-axis is year, and *y*-axis is temperature

1989年)区域集中在北太平洋中部、印度洋东南部、 北冰洋、北大西洋中部区域,陆地是主要在北美洲 西北部、亚洲东南部以及非洲东南部区域。突变发 生偏晚(1990~1994年)区域主要以南太平洋、印 度洋南部、南大西洋和欧洲中部区域。

1994~2004 年开始的突变,北太平洋中部区 域、印度洋中南部,亚洲大陆、南美洲南部区域突 变发生偏早(1994~1998 年),而太平洋中东部、 南太平洋,大西洋中部区域突变发生偏晚(2000~ 2004 年)。

总体上来看,1979年之前的突变,高纬度区域、 海洋上空的突变发生偏早,低纬度区域、亚欧大陆 上空偏晚;而 1979年之后的突变,东半球偏早一 些,西半球太平洋上空突变偏晚。

#### 3.2 不同突变时期温度突变幅度的分布规律

注意参数 v 和参数 # 表示系统突变前后的温度, μ-v 表示突变过程中的温度变化幅度。图 6 给出四次突变时段的突变幅度的空间分布,其中深蓝色系表示降温超过 3.5°C、浅蓝色表示降温幅度在 0~3.5°C, 黄色系表示升温幅度在 0~3.5°C、绿

色表示升温幅度超过 3.5°C。

1956~1959年突变,全球降温幅度较大区域集 中北太平洋北部、北美大陆南太平洋南部、北极、 南太平洋南部等区域;降温幅度较小的区域集中在 太平洋东海岸和西海岸,大西洋以及印度洋南部区 域。增温幅度较大区域集中在欧洲西部和南美洲南 部区域;增温幅度较小的区域在北美洲南部、北太 平洋中部、南太平洋东南部、澳大利亚南部等区域。

1970~1979 年突变全球降温幅度较大区域较 少,主要集中在欧洲西北部、北太平洋、北美洲东 北部、大西洋北部以及南极区域;降温幅度较小的 区域集中在非洲北部、印度洋中部、太平洋南部以 及大西洋南部等区域。而增温幅度较大的区域集中 在欧亚、北美大陆、北太平洋以及南太平洋南部区 域和南极。增温幅度较小的区域在太平洋、大西洋 和印度洋北部。

1986~1994 年突变幅度较大区域集中在欧洲、 太平洋北部区域;降温幅度较小的区域集中在太平 洋西海岸赤道区域、印度洋中部以及南太平洋南部 等区域。增温幅度较大区域主要集中在北美洲、北



图 5 不同时段的突变开始时刻空间分布: (a) 1956~1959 年; (b) 1970~1979 年; (c) 1986~1994 年; (d) 1994~2004 年。深蓝色区域表示突 变开始年份偏早, 橙色区域表示突变开始年份稍晚, 青绿区域突变开始年份则偏晚

Fig. 5 Spatial distribution of the abrupt change start moment in different processes, deep azure areas show that the moment of abrupt change is early, orange areas show that the moment of abrupt change is later, and turquoise areas show that the moment of abrupt change is much more later. Abrupt change starts in (a) 1956–1959, (b) 1970–1979, (c) 1986–1994, (d) 1994–2004



图 6 不同突变时期温度突变幅度的空间分布: (a) 1956~1959 年; (b) 1970~1979 年; (c) 1986~1994 年; (d) 1994~2004 年。品红色表示增 温幅度超过 3.5℃ 的区域,青绿色表示增温幅度在 3.5℃ 以内的区域,橙色表示降温幅度在 3.5℃ 以内的区域,深蓝色表示降温幅度超过 3.5℃的区域

Fig. 6 Spatial distribution of the temperature abrupt change amplitude in different processes, magenta means the temperature increase is more than 3.5°C, turquoise means the temperature increase is less than 3.5°C, orange means the temperature decrease is less than 3.5°C, deep azure means the temperature decrease is more than 3.5°C. Abrupt change starts in (a) 1956–1959, (b) 1970–1979, (c) 1986–1994, (d) 1994–2004

冰洋区域以及南极部分区域;增温幅度较小的区域 在太平洋中东部,大西洋以及印度洋部分区域。

1994~2004 年突变幅度较大区域集中在亚洲 中北部、美洲东北部以及南太平洋西南部等部分区 域;降温幅度较小的区域集中在太平洋中部区域以 及南太平洋东南部。增温幅度较大区域在主要集中 在南极和北半球高纬度区域;增温幅度较小的区域 在太平洋东西海岸、印度洋和大西洋,以及南美洲 北部和非洲东北部等部分区域。

整体来看,高纬度区域增降温幅度明显要高于 低纬度区域,1956~1959年突变期间大部分区域表 现为降温,且南北纬 40°以外区域的增降温幅度超 过 3.7°C;1970~1979年(北纬 30°以北及南纬 40° 以南区域的增降温幅度超过 4°C)、1986~1994年 (北纬 30°以北及南纬 50°以南的增降幅度超过 4°C)、1994~2004年(北纬 30°以北及南纬 50°以 南的增降幅度超过 3.5°C)突变增降温幅度较大的 格点向低纬度靠近。

#### 3.3 突变持续时间的统计规律

式(5)给出了均值突变序列突变过程中的持续时间,一次完整的突变过程,应该包含突变前后系统状态的保持时间和完整的突变持续时间,对于持续过程在10年内的突变,全球检测得到的突变持续时间统计结果如图7所示。

对四次突变的持续时间进行统计,其均在 60 个月前后出现极小值,而 1970~1979、1986~1994 和 1994~2004 年突变,在 30 个月处也出现极小值, 据此可以将突变分为三种类型,一是突变持续时间 不大于 30 个月的突变,定义为 A 类突变;二是大 于 30 个月但不大于 60 个月的突变,定义为 B 类突 变;对于大于 60 个月的定义为 C 类突变。统计三 类突变的持续时间,如表 1,属于 C 类突变的格点 数目除了 1970~1979 年期间的突变 53.04%外,其 余的均约为 60%,认为这一类型的突变没有变化; 属于 A 类突变的格点数目,则持续增加,在 1970~ 1979 年期间,这一类型的格点突增至 29.42%,表



图 7 不同突变时期各格点温度发生突变持续时间统计分布,横坐标是突变持续时间,纵坐标是统计概率:(a)1956~1959年;(b)1970~1979年; (c)1986~1994年;(d)1994~2004年

Fig. 7 Statistics distribution of the temperature persist time in different processes, *x*-axis is the persist time, and *y*-axis is its statistical probability. Abrupt change starts in (a) 1956–1959, (b) 1970–1979, (c) 1986–1994, (d) 1994–2004

明在全球增暖背景下,越来越多的格点上完成一次 突变的持续时间在缩短,持续时间较长的格点数基 本保持不变。

#### 表1 突变过程的持续时间分类统计

Table 1Statistics of different kinds of persist time inabrupt change process

	A 类突变占总	B 类突变占总	C 类突变占总
	突变百分比	突变百分比	突变百分比
1956~1959年	19.71%	19.90%	60.40%
1970~1979年	29.42%	17.54%	53.04%
1986~1994年	22.63%	17.63%	59.74%
1994~2004 年	25.75%	14.31%	59.94%

#### 3.4 突变检测过程中不稳定性探讨

闫冠华等(2012)对参数κ进行数值探讨表明 |κ|越大,系统混沌性越强,即认为此时系统不稳定 性越强。本文在对 500 hPa 温度场各格点温度序列 的参数提取过程中,对提取的参数κ进行统计分 析,以了解系统在突变过程中的不稳定性。

图 8 给出突变检测过程中参数 κ 的统计结果, 可以发现分布比较集中,其中 κ 值在[-0.5, 0.5] 之间的,1956~1959 年突变占 87.4%,1970~1979 年突变占 78.6%,1986~1994 年突变占 85.2%, 1994~2004 年突变占 80.9%,表明检测过程中大部 分的格点温度变化是平稳的,没有出现明显的不稳 定现象。从概率分布来看,1956~1959 年突变,近 似呈正态分布,概率极大位置在 0.12 附近;1970~ 1979 和 1994~2004 年突变期间的参数 κ 比较一致, 呈负偏态分布,概率极大位置在 -0.20 附近;1986~ 1994 年突变呈现正偏态分布,概率极大位置在 0.40 附近。表明 1956~1959 年温度序列发生的突变相 对比较稳定,1970~1979 和 1994~2004 年期间发 生的突变不稳定性增强,而 1986~1994 突变不稳 定性最明显。

图 9 给出所有突变区域的参数 κ 与系统 "始— 末状态"的关系相图,其中横坐标参数 ν 表示观察 窗口内的突变过程中的初始状态,纵坐标参数 μ 表 示观察窗口内的突变过程中的末状态,"始—末状 态"相空间中的点表示观察窗口内系统的变化状 态,本文在计算中选取观察窗口为 10a。可以发现 四次突变过程 "始—末状态"的取值总是分布在 二四象限,表明突变发生的过程中总是由"初值为 负"向"末状态为正",或者"初值为正"向"末 状态为负"发生的相位转换,意味着温度距平由负 相位到正相位或者由正相位向负相位的转换,即温度的增加或减少。

图 9 中蓝色和红色表示参数  $\kappa$  取值分别在-0.5 和+0.5 之外的突变,认为突变过程中系统的不 稳定性较强;浅蓝色和黄色表示  $\kappa$  取值在-0.5~0 和 0~0.5 之间的突变,认为突变过程中系统的稳定 性较强。图 9 中大部分突变的状态尤其是不稳定性 较强的突变主要分布在  $\mu$ ,  $\nu$  坐标轴上。已有研究 (闫冠华等,2013)分析认为观察窗口内突变发生 的"始一末状态"分布在坐标轴上表明此时系统 状态有四种可能的存在状态:(1) $\mu$ =0, $\nu$ >0 时, 突变处于减少至平衡状态;(2) $\mu$ =0, $\nu$ <0, 突变 处于增加至平衡状态;(3) $\mu$ >0, $\nu$ =0, 突变处 于平衡态向增加方向改变;(4) $\mu$ <0, $\nu$ =0, 突 变处于平衡态向减少方向改变。因此 500 hPa 温度 场的温度序列当系统处于这四种突变状态时,其系 统是不稳定的。

表 2 不稳定性参数  $\kappa$  随突变幅度参数  $\mu - \nu$  的统计规律 Table 2 Statistics distribution of the unstable parameter  $\kappa$ with the abrupt change amplitude parameter  $\mu - \nu$  changing

	0	1 1		0 0
	μ-ν >0 増温情况		μ−ν <0 降温情况	
	$\kappa > 0$ 情况	<i>κ</i> <0 情况	$\kappa > 0$ 情况	$\kappa < 0$ 情况
	突变占总	突变占总突	突变占总	突变占总
突变时段	突变百分比	变百分比	突变百分比	突变百分比
1956~1959年	17.4%	29.9%	20.2%	32.4%
1970~1979 年	30.6%	38.0%	19.3%	12.1%
1986~1994 年	15.9%	42.7%	24.0%	17.3%
1994~2004 年	30.1%	38.0%	20.3%	11.6%

进一步从参数 $\kappa$ 的取值正负来看,如表 2 所示, 在 $\mu > \nu$ 的区域(第二象限),基于参数 $\kappa$ 的突变格 点统计概率在四次突变期间,不同程度的出现  $\kappa < 0$ 的格点数目要大于 $\kappa > 0$ 的数目,前述文献 (颜鹏程等,2012)分析结果表明,当 $\mu > \nu, \kappa < 0$ 系统是不稳定的,因此进一步表明发生突变期间,系 统是非稳定系统。同样在 $\mu < \nu$ 的区域(第四象限) 较多的格点突变过程也出现当 $\mu < \nu, \kappa > 0$ ,表明 系统突变过程中的不稳定性。

### 4 结论

利用 Logistic 模型推导出分段参数方程,对 500 hPa 温度场各格点温度序列进行突变参数提取,从 而实现对突变的过程性分析。分析结果发现自 1948~2012 年,500 hPa 温度场出现四次明显的突 变过程: 1956~1959、1970~1979、1986~1994、



图 8 不同突变过程下的参数  $\kappa$  的统计分布, 横坐标是参数  $\kappa$  取值, 纵坐标是其概率 Fig. 8 Statistics distribution of the parameter  $\kappa$  in different abrupt change processes, *x*-axis is the parameter  $\kappa$ , and *y*-axis is its statistical probability



图 9 参数 κ 与始一末状态, x 轴突变过程开始状态, y 轴是结束状态 Fig. 9 Parameter κ and start–end states. *x*-axis is the start state of the abrupt change process, and the *y*-axis is the end state

1994~2004年。对四次突变过程分析,得到如下结论:

1) 从平均温度序列来看,1956~1959 年全球 平均温度距平-0.20°C,1970~1979 年-0.23°C, 而1986~1994 年和1994~2004 年则分别为 0.10°C 和 0.18°C。发生突变期间,1986~1994 年突变期间, 全球温度降低 0.33°C;1956~1959、1970~1979 和 1994~2004 年突变期间,全球增温分别为:0.37、 0.16 和 0.23°C。

2) 从突变早晚来看 1956~1959、1970~1979 年突变发生偏早区域主要在北半球的北太平洋中 北部、欧洲西北部和美洲东北部上空;南半球的南 太平洋、印度洋南部以及南美洲南部上空。而 1986~1994 和 1994~2004 年突变,北半球欧亚大 陆上空突变发生时间偏早、北太平洋相对偏晚;南 半球南太平洋上空同样突变偏晚。

3) 从全球温度突变幅度来看,在大约以南北 纬 40°附近分界,出现低纬度区域温度变化幅度较 小、高纬度区域较大的明显分界线。并且四次突变, 这一分界线有逐渐向低纬度靠近的趋势。

4) 从突变持续时间来看,约 20%的格点完成一次突变持续时间小于 30 个月,近 50%格点突变持续时间不超过 60 个月。属于 A 类突变格点(突变持续时间少于 30 个月)数目的比重也由 1956~1959 年的 19.71%,增加到 1986~1994 年的 22.63%和 1994~2004 年的 25.75%(其中 1970~1979 年为 29.42%)。

5) 对突变过程中的系统不稳定性分析结果表明, 检测过程中不少突变正处于平衡态向增/减少或 者正在增加/减少至平衡的状态, 在此期间系统的不 稳定性明显较强。

可以看出,对于较多文献中分析认为的七十年 代突变前后,500 hPa 温度场的分布型和序列的突 变演化都有了较大的结构性调整,具体表现为七十 年代末之前的两次突变和之后的两次突变,在突变 早晚区域的分布型由太平洋偏早、欧亚偏晚,转变 为欧亚偏早、太平洋偏晚。同时在突变持续时间上, 在全球增暖背景下,越来越多的格点完成一次突变 的持续时间缩短。在进一步的研究工作中将对更多 温度场的数据进行突变过程性分析,以期找到温度 序列的突变事件在垂直方向上的演化结构。

#### 参考文献(References)

Carpenter S R, Brock W A. 2006. Rising variance: A leading indicator

ecological transition [J]. Ecology Letters, 9: 311-318.

- Clark P U, Alley R B, Pollard D. 1999. Northern Hemisphere Ice-Sheet influences on global climate change [J]. Science, 286: 1104–1111.
- 丁一汇, 张莉. 2008. 青藏高原与中国其他地区气候突变时间的比较 [J]. 大气科学, 32 (4): 794–805. Ding Yihui, Zhang Li. 2008. Intercomparison of the time for climate abrupt change between the Tibetan Plateau and other regions in China [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 32 (4): 794–805.
- 董文杰, 封国林, 龚志强, 等. 2005. 基于启发式分割算法的气候突变检 测研究 [J]. 物理学报, 54 (11): 5494–5499. Dong Wenjie, Feng Guolin, Gong Zhiqiang, et al. 2005. Abrupt climate change detection based on heuristic segmentation algorithm [J]. Acta Phys. Sin. (in Chinese), 54 (11): 5494–5499.
- 封国林, 戴新刚, 王爱慧, 等. 2001. 混沌系统中可预报性的研究 [J]. 物理学报, 50 (4): 606–611. Feng Guolin, Dai Xin'gang, Wang Aihui, et al. 2001. On numerical predictability in the chaos system [J]. Acta Phys. Sin. (in Chinese), 50 (4): 606–611.
- 封国林, 董文杰, 贾晓静, 等. 2002. 海—气振荡子中的极限环解 [J]. 物理学报, 51 (6): 1 181–1185. Feng Guolin, Dong Wenjie, Jia Xiaojing, et al. 2002. On the dynamics behaviour and instability evolution of air-sea Oscillator [J]. Acta Phys. Sin. (in Chinese), 51 (6): 1181–1185.
- 封国林, 董文杰, 龚志强, 等. 2006. 观测数据非线性时空分布理论和方 法 [M]. 北京: 气象出版社, 1–227. Feng Guolin, Dong Wenjie, Gong Zhiqiang, et al. 2006. Nonlinear theories and methods on spatial-temporal distribution of the observational data (in Chinese) [M]. Beijing: China Meteorological Press 1–227.
- 封国林, 龚志强, 支蓉. 2008. 气候变化检测与诊断技术的若干新进展 [J]. 气象学报, 66 (6): 892–905. Feng Guolin, Gong Zhiqiang, Zhi Rong. 2008. Latest advances of climate change detecting technologies [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 66 (6): 892–905.
- 封国林, 侯威, 支蓉, 等. 2011. 极端气候事件的检测、诊断和可预测性 研究 [M]. 北京: 科学出版社, 350pp. Feng Guolin, Hou Wei, Zhi Rong, et al. 2011. Research on Detecting, Diagnosing and Predictability of Extreme Climate Events (in Chinese) [M]. Beijing: Science Press, 350pp.
- 符淙斌, 王强. 1992. 气候突变的定义和检测方法 [J]. 大气科学, 16 (4): 482–493. Fu Congbin, Wang Qiang. 1992. The definition and detection of the abrupt climatic change [J]. Scientia Atmospherica Sinica 16(4): 482–493.
- 符淙斌, 马柱国. 2008. 全球变化与区域干旱化 [J]. 大气科学, 32 (4): 752-760. Fu Congbin, Ma Zhuguo. 2008. Global change and regional aridification [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 32 (4): 752-760.
- 龚志强, 王晓娟, 支蓉, 等. 2009. 中国近 58 年温度极端事件的区域特 征及其与气候突变的联系 [J]. 物理学报, 58 (6): 4342–4352. Gong Zhiqiang, Wang Xiaojuan, Zhi Rong, et al. 2009. Regional characteristics of temperature changes in China during the past 58 years and its probable correlation with abrupt temperature change [J]. Acta Physica Sinica (in Chinese), 58 (6): 4342–4352.
- Guttal V, Jayaprakash C. 2008. Changing skewness: An early warning signal of regime shifts in ecosystems [J]. Ecology Letters, 11: 450–460.

何文平, 吴琼, 邓北胜, 等. 2010. 一种基于重标极差方法的动力学结构

突变检测新方法 [J]. 物理学报, 59 (11): 8264-8271. He Wenping, Wu Qiong, Deng Beisheng, et al. 2010. A new method of detecting abrupt dynamic change based rescaled range analysis [J]. Acta Phys. Sin. (in Chinese), 59 (11): 8264-8271.

- 侯威,封国林,董文杰. 2005. 基于复杂度分析 logistic 映射和 Lorenz 模型的研究 [J]. 物理学报, 54 (8): 3940–3946. Hou Wei, Feng Guolin, Dong Wenjie. 2005. Investigation about the Lorenz model and Logistic equation based on the complexity [J]. Acta Phys. Sin. (in Chinese), 54 (8): 3940–3946.
- 侯威,章大全,周云,等. 2011a. 一种确定极端事件阈值的新方法:随机 重排去趋势波动分析方法 [J]. 物理学报, 60 (10): 109202. Hou Wei, Zhang Daquan, Zhou Yun, et al. 2011a. Stochastic re-sorting detrended fluctuation analysis: A new method to define the threshold of extreme event [J]. Acta Physica Sinica (in Chinese), 60 (10): 109202.
- 侯威,章大全,钱忠华,等. 2011b. 基于随机重排去趋势波动分析的极端低温事件研究及其综合指标的建立 [J]. 物理学报, 60 (10): 109203.
  Hou Wei, Zhang Daquan, Qian Zhonghua, et al. 2011b. Extremely low temperature and its composite index based on stochastically re-sorting detrended fluctuation analysis [J]. Acta Physica Sinica (in Chinese), 60 (10): 109203.
- Hoegh-Guldberg O, Bruno J F. 2010. The impact of climate change on the world's marine ecosystems [J] Science, 328: 1523–1528.
- 黄嘉佑. 1990. 气象统计分析与预报方法 [M]. 北京: 气象出版社, 28-30, 130-139. Huang Jiayou. 1990. Meteorological Statistical Analysis and Prediction (in Chinese) [M]. Beijing: China Meteorological Press, 28-30, 130-139.
- IPCC, 2007. Climate Change. 2007. Synthesis Report [M]. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2007.
- 季飞,支蓉,龚志强,等. 2011. 全球环流系统关联性的时空演化特征研 究 [J]. 气象学报,69 (6): 1038–1045. Ji Fei, Zhi Rong, Gong Zhiqiang, et al. 2011. Analysis of temporal and spatial characteristics of correlations between the global circulation systems [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 69 (6): 1038–1045.
- 金红梅,何文平,侯威,等. 2012a. 不同趋势对滑动移除近似熵的影响 [J]. 物理学报, 61 (6): 069201. Jin Hongmei, He Wenping, Hou Wei, et al. 2012a. Effects of different trends on moving cut data-approximate entropy [J]. Acta Phys. Sin. (in Chinese), 61 (6): 069201 (in Chinese)
- 金红梅,何文平,张文,等. 2012b. 噪声对滑动移除近似熵的影响 [J]. 物理学报,61 (12): 129202. Jin Hongmei, He Wenping, Zhang Wen, et al. 2012b. Effect of noises on moving cut data—Approximate entropy [J]. Acta Phys. Sin. (in Chinese), 61 (12): 129202.
- 江志红,李建平,王梅华,等. 2004a. 20世纪全球温度场趋势变化的区域特征分析 [J]. 气候与环境研究, 9 (3): 422–434. Jiang Zhihong, Li Jianping, Wang Meihua, et al. 2004. Regional characteristics of the trend change for global temperature field during the last century [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 9 (3): 422–434.
- 江志红,李建平,屠其璞,等. 2004b. 20世纪全球温度年代和年代际变 化的区域特征 [J]. 大气科学, 28 (4): 545–558. Jiang Zhihong, Li Jianping, Tu Qipu, et al. 2004. Regional characteristics of the decadal and interdecadal variations for global temperature field during the last century

[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 28 (4): 545-558.

- 李建平, 丑纪范, 史久恩. 1996. 气候突变的完备定义和类型 [J]. 北京 气象学院, (1): 7-12. Li Jianping, Chou Jifan, Shi Jiuen. 1996. Complete definition and types of abrupt climate change [J]. Journal of Beijing Meteorological College (in Chinese), (1): 7-12.
- 刘秉正, 彭建华. 2004. 非线性动力学 [M]. 北京: 高等教育出版社, 215-218. Liu Bingzheng, Peng Jianhua. 2004. Nonlinear Dynamics (in Chinese) [M]. Beijing: Higher Education Press, 215-218.
- May R M. 1976. Simple mathematical models with very complicated dynamics [J]. Nature (in Chinese), 261: 459–467.
- Overpeck J T, Cole J E. 2006. Abrupt change in earth's climate system [J]. Annu. Rev. Environ. Resour., 31: 1–31.
- Will M, Patrick M. 2007. Why is it so difficult? Trade liberalization under the Doha Agenda [J]. Oxford Review of Economic Policy, 23, 347–366
- Post E, Forchhammer M C, Bret-Harte M S, et al. 2009. Ecological dynamics across the arctic associated with recent climate change [J]. Science, 325: 1355–1358.
- Scheffer M, Bascompte J, Brock W A, et al. 2009. Early-warning signals for critical transitions [J]. Nature, 461: 53–59.
- 雷内·托姆. 1972. 结构稳定性与形态发生学 [M]. 成都:四川教育出版
  社. Thom R. 1972. Stability Structural and Morphogenesis (in Chinese)
  [M]. Chengdu: Sichuan Education Press.
- 魏凤英. 1999. 现代气候统计诊断与预测技术 [M]. 北京: 气象出版社, 62-76. Wei Fengying. 1999. Modern Climatic Statistical Diagnosis and Forecasting Technology (in Chinese) [M]. Beijing: China Meteorological Press, 62-76.
- 吴浩,侯威,钱忠华,等. 2012. 基于气候变化综合指数的中国近 50 年 来气候变化敏感性研究 [J].物理学报, 61 (14): 149205. Wu Hao, Hou Wei, Qian Zhonghua, et al. 2012. The research on the sensitivity of climate change in China in recent 50 years based on composite index [J]. Acta Physica Sinica (in Chinese), 61 (14): 149205.
- 吴浩,侯威,颜鹏程. 2013. 试用临界慢化原理探讨气候突变 [J]. 物理 学报, 62 (3): 039206. Wu Hao, Hou Wei, Yan Pengcheng. 2013. Try to use the principle of critical slowing down to discuss the abrupt climate change [J]. Acta Physica Sinica (in Chinese), 62 (3): 039206.
- 肖栋. 2008. 全球海气系统年代际突变的研究 [D]. 兰州大学大气科学 学院博士学位论文. Xiao Dong. 2008. Study of the decadal abrupt changes of global ocean-atmosphere system [D]. Ph. D. dissertation (in Chinese), College of Atmospheric Science, Lanzhou University.
- 肖栋, 李建平. 2007. 全球海表温度场中主要的年代际突变及其模态 [J]. 大气科学, 31 (5): 839–854. Xiao Dong, Li Jianping. 2007. Main decadal abrupt changes and decadal modes in global sea surface temperature field [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 31 (5): 839–854.
- Xiao D, Li J P. 2007. Spatial and temporal characteristics of the decadal abrupt changes of global atmosphere-ocean system in the 1970s [J]. J. Geophys. Res. (in Chinese), 112, D24S22, doi: 10.1029/2007JD008956.
- Xiao D, Li J P, Zhao P, 2012. Four-dimensional structures and physical process of the decadal abrupt changes of the northern extratropical ocean-atmosphere system in the 1980s [J]. Int. J. Climatol. (in Chinese), 32: 983–994, doi:10.1002/joc.2326.

- 严中伟,季劲钧,叶笃正. 1990a. 60年代北半球夏季气候跃变——I. 降水和温度变化 [J]. 中国科学 (B 辑), 20: 97–103. Yan Zhongwei, Ji Jinjun, Ye Duzheng. 1990a. Northern Hemispheric summer climatic jump in the 1960s, Part I—Rainfall and temperature [J]. Science in China Series B (in Chinese), 20: 97–103.
- 严中伟,季劲钧,叶笃正. 1990b. 60 年代北半球夏季气候跃变——II.海 平面气压和 500 hPa 高度变化 [J]. 中国科学 (B 辑), 20: 879–885. Yan Zhongwei, Ji Jinjun, Ye Duzheng. 1990b. Northern Hemispheric summer climatic jump in the 1960s, Part II—Sea level pressure and 500 hPa height[J]. Science in China Series B (in Chinese), 20: 879–885.
- 严中伟. 1992. 60 年代北半球夏季气候跃变过程的初步分析 [J]. 大气科 学, 16 (1): 111–119. Yan Zhongwei. 1992. A primary analysis of the process of the 1960s northern hemispheric summer climatic jump [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 16 (1): 111–119.
- 颜鹏程, 侯威, 胡经国. 2012. 基于 Logistic 模型的均值突变时间序列临 界预警研究 [J]. 物理学报, 61 (18): 189202. Yan Pengcheng, Hou Wei, Hu Jingguo. 2012. The critical warning research of the mean time series mutations based on Logistic model [J]. Acta Phys. Sin. (in Chinese), 61 (18): 189202.
- 闫冠华,颜鹏程,侯威,等. 2012. 一种基于 Logistic 模型的过程性突变 分析方法及其应用 [J]. 物理学报, 62 (7): 079202. Yan Guanhua, Yan Pengcheng, Hou Wei, et al. 2012. A method of abrupt change process analysis based on Logistic model and its applications [J]. Acta Phys. Sin. (in Chinese), 62 (7): 079202.
- 杨萍, 侯威, 封国林. 2008. 基于去趋势波动分析方法确定极端事件阈 值 [J]. 物理学报, 57 (8): 5333–5342. Yang Ping, Hou Wei, Feng Guolin. 2008. Determining the threshold of extreme events with detrended fluctuation analysis [J]. Acta Phys. Sin. (in Chinese), 57 (8): 5333–5342.