

一百年来全球气候突变的检测与分析*

李建平 史久恩

(兰州大学大气科学系, 730001) (北京气象学院)

提 要

本文利用连续滑动 t -检验法对全球气候突变进行了全面检测,发现:

(1) 全球气温在本世纪有两次突然增暖,一次在 20 年代;一次在 70 年代末 80 年代初。还有一次突然降温,北半球在 60 年代,南半球在 40 年代中期,不过降温期持续较短。

(2) 中国气温在本世纪有两次突变,一次在 10 年代,表现为迅速增暖;一次在 40 年代中,表现为急剧降温。

(3) 大气环流强度有两次突变;一次在上世纪 90 年代,是突然加强;一次在本世纪 30 年代末 40 年代初,为迅速减弱。

(4) 南亚夏季风有三次突变,一次在上世纪 90 年代,是突然减弱;一次在本世纪 20 年代,为突然加强;另一次在 60 年代,弱期持续较短。

最后,对各次突变间的联系及可能机制进行了初步分析。

关键词: 气象突变;检测与分析。

一、引 言

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^[1,2];可以预料,未来还将变化不息。气候变动对人类活动和经济效益有很大的影响。因此,随着现代气候的不断变暖^[3,4],近一、二十年来气候异常的增多^[5],日益引起了人们的关注。气候的变化有渐变和突变两种形式。气候的渐变表现在相当长时间内在某一相对稳定态附近振动;气候的突变则是相对稳定态的不连续跳跃。由于突变具有“滞后性”,因此,气候一旦发生突变,天气过程的大背景随即改变,人类生活的大环境也随之发生变化。所以,气候突变现象一出现,便引起了广泛的重视。

自从叶笃正等^[6]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,符淙斌等、林学椿等、Yamamoto、Fletcher、Goossens 等^[7-11]对气候突变进行了广泛的研究,获得了许多重要结果;符淙斌等^[11]对气候突变的定义和检测方法进行了较全面的综述。然而,目前的几种气候检测方法都还有待于进一步改进和完善。同时,它们共同存在的一个弱点是对系统已发生的突变不能作出全面检测。为此,本文提出一种连续滑动 t -检验法试图弥补以上的不足之处,并且,利用它对一百年来全球(及南、北半球)气温、中国气温、南亚夏季风活动强度、大气环流强度等指标进行了全面的检测,发现了一些新的情况,特别是检测到本世纪 70 年代末 80 年代初的一次全球范围的突变性增

1993 年 4 月 7 日收到,7 月 18 日收到修改稿。

* 国家自然科学基金资助项目。

暖,目前的气候正处于这次突变之后的相对稳定期。最后,揭示了各指标突变间的关系,并对突变的可能机制作了初步的讨论。

二、气候突变的定义及连续滑动 t -检验法

气候突变是气候运动渐变过程的中断,是从一个相对稳定态到另一相对稳定态的不连续跳跃现象,表现在时空上就是统计特性的显著变化。气候突变的类型可见文献[11]。本文讨论的是气候均值突变。

在统计学上,检验两随机样本平均值显著性差异的方法(母体方差未知)称为 t -检验法。这是研究气候突变的一种较好的方法。然而,这种方法在选择样本长度时往往带有较大的人为性。故我们在此法的基础上,提出连续滑动 t -检验法以弥补这一不足。

设一气候序列为 x_1, x_2, \dots, x_n ,为检验其是否存在突变,我们对它进行连续考察,即将它分解为连续的 $(n - a + 1)$ 个时段 $X_1, X_2, \dots, X_{n-a+1}$,其中

$$\begin{aligned} X_1 &= (x_1, x_2, \dots, x_a) \\ X_2 &= (x_2, x_3, \dots, x_{a+1}) \\ &\vdots \\ X_{n-a+1} &= (x_{n-a+1}, x_{n-a+2}, \dots, x_n) \end{aligned}$$

a 称为观察的时间尺度,它不是某个气候平衡态的持续时间,它的取值对应着我们z对何种气候尺度的变化感兴趣。例如,若我们讨论的是 10 年尺度的气候变化,那就取 $a=10$ 年。因此,变换尺度 a 可使我们对各种时间尺度的气候变化进行研究。当然,不同尺度的气候其变化规律是不同的。这连续的 $(n - a + 1)$ 个时段 $X_i (i = 1, 2, \dots, n - a + 1)$

的平均值 \bar{X}_i 正好是原序列以时间尺度为 a 的滑动平均值,即 $\bar{X}_i = \frac{1}{a} \sum_{j=i}^{i+a-1} x_j$ 。假设这 $(n - a + 1)$ 个时期的总体平均值在无显著性差异的条件下,即假设 $H_0: \mu_i - \mu_j = 0$, 定义如下统计量

$$t_{ij} = \frac{\sqrt{a-1}(\bar{X}_i - \bar{X}_j)}{S_{ij}} \quad i, j = 1, 2, \dots, n - a + 1$$

式中 $S_{ij} = \sqrt{S_i^2 + S_j^2}$, $S_i^2 = \frac{1}{a} \sum_{l=i}^{i+a-1} (x_l - \bar{X}_i)^2$ 为第 i 个时期的方差。显然 $t_{ij} \sim t(2a-2)$ 分布。给定信度 α , 若 $|t_{ij}| \geq t_\alpha$, 则否定原假设 H_0 , 说明第 i 个时期 $(x_i, x_{i+1}, \dots, x_{i+a-1})$ 与第 j 个时期 $(x_j, x_{j+1}, \dots, x_{j+a-1})$ 有显著性差异。计算出所有的 $t_{ij} (i, j = 1, 2, \dots, n - a + 1)$ 并将它们列成一个 T 矩阵,即

$$T = (T_{ij})_{(n-a+1) \times (n-a+1)} = \begin{cases} 0, & |t_{ij}| < t_\alpha; \\ 1, & |t_{ij}| \geq t_\alpha. \end{cases} \quad i, j = 1, 2, \dots, n - a + 1$$

显然 T 为一对称阵。然后,再将 T 阵转化为直观图(如图 1)。图中点 (X_i, X_j) 上的值为 T_{ij} , 空白则表示其值为 0; 阴影则表示其值为 1, 即达到了显著水平。如果序列存在一次不连续跳跃,则矩阵 T 可以分为四个子块,

$$T = \begin{pmatrix} \mathcal{F}_{11} & \mathcal{F}_{12} \\ \mathcal{F}_{21} & \mathcal{F}_{22} \end{pmatrix}$$

其中子块 \mathcal{F}_{11} 、 \mathcal{F}_{22} 都是零方阵, $\mathcal{F}_{12} = (\mathcal{F}_{21})^T$ 为单位阵, T 表示转置. 突变的起始点也便容易确定出来. 从图 1 可见:

(1) X_i 前的所有以尺度为 a 的时段之间都无显著性差异, 表明它们是属于同一气候性质的, 即 X_i 前的时期 (x_1, x_2, \dots, x_i) 处于一种基本状态;

(2) X_i 后的所有以尺度为 a 的时段之间都无显著性差异, 表明它们是同一气候性质的, 即 X_i 后的时期 $(x_{i+1}, x_{i+2}, \dots, x_n)$ 处于另一种基本状态;

(3) X_i 前的时期中任何一个以尺度为 a 的时段都与 X_i 后的时期中任何一个以尺度为 a 的时段有显著性差异, 表明 X_i 前的时期 (x_1, \dots, x_i) 与 X_i 后的时期 (x_{i+1}, \dots, x_n) 是两种不同的基本状态. 由于两种基本状态之间转换的时间(即过渡期)远小于各自状态所经历的时期, 因此它们的转变是跳跃式的. 对于图 1, 突变的起始点为 $x_i = X_i - X_i \cap X_{i+1}$ (在实际中, 一般存在一个过渡期).

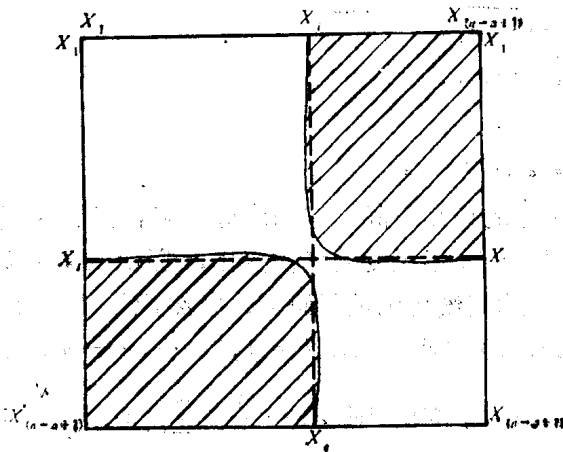


图 1 发生一次突变序列的连续滑动 t -检验计算草图
阴影部分为达到显著水平, 突变点为
 $x_i = X_i - X_i \cap X_{i+1}$.

由此可见, 连续滑动 t -检验法的思想是首先确定出哪些时段是属于一种性质的气候状态, 哪些时段是属于另一性质的气候状态, 若两种基本状态转换期远小于各自状态的持续期, 则它们的转换是突变的. 应该注意的一点是, 尺度 a 的取值不同, 特别是当 a 取值相差很大时, 所得到的过渡期也有可能不同. 这是可以理解的, 因为不同时间尺度的气候变化是不相同的. 正如, 在小的时间尺度(如 10 年)的气候变化中可以认为是突变的, 而在

在大的时间尺度(如百年、千年等)的气候变化中也许并不能认为是突变. 问题的关键是看我们研究何种尺度的气候变化.

连续滑动 t -检验法的优点是: (1) 避免了 t -检验法中选择样本长度的人为性, 客观性强, 判断过渡期直观简便; (2) 能对系统以不同的时间尺度进行研究; (3) 能对系统所发生的突变进行全面的检测, 即使是最近十多年前才发生的气候突变也能检测出来; (4) 能对系统长期变化的不同阶段进行区分. 下面我们就用它对一百年来全球气候突变进行全面检测, 所用资料是: (1) P. Jones 所整理的全球(及南、北半球)气温序列(1854—1991); (2) 中国年平均温度序列(1873—1990); (3) 南亚夏季风活动强度——印度夏季风中断日数(1888—1984)^[12]; (4) 大不列颠群岛西风型日数(1861—1976)^[13].

三、全球气候突变的检测

1. 全球气温突变

图 2(a)、(b) 分别是对全球(及南、北半球) 10 年、30 年尺度气温变化的连续滑动 t -检验图。对于时间尺度为 10 年的全球气温变化有:

(1) 在 1925 年左右发生突变, 到 1929 年左右完成, 过渡期为 1925—1929 年。结合原序列知, 全球气温在本世纪 20 年代经历了一次突发性增暖, 这与许多作者的结果一致。

(2) 在 1978 年左右发生第二次突发性增暖。北半球的情况不如全球及南半球明显。当代气候正处于这次突变后的相对暖期。关于这次突变, 其它气候突变检测方法没有检测出来。

(3) 图 2(a_2)、(a_3) 中还有两个小特点: ①在其阴影区, (a_2) 中 60—70 年代, (a_3) 中 40 年代中—50 年代中有几小块空白, 结合原序列知, 北半球在 60—70 年代有一次小的突变性降温(这与文献[13]的结论一致); 南半球在 40 年代中—50 年代中有一次小的突变性降温, 它们持续的时间较短; ②在 (a_2)、(a_3) 中的空白处有很小的阴影区, 这是小尺度的变化。

对于时间尺度是 30 年的全球气温变化只有一次突变, 在 1913 年左右发生, 到 1920 年左右完成, 过渡期为 1913—1920 年。这是与 10 年际尺度变化所不同的。可见, 不同尺度的气候变化是不尽相同的。

2. 中国气温突变

对中国气温的连续滑动 t -检验结果见图 3(a)、(b)。由图可知本世纪中国气温发生了两次大的突变。

(1) 时间尺度是 10 年时, 大致在本世纪 10 年代发生一次突变性增暖, 过渡期为 1913—1918 年。比北半球气温突变性增暖略早。对于 30 年尺度的变化, 则是在 1904 年左右发生突变。

(2) 在本世纪 40 年代, 中国气温发生一次突变性降温(10 年际尺度过渡期为 1946—1949 年; 30 年际尺度变化则是在 1942 年左右发生), 降温期一直持续到最近才结束(在 $a = 5$ 年时可以看出)。这是与全球气温发展所不同之处。

3. 大气环流强度变化

Lamb^[4] 指出大不列颠岛西风频率的变化可以作为全球环流能量变化的指标。图 4 是对大不列颠岛西风频数连续滑动 t -检验的结果。由图可知: (1) 在上世纪 90 年代初, 大气环流强度发生一次突变, 其强度迅速增强; (2) 时间尺度是 20 年的大气环流强度在本世纪 40 年代前后发生第二次突变, 环流强度迅速减弱, 一直持续到 70 年代。30 年尺度的大气环流强度则是在本世纪 30 年代发生第二次突变。

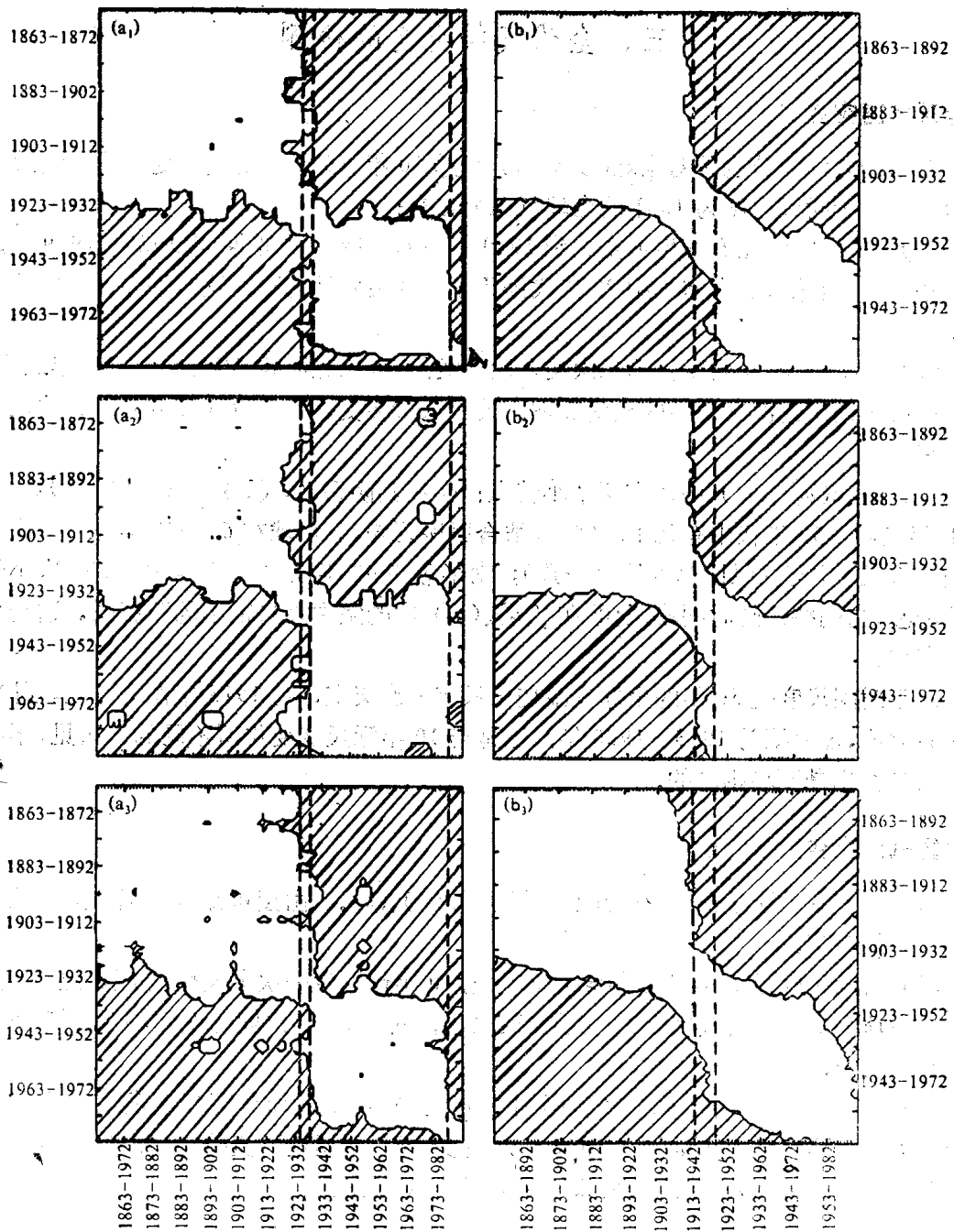


图 2 全球气温的连续滑动 t -检验计算图

(a_1)、(a_2)、(a_3) 分别是以时间尺度为 10 年的全球、北半球及南半球的计算图(达到 99% 的置信度)。

(b_1)、(b_2)、(b_3) 分别是以时间尺度为 30 年的全球、北半球及南半球的计算图(达到 99.9% 的置信度)。

4. 南亚夏季风活动强度变化

图 5 是对印度夏季风中断日数连续滑动 t -检验的检测结果。由图可得下面几个事实：(1)在本世纪 10 年代末发生一次突变，即南亚夏季风日数突然减少，夏季风活动突然

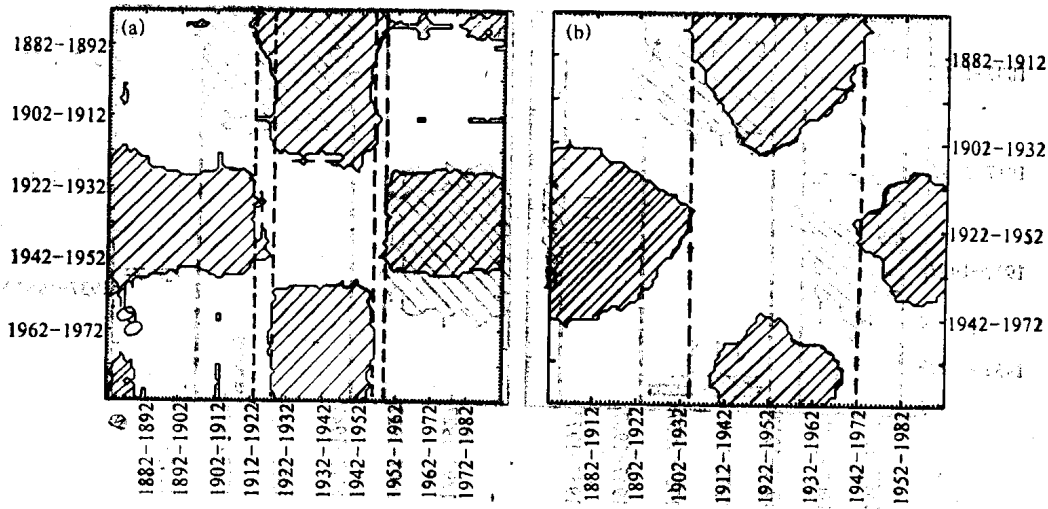


图3 中国气温的连续滑动 t -检验计算图
 (a) 时间尺度 $\alpha = 10$ 年(达到 99% 的置信度);
 (b) 时间尺度 $\alpha = 30$ 年(达到 99.9% 的置信度).

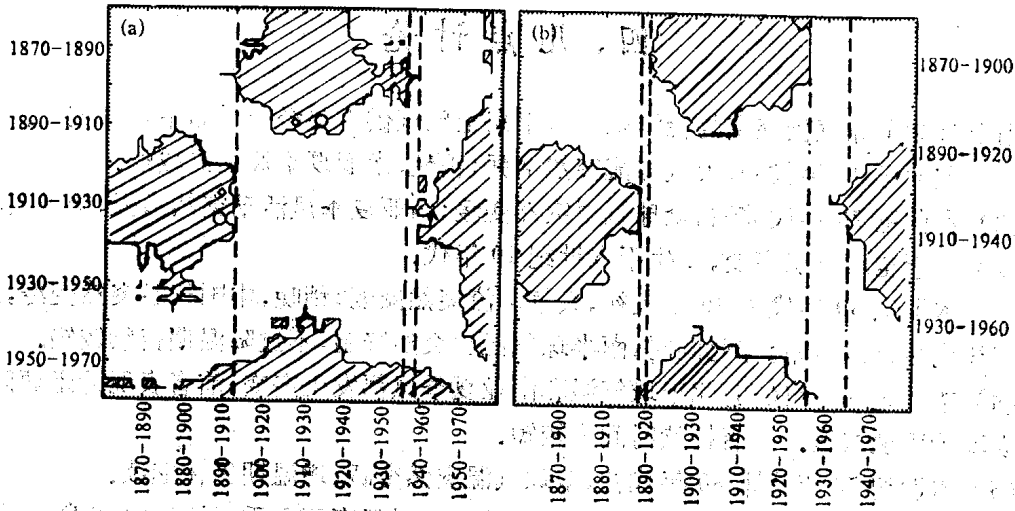


图4 大不列颠岛西风频数连续滑动 t -检验的计算图
 (a) 时间尺度 $\alpha = 20$ 年(达到 95% 的置信度);
 (b) 时间尺度 $\alpha = 30$ 年(达到 98% 的置信度);

增强;(2)在本世纪 60 年代初有一次突变,即南亚夏季风日数突然增强,夏季风活动突然减弱;不过这次减弱持续时间较短,从图中知,已经结束,并向活跃期过渡;(3)在以 $\alpha=20$ 年时,上世纪 90 年代发生一次突变,夏季风活动突然减弱;(4) 在本世纪 40 年代中期到 50 年代末这一段时期,夏季风活动强度与 10 年代末突变前后的不活跃期和活跃期均无显著不同,表明这一时期是过渡性质的。以上四点结论与文献[10]分析南亚夏季风活动的长期变化几条结论一致。表明连续滑动 t -检验法不仅在检测气候突变上有较强的功能,而且还能用它来对系统长期变化的不同阶段进行区分。

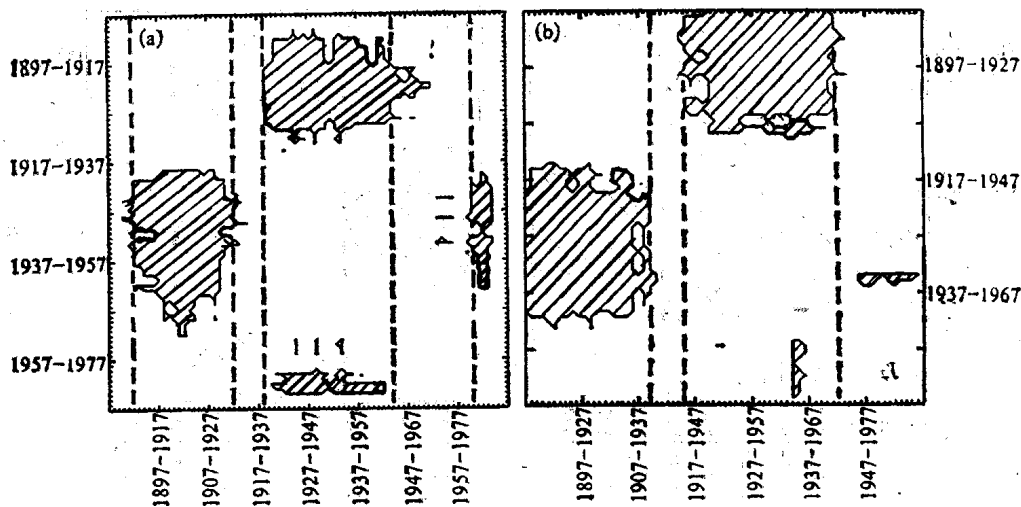


图 5 印度夏季风中断日数的连续滑动 t -检验计算图

(a) 时间尺度 $\alpha = 20$ 年(达到 95% 的置信度);

(b) 时间尺度 $\alpha = 30$ 年(达到 95% 的置信度).

四、几点讨论

由上节对全球气候突变的检测知一百年来全球气候主要经历了如下几次突变:

(1) 上世纪 90 年代初,大气环流突然增强;稍晚,南亚夏季风突然减弱。

(2) 本世纪 20 年代前后,全球气温突然变暖;南亚夏季风活动突然增强;中国气温突然增暖略早于全球气温突变,发生于本世纪 10 年代。

(3) 本世纪 30 年代末 40 年代初,大气环流突然减弱;稍晚,中国气温突然变冷,冷期一直持续到最近才结束;与此同时,南半球气温也突然降温,不过降温期持续较短。

(4) 本世纪 60 年代初,北半球气温和南亚夏季风都发生突变,前者表现为迅速降温;后者表现为迅速减弱。二者持续时间都较短。

(5) 本世纪 70 年代末 80 年代初,全球气温突然变暖,增温期仍在继续。

上世纪 90 年代初,大气环流突然加强与稍晚些时候南亚夏季风活动的突然减弱是否有联系? 文献 [1] 指出季风强度的变化是伴随全球环流强度变化情况下发生的。上述现象表明上世纪 90 年代中南亚夏季风活动的突然减弱很可能是动力性质的(由于没有更多的资料对比进行全面分析,所以目前只是一种推测,有待进一步论证)。

自大气环流在上世纪 90 年代突然加强后,直到本世纪 30 年代大气环流盛行强的纬向环流。这样在这段时期里,南北空气交换减少,赤道加热不断发展,暖空气不断蓄积,中纬度逐渐增暖,从而使得全球气温自本世纪初持续稳定地上升。当增暖达到一定程度,便在本世纪 20 年代前后发生突变。当然,这次迅速增暖的另一原因则是在这一时期里,北半球大火山活动减弱,对流层低层透明度增加^[4]。地球低层大气接受的太阳辐射增多,从而温度升高。全球气温的迅速增暖则导致了南亚夏季风在 20 年代的突然增强^[10]。还值得一提的是,中国气温的增暖略早于全球气温突变,表明气候突变的局地不同步性。

当全球气温急剧增暖的同时, 它也开始反作用于大气环流。伴随着赤道加热的不断发展, 两极地区却不断冷却。这样使得南北温差增大。南北温差的增大, 则导致了大气处于不稳定状态。为了取得热平衡, 两极的冷空气持续吹向赤道, 而赤道暖空气则朝向两极, 南北向的热量交换不断发展, 大气环流的强度开始减弱。直到 40 年代全球气温达到极大值时, 大气环流完成了盛行环流型式的转换, 这种转换是突然的。经向环流的突然加强, 环流的阻塞形势便频繁出现, 极地冷空气不断流向较低纬度, 气候转冷。中国地区的气温对这次环流突变的响应是较快的, 在 40 年代中发生了突变性降温, 冷期一直持续到最近才结束。这再次表明了气候突变的局地特点。与此同时, 南半球气温也有一次急剧的降温, 不过降温期到 50 年代末结束, 60 年代又转向增暖。这归因于风和洋流穿过赤道向北的热量输送净通量减少了^[1]。同时, 由于北极气旋活动的频率大大增加^[2], 这样就使得北半球气温发生急剧的下降, 但只是较短期的变化。这次变化还应归因于 60 年代初太阳辐射强度已经有 2% 或 3% 的减弱^[3]。与南半球 60 年代增暖而北半球急剧降温的同时, 南亚夏季风活动有一次明显的减弱。

对于上述几次突变, 主要是自然原因造成的。但对于本世纪 70 年代末 80 年代初的急剧增暖则主要归因于人为因素^[4]。一方面是人类工业活动急剧发展而向大气排放大量的石化燃料所导致的温室效应; 一方面则是森林的大量破坏。本世纪 80 年代的十年中, CO₂、CH₄、N₂O、氟里昂及其它温室气体的增加, 使得平衡态的地球平均气温升高 0.16℃^[4]。这次增暖, 除了人为因素外, 自然原因也是重要的。理由是诸如 CO₂、CH₄ 等温室气体的增加根源是在北半球的地面上, 这些气体大约需要两年时间才能输送到南半球^[4]。然而, 这次增暖在南半球反应得比北半球明显且略早(从 $a = 5$ 年时可清楚地看出)。关于这种自然原因及其对气候增暖的内部机理是什么是非常值得研究的, 因它对我们认识 80 年代的剧烈增暖中自然原因到底起到多大作用将是很有意义的。

致谢: 林学椿副研究员曾与作者作过一些有益的讨论, 特此致谢。

参 考 文 献

- [1] Lamb, H. H., 1977, *Climate: Present, Past and Future*, Vol. 2, *Climatic History and the Future*, Methuen and Co., LTD, London.
- [2] 叶笃正、曾庆存、郭裕福主编, 1991, 当代气候研究, 气象出版社。
- [3] 王绍武, 1990, 当前气候变化及其演变趋势, 旱涝气候研究进展(叶笃正等主编), 气象出版社。
- [4] 田中正之著, 石广玉等译, 1992, 地球在变暖, 气象出版社。
- [5] 朝仓 正著, 周力译, 1991, 气候异常与环境破坏, 气象出版社。
- [6] 叶笃正、陶诗言、李麦村, 1958, 在 6 月和 10 月大气环流的突变现象, 气象学报, 29(3), 249—263。
- [7] Fu, C. B. (符淙斌) & Fletcher, J. O., 1982, Proceedings of the Seventh Annual Climate Diagnostic Workshop, NCAR, Boulder, Oct. 18—22, 223—230. PB82—219486.
- [8] Fu, C. B. & Fletcher, J., 1988, Large Signals of Climatic Variation over the Ocean in the Asian Monsoon Region, *Advances in Atmospheric Sciences*, 5, 389—404.
- [9] Goossens, C. & Berger, A., 1983, Proceedings of the Second International Meeting on Statistical Climatology, Lisboa, 26—30/09/1983.
- [10] 符淙斌、王强, 1991, 南亚夏季风长期变化中的突变现象及其与全球迅速增暖的同步性, 中国科学, B 辑 No. 6, 666—672.
- [11] 符淙斌、王强, 1992, 气候突变的定义和检测方法, 大气科学, 4(16), 482—493.
- [12] Parthasarathy & Pant, 1985, Proceedings of the First WMO Workshop on the Diagnosis and Prediction of Monthly and Seasonal Atmospheric Variations Over the Global, College Park,

- U. S. 29 July-2 August, 1985, WMO/TD, No. 87, 235-246.
- [13] 严中伟、李劲筠、叶笃正, 1990, 60年代北半球夏季气候跃变, I. 降水和温度变化, 中国科学B辑, 97-103.
- [14] М.И. Будыко, 1990, 未来气候变化的经验估计(孙长先译), 气象科技, No. 5, 30-35
- [15] 李建平、史久恩, 用连续滑动 t -检验法检测全球气温突变, 待发表.

The Detection and Analysis of the Abrupt Change of the Global Climate during the Last 100 Years

Li Jianping

(Department of Atmospheric Sciences, Lanzhou University, 730001)

Shi Jiuen

(Beijing Meteorological College)

Abstract

In this paper, the successive moving t -test technique for detection of the abrupt climatic change is presented and applied to detect the abrupt climatic change on global scale during the last one hundred years. The results show that:

(1) The global temperature experienced two abrupt warming in this century, one in the 1920s, the other around 1980. In addition, the Northern Hemisphere in the 1960s and the Southern Hemisphere in the middle of 1940s experienced an abrupt cooling respectively, but the detemperature term is short.

(2) Temperature in China experienced two abrupt changes, i.e., the abrupt warming in the 1910s and the strong cooling in the middle of 1940s.

(3) The general atmospheric circulation intensity experienced two abrupt changes. They are abrupt intensification in the 1890s and rapid weakening in the late 1930s up to the early 1940s.

(4) The summer monsoon of South Asia experienced three abrupt changes, they are rapid decrease in the 1890s, abrupt increase in the 1920s and strong decrease in the 1960s (the decline term is short).

Finally, the relation of each abrupt change and the probable mechanism are analysed.

Key words: Abrupt climatic change; Detection and analysis.