

气候变暖的显著性检验以及温度场 和降水场的时空分布特征

宋燕^{1,2} 季劲钧¹

- 1 中国科学院大气物理研究所东亚区域气候-环境重点实验室, 全球变化东亚区域研究中心, 北京 100029
2 中国气象局培训中心, 北京 100081

摘要 用近百年来全球温度和降水资料研究了20世纪20年代和80年代两次全球性气候突然变暖现象, 并利用Mann-Kendall突变检验方法对其进行突变检验。分析表明, 温度场和降水场的经验正交分解函数的主分量(EOF1), 能够很好地表征相应变量年代际时间尺度上突变空间分布型的主要特征, 因而用温度资料的EOF1讨论了两次突然变暖的全球空间和时间分布特点。在全球两次突然变暖的同时也发生了相应的降水空间分布型突变。对比分析表明, 两次变暖事件的基本特征并不相同, 说明引起两次突变的物理机制也不相同。

关键词 气候变暖 经验正交函数 年代际 突变检验

文章编号 1006-9585 (2005) 02-0157-09 **中图分类号** P461 **文献标识码** A

The Remarkable Test of Abrupt Climatic Warming and Spatiotemporal Distribution Features of Temperature and Precipitation Fields

SONG Yan^{1,2}, JI Jin-Jun²

- 1 Key Laboratory of Regional Climate-Environment for Temperate East Asia, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences; START Regional Center for Temperate East Asia, Beijing 100029
2 China Meteorological Administration Training Centre, Beijing 100081

Abstract Based on the analyses of global temperature and precipitation data for the last 100 years, this paper studied the two abrupt climatic warmings especially in the 1920s and in the 1980s in 20th century, and made abrupt changes test with Mann-Kendall Method. The results of the first eigenvector of Empirical Orthogonal Function (EOF1) of temperature and precipitation data indicate that the main features on spatial and temporal modes could be represented very well on decadal and interdecadal time scales. The first eigenvector of temperature data reflects the two abrupt climatic warmings very clearly. At the same time the precipitation fields also change abruptly in accordance. Contrasting the two abrupt warming events, we can find that in most aspects they are very different, so the physical mechanisms for the two events should be different also.

Key words climatic warming, Empirical Orthogonal Function, interdecade, abrupt change test method

1 引言

气候变暖是气候连续变化的结果, 但却是通

过突变短暂过程来完成的。所谓气候突变是指一种气候状态在很短时期内迅速转变为另一种状态^[1,2]。从时间尺度上看, 气候突变可存在于各个

收稿日期 2003-12-05 收到, 2005-05-10 收到修定稿

资助项目 中国科学院东亚区域气候-环境重点实验室开放课题

作者简介 宋燕, 女, 1965年出生, 博士, 副研究员, 主要从事气候变化和季风的研究工作。Email: songyan@cma.gov.cn

时间尺度^[1]；以空间尺度来区分，气候存在局地性和非局地性突变^[3]。目前的研究可以看出，20 世纪以来气候变暖是年代际尺度的全球气候事件。

关于气候的年代际变化是近十几年来的热门话题，有许多学者进行了大量的研究。对近百年来出现的气候突然变暖的研究，国内的工作主要有如 20 世纪 20 年代全球变暖^[4~6]，人们利用不同方法检测到 20 年代北半球平均温度系列中的增暖信号。20 世纪第 2 次突然变暖发生在 80 年代^[7]，并被认为是 20 世纪以来增暖最强的一次。

除此以外，还有一些作者提出不同时间和地域的其他增暖事件。有人认为在 1976 年左右北半球地表面气温、全球地表面气温和海洋温度迅速增加^[8~10]，与此同时，热带东太平洋突然变暖，温带中北太平洋变冷^[11]。

到目前为止，人们对 20 世纪以来气候究竟发生哪几次突然变暖众说不一，而且变暖后全球气候场的空间分布如何，区域气候之间有什么不同等问题，人们并没有作客观的分析和总结。本文认为有必要对 20 世纪全球气候突然变暖做较客观可靠的分析和总结，使人们对目前自身所处的环境有一个较清醒的认识，这对认清未来气候的发展趋势非常有益。

近年来，由于气候资料不断健全和完善，处理方法不断改进，使得我们能够对全球气候年代际的变化有一个客观的分析，为今后的研究提供了基础。在前人工作的基础上，利用较完善的全球气候资料，找出变暖的可能时段，给出每次突变的空分布型，分析不同地域在突变前后的不同特征，并且对比不同变暖事件的时空分布特征。

2 所用资料和方法

本文所用温度资料选用美国 CDIAC NDP-020/R2 Jones $5^\circ \times 5^\circ$ 网格点资料，时间长度是 1900 年到 1996 年；降水资料选用美国 NASA 的网格月降水总量^[12]，网格分辨率是 $2.5^\circ \times 2.5^\circ$ ，资料长度从 1900 年到 1995 年。

在分析全球温度场和降水场的空分布型时，选用经验正交函数分解方法（EOF），因为气候突

变的空分布型至关重要，用此方法可以看到在同一个气候突变过程中，不同地区对事件的不同响应。

用来检测气候突变的统计方法，选用 Mann-Kendall 检验方法，与其他方法相比，其优点在于检测范围较宽，人为因素较少，定量化程度较高^[13]。这种方法直观，计算方便，但不适宜多个变点的情形^[14]。

Mann-Kendall 检验方法：

第一步，对样本序列 $\{x_t\}$ ， $t=1, 2, \dots, l$ ，且 $l \leq N$ 构造一个统计量

$$d_l = \sum_{j=1}^l \sum_{i=1}^{j-1} a_{ij}, a_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{当 } i < j \text{ 时, } x_i < x_j \\ 0, & \text{其他} \end{cases}$$

第二步，令 $l=1, 2, \dots, N$ ，计算 N 个统计量 $U(d_l)$ 。统计量 d 表示长度为 l 的序列 $X_1, \dots, X_l$ 中按大小顺序排列的样本个数，称为顺序统计量。

$$U(d_l) = (d_l - E(d_l)) / \sqrt{\text{Var } d_l},$$

式中 $E(d_l)$ 和 $\text{Var } d_l$ 在 $x_1, \dots, x_N$ 相互独立且有连续分布时可计算得到

$$E(d_l) = l(l-1)/4,$$

$$\text{Var } d_l = l(l-1)(2l+5)/72,$$

此时 $U(d_l)$ (l 固定时) 渐近服从标准分布 $N(0, 1)$ ($l > 10$ 即够)。

第三步，将序列 $\{x_t\}$ 反向构成序列 $\{x'_t\}$ ， $x'_t = x_{N-t+1}$ ，对 $\{x'_t\}$ 重复前两步运算，得到统计量 $U'(d'_l)$ ， $l=1, 2, \dots, N$ 。令 $U^*(d_l) = -U'(d'_l)$ ， $l' = N-l+1$ ，将 $U^*(d_l)$ 与 $U(d_l)$ 画于同一张图上。

为突出气候年代际的变化，文中所用资料全部经过 5 年滑动平均，以滤去年际振荡；夏季的资料全部用 6、7、8 月共 3 个月的数据作平均，以代表此年夏季的平均情况。

3 全球温度突然变暖的 Mann-Kendall 显著性检验

本文做了 1900 年到 1995 年全球夏季平均温度异常随时间变化的曲线（图略）。从分析中可以得出，自 20 世纪初以来全球一直在增暖。在增暖的大趋势下，还叠加着一些变冷的小波动。

从整个变化趋势来看，全球温度的变化有着明显的年代际变化。1909 年左右是 20 世纪全球最冷的时期，以后温度持续上升。1943 年左右温度达到一个暖期峰值，1959 年左右达到第二个峰值，其后温度下降。1976 年温度又开始上升，直到 1995 年，达到 20 世纪最高值。从变化趋势来看，全球温度应划分为 3 个时段：1900~1935 年是冷期，1936~1975 年是正常时期，1976 年至今为暖期。从冷期到暖期温度变化最大为 0.6℃左右。

20 世纪以来，全球年平均温度异常随时间变化趋势（图略）与全球夏季平均温度异常随时间变化趋势非常相似，所划分的几个冷暖时段两图也基本一致。所以，全球夏季平均温度异常变化基本能代表全球年平均温度异常变化。以下均利用夏季平均气候值来代表全年的气候平均值。

因为 Mann-Kendall 突变检验方法不适宜于多个变点的情形，为检验出全球气候变暖，参照前人的工作结果，我们将全球网格温度资料场化分为两个时段分别进行讨论，以突出每个时段内的气候突然变暖。这两个时段分别是 1900~1950 年和 1951~1995 年。

图 1a 和图 1b 分别是全球夏季 1900~1950 年和 1951~1995 年平均温度曲线的 Mann-Kendall 突变检验曲线。从图 1a 中可以看到大约在 1926 年左右两条曲线有一个交点，并且仅有一个交点，可以说明全球温度夏季场在 20 世纪 20 年代经历了一次显著的突然变暖过程。同样，图 1b 表明在 1987 年左右两条曲线也有一个交点，并且也仅有一个交点，说明在 20 世纪 80 年代也存在一次显著的全球突然变暖过程。

下面利用全球夏季温度和降水资料的 EOF 分析对两次全球变暖进行空间分布型分析。

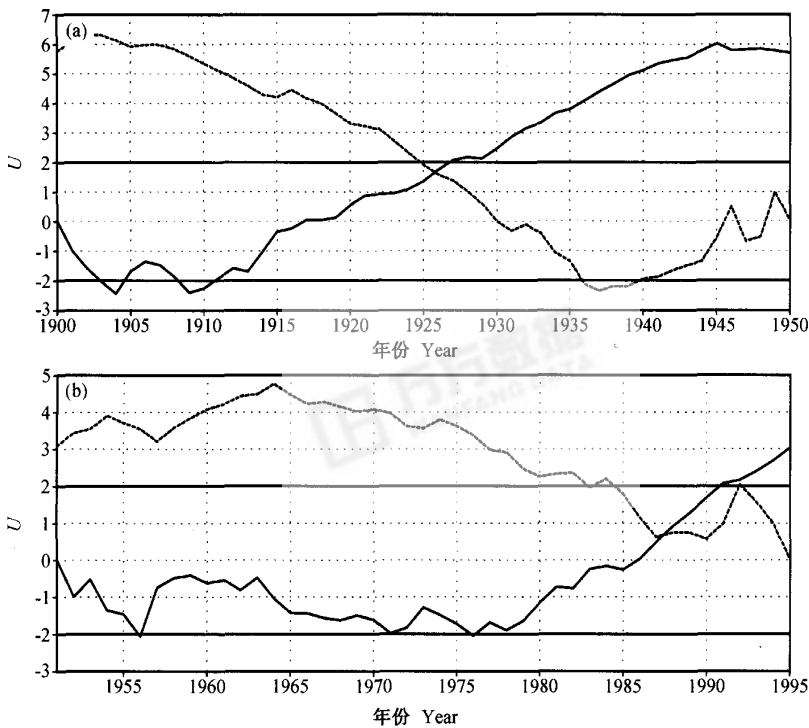


图 1 (a) 1900~1950 年和 (b) 1951~1995 年全球夏季平均温度的 Mann-Kendall 突变检验。实线是 Mann-Kendall 突变检验中的 $U(d_t)$ ，虚线是 $U^*(d_t)$ 。下同

Fig.1 (a) 1900—1950 and (b) 1951—1995 global summer surface temperature Mann-Kendall significance test for abrupt change. The solid line is $U(d_t)$ and the dashed line is $U^*(d_t)$, the same as later figures

4 20 世纪 20 年代气候突然变暖

1900~1950 年 EOF 分析的第一主分量情况如图 2 所示, 其方差贡献为 22.9%。图 2a 是第一主分量的空间分布型, 图 2b 是第一主分量的时间系数变化, 图 2c 为时间变化 (图 2b) 的 Mann-Kendall 突变检验。图 2c 检验结果表明, 在 20 年代全球温度场有一次明显的突然变暖过程, 这与图 1a 的结果一致。在此之前全球温度以负距平为主, 之后全球大范围增温。如图 2a 所示, 全球只有部分地区存在降温异常, 大部分陆地和海洋有增温趋势。海洋上赤道中东太平洋有一个降温异常区, 南半球印度洋有一降温异常区, 南大西洋有一降温异常区。其他几乎全部为增温异常区。

由此可见, 全球夏季温度场在 20 世纪 20 年代有一次突然增暖过程, 但并不是所有地区都增暖, 一些地区反而降温。值得注意的是还有些区域的温度并没有明显变化, 比如零等值线所在区域。

从 EOF 分析可知, 其第一分量的变化趋势基本能够反映实际温度场的主要变化特征。

下面再来看降水场的情况。其 EOF 第一主分量的空间分布、时间系数变化和 Mann-Kendall 突变检验如图 3 所示, 方差贡献为 12.8%。从图 3c 中可见, 全球夏季降水场在 20 世纪 10 年代末期也经历了一次突变。图 3a 和 3b 表明, 突变以后从俄罗斯北部地区经我国华北地区到印度北部以及非洲东北部带状地区降水量有增大趋势。可看到, 亚非季风区北部一些干旱半干旱地区的降水量偏多, 其两侧区域降水量偏少。

应该说全球的降水场在同一个时段与温度场一起经历了突变, 这种全球范围内不同气候要素场同步变化原因, 需要进一步探讨。

有学者对 20 世纪 20 年代突变也有研究。符淙斌等^[5]曾用 Mann-Kendall 分析了 20 年代季风水风活动突然增强的季风气候突变现象, 并将这一突变现象与该时期的全球迅速增暖联系起来。

5 20 世纪 80 年代气候突然变暖

以下分析 1970~1996 年夏季温度场变化情

况。EOF 第一主分量空间分布的时间序列和 Mann-Kendall 检验曲线, 如图 4 所示, 方差贡献为 25.2%。从图 4c 可知, 在 20 世纪 80 年代中期左右全球温度再一次经历突变增暖, 这与图 1a 的结果一致。突变之后全球大部分陆地和海洋有增温异常。同样, 也有一些地区有降温现象, 一些地区的变化不明显。

这次增温与 20 世纪 20 年代增温大部分地区并不相似, 例如 20 年代北太平洋和北大西洋地区以增温异常为主, 而 80 年代这些地区却有降温异常的区域; 20 年代赤道中东太平洋为降温异常, 而 80 年代以增温异常为主; 另外, 20 年代印度洋地区增温趋势以北印度洋增温、南印度洋降温为主要特征, 而 80 年代以西印度洋降温、北印度洋增温为主要特征, 也即海温异常的分布型不同。说明 20 年代突变和 80 年代突变在机制上应该是有所不同的。

1970~1995 年夏季降水场的情况如图 5 所示。图 5c 中 Mann-Kendall 检验表明, EOF 分析的第一主分量 (方差贡献是 16.0%) 的时间系数变化 (图 5b) 在 1985 年前后有一次明显的突然变化, 从负值变为正值, 属于一次突变。突变之前亚洲大陆中部地区、印度中南部及北非 Sahel 地区为降水异常减少地区, 突变后成为异常多雨地区。欧亚大陆上 30~50°N 地带以降水增多为主要特征, 这种降水增多带与 20 年代突变后的降水增多带并不相似。但 80 年代突变以后我国华北部分地区、印度北部地区以及北非东部降水并没有明显的增多, 这是 80 年代与 20 年代突变增暖事件不同的地方。

全球夏季降水网格点资料 1990~1995 年与 1980~1985 年差值图 (图略) 表明, 在实际降水场中确实存在以上特征, 说明 EOF 分析的第一主分量能够代表实际气候场的变化特点。

尽管第一分量的方差贡献所占比例较小, 但因其与实测资料场的分布特征很相似, 所以仍能代表全球温度场和降水场年代际变化的主要特征。

迄今为止, 研究 20 世纪 80 年代突然变暖的人仍不太多, 其现象和机制需要进一步深入探讨。

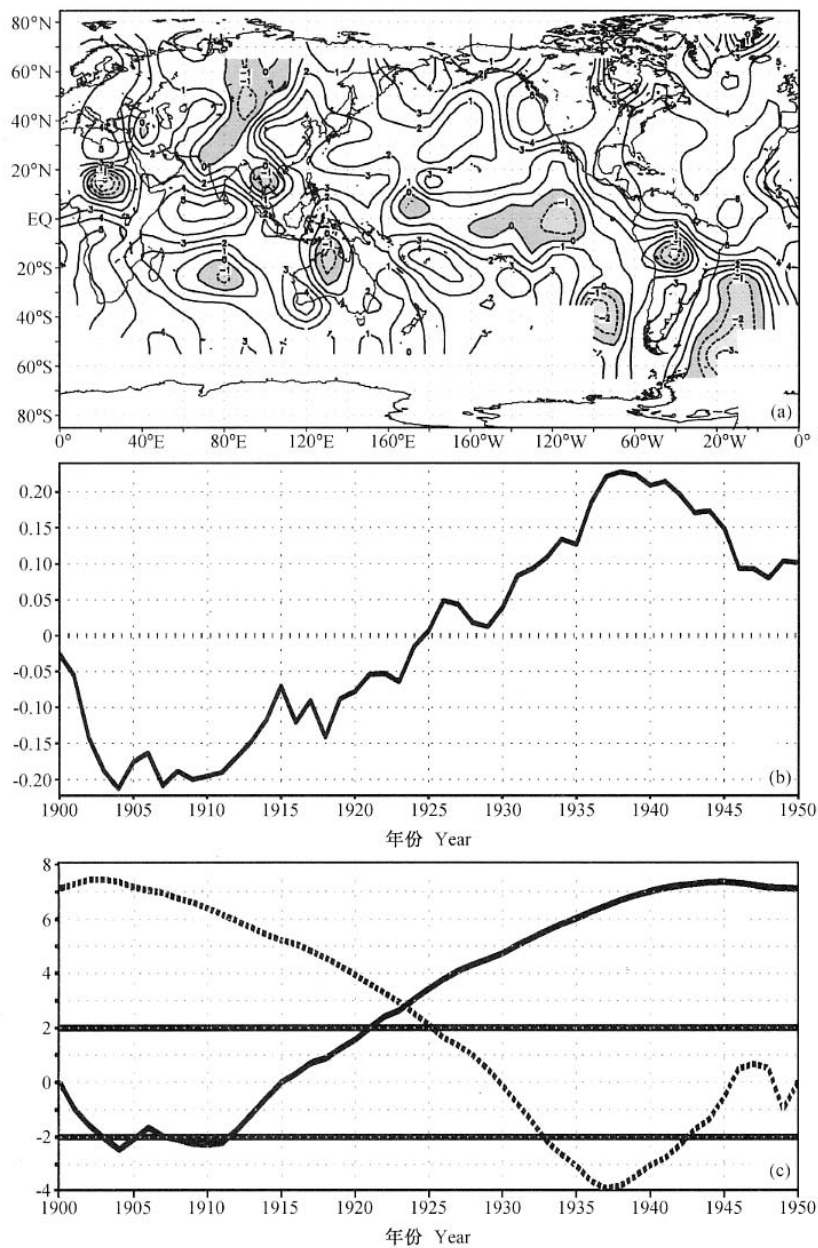


图 2 (a) 1900~1950 年夏季全球温度 5 点平滑标准化值 EOF1 空间分布 (5 年滑动平均, 方差贡献 22.9%, 阴影区是负值区, 等值线间隔为 1); (b) EOF1 时间系数变化; (c) 时间序列 Mann-Kendall 突变检验

Fig. 2 (a) 1900—1950 global summer normalized surface temperature EOF1 distribution with 5-grid smoothing and 5-year running mean (accounting for the total variance 22.9%), the shadow area is indicative of negative values, and the interval of isoline is 1; (b) PC1 line; (c) The significance test line of abrupt change for PC1

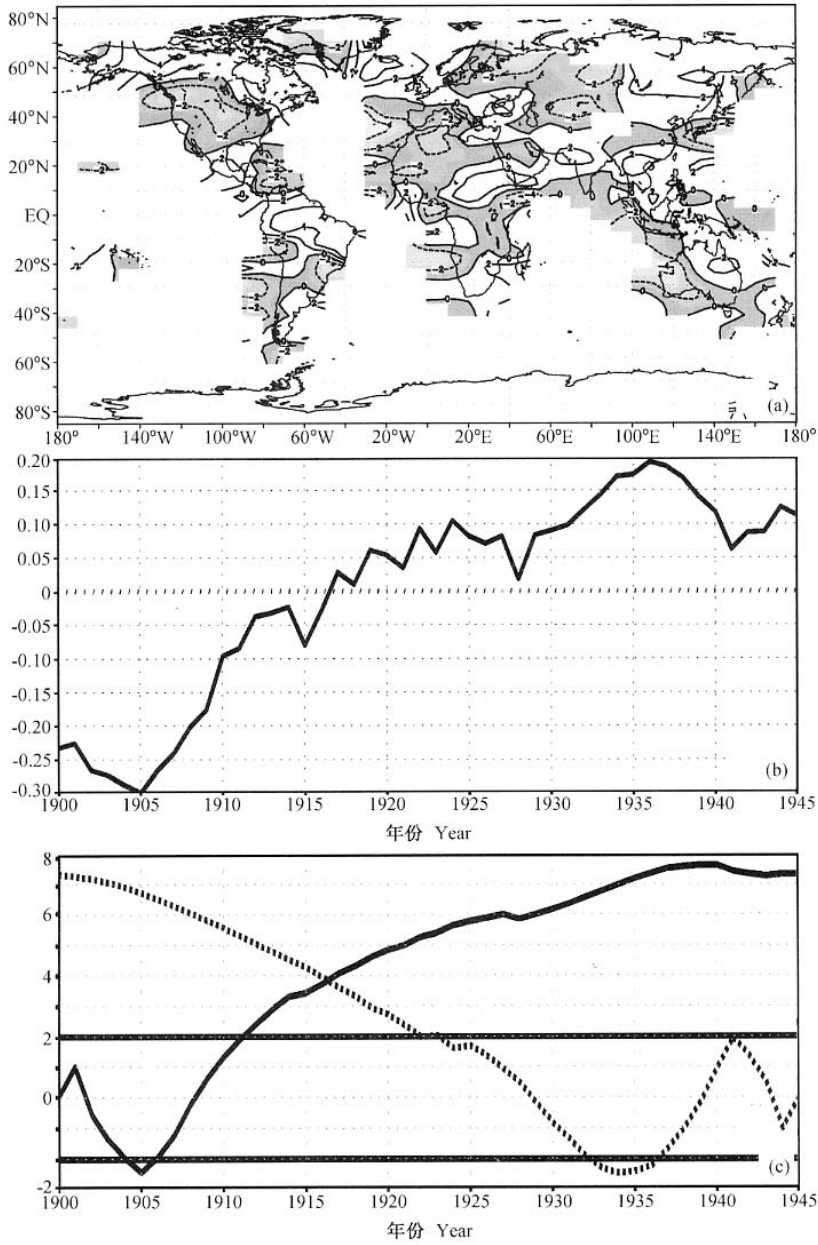


图 3 (a) 1900~1950 年夏季全球降水 5 点平滑标准化值 EOF1 空间分布 (5 年滑动平均, 方差贡献 12.8%)。阴影区是负值, 等值线间隔为 2); (b) EOF1 时间系数变化; (c) 时间序列 Mann-Kendall 突变检验

Fig. 3 (a) 1900—1950 global summer normalized precipitation EOF1 distribution with 5-grid smoothing and 5-year running mean (accounting for the total variance 12.8%), the shadow area is indicative of negative values, and the interval of isoline is 2; (b) PC1 line; (c) The significance test line of abrupt change for PC1

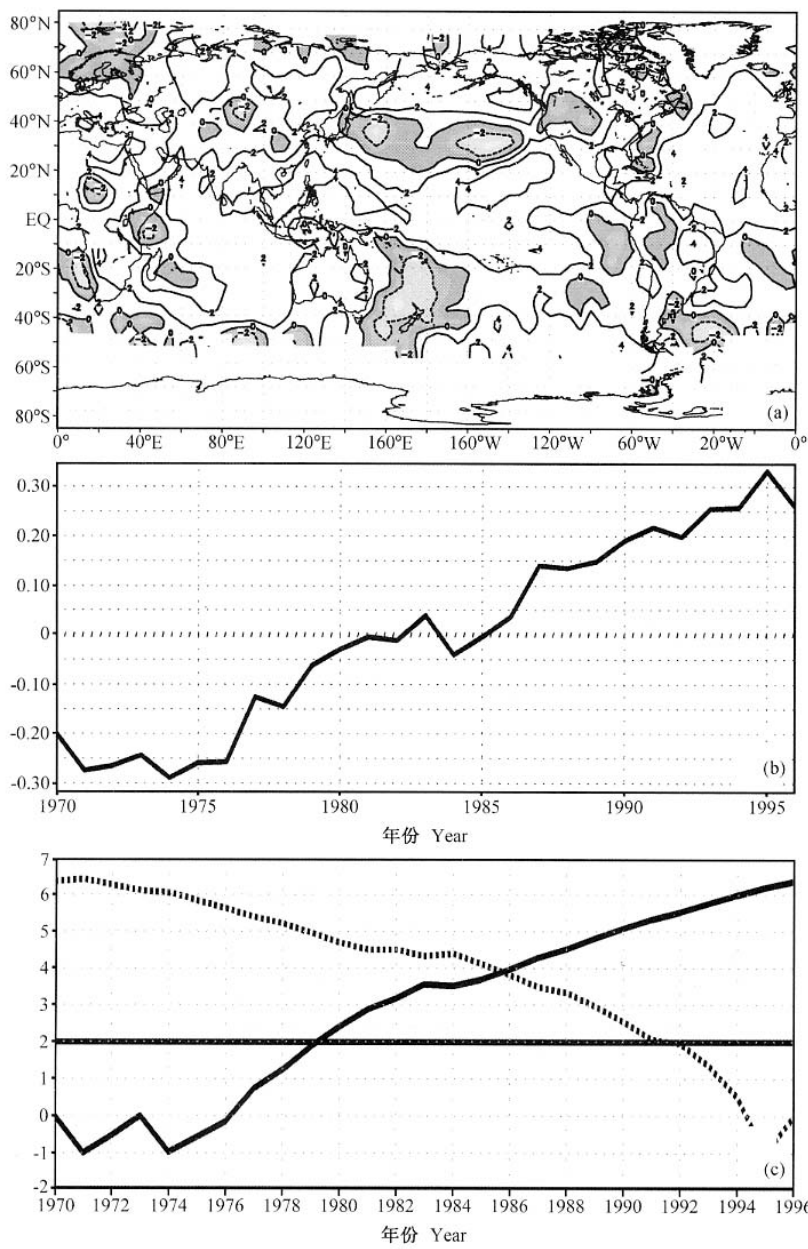


图 4 (a) 1970~1996 年夏季全球温度 5 点平滑标准化值 EOF1 空间分布 (5 年滑动平均, 方差贡献 25.2%, 阴影区是负值区, 等值线间隔为 2); (b) EOF1 时间系数变化; (c) 时间序列 Mann-Kendall 突变检验
Fig. 4 (a) 1970—1996 global summer normalized surface temperature EOF1 distribution with 5-grid smoothing and 5-year running mean (accounting for the total variance 25.2%), the shadow area is indicative of negative values, and the interval of isoline is 2; (b) PC1 line; (c) The significance test line of abrupt change for PC1

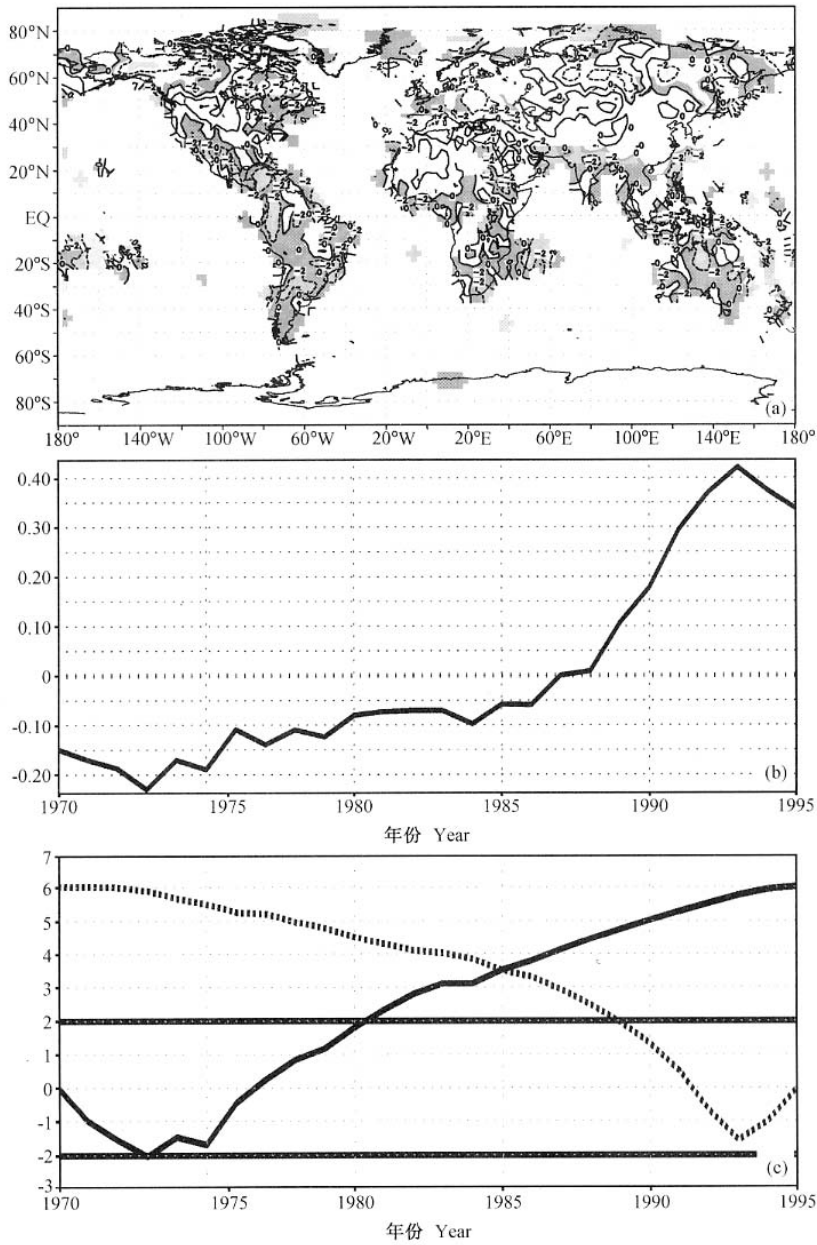


图 5 (a) 1970~1995 年夏季全球降水 5 点平滑标准化值 EOF1 空间分布 (5 年滑动平均, 方差贡献 16.0%, 阴影区是负值, 等直线间隔为 2); (b) EOF1 时间系数变化; (c) 时间序列 Mann-Kendall 突变检验

Fig. 5 (a) 1970—1995 global summer normalized precipitation EOF1 distribution with 5-grid smoothing and 5-year running mean (accounting for the total variance 16.0%), the shadow area is indicative of negative values, and the interval of isoline is 2; (b) PC1 line; (c) The significance test line of abrupt change for PC1

6 结论

通过上述分析可得以下结论:

(1) 本文用 Mann-Kendall 突变检验方法对全球温度资料进行检验, 得出 20 世纪全球有两次较显著的突然增暖过程, 其分别发生在 20 年代和 80 年代。

(2) 利用 EOF 分析方法和 Mann-Kendall 突变检验方法来分析温度资料, 结果表明全球气候突然变暖与实际情况非常接近, 其同样分别发生在 20 年代和 80 年代。分析时给出了增暖后温度空间的分布型。与此同时, 降水场的空间分布型与温度场一起也发生了突变, 突变后有的地区降水增多, 有的地区降水减少, 但是两次突然变暖后亚非地区降水增多带的地理位置并不相同。

(3) 全球突然变暖后, 并非所有地区都存在变暖, 有一小部分地区反而降温, 还有的区域没有明显变化。

(4) 通过对两次全球突然变暖的对比分析, 我们认为两次变暖的基本特征并不相同, 从而引起两次突变的机制也应有所不同。

致 谢 感谢陶诗言院士对本工作的指导和支持。

参考文献

- [1] Ye Duzheng, Yan Zhongwei. Climate Jumps in the History. *Climate Variability*, Proceedings of International Workshop on Climate Variabilities (IWCV), 3-4, July 1992, Beijing China. Beijing: China Meteorological Press, 1992
- [2] Yan Zhongwei, Ye Duzheng, Wang Cun. Climatic Jumps in the Flood/Drought Historical Chronology of Central China. *Climate Dynamics*, 1992, **6**: 153~160
- [3] 严中伟, 李兆元, 王晓春. 历史上 10 年—100 年尺度气候跃变的分析. *大气科学*, 1993, **17** (6): 663~671
Yan Zhongwei, Li Zhaoyuan, Wang Xiaochun. Analyses of climatic abrupt change on decadal to century scales in history. *Scientia Atmospherica Sinica* (in Chinese), 1993, **17** (6): 663~671
- [4] 王绍武, 叶瑾林. 近百年全球气候变暖的分析. *大气科学*,

1995, **19** (5): 45~553

Wang Shaowu, Ye Jinlin. Analyses of global climatic warming in recent 100 years. *Scientia Atmospherica Sinica* (in Chinese), 1995, **19** (5): 45~553

- [5] 符淙斌, 王强. 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)*, 1991, **6**: 666~672
Fu Congbin, Wang Qiang. Abrupt change in the South Asian Summer Monsoon long-term variations and its synchronization with global rapid warming. *Science in China* (Ser. B) (in Chinese), 1991, **6**: 666~672
- [6] Fu Congbin. Large Signals of Climate Variation over the Ocean in the Asian Monsoon Region. *Advances in Atmospheric Sciences*, 1988, **5** (4): 389~404
- [7] 育红, 绍武. 80 年代全球气候突然变暖. *科学通报*, 1992, **6**: 528~531
Yi Yuhong, Wang Shaowu. Global climatic abrupt change in 1980s. *Chinese Science Bulletin* (in Chinese), 1992, **6**: 528~531
- [8] Nitta T, Yamada S. Recent Warming of Tropical Sea Surface Temperature and Its Relationship to the Northern Hemisphere Circulation. *Journal of the Meteorological Society of Japan*, 1989, **67** (3): 375~383
- [9] Trenberth K E. Recent Observed Interdecadal Climate Changes in the Northern Hemisphere. *Bulletin American Meteorological Society*, 1990, **71** (7): 988~993
- [10] Lau K M, Weng H. Interannual, Decadal-Interdecadal, and Global Warming Signals in Sea Surface Temperature during 1955-97. *J. Climate*, 1999, **12**: 1257~1267
- [11] Zhang Yuan, John Wallace M, Battisti D S. ENSO-like Interdecadal Variability: 1900-93. *J. Climate*, 1997, **10**: 1004~1020
- [12] Dai Aiguo, Fung I Y. Surface Observed Global Land Precipitation Variations during 1900-88. *J. Climate*, 1997, **10**: 2943~2962
- [13] 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
Fu Congbin, Wang Qiang. The definition and examination of climatic abrupt change. *Scientia Atmospherica Sinica* (in Chinese), 1992, **16** (4): 482~493
- [14] 项静恬, 史久恩. 均值变点分析. 见: 方开泰主编, 非线性系统中数据处理的统计方法. 北京: 科学出版社, 1997. 3~14
Xiang Jingtian, Shi Jiuen. Analyses of average values change drop. In: *Statistic Methods of Data Processing in Nonlinear Systems* (in Chinese), Fang Kaitai, Ed. Beijing: Science Press, 1997. 3~14