

气候突变现象的研究

符淙斌

(中国科学院大气物理研究所, 北京 100080)

提 要

本文分析了各种时间尺度的气候突变现象, 特别是本世纪以来的三次主要气候突变(1900、1920和1960), 讨论了十年尺度气候突变现象的几个主要特点: 气候突变与全球温度变化的关系、突变的空间尺度以及季风系统在气候突变中的敏感性等。

关键词: 气候突变; 季风气候; 十年尺度

一、前 言

把突变的概念和突变理论应用于气候变化的研究是近代气候学一个年轻的研究方向, 它对于认识气候变化的性质有重要意义。

所谓“气候突变”, 是指气候从一种稳定状态跳跃式地转变到另一稳定状态的现象^[1]。用以描述气候状态的变量有平均值、方差(又称变率)、频率分布、变化倾向等。显然, 如果我们能够把气候状态转变发生的条件, 发生的原因弄清楚, 从而能正确地预测突变发生的时间和方式, 对气候预报有重要意义。

气候学家对突变问题的兴趣, 首先来自观测到的气候突变现象。早在突变理论建立之前, 气候学家已经注意到了气候变化中的不连续性、阶段性以至跳跃性的特征, 形成了最初经验性的气候突变的概念。

已经揭示的大量观测事实表明, 气候突变是一种多时间尺度的现象。气候状态的跳跃可以发生在从季节、年际、十年或百年, 甚至更长的直到地质时间尺度宽广的时域内, 是存在于各种时间尺度气候变化中的普遍现象。

本文概述了气候突变现象的观测研究的主要进展。在综合介绍几种主要时间尺度的气候突变(气候的季节性突变、十年尺度的气候突变和地质时期的气候突变)的基础上, 着重分析了本世纪以来的三次气候突变(本世纪初、20年代和60年代), 讨论了这个时间尺度气候突变的一些主要特点, 如突变的空间尺度、突变与全球温度变化的关系, 以及季风区在气候突变中的敏感性等。

二、气候的季节性突变

中国学者最早指出了大气环流和气候的季节突变现象。竺可桢^[2]在《东南季风与中

国之雨量》一文中,就明确指出了东亚夏季风来临的突发性。涂长望等^[3]采用湿球位温为 20°C 的等日期线描写我国夏季风的进退,发现 6 月 1—5 日至 6 月 11—15 日,夏季风突然从江淮流域迅速推进到华北平原。9 月 1—5 日至 9 月 11—15 日,它又迅速从华北撤回长江流域一带。Yin^[4]在研究缅甸和印度夏季风建立时也指出了季节开始的突发性,并发现它与喜马拉雅山南麓的高空西风急流的迅速北撤有关。陶诗言等^[5]在分析 1956 年从春到夏过渡时期亚洲上空大气环流的变化中,更明确地指出:“从春季到夏季的过渡时期,亚洲上空的大气环流有着一个跳跃性的转变。”叶笃正等^[6]则第一次系统地阐述了北半球大气环流的季节性突变现象。他们指出,高空大气环流的急剧变化现象,并不是亚洲地区的特殊情况,而是一个全球性的现象。在 6 月和 10 月,北半球大气环流都有一次非常急剧的变化。他们把它称之为“6 月和 10 月大气环流的突变现象”。6 月大气环流的变化主要表现为东西风带突然向北推移。以 1956 年为例,西风急流的位置从 5 月最后一候的 33°N 附近跳跃到 6 月第一候的 40°N , 此时高空流型发生一次大的调整。在 10 月,高空东西风带突然向南撤退,高空流型也发生相应的调整。与大气环流的突变相配合,随着 6 月的突变,印度西南季风爆发,中国和日本的梅雨开始,赤道辐合带突然向北推进。10 月的突变,伴随着冬季风的来临和辐合带迅速向南推移。

大约过了 30 多年,大气环流和气候的季节性突变现象引起了世界各国科学家的兴趣。更多更好的全球资料为季节突变的研究提供了详细的信息,特别是 1979 年的全球大气试验 (FGGE)。Krishnamurti^[7]指出,随着印度季风的爆发,印度洋上空区域平均涡动动能 (K_{ψ}) 突然增长。季风爆发前,动能平均为 $20\text{m}^2/\text{s}^2$ 。在 6 月 15 日左右,迅速增大到 $80\text{m}^2/\text{s}^2$ 左右,即突然增加了 4 倍。图 1 给出了 1979 年 5—7 月,印度洋上空 (50°E — 100°E , 10°S — 10°N) 区域平均动能随时间的变化, K_{ψ} 和 K_{χ} 分别为有旋和无旋部分的动能,揭示了季节性气候突变的动力学特征。

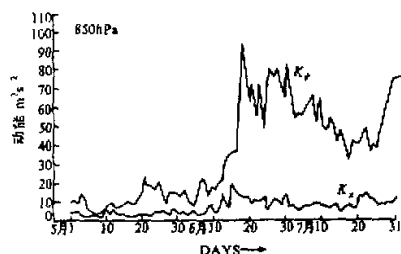


图 1 赤道印度洋上空 (50°E — 100°E , 10°S — 10°N) 区域平均动能随时间的变化^[7]
 K_{ψ} 、 K_{χ} 分别为有旋和无旋部分的动能

Shinodo 等^[8]使用 FGGEII 的全球 6000 个站的逐日降水资料指出了 1979 年 5—6 月全球降水分布季节性突变及其区域之间的同步性。它指出,主要降水区有两次明显的突变:第一次在 5 月初,从赤道北移到 10°N 附近;第二次在 6 月初,它迅速移到 20°N 以北。

Lanzante^[9]使用北美和邻近的大西洋和太平洋地区 700 hPa 高度 5 天平均值资料,分析了高度场季节变化的不连续性,在 5 月末到 6 月初有一次明显突变。Mcbride^[10]指出澳洲季风爆发中的突变现象,

12 月达尔文港低空东风突然转为西风,高空西风则突然变为强盛东风,夏季风爆发。

曾庆存等^[11]应用大气物理研究所的大气环流模式,较成功地模拟了季节突变现象。在连续 3 年的模拟中,每一年东亚西风急流在 6 月和 10 月的突变都模拟的与实况

非常相似。

关于大气环流季节突变的机理, 现在还不清楚。Yin^[4]和 Hahn^[12]等强调高原的动力作用。李麦村^[13]、罗哲贤^[14]、缪锦海^[15]和柳崇健^[16]等从大气运动多平衡态和分叉理论来解释大气环流的季节突变。余志豪等^[17]用给定的加热场模拟副热带高压的北跳现象。但是, 季节突变的机理还需进一步研究。

三、古气候记录中的突变信息

从某种意义上来说, 气候突变的概念最初是由长期的古气候记录分析中提出来的, 气候突变是古气候研究的一个重要课题。冰芯、湖泊沉积、深海沉积、黄土、孢子花粉、树木年轮、动物化石以及各种历史文献记载中保留着大量的长期变化的信息, 由此重建的各种气候变化序列是研究不同时期尺度气候突变现象的基础数据。由 Berger 和 Labeyrie 编辑出版的《气候突变》一书^[18], 详细总结了这方面的工作。本文仅列几个有代表性的例子, 以及未被该书搜集进去的中国的典型材料, 可以说明千年到万年尺度的气候突变现象。

小冰期 (Little Ice Age) 是最近 1000 年来最重要的一个气候阶段, 在欧洲和中国有较多的研究。最近 Thompson 等^[19]根据秘鲁热带 Quelccaya 冰盖 (5670m 厚) 中保留的信息, 重建了 1500 年来的气候变化, 揭示了小冰期开始和结束的突变性质。由最近 1000 年冰盖测得的 10 年平均粉尘浓度、传导率、累积量和氧同位素 $\delta^{18}\text{O}$ 的变化。可以看到这 1000 年内热带南美洲最重要的气候变化是公元 1490—1880 年的小冰期。其中累积量, 也即降水量和传导率的变化说明小冰期的开始是突发性的, 但氧同位素的变化是渐变的。小冰期的结束过程, 所有的量均表示为突变性。小冰期本身持续了大约 400 年, 但它的开始和结束过程仅仅在几年内完成, 也就是说大气状况可以在很短时间内发生显著的调整, 然后进入一个相当长的稳定的气候状态, 这是个很典型的气候突变事例。

另一个例子是乍得湖 (Lake Chad) 的变化, 它是非洲气候变化的一个指示物。将古代距今 6000—7000 年的乍得湖及其流域面积同现在相比, 可以清楚地说明非洲的干旱化。这种干旱化进程也呈现突变性质。图 2 给出距今 9000 年以来, 乍得湖水位和热带植被孢粉量 (百分数) 的变化^[20]。可以看出湖面水位的下降, 也就是非洲干旱化的进程是发生在大约距今 4000 年前, 相当于全新世高温期结束的时候。

另一个著名的例子是北大西洋 Younger Dryas 的变化。图 3 是由北大西

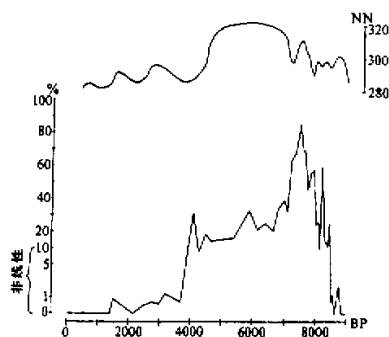


图 2 乍得湖水位 (上) 和苏丹-几内亚植物孢粉量 (百分数) (下) 的变化^[20]

洋冰芯 (a: Camp Century; b: Dye 3) 和花粉记录 (法国东南部 Grand Pile) 重建的 20000 年来的温度变化。其中 O.D.(Older Dryas)为冷期; A—B (Allorod—Bolling)为暖期; Y.D.(Younger Dryas)为冷期。显然,这三个主要时期之间的转换都非常迅速。尤其是大约 12000 多年前,大气由暖突然变冷,称为 Younger Dryas,是一次公认的万年尺度上的气候突变。

我国有丰富的古气候记录,其间保存着不少气候突变的信息,例如湖泊沉积、黄土剖面和冰芯等。

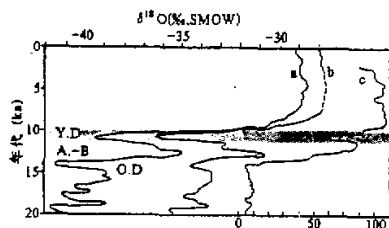


图3 由北大西洋冰芯 (a)、(b) 和法国东南部 Grand Pile 的花粉记录重建的 20000 年来的温度变化^[21]

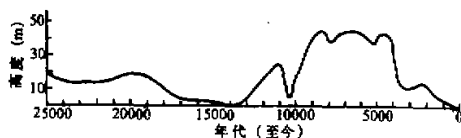


图4 25000 年来内蒙岱海湖面高度变化^[22]

图 4 给出了由湖泊沉积序列的测年和环境指标系统分析建立起来的内蒙岱海 (112° 40'E, 40° 40'N) 近 25000 年来湖面高度变化^[22]。大约 9000 年前湖面迅速升高,大约 4000 年前迅速下降,4000—9000 年间的湖面比现在要高出 10m 左右,这就是全新世高温高湿期。

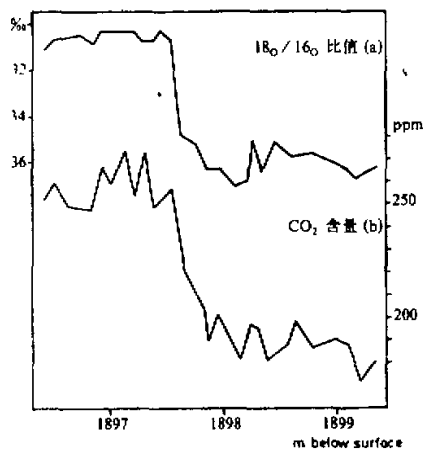


图5 南格陵兰冰芯中 40000 年前 $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ 比值和 CO_2 含量随深度的变化^[23]

关于长期气候变化中突变产生的原因有过不少讨论,至今尚无明确的结论。Flohn 曾分析过这一类尺度气候突变与 CO_2 含量变化的关系^[23]。图 5 是南格陵兰冰芯 Dye 3 取得的大约 40000 年前的 $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ 比值和 CO_2 含量随深度的变化。那里 3m 深的岩芯相当于 1000 年左右。可以看出大约 40000 年前 (1898m), 有一次突然增暖过程,它持续了大约 50—80 年。此时, CO_2 的含量从 190ppm 迅速增大到 260ppm。据计算,大气中 CO_2 浓度增加 70ppm, 温度将升高 5℃。这个例子可能说明气候变化与大气中 CO_2 浓度变化有关系,但很难说清其间的因果关系。

四、仪器观测时期的气候突变——本世纪来的三次突变事件

气候学家通常用某一时期内气候要素的值来描写所谓“气候状态”。在整理分析仪器观测的气候资料中,发现不同时段的气候平均值可以存在显著差异,从而把气候划分为阶段 (climatic regime); 不同气候阶段的气候要素有时表现为缓慢变化,有时却表现为不连续,甚至跳跃的性质,这种气候阶段的不连续和跳跃的性质,是最初的、狭义的气候突变的概念 (abrupt climatic change)。近百年来,仪器观测的气候记录提供了研究这一类时间尺度气候突变的较可靠的资料。

Kraus 在全球不同地区降水量世纪变化的研究中,首先指出了这一类尺度的气候突变^[24,25]。根据降水距平的累积曲线,他发现 19 世纪末全球热带降水量突然减少 (abrupt decrease),北美、南美、澳大利亚和亚洲东岸也有类似的现象,是他首先使用了“突变”这个词来描述这一尺度的气候变化。

像季节气候突变的研究一样,大约过了 20 多年,10 年尺度的气候突变又开始引起人们的注意。Fletcher^[26,27]和符淙斌^[28-30]比较系统地研究了全球海洋气候,特别是亚洲和西太平洋海洋上风场的突变,指出了 1900, 1930 和 1960 年左右的强信息。Jones^[31], Diaz^[32]和 Rogers^[33]等研究了全球陆面温度和北美、北大西洋高纬度地区在 20 年代出现的迅速增暖现象 (rapid warming)。符淙斌等分析了全球长期纬圈平均和区域海面温度的突变,用滑动 t 检验方法检测到 20—30 年代和 60 年代海面温度的两次迅速变化。符淙斌等^[34]、郭其蕴^[35]研究了南亚和东亚季风在 20 年代和 60 年代的两次突变。Flohn^[20]则着重分析了非洲季风区的气候突变,指出尼罗河年流量 (阿斯旺站) 在 1900 年前后突然减少,而在 60 年代初,在东非许多地区雨量迅速增加,以乌干达境内的尼罗河年流量为例,1962—1978 年竟为 1899—1961 年的两倍多,两者的差异为 4.5 倍标准差,同时北非萨赫勒(Sahel)地区的年雨量在 60 年代后期却迅速减少,1968—1984 年的平均雨量与 1950—1967 年平均雨量差值超过 1.5 个标准差。Yamamoto 等^[36,37]主要指出了 50 年代日本地区的气候跳跃 (climatic jump) 及其与北半球海平面气压场变化的关系。严中伟等^[38]则详细分析了北半球 60 年代夏季的气候突变事件。

综合以上的研究结果,本世纪以来全球性的气候突变主要有 3 次:本世纪初、20 年代和 60 年代。

(1) 本世纪初的气候突变

这次突变在温度场表现为小冰期结束前的最后一次降温过程,在降水场上的主要特征是,全球热带、非洲和南亚季风区降水量减少,但中纬度地区 (如欧洲) 和东亚季风区雨量是增加的。

符淙斌和 Fletcher^[28,29]详细地分析了 1900 年前后印度洋和西太平洋地区海上风场和相应的季风活动,提出了这一突变前后两种亚洲季风型,以及南亚季风与东亚季风长期变化中的 seasaw 现象。

在印度季风区,这次突变表现为由经向季风型向纬向季风型的转变。在东亚季风区,表现在太平洋上的东南季风由经向型向纬向型的转变。相应的中国季风则由少雨期转入多雨期。

风场的这种突变,在西太平洋赤道辐合带地区尤其明显。这里是东北、东南信风和西南、东南季风之间的过渡地带,表现出更强的突变信息。图6为该区域内区域平均风矢量的累积曲线。带箭头的虚线标出该区域多年平均合成风矢量(125°),即东南风。图6表明,风场有一次急剧的变化,它分隔的两个气候阶段1876—1902年和1902—1930年之间风向的转变达到 130° 。在1876—1902年,该区域内盛行东南气流,相当于印度西南季风的经向型发展时期,这就是说赤道辐合带位置偏西。1902—1930年间,该区域内盛行西南气流,此间印度西南季风进入纬向型发展时期。这就是说,强的西南气流向东推进,使赤道辐合带向东北方向移动。可见,赤道辐合带内盛行风的如此剧烈的变化,不仅可以指示辐合带本身位置的变化,而且指示出这一地区平均大气环流型的转变。

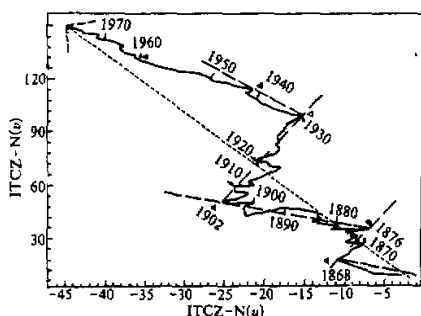


图6 西太平洋赤道辐合带风速矢量及其随时间的变化^[28]

进一步的分析表明,1900年前后季风环流型的变化还同跨赤道气流主要通道位置的变化有密切的关系。这一特征表明1900年前后季风环流型的突变与来自另一半球的影响有关,是一个全球尺度的气候突变事件。

(2) 20年代的气候突变

这次突变在温度场上表现为全球性的迅速增暖,在降水场上的主要特征是全球热带雨量增加,中纬度地区变干,热带季风活跃,但副热带季风减弱。

图7为1850年以来北半球大陆年平均气温的变化曲线,以及由Mann-Kendall Rank Statistic方法检测到的发生在1921年的突然增暖^[36]。与本世纪温度场的其它两次变化(本世纪初和60年代)相比较,这次突变的信号最强,达到了信度要求。

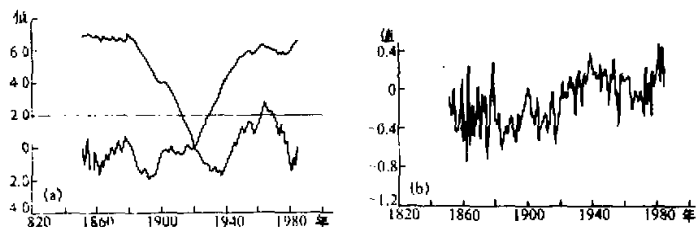


图7 北半球1851—1984年年平均气温的变化(a)以及Mann-Kendall方法检验结果(b)^[34]

这次温度突变的主要特点是:

- (a) 增温在冬季要比其它季节清楚;
- (b) 增温的幅度高纬要比低纬大;
- (c) 信号最强是在北大西洋地区;

(d) 南半球突变信号很弱。

符淙斌、Diaz 和 Fletcher 等^[30]运用滑动平均 t 检验方法分析了北大西洋和全球海面温度的突变现象。就大范围平均而言, 突变存在于整个海洋。但北半球要早于南半球。在北半球海洋上, 高低纬度均有明显突变。

南亚的夏季风在 20 年代也有一次明显的突变现象^[34]。图 8 为 1888—1984 年逐年 7—8 月印度季风中断日数的变化和它的九项 Gauss 滤波曲线。可以看到这个表征印度夏季风强度的指数在 1920 年左右有一次突变, 它迅速地从不活跃时期跳跃到一个活跃期。季风中断日数从突变前平均 13 天突然减少到突变后 (1923—1936 年) 平均 6 天。用 Mann-Kendall Rank Statistic 方法确定其突变大约发生在 1922 年。

20 年代中国的气候也有一次明显的突变。图 9 为我国东部 100 站的资料所确定的近百年来干旱指数 5 年滑动平均值和它的线性拟合^[39]。它呈现出明显的上升趋势, 即干旱化趋势。值得注意的是, 这个干旱化的进程是以突变的方式出现的, 这个突变发生在 20 年代。由 Mann-Kendall 统计方法检测到干旱指数在 1922 年的突变。在这个突变点之前, 干旱指数平均为 0.27, 在这次突变发生后 (1923—1986 年), 干旱指数增长到 0.36。

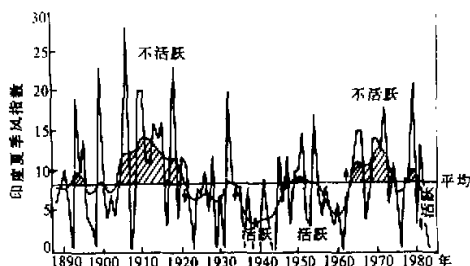


图 8 1888—1984 年印度夏季风指数的变化^[34]

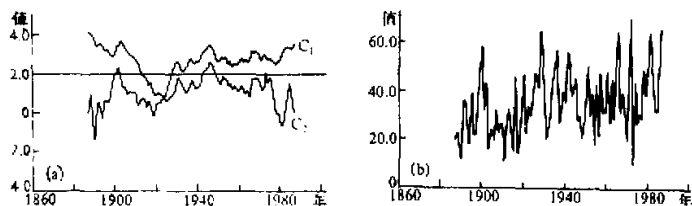


图 9 我国东部干旱指数及其与北半球温度变化的关系^[39]

在欧洲的长期气候记录中也可以发现 20 年代气候突变的信号, 例如莱茵河的径流量等。

既然 20 年代的突变表现在全球温度场上, 也表现在许多地方的干湿状况的变化和季风活动的变化方面, 它一定在大气环流的演变上反映出来。图 10 给出了北半球 1899—1939 年夏季 (6—8 月) 海平面气压 EOF 第一特征向量 (占方差 18.7%) 的时间系数, 清楚地显示出在 20 年代发生了突变^[39]。

符淙斌等^[30]还应用滑动 t 检验的方法检测了 20 年代海洋上主要的大气活动中心: 阿留申低压、冰岛低压、北太平洋高压和北大西洋高压的变化。他们发现北太平洋和北大西洋高压的位置和强度, 在 20 年代都有突变, 主要表现为强度减弱、位置向北移。阿

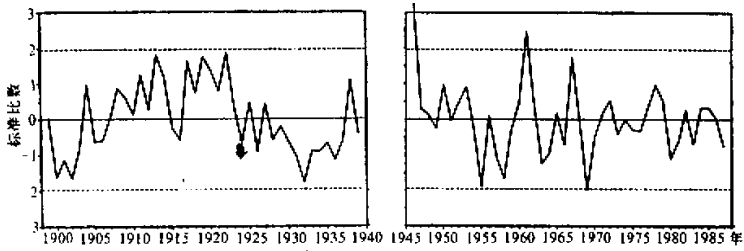


图 10 北半球海平面气压 EOF 第一特征向量的时间系数^[39]

留申低压的中心气压下降，即低压加深。

(3) 60 年代的气候突变

这次突变在全球温度场表现为另一次相对的降温过程，降水场主要特征是非洲和印度季风迅速减弱，特别是北非的萨赫勒地区进入了持续的干旱期。在干旱带的两侧按排着正负相间的带状结构的距平场分布。这一时期，由于有了高空资料，可以扩展到对对流层大气环流突变的分析。

北半球温度变化曲线（图 7），已清楚显示了 60 年代北半球大陆的降温过程。Diaz 等^[32]分析北美洲北部温度变化也指出了这次变化的突变性质。高空资料的分析说明，这次突然降温不仅仅是在地面，而且在对流层温度场上也很清楚。图 11 给出 1949—1973 年北半球三个纬度范围内（ 65°N — 90°N ， 50°N — 90°N ， 25°N — 90°N ）1000—500hPa 厚度年平均距平值的变化。在 1963—1964 年间，整个北半球对流层下半部的平均温度突然由持续的正距平转变为持续的负距平^[40]。据 Flohn 转引 Stefansson (1985) 的资料，冰岛北岸 20m 深处的温度在 1965 年左右下降了 3.2°C 。这样的温度迅速变化无疑对大气环流和气候有重要的影响。

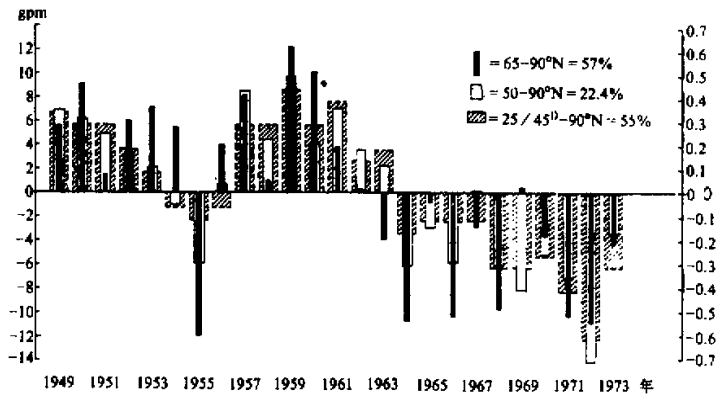


图 11 北半球 500—100 hPa 厚距平场的变化^[40]

在 60 年代后期，横贯非洲的萨赫勒地带的降水量突然减少，干旱发展是这次突变

中一个典型的例子。图 12 给出了在 11°N — 18°N , 17°W — 9°E , 大约 $2 \times 10^6 \text{ km}^2$ 内 20 个代表站的平均年降水量距平标准化量的变化^[41]。1950—1967 年为持续正距平, 1968 年以后则为持续的负距平, 这两个时期降水量的差值超过二倍标准差。苏丹和埃塞俄比亚的降水也有类似变化。这种变化也表现在沿尼罗河的某些测站的流量变化, 如 Aswan, Tamanial 和 Roserires 等^[42]。

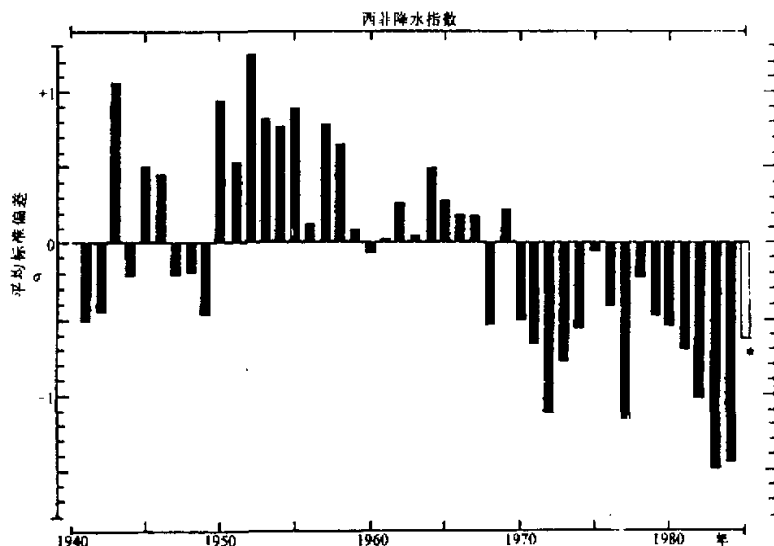


图 12 Lamb 西非降水指数^[41]

但是同在非洲, 白尼罗河的某些测站的流量却呈现出截然相反的突变趋势。分析乌干达 Jinja 站的 1946—1979 年的年径流量变化。其年径流量在 1962 年, 迅速地从 $20.1 \text{ km}^3/\text{a}$ 增加到 $40.6 \text{ km}^3/\text{a}$, 两个时期的差值为 4.5 标准差, 绝对量增加了一倍多。白尼罗河上的 Mongalla 和 Malakal 两站也有类似的变化趋势。非洲不同地区降水表现出来的不同方向的突变是一个有意思的现象。

亚洲的降水也有类似的突变现象。符淙斌^[29]和郭其蕴^[35]指出, 60 年代的突变主要特征是梅雨期缩短, 夏季风强度减弱。从上面给出的图 8 可以看到 60 年代初印度季风突然减弱的现象, 中断日数增加到平均为 12 天。

欧洲和美洲的情况还不清楚。

严中伟等^[38]从降水量、温度、海面温度、500hPa 高度、海平面气压场等多种要素场对 60 年代夏季的气候突变进行了细致的分析。他们的工作发现这次突变反映在各种要素变化上, 这次突变具有行星尺度的带状的正负距平相间的空间结构。自北非到日本一带在 60 年代出现突发性降水减少, 而其南北两侧则各有一条降水增多的地带, 反映了一些大尺度气候带在 60 年代出现突发性的变动。

60 年代夏季降水这样一种变化也反映在气温、海表水温、500hPa 高度、海平面气压等的变化上。

上述行星尺度正负距平的空间结构是叠加在半球或全球平均变化之上的空间扰动。可以用来解释突变的区域差异。例如,同在非洲的尼罗河流域,一些站年径流量在 60 年代迅速减少,雨量也突然减少。但是,有些站则明显增加,如乌干达的 Jinjia。这是因为它们正好处于不同符号的距平带内。

五、讨 论

通过上一节对仪器观测时期 3 次气候突变的分析,我们可以发现 10 年尺度气候突变具有以下几个主要特点。

(1) 气候突变与全球温度变化有密切的关系

本世纪初,20 年代和 60 年代这 3 次全球性的气候突变在全球温度场上有着十分清楚的反映。降水场、气压场和其它气象要素场上的变化都与温度场上的突变相配合。例如,20 年代的全球气候变化是同全球的迅速增暖有密切关系的。不仅如此,一些地区的降水量的时间序列与北半球气温时间序列,在近百年来存在着密切的相关,它们的变化总趋势,非周期性的振荡,以及突变发生的时间等都配合得很好。这个现象是否可以说明,在一定意义上来说,气候突变可能具有热力驱动的性质。当然,一次气候突变过程不可能是纯热力的。动力学过程在突变中的作用需进一步研究。

(2) 季风区在气候突变中的敏感性

上节揭示的事实也清楚地表明,各次气候突变在季风区,如亚洲季风区、非洲季风区,以及澳大利亚季风区,都有很好的反映。中国和印度的季风指数的长期变化中均表现出突变的性质。萨赫勒地区的雨量变化也呈现明显的突变。从已有的观测研究的大量文献中,其它地区气候突变的例子,都没有象季风区那么典型。这是否说明,季风区在气候突变中的反映比较敏感。

(3) 突变的尺度

人们可以在一些区域或局地的气象要素时间序列变化中发现不连续,把它们看成为气候突变。然而,正如我们在“气候突变的定义、分类和检测方法”^[1]一文中所指出的。并不是任何气候变化中的不连续现象都可以称之为“突变”。它必须满足气候突变定义的基本要求。同时,又经过合格的统计检验的那些变化,才能称为气候突变。上一节的分析表明,我们所讨论的三次气候突变都经过了严格检验,符合定义的。这样的突变看来决不是局地的,单要素的现象,而是全球范围的大尺度的气候事件,具有行星尺度的空间结构,需要进一步研究,这种大尺度气候突变事件的动力学结构和它的维持机制。

参 考 文 献

- [1] 符淙斌,王强,1992,气候突变的定义和检测方法,大气科学,16(4),482—493.
- [2] 竺可桢,1934,东南季风与中国之雨量,地理学报,1(1),创刊号.
- [3] 涂长望,黄士松,1944,中国夏季风之进退,气象学报,18,81—92.
- [4] Yin Maung Tun, 1949, A synoptic-airologic study of the onset of the summer monsoon over India and Burma, J. Meteor., 6, 393—400.
- [5] 陶诗言,陈隆勋,1957,夏季亚洲大陆上空大气环流的结构,气象学报,28,234—247.

- [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**, 249—263.
- [7] Krishnamurti, T. N. and Y. Ramanathan, 1982, Sensitivity of monsoon onset of differential heating, *J. Atmos. Sci.*, **39**, 1290—1306.
- [8] Shinoda, M. et al., 1986, Global simultaneity of abrupt seasonal changes in precipitation during May and June of 1979, *J. Meteor. Soc. Japan*, **64**, 531—546.
- [9] Lanzante, J. R., 1983, Some singularities and irregularities in the seasonal progression of 700 hPa height field, *J. Climate Appl. Meteor.*, **22**, 967—981.
- [10] McBride, J. L., 1987, The Australian summer monsoon, in: *Monsoon Meteorology*, Edited by C. P. Chang and T. N. Krishnamurti, Oxford University Press.
- [11] 曾庆存、梁信忠、张明华, 1988, 季风和大气环流季节突变的数值模拟, *大气科学特刊*, 22—42.
- [12] Hahn, D. G. and S. Manabe, 1975, The role of mountains in the South Asia monsoon circulation, *J. Atmos. Sci.*, **32**, 1515—1541.
- [13] Li Maicun and Luo Zhexion, 1983, Nonlinear mechanism of abrupt change of atmospheric circulation during June and October, *Scientia Sinica, Ser. B*, **26**, 746—754.
- [14] 罗哲贤, 1985, 副热带高压两种平衡态之间的转换与加热场变化的双态特征, *气象学报*, **43**, 276—283.
- [15] 缪锦海、丁敏芳, 1985, 季节变化的突变理论, *中国科学, B 辑*, **28**, 1077—1092.
- [16] 柳荣建、陶诗言, 1983, 副热带高压的向北跳跃与突变论, *中国科学, B 辑*, **26**, 1065—1074.
- [17] 余志豪、葛孝贞, 1983, 副热带高压脊线季节活动的数值试验, I, *海洋学报*, **5**, 698—708.
- [18] Berger, W. H. and L. D. Labeyrie, 1987, *Abrupt Climatic Change, Evidence and Implications*, NATO ASI Series, Series C, Mathematical and Physical Sciences, Vol. 216, 425pp.
- [19] Thompson, L. G. and E. M. Thompson, 1987, Evidence of abrupt climatic change during the last 1500 years recorded in ice cores from the tropical Quelccays ice cap, Peru, 99—110, in: *Abrupt Climatic Change*, Edited by W. H. Berger and L. D. Labeyrie, 425pp.
- [20] Flohn, H., 1984, Selected climates from the past and their relevance to possible future climate, 198—208, in: *The Climate of Europe: Past, Present and Future*, Edited by H. Flohn and R. Fantechi, D. Reidel Pub. 1984, 356pp.
- [21] Dansgaard, W. and Oeschger, H., 1988, Past environmental long-term records from the Arctic, in: *The Environmental Records in Glacier and Ice-Sheet*, Eds H. Oeschger et al., John Wiley and Sons, Ltd.
- [22] 王苏民, 1990, 岱海环境与气候变化, 中国科技大学出版社.
- [23] Flohn, H., 1986, Singular events and catastrophes now and in climatic history, *Naturwissenschaften*, **73**, 136—149.
- [24] Kraus, E. B., 1954, Secular changes in the rainfall regime of southeast Australia, *Quart. J. Roy. Met. Soc.*, **80**, 591—601.
- [25] Kraus, E. B., 1955, Secular changes of tropical rainfall regimes, *Quart. J. Roy. Met. Soc.*, **81**, 198—210.
- [26] Fletcher, J. O., 1982, The difference between Southern Oscillation and El Niño, in: *Proceedings of the 7th Annual Climate Diagnostic Workshop*, NCAR, Boulder, Oct. 18—22, 1982, 231—240.
- [27] Fletcher, J. O., U. Radok and R. Slutz, 1982, Climate signals of Antarctic Ocean, *J. Geophys. Res.*, **87**, 4269—4276.
- [28] Fu Congbin and J. Fletcher, 1982, Large signal of climate variation in Asian monsoon region — Northern summer, in: *Proceedings of the 7th Annual Climate Diagnostic Workshop*, NCAR, Boulder, Oct. 18—22, 1982, 223—230.
- [29] Fu Congbin and J. Fletcher, 1988, Larger signals of climatic variation over the ocean in the Asian monsoon region, *Advances in Atmospheric Sciences*, **5**, 389—404.
- [30] Fu Congbin, H. Diaz and J. Fletcher, 1989, Changes of atmospheric circulation over Northern Hemispheric Ocean associated with the rapid global warming in 1920's, NOAA TN. 45pp.
- [31] Jones, P. D., et al., 1986, Northern Hemisphere surface air temperature variations, 1851—1984, *J. Climate Appl. Meteor.*, **25**, 161—179.
- [32] Diaz, H. F., 1986, An analysis of twentieth century climate fluctuations on northern north America, *J. Climate Appl. Meteor.*, **25**, 1625—1657.
- [33] Rogers, J. C., 1985, Atmospheric circulation changes associated with the warming over the northern North Atlantic in the 1920's, *J. Climate Appl. Meteor.*, **24**, 1303—1310.
- [34] 符淙斌、王强, 1991, 南亚夏季风长期变化中的现象及其与全球迅速增暖的同步性, *中国科学, B 辑*, **35**.

- 666—672.
- [35] 郭其蕴, 1983, 东亚夏季风指数的变化, 地理学报, **38**, 207—217.
- [36] Yamamoto, R., T. Iwashima and Sanga, N. K., 1985, Climatic jump, a hypothesis in climate diagnosis, *J. Met. Soc. Japan*, **63**, 1157—1160.
- [37] Yamamoto, R., T. Iwashima and Sanga, N. K., 1986, An analysis of climatic jump, *J. Met. Soc. Japan*, **64**, 273—281.
- [38] 严中伟, 李劲钧, 叶笃正, 1989, 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, **33**, 97—103.
- [39] Fu Congbin, 1991, An aridity trend in China and its abrupt feature in association with the global warming, in: *Climate Biosphere Interactions, Biogenic Emissions and Climate change, Environmental Science and Technology. A Wiley Intersciences Series of Texts*, Edited by Richard Zepp.
- [40] Dronia, H., 1974, Meteor. Rundsch, **27**, 166—174, quoted from Schuurmans, C. J. E., in: *The Climate of Europe: Past Present and Future*, Edited by H. Flohn and P Fantochi, D. Redal Publishing Company, 1984, 356pp.
- [41] Lamb, P., 1983, Sub-Saharan rainfall update for 1982, continued drought, *J. Climatology*, **13**, 419—422.
- [42] Wang Qiang and Fu Congbin, 1992, The detection of climate abrupt change with Mann-Kendall Rank statistic test, *Acta Meteorologica Sinica*, **6**, 254—260.

Studies on the Observed Abrupt Climatic Change

Fu Congbin

(Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080)

Abstract

The paper overviews the observed abrupt climatic changes on various time scales, with a focus on the analysis of three abrupt events (1900s, 1920s and 1960s) in the last century and discusses the major characteristics of the abrupt climatic change on a decadal scale: the abrupt change in association with global temperature variation; the spatial scale of abrupt change and the possible sensitivity of Asian monsoon system in response to the abrupt climate change.

Key words: abrupt climatic change; monsoon climate; decadal scale.