

# 全球海气系统年代际突变时空特征的模拟评估<sup>\*1</sup>

肖 栋<sup>1</sup> 李建平<sup>2</sup> 周秀骥<sup>1</sup> 赵 平<sup>1</sup>  
XIAO Dong<sup>1</sup> LI Jianping<sup>2</sup> ZHOU Xiuji<sup>1</sup> ZHAO Ping<sup>1</sup>

1. 中国气象科学研究院,北京,100081

2. 中国科学院大气物理研究所大气科学和地球流体力学数值模拟国家重点实验室,北京,100029

1. *Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081, China*

2. *State Key Laboratory of Numerical Modeling for Atmospheric Sciences and Geophysical Fluid Dynamics, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Science, Beijing 100029, China*

2008-11-03 收稿,2009-01-02 改回.

**Xiao Dong, Li Jianping, Zhou Xiuji, Zhao Ping. 2010. An evaluation of the spatiotemporal structures of the decadal abrupt changes in the global ocean-atmosphere system simulated by the coupled climate models. *Acta Meteorologica Sinica*, 68(6):763-778**

**Abstract** The spatiotemporal structures of the decadal abrupt changes (DACs) in the annually averaged field in the global ocean-atmosphere system simulated by the coupled climate models (e. g., CCSM3, ECHAM5/MPI-OM, GFDL-CM2. 1, FGOALS-g1.0 and UKMO-HadGEM1) are evaluated in this study. Since 1880, these five coupled climate models haven't captured the dominant mode—the Pacific Decadal Oscillation (PDO) of the distribution of the DAC episodes in the global sea surface temperature (SST) field and the planetary-scale structure of the distribution of the DAC episodes in the sea level pressure (SLP) field. Among the 1970s–1990s periods, the spatiotemporal characteristics of the DACs of the 500 hPa tropical air temperature and geopotential height in 1970s, those of the SLP DACs over the North Pole in 1980s, and those of the DACs in both the northern and southern subtropical air temperatures were well simulated by the UKMO-HadGEM1 model, and those of the DACs in 1990s of SST and 500 hPa air temperature by the GFDL-CM2. 1 model. There are the planetary-scale atmospheric DACs which occurred in other models. It means that these five coupled climate models could depict the mechanisms of the planetary-scale atmospheric DACs in themselves, although the spatiotemporal structures of these DACs are not consistent with the actual ones. The decreased DACs in 1990s in the stratosphere, which maybe were caused by the Pinatubo eruption in 1991 (Xiao, 2008), are well simulated by the GFDL-CM2. 1 and ECHAM5/MPI-OM models, partly by the CCSM3 and UKMO-HadGEM1 models, and not by the FGOALS-g1.0 model. According to the analysis in this study, this may result from the lack of consideration of the influences of the eruption or ozone in the FGOALS-g1.0 model.

**Key words** Global ocean-atmosphere system, Decadal abrupt change, Spatiotemporal structure, Simulation evaluation, 20th Century Coupled Climate Models, Volcanic eruption

**摘 要** 文中评估了5个耦合模式对1880年至今全球海气系统的年平均年代际突变时空特征的模拟能力。19世纪80年代—20世纪90年代,评估了耦合模式对海表温度(SST)和海平面气压(SLP)的年代际突变水平分布的模拟能力;20世纪70—90年代,评估了耦合模式对70、80和90年代这3次年代际突变大气的四维时空特征的模拟。结果表明,在上述2个时段中,5个耦合模式对SST场中年代际突变分布最主要的空间分布型——太平洋年代际振荡(PDO)没有抓住,可能导致了对于SST年代际突变的模拟能力较差,也没有模拟出SLP年代际突变的行星及其以上尺度的空间结构。20世纪70—

\* 资助课题:国家重点基础发展规划项目(2006CB400503)、国家自然科学基金重大项目(40890052,40890053)、国家自然科学基金项目(40821092)和中国气象科学研究院基本科研业务费。

作者简介:肖栋,主要从事年代际气候变率研究。E-mail: xiaodong@cma. gov. cn

90年代,在对流层中,UKMO-HadGEM1模式较好地模拟出了70年代的热带地区500 hPa气温和位势高度,80年代极地SLP,90年代南、北副热带气温和500 hPa气温的年代际突变的分布。GFDL-CM2.1模式部分模拟出了90年代的SST和500 hPa温度场突变的水平分布。其余模式中也有行星及以上尺度的年代际突变发生,虽然所模拟出来的突变的时间和空间分布与实际差异都较大,但说明这些模式可以模拟出大尺度气候系统年代际突变,其中包含的物理过程还有待于进一步的研究。在平流层,肖栋(2008年)指出1994年平流层的降温突变可能是1991年Pinatubo火山爆发所造成的臭氧减少导致的。其中,GFDL-CM2.1和ECHAM5/MPI-OM模式较好地模拟出了平流层在1994年的降温突变,CCSM3和UKMO-HadGEM1模式部分模拟出了平流层的变冷突变,而FGOALS-g1.0模式没有模拟出来。分析表明,这可能是FGOALS-g1.0模式没有考虑火山灰或者臭氧的作用所致。

**关键词** 全球海气系统,年代际突变,时空特征,模拟评估,20世纪耦合气候模拟,火山爆发

**中图法分类号** P46

## 1 引言

随着社会的发展和科学的进步,人们不仅需要了解和预测季节和年际时间尺度的气候变化,而且也十分关心更长时间尺度,尤其是10年及年代际时间尺度的气候变化和预测程度(李崇银,2000)。因为研究10年及年代际气候变化及其可预报性成为社会经济持续发展、避免或减轻自然灾害,以及为较长时期的社会和经济发展规划提供科学依据的迫切需要。年代际尺度的气候变率的预测是国际气候变化与可预报性研究计划(Climatic Variability and Predictability, CLIVAR)的重要组成部分(王绍武,1997),气候模式是我们研究和预测年代际突变(Decadal abrupt changes, DACs)的有效工具。耦合模式对已有的突变模拟能力的高低直接决定了其对未来气候变化的预测水平。在国际上,用耦合模式资料对年代际突变的评估还是一个全新的领域,这方面工作的开展,有助于改进耦合模式对年代际突变的模拟能力,以提高耦合模式对年代际突变的模拟和预测水平。

国际上有较多的模式比较计划,如被IPCC(Intergovernmental Panel on Climate Change) AR4 (Fourth Assessment Report)采用的20世纪耦合气候模式(20th Century Coupled Climate Models, 20C3M)计划就有1860—2000年的模式资料,Zhou等(2006)利用20C3M资料评估了耦合模式对20世纪中国和全球气温的变暖趋势的模拟能力。耦合模式的比较计划为我们评估耦合模式对于已发生的全球海气系统年代际突变的模拟能力提供了前提条件。符淙斌(1994)对发生在20世纪10、20和60年

代的突变现象做了全面的总结。肖栋等(2007)对1880年以来的全球海表温度(SST)的年代际突变做了系统的检测,指出了7个主要的年代际突变时期。Xiao等(2007)对20世纪70年代海气系统年代际突变的时空特征进行了详细的分析。肖栋(2008)对1880年至今的全球海平面气压(SLP)的年代际突变进行了检测,揭示了其9个主要的突变时期,还用再分析资料分析了20世纪70、80和90年代全球海气系统年代际突变的四维时空特征。那么,耦合模式对海气系统已有的这些突变是否有很好的描述呢?回答这个问题对于认识现有耦合模式对年代际突变的模拟能力和水平是有帮助的,这正是本文研究的目的。

本文的工作主要分为两个方面,一是评估20C3M中5个耦合气候模式模拟的19世纪80年代—20世纪90年代SST和SLP年代际突变的时空特征;二是从多个变量入手来分析20世纪70、80和90年代全球大气系统年代际突变的四维时空特征。最后,对年代际突变时空特征模拟所存在问题的可能成因和未来继续需要研究的工作进行了讨论。

## 2 资料和方法

### 2.1 模式和观测资料

参加20C3M比较计划的有23个模式,本文选取了美国NCAR的CCSM3,德国马普研究所(MPI)的ECHAM5/MPI-OM,美国地球流体动力学实验室(GFDL)的GFDL-CM2.1,中国科学院大气物理研究所(IAP)的FGOALS-g1.0和英国哈得来中心的UKMO-HadGEM1等5个模式资料作为

分析对象。20C3M 模拟考虑了多种自然和人为外强迫的综合效应,如温室气体、硫酸盐气溶胶、臭氧、火山灰气溶胶和太阳变率等(详见 Zhou 等(2006)中的表 1)。这就为分析 20 世纪年代际突变的自然和人为成因提供了前提条件。本文分析的是年平均序列,资料分析时段为 1880—1999 年或更长至模式资料结束(ECHAM5/MPI-OM 于 2009 年结束)。

由于本文用模式模拟的年代际突变的空间分布与 2.2 方法中所述的结果进行对比的,因此,这里先介绍一下这些实际突变分布所采用的资料,海表温度资料采用的是 NOAA 提供的 ERSST(Extended Reconstruction Sea Surface Temperature)资料第 2 版(Smith, et al, 2004),资料分辨率为  $2^{\circ} \times 2^{\circ}$ ,资料长度为 1854 年 1 月—2008 年 3 月。SLP 资料采用的是哈得来中心的 HadSLP 第 2 版(Allan, et al, 2006),资料分辨率为  $5^{\circ} \times 5^{\circ}$ 。资料时段为 1850 年 1 月—2004 年 12 月。20 世纪 70—90 年代的大气资料采用的是 NCEP/NCAR 再分析资料(Kalnay, et al, 1996)。资料的分辨率为  $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$ ,资料长度为 1948 年 1 月—2008 年 2 月。

## 2.2 方 法

符淙斌等(1992),李建平等(1996),魏凤英(1999),赵芳芳等(2006),封国林等(2006)和 He 等(2008)介绍并评述了检验均值突变常用的几种常用方法:低通滤波法、滑动  $t$ -检验法、Yamamoto 法、Cramer 法、Mann-Kendall 法、子波变换和连续滑动  $t$ -检验法等,封国林等(2006)和 He 等(2008)还介绍了用于非线性时间序列突变检测的方法:启发式分割算法,动力学指数分割算法,条件熵、排列熵等检测动力学结构突变的检测方法。传统的突变方法的用途是用来检测均值突变,而非线性方法突变检测方法是用来检测非线性时间序列的动力学结构突变的,均值发生突变,动力学结构可能发生突变,也可能不发生突变,反之亦然。由于本文所关注的是年代际均值突变,肖栋等(2007)通过比较上述几种均值突变检测方法的优缺点,选择了滑动  $t$ -检验方法并应用于检测 SST 的年代际突变的水平分布,Xiao 等(2007)对其进行了发展,对滑动  $t$ -检验方法进行了正态分布的检验和错误发现率的订正,并将其应

用到分析海气系统变量年代际突变的四维时空特征。本文采用滑动  $t$ -检验法检测上述 5 个耦合模式模拟结果中年代际突变的时空特征,并与肖栋等(2007, 2008)、Xiao 等(2007)所揭示的实际资料中的年代际突变的时空特征进行对比。

由于对 120 年左右的月平均资料进行 EOF 运算,样本量将达到 1200 左右,这样计算 EOF 很难实现。为了计算方便,本文用冬季(11 月—3 月平均)的 SST (Smith, et al, 2004) 来计算 Mantua 等(1997)定义的冬季的 PDO 指数,从计算的 PDO 指数与肖栋等(2007)计算的结果对比可以发现,除了 1897 年外,其余突变年份都是一致的。因此,这样计算的冬季 PDO 指数是合理的。

## 3 对 19 世纪 80 年代—20 世纪 90 年代全球 SST 和 SLP 年代际突变时空特征的模拟评估

19 世纪 80 年代—20 世纪 90 年代,器测 SST 资料中的年代际突变时期为 1894—1901、1905—1909、1920—1930、1939—1945、1954—1958、1973—1979、1983—1988 和 1994—1998 年(肖栋等, 2007, 2008),器测 SLP 资料的年代际突变时期为 1892—1898、1907—1914、1917—1922、1932—1936、1939—1947、1954—1958、1973—1978、1983—1988 和 1994—1998 年(肖栋, 2008)。SST 和 SLP 年代际突变空间分布的文字描述分别请见肖栋等(2007, 2008)。肖栋等(2007)没有给出 20 世纪 80 年代海洋上的突变分布,是因为 20 世纪 80 年代海洋上的突变分布在空间上没有连续性,而其综合效应可能会导致大气的年代际突变(肖栋, 2008)。在观测资料没有突变发生的时段,模式的模拟结果中也有突变发生,本文中关注的时段是观测资料发生突变的时段。由于模式中的 SST 和 SLP 的突变大体上和实际突变的位置和时间一致的比较少,而且突变的分布较实际的零散,因此,在本部分中略去这些模式关于 SST 和 SLP 在 19 世纪 80 年代—20 世纪 90 年代模式模拟的突变分布图,这里只做文字说明。上述 5 个模式模拟的 SST 突变和实际 SST 突变的主要的地理分布如表 1 所示,其中对模式的模拟结果进行了简评。

表1 5个耦合模式模拟的19世纪80年代—20世纪90年代的SST突变地理分布与实际突变分布的对比

Table 1 Evaluation of the geographical distribution of the SST DACs in five coupled models compared with the actual ones during the 1880s–1990s period

时间	观测资料	CCSM3 模拟结果	ECHAM5/ MPI-OM 模拟结果	GFDL-CM2.1 模拟结果	FGOALS-g1.0 模拟结果	UKMO-Had GEM1 模拟结果	模拟结果评价
1894—1901	北、西太平洋,南印度洋和北大西洋的降温突变,中东太平洋的升温突变	北大西洋北部的降温突变	北太平洋和北大西洋的升温突变	北太平洋和北大西洋升温突变	北太平洋升温突变和南大西洋的降温突变	无大范围突变	模拟结果均不好
1905—1909	中东太平洋和南太平洋南部的降温突变	南太平洋东部的升温突变	无大范围突变	热带大西洋北部和北太平洋的升温突变	南印度洋和北冰洋的降温突变	热带大西洋南部的降温突变	模拟结果均不好
1920—1930	北大西洋,东太平洋,西太平洋和北印度洋的升温突变	北太平洋南部,北部的降温突变,南印度洋和南大西洋的升温突变	南太平洋中部的升温突变	北、热带印度洋,热带大西洋和北太平洋的升温突变	北太平洋中部和北太平洋西部的降温突变及北太平洋东部的升温突变	北太平洋,北大西洋,热带大西洋和南太平洋南部的降温突变及一些零星的升温突变	GFDL-CM2.1 模拟结果与实际突变部分一致,但无PDO型
1939—1945	南、北太平洋升温突变,东太平洋和北大西洋降温突变	热带印度洋、中太平洋北部和南太平洋东部的升温突变	北太平洋中部的降温突变和南印度洋南部的降温突变	北太平洋、北大西洋降温突变,东南太平洋和热带大西洋南部的升温突变	北太平洋中部和美国西海岸突变,副热带西太平洋及澳大利亚四周的升温突变	热带大西洋北部的降温突变,北太平洋和南太平洋南部的升温突变	模拟结果均不好
1954—1958	南、北太平洋降温突变,中太平洋和北印度洋升温突变	中太平洋和赤道东部的升温突变	北太平洋和北大西洋南部和北部的升温突变	西北太平洋和北部的降温突变,西太平洋北部的升温突变	南印度洋和北部的降温突变	北太平洋北部的降温突变和南太平洋的升温突变	模拟结果均不好
1973—1978	南北太平洋降温突变,东太平洋增温突变	北大西洋北部,东部的降温突变,南太平洋中部的升温突变	北太平洋西部,北部降温突变,南、北副热带太平洋和北大西洋升温突变	南大西洋南部和热带大西洋北部的升温突变	南印度洋,热带南部和副热带大西洋的升温突变	热带太平洋,印度洋和北大西洋的升温突变	模拟结果均不好
1983—1988	热带大西洋南部,北半球中纬度海域的升温突变	澳大利亚南方和南太平洋中部的升温突变	北大西洋中部,北太平洋东部降低突变;南太平洋升温突变	绕极环流和西北太平洋的升温突变	北太平洋北部和东部的升温突变	热带太平洋北部、赤道大西洋和印度洋西部的升温突变	模拟结果均不好
1994—1998	南、北、西太平洋,北印度洋和北大西洋升温突变	印度洋中、西部的升温突变	南印度洋,北太平洋西部和西部,热带大西洋北部的升温突变	北印度洋和南太平洋中部的升温突变	无大范围突变	北太平洋北部的升温突变	GFDL-CM2.1 中 SST 突变部分与实际一致,但无PDO型

### 3.1 对全球 SST 年代际突变时空分布特征的模拟

#### 3.1.1 CCSM3 模拟结果

由表1可知,1894—1901年,CCSM3模拟出北大西洋北部地区SST在1900年左右发生了降温突变,与该地区的实际情况是一致的,然而,对实际资

料中太平洋西岸和南极绕流区的SST降温突变都没有模拟出来。1905—1909年,CCSM3模式模拟的赤道东太平洋以南海域SST在1905年发生了升温突变,与实际刚好相反。1920—1930年,CCSM3模拟的SST降温突变发生在南大西洋,升温突变发

生在中印度洋,但是,该分布均与实际情况不一致,并且对本次突变最主要的特征(北大西洋和东太平洋 SST 的升温突变)没有模拟出来。1939—1945 年,CCSM3 模式中印度洋 SST 在 1942—1943 年发生了升温突变,而实际这一地区却是降温突变。总体而言,实际 SST 的突变最主要的分布型(南、北太平洋升温,北大西洋降温)没有模拟出来。1954—1958 年,CCSM3 模拟的热带东太平洋以南和中太平洋 SST 在 1954 年发生了升温突变,其中太平洋 SST 的升温突变和实际的突变位置是一致的,但是时间比实际的 1956 年要早 2 年。CCSM3 模式中澳大利亚以西海域 SST 的降温突变与实际的升温突变恰好相反。1973—1978 年,CCSM3 模拟的 SST 于 1973—1974 年在北大西洋北部、东部的降温突变,南太平洋中部的升温突变。1983—1988 年,CCSM3 模拟的澳大利亚东南方和南太平洋中部的 SST 于 1983—1986 年发生了升温突变。1993—1998 年,CCSM3 模式中热带印度洋中、西部 SST 在 1993—1998 年发生了升温突变。20 世纪 70、80 和 90 年代 CCSM3 模拟的 SST 与实际均不一致。

### 3.1.2 ECHAM5/MPI-OM 模拟结果

1894—1901 年,ECHAM5/MPI-OM 模式模拟的北太平洋和北大西洋 SST 发生了升温突变,实际情况刚好与之相反。ECHAM5/MPI-OM 模拟的南印度洋南部 SST 的降温突变与该地区实际的突变时间一致,但位置比实际偏南。1905—1909 年,没有成片的突变发生。1920—1930 年,ECHAM5/MPI-OM 模拟的南太平洋北部的 SST 于 1928 年发生了升温突变,与该地区的实际突变大体一致,而没有模拟出北大西洋升温这一主要特征。1939—1945 年,ECHAM5/MPI-OM 模拟的 SST 于 1944—1945 年在北太平洋中部发生了升温突变,其北面和东南面均是降温突变,这与实际情况是一致的。在南印度洋的降温突变,在北大西洋的升温突变都与当地的实际突变相反。1954—1958 年,ECHAM5/MPI-OM 模拟的 SST 于 1956—1957 年在北太平洋中西部发生了小范围的降温突变,与实际情况一致。此外,ECHAM5/MPI-OM 模拟的 SST 于 1956—1957 年在热带大西洋北部和北大西洋分别发生了升温 and 降温突变,而实际上这一地区没有突变发生。1973—1978 年,ECHAM5/MPI-OM 模式模拟的 SST 于 1977—1978 年在北太平洋西北部发生降温

突变,与实际突变一致。模拟的 1978 年在南、北副热带太平洋和 1973—1974 年北大西洋的升温突变,则与实际情况不一致。1983—1988 年,ECHAM5/MPI-OM 模拟的南太平洋 SST 在 1983—1984 年发生了升温突变,而 SST 实际的突变发生在北半球中纬度海洋。1993—1998 年,ECHAM5/MPI-OM 模拟的南印度洋,北太平洋西北部和西部,热带大西洋北部的 SST 在 1994—1996 年发生了升温突变,和该地区实际情况一致,但是对北大西洋大范围的突变没有模拟出来。

### 3.1.3 GFDL-CM2.1 模拟结果

1894—1901 年,GFDL-CM2.1 模拟的 1895 年西北太平洋 SST 的升温突变与实际相反,模拟的澳大利亚南部 SST 的降温突变与实际情况一致。1905—1909 年,GFDL-CM2.1 模拟的北太平洋中部和热带大西洋中部 SST 在 1908—1909 年发生了升温突变,北大西洋中部 SST 于 1909 年发生了降温突变,与实际的突变分布均不一致,而且东太平洋降温突变这一主要特征没有模拟出来。1920—1930 年,GFDL-CM2.1 模拟的北印度洋和北太平洋南部 SST 在 1927 年发生了升温突变,与该地实际突变位置相同但突变时间晚 2—3 年。此外,GFDL-CM2.1 模拟的热带大西洋南部和西南印度洋 SST 分别在 1921—1922 和 1927 年发生了升温突变。1939—1945 年,GFDL-CM2.1 模拟的北大西洋 SST 在 1941—1943 年发生了降温突变,突变位置与实际情况一致,但比实际突变时间(1943—1944 年)要晚 2—3 年。此外,GFDL-CM2.1 模拟的北太平洋 SST 发生在 1943—1944 年的降温突变,与实际突变的性质相反,但时间大体一致。GFDL-CM2.1 模拟的 SST 于 1940 年在热带大西洋南部发生了升温突变,而实际情况则没有。1954—1958 年,GFDL-CM2.1 模拟的西太平洋北部 SST 在 1956—1957 年发生了降温突变,比实际突变的位置偏南。GFDL-CM2.1 模拟的北大西洋 SST 在 1955—1956 年发生了升温突变,而实际则没有。1973—1978 年,GFDL-CM2.1 模拟的 SST 于 1977—1978 年在南大西洋南部和副热带北大西洋发生了升温突变,其中副热带北大西洋的突变与实际情况一致。1983—1988 年,GFDL-CM2.1 模拟的绕极环流和西北太平洋 SST 于 1983—1988 年发生了升温突变,与实际突变位置均不一致。1993—

1998年,GFDL-CM2.1模拟的北印度洋和南太平洋SST在1994—1996年发生了升温突变,与实际情况一致。

#### 3.1.4 FGOALS-g1.0模拟结果

1894—1901年,FGOALS-g1.0模拟的南大西洋西部SST在1897—1899年发生了降温突变,与该地区实际突变一致。1905—1909年,FGOALS-g1.0模拟的SST于1907—1909年在北冰洋和南印度洋南部发生了降温突变,与该地区实际突变均不一致。1920—1930年,FGOALS-g1.0模拟的北太平洋中部SST于1922年发生降温突变,北太平洋东部SST于1925—1929年发生升温突变,这与实际突变位置一致,但是突变时间要晚3—5年。此外,FGOALS-g1.0模拟的南印度洋SST在1928年也发生了升温突变,实际中则没有。1939—1945年,FGOALS-g1.0模拟的西太平洋地区和南印度洋SST在1939—1944年发生了升温突变,北太平洋和美国以东海域在1940—1942年发生了降温突变。其中北太平洋的降温突变与实际情况相反,南太平洋的升温突变与实际情况类似。1954—1958年,FGOALS-g1.0模拟的澳大利亚西南海域和美国以东海域SST在1954—1955年发生了降温突变,北太平洋北部SST在1955和1957年发生了升温突变,南太平洋中部SST在1954年发生了降温突变,这些突变的分布均与实际情况不一致。1973—1978年,FGOALS-g1.0模拟的SST在南印度洋和热带南部和副热带大西洋发生了升温突变,其中南印度洋的突变位置与实际情况大体一致。1983—1988年,FGOALS-g1.0模拟的北太平洋北部和东部SST于1983—1984和1987年发生了升温突变,其中前者与实际突变位置是一致的,但时间偏早3年。1993—1998年,FGOALS-g1.0模拟的SST突变零散分布,显然与实际突变不一致。

#### 3.1.5 UKMO-HadGEM1模拟结果

1894—1901和1920—1930年,UKMO-HadGEM1模拟的突变零星分布,显然与实际突变分布不一致。1905—1909年,UKMO-HadGEM1模拟的SST在热带印度洋南部于1906年发生了降温突变,而实际资料中的东太平洋的降温突变没有被模拟出来。1939—1945年,UKMO-HadGEM1模拟的北太平洋北部和东部SST在1941—1942年发生了升温突变,而实际资料中北太平洋中部SST为降

温突变,这与实际情况相反。UKMO-HadGEM1模拟的热带大西洋北部和北大西洋东部SST在1942—1943年发生了降温突变,这与实际突变位置一致,但时间要早1—2年。1954—1958年,UKMO-HadGEM1模拟的北太平洋北部SST于1954—1958年发生了降温突变,这与实际情况大体类似。UKMO-HadGEM1模拟的南太平洋SST在1957年发生了升温突变,与实际情况相反。1973—1978年,UKMO-HadGEM1模拟的SST的升温突变于1977年发生在南大西洋,与实际突变位置大体类似,UKMO-HadGEM1模拟的热带太平洋、北印度洋和北大西洋SST于1974—1978年发生了升温突变,其中北印度洋的突变位置与实际是一致的。1983—1988年,UKMO-HadGEM1模拟的热带太平洋北部和赤道大西洋SST于1983—1984年发生了升温突变,北大西洋东部SST于1987年也发生了升温突变,与实际突变不一致。1993—1998年,UKMO-HadGEM1模拟的SST无大范围突变发生,与实际情况不符。

### 3.2 对全球SLP年代际突变时空特征的模拟

肖栋(2008)给出了观测SLP在19世纪80年代—20世纪90年代突变的时空分布。表2给出了SLP实际突变和模式模拟的SLP突变的主要空间分布,并依据其中实际突变分布对模式模拟的结果进行了评价。

#### 3.2.1 CCSM3模拟结果

由表2可知,1892—1898年,CCSM3模拟的南大西洋地区SLP在1900年发生了增加突变,和该地区实际突变位置大体对应,但对南极大范围的突变没有模拟出来。1907—1914年,CCSM3模拟的1907—1908年赤道中太平洋SLP和1910年在热带大西洋SLP均有增加突变发生,其中发生在中太平洋的突变在时间和位置上与实际的突变大体上是一致的。其他大范围的突变都没有被模拟出来。1917—1922年,CCSM3模拟的降温突变1919年和1921年分别发生在中太平洋和欧洲北部地区,而实际的增加突变1921年发生在南极地区。1932—1936年,实际的降温突变1932—1933年发生在东亚和西北太平洋地区,而CCSM3模拟的SLP的突变1933—1934年发生在热带大西洋和北美洲南部地区。1939—1947年,观测SLP的增加突变主要发生在北极地区和南、北太平洋地区,降低的突变发

表2 同表1,但为 SLP  
Table 2 Same as Table 1, but for SLP

时间	观测资料	CCSM3 模拟结果	ECHAM5/ MPI-OM 模拟结果	GFDL-CM2.1 模拟结果	FGOALS-g1.0 模拟结果	UKMO-Had- GEM1 模拟结果	模拟结果评价
1892—1898	南、北太平洋降低突变,亚洲和南极增加突变	南大西洋南部降低突变	热带大西洋和西北非的降低突变	中东北部、中亚的降低突变;新西兰东南和巴西东北的增加突变	北欧、中东和北大西洋西部的增加突变;西南大西洋的降低突变	南美洲北部和南印度洋极地附近海域的增加突变	模拟结果均不好
1907—1914	北、中太平洋、热带大西洋的增加突变;南印度洋、南极和中亚的降低突变	热带大西洋和中美洲的增加突变;白令海峡的降低突变	无大范围突变	南大西洋和南太平洋东部的小范围的增加突变	里海及其周围的降低突变	澳大利亚以南和南太平洋中、东部的降低突变	模拟结果均不好
1917—1922	中亚和南极的增加突变;北美洲和南美洲北部的降低突变	北欧和中太平洋的降低突变	格陵兰岛东部和西部的增加突变	无大范围突变	中东、东欧的增加突变;副热带南大西洋的降低突变	贝加尔湖东北方的增加突变	模拟结果均不好
1932—1936	东亚和西北太平洋的降低突变;南太平洋中部的增加突变	热带大西洋和中、北美洲的降低突变	北太平洋西北部的降温突变	北欧、南太平洋南部的增加突变;北大西洋的降低突变	南欧和东欧的增加突变	西欧和南印度洋极地附近海域的降低突变	模拟结果均不好
1939—1947	北太平洋沿岸,新西兰东南方的增加突变;热带大西洋,暖池,太平洋东南部的降低突变	南印度洋、热带大西洋和北美洲的增加突变;加拿大东部和东欧的降低突变	美国、格陵兰岛和中东地区的降低突变;澳大利亚北方和南太平洋的增加突变	副热带北大西洋的增加突变和副热带南大西洋的降低突变	北极和北大西洋北部的增加突变;阿拉斯加和罗斯海的降低突变	北极和副热带北太平洋的降低突变;白令海峡的增加突变	模拟结果均不好
1954—1958	热带大西洋,暖池的增加突变;南极和中太平洋北部的降低突变	西欧的降低突变;加拿大北部和南美洲东南方的增加突变	无大范围突变	北欧的降低突变;北大西洋北部和印度洋东南部的增加突变	北极的降低突变	南亚、热带大西洋的增加突变;南太平洋东、西部,印度洋西南部的降低突变	UKMO-Had-GEM1 模拟结果部分与实际突变一致
1973—1978	东半球热带增加突变	南大西洋增加突变	加拿大北部和西北太平洋增加突变	西南大西洋的增加突变	无大范围突变	南印度洋的增加突变和西南太平洋的降低突变	模拟结果均不好
1983—1988	极地的降低突变	无大范围突变	无大范围突变	美国东部和赤道大西洋的增加突变	极地和北大西洋北部的增加突变	北极降低突变和中美洲的降低突变	UKMO-Had-GEM1 模拟结果较好
1994—1998	北极增加突变	无大范围突变	无大范围突变	无大范围突变	北太平洋东南部的增加突变	副热带南大西洋和中太平洋北部的增加突变	模拟结果均不好

生在热带大西洋和南太平洋东南部,而 CCSM3 模拟的热带大西洋 SLP 在 1944—1945 年发生了降温突变,显然与实际不符。1954—1958 年,实际的增加突变发生在热带大西洋、暖池和东非地区,减少突变发生在南极地区。然而,CCSM3 模拟的 SLP 的

降低突变发生在西欧和南极地区,增加突变发生在南美洲东南方海域。CCSM3 模式中仅有南极地区发生的零星降温突变和实际的突变是一致的。1973—1978 年,CCSM3 模拟的 SLP 在南大西洋发生增加突变。在 1983—1988 和 1993—1998 年,

CCSM3 模拟的 SLP 无大范围突变发生,显然与实际不符。

### 3.2.2 ECHAM5/MPI-OM 模拟结果

1892—1898 年, ECHAM5/MPI-OM 模拟的 SLP 的降低突变 1894 年发生在热带大西洋北部和北非地区,而实际的降低突变发生在南、北太平洋地区。1907—1914、1917—1922 和 1954—1958 年, ECHAM5/MPI-OM 模拟的 SLP 场没有成片的突变发生,显然与实际情况不一致。1932—1936 年, ECHAM5/MPI-OM 模拟的西北太平洋地区 SLP 在 1936 年发生了降温突变,与该地区实际的突变位置是相同的,但是突变时间要晚 3 年。1939—1947 年, ECHAM5/MPI-OM 模拟的 SLP 的降低突变发生在里海,地中海,美国和格陵兰岛南部地区;增加突变发生在南太平洋和澳大利亚以北海域,与实际情况均不一致。1973—1978 年, ECHAM5/MPI-OM 模拟的 SLP 在加拿大北部和西北太平洋发生增加突变,与实际突变位置是不一致的。1983—1988 和 1993—1998 年, ECHAM5/MPI-OM 模拟的 SLP 无大范围突变发生,均与实际不符。

### 3.2.3 GFDL-CM2.1 模拟结果

1892—1898 年, GFDL-CM2.1 模拟的 SLP 的降低突变于 1892 和 1895 年发生在亚洲 40°N 一线,与实际情况不符。1907—1914 年, GFDL-CM2.1 模拟的 SLP 于 1911 年在南太平洋东南部发生的增加突变与该地区实际突变的位置和时间均一致,但是对实际的大部分突变都没有被模拟出来。1917—1922 年, GFDL-CM2.1 模拟的 SLP 没有突变发生。1932—1936 年, GFDL-CM2.1 模拟的 SLP 的增加突变 1932—1933 年发生在北欧地区,降低突变 1936 年发生在北大西洋地区,与实际突变的位置(东亚和西北太平洋)都不一致。1939—1947 年, GFDL-CM2.1 模拟的 SLP 场没有大范围突变发生,与实际情况不符。1954—1958 年, GFDL-CM2.1 模拟的 SLP 增加突变发生在南欧地区,降低突变发生在北欧地区,均与实际情况不符。1973—1978 年, GFDL-CM2.1 模拟的 SLP 在南大西洋西部发生增加突变。1983—1988 年, GFDL-CM2.1 模拟的 SLP 于 1985 年在美国东部和赤道大西洋发生了增加突变;1993—1998 年, GFDL-CM2.1 模拟的 SLP 无大范围突变发生,显然与实际突变不符。

### 3.2.4 FGOALS-g1.0 模拟结果

1892—1898 年, FGOALS-g1.0 模拟的 SLP 增加突变于 1895 年发生在北大西洋西部,1898 年发生在东欧和中东地区。其中,中东地区的突变和实际的突变位置是一致的,但突变时间比实际的突变年份(1895 年)早 3 年。1907—1914 和 1932—1936 年, FGOALS-g1.0 模拟的 SLP 没有突变发生,与实际情况不一致。1917—1922 年, FGOALS-g1.0 模拟的 SLP 于 1917 年在里海地区发生增加突变,1917 和 1921 年在南大西洋发生了降低突变,与实际的突变时间和位置都不一致。1939—1947 年, FGOALS-g1.0 模拟的 SLP 于 1939—1940 年在北极发生了增加突变,与该地区实际情况大体一致,但整体分布与实际突变分布相差较远。1954—1958 年, FGOALS-g1.0 模拟的北极 SLP 在 1956 年发生了降低突变,这与实际情况不符。1973—1978 年, FGOALS-g1.0 模拟的 SLP 无大范围突变发生。1983—1988 年, FGOALS-g1.0 模拟的 SLP 于 1985 年在极地和北大西洋北部发生了增加突变,与实际突变分布刚好相反。1993—1998 年, FGOALS-g1.0 模拟的 SLP 于 1994—1995 年在北太平洋东南部发生增加突变,与实际发生在北太平洋的突变是不一致的。

### 3.2.5 Ukmo-HadGEM1 模拟结果

1892—1898、1917—1922 和 1932—1936 年, Ukmo-HadGEM1 模拟的 SLP 没有成片的突变发生,显然与实际不符。1907—1914 年, Ukmo-HadGEM1 模拟的 SLP 于 1909 和 1913 年在南太平洋地区发生了降温突变,1913 年在澳大利亚以南地区也发生了降低突变,这和实际突变位置一致,但突变的性质是相反的。1939—1947 年, Ukmo-HadGEM1 模拟的 SLP 于 1941 年在北极地区发生的降温突变与该地区 1939—1940 年实际发生的增加突变的性质是相反的,模拟的白令海峡 1947 年的增加突变与该地区实际突变分布一致。1954—1958 年, Ukmo-HadGEM1 模拟的 SLP 于 1956 年发生在热带大西洋的增加突变与该地区的实际突变一致,而其他地区一些突变分布与实际情况就不一致了。1973—1978 年, Ukmo-HadGEM1 模拟的 SLP 于 1976—1978 年在南印度洋发生了增加突变,显然与实际中西半球的增加突变是不一致的。1983—1988 年, Ukmo-HadGEM1 模拟的 SLP 于 1987—1988 年在北极发生了降温突变,在中美洲发生了增加突

变,这与实际突变位置是一致的。1993—1998年,UKMO-HadGEM1模拟的SLP于1995年在副热带南大西洋和中太平洋北部发生了增加突变,与实际突变是不一致的。

### 3.3 小结

肖栋等(2007)所揭示的全球SST年代际突变最主要的特征就是太平洋上的PDO模态。冬季PDO的突变年份和年平均全球SST的突变时间从1900年以来大体都是一致的。PDO模态是指独立于ENSO的北太平洋年代际模态,北太平洋和赤道东太平洋的SST在年代际尺度上呈现反向变化趋势。图1给出了5个模式结果和实际资料计算的冬季(11月—3月)的PDO指数。可以看出,实际资料的突变发生在1897、1907、1924、1941、1956、1976和1997年(图1f)。CCSM3模式模拟PDO在1939年发生了降低突变,在1957年发生了增加突变(图1a)。CCSM3模拟的1957年的增加突变与实际突变是一致的,但是CCSM3模拟的北太平洋年平均的SST在20世纪50年代并没有发生突变。ECHAM5/MPI-OM模拟的冬季PDO指数在1898年发生了降低突变,与实际是一致的,还在1993年也发生了降低突变(图1b)。GFDL-CM2.1模拟的冬季PDO指数在1937年发生增加突变,1997年可能发生了降低突变(图1c)。这里需要特别指出的是GFDL-CM2.1模式模拟的PDO是第2模态。FGOALS-g1.0模拟的冬季PDO指数在1925和1983年发生了增加突变,其中1925年的增加突变和实际突变是一致的(图1d)。UKMO-HadGEM1模拟的冬季PDO指数1907和1925年的降温突变和增加突变与实际突变年份是一致的(图1e)。总体而言,这5个耦合模式可以模拟出PDO的几次突变事件,而且其突变均远不及实际突变明显,大部分的突变事件均没有被模拟出来。

从冬季PDO指数的年代际突变来看,CCSM3模拟的1957年的增加突变,FGOALS-g1.0模拟的1925年发生的增加突变,UKMO-HadGEM1模拟的1907年的降低突变和1925年的增加突变和实际PDO的突变是一致的。这说明在PDO最强的冬季,这些模式可以抓住PDO的突变特征。但是从年平均突变分布图来看,北太平洋和赤道东太平洋不存在相反性质的突变,由表1可知,这5个模拟的SST突变都没有抓住PDO模态本质特征(北太平洋主导,北太平洋和赤道东太平洋在年代际尺度上

的反向变化),也就没有抓住全球SST年代际突变的主要特征。实际资料中SLP的突变分布并无固定的模态,就时空尺度而言,SLP突变的分布具有行星尺度结构。由表2可知,本文所采用的5个模式模拟的突变只是部分区域和实际一致,而对SLP实际突变的行星尺度结构没有模拟出来。

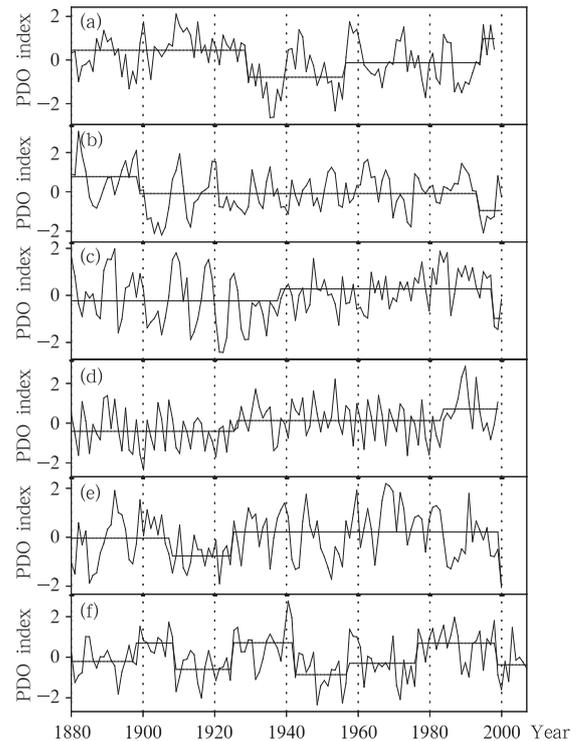


图1 冬季(11月—3月)PDO指数时间序列及其分段平均(a. CCSM3, b. ECHAM5/MPI-OM, c. GFDL-CM2.1, d. FGOALS-g1.0, e. UKMO-HadGEM1, f. 观测资料(ERSST),分段平均(加粗实线)是以置信度为99%的突变年份为界)  
Fig. 1 Winter (November-March) time series and episode averages of the PDO index of (a) CCSM3, (b) ECHAM5/MPI-OM, (c) GFDL-CM2.1, (d) FGOALS-g1.0, (e) UKMO-HadGEM1 and (f) observational data (ERSST). The episode averages are divided by the DACYs DAC years, significant at the 0.01 confidence level

## 4 对20世纪70—90年代全球大气年代际突变时空特征的模拟评估

对于发生在20世纪70年代以后的年代际突变的研究大量地采用了再分析资料,比较全面地揭示了大气系统的四维时空特征(Yu, et al, 2007, Xiao, et al, 2007)。本文的第3节已经对20世纪70、80和90年代的SST的突变做了介绍,这里主要介绍

这3次突变中大气突变的部分。本文的时空分布特征是与Xiao等(2007),肖栋(2008)中所揭示的20世纪70、80和90年代全球大气系统年代际突变的四维时空特征进行对比的。70和80年代的时空特征比较的变量为500 hPa气温和位势高度;由于观

测资料中90年代平流层发生了降温突变,因此,90年代比较的变量比前者多了30 hPa气温和位势高度。一些变量范围很小的突变,将不再赘述。模式模拟的和实际的海气系统的年代际突变的空间分布请见表3。

表3 同表1,但为20世纪70—90年代全球大气系统变量

Table 3 Same as Table 1, but for the variables of the global atmospheric system during the 1970s—1990s periods

时间	变量	观测资料	CCSM3 模拟结果	ECHAM5/ MPI-OM 模拟结果	GFDL-CM2.1 模拟结果	FGOALS-g1.0 模拟结果	UKMO-Had- GEM1 模拟结果	模拟结果评价
1973—1978	500 hPa 气温	热带升温突 变	加拿大西部 和中国北部 的升温突变	北极、北大西 洋、太平洋西 海岸、欧洲和 东北非的升 温突变	南大西洋南 部的升温突 变	美国、热带大 西洋北部,南 印度洋,西南 太平洋和南 印度洋的升 温突变	热带升温突 变	UKMO-Had- GEM1 模拟 的 500 hPa 气温突变与 实际突变一 致
	500 hPa 位势高 度	热带增加突 变	北极降低突 变,加拿大西 部,南大西洋 和南极中心 区增加突变	东亚,东、北 欧,北太平洋 东部和北大 西洋的增加 突变	南大西洋西 部的增加突 变	美国西部和 南半球副热 带的增加突 变	热带增加突 变	UKMO-Had- GEM1 模拟 的 500 hPa 位势高度突 变与实际突 变分布一致
1984—1988	500 hPa 气温	南、北半球中 纬度升温突 变,南极降温 突变	北极,副热带 大西洋,西非 和澳洲东南 方的升温突 变	美国,东亚, 西北非和北 欧的升温突 变	美国西北方, 日本东南方 和北大西洋 中部的升温 突变	西南、东南印 度洋,南太平 洋和南大西 洋的升温突 变	南、北半球副 热带和欧洲 的升温突变	模拟结果均 不好
	500 hPa 位势高 度	东北亚,加拿 大西部,西欧 和副热带大 西洋的增加 突变	中亚和加拿 大以北增加 突变;南大西 洋西南部降 低突变	美国和中纬 度南太平洋 的增加突变	美国西北方, 东北亚和副 热带北大西 洋的增加突 变	加拿大西部 和东北亚北 部的增加突 变	南、北半球副 热带的增加 突变	GFDL-CM2.1 模拟的 500- hPa 位势高 度中纬度部 分突变与实际 突变一致
1991—1998	(a) 500 hPa 气 温和(b) 500 hPa 位势高 度	(a)和(b)南、 北副热带和 北极位势高 度增加突变	(a)和(b)热 带增加突变	(a)北极降温 突变和中东 和日本东南 的升温突变; (b)中东和日 本东南方增 加突变	(a)加拿大北 部至北欧和 南北副热带 的升温突变; (b)中东和日 本东南方增 加突变	(a)亚洲大陆 以北和加拿 大西北部的 升温突变; (b)无大范围 突变	(a)南北半球 副热带的升 温突变;(b) 亚洲中纬和 副热带北太 平洋的增加 突变	UKMO-Had- GEM1 模拟 的突变位置 与实际大体 类似
	(a) 30 hPa 气 温和(b) 30 hPa 位势高 度	(a)和(b)热 带降温突变	(a)和(b) 60°W— 120°E中高 纬度的降低 突变	(a)热带降低 突变;(b)俄 罗斯东部的 降低突变	(a)热带和澳 大利亚以南 降低突变; (b)新西兰南 部的降低突 变	(a)无大范围 突变;(b)无 大范围突变	(a)南印度洋 和北半球副 热带的升温 突变;(b)南 北半球副热 带的增加突 变	GFDL-CM2.1 模拟的 500 hPa 位势高 度与实际突 变大体一致, 除了 FGOALS- g1.0 外,其余 模式部分或 全部模拟出 了平流层降 温突变

#### 4.1 CCSM3 模拟结果

20世纪70年代,加拿大西部的500 hPa气温和位势高度在1976—1977年发生了升温突变,与该地区的实际突变大体一致,而对热带大范围的增加突变没有模拟出来。80年代,CCSM3模式中北半球副热

带大西洋至北非,南半球副热带大西洋至南非一线和北美洲北部的500 hPa气温在1984—1985年发生了升温突变,而实际位势高度的突变为北极降低突变和北半球中纬度增加突变。90年代,500 hPa气温和位势高度1993—1995年大致发生在热带地区。从图2a

和2b可以看出,CCSM3模拟的热带地区500 hPa气温和位势高度在1994年发生增加突变,分别比前一时段的均值增加了0.52 °C和10.5 gpm。然而,实际突变发生在南、北半球副热带和极地地区,与实际情况不符。CCSM3模拟的30 hPa气温和位势高度的减少突变1993—1996年发生在60°W—120°E一带的南半球副热带和中高纬地区,与实际发生在热带地区的降低突变部分一致。

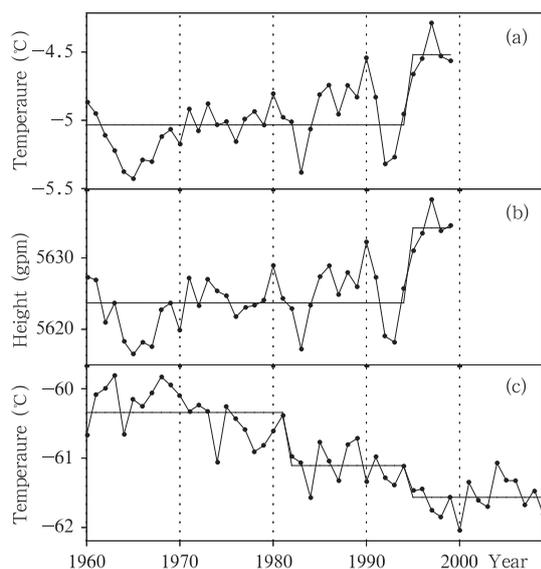


图2 (a)CCSM3模拟的(25°S—25°N,0°—357.5°E)

500 hPa气温(单位:°C)的年平均时间序列(带点实线)和分段平均(加粗实线);(b)同(a),

但为(25°S—25°N,0°—357.5°E)500 hPa位势高度(单位:gpm),和(c)ECHAM5/

MPI-OM模拟的(20°S—20°N,0°—357.5°E)

30 hPa气温(单位:°C)的年平均时间序列(带点实线)和分段平均(加粗实线),分段平均(加粗实线)是以置信度为95%的突变年份为界的

Fig. 2 (a) Annual averaged time series (close circles) and episode average (thickened lines) of 500 hPa air temperature (unit: °C) for the region (0° - 357.5°E, 25°S - 25°N) in CCSM3 model, (b) same as (a), but for 500-hPa eopotential height (unit: geopotential meter, gpm) over the domain (25°S - 25°N, 0° - 357.5°E, and (c) Annual averaged time series and episode average of 30-hPa air temperature (unit: °C) of the domain (20°S - 20°N, 0° - 357.5°E) in ECHAM5/MPI-OM model. The episode averages are divided by the DACYs significant at the 0.95 confidence level

## 4.2 ECHAM5/MPI-OM 模拟结果

20世纪70年代,ECHAM5/MPI-OM模拟的500 hPa气温的突变1973—1975年发生在西半球和北极地区。尽管和实际1976年热带升温突变在时间和位置上有所差异,但是这些突变表明ECHAM5/MPI-OM可以模拟出大尺度气候系统的年代际突变。80年代,ECHAM5/MPI-OM模拟的500 hPa气温和位势高度在1986—1988年在北美洲南部,东亚和欧洲地区发生了增加突变,与该地区的实际突变位置接近,突变时间要晚1—2年,但是对极地位势高度的降低突变没有模拟出来。90年代,ECHAM5/MPI-OM模拟的500 hPa气温在中东发生了升温突变,在北极地区(80°—90°N,90°W—90°E)1990年发生了降温突变。ECHAM5/MPI-OM模拟的500 hPa位势高度场的突变分布与500 hPa气温的类似。ECHAM5/MPI-OM模拟的热带30 hPa气温在1994年发生了降温突变,如图2c所示,在1994年以后时段,热带地区30 hPa气温比前一时段的降低了0.46 °C。ECHAM5/MPI-OM模拟的30 hPa位势高度1993年在东北亚地区发生了降低突变,与观测结果不一致。

## 4.3 GFDL-CM2.1 模拟结果

20世纪70年代,GFDL-CM2.1模拟的500 hPa气温和位势高度在南大西洋发生了增加突变,与观测不一致。80年代,GFDL-CM2.1模拟的500 hPa位势高度在东北亚、美国西海岸和副热带大西洋发生了增加突变,与观测大体一致,但没有模拟出极地的降低突变。90年代(图3a),GFDL-CM2.1模拟的500 hPa气温于1994—1996年大体在南、北半球副热带和北极发生升温突变,与实际分布是大体类似的。从图4a可以看出,GFDL-CM2.1模拟的北半球副热带气温于1993—1995年在1000—250 hPa发生了升温突变,与实际情况也是一致的。GFDL-CM2.1模拟的500 hPa位势高度在北半球副热带地区发生了增加突变,与该地区的实际突变分布是一致的。GFDL-CM2.1模拟的30 hPa气温在热带地区发生降温突变(图3e),这与实际突变的位置基本是一致的,但时间要晚2年。热带地区的降温突变(图4b)1994年发生在整个平流层。为了直观的看出这些突变,图5给出了GFDL-CM2.1模拟的北半球副热带500 hPa气温和位势高度,热带30 hPa气温的时间序列,可以看出,他们的突变均发

生在 1994 年,前二者分别比前一时段的均值增加了 0.78°C 和 14.8 gpm,而 30 hPa 气温则降低了

1.2°C。可见,GFDL-CM2.1 模式较好地模拟了 20 世纪 90 年代的突变。

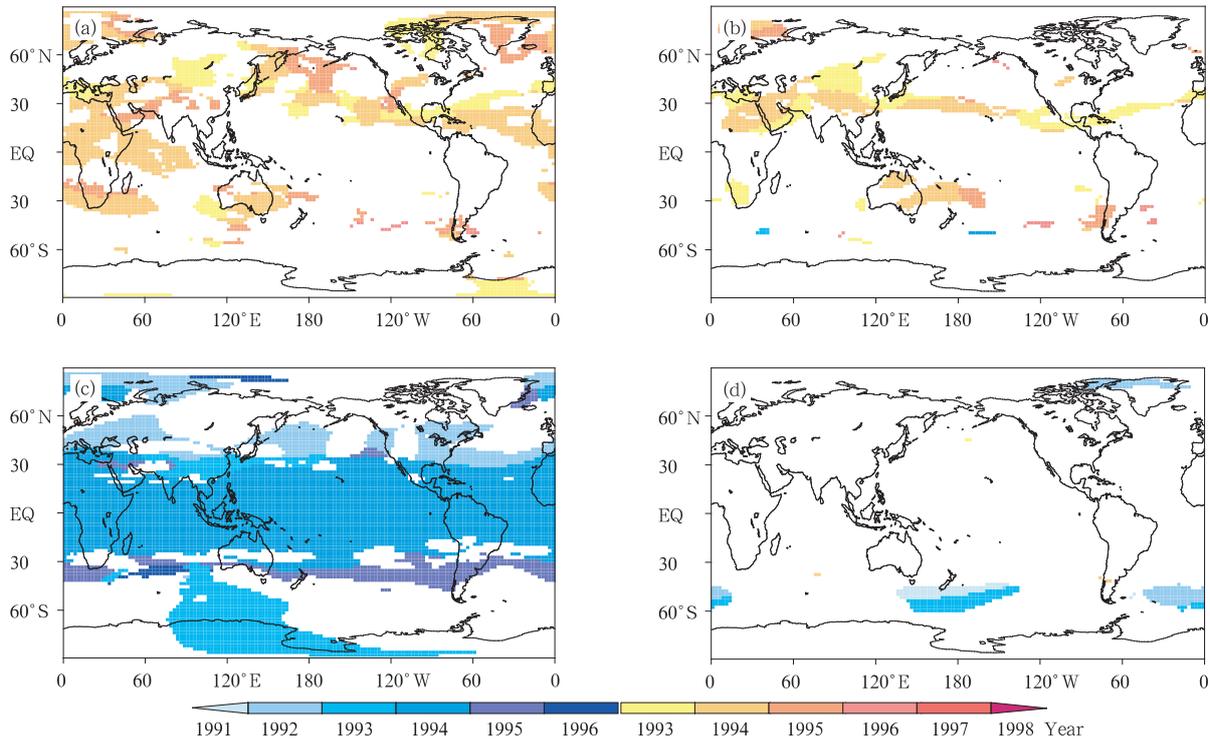


图3 GFDL-CM2.1 模拟的 20 世纪 90 年代年平均的突变年份的水平分布(a. 500 hPa 气温, b. 500 hPa 位势高度, c. 30 hPa 气温, d. 30 hPa 位势高度

灰色、蓝色系代表减少突变年份,黄、红色系代表增加突变年份。突变年份的置信度为 95%。每个变量场中年代际突变年份的错误发现率均控制在 0.05)

Fig. 3 Horizontal distributions of the DACYs in the 1990s of annual averaged field in the GFDL-CM2.1 model of (a) 500 hPa air temperature, (b) 500 hPa geopotential height, (c) 30 hPa air temperature, and (d) 30 hPa geopotential height. The cold color system (gray, blue, etc.) and warm color system (yellow, red, etc.) represent the decreased DACYs and increased DACYs significant at 0.05 confidence level, respectively. The false discovery rate of the DACYs in each field is controlled at 0.05

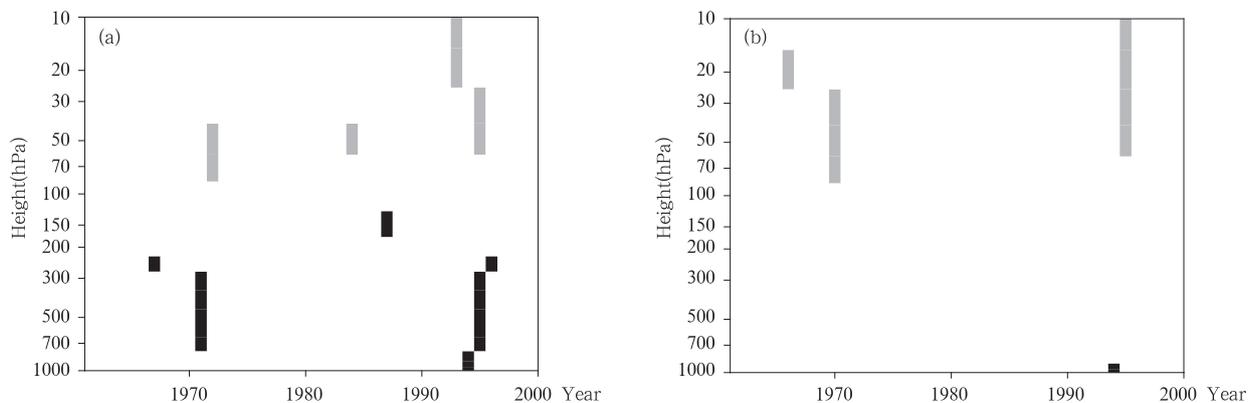


图4 GFDL-CM2.1 模拟的年平均气温的突变年份的垂直分布(a)(25°—40°N, 0°—357.5°E) (b)(30°S—30°N, 0°—357.5°E)(深色和浅色的阴影分别代表增加和降低的置信度为 95% 的年代际突变年份,每个变量场中年代际突变年份的错误发现率均控制在 0.05)

Fig. 4 Vertical distributions of the DACYs of annual averaged air temperature field in GFDL-CM2.1 model in the domains (a) (25° - 40°N, 0° - 357.5°E) and (b) (30°S - 30°N, 0° - 357.5°E). The darker and lighter shading indicate the increased DACYs and decreased DACYs significant at the 0.95 confidence level, respectively. The false discovery rate of the DACYs in each field is controlled at 0.05

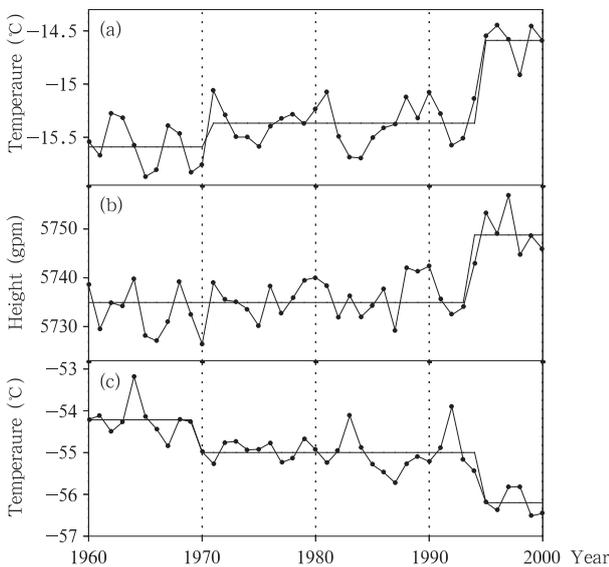


图5 同图2,但为GFDL-CM2.1模拟的(a)500 hPa气温(25°—40°N, 0°—357.5°E)(单位: °C), (b)500 hPa位势高度(25°—40°N, 0°—357.5°E)(单位: gpm)和(c)30 hPa气温(30°S—30°N, 0°—357.5°E)(单位: °C)  
 Fig. 5 Same as Fig. 2, but for the GFDL-CM2.1 model in the regions (a) 500-hPa air temperature (25° - 40°N, 0° - 357.5°E) (unit: °C), (b) 500-hPa geopotential height (25° - 40°N, 0° - 357.5°E) (unit: gpm) and (c) 30-hPa air temperature (30°S - 30°N, 0° - 357.5°E) (unit: °C)

4.4 FGOALS-g1.0 模拟结果

20世纪70年代, FGOALS-g1.0模拟的500 hPa气温于1973—1978年在南印度洋, 西南太平洋, 西南大西洋, 以及美国和副热带北大西洋发生了增加突变。FGOALS-g1.0模拟的500 hPa位势高度的突变分布与气温的大体类似。20世纪80年代,

8FGOALS-g1.0模拟的1986—1987年SLP在北极和北大西洋北部发生了增加突变, 这与实际突变分布是相反的。FGOALS-g1.0模拟的500 hPa气温于1983—1988年在南半球中纬度地区发生了升温突变。90年代, FGOALS-g1.0模拟的500 hPa气温在加拿大西北部于1994年发生了增加突变, 上述突变与实际情况均不一致。

4.5 UKMO-HadGEM1 模拟结果

20世纪70年代(图6), UKMO-HadGEM1模拟的500 hPa气温和位势高度于1973—1975年在南印度洋和南大西洋及1975—1978年在热带地区发生了增加突变。这和实际分布是一致的。从垂直分布来讲(图7a), 500 hPa气温1976年在对流层内均发生了升温突变。UKMO-HadGEM1模拟的气温突变的水平和垂直分布和实际都是一致的。UKMO-HadGEM1模拟的位势高度的突变(图7b)于1976年发生在平流层内, 1978年发生在对流层内, 高层的突变要早于低层, 但与实际情况却刚好相反。80年代, UKMO-HadGEM1模拟的500 hPa气温和位势高度的增加突变大致发生在南、北半球副热带地区, 这与实际的北半球热带外的突变是不一致的。90年代, UKMO-HadGEM1模拟的500 hPa气温和位势高度在1993—1995年大体上在南北半球副热带发生了增加突变。这比实际突变的时间(1996—1997年)晚2—3年。在UKMO-HadGEM1模拟的30 hPa气温场中, 南、北副热带分别在1991和1992年发生了降低突变, 部分模拟出了平流层降温的特征。

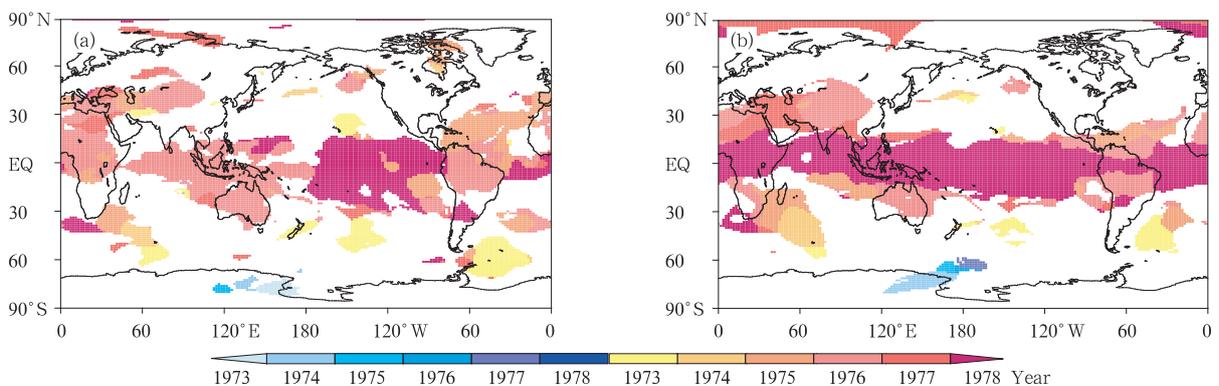


图6 同图3, 但为UKMO-HadGEM1模拟的20世纪70年代年平均突变年份的水平分布(a. 500 hPa气温, b. 500 hPa位势高度)

Fig. 6 Same as Fig. 3, but for the UKMO-HadGEM1 model in the 1970s of (a) 500 hPa air temperature and (b) 500 hPa geopotential height

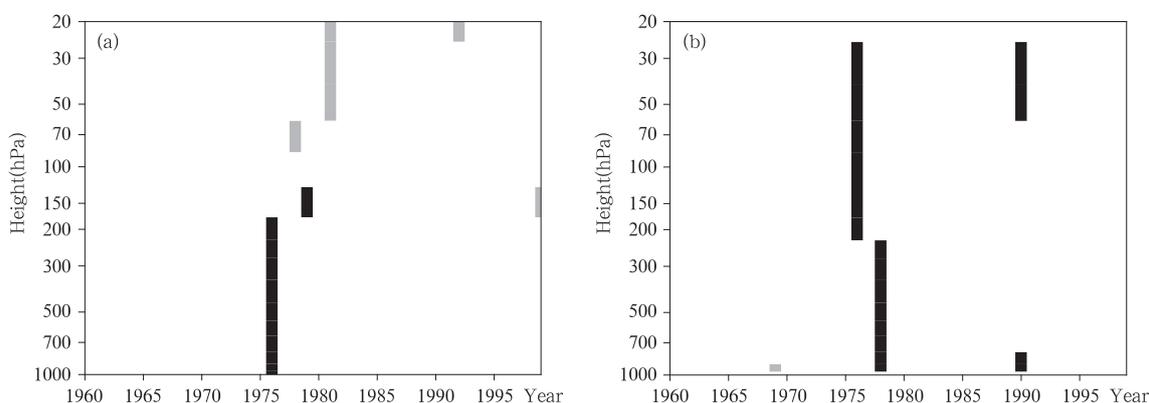


图7 同图4, 但为 UKMO-HadGEM1 模拟的(a)气温( $20^{\circ}\text{S}-20^{\circ}\text{N}$ ,  $60^{\circ}\text{W}-180^{\circ}$ )和(b)位势高度( $20^{\circ}\text{S}-20^{\circ}\text{N}$ ,  $0^{\circ}-357.5^{\circ}\text{E}$ )

Fig. 7 Same as Fig. 4, but the (a) air temperature of the domain ( $20^{\circ}\text{S}-20^{\circ}\text{N}$ ,  $60^{\circ}\text{W}-180^{\circ}$ ) and (b) geopotential height of the region ( $20^{\circ}\text{S}-20^{\circ}\text{N}$ ,  $0^{\circ}-357.5^{\circ}\text{E}$ ) in UKMO-HadGEM1 model

#### 4.6 结论

由表3可知, UKMO-HadGEM1模拟的500 hPa温度和位势高度于1976—1978年在热带地区发生了增加突变, 并大体上模拟出了20世纪80年代中纬度500 hPa位势高度的增加突变和北极SLP的降低突变。GFDL-CM2.1模拟的500 hPa温度的增加突变于1994—1996年发生在南、北半球副热带, 这与实际突变的分布基本上是一致的, 但是GFDL-CM2.1模拟的500 hPa温度的增加突变比实际的突变时间(1996—1997年)要早大约2—3年。对于CCSM3模拟的500 hPa温度场和位势高度场中20世纪90年代热带地区的增加突变, ECHAM5/MPI-OM模拟的500 hPa温度场和位势高度场中20世纪70年代北半球热带外地区的增加突变和FGOALS-g1.0模拟的500 hPa温度场中20世纪80年代南半球热带外的增加突变, 这些突变具有行星、半球或者全球尺度结构。尽管这些突变和实际情况相差较大, 但上述事实说明这5个模式都可以模拟出行星或者全球尺度气候系统年代际突变, 但其中包含有什么样的物理过程还有待于进一步的改进。

ECHAM5/MPI-OM和GFDL-CM2.1模式较好地模拟出了平流层热带地区的降温突变, 但比实际突变时间(1992年)晚2年。CCSM3模拟出的降温突变在南半球, 比实际位置偏南, UKMO-HadGEM1模拟出的降温突变大致发生在南、北半球副热带, 比实际突变范围要小, 而FGOALS-g1.0没有

模拟出平流层的变冷。肖栋(2008)指出尽管火山灰对平流层和对流层的气温等的影响时间约为1—2年, 而火山灰造成的南半球副热带地区的平流层臭氧减少却没有恢复到爆发前的水平, 而且臭氧对于平流层的热力平衡具有决定性作用(Baede, 2007)。肖栋(2008)还指出平流层南半球副热带地区的臭氧在1991年发生了减少的年代际突变, 从而平流层所吸收的太阳辐射减少, 可能造成了平流层的降温突变。因此, 20世纪90年代平流层热带的变冷突变可能是由于1991年6月12—16日菲律宾皮纳图博火山爆发引起的平流层臭氧减少所导致的。CCSM3、GFDL-CM2.1和UKMO-HadGEM1模式都考虑了火山灰和臭氧的影响, ECHAM5/MPI-OM模式虽然没有考虑火山灰的影响, 但是它考虑了臭氧的影响, FGOALS-g1.0模式两者都没有考虑。综合上面的分析, FGOALS-g1.0模式没有模拟出20世纪90年代平流层热带地区的变冷突变可能是由于没有考虑臭氧或者火山灰的影响。那么要改进FGOALS-g1.0模式对20世纪90年代平流层热带变冷突变的模拟可能需从考虑火山灰和臭氧的作用入手。

#### 5 结论和讨论

本文分2个时段对CCSM3、ECHAM5/MPI-OM、GFDL-CM2.1、FGOALS-g1.0和UKMO-HadGEM1 5个耦合气候模式中全球海气系统年代际突变的时空特征进行了评估。第1个时段为19

世纪 80 年代—20 世纪 90 年代,评估了 SST 和 SLP 的年代际突变的水平分布特征,结果表明,上述模式中 SST 的突变分布没有抓住以 PDO 为主要分布型的特征可能造成了模式对 SST 年代际突变的时空结构模拟不好。模式对于具有行星尺度的 SLP 的年代际突变时空特征也没有模拟出来。为了提高上述模式对于 SST 和 SLP 年代际突变时空特征的模拟,可能需从描述行星或以上尺度的气候系统(如 PDO)的年代际突变的时空特征入手。

第 2 时段为 20 世纪 70—90 年代,评估了 70、80 和 90 年代全球大气系统年代际突变的四维时空特征。结果表明,在对流层,GFDL-CM2.1 较为合理的模拟出了 90 年代 500 hPa 气温的年代际突变的时空特征,UKMO-HadGEM1 较好地模拟出了 70 年代 500 hPa 气温和位势高度的年代际突变的时空特征和 80 年代北极 SLP 的降低突变。其他模拟的 500 hPa 气温或者 500 hPa 位势高度都发生了具有行星或者以上尺度的年代际突变,但是大体特征和实际突变的特征都不一致,仅在某些小范围的区域内是一致的。5 个模式都可以模拟出行星及其以上尺度的气候系统的突变,说明这 5 个模式具有描述行星尺度气候系统年代际突变的能力,但其中的物理过程有待于进一步的改进。在平流层,ECHAM5/MPI-OM 和 GFDL-CM2.1 模式成功地模拟出了平流层热带地区的降温突变,CCSM3 和 UKMO-HadGEM1 模式部分模拟出了平流层的降温突变,而 FGOALS-g1.0 没有模拟出平流层的变冷突变。这可能是由于 FGOALS-g1.0 没有考虑火山灰或者臭氧作用的缘故,可能需要考虑火山灰或者臭氧的影响来改进 FGOALS-g1.0 模式对 90 年代平流层变冷突变的模拟能力。进一步的工作还会扩展到评估 IPCC 的 23 个耦合气候模式对平流层变冷的模拟,以评估火山灰和臭氧在平流层变冷突变的作用。

本文所选取的 5 个耦合模式都考虑了硫酸盐气溶胶的直接效应和均匀混合的 CO<sub>2</sub>,除了 ECHAM5/MPI-OM 外都考虑了太阳辐射的变化(参见 Zhou 等(2006)中的表 1),可见,考虑太阳辐射变化的 UKMO-HadGEM1 模式模拟出 20 世纪 70 年代大气的年代际突变,而没有考虑太阳辐射变化的 ECHAM5/MPI-OM 与考虑太阳辐射变化的 CCSM3、GFDL-CM2.1 和 FGOALS-g1.0 模式没有

模拟出 20 世纪 70 年代大气的突变。根据上面叙述的本文结论,可以做如下思考,一方面,如果我们相信模式对年代际变率的模拟能力,这就说明 20 世纪 70、80 和 90 年代全球海气系统年代际突变可能与太阳辐射变化、温室气体(CO<sub>2</sub>、CH<sub>4</sub> 等)和硫酸盐气溶胶的直接效应等外强迫是无关系的,而是海气系统自身的耦合模态或者振荡。另一方面,可能是耦合模式对本文所评估的这几次年代际突变的机制没有描述清楚,从这方面考虑,就需要改进耦合模式对于年代际变率的模拟能力。无论从那个方面来说,研究这几次突变(主要是 20 世纪 70、80 和 90 年代的突变)的机制就成了年代际突变研究的当务之急,也是进一步评估模式对年代际突变模拟能力的基础,是年代际变率研究亟待解决的问题。

如果 20 世纪 70、80 和 90 年代全球海气系统年代际突变与太阳辐射变化,温室气体等外强迫是有关的,那就要考虑到海洋在碳循环和对太阳辐射能储存方面的作用,进一步的工作,就是评估大气模式对于这 3 次突变的大气信号的模拟,揭示 SST 的年代际突变对于大气年代际突变的影响,以及考察大气模式对于年代际突变机制的描述。然而,AMIP (Atmospheric model Inter-comparison Project) 模拟资料的积分时段是 1979—1999 年,从时间长度上来讲,用 AMIP 资料来评估 20 世纪 70、80 和 90 年代这 3 次全球海气系统的年代际突变都不太适合,只有用更长时段的大气模拟资料来评估 20 世纪 70、80 和 90 年代全球海气系统年代际突变的可能成因和物理过程,这也是我们下一步要开展的工作。

**致谢:**感谢 Bin Wang 教授对本工作的建议;感谢 IPCC 提供 20 世纪耦合气候模式资料;感谢周天军研究员,张丽霞提供部分模式资料;感谢王金成、张文君在处理模式资料方面给予的帮助,感谢张志富博士阅读了全文。

## 参考文献

- 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. 北京: 气象出版社, 227pp
- 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
- 符淙斌. 1994. 气候突变现象的研究. 大气科学, 18(3): 373-384
- 李崇银. 2000. 气候动力学引论(第二版). 北京: 气象出版社, 515pp
- 李建平,丑纪范,史久恩. 1996. 气候均值突变的检测方法. 北京气象学院学报, 2: 16-21
- 王绍武. 1997. PAGES 计划与 CL IVAR 计划中的交叉科学问题. 气

- 象学报, 55 (6):662-669
- 魏凤英. 1999. 现代气候统计诊断与预测技术. 北京: 气象出版社, 187pp
- 肖栋, 李建平. 2007. 全球海表温度场中的年代际突变及其模态. 大气科学, 31(5):839-854
- 肖栋. 2008. 全球海气系统年代际突变的研究[D]. 兰州: 兰州大学, 200 pp
- 赵芳芳, 许宗学. 2006. 黄河兰州以上气候要素长期变化趋势和突变特征分析. 气象学报, 64(2): 246-255
- Allan R, Ansell T. 2006. A New globally complete monthly historical gridded mean sea level pressure dataset (HadSLP2): 1850 - 2004. J Climate, 19: 5816-5842
- Baede A P M. 2007. Glossary, in Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge United Kingdom and New York, USA: Cambridge University Press, 950pp
- He Wenping, Feng Guolin, Wu Qiong, et al. 2008. A new method for abrupt change detection in dynamic structures. Nonlin Processes Geophys, 15: 601-606
- Kalnay E M, et al. 1996. The NCEP/NCAR reanalysis project. Bull Amer Meteor Soc, 77: 437-471
- Mantua N J, Hare S R, Zhang Y, et al. 1997. A Pacific interdecadal climate oscillation with impacts on salmon production. Bull Amer Meteor Soc, 78: 1069-1079
- Martinson, D, Battisti D, Bradley R S, et al. 1998. Decade-to-century-scale climate variability and change: A science strategy. Washington: National Academy Press, 225pp
- Smith T M, Reynolds R W. 2004. Improved extended reconstruction of SST (1854 - 1997). J Climate, 17, 2466-2477
- Xiao Dong, Li Jianping. 2007. Spatial and temporal characteristics of the decadal abrupt changes of global atmosphere-ocean system in 1970s. J Geophys Res, 112, D24S22, doi:10.1029/2007JD008956
- Yu Rucong, Zhou Tianjun. 2007. Seasonality and three-dimensional structure of the interdecadal change in East Asian monsoon. J Climate, 20: 5344-5355
- Zhou Tianjun, Yu Rucong. 2006. Twentieth century surface air temperature over China and the globe simulated by coupled climate models. J Climate, 19(22): 5843-5858