

大气环流的年代际变化

II. GCM 数值模拟研究*

李崇银 穆明权 毕训强

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

摘 要 类似大气环流模式比较计划 (AMIP) 的数值模拟, 将实际观测的海表水温 (SST) 资料引入模式进行 40 多年的数值积分, 得到长时间的大气环流模拟结果。分析数值模拟结果发现, 无论是大气中的主要涛动和遥相关型, 还是重要大气环流系统都极为清楚地存在着年代际变化特征, 包括 10~20 年准周期振荡和可能的 30 年以上的准周期振荡; 而且上述主要环流系统的形势及其年代际变化大都与实际观测资料所给出的结果相一致。顺便分析中国东部气候的模拟结果, 年代际变化特征 (包括 60 年代的气候突变) 也很清楚, 并同大气环流变化配合十分合理。结果也表明, 同研究季节和年际变化一样, 大气环流模式 (AGCM) 数值模拟也是研究大气环流和气候年代际变化的有效方法。

关键词: 大气环流; 年代际变化; 大气环流模式; 数值模拟

1 引言

气候及大气环流的长时期变化或震动虽然早就有过研究^[1,2], 但因种种原因, 直到 90 年代初才真正成为大家关注的重大科学问题。在刚刚开始实施的国际气候变化及可预报性研究 (CLIVAR) 计划中, 它已成为主要研究内容之一^[3]。

国际上有关年代际气候变化的研究最先是针对海洋状况进行的, 例如北大西洋海表温度 (SST) 的变化^[4,5]、北太平洋 SST 的变化^[6,7]以及极区海冰的变化^[8,9]等。因为海洋的变化较为缓慢, 从而认为年代际气候变化以海洋最为重要。我们最近的研究表明, 东亚和西北太平洋的海-气系统明显存在准十年时间尺度的变化, 而且大气的变化与海洋的变化有紧密关系^[10]。在本文的第一部分中, 我们依据多年观测资料的分析, 已经指出大气环流也存在极显著的年代际变化特征, 无论在热带还是在中高纬度地区, 大气环流主要有 10~20 年准周期振荡和 30 多年准周期振荡^[11]。

自 60 年代起, 数值模式已成为短期天气预报的主要工具, 70 年代数值天气预报的时效开始延展到中期 (7~10 天)。随着科学和计算机技术的发展, 80 年代末已开始用大气环流模式、大洋环流模式, 尤其是大气-海洋耦合模式进行年际气候变化的预报试验, 并取得了可喜的效果, 尤其是显示出了 ENSO 的可预报性^[12~14]。

数值模式 (GCM) 是否也可以提供年代际气候变化的可预报性, 是正在探讨和研

1999-08-17 收到, 1999-12-06 收到修改稿

* 国家重点基础研究重点发展规划项目“我国重大气候灾害的形成机理和预测理论研究”G1998040903-2、国家“九五”科技项目 96-908-01-01 以及中国科学院 KZ952-S1-403 的共同资助

究的科学问题, 尚需相当长时间才会得到答复。本文将分析大气环流模式的长期积分结果, 并与观测资料进行比较, 从而揭示数值模拟的大气环流的年代际变化特征, 并表明 GCM 对于研究气候和大气环流的年代际变化也是非常有用的。

2 模式及气候数值模拟试验

本研究所使用的大气环流模式是中国科学院大气物理研究所发展的九层大气环流格点模式 (IAP-AGCM9)^[15], 其水平分辨率为 4° 纬度和 5° 经度。这个模式是在中国科学院大气物理研究所原二层大气环流格点模式 (IAP-AGCM2) 基础上发展的, 在动力学框架上保留原二层模式的基本特征^[16]。模式差分格式能保持原微分方程的守恒性质; 大气标准层结近似的引入, 能有效降低地形区的截断误差。模式引入了各种应用有效的物理过程格式, 包括云和对流、降水、辐射、重力波拖曳以及陆-气相互作用等。IAP-AGCM2 曾在大气环流模式比较计划 (AMIP) 中被证明对气候有较好的模拟能力, IAP-AGCM9 的模拟试验也同样表明可较好地模拟气候及其变化。

根据 AMIP 的要求, 需要在给定观测的气候海表温度 (SST) 强迫下, 模拟气候的演变过程, 其模拟时间为 1950~1993 年。具体数值积分过程中, 每天的 SST 是用观测的月平均 SST 资料内插所取得, 而以下边界条件引入。本文后面分析的资料就是 1950~1993 年期间在观测的 SST 强迫下由 IAP-AGCM9 所给出的数值模拟结果。为了方便却又不失讨论年代际变化的要求, 在具体资料分析中用了季节 (3 个月) 平均的结果。

3 主要遥相关型的模拟结果

南方涛动 (SO) 和太平洋-北美 (PNA) 型遥相关是全球最典型的两种遥相关。数值模拟结果能否显现出这两个遥相关型是数值模拟好坏的重要标志之一。因此我们首先分析模式积分结果对这两个遥相关型的描写情况。

对于南方涛动, 一般用南方涛动指数来描述其变化, 通常又用 Tahiti 岛和 Darwin 之气压差 (或气压差的标准化值) 来表示南方涛动指数 (SOI)。图 1 给出的是 1950 年到 1993 年间观测的 SOI 和模拟的 SOI 随时间的变化, 除了一些强 SOI 的模拟值比观测值往往偏小之外, SOI 的绝大部分变化形式都得到了很好的模拟。观测的 SOI 与模拟的 SOI 间其相关系数达到 0.68, 数值模拟可谓相当成功。图 2 是以达尔文为参考点所计算的全球模拟地面气压的点相关系数的分布形势, 即南方涛动形势, 东西向跷跷板特征十分清楚, 与观测结果相比只是正相关的大值区略为偏东^[17]。

图 3 分别给出了模拟的 PNA 型[模拟的 500 hPa 高度对参考点 (46°N , 165°W) 的相关系数分布形势和 PNA 指数 (观测及模拟) 的时间变化。图 3a 的相关系数分布极为清楚地反映出 PNA 遥相关型, 它与观测资料的分析结果非常一致^[18]。同时, 图 3a 也同时反映出欧亚-太平洋 (EUP) 遥相关型的特征。图 3b 中 PNA 遥相关指数的时间变化清楚地表明模拟结果与观测相当一致, 其相关系数达 0.55。这也从另一方面说明本文的 GCM 模拟是相当成功的。

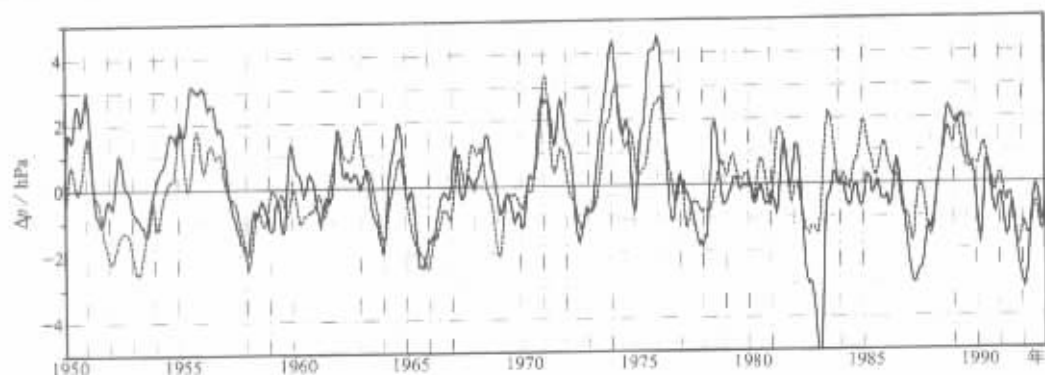


图1 观测(实线)和数值模拟(虚线)的南方涛动指数(SOI)的时间变化(均用3个月平均值计算)

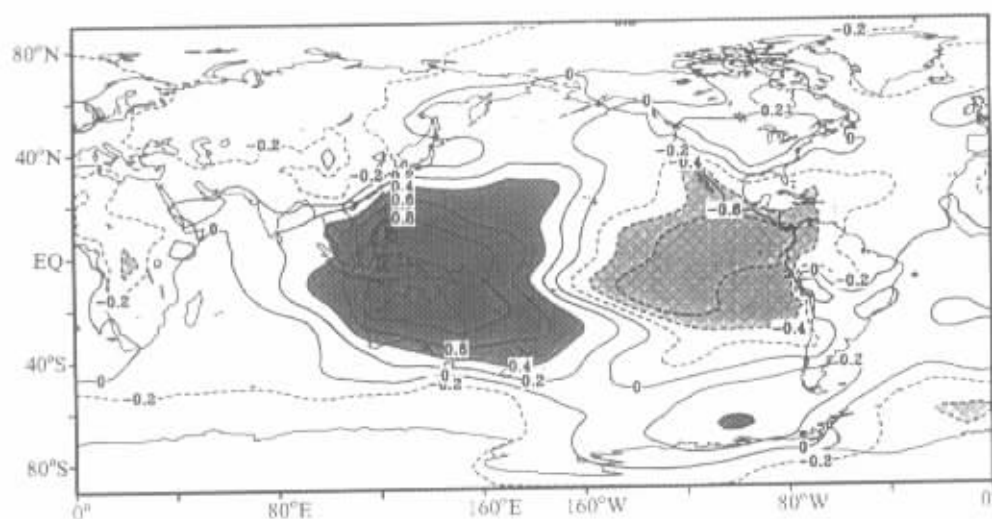


图2 数值模拟得到的南方涛动形势

同样,数值模拟结果也十分清楚地反映出其他大气环流遥相关型的特征,而且与观测很相似。图4给出的是以(60°N,155°E)为参考点计算的500 hPa高度的格点相关系数的分布,它极为清楚地表明了观测所得到的西太平洋(WP)遥相关型也被很好地模拟了出来。

在观测资料的分析中我们已指出,大气环流的几大涛动和遥相关型都有极明显的年代际变化特征。上述数值模拟结果与观测分析的很好一致性,实际上说明GCM数值模拟试验也可以反映几大大气涛动和主要遥相关型的年代际变化。

4 模拟的主要大气环流系统的年代际变化

4.1 东亚大槽

虽然东亚大槽有季节变化,但无论冬夏它对东亚及北太平洋地区的天气气候都有重

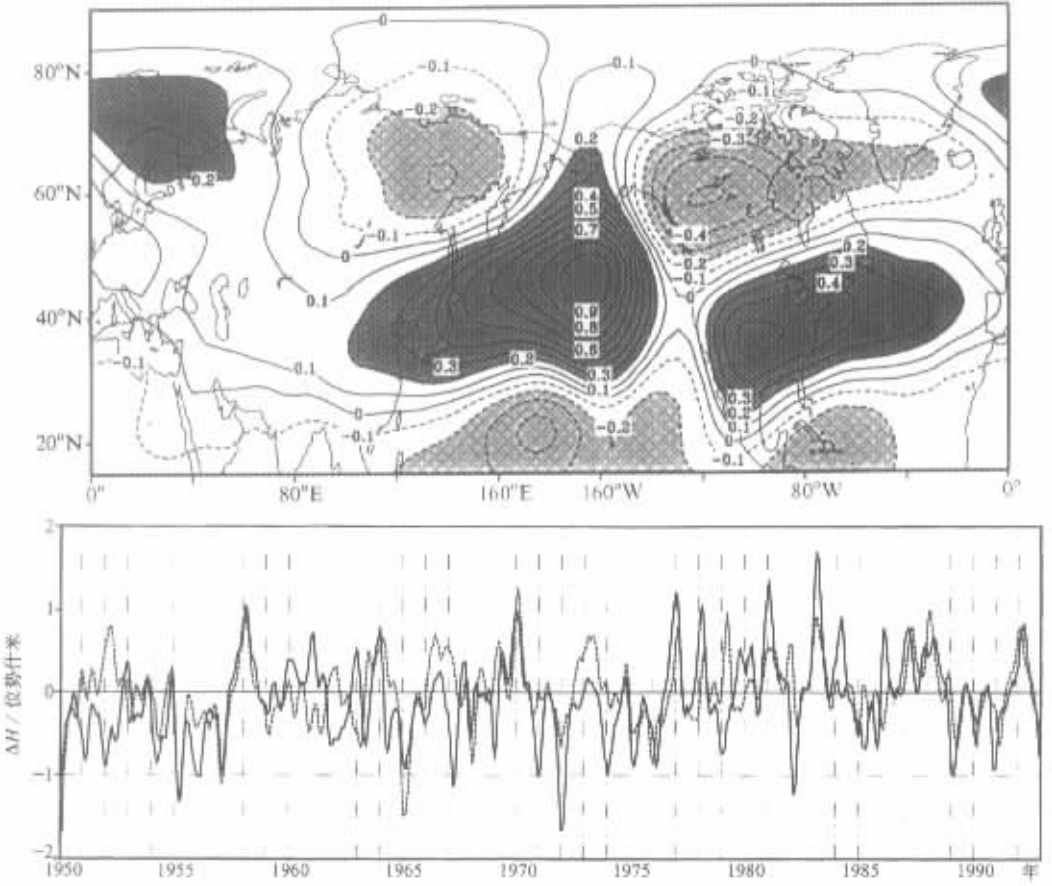


图 3 数值模拟得到的 PNA 遥相关型 (a) 以及观测 (实线) 和模拟 (虚线) 的 PNA 指数的时间变化 (b)

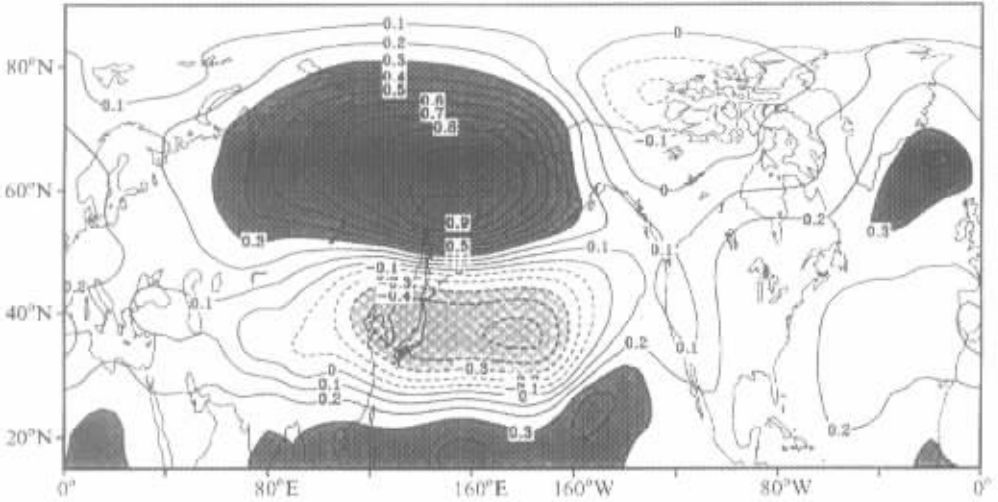


图 4 数值模拟得到的西太平洋 (WP) 遥相关型

要影响。观测资料已表明东亚大槽的强度也具有年代际变化特征。GCM 的数值模拟结果如何呢? 图 5 给出的是以 ($30^{\circ}\sim 50^{\circ}\text{N}$, $120^{\circ}\sim 150^{\circ}\text{E}$) 区域季节 (3 个月) 平均的 500 hPa 高度距平所表示的东亚大槽强度的时间变化及其子波分析结果。年代际变化特征也模拟得十分清楚, 不仅包括 10~20 年准周期振荡, 也有 30 年以上的准周期振荡。这些准周期振荡在最大熵谱的计算中也十分清楚地存在峰值 (图略)。同时, 与观测资料分析相比较, 年代际变化的小波形势也相当一致, 尤其是 30 多年的准周期振荡, 在 1962~1964 年之前和 1981~1983 年之后都为正距平, 而它们之间都为负距平。

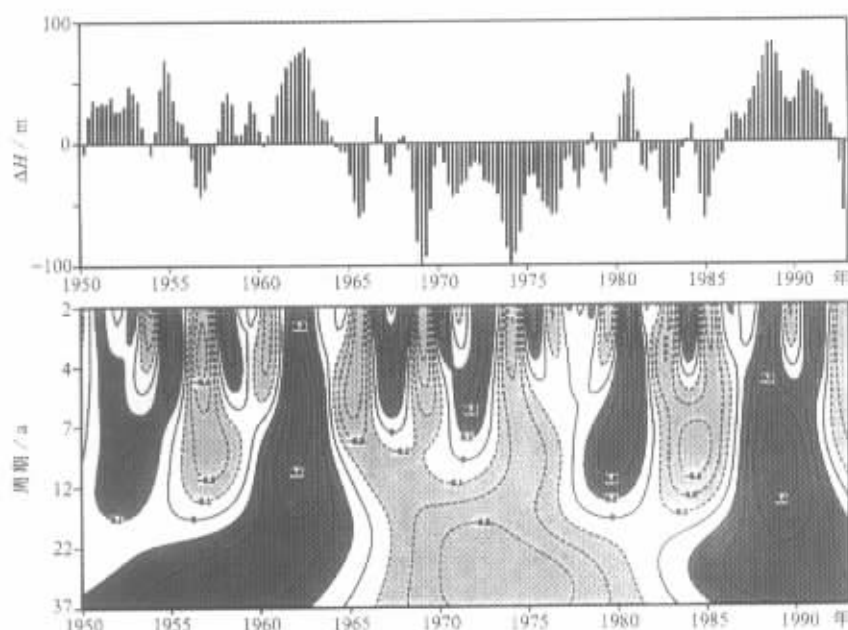


图 5 模拟的 500 hPa 东亚大槽强度 ($30^{\circ}\sim 50^{\circ}\text{N}$, $120^{\circ}\sim 150^{\circ}\text{E}$ 区域平均高度距平) 的时间变化及其子波分析结果

4.2 北美大槽

北美大槽是北半球另一重要天气气候系统, 资料分析已表明其存在年代际变化。图 6 是以 ($30^{\circ}\sim 50^{\circ}\text{N}$, $60^{\circ}\sim 90^{\circ}\text{W}$) 区域季节 (3 个月) 平均的 500 hPa 高度距平模拟结果所表示的北美大槽强度的时间变化及其子波分析结果。与观测十分类似, 年代际变化十分清楚, 包括 10~20 年准周期振荡和 30 年以上的准周期振荡; 模拟与观测相比较, 10~20 年准周期振荡的子波形势虽不是很一致, 但 30 多年准周期振荡的子波形势却相当类似, 1960 年 (左右) 之前和 1980 年之后都为正距平, 其间都为负距平。

4.3 其他大气环流系统

西太平洋副热带高压和南亚季风都是重要的大气环流 (天气气候) 系统, 从 GCM 模拟结果可以看到, 它们都存在 10~20 年准周期振荡; 但对于 30 多年准周期振荡只在西太平洋副高的变化中较清楚, 南亚季风的强度变化却并不明显 (图略)。

大气环流往往出现强纬向西风与大槽大脊明显 (纬向西风偏弱) 两类不同形势的相

互变化的特征, 在天气分析研究中称其为指数循环。对于年代际时间尺度, 大气环流指数的变化如何呢? 一般可以用 ($35 \sim 40^\circ\text{N}$) 纬向平均的 500 hPa 高度与 ($50 \sim 55^\circ\text{N}$) 纬向平均的 500 hPa 高度之差来表示环流指数, 若其高度差大 (小) 则说明纬向西风强 (弱), 可谓高 (低) 指数环流。图 7 给出的是由 GCM 数值模拟得到的环流指数季节

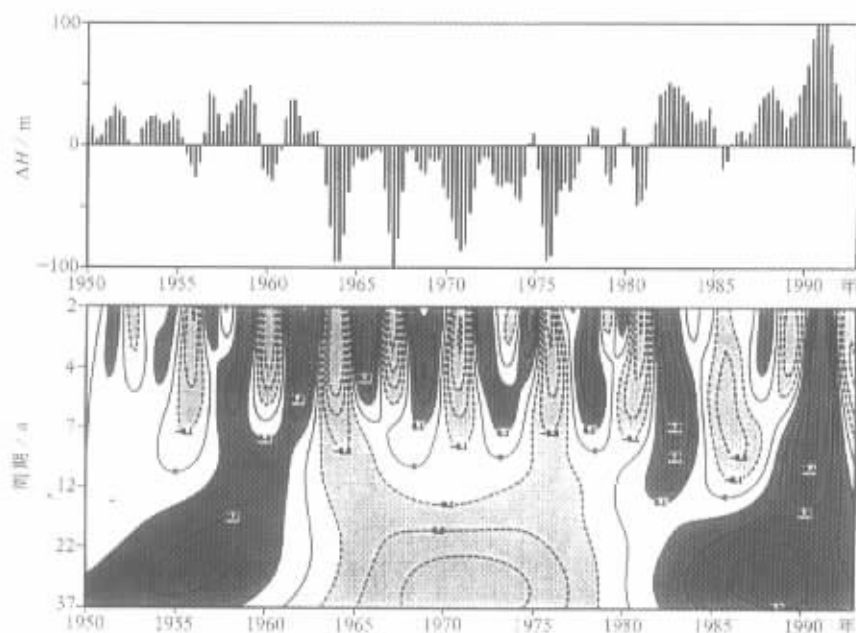


图 6 模拟的北美大槽强度 ($30 \sim 50^\circ\text{N}$, $60 \sim 90^\circ\text{W}$ 区域平均的 500 hPa 高度距平) 的时间变化及其子波分析结果

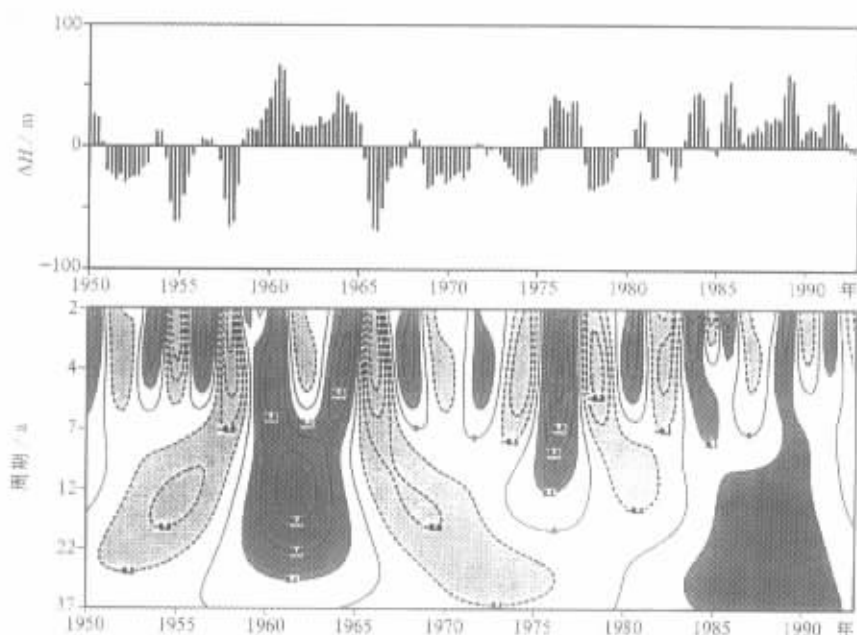


图 7 模拟的北半球环流指数 (距平) 的时间变化及其子波分析结果

距平的时间变化及其子波分析结果, 这里正负值是对多年平均环流指数的偏差, 分别表示其环流较多年平均更趋于纬向(经向)形势。子波分析及谱分析都表明模拟的环流指数同样存在着年代际变化特征, 也有 10~20 年准周期振荡和 30 多年准周期振荡。

以上的讨论清楚地表明, 大气环流各种系统的年代际变化特征都可以用 GCM 模拟出来; 而且所模拟的年代际变化形势与观测资料的分析结果基本一致, 包括 30 多年准周期振荡和 10~20 年准周期振荡。

5 中国东部气候年代际变化的数值模拟

前面的讨论已经清楚地表明, GCM 数值模拟可以很好地表现出大气环流的年代际变化特征, 而且所模拟出的大气环流的年代际变化与观测资料分析结果基本相似。这里, 我们将讨论对中国东部气候年代际变化的数值模拟情况, 因为观测资料的分析已表明中国东部地区的气候也有年代际变化, 包括气温、降水等。

图 8 是数值模拟给出的中国东部地区(20~40°N, 110~120°E)平均的气温季度距平的时间变化及其子波分析结果, 年代际变化特征也很清楚, 包括 10~20 年准周期振荡和 30 多年准周期振荡。而且, 同图 5 所示的东亚大槽强度变化相比可以看到, 中国东部气温的年代际变化与东亚大槽强度的年代际变化有很好的负相关。强东亚大槽(高度负距平)对应着中国东部低温(温度负距平), 弱东亚大槽(高度正距平)对应着中国东部高温(温度正距平)。它们的关系就像对于天气时间尺度的变化一样, 物理过程十分明显。

为了更清楚地看到年代际变化特征, 可以将气候要素进行低通滤波处理, 以便滤去年际时间尺度以下的变化。图 9 给出的就是滤掉了周期小于 7 年的较短时间尺度变化的

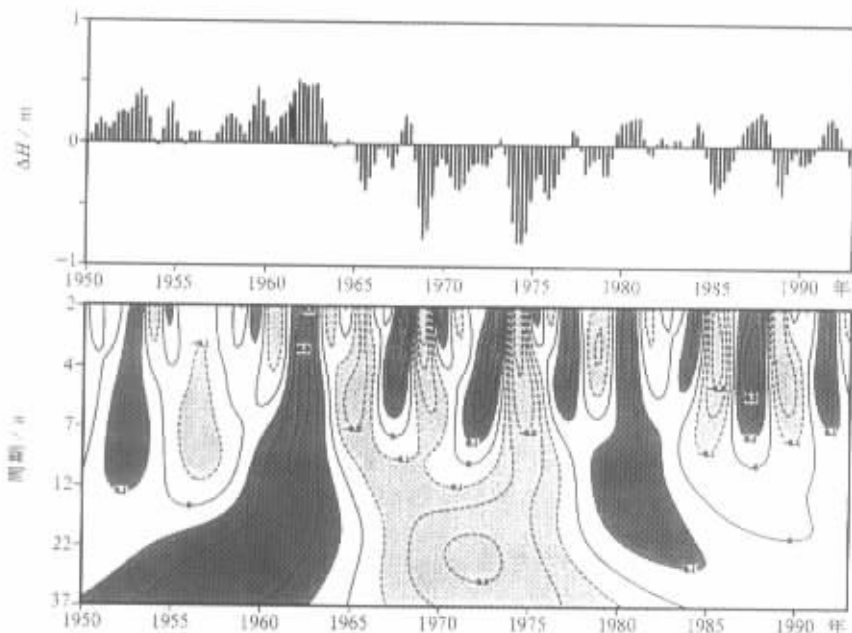


图 8 模拟的中国东部(20~40°N, 110~120°E)平均气温距平的时间变化及其子波分析结果

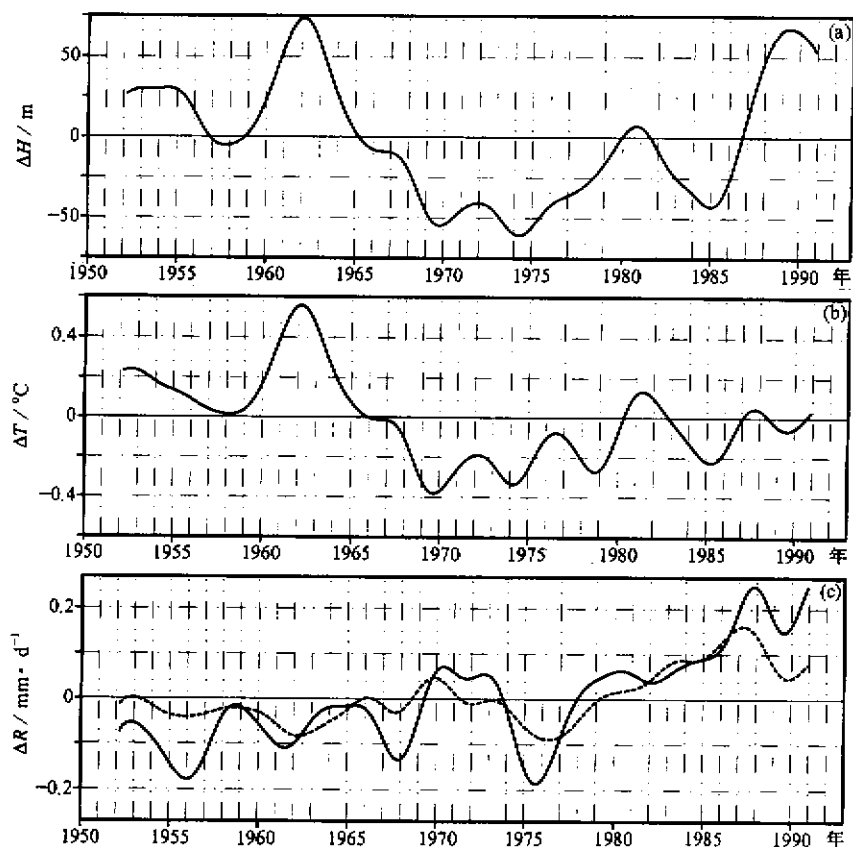


图9 低通滤波得到的东亚大槽强度 (a), 中国东部 ($22\sim 38^{\circ}\text{N}$, $110\sim 120^{\circ}\text{E}$) 气温 (b) 及江淮流域 ($26\sim 34^{\circ}\text{N}$, $115\sim 125^{\circ}\text{E}$) 和华北地区 ($34\sim 40^{\circ}\text{N}$, $110\sim 120^{\circ}\text{E}$) 降水 (c) 距平的时间变化

结果, 无论是东亚大槽, 还是中国东部气温和江淮流域及华北地区的降水, 年代际变化特征都是比较清楚的。需要特别指出的是, 过去不少研究都从资料分析发现 60 年代有明显气候突变存在^[19,20]。图 9 的 GCM 数值模拟结果, 也可以看到在 60 年代有气候突变存在, 而且气温的突变正好与东亚大槽区 500 hPa 高度的突变相一致, 也与观测资料的分析有比较类似的结果^[21]。

从上面的讨论不难看到, 中国东部气候的年代际变化, 以及与此相联系的 60 年代气候突变在 GCM 数值模拟中都十分清楚地存在; 环流特征与气候年代际变化以及气候突变, 都可以用 GCM 模式进行数值模拟研究。

6 结论

基于 IAP-AGCM, 40 余年的气候数值模拟结果 (数值积分过程中 SST 用实际观测资料), 本文系统分析了对大气环流的年代际变化的数值模拟情况, 并与观测资料分析结果进行了比较讨论。可以将主要结论归纳如下:

(1) IAP-AGCM9 对大气环流的年代际变化也有相当好的模拟能力。

(2) 数值模拟结果不仅很清楚地给出了主要大气涛动和大气环流的几个主要遥相关型, 而且它们的年代际变化 (10~20 年准周期振荡和可能的 30 年以上的准周期振荡) 也十分明显。同时, 大气涛动和遥相关型, 以及它们的年代际变化都与观测资料分析结果十分相近。

(3) GCM 也很好模拟了主要大气环流系统 (包括东亚大槽、北美大槽、大气环流指数等) 的年代际变化特征, 而且模拟的年代际变化特征与观测基本相一致。

(4) 同大气环流系统的年代际变化相配合的中国东部气候的年代际变化也模拟得很清楚, 包括 60 年代的气候突变现象。

(5) 大气环流和气候的年代际变化同季节和年际变化一样, GCM 数值模拟也是重要而可行的研究途径。

参 考 文 献

- 1 王绍武, 近90年大气环流的振动, 气象学报, 1964, 34, 486~506.
- 2 WMO / ICSU, Scientific plan for world climate research programme, WCRP Publications Series, 1984, No.2, WMO / TD ~ No.6.
- 3 WCRP, CLIVAR-A Study on Climate Variability and Predictability-Science Plan, WCRP No. 89, WMO / TD No. 690, Geneva, 1995, 172pp.
- 4 Deser, C. and M. L. Blackmon, Surface climate variations over the North Atlantic Ocean during winter, 1900~1989, *J. Climate*, 1993, 6, 1743~1753.
- 5 Kushnir, Y., Interdecadal variations in the North Atlantic sea-surface temperature and associated atmospheric conditions, *J. Climate*, 1994, 7, 141~157.
- 6 Trenberth, K. E. and J. W. Hurrelle, Decadal atmosphere-ocean variations in the Pacific, *Climate Dyn.*, 1994, 9, 303~319.
- 7 Graham, N. E, Decadal-scale climate variability in the tropical and North Pacific during the 1970s and 1980s: observations and model results, *Climate Dyn.*, 1994, 9, 135~162.
- 8 Mysak, L. A., D. K. Manak and R. F. Mavsdén, Sea-ice anomalies observed in the Greenland and Labrador Sea during 1901~1984 and their relation to an interdecadal Arctic climate cycle, *Climate Dyn.*, 1990, 5, 111~123.
- 9 Hill, B. T. and S. Jones, The new found land ice extent and the solar cycle from 1860 to 1988, *J. Geophys. Res.*, 1990, 95, 5385~5394.
- 10 Li Chongyin, The Quasi-decadal oscillation of air-sea system in the northwestern Pacific region, *Adv. Atmos. Sci.*, 1998, 15, 31~40.
- 11 穆明权, 李崇银, 大气环流的年代际变化 I. 观测资料的分析, 气候与环境研究, 2000, 5(3), 233~241.
- 12 Cane, M. A., S. E. Zebiak and S. D. Dolan, Experimental forecasts of El Niño, *Nature*, 1986, 321, 827~832.
- 13 Zebiak, S. E. and M. A. Cane, A model El Niño-Southern Oscillation, *Mon. Wea. Rev.*, 1987, 115, 2262~2278.
- 14 曾庆存, 袁重光, 王万秋, 张荣华, 跨季度气候距平预测实验, 大气科学, 1990, 14, 10~25.
- 15 Liang Xinzong, Description of a nine-level grid-point general circulation model, *Adv. Atmos. Sci.*, 1996, 13, 269~299.
- 16 Zeng Qingcun, Zhang Xuehong, Liang Xinzong, Yuan Chongguang and Chen Sengfang, Documentation of IAP Two-Level Atmospheric General Circulation Model, TRO44, DOE / ER / 60314-H1, U. S. DOE, 1989, 383pp.
- 17 李崇银, 气候动力学引论, 北京: 气象出版社, 1995.
- 18 Wallace, J. M. and D. S. Gutzler, Teleconnection in the geopotential height field during the northern hemisphere winter, *Mon. Wea. Rev.*, 1981, 109, 784~812.

- 19 严中伟、季劲钧、叶笃正, 六十年代北半球夏季气候跃变 I. 降水和气温变化, 中国科学 (B), 1990, 20, 97~103.
- 20 李崇银、李桂龙, 北大西洋涛动和北太平洋涛动的演变与20世纪60年代的气候突变, 科学通报, 1999, 44(16), 1765~1769.
- 21 王绍武等, 近百年中国年气温序列的建立, 应用气象学报, 1998, 9, 392~401.

Inter-Decadal Variations of Atmospheric Circulation Part II: GCM Simulation Study

Li Chongyin, Mu Mingquan and Bi Xunqiang

*(State Key Laboratory of Numerical Modeling Atmospheric Sciences and Geophysical Fluid Dynamics,
Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029)*

Abstract Similar to numerical simulations with atmospheric global circulation models (AGCM) in the Atmospheric Model Inter-comparison Plan (AMIP), an atmospheric global circulation model is introduced to make 43 years integration by monthly observed sea surface temperatures from 1950 to 1993. We use the long-time series to discuss the inter-decadal variations of the atmospheric circulation, mainly focusing on the three key oscillations and principal circulation systems in the tropics and the Northern Hemisphere, such as Southern Oscillation (SO), Pacific-North Americal pattern (PAN), though in East Asia at 500 hPa. The results strikingly show that the inter-decadal variations, including 10-20 and more than 30 years quasi-periods oscillations are very clear. The simulation results agree with observations quite well. We also analyze the precipitation in the eastern China with the simulation data, and obtain the notable inter-decadal variations, including the climate jump in the 1960's. At the same time, the above features correspond with the variations of the atmospheric circulation in East Asia very well. Above all, we can use the GCM simulation data to investigate not only the seasonal and inter-annual variations of the atmospheric circulation and climate, but the inter-decadal variations as well.

Key words: atmospheric circulation; inter-decadal variation; atmospheric general circulation model; numerical simulation