

顾薇,李崇银. IPCC AR4 中海气耦合模式对中国东部夏季降水及 PDO、NAO 年代际变化的模拟能力分析[J]. 大气科学学报,2010,33(4):401-411.

Gu Wei, Li Chong-yin. Evaluation of the IPCC AR4 climate models in simulating the interdecadal variations of the east China summer precipitation, PDO and NAO[J]. Trans Atmos Sci, 2010, 33(4): 401-411.

IPCC AR4 中海气耦合模式对中国东部夏季降水及 PDO、NAO 年代际变化的模拟能力分析

顾薇^{1,2}, 李崇银^{2,3}

(1. 国家气候中心, 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; 3. 解放军理工大学 气象学院, 江苏 南京 211101)

摘要: 利用 1880—1999 年中国东部 35 站的观测降水资料、英国 Hadley 中心的海温和海平面气压资料以及 IPCC 第 4 次评估报告 (AR4) 中 20 世纪气候模拟试验 (20C3M) 的模式输出结果, 对 IPCC AR4 中 22 个耦合模式所模拟的我国东部夏季降水的年代际变化情况以及太平洋年代际涛动 (PDO) 和北大西洋涛动 (NAO) 的年代际变化情况进行了分析。结果显示, 这些模式对 20 世纪我国东部夏季降水年代际变化的模拟结果并不理想, 但对降水在 20 世纪 70 年代中期前后的突变具有一定的模拟能力。其中 IAP_FGOALSL_0_G 可以大致模拟出 20 世纪 70 年代中期前后降水型的突变特征, 而 BCCR_BCM2_0 和 UKMO_HadGEM1 则可以模拟出华北地区降水在 20 世纪 70 年代中期之后减少的现象。对于引起我国东部夏季降水年代际变化的重要因子 PDO 和 NAO, 模式对它们年代际变化的模拟效果略好于降水。多数模式都可以模拟出 PDO 和 NAO 的空间模态, 其中 CNRM_CM3 和 UKMO_HadGEM1 对 PDO 年代际变化 (8 a 以上) 的模拟与实际情况比较相似, 并可以模拟出 20 世纪 70 年代中期之后 PDO 由负位相转变为正位相的情况, 而模式 UKMO_HadGEM1 也对 NAO 的年代际变化以及 1980 年以来不断加强的趋势模拟较好。

关键词: 中国东部夏季降水; IPCC AR4; 年代际变化; 太平洋年代际振荡 (PDO); 北大西洋涛动 (NAO)

中图分类号: P467 文献标识码: A 文章编号: 1674-7097(2010)04-0401-11

Evaluation of the IPCC AR4 Climate Models in Simulating the Interdecadal Variations of the East China Summer Precipitation, PDO and NAO

GU Wei^{1,2}, LI Chong-yin^{2,3}

(1. National Climate Center, Beijing 100081, China; 2. State Key Laboratory of Numerical Modeling for Atmospheric Sciences and Geophysical Fluid Dynamics, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China; 3. Meteorological College, PLA University of Science and Technology, Nanjing 211101, China)

Abstract: This paper aims to evaluate the performance of the IPCC AR4 (Intergovernmental Panel on Climate Change, the Fourth Assessment Report) climate models in simulating the interdecadal variations of the summer precipitation in East China and its two important influencing factors—the Pacific Decadal Oscillation (PDO) and the North Atlantic Oscillation (NAO). The results indicate that although most models can not reproduce the interdecadal variations of the summer precipitation during the 20th centu-

收稿日期: 2009-11-22; 改回日期: 2010-03-30

基金项目: 国家重点基础研究发展计划项目 (2006CB403600); 科技部科技支撑项目 (2006BAC02B04); 中国气象局 2009 年季节气候预测业务系统建设项目

作者简介: 顾薇 (1981—), 女, 山西大同人, 博士, 工程师, 研究方向为东亚气候的年代际变化及短期气候预测, guwei@mail.iap.ac.cn.

ry, IAP_FGOALS_L0_G can simulate the abrupt change of the precipitation around the 1970s. Besides, models BCCR_BCM2_0 and UKMO_HadGEM1 can simulate the abrupt change of the precipitation in North China around the 1970s. For PDO and NAO, most models can reproduce them as the principal mode in North Pacific sea surface temperature field and in North Atlantic sea level pressure field, respectively. However, only CNRM_CM3 and UKMO_HadGEM1 can reproduce the interdecadal variations of PDO in the 20th century and its abrupt change around the 1970s. And model UKMO_HadGEM1 can also reproduce the interdecadal variations of NAO and its increasing trend since the 1970s.

Key words: summer precipitation in eastern China; IPCC AR4; interdecadal variation; the Pacific Decadal Oscillation; the North Atlantic Oscillation

0 引言

为了初步检验模式的模拟能力, IPCC 第 4 次评估报告 (AR4) 中采用的耦合气候模式均进行了 20 世纪气候模拟 (20C3M) 试验。该试验主要利用实际观测的外强迫变化资料来驱动“海洋—大气—陆地—海冰”耦合的气候模式, 以考察在这些外强迫作用下, 耦合模式能够在多大程度上再现实际观测的 20 世纪气候演变过程。并且, 为了方便不同模式间结果的比较, 各模式所加的外强迫均采用统一的标准。这样得到的模式资料是非常宝贵的资源, 各国科学家利用这些资料进行了大量研究, 并对这些耦合气候模式对过去近百年来气候的模拟能力进行了评估。例如, Zhou 和 Yu^[1] 利用 20C3M 试验的模拟结果和观测数据, 对中国和全球气温的变化趋势进行了分析, 指出在考虑了自然和人类活动的情况下, IPCC AR4 中的模式可以模拟出全球气温的长期变化趋势以及年代际时间尺度的变化, 但更短时间尺度的气温变化在模式中则没能得到再现。此外, 这些模式也无法很好的模拟出中国气温变化趋势的区域性特征^[1]。Dai^[2] 则利用 20C3M 的模拟结果和观测的降水资料, 从空间分布、日变化、季节内至年际时间尺度变化、与 ENSO 之间的关系等多方面评估了 IPCC AR4 中模式对降水 (主要是热带地区降水) 的模拟能力。

东亚夏季风是影响东亚夏季气候的重要系统, 在它的影响下, 中国东部夏季降水呈现出从季节内到年代际时间尺度的复杂的变化^[3-6], 其中降水的年代际变化问题受到广泛的关注。如 20 世纪 70 年代中期以来华北地区持续干旱, 而长江中下游地区则洪涝灾害频繁发生, 这种“南涝北旱”的现象给我国国民经济和人民生活带来巨大影响^[7-10]。目前, 不少学者都对引起我国东部夏季降水年代际变化的机理进行了分析^[11-15], 然而, 资料长度不足的问题大大限制了人们对于降水年代际变化规律和机理的

进一步认识, 而耦合模式则能够在一定程度上弥补这一不足。Bao 和 Huang^[16] 利用 IPCC 第 3 次评估报告中 5 个耦合模式的结果, 对 1951—1999 年中国东部夏季降水年代际变化的模拟情况进行了分析, 发现虽然模式对降水年代际变化的模拟与观测事实相差较远, 但有的模式基本上可以模拟出 20 世纪 70 年代中期前后降水发生的突变。此外, 虽然对东亚降水的模拟较差, 但模式依然可以较好地再现南方涛动、太平洋—北美遥相关型等几个主要大气涛动, 以及东亚大槽、北美大槽等几个主要大气环流系统的年代际变化特征^[17-18], 有的模式还能够较好地模拟出 1976/1977 年前后的年代际突变现象^[19-21]。

在 Bao 和 Huang^[16] 的研究中采用的是 IPCC 第 3 次评估报告中的耦合模式, 而 IPCC AR4 中使用的模式无论是空间分辨率, 还是所采用的物理过程, 都比第 3 次评估报告中使用的模式有长足的进步。因此, 为了更好地了解现有模式对中国东部夏季降水的模拟情况, 尤其是对降水年代际变化的模拟情况, 本文将利用 IPCC AR4 中 22 个耦合模式的结果, 对模式中 20 世纪中国东部夏季降水在 1880—1999 年的年代际变化情况进行分析, 并着重分析耦合模式对 20 世纪 70 年代中期夏季降水突变这一现象的再现能力。此外, 由于太平洋年代际振荡 (PDO) 和北大西洋涛动 (NAO) 都具有很强的年代际变化特征, 是年代际尺度上可能影响我国东部夏季降水变化的重要因子^[22-23], 本文也对模式模拟二者年代际变化的能力进行了评估。

1 资料和方法

使用的模式资料为 IPCC AR4 中 22 个耦合模式 (表 1) 的 20C3M 试验月平均的输出结果, 使用的变量包括降水通量、海表温度和海平面气压场。降水观测数据为我国东部 35 站夏季 (6—8 月) 降水量, 该数据基于台站的历史观测和部分代用资料重建而成, 包含的时段为 1880—1999 年。由于这 35

站在中国东部的分布比较均匀,因此能够很好地描述中国东部降水的空间分布和时间变化^[24]。海温的观测资料为英国气象局哈德莱中心(Met Office Hadley Centre)提供的海冰和海表温度数据集 HadISST1^[25],该资料覆盖了1870年1月以来的全球海冰和海表温度,水平分辨率为 $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ 。此外,还采用了英国气象局哈德莱中心提供的全球平均海平面气压数据集 HadSLP2^[26],该资料的空间分辨率为 $5^{\circ} \times 5^{\circ}$,时间从1850年1月到2005年12月。它基于 International Comprehensive Ocean-Atmosphere Data Set (ICOADS)的海洋观测以及全球2 228个地面观测站的月平均历史记录,通过优化空间差值技术重建到全球的格点上。

文中我国东部地区特指 $110 \sim 120^{\circ}\text{E}$ 、 $22 \sim 45^{\circ}\text{N}$

的范围。夏季定义为6—8月,受到观测降水资料长度的限制,研究时段为1880—1999年。分析所用方法包括方差分析、时间相关分析、经验正交函数展开等。在研究年代际变化时,采用8 a低通滤波后的资料进行分析。同时,由于滤波会破坏原数据的相互独立性,因此在对年代际分量做显著性检验之前,先计算样本的有效自由度^[27]。为了文字表达更加简洁,采用表1中第1列的序号来代表各个模式。

2 中国东部夏季降水的模拟情况

2.1 模式对降水气候态和年代际变化的模拟情况

气候平均值的模拟情况是检验模式性能的一个基本标准,因此首先考察这22个模式对中国东部夏季降水气候态的模拟情况。图1显示了35站观测

表1 IPCC第4次评估报告中22个耦合模式名称及所属机构

Table 1 The 22 climate models in IPCC AR4 and their originating groups

模式序号	模式名称	机构
1	BCCR_BCM2_0	Bjerknes Centre for Climate Research(Norway)
2	CCCMA_CGCM3_1	Canadian Centre for Climate Modelling & Analysis
3	CCCMA_CGCM3_1_T63	As above
4	CNRM_CM3	Météo-France / Centre National de Recherches Météorologiques
5	CSIRO_MK3_0	CSIRO Atmospheric Research(Australia)
6	CSIRO_MK3_5	As above
7	GFDL_CM2_0	US Dept. of Commerce / NOAA / Geophysical Fluid Dynamics Laboratory(USA)
8	GFDL_CM2_1	As above
9	GISS_AOM	NASA / Goddard Institute for Space Studies(USA)
10	GISS_MODEL_E_H	As above
11	GISS_MODEL_E_R	As above
12	IAP_FGOALSL_0_G	LASG/Institute of Atmospheric Physics(China)
13	INGV_ECHAM4	Max Planck Institute for Meteorology(Germany)
14	INMCM3_0	Institute for Numerical Mathematics(Russia)
15	IPSL_CM4	Institut Pierre Simon Laplace(France)
16	MIROC3_2_MEDRES	Center for Climate System Research(The University of Tokyo), National Institute for Environmental Studies, and Frontier Research Center for Global Change(Japan)
17	MIUB_ECHO_G	Meteorological Institute of the University of Bonn, Meteorological Research Institute of KMA, and Model and Data group(Germany/Korea)
18	MRI_CGCM2_3_2A	Meteorological Research Institute(Japan)
19	NCAR_CCSM3_0	National Center for Atmospheric Research(USA)
20	NCAR_PCM1	Meteorological Research Institute(Japan)
21	UKMO_HadCM3	Hadley Centre for Climate Prediction and Research/Met Office(UK)
22	UKMO_HadGEM1	As above

资料和 22 个 IPCC 耦合模式模拟的我国东部夏季降水的气候平均值。可以看到,多数模式对中国东部夏季降水气候态的模拟都偏小,在 22 个模式中,只有 4 个模式(CNRM_CM3、GISS_MODEL_E_R、UKMO_HadCM3、UKMO_HadGEM1)模拟的气候平均降水超出了观测值。进一步对华北地区(110~120°E, 35~40°N)、长江中下游地区(110~122°E, 28~33°N)和华南地区(110~120°E, 22~28°N)的夏季降水分别做了同样的分析,结果与整个中国东部地区的情况基本一致(图略)。以与中国东部地区观测降水量气候态的偏差不超过 15% 为标准,则可以选出 11 个对气候态模拟相对较好的模式(表 1 中第 1、2、3、4、7、9、10、11、12、21 和 22 个模式)。因此,接下来的研究只对这 11 个对降水气候态模拟较好的模式做进一步的分析。

表 2 给出了用我国东部 35 站资料和上述 11 个耦合模式资料所构建的我国东部地区 120 a(1880—1999 年)夏季降水时间序列的总方差、年代际方差贡献、相关系数以及年代际尺度上的相关系数等。从降水的方差可以看出,模式模拟的夏季降水的方差远远小于观测值,其中模式 1(BCCR_BCM2_0)的方差最大,但其量值也不到观测值的一半,这说明各耦合模式普遍低估了我国东部夏季降水的变化幅度。模拟与观测降水的相关系数显示,只有模式 22(UKMO_HadGEM1)所模拟的东部总降水量与观测的相关系数能够通过 0.1 信度的显著性检验(0.15),为 0.16;而其他模式与观测降水的相关都

非常低,甚至许多出现负相关,这说明多数耦合模式对于中国东部夏季降水总的模拟能力还比较差。从年代际方差贡献来看,观测降水的年代际变化非常明显,占到总方差的 31%,而模式模拟降水的年代际变化特征也比较明显,除了模式 1 中年代际方差贡献为 15% 以外,其余模式中年代际变化的方差贡献都在 20%~40%,与观测值较为接近。然而,由于 8 a 低通滤波后 120 a 资料的有效自由度降低至 15 左右,达到 0.1 信度显著性检验的相关系数上升为 0.47 左右,因此年代际尺度上,无论哪个模式模拟的降水序列都没有达到 0.1 信度显著性检验的相关水平(表 2)。这说明,尽管各耦合模式中降水年代际变化的方差贡献比较接近观测,但是其模拟的年代际变化与观测仍然有很大差距。

对华北地区、长江中下游地区和华南地区的夏季降水做类似分析(表 3~5),发现其结果与整个中国东部地区的结果基本一致,即各模式均大大低估了降水变化的方差,但能够较好地再现年代际变化的方差贡献。同时,模式中降水的变化与观测相差依然很大,除了模式 2(CCCMA_CGCM3_1)中长江流域夏季降水与观测的相关能通过 0.1 信度的显著性检验外,其余不管是总变化还是年代际时间尺度上的变化,各模式与观测的相关系数均没有通过 0.1 信度的显著性检验。这表明,无论是从整体还是区域来看,模式对我国东部降水的模拟都存在很大不足;然而,相比而言,模式对我国东部降水年代际分量的模拟在某种程度上具有一定的可信性。

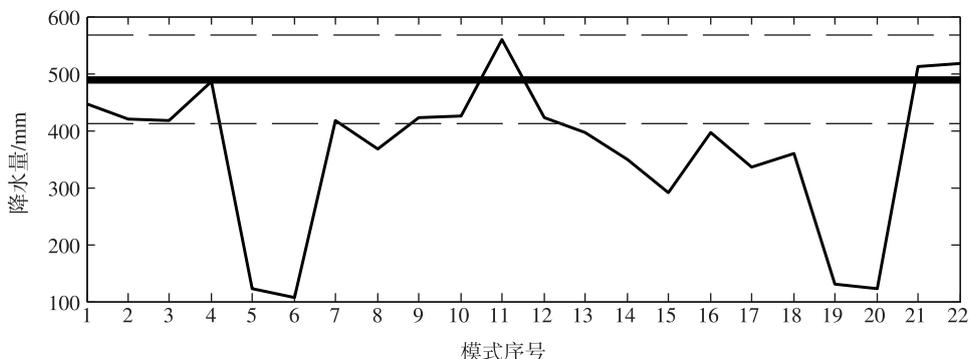


图 1 22 个模式模拟中国东部夏季降水的平均值(粗实线代表观测降水的气候平均值,短划线表示偏离平均值 15% 水平)

Fig. 1 The climatology of summer precipitation(mm) in eastern China in 22 model simulations(The x-axis denotes the model numbers, and the y-axis denotes the precipitation. Thick line indicates the observational value, and dashed lines indicate a departure of 15% from the observational value)

表 2 观测及模式模拟中国东部夏季降水的总方差、年代际分量的方差贡献及二者的相关系数

Table 2 Total variance and its interdecadal contribution of summer precipitation in eastern China in observations and simulations, and the correlation coefficients between the observations and the simulations

模式号	模式名称	方差	年代际方差贡献	相关系数	年代际相关系数
	观测	3 240	0.31	—	—
1	BCCR_BCM2_0	1 570	0.15	-0.01	0.17
2	CCCMA_CGCM3_1	260	0.32	0.10	-0.05
3	CCCMA_CGCM3_1_T63	1 226	0.32	-0.13	0.15
4	CNRM_CM3	831	0.21	-0.05	-0.52
7	GFDL_CM2_0	589	0.26	-0.14	-0.32
9	GISS_AOM	200	0.26	-0.04	-0.00
10	GISS_MODEL_E_H	296	0.42	-0.13	-0.11
11	GISS_MODEL_E_R	175	0.34	0.09	0.12
12	IAP_FGOALSL_0_G	308	0.24	-0.02	0.20
21	UKMO_HadCM3	1 135	0.22	-0.13	0
22	UKMO_HadGEM1	1 529	0.36	0.16 ¹⁾	0.09

注:1)表示通过 0.1 信度的显著性检验.

表 3 观测及模式模拟华北夏季降水的总方差、年代际分量的方差贡献及二者的相关系数

Table 3 Total variance and its interdecadal contribution of summer precipitation in North China in observations and simulations, and the correlation coefficients between the observations and the simulations

模式号	模式名称	方差	年代际方差贡献	相关系数	年代际相关系数
	观测	9 000	0.31	—	—
1	BCCR_BCM2_0	2 249	0.31	-0.01	0.03
2	CCCMA_CGCM3_1	769	0.30	-0.01	-0.08
3	CCCMA_CGCM3_1_T63	4 846	0.33	-0.11	-0.35
4	CNRM_CM3	2 614	0.20	0.01	-0.25
7	GFDL_CM2_0	1 643	0.22	0.11	0.09
9	GISS_AOM	457	0.25	0.12	0.24
10	GISS_MODEL_E_H	1 211	0.23	-0.02	-0.01
11	GISS_MODEL_E_R	808	0.20	-0.03	-0.25
12	IAP_FGOALSL_0_G	1 121	0.16	0.07	-0.03
21	UKMO_HadCM3	1 182	0.29	-0.07	-0.14
22	UKMO_HadGEM1	2 530	0.33	0.14	0.33

表 4 观测及模式模拟长江流域夏季降水的总方差、年代际分量的方差贡献及二者的相关系数

Table 4 Total variance and its interdecadal contribution of summer precipitation in the Yangtze River valley in observations and simulations, and the correlation coefficients between the observations and the simulations

模式号	模式名称	方差	年代际方差贡献	相关系数	年代际相关系数
	观测	14 876	0.27	—	—
1	BCCR_BCM2_0	6 378	0.17	0.07	0.16
2	CCCMA_CGCM3_1	472	0.25	0.17 ¹⁾	0.01
3	CCCMA_CGCM3_1_T63	3 383	0.25	-0.01	0.46
4	CNRM_CM3	2 334	0.35	0.07	-0.06
7	GFDL_CM2_0	2 418	0.21	-0.03	-0.15
9	GISS_AOM	1 631	0.26	-0.10	-0.13
10	GISS_MODEL_E_H	1 279	0.35	-0.16	-0.24
11	GISS_MODEL_E_R	495	0.31	-0.06	-0.14
12	IAP_FGOALSL_0_G	1 856	0.16	0.11	0.33
21	UKMO_HadCM3	5 173	0.23	-0.07	-0.03
22	UKMO_HadGEM1	4 869	0.33	0.14	-0.12

注:1)表示通过 0.1 信度的显著性检验.

表 5 观测及模式模拟华南夏季降水的总方差、年代际分量的方差贡献及二者的相关系数

Table 5 Total variance and its interdecadal contribution of summer precipitation in South China in observations and simulations, and the correlation coefficients between the observations and the simulations

模式号	模式名称	方差	年代际方差贡献	相关系数	年代际相关系数
	观测	14 918	0.32	—	—
1	BCCR_BCM2_0	2 744	0.15	0.02	0.07
2	CCCMA_CGCM3_1	324	0.26	0.14	-0.03
3	CCCMA_CGCM3_1_T63	1 641	0.33	-0.02	0.04
4	CNRM_CM3	1 124	0.23	-0.11	-0.18
7	GFDL_CM2_0	907	0.24	-0.03	-0.03
9	GISS_AOM	232	0.22	0.06	0.00
10	GISS_MODEL_E_H	438	0.44	-0.01	-0.07
11	GISS_MODEL_E_R	283	0.38	0.06	-0.01
12	IAP_FGOALSL_0_G	512	0.24	-0.14	0.02
21	UKMO_HadCM3	1 899	0.22	-0.16	0.05
22	UKMO_HadGEM1	7 671	0.32	0.06	0.13

2.2 模式对降水 20 世纪 70 年代中期突变的模拟情况

我国东部夏季降水在 20 世纪 70 年代中期前后发生了一次非常显著的年代际突变,降水异常分布由“南旱北涝”型转变为“南涝北旱”型,许多研究都对降水的这次突变进行了研究,并揭示了这次突变产生的一些重要原因^[7-11]。但是由于资料长度的限制,目前对于这次突变产生原因的了解并不全面,而气候模式则能够在一定程度上弥补这一不足,成为研究突变机制的有力工具。一个模式是否可以用来研究机制,其前提是它能够对现象进行合理的再现,因此这里将评估上述 11 个耦合模式对 20 世纪 70 年代中期我国东部降水突变的模拟情况。

图 2 显示了用观测降水资料计算的 20 世纪 70 年代中期之前(1951—1976 年)和之后(1977—1999 年)我国东部夏季降水异常的分布。可以清楚地看到,1951—1976 年我国东部华北地区降水偏多、长江中下游降水偏少,1977—1999 年则华北偏旱、长江中下游地区偏涝。为了分析模式结果对这一突变现象的再现能力,分别计算了 11 个模式中 1951—1976 年和 1977—1999 年我国东部的降水异常(图略)。结果表明,没有一个模式能够很好地模拟出这种降水异常由“南旱北涝”向“南涝北旱”转变的情况。相对而言,模式 12(IAP_FGOALSL_0_G)的结果与观测具有一定的相似性,其模拟的降水在 20 世纪 70 年代中期前后的差值场显示出从北至南“负正负”的异常分布形势(图 3),但这种异常分布比实际情况偏南,而且华北地区降水异常也较弱。

此外,模式 1(BCCR_BCM2_0)和模式 22(UKMO_HadGEM1)能模拟出华北地区降水在 20 世纪 70 年代末期之后变少的现象,但却不能同时模拟出长江中下游地区降水增多的情况。图 4 给出了 35 站观测、模式 1(BCCR_BCM2_0)、模式 12(IAP_FGOALSL_0_G)和模式 22(UKMO_HadGEM1)中华北地区平均降水的年代际分量。可以看到,从 20 世纪 70 年代末期开始,华北地区降水出现了显著的减少(图 4a),模式 1(BCCR_BCM2_0)(图 4b)和模式 22(UKMO_HadGEM1)(图 4d)能够模拟出该特征,但模拟中变化的强度比观测要大。模式 12(IAP_FGOALSL_0_G)(图 4c)的结果也表现出华北降水的这一突变特征,但其突变时间比实际情况偏晚,发生在 1985 年前后。

总的来说,上述 11 个耦合模式虽然还都不能十分准确地模拟出 20 世纪 70 年代中期前后我国东部夏季降水由“南旱北涝”向“南涝北旱”的转变,但对于 20 世纪 70 年代中期这次突变,模式还是有所反映的。在模式 12(IAP_FGOALSL_0_G)的模拟结果中,20 世纪 70 年代中期前后降水的变化与实际情况较为相似,但是异常中心分布略为偏南,突变时间也偏晚。此外,模式 1(BCCR_BCM2_0)和模式 22(UKMO_HadGEM1)也可以模拟出 20 世纪 70 年代末期华北地区降水减少的现象。

3 PDO 和 NAO 年代际变化的模拟情况

目前对于我国东部夏季降水年代际变化机制的了解并不全面,但许多研究表明,夏季 PDO 和前冬

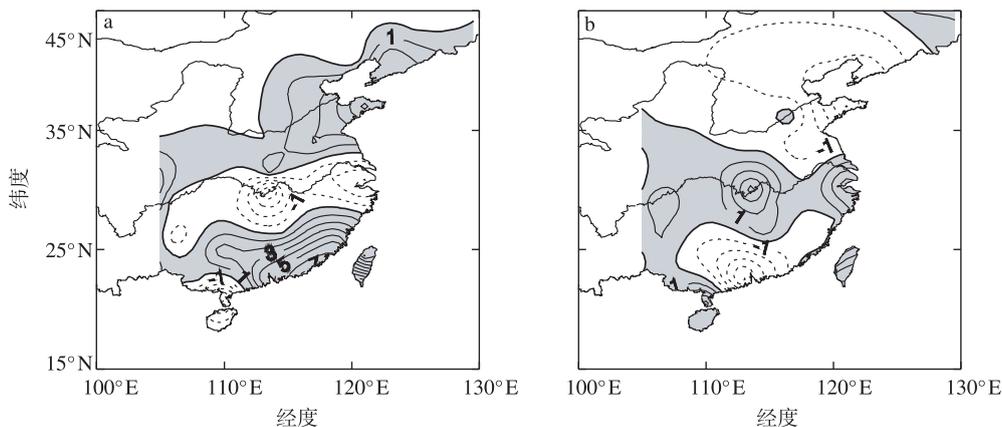


图 2 1951—1976 年 (a) 和 1977—1999 年 (b) 平均的夏季降水异常 (单位: mm; 阴影为正值区)

Fig. 2 Summer precipitation anomalies (mm) during (a) 1951—1976 and (b) 1977—1999 (The shading indicates the positive values)

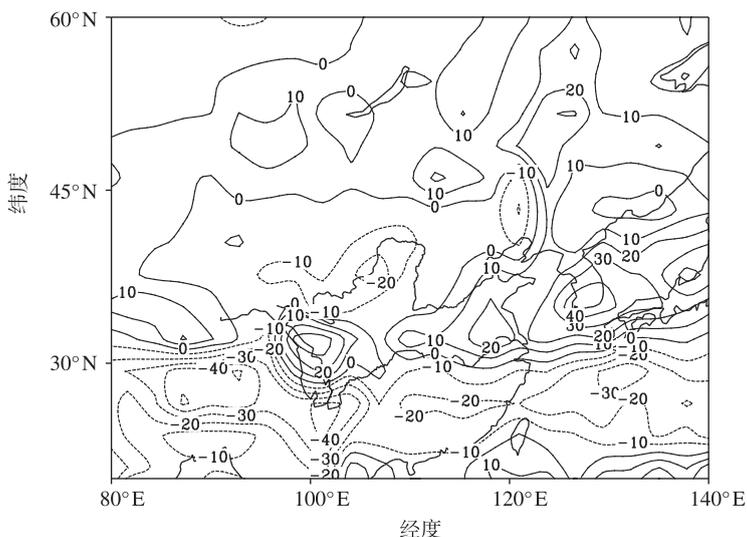


图 3 IAP_FGOALSL_0_G 模拟的 1977—1999 年与 1951—1976 年平均夏季降水的差值分布 (单位: mm)

Fig. 3 The composite difference of summer precipitation between 1977—1999 and 1951—1976 in IAP_FGOALSL_0_G simulations (units: mm)

NAO 可能在其中起到了重要的作用^[22-23]。因此,在利用耦合模式研究引起我国东部夏季降水年代际变化的原因之前,除了需要评估模式对降水年代际变化的模拟能力外,还有必要评估模式中 PDO 和 NAO 的变化情况。

3.1 模式对 PDO 的模拟情况

PDO 是北太平洋地区海温变化的最主要模态,它在空间分布型上类似于 El Niño/La Niña,但比 El Niño/La Niña 模态空间分布的经向范围更大,且与 El Niño/La Niña 的最强信号出现在热带中、东太平洋不同, PDO 的最强信号出现在北太平洋中部。PDO 具有两个主要的年代际变化周期,一个是 15 ~

25 a,另一个是 50 ~ 70 a。此外, PDO 在 1924、1946 和 1977 年前后分别发生了 3 次年代际突变^[28]。为了分析耦合模式中的 PDO 现象,根据 Mantua 和 Hare^[28] 计算 PDO 指数的方法,利用 Hadley 中心的海温观测资料以及上述 11 个模式的输出资料对北太平洋地区 (110°E ~ 110°W, 20 ~ 65°N) 夏季平均的海温异常场进行了经验正交函数分解。用观测和模式海温资料计算得到的北太平洋海温异常的第 1 模态 (图略) 显示,在 11 个模式中,有 7 个模式 (CCCMA_CGCM3_1, CCCMA_CGCM3_1_T63, CNRM_CM3, GISS_AOM, HadGEM, IAP_FGOALSL_0_G 和 UKMO_HadCM3) 能够模拟出 PDO 这一

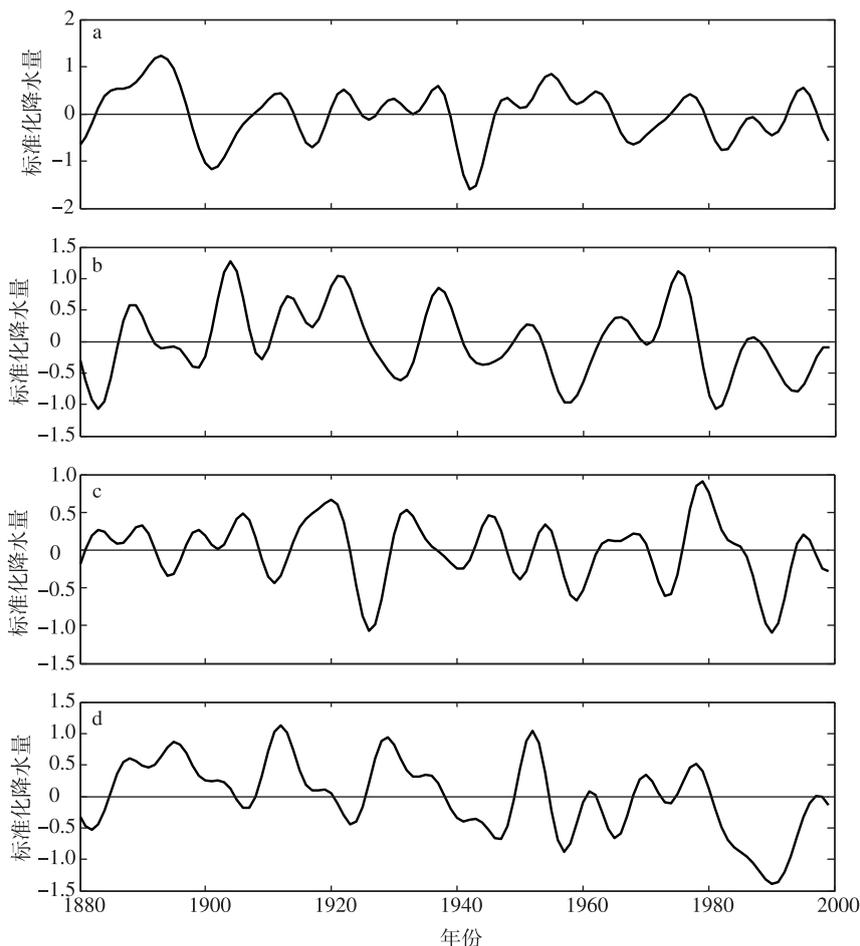


图 4 观测及模式模拟的 8 a 低通滤波的华北夏季降水量 a. 观测; b. BCCR_BCM2_0; c. IAP_FGOALSL_0_G; d. UKMO_HadGEM1

Fig. 4 The 8-yr low-pass filtered summer precipitation in North China in (a) observations, and simulations of (b) BCCR_BCM2_0, (c) IAP_FGOALSL_0_G, and (d) UKMO_HadGEM1

北太平洋海温的主要模态,而其余 4 个模式则不能。在观测中, PDO 模态的方差贡献为 22.3%, 对于能够模拟出 PDO 的 7 个模式,其模拟结果中 PDO 所解释的方差除了一个模式(IAP_FGOALSL_0_G)为 35.8% 以外,其余模式的结果都在 15% 与 30% 之间,与实际值 22.3% 较为接近(表 6)。

为了比较模式与观测中 PDO 随时间的变化情况,进一步计算了观测的 PDO 指数与模式模拟的 PDO 指数间的相关系数(表 6)。可以看到, CNRM_CM3 模式模拟的 PDO 指数与观测资料的 PDO 指数关系最好,相关系数为 0.27,通过 0.01 信度的显著性检验,其余模式中 PDO 与实际 PDO 的关系则比较差。对年代际分量而言,仍然是 CNRM_CM3 模式模拟的 PDO 与实际 PDO 的变化最为接近,相关系数达到 0.35。此外,在年代际尺度上 UKMO_HadCM3 模拟的 PDO 与实际也较为接近,相关系数达到 0.34。然而,考虑到滤波之后大大减小的自由

表 6 各耦合模式中 PDO 模态的解释方差、模式与观测 PDO 指数的相关系数及年代际分量的相关系数

Table 6 Variance contribution from the PDO mode in the simulations, and the correlation coefficients of the PDO indices between the observations and the simulations and their interdecadal correlation coefficients

模式号	模式名称	解释方差	相关系数	年代际相关系数
2	CCCMA_CGCM3_1	15.8	0	-0.09
3	CCCMA_CGCM3_1_T63	18.5	-0.03	-0.04
4	CNRM_CM3	29.5	0.27 ¹⁾	0.35
9	GISS_AOM	21.0	0.05	0
12	IAP_FGOALSL_0_G	35.8	0.09	0.08
21	UKMO_HadCM3	19.0	0.04	0.34
22	HadGEM	15.8	0.07	0.21

注:1)表示通过 0.01 信度的显著性检验。

度(15 左右),年代际时间尺度上以上两个相关系数仍然没有通过 0.1 信度的显著性检验标准。图 5 进一步给出了观测中以及 CNRM_CM3 和 UKMO_HadCM3 模式模拟的 PDO 年代际分量的时间变化。可以看到,模式对年代际尺度上 PDO 时间变化的模拟与观测较为一致,尤其是 20 世纪 70 年代中期前后 PDO 由负位相向正位相的转变,在这两个模式的模拟结果中可以得到清楚的体现。

3.2 耦合模式对 NAO 的模拟情况

NAO 是全球几个最显著的大气环流遥相关型之一,表现为北大西洋上两个大气活动中心——冰岛低压和亚速尔高压间的反位相变化^[29],同时它也是北大西洋地区海平面气压场的最主要模态。据此,Hurrell 等^[29]将北大西洋区域(90°W ~ 40°E, 20 ~ 80°N)海平面气压场的第 1 主分量定义为 NAO 指数。根据 Hurrell 等^[29]的定义,分别利用 Hadley 中心的海平面气压资料以及上述 11 个模式模拟的海平面气压场资料计算了相应的冬季 NAO 的空间形态和时间变化。对比观测和 11 个耦合模式的结果(图略)可以发现,这 11 个耦合模式都能够很好的抓住 NAO 的空间分布特征,即在各个模式中,第 1 模态都表现出以北大西洋地区 50°N 附近为界,南北反位相变化的偶极子模态。同时,各个模式对 NAO 模态所解释的方差也有较好的模拟,观测中 NAO 的解释方差为 52%,而模式中 NAO 的解释方

差最大为 64%,最小为 42%,都与观测值较为接近。

进一步分析模式模拟的 NAO 指数与观测的 NAO 指数间的相关系数(图 6),结果表明,在 11 个模式当中,只有模式 12(IAP_FGOALSL_0_G)和模式 22(UKMO_HadGEM1)能够较好地模拟出 NAO 的变化特征,它们模拟的 NAO 与观测 NAO 之间的相关系数通过了 0.1 信度的显著性检验,而其他模式中的 NAO 与观测值的相关都比较低,对模式 4、5 和 7 来说,相关系数甚至为负。在年代际时间尺度上,观测与模拟 NAO 的相关系数均没有超过 0.1 信度检验,相对而言,模式 22(UKMO_HadGEM1)与观测的相关系数最高,达到 0.4。从它们的时间序列(图 7)也可以看到,在过去 100 多年,二者在年代际时间尺度上具有较为一致的变化。尤其是近几十年来,NAO 表现出很强的年代际变化特征,冬季 NAO 指数在近 20 多年以来持续加强,而在模式 UKMO_HadGEM1 中,1980 年以来 NAO 也有不断加强的趋势,只是变化幅度比观测值要小。总的来说,虽然 11 个模式都可以较好模拟出 NAO 这一模态,但只有模式 12(IAP_FGOALSL_0_G)和模式 22(UKMO_HadGEM1)能够较好地模拟出 NAO 的总体变化,而模式中 NAO 的年代际变化模拟则差一些,只有模式 22(UKMO_HadGEM1)能够在一定程度上模拟出 NAO 的年代际变化。

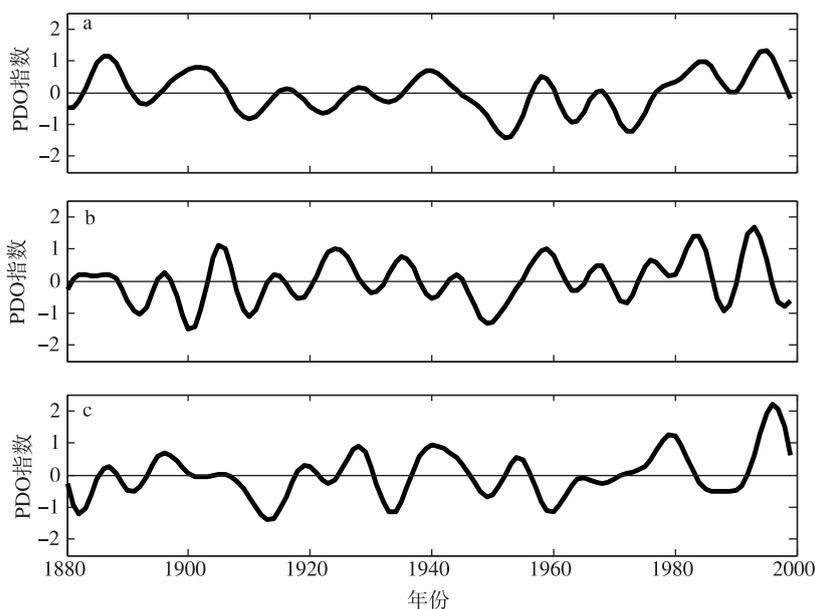


图 5 观测及模拟中 8 a 低通滤波的北太平洋海温异常的第 1 主分量 a. 观测; b. CNRM_CM3; c. UKMO_HadCM3

Fig. 5 The 8-yr low-pass filtered results of the first PC of SSTA in North Pacific in (a) observations, (b) CNRM_CM3 and (c) UKMO_HadCM3 simulations

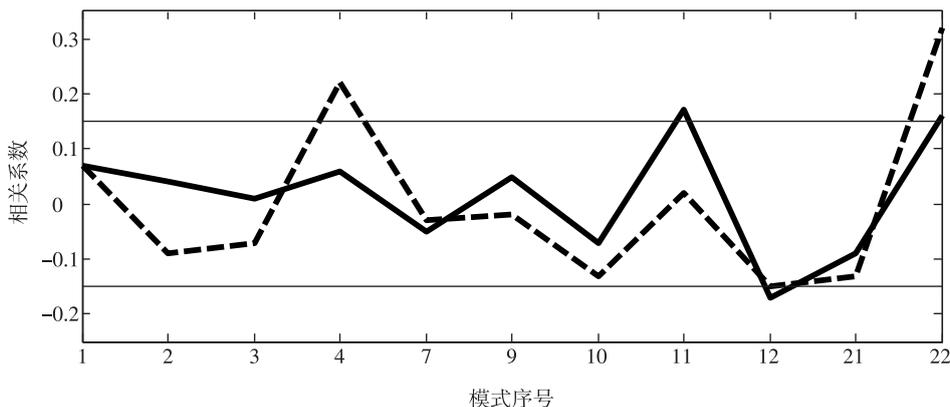


图 6 观测和模拟的冬季 NAO 指数的相关系数(粗实线)及二者在年代际尺度上的相关系数(虚线)(细实线表示 0.1 的显著性水平)

Fig. 6 Correlation coefficients between the observed and the simulated winter NAO indices (thick solid line), and their correlation coefficients on the interdecadal timescales (dashed line) (The x-axis denotes the model numbers, and the thin solid line denotes the 0.1 significance level)

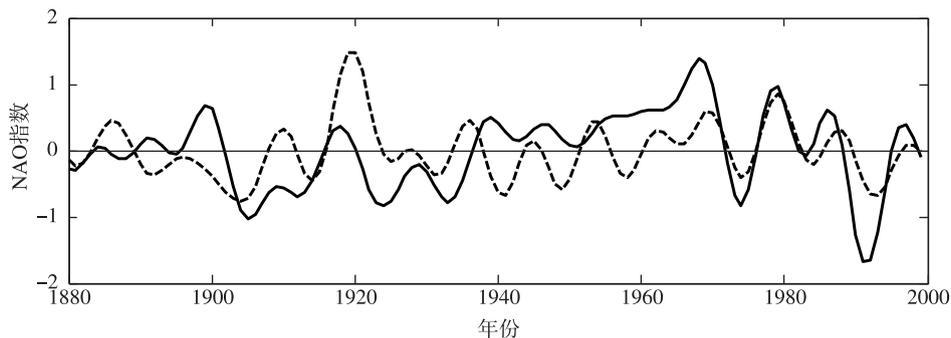


图 7 观测(实线)和 UKMO_HadGEM1 模拟(虚线)的 8 a 低通滤波的冬季 NAO 指数

Fig. 7 The 8-yr low-pass filtered NAO indices of observations (solid line) and UKMO_HadGEM1 simulations (dashed line) in winter

4 结论和讨论

利用 1880—1999 年中国东部 35 站的观测降水资料、英国 Hadley 中心的海温和海平面气压资料以及 IPCC 第 4 次评估报告中 20 世纪气候模拟试验 (20C3M) 的模式输出结果,对 IPCC AR4 中 22 个耦合模式所模拟的我国东部夏季降水的年代际变化情况以及太平洋年代际振荡 (PDO) 和北大西洋涛动 (NAO) 的年代际变化情况进行了分析。结果表明,在 22 个模式当中,有 11 个模式能够模拟出与观测值较为接近的中国东部夏季降水的气候平均值。对这 11 个模式结果的进一步分析表明,各模式模拟的夏季降水的总方差远远小于观测值,说明各模式普遍低估了我国东部夏季降水的变化幅度。模式对降水总变化及其年代际变化分量的模拟都与观测相差较大,只有一个模式 (UKMO_HadGEM1) 能够较好地模拟出中国东部夏季降水量的总体变化特征。尽管各耦合模式能够较好地

模拟出降水年代际变化的方差贡献,但是其模拟的年代际变化与观测值仍然有很大差距。

对于 20 世纪 70 年代中期前后中国东部夏季降水异常由“南旱北涝”转变为“南涝北旱”的这种空间分布型的显著突变,多数耦合模式并不能再现,只有模式 (IAP_FGOALS_L0_G) 可以大致反映出这种空间分布的变化,但异常雨带的分布比实际情况要偏南,另外该模式模拟华北降水发生突变的时间 (80 年代中期) 也比实际情况 (70 年代末期) 偏晚。对于突变较为明显的华北地区,有 2 个模式 (BCCR_BCM2_0 和 UKMO_HadGEM1) 也可以模拟出该地区降水在 20 世纪 70 年代末期之后的减少现象。

针对影响中国东部夏季降水变化的因子,分析了模式对夏季 PDO 和冬季 NAO 的模拟情况。对于 PDO 这一北太平洋海温变化的第 1 模态,11 个模式中有 7 个模式 (CCCMA_CGCM3_1, CCCMA_CGCM3_1_T63, CNRM_CM3, GISS_AOM, Had-

GEM, IAP_FGOALSL_0_G 和 UKMO_HadCM3) 可以模拟出其空间分布。其中, 模式 21 (CNRM_CM3) 和模式 22 (UKMO_HadGEM1) 对 PDO 年代际变化的模拟与实际情况比较相似。这两个模式同时也可以模拟出 20 世纪 70 年代中期之后 PDO 由负位相转变为正位相的情况。对北大西洋地区冬季海平面气压场的分析表明, 11 个模式都可以模拟出 NAO 这一北大西洋地区的最主要模态, 并且各模式中 NAO 这一模态的解释方差都与观测较为接近。其中模式 12 (IAP_FGOALSL_0_G) 和模式 22 (UKMO_HadGEM1) 能够较好地模拟出 NAO 的总体变化特征, 而模式 22 (UKMO_HadGEM1) 对 NAO 的年代际变化以及 1980 年以来不断加强的趋势也有相对较好的模拟。

综合来看, IPCC AR4 中的耦合模式对东亚地区夏季降水年代际变化的模拟总体仍不理想, 但一部分模式能够再现出 20 世纪 70 年代中期以来华北夏季降水的减少、PDO 在 20 世纪 70 年代中期前后的突变, 以及 NAO 自 1980 年以来的持续加强等显著的年代际变化现象。因此, 在今后的工作中, 如果要利用模式对中国东部降水年代际变化的机制进行分析, 首先应该考虑选择对年代际变化模拟较好的耦合模式。

参考文献:

- [1] Zhou T, Yu R. Twentieth-century surface air temperature over China and the globe simulated by coupled climate models [J]. *J Climate*, 2006, 19(22): 5843-5858.
- [2] Dai A. Precipitation characteristics in eighteen coupled climate models [J]. *J Climate*, 2006, 19(18): 4605-4630.
- [3] 郭其蕴. 东亚夏季风的变化与中国降水 [J]. *热带气象学报*, 1985, 1(1): 44-51.
- [4] 张庆云, 陶诗言, 陈烈庭. 东亚夏季风指数的年际变化与东亚大气环流 [J]. *气象学报*, 2003, 61(5): 559-568.
- [5] 吕俊梅, 任菊章, 琚建华. 东亚夏季风的年代际变化对中国降水的影响 [J]. *热带气象学报*, 2004, 20(1): 73-80.
- [6] 李爱华, 江志红. 中国东部夏季雨带推进过程的年际、年代际变化 [J]. *南京气象学院学报*, 2007, 30(2): 186-193.
- [7] Nitta T, Hu Z Z. Summer climate variability in China and its association with 500 hPa height and tropical convection [J]. *J Meteor Soc Japan*, 1996, 74(4): 425-445.
- [8] Hu Z Z. Interdecadal variability of summer climate over East Asia and its association with 500 hPa height and global sea surface temperature [J]. *J Geophys Res*, 1997, 102(D1): 19403-19412.
- [9] 黄荣辉, 徐予红, 周连童. 我国夏季降水的年代际变化及华北干旱化趋势 [J]. *高原气象*, 1999, 18(4): 465-476.
- [10] 顾薇, 李崇银, 杨辉. 中国东部夏季主要降水型的年代际变化及趋势分析 [J]. *气象学报*, 2005, 63(5): 728-739.
- [11] Wang H. The weakening of the Asian monsoon circulation after the end of 1970's [J]. *Adv Atmos Sci*, 2001, 18: 376-386.
- [12] 陆日宇. 华北汛期降水量年代际和年际变化之间的线性关系 [J]. *科学通报*, 2003, 48(7): 718-722.
- [13] 黄刚, 周连童. 青藏高原西侧绕流风系的变化及其与东亚夏季风和我国华北地区夏季降水的关系 [J]. *气候与环境研究*, 2004, 9(2): 316-330.
- [14] 龚敬瑜, 王谦谦. 江淮梅雨期降水不同尺度异常与 SSTA 的关系 [J]. *南京气象学院学报*, 2006, 29(5): 656-661.
- [15] 王研, 钱明, 朱伟军. 夏季欧亚阻塞活动的年代际变化及其与我国降水的可能联系 [J]. *南京气象学院学报*, 2006, 29(5): 591-598.
- [16] Bao M, Huang R. Intercomparison of the interdecadal variations of summer precipitation in China simulated by AOGCMS from the IPCC-DDC [J]. *Journal of Tropical Meteorology*, 2005, 11(1): 10-22.
- [17] 李崇银, 穆明权. 大气环流的年代际变化 II. GCM 数值模拟研究 [J]. *大气科学*, 2000, 24(6): 739-748.
- [18] Li C, Mu M. Influence of the Indian Ocean Dipole on Asian monsoon circulation [J]. *CLIVAR Exchange*, 2001, 6: 11-14.
- [19] Graham N E. Decadal-scale climate variability in the tropical and North Pacific during the 1970s and 1980s: Observations and model results [J]. *Climate Dyn*, 1994, 10(3): 135-162.
- [20] Lau N C, Nath M J. A modeling study of the relative roles of tropical and extratropical SST anomalies in the variability of the global atmosphere-ocean system [J]. *J Climate*, 1994, 7(8): 1184-1207.
- [21] Kawamura R, Sugi M, Sato N. Interdecadal and interannual variations over the North Pacific simulated by a set of three climate experiments [J]. *J Climate*, 1997, 10(8): 2115-2121.
- [22] 朱益民, 杨修群. 太平洋年代际振荡与中国气候变率的联系 [J]. *气象学报*, 2003, 61(6): 641-654.
- [23] Yu R, Zhou T. Seasonality and three-dimensional structure of interdecadal change in the East Asian monsoon [J]. *J Climate*, 2007, 20(21): 5344-5355.
- [24] 王绍武, 龚道溢. 1880 年以来中国东部四季降水量序列及其变率 [J]. *地理学报*, 2000, 55(3): 281-293.
- [25] Rayner N A, Parker D E, Horton E B, et al. Global analyses of sea surface temperature, sea ice, and night marine air temperature since the late nineteenth century [J]. *J Geophys Res*, 2003, 108(D14), 4407, doi: 4410. 1029/2002JD002670.
- [26] Allan R, Ansell T. A new globally complete monthly historical gridded mean sea level pressure dataset (HadSLP2): 1850—2004 [J]. *J Climate*, 2006, 19(22): 5816-5842.
- [27] Bretherton C S, Widmann M, Dymnikov V P, et al. The effective number of spatial degrees of freedom of a time-varying field [J]. *J Climate*, 1999, 12(7): 1990-2009.
- [28] Mantua N J, Hare S R. The Pacific decadal oscillation [J]. *Journal of Oceanography*, 2002, 58: 35-44.
- [29] Hurrell J W, Kushnir Y, Ottersen G, et al. The North Atlantic Oscillation: Climatic significance and environmental impact [C]// *Geophysical Monograph Series*. Washington, DC: American Geophysical Union, 2003.