

不同区域气候模式对中国地区温度和降水的长期模拟比较

冯锦明 符淙斌

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

摘 要 利用亚洲区域模式比较计划 RMIP 第二阶段五个区域模式和一个变网格全球模式, 对中国地区 1988 年 12 月~1998 年 11 月十年模拟的平均温度和降水结果, 分析比较了不同区域气候模式对中国地区温度和降水的模拟能力。研究结果表明: 几乎所有模式都能模拟出中国地区多年平均温度和降水的基本空间分布形态, 但模式模拟的温度普遍偏低, 在大部分区域, 大多数模式模拟的降水偏多, 而且不同模式之间存在较大差别。模式能较好地反映出中国地区温度的年际变化, 对夏季降水的年际变化模拟较差, 对冬季模拟较好。

关键词 亚洲区域模式比较计划 平均温度 降水 空间分布 年际变化

文章编号 1006-9895 (2007) 05-0805-10

中图分类号 P435

文献标识码 A

Inter-comparison of Long-Term Simulations of Temperature and Precipitation over China by Different Regional Climate Models

FENG Jin-Ming and FU Cong-Bin

Key Laboratory of Regional Climate-Environment Research for Temperate East Asia, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences; START Regional Center for Temperate East Asia, Beijing 100029

Abstract Because the regional climate model (RCM) includes the detailed surface characteristics and physical processes, it can simulate climatic fields more exactly than the global model does. Currently, significant achievements for RCMs have been obtained in simulating mean climate state, extreme events of climate and climate changes, however there are many problems and limitations. In the past, most works focused on the case study and the sensitivity experiments. The integration period of experiments was often short, although some long-term experiments were performed in the recent years. Also most of researches on regional climate simulation are carried out by a single model, the inter-comparison among different RCMs is scarce. In order to understand the performance of RCMs in simulating Asian, especially East Asian climate, the Regional Climate Model Inter-comparison Project (RMIP) for Asia was launched by START Regional Center for Temperate East Asia, Institute of Atmospheric Physics (IAP)/Chinese Academy of Sciences (CAS), in 2000.

In phase II of RMIP, six models participate for 10-year climate simulation over Asia. The objective is to assess the statistical characteristics and capabilities of the models in simulating Asian monsoon climate systemically, including mean field and variability of meteorological elements. Among six models, there are five RCMs and one global variable resolution model. The RCMs include: RIEMS, developed by START Regional Center for Temperate East Asia, IAP/CAS; NJU RCM, based on MM5v3 and improved by Nanjing University, China; MRI JSM_BAIM, a Japanese Spectral Model developed by Meteorological Research Institute/Japan Meteorological Agency; RegCM2b,

based on RegCM2, improved by Central Research Institute of Electric Power Industry, Japan; SNU RCM, based on MM5v3, improved by Seoul National University, Korea. CSIRO CCAM is a global variable resolution model, developed by Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization Atmospheric Research, Australia.

These models are all integrated from December 1988 to November 1998. The experiment domain contains a large part of Asian continent, the western Pacific, the Bay of Bengal and the South China Sea. The horizontal resolution of the models is 60 km, and the driving fields come from NCEP-II reanalysis data. The inter-comparison of temperature and precipitation over China simulated by six models, as well as the validation to the observation, are presented in the paper. The observed data at 730 stations in China are used for model validation. In some areas of western China, observation stations are very sparse, thus CRU (Climatic Research Unit, University of East Anglia) data are used.

Results show that almost all of the models have the capability to reproduce the spatial patterns of both temperature and precipitation over China. But a general cold bias is found in the temperature simulations, while most models overestimate the precipitation over most areas. The location and intensity of the rainbelt center have the differences from the observations.

The models usually have a good performance in simulating the interannual variability of temperature over China, as well as the precipitation in winter. However the interannual variability of summer precipitation is poorly simulated.

The deviation of the large-scale driving fields and the deficiency of validation data may be some reasons for the bias of simulation. In addition, the bias of stream field is an important reason for simulation errors of RCMs. Cumulus parameterization scheme has large influence on precipitation simulation.

Key words RMIP, mean temperature, precipitation, spatial pattern, interannual variation

1 引言

自 20 世纪 80 年代以来,随着全球气候观测系统的不断完善和高性能计算机的快速发展,气候数值模拟也得到了较快的发展。目前,全球气候模式(GCM)已广泛应用于气候变化的研究,然而由于其较低的空间分辨率,很难用它来描述与复杂地形和陆面等密切相关的区域气候特征。许多研究已经表明,由于区域气候模式(RCM)具有较高的分辨率和更完善的物理过程,较 GCM 能够更加细致地描述地形和海陆分布以及地表植被分布等下垫面特征,因而能够更好地刻画气候的区域性特征,能够模拟出更详尽更准确的气候场分布。区域气候模式首先是由 Dickinson 等^[1]和 Giorgi^[2]发展并应用到气候模拟中来的。目前,大部分区域气候模式是在美国国家大气研究中心(NCAR)与美国宾州大学(PSU)联合创建的中尺度天气模式 MM4 或 MM5 基础上发展起来的,其中应用最多的是 RegCM 系列模式。另外,还有其他不少国家和组织的区域气候模式,比如美国科罗拉多大学(CSU)的 RAMS、澳大利亚联邦科学与工业组织(CSIRO)的 DARLAM、英国气象局(UKMO)哈德莱中心的 HadRM、德国马普气象研究所(MPI)的 REMO,以及德国

马普与丹麦气象研究所(DMI)的 HIRHAM 等,都具有一定的应用。

区域气候模式在对平均气候、极端气候和气候变化的模拟研究方面已取得显著的成果,但仍然存在许多问题和缺陷。对于以往的区域气候模拟研究,主要存在以下不足:大多数模拟研究只是针对于个例的模拟研究,模拟试验积分时间较短,不能反映区域模式对气候特征的统计模拟能力;大多数区域气候模拟研究都是单个模式的模拟与观测之间的比较,不便于模式之间的比较,然而这种比较对于分析区域模式模拟偏差及其原因是极其重要的;对于现代气候研究的模拟区域主要位于美国、欧洲等地区,对于东亚地区研究相对较少。随着计算技术的提高,利用区域模式进行长期积分和各种模拟的试验研究已逐渐展开^[3~5],但对于亚洲地区长期积分的多个区域模式的比较研究目前还没有。东亚地区地理环境独特,为典型的季风区,是世界上气候变率较大的地区之一,包括季节、年际和年代际,甚至世纪尺度的变化^[6]。为了更加清楚地了解区域气候模式对于亚洲特别是东亚地区气候的模拟能力,东亚区域研究中心于 2000 年发起了亚洲区域模式比较计划 RMIP^[7]。区域模式比较计划分三个阶段,第一阶段有来自于中国、美国、澳大利亚、

韩国和日本共 10 个模式参加比较，模式从 1997 年 4 月开始到 1998 年 9 月结束进行 18 个月连续积分，模拟区域包括了东亚及中亚大部分地区。这一阶段研究工作的目的是为了检验区域模式对东亚季风气候的季节循环及其极端气候事件的模拟能力。RMIP 第二阶段共有 6 个模式参加比较，对亚洲区域进行十年连续积分，积分时段从 1988 年 7 月到 1998 年 12 月，这一阶段模拟试验的目的是对区域模式模拟亚洲季风气候的能力，包括气象要素的平均场和变率等进行更为系统的评估，从而研究区域气候模式模拟亚洲区域气候的统计行为与能力。

温度和降水是气候研究中的主要元素，利用区域模式对中国区域的温度和降水进行模拟研究具有重要的意义。因此，本文将利用亚洲区域模式比较计划的结果，对不同区域模式模拟的中国区域温度和降水进行比较研究，分析区域模式对中国区域气候的模拟能力，从而为区域气候模式的改进和气候变化的预测和评估提供一定的参考。

2 模式及试验和资料介绍

RMIP 第二阶段参加十年积分比较的 6 个模式中，5 个为区域模式，1 个为变网格全球模式。区域环境系统集成模式 RIEMS 是全球变化东亚研究中心发展的区域气候模式^[8, 9]，NJU RCM 是中国南京大学大气科学系在 NCAR MM5v3 模式基础上发展的区域气候模式^[3]，MRI JSM_BAIM 是日本气象厅发展的区域谱模式^[10]，RegCM2b 是日本电力工业研究所（CRIEPI）大气科学部在 NCAR RegCM2 基础上改进发展的区域模式^[11]，SNU RCM 是韩国汉城大学大气科学系在 NCAR MM5v3 基础上发展的区域气候模式^[12]，而 CSIRO CCAM 是澳大利亚的变网格全球模式^[13, 14]。表 1 是参加模拟比较的 6 个模式的动力框架及其所采用

的物理过程情况。

RMIP 模拟区域包括了大部分亚洲大陆、西太平洋、孟加拉湾和南海等。采用 Lambert 投影，两个真实纬度为 15°N 和 55°N，区域中心位于（35°N，105°E），水平分辨率为 60 km，东西向网格点数为 151，南北向网格点数为 111。积分时段为 1988 年 7 月～1998 年 12 月，在后面的比较中，我们取 1988 年 12 月～1998 年 11 月整十年的模拟结果进行分析。5 个区域模式均采用 NCEP-II 再分析资料作为驱动场，缓冲区大小采用 15 个格点，图 1a 所示为控制区大小。各模式均采用 NCAR 的 0.5°×0.5°分辨率的地形高度资料，以及由美国国家航空和宇宙航行局（NASA）提供的卫星陆面覆盖资料。用于模式检验的资料包括中国 730 个台站的温度和降水观测资料，在观测台站较为稀少的中国西部一些地区，也利用了 CRU（Climatic Research Unit, University of East Anglia）格点资料。为了分析区域模式在不同区域的模拟性能，将中国区域按气候特点分为 8 个子区域（图 1b）

3 模拟结果分析

3.1 温度和降水的空间分布

所有区域模式均用 NCEP-II 资料作为驱动场，为了对比模式的模拟效果，图 2 给出了观测、NCEP-II 资料及其模式模拟的十年平均温度的空间分布。可以看出，在中国东部，等温线大致呈纬向分布，温度从南向北递减。在中国西部，由于复杂地形的影响，在青藏高原为冷中心，在塔里木盆地为一暖中心。所有模式都能基本模拟出中国地区年平均温度的这种空间分布形势，但不同模式模拟的温度大小存在不同程度的偏差。在青藏高原，模拟与观测相比明显偏低，在中国其他大部分地区，模拟比观测也均有一定的偏低。NCEP-II 资料由

表 1 RMIP 第二阶段参加模式的主要信息
Table 1 The main information of models for RMIP phase II

模式	垂直层数	动力框架	积云参数化	陆面过程	长波辐射	短波辐射
RIEMS	16	静力	Kuo-Anthes	BATs	CCM3	CCM3+aerosol
NJU RCM	16	非静力	Grell	LSM	CCM2	CCM2
RegCM2b	14	静力	Kuo-Anthes	LSM	CCM3	CCM3
JSM_BAIM	23	静力	Moist convective adjustment	BAIM	Sugi	Lacis & Hansen
SNU RCM	23	非静力	Grell	LSM	CCM2	CCM2
CSIRO CCAM	18	CCAM	Arakawa-Gordon	Kowalczyk	GFDL	GFDL

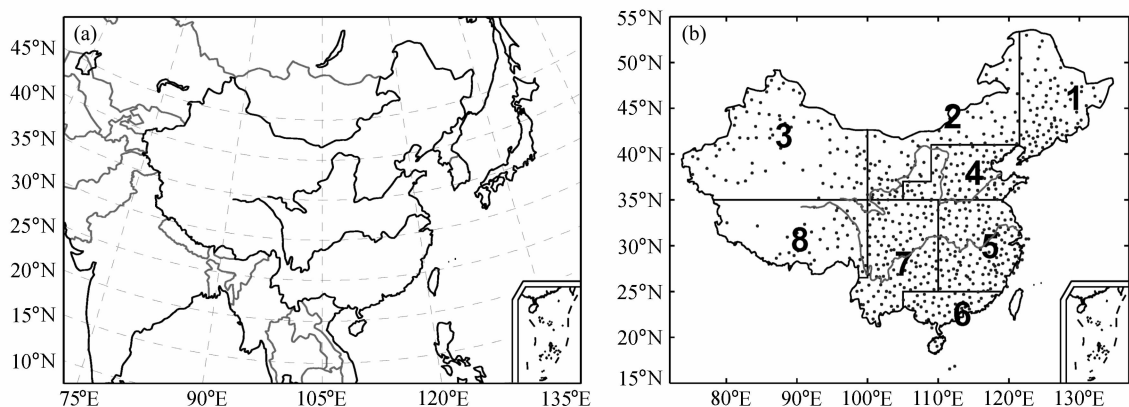


图 1 (a) RMIP 模拟区域; (b) 中国观测台站分布及子区域划分
Fig. 1 (a) Simulation domain for RMIP; (b) observation stations and sub-regions in China

于其分辨率较低,等值线分布比较平滑,未能反映出温度在空间上较为详细的分布特征。同时可以看出,与观测相比,NCEP-II 的平均温度也是偏低的。

降水是比温度更难以模拟的气候变量。在气候模拟中,降水的空间分布和雨带位置是较为重要的研究内容。图 3 为观测、NCEP-II 资料与模式模拟的十年平均年总降水量的空间分布。从观测的年总降水分布来看,中国地区东南多雨、西北干旱少雨,在中国东南地区有一个年总量在 1800 mm 以上的强降水雨带。模式基本都能模拟出中国地区的主要雨带及降水的空间分布,但大多数模式模拟的雨带位置与观测存在一定的偏差,而且模拟的降水总体偏多,尤其在中国西部地区所有模式模拟的降水均偏多。NJU RCM 与 SNU RCM 模拟的降水空间分布较为相似,这与它们所采用的物理过程较为一致是相对应的。CSIRO CCAM 模拟雨量偏多很多,而 RegCM2b 和 MRI 在中国东南地区模拟的降水又偏少很多。对于旱-半干旱区位置(300~600 mm 等值线),RIEMS、NJU RCM、SNU、CSIRO 模拟均偏西,表明干旱、半干旱区域模拟范围小,而 MRI、RegCM3 模拟的干旱-半干旱范围又太大。与温度类似,NCEP-II 降水资料能够反映中国地区降水分布的基本空间格局,但由于其分辨率低而不能很好地刻画降水分布较为细致的区域性特征。

根据观测,在青藏高原东南麓陡峭坡地边缘,有一较强的降水中心,位于我国四川省雅安地区,十年平均的年总降水量为 1700 mm 左右,大多数模式能将这一强降水中心模拟出来,但模拟的降水强度和范围明显偏大。另外,在青藏高原与甘肃交界的祁连山一带,模式模拟出较强的降水,与观测

表 2 观测的不同区域年平均温度和总降水
Table 2 Observed mean annual temperature and total precipitation over the sub-regions

区域	温度/℃	降水/mm
东北地区	3.6	576
东部半干旱区	5.3	291
西北地区	6.7	111
华北地	10.3	529
华中地区	16.3	1360
华南地区	21.1	1631
西南地区	13.6	987
青藏高原	2.0	412
中国区域	8.5	598

偏差很大。很多模式在地形陡峭的地方模拟出很多降水强度很大的点,即数值点风暴,这是由于陡峭地形梯度造成的较强垂直运动和对流潜热加热与对流降水之间的正反馈机制,从而使水汽向其下风方的输送降低,影响其下风方降水的模拟能力^[15]。

3.2 区域平均模拟偏差

表 2 为观测的各个区域十年平均的年均温度和总降水。图 4 为不同模式在各个区域年平均温度与降水的模拟偏差。除 NJU RCM 在中国东北和东部半干旱区模拟的温度略有偏高外,模式在其他所有区域模拟的年平均温度均偏低。模式模拟的青藏高原温度偏低最多,偏差达到-4~-8℃,其次是西北地区,偏差也较大。除个别模式外,在东北、华北、华中和华南等中国东部地区模式模拟的温度偏差较小,基本在 2℃ 以内。观测的整个中国区域平均的年平均温度为 8.5℃,模式模拟偏差在-3.9~-1.1℃ 之间。

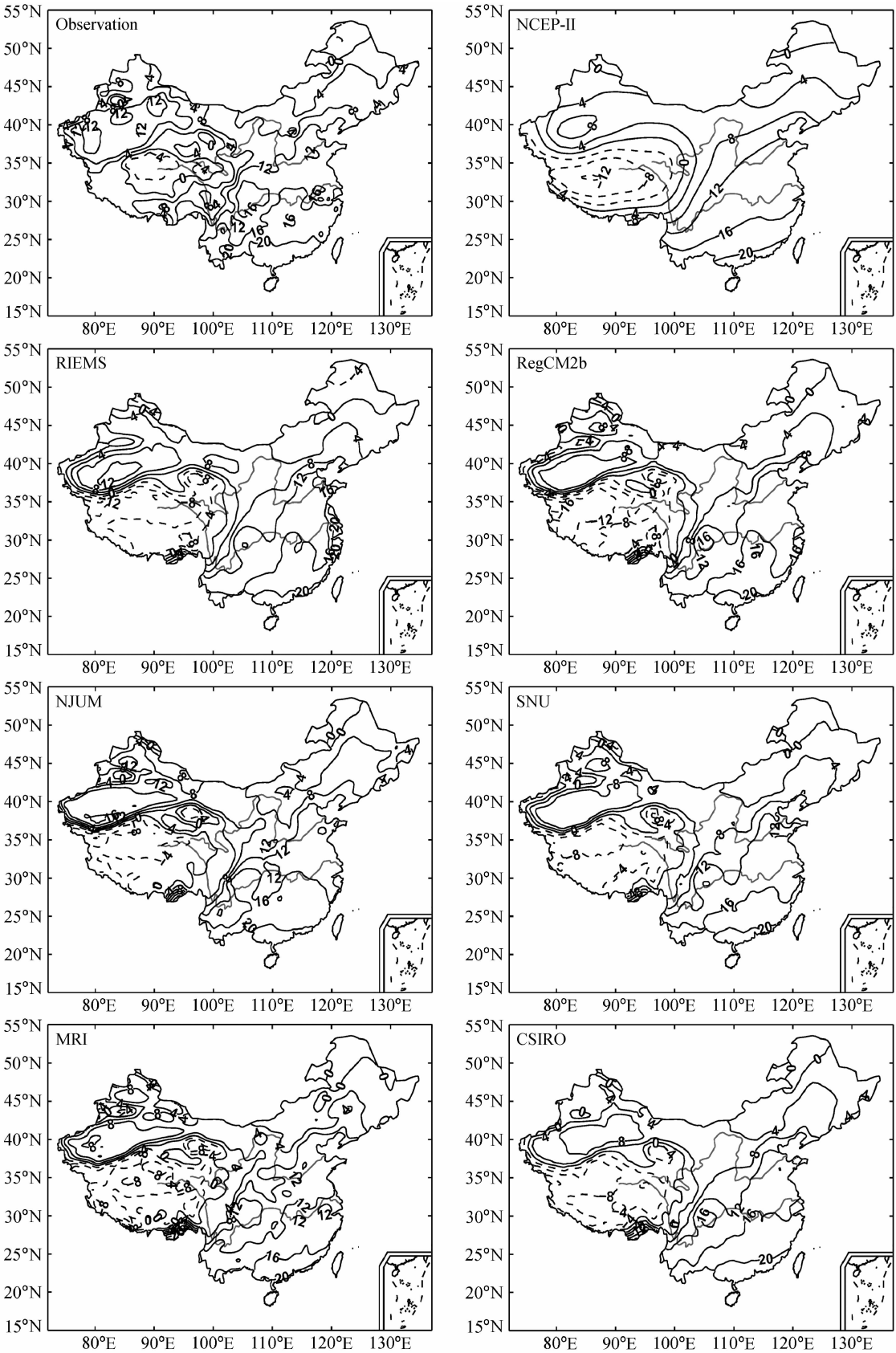


图 2 10 年平均的年平均温度空间分布 (单位: $^{\circ}\text{C}$)
Fig. 2 The spatial distribution of 10-year mean annual temperature ($^{\circ}\text{C}$)

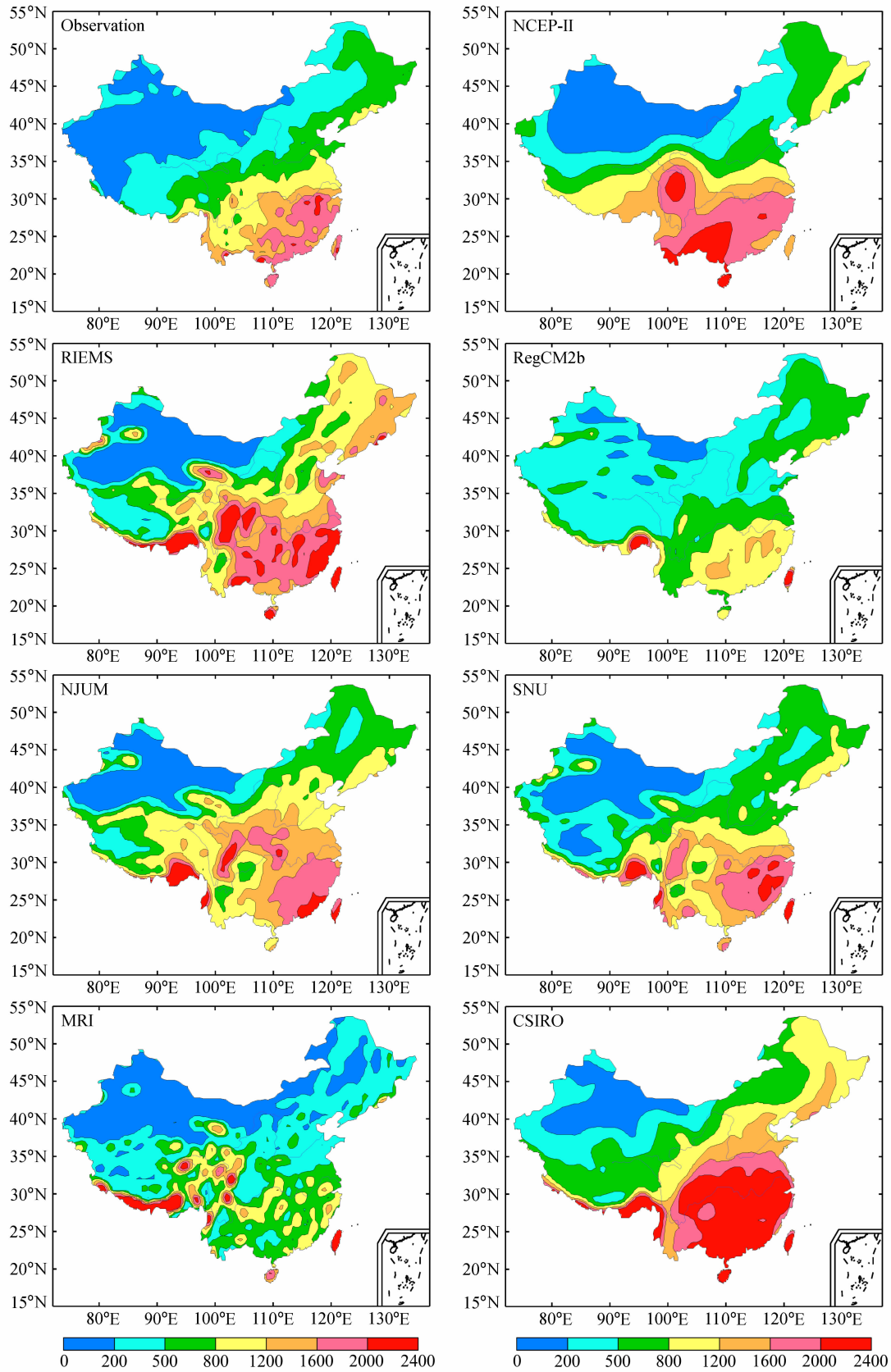


图 3 十年平均的年总降水空间分布 (单位: mm)
Fig. 3 The spatial distribution of 10-year mean annual precipitation (mm)

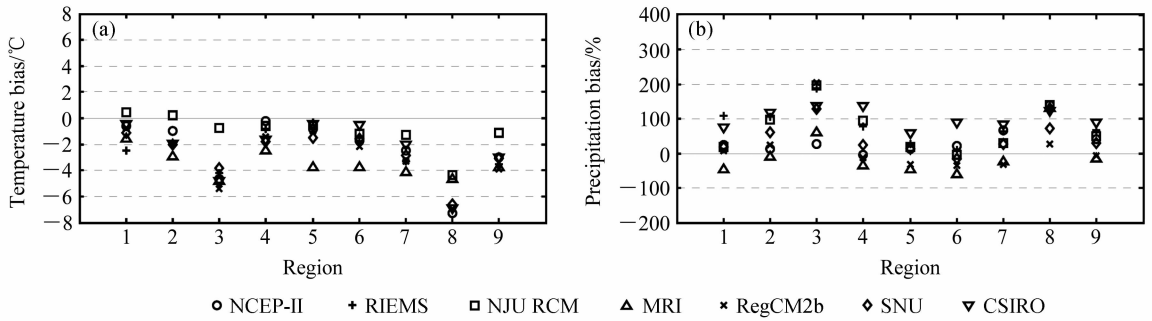


图 4 各个区域年平均温度 (a) 和总降水 (b) 的模拟偏差。横坐标：1 中国东北；2 东部半干旱区；3 中国西北；4 华北地区；5 华中地区；6 华南地区；7 中国西南；8 青藏高原；9 中国区域

Fig. 4 Biases of simulated mean annual (a) temperature and (b) precipitation in the sub-regions. Abscissa: 1 Northeast China, 2 semi-arid region in eastern China, 3 Northwest China, 4 North China, 5 Central China, 6 South China, 7 Southwest China, 8 Tibetan Plateau, 9 China

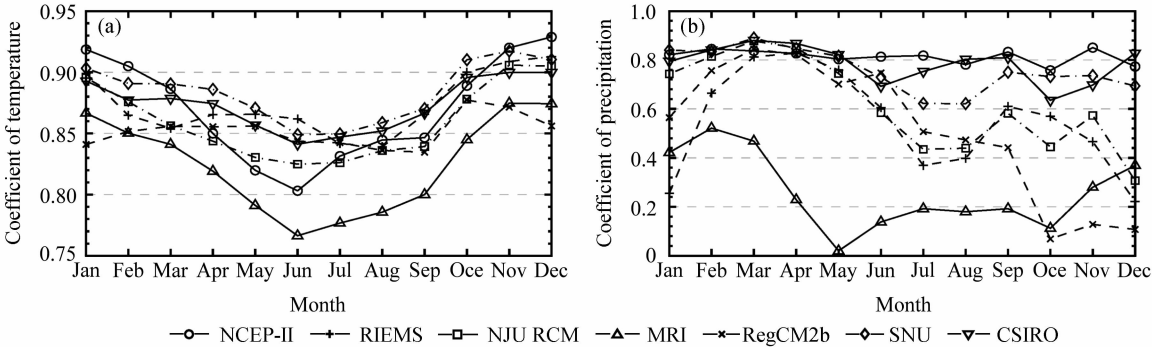


图 5 模拟与观测空间相关性的季节变化：(a) 平均温度；(b) 降水

Fig. 5 The seasonal variation of spatial correlation between observation and simulation: (a) Mean temperature; (b) precipitation

对于降水，除 MRI 在大多数区域模拟偏少外，其他模式在大部分区域模拟均偏多。在西北地区，模式模拟的降水偏差百分比最大，降水偏多达到 100%~200%，其次是青藏高原地区。华中和华南地区观测的降水量值较大，模拟的偏差百分比与其他地区相比相对较小。观测的整个中国区域平均年总降水为 598.7 mm，模式模拟的偏差百分比在 -16%~88% 之间。

总体来说，对于温度的模拟，NJU RCM 相对较好一些，对于降水的模拟，SNU RCM 相对较好一些。

从区域平均的温度和降水偏差来看，NCEP-II 资料的偏差幅度并不比模式模拟的大，在不少区域 NCEP-II 的偏差比部分模式的小。区域模式的模拟结果能够更为清楚地反映由于地形等引起的较小尺度上的区域性特征，对于区域平均误差来说，模式模拟的误差反而比大尺度驱动场的误差要大。

3.3 模拟与观测的空间相关性

由于中国区域地形复杂，温度和降水除了随时间有明显的变化外，在地域分布上差异很显著，空间相关性能在一定程度上反映模式模拟这种空间分布特征的能力。

图 5 为月平均温度和降水模拟以及 NCEP-II 资料与观测空间相关性的季节变化，即根据 12 个月每月的十年平均结果计算模拟与观测空间序列的相关系数。可以看出，温度模拟与观测空间相关系数的季节变化很有规律，模拟与观测的空间相关系数在冬季较高，可达到 0.9 以上，在夏季较低，6、7 月份最低。也就是说，模式模拟的冬季温度空间分布形势与观测更为相近，而夏季模拟的空间分布形势比冬季要差，这是因为夏季气候比冬季复杂从而更难以模拟的缘故。相对于其他模式来比，MRI 模拟温度的空间相关性最低。NCEP-II 平均温度与观测的空间相关性在冬季较高，在夏季较低。

与温度结果相比，降水的空间相关不如温度

的季节变化规律强,同时相关性比温度要低。MRI 模拟降水的空间相关性最低。在前半年即 2~6 月,模拟与观测的空间相关性较高,而且不同模式较为集中,后半年即 7~12 月,相关性较低,而且不同模式差别较大。NCEP-II 降水与观测的空间相关性总体上比模式模拟结果要高,这可能是由于地形的作用,区域模式模拟出来的数值风暴点会严重影响到模拟结果与观测的空间相关性。

3.4 温度和降水的年际变化

区域气候模式分辨率较高,进行长时间的气候模拟对计算机资源的消耗很大,因此过去大多数的区域气候模拟研究主要集中在对气候平均态和年内气候变化的模拟研究上,对气候年际变化的研究很少。在 RMIP 第二阶段的区域气候模拟中每个模式均进行了十年的长期积分,这使得我们能利用这些积分结果进行中国区域气候年际变化的研究。在

这里,我们对观测和模拟的温度和降水结果进行距平处理,以消除模式模拟结果的系统偏差,从而可以更清楚地看出中国区域平均温度和降水年际变化的情况。同时降水又是一个累积量,因此首先对其进行距平处理,再根据降水量的平均值得到降水的距平百分比。

图 6 为中国区域平均的冬季、夏季和年平均温度距平与降水距平百分比的年际变化,其中包括观测、NCEP-II 资料以及模式模拟的结果。模式模拟的温度的年际变化比降水更接近观测,不同模式的基本变化趋势较为一致。大多数模式能基本模拟出冬季、夏季和年平均温度的年际变化趋势。模式模拟的冬季降水的年际变化明显要优于夏季,对于夏季降水年际变化趋势的模拟,不同模式之间差别较大。相对于其他模式而言,CSIRO CCAM 和 MRI 的模拟结果要差一些。除了个别年份外,NCEP-II 资

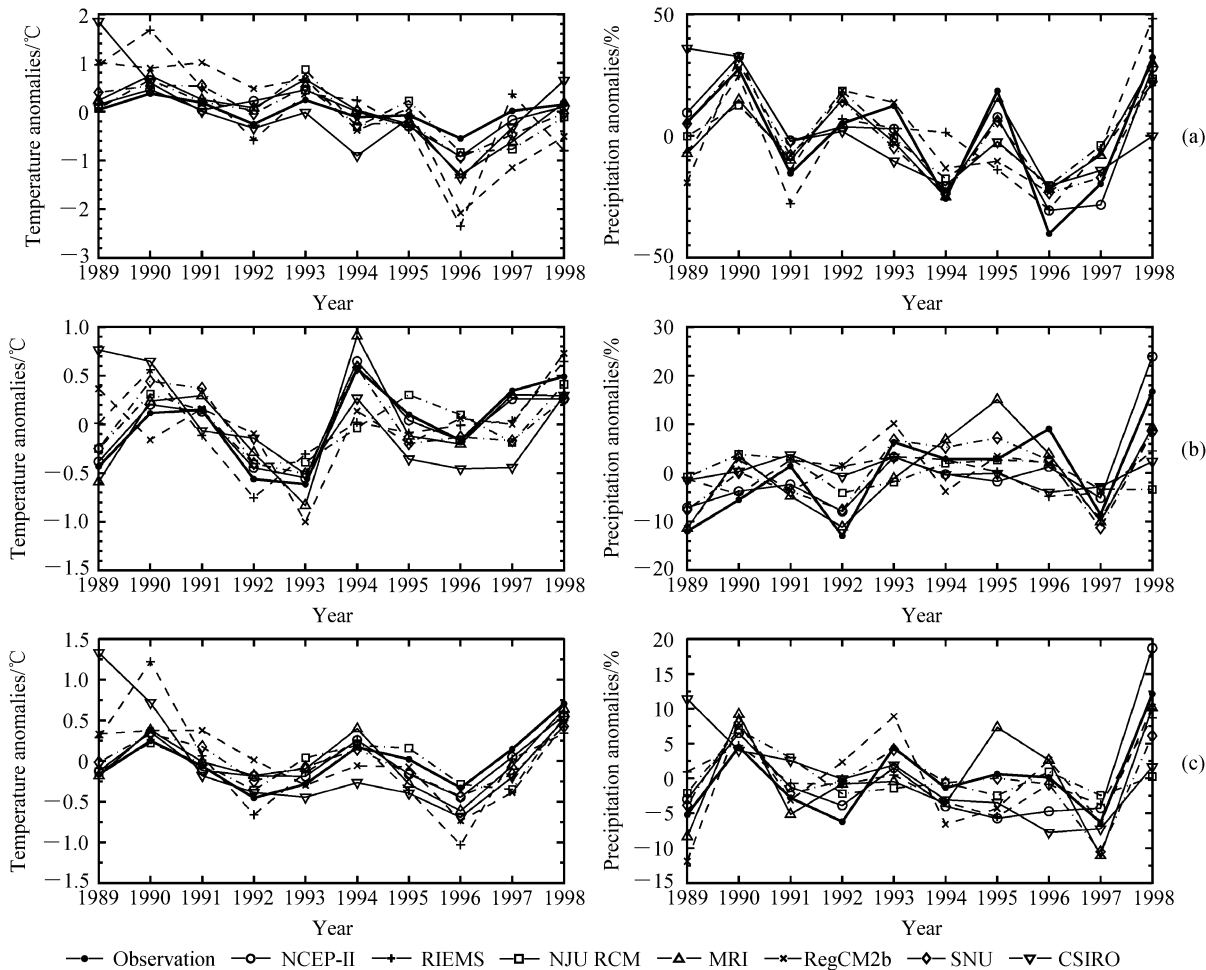


图 6 整个中国区域平均温度(左列)和降水(右列)的年际变化:(a) 冬季;(b) 夏季;(c) 年平均

Fig. 6 Interannual variations of mean temperature (left column) and precipitation (right column) over China: (a) Winter; (b) summer; (c) annual average

料的年际变化趋势与观测是较为一致的。

4 总结与讨论

通过 5 个区域模式和 1 个变网格全球模式对中国区域温度和降水的十年模拟比较, 有如下主要结论:

(1) 大多数模式能够模拟出中国区域温度和降水的基本空间分布形态。大多数模式模拟的温度比观测偏冷, 在大部分地区模拟降水偏多。温度和降水模拟偏差的区域性差异较大, 在西北干旱-半干旱地区温度和降水偏差都比其他地区大。模式能够抓住我国雨带的主要特征, 但模拟的雨带位置和中心强度与观测均有不同程度的偏差。

(2) 大多数模式能基本模拟出中国区域温度的年际变化趋势。对降水年际变化趋势的模拟, 不同模式之间差别较大。模式对冬季降水的年际变化趋势模拟较好, 对夏季降水的年际变化趋势模拟较差。

(3) 大尺度强迫场的偏差和用于模式检验资料的匮乏是模拟偏差的可能原因之一。另外, 对季风环流模拟的偏差是造成区域模式模拟偏差的重要原因。

(4) 对于单个模式, 没有一个模式在所有方面表现均好, 因此通过多个模式进行集成可能将是改进模拟结果的另一个有效方法。

在参加十年积分比较的 6 个模式中, CSIRO CCAM 是一个为变网格全球模式, 其采用的动力框架、侧边界方案和各个物理过程均与其他模式不同, MRI JSM_BAIM 所采用的动力框架与 RIEMS 和 RegCM2b 一样, 为静力模式, 但它所采用的各个物理过程又与其他四个区域模式不同。通过分类组合可以发现, 动力框架和物理过程较为相近的 NJU RCM 和 SNU RCM 组合对温度和降水的模拟结果优于 RIEMS 和 RegCM2b 组合的结果。根据现有的模拟结果并不能说明哪一个物理过程参数化方案模拟好或差, 因为这是动力框架、辐射方案、积云方案等组合的模拟效果。但根据本研究中区域模式的模拟结果, 并结合已有的研究成果^[16~19]可以认为, 非静力模式比静力模式的模拟效果可能要好一些; CCM3 辐射方案模拟的冬季温度比 CCM2 要低, 而对夏季模拟效果较好; 积云参数化方案对降水模拟具有较大的影响, Grell 方案能比 Kuo 方

案产生更多的降水; 不同的陆面过程, 不同的垂直分辨率等对模式的模拟结果均具有一定的影响。

对于区域模式来说, 各种物理过程参数化方案、初始场和边界场、水平和垂直分辨率、侧边界方案、地形处理及其他各种参数设置均能对模拟结果产生一定的影响, 因而模式的模拟结果尚具有较大的不确定性, 对区域模式的改进还需要进一步的模拟试验和各方面研究工作的深入与加强。

参考文献 (Reference)

- [1] Dickinson R E, Errico R M, Giorgi F, et al. A regional climate model for the western United States. *Climate Change*, 1989, **15**: 383~422
- [2] Giorgi F. Simulation of regional climate using a limited area model nested in general circulation model. *J. Climate*, 1990, **2** (3): 941~963
- [3] 汤剑平, 苏炳凯, 赵鸣, 等. 东亚区域气候变化的长期数据模拟试验. *气象学报*, 2004, **62** (6): 752~763
Tang Jianping, Su Bingkai, Zhao Ming, et al. Long term climate change numerical simulation in East Asia. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 2004, **62** (6): 752~763
- [4] 张冬峰, 高学杰, 赵宗慈, 等. RegCM3 区域气候模式对中国气候的模拟. *气候变化研究进展*, 2005, **1** (3): 119~121
Zhang Dongfeng, Gao Xuejie, Zhao Zongci, et al. The climate simulation over China using regional climate model RegCM3. *Advances in Climate Change Research* (in Chinese), 2005, **1** (3): 119~121
- [5] 高学杰, 徐影, 赵宗慈, 等. 数值模式不同分辨率和地形对东亚降水模拟影响的试验. *大气科学*, 2006, **30** (2): 185~192
Gao Xuejie, Xu Ying, Zhao Zongci, et al. Impacts of horizontal resolution and topography on the numerical simulation of East Asian precipitation. *Chinese Journals of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 2006, **30** (2): 185~192
- [6] 符淙斌, 曾昭美. 季风区——全球降水变化率最大的地区. *科学通报*, 1997, **42** (21): 2306~2309
Fu Congbin, Zeng Zhaomei. Monsoon: The highest rate of precipitation changes observed from global data. *Chinese Science Bulletin*, 1998, **43**: 662~666
- [7] Fu C B, Wang S Y, Xiong Z, et al. Regional climate model intercomparison project for Asia. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 2005, **86**: 257~266
- [8] Fu Congbin, Wei Helin, Qian Yun. Documentation on a regional integrated environment model system (RIEMS version 1). TEACOM Science Report No. 1, START Regional Committee for Temperate East Asia, Beijing, China, 2000. 1~26
- [9] Xiong Zhe, Wang Shuyu, Zeng Zhaomei, et al. Analysis of simulated heavy rain over the Yangtze River valley during 11-

- 30 June 1998 using RIEMS. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2003, **20**: 815~824
- [10] Mabuchi K, Sato Y, Kida H. Verification of the climatic features of a regional climate model with BAIM. *J. Meteor. Soc. Japan*, 2002, **80**: 621~644
- [11] Kato H, Nishizawa K, Hirakuchi H, et al. Performance of RegCM2.5/NCAR-CSM nested system for the simulation of climate change in East Asia caused by global warming. *J. Meteor. Soc. Japan*, 2001, **79**: 99~121
- [12] Lee D K, Kang H S. Coupling of the NCAR/LSM into the MM5 and its application for the East Asian summer monsoon. Preprints, Ninth PSU/NCAR Mesoscale Model Users, Workshop, Boulder, CO, NCAR, 1999. 198~201
- [13] McGregor J L. Semi-Lagrangian advection on conformal-cubic grids. *Mon. Wea. Rev.*, 1996, **124**: 1311~1322
- [14] McGregor J L, Katzfey J J. Simulating typhoon recurvature with a variable resolution conformal-cubic model. Research Activities in Atmospheric and Oceanic Modeling, WMO/TD-No. 942, 1998. 3. 19~3. 20
- [15] Leung L R, Ghan S J, Zhao Z C, et al. Intercomparison of regional climate simulation of the 1991 summer monsoon in eastern Asia. *J. Geophys. Res.*, 1999, **104**: 425~454
- [16] Giorgi F, Marinucci M R, Bates G T. Development of a second-generation regional climate model (RegCM2). Part II: Convective processes and assimilation of lateral boundary conditions. *Mon. Wea. Rev.*, 1993, **121** (10): 2814~2832
- [17] 赵宗慈, 罗勇. 区域气候模式在东亚地区的应用研究——垂直分辨率与侧边界对夏季季风降水影响研究. *大气科学*, 1999, **23** (5): 522~532
Zhao Zongci, Luo Yong. Investigations of application for the regional climate model over East Asia. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 1999, **23** (5): 522~532
- [18] 潘劲松, 翟国庆, 高坤. 区域气候模拟中多种对流参数化方案的比较研究. *大气科学*, 2002, **26** (2): 206~220
Pan Jinsong, Zhai Guoqing, Gao Kun. Comparisons of three convection parameterization schemes of regional climate simulations. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 2002, **26** (2): 206~220
- [19] 王淑渝. 东亚区域气候模拟和土壤湿度初始化问题研究. 中国科学院大气物理研究所博士学位论文, 2003. 93pp
Wang Shuyu. The studies of the regional climate simulation over East Asia and the initiation of soil moisture. Ph. D. dissertation (in Chinese), Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, 2003. 93pp