

王树舟, 于恩涛. 2013. 基于 MIROC/WRF 嵌套模式的中国气候降尺度模拟 [J]. 气候与环境研究, 18 (6): 681–692, doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2012.12068. Wang Shuzhou, Yu Entao. 2013. Dynamical downscaling simulation over China using the nested MIROC/WRF model [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 18 (6): 681–692.

基于 MIROC/WRF 嵌套模式的中国气候降尺度模拟

王树舟^{1,2} 于恩涛^{2,3}

¹ 南京信息工程大学大气科学学院, 南京 210044

² 中国科学院大气物理研究所竺可桢—南森国际研究中心, 北京 100029

³ 中国科学院气候变化研究中心, 北京 100029

摘 要 开展了基于嵌套的全球模式 MIROC 和区域气候模式 WRF 的动力降尺度模拟试验, 检验该模式对中国气候的模拟性能, 得到以下结论: 全球气候模式 MIROC 和 WRF 都能较好地模拟出中国年平均地表气温 (下文简称气温) 分布。WRF 模式对气温场的描述更为细致, 模拟出了四川盆地高温和中国最北方区域的低温。两个模式总体上对南方降水模拟好于北方地区, 东部地区好于西部地区。MIROC 模式模拟的年平均和各季节降水与观测的空间相关系数在 0.79~0.83 之间, 表明它对降水的模拟较好。WRF 模式模拟的降水空间分布好于 MIROC 模式。MIROC 模式在青藏高原东南侧存在虚假降水中心, WRF 能有效改进该地区降水的模拟。两个模式对年平均气温和降水年际变率的模拟能力均较差, WRF 模式相对 MIROC 模式有一定改进。

关键词 动力降尺度 地表气温 降水 年际变率

文章编号 1006-9585 (2013) 06-0681-12

中图分类号 P467

文献标识码 A

doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2012.12068

Dynamical Downscaling Simulation over China Using the Nested MIROC/WRF Model

WANG Shuzhou^{1,2} and YU Entao^{2,3}

¹ College of Atmospheric Sciences, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044

² Nansen-Zhu International Research Center, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029

³ Climate Change Research Center, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029

Abstract A dynamic downscaling simulation experiment based on the WRF (Weather Research and Forecasting) model was conducted to examine the performance of the model in simulating the climate in China. The following results were found. MIROC (Model for Interdisciplinary Research on Climate) and the WRF model can reproduce the observed spatial patterns of surface air temperature well. The WRF model provides more detailed descriptions of the temperature, with both high temperatures in the Sichuan Basin and low temperatures in North China simulated well. The annual and seasonal spatial correlation coefficient between the MIROC simulated and observed precipitation ranges from 0.79 to 0.83, indicating that MIROC can simulate precipitation well. Overall, the WRF model can reproduce the observed precipitation distribution more accurately than the MIROC. Both the MIROC and the WRF models simulate precipitation better in South and East China than in North and West China. The WRF model can remove the artificial precipitation center over the eastern edge of the Tibetan Plateau simulated by the MIROC. Both models do a poor job of simulating the interannual variations in annual mean temperature and total precipitation, although the WRF model performs better.

收稿日期 2012-04-17 收到, 2012-08-09 收到修定稿

资助项目 国家自然科学基金项目 41130103, 南京信息工程大学科研启动基金项目 2012X035

作者简介 王树舟, 男, 1982 年出生, 博士, 讲师, 主要从事大气边界层和气候变化研究。E-mail: wangsz@mail.iap.ac.cn

Keywords Dynamical downscaling, Surface air temperature, Precipitation, Interannual variation

1 引言

全球模式是进行气候模拟和预估的重要工具,已经被广泛应用于气候变化及其机制的研究中。我国处于东亚季风区,具有复杂的地形和下垫面特征,气候的季节变化和年际变化及环境和生态系统的变化都非常显著,一直是数值模拟的难点地区(Wang, 2000; Kang et al., 2002)。为此,许多学者考察了全球气候模式对我国气候的模拟能力(赵宗慈, 1990; 罗勇和赵宗慈, 1997; Wang et al., 2000; 高学杰等, 2004; Jiang et al., 2005; Zhou and Yu, 2006)。例如,赵宗慈(1990)评估了6个全球环流模式在中国区域模拟效果,发现模式对气温的模拟效果最佳,降水的总体分布特征可以模拟出来,但数值相差较大。高学杰等(2004)分析了NCAR/CCM3全球环流模式结果,发现模式对中国气温有较好的模拟效果,对降水的模拟效果则比较差,最大误差是在我国中西部出现了一个大的虚假降水中心。并指出,这和许多全球模式的结果类似,反映了东亚季风区降水模拟的难度。

与全球模式相比,区域模式由于具有较高分辨率和较完善的物理过程,从而能够改进模式对局地要素的描述,能够更好地模拟出区域气候变化特征,对我国气候也有较好的模拟能力(符淙斌等, 1998; Gao et al., 2002, 2008, 2011; 高学杰等, 2003, 2004; 熊喆, 2004; Ding et al., 2006a, 2006b; Ju and Wang, 2006; 许吟隆等, 2006; Ju et al., 2007; 张冬峰等, 2007; Cui et al., 2008; 汤剑平等, 2008; Yu et al., 2010; Wang et al., 2011; Zong and Wang, 2011)。许吟隆等(2006)利用区域气候模式PRECIS单向嵌套全球海气耦合气候模式HadCM3的大气部分HadAM3P,进行50 km水平分辨率的模拟,结果表明:PRECIS模式能够很好地模拟中国区域地表气温的局地分布特征;它对中国北方地区降水的模拟效果优于南方地区,模拟的冬季降水型态分布较好,而夏季降水对地形比较敏感,东南沿海地区降水的模拟值偏低。张冬峰等(2007)使用ECMWF再分析资料ERA-40驱动区域气候模式RegCM3,对东亚地区进行了15年的数值积分试验,结果表明:模式可较好地模拟中国地表气温的分布

和季节变化,但存在系统性的冷偏差;对降水的变化模拟也较好,但地理分布的模拟存在一定偏差。

数值模式对气候的模拟存在很大的不确定性,有必要尝试使用不同的区域模式进行气候模拟研究。WRF(Weather Research and Forecasting)模式从V3版本开始,参数化方案、海冰、反照率和海表温度的处理有了重要的改进,增强了对气候的模拟能力。已有研究表明,WRF模式能较好地模拟区域气候特征(Leung et al., 2006; Lo et al., 2008; Bukovsky and Karoly, 2009; Caldwell et al., 2009; Qian et al., 2010; Yu et al., 2010)。例如,Yu et al.(2010)使用区域气候模式WRF单向嵌套全球环流模式CAM,进行25年的动力降尺度模拟,发现WRF模式模拟的中国区域气温和降水与观测更加接近,空间相关系数更高,均方根误差更小。我们也将选用WRF模式进行东亚区域的气候模拟试验,并与观测结果进行对比分析,检验该模式对中国气候的模拟能力。

2 模式、数据和试验设计

使用区域模式进行气候变化模拟试验,需要全球模式提供初始场和侧边界条件。在参加国际耦合模式比较计划第三阶段(CMIP3)试验的22个全球模式中,MIROC3.2_hires模式(下文简称MIROC模式)是对中国气候特别是东部季风区气候平均态模拟效果最好的模式(许崇海等, 2007)。本试验的WRF模式版本为V3.3.1,初始场和侧边界条件由MIROC模式提供,每6 h输入模式一次。关于MIROC模式更详细的介绍可以参考文献(K-1 Model Developers, 2004)。

模式采用Lambert投影,水平分辨率为50 km,纬向164格点,经向128格点,中心点位于(35°N, 102°E)。垂直 σ 坐标分为28层,模式顶层气压为50 hPa。试验采用的物理选项见表1。模式的积分时间为1980年1月1日至2000年12月31日,1980年的积分结果被视作模式的初始化阶段结果,不用于分析,后20年的结果用于本文的分析。图1给出全球和区域模式在东亚地区的地形分布及区域模式的模拟范围。区域模式分辨率较高,能够更细致和精确地描述海岸线和地形分布,中国境内的天

山、祁连山、柴达木盆地、四川盆地等地形特征都比全球模式的明显。

表 1 模式选项设置

Table 1 Main physics options in the experiment

类别	名称
微物理参数化方案	WSM6 方案
积云对流参数化方案	Kain-Fritsch 方案
陆面过程	Noah 陆面模式
行星边界层 (PBL) 方案	Yonsei University 边界层方案
长波辐射方案	CAM 长波辐射方案
短波辐射方案	CAM 短波辐射方案

用于和模拟对比的气温资料采用的是中国气象局根据 751 个观测台站的气温资料所整理得到的 0.5° (纬度) $\times 0.5^\circ$ (经度) 格点资料 (Xu et al., 2009), 降水采用的是 Xie et al. (2007) 发展的东亚 0.5° (纬度) $\times 0.5^\circ$ (经度) 格点日降水数据集。需要说明的是, 气温和降水的观测数据为 0.5° (纬度) $\times 0.5^\circ$ (经度) 的格点数据, 全球模式为 145×73 的高斯格点分布, 区域模式分辨率为 50 km, 在计算相关系数和均方根误差之前, 先将两个模式的模拟结果统一插值到了观测数据的 0.5° (纬度) $\times 0.5^\circ$ (经度) 的格点上。

本文对模拟性能的检验将主要集中于气温和降水的平均气候态及其年际变率上。研究气温的年际变率时, 采用的是反映变量围绕平均值的平均变化程度的物理量: 标准差; 研究降水的年际变率时, 采用标准差与平均降水量的比值: 变异系数。由于不同地区降水标准差受当地平均降水量的影响显著, 将降水标准差除以平均降水量后不仅可以表征降水变率的大小, 同时也消除了不同地区降水量量级的差异 (石英等, 2010)。

空间相关系数 (COR) 和均方根误差 (RMSE) 表示如下:

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}}, \quad (1)$$

$$R = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - y_i)^2}, \quad (2)$$

其中, r 表示 COR, R 表示 RMSE, x_i 和 y_i 分别为各格点上的模拟和观测值, $\bar{x}$ 和 $\bar{y}$ 分别为模拟和观测的区域平均值, n 为年数。

标准差 (STD) 和变异系数 (CV) 表示如下:

$$D_{st} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\alpha_i - \bar{\alpha})^2}, \quad (3)$$

$$C_v = \frac{\sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\alpha_i - \bar{\alpha})^2}}{\bar{\alpha}}, \quad (4)$$

其中, D_{st} 表示 STD, C_v 表示 CV, α_i 为各格点上的观测或模拟值, $\bar{\alpha}$ 为各格点上观测或模拟的多年平均值, n 是年数。

3 模拟结果分析

3.1 地表气温

首先, 我们根据公式 (1) 和 (2), 计算了模拟与观测的气温在各季节及其年平均的空间相关系数和均方根误差, 在表 2 中给出。其中, 年平均是指 1981~2000 年 20 年的平均, 春季定义为 3~5 月, 夏季为 6~8 月, 秋季为 9~11 月, 冬季为 12 月以及 1 月和 2 月 (下文同)。可以看出, 气温空间相关系数值均在 0.9 以上, 表明模式对气温模拟较好, 且 WRF 模式的模拟要好于 MIROC 模式。但是从春季、秋季以及年平均来看, WRF 模式模拟对应的均方根误差却是大于 MIROC 模式的模拟。

表 2 全球和区域模式模拟各季节平均气温与观测的空间相关系数 (COR) 和均方根误差 (RMSE)

Table 2 Spatial correlation coefficient (COR) and root-mean-square error (RMSE) between observed and simulated seasonal temperature by the MIROC model and the WRF model

	COR		RMSE ($^\circ\text{C}$)	
	MIROC 模式	WRF 模式	MIROC 模式	WRF 模式
春季	0.93	0.97	4.21	5.06
夏季	0.91	0.95	3.86	3.82
秋季	0.94	0.96	3.10	3.87
冬季	0.93	0.95	3.90	3.49
年平均	0.93	0.96	3.50	3.88

图 2 给出 MIROC 模式和 WRF 模式模拟的 1981~2000 年中国年平均气温和同时期观测值, 及其它们之间的差值场。两个模式对中国年平均地表气温分布状态模拟效果较好, 除青藏高原外, 大致呈由南向北逐渐降低的趋势, 符合实际情况。MIROC 模式模拟出了气温由南向北逐渐降低的

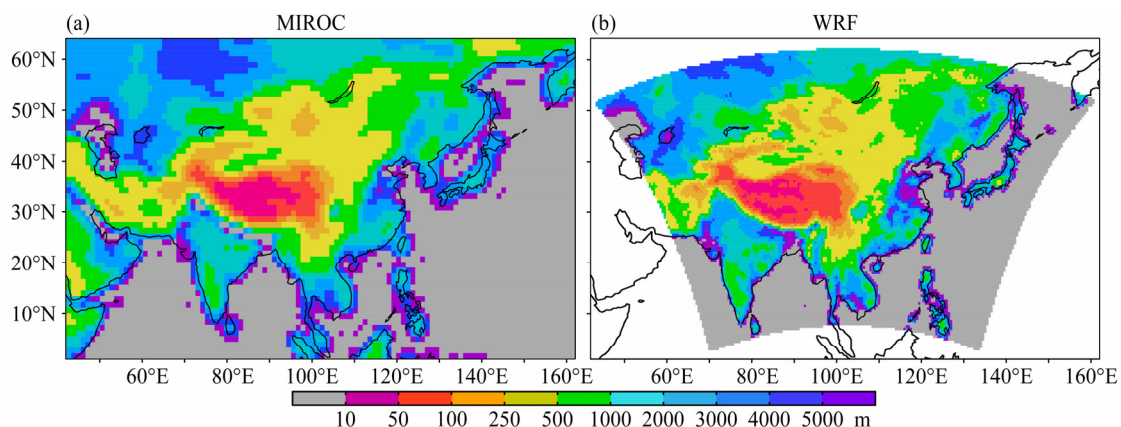


图1 (a) MIROC 模式地形分布 (单位: m); (b) WRF 模式的地形分布 (单位: m) 及其模拟范围 (填色部分)

Fig. 1 (a) Topography (m) of the MIROC (Model for Interdisciplinary Research on Climate) model; (b) Topography (m) and simulation domain (shaded) of the WRF (Weather Research and Forecasting) model

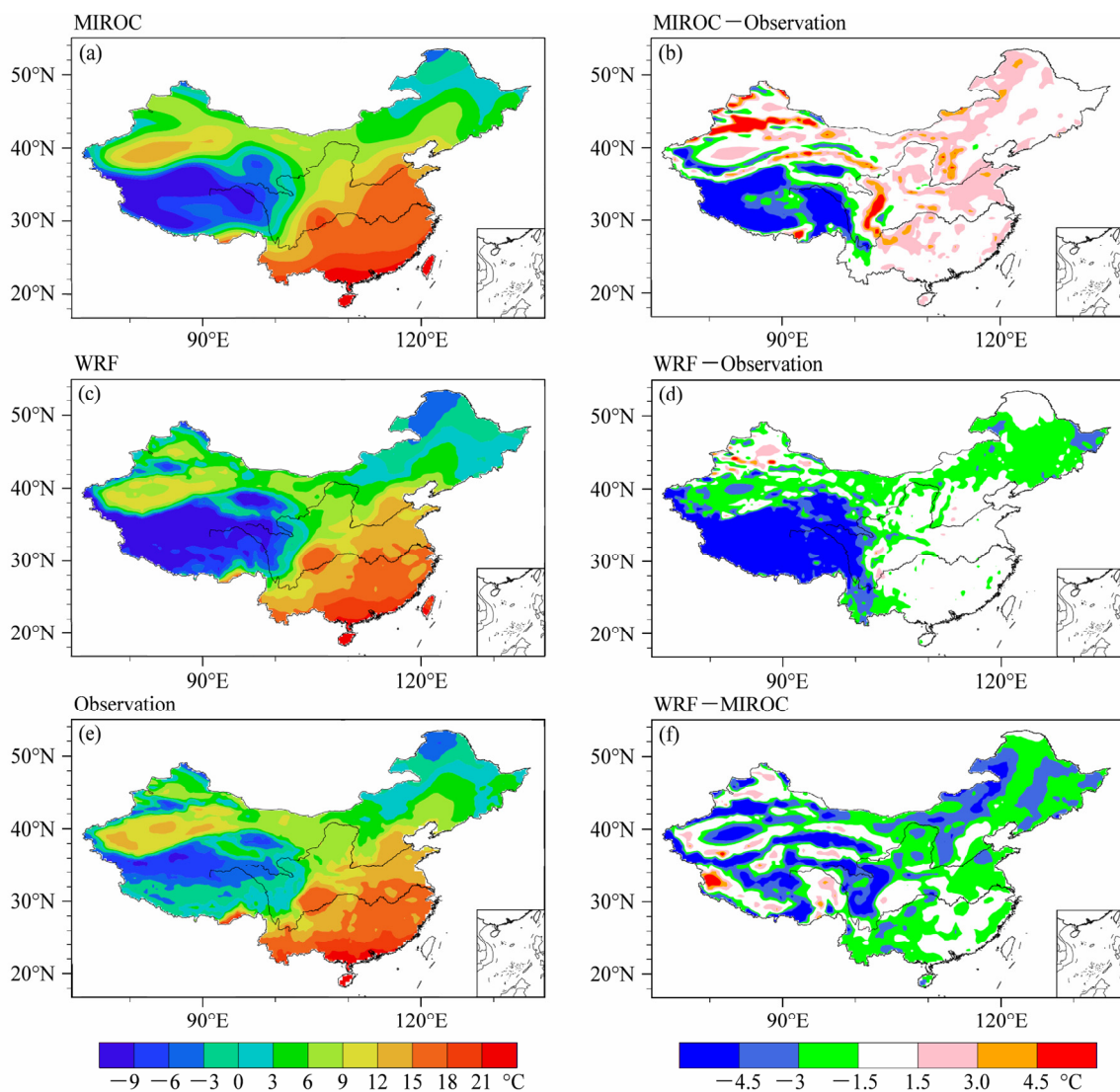


图2 中国区域年平均气温: (a) MIROC 模式结果; (b) MIROC 模式结果减观测; (c) WRF 模式结果; (d) WRF 模式结果减观测; (e) 观测; (f) WRF 模式结果减 MIROC 模式结果

Fig. 2 Annual mean temperature: (a) MIROC; (b) MIROC minus observation; (c) WRF; (d) WRF minus observation; (e) observation; (f) WRF minus MIROC

趋势,但在青藏高原的大部分地区模拟气温明显偏低。从和观测的差值场(图 2b)看来,东部地区气温的模拟相对较好,绝大多数地区模拟比观测偏高,西部地区模拟相对较差。WRF 模式模拟的气温整体上较好,在西部地区,模拟出了天山及其南北地区的气温差异,以及青藏高原和祁连山脉的低温区;在东部,模拟出了气温由南向北的渐变。WRF 模式还很好地模拟出了四川盆地的高温和我国最北方区域的低温。从和观测的差值场(图 2d)看来,华北、华中、华南、华东地区模拟都很不错,青藏高原地区气温偏低一些。从两个模拟的气温差中(图 2f)可以发现,WRF 模式模拟的气温在绝大多数地区,特别是中国东部,是偏

低的。

两模式模拟的 1981~2000 年冬季气温和同时期观测气温及其差值由图 3 给出。两个模式都很好模拟出了东北地区气温的南北递减,WRF 模式能很好地模拟出天山及其南北地区的气温差异。从差值场来看,两个模式都对北疆的气温有所高估,对青藏高原地区的气温模拟是冷偏差。WRF 模式对东部地区的气温模拟总体上要好于 MIROC 模式,特别是在黄河以南地区。WRF 模式在全国大部分地区,特别是东部地区,模拟气温高于 MIROC 模式。

图 4 给出两模式模拟的 1981~2000 年夏季平均气温及其和同时期观测气温的比较。在 MIROC

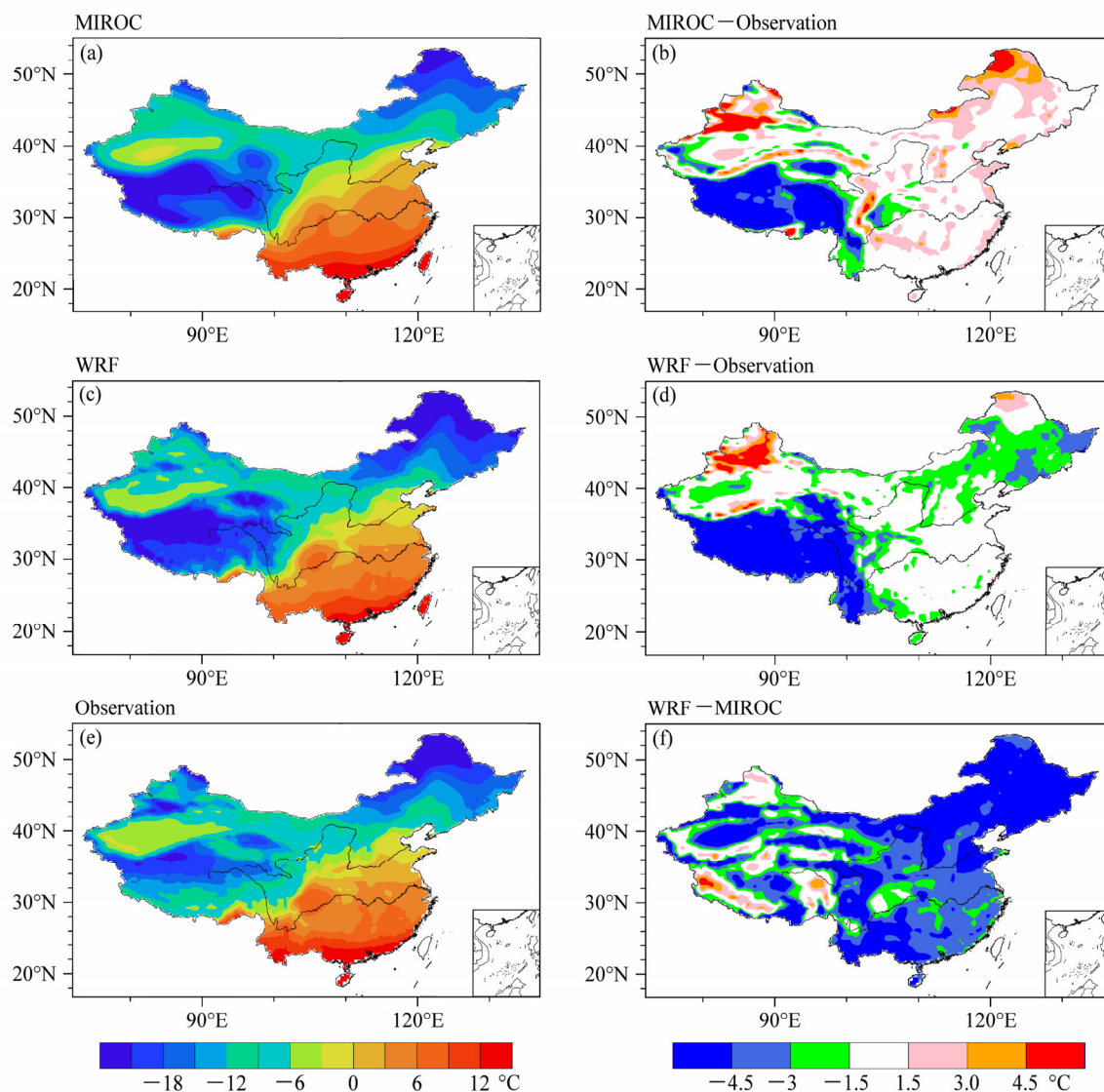


图3 同图2, 但为冬季平均

Fig. 3 Same as Fig. 2, but for winter

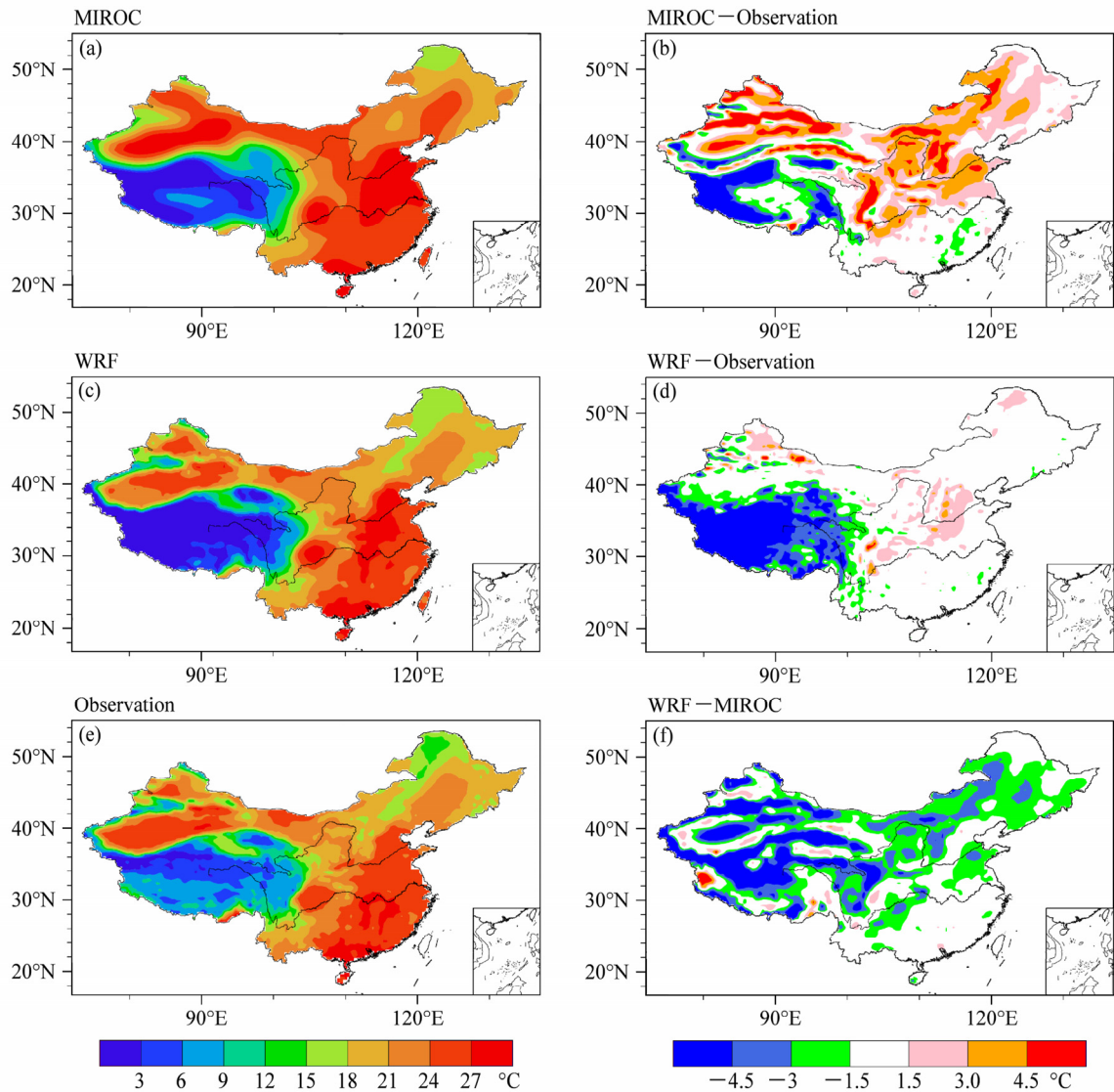


图 4 同图 2，但为夏季平均

Fig. 4 Same as Fig. 2, but for summer

模式模拟结果里，华北出现大范围高温，而华南地区高温区域却偏小。WRF 模式对这样的状况有所改进，华北的高温区域缩小了，两广地区的高温范围有所扩大。不过，两个模式都能模拟出塔里木盆地和四川盆地的高温。从 WRF 模式模拟结果和观测的差值场（图 4d）来看，除青藏高原地区，全国大部分地区的模拟气温和观测气温都很接近（偏差小于 1.5℃）。而 MIROC 模式的结果却差许多，尤其是在长江以北地区（图 4b）。从 WRF 模式和 MIROC 模式模拟地表气温的差值来看（图 4f），WRF 模式模拟的东部地区也基本是偏低 1.5℃ 以上。

3.2 降水

表 3 给出中国区域模拟降水与各季节以及年平

表 3 全球和区域模式模拟各季节平均降水与观测的空间相关系数和均方根误差

Table 3 COR and RMSE between observed and simulated seasonal precipitation by the MIROC model and the WRF model

	COR		RMSE (mm/d)	
	MIROC 模式	WRF 模式	MIROC 模式	WRF 模式
春季	0.79	1.22	0.76	1.31
夏季	0.79	2.47	0.67	3.56
秋季	0.80	1.32	0.79	1.78
冬季	0.80	0.66	0.75	0.86
年平均	0.83	2.97	0.77	3.27

均观测降水的空间相关系数和均方根误差。MIROC 模式模拟的降水和观测降水的空间相关系数在 0.8 左右，表明它对降水的模拟比较好。WRF 模式模拟

降水对应的空间相关系数要小于 MIROC 模式。这可能是 WRF 模式在天山和塔里木盆地等地区表现欠佳, 模拟出极大降水或极少降水。

图 5 给出 MIROC 模式和 WRF 模式模拟和观测的 1981~2000 年中国区域年平均降水及它们之间的差。从图中可以看到, 观测的年平均降水由东南沿海向西北内陆逐渐减少, 东南沿海降水值在 1500 mm 以上, 西北塔里木盆地、柴达木盆地等降水量在 500 mm 以下, 南北降水差异明显。从 MIROC 模式和观测降水的差值场(图 5b)看来, 全年降水的模拟也是东部地区要好于西部地区, 在天山以南的新疆大部 and 甘肃的大部地区都模拟了较多的降水, 青藏高原南麓和东侧也出现异常降水高

值区, 即虚假降水中心, 这也是全球模式模拟普遍存在的问题(高学杰等, 2004; Jiang et al., 2005)。WRF 模式的模拟在此区域有很大的改进(图 5c)。但是 WRF 模式的模拟对塔里木盆地的降水有很大低估, 在 75%以上。总体上, 两个模式对南方降水模拟要好于北方地区, 东部地区要好于西部地区。这或许跟地形和其他下垫面的状况有很大的关系。WRF 模式能改进西南地区的降水模拟, 但有所高估了地形和下垫面状况的作用。例如, 青藏高原周边的山脉区域以及天山及其西侧的降水量被高估, 而塔里木盆地的沙漠地区的降水有所低估。

图 6 是 MIROC 和 WRF 模式模拟的和观测的

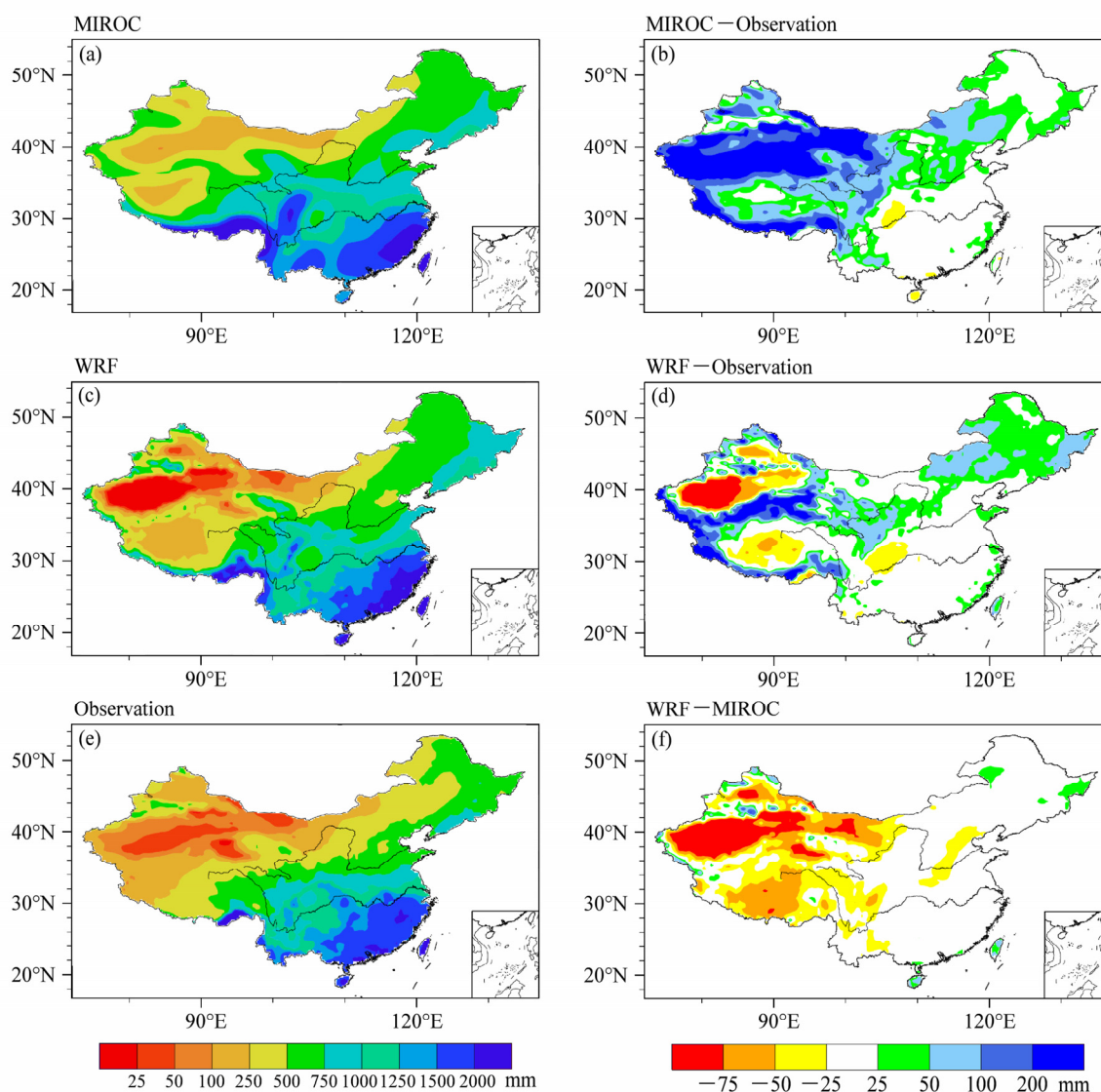


图 5 中国区域年平均降水: (a) MIROC 模式结果; (b) MIROC 模式结果减观测; (c) WRF 模式结果; (d) WRF 模式结果减观测; (e) 观测; (f) WRF 模式结果减 MIROC 模式结果

Fig. 5 Annual mean precipitation: (a) MIROC; (b) MIROC minus observation; (c) WRF; (d) WRF minus observation; (e) observation; (f) WRF minus MIROC

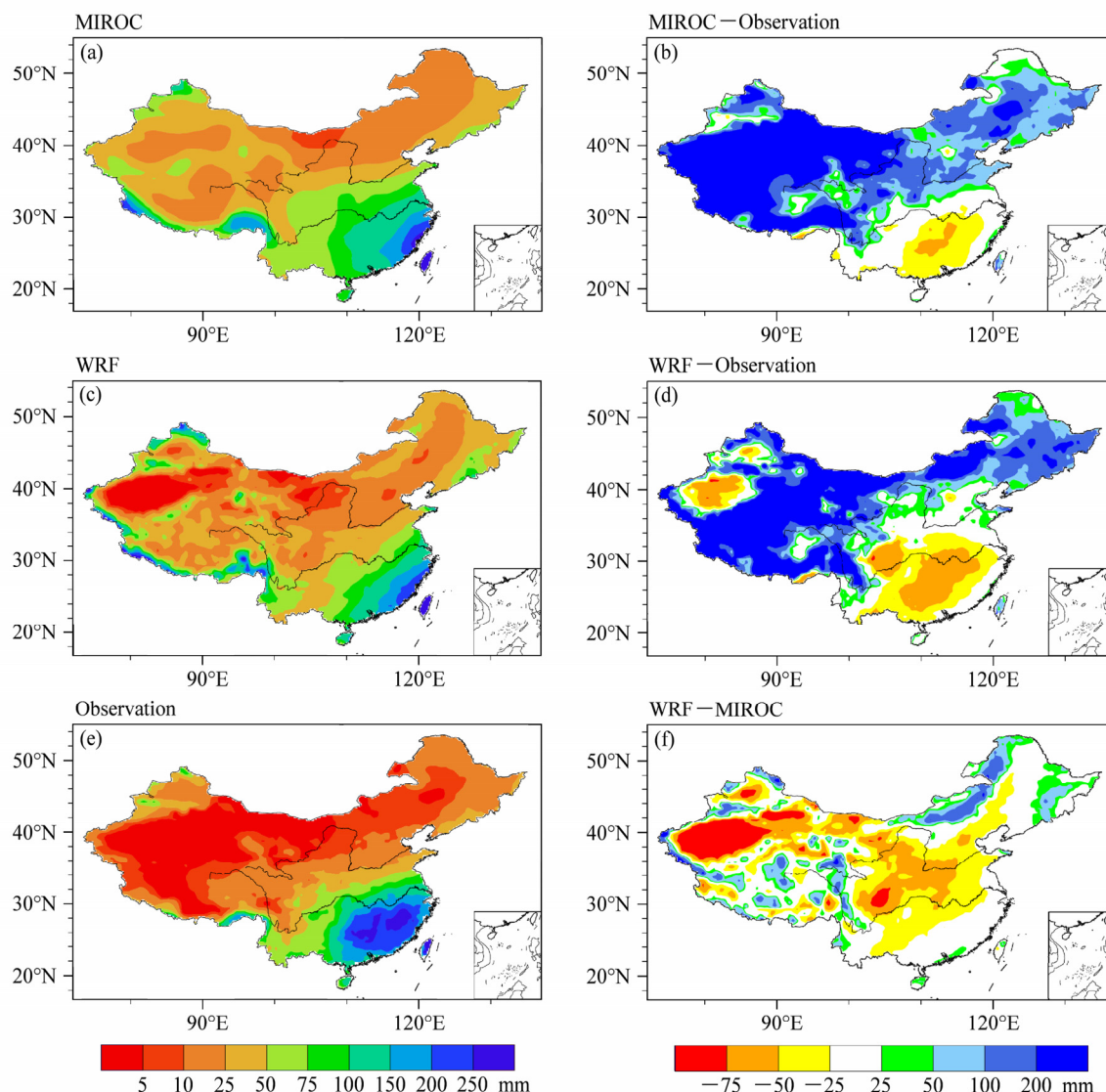


图6 同图5, 但为冬季平均

Fig. 6 Same as Fig. 5, but for winter

1981~2000 年中国区域冬季降水及它们之间的差。整体看来, 两个模式模拟的中国东南部地区降水明显比观测偏少。MIROC 模式模拟的北方降水明显多于观测。WRF 模式改进了我国北方特别是华北地区的降水模拟, 但在四川盆地以及长江以南部分地区模拟的降水偏少 50% 以上。从两个模式模拟降水的差值看来, WRF 模式模拟的要偏少, 大部分地区偏少 25% 以上 (图 6f)。

夏季是我国降水量最多的季节, 其降水量占全年降水的大部分份额。观测中 (图 7e), 降水大致呈由东南向西北递减的趋势, 大部分地区的降水值在 250 mm 以上, 长江流域及其以南地区则大多在 500 mm 以上, 南部沿海及雅鲁藏布江东麓数值最

大, 在 750 mm 以上。总体上, 模拟较好的区域仍然是东部区域。WRF 模式较好地模拟出了塔里木盆地和柴达木盆地的少雨区。从差值场来看, MIROC 模式在东部地区模拟较好, 但在西部地区模拟的降水偏多, 在长江中下游地区的降水较观测偏少。WRF 模式对长江中下游地区的降水有一定的改进, 使得降水量更接近观测一些。不过, WRF 模式在西部地区的塔里木盆地和柴达木盆地以及青藏高原中西部低估了降水, 与实际观测相比, 部分地区偏少 50% 以上。

3.3 气温和降水的年际变率

根据公式 (3) 和 (4) 计算得到的两个模式模拟和观测的 1981~2000 年中国区域年平均气温

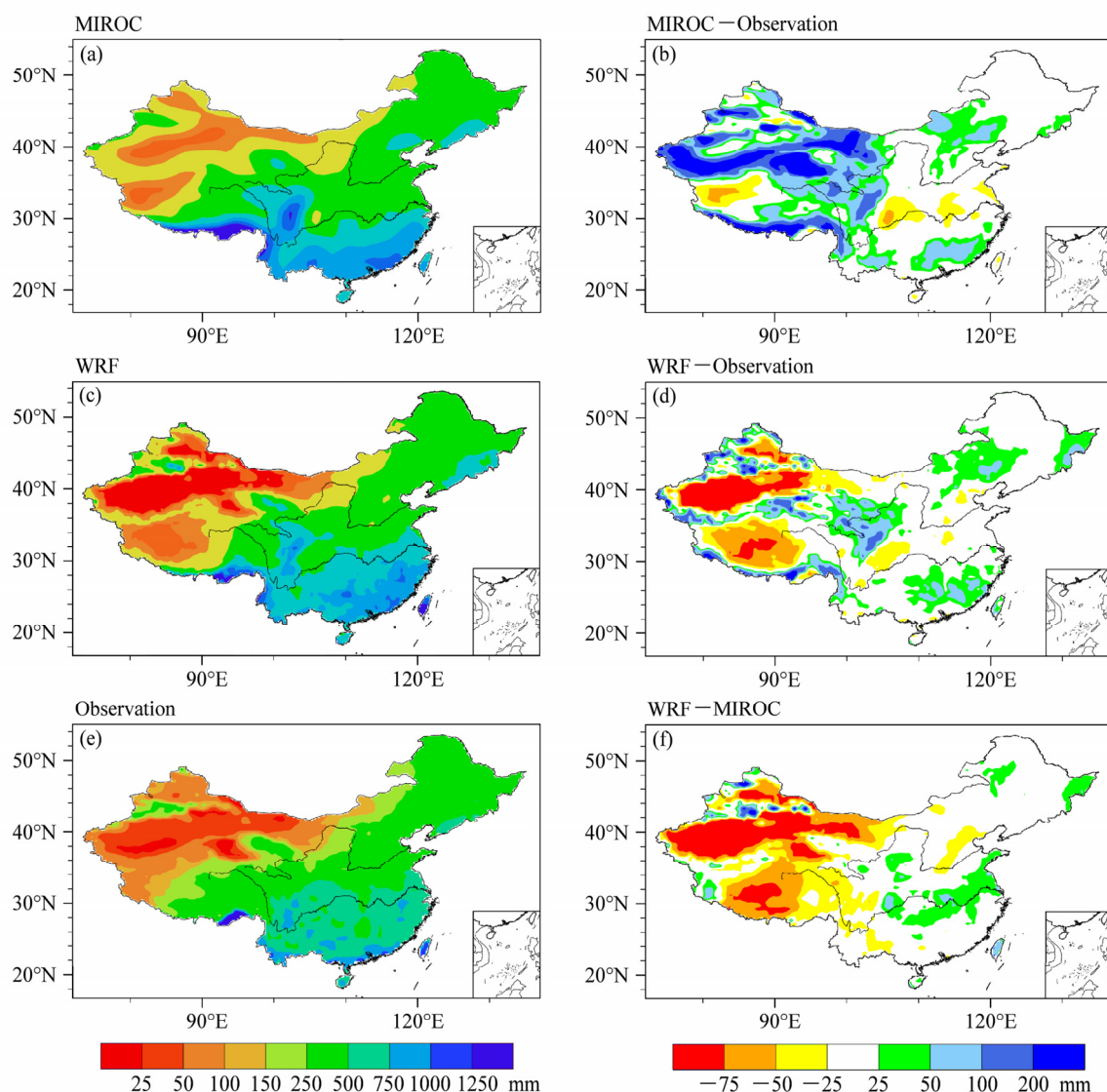


图7 同图5, 但为夏季平均

Fig. 7 Same as Fig. 5, but for summer

STD 和降水 CV 如图 8 所示。可以看出, 观测的年平均气温标准差基本呈南部低、北部高的分布形势, 新疆北部、内蒙古中部是数值较高的区域, 中心 STD 值在 0.8°C 以上, 表明这些地区年际变率较大。 30°N 以南大部分地区数值在 0.5°C 以下, 新疆西南部和山东半岛部分地区数值也相对较低, 表明这些地区年际变率相对较小。MIROC 模式模拟的平均气温标准差, 在青藏高原数值较高, 大于 0.8°C , 黑龙江和新疆的北部部分区域超过 0.6°C , 其他地区在 0.6°C 以下。云南西部、黄河中上游地区等是数值较低的地区, 模拟与观测差异较大。在 WRF 模式的模拟结果里, 青藏高原区域也是大值区, 在 0.8°C 以上, 表明该地区年际变率较大。东

北地区也是 STD 大值区, 基本都是在 0.5°C 以上。塔里木盆地, 黄河流域及其以南地区为 STD 小值区, 全部在 0.5°C 以下。两个模式对 STD 分布及其大小的模拟与观测都有较大不同, 特别是在青藏高原地区, 表明模式里该区域有很大的年际变率。WRF 模式给出的我国除青藏高原以外的南方地区的平均气温标准差更接近观测一些, 在北方的标准差高值区的也更接近观测, 例如东北和内蒙中西部地区。

观测中, 年平均降水的 CV 值 (图 8f) 在我国南方较小, 北方较大。西北和青藏高原西部地区最大, 中心值在 0.4 以上, 表明这些区域年平均降水的变化较大。MIROC 模式的模拟 (图 8b), 除东北

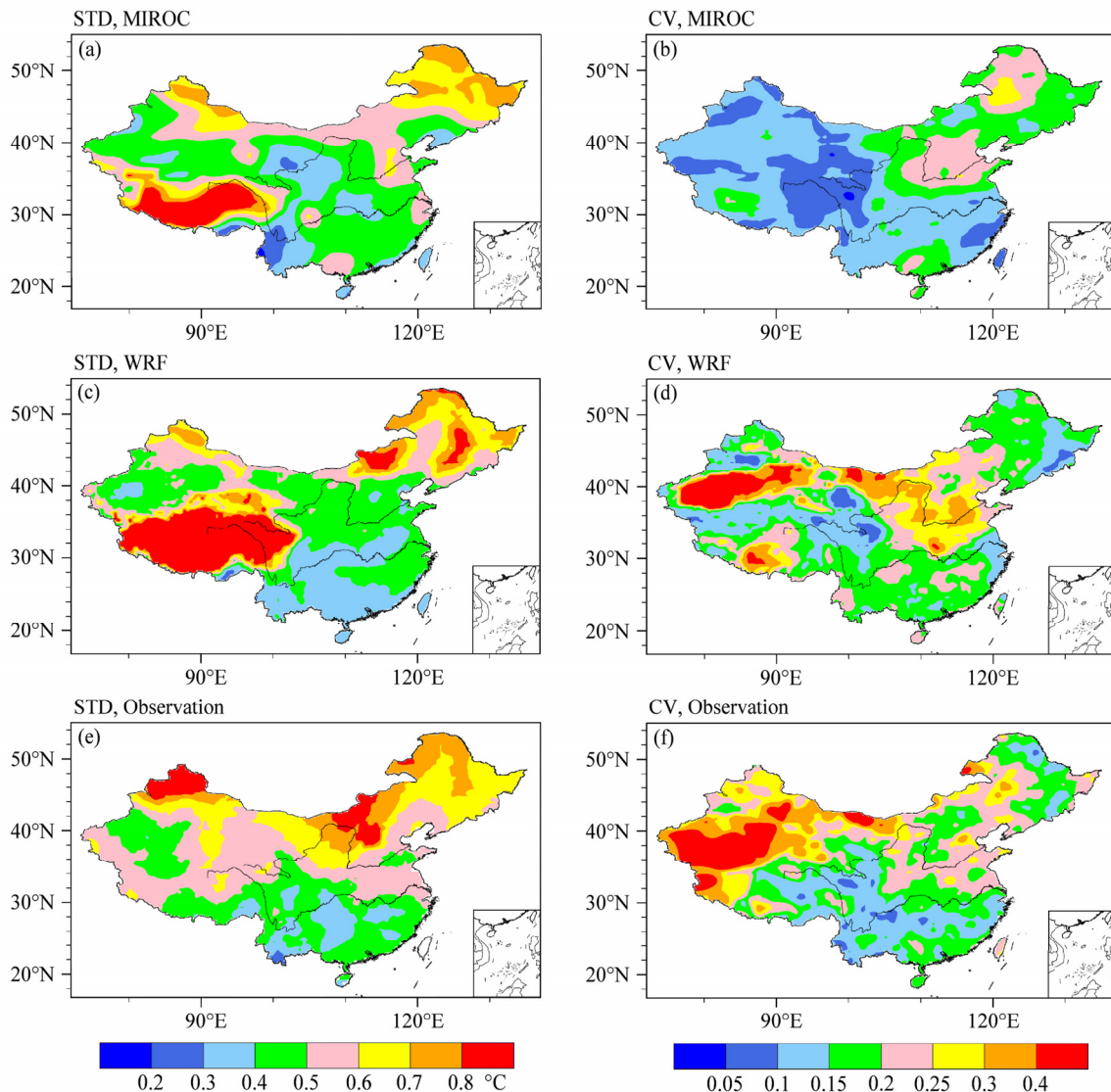


图 8 1981~2000 年中国区域 (a、c、e) 年平均气温的标准差和 (b、d、f) 降水变异系数: (a、b) MIROC 模式; (c、d) WRF 模式; (e、f) 观测

Fig. 8 (a, c, e) Standard deviation (STD) of surface air temperature and (b, d, f) coefficient of variation (CV) of precipitation in China during 1981~2000: (a, b) MIROC model; (c, d) WRF model; (e, f) observation

北部、华北部分地区数值在 0.2 以上外, 其余大部分地区 CV 值都在 0.05~0.15 之间, 表明这些区域降水年际变率很小, 与观测差异较大。整体看来, WRF 模式的表现要好许多, 与观测较为一致, 在华北和西部相对为大值区。不同的是, 在河套及其附近地区, WRF 模式模拟 CV 值较大, 在 0.2 以上, 而观测中数值大多在 0.15~0.25 之间。

4 总结与讨论

本文使用区域气候模式 WRF 模式单向嵌套全

球气候模式 MIROC 模式就中国区域进行长时间积分模拟试验, 检验了 WRF 模式对中国气候及其变化的模拟性能。通过跟实际观测的不同季节地表气温和降水的比较, 分析了两个模式对我国当前气候及其年际变率模拟的异同点。

总体上, 两个模式都能较好模拟出中国年平均地表气温分布, 除青藏高原外, 大致呈由南向北逐渐降低的趋势, 符合实际情况。WRF 模式模拟的气温整体上低于 MIROC 模式。MIROC 模式对中国年平均地表气温分布状态模拟效果较好, 模拟出了气温由南向北逐渐降低的趋势。但在青藏高原的大

部分地区模拟气温明显偏低。WRF 模式模拟的气温整体上较好,在西部地区,模拟出了天山及其南北地区的气温差异,以及青藏高原和祁连山脉的低温区;在东部,模拟出了气温由南向北的渐变。WRF 模式对气温分布的描述更为细致,模拟出了四川盆地的高温和我国最北方区域的低温。MIROC 模式对夏季气温的模拟能力相对较差,在华北出现大范围高温,而华南地区高温区域却偏小。WRF 模式对这样的状况有所改进,华北的高温区域缩小了,两广地区的高温范围有所扩大。另外,WRF 模式在青藏高原地区模拟的气温整体偏低。

MIROC 模拟的降水和观测降水的空间相关系数在 0.8 左右,表明它对降水的模拟比较好。对于降水分布的模拟,WRF 模式要好于 MIROC 模式。总体上,两个模式对南方地区的降水模拟要好于北方地区,东部地区要好于西部地区。WRF 模式很好地模拟出了地形降水,例如青藏高原周边的山脉区域以及天山及其西侧的降水区;对于干旱区降水的模拟也好于 MIROC 模式,例如塔里木盆地、柴达木盆地以及内蒙古和甘肃的部分干旱和半干旱区域。MIROC 模式在青藏高原东南侧出现较大区域的降水大值区,即虚假降水中心,这也是全球模式模拟普遍存在的问题,WRF 模式能改进该地区降水的模拟。

两个模式对年平均气温和降水年际变率的模拟能力均较差,WRF 模式相对 MIROC 模式有一定的改进。观测的年平均气温标准差基本呈南部低、北部高的分布形势,新疆北部、内蒙古西部是数值较高的区域,中心 STD 值在 0.8°C 以上,表明这些地区年际变率较大。 30°N 以南大部分地区数值在 0.5°C 以下,新疆西南部和山东半岛部分地区数值也相对较低,表明这些地区年际变率相对较小。两个模式对 STD 分布及其大小的模拟与观测都有较大不同,特别是在青藏高原地区,表明模式里该区域有很大的年际变率。WRF 模式给出的我国除青藏高原以外的南方地区的平均气温标准差更接近观测一些,表明南方区域年际变率相对较小。在北方的标准差高值区的更接近观测,例如东北和内蒙中西部地区。对于降水的变异系数,WRF 模式的性能要比全球模式 MIROC 模式好许多,与观测较为一致,基本上在南方较小,北方较大。在华北和西部相对为大值区。总体上,相对于气候平均态的模拟来说,两个模式对年平均气温

和降水年际变率的模拟能力均较差,WRF 模式相对 MIROC 模式有一定的改进。

致谢 国家气候中心高学杰研究员和日本国立环境研究所的 Manabu Abe 博士为本试验提供了 MIROC3.2_hires 模式资料,在此表示感谢。

参考文献 (Reference)

- Bukovsky M S, Karoly D J. 2009. Precipitation simulations using WRF as a nested regional climate model [J]. *Journal of Applied and Meteorology and Climatology*, 48: 2152–2159.
- Caldwell P H, Chin N S, Bader D C, et al. 2009. Evaluation of a WRF dynamical downscaling simulation over California [J]. *Climatic Change*, 95: 499–521.
- Cui X F, Huang G, Chen W. 2008. Notes of numerical simulation of summer rainfall in China with a regional climate model REMO [J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 25: 999–1008.
- Ding Y H, Shi X L, Liu Y M, et al. 2006a. Multi-year simulations and experimental seasonal predictions for rainy seasons in China by using a nested regional climate model (RegCM_NCC). Part I: Sensitivity study [J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 23: 323–341.
- Ding Y H, Liu Y M, Shi X L, et al. 2006b. Multi-year simulations and experimental seasonal predictions for rainy seasons in China by using a nested regional climate model (RegCM_NCC). Part II: The experimental seasonal prediction [J]. *Advance in Atmospheric Sciences*, 23: 487–503.
- 符淙斌, 魏和林, 陈明, 等. 1998. 区域气候模式对中国东部季风雨带演变的模拟 [J]. *大气科学*, 22: 522–534. Fu Congbin, Wei Helin, Chen Ming, et al. 1998. Simulation of the evolution of summer monsoon rainbelts over eastern China from regional climate model [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 22: 522–534.
- Gao X J, Zhao Z C, Giorgi F. 2002. Changes of extreme events in regional climate simulations over East Asia [J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 19: 927–942.
- Gao X J, Shi Y, Song R Y, et al. 2008. Reduction of future monsoon precipitation over China: Comparison between a high resolution RCM simulation and the driving GCM [J]. *Meteor. Atmos. Phys.*, 100: 73–86.
- Gao X J, Shi Y, Giorgi F. 2011. A high resolution simulation of climate change over China [J]. *Science China Earth Sciences*, 54: 462–472.
- 高学杰, 赵宗慈, 丁一汇, 等. 2003. 温室效应引起的中国区域气候变化的数值模拟 I: 模式对中国气候模拟能力的检验 [J]. *气象学报*, 61: 20–28. Gao Xuejie, Zhao Zongci, Ding Yihui, et al. 2003. Climate change due to greenhouse effects in China as simulated by regional climate model Part I: Evaluation of the model simulations [J]. *Acta Meteorologica Sinica (in Chinese)*, 61: 20–28.
- 高学杰, 林万涛, Kucharsky F, 等. 2004. 实况海温强迫的 CCM3 模式对中国区域气候的模拟能力 [J]. *大气科学*, 28: 78–90. Gao Xuejie, Lin Wantao, Kucharsky F, et al. 2004. A simulation of regional climate in China by using CCM3 and observed SST [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 28: 78–90.

- Jiang D B, Wang H J, Lang X M. 2005. Evaluation of East Asian climatology as simulated by seven coupled models [J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 22: 479–495.
- Ju L X, Wang H J. 2006. Modern climate over East Asia simulated by a regional climate model nested in a global gridpoint general circulation model [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 49: 52–60.
- Ju L X, Wang H J, Jiang D B. 2007. Simulation of the last glacial maximum climate over East Asia with a regional climate model nested in a general circulation model [J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 248: 376–390.
- K-1 Model Developers. 2004. K-1 Coupled Model (MIROC) Description. K-1 Technical Report 1 [M]. Tokyo: University of Tokyo, 34pp.
- Kang I S, Jin K, Wang B, et al. 2002. Intercomparison of the climatological variations of Asian summer monsoon precipitation simulated by 10 GCMs [J]. *Climate Dynamics*, 19: 383–395.
- Leung L R, Kuo Y H, Tribbia J. 2006. Research needs and directions of regional climate modeling using WRF and CCSM [J]. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 87: 1747–1751.
- Lo J C F, Yang Z L, Pielke Sr R A. 2008. Assessment of three dynamical climate downscaling methods using the weather research and forecasting (WRF) model [J]. *J. Geophys. Res.*, 113 (D9): D09112, doi:10.1029/2007JD009216.
- 罗勇, 赵宗慈. 1997. NCAR RegCM2 对东亚区域气候的模拟试验 [J]. *应用气象学报*, 8: 124–133. Luo Yong, Zhao Zongci. 1997. Numerical simulation of East Asian regional climate with NCAR RegCM2 [J]. *Quarterly Journal of Applied Meteorology (in Chinese)*, 8: 124–133.
- Qian Y, Ghan S J, Leung R L. 2010. Downscaling hydroclimatic changes over the western US based on CAM subgrid scheme and WRF regional climate simulations [J]. *International Journal of Climatology*, 30: 675–693.
- 石英. 2010. RegCM3 对 21 世纪中国区域气候变化的高分辨率模拟 [D]. 中国科学院大气物理研究所博士学位论文, 117pp. Shi Ying. 2010. A high resolution climate change simulation of the 21st century over East Asia by RegCM3 [D]. Ph. D. dissertation (in Chinese), Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, 117pp.
- 汤剑平, 陈星, 赵鸣, 等. 2008. IPCC A2 情景下中国区域气候变化的数值模拟 [J]. *气象学报*, 66: 13–25. Tang Jianping, Chen Xing, Zhao Ming, et al. 2008. Numerical simulation of regional climate change under IPCC A2 scenario in China [J]. *Acta Meteorologica Sinica (in Chinese)*, 66: 13–25.
- Wang H J. 2000. The interannual variability of East Asian monsoon and its relationship with SST in a coupled atmosphere–ocean–land climate model [J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 17: 31–47.
- Wang H J, Matsuno T, Kurihara Y. 2000. Ensemble hindcast experiments for the flood period over China in 1998 by use of the CCSR/NIES atmospheric general circulation model [J]. *Journal of Meteorological Society of Japan*, 78: 357–365.
- Wang H J, Yu E T, Yang S. 2011. An exceptionally heavy snowfall in Northeast China: Large-scale circulation anomalies and hindcast of the NCAR WRF model [J]. *Meteor. Atmos. Phys.*, 113: 11–25.
- Xie P P, Yatagai A, Chen M Y, et al. 2007. A gauge-based analysis of daily precipitation over East Asia [J]. *Journal of Hydrometeorology*, 8: 607–626.
- 熊喆. 2004. 区域气候模式对东亚气候时空演变特征的模拟研究 [J]. *气候与环境研究*, 9: 295–302. Xiong Zhe. 2004. Evolutionary character of climatology over East Asia by RIEMS [J]. *Climatic and Environmental Research*, 9: 295–302.
- 许崇海, 沈新勇, 徐影. 2007. IPCC AR4 模式对东亚地区气候模拟能力的分析 [J]. *气候变化研究进展*, 3: 287–292. Xu Chonghai, Shen Xinyong, Xu Ying. 2007. An analysis of climate change in East Asia by using the IPCC AR4 simulations [J]. *Advance in Climate Change Research (in Chinese)*, 3: 287–292.
- 许吟隆, 张勇, 林一骅, 等. 2006. 利用 PRECIS 分析 SRES B2 情景下中国区域的气候变化响应 [J]. *科学通报*, 51: 2068–2074. Xu Yinlong, Zhang Yong, Lin Yichi, et al. 2006. Response to climate change analysed by PRECIS under scenarios of SRES B2 in China [J]. *Chinese Science Bulletin (in Chinese)*, 51: 2068–2074.
- Xu Y, Gao X J, Shen Y, et al. 2009. A daily temperature dataset over China and its application in validating a RCM simulation [J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 26: 763–772.
- Yu E T, Wang H J, Sun J Q. 2010. A quick report on a dynamical downscaling simulation over China using the nested model [J]. *Atmospheric and Oceanic Science Letters*, 3: 325–329.
- 张冬峰, 欧阳里程, 高学杰, 等. 2007. RegCM3 对东亚环流和中国气候模拟能力的检验 [J]. *热带气象学报*, 23: 444–452. Zhang Dongfeng, Ouyang Licheng, Gao Xuejie, et al. 2007. Simulation of the atmospheric circulation over East Asia and climate in China by RegCM [J]. *Journal of Tropical Meteorology (in Chinese)*, 23: 444–452.
- 赵宗慈. 1990. 全球环流模式在中国部分模拟效果评估 [J]. *气象*, 16: 13–17. Zhao Zongci. 1990. Assessment on validation of general circulation models (GCMs) in China [J]. *Meteorological Monthly (in Chinese)*, 16: 13–17.
- Zhou T J, Yu R C. 2006. Twentieth century surface air temperature over China and the globe simulated by coupled climate models [J]. *J. Climate*, 19: 5843–5858.
- Zong P S, Wang H J. 2011. Evaluation and analysis of RegCM3 simulated summer rainfall over the Huaihe River basin of China [J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 25: 386–394.