

张冬峰, 高学杰, 马洁华. 2015. CCSM4.0 模式及其驱动下 RegCM4.4 模式对中国夏季气候的回报分析 [J]. 气候与环境研究, 20 (3): 307-318, doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2015.14158. Zhang Dongfeng, Gao Xuejie, Ma Jiehua. 2015. Analysis of summer climate over China from hindcast experiments by CCSM4.0 and RegCM4.4 models [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 20 (3): 307-318.

CCSM4.0 模式及其驱动下 RegCM4.4 模式对中国夏季气候的回报分析

张冬峰^{1,2} 高学杰³ 马洁华^{3,4}

1 山西省气候中心, 太原 030006

2 中国气象局气候研究开放实验室, 北京 100081

3 中国科学院大气物理研究所气候变化研究中心, 北京 100029

4 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

摘要 使用区域气候模式 RegCM4.4 (Regional Climate Model version 4.4) 单向嵌套 CCSM4.0 (Community Climate System Model version 4.0) 气候系统模式输出结果, 进行了 2001~2010 年逐年 2 月 1 日至 9 月 1 日共 10 年长度的季节尺度气候预测回报试验, 针对平均气温和降水, 分析了两个模式对中国地区夏季 (6~8 月) 气候的回报能力。首先对气候态的分析表明, RegCM4.4 对气温和降水的回报/模拟效果均较 CCSM4.0 有所改进, 特别是在提供更详细可靠的局地信息方面, 其中降水回报与观测的空间相关系数, 由 CCSM4.0 的 0.39 提高到 RegCM4.4 的 0.53, 但同时 RegCM4.4 对中国东部季风降水的回报表现出类似 CCSM4.0 北方偏多的偏差。对两个模式 2001~2010 年逐年气温和降水距平的回报能力, 通过回报与观测空间和时间距平相关系数 (ACCs 和 ACct)、回报与观测空间和时间距平符号一致率 (PCs 和 Pct) 以及趋势异常综合评分 (PS) 进行了考察, 结果表明两个模式的表现整体分布上有一定相似的同时, RegCM4.4 能够提供更多的空间分布细节, 并对降水的回报结果有一定的改善, 如 CCSM4.0 和 RegCM4.4 回报降水的 ACCs 多年平均分别为 0.03 和 0.10, PS 分别为 70.4 和 71.4。同时给出了两个具体年份 (2003 年和 2009 年) 的个例分析。

关键词 气候模式 回报试验 回报分析

文章编号 1006-9585 (2015) 03-0307-12

中图分类号 P435

文献标识码 A

doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2015.14158

Analysis of Summer Climate over China from Hindcast Experiments by CCSM4.0 and RegCM4.4 Models

ZHANG Dongfeng^{1,2}, GAO Xuejie³, and MA Jiehua^{3,4}

1 Shanxi Climate Center, Taiyuan 030006

2 Laboratory for Climate Studies, China Meteorological Administration, Beijing 100081

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

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

Abstract Hindcast experiments for the 10-year period from 2001 to 2010 are completed using the regional climate model RegCM4.4 (Regional Climate Model version 4.4), driven by the global model CCSM4.0 (Community Climate System Model version 4.0). All experiments are conducted from 1 Feb to 1 Sep. The hindcast simulations from CCSM4.0

收稿日期 2014-08-01; 网络预出版日期 2015-02-03

资助项目 公益性行业 (气象) 科研专项经费项目 GYHY20130619

作者简介 张冬峰, 女, 1969 年出生, 博士, 高级工程师, 主要从事气候和气候变化模拟研究。E-mail: minczdf@hotmail.com

通讯作者 高学杰, E-mail: gaouxj@cma.gov.cn

and RegCM4.4 are intercompared and evaluated against observations in the summer season (June–July–August, JJA). RegCM4.4 captures the observed temperature and precipitation climatology better than CCSM4.0 and provides more detailed and reliable local information. The spatial correlation coefficient of precipitation improves from 0.39 in CCSM4.0 to 0.53 in RegCM4.4, while similar bias in reproducing monsoonal precipitation, characterized by the overestimation in northern China, is apparent. The anomalies of temperature and precipitation are in general consistent between the two models, as measured by the spatial anomaly correlation coefficient (ACCs) and temporal anomaly correlation coefficient (ACCt), the prediction consistency of the anomaly sign (PCs and PCt), and the prediction score (PS) between hindcasts and observations. Meanwhile, more detailed spatial information and a slightly better performance in precipitation are presented by RegCM4.4; the multi-annual ACCs values for precipitation from CCSM4.0 and RegCM4.4 are 0.03 and 0.10, and the corresponding PS values are 70.4 and 71.4, respectively. The anomalies of precipitation in two cases (2003 and 2009) are also analyzed and discussed.

Keywords Climate model, Hindcast experiment, Hindcast analysis

1 引言

随着对气候系统认知的不断深入,近年来全球气候系统模式快速发展,并在模拟全球气候和气候变化方面,取得了大量成果(Flato et al., 2013; Kirtman et al., 2013),同时也逐渐成为气候预测工作的核心技术手段和主要工具之一(Kirtman and Pirani, 2009; Doblas-Reyes et al., 2013),如欧洲中期天气预报中心(ECMWF)、美国国家环境预报中心(NCEP)、英国气象局 Hadley 中心等先后使用全球耦合气候系统模式进行实时季节气候预测(Palmer et al., 2004; Saha et al., 2006, 2014; Arribas et al., 2011)。中国使用全球模式进行气候预测的工作开展较早(曾庆存等, 1990; Wang, 1994; Wang et al., 1997, 2001; 林朝晖等, 1998; Gao and Zhao, 2000; 王会军等, 2002; 郎咸梅等, 2003, 2004; 李维京等, 2005),并取得很多成果。

一般说来,由于计算机能力的限制,现有的全球模式分辨率仍然较低,影响其对区域尺度气候的模拟能力,特别是在具有复杂地形和气候系统的东亚季风区。研究表明使用高分辨率区域气候模式,可以明显提高对中国区域平均气候的模拟效果,并得到在未来气候变化预估中更可靠的信号(Gao et al., 2001, 2006, 2012, 2013; 鞠丽霞和王会军, 2006; Xu et al., 2006; 张冬峰等, 2007; Yu et al., 2010; 邹立维和周天军, 2012; Zou and Zhou, 2013)。相对于气候机理和气候变化研究,区域模式应用于季节尺度气候预测的工作相对较少,特别是在中国地区缺乏系统性检验(丁一汇等, 2004; 杨雅薇等, 2008; Yuan et al., 2012; 鞠丽霞和郎咸梅, 2012)。同时,有限的工作表明,通过

区域模式的降尺度有望提高预报技巧(Cocke and LaRow, 2000; Sun et al., 2006; Cocke et al., 2007; Yuan and Liang, 2011)。

在中国的季节尺度气候预测(短期气候预测)中,夏季(汛期,6~8月)气候预测最多得到重视,一般在每年的2月底至3月初间做出汛期平均气温和降水的预报意见。在本文中,尝试使用一个全球气候系统模式NCAR CCSM4.0(Community Climate System Model version 4.0)(Gent et al., 2011),以其输出结果,驱动RegCM4.4区域模式(Giorgi et al., 2012),进行中国地区夏季的气候预测回报试验,通过对比分析两个模式的回报结果,期望得到一些对气候异常预测有用的信息,并最终为预测水平的提高服务。

2 模式、试验设计、资料和方法

通用气候系统模式CCSM(Community Climate System Model)是国际上新一代的耦合气候系统模式之一,其中CCSM4.0于2010年发布,模式整体性能相对以往有了较大改进(Gent et al., 2011)。CCSM4.0由大气、海洋、陆面、海冰和耦合器5个模块组成。模式开源,支持多种分辨率,可以对各模块进行不同组合,以满足不同研究的需求。本研究试验中选用其中等分辨率版本,即大气模块(Community Atmosphere Model version 4, CAM4)和陆面模块(Community Land Model version 4, CLM4)采用有限体积元动力内核,水平分辨率约为 1.9° (纬度) $\times 2.5^\circ$ (经度),垂直方向大气分为26层,陆面15层;海洋模块为混合层海洋模式(Slab Ocean Model, SOM),水平分辨率约为 1° (纬度) $\times 1^\circ$ (经度),海冰模块(Community Ice

CodE version 4, CICE4) 的水平分辨率同海洋模块。回报试验中模式初始值, 大气部分采用 NCEP FNL (Final) 分析资料 (NCEP, 2000), 陆面选用 NCEP 气候预测系统再分析资料 (CFSR) (Saha et al., 2010), 海洋模块采用 NCEP 全球海洋资料同化系统 (GODAS) 数据 (Behringer and Xue, 2004), 由于较难获得海冰模块的初始场资料, 使用了模式气候态作为初始场, 模式初始化的细节请参见马洁华和王会军 (2014)。回报试验积分时间为 2001~2010 年逐年 2 月 1 日至 9 月 1 日。

国际理论物理中心研制的 RegCM (Regional Climate Model) 系列区域气候模式, 在全球特别是在中国区域有广泛的应用, 以往所进行的中国地区气候预测工作亦多使用此模式的较早版本 (丁一汇等, 2004; 杨薇薇等, 2008; 鞠丽霞和郎咸梅, 2012), 本研究使用其最新版本模式 RegCM4.4 (Regional Climate Model version 4.4)。RegCM4.4 有多种物理参数化方案选择, 经过在再分析资料驱动下的大量试验, 本研究选择了对中国气候有较好模拟能力的下列组合: 辐射采用 NCAR CCM3 (Community Climate Model version 3) 方案, 行星边界层方案使用 Holtzlag, 大尺度降水采用 SUBEX (SUB-grid EXplicit moisture schene) 方案, 积云对流参数化选择 Emanuel, 陆面过程使用 CLM3.5 (Community Land Model version 3.5)。试验使用的植被和土地覆盖资料在中国区域内基于中国 1:1000000 植被图得到 (张新时, 2007)。与 CCSM4.0 的分辨率匹配, 区域模式的水平分辨率取为 50 km, 范围包括整个中国及周边地区 (图略), 东西—南北的格点数分别为 160 和 109, 垂直方向分成 18 层, 层顶高度 50 hPa。运行 RegCM4.4 所需的初始场和每 6 h 一次输入模式的侧边界值由 CCSM4.0 回报试验结果得到, 回报试验积分时间同样为 2001~2010 年的逐年 2 月 1 日至 9 月 1 日。

用于检验模式回报所需的地面气温和降水观测资料, 分别采用同期 CN05.1 格点数据 (吴佳和高学杰, 2013) 和中国 2400 余台站资料。CN05.1 为 CN05 (Xu et al., 2009) 数据的更新版本, 其分辨率包括 0.25°、0.5°和 1° (经、纬度) 等多种, 基于 2400 余台站的观测通过距平逼近法制作而成。

首先计算比较两个模式回报试验的气温、降水多年 (2001~2010 年) 平均值与观测 (实况) 场的差别及空间相关 (COR), 检验模式对气候态的回

报和模拟; 然后检验两个模式对气候异常的回报, 使用回报和观测的空间和时间距平相关系数 (ACCs 和 ACCt)、空间和时间距平符号一致率 (PCs 和 PCt) 以及预测产品趋势异常综合检验 (PS) 等指标进行检验。

(a) 空间相关系数 (COR), 表征回报气候场与观测之间在空间上的相似程度:

$$COR = \frac{\sum_{i=1}^N (R_{hi} - \bar{R}_h)(R_{oi} - \bar{R}_0)}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (R_{hi} - \bar{R}_h)^2 \sum_{i=1}^N (R_{oi} - \bar{R}_0)^2}}, \quad (1)$$

其中, R_{hi} 为检验区域第 i 格点多年平均气温 (或降水) 的回报值, \bar{R}_h 为检验区域内所有格点多年平均气温 (或降水) 的回报平均值; R_{oi} 、 \bar{R}_0 为相应观测值; N 为检验区域内格点总数。

(b) 空间距平相关系数 (ACCs), 检验模式对中国区域整体气候异常的回报能力:

$$ACCs = \frac{\sum_{i=1}^N (\Delta R_{hi} - \overline{\Delta R}_h)(\Delta R_{oi} - \overline{\Delta R}_0)}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (\Delta R_{hi} - \overline{\Delta R}_h)^2 \sum_{i=1}^N (\Delta R_{oi} - \overline{\Delta R}_0)^2}}, \quad (2)$$

其中, ΔR_{hi} 为检验区域第 i 格点气温距平 (或降水距平百分率) 的回报值, $\overline{\Delta R}_h$ 为检验区域内所有格点气温距平 (或降水距平百分率) 回报平均值; ΔR_{oi} 、 $\overline{\Delta R}_0$ 为相应观测值; N 为检验区域内格点总数。

(c) 时间距平相关系数 ACCt, 用于检验模式对各格点距平的回报能力, 计算公式同公式 (1), 但式中, R_{hi} 、 \bar{R}_h 分别为检验区域各格点逐年气温 (或降水) 的回报值和多年平均值; R_{oi} 、 \bar{R}_0 为相应的观测值; N 为回报时间长度 (10 年)。多年平均值计算时, 去除了当年的值。

(d) 空间距平符号一致率 (PCs), 和 ACCs 一样, 同样检验模式对中国区域整体气候异常的回报能力:

$$PCs = \frac{N_t}{N} \times 100\%, \quad (3)$$

其中, N 为检验区域格点总数, N_t 为其中观测和回报气温距平 (或降水距平百分率) 符号相同的格点数。

(e) 时间距平符号一致率 (PCt), 检验模式对各格点距平的回报能力, 计算公式同公式 (3), 但 N 为检验时间长度, N_t 为观测和回报气温距平 (或降水距平百分率) 符号相同的年份。

(f) 趋势异常综合评分 (PS)。PS 评分是中国气象局短期气候预测准确率评价的重要指标。2014

年之前, 中国气象局业务评分采用 6 级分级评分 (PG), 气温 6 级分别为: 气温距平在 $-1\sim 1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 为正常级 (正常略高或正常略低), 其他为异常级, 其中在 $1\sim 2\text{ }^{\circ}\text{C}$ 或 $-2\sim -1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 为一级异常 (偏高和偏低), 大于 $2\text{ }^{\circ}\text{C}$ 或小于 $-2\text{ }^{\circ}\text{C}$ 为二级异常 (特高和特低); 降水 6 级分别为: 降水距平百分率在 $-20\%\sim 20\%$ 为正常级 (正常略多或正常略偏少), 在 $20\%\sim 50\%$ 或 $-50\%\sim -20\%$ 为一级异常 (偏多和偏少), 大于 50% 或小于 -50% 为二级异常 (特多和特少)。评分原则为: 当预测与实况的距平符号和量级均一致时, 评分为 100 分; 预测与实况的量级每相差 1 个级别时, 减 20 分, 依次类推, 减至 0 为止; 当预测与实况的距平符号不一致时, 在量级减分的基础上再减 20 分, 减至 0 为止; 为鼓励预报异常, 当预报为异常级且实况与预报相差 1 个量级时, 可以在上述得分的基础上再加 10 分。区域评分为各个单站评分值的平均。

2014 年 1 月开始改用趋势异常综合评分 (PS) 方法, 对全国 2400 气象台站进行考核, 该方法主要考虑预测的趋势项、异常项和漏报项, 计算公式:

$$PS = \frac{a \times N_0 + b \times N_1 + c \times N_2}{(N - N_0) + a \times N_0 + b \times N_1 + c \times N_2 + M} \times 100, \quad (4)$$

其中, N_0 为预报和观测距平符号一致的总站数; N_1 为一级异常预测正确的总站数; N_2 为二级异常预测正确的总站数; M 为漏报站, 针对降水 (气温) 定义为没有预报二级异常而实况出现降水距平百分率 $\geq 100\%$ 或 $\leq -100\%$ (气温距平 $\geq 3\text{ }^{\circ}\text{C}$ 或 $\leq -3\text{ }^{\circ}\text{C}$) 的站数; N 为实际参加评估的站数; a 、 b 和 c 分别为气候趋势项、一级异常项和二级异常项的权重系数, 分别取 $a=2$ 、 $b=2$ 、 $c=4$ 。

下文中, CCSM4.0 的气候态、ACCt、PCs 和 PCt 的分析, 在 CCSM4.0 的格点上进行, RegCM4.4 的分析在 0.5° (纬度) $\times 0.5^{\circ}$ (经度) 分辨率 CN05.1 格点上进行。此外两个模式 COR、ACCs 的分析均在 CN05.1 格点上, PS 检验均在中国 2400 观测站点上进行。过程中所需的插值, 除 CN05.1 采用面积守恒法外, 其他使用了双线性插值方法。

3 模式回报结果检验

3.1 气候平均态

图 1 中分别给出观测和两个模式回报/模拟的

夏季多年 (2001~2010 年) 平均地面气温和降水分布。CCSM4.0 较好的回报了中国夏季平均气温的空间分布特征和数值 (图 1a、1b), 中国东部气温大致呈南高北低, 西部气温则受地形影响显著呈北高南低, 和观测相比, CCSM4.0 在大部分地区回报气温偏高 $1\sim 3\text{ }^{\circ}\text{C}$, 其中在新疆和黑龙江北部较观测偏高 $3\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以上, 观测和回报平均气温的 COR 为 0.90。RegCM4.4 回报的平均气温数值较 CCSM4.0 更接近观测, 明显纠正了 CCSM4.0 中存在的暖偏差, 除西北和东北部分地区气温较观测偏高 $1\sim 3\text{ }^{\circ}\text{C}$ 外, 大部分地区回报和观测气温差别在 $\pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 之间。此外由于较高的分辨率, RegCM4.4 更好的再现了观测中夏季气温的小尺度空间分布特征 (图 1c), 如西北地区天山与其相邻的准噶尔和塔里木盆地的高低、温对比等, 观测和回报平均气温的 COR 提高到 0.93。

CCSM4.0 回报的降水大体上体现了观测中降水从东南向西北递减的空间分布特点 (图 1d、1e), 但大值区由青藏高原东部向河套—华北一线伸展, 数值在这些地区较观测一般偏多 $0.5\sim 2.5\text{ mm/d}$, 部分地区更大, 形成虚假降水中心; 同时在江南降水较观测偏少 $0.5\sim 2.5\text{ mm/d}$, 整个区域观测和回报降水的 COR 为 0.39。RegCM4.4 回报结果有所改善, 特别是在地形降水方面, 如祁连山脉的降水高值区以及与相邻的柴达木盆地低值区的对比等 (图 1f), 观测和回报降水的 COR 提高为 0.53, 但 CCSM4.0 回报中的虚假降水中心同样引入了 RegCM4.4。回报试验中的虚假降水中心是由于模式分辨率不足引起的, 以往经验表明, 进一步提高区域模式的分辨率可以减少这个误差 (Gao et al., 2006, 2012)。

3.2 回报与观测的时间和空间距平相关系数 (ACCt 和 ACCs)

图 2 分别给出了 CCSM4.0 和 RegCM4.4 回报的夏季逐年平均地面气温、降水和相应观测的 ACCt 和 ACCs。CCSM4.0 气温 ACCt 大部分地区为负值, 仅在东北和江南以及西部零散地区为正, 其中东北部分地区通过 90% 的信度检验 (图 2a)。RegCM4.4 回报气温在空间分布上与 CCSM4.0 大体相似, 但提供了更多空间分布的细节, 表现出区域模式的降尺度优势, 另外在黄淮江淮等地较 CCSM4.0 回报气温有较大改进, 气温 ACCt 为正值 (图 2b)。两个模式回报的气温 ACCs 多数年份为正值, 并呈现出一致的年际变化趋势 (图 2c),

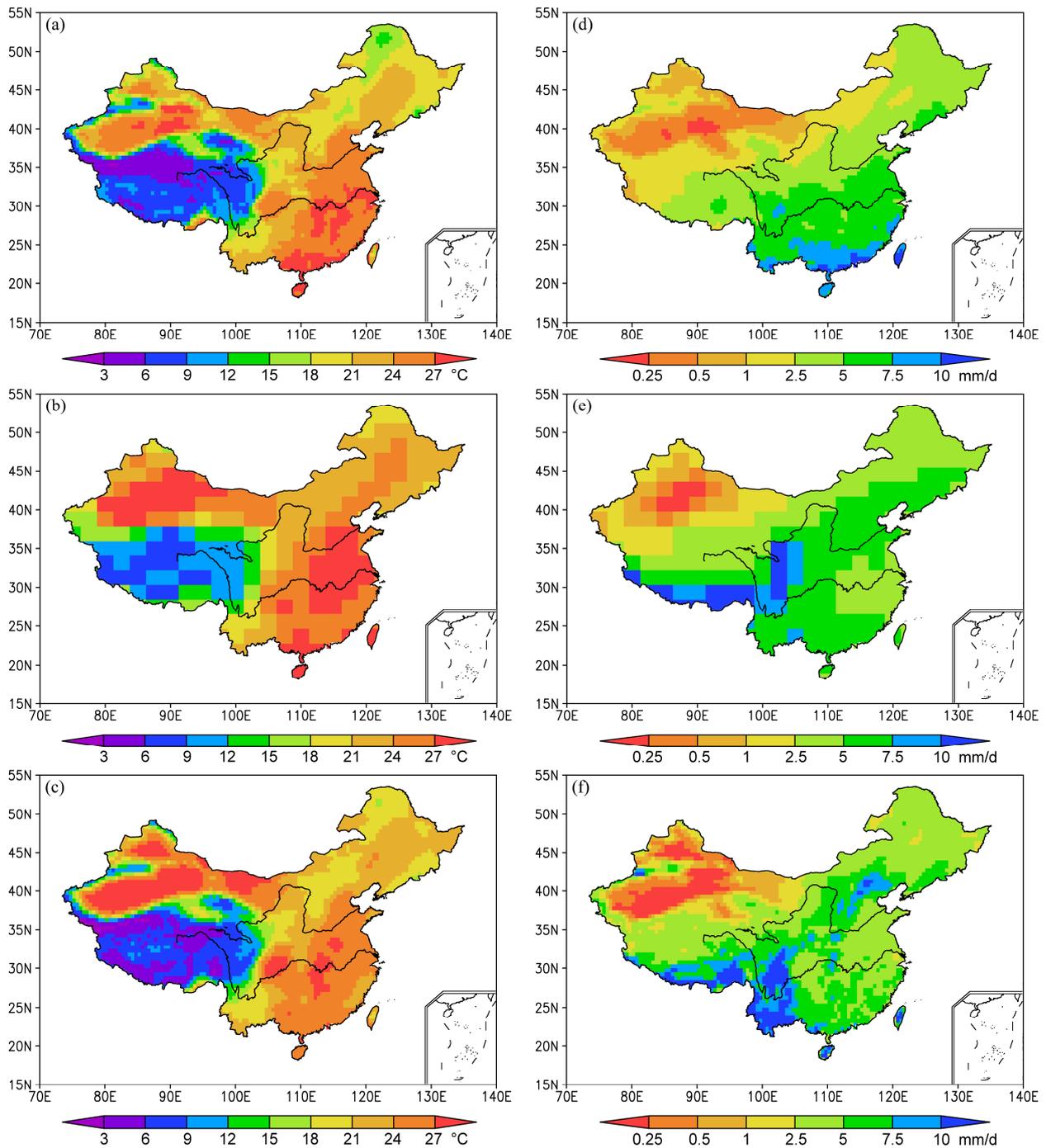


图1 夏季多年平均气温(左列)和降水(右列): (a、d) 观测; (b、e) CCSM4.0 回报; (c、f) RegCM4.4 回报
Fig. 1 Multi-annual mean temperature (left column) and precipitation (right column) in JJA (June, July, and August): (a, d) Observed; (b, e) hindcasted by CCSM4.0 (Community Climate System Model version 4.0); (c, f) hindcasted by RegCM4.4 (Regional Climate Model version 4.4)

2001~2010 年 CCSM4.0 回报 9 年为正值, 并通过 99% 的信度检验, 多年平均数值为 0.26; RegCM4.4 回报 8 年为正值, 达到 99% 的信度检验, 2003~2007 年间 ACCs 数值持续小于 CCSM4.0 回报值, 多年平均数值为 0.15。

CCSM4.0 降水 ACCt 如图 2d 所示, 长江以北大部分地区 and 西北以正值为主, 其中四川部分地区、陕西和山西交界处以及东北局部通过 90% 的信度检验; 在江南和青藏高原大部分地区为负值。RegCM4.4 回报的降水情况大体和 CCSM4.0 相似,

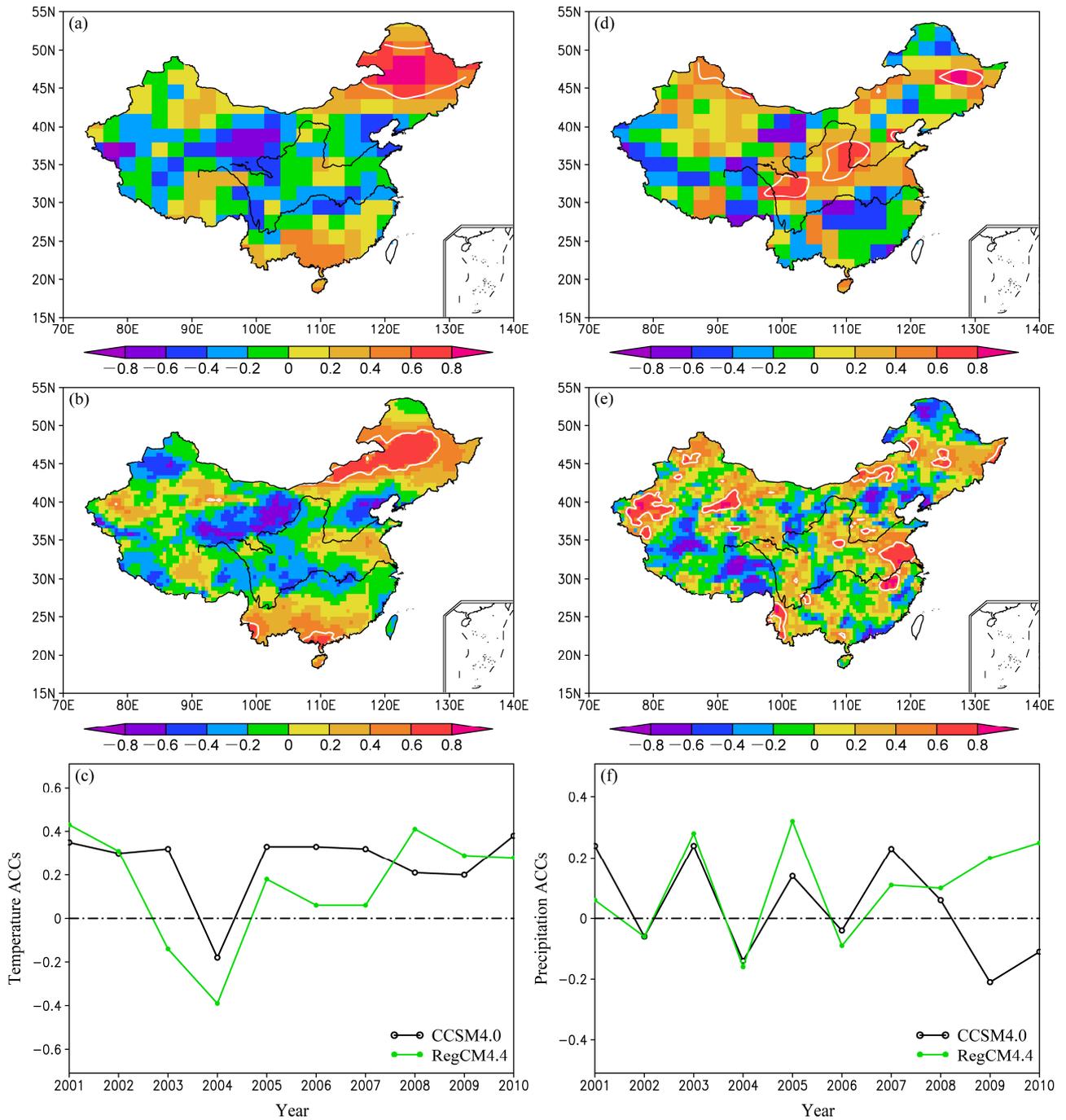


图2 回报的夏季逐年平均气温(左列)、降水(右列)的 ACCt(白色实线所围区域为通过 90%信度检验的地区)和 ACCs: (a、d) CCSM4.0 回报 ACCt; (b、e) RegCM4.4 回报 ACCt; (c、f) 两个模式回报 ACCs

Fig. 2 ACCt (temporal anomaly correlation coefficient between hindcasts and observations, the white solid lines represent the 90% confidence level curves) and ACCs (spatial anomaly correlation coefficient between hindcasts and observations) results for the JJA temperature (left column) and precipitation (right column): (a, d) ACCt hindcasted by CCSM4.0; (b, e) ACCt hindcasted by RegCM4.4; (c, f) ACCs hindcasted by CCSM4.0 and RegCM4.4

但除了提供更多的空间细节外, 降水 ACCt 正值范围有所扩大, 通过 90%信度检验的区域分布更多但零散化(图 2e), 其中特别需要指出的是, RegCM4.4

对汛期预测关注的重点地区江淮黄淮的改善明显, 对长江下游及江南部分地区亦有所改进。两个模式回报降水 ACCs 在 2001~2008 年间变化基本一致,

2009~2010 年 RegCM4.4 回报降水结果明显好于 CCSM4.0 (图 2f); 两个模式回报降水 ACCs 数值多数年份在 ± 0.3 之间, CCSM4.0 回报有 5 年通过 99% 的信度检验, 多年平均值为 0.03, RegCM4.4 回报有 7 年通过 99% 的信度检验, 多年平均值为 0.10, 区域模式对降水的回报效果有一定改善。

3.3 回报与观测的时间和空间距平符号一致率 (PCt 和 PCs)

图 3 给出了两个模式的 PCt 和 PCs。CCSM4.0 回报气温 PCt 大值区 (图 3a) 和气温 ACCt 正值区 (图 2a) 对应, 东北地区数值最大。同样 RegCM4.4 回报的气温 PCt 除提供更多空间分布细节外, 与

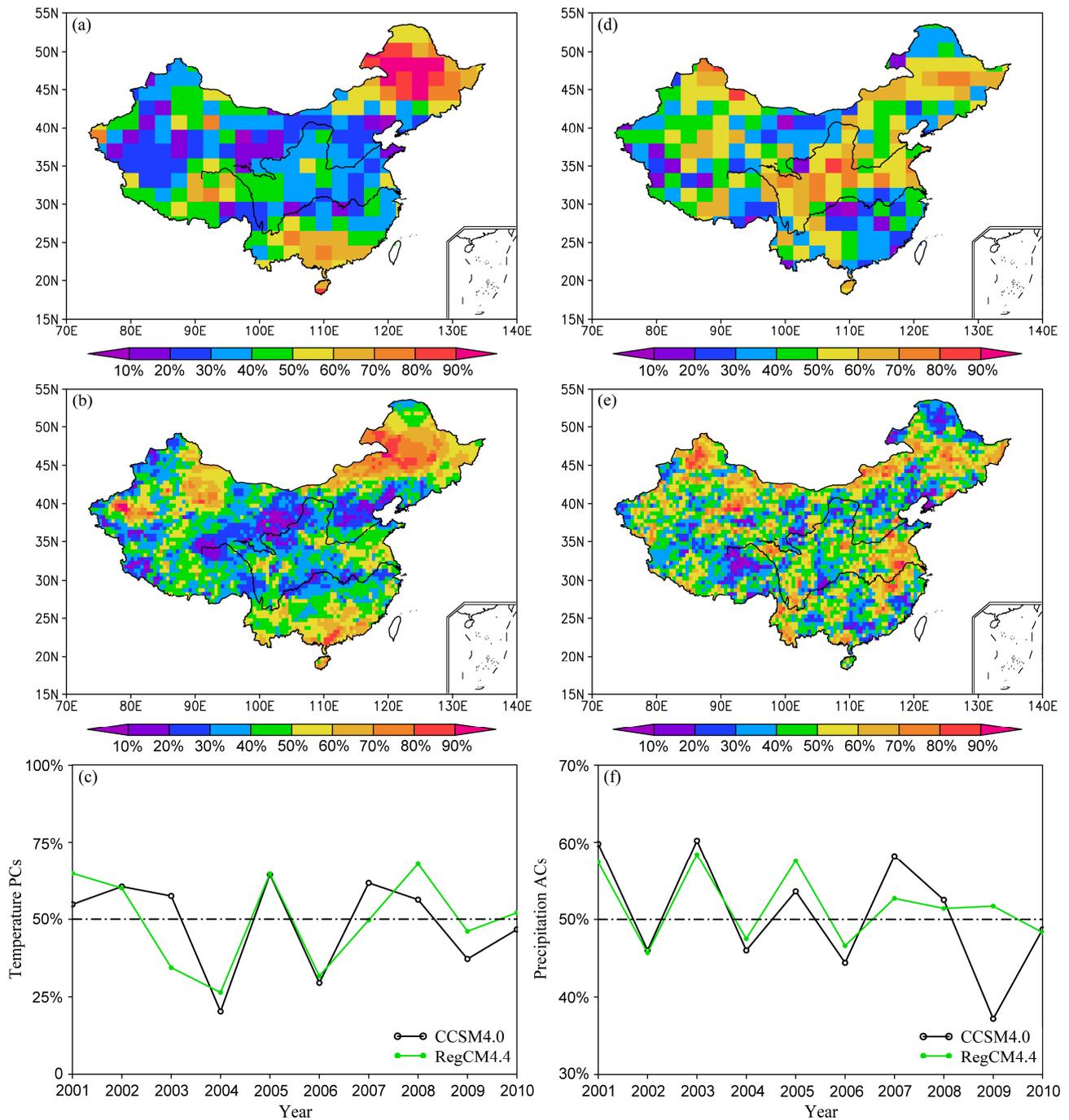


图 3 回报的夏季气温 (左列)、降水 (右列) 的 PCt 和 PCs; (a, d) CCSM4.0 回报 PCt; (b, e) RegCM4.4 回报 PCt; (c, f) 两个模式回报 PCs
Fig. 3 PCt and PCs (the temporal and spatial prediction consistency of the anomaly sign) results for temperature (left column) and precipitation (right column) in JJA: (a, d) PCt hindcasted by CCSM4.0; (b, e) PCt hindcasted by RegCM4.4; (c, f) PCs hindcasted by CCSM4.0 and RegCM4.4

CCSM4.0 在空间分布上大体相似 (图 3b)。两个模式回报的气温 PCs 年际变化趋势基本一致, 数值上年际波动较大, CCSM4.0 在 20.3%~64.4%, 多年平均值为 48.9%; RegCM4.4 回报气温结果略好, 逐年数值在 26.4%~64.8%, 多年平均值为 49.8% (图 3c)。

CCSM4.0 回报的降水 PCt 如图 3d 所示, 大值区分布在西北、东北、四川、陕西、以及黄淮等地, 和回报的降水 ACCt 正值区 (图 2d) 对应。RegCM4.4 回报降水 PCt 空间分布和 CCSM4.0 大致一致, 包括更为细致的空间分布 (图 3e)。两个模式回报降水 PCs 的年际变化也基本一致, 回报数值 CCSM4.0 在 37.2%~60.2%, 多年平均值为 50.7%; RegCM4.4 在 45.7%~57.6%, 多年平均值为 51.7% (图 3f)。

3.4 趋势异常综合评分 (PS)

图 4a 和 4b 分别给出两个模式回报的基于 2400 观测站点的逐年气温和降水 PS 评分。两个模式回报气温的 PS 变化趋势基本一致 (图 4a), 如 2005 年均数值较高, 分别为 82.8 和 79.2, 2004 年均数值较低等。2001~2010 年, CCSM4.0 回报气温 PS 在不同年份差别很大, 数值范围在 29.1~83.9, 多年平均为 62.7; RegCM4.4 回报气温 PS 同样在不同年份差别很大, 数值范围在 28.9~79.2, 多年平均为 63.4。和气温相比, 两个模式回报的降水 PS 数值在不同年份较为稳定, 除 CCSM 在 2009 年较低 (57.6) 外, 一般在 70 左右, 其中 CCSM4.0 的多年值在 57.6~75.8, 平均为 70.4, RegCM4.4 的值在 68.2~80.1, 平均为 71.4。

3.5 降水回报个例分析

图 5 给出 2003 年和 2009 年观测和两个模式的

回报的降水结果。由 ACCs、PCs、PS 3 个指标看, 2003 年是两个模式回报效果均较好的情况, 2009 年则 CCSM4.0 回报较差, RegCM4.4 较好。中国汛期短期气候预测业务重点关注东部降水。2003 年夏季, 中国东部降水 (图 5a) 与常年相比, 长江以南偏少, 黄淮江淮偏多, 华北偏少, 主要多雨区位于淮河流域和东北。CCSM4.0 回报结果中, 黄淮江淮降水偏多与观测相近, 但中心位置偏西 (图 5b), 而江南以多雨、东北以少雨为主, 和观测相反, 对西北地区的回报则与观测接近, 以偏少为主。CCSM4.0 回报降水的 ACCs、PCs 和 PS 分别为 0.24、60.2% 和 75.8。RegCM4.4 对东部雨带位置的回报总体较好, 降水中心位于淮河流域, 华北和江南的降水偏少, 均和观测相吻合 (图 5c), 回报降水的 ACCs、PCs 和 PS 分别为 0.28、58.4% 和 80.1。2003 年夏季 RegCM4.4 较好的模拟了中国降水的主要特征, 丁一汇等 (2004) 和杨紫薇等 (2008) 利用国家气候中心全球 T63 海气耦合模式嵌套区域气候模式 (RegCM_NCC) 也得到类似的结论。

2009 年夏季, 中国大部分地区降水偏少, 仅在西部黄河长江源区、东北北部和其他几个零散地区降水偏多 (图 5d)。CCSM4.0 回报中国降水整体偏多, 仅在一些分散的区域回报结果和观测一致 (图 5e), ACCs、PCs 和 PS 分别为 0.21、37.2% 和 57.6。RegCM4.4 回报降水的距平分布在许多地区 (如华北和东北) 和 CCSM4.0 一致的同时, 在一些地区回报则有较大改进, 如江南和西北及内蒙中西部的少雨区范围更大等, 和观测更加接近 (图 5f), ACCs、PCs 和 PS 分别为 0.20、51.7% 和 69.8, 明显好于 CCSM4.0 回报。

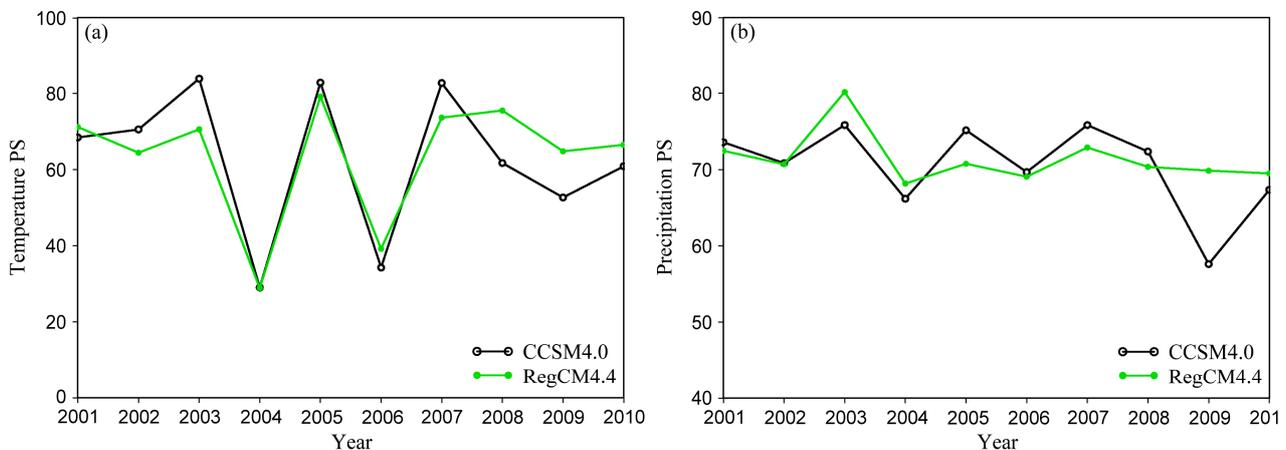


图 4 回报的夏季 (a) 气温 PS 和 (b) 降水 PS

Fig. 4 PS (Prediction Score) results for temperature and precipitation in JJA during the hindcast period: (a) PS for temperature; (b) PS for precipitation

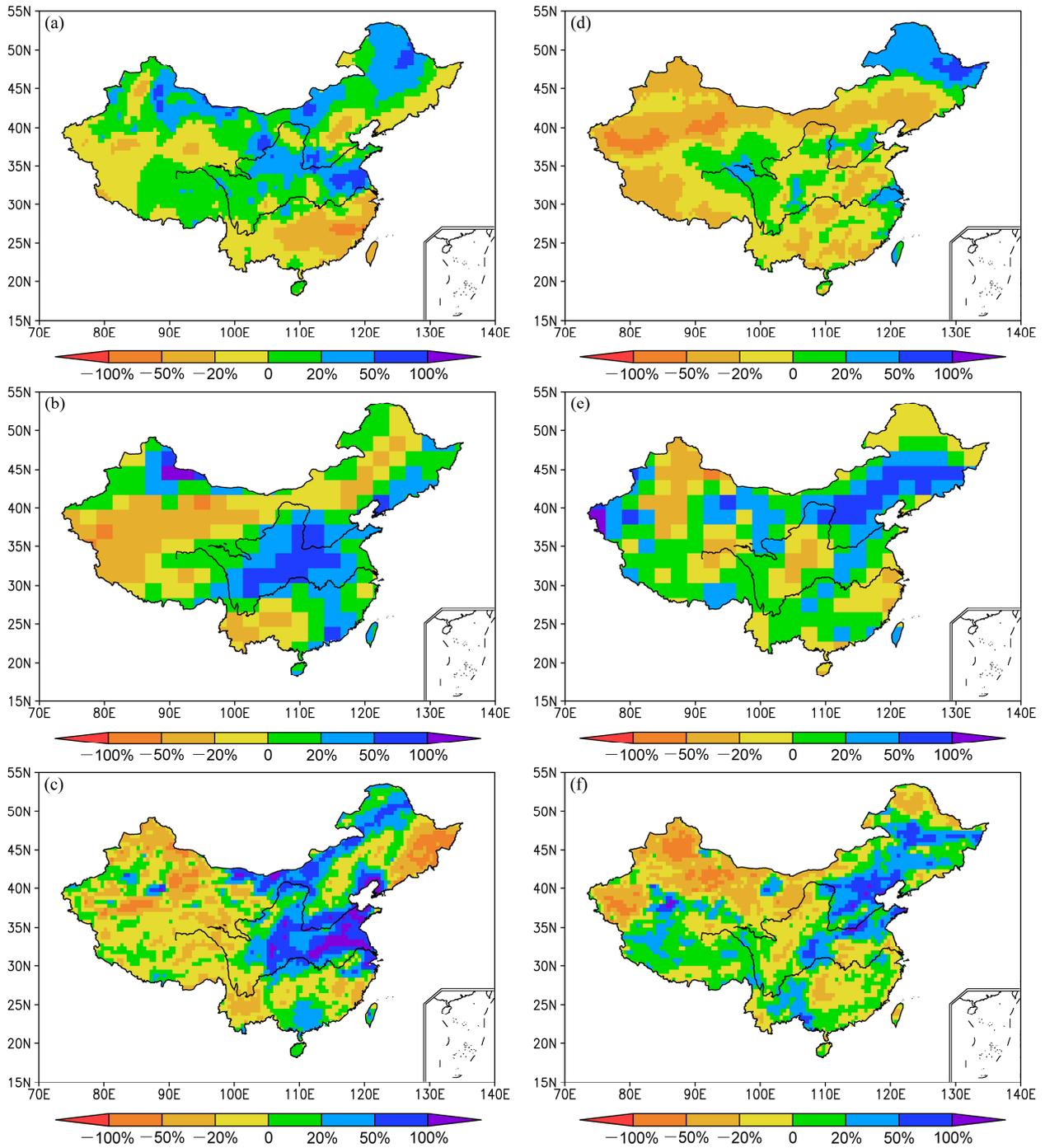


图5 2003年(左列)和2009年(右列)夏季降水距平百分率:(a、d)观测;(b、e)CCSM4.0回报;(c、f)RegCM4.4回报
Fig. 5 The precipitation anomaly percentage in JJA 2003 (left column) and 2009 (right column): (a, d) Observation; (b, e) hindcast by CCSM4.0; (c, f) hindcast by RegCM4.4

4 结论和讨论

使用 RegCM4.4 嵌套 CCSM4.0 进行 2001~2010 年逐年 2 月 1 日至 9 月 1 日的回报试验,对比分析了 CCSM4.0 和 RegCM4.4 两个模式对中国区

域夏季气温、降水的回报水平。

和连续长期的气候模拟结果相似 (Gao et al., 2001, 2008, 2012, 2013), 这里的气候预测回报试验中, 区域模式对夏季多年平均气温、降水的回报效果较全球模式有明显的提高, 特别在提供更详细的空间分布信息方面。同时在以往的气候变化模

拟中,在温室气体强迫下,区域模式和其驱动场全球模式预估的未来气温变化基本一致,但降水变化差异很大(Gao et al., 2008, 2012)。而在本文的季节预测试验中,两个模式回报气温、降水年际距平的差别均不如上述气候变化模拟中的大,这里区域模式更多起的是传统意义上的降尺度作用,即在空间分布上细化全球模式的结果。

具体对于气温的回报能力,由 ACCt 和 PCt 均可反映出 CCSM4.0 对于中国东北和江南的气温有较好的回报效果,RegCM4.4 则在回报效果较好的地区中增加了黄淮、江淮。由 ACCs 反映的区域整体回报效果以 CCSM4.0 较好(全球和区域模式分别为 0.26 和 0.15),但由 PCs 和 PS 来看两者的差别则不大,其中气温回报的 PS 评分在一些年可以出现非常低的情况。

对于降水的回报能力,由 ACCt 可以看到 RegCM4.4 的正值及达到信度水平的地区较 CCSM4.0 多但分布较零散,RegCM4.4 回报效果较好的地区包括东北、黄淮江淮、长江下游、西南和西北大部分地区,和气温一样,黄淮江淮改进明显,CCSM4.0 和 RegCM4.4 降水回报的 ACCs 数值分别为 0.03 和 0.10。降水的 PS 在各年相对气温比较稳定,除 CCSM4.0 的个别年外,大部分在 70 左右。

中国大陆大部分地区处于中高纬度,天气气候系统复杂,对季节尺度预测产生影响的因子很多,包括南方的热带系统和海洋、中高纬度环流、复杂地形(如青藏高原积雪)等,可预报性较低。在本文的试验中,区域模式对于降水的回报效果较全球模式有所改进,但不如在全球模式本身预测技巧高的热带地区的提高明显(Sun et al., 2006; Cocke et al., 2007)。本研究中区域模式对黄淮、江淮地区改进明显,可能是源于区域模式更适合区域尺度气候问题的物理参数化方案和较高的模式分辨率。

本研究是新版区域模式 RegCM4.4 在季节预测工作中的初步尝试,其中存在的问题和有待完善之处仍很多,如在每一年回报中的样本数目只有一个,不能进行多样本集合分析,试验的年份不够多(10 年),同时对于区域模式改进的具体原因分析也有所欠缺,均将是在未来的工作中需要进一步改进的地方。关于集合样本的数目,目前不同的研究和业务中所使用的个数也有所不同,如由 7 个到 40 个不等(郎咸梅等, 2004; Palmer et al., 2004; Saha et al., 2006, 2014),具体在计算条件有限的情况

下使用多少合适,也是需要探讨的问题。最后在未来的工作中,我们还将尝试多全球模式和多区域模式的预测集合,对陆面变量进行更好的同化(Koster et al., 2010),以及进行更高分辨率的模拟等,从而更好的了解中国地区的可预报性,并为最终提高汛期气候特别是降水的预测技巧服务。

参考文献 (References)

- Arribas A, Glover M, Maidens A, et al. 2011. The GloSea4 ensemble prediction system for seasonal forecasting [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 139 (6): 1891–1910.
- Behringer D, Xue Y. 2004. Evaluation of the global ocean data assimilation system at NCEP: The Pacific Ocean [C]// Eighth Symposium on Integrated Observing and Assimilation Systems for Atmosphere, Oceans, and Land Surface, AMS 84th Annual Meeting. Seattle, Washington: Amer. Meteor. Soc., 11–15.
- Cocke S, LaRow T E. 2000. Seasonal predictions using a regional spectral model embedded within a coupled ocean-atmosphere model [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 128 (3): 689–708.
- Cocke S, LaRow T E, Shin D W. 2007. Seasonal rainfall predictions over the Southeast United States using the Florida State University nested regional spectral model [J]. *J. Geophys. Res.*, 112: D04106.
- 丁一汇, 李清泉, 李维京, 等. 2004. 中国业务动力季节预报的进展[J]. *气象学报*, 62 (5): 598–612. Ding Yihui, Li Qingquan, Li Weijing, et al. 2004. Advance in seasonal dynamical prediction operation in China [J]. *Acta Meteorologica Sinica (in Chinese)*, 62 (5): 598–612.
- Doblas-Reyes F J, Garcia-Serrano J, Lienert F, et al. 2013. Seasonal climate predictability and forecasting: Status and prospects [J]. *WIREs Climate Change*, 4 (4): 245–268.
- Flato G, Marotzke J, Abiodun B, et al. 2013. Evaluation of climate models [M]// Stocker T F, Qin D, Plattner G K et al, eds. *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA: Cambridge University Press, 741–866.
- Gao X J, Zhao Z C. 2000. Experiments of short-term climate prediction by the OSU/NCC GCM for summer season in China [J]. *J. Meteor. Res.*, 14 (3): 280–292.
- Gao X J, Zhao Z C, Ding Y H, et al. 2001. Climate change due to greenhouse effects in China as simulated by a regional climate model [J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 18 (6): 1224–1230.
- Gao X J, Xu Y, Zhao Z C, et al. 2006. On the role of resolution and topography in the simulation of East Asia precipitation [J]. *Theor. Appl. Climatol.*, 86: 173–185.
- Gao X J, Shi Y, Song R, 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, Zhang D F, et al. 2012. Uncertainties in monsoon precipitation projections over China: Results from two high resolution

- RCM simulations [J]. *Climate Research*, 52 (1): 213–226.
- Gao X J, Wang M L, Giorgi F. 2013. Climate change over China in the 21st century as simulated by BCC-CSM1.1-RegCM4.0 [J]. *Atmospheric and Oceanic Science Letters*, 6 (5): 381–386.
- Gent P R, Danabasoglu G, Donner L J, et al. 2011. The community climate system model version 4 [J]. *J. Climate*, 24 (19): 4973–4991.
- Giorgi F, Coppola E, Solmon F, et al. 2012. RegCM4: Model description and preliminary tests over multiple CORDEX domains [J]. *Climate Research*, 52 (1): 7–29.
- 鞠丽霞, 王会军. 2006. 用全球大气环流模式嵌套区域气候模式模拟东亚现代气候 [J]. *地球物理学报*, 49 (1): 52–60. Ju Lixia, Wang Huijun. 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 (in Chinese)*, 49 (1): 52–60.
- 鞠丽霞, 郎咸梅. 2012. RegCM3-IAP9L-AGCM 对中国跨季度短期气候预测的回报试验研究 [J]. *气象学报*, 70 (2): 244–252. Ju Lixia, Lang Xianmei. 2012. Hindcast experiment of extraseasonal short-term summer climate prediction over China with RegCM3_IAP9L-AGCM [J]. *Acta Meteorologica Sinica (in Chinese)*, 70 (2): 244–252.
- Kirtman B, Pirani A. 2009. The state of the art of seasonal prediction: Outcomes and recommendations from the first world climate research program workshop on seasonal prediction [J]. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 90 (4): 455–458.
- Kirtman B, Power S B, Adedoyin A J, et al. 2013. Near-term climate change: Projections and predictability [M]// Stocker T F, Qin D, Plattner G K, et al, eds. *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA: Cambridge University Press, 953–1028.
- Koster R D, Mahanama S P P, Yamada T J, et al. 2010. Contribution of land surface initialization to subseasonal forecast skill: First results from a multi-model experiment [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 37 (2): L02402.
- 郎咸梅, 王会军, 周广庆. 2003. 我国 2003 年冬季气候特征与 2004 年春季沙尘气候形势的实时预测初步报告 [J]. *气候与环境研究*, 8 (4): 381–386. Lang Xianmei, Wang Huijun, Zhou Guangqing. 2003. Real-time prediction of the climate feature for 2003 winter and dust climate for 2004 spring over China [J]. *Climatic and Environmental Research (in Chinese)*, 8 (4): 381–386.
- 郎咸梅, 王会军, 姜大膀. 2004. 应用九层全球大气格点模式进行跨季度短期气候预测系统性试验 [J]. *地球物理学报*, 47 (1): 19–24. Lang Xianmei, Wang Huijun, Jiang Dabang. 2004. Extraseasonal short-term predictions of summer climate with IAP9L-AGCM [J]. *Chinese Journal of Geophysics (in Chinese)*, 47 (1): 19–24.
- 李维京, 张培群, 李清泉, 等. 2005. 动力气候模式预测系统业务化及其应用 [J]. *应用气象学报*, 16 (增刊): 1–11. Li Weijing, Zhang Peiqun, Li Qingquan, et al. 2005. Research and operational application of dynamical climate model prediction system [J]. *Journal of Applied Meteorological Science (in Chinese)*, 16 (suppl.): 1–11.
- 林朝晖, 李旭, 赵彦, 等. 1998. 中国科学院大气物理研究所短期气候预测系统的改进及其对 1998 年全国汛期旱涝形势的预测 [J]. *气候与环境研究*, 3 (4): 339–348. Lin Zhaohui, Li Xu, Zhao Yan, et al. 1998. An improved short-term climate prediction system and its application to the extraseasonal prediction of rainfall anomaly in China for 1998 [J]. *Climatic and Environmental Research (in Chinese)*, 3 (4): 339–348.
- 马洁华, 王会军. 2014. 一个基于耦合气候系统模式的气候预测系统的研制 [J]. *中国科学: 地球科学*, 44 (8): 1689–1700. Ma Jiehua, Wang Huijun. 2014. Design and testing of a global climate prediction system based on a coupled climate model [J]. *Science China: Earth Sciences*, 57 (10): 2417–2427.
- NCEP. 2000. updated daily. NCEP FNL Operational Model Global Tropospheric Analyses, continuing from July 1999[J/OL]. Research Data Archive at the National Center for Atmospheric Research, Computational and Information Systems Laboratory. <http://rda.ucar.edu/datasets/ds083.2>. Accessed in 15 Mar 2010.
- Palmer T N, Doblas-Reyes F J, Hagedorn R, et al. 2004. Development of a European multimodel ensemble system for seasonal-to-interannual prediction (DEMETER) [J]. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 85 (6): 853–872.
- Saha S, Nadiga S, Thiaw C, et al. 2006. The NCEP climate forecast system [J]. *J. Climate*, 19 (15): 3483–3517.
- Saha S, Moorthi S, Pan H L, et al. 2010. The NCEP climate forecast system reanalysis [J]. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 91 (8): 1015–1057.
- Saha S, Moorthi S, Wu X R, et al. 2014. The NCEP climate forecast system version 2 [J]. *J. Climate*, 27 (6): 2185–2208.
- Sun L Q, Li H L, Zebiak S E, et al. 2006. An operational dynamical downscaling prediction system for Nordeste Brazil and the 2002–04 real-time forecast evaluation [J]. *J. Climate*, 19 (10): 1990–2007.
- Wang H J. 1994. Modelling the interannual variation of regional precipitation over China [J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 11 (2): 230–238.
- Wang H J, Xue F, Bi X Q. 1997. The interannual variability and predictability in a global climate model [J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 14 (4): 554–562.
- Wang H J, Zhou G Q, Lin Z H, et al. 2001. Recent researches on the short-term climate prediction at IAP—A brief review [J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 18 (5): 929–936.
- 王会军, 周广庆, 林朝晖. 2002. 我国近年来短期气候预测研究的若干进展 [J]. *气候与环境研究*, 7 (2): 220–226. Wang Huijun, Zhou Guangqing, Lin Zhaohui. 2002. Reviews on study of the short-term climate prediction in China [J]. *Climatic and Environmental Research (in Chinese)*, 7 (2): 220–226.
- Xu Y L, Zhang Y, Lin E D, et al. 2006. Analyses on the climate change responses over China under SRES B₂ scenario using PRECIS [J]. *Chinese Science Bulletin*, 51 (18): 2260–2267.
- 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 (4): 763–772.
- 吴佳, 高学杰. 2013. 一套格点化的中国区域逐日观测资料及与其它资料的对比 [J]. *地球物理学报*, 56 (4): 1102–1111. Wu Jia, Gao Xuejie. 2013. A gridded daily observation dataset over China region and comparison with the other datasets [J]. *Chinese Journal of Geophysics (in Chinese)*, 56 (4): 1102–1111.
- 杨雅薇, 陈伯民, 董广涛, 等. 2008. 区域气候模式 RegCM_NCC 在华东地区的业务应用 (II): 10 年夏季回报试验 [J]. *高原气象*, 27 (增刊): 32–41. Yang Yawei, Chen Bomini, Dong Guangtao, et al. 2008. An

- application of regional climate model (RegCM_NCC) in operation over the eastern China (II): 10-year summer time hindcasts [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 27 (Suppl.): 32–41.
- 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 (6): 325–329.
- Yuan X, Liang X Z. 2011. Improving cold season precipitation prediction by the nested CWRF-CFS system [J]. Geophys. Res. Lett., 38 (2): L02706.
- Yuan X, Liang X Z, Wood E F. 2012. WRF ensemble downscaling seasonal forecasts of China winter precipitation during 1982–2008 [J]. Climate Dyn., 39 (7–8): 2041–2058.
- 曾庆存, 袁重光, 王万秋, 等. 1990. 跨季度气候距平数值预测试验[J]. 大气科学, 14 (1): 10–25. Zeng Qingcun, Yuan Chongguang, Wang Wanqiu, et al. 1990. Experiments in numerical extra-seasonal prediction of climate anomalies [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 14 (1): 10–25.
- 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 (5): 444–452. Zhang Dongfeng, Ouyang Licheng, Gao Xuejie, et al. 2007. Simulation of the atmospheric circulation over East Asia and climate in China by RegCM3 [J]. Journal of Tropical Meteorology (in Chinese), 23 (5): 444–452.
- 张新时. 2007. 中华人民共和国植被图 (1:1000000) [M]. 北京: 地质出版社, 1270pp. Zhang Xinshi. 2007. Vegetation map of the Peoples Republic of China(1: 1000000) (in Chinese) [M]. Beijing: China Map Press, 1270pp.
- 邹立维, 周天军. 2012. 区域海气耦合模式研究进展 [J]. 地球科学进展, 27 (8): 857–865. Zou Liwei, Zhou Tianjun. 2012. A review of development and application of regional ocean-atmosphere coupled model[J]. Advances in Earth Science (in Chinese), 27 (8): 857–865.
- Zou L W, Zhou T J. 2013. Near future (2016–40) summer precipitation changes over China as projected by a regional climate model (RCM) under the RCP8.5 emissions scenario: Comparison between RCM downscaling and the driving GCM [J]. Advances in Atmospheric Sciences, 30 (3): 806–818.