

陶纯苇, 姜超, 孙建新. 2016. CMIP5 模式对中国东北气候模拟能力的评估 [J]. 气候与环境研究, 21 (3): 357–366. Tao Chunwei, Jiang Chao, Sun Jianxin. 2016. Evaluation of CMIP5 models performance on climate simulation in Northeast China [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 21 (3): 357–366, doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2015.15275.

CMIP5 模式对中国东北气候模拟能力的评估

陶纯苇 姜超 孙建新

北京林业大学林学院, 北京 100083

摘 要 利用 CN05 观测资料和参与 IPCC 第五次评估报告的 45 个全球气候系统模式的模拟结果, 分析了新一代全球气候模式对中国东北三省 (1961~2005 年) 气温和降水的模拟能力。结果表明: 1) 绝大多数模式都能较好地模拟出研究区内显著增温的趋势, 对气温的年际变化模拟能力则相对有限; 2) 所有模式均能很好地再现气温气候态的空间分布特征, 且多模式集合模拟结果优于绝大多数单个模式, 空间相关系数达到了 0.96; 3) 对于降水的模拟结果, 模式间差异较大, 多模式集合能较好地再现其空间分布规律 (空间相关系数为 0.86), 对降水年际变化及线性变化趋势的模拟能力则较差。总体来说, 多模式集合对东北气候的时空变化特征具有一定的模拟能力, 且对气温模拟效果优于降水, 对空间分布的模拟能力优于时间变化。

关键词 CMIP5 模式 气温 降水 评估 中国东北三省

文章编号 1006-9585 (2016) 03-0357-10

中图分类号 P467

文献标识码 A

doi:10.3969/j.issn.1673-503X.2010.03.001.

Evaluation of CMIP5 Models Performance on Climate Simulation in Northeast China

TAO Chunwei, JIANG Chao, and SUN Jianxin

College of Forestry, Beijing Forestry University, Beijing 100083

Abstract Based on observational data of CN05 (daily observations on a 0.5° latitude–longitude grid over China) and outputs of 45 CMIP5 (Coupled Model Inter-comparison Project Phase 5) models adopted in the Fifth Assessment of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC AR5), the capability of new generation climate models on simulating air temperature and precipitation over the three provinces in Northeast China during 1961–2005 are evaluated. Results show that: 1) Most of the models are capable of reproducing the significant warming trend during 1961–2005 in the three provinces in Northeast China; however, they have limited ability to realistically simulate the interannual variation of mean surface air temperature. 2) All models can well capture the spatial distribution of surface air temperature, with the MME (the multi-model ensemble mean) more consistent with observations than results of most individual models (the spatial correlation coefficient between MME and observations is up to 0.96). 3) There are large differences in precipitation simulations between various climate models. Although the multi-model ensemble approach has limited ability in simulating the interannual variation and linear trend of regional mean precipitation, it can better capture the spatial pattern of precipitation than any individual models (the spatial correlation coefficient is up to 0.86). Generally speaking, the multi-model ensemble approach has proven effective at simulating the spatial-temporal variations of surface climate in

收稿日期 2015-05-10; 网络预出版日期 2015-12-14

作者简介 陶纯苇, 女, 1990 年出生, 硕士研究生, 主要研究方向为全球气候变化生态学。E-mail: tcw_peach1020@163.com

通讯作者 姜超, E-mail: jiangchao@bjfu.edu.cn

资助项目 国家林业公益性行业科研专项 201404201, 北京林业大学青年科技启动基金资助项目 BLX2011002

Funded by The National Special Forestry Research Fund for the Public Benefits (Grant No. 201404201), Beijing Forestry University Young Scientist Fund (Grant No. BLX2011002)

Northeast China. Specifically, it performs better in the simulation of surface air temperature than the simulation of precipitation. The spatial patterns of surface air temperature and precipitation are also better represented than their temporal variations in the model results.

Keywords CMIP5 models, Air temperature, Precipitation, Evaluation, Northeast China

1 引言

近年来,全球气候变化得到了国内外的广泛关注。其中,气候变暖作为气候变化中的重要部分,已成为各国政府最为关心的事情之一。根据政府间气候变化专门委员会(Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC)第五次评估报告(IPCC, 2013)的主要结论,1880~2012年全球平均地表温度升高了0.85℃。自1901年以来,北半球中纬度陆地地区的降水量已明显增加,且高温酷暑、洪涝干旱等极端气候事件发生的频率也显著增大(Chen et al., 2012)。近几十年来,我国东北地区的气温也有显著升高的趋势,1961~2010年年均温的上升速率为 $0.36\text{ }^{\circ}\text{C}(10\text{ a})^{-1}$ (孙倩倩和刘晶淼, 2014);降水则呈现不均匀分布,干旱现象持续发生(马建勇等, 2013)。而东北三省作为我国重要的商品粮食基地,拥有丰富的林业资源,其气候变化将给东北乃至全国的粮食安全和林业资源带来许多不可预测的影响,因此研究东北的气候变化有着重要的意义。

气候模式作为气候变化研究中的重要技术(王绍武等, 2013),在研究气候变化机理和预测未来气候变化中有着至关重要的作用(辛晓歌等, 2012)。自全球耦合模式比较计划(Coupled Model Inter-comparison Project, CMIP)成立以来,已建立起一个内容广泛的模式资料库(王澄海等, 2009)。目前已有上百个模式先后参与了全球气候评估。各国学者也基于参与耦合模式比较计划第三阶段(CMIP3)的模式模拟结果进行了各项研究(江志红等, 2009; Brunsell et al., 2010; 陶辉等, 2012; Jiang and Tian, 2013)。

自2008年以来,已有60多个气候模式参与了全球耦合模式比较计划第五阶段(CMIP5),各国学者分别利用不同的CMIP5气候模式模拟结果对全球各区域进行了气候评估。Otieno and Anyah (2013)利用CMIP5模式输出结果对非洲之角的气候进行评估发现,一些模式将季节降水的位置北移了。姜燕敏和吴昊旻(2013)的研究表明,20个

CMIP5气候多模式集合平均能较好地模拟出1951~2005年中亚地区的显著增温趋势,同时能较好的再现年均温的空间分布特征,尤其体现在高低温区的分布上。

我国学者在此方面也展开了一系列工作,并取得了一些很有意义的成果。Guo et al. (2013)的研究发现CMIP5多模式模拟的1901~1999年中国年均温的线性趋势为 $0.65\text{ }^{\circ}\text{C}(100\text{ a})^{-1}$,其结果比CMIP3模式模拟结果 $[0.72\text{ }^{\circ}\text{C}(100\text{ a})^{-1}]$ 更接近于观测值 $[0.64\text{ }^{\circ}\text{C}(100\text{ a})^{-1}]$ 。Xu and Xu (2012)的研究表明CMIP5模式能较好地模拟出降水在中国区域内由东南至西北逐渐减少的趋势,但存在系统偏差。

对于气候模式在中国东北三省的应用,目前已有学者对CMIP3模式或区域模式的模拟能力进行过评估(李辑等, 2010; Gao et al., 2012)。崔妍等(2013)在 1° (纬度) $\times 1^{\circ}$ (经度)水平分辨率上评估了5个CMIP3模式对1961~2000年东北地区地面温度的模拟能力,指出模式对地面温度的模拟值偏低,且对年变化的模拟优于年际变化。那么如果在更高的水平分辨率基础上,采用更多更新的气候模式数据和更为可靠的观测资料,新一代的CMIP5模式对东北气候的模拟能力又会是怎样呢?围绕这些问题,本文利用CN05观测资料和45个CMIP5全球气候系统模式的模拟结果,评估并分析了新一代气候模式对中国东北三省(1961~2005年)气温和降水的模拟能力,并选出对东北气候模拟相对可靠的模式,为预估东北未来气候做铺垫。

2 数据与方法

2.1 全球气候模式资料

本文所用的气候模式资料为CMIP5地球系统模式(ESM)的历史模拟试验数据,所取时间段为1961~2005年。根据这一时段气温与降水数据的可利用性,共选取了45个地球系统模式的数据,更多细节请参见相关网站(<http://cmip-pcmdi.llnl.gov/cmip5/> [2016-03-20])。相比于CMIP3,新一代的CMIP5模式(Taylor et al., 2012)具有许多明显的改进,如

地球系统模式就加入了对生物地球化学循环的描述(王绍武等, 2013), 增加了更多的评估方法, 更加重视精确性(胡国权和赵宗慈, 2014)。

2.2 观测资料

本文所使用的气温和降水的观测数据均来自 CN05 数据(Xu et al., 2009), 该数据主要是基于全国 700 多个气象站的观测资料建立起的一套 0.5° (纬度) $\times 0.5^{\circ}$ (经度) 分辨率的格点资料, 时间跨度为 1956~2005 年。该套资料已被多次用于气候模式的评估, 数据可靠(Guo et al., 2013)。

2.3 分析方法

考虑到各个模式的水平分辨率不同, 为方便对比, 首先利用双线性插值法(胡琴等, 2014)将所有模式数据统一插值到与 CN05 数据分辨率相同的网格点 [0.5° (纬度) $\times 0.5^{\circ}$ (经度)] 上。然后, 选取中国东北三省作为研究区, 包括辽宁省、吉林省和黑龙江省, 共计 371 个格点。此外, 因为 45 个模式采用的地形资料和水平分辨率均不相同, 所以在对模式气温数据进行插值时便会因地形起伏而带来误差。因此, 为了消除这类偏差, 本文在对模拟的气温数据进行插值以后, 又统一根据英国东英格利亚大学气候研究所(CRU)所提供的地形高度对模式的气温数据进行了地形效应校正(Zhao et al., 2008) [气温直减率取 $0.65^{\circ}\text{C} (100\text{ m})^{-1}$]。

在评估模式模拟能力的过程中, 文章首先对单个模式从区域平均、时间变化和空间分布这几个角度来评估 CMIP5 模式模拟东北三省历史气候变化的能力, 然后通过一些量化评估方法筛选出对东北气候模拟能力较好的模式, 进行等权重集合平均, 最后对多模式集合输出结果进行评估与分析。

3 单个模式对东北三省气温和降水的模拟

3.1 单个模式对东北三省气温的模拟

气温作为最基本的气象要素之一(Sun and Ao, 2013), 在气候变化研究中受到了广泛的关注(Zhao et al., 2008)。为了评估各模式对区域平均气温气候态逐月变化的模拟能力, 分别将 45 个 CMIP5 模式和 CN05 数据的平均气温逐月气候值(1961~2005 年)绘于图 1a 中。从图 1a 中可以看出, 45 个模式模拟的区域平均气温气候态的逐月变化与观测变化呈现出较好的一致性, 均能反映出东北三省区域

平均气温的逐月变化规律, 但模拟的气温值与观测值存在一定的偏差。45 个模式中, 模式 EC-EARTH 与实测误差最小, 其次为 MPI-ESM-MR 和 CSIRO-Mk3-6-0。模式 EC-EARTH 的模拟结果在夏季与观测值最接近, 误差在 0.4°C 以内。与 CMIP3 模式模拟结果对比发现, CMIP5 模式对东北三省区域平均气温气候态的模拟效果有所改进。如模式 CSIRO-Mk3-6-0 对气温的模拟能力较该模式的以前版本(CSIRO-MK3-0)就有了较大提高, 年均温的模拟误差由 -3.81°C (崔妍等, 2013) 减小到了 -0.13°C 。计算 45 个模式间月平均气温模拟值之间的均方差, 发现其均方差分布在 $0.9\sim 4.9^{\circ}\text{C}$ 之间。其中 5~10 月的均方差较小, 说明模式对东北三省 5~10 月气温模拟的不确定性低于其他月份。全球气候模式模拟的不确定性(顾问等, 2010)主要来自以下两个方面: 1) 模式中对反馈机制等物理过程的描述及物理参数的选取存在着较大的不确定性; 2) 太阳参数、碳循环、 O_3 等各种外强迫以及气候系统对其的响应导致气候模式模拟结果的不确定性。

将 1961~2005 年东北三省区域平均气温的年际变化绘于图 1b, 并计算了模拟与观测序列之间的相关系数(表 1)。从图 1b 可以看出模式间存在差异, 表 1 则表明所有模式与观测序列的时间相关系数均分布在 $0.02\sim 0.71$ 之间。有 13 个模式对东北区域平均气温年际变化的模拟相对较好, 相关系数超过了 0.4 且通过 99% 的信度检验; 其中, 模拟效果最好的前两个模式为 MIROC4h 和 CanESM2, 与观测气温年际变化趋势最为接近, 相关系数均超过了 0.5 (通过了 99.9% 的信度检验)。

为了检验 CMIP5 模式对东北三省区域平均气温在 1961~2005 年间线性趋势的模拟能力, 分别计算了研究区内各模式及观测序列的线性趋势值(表 1)。可以看出, 东北三省在 1961~2005 年间的增温现象比较明显, 观测线性增温率为 $0.38^{\circ}\text{C} (10\text{ a})^{-1}$ (通过 99.9% 信度检验)。所有模式均能模拟出东北增温的趋势(表 1), 但在数值上存在一定的偏差。45 个模式模拟的线性增温率分布在 $0.05\sim 0.60^{\circ}\text{C} (10\text{ a})^{-1}$ 之间, 多数在 $0.3^{\circ}\text{C} (10\text{ a})^{-1}$ 左右。有 35 个模式模拟结果超过 95% 的信度检验, 其中对增温趋势模拟效果最好的模式为 EC-EARTH、IPSL-CM5A-LR 和 CMCC-CM, 模拟增温趋势分别为 $0.37^{\circ}\text{C} (10\text{ a})^{-1}$ 、 $0.36^{\circ}\text{C} (10\text{ a})^{-1}$ 和 $0.35^{\circ}\text{C} (10\text{ a})^{-1}$ (均通过 99.9% 的信度检验), 与观测值最接近。

表 1 1961~2005 年东北三省区域平均的年气温和年降水量的模拟值的线性趋势及其与观测值的时间相关系数

Table 1 Linear trends of simulations and time correlation coefficients of regionally averaged surface air temperature and precipitation in Northeast China between simulations and observations for the period of 1961–2005

模式 编号	模式名称	年气温		年降水量		模式 编号	模式名称	年气温		年降水量	
		线性趋势/ °C (10 a) ⁻¹	时间相 关系数	线性趋势/ mm (10 a) ⁻¹	时间相 关系数			线性趋势/ °C (10 a) ⁻¹	时间相 关系数	线性趋势/ mm (10 a) ⁻¹	时间相 关系数
01	ACCESS1-0	0.23***	0.37**	11.87	-0.15	25	GISS-E2-H-CC	0.17**	0.29*	0.08	0.09
02	ACCESS1-3	0.19***	0.23	-8.72	-0.08	26	GISS-E2-R	0.16***	0.31**	-1.69	-0.41***
03	BCC-CSM1.1	0.28***	0.44***	-0.58	-0.04	27	GISS-E2-R-CC	0.06	0.23	2.57	0.02
04	BCC_CSM1.1-M	0.25**	0.36**	11.44	-0.02	28	HadCM3	0.19**	0.32**	8.65	-0.26*
05	BNU-ESM	0.60***	0.39***	15.78	-0.09	29	HadGEM2-AO	0.27***	0.47***	22.18**	0.14
06	CanESM2	0.42***	0.52***	6.92	0.13	30	HadGEM2-CC	0.09	0.19	-19.22**	-0.14
07	CCSM4	0.25***	0.33**	10.43	-0.23	31	HadGEM2-ES	0.23***	0.34**	9.07	-0.24
08	CESM1-BGC	0.33***	0.46***	0.83	0.00	32	inmcm4	0.08	0.15	-6.55	0.03
09	CESM1-CAM5	0.09	0.27*	10.67	0.02	33	IPSL-CM5A-LR	0.36***	0.43***	12.42	0.03
10	CESM1-FASTCHEM	0.20**	0.23	13.96	0.13	34	IPSL-CM5A-MR	0.22***	0.44***	17.54*	-0.22
11	CESM1-WACCM	0.11	0.18	9.22	-0.21	35	IPSL-CM5B-LR	0.10*	0.01	2.07	-0.06
12	CMCC-CESM	0.07	0.21	9.47	0.10	36	MIROC4h	0.20***	0.54***	3.31	-0.14
13	CMCC-CM	0.35***	0.51***	5.98	0.11	37	MIROC5	0.13**	0.34**	-6.60	-0.17
14	CMCC-CMS	0.26***	0.27*	20.84**	-0.19	38	MIROC-ESM	0.07	0.07	17.67*	0.21
15	CNRM-CM5	0.22**	0.21	19.23**	-0.12	39	MIROC-ESM-CHEM	0.27***	0.16	4.81	0.11
16	CSIRO-Mk3-6-0	0.19***	0.40***	12.28	-0.23	40	MPI-ESM-LR	0.22***	0.05	-7.55	0.24
17	EC-EARTH	0.37***	0.51***	21.55**	0.15	41	MPI-ESM-MR	0.20***	0.34**	6.80	0.16
18	FGOALS-g2	0.25***	0.53***	9.18	0.01	42	MPI-ESM-P	0.29***	0.31**	-0.80	0.18
19	FIO-ESM	0.23***	0.17	11.97	-0.23	43	MRI-CGCM3	0.15**	0.29*	-24.84**	0.15
20	GFDL-CM2p1	0.25***	0.13	1.64	-0.01	44	NorESM1-M	0.29***	0.41***	-1.72	0.12
21	GFDL-CM3	0.12	0.18	-22.49	0.25	45	NorESM1-ME	0.07	0.02	-2.72	-0.01
22	GFDL-ESM2G	0.34***	0.30**	-13.64*	0.36**		MME	0.29***	0.71***	7.53*	0.11
23	GFDL-ESM2M	0.27***	0.48***	0.72	0.05		CN05	0.38***		-2.99	
24	GISS-E2-H	0.05	0.18	1.05	0.16						

注：模式编号按首字母顺序排列；MME 为 9 个相对可靠的多模式集合平均。
***表示通过 99.9%的信度检验；**表示通过 99%的信度检验；*表示通过 95%的信度检验。

取 1961~2005 年这 45 年平均作为气候态，评估 CMIP5 模式对东北三省气候空间分布的模拟。对于气温气候态的空间分布，每一个模式都能很好地抓住其地理分布特征，在一定程度上模拟出东北气温从南向北逐渐降低的纬向分布特点（图略）。各模式的模拟场与观测场的空间相关系数均超过了 0.9(模式 FIO-ESM、BNU-ESM 和 HadGEM2-AO 除外，分别为 0.85、0.88 和 0.89)，且均通过了 99.9%的信度检验。其中，空间相关系数最大的为模式 EC-EARTH，达到了 0.97。

3.2 单个模式对东北三省降水的模拟

将 1961~2005 年东北三省区域平均降水量气候态逐月变化的模拟与观测进行对比，如图 2a 所示。发现模式对逐月降水量变化的模拟效果与气温相似，绝大多数模式能模拟出降水量的逐月变化特点。相比较而言，模式 MRI-CGCM3 对东北降水量

逐月变化的模拟效果最好，变化趋势与观测基本一致，但存在数值偏差，7~8 月模拟降水量低于观测值，其他月份则高于观测值。考察模式间月平均降水量之间的均方差发现，模式对冬季降水模拟的不确定性较低，对夏季模拟的不确定性则较高。

图 2b 为 1961~2005 年东北三省区域平均降水量的年际变化图。与逐月变化相比，模式对降水的年际变化模拟相对较差，模式间差异较大。这不仅在东北地区有所体现，全国范围内也是如此(陈红，2014)。有 23 个模式对东北降水量年际变化的模拟与观测序列的相关系数为正(表 1)，但只有一个模式(GFDL-ESM2G)通过了显著性水平检验，其与观测的相关系数达到了 0.36(通过 99%的信度检验)。相比于其他模式来说，该模式对降水的年际变化模拟效果最好，但在数值上存在系统性偏高。

对东北三省区域平均降水的线性趋势分析可

看出(表 1), 东北在 1961~2005 年间区域平均年降水量的线性趋势虽为负值 $[-2.99 \text{ mm} (10 \text{ a})^{-1}]$, 但并未通过显著性检验, 可见东北在这 45 年间年降水量波动较大, 并无明显的增加或减少趋势。45 个 CMIP5 模式中, 有 10 个模式模拟东北降水为明显的增加或减少趋势, 说明这 10 个模式对东北降水的线性趋势模拟有一定的偏差。

绝大多数模式对降水的空间分布模拟较好, 在一定程度上模拟出了东北降水从东南向西北逐渐减少的空间分布特征(图略)。模拟场与观测场的空间相关系数分布在 0.15~0.90 之间(均通过 99.9% 的信度检验), 多数在 0.75 左右, 有 11 个模式模拟结果超过了 0.8。其中, 对降水空间分布模拟最好的为模式 EC-EARTH, 空间相关系数达到了 0.90, 其次是 MPI-ESM-LR、MIROC5 和 MPI-ESM-P, 分别为 0.86、0.85 和 0.85。

4 多模式集合对东北三省气温和降水的模拟

4.1 模式的选择

为了客观地衡量 45 个 CMIP5 地球系统模式对东北三省气温和降水的模拟能力, 分别计算了 1961~2005 年东北三省标准化后的年平均气温(年平均降水量)模拟场与观测场之间的空间相关系数和时间相关系数, 以及各自的标准差之比和模拟场相对于观测场的中心化标准误差, 并将所有信息直观地绘制在泰勒图中(Jiang and Tian, 2013; Zhao et al., 2014)(图 3)。泰勒图是一种可以将两个场或两组序列间的相关系数、标准差以及标准误差这 3 个指标放在同一张图上的极坐标图。因这三者间存在着算数上的三角转换关系, 因此可以从泰勒图上全面清楚地比较出各模式模拟结果的好坏。本文中因

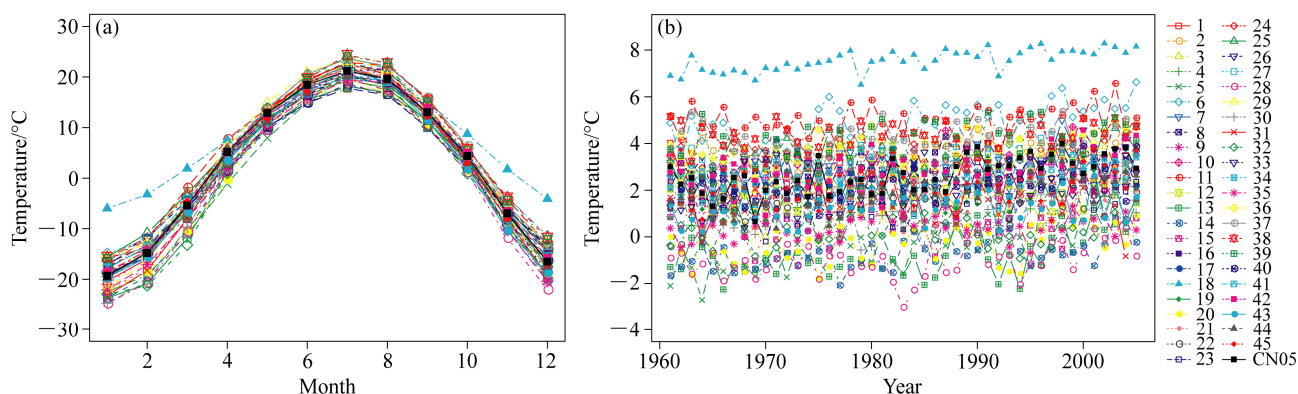


图 1 1961~2005 年东北三省各模式的区域平均气温气候态 (a) 逐月变化与 (b) 年际变化。图中黑色线条为 CN05 资料, 图例中数字分别对应表 1 中的模式编号

Fig. 1 (a) Monthly mean and (b) interannual variability of the regionally averaged surface air temperature over the three provinces in Northeast China from simulations of the 45 CMIP5 models and observations for the period of 1961–2005. Black line denotes the observational data of CN05 (daily observations on a 0.5° latitude–longitude grid over China); numbers in legend refer to model IDs listed in Table 1

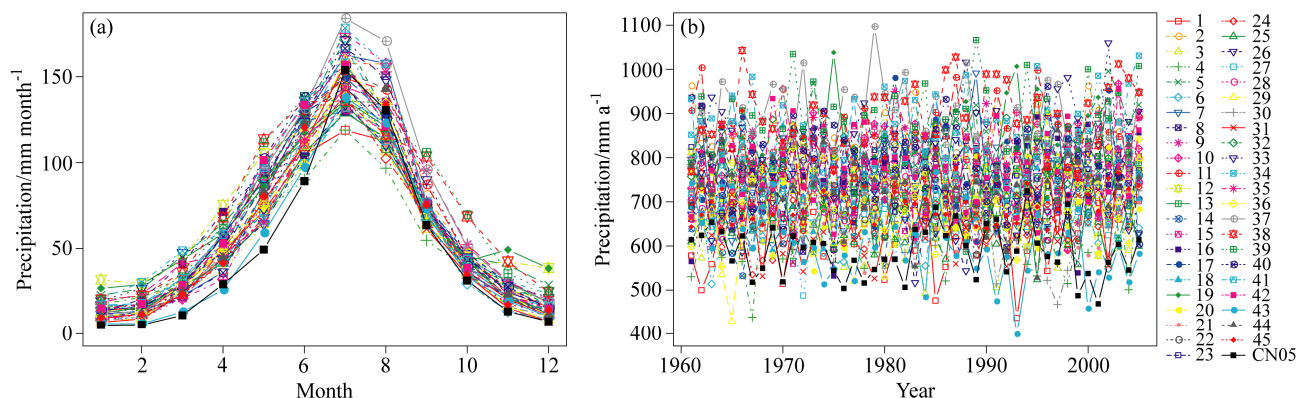


图 2 1961~2005 年东北三省各模式的区域平均降水量气候态的 (a) 逐月变化与 (b) 年际变化

Fig. 2 (a) Monthly mean precipitation averaged over the three provinces in Northeast China and (b) interannual variability of the regionally averaged precipitation from simulations of the 45 CMIP5 models and from observations for the period of 1961–2005

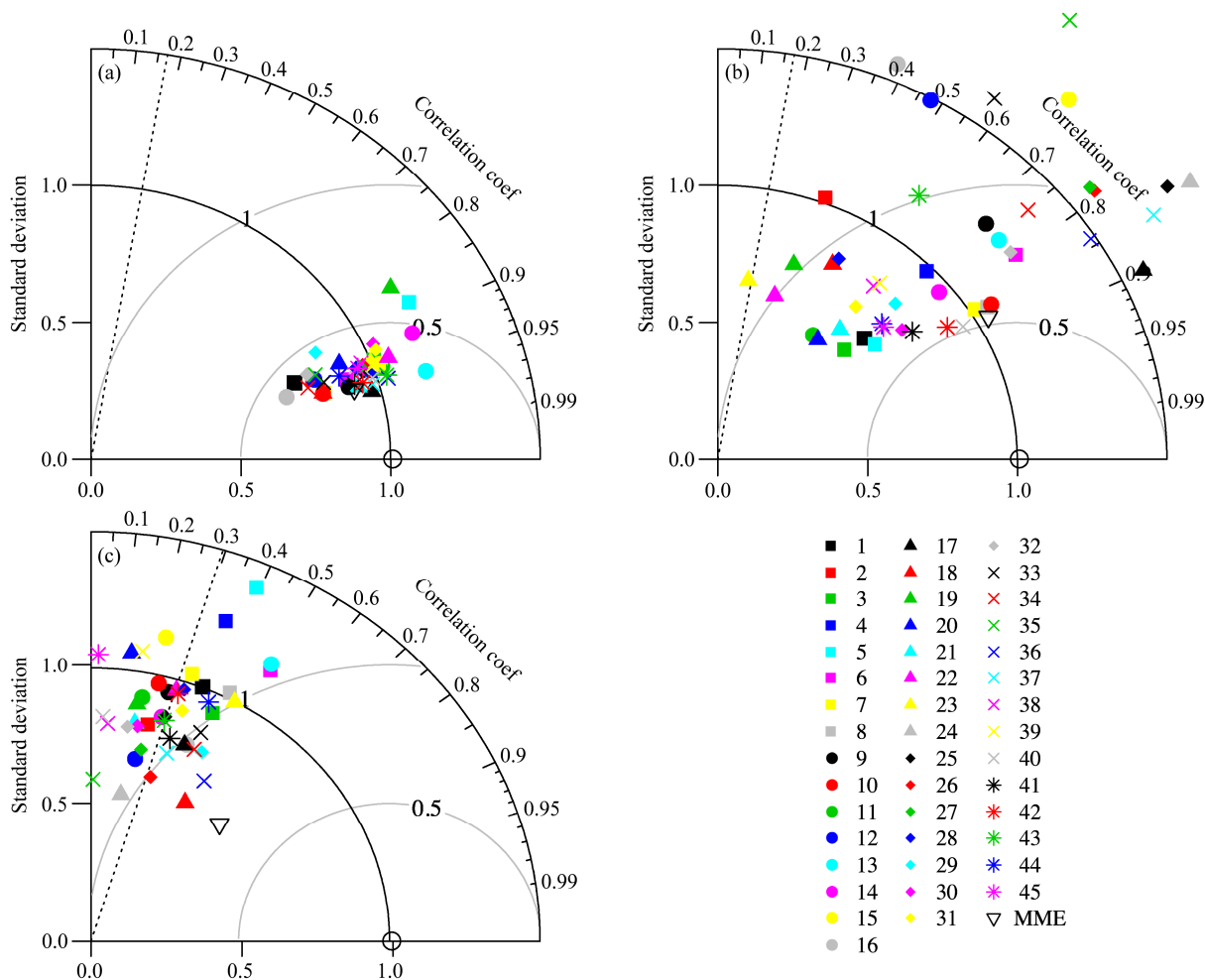


图3 在参照时段 1961~2005 年, 东北三省模拟场相对于观测场的泰勒图: (a) 气温空间分布; (b) 降水空间分布; (c) 气温时间序列。空心倒三角为模式集合, 横坐标上的空心圆表示观测

Fig. 3 Taylor diagrams displaying the statistics of spatial distributions of 45-year (1961–2005) mean (a) surface air temperature, (b) precipitation, and (c) temporal variability of regionally averaged surface air temperature in Northeast China. The inverted hollow triangle represents MME and the circle in abscissa axis represents observation

绝大多数模式对降水的时间变化模拟都相对较差, 故未考虑降水时间序列的泰勒图。如图 3 所示, 模式点到观测点的距离表示模拟场经观测场标准差标准化之后的中心化标准误差, 模式点到原点的距离表示两个场之间的标准差之比 (假定观测场标准差为 1), 模式点对应的方位角位置表示两个场之间的相关系数。综合以上 3 个指标, 当模式点到观测点的距离越短、到原点的距离越接近于 1、相关系数越大, 简言之, 即离观测点越近时, 表明该模式的模拟能力越强 (Jiang and Tian, 2013)。

综合以上定量化评估结果, 从图 3 可以看出 45 个 CMIP5 模式对东北三省在 1961~2005 年气温空间分布的模拟能力集中且与观测相关性较高; 对气

温时间序列的模拟能力较为集中但与观测相关性略低, 对降水空间场的模拟效果分歧较大。因此剔除一些对东北气候模拟能力相对较差的模式是有必要的。为此, 本文设置了四个定量标准来挑选相对可靠的模式: 1) 研究区内, 年平均气温和年平均降水的模拟场与观测场的空间相关系数均大于 0.5 且通过 99.9% 的信度检验; 2) 年平均气温空间场的中心化均方根误差与观测场标准差比值 (NCRMSE) (Jiang and Tian, 2013) 在 0.5 个标准差以内、年降水空间场的 NCRMSE 值在 1 个标准差以内; 3) 年平均气温的模拟时间序列与观测时间序列的相关系数大于 0.4 且通过 95% 的信度检验; 4) 年平均气温线性趋势模拟值介于 0.2~0.5 °C

(10 a^{-1}) 之间且通过显著性检验的 (表 1)。最终, 从 45 个 CMIP5 气候模式中选取了 9 个对 1961~2005 年东北三省气候模拟相对可靠的模式: BCC-CSM1.1、CanESM2、CESM1-BGC、CMCC-CM、EC-EARTH、HadGEM2-AO、IPSL-CM5A-MR、MIROC4h、NorESM1-M。下文中应用多模式集合 (the multi-model ensemble mean, MME), 即该 9 个模式在等权重系数条件 (姚遥等, 2012; Chen, 2013; Zhao et al., 2014) 下的集合平均, 对东北三省气温和降水进行模拟。

4.2 多模式集合对东北三省气温的模拟

相比于单个模式, 虽然多模式集合平均在某些地方可能不如单个模式模拟的好, 但就总体而言, 多模式集合仍要普遍优于绝大多数的单个模式, 与观测值的相关性较高 (图 3), 这在以往 CMIP3 及以前的模式对不同区域的研究中也已得到证实 (辛晓歌等, 2012)。对比分析 1961~2005 年东北三省气温区域平均逐月气候态的观测值与多模式集合模拟结果 (图 4a), 发现多模式集合能很好地反映出东北区域气温的逐月变化规律, 模拟气温虽与实测值略有偏差, 但仍优于绝大多数的单个模式。其中, 多模式集合对夏季和冬季气温的模拟优于春秋两季, 夏冬两季的模拟误差百分比分别为 0.97% 和 -1.44%, 而春秋两季模拟误差百分比则分别为 -21.83% 和 -10.91%。

图 4b 给出了 1961~2005 年东北三省区域平均气温观测与多模式集合的年际变化图。从图 4b 中可以看出, 多模式集合模拟的气温年际振荡幅度较小, 这是因为多模式进行集合的等权重系数法对极值有平滑作用 (姜燕敏和吴昊旻, 2013)。

多模式集合对气温年际变化的模拟与观测值的偏差基本在 $-1\sim 0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 之间, 与观测时间序列的相关系数达到了 0.71 (通过 99.9% 的信度检验), 且比任何单个模式与观测的相关性要高, 这也验证了多模式集合优于单个模式的说法。与 CMIP3 多模式集合模拟结果 (相关系数为 0.19) (崔妍等, 2013) 对比, CMIP5 多模式集合的模拟能力大大提高了。

多模式集合模拟的东北三省在 1961~2005 年间的增温趋势为 $0.29\text{ }^{\circ}\text{C} (10\text{ a})^{-1}$ (通过 99.9% 的信度检验) (表 1), 虽低于观测值 [$0.38\text{ }^{\circ}\text{C} (10\text{ a})^{-1}$], 但仍优于绝大多数单个模式模拟结果, 在一定程度上模拟出了东北气温增加的现象。此外, 东北冬季气温的增温率 [$0.57\text{ }^{\circ}\text{C} (10\text{ a})^{-1}$] 明显高于夏季 [$0.23\text{ }^{\circ}\text{C} (10\text{ a})^{-1}$], 多模式集合结果也模拟出了此特点, 模拟的冬季和夏季增温率分别为 $0.41\text{ }^{\circ}\text{C} (10\text{ a})^{-1}$ 和 $0.22\text{ }^{\circ}\text{C} (10\text{ a})^{-1}$ (均通过 99.9% 的信度检验)。

图 5 为 1961~2005 年东北三省年平均气温气候态的观测场、多模式集合模拟场与差值场的空间分布。由观测场 (图 5a) 可以看出, 辽宁省的西南部为研究区内年平均气温最高的地区, 低温区则位于黑龙江省最北部。多模式集合 (图 5b) 较好地模拟出了高低温中心, 且很好地再现了 1961~2005 年研究区内气温由南至北逐渐降低的纬向变化趋势。气温气候态的模拟场与观测场的空间相关系数达到了 0.96 (通过 99.9% 的信度检验)。从差值场 (图 5c) 来看, 除少数地区模拟出现暖偏差, 多模式集合对东北大部分地区的气候态气温值存在低估, 模拟场与观测场的系统性数值偏差绝大多数落在 $-1\sim 0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 之间。

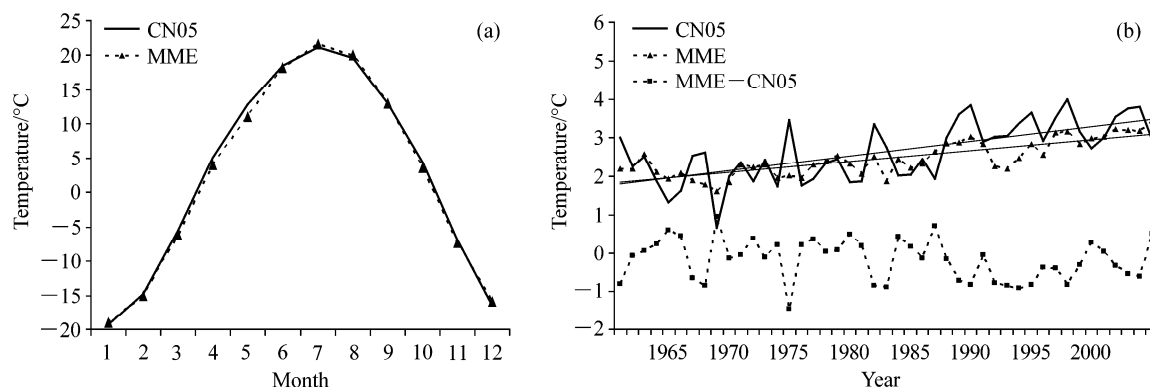


图 4 1961~2005 年东北三省观测与多模式集合的区域平均气温 (a) 逐月变化和 (b) 年际变化 (MME-CN05 为模拟值与观测值的差值)

Fig. 4 (a) Monthly mean and (b) interannual variability of the regionally averaged surface air temperature over the three provinces in Northeast China from multi-model ensemble (MME) simulation and from observations for the period of 1961–2005. MME-CN05 in Fig. b represents the differences between the simulation and observations

4.3 多模式集合对东北三省降水的模拟

从 1961~2005 年东北三省降水区域平均逐月气候态的观测值与多模式集合模拟结果对比分析中可以发现,多模式集合能较好地反映出东北三省区域多年平均降水的逐月变化规律(图 6a),模拟效果优于绝大多数单个模式,但在数值上仍存在系统性偏高。其中,多模式集合对夏季和秋季降水的模拟优于春冬两季,夏秋两季的模拟误差百分比分别为 7.78%和 22.18%。

图 6b 为 1961~2005 年东北三省区域平均降水观测与多模式集合的年际变化图。对比观测序列与模拟序列可以发现,在 1961~1992 年间,多模式集合虽在一定程度上模拟出了降水的年际变化趋势,但降水极值出现的年份与观测有略微的偏差。1993~2004 年模拟的降水量则较为平滑,年际振荡明显小于观测资料。总体来说,多模式集合对于东北降水的时间变化模拟能力有限,模拟降水量偏多,偏差在 $50\sim 250\text{ mm a}^{-1}$ 之间,时间相关系数仅为 0.11(表 1),且未通过显著性检验。

多模式集合对于东北三省在 1961~2005 年区域平均降水的线性趋势模拟能力相对较差,模拟结果为略微增加趋势 [$7.53\text{ mm (10 a)}^{-1}$],且通过 95%的信度检验,而实际降水并无明显的增加或减少趋势。

图 7 为 1961~2005 年东北三省年平均降水气候态的观测场、多模式集合模拟场与差值场。对比降水观测场和模拟场(图 7a 和图 7b)可以看出,东北三省实际降水量有从东南向西北明显减少的趋势。在某种程度上,多模式集合模拟出了此特点,模拟场与观测场的空间相关系数达到了 0.86(通过 99.9%的信度检验)。此外,多模式集合基本模拟出了辽宁省东部到吉林省南部这个年降水中心,但在数值上存在系统偏差。从降水差值场(图 7c)来看,多模式集合平均有一个明显的特点,即沿海地区模拟降水偏低,内陆地区模拟偏高。除了辽宁省南部地区,其他地方模拟降水量均高于观测值,模拟误差多数分布在 10%~40%之间,最大偏差百分比为 64%,位于吉林省东部地区。与 Xu and Xu (2012)的研究结果类似,其用 18 个 CMIP5 多模式集合模

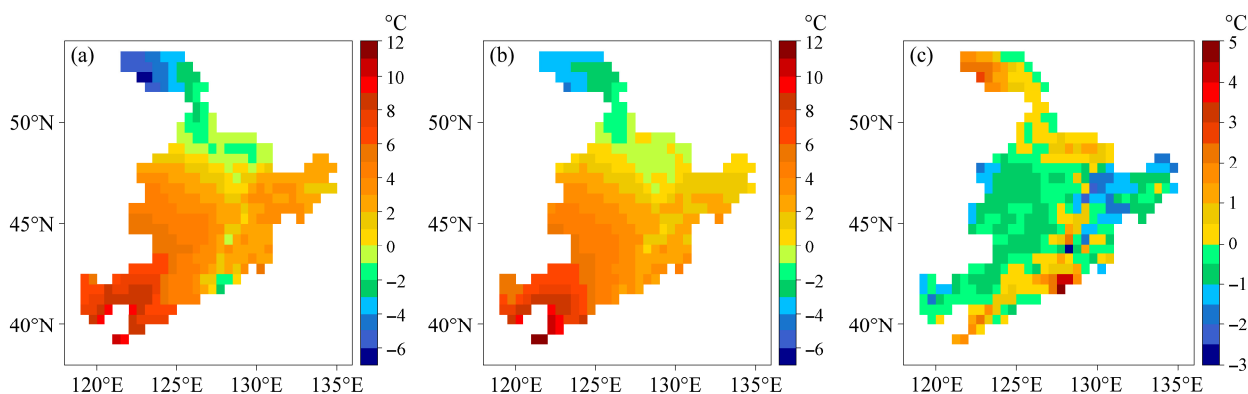


图 5 1961~2005 年中国东北三省年平均气温气候态空间分布(单位: $^{\circ}\text{C}$): (a) 观测场; (b) MME 模拟场; (c) 差值场(模拟减去观测)

Fig. 5 Spatial distributions of 45-year (1961–2005) averaged surface air temperature in Northeast China (units: $^{\circ}\text{C}$): (a) Observations; (b) MME simulation; (c) the difference between simulation and observations

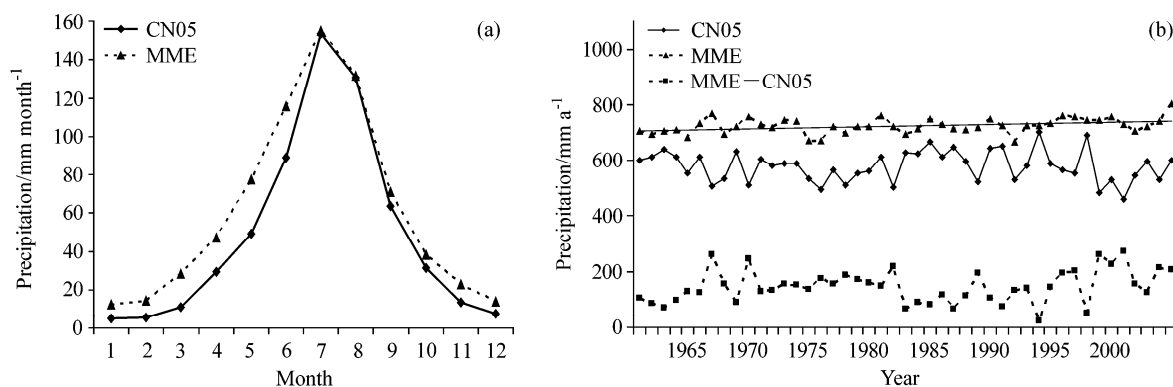


图 6 同图 4, 但为降水量的变化

Fig. 6 As in Fig. 4, but for precipitation

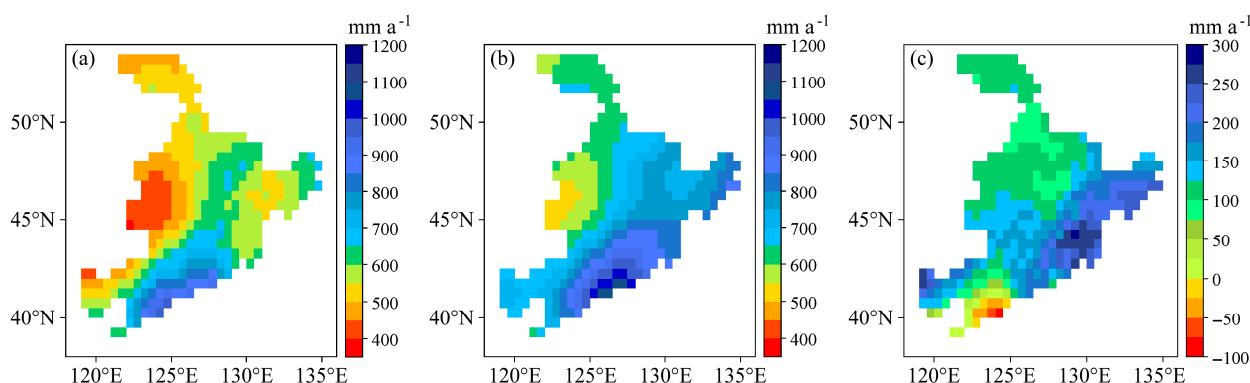


图7 同图5, 但为降水量的空间分布

Fig.7 As in Fig. 5, but for precipitation

拟的东北降水量误差比例在 0~80%之间。

5 总结

本文利用 CN05 观测数据, 检验了参与 CMIP5 的 45 个地球系统模式对 1961~2005 年中国东北三省气温和降水的模拟能力, 并通过一些量化的评估方法, 选出 9 个对东北气候模拟相对可靠的模式进行多模式集合平均, 并对多模式集合的模拟能力也进行了评估分析。得到以下结论:

(1) 多数模式都低估了气温, 高估了降水。多模式集合结果与观测的气温差值基本在 $-1\sim 0.5^{\circ}\text{C}$ 之间, 与观测降水量差值在 $0\sim 250\text{ mm a}^{-1}$ 之间。

(2) 绝大多数模式都能较好地模拟出 1961~2005 年东北三省显著增温的趋势, 对区域平均气温的年际变化模拟能力有限, 多模式集合模拟结果优于大多数单个模式。

(3) 所有模式均能较好地再现东北三省气温气候态的逐月变化规律以及由南至北气温逐渐降低的空间分布特征, 多模式集合模拟效果比绝大多数单个模式出色, 其模拟的模拟场与观测场的空间相关系数达到了 0.96, 并通过 99.9% 的信度检验。

(4) 模式对降水年际变化的模拟能力相对有限, 仅有一个模式 (GFDL-ESM2G) 与观测时间序列正相关并通过 99% 的信度检验; 多模式集合模拟的降水量普遍偏高, 且年际振荡小于观测资料。

(5) 大部分模式对降水气候态逐月变化规律以及从东南向西北降水量逐渐减少的空间分布特征的模拟都较好, 多模式集合能更好地反映其变化规律, 模拟场与观测场的空间相关系数达到了 0.86, 并通过 99.9% 的信度检验。

总体而言, 与单个模式相比, 9 个 CMIP5 多模

式集合平均对东北气候的模拟效果更优。该模式集合对气温具有较强的模拟能力, 可利用其来预估未来东北三省气温的时空分布特征和演变规律。对于降水, 多模式集合的模拟能力整体不如气温, 但对降水的空间分布模拟较好, 因此可用该集合来预估未来东北降水的空间分布特点; 对于降水的年际变化, 多模式集合模拟能力则相对有限, 高估了降水, 且波动较大, 用其进行预估时需谨慎。

参考文献 (References)

- Brunsell N A, Jones A R, Jackson T L, et al. 2010. Seasonal trends in air temperature and precipitation in IPCC AR4 GCM output for Kansas, USA: Evaluation and implications [J]. *International Journal of Climatology*, 30 (8): 1178–1193, doi:10.1002/joc.1958.
- 陈红. 2014. CMIP5 气候模式对中国东部夏季降水年代际变化的模拟性能评估 [J]. *气候与环境研究*, 19 (6): 773–786. Chen Hong. 2014. Validation of the CMIP5 climate models in simulating decadal variations of summer rainfall in eastern China [J]. *Climatic and Environmental Research (in Chinese)*, 19 (6): 773–786, doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2014.13174.
- Chen H P. 2013. Projected change in extreme rainfall events in China by the end of the 21st century using CMIP5 models [J]. *Chinese Science Bulletin*, 58 (12): 1462–1472, doi:10.1007/s11434-012-5612-2.
- Chen H P, Sun J Q, Fan K. 2012. Decadal features of heavy rainfall events in eastern China [J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 26 (3): 289–303, doi:10.1007/s13351-012-0303-0.
- 崔妍, 李倩, 周晓宇, 等. 2013. 5 个全球气候模式对中国东北地区地面温度的模拟与预估 [J]. *气象与环境学报*, 29 (4): 37–46. Cui Yan, Li Qian, Zhou Xiaoyu, et al. 2013. Simulation and projection of the surface temperature based on five global climate models over the Northeast China [J]. *Journal of Meteorology and Environment (in Chinese)*, 29 (4): 37–46, doi:10.3969/j.issn.1673-503X.2013.04.006.
- Gao X J, Shi Y, Zhang D F, et al. 2012. Climate change in China in the 21st century as simulated by a high resolution regional climate model [J]. *Chinese Science Bulletin*, 57 (10): 1188–1195, doi:10.1007/s11434-011-

- 4935-8.
- 顾问, 陈葆德, 杨玉华, 等. 2010. IPCC-AR4 全球气候模式在华东区域气候变化的预估能力评价与不确定性分析 [J]. 地理科学进展, 29 (7): 818-826. Gu Wen, Chen Baode, Yang Yuhua, et al. 2010. Simulation evaluation and uncertainty analysis for climate change projections in East China made by IPCC-AR4 models [J]. Progress in Geography (in Chinese), 29 (7): 818-826, doi:10.11820/dlkxjz.2010.07.007.
- Guo Y, Dong W J, Ren F M, et al. 2013. Surface air temperature simulations over China with CMIP5 and CMIP3 [J]. Advances in Climate Change Research, 4 (3): 145-152, doi:10.3724/SP.J.1248.2013.145.
- 胡国权, 赵宗慈. 2014. IPCC 第五次评估报告中所用的气候模式有进步吗? [J]. 气候变化研究进展, 10 (1): 45-50. Hu Guoquan, Zhao Zongci. 2014. Are climate models of IPCC AR5 getting better than before? [J]. Advances in Climate Change Research (in Chinese), 10 (1): 45-50, doi:10.3969/j.issn.1673-1719.2014.01.010.
- 胡琴, 姜大膀, 范广洲. 2014. CMIP5 全球气候模式对青藏高原地区气候模拟能力评估 [J]. 大气科学, 38 (5): 924-938. Hu Qin, Jiang Dabang, Fan Guangzhou. 2014. Evaluation of CMIP5 models over the Qinghai-Tibetan Plateau [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 38 (5): 924-938, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2013.13197.
- IPCC. 2013. Climate Change 2013: The Physical Science Basis [M]. Stocker T F, Qin D H, Plattner G K, et al., Eds. Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA: Cambridge University Press, 1-27.
- Jiang D B, Tian Z P. 2013. East Asian monsoon change for the 21st century: Results of CMIP3 and CMIP5 models [J]. Chinese Science Bulletin, 58 (12): 1427-1435, doi:10.1007/s11434-012-5533-0.
- 姜燕敏, 吴昊旻. 2013. 20 个 CMIP5 模式对中亚地区年平均气温模拟能力评估 [J]. 气候变化研究进展, 9 (2): 110-116. Jiang Yanmin, Wu Haomin. 2013. Simulation capabilities of 20 CMIP5 models for annual mean air temperatures in central Asia [J]. Advances in Climate Change Research (in Chinese), 9 (2): 110-116, doi:10.3969/j.issn.1673-1719.2013.02.005.
- 江志红, 陈威霖, 宋洁, 等. 2009. 7 个 IPCC AR4 模式对中国地区极端降水指数模拟能力的评估及其未来情景预估 [J]. 大气科学, 33 (1): 109-120. Jiang Zhihong, Chen Weilin, Song Jie, et al. 2009. Projection and evaluation of the precipitation extremes indices over China based on seven IPCC AR4 coupled climate models [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 33 (1): 109-120, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2009.01.10.
- 李辑, 王小桃, 李菲, 等. 2010. 区域气候模式 RegCM-NCC 在东北地区的应用研究 [J]. 气象与环境学报, 26 (3): 1-6. Li Ji, Wang Xiaotao, Li Fei, et al. 2010. Localization application of regional climate model RegCM-NCC in Northeast China [J]. Journal of Meteorology and Environment (in Chinese), 26 (3): 1-6, doi:10.3969/j.issn.1673-503X.2010.03.001.
- 马建勇, 潘婕, 许吟隆, 等. 2013. SRES A1B 情景下东北地区未来干旱趋势预估 [J]. 干旱区研究, 30 (2): 329-335. Ma Jianyong, Pan Jie, Xu Yinlong, et al. 2013. Drought trend in Northeast China in the future under SRES A1B scenario [J]. Arid Zone Research (in Chinese), 30 (2): 329-335.
- Otieno V O, Anyah R O. 2013. CMIP5 simulated climate conditions of the Greater Horn of Africa (GHA). Part II: Projected climate [J]. Climate Dyn., 41 (7-8): 2099-2113, doi:10.1007/s00382-013-1694-z.
- Sun J Q, Ao J. 2013. Changes in precipitation and extreme precipitation in a warming environment in China [J]. Chinese Science Bulletin, 58 (12): 1395-1401, doi:10.1007/s11434-012-5542-z.
- 孙倩倩, 刘晶森. 2014. 基于聚类分析的中国东北地区气温和降水时空变化特征 [J]. 气象与环境学报, 30 (3): 59-65. Sun Qianqian, Liu Jingmiao. 2014. Temporal-spatial change of temperature and precipitation based on CAST in Northeast China [J]. Journal of Meteorology and Environment (in Chinese), 30 (3): 59-65, doi:10.3969/j.issn.1673-503X.2014.03.009.
- 陶辉, 白云岗, 毛炜峰. 2012. CMIP3 气候模式对北疆气候变化模拟评估及未来情景预估 [J]. 地理研究, 31 (4): 589-596. Tao Hui, Bai Yungang, Mao Wei. 2012. Assessment of CMIP3 climate models and projected climate changes in northern Xinjiang [J]. Geographical Research (in Chinese), 31 (4): 589-596.
- Taylor K E, Stouffer R J, Meehl G A. 2012. An overview of CMIP5 and the experiment design [J]. Bull. Amer. Meteor. Soc., 93 (4): 485-498, doi:10.1175/BAMS-D-11-00094.1.
- 王澄海, 吴永萍, 崔洋. 2009. CMIP 研究计划的进展及其在中国地区的检验和应用前景 [J]. 地球科学进展, 24 (5): 461-468. Wang Chenghai, Wu Yongping, Cui Yang. 2009. Evaluating the progress of the CMIP and its application prospect in China [J]. Advances in Earth Science (in Chinese), 24 (5): 461-468, doi:10.11867/j.issn.1001-8166.2009.05.0461.
- 王绍武, 罗勇, 赵宗慈, 等. 2013. 气候模式 [J]. 气候变化研究进展, 9 (2): 150-154. Wang Shaowu, Luo Yong, Zhao Zongci, et al. 2013. Climate models [J]. Advances in Climate Change Research (in Chinese), 9 (2): 150-154, doi:10.3969/j.issn.1673-1719.2013.02.011.
- 辛晓歌, 吴统文, 张洁. 2012. BCC 气候系统模式开展的 CMIP5 试验介绍 [J]. 气候变化研究进展, 8 (5): 378-382. Xin Xiaoge, Wu Tongwen, Zhang Jie. 2012. Introduction of CMIP5 experiments carried out by BCC climate system model [J]. Advances in Climate Change Research (in Chinese), 8 (5): 378-382, doi:10.3969/j.issn.1673-1719.2012.05.010.
- Xu Y, Xu C H. 2012. Preliminary assessment of simulations of climate changes over China by CMIP5 multi-models [J]. Atmospheric and Oceanic Science Letters, 5 (6): 489-494, doi:10.1080/16742834.2012.11447041.
- 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, doi:10.1007/s00376-009-9029-z.
- 姚遥, 罗勇, 黄建斌. 2012. 8 个 CMIP5 模式对中国极端气温的模拟和预估 [J]. 气候变化研究进展, 8 (4): 250-256. Yao Yao, Luo Yong, Huang Jianbin. 2012. Evaluation and projection of temperature extremes over China based on 8 modeling data from CMIP5 [J]. Advances in Climate Change Research (in Chinese), 8 (4): 250-256, doi:10.3969/j.issn.1673-1719.2012.04.003.
- Zhao T B, Guo W D, Fu C B. 2008. Calibrating and evaluating reanalysis surface temperature error by topographic correction [J]. J. Climate, 21 (6): 1440-1446, doi:10.1175/2007JCLI1463.1.
- Zhao T B, Chen L, Ma Z G. 2014. Simulation of historical and projected climate change in arid and semiarid areas by CMIP5 models [J]. Chinese Science Bulletin, 59 (4): 412-429, doi:10.1007/s11434-013-0003-x.