

王铭昊,李焕连,孙小婷,2018. 中国 6 个 CMIP5 模式对全球降水年际-年代际变率模拟的定量评估[J]. 气象,44(5):634-644.

中国 6 个 CMIP5 模式对全球降水年际-年代际 变率模拟的定量评估*

王铭昊^{1,2} 李焕连^{1,3} 孙小婷^{1,2}

1 南京信息工程大学长望学院,南京 210044

2 南京信息工程大学大气科学学院,南京 210044

3 中国气象局气象干部培训学院,北京 100081

提 要: 本文利用美国全球降水气候中心(GPCC)的降水资料和中国参加国际第五阶段耦合模式比较计划(CMIP5)的 6 个气候模式[BCC_CSM1.1、BCC_CSM1.1(m)、BNU-ESM、FGOALS-s2、FGOALS-g2 和 FIO-ESM]的历史模拟试验的降水数据,采用可以表征降水变率相对和绝对量级的方法,定量评估了 6 个模式对降水年际-年代际变率的模拟能力。研究表明,观测降水的年际变率一般占总方差的 65%~80%,年代际变率占总方差的 10%~35%。在 CMIP5 历史试验中,6 个模式平均的降水年际分量方差对总方差的贡献(超过 70%)较观测偏强,模拟降水年代际分量的方差对总方差的贡献较小(约为 10%~20%)。模式总体低估了全球平均总降水、年际降水和年代际降水的变率,但是高估了年际降水对总降水的贡献、低估了年代际降水对总降水的贡献。与观测相比,6 个模式对东亚和澳大利亚地区的年代际降水的模拟都比较好,模拟与观测年代际降水方差的比值为 1 左右。在非洲、南美洲和海洋性大陆,BCC_CSM1.1 模式模拟的降水年代际变率最接近观测;在欧亚和北美,BNU-ESM 模式模拟的降水年代际变率与观测最接近。在欧亚大陆上,BCC_CSM1.1 模式模拟的降水年际分量与年代际分量的方差比最接近观测;在非洲和美洲,FGOALS-s2 模式模拟的降水年际分量与年代际分量的方差比最接近观测。本文的研究结果有助于理解中国当前气候模式对降水年际-年代际变率的模拟能力,以及未来改进模式。

关键词: CMIP5 模式,降水变率,年际,年代际,定量评估

中图分类号: P456

文献标志码: A

DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2018.05.004

Quantitative Evaluation on the Interannual and Interdecadal Precipitation Variability Simulated by Six CMIP5 Models of China

WANG Minghao^{1,2} LI Huanlian^{1,3} SUN Xiaoting^{1,2}

1 School of Changwang, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044

2 College of Atmospheric Sciences, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044

3 CMA Training Centre, Beijing 100081

Abstract: By using the precipitation data of the US Global Precipitation Climate Center (GPCC) and the outputs of six Chinese climate models [BCC_CSM1.1, BCC_CSM1.1(m), BNU-ESM model, FGOALS-s2, FGOALS-g2 and FIO-ESM] participating in the historical simulations of Coupled Model Intercomparison Project Phase 5 (CMIP5) as well as the methods featuring the relative and absolute magnitudes of precipitation variability, this paper evaluated the capabilities of the six models quantitatively to capture the interannual and interdecadal variations of global precipitation. The research results showed that the interannual

* 中国科学院战略性先导科技专项(XDA20100304)、国家重点研发计划(2016YFA0602200)及国家重点基础研究发展计划(973 计划)(2013CB430202 和 2012CB955203)共同资助

2017 年 10 月 11 日收稿; 2018 年 1 月 18 日收修定稿

第一作者:王铭昊,从事气候诊断研究. Email:timekeeper_forever@126.com

通信作者:李焕连,从事气候动力学与预测研究. Email:lihuanlian@163.com

variance of observational precipitation generally accounts for 65%—80% of the total variance, and the interdecadal variance accounts for 10%—35% of the total variance. In the CMIP5 simulations, the interannual variance of the ensemble mean precipitation of the six models is generally stronger than observation, accounting for over 70% of the total variance, while the variance of the interdecadal component contributes less to the total variance (about 10%—20%). Compared with observation, the variability of the globally averaged total, interannual and interdecadal precipitations were underestimated, the contribution of interannual precipitation to total precipitation was overestimated, and the contribution of interdecadal precipitation to total precipitation was underestimated by the models. The interdecadal precipitation in East Asia and Australia was well simulated by the six models, and the ratio between simulated and observed interdecadal precipitation variance is about 1. For Africa, South America and Maritime Continent areas, the simulated interdecadal precipitation variability of BCC_CSM1.1 model is the closest to observation, and for Eurasia and North America, the simulated interdecadal precipitation variability of BNU-ESM model is also close to observation. In Eurasia, the ratio between interannual and interdecadal precipitation variances simulated by BCC_CSM1.1 model is the closest to observation, so did the FGOALS-s2 model in Africa and America. The results of this study would help to understand the current simulation ability of the six Chinese climate models and to improve the models in the future.

Key words: CMIP5 models, precipitation variability, interannual, interdecadal, quantitative evaluation

引言

干旱和洪涝不仅会破坏农业生产、生态环境、能源交通,还会影响灾区居民的身体健康和日常生活。随着全球变暖,极端气候事件发生更加频繁(IPCC, 2014)。未来几十年,人类活动和自然变化将导致与干旱和洪涝相关的气候预测更加复杂。干旱和洪涝风险的影响可能是巨大的,但尚未得到很好的控制。在许多地区,对降水年际-年代际变率的正确认识是预测干旱和洪涝风险的科学基础(任福民等, 2014)。

年际和年代际变率是气候系统中两类不同时间尺度的气候变率,全球气候系统中已分别检测出这两类气候变率的强信号。例如,热带太平洋海气系统典型的年际尺度强信号厄尔尼诺/南方涛动(ENSO)、太平洋年代际变率(PDO)、大西洋多年代际振荡(AMO)(Zhang et al, 1997; Mantua et al, 1997; Zhang and Delworth, 2006)。随着人们对气候信息重要性的认识,年代际时间尺度上的气候变化及这种变化对全球环境、社会、经济发展带来的影响,逐渐成为人们关注的问题(Wang, 2001; McCabe et al, 2004; Zhang and Delworth, 2006; Zhu et al, 2011; 2015; Li et al, 2012; 孙秀博等, 2012; 丁一汇等, 2013; 李维京等, 2015; 蒋薇等, 2016; Si et al, 2016),年代际气候变率的预测也越来越受到关注

(Meehl et al, 2009; Cane, 2010; 魏凤英, 2011; IPCC, 2014; Wei et al, 2017)。在全球变暖的背景下,气候的年际和年代际变率已成为气候变化信号检测和气候可预测性研究的核心内容。

气候模式是进行气候模拟和预测的有效工具。但是此前的模式,包括第三次和第四次气候模式比较计划中的模式,都无法正确捕捉到降水年际-年代际时间尺度变率的重要特征(Ault et al, 2012)。总体来说,模式模拟高估了高频率波动的振幅,而低估了未来十年尺度的干旱风险(Guilyardi et al, 2009)。自政府间气候变化专门委员会(IPCC)第四次评估报告发布以来,各国已经开发了新一代的全球耦合环流模式、并在第五阶段耦合模式比较计划(CMIP5)中公开使用,气候模式的模拟结果成为预估未来几十年或一个世纪气候变化的宝贵资源。然而,关键问题是评估这些模式对20世纪气候在不同区域和不同时间尺度变化的模拟能力。因此,本研究定量分析了中国参加CMIP5试验的6个气候模式模拟的降水量年际-年代际变率的相对和绝对重要性,并与观测进行比较。

本文通过分析美国GPCC的逐月降水资料和6个中国CMIP5气候模式历史试验的降水数据,研究了全球降水的观测特征及其数值模拟情况。本文试图回答三个问题:(1)全球降水年际-年代际变率的观测特征如何?(2)6个中国CMIP5模式对全球降

水年际-年代际变化的模拟能力如何?存在的主要偏差是什么?(3)在近 100 年里不同时间尺度降水的关系是怎样的?通过回答以上三个问题,以期增进对全球降水年际-年代际变率的理解,为下一步利用气候模式进行未来降水预估提供依据,同时也为改进气候模式提供参考。

1 资料和方法

1.1 资料

本文所用的模式资料来自中国参加 CMIP5 的 6 个气候模式的历史模拟试验的降水数据。这 6 个模式分别是国家气候中心研发的气候系统模式 BCC_CSM1.1(m) 和 BCC_CSM1.1(Wu et al, 2014)、北京师范大学全球变化与地球系统科学研究院研发的地球系统模式 BNU-ESM(Ji et al, 2013)、

中国科学院大气物理研究所大气科学和地球流体力学数值模拟国家重点实验室(LASG)发展的气候系统模式 FGOALS-s2(Bao et al, 2013)及清华大学共同参与研发的 FGOALS-g2(Li et al, 2013)、国家海洋局第一研究所研发的地球系统模式 FIO-ESM(Qiao et al, 2013)。各模式详细信息见表 1。CMIP5 历史试验的模拟时段大多为 1850—2005 年,该试验的强迫场是随时间变化的,强迫场包括人类活动(温室气体、土地利用和气溶胶)和自然影响(太阳和火山活动)。

为了评估 6 个模式对降水的模拟能力,本文使用的对比资料取自美国全球降水气候中心(GPCC)1901—2013 年的降水再分析资料(第 7 版),纬度格点数和经度格点数分别为 72 和 144(Schneider et al, 2014),数据获取地址为 <https://www.esrl.noaa.gov/psd/data/gridded/data.gpcc.html>。

表 1 中国 6 个 CMIP5 模式的基本信息

Table 1 Basic information of six CMIP5 models of China

模式名称	研发机构	分辨率
BCC_CSM1.1	国家气候中心	64×128
BCC_CSM1.1(m)	国家气候中心	160×320
FGOALS-s2	中科院大气物理研究所 LASG	108×128
FGOALS-g2	中科院大气物理研究所 LASG、清华大学	60×128
BNU-ESM	北京师范大学全球变化与地球系统科学研究院	64×128
FIO-ESM	国家海洋局第一研究所	64×128

注:分辨率为纬度格点数×经度格点数。

Note: The horizontal resolution is latitude grid × longitude grid.

1.2 方法

本文首先利用 GPCC 的降水资料对历史气候进行了分析,然后利用 6 个模式 1901—2005 年的历史试验数据对该模式降水年际-年代际变率的模拟能力进行了评估。具体方法如下:

首先,计算 GPCC 观测的和 6 个模式模拟的全年(1—12 月)累积降水量,并将数据使用双立方插值法统一插值到 $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$ 网格上;使用三阶巴特沃斯(Butterworth)带通滤波方法提取降水年际变化分量(2~10 a)和年代际变化分量(10~100 a)的时间序列,这种滤波方法适用于这种应用,因为其频率响应在通带内几乎是平坦的,而在高频波和低频波的频率上相对陡峭,这就确保对年际和年代际变化的表示是准确和独立的。然后,分别计算 GPCC 和 6 个模式降水的原始资料(即总体)、年际和年代

际降水量的标准差(σ)和方差(σ^2),用来表征降水变率的绝对量级;分别计算 GPCC 和 6 个模式的降水年际变化分量的方差及年代际分量的方差与原始资料的方差之间的比值,用来表征降水年际和年代际变率的相对量级。最后,把 6 个模式的年际和年代际降水分量的标准差和方差分别进行平均,进一步求得 6 个模式平均和每个模式单独的降水年际分量的方差与年代际分量的方差之比;并分别计算 GPCC 降水的年代际分量的方差与 6 个模式平均及单个模式模拟的降水年代际分量的方差之间的比值。

2 结果分析

图 1 是使用 GPCC 观测降水资料计算得到的降水年际和年代际变率分布。由图 1 可见,降水在

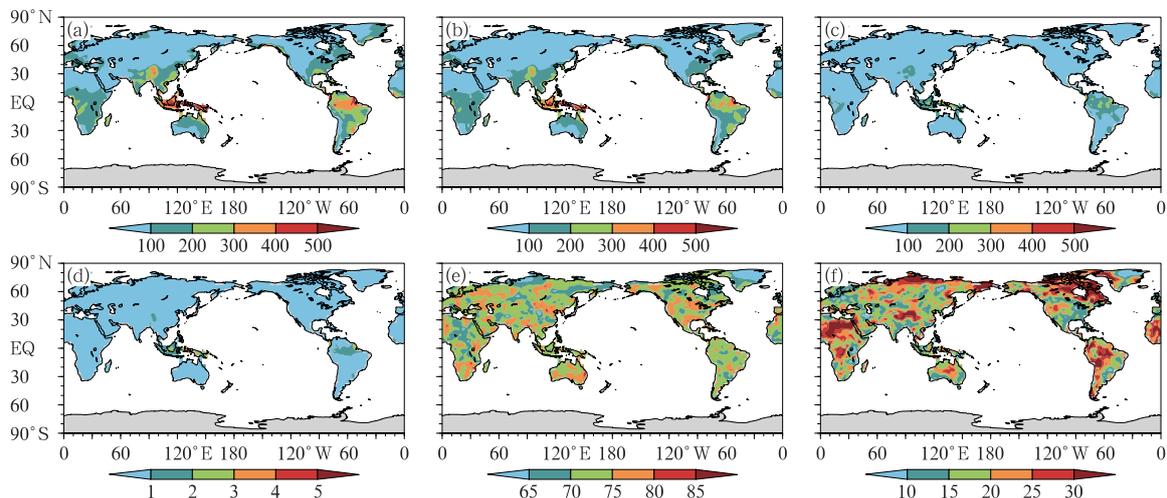


图 1 GPCP 观测年降水量的年际和年代际变率

(a) 总标准差, (b) 年际分量的标准差, (c) 年代际分量的标准差, (d) 总方差, (e) 年际分量的方差占总方差的百分比, (f) 年代际分量的方差占总方差的百分比
(标准差单位: $\text{mm} \cdot \text{a}^{-1}$, 方差单位: $10^{-5} \text{mm}^2 \cdot \text{a}^{-1}$, 占比单位: %)

Fig. 1 Interannual and interdecadal variabilities of annual GPCP observation precipitation

(a) total standard deviation, (b) interannual standard deviation, (c) interdecadal standard deviation, (d) total variance, (e) the percentage of interannual variance accounting for total variance, (f) the percentage of interdecadal variance accounting for total variance
(standard deviation unit: $\text{mm} \cdot \text{a}^{-1}$, variance unit: $10^{-5} \text{mm}^2 \cdot \text{a}^{-1}$, percentage unit: %)

热带地区 ($20^{\circ}\text{S} \sim 20^{\circ}\text{N}$) 的变率最大 (图 1a), 其中大部分地区的降水总标准差在 $100 \sim 200 \text{mm} \cdot \text{a}^{-1}$, 但印度尼西亚和南美洲的亚马孙地区的降水的总标准差最高达 $400 \text{mm} \cdot \text{a}^{-1}$ 以上。降水年际分量的标准差与降水量的总标准差的量级相当 (图 1b), 而降水年代际分量的标准差较小, 例如在印度尼西亚和南美洲的亚马孙地区的降水总标准差最高为 $200 \text{mm} \cdot \text{a}^{-1}$ 左右 (图 1c)。观测降水的总方差为 $1 \times 10^{-5} \text{mm}^2 \cdot \text{a}^{-1}$ 左右, 在印度尼西亚和南美洲的亚马孙地区的降水总方差最高为 $2 \times 10^{-5} \text{mm}^2 \cdot \text{a}^{-1}$ 左右 (图 1d)。从图 1e 和 1f 可以看出观测降水的年际和年代际分量对总降水的贡献。降水的年际变率一般占总方差的 $65\% \sim 80\%$ (图 1e), 而降水年代际分量的方差与总方差的比值较小, 约为 $10\% \sim 35\%$ (图 1f)。

6 个 CMIP5 模式平均的降水总标准差和总方差、年际和年代际降水的标准差的空间分布与 GPCP 观测降水相应结果的分布非常相似, 模拟的降水变率在热带地区最大, 总标准差最大值为 $300 \sim 400 \text{mm} \cdot \text{a}^{-1}$ (图 2)。但是模式模拟的降水年际分量的方差对总方差的贡献比观测大, 模拟的年代

际方差对总方差的贡献比观测小。模拟的降水年际分量的方差对总方差的贡献超过 70% (图 2e), 而模拟降水年代际分量的方差只占总方差 $10\% \sim 20\%$ (图 2f)。

6 个模式模拟与观测之间的差异是否反映了模拟的降水年际变化太强、年代际变化太弱? 为了更细致地分析模拟与观测的差异, 我们计算了全球和区域平均的降水标准差和方差。各区域范围见表 2。图 3 是全球和区域的观测和 6 个模式平均的降水标准差以及观测和模拟降水的标准差比。由图 3a 可见, 从全球平均来看, 6 个模式全球平均的总降水标准差、年际降水标准差和年代际降水的标准差均比观测值偏大, 说明模式模拟的全球平均总降水、年际降水和年代际降水的变率都比观测降水的变率偏强。但是, 正如图 2 所示, 不同区域情况有所不同。图 3a 清楚地显示出, 在热带、北半球热带外、东亚、南亚、澳大利亚以及北美洲, 6 个模式平均的总降水标准差、年际降水的标准差、年代际降水的标准差比观测值偏大; 而在南半球热带外、非洲北部、非洲南部以及南美洲, 模拟值均小于观测值, 特别是在南美洲。从图 3b 可以看到, 观测与模拟的比

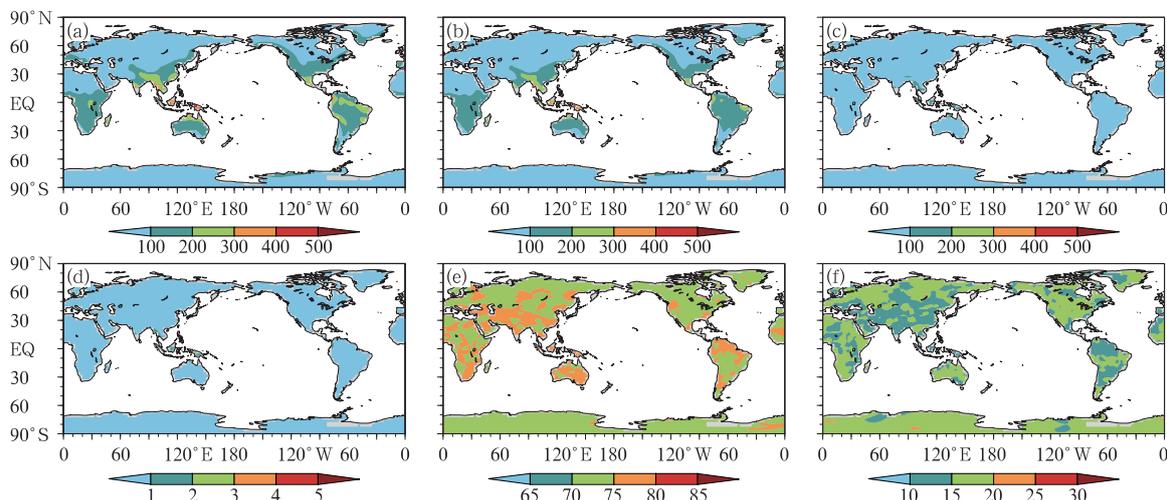


图 2 同图 1, 但为 6 个模式的平均结果

Fig. 2 Same as Fig. 1, but for the average results of the six models

表 2 区域和范围
Table 2 Region and range

区域	范围
全球 (GL)	60°S~90°N, 0°~360°E
热带 (TP)	20°S~20°N, 0°~360°E
北半球热带外 (NET)	20°~90°N, 0°~360°E
南半球热带外 (SET)	20°~60°S, 0°~360°E
东亚 (EA)	20°~50°N, 90°~150°E
南亚 (SA)	10°S~30°N, 60°~130°E
澳大利亚 (AUS)	41°~10°S, 113°~153°E
北美洲 (NAM)	7°~72°N, 168°~55°W
南美洲 (SAM)	54°S~12°N, 81°~34°W
非洲北部 (NAF)	15.5°~37°N, 16°W~50°E
非洲南部 (SAF)	35°S~15°N, 15°W~40°E

值仅在南半球热带外、非洲北部、非洲南部和南美洲 4 个区域大于 1, 在其他区域小于 1。但不管在哪个区域, 观测和模拟降水的年际变化均比年代际变化偏强 (图 3a), 年际与年代际降水标准差比值都大于 1 (图 3b), 且模拟值比观测值普遍偏强。

已有研究表明, 年代际降水变率在非洲北部 (Giannini et al, 2008)、东亚 (Si et al, 2016)、澳大利亚 (Cai et al, 2009)、北美洲西部 (Seager, 2007) 以及南美洲的亚马孙 (Marengo et al, 2011) 等地区十分显著且与干旱相联系。但本文的分析结果表明, 6 个模式对历史时期 (1850—2005 年) 的模拟在东亚和北美洲高估了年代际降水变化, 模拟的降水年代际变率偏强; 在非洲北部和南美洲低估了年际和年代际降水变率; 在澳大利亚, 模拟与观测的年代际降水变率相当 (图 2 和图 3)。此外, 从图 3a 可见, 观测和模拟的降水标准差在热带、南亚和南美洲较其

他区域都强, 模拟与观测的偏差较大。这些地区是受热带太平洋海温最强的年际变化 ENSO 影响最直接的地区。因此, 模拟降水与观测的误差, 可能与热带太平洋的海温模拟偏差有关。在 6 个模式平均模拟结果中, 热带太平洋地区的降水年际变率最大 (图略)。这个结果与 Guilyardi et al (2009) 对第三阶段耦合模式比较计划 (CMIP3) 模式模拟的研究结果一致, 他认为模拟与观测的差异可能主要是由于模式模拟的热带太平洋热源的变率太强导致的。具体原因有待今后进一步的研究。

图 4 显示了观测和模式平均的年际与年代际降水分量的方差比。由图 4a 可见, 观测降水的年际与年代际分量的方差比小于 4 的地区有相对低频 (年代际尺度) 的降水变率, 包括俄罗斯北部、东亚大部、北非大部、澳大利亚大部、北美洲北部和西部、南美洲北部等地区。与观测相比, 模式模拟的降水年际与年代际分量的方差比率较高, 普遍为 4~7 及以上, 且比观测结果更均匀 (图 4b)。比较图 4a 和 4b 可见, 在非洲、澳大利亚、南美和北美等地区, 6 个模式平均的降水年际变率与年代际变率的比值 (约为 6) 明显大于观测降水的年际变率与年代际变率的比值 (约为 3)。观测与模式模拟的降水年代际分量的方差比如图 4c 所示, 在北非中部、青藏高原和亚马孙地区观测降水年代际变率的量级明显大于模拟的结果, 观测与模拟的方差比值最大可达 7 以上, 说明在这些地方模式严重低估了降水的年代际变率。同样, 从图 4d 可见, 在这些地区观测降水年际变率明显大于模拟的结果, 模式也低估了降水的年际变率,

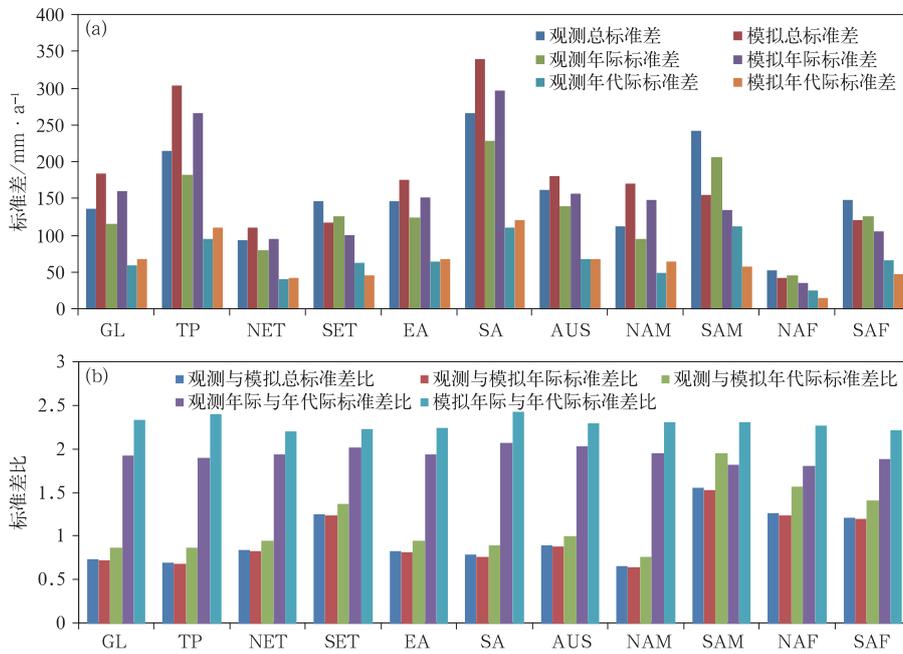


图 3 全球和区域的观测和模式平均的降水标准差(a)及标准差比(b)

Fig. 3 Global and regional average standard deviations of observed and simulated precipitations (a) and their ratios (b)

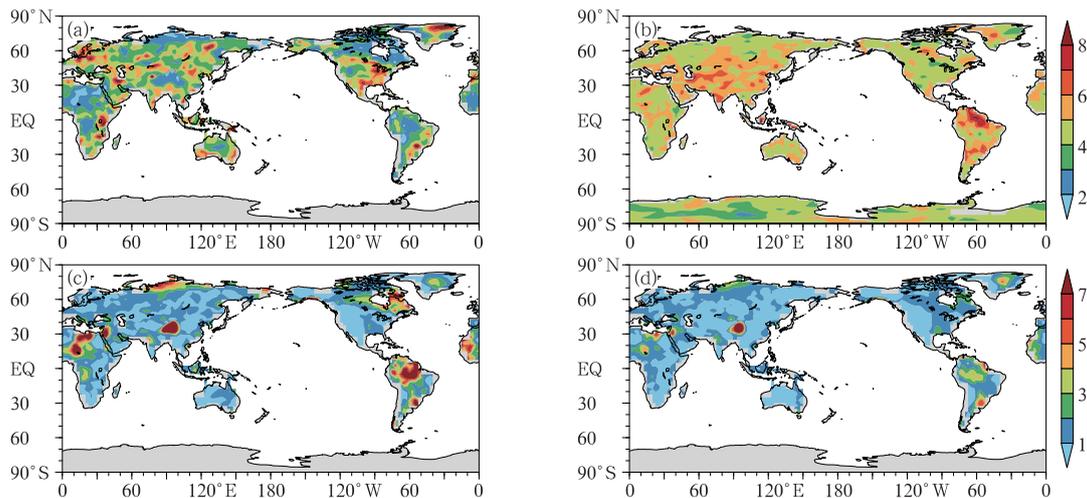


图 4 (a) 观测的降水年际与年代际分量的方差比, (b) 模式平均的降水年际与年代际分量的方差比, (c) 观测与模式平均的降水年代际分量的方差比, (d) 观测与模式平均的降水年际分量的方差比

Fig. 4 (a) Variance ratio between observed interannual and interdecadal precipitations, (b) same as Fig. 4a, but for the six-model average, (c) variance ratio between observed and simulated interdecadal precipitations, (d) same as Fig. 4c, but for interannual precipitation

只是没有对年代际低估的那么严重, 观测与模拟的年际降水方差比值仅在青藏高原附近达到 7 以上。

从图 1e 和图 2e 也可以看到, 观测的降水年际分量对总降水的贡献小于模拟的降水年际分量对总降水的贡献。进一步计算了全球和区域的观测和 6

个模式平均的年际和年代际降水与总降水的方差百分比(图 5)。由图 5 可见, 对全球平均情况, 模拟的年际降水方差与总降水方差的百分比(74%)略大于观测的方差百分比(72%)。对于区域平均情况, 大部分地区与全球平均情况相似, 仅在澳大利亚模拟

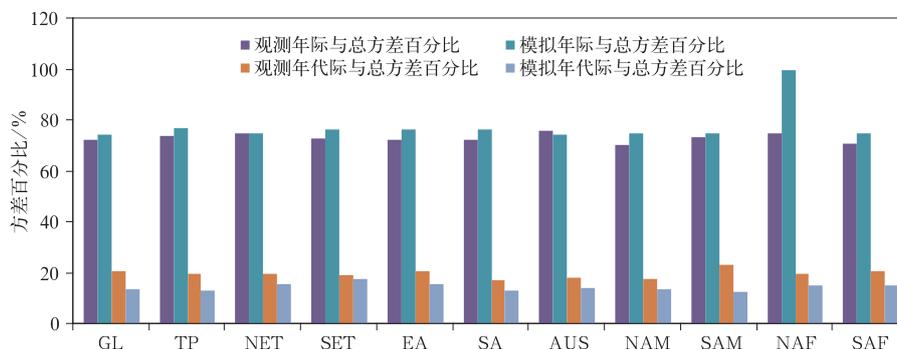


图 5 全球和区域的观测和模式平均的年际和年代际降水与总降水的方差百分比

Fig. 5 Global and regional average percentages between interannual, interdecadal and total variances of observed and simulated precipitations

的年际降水方差与总降水方差的百分比(74%)略小于观测的方差百分比(76%)。其中,在非洲北部模拟的方差百分比(100%)明显大于观测结果(75%)。全球和各区域平均的观测年代际降水与总降水的方差百分比约为 20%,大于模拟的方差百分比(15%左右)。总之,模拟降水的年代际分量对总降水的贡献小于观测的年代际分量对总降水的贡献。

6 个模式模拟的年降水量的标准差如图 6 所示。比较图 6 和图 1a~1c 可见,在非洲南部地区, BCC_CSM1.1 模式模拟的降水总标准差略偏强,其他模式模拟的降水总标准差略偏弱;在东亚和南亚地区, BCC_CSM1.1、BCC_CSM1.1(m)、FGOALS-s2、BNU-ESM 和 FIO-ESM 模式模拟的降水总标准差略偏强, FGOALS-g2 模式模拟的降水总标准差接近观测。在南美洲,降水总标准差模拟较好的是 BCC_CSM1.1 模式,其他模式模拟的降水总标准差较弱,特别是 FGOALS-g2 和 FGOALS-s2 模式。与观测相似,模式模拟的年代际降水标准差总体上比年际降水标准差弱,其中在南非、东亚和南美等地区, BCC_CSM1.1 模式模拟年代际降水标准差最接近观测,其他模式明显偏弱。

图 7 是 6 个模式模拟的降水年际分量与年代际分量的方差比,与观测相比(图 4a), BCC_CSM1.1、BCC_CSM1.1(m)、FGOALS-s2 和 FGOALS-g2 模式模拟的降水年际分量与年代际分量的方差比更接近观测, BNU-ESM 和 FIO-ESM 模式模拟的降水年际分量与年代际分量的方差比比观测的结果大 1~2 倍。其中,在欧亚大陆上, BCC_CSM1.1 模式结果最接近观测,其次是 BCC_CSM1.1(m) 模式;在非洲和美洲大陆上, FGOALS-s2 模式结果最接

近观测。

图 8 是观测与 6 个模式模拟的降水年代际分量的方差比。总体来说, FGOALS-s2 和 FGOALS-g2 模式模拟的降水年代际变率比 BCC_CSM1.1、BCC_CSM1.1(m)、BNU-ESM、FIO-ESM 模式的模拟结果偏弱。在欧亚和北美地区, BNU-ESM 模式的模拟结果与观测最接近,大部分地区比值为 1 左右;在非洲、南美洲和海洋性大陆地区, BCC_CSM1.1 模式模拟的降水年代际变率最接近观测。各模式对东亚和澳大利亚地区的年代际降水的模拟都比较好,与观测年代际降水的方差比值为 1 左右。

如上所述,与根据观测资料得到的降水年代际变率相比, 6 个模式模拟的降水年代际变率较弱,暗示着这些模式的回报和预测可能难以抓住实际降水的年代际变化强度。那么,未来的持续干旱和洪涝风险可能远远大于这些模式所预估的结果。在水资源有限的干旱、半干旱地区,模式模拟降水年代际变率偏弱的问题更突出。

3 结论与讨论

本文利用可以表征降水年际和年代际变率的相对量级和绝对量级的方法,通过与观测比较,定量评估了中国参加 CMIP5 试验的 6 个气候模式[BCC_CSM1.1、BCC_CSM1.1(m)、BNU-ESM、FGOALS-s2、FGOALS-g2 和 FIO-ESM]对降水年际和年代际变率的模拟性能。研究发现,观测降水的年际分量方差一般占总方差的 65%~80%,而年代际分量的方差与总方差的比值较小,约为 10%~35%。6 个模式模拟的的平均的降水年际分量对总方差的贡献达

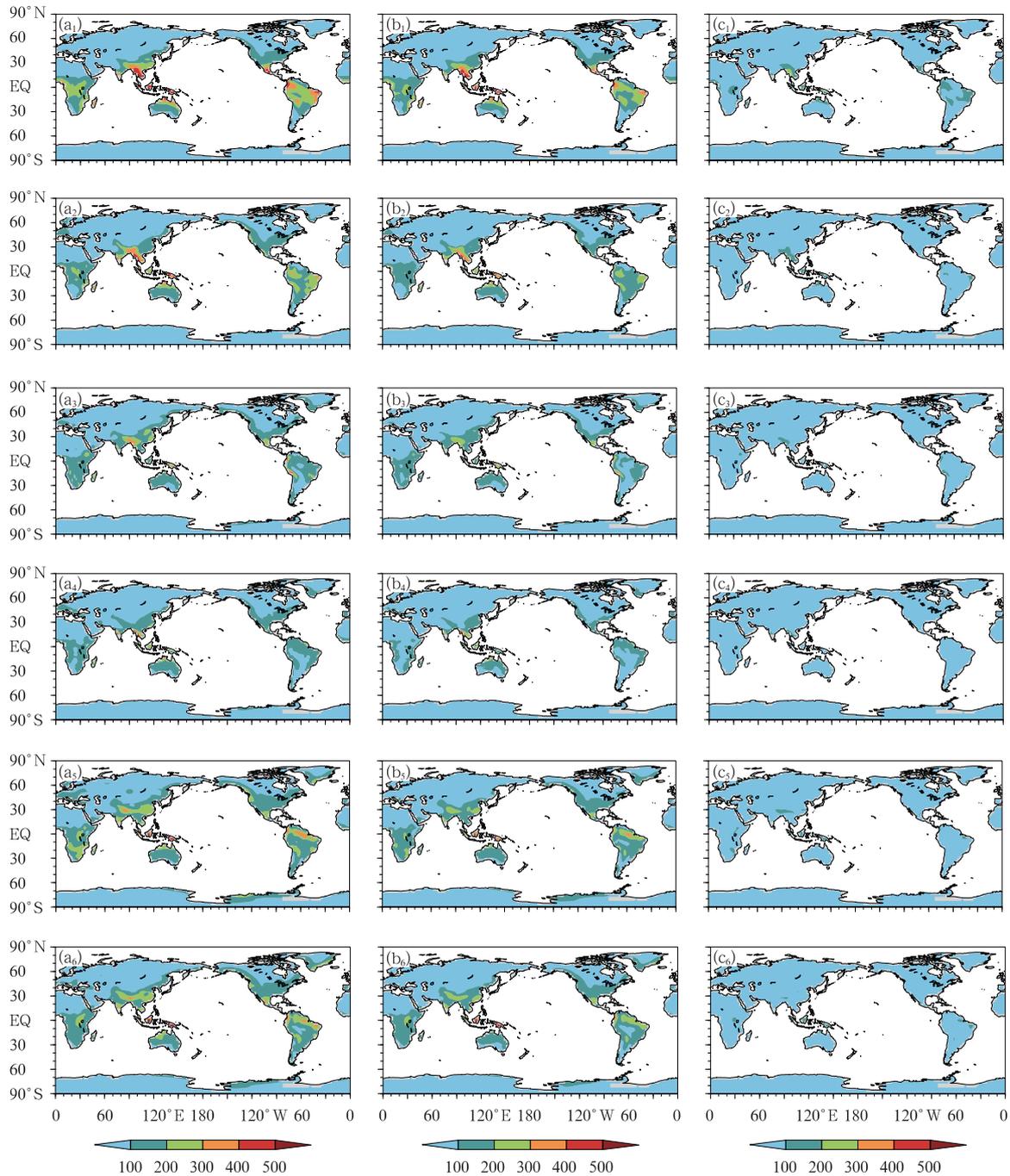


图 6 6 个模式模拟的年降水量的标准差(单位: $\text{mm} \cdot \text{a}^{-1}$)

(a_1, b_1, c_1)BCC_CSM1.1, (a_2, b_2, c_2)BCC_CSM1.1(m), (a_3, b_3, c_3)FGOALS-s2,
 (a_4, b_4, c_4)FGOALS-g2, (a_5, b_5, c_5)BNU-ESM, (a_6, b_6, c_6)FIO-ESM 模式结果;
 ($a_1 \sim a_6$)总标准差,($b_1 \sim b_6$)年际分量的标准差,($c_1 \sim c_6$)年代际分量的标准差

Fig. 6 Standard deviation of annual precipitation simulated by the six models (unit: $\text{mm} \cdot \text{a}^{-1}$)

(a_1, b_1, c_1) BCC_CSM1.1, (a_2, b_2, c_2) BCC_CSM1.1 (m), (a_3, b_3, c_3) FGOALS-s2,
 (a_4, b_4, c_4) FGOALS-g2, (a_5, b_5, c_5) BNU-ESM, (a_6, b_6, c_6) FIO-ESM;
 ($a_1 \sim a_6$) total standard deviation, ($b_1 \sim b_6$) interannual standard deviation,
 ($c_1 \sim c_6$) interdecadal standard deviation

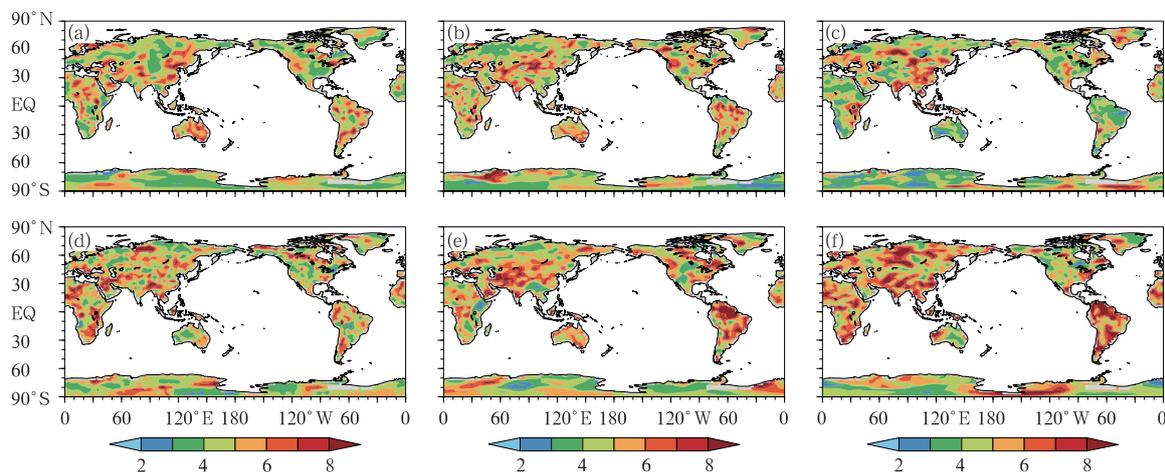


图 7 6 个模式模拟的降水年际分量与年代际分量的方差比

(a) BCC_CSM1.1, (b) BCC_CSM1.1(m), (c) FGOALS-s2, (d) FGOALS-g2,
(e) BNU-ESM, (f) FIO-ESM

Fig. 7 Variance ratio between interannual and interdecadal precipitations simulated by six models

(a) BCC_CSM1.1, (b) BCC_CSM1.1(m), (c) FGOALS-s2, (d) FGOALS-g2,
(e) BNU-ESM, (f) FIO-ESM

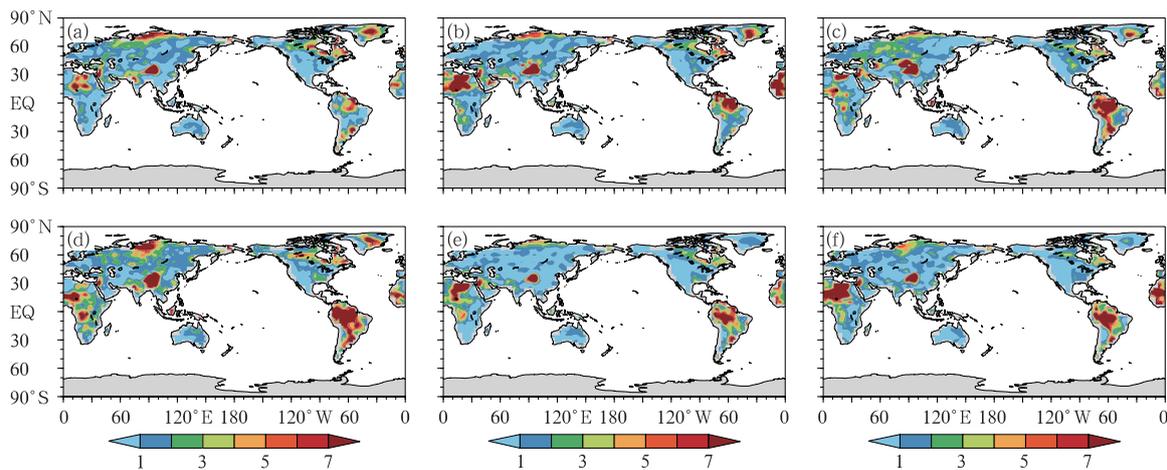


图 8 观测与 6 个模式模拟的降水年代际分量的方差比

(a) BCC_CSM1.1, (b) BCC_CSM1.1(m), (c) FGOALS-s2, (d) FGOALS-g2,
(e) BNU-ESM, (f) FIO-ESM

Fig. 8 Variance ratio between observed and six-model simulated interdecadal precipitations

(a) BCC_CSM1.1, (b) BCC_CSM1.1(m), (c) FGOALS-s2, (d) FGOALS-g2,
(e) BNU-ESM, (f) FIO-ESM

70%以上,模拟的降水年代际分量对总方差的贡献较小,约为10%~20%。模拟的降水变率在热带地区最大、降水年际变率比年代际变率偏强,这些特征大体上与观测的相似。然而,在北非中部、青藏高原和亚马孙地区,模拟的降水年代际变率明显偏弱,说明模式严重低估了降水的年代际变化。在这些地

区,降水的年代际变化十分显著,与持续干旱相联系。

从对不同区域模拟的6个模式平均结果来看,与观测相比,模式模拟的全球、热带、北半球热带外,东亚、南亚、澳大利亚和北美洲的总降水、年际、年代际降水变率都偏强;而在南半球热带外,非洲北部、

非洲南部和南美洲,模拟的总降水、年际、年代际变率均偏弱。此外,模拟的年际与年代际降水分量的标准差之间的比值普遍比观测的偏大,尤其是在非洲、澳大利亚、南美和北美等地区更为明显。这说明模拟的年际降水量对总降水的贡献大于观测的年际降水量对总降水的贡献,模拟的年代际降水量对总降水的贡献则小于观测的年代际降水量对总降水的贡献。这就表明模式高估了年际降水量对总降水的贡献,而低估了年代际降水量对总降水的贡献。

从6个模式各自模拟的结果看,6个模式对东亚和澳大利亚的年代际降水变率的模拟都比较好(模拟与观测的年代际降水分量的方差比值为1左右)。在非洲、南美洲和海洋性大陆地区,BCC-CSM1.1模式模拟的降水年代际变率最接近观测;在东亚和北美地区,BNU-ESM模式模拟的降水年代际变率与观测最接近。BCC-CSM1.1、BCC-CSM1.1(m)、FGOALS-s2和FGOALS-g2模式模拟的降水年际分量与年代际分量的方差比更接近观测,其中,在欧亚大陆,BCC-CSM1.1模式模拟最接近观测;在非洲和美洲大陆上,FGOALS-s2模式模拟最接近观测。BNU-ESM和FIO-ESM模式模拟的降水年际分量与年代际分量的方差比比观测结果大1~2倍。

与观测相比,6个中国CMIP5模式历史试验模拟的年代际降水量明显偏弱。这是目前国际上大部分先进模式所共同存在的问题(Ault et al, 2012)。目前还不清楚观测的年代际降水变率究竟是由于外部强迫还是内部变率造成。不管是哪种情况,20世纪降水的模拟与观测的偏差都说明模式对未来降水的预估可能缺少年代际变化信息。由于可预测性对初始状态具有较高的敏感性(Hawkins and Sutton, 2009),海洋和气候变量的预测依赖于初始气候状态(Hermanson and Sutton, 2010)。为此,CMIP5专门增加了年代际预测试验(Taylor et al, 2012),CMIP6还将继续开展年代际预测试验(Eyring et al, 2016)。在年代际尺度上,不仅要考虑外强迫(太阳活动、火山喷发、人类活动引起的温室气体排放等)和气候系统内部变率的影响,还需要关注模式的初始状态,模式初始化可能会提高气候预测的技巧(Meehl et al, 2013)。

总之,6个中国CMIP5模式模拟的降水变率总体偏弱,尤其是年代际变率偏弱更加明显,暗示着这

些模式可能难以抓住实际降水的年际-年代际变率。那么,未来的持续干旱和洪涝的风险可能远远大于这些模式所预估的结果。在水资源有限的干旱、半干旱地区,模式模拟降水年代际变率偏弱的问题更突出。本文的研究结果可以为理解当前中国6个气候模式对全球降水年际-年代际变率的模拟能力以及未来模式发展提供参考和借鉴。

参考文献

- 丁一汇,孙颖,刘芸芸,等,2013. 亚洲夏季风的年际和年代际变化及其未来预测[J]. 大气科学,37(2):253-280.
- 蒋薇,张祖强,刘芸芸,2016. 21世纪以来西南地区干季降水与西太平洋副热带高压年代际变化的关系[J]. 气象,42(11):1335-1341.
- 李维京,左金清,宋艳玲,等,2015. 气候变暖背景下我国南方旱涝灾害时空格局变化[J]. 气象,41(3):261-271.
- 任福民,高辉,刘绿柳,等,2014. 极端天气气候事件监测与预测研究进展及其应用综述[J]. 气象,40(7):860-874.
- 孙秀博,李清泉,魏敏,2012. 1960—2009年中国年降水量的年际及年代际变化特征[J]. 气象,38(12):1464-1472.
- 魏凤英,2011. 我国短期气候预测的物理基础及其预测思路[J]. 应用气象学报,22(1):1-11.
- Ault T R, Cole J E, St. George S, 2012. The amplitude of decadal to multidecadal variability in precipitation simulated by state-of-the-art climate models[J]. Geophys Res Lett, 39(21):L21705.
- Bao Qing, Lin Pengfei, Zhou Tianjun, et al, 2013. The flexible global ocean-atmosphere-land system model, spectral version 2: FGOALS-s2[J]. Adv Atmos Sci, 30(3):543-560.
- Cai Wenju, Cowan T, Briggs P, et al, 2009. Rising temperature depletes soil moisture and exacerbates severe drought conditions across southeast Australia [J]. Geophys Res Lett, 36(21):L21709.
- Cane M A, 2010. Climate science: decadal predictions in demand[J]. Nat Geosci, 3(4):231-232.
- Eyring V, Bony S, Meehl G A, et al, 2016. Overview of the Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6) experimental design and organization[J]. Geosci Model Dev, 9(5):1937-1958.
- Ji Duoying, Wang Lanning, Feng Jinming, et al, 2014. Description and basic evaluation of Beijing Normal University Earth System Model (BNU-ESM) version 1[J]. Geosci Model Dev, 7(5):2039-2064.
- Giannini A, Biasutti M, Held I M, et al, 2008. A global perspective on African climate[J]. Clim Change, 90(4):359-383.
- Guilyardi E, Wittenberg A, Fedorov A, et al, 2009. Understanding El Niño in ocean-atmosphere general circulation models: progress and challenges[J]. Bull Amer Meteor Soc, 90(3):325-340.
- Hawkins E, Sutton R, 2009. The potential to narrow uncertainty in regional climate predictions[J]. Bull Am Meteorol Soc, 90:1095-1107.

- Hermanson L, Sutton R T, 2010. Case studies in interannual to decadal climate predictability[J]. *Climate Dyn*, 35(18):1169-1189.
- IPCC, 2014. *Climate Change 2013: the Physical Science Basis*. Working Group I Contribution to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change[M]. Cambridge, UK: Cambridge University Press.
- Li Huanlian, Wang Hhuijun, Yin Yizhou, 2012. Interdecadal variation of the West African summer monsoon during 1979–2010 and associated variability[J]. *Climate Dyn*, 39(12):2883-2894.
- Li Lijuan, Lin Pengfei, Yu Yongqiang, et al, 2013. The flexible global ocean-atmosphere-land system model, Grid-point version 2; FGOALS-g2[J]. *Adv Atmos Sci*, 30(3):543-560.
- Mantua N J, Hare S R, Zhang Yuan, et al, 1997. A Pacific interdecadal climate oscillation with impacts on salmon production[J]. *Bull Amer Meteor Soc*, 78(6):1069-1079.
- Marengo J A, Tomasella J, Alves L M, et al, 2011. The drought of 2010 in the context of historical droughts in the Amazon region [J]. *Geophys Res Lett*, 38(12):L12703.
- McCabe G, Palecki M, Betancourt J, 2004. Pacific and Atlantic Ocean influences on multidecadal drought frequency in the United States[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 101(12):4136-4141.
- Meehl G A, Goddard L, Murphy J, et al, 2009. Decadal prediction: can it be skillful? [J]. *Bull Amer Meteor Soc*, 90(10):1467-1485.
- Meehl G A, Hu A, Arblaster J, et al, 2013. Externally forced and internally generated decadal climate variability associated with the interdecadal Pacific oscillation[J]. *J Clim*, 26:7298-7310.
- Qiao Fangli, Song Zhenya, Bao Ying, et al, 2013. Development and evaluation of an Earth System Model with surface gravity waves [J]. *J Geophys Res*, 118(9):4514-4524.
- Schneider U, Becker A, Finger P, et al, 2014. GPCP's new land surface precipitation climatology based on quality-controlled in situ data and its role in quantifying the global water cycle[J]. *Theor Appl Climatol*, 115(1-2):15-40.
- Seager R, 2007. The turn of the century North American drought: global context, dynamics, and past analogs [J]. *J Climate*, 20(22):5527-5552.
- Si Dong, Hu Zengzhen, Kumar A, et al, 2016. Is the interdecadal variation of the summer rainfall over eastern China associated with SST? [J]. *Climate Dyn*, 46(1-2):135-146.
- 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.
- Wang Huijun, 2001. The weakening of the Asian monsoon circulation after the end of 1970's [J]. *Adv Atmos Sci*, 18(3):376-386.
- Wei Min, Li Qingquan, Xin Xiaoge, et al, 2017. Improved decadal climate prediction in the North Atlantic using EnOI-assimilated initial condition [J]. *Sci Bull*, 62(16):1142-1147.
- Wu Tongwen, Song Lianchun, Li Weiping, et al, 2014. An overview of BCC climate system model development and application for climate change studies [J]. *J Meteor Res*, 28(1):34-56.
- Zhang Rong, Delworth T L, 2006. Impact of Atlantic multidecadal oscillations on India/Sahel rainfall and Atlantic hurricanes [J]. *Geophys Res Lett*, 33(17):L17712.
- Zhang Yuan, Wallace J M, Battisti D S, 1997. ENSO-like interdecadal variability: 1900–93 [J]. *J Climate*, 10(5):1004-1020.
- Zhu Yali, Wang Huijun, Ma Jiehua, et al, 2015. Contribution of the phase transition of Pacific Decadal Oscillation to the late 1990s' shift in East China summer rainfall [J]. *J Geophys Res*, 120(17):8817-8827.
- Zhu Yali, Wang Huijun, Zhou Wen, et al, 2011. Recent changes in the summer precipitation pattern in East China and the background circulation [J]. *Climate Dyn*, 36(7-8):1463-1473.