第43卷第6期	大 气 科 学	Vol. 43 No. 6
2019年11月	Chinese Journal of Atmospheric Sciences	Nov. 2019

张蓓,戴新刚,杨阳. 2019. 21世纪前期中国降水预估及其订正 [J]. 大气科学, 43(6): 1385-1398. ZHANG Bei, DAI Xingang, YANG Yang. 2019. Projection of China Precipitation and Its Bias Correction for the Early 21st Century [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 43(6): 1385-1398. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1902.18221

21世纪前期中国降水预估及其订正

张蓓^{1,2,3} 戴新刚² 杨阳^{2,3}

1 甘肃省天水市气象局,甘肃天水 741000 2 中国科学院大气物理研究所东亚区域气候一环境重点实验室,北京100029

3兰州大学大气科学学院,兰州730000

摘 要 用全球格点分析数据集(CRU TSv4.0)月降水资料和24个 CMIP5(Coupled Model Intercomparison Project Phase 5)模式历史模拟数据以及 RCP4.5 情景下的预估数据,分析了多模式集合平均降水的偏差特征并进行了扣除模式气候漂移和一元对数差分回归订正。结果表明,模式降水在西部和北部明显偏多,东南沿海偏少;冷季(11月至次年4月)在全国大部分地区模式降水偏多,暖季(5~10月)东南沿海季风区偏少。1956~2005年多模式集合平均历史模拟降水偏差中 84%属于气候漂移,其余是偏差的非定常模态。扣除气候漂移后,RCP4.5 情景下 2006~2015年中国模式降水预估偏差减小 90%以上,大部分地区降水偏差百分率分布在±5%以内,仅在青藏高原西部和西北中部等地区模式降水偏多10%~40%;暖季降水偏差分布与年降水量类似;冷季偏差较大,北方降水偏多,南方偏少。检验表明,一元线性对数差分回归方程订正后,模式降水对于 2006~2015年期间西南和江南中部的干旱少雨气候均能再现,且距平同号率高于多模式集合平均和扣除气候漂移的结果。用该方法对 RCP4.5 情景下 2016~2035年模式预估降水进行订正,结果显示,南方(淮河以南)降水减少 5%~20%,河套、内蒙古和华北北部减少 20%~40%,东北南部、淮河流域、西北大部增加10%~40%及以上,东南沿海和台湾省降水增加10%~20%。以上降水预估结果说明,在 RCP4.5 情景下,21 世纪前期持续十年的西南干旱会略有缓解,但南方降水偏少格局变化不大,淮河流域和三江源区及其以西等地降水可能明显增加。中国降水异常分布总体呈现南北少、中间多的格局,但北方和西部高山地带的降水预估存在较大的不确定性。

关键词 CMIP5(Coupled Model Intercomparison Project Phase 5)模式 中国降水预估 偏差订正 线性回归 旱涝格局

文章编号1006-9895(2019)06-1385-14中图分类号P467文献标识码Adoi:10.3878/j.issn.1006-9895.1902.18221

Projection of China Precipitation and Its Bias Correction for the Early 21st Century

ZHANG Bei^{1,2,3}, DAI Xingang², and YANG Yang^{2,3}

1 Tianshui Meteorology Bureau, Tianshui, Gansu 741000

2 Key Laboratory of Regional Climate–Environment for Temperate East Asia, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029

3 College of Atmospheric Sciences, Lanzhou University, Lanzhou 730000

收稿日期 2018-08-29; 网络预出版日期 2019-04-01

作者简介 张蓓,女,1993年出生,硕士研究生,主要从事气候变化研究。E-mail: zhangb13@lzu.edu.cn

通讯作者 戴新刚, E-mail: daixg@tea.ac.cn

资助项目 国家自然科学基金项目41475075、41675087,国家重点研究发展计划项目2016YFA0601901

Funded by National Natural Science Foundation of China (Grants 41475075, 41675087), National Key Research Program of China (Grant 2016YFA0601901)

大气科学	43 卷
Chinese Journal of Atmospheric Sciences	Vol. 43

Abstract Based on precipitation data from CRU TS v4.0 (Climatic Research Unit Time series 4.0) and 24 CMIP5 (Coupled Model Intercomparison Project Phase 5) historical experimental models and the RCP4.5 (Representative Concentration Pathway 4.5) scenario, this paper analyzed the bias and its correction method in precipitation projected by the ensemble of the CMIP5 multi-models. Bias of precipitation estimated over China for 2006-2015 under the RCP4.5 scenario was corrected by removing its climate drift and univariate logarithmic difference regression equation. Results showed that the model precipitation was usually overestimated in western and northern parts of China, while it was underestimated in the southeast coastal zone. In the warm season (May-October), the model precipitation was underestimated in the southeast coastal monsoon zone, while it was significantly overestimated in the cold season (November-April). 84% precipitation deviations simulated by the historical experiment from 1956 to 2005 belonged to climate drift, the rest to unsteady modes. Bias of model precipitation was decreased by about 90% after removal of climate drift, and the anomaly percentage in most areas was within $\pm 5\%$. Model precipitation was overestimated 10%-40% in the western Tibetan Plateau and the middle northwestern region. Distribution of precipitation anomaly was similar to annual precipitation in warm season. The deviation of the cold season was larger, with more precipitation in the north and less in the south. The model was improved in its coincidence rate of anomaly sign after correction by using single linear logarithmic increment regression. The drought and reduced rain in the southwestern and central parts of the regions south of the Yangtze River reappeared during the period from 2006 to 2015, although the standard deviation was larger than the correction of climate drift. After the correction by SR-Log-Increment, the projected precipitation for 2016-2035 under RCP4.5 scenario showed that the precipitation would increase in the northeastern part of the south, the Huaihe River basin, and most parts of the northwest by about 10%-40%. Over the southeast coast and Taiwan, precipitation increased by about 10%-20%. It decreased in the south of the Huaihe River by about 5%-20%, while in Hetao, Inner Mongolia, and north of Northern China, the decrease was about 20%-40%. Results implied that under the RCP4.5 scenario, the southwest drought would be slightly relieved in the early 21st century, while there would be little change in the pattern of less precipitation in the south. Also, precipitation would increase significantly in the Huaihe River basin, the source of the three rivers, and its western region. Distribution of the precipitation anomaly over mainland China would present a pattern of less precipitation in the south and north, with more in the middle. Nevertheless, the projection of precipitation in the northern and western alpine regions had clear uncertainty.

Keywords CMIP5 (Coupled Model Intercomparison Project Phase 5), China precipitation, Bias correction, Simple regression, Pattern of drought and flood

引言 1

20世纪后半叶以来,全球温度明显上升并伴 随着极端天气、气候事件的增多(IPCC, 2014; Dai et al., 2018)。这些气候的变化已经引起我国旱 涝灾害格局的变化,例如,21世纪初的西南严重 干旱 (Dai et al., 2015), 已经给社会、经济和人民 财产造成了严重损失,并带来一系列环境问题(沈 永平和王国亚, 2013; 秦大河等, 2014)。全球降 水格局的变化可能造成区域性水资源危机,对于工 农业生产用水及生态环境保护等都提出了严峻挑战 (Meehl and Tebaldi, 2004; 翟建青等, 2014)。中 国独特的地理位置和复杂地形使得气候降水的空间 分布极不均匀且伴有很大的年际变化。就东亚降水 的形成机理来说,除了夏季的对流性降水和台风暴 雨,主要有季风(热带和副热带季风)和西风带扰 动,以及二者的相互作用,其机理比较复杂,影响 因子较多。这给降水的跨季度预测或多年代尺度的 预估带来很大的困难(陈活泼等, 2012; Song and Zhou, 2014)。因此, 较为准确地预估未来10~20 年、甚至更长时间尺度的气候变化,对于国家中、 长期发展规划和防灾、减灾的战略部署都具有重要 意义(Xu and Xu, 2012; 苏涛和封国林, 2014)。

当今,短期气候预测主要有三种方法,即动力 学方法 (数值模式)、概率统计方法以及动力一统 计结合的方法。然而,对于未来几十年、甚至百年 尺度的气候预估,必须考虑温室气体、气溶胶及土 地利用等地球环境方面的变化。为此, IPCC AR5 (Intergovernmental Panel on Climate Change Fifth Assessment Report)设计了从低到高的四种路径排 放情景,即RCP2.6、RCP4.5、RCP6.0及RCP8.5 (Riahi et al., 2011; Thomson et al., 2011; Van

Vuuren et al., 2011)。第五次国际耦合模式比较计 划(CMIP5)将这些排放情景作为模式的强迫场或 边界条件来积分海—气耦合气候数值模式,从而得 到未来百年的全球气候情景预估(Moss et al., 2010; Semenov and Stratonovitch, 2010; Taylor et al., 2012)。对于未来气候预估科学家大多采用多 模式集合平均的方法,即用多个模式积分输出气象 数据平均预估未来气候变化(Barnston et al., 2003)。然而,若干研究已经发现,无论是CMIP5 的历史气候模拟,还是未来排放情景下的气候预 估,采用简单集合平均的方法都存在较大偏差,导 致预估存在较大的不确定性(陈威霖等, 2012; 成 爱芳等,2015)。为此,需要研究对模式输出数据 进行订正的理论和方法,进一步提高未来气候情景 预估的可信度。Huang and Ying (2015) 提出了 EPR方法,即建立"历史气候一未来变化"的线性 关系,较好地订正了热带太平洋地区海温变化分布 型的预估; Huang等(2016)采用的经验正交函数 (EOF) 法是假设 EOF 模态不随时间变化, 通过建 立预估场和观测场EOF展开时间系数之间的多元 回归模型,以此对预估场的EOF展开时间系数进 行订正。另一种订正思路是考虑模式输出数据的带 权集合平均问题,即给不同模式赋予不一样的权 重,权重由模式的历史气候模拟水平确定。例如, 贝叶斯模式平均(BMA)被认为是多模式集合平 均预估的优良方法,已经被一些学者用于制作未来 路径排放情景下的气候预估(Zhang and Yan, 2015)。在BMA算法中需要估计每个模式的方差 和权重,所用方法是期望最大化(Expectation Maximization: EM)。不过,该方法仅是局域最 优,且要求被估计数据满足正态分布(Raftery et al., 2005)。田向军等(2011)利用一种有限记忆 的牛顿优化算法(LBSGF-B) 替换了其中的EM, 发展出改进型的贝叶斯模式平均算法 (BMA-BFGS),其精度与马尔科夫链蒙特卡洛 (MCMC) 方法相仿,但计算用时更少,结果接近于EM方 法。此外,也有根据CMIP5的历史模拟和未来预 估数据用统计或动力降尺度方法来减少预估偏差, 得到区域尺度未来气候的情景预估(Xu and Yang, 2012; Fan et al., 2013; Gao et al., 2013; Zou and Zhou, 2013; 孙建奇等, 2018)。当然, 动力 降尺度方法依然存在未来大尺度模式强迫场的偏差 订正问题,而统计降尺度方法则需要解决CMIP5 历史气候模拟和未来气候情景预估数据之间的统计 非平稳性问题。

1387

过去一系列的相关研究显示,CMIP5模式对 于区域降水预估存在明显偏差(陈晓晨等,2014; 苏琪骅,2017),需要进行订正以减少其不确定性。 本文拟详细分析CMIP5多模式集合平均降水在中 国的偏差分布特征并用线性回归方法进行订正。考 虑到统计回归订正的主要困难在于模式数据的非正 态和非平稳性,本文选用一元对数差分回归方法对 模式降水进行订正。在此基础上,对21世纪前期 (2016~2035年)的中国降水情景预估进行订正。 第2节介绍数据、模式和方法;第3节评估CMIP5 多模式集合平均历史模拟降水的偏差特征;第4节 展示 2006~2015年模式集合预估降水的偏差分布 并对其进行订正和检验;第5节给出21世纪前期降 水情景预估及其订正结果;最后一节是总结和 讨论。

2 数据和方法

本文选用英国气候研究所(CRU)提供的格 点降水分析数据集(CRU TS v4.0)作为模式偏差 评估的参考态,在下文中均视为"观测降水",其 分辨率为 0.5°×0.5° (Harris et al., 2014)。在 CMIP5模式群中,选取了24个常用模式(表1)输 出的1956~2005年逐月历史气候模拟降水数据集, 以及RCP4.5情景下2006~2035年的未来降水预估 数据集。由于大多数模式的分辨率较低且不统一, 故采用 OpenGrADS 软件 (http://www.opengrads. org/[2018-08-20]) 中的双线性/面积平均插值法 (RE) 将模式和观测降水数据均插值到1.0°×1.0° 的格点上再进行比较和偏差分析 (Jiang et al., 2005)。拟采用的偏差订正方法有两种,第一种是 扣除模式气候漂移,即先计算24个CMIP5模式集 合对 1956~2005 年中国降水的历史模拟平均偏 差,以此作为模式降水气候漂移,通过扣除这一 部分对未来降水预估进行订正; 第二种是建立格 点上CMIP5历史气候模拟降水与观测降水之间的 一元对数差分回归方程,即利用CMIP5多模式集 合平均降水数据与CRU降水格点降水数据建立一 元线性回归方程,在回归计算前已对降水数据取 对数并将对数降水序列转变成一阶对数差分序列 或降水对数年际增量序列(范可等, 2007),其

Table 1 Parameters information of the 24 CMIP5 (Coupled Model Intercomparison Project Phase 5) models							
模式名称	单位及所属国家	格点数(纬向×经向)	模式名称	单位及所属国家	格点数(纬向×经向)		
ACCESS1-0	CSIRO-BOM, 澳大利亚	192×145	INMCM4	INM, 俄罗斯	180×120		
ACCESS1-3	CSIRO-BOM, 澳大利亚	192×145	IPSL-CM5A-LR	IPSL, 法国	96×96		
BCC-CSM1-1	BCC, 中国	128×64	IPSL-CM5A-MR	IPSL, 法国	144×143		
BCC-CSM1-1-m	BCC, 中国	320×160	IPSL-CM5B-LR	IPSL, 法国	96×96		
CanESM2	CCCMA,加拿大	128×64	MIROC5	MIROC, 日本	256×128		
CCSM4	NCAR,美国	288×192	MIROC-ESM	MIROC, 日本	128×64		
CNRM-CM5	CNRM-CERFACS, 法国	256×128	MIROC-ESM-CHEM	MIROC, 日本	128×64		
CSIRO-Mk3-6-0	CSIRO-QCCCE, 澳大利亚	192×96	MPI-ESM-LR	MPI-M, 德国	192×96		
GISS-E2-H	NASA GISS, 美国	144×90	MPI-ESM-MR	MPI-M, 德国	192×96		
GISS-E2-H-CC	NASA GISS, 美国	144×90	MRI-CGCM3	MRI, 日本	320×160		
GISS-E2-R	NASA GISS, 美国	144×90	NorESM1-M	NCC, 挪威	144×96		
GISS-E2-R-CC	NASA GISS, 美国	144×90	NorESM1-ME	NCC, 挪威	144×96		

表1 24个CMIP5模式的参数信息

目的是削弱降水序列的非正态和非平稳性,以便 该回归方程可以用于未来气候情景下的降水预估 订正。

历史降水模拟 3

3.1 模式降水偏差

一个模式的集合平均降水是指在不同初始条件 下模式积分结果的算术平均。对于多个模式再取平 均就得到多模式集合平均。在未特别说明时,下文 中的"模式降水"均指"每个模式取一个初值积分 的多模式(24个模式)集合平均降水"。此外,由 于我国降水分布受南北气候差异的影响大,本文将 12个月划分为暖季(5月至10月)和冷季(当年 11月至次年4月),对其降水分别进行检验分析。 从1956~2005年模式历史模拟降水偏差百分率看 (图1),模式年降水量在西北部偏多,东南部偏 少: 西北大部分地区偏多达60%以上, 东北和华 北偏多10%~40%;偏少区域主要位于沿海和江南 等地,其中东部沿海偏少约10%,华南沿海和海南 省偏少10%~20%(图1a)。暖季模式降水偏差分 布与年降水类似,但东南沿海的降水偏少幅度与范 围有所增加,西部降水偏多范围缩小(图1b);冷 季模式降水在中国大部分地区明显偏多达40%~ 60%及以上,仅在华南沿海和江南中部等地偏少 (图1c)。这表明,模式降水偏差分布具有地域性

和季节性,东南沿海的降水偏少主要是在暖季(东 亚夏季风季节),可能是由于模式模拟的东亚夏季 风偏弱造成;而在华南,模式降水偏少除了暖季季 风模拟偏弱外,还可能与冷季模式降水偏少有关 (黄荣辉等, 2006: 孙颖和丁一汇, 2008)。西部多 山地区模式降水偏差可能源于模式对固体降水物理 过程描述不完善, 或模式分辨率偏低, 对复杂地形 上的降水模拟较差等因素有关(高学杰等,2006; 胡芩等,2014;柳媛普等,2014)。这些偏差的存 在表明,CMIP5历史气候模拟降水在中国存在系 统性偏差,无论依据其进行气候变化机理分析,或 进行未来气候情景预估前都需要进行订正, 以减少 不确定性。

3.2 模式间降水差异

利用泰勒图(Taylor, 2001)可以评估24个 CMIP5模式对中国1956~2005年降水场的模拟能 力。泰勒图中有相关系数和标准差两个基本参数。 前者是格点上的观测降水和模式降水序列的相关系 数的全场平均,后者是全场平均格点模式降水序列 标准差与观测降水标准差之比。从图2可以看到, 各模式年平均降水模拟场与观测场的相关系数均分 布在0.5~0.8之间,均超过95%信度水平的显著性 检验;标准差之比则大多分布在0.5~1.0之间,即 比较接近于观测降水标准差,只有GISS-E2-H、 GISS-E2-H-CC、GISS-E2-R-CC和GISS-E2-R四个

1388



6期

图 1 1956~2005 年 24 个 CMIP5 模式集合平均降水量与观测 (CRU TS v4.0) 降水量的偏差百分率:(a) 年降水;(b) 暖季(5 ~10月)降水; (c) 冷季(11~4月)降水

Fig. 1 Bias percentage of precipitation between ensemble mean of 24 CMIP5 models and observations from CRU TS v4.0 (Climatic Research Unit Time series 4.0) during 1956-2005: (a) Annual precipitation; (b) precipitation in warm season (May-October); (c) precipitation in cold season (November-next April)

模式的标准差之比相对较大,介于1.5~2.0之间。 从图中还可以看出,模式CCSM4、CNRM-CM5、 INMCM4、NorESM1-M的标准差与观测标准差相 差较小,其相关系数均在0.7以上; MIROC5模式 相关系数是24个模式中最大的,其标准差与观测 降水也较为接近,是24个模式中表现最好的模式。 而 IPSL-CM5A-MR、 IPSL-CM5B-LR、 MIROC-ESM、MIROC-ESM-CHEM这4个模式与观测降水 的相关系数均未达到0.6,且其标准差也与观测标 准差相差较大。这些评估结果说明,24个CMIP5 模式中多数模式的降水模拟能力比较相似, 在泰勒 图中分布比较集中,但分析还表明,它们在降水空 间分布型和变化幅度等方面也存在明显偏差(张蓓 和戴新刚, 2016)。因此, 需要研究对模式输出数 据进行订正的理论和方法,以减少模式降水预估的 不确定性。

3.3 偏差时空特征

考虑到中国大多数台站建站于1954年后(Li et al., 2010), 兹将1956~2005年作为检验CMIP5 模式中国降水历史模拟偏差的参考时段。对该时段 模式降水与观测降水之差进行经验正交函数 (EOF) 分解,以此来分析偏差的时空分布特征。 图3显示, EOF第一模态约占总方差的84%, 是偏 差的主要成分,去除此模态理论上可以有效减少中 国模式降水偏差。EOF展开的第二至第七模态依 次占总方差的 2.03%、1.75%、1.39%、1.20%、 0.98%、0.79%,属于小量,几乎可以忽略不计。 模式降水偏差场的EOF展开第一模态(EOF1)在 全国大部分地区模式降水偏多,明显偏多地区位 于青藏高原东南部;模式降水偏少地区位于华南 沿海、海南和台湾省、山东半岛等地(图4a)。 注意到EOF1时间系数恒为正,其演变除了呈现 弱的下降趋势和波动变化外,似乎还存在一个弱 的年代际变化,转换点在1980年代初,与全球大 气环流的年代际变化一致(图4d)(陈红,2014; 林朝晖等,2018)。这表明该部分模式降水偏差 较为稳定,偏差分布类似于图1a,其主要部分大 致可认为是反映了集合模式降水偏差的气候漂移 部分。

EOF 展开的第二模态(EOF2)呈现长江以南 和淮河流域符号相反的偶极结构(图4b),其时间 系数在正一负之间振荡(图4e),属于偏差的非定 常部分,在南方大部和淮河流域等地的模式降水偏 差会因时间系数振荡在偏多或偏少之间循环。EOF 展开的第三模态(EOF3)显示,除了华南沿海和 海南省外,中国东部降水偏差具有一致性(图 4c),其时间系数除了振荡外还存在一个上升趋势 (图4f),说明EOF3表示的模式降水偏差在中国东







图3 1956~2005年中国降水量与CMIP5模拟偏差主成分(PC) 方差分布。左侧纵坐标表示第一主成分占总方差的百分比(蓝 色柱),右侧纵坐标为第二至第七主成分占总方差的百分比(红 色柱)

Fig. 3 Variances in precipitation-bias PCs (principal components) from CMIP5 simulation for 1956–2005. The left *y*-axis represents the percentage of the first principal components (blue bar) in the total variance, the right *y*-axis represents the percentage of the second to seventh principal components (red bars) in the total variance

部随着时间有增强的趋势,即模式降水估计偏多 呈现逐渐上升的趋势。可见,模式降水偏差除气 候漂移部分外,还存在明显的年际,甚至年代际 变化。尽管偏差的非定常部分方差贡献小,但在 模式降水气候漂移较小的地带(图4a)降水偏差 会受到非定常性的明显影响,对此也需要进行 订正。

4 情景降水预估偏差

4.1 观测降水距平

21世纪初中国降水异常分布发生了较大的变 化。基于CRU TS v4.0 降水计算出 2006~2015 年平 均降水量相对于1976~2005年的距平(图5a)显 示,这十年中国西南部、江南中部及长江中游至淮 河中、上游降水减少40~50 mm, 华北减少10~ 30 mm,均对应于 5%~10% 的降水减少率(图 5d); 青藏高原南部降水减少也达20~50 mm, 对 应于10%~40%的减少率,其原因是该地气候降水 稀少,年际及年代际变化率相对比较大。降水增加 的区域主要位于东南沿海、台湾和海南省、西北东 部、东北东南边界带、河套以南至长江一带等地, 对应的降水增加百分率依次为5%~10%、10%~ 20%、10%~40%、5%~10%、5%~10%等,其中 三江源区降水增加10%~20%。暖季降水距平分布 与年降水相似(图5b),只是西南、华北和东北的 降水减少率略有增加,其中东北南部和华北北部的 降水减少率达到10%~20%; 西北中东部和东南沿 海的降水增加率也有所上升,个别地区超过10% (图5e)。这说明夏季风降水异常是中国年降水量 变化的主要来源。冷季降水异常分布与暖季有所不 同,降水距平大致呈带状分布,淮河以南和青藏高



图 4 1956~2005 年 24 个 CMIP5 模式集合平均的降水量相对观测降水量偏差场的主成分分析: (a、b、c) 经验正交函数的前三个模态 (EOF1、EOF2、EOF3); (d、e、f) 前三个主成分 (PC1、PC2、PC3)

Fig. 4 Principal component analysis of precipitation bias from ensemble mean of 24 CMIP5 models and observations for 1956–2005: (a, b, c) The first, second, and third empirical orthogonal functions (EOFs) noted as EOF1, EOF2, EOF3; (d, e, f) the first, second and third principal components noted as PC1, PC2, PC3

原南部降水减少(图5c),减少率均大于暖季,其 中青藏高原西南部和新疆东部降水减少40%以上, 云贵高原减少5%~40%,长江中游、福建沿海等 地减少5%~30%(图5f)。因此,华北北部和东北 的降水减少主要由暖季季风降水减少造成,而江南 中部、西南和青藏高原南部等地的降水减少既有暖 季季风降水减少的贡献,也与冷季降水偏弱有关。

4.2 气候漂移订正

最简单的模式降水偏差订正法是直接扣除模式 的气候漂移部分。原则上一个模式的气候漂移应该 是充分长的时间积分平均降水与相应观测降水之 差。考虑到中国大多数气象观测站的建站时间,本 文将1956~2005年(50年)平均模式降水偏差近 似作为模式降水的气候漂移部分。降水的气候参考



图5 2006~2015年观测降水量距平(左)及其百分率(右):(a、d)年降水;(b、e)暖季降水;(c、f)冷季降水。参考时段为1976~2005年,下同

Fig. 5 Observed precipitation anomalies (left) and their percentage (right) during 2006–2015: (a, d) Annual precipitation; (b, e) precipitation in warm season; (c, f) precipitation in cold season. Reference period is 1976–2005, the same below

态均为1976~2005年CRUTS v4.0格点降水(视为 观测降水)。为了检验RCP4.5情景下模式降水扣除 气候漂移后的订正效果,在2006~2015年模式降 水中扣除其气候漂移部分就得到订正后的模式降 水。从图6可以看到,经偏差订正后,年、暖季和 冷季降水预估偏差均有了明显改善,整个中国区域 年降水偏差减少接近90%,暖季减少约89%,冷季 减少约93%。因此,对模式集合平均降水进行气候 漂移订正可以有效地减少模式降水预估偏差,尤其 是冷季的降水偏差。图6a显示,订正后模式年降 水量在北方略偏多,偏多明显的区域位于山东半岛 和辽东半岛,达到40~50 mm左右,但从降水百 分率看约为10%;降水偏多最明显的区域位于西北 中部干旱区,达到20%~40%及以上(图6d);模 式降水量偏少较明显的区域在黄河以南地区,但从 降水百分率看,该区域降水偏少均在5%以内。经

1393



图 6 2006~2015年RCP4.5情景下扣除气候漂移后24个CMIP5模式集合平均降水量距平(左)及其百分率(右):(a、d)年降水;(b、e)暖季降水;(c、f)冷季降水

Fig. 6 24 CMIP5 models ensemble mean precipitation anomalies (left) and their percentage (right) after removing model climate drift under the RCP4.5 (Representative Concentration Pathway 4.5) scenario during 2006–2015: (a, b) Annual precipitation ; (c, d) precipitation in warm season; (e, f) precipitation in cold season

气候漂移订正后暖季模式降水偏差分布与年降水类 似,只是北方降水偏多的范围缩小,偏少的范围增 大(图6b、e)。冷季的模式降水偏差分布依然是 北方偏多,南方偏少(图6c),但从降水偏差百分 率看,北方模式降水增加的区域明显扩大、幅度增 大,在西北东部、内蒙古及环渤海湾降水偏多都在 10%~40%及以上(图6f);降水偏少区域南移、 幅度增大,在青藏高原南部、云贵高原和东南沿海 等地降水偏少均超过10%。这些结果说明扣除模式 降水气候漂移订正后,虽然总体偏差明显减小,但 在个别区域,特别是干旱少雨地区,依然存在较大 的偏差百分率,在降水稀少的冬季尤为明显。这表 明,模式降水偏差的非定常部分仍然不能忽略,需 要进一步订正,特别是对于未来长时期的降水 预估。

4.3 回归方程订正

建立模式降水与观测降水之间的统计回归方程 是模式降水偏差订正的方法之一,即利用CMIP5 历史模拟数据建立模式降水与观测降水之间的回归 方程,并将其用于未来模式降水的预估订正。例 如,将每一个格点上模式降水视作一个变元,可以 建立24个模式降水的多元回归方程,其中归一化 的回归系数可视为每个模式的权重,即模式之间相 对优劣的一个度量。因而多元回归方程的订正结果 可以看成是模式降水的带权集合平均。另一种简单 的方法是, 先对24个模式历史模拟降水做算术平 均或集合平均,然后再与观测降水建立一元线性回 归方程,最后将该方程应用于模式未来预估降水, 得到订正后的降水预估。实际计算检验表明,一元 线性回归方程的订正效果优于多元线性回归方程。 因此本文使用前者进行模式降水的偏差订正。由于 降水数据的非正态和非平稳性等特点,用训练期数 据建立的回归方程不一定能适用于未来模式降水的 预估订正。因此做回归计算之前先对模式和观测降 水数据取对数,再将对数降水序列变为一阶差分或 年际增量对数降水序列(范可等, 2007),最后再 做回归方程订正。具体过程是,先用1960~2005 年24个CMIP5模式的历史气候模拟降水集合平均 和观测降水数据建立一元线性回归方程,再将方程 估计的结果返回到降水序列,以此得到订正后的 2006~2015年模式集合平均预估降水。比较图7a、 图 6a、图 5a 可见,除了内蒙古、华北北部和东北 北部外,一元对数差分回归法订正后的大尺度降水 距平分布场与扣除气候漂移的降水距平场比较相 似,但其异常幅度更大。相对于扣除气候漂移订正 的结果,一元对数差分回归法能较好地预估出南方 和青藏高原南部的大部分降水偏少区域,以及除长 江下游外东部和东南部沿海的降水偏多带;对于华 北北部和东北大部的降水偏少区域也在一定程度上 做出了预估,但对新疆南部和青藏高原大部的降水 预估仍然严重偏多,偏多达40%~50%;对山东、 苏北和辽宁南部等地的降水预估偏多30%~50%, 长江流域偏少10%~20%,华北、东北北部及内蒙 古大部等地偏少10%~30%(图7d、图5d)。因 此,对于未来预估降水的订正,不确定性依然较 大,在变化趋势(距平符号)方面可信度较高,但 在定量方面仍需要进一步提高精度。

订正后暖季模式降水的距平分布也大致与观测 降水相似(图7b、图5b),例如2006~2015年西 南、江南中部、华北北部和东北等地的降水偏少, 东南沿海(除长江下游外)的降水偏多,三江源区 的降水偏多。不足之处是降水距平的幅度大于观测 降水,并且夸大了环渤海湾沿岸的降水增加带。从 降水距平百分率看,西南和江南中部降水预估比观 测降水偏少10%~20%,在华北和东北偏少20%~ 30%; 而在降水偏多区域, 除了三江源区外, 订正 后的暖季模式降水偏多均达到20%~30%,淮河上 游降水预估更是比观测降水偏多达30%~40%(图 7e、图5e)。订正后的冷季模式降水在北方存在较 大的偏差,在南方与观测降水比较接近(图7c、 图5c)。例如,在河套、华北及内蒙古等大部地区 的降水预估与实况相反,观测降水变化偏多10%~ 20%, 而模式预估降水偏少20%~40%; 新疆和青 藏高原大部模式降水预估均偏多10%~40%;但对 华南、江南,特别是西南地区的降水预估与实况比 较接近,与扣除气候漂移订正的结果更为接近。上 述降水预估结果的对比说明,这两种订正方法对暖 季降水比较有效,但对冷季固体降水预估的订正效 果均较差,对南方模式预估降水的订正效果要好于 北方和西部。

5 二十一世纪前期降水预估

从2006~2015年检验期预估降水距平与观测 降水距平的同号率看,单纯多模式集合平均为 45%,扣除气候漂移后增至56%,一元对数差分回 归方程订正后增加到64%,后二者均达到业务上可 用的标准(超过50%)。因此对于RCP4.5情景下21 世纪前期(2016~2035年)中国的降水预估,本 文选用一元对数差分回归方程订正法。根据1960 ~2005年历史数据建立的格点降水一元对数差分 回归方程订正了2016~2035年模式集合平均预估 降水(图8a),结果显示,中国未来降水距平场分 布出现了多个区域性的正负距平结构,即南方、青 藏高原南沿地带和长江中下游降水减少5%~20%, 内蒙古、河套和华北北部均减少20%~40%;三江 源区、山东、河南等地降水增加10%~40%,新疆 南部和青藏高原西部极端干旱区降水增加达20%~ 40%, 辽宁南部增加10%~20%, 福建东南部和台 湾省等地增加约10%。因此,21世纪前期中国的

1395



图7 2006~2015年一元对数差分回归方程偏差订正后的RCP4.5情景下24个CMIP5模式集合平均降水预估距平(左)及其百分率(右): (a、d)年;(b、e)暖季;(c、f)冷季

Fig. 7 Precipitation projection anomalies (left) and their percentage (right) from 24 CMIP5 models under scenario RCP4.5 using univariate logarithmic difference regression equation for 2006–2015: (a, d) Annual precipitation; (c, e) precipitation in warm season; (c, f) precipitation incold season

降水异常分布大致呈现南北少、中间多的格局。

24个模式集合平均降水预估的不确定性还可 以用每个模式降水相对于集合平均降水的离散度即 相对标准差近似表达(图8b)。中国大部分地区年 平均降水预估模式间相对标准差在40%以下,只 有西北北部和青藏高原南部地区相对标准偏差较 高,尤其是在西北北部大部分地区达60%以上。 如果假设订正后模式降水的离散度不变,即相当于 每个模式降水的订正只是一个线性平移过程,则可 以用该离散度近似表示订正后降水预估的不确定 性。显然,相对标准差较大的格点降水预估的不确 定性较大,反之较小。另一方面,注意到订正后 2006~2015年降水偏差分布仍然存在区域性特征, 也可以将其作为评估2016~2035年预估降水偏差



图8 RCP4.5情景下一元对数差分回归方程偏差订正后24个CMIP5模式集合平均预估的2016~2035年降水量:(a)距平百分率;(b)相 对标准差。回归方程建模时段:1960~2005年;参考时段:1976~2005

Fig. 8 Bias-corrected precipitation of CMIP5 24-model ensemble mean under RCP4.5 by using univariate logarithmic difference regression equation for 2016–2035: (a) Anomaly percentage; (b) relative standard deviation. The regression equation established period is 1960–2005; reference period is 1976–2005

的一个参考,以此粗略估计订正后21世纪前期降 水预估中可能存在的偏差地理分布。例如,图8a 中华北和东北北部20%~40%的降水减少可能是订 正方法造成的偏差,不确定性较大。而图中订正后 的南方(35°N以南)降水预估偏差相对较小。

6 结论与讨论

综上所述,CMIP5多模式集合的历史气候模 拟和RCP4.5情景下的降水预估均存在较大的偏差, 其中模式气候漂移是偏差的主要来源。在中国西 部,特别是高原山区,模式降水明显偏多,在东南 沿海偏少;冬季中国绝大部分地区模式降水或降雪 亦明显偏多,夏季降水偏多范围有所减少,但东南 沿海模式降水偏少范围增加。因此,未做订正的多 模式集合平均情景降水预估存在较大的不确定性。 EOF 分解表明,模式集合降水偏差中气候漂移部 分大约占80%以上,其余可归为偏差的非定常部 分。虽然扣除气候漂移能有效减少模式降水预估的 总体偏差并在大尺度降水异常分布型上与观测降水 较为一致,但其降水预估场缺乏实际降水的区域尺 度异常结构特征。而经过一元对数差分回归订正的 模式降水更接近于实际降水的区域性异常结构,距 平同号率也明显增加。用一元对数差分回归方程订 正法对未来降水预估进行订正, 订正后的结果表 明,相对于1976~2005年30年平均,未来20年南 方降水仍然处于偏少位相,长江中下游一带降水可 能减少10%左右,黄河和长江之间、三江源区以 及西部的大部分地区降水可能增加10%~20%。因 此,21世纪前期(2016~2035年)中国的降水异 常分布可能会呈现南方少、中间多的格局。但订正 后的预估结果在南方比较有参考价值,在西部多山 或干旱地区,以及北部内蒙古一带仍然存在较大的 不确定性。

致谢 绘图等方面得到冯锦明研究员的帮助。

参考文献(References)

- Barnston A G, Mason S J, Goddard L, et al. 2003. Multimodel ensembling in seasonal climate forecasting at IRI [J]. Bull. Amer. Meteor. Soc., 84(12): 1783–1796. doi:10.1175/BAMS-84-12-1783
- 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
- 陈活泼, 孙建奇, 陈晓丽. 2012. 我国夏季降水及相关大气环流场未 来变化的预估及不确定性分析 [J]. 气候与环境研究, 17(2): 171-183. Chen Huopo, Sun Jianqi, Chen Xiaoli. 2012. The projection and uncertainty analysis of summer precipitation in China and the variations of associated atmospheric circulation field [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 17(2): 171-183. doi: 10. 3878/j.issn.1006-9585.2011.10137
- 陈威霖, 江志红, 黄强. 2012. 基于统计降尺度模型的江淮流域极端 气候的模拟与预估 [J]. 大气科学学报, 35(5): 578-590. Chen Weilin, Jiang Zhihong, Huang Qiang. 2012. Projection and simulation of climate extremes over the Yangtze and Huaihe River

basins based on a statistical downscaling model [J]. Transactions of Atmospheric Sciences (in Chinese), 35(5): 578–590. doi:10.3969/j. issn.1674-7097.2012.05.008

- 陈晓晨, 徐影, 许崇海. 2014. CMIP5 全球气候模式对中国地区降水 模拟能力的评估 [J]. 气候变化研究进展, 10(3): 217-225. Chen Xiaochen, Xu Ying, Xu Chonghai. 2014. Assessment of precipitation simulations in China by CMIP5 multi-models [J]. Progressus Inquisitiones de Mutatione Climatis (in Chinese), 10(3): 217-225. doi:10.3969/j.issn.1673-1719.2014.03.011
- 成爱芳, 冯起, 张健恺, 等. 2015. 未来气候情景下气候变化响应过程 研究综述 [J]. 地理科学, 35(1): 84-90. Cheng Aifang, Feng Qi, Zhang Jiankai, et al. 2015. A review of climate change scenario for impacts process study [J]. Scientia Geographica Sinica (in Chinese), 35(1): 84-90. doi:10.13249/j.cnki.sgs.2015.01.010
- Dai X G, Liu Y, Wang P. 2015. Warm–dry collocation of recent drought in southwestern China tied to moisture transport and climate warming [J]. Chinese Phys. B, 24(4): 049201. doi: 10.1088/1674-1056/24/4/049201
- Dai X G, Liu Y, Wang P. 2018. Identifying the early 2000s hiatus associated with internal climate variability [J]. Sci. Rep., 8: 13602. doi:10.1038/s41598-018-31862-z
- 范可, 王会军, Choi Y J. 2007. 一个长江中下游夏季降水的物理统计预测模型 [J]. 科学通报, 52(24): 2900-2905. Fan Ke, Wang Huijun, Choi Y J. 2008. A physically-based statistical forecast model for the middle-lower reaches of the Yangtze River valley summer rainfall [J]. Chin. Sci. Bull., 53(4): 602-609. doi:10.3321/j.issn:0023-074x.2007.24.014
- Fan L J, Chen D L, Fu C B, et al. 2013. Statistical downscaling of summer temperature extremes in northern China [J]. Adv. Atmos. Sci., 30(4): 1085–1095. doi:10.1007/s00376-012-2057-0
- 高学杰, 徐影, 赵宗慈, 等. 2006. 数值模式不同分辨率和地形对东亚 降水模拟影响的试验 [J]. 大气科学, 30(2): 185-192. Gao Xuejie, Xu Ying, Zhao Zongci, et al. 2006. Impacts of horizontal resolution and topography on the numerical simulation of East Asian precipitation [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 30(2): 185-192. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2006.02.01
- 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]. Atmos. Oceanic Sci. Lett., 6(5): 381–386. doi:10.3878/j.issn.1674-2834.13. 0029
- Harris I, Jones P D, Osborn T J, et al. 2014. Updated high-resolution grids of monthly climatic observations—The CRU TS3.10 dataset [J]. Int. J. Climatol., 34(3): 623–642. doi:10.1002/joc.3711
- 胡芩,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
- Huang J P, Yu H P, Guan X D, et al. 2016. Accelerated dry land expansion under climate change [J]. Nature Climate Change, 6(2):

166-171. doi:10.1038/nclimate2837

- Huang P, Ying J. 2015. A multimodel ensemble pattern regression method to correct the tropical Pacific SST change patterns under global warming [J]. J. Climate, 28(12): 4706–4723. doi: 10.1175/ JCLI-D-14-00833.1
- 黄荣辉, 蔡榕硕, 陈际龙, 等. 2006. 我国旱涝气候灾害的年代际变化 及其与东亚气候系统变化的关系 [J]. 大气科学, 30(5): 730-743. Huang Ronghui, Cai Rongshuo, Chen Jilong, et al. 2006. Interdecaldal variations of drought and flooding disasters in China and their association with the East Asian climate system [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 30(5): 730-743. doi: 10.3878/j.issn.1006-9895.2006.05.02
- IPCC, 2014. Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [M]. Cambridge, UK and New York, USA: Cambridge University Press, 1132pp.
- Jiang D B, Wang H J, Lang X M. 2005. Evaluation of East Asian climatology as simulated by seven coupled models [J]. Adv. Atmos. Sci., 22(4): 479–495. doi:10.1007/BF02918482
- Li Q X, Dong W J, Li W, et al. 2010. Assessment of the uncertainties in temperature change in China during the last century [J]. Chinese Sci. Bull., 55(19): 1974–1982. doi:10.1007/s11434-010-3209-1
- 林朝晖,杨笑宇,吴成来,等. 2018. CMIP5模式对中国东部夏季不同 强度降水气候态和年代际变化的模拟能力评估 [J]. 气候与环境研 究, 23(1): 1-25. Lin Zhaohui, Yang Xiaoyu, Wu Chenglai, et al. 2018. Capability assessment of CMIP5 models in reproducing observed climatology and decadal changes in summer rainfall with different intensities over eastern China [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 23(1): 1-25. doi: 10.3878/j. issn.1006-9585.2017.16207
- 柳媛普,李锁锁,吕世华,等. 2014. 基于 CMIP5 的东亚地区降雪量变 化特征分析 [J]. 冰川冻土, 36(6): 1345-1352. Liu Yuanpu, Li Suosuo, Lü Shihua, et al. 2014. An analysis of the changing characteristics of snowfall in the East Asia based on CMIP5 [J]. Journal of Glaciology and Geocryology (in Chinese), 36(6): 1345-1352. doi:10.7522/j.issn.1000-0240.2014.0161
- Meehl G A, Tebaldi C. 2004. More intense, more frequent, and longer lasting heat waves in the 21st century [J]. Science, 305(5686): 994– 997. doi:10.1126/science.1098704
- Moss R H, Edmonds J A, Hibbard K A, et al. 2010. The next generation of scenarios for climate change research and assessment [J]. Nature, 463(7282): 747–756. doi:10.1038/nature08823
- 秦大河, Stocker T, 259 名作者和TSU (驻伯尔尼和北京). 2014. IPCC 第五次评估报告第一工作组报告的亮点结论 [J]. 气候变化研究进 展, 10(1): 1-6. Qin Dahe, Stocker T, 259 Authors and TSU (Bern & Beijing). 2014. Highlights of the IPCC working group I fifth assessment report [J]. Climate Change Research (in Chinese), 10(1): 1-6. doi:10.3969/j.issn.1673-1719.2014.01.001
- Raftery A E, Gneiting T, Balabdaoui F, et al. 2005. Using Bayesian model averaging to calibrate forecast ensembles [J]. Mon. Wea.

Rev., 133(5): 1155-1174. doi:10.1175/MWR2906.1

- Riahi K, Rao S, Krey V, et al. 2011. RCP8.5—A scenario of comparatively high greenhouse gas emissions [J]. Climatic Change, 109(1/2): 33–57. doi:10.1007/s10584-011-0149-y
- Semenov M A, Stratonovitch P. 2010. Use of multi-model ensembles from global climate models for assessment of climate change impacts [J]. Climate Research, 41(1): 1–14. doi:10.3354/cr00836.
- 沈永平, 王国亚. 2013. IPCC 第一工作组第五次评估报告对全球气 候变化认知的最新科学要点 [J]. 冰川冻土, 35(5): 1068-1076. Shen Yongping, Wang Guoya. 2013. Key findings and assessment results of IPCC WGI fifth assessment report [J]. Journal of Glaciology and Geocryology (in Chinese), 35(5): 1068-1076.
- Song F F, Zhou T J. 2014. Interannual variability of East Asian summer monsoon simulated by CMIP3 and CMIP5 AGCMs: Skill dependence on Indian Ocean-Western Pacific anticyclone teleconnection [J]. J. Climate, 27(4): 1679–1697. doi:10.1175/JCLI-D-13-00248.1
- 苏琪骅. 2017. 基于 CMIP5 模式在中国地区温度与降水的模拟评估 及集合预报方法研究 [D]. 中国科学技术大学硕士学位论文. Su Qiye. 2017. Evaluation and ensemble forecast of the surface air temperature and precipitation in China based on CMIP5 multimodels [D]. M. S. thesis (in Chinese), University of Science and Technology of China, 81pp.
- 苏涛,封国林. 2014. 中国夏季大气水分循环特征及再分析资料对比分析 [J]. 物理学报, 63(24): 493-505. Su Tao, Feng Guolin. 2014. The characteristics of the summer atmospheric water cycle over China and comparison of ERA-Interim and MERRA reanalysis [J]. Acta Physica Sinica (in Chinese), 63(24): 249201. doi:10.7498/aps.63.249201
- 孙建奇, 马洁华, 陈活泼, 等. 2018. 降尺度方法在东亚气候预测中的 应用 [J]. 大气科学, 42(4): 806-822. Sun Jianqi, Ma Jiehua, Chen Huopo, et al. 2018. Application of downscaling methods in the East Asian climate prediction [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 42(4): 806-822. doi:10.3878/j.issn.1006-9895. 1801.17266
- 孙颖, 丁一汇. 2008. IPCC AR4气候模式对东亚夏季风年代际变化的模拟 性能评估 [J]. 气象学报, 66(5): 765-780. Sun Ying, Ding Yihui. 2008. Validation of IPCC AR4 climate models in simulating interdecadal change of East Asian summer monsoon [J]. Acta Meteor. Sinica (in Chinese), 66(5): 765-780. doi:10.11676/qxxb2008.070
- Taylor K E. 2001. Summarizing multiple aspects of model performance in a single diagram [J].J. Geophys. Res., 106(D7): 7183–7192. doi: 10.1029/2000JD900719

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

- Thomson A M, Calvin K V, Smith S J, et al. 2011. RCP4.5: A pathway for stabilization of radiative forcing by 2100 [J]. Climatic Change, 109(1–2): 77–94. doi:10.1007/s10584-011-0151-4
- 田向军,谢正辉,王爱慧,等. 2011. 一种求解贝叶斯模型平均的新方法 [J]. 中国科学: 地球科学, 41(11): 1679-1687. Tian Xiangjun, Xie Zhenghui, Wang Aihui, et al. 2011. A new approach for Bayesian model averaging [J]. Sci. China: Earth Sci., 55(8): 1336-1344.
- Van Vuuren D P, Stehfest E, Den Elzen M G J, et al. 2011. RCP2.6: Exploring the possibility to keep global mean temperature increase below 2°C [J]. Climatic Change, 109(1–2): 95–116. doi: 10.1007/ s10584-011-0152-3
- 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 Z F, Yang Z L. 2012. An improved dynamical downscaling method with GCM bias corrections and its validation with 30 years of climate simulations [J]. J. Climate, 25(18): 6271–6286. doi:10.1175/ JCLI-D-12-00005.1
- 翟建青,占明锦,苏布达,等. 2014. 对IPCC 第五次评估报告中有关 淡水资源相关结论的解读 [J]. 气候变化研究进展, 10(4): 240-245. Zhai Jianqing, Zhan Mingjin, Su Buda, et al. 2014. The interpretation of fresh water resources in the fifth assessment report of IPCC [J]. Climate Change Research (in Chinese), 10(4): 240-245. doi:10.3969/j.issn.1673-1719.2014.04.002
- Zhang X L, Yan X D. 2015. A new statistical precipitation downscaling method with Bayesian model averaging: A case study in China [J]. Climate Dynamics, 45(9–10): 2541–2555. doi:10.1007/s00382-015-2491-7
- 张蓓,戴新刚. 2016. 2006~2013年 CMIP5 模式中国降水预估误差 分析 [J]. 大气科学, 40(5): 981-994. Zhang Bei, Dai Xingang. 2016. Assessment of the deviation of China precipitation projected by CMIP5 models for 2006-2013 [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 40(5): 981-994. doi: 10.3878/j. issn.1006-9895.1511.15212
- 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]. Adv. Atmos. Sci., 30(3): 806– 818. doi:10.1007/s00376-013-2209-x