杨阳, 戴新刚, 唐恒伟, 等. 2019. CMIP5 模式降水订正法及未来30年中国降水预估 [J]. 气候与环境研究, 24(6): 769−784. YANG Yang, DAI Xingang, TONG Hangwai, et al. 2019. CMIP5 Model Precipitation Bias-correction Methods and Projected China Precipitation for the Next 30 Years [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 24(6): 769−784. doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2019.19021

CMIP5模式降水订正法及未来30年中国降水预估

杨阳[1,2] 戴新刚[2,1] 唐恒伟[3] 张蓓[4]

1 兰州大学大气科学学院，兰州 730000
2 中国科学院东亚区域气候—环境重点实验室，中国科学院大气物理研究所，北京 100029
3 香港天文台，香港 999077
4 甘肃省天水市气象局，甘肃天水 741000

摘　要　借助英国气候研究所（Climate Research Unit, CRU）全球陆地格点分析数据集（CRU TS v4.0）月降水资料和24个国际耦合模式比较计划第五阶段（Coupled Model Intercomparison Project Phase 5, CMIP5）模式历史气候模拟及RCP4.5情景下的降水预估数据，设计了多种回归方案并对模式降水预估偏差进行订正。这些方案包括一元回归、一元对数回归、一元差分回归、一元对数差分回归、多元回归、多元对数回归、多元差分回归、多元对数差分回归和简单移除气候漂移等。2006～2015年中国大陆模式降水预估的订正结果表明，一元回归订正法普遍优于多元回归订正和扣除气候漂移订正法，其中一元对数回归法的效果最好，其降水距平同号率（Anomaly Rate, AR）和降水距平百分率相关系数（Anomaly Percentage Correlation Coefficient, APCC）最高，分别达到69%和0.5；而降水距平相关系数（Anomaly Correlation Coefficient, ACC）最高的是一元对数差分回归法。不同回归订正法所得预估结果的距平同号格点分布显示，一元对数回归法在北方优于南方，而一元差分（年际增量）或对数差分回归法在南方优于北方。这直接导致在中国南方区域（95°E以东，35°N以南）一元对数回归或多元对数回归订正结果的AR、ACC和APCC均低于对应的差分/对数差分回归法，在北方和西部地区则与此相反。因此，模式降水的回归订正方案具有区域性，这可能源于不同区域降水序列统计性质的差异。用区域组合回归订正法，即在南方用一元差分回归订正，其余地区用一元对数回归订正，其降水预估场的AR提高到72%，但ACC和APCC均略有下降，原因是差分回归订正增加了预估降水场的方差。对RCP4.5情景下2016～2045年24个模式集合平均降水预估的组合回归订正结果显示，相对于1976～2005年平均，未来30年降水异常大致呈南北少，中间多的格局，其中长江中下游、江南中西部、西南东北部、华南沿海和海南省等地降水偏少10%～20%，淮河流域、三江源区和台湾省降水偏多10%～40%，西北东部、华北和东北大部降水正常或略偏少。从降水百分率方差看，模式群的离散度（不确定度）呈现东部小，西部大的分布特征，说明模式预估的西北中部和青藏高原西部等降水偏少区的不确定性较大；而河套北部、华北南部和江南东部等地对应于2006～2015年检验期的“盲区”（模式与观测降水距平反号），其降水预估参考价值可能不大，需要引入他法加以改进。

关键词　CMIP5模式计划　中国降水预估　偏差订正法　回归方程　未来30年旱涝格局

文章编号　1006-9585(2019)06-0769-16　　**中图分类号**　P467　　**文献标识码**　A

doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2019.19021

收稿日期　2019-02-20；**网络预出版日期**　2019-04-19

作者简介　杨阳，女，1995年出生，硕士研究生，主要从事气候变化研究。E-mail: yangy2016@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，国家重点研发计划2016YFA0600400

Funded by　National Natural Science Foundation of China (Grants 41475075 and 41675087), National Key Research and Development Program of China (Grant 2016YFA0600400)

CMIP5 Model Precipitation Bias-Correction Methods and Projected China Precipitation for the Next 30 Years

YANG Yang[1, 2], DAI Xingang[2, 1], TONG Hangwai[3], and Zhang Bei[4]

1 *College of Atmospheric Sciences*, *Lanzhou University*, *Lanzhou* 730000

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

3 *Hong Kong Observatory*, *Hong Kong* 999077

4 *Tianshui Meteorology Office*, *Tianshui*, *Gansu Province* 741000

Abstract Based on monthly precipitation data from CRU TS v4.0 (Climatic Research Unit Timeseries version 4.0), output of the CMIP5 (Coupled Model Intercomparison Project Phase 5) historical experiments and RCP4.5 (Representative Concentration Pathway 4.5) scenario from 24 models, a variety of simple and multiple regression methods were designed to bias-correct projected precipitation for China. These included simple regression (SR), simple regression with log-transformed rainfall (SR-Log), simple regression with year-to-year rainfall increment as predictand (SR-Increment), simple regression with year-to-year log-transformed rainfall increment as predictand (SR-Log-Increment), multiple regression (MR), multiple regression with log-transformed rainfall (MR-Log), multiple regression with year-to-year rainfall increment as predictand (MR-Increment), multiple regression with year-to-year log-transformed rainfall increment as predictand (MR-Log-Increment), and simple removal of climate drift (RCD). Bias-corrected results for projected precipitation over mainland China for 2006–2015 showed that univariate regression correction methods were generally better than multi-variate methods and simple RCD. SR-Log performed best, with rate of precipitation anomaly having the same sign with observation (AR) and precipitation anomaly percentage correlation coefficient (APCC) were the highest, reaching 69% and 0.5, respectively. On the other hand, SR-log-Increment obtained the highest correlation coefficient of precipitation anomaly (ACC) among the different methods. The distributions of precipitation anomaly with the same sign with respect to observation, using different bias-correction methods, showed that the SR-Log performed better in the north than in the south. To the contrary, SR-Increment and SR-Log-Increment performed better in the south than in the north. As a result, the AR, ACC and APCC of the SR-Log or MR-Log were lower than those of the SR-Log-Increment and MR-Log-Increment over southern China (east of 95°E and south of 35°N), while the opposite was true for northern and western China. Therefore, the best regression correction method for model precipitation was regional-dependent, possibly reflecting the differences in statistical properties of precipitation in different regions. Using synthesis of regional regression models, i.e., using SR-Increment in the southern region and SR-Log for the rest of China, the AR of projected precipitation for 2006–2015 improved to 72% while ACC and APCC declined slightly, as the increment regression method increased the variance of the projected precipitation. Projected precipitation for 2016–2045 was bias-corrected by the synthesis of regional regressions method. The results showed that, compared with the average of 1976–2005, the precipitation anomaly pattern for the next 30 years would display a "dry in the north and south, wet in the middle" pattern. Precipitation would decrease by 10%–20% in the middle and lower Yangtze River, middle and west of the regions south of the Yangtze River, the northeastern part of southwestern China, and the coastal regions of southern China and Hainan; precipitation would increase by 10%–40% in the Huai River basin, three rivers source regions, and Taiwan. Minimal changes, or slightly less precipitation was projected over the eastern part of northwestern China, northern China, and most of northeastern China. According to the variance of precipitation anomaly percentage, the spread (uncertainty) of the model group was smaller in the east and larger in the west. It indicated that the projected less precipitation areas were more uncertain such as in the central northwestern, and western Qinghai-Tibet Plateau. In addition, the northern part of the Hetao area, the southern part of northern China, and the eastern part of the south of the Yangtze River corresponded to the "obscured areas," where the precipitation anomaly in the projections and observations showed opposite signs for the verification period 2006–2015. As such, the projected precipitation over these

regions may not be of value. Consequently, alternative methods need to be developed in the future for further improvement.

Keywords CMIP5 model, China precipitation projection, Bias-correction method, Regression equation, Drought and flood pattern for the next 30 years

1 引言

自20世纪80年代以来，全球气候暖化已经逐渐成为人们关注的焦点之一。温室气体排放的持续增加已经导致百年尺度的气候背景发生变化（沈永平和王国亚，2013；IPCC，2014；Dai et al.，2015；Dai and Wang，2018）。与此同时，某些天气气候灾害的发生率似乎出现上升趋势（Meehl and Tebaldi，2004；秦大河等，2014；贺冰蕊和翟盘茂，2018）。如何适应与减缓未来可能的气候变化已经成为国际社会必须共同面对的严峻挑战（叶笃正和董文杰，2010；何建坤，2018）。欧盟第六框架计划（The sixth framework programme for research, FP6）中专门设计了关于气候变化的适应与减缓项目（Adaptation and Mitigation Strategies, ADAM），以支持2012年后的欧盟气候政策制定。该项目历时4年，对温室气体排放、土地利用、绿色能源、适应政策等进行了评估，并对相关联的微观和宏观经济学层面问题进行了广泛深入的研究（戴新刚，2007；Tàbara et al.，2009，2010；Werners et al.，2011；戴新刚等，2012）。

为了制定未来的气候变化适应与减缓政策或规划，必须对未来可能排放情景下的气候变化进行预估，从而为国家经济发展规划的制定及其适应与减缓策略的选择提供参考。联合国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（Fifth Assessment Report, AR5）从高到低设计了4种全球典型浓度路径排放情景（Representative Concentration Pathways，RCPs），即RCP8.5、RCP6.0、RCP4.5和RCP2.6，其中RCP4.5属于中等排放情景，RCP8.5是高排放情景(Meinshausen et al.，2011; Riahi et al.，2011；Thomson et al.，2011；Van Vuuren et al.，2011)。国际耦合模式比较计划第五阶段（Coupled Model Intercomparison Project Phase 5，CMIP5）以这4种路径排放情景为基础，进行了历史气候模拟和未来情景下的气候模拟预估试验，给出了对应于每种情景的多模式积分结果（Moss et al.，2010；Semenov and Stratonovitch，2010；Taylor et al.，2012）。目前，对于未来几十年至数百年尺度的气候预估大都基于这些模式输出数据的集合平均(Barnston et al., 2003; 陈超辉等, 2010; Xu and Xu, 2012)。然而，一系列的检验表明，CMIP5历史气候模拟或未来排放情景下的气候预估均存在较大的不确定性（陈威霖等，2012；成爱芳等，2015），无论是单一模式，或是多模式集合平均的历史气候模拟或情景预估等都存在明显的偏差(张蓓和戴新刚, 2016, 2017)。与模式输出气温不同，模式降水并不是模式直接模拟的变量，而是属于模式模拟结果的二次诊断量，一般其偏差或不确定性会更大些（陈活泼等，2012；陈晓晨等，2014；姚世博等，2018）。因此，基于CMIP5多模式输出资料的气候预估需要评估其不确定性并对其偏差进行有效订正（Tian et al.，2015）。目前，除了常用的扣除模式气候漂移和动力降尺度方法外，几乎都是利用历史观测记录与模式数据建立某种统计关系来进行偏差订正。例如，海温订正的EPR方法（Huang and Ying，2015）、经验正交函数（Empirical orthogonal function，EOF）订正法（Huang et al.，2016）、贝叶斯模式平均（Bayesian model averging，BMA）法（Raftery et al.，2005；Zhang and Yan，2015）、改进型的BMA-BFGS（田向军等，2011）以及统计或动力降尺度法（范丽军等，2005；Xu and Yang，2012；Fan et al.，2013；Gao et al.，2013；Zou and Zhou，2013；孙建奇等，2018）等。上述每一种统计方法的应用都对数据或多或少提出了限制。例如要求数据近似满足正态分布，或统计平稳性等等。事实上，只要通过适当的数学变换，使得数据序列满足一定的统计性质（如准正态分布），利用单站点/格点数据的线性回归方程法也可以获得较好的未来气候预测/预估订正效果（张凯静等，2017）。鉴于以往对中国的降水预估多集中在未来可能发生的极端降水事件，其不确定性很大（周莉等，2018；魏培培等，2019）。本文拟使用多种数据变换下降水序列的线性回归方案，对CMIP5模式未来情景下21世纪前期（2016

～2045年）降水进行预估订正，并对其不确定性做定性或定量评估，以便找出更有效的订正方案。

2 数据和方法

本文使用的数据有英国气候研究所的全球陆地格点分析数据集（CRU TS v4.0），其格点降水在本文中视为观测降水，分辨率为0.5°（纬度）×0.5°（经度）(Harris et al.，2014)以及CMIP5的多模式降水输出资料，其中包括历史气候模拟输出数据和未来气候情景（RCP4.5）下的模式预估数据。考虑到过多的模式集合平均可能会使结果更接近于气候的强迫场(Dai et al., 2015)，模式过少又会使降水集合平均的稳定性较差，以及降水演变中趋势项一般比较弱，年代际变化显得更为重要，本文只选用了24个常用的CMIP5模式，模式分辨率及其参数等见表1。

因各个国家参加CMIP5的模式分辨率不同，为统一起见，先使用GraDS中的双线性/面积平均插值法将每个模式降水和观测降水都插值到1.0°（纬度）×1.0°（经度）的格点上再进行分析（Jiang et al., 2005）。本文使用一元线性和多元线性回归方程作为模式降水的订正方法（表2）。前者是针对格点上24个模式集合平均降水和观测降水序列做回归分析，后者是将每一个模式的降水序列作为一个变元建立24元线性回归方程（Ke et al., 2009），这相当于用1960～2005年历史气候模拟降

表1 所用24个CMIP5模式的参数信息

Table 1 Parameters of the 24 CMIP5 models

模式名称	单位及所属国家	经纬向格点数	模式名称	单位及所属国家	经纬向格点数
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2 模式预估降水的订正方法

Table 2 Bias-correction methods for model-projected precipitation

订正方法名称	订正方法英文名称	说明
1 移除气候漂移	Simple removal of climate drift (RCD)	气候漂移为1956～2005年多模式集合平均与观测降水（CRU TS v4.0）偏差
2 一元线性回归	Simple regression (SR)	预报因子为多模式集合平均降水
3 一元对数回归	Simple regression with log-transformed rainfall (SR-Log)	预报因子为对数降水
4 一元年际增量回归	Simple regression with year-to-year rainfall increment (SR-Increment)	预报因子为降水年际增量
5 一元对数年际增量回归	Simple regression with year-to-year log-transformed rainfall increment as predictand (SR-Log-Increment)	预报因子为对数降水年际增量
6 多元线性回归	Multiple regression (MR)	预报因子为每一模式输出降水
7 多元对数回归	Multiple regression with log-transformed rainfall (MR-Log)	预报因子为每一模式输出对数降水
8 多元年际增量回归	Multiple regression with year-to-year rainfall increment as predictand (MR-Increment)	预报因子为每一模式输出降水年际增量
9 多元对数年际增量回归	Multiple regression with year-to-year log-transformed rainfall increment as predictand (MR-Log-Increment)	预报因子为每一模式输出对数降水年际增量

水数据确定权重的24个模式降水的加权平均代替通常使用的算数平均（集合平均）。

考虑到回归方程对数据序列的要求，以及用训练期（1960～2005年）数据建立的回归方程也可以用于未来气候预估，在做回归计算之前先对每个格点的降水序列进行预处理，即取对数，或变为差分序列或年际增量序列（范可等，2007），以及将对数序列变换为对数差分序列等等。通过考察降水距平同号格点分布、距平同号率（AR）、距平相关系数（ACC）和距平百分率相关系数（APCC）等指标，对RCP4.5情景下2006～2015年中国降水预估场进行订正，并进行定性或定量评估。这里选择RCP4.5排放情景是考虑到预估降水时段不长，排放情景之间的差异应该不会太明显。

3 模式降水偏差

CMIP5的未来气候情景预估始于2006年，这给了我们直接检验模式情景降水预估偏差的机会。RCP4.5情景下2006～2015年24个CMIP5模式集合平均降水（下文均称之为模式降水）与同期观测降水之差显示（图1a），模式降水量在西部和北部普遍偏多，大部分地区偏多40%以上；山东半岛、辽东半岛和东南沿海偏少，其中台湾省、海南省和华南沿海偏少10%～20%，江南东部偏少约5%。另外，青藏高原南部还存在一个孤立的模式降水明显偏少区。冬季全国大部分地区模式降水明显偏多；夏季模式降水偏多范围较小，东南部降水偏少的范围增加（图略）。除了模式集合平均降水偏差外，不确定性的另一个来源是各模式预估与观测降水之间的平均离散度（用模式降水偏差百分率标准差表示），标准差越大相对不确定性越强（Li et al.，2010）。图1b显示，模式离散度在西部多山地带明显大于东部平原或丘岭地带，说明模式集合对中国东部季风区降水的预估不确定性较小，西部比较大。这表明，单纯的CMIP5模式集合平均降水预估存在很大的偏差或不确定性，在使用前需要进行偏差订正及不确定性评估。

对于2006～2015年平均降水预估场，每个模式的预估水平可以用各自预估的平均降水与同期观测降水的相关系数和标准差之比绘制在泰勒图（Taylor, 2001; Taylor et al., 2012）上进行评估。从图2可以看到，各模式对降水的预估结果比较集中，降水预估场与观测场的相关系数基本分布在0.5～0.8之间，标准差之比则大多分布在0.5～1.0之间，其中模式ACCESS1-0、INMCM4、MIROC5的标准差与观测均值相差较小，且相关系数在0.7以上，而MIROC5模式的标准差与观测均值最为接近，相关系数在24个模式中最大；GISS-E2-R、MIROC-ESM、MIROC-ESM-CHEM这三个模式与观测的相关系数均未达到0.6，且其标准差也与观测值相差较大。这说明模式之间的降水预估水平差异较大即不确定性亦较大，容易造成多模式

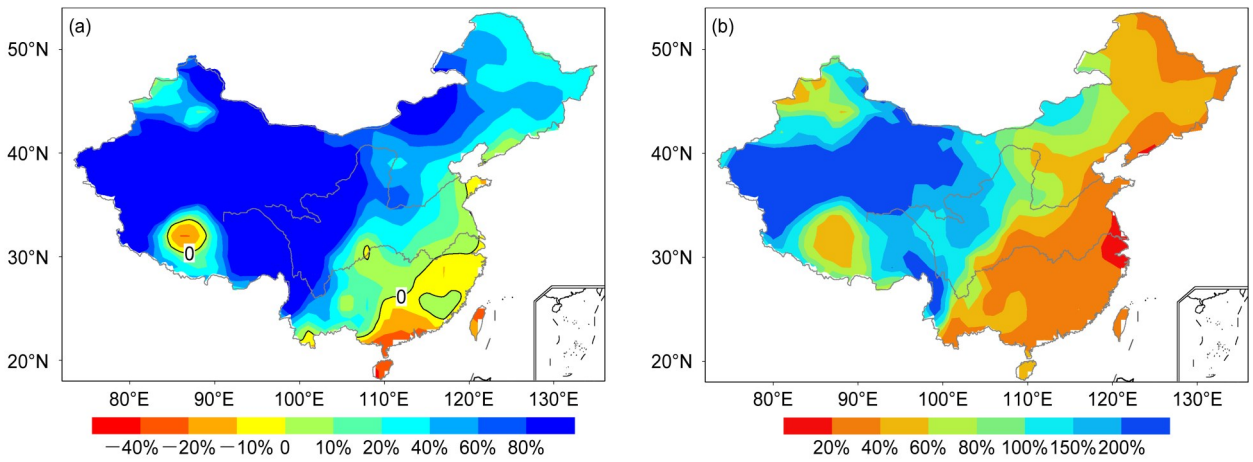

图1 RCP4.5情景下2006～2015年24个CMIP5模式集合平均中国大陆（a）年降水量与观测降水（CRU TS v4.0）的偏差百分率及（b）模式群预估年降水变化百分率的标准差（相对于1976～2005年平均）

Fig. 1 (a) The percentage bias of projected precipitation of the ensemble mean of 24 CMIP5 models as compared to observation (CRU TS v4.0) for 2006–2015 under RCP4.5 scenario and (b) standard deviation of projected precipitation percentage anomalies of the 24 CMIP5 models for 2006–2015 (with respect to the average of 1976–2005)

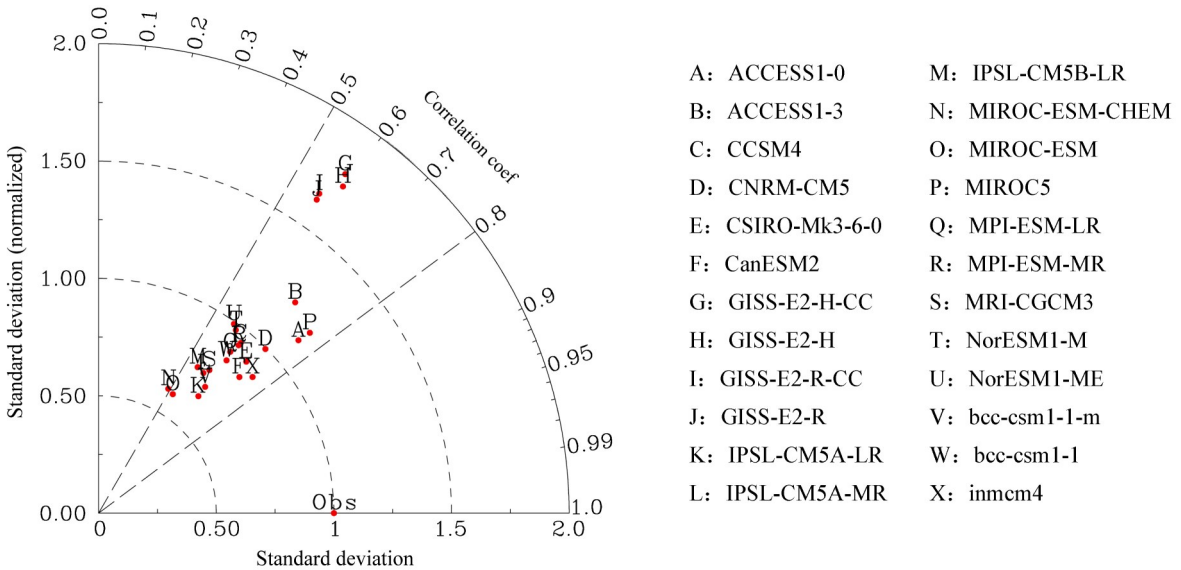

图2 RCP4.5情景下2006～2015年24个CMIP5模式预估中国大陆年平均降水量与观测降水（CRU TS v4.0）的泰勒图，其中模式降水标准差已经用观测降水的标准差标度

Fig. 2 Taylor diagram for observed average annual precipitation (CRU TS v4.0) and outputs from 24 CMIP5 models over mainland China under RCP4.5 scenario for 2006−2015; the standard deviation is scaled by that of the observed precipitation

集合平均降水偏离观测降水。

4 模式降水订正与评估

4.1 降水预估评估指标

模式降水预估效果既可以直接与观测降水比较，以评估其在地理分布上的差异，也可以通过计算二者之间的某些统计量进行评估。例如，在汛期降水预报评估中常用的有AR、ACC和PS评分等。其中AR可以视为定性统计评估指标，ACC属于定量评估指标之一，隐含着站点降水预报任务的相对贡献。一个站点或格点的预报任务可以用信息熵或香农熵来度量，其中主要影响因素是降水的方差（张学文，1981）。由于中国南北方的气候差异，南方降水方差大，西北干旱区方差较小，这导致ACC中南方格点相对贡献率较大，西北干旱区格点相对贡献率较小。因此，ACC不是一种全场“公平”的降水预报/预估评估指标，它主要反映了东部及南方站点/格点降水预报/预估场与观测降水场之间的相关性。如果用格点模式降水和观测降水距平百分率计算相关系数（APCC），似乎对任何格点而言都是“公平”的。然而，全国气候降水平均值的明显差异会造成APCC中干旱少雨区格点的贡献率偏大。这是由于格点的气候平均降水很小，其相对变率（距平百分率变率）较大，用降水距平百分率计算的方差在西北干旱区偏大，使得APCC中西北干旱区格点/站点的贡献率偏大。因此，ACC和APCC各有优缺点，在全国预估场的评估中应该根据评估目标而有所侧重。

4.2 距平同号格点分布

对于不同模式降水预估订正方法，首先考察其AR及降水距平同号格点的分布。24个CMIP5模式集合平均预估的2006～2015年平均中国大陆降水距平（相对于1976～2005平均）同号率仅有45%，未达到可用标准（AR>50%），其同号格点集中出现在东南沿海、新疆西部、西北东部及河套等地区（图3a）；反号格点分布在华北、东北、淮河上游、西南东部、以及西北中部等地，在反号格点地区模式集合降水预估未达到实际可用的水平。去除模式集合平均气候漂移是对模式预估/预测结果后处理的常用方法，也是一种最简单和最常用的模式偏差订正法。一般气候漂移是指充分长时间模式降水与观测降水的平均偏差。鉴于中国大多数气象观测站建站时间都晚于1954年，故将1956～2005年50年平均降水偏差定义为模式气候漂移。在2006～2015年平均模式集合平均预估降水中去除模式气候漂移后，降水距平同号率上升到57%。比较图3a和3b可以发现，去除气候漂移对北方的距平同

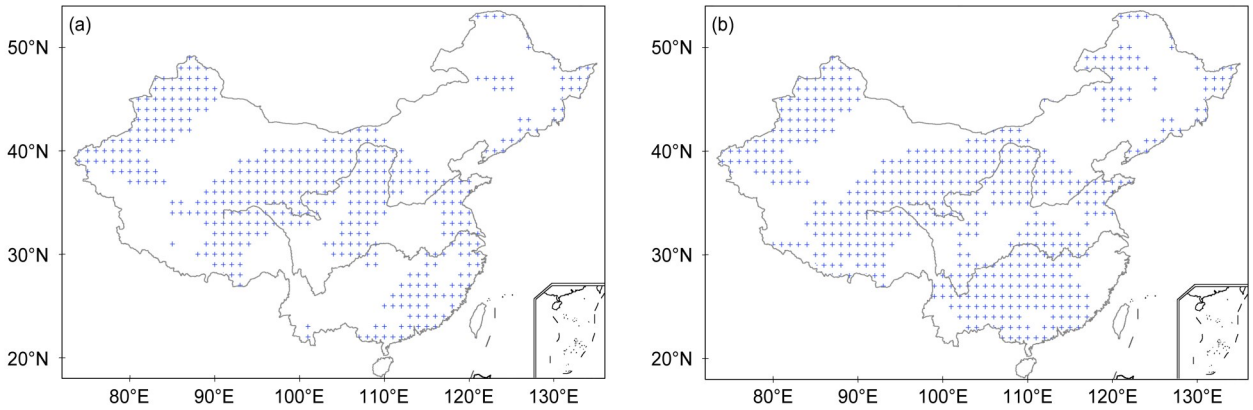

图3　RCP4.5情景下2006～2015年24个CMIP5模式预估及经订正后中国大陆降水与观测距平同号（“+”）格点分布（相对于1976～2005年平均降水，下同）：（a）模式集合平均；（b）去气候漂移。空白处表示距平异号格点

Fig. 3　Distribution of grid points having the same sign of simulated precipitation anomaly over mainland China under RCP4.5 scenario with respect to observations during 2006–2015 (marked with blue “+”; with respect to the average of 1976–2005, the same below): (a) Ensemble mean of 24 CMIP5 models; (b) bias-corrected precipitation by removing the model’s climate drift (RCD). Blanks indicate grid points having opposite sign

号格点分布并无明显改进，但对中国西南部的云贵高原和江南中部等地改进明显，但江南东部和华东沿海却变为距平异号区域。这表明虽然去除气候漂移在一定程度上能提高了距平同号率，但只增加了南方区域的距平同号格点数，要想提高北方或西部的距平同号率，还需要引入回归方程或其他订正法。

根据1960～2005年CMIP5历史气候模拟的多模式降水与观测降水建立每一格点上的一元线性回归、多元线性回归、一元差分回归和多元差分回归方程，并将它们运用于RCP4.5情景下2006～2015年多模式集合平均降水订正。一元线性回归订正法将降水距平同号率提高到65%。比较图4a和图3可以发现，该订正法明显地增加了北方和西部模式降水距平同号格点数，对南方的改进也好于多模式集合平均降水（图3a），但低于去除气候漂移结果（图3b）。除了淮河流域上游、江南东部、东北东南部等地外，该订正法对全国大部分地区的模式预估降水距平同号率都有明显改善（图4a），尤其是中国北方和西部（95°E以西）。而多元线性回归订正后模式降水距平同号率仅为52%，其距平同号格点分布比较稀疏（图4b），仅在东北南部的距平同号率高于前二者。若要以历史气候数据建立的回归方程能用于未来气候预估，需要观测和模式数据都满足统计平稳性条件。降水数据序列中的非平稳性主要来自于序列中存在的趋势或长周期波动，导致以训练期数据建立的回归方程的参数不适用于未来模式降水预估的订正。目前消除序列非平稳性的常用方法之一是将其变为一阶差分或年际增量序列后再做回归分析（范可等，2007）。计算表明，经一元差分回归订正后预估降水距平同号率提高到64%，略低于一元线性回归法。由图4c可知，前者明显提高了南方的降水距平同号格点数，尤其是我国西南部，但与一元线性回归订正结果相比（图4a），却减少了北方同号距平格点数，特别是河套地区变为距平异号格点区。多元差分回归订正后的距平同号率为57%，高于单纯多元回归订正法（52%）。该方法同样增加了在南方的降水距平同号格点数，但对北方改进不明显，距平同号格点数分布也比较稀疏（图4b和4d）。这个结果说明北方模式和观测降水的非平稳性可能弱于南方，其统计性质与南方季风降水存在明显差异。

建立一个数据序列的线性回归方程要求数据序列大致满足正态分布，而一般降水序列并不满足这个条件。为此，先对降水序列做对数变换，使其接近正态分布，然后再做回归分析。计算表明，经一元对数回归订正后，模式降水距平同号率高达69%，高于一元线性回归和一元差分回归订正法。从图5a可以看到，一元对数回归法对北方降水距平同号率的提高明显高于南方，尤其是在东北。然而，当进一步用一元对数差分回归法进行订正后，降水距平同号率又回落到64%，与一元差分回归订

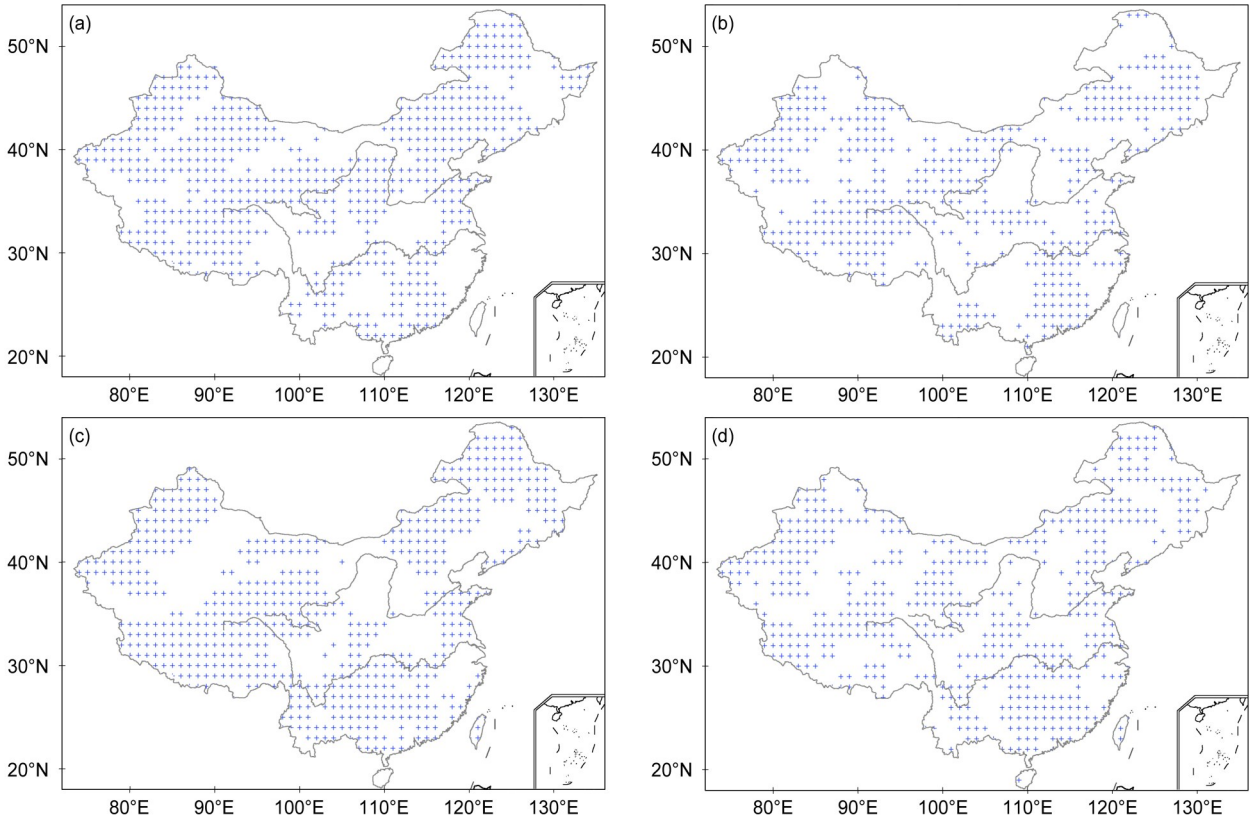

图4 RCP4.5情景下2006～2015年线性回归订正后模式降水与观测降水距平同号格点分布：（a）一元线性回归；（b）多元线性回归；（c）一元差分回归；（d）多元差分回归

Fig. 4 Distributions of grid points having the same sign of precipitation anomaly over mainland China with respect to observations during 2006–2015 for precipitation bias-corrected by (a) simple regression (SR); (b) multiple regression (MR); (c) simple regression with year-to-year rainfall increment (SR-Increment); (d) multiple regression with year-to-year rainfall increment as predictand (MR-Increment) under RCP4.5 scenario

正法相当，其原因是北方距平同号率明显低于一元对数回归法，仅在西南部的降水距平同号率高于前者（图5c），与一元差分回归法相近。另一方面，多元对数回归订正的降水距平同号率仅有51%，与多元线性回归订正法相近，但低于多元差分回归订正法（57%）；而多元对数差分回归法的降水距平同号率又增加到57%。4种多元回归订正法的降水距平同号率均低于对应的一元回归订正法，仅在江南东部和东北东南部等个别地区略优于前者（图5b和5d）。

4.3 偏差订正统计特征

降水距平同号率（AR）只涉及降水异常的符号，未考虑降水异常的幅度，对于全场统计的AR，每个格点的贡献率一样，因而是一种“公平”的定性评估指标。图6a显示，对2006～2015年平均降水预估，多模式集合平均降水预估的AR仅为45%，未超过随机预估结果（50%）。而去除气候漂移及其他回归订正结果的AR都超过50%，即均有使用价值，其中一元对数回归法的AR最高，接近70%；其次是一元线性回归（65%），一元差分回归（64%）和一元对数差分回归法（64%）；去除气候漂移后AR也提高了11%（56%）；其余方法的AR介于51%～57%之间。然而，常用的降水距平相关系数（ACC）的大小排序却不同于AR，排在前三位的分别是一元对数差分回归（0.38）、一元差分回归（0.36）和多元差分回归法（0.28），多元对数差分回归和去除气候漂移法紧随其后，最低的仍然是多模式集合平均降水预估，约为−0.15。对于降水距平百分率相关系数（APCC）的前五位排序与AR比较一致，依次是一元对数回归（0.50）、一元线性回归（0.41）、一元差分回归（0.29）和一元对数差分回归法（0.27）及扣除气候漂移法（0.18），多模式降水集合平均预估的APCC仅为0.07，高于多元对数回归和多元对数差分回归

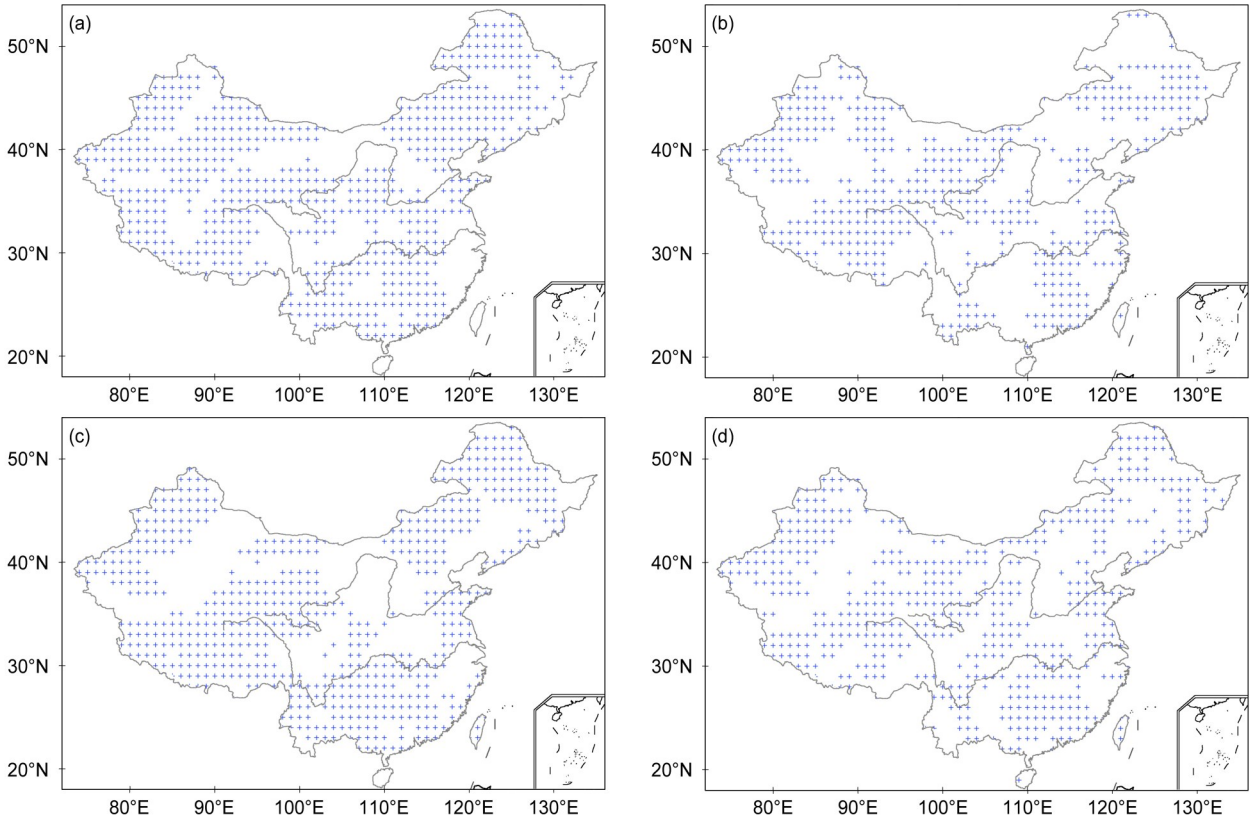

图5　RCP4.5情景下2006～2015年对数降水回归订正后的模式降水与观测降水距平同号格点分布：（a）一元对数回归；（b）多元对数回归；（c）一元对数差分回归；（d）多元对数差分回归

Fig. 5　Distributions of grid points having the same sign precipitation anomaly over mainland China with respect to the observation during 2006–2015 for precipitation bias-corrected by (a) simple regression with log-transformed rainfall (SR-Log), (b) multiple regression with log-transformed rainfall (MR-Log), (c) simple regression with year-to-year log-transformed rainfall increment as predictand (SR-Log-Increment), and (d) multiple regression with year-to-year log-transformed rainfall increment as predictand (MR-Log-Increment) under RCP4.5 scenario

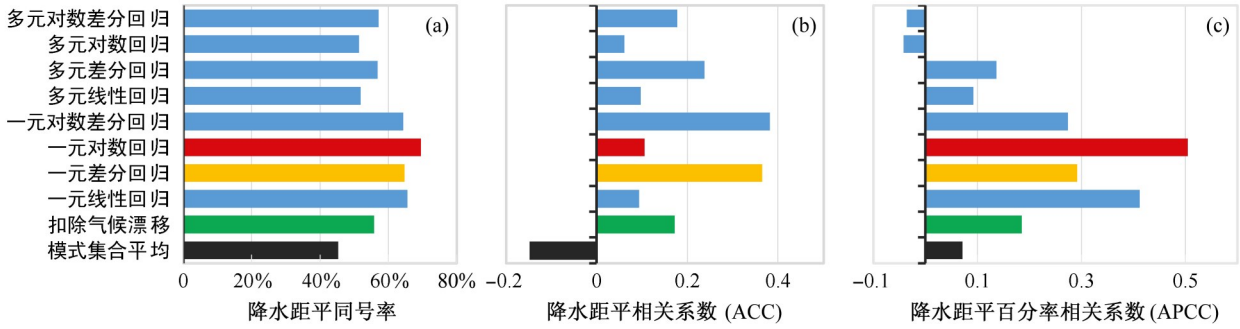

图6　RCP4.5情景下2006~2015年24个CMIP5模式集合中国大陆降水预估回归订正后与观测的（a）降水距平同号率、（b）降水距平相关系数及（c）降水距平百分率相关系数

Fig. 6　(a) Anomaly rate with the same sign (AR), (b) anomaly correlation coefficient (ACC), and (c) anomaly percentage coefficient (APCC) between observations and precipitation projection from the ensemble mean of 24 CMIP5 models, bias-corrected by different regression methods in China for 2006–2015 under RCP4.5 scenario

法，后二者的APCC都小于0。对于中国大陆评估区域的格点数为1108，一般相关系数超过0.1（临界值接近0.082）即可认为是统计相关显著，其信度超过0.01。因而，最优订正方法的选择因ACC与APCC排序的不一致而遇到了困难。

APCC的排序与AR排序几乎一致，说明

APCC应该是比ACC更客观的降水预测/预估场评估的统计量。因此，可以根据APCC选择一元对数回归或一元线性回归法作为未来模式降水预估的订正方法。然而，通过前面的降水距平同号格点分布已经发现，这两种方法主要提高了北方及西部区域的AR，对于南方的改善并不明显；而差分回归或对数差分回归法在南方有更高的距平同号率，这就解释了为什么ACC统计中差分回归法均高于对应的线性回归或对数回归法。相反，APCC的统计中一元线性或对数回归法均高于对应的差分回归法，其原因是北方，特别是西部格点数多且气候降水远小于南方，导致它们的贡献率高。这些差异表明，订正方法具有区域性，需要在构造降水预估订正过程中加以考虑。

5 订正方法的区域性

每一种回归订正法都有区域性优势，可以选择区域最优订正法对该区域模式降水预估进行订正。参考几种一元回归订正法对应的降水距平同号格点分布（图4和图5），中国大陆可大致分成3块，第一块是95ºE以西的中国西部，属于高原多山地区或干旱沙漠盆地，降水多受西风带影响；第二块是95ºE以东、35ºN以北地区，包括了西北东部、华北和东北等地，近似代表中国北方，影响降水的因子主要是东亚季风和西风带扰动及其相互作用；第三块是95ºE以东、35ºN以南地区，大致代表中国南方地区，其降水主要受季风或低纬度扰动影响。季风降水主要集中在夏季风季节，对流性降水所占比重大，而西风带降水的季节差异相对较小，以天气尺度降水为主。

对这三个区域分别统计几种预估订正法的AR、ACC和APCC（图7），结果表明，西部地区（图7a–7c）降水预估及其订正方法的统计参数分布与图6相似，即AR和APCC最高的都是一元对数回归和一元线性回归，而ACC最高的是一元差分回归和一元对数差分回归法。这说明西部降水场中青藏高原东南部的降水亦具有与南方季风降水相似的统计特征，即中国西部地区的降水似乎也是北方型与南方型的组合，二者的统计特征不同。图7a显示，这10种降水预估的AR都超过了50%，差异不甚明显，但对应的APCC有明显差异，60%通过了0.05信度的显著性检验（临界APCC＝0.10，样本数为353个格点），低于该信度的是多模式集合平均、扣除气候漂移、多元对数回归和多元对数差分回归法等，它们均未达到0.05信度的显著性水平，而其中一元对数回归和一元线性回归法的APCC高达0.63和0.47，均超过0.01的信度水平。尽管图7b中90%方法的ACC也都通过了0.05信度的检验，但是综合来看中国西部地区降水总体上呈现出与北方降水相似的统计特征。

将95ºE以东、35ºN以南（南方）和以北（北方）降水预估订正结果比对可以看出降水序列统计性质的南北差异。对于北方而言（图7d–7f），AR、ACC和APCC排在前两位的都是一元对数回归和一元线性回归，其中前者的3个指标依次为70%、0.66和0.55，后者的是72%，0.66和0.52，但一元差分回归和一元对数差分回归法的ACC都较小，说明北方区域内部降水的统计性质差异不大。然而，图7g–7i显示，对于南方地区来说差分回归法较好，降水预估结果的AR、ACC和APCC排在前两位的分别是一元对数差分回归和一元差分回归法，紧跟其后的是多元对数差分回归和多元差分回归法，其余预估方法都比较差，且一元对数回归和一元线性回归法的ACC和APCC均是负值。这充分说明南北方降水具有不同的统计性质，需要用不同的回归方法加以订正。

6 区域组合订正法

模式降水预估订正结果的区域性表明，要想在中国大陆范围内获得相对最优订正效果不推荐用单一回归方法，可以选出区域性最优订正法进行组合，以提高预估水平，或减少其不确定性。根据前两节的分析结果，一种较好的组合方式是南方（95ºE以东，35ºN以南）用一元差分回归/一元对数差分回归订正法，其余地方用一元对数回归订正。组合订正结果显示（图8a），中国大陆南北方距平同号格点分布均较密集，AR达到72%，高于前文中任何一种订正方法。然而，组合订正法的ACC（0.3）低于一元差分回归和一元对数差分回归法（图6b），以及APCC（0.41）也低于一元对数回归和一元线性回归法（图6c）。原因是在南方改用差分回归后降水标准差变大，导致ACC及APCC变小。由此可知，降水预估需要参考多个指标，进行综合评估，其中AR可以看成是最重要的指标。例

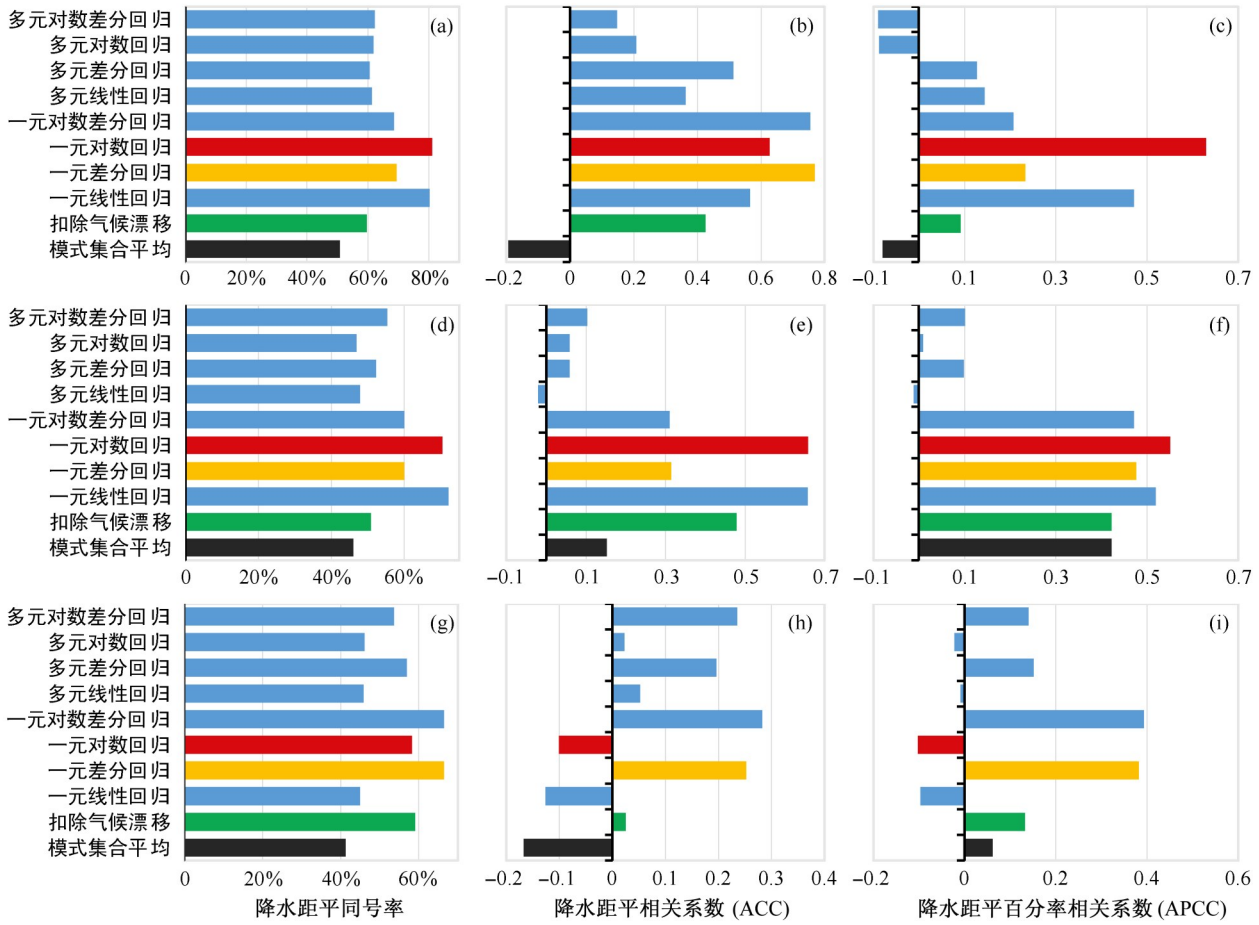

图7　2006～2015年中国（a–c）西部（95ºE以西）、（d–f）北部（95ºE以东，35ºN以北）、（g–i）南部（95ºE以东，35ºN以南）CMIP5模式降水订正后与观测的距平同号率（左列）、降水距平相关系数（中列）和降水距平百分率相关系数（右列）

Fig. 7　AR (left panel), ACC (middle panel), and APCC (right panel) between observations and 24 CMIP5 models ensemble mean precipitation projection bias-corrected by different regression methods in (a–c) western China (west of 95ºE), (d–f) northern China (west of 95ºE and north of 35ºN), and (g–i) southern China (west of 95ºE and south of 35ºN) for 2006–2015 under RCP4.5 scenario

如，降水预估组合订正后，可以认为在同号格点区域模式降水与2006～2015年平均观测降水距平一致，而在异号格点上没有参考价值（图8a和8b），例如河套北部、华北西南部、淮河流域中下游、四川盆地及江南东部等地。这些地区的降水预估订正还需要寻找其他方法。

7　未来30年降水预估

在RCP4.5情景下，对未来30年（2016～2045年）24个CMIP5模式集合平均预估的中国降水分别做一元对数及一元差分回归订正。一元对数订正后的降水场中的南方区域用一元差分回归订正后的降水场替换，得到所谓的区域组合订正后的降水预估场。图9a显示，未来30年平均预估降水距平分布型与2006～2015年相似（图8b），即降水在南方、北方均偏少，从三江源区到淮河流域偏多。南方降水偏少的地带为长江中下游、江南中、西部、西南部分地区、华南沿海、海南省、西北和青藏高原中部及内蒙古中部等地，其中长江中下游降水偏少10%～20%，江南中、西部偏少20%～40%，华南沿海和海南省偏少10%～20%，云南西部到雅鲁藏布江河谷偏少5%～10%，西北大部与青藏高原中部降水偏少10%～20%，内蒙古中东部偏少5%～10%。河套和华北大部降水接近正常（相对于1976～2005年平均）。而三江源区、淮河流域、江南东部和台湾省降水偏多20%～40%，新疆西部偏多5%～10%，云南南部和东部降水有所增加。西北东部、河套地区、东北和华北大部降水接近正常。

关于未来30年降水预估的不确定性，一方面

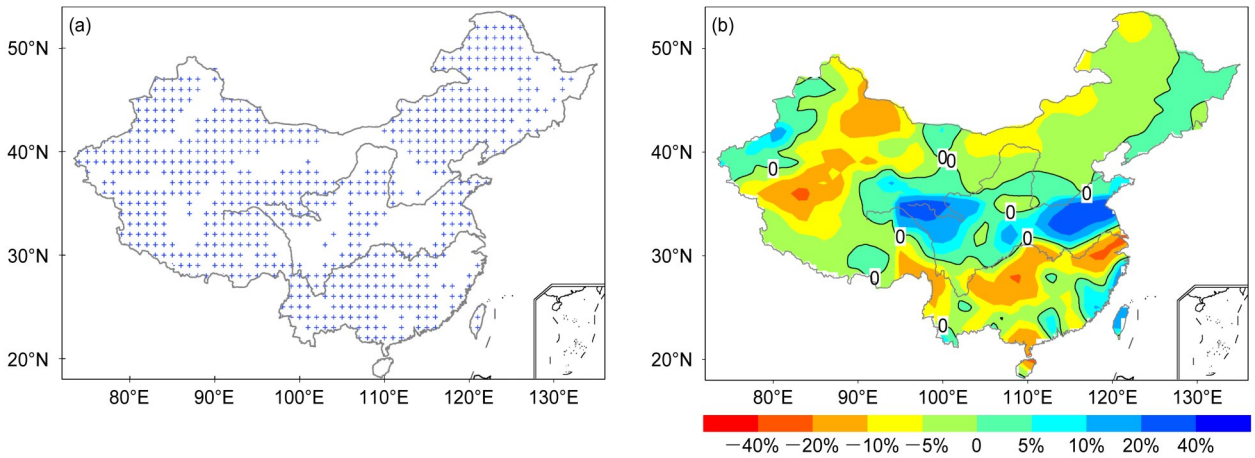

图8 一元差分回归（95ºE以东，35ºN以南）和一元对数回归（其余地区）组合订正后RCP4.5情景下2006～2015年24个CMIP5模式集合平均预估的中国大陆（a）同号降水距平格点分布和（b）预估降水距平百分率（参考态为1976～2005年平均）

Fig. 8 (a) Distribution of grid points having the same sign precipitation anomaly over mainland China with respect to the observation (marked with blue "+"; blank indicates grid points having opposite sign), and (b) projection of precipitation anomaly of the ensemble mean of 24 CMIP5 models, bias-corrected by synthesis of regional regression methods for 2006–2015 with respect to the 1976–2005 average under RCP4.5 scenario

可以通过多个模式积分结果的离散度（标准差）度量，另一方面可以参考2006～2015年检验期的模式降水偏差，粗略估计区域性的不确定性。图9b是未经订正的24个CMIP5模式预估的未来30年降水相对于其集合平均降水的离散度（距平百分率标准差）。因为订正过程是非线性的，它并不等于单个模式降水订正后再取集合平均降水的离散度。但如果将集合平均降水的订正量视为每个模式预估降水的一个平移，则可以将图9b近似作为订正后降水预估离散度或不确定性度量的一个参考。从该图中可以看到，模式预估降水的不确定性呈现东西向分布，西部大，东部小。在东部大部分区域不确定性低于60%，其中长江下游和东北的部分地区低于20%；大部分西部地区的不确定性高于80%，其中西北中部、青藏高原西端和云南西部的不确定性高达100%～200%及以上。这种不确定性的分布既与模式本身的模拟性能有关，也与选择降水距平百分率作为统计指标有关。例如西部干旱区的巨大不确定性主要与该区域降水稀少有关，导致降水距平百分率（相对距平）很大，若改用降水距平计算标准

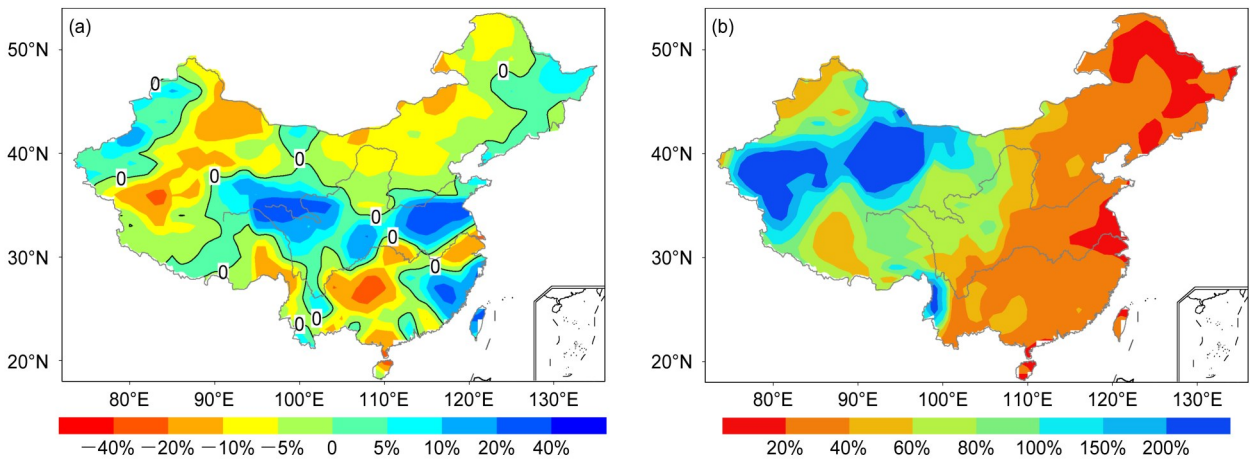

图9 区域组合订正后RCP4.5情景下2016～2045年24个CMIP5模式集合平均预估的中国（a）降水距平百分率和（b）模式群离散度（标准差）。参考态为1976～2005年平均

Fig. 9 (a) Bias-corrected projection of precipitation anomaly percentage by synthesis of regional regression methods and (b) standard deviation of projected precipitation percentage anomalies of 24 CMIP5 model projections over China for 2016–2045 under RCP4.5 scenario (as compared to 1976–2005 average)

差，它将明显减弱。此外，参考图8a，可知订正后降水距平反号区域可能存在较大的不确定性，因此在预估降水的使用中也必须谨慎参考，减少风险。

8 结论与讨论

综上所述，本文研究和分析了多种模式降水的订正方法，比较了订正后降水预估场的降水距平同号格点分布、降水距平同号率（AR）、降水距平相关系数（ACC）和降水距平百分率相关系数（APCC）等结果发现，2006～2015年中国大陆多模式集合平均降水预估存在很大偏差，西部、北部明显偏多，南方及东南沿海偏少，暖季偏差小于冷季；去除气候漂移能够显著减少降水预估偏差，对于南方降水预估的改进比较明显；在多种回归方案中，一元对数回归订正法最优，其AR和APCC最大，ACC较小，该订正法明显增加了北部和西部降水距平同号格点数，对南方的改进比较小；差分（年际增量）回归法在南方均比较有效，其中ACC最大的是一元差分回归和一元对数差分回归订正法。

将中国大陆分成西部、北方和南方3个区域，分区统计这三个指标，结果显示中国西部和北部最优订正法仍然是一元对数回归，而南方是一元差分回归或对数差分回归法最优。这个结果表明，回归订正法有区域性。如果在西部和北部用一元对数回归订正，在南方用一元差分回归订正，再将订正后的降水组合起来得到一种区域组合降水订正结果。统计显示，组合订正后2006～2015年降水的AR可提高到72%，但APCC和ACC相对于一元对数回归法或一元差分回归法有所下降。可见，AR是较为客观的全局降水预估评价指标。将该组合订正法用于2016～2045年未来30年模式降水预估订正，结果显示，相对于1976～2005年平均降水量，未来长江及其以南大部分地区降水偏少，其中，长江中下游、湖南、华南沿海、云贵高原东部降水明显偏少，云南大部及雅鲁藏布江下游周边地区降水亦偏少；从三江源区向东一直到淮河流域下游一带降水明显偏多，其中淮河流域中下游和三江源区降水明显偏多，江南东部和台湾省降水也明显偏多；西北中部干旱区和青藏高原西部降水明显偏少，西北东部、华北和东北降水正常或略偏少，其中内蒙东部降水明显偏少，新疆西部降水接近正常或略偏多。当然，这个未来降水预估存在一定的不确定性。它一方面来源于所用每个模式降水相对于其集合平均的离散度，同时也来源于因订正方法或降水数据本身的局限性造成的降水预估偏差。前者呈东西向分布，即东部不确定性小，西部不确定性较大；而后者既来源于订正后同号距平格点上降水距平幅度的偏差，也来源于降水距平异号格点区域，其属于该降水预估订正法的盲区，需要寻求其他方法加以改进。

由于降水预估时段、地域、预估内容或气候参考态时段等的差异，本文对未来30年的降水预估与大多数已发表的降水预估无法进行一一对应的比对，其可参考性来源于对2006～2015年CMIP5集合平均降水预估的订正检验，而非历史气候模拟的预报或模拟检验。本文只针对RCP4.5情景示范如何利用回归订正法降低模式情景降水预估的不确定性，如果选取的RCP情景不同，结果或许存在差异。排放情景的不同可能会导致降水预估中的强迫分量发生变化。这可以通过2006～2015年区间的平均降水差异，即因排放情景差异带来的降水变化来对其他排放情景下的降水预估进行附加订正。此外，由于中国面积广大，地形复杂，造成不同地区气候差异明显，可以设计更小区域的区域组合订正方案对模式降水进行订正，进一步减小其预估的不确定性。

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

陈超辉, 李崇银, 谭言科, 等. 2010. 基于交叉验证的多模式超级集合预报方法研究 [J]. 气象学报, 68(4): 464–476. Chen Chaohui, Li Chongyin, Tan Yanke, et al. 2010. Research of the multi model super ensemble prediction based on cross validation [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 68(4): 464–476. doi:10.11676/qxxb2010.045

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:10.13878/j.cnki.dqkxxb.2012.05.010

陈晓晨, 徐影, 许崇海, 等. 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, et al. 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.2015.01.84

Dai A G, Fyfe J C, Xie S P, et al. 2015. Decadal modulation of global surface temperature by internal climate variability [J]. Nature Climate Change, 5(6): 555−559. doi:10.1038/nclimate2605

戴新刚. 2007. 欧盟ADAM项目简介 [J]. 气候变化研究进展, 3(3): 185 Dai Xingang. 2007. A brief of the ADMA project [J]. Advances in Climate Change Research (in Chinese), 3(3): 185. doi: 10.3969/j.issn.1673-1719.2007.03.013

戴新刚, 熊喆, Kramer K, et al. 2012. 羊啃食动力学模拟与内蒙古西部气候变化适应 [J]. 中国沙漠, 32(5): 1442−1450. Dai Xingang, Xiong Zhe, Kramer K, et al. 2012. Simulation of goat and sheep grazing dynamics and climate change adaptation strategies in west Inner Mongolia, China [J]. Journal of Desert Research (in Chinese), 32(5): 1442−1450.

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 Physics B, 24(4): 049201. doi: 10.1088/1674-1056/24/4/049201

Dai X G, Wang P. 2018. Identifying the early 2000s hiatus associated with internal climate variability [J]. Scientific Reports, 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]. Chinese Science Bulletin, 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]. Advances in Atmospheric Sciences, 30(4): 1085−1095. doi: 10.1007/s00376-012-2057-0

范丽军, 符淙斌, 陈德亮. 2005. 统计降尺度法对未来区域气候变化情景预估的研究进展 [J]. 地球科学进展, 20(3): 320−329. Fan Lijun, Fu Congbin, Chen Deliang. 2005. Review on creating future climate change scenarios by statistical downscaling techniques [J]. Advances in Earth Science (in Chinese), 20(3): 320−329. doi: 10.11867/j.issn.1001-8166.2005.03.0320

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. 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]. International Journal of Climatology, 34(3): 623−642. doi: 10.1002/joc.3711

贺冰蕊, 翟盘茂. 2018. 中国1961~2016年夏季持续和非持续性极端降水的变化特征 [J]. 气候变化研究进展, 14(5): 437−444. He Bingrui, Zhai Panmao. 2018. Characteristics of the persistent and non-persistent extreme precipitation in China from 1961 to 2016 [J]. Climate Change Research (in Chinese), 14(5): 437−444. doi: 10.12006/j.issn.1673-1719.2018.016

何建坤. 2018. 新时代应对气候变化和低碳发展长期战略的新思考 [J]. 武汉大学学报(哲学社会科学版), 71(4): 13−21. He Jiankun. 2018. New idea on China's long-term strategy of addressing climate change and low-carbon development for new era [J]. Wuhan University Journal (Philosophy and Social Sciences) (in Chinese), 71(4): 13−21. doi:10.14086/j.cnki.wujss.2018.04.002

Huang J P, Yu H P, Guan X D, et al. 2016. Accelerated dryland 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

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: Cambridge University Press, 976.

Jiang D B, Wang H J, Lang X M. 2005. Evaluation of East Asian climatology as simulated by seven coupled models [J]. Advances in Atmospheric Sciences, 22(4): 479−495. doi:10.1007/BF02918482

Ke Z J, Dong W J, Zhang P Q, et al. 2009. An analysis of the difference between the multiple linear regression approach and the multimodel ensemble mean [J]. Advances in Atmospheric Sciences, 26(6): 1157−1168. doi:10.1007/s00376-009-8024-8

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 Science Bulletin, 55(19): 1974−1982. doi: 10.1007/s11434-010-3209-1

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

Meinshausen M, Smith S J, Calvin K, et al. 2011. The RCP greenhouse gas concentrations and their extensions from 1765 to 2300 [J]. Climatic Change, 109: 213−241. doi:10.1007/s10584-011-0156-z

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. 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. 2014. Highlights of the IPCC working group I fifth assessment report [J]. Progressus Inquisitiones de Mutatione Climatis (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. doi:10.7522/j.issn.1000-0240.2013.0120

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

Tàbara J D, Cots F, Dai X G, et al. 2009. Social learning on climate change among regional agents. Insights from China, Eastern Europe and Iberia [M]//Leal Filho W, Mannke F. Interdisciplinary Aspects of Climate Change. Frankfurt, DE: Peter Lang AG - International Academic Publishers, 121−150.

Tàbara J D, Dai X G, Jia G S, et al. 2010. The *climate learning ladder*. A pragmatic procedure to support climate adaptation [J]. Environmental Policy and Governance, 20(1): 1−11. doi: 10.1002/eet.530

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

Tian D, Guo Y, Dong W J. 2015. Future changes and uncertainties in temperature and precipitation over China based on CMIP5 models [J]. Advances in Atmospheric Sciences, 32(4): 487−496. doi:10.1007/s00376-014-4102-7

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. 2012. A new approach for Bayesian model averaging [J]. Science China Earth Sciences, 55(8): 1336−1344. doi:10.1007/s11430-011-4307-x

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 2ºC [J]. Climatic Change, 109(1−2): 95−116. doi: 10.1007/s10584-011-0152-3

魏培培, 董广涛, 史军, 等. 2019. 华东地区极端降水动力降尺度模拟及未来预估 [J]. 气候与环境研究, 24(1): 86−104. Wei Peipei, Dong Guangtao, Shi Jun, et al. 2019. Dynamical downscaling simulation and projection of extreme precipitation over East China [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 24(1): 86−104. doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2018.17169

Werners S E, West J, Leemans R, et al. 2011. Opportunities and constraints for climate adaptation in regional water and land use planning [M]//Leal Filho W. The Economic, Social and Political Elements of Climate Change. Berlin, Heidelberg: Springer, 669−692. doi:10.1007/978-3-642-14776-0_40

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

姚世博, 姜大膀, 范广洲. 2018. 中国降水季节性的预估 [J]. 大气科学, 42(6): 1378−1392. Yao Shibo, Jiang Dabang, Fan Guangzhou. 2018. Projection of precipitation seasonality over China [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 42(6): 1378−1392. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1801.17219

叶笃正, 董文杰. 2010. 联合国应如何组织人类开展有序应对气候变化问题的科学研究?——我们的思考和建议 [J]. 气候变化研究进展, 6(5): 381−382. Ye Duzheng, Dong Wenjie. 2010. Coordinated research on orderly human activity to cope with global climate change—Our thoughts and recommendations [J]. Advances in Climate Change Research (in Chinese), 6(5): 381−382. doi:10.3969/j.issn.1673-1719.2010.05.012

张凯静, 汪萍, 戴新刚. 2017. 中国降水回归模型设计策略与回报检验 [J]. 海洋气象学报, 37(3): 27−35. Zhang Kaijing, Wang Ping, Dai Xingang. 2017. The design strategy and hindcasting experiment of China precipitation using regression model [J]. Journal of Shandong Meteorology (in Chinese), 37(3): 27−35. doi: 10.19513/j.cnki.issn2096-3599.2017.03.004

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

张学文. 1981. 气象预告问题的信息分析 [M]. 北京: 科学出版社, 176pp. Zhang Xuewen. 1981. Information Analysis of Weather Forecasting Asuues (in Chinese) [M]. Beijing: Science Press, 176pp.

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

张蓓, 戴新刚. 2017. 基于CMIP5的2006~2015年中国气温预估偏差分析及订正 [J]. 高原气象, 36(6): 1619−1629. Zhang Bei, Dai Xingang. 2017. Evaluation and correction for the deviation of the surface air temperature based on 24 CMIP5 models over China for 2006−2015 [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 36(6): 1619−1629. doi:10.7522/j.issn.1000-0534.2016.00136

周莉, 兰明才, 蔡荣辉, 等. 2018. 21世纪前期长江中下游流域极端降水预估及不确定性分析 [J]. 气象学报, 76(1): 47−61. Zhou Li, Lan Mingcai, Cai Ronghui, et al. 2018. Projection and uncertainties of extreme precipitation over the Yangtze River valley in the early 21st century [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 76(1): 47−61. doi:10.11676/qxxb2017.084

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. doi:10.1007/s00376-013-2209-x