

DOI:10.13232/j.cnki.jnju.2024.02.011

基于 CMIP6 模式对青藏高原平均降水的模拟评估与预估

季玉枝^{1,3}, 杨小玲^{2,3*}, 周波涛³, 徐 昕¹, 王 元¹

(1. 中尺度灾害性天气教育部重点实验室, 南京大学大气科学学院, 南京, 210023; 2. 江西信息应用职业技术学院, 南昌, 330043; 3. 气象灾害教育部重点实验室/气象灾害预报预警与评估协同创新中心, 南京信息工程大学, 南京, 210044)

摘 要: 青藏高原降水对区域气候和水循环有着重要影响, 在全球变暖的大背景下, 研究青藏高原的降水分布及趋势变化十分必要. 以 1995—2014 年青藏高原观测降水为基准态, 评估第六次国际耦合模式比较计划(CMIP6)中 20 个模式对青藏高原年和季节平均降水的模拟能力. 结果表明, CMIP6 模式能够较好地模拟出青藏高原降水从东南向西北减少的空间分布特征, 但模式模拟仍存在湿偏差, 平均降水偏差达到 $1.3 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$. 而且对于冬季模拟降水, 模式之间存在较大的差异, 模式标准差在 $3 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$ 以上. 在共享社会经济路径 SSP5-8.5 和 SSP2-4.5 情景下, 基于 20 个模式的模式集合(AMME)与择优选取的五个模式组成的集合(BMME)对中期(2045—2065 年)和长期(2081—2100 年)平均降水的未来预估, 整体上青藏高原未来降水将有所增加, SSP5-8.5 情景增幅大于 SSP2-4.5, 长期降水增幅大于中期. 中期降水变化与长期分布一致, 除了冬季和秋季南部地区、夏季东部地区表现为降水减少之外, 其他大部分地区表现为全年和季节平均降水量的增加. BMME 预估全年和季节平均降水增幅往往大于 AMME. 未来年平均降水的增加主要来源于春季降水的增加.

关键词: CMIP6 模式, 青藏高原, 平均降水, 模式评估, 预估

中图分类号: P448

文献标志码: A

CMIP6 evaluation and projection of precipitation over the Qinghai-Xizang Plateau

Ji Yuzhi^{1,3}, Yang Xiaoling^{2,3*}, Zhou Botao³, Xu Xin¹, Wang Yuan¹

(1. Key Laboratory of Mesoscale Severe Weather, Ministry of Education, and School of Atmospheric Sciences, Nanjing University, Nanjing, 210023, China; 2. Jiangxi Vocational and Technical College of Information Application, Nanchang, 330043, China; 3. Key Laboratory of Meteorological Disaster, Ministry of Education/ Collaborative Innovation Center on Forecast and Evaluation of Meteorological Disasters, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing, 210044, China)

Abstract: Precipitation over the Qinghai-Xizang Plateau (QXP) has a significant impact on regional climate and water cycling. Understanding the impact of global warming on the trend of precipitation over the QXP is crucially important. This article assesses the simulation results of 20 Coupled Model Inter-comparison Project Phase 6 (CMIP6) models with the gridded observations for the period of 1995—2014 to evaluate the performance of CMIP6 models in simulating precipitation over the QXP. The results indicate that the CMIP6 models reasonably capture the spatial distributions of precipitation on the QXP, which decrease from the southeast to the northwest, but the model simulations still suffer from wet bias, the mean precipitation bias is $1.3 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$. And there is a large model spread of simulated winter precipitation, the standard deviation is larger than $3 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$. Under the scenario of the Shared Socio-economic Pathway SSP5-8.5 and SSP2-4.5, future projections

基金项目: 科技部国家重点研发计划(2023YFC3007502), 国家自然科学基金(42122036)

收稿日期: 2024-02-01

* 通讯联系人, E-mail: yxljxcia@163.com

of precipitation in the mid-term (2045—2065) and long term (2081—2100) based on the ensemble of 20 models (AMME) and the ensemble of 5 optimal models (BMME) show that the future precipitation over the Qinghai-Xizang Plateau is expected to increase, with larger increases under SSP5-8.5 than under SSP2-4.5, and larger increases in long term than mid-term. Spatially, the mid-term precipitation changes align with the long-term, with most areas showing increases in year- and seasonal-averaged precipitation, except for the southern portion of the region in winter and fall, and the eastern portion of the region in summer, which show decreases in precipitation. Notably, BMME projections tend to be higher magnitudes of increase in both annual and seasonal precipitation compared to the AMME. In future scenarios, the increase of annual precipitation is predominantly attributable to the increase of springtime rainfall.

Key words: CMIP6, Qinghai-Xizang Plateau, precipitation, model evaluation, projection

青藏高原是我国重要的大地形,其面积占我国陆地总面积的 26.8%^[1],因其巨大的冰雪储量被称为世界“第三极”^[2]. 青藏高原的平均海拔高度在 4000 m 以上,是亚洲河流的主要源头,滋养了十几亿人口,因此被称为“亚洲水塔”^[3]. 作为中纬度大地形,青藏高原通过动力作用和热力作用不仅影响着我国的天气和气候变化,也对全球气候产生深远影响^[4-5]. 因此,青藏高原成为国际上受到广泛关注的区域.

重现当前和过去气候及气候变化的能力是评估全球气候模式(Global Climate Model, GCM)的重要部分^[5]. 研究表明, GCM 可以再现气候态的大尺度特征,但在某些小范围区域气候变化模拟中会出现较大的误差,尤其是在气候变化敏感区. Phillips and Gleckler^[6]评估了 19 个 GCM 对 20 世纪降水的模拟能力,发现相对于全球和区域尺度的降水观测,许多模式显示出系统性偏差,与观测到的空间变化和季节周期的振幅/相位明显不同. 同样,耦合模式比较计划第五阶段(CMIP5)气候模式在再现区域性降水分布,特别是高海拔的青藏高原区域时,能模拟出高原降水从西北到东南逐渐增加的空间分布特征,但通常会表现出较大的系统性偏差^[7]. Jia et al^[8]评估了 CMIP5 的 33 个 GCM 对青藏高原降水的模拟能力,结果表明所有模式均高估了青藏高原降水,而且春季和夏季有着最大的湿偏差. Su et al^[7]评估了 24 个 GCM 对降水的模拟能力,结果表明 GCM 对年平均降水率高估了 62%~183%,并且只有一半的模式可以重现季节降水的空间模态分布. 由于青藏高原西部测站较少,对评估模式模拟优劣程度有一定影响. 总的来说,CMIP5 模式对青藏高原

西部降水偏少区域的模拟差异较大,虽然都能较好地模拟出降水的极大值中心,但都存在湿偏差^[9].

除此之外, GCM 还被广泛应用于预估未来气候变化. 未来气候变化对水循环和经济发展有着重要意义, GCM 预估的未来气候变化对政策决策者有着重要的参考价值. 政府间气候变化专门委员会(Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC)在研究气候变化及其对人类社会的影响问题时很大程度上依靠 GCM 在各种排放情景下对未来气候的预估. 从空间变化来看,在典型浓度路径 RCP4.5 和 RCP8.5 情景下,未来高原年均降水整体上将有所增加,长期(2051—2095 年)降水变化的空间分布与近期(2006—2050 年)基本一致,均为北部地区的降水增加更为显著^[8]. 从时间变化来看,虽然模式对未来降水的预估结果有着不确定性,但都表现出年平均降水增加的趋势^[10-11]. 青藏高原季节降水也呈现增加的趋势,并且呈现出冬季弱、春夏季强的季节变化特征^[12]. 张宏文和高艳红^[13]基于动力降尺度方法,运用 WRF 模式预估青藏高原降水,结果表明本世纪后期高原湿季总降水将有所增加. 有研究表明,青藏高原本身的复杂地形、西部地区测站较少以及东亚季风系统的复杂性都使得模式预估的不确定性增加,此外,模式低分辨率、参数化方案等问题也都将影响模式预估的不确定性^[8,14].

目前,CMIP 计划已经发展到第六阶段,为未来 5~10 年气候研究提供数据支撑^[15]. CMIP6 相较于 CMIP5,模式数量更多,参数化方案和分辨率等方面也有不同程度的改进和提高,众多学者探究了 CMIP6 模式的模拟能力较之前阶段是否

有所改善. 比较CMIP5和相应CMIP6气候模式的模拟数据发现,CMIP6提高了中国区域降水气候态的模拟效果,减少了区域平均降水偏差^[16-17]. 此外,CMIP6还提高了东亚冬季风的模拟效果,但夏季风模拟效果并未有明显改善^[18]. Zhu and Yang^[19]利用CMIP5和CMIP6中23个气候模式针对青藏高原降水做了评估,将CMIP6多模式集合平均与CMIP5结果对比发现,CMIP6模式在柴达木盆地和西北部干旱地区模拟能力有所改善,但在湿润地区模拟降水能力较弱,且高原季节降水模拟相对于观测降水仍存在湿偏差. 在预估未来气候变化上,CMIP6结合共享社会经济路径(Shared Socioeconomic Pathways, SSPs)和辐射强迫,提出了新的气候预估情景^[20]. 众多学者基于此对青藏高原未来的气候变化开展研究^[21-23]. 研究表明,未来青藏高原降水在时间上呈现增加趋势,在空间上呈现西北向东南递增的特征. 对于辐射强迫越大的情景,降水增幅越高,SSP5-8.5情景下降水增幅接近SSP2-4.5情景下的两倍^[21-22]. 李博渊和胡琴^[24]指出最新的CMIP6模式对于青藏高原降水模拟能力总体而言较差,模式模拟降水之间存在较大差异. 基于现有模式数据,依据统计指标选取较优模式可获得较为统一信息,排除模式差异性对结果分析的干扰. 比如, Yang et al^[25-26]利用评分指数选取CMIP6中模拟较好和较差的气候模式对中国区域未来降水进行预估,得到中国北部和西部区域降水增加显著,且模拟较优的模式相较于多模式集合平均,预估降水更多. 因此,本文在评估20个CMIP6模式模拟青藏高原年和季节平均降水模拟能力的基础上,从中选择了对年和季节平均降水模拟较优的五个模式组成集合,比较了20个CMIP6模式组成的集合与择优挑选模式组成的集合在预估SSPs情景下青藏高原地区21世纪年和季节平均降水的变化及其差异,旨在为深入了解青藏高原气候变化提供科学参考.

1 资料和方法

1.1 资料 本文采用CN05.1格点资料来评估CMIP6模式对青藏高原平均降水的模拟能力,该数据是根据中国气象局所属的2400余个台站的

观测资料插值而成的,分辨率为 $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$ ^[27],评估时段为1995—2014年. 表1为本文采用的CMIP6 20个GCM的基本信息,数据来源于<https://aims2.llnl.gov/search/?project=CMIP6/>. 因为模式来自不同的国家和地区,模式分辨率不一,为便于对比分析,将其双线性插值到 $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ 的网格点中. 多模式集合平均为等权重平均.

1.2 方法 为定量评估20个模式对降水气候态空间分布特征的模拟能力,我们使用泰勒图^[28]将其形象化地表现出来. 泰勒图是表现青藏高原的模拟降水数据与观测降水数据的空间相关系数(Spatial Correlation Coefficient, SCC)、中心化均方根误差(Centralized Root Mean Square Error, CRMSE)和标准差之比的综合概述图,可直观地展现和评估模式的模拟能力. 其中弧度轴表示SCC,横轴和纵轴均为标准差之比,CRMSE为模式点到参照点(REF)的距离. 假设模拟数据的标准差为 σ_m ,观测数据的标准差为 σ_o ,SCC, CRMSE, σ_m 和 σ_o 之间的关系为:

$$CRMSE^2 = \sigma_m^2 + \sigma_o^2 - 2\sigma_m\sigma_oSCC \quad (1)$$

其中,CRMSE的定义为:

$$CRMSE = \left\{ \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n [(o_i - \bar{o}) - (f_i - \bar{f})]^2 \right\}^{1/2} \quad (2)$$

其中, o_i 和 f_i 代表观测和模拟的降水, n 为样本数量. 本文根据均方根误差越小越好的标准选取年平均和季节平均中模拟最优的前五个模式,用于预估青藏高原的未来降水变化趋势和空间分布.

本文基于共享社会经济路径情景SSP5-8.5和SSP2-4.5的预估结果研究未来青藏高原地区降水的时空变化特征. SSP5-8.5和SSP2-4.5代表着不同的社会经济路径与辐射强迫的组合,其中SSP5-8.5表示在SSP5常规发展路径下到2100年辐射强迫稳定在 $8.5 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$,SSP2-4.5表示在SSP2中度发展路径下到2100年辐射强迫稳定在 $4.5 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ ^[20]. 相较之前的典型浓度路径(Representative Concentration Pathway, RCP), SSPs情景综合考虑了人口、经济和技术等社会发展指标变化,因此能够更容易地评估气候变化减缓行动的成本和效益.

根据前人的研究,多模式等权重集合平均比

表 1 所使用的 20 个 CMIP6 模式概况

Table 1 Details of 20 CMIP6 models used in this study

序号	模式名称	所属国家和机构	分辨率(经度×纬度:格点数)
1	ACCESS-CM2	Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization, Australia Research Council Centre of Excellence for Climate System Science, Australia	192×144
2	ACCESS-ESM1-5	Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization, Australia	192×145
3	BCC-CSM2-MR	Beijing Climate Center, China	320×160
4	CanESM5	Canadian Centre for Climate Modelling and Analysis, Canada	128×64
5	CESM2	National Center for Climate Research, USA	288×192
6	CESM2-WACCM	National Center for Climate Research, USA	288×192
7	EC-Earth3	EC-Earth Consortium, Europe	512×256
8	EC-Earth3-Veg	EC-Earth Consortium, Europe	512×256
9	FGOALS-g3	Chinese Academy of Sciences, China	180×80
10	GFDL-ESM4	National Oceanic and Atmospheric Administration, Geophysical Fluid Dynamics Laboratory, USA	288×180
11	INM-CM4-8	Institute for Numerical Mathematics, Russia	180×120
12	INM-CM5-0	Institute for Numerical Mathematics, Russia	180×120
13	IPSL-CM6A-LR	Institute Pierre Simon Laplace, France	144×143
14	MIROC6	Atmosphere and Ocean Research Institute, The University of Tokyo, Japan	256×128
15	MPI-ESM1-2-HR	Max Planck Institute for Meteorology, Germany	384×192
16	MPI-ESM1-2-LR	Max Planck Institute for Meteorology, Alfred Wegener Institute, Germany	192×96
17	MRI-ESM2-0	Meteorological Research Institute, Japan	320×160
18	NESM3	Nanjing University of Information Science & Technology, China	192×96
19	NorESM2-LM	NorESM Climate modeling Consortium, Norway	144×96
20	NorESM2-MM	NorESM Climate modeling Consortium, Norway	288×192

多模式集合中位数模拟结果要好,并且根据模式模拟表现优选的模式集合平均相较于所有模式集合平均的模拟能力又有所提高^[29]. 因此在预估青藏高原降水变化时,将分析 20 个 CMIP6 模式的集合平均(All Multi-model Ensemble, AMME)和优选模式集合平均(Best Multi-model Ensemble, BMME)在不同情景下预估的年和季节平均降水的时空变化特征,使用置信水平为 90% 的 t 检验来检验统计显著性.

2 降水评估和预估结果分析

2.1 历史时期降水评估 本文主要评估模式对青藏高原年(1—12 月, ANN)、冬季(12—2 月, DJF)、春季(3—5 月, MAM)、夏季(6—8 月, JJA)和秋季(9—11 月, SON)降水的模拟能力. 图 1 为观测和 CMIP6 模式集合平均模拟的青藏高原年和季节平均降水的气候态与模式偏差的空间分

布. 大体上看, AMME 能够较好地模拟出观测的年和季节平均降水从东南向西北递减的空间分布特征, 但均存在高估降水现象. 就全年平均降水而言(图 1a1), 降水大值中心在高原东南部的横断山脉处, 最小值位于中北部的柴达木盆地. 而 AMME 在雅鲁藏布江南部有一个明显的虚假降水大值中心(图 1a2). 与 CMIP5 相似, CMIP6 AMME 在大部分地区均表现为湿偏差, 尤其在南部和北部地区(图 1a3). 从季节平均降水来看, 青藏高原地区冬季降水(图 1b1)稀少, 日平均降水量大部分地区不足 $0.5 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$, 夏季(图 1d1)降水量最多, 东部地区可达 $6 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$ 以上. 春季(图 1c1)大部分地区降水在 $1 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$, 秋季(图 1e1)降水量略大于春季, 东部大部分地区可达到 $1 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$ 以上, 春、秋两季的降水中心均位于青藏高原东南边界处. AMME 季节模拟结果仍存在高估降水的现象. 冬季 AMME 降水偏差

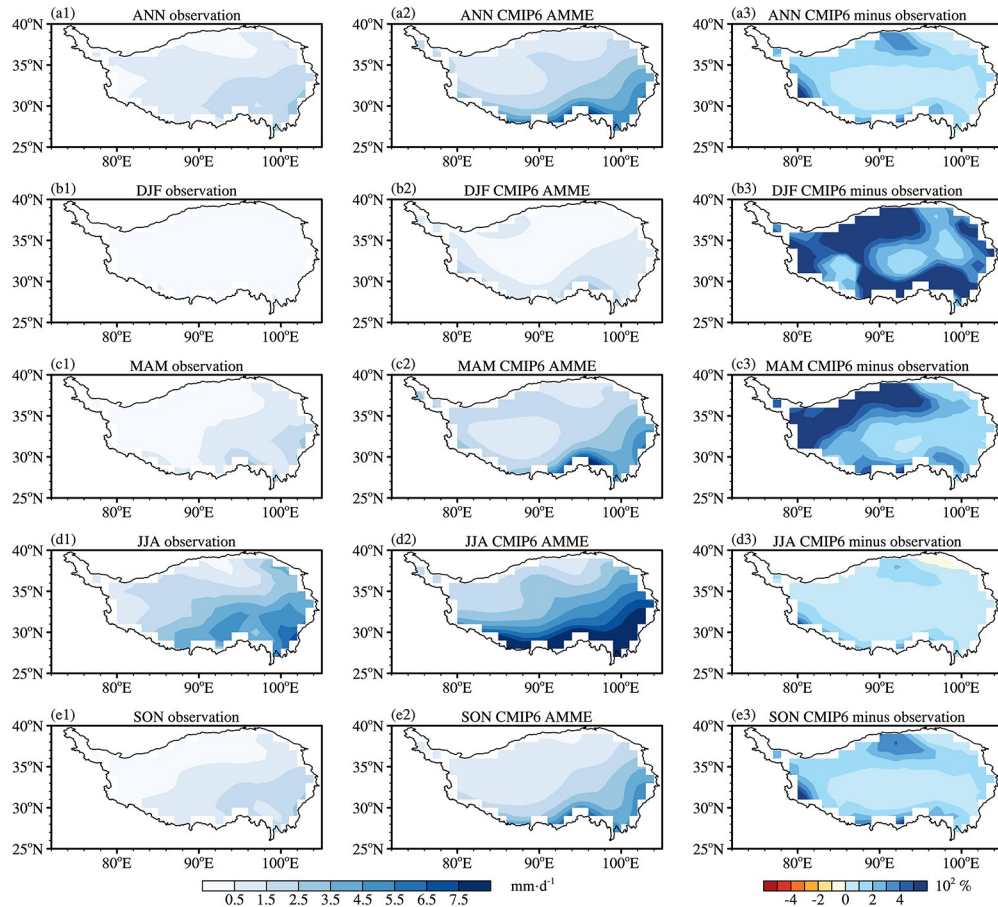


图1 青藏高原地区1995–2014年历史观测(左列)和AMME模拟(中列)降水气候态(单位: $\text{mm} \cdot \text{d}^{-1}$)及相对偏差(右列)分布图:从上到下分别为年(1–12月,ANN)、冬季(12–2月,DJF)、春季(3–5月,MAM)、夏季(6–8月,JJA)、秋季(9–11月,SON)

Fig. 1 Spatial distributions of CN05. 1 (left panel), AMME (central panel) precipitation climatology (units: $\text{mm} \cdot \text{d}^{-1}$) and relative biases between CN05. 1 and AMME (right panel) for annual (ANN), winter (DJF), spring (MAM), summer (JJA) and autumn (SON) during 1995–2014 over the Qinghai-Xizang Plateau

最大(图1b2和图1b3),在南部和西北部降水偏差达700%以上.春季(图1c2和图1c3)的湿偏差大于秋季(图1e2和图1e3),较大偏差出现在青藏高原西北部.夏季(图1d2和图1d3)青藏高原东南部AMME模拟值在 $7 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$ 以上,也明显高于观测值.总的来说,AMME对青藏高原年和季节平均降水模拟均存在湿偏差,湿偏差大值区主要集中在高原的南北缘,且冬季模拟的湿偏差最大.

图2是1995–2014年青藏高原地区CMIP6模式模拟相对于观测年和季节平均降水的泰勒图,可综合表征模式对气候态降水的模拟能力.泰勒图中散点代表模式,弧度轴表示观测降水分

布与模式降水分布的SCC,横轴纵轴代表模式与观测的标准差比值,而模式到REF的距离代表CRMSE.从泰勒图的原理来看,SCC越大,CRMSE越小,标准差之比越接近1,模式模拟能力越好.除冬季外,全年平均和其他三个季节的SCC都在0.6~0.9,说明CMIP6模式对全年平均和春、夏、秋三个季节平均降水的空间分布模拟较好.大多数模式的冬季SCC在0.6以下,FGOALS-g3的空间相关系数为0.3,说明模式对冬季降水的空间分布模拟较差.而且冬季模式分布较为分散,说明不同模式模拟的降水空间分布能力也存在较大差异.其次,对于CRMSE,全年

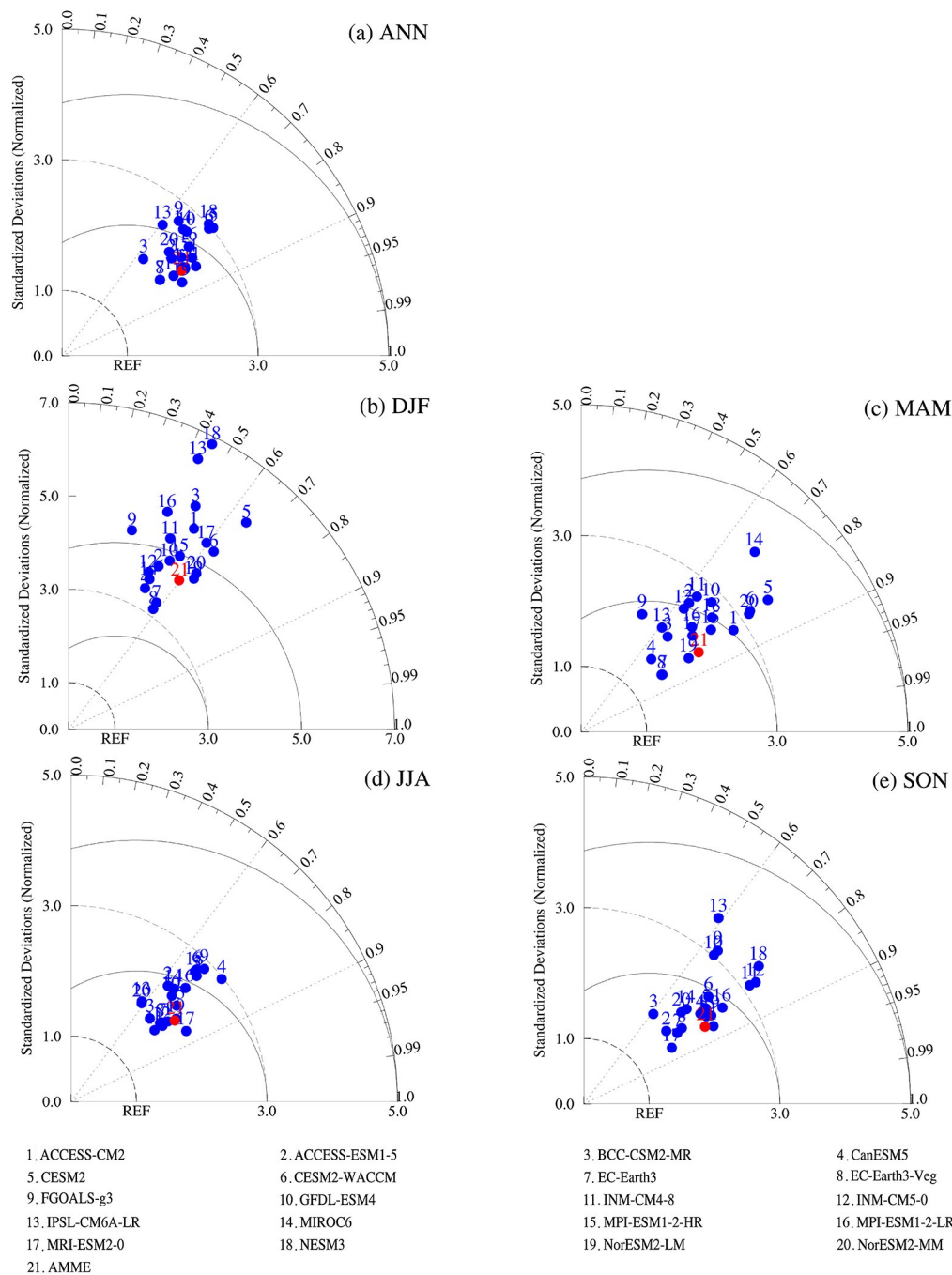


图 2 CMIP6 20 个模式和 AMME 模拟的 1995–2014 年青藏高原年 (a) 和季节平均 (b~e) 降水泰勒图

Fig. 2 Taylor diagrams for annual (a) and seasonal (b~e) simulation precipitation of 20 CMIP6 models and AMME during 1995–2014 over the Qinghai-Xizang Plateau

和夏季都在 3.0 以下,春季和秋季均仅有一个模式在 3.0 以上,但冬季的 $CRMSE$ 都在 3.0 以上,并且 NESM3 可达到 6.45,说明模式模拟不同季节降水的能力有所不同,并且对冬季平均降水的模拟还存在较大缺陷.最后,所有季节和全年平

均的标准差之比都大于 1.0,其中冬季标准差之比数值最大,都在 2.0 以上,说明所有模式均高估了青藏高原年和季节平均降水的空间变率,其中冬季更为明显.不同模式由于分辨率、地形处理等因素的影响在模拟青藏高原时存在较大差异,

同一模式对全年平均和季节降水的模拟能力也不尽相同,但可以肯定的是,通过对 *SCC*, *CRMSE* 和标准差之比在全年平均和所有季节平均的比较,根据泰勒图可以直观地看到模式对全年和夏季降水的模拟能力最优,具体表现为模式分布相对集中,均方根误差最小。对秋季和春季模拟能力相仿,相对于全年和夏季较差,而冬季表现最差。

综合比较 AMME 对全年平均和所有季节降水的模拟能力发现,AMME 对全年、冬季、春季、夏季和秋季平均降水的均方根误差分别为 1.54, 3.48, 1.46, 1.38 和 1.46, 标准差之比均大于 1.0, 从小到大依次是夏季、春季、秋季和冬季。相对于其他 20 个模式的模拟能力,AMME 的均方根误

差在春季中为前五名,全年平均、冬季和秋季都处于第六位,夏季处于第八位,说明 AMME 的模拟能力优于大部分模式。根据 *CRMSE* 越小越好的标准,在 20 个模式中分别选取了模拟全年和各季节平均降水能力最好的五个模式,见表 2。其中 EC-Earth3-Veg 和 EC-Earth3 在全年平均和所有季节的降水模拟能力中均排在前五名,表明这两个模式模拟年和季节平均降水均表现较好。另外来自国家气候中心的 BCC-CSM2-MR 模拟全年和除冬季外的其他季节平均降水也均进入了优选模式的前五名,但对冬季降水模拟效果略逊,说明其对冬季青藏高原的降水变化研究不够充分,但这也是国际耦合模式普遍存在的问题。

表 2 模拟年和季节平均降水的五个最优模式

Table 2 The 5 optimal models in simulating annual and seasonal precipitation

ANN	DJF	MAM	JJA	SON
EC-Earth3-Veg	EC-Earth3-Veg	EC-Earth3-Veg	INM-CM4-8	MRI-ESM2-0
EC-Earth3	EC-Earth3	EC-Earth3	EC-Earth3-Veg	ACCESS-ESM1-5
NorESM2-LM	CanESM5	CanESM5	INM-CM5-0	EC-Earth3
MRI-ESM2-0	MIROC6	NorESM2-LM	EC-Earth3	EC-Earth3-Veg
BCC-CSM2-MR	INM-CM5-0	BCC-CSM2-MR	BCC-CSM2-MR	BCC-CSM2-MR

2.2 中期和长期降水预估 图 3 显示了 1961—2100 年青藏高原全年和季节平均降水相较基准期降水变化的时间序列。该图体现的是青藏高原地区 (20°~50°N, 60°~110°E) 降水区域平均的结果。总体而言, SSP5-8.5 和 SSP2-4.5 情景下青藏高原全年和季节平均降水均呈增加趋势, 且 SSP5-8.5 的增幅大于 SSP2-4.5。对于全年平均降水 (图 3a), 在两组情景下, AMME 预估到 21 世纪末青藏高原降水将分别增加 12.78% 和 25.72%, BMME 预估到 21 世纪末青藏高原年降水将分别增加 14.10% 和 27.98%, 均大于 AMME 增幅。

对于冬季 (图 3b), 在本世纪中期阶段, 时间序列呈现 AMME 降水增幅大于 BMME 的特点, 而到本世纪末, BMME 降水增幅明显大于 AMME。具体而言, AMME 预估 SSP2-4.5 和 SSP5-8.5 情景下到 21 世纪末增幅分别为 10.52% 和 21.43%, BMME 预估增幅则要更大, 分别为 11.83% 和 25.31%。与全年平均相比, 青

藏高原冬季平均降水量的增幅有所减小, 从图 6b 和图 7b 的降水变化空间分布可知, 这主要是未来高原南部降水减少造成的。

对于春季 (图 3c), 到 21 世纪末, SSP2-4.5 情景下的 AMME 和 BMME 预估降水增加 15.79% 和 21.16%, SSP5-8.5 情景下增幅更大, AMME 和 BMME 预估降水增幅可分别达到 29.35% 和 43.13%, 均大于全年和冬季平均降水增幅。

对于夏季 (图 3d), 两组情景下 AMME 和 BMME 的预估降水变化差异较小。到 21 世纪末, 在 SSP2-4.5 情景下 AMME 降水增加 12.85%, BMME 降水增加 13.19%, 而在 SSP5-8.5 情景下, BMME 预估降水增幅略小于 AMME, 分别为 24% 和 26.46%。对比季节而言, 夏季预估降水增幅大于冬季, 但小于春季。

对于秋季 (图 3e), 与上述季节预估结果不同的是, 两组情景下 BMME 预估降水变化往往小于 AMME, 尤其是在本世纪后期。到 21 世纪末,

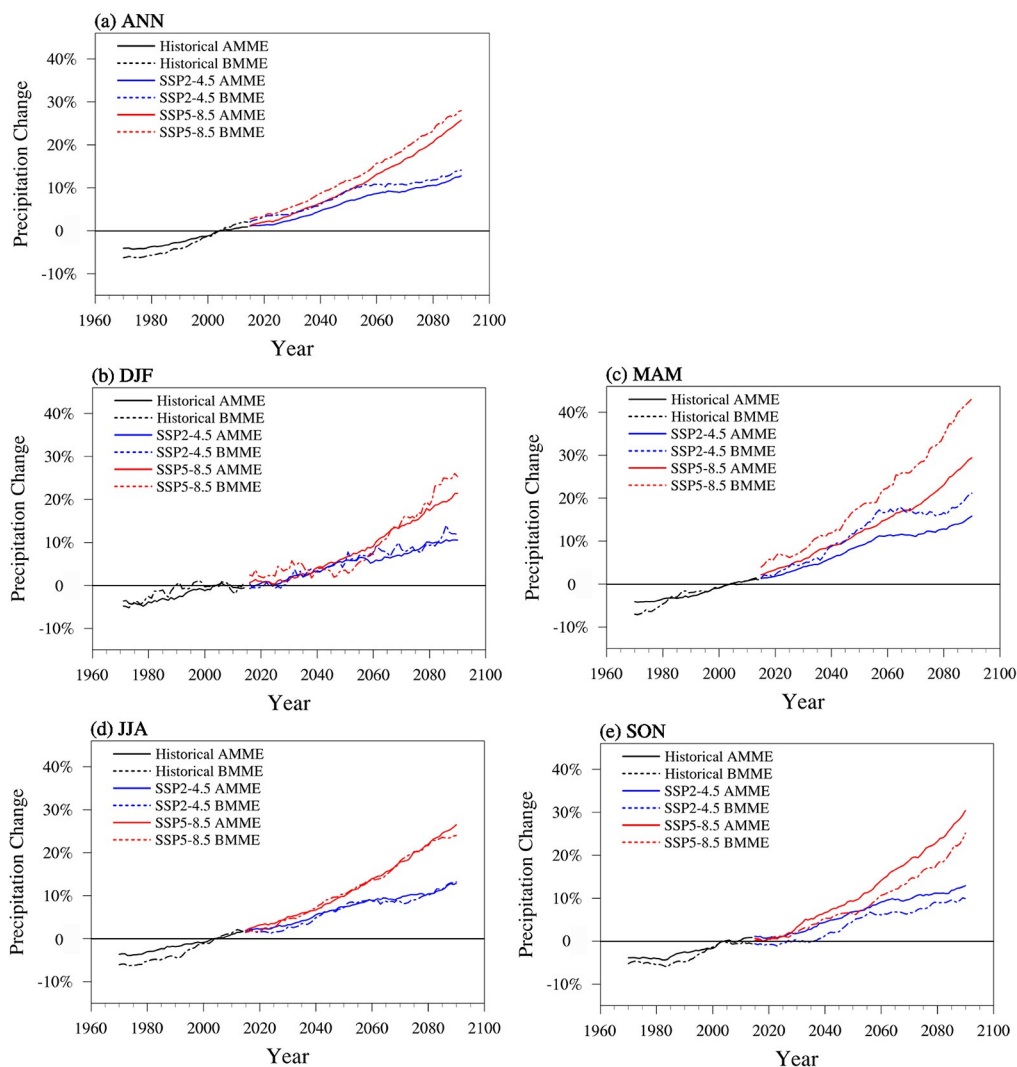


图3 历史时期(1961–2014年,黑线)与在SSP5-8.5(红线)和SSP2-4.5(蓝线)情景下2015–2100年AMME(实线)和BMME(虚线)预估的青藏高原年(a)和(b–e)季节平均降水异常的20年滑动平均的时间序列(相对于1995–2014年)

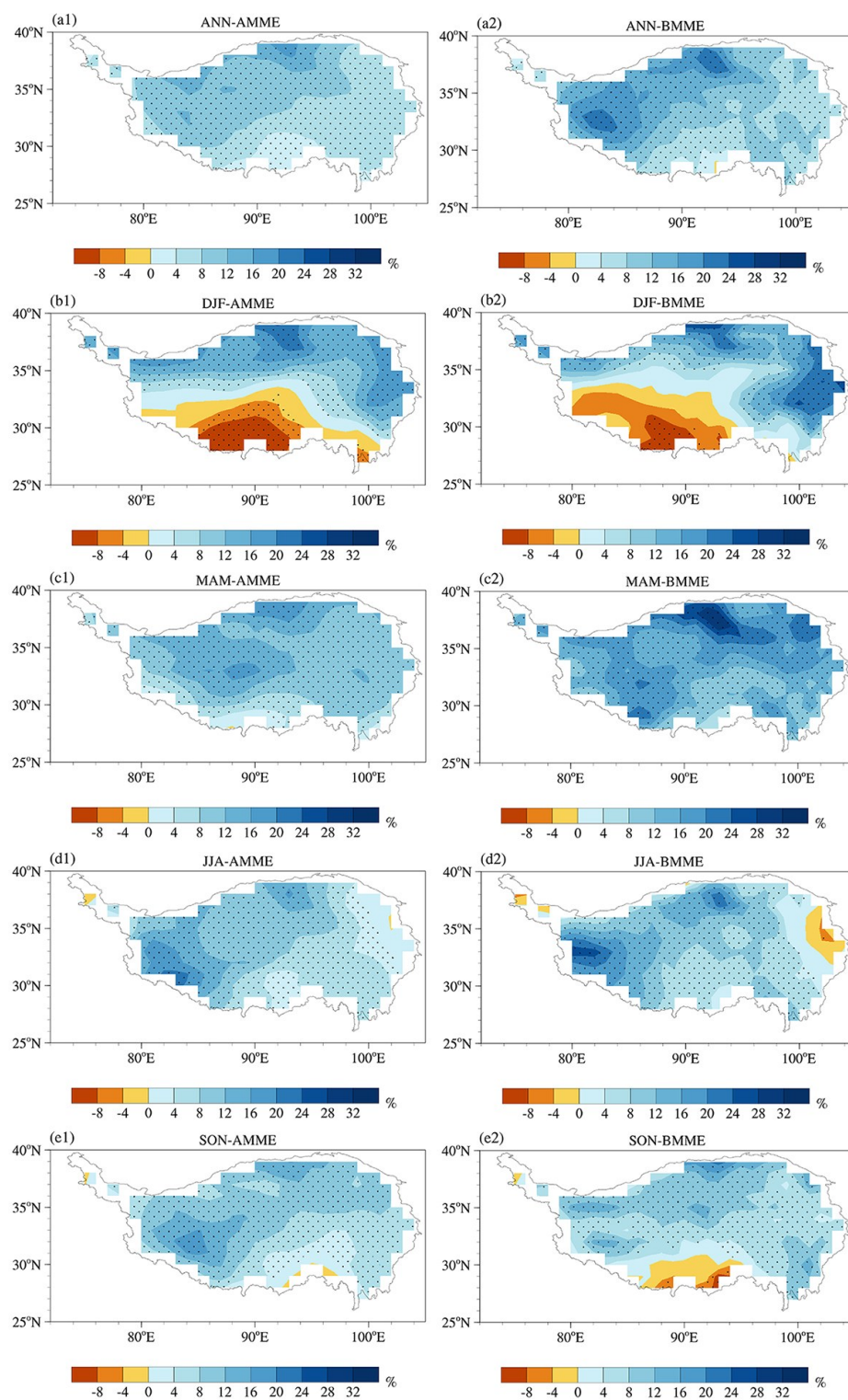
Fig. 3 Time series of relative biases for annual (a) and seasonal (b–e) precipitation between observations (1961–2014) and AMME (solid line), BMME (dotted line) under SSP5-8.5 (blue line) and SSP2-4.5 (red line) during 2015–2100 over the Qinghai-Xizang Plateau

AMME 预估的未来时期降水在 SSP2-4.5 情景下增加 12.89%, BMME 预估降水增加 9.9%。在 SSP5-8.5 情景下, AMME 和 BMME 预估降水增幅分别为 30.4% 和 25.12%。

综上所述, 两组情景下, 未来青藏高原全年和季节平均降水总体上均呈现增加趋势, 且 SSP5-8.5 情景增幅大于 SSP2-4.5。到 21 世纪末, 除夏季和秋季外, BMME 预估年和季节平均降水增幅往往大于 AMME。对比各季节平均, 春季降水增幅百分比最大, 表明未来年平均降水的增加主要

来源于春季降水的增加。

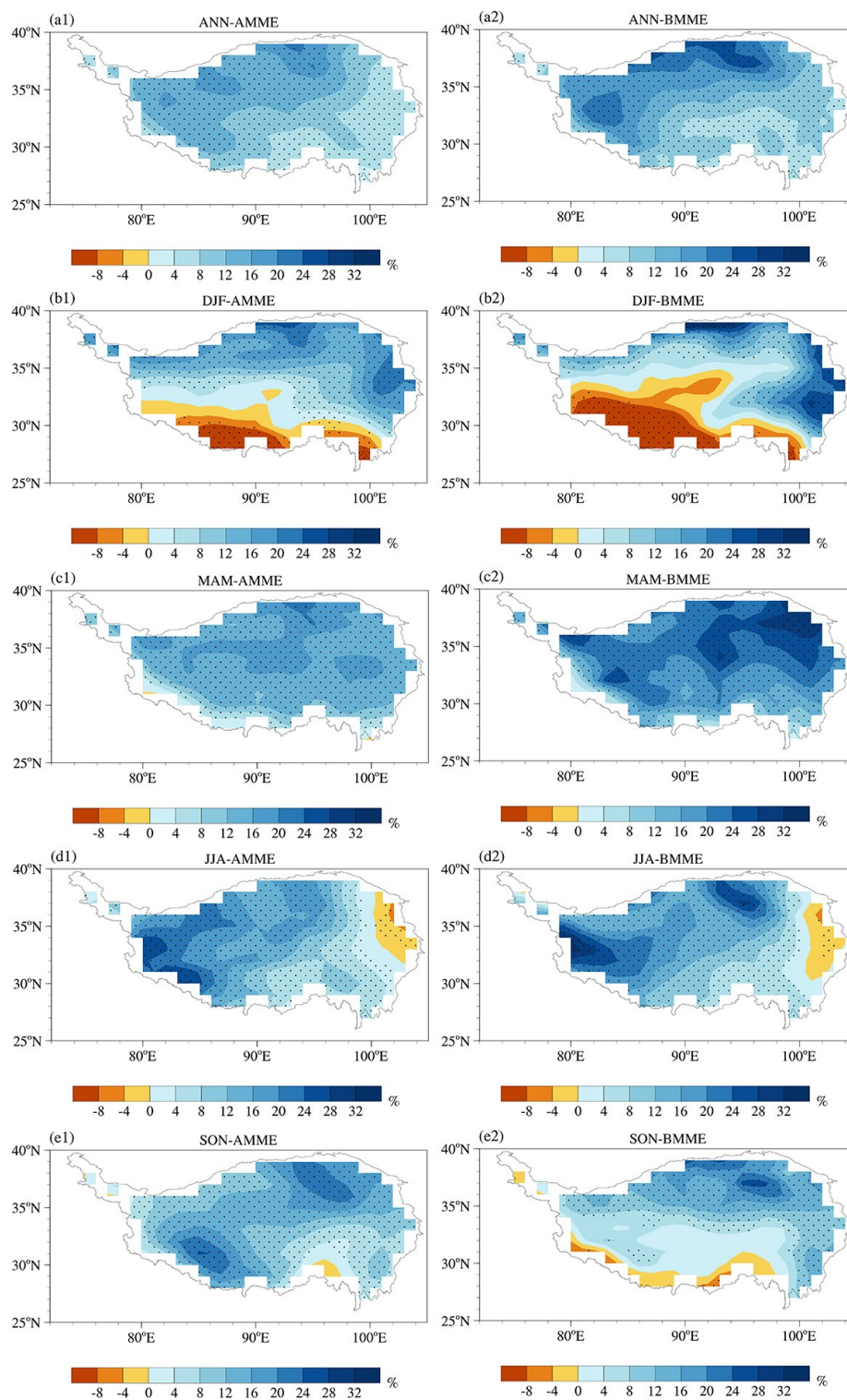
在 SSP2-4.5 情景下, AMME 和 BMME 预估的本世纪中期降水变化如图 4 所示。SSP5-8.5 情景降水变化如图 5 所示。SSP2-4.5 情景下(图 4a1 和图 4a2) AMME 预估本世纪中期青藏高原年平均降水呈现增加的趋势, 区域平均降水增幅为 7.82%, 其中西北部增幅较大, 东南部增幅较小。BMME 将这一变化特征表现得更加明显。区域平均降水增幅为 10.49%, 西北部地区降水增幅普遍大于 8%。SSP5-8.5 情景下两组模式集合



Black solid dots represent grids with a statically significant change at the 90% confidence level.

图4 SSP2-4.5情景下青藏高原地区中期(2046–2065年)相对于1995–2014年的年(a)和季节平均(b~e)降水变化

Fig. 4 Projected percentage changes for annual (a) and seasonal (b~e) precipitation under SSP2-4.5 over the period 2046–2065 relative to 1995–2014



Black solid dots represent grids with a statically significant change at the 90% confidence level.

图 5 SSP5-8.5 情景下青藏高原中期(2046–2065 年)相对于 1995–2014 年的年(a)和季节平均(b–e)降水变化

Fig. 5 Projected percentage changes for annual (a) and seasonal (b–e) precipitation under SSP5-8.5 over the period 2046–2065 relative to 1995–2014

预估的本世纪中期年平均降水变化的空间分布与SSP2-4.5情景一致,而增幅大于SSP2-4.5(图5a1和图5a2)。在SSP5-8.5情景下AMME预估青藏高原地区本世纪中期年降水增加10.87%,BMME预估增幅更大,为13.16%。

对于冬季,与全年平均降水变化不同的是,SSP2-4.5情景下(图4b1和图4b2),两组模式集合预估青藏高原中北部降水有增加的趋势,而南部降水呈现减少的趋势。从区域平均上看,BMME预估青藏高原冬季降水增幅为6.99%,略大于AMME预估的6.46%。在SSP5-8.5情景下(图5b1和图5b2),AMME和BMME预估青藏高原中北部冬季降水增幅更大,整体而言,SSP5-8.5情景下的冬季降水增幅分别为7.79%和5.36%,BMME预估降水小于AMME,且比SSP2-4.5情景下BMME预估增幅更小。这主要是因为高原南部降水减少的幅度更大。

对于春季,与全年平均降水变化相似,青藏高原降水呈现增加的趋势,北部与西部降水增幅大于南部与东部(图4c1,4c2和图5c1,5c2)。在SSP2-4.5情景下,AMME预估青藏高原春季降水增幅为10.32%,BMME预估降水增幅为15.37%,降水增幅大值区位于柴达木盆地。在SSP5-8.5情景下,AMME和BMME预估降水增幅分别为13.26%和18.88%。

对于夏季,除东部部分地区外,两组模式集合均预估青藏高原降水呈现增加趋势。在SSP2-4.5情景下(图4d1和图4d2),降水增幅大值区位于西部和北部,且BMME预估降水增幅更大。在SSP5-8.5情景下,两组模式集合预估夏季降水增幅都有明显增大(图5d1和图5d2),AMME和BMME预估降水增幅分别为11.64%和12.25%,大于SSP2-4.5情景下8.14%和8.43%的降水增幅。

对于秋季,与冬季降水变化的空间分布相似,在SSP2-4.5情景下,BMME预估青藏高原秋季降水呈现北增南减的趋势。区域平均而言,BMME预估秋季降水增幅为6.34%,小于AMME预估的7.82%。在SSP5-8.5情景下,两组模式集合预估绝大多数地区秋季降水都将有所增加,增幅相较SSP2-4.5情景下也都有所增大。

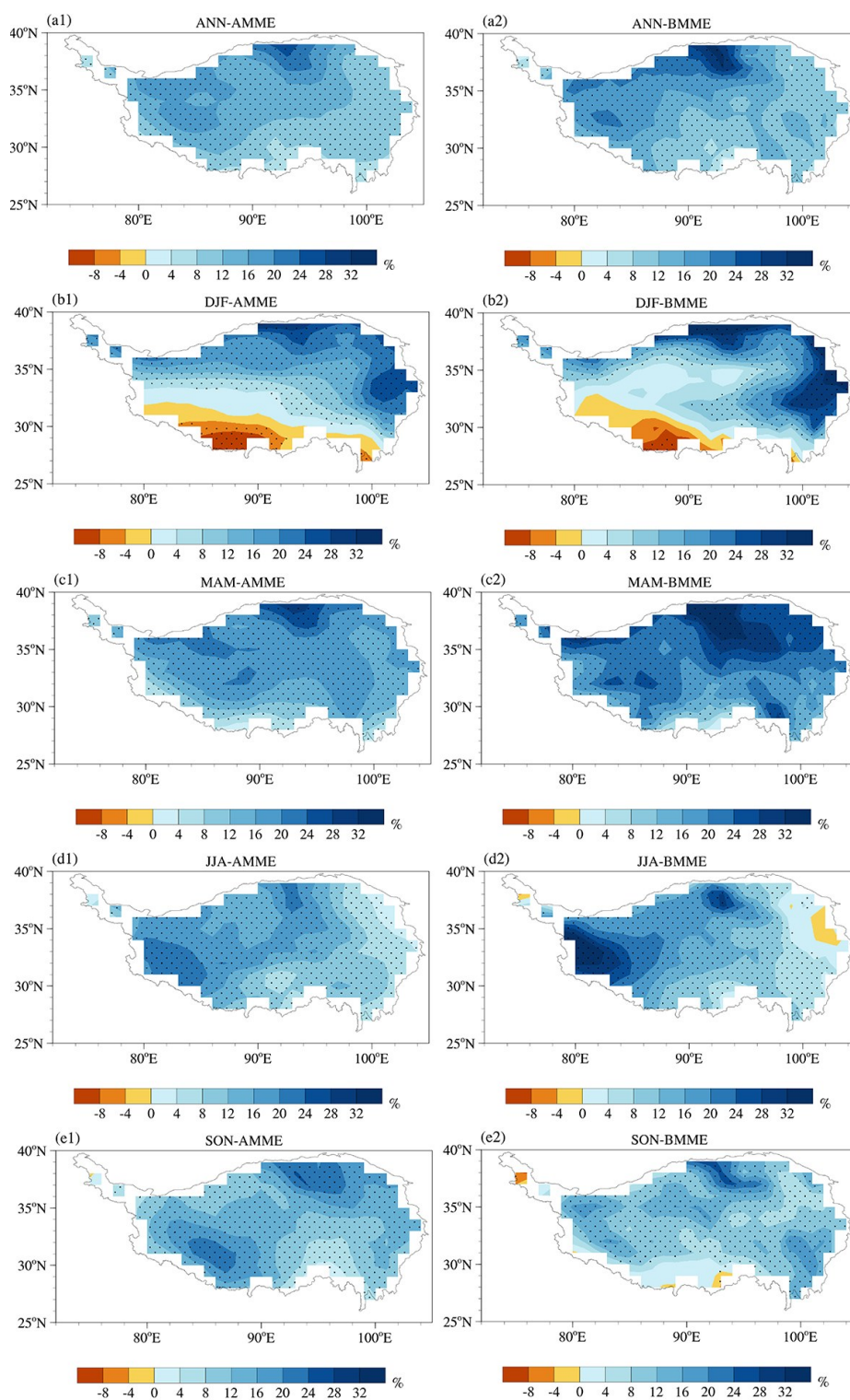
总体而言,除冬季和秋季南部部分地区和夏季东部部分地区外,两组模式集合预估年和季节平均降水呈现增加的趋势,其中SSP5-8.5情景下的增幅大于SSP2-4.5。BMME预估全年和春、夏季降水增幅大于AMME预估。除冬季外,青藏高原北部和西部的年和季节平均降水增幅往往大于南部和东部。

到本世纪末,在两组情景下,AMME和BMME预估的青藏高原全区域的年平均降水都将有所增加,与中期降水变化分布具有较好的一致性,表现为AMME预估降水增幅最大的区域位于青藏高原的西部与北部,BMME相较AMME的预估增幅有所增大(图6a1,6a2和图7a1,7a2)。就区域平均而言,AMME和BMME预估SSP2-4.5情景下青藏高原年平均降水增幅为12.78%和14.10%。相较于低排放情景,SSP5-8.5情景下两组模式集合预估的降水增幅有较大差异,增幅分别为25.72%和27.98%。

在季节尺度上,与中期季节平均降水变化分布相似,在两组情景下,除了冬季和秋季南部地区、夏季东部地区表现为降水减少以外,其他大部分地区表现为季节平均降水量的增加。

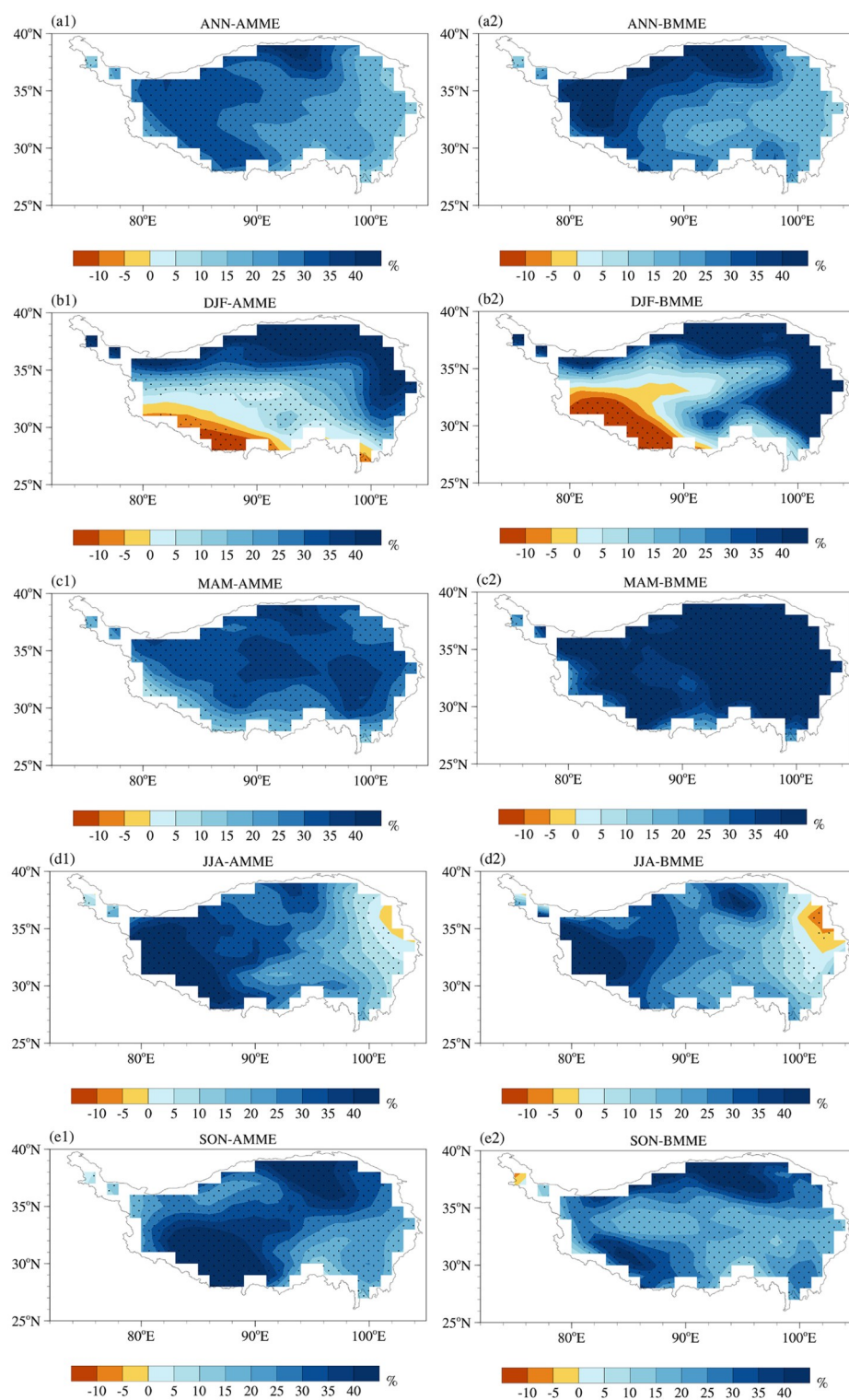
对于冬季,SSP2-4.5情景下两组模式集合预估青藏高原降水呈现“北增南减”的分布特征,降水减少的大值区位于西南地区,降水增加的大值区位于东部和北部地区,BMME预估变化幅度大于AMME(图6b1和图6b2)。从区域平均上看,BMME预估青藏高原冬季降水增幅为11.83%,AMME为10.52%。SSP5-8.5情景下,降水减少区域主要集中在西南地区,其他大部分地区表现为降水量的增加(图7b1和图7b2)。整体而言,AMME预估降水增加21.43%,BMME预估降水增加25.31%。

对于春季,SSP2-4.5情景下预估降水(图6c1和图6c2)在青藏高原为增加趋势,大部分地区的降水增幅在12%以上。就区域平均而言,BMME预估降水增幅为21.16%,AMME为15.79%,BMME预估降水增幅大于AMME。在SSP5-8.5情景与SSP2-4.5情景下得到的结论一致(图7c1和图7c2),区域平均之后,AMME预估降水增幅为29.35%,BMME为43.13%。



Black solid dots represent grids with a statically significant change at the 90% confidence level.

图 6 SSP2-4.5 情景下青藏高原长期 (2081-2100 年) 降水相对于 1995-2014 年的年 (a) 和季节平均 (b-e) 降水变化
Fig. 6 Projected percentage changes for annual (a) and seasonal (b-e) precipitation under SSP2-4.5 over the period 2081-2100 relative to 1995-2014



Black solid dots represent grids with a statically significant change at the 90% confidence level.

图7 SSP5-8.5情景下青藏高原长期(2081-2100年)相对于1995-2014年的年(a)和季节平均(b-e)降水变化

Fig. 7 Projected percentage changes for annual (a) and seasonal (b-e) precipitation under SSP5-8.5 over the period 2081-2100 relative to 1995-2014

对于夏季, SSP2-4.5 情景下两组模式集合的预估结果(图 6d1 和图 6d2)表明青藏高原长期降水增加的大值区位于青藏高原西部, 而 BMME 预估东部存在降水减少的趋势. 在 SSP5-8.5 情景下, 两组模式集合均预估在高原东部存在降水减少的区域, 除此之外, 青藏高原总体上以降水增加为主. 对比 SSP2-4.5 情景, SSP5-8.5 情景下青藏高原的长期降水预估中心不仅出现在高原西部, 还出现在高原北部. 整体而言, SSP5-8.5 情景下 AMME 预估降水增幅为 26.46%, BMME 预估降水增幅(图 7d2)接近 24%.

对于秋季, SSP2-4.5 情景 AMME 预估降水(图 6e1)表明降水增加的极大值中心出现在高原西南部和东北部, 降水中心增幅在 16% 以上, 但 BMME 预估降水(图 6e2)在青藏高原西部的降水极大值中心消失, 在东北部的降水极大值中心范围减小, 东南部降水增多, 整体而言, BMME 比 AMME 预估降水减少约 3%. 在 SSP5-8.5 情景下(图 7e1 和图 7e2), BMME 比 AMME 预估降水增幅减少约 5%.

综上所述, 与中期降水变化的分布一致, 到本世纪末, 在两组情景下, 除了冬季和秋季南部地区、夏季东部地区表现为降水减少以外, 其他大部分地区表现为全年和季节平均降水量的增加, 且长期降水增幅大于中期. 通过 SSP2-4.5 与 SSP5-8.5 情景的对比可知, 辐射强迫越高, 预估降水增幅越大, 即 SSP5-8.5 情景下预估降水增幅大于 SSP2-4.5 情景. 除夏季与秋季外, BMME 预估降水增幅往往大于 AMME. 对比各季节平均, 冬季降水增幅最少, 这与高原南部较大范围的降水减少有关. 除冬季外, 青藏高原大部分地区的季节降水均将有所增加, 其中春季降水增幅最大.

3 结论

本文利用 20 个 CMIP6 模式历史数据与 CN05.1 观测数据进行对比, 评估了 CMIP6 模式对青藏高原年和季节平均降水的模拟能力. 并根据中心化均方根误差择优选取了五个模式, 基于 20 个模式的 AMME 与 BMME 的预估结果, 分析了青藏高原未来降水的时空变化特征, 得到了如下结论.

(1) CMIP6 模式能很好地模拟青藏高原降水从东南向西北递减的空间分布特点, 但仍存在湿偏差, 尤其是冬季. 模式之间模拟结果有所差异, 同一模式对不同季节的模拟能力也不尽相同. 经过评估, 模式 EC-Earth3-Veg 和 EC-Earth3 模拟全年和各季节平均降水均取得较高排名. 此外, BCC-CSM2-MR 在模拟除冬季外的年和季节平均降水时也表现出良好的性能.

(2) 两组情景下两组模式集合的预估结果表明, 未来青藏高原全年和季节平均降水总体上均呈现增加趋势, 且 SSP5-8.5 情景增幅大于 SSP2-4.5. 除夏季和秋季以及中期(2046—2065 年)冬季降水外, BMME 预估年和季节平均降水增幅往往大于 AMME. 对比各季节平均, BMME 预估春季降水增幅百分比最大, 表明未来年平均降水的增加主要来源于春季降水的增加.

(3) 从降水变化的空间分布上看, 中期降水变化与长期(2081—2100 年)分布一致, 在两组情景下, 除了冬季和秋季南部地区、夏季东部地区表现为降水减少以外, 其他大部分地区表现为全年和季节平均降水量的增加, 且长期降水增幅大于中期, SSP5-8.5 情景下预估降水增幅大于 SSP2-4.5 情景. BMME 预估中期全年和春、夏季降水增幅大于 AMME, 预估长期全年和冬、春季平均降水增幅大于 AMME. 除冬季外, 青藏高原北部和西部的年和季节平均降水增幅往往大于南部和东部. CMIP6 模式较 CMIP5 模式的模拟能力有所改进和提高, 但对青藏高原降水的模拟仍存在系统性偏差. 系统性偏差可能与模式的低分辨率有关. 青藏高原复杂的地形引发许多过程, 例如局地环流, 这些过程会因模式的低分辨率而无法模拟. 以全年平均降水的模拟排名为例, EC-Earth3-Veg 和 EC-Earth3 是 20 个模式中模拟表现最好的, 其空间分辨率也是最高的. 另外, 在选取最优模式时, 根据不同的标准选取的模式可能会有所不同, 对于不同区域使用同一指标所选取的最优模式也会有所不同.

本研究基于 CMIP6 的 20 个模式, 评估高原降水模拟情况, 并预估未来降水变化情况, 但观测数据差异、模式选择差异和评估时间差异等因素均会对研究结果产生影响. 如张佳怡等^[23]采用中

国区域地面气象要素驱动数据集及CMIP6中的24个气候模式,选取1979—2014年为基准期,在不同情景下预估2061—2080年降水变幅为 $-1\%\sim 21\%$ 。李博渊和胡芩^[24]的研究表明选取1995—2014年为基准期,SSP5-8.5情景下降水增幅为23%。虽然预估结果有所差异,但以上研究均表明降水量在未来呈现增长趋势,且在SSP5-8.5情景下降水增幅最大。

此外,由于本文使用的CN05.1观测资料由气象站点插值而成,但高原站点稀疏,冬季降水较少,并且主要以降雪为主,存在不可忽略的观测误差,在评估模式高估冬季降水方面存在误差。Zhou et al.^[30]使用多种观测降水资料评估模式模拟效果,减少了高原地区降水观测资料的不足所带来的误差。未来将结合GPCC,CMORPH等卫星降水数据详细分析CMIP6气候模式对高原冬季降水的模拟效果。

参考文献

- [1] 张懿铨,李炳元,郑度.论青藏高原范围与面积.地理研究,2002,21(1):1—8. (Zhang Y L, Li B Y, Zheng D. A discussion on the boundary and area of the Tibetan Plateau in China. Geographical Research, 2002, 21(1): 1—8.)
- [2] Qiu J. China: The third pole. Nature, 2008, 454(7203): 393—396.
- [3] Xu X D, Lu C G, Shi X H, et al. World water tower: An atmospheric perspective. Geophysical Research Letters, 2008, 35(20): L20815.
- [4] 陆龙骅,卞林根,张正秋.极地和青藏高原地区的气候变化及其影响.极地研究,2011,23(2):82—89. (Lu L H, Bian L G, Zhang Z Q. Climate change and its impact of the polar and the Tibetan Plateau regions. Chinese Journal of Polar Research, 2011, 23(2): 82—89.)
- [5] Mote P W, Salathé E P. Future climate in the Pacific Northwest. Climate Change, 2010, 102(1): 29—50.
- [6] Phillips T J, Gleckler P J. Evaluation of continental precipitation in 20th century climate simulations: The utility of multimodel statistics. Water Resources Research, 2006, 42(3): W03202.
- [7] Su F G, Duan X L, Chen D L, et al. Evaluation of the global climate models in the CMIP5 over the Tibetan Plateau. Journal of Climate, 2013, 26(10): 3187—3208.
- [8] Jia K, Ruan Y F, Yang Y Z, et al. Assessing the performance of CMIP5 global climate models for simulating future precipitation change in the Tibetan Plateau. Water, 2019, 11(9): 1771.
- [9] 李振朝,韦志刚,吕世华,等. CMIP5部分模式气温和降水模拟结果在北半球及青藏高原的检验.高原气象,2013,32(4):921—928. (Li Z C, Wei Z G, Lü S H, et al. Verifications of surface air temperature and precipitation from CMIP5 model in Northern Hemisphere and Qinghai - Xizang Plateau. Plateau Meteorology, 2013, 32(4): 921—928.)
- [10] 梁玉莲,延晓冬. RCPs情景下中国21世纪气候变化预估及不确定性分析.热带气象学报,2016,32(2):183—192. (Liang Y L, Yan X D. Prediction of climate change over China and uncertainty analysis during the 21st century under RCPs. Journal of Tropical Meteorology, 2016, 32(2): 183—192.)
- [11] 胡芩,姜大膀,范广洲.青藏高原未来气候变化预估:CMIP5模式结果.大气科学,2015,39(2):260—270. (Hu Q, Jiang D B, Fan G Z. Climate change projection on the Tibetan Plateau: Results of CMIP5 models. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2015, 39(2): 260—270.)
- [12] 赵彦茜,肖登攀,柏会子. CMIP5气候模式对中国未来气候变化的预估和应用.气象科技,2019,47(4):608—621. (Zhao Y X, Xiao D P, Bai H Z. Projection and application for future climate in China by CMIP5 climate model. Meteorological Science and Technology, 2019, 47(4): 608—621.)
- [13] 张宏文,高艳红.基于动力降尺度方法预估的青藏高原降水变化.高原气象,2020,39(3):477—485. (Zhang H W, Gao Y H. Projected changes of precipitation over the Qinghai-Tibetan Plateau based on dynamical downscaling. Plateau Meteorology, 2020, 39(3): 477—485.)
- [14] 张蓓,戴新刚.2006—2013年CMIP5模式中国降水预估误差分析.大气科学,2016,40(5):981—994. (Zhang B, Dai X G. Assessment of the deviation of China precipitation projected by CMIP5 models for 2006—2013. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2016, 40(5): 981—994.)
- [15] 周天军,邹立维,陈晓龙.第六次国际耦合模式比较计划(CMIP6)评述.气候变化研究进展,2019,15

- (5): 445—456. (Zhou T J, Zou L W, Chen X L. Commentary on the coupled model intercomparison project phase 6 (CMIP6). *Climate Change Research*, 2019, 15(5): 445—456.)
- [16] Zhu H H, Jiang Z H, Li J, et al. Does CMIP6 inspire more confidence in simulating climate extremes over China?. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2020, 37(10): 1119—1132.
- [17] Lei Y W, Chen J, Xiong L H. A comparison of CMIP5 and CMIP6 climate model projections for hydrological impacts in China. *Hydrology Research*, 2023, 54(3): 330—347.
- [18] Jiang D B, Hu D, Tian Z P, et al. Differences between CMIP6 and CMIP5 models in simulating climate over China and the East Asian monsoon. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2020, 37(10): 1102—1118.
- [19] Zhu Y Y, Yang S N. Evaluation of CMIP6 for historical temperature and precipitation over the Tibetan Plateau and its comparison with CMIP5. *Advances in Climate Change Research*, 2020, 11(3): 239—251.
- [20] 张丽霞, 陈晓龙, 辛晓歌. CMIP6 情景模式比较计划 (ScenarioMIP) 概况与评述. *气候变化研究进展*, 2019, 15(5): 519—525. (Zhang L X, Chen X L, Xin X G. Short commentary on CMIP6 scenario model intercomparison project (ScenarioMIP). *Climate Change Research*, 2019, 15(5): 519—525.)
- [21] 陈荣, 段克勤, 尚澈, 等. 基于 CMIP6 模式数据的 1961—2099 年青藏高原降水变化特征分析. *高原气象*, 2023, 42(2): 294—304. (Chen R, Duan K Q, Shang W, et al. Characteristics of precipitation change over the Qinghai-Xizang Plateau from 1961 to 2099 based on CMIP6 models. *Plateau Meteorology*, 2023, 42(2): 294—304.)
- [22] 陈炜, 姜大膀, 王晓欣. CMIP6 模式对青藏高原气候的模拟能力评估与预估研究. *高原气象*, 2021, 40(6): 1455—1469. (Chen W, Jiang D B, Wang X X. Evaluation and projection of CMIP6 models for climate over the Qinghai-Xizang (Tibetan) Plateau. *Plateau Meteorology*, 2021, 40(6): 1455—1469.)
- [23] 张佳怡, 伦玉蕊, 刘浏, 等. CMIP6 多模式在青藏高原的适应性评估及未来气候变化预估. *北京师范大学学报(自然科学版)*, 2022, 58(1): 77—89. (Zhang J Y, Lun Y R, Liu L, et al. CMIP6 evaluation and projection of climate change in Tibetan Plateau. *Journal of Beijing Normal University (Natural Science)*, 2022, 58(1): 77—89.)
- [24] 李博渊, 胡琴. 基于 CMIP6 模式评估结果对未来青藏高原降水多情景预估. *高原气象*, 2024, 43(1): 59—72. (Li B Y, Hu Q. Multi-scenario projection of future precipitation over the Qinghai-Xizang (Tibetan) Plateau based on CMIP6 model assessment results. *Plateau Meteorology*, 2024, 43(1): 59—72.)
- [25] Yang X L, Zhou B T, Xu Y, et al. CMIP6 evaluation and projection of precipitation over northern China: Further investigation. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2023, 40(4): 587—600.
- [26] Yang X L, Zhou B T, Xu Y, et al. CMIP6 evaluation and projection of temperature and precipitation over China. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2021, 38(5): 817—830.
- [27] 吴佳, 高学杰. 一套格点化的中国区域逐日观测资料及与其它资料的对比. *地球物理学报*, 2013, 56(4): 1102—1111. (Wu J, Gao X J. A gridded daily observation dataset over China region and comparison with the other datasets. *Chinese Journal of Geophysics*, 2013, 56(4): 1102—1111.)
- [28] Taylor K E. Summarizing multiple aspects of model performance in a single diagram. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2001, 106(D7): 7183—7192.
- [29] 胡琴, 姜大膀, 范广洲. CMIP5 全球气候模式对青藏高原地区气候模拟能力评估. *大气科学*, 2014, 38(5): 924—938. (Hu Q, Jiang D B, Fan G Z. Evaluation of CMIP5 models over the Qinghai-Tibetan Plateau. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 2014, 38(5): 924—938.)
- [30] Zhou X, Yang K, Beljaars A, et al. Dynamical impact of parameterized turbulent orographic form drag on the simulation of winter precipitation over the western Tibetan Plateau. *Climate Dynamics*, 2019, 53(1—2): 707—720.

(责任编辑 杨贞)