

# CMIP6 全球气候模式对中国极端降水模拟能力的评估及其与 CMIP5 的比较\*

王 予<sup>1</sup> 李惠心<sup>1,2,3</sup> 王会军<sup>1,2,3</sup> 孙 博<sup>1,2,3</sup> 陈活泼<sup>3</sup>  
WANG Yu<sup>1</sup> LI Huixin<sup>1,2,3</sup> WANG Huijun<sup>1,2,3</sup> SUN Bo<sup>1,2,3</sup> CHEN Huopo<sup>3</sup>

1. 南京信息工程大学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, 210044

2. 南方海洋科学与工程广东省实验室, 珠海, 519080

3. 竺可桢-南森国际研究中心, 中国科学院大气物理研究所, 北京, 100029

1. *Key Laboratory of Meteorological Disasters, Ministry of Education/Collaborative Innovation Center on Forecast and Evaluation of Meteorological Disasters, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China*

2. *Southern Marine Science and Engineering Guangdong Laboratory (Zhuhai), Zhuhai 519080, China*

3. *Nansen-Zhu International Research Centre, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China*

2021-01-08 收稿, 2021-03-22 改回.

王予, 李惠心, 王会军, 孙博, 陈活泼. 2021. CMIP6 全球气候模式对中国极端降水模拟能力的评估及其与 CMIP5 的比较. 气象学报, 79(3): 369-386

Wang Yu, Li Huixin, Wang Huijun, Sun Bo, Chen Huopo. 2021. Evaluation of CMIP6 model simulations of extreme precipitation in China and comparison with CMIP5. *Acta Meteorologica Sinica*, 79(3):369-386

**Abstract** Based on the 32 global climate models that participated in the phase 6 of the Coupled Model Intercomparison Project (CMIP6), 27 global climate models that participated in CMIP5 and the observational dataset CN05.1, this study evaluates the performances of these CMIP6 and CMIP5 models on the simulation of extreme precipitation index over China for 1961—2005. Eight extreme precipitation indices defined by the Expert Team on Climate Change Detection and Indices (ETCCDI) are used to represent extreme precipitation events. Results indicate that the multi-model ensemble (MME) median of CMIP6 overall has lower relative errors of both climatological mean (with an average of 29.94%, reduced by 2.95%) and relative variability (with an average of 10.10%, reduced by 5.45%) than that of CMIP5. Generally, CMIP6 performs better than CMIP5 in simulating climatological condition of China, especially over the arid region (the error was reduced by 12.15% compared to CMIP5). Further analyses suggest that the MME median of CMIP6 has large spatial correlation coefficients and small root-mean-square errors. Based on the Taylor skill (TS) score, both CMIP6 and CMIP5 models are ranked to evaluate relative model performance. CMIP6 models have higher ranks than CMIP5 models, with an average TS score of 0.78 (0.75) for CMIP6 (CMIP5), and four out of the five highest-scored models are CMIP6 models. Regarding the homologous models, the TS scores of CMIP6 models (an average of 0.91) are larger than their earlier versions in CMIP5 (an average of 0.68), indicating a prominent improvement in CMIP6. Further analyses reveal that the performances of CMIP6 models differ in the simulation of extreme precipitation over different regions of China. Generally, compared to CMIP5, CMIP6 models perform better in simulating extreme precipitation events over China.

**Key words** CMIP6, CMIP5, Extreme precipitation, Model evaluation

\* 资助课题: 国家自然科学基金项目(42005015、42088101、41991283、42025502)、江苏省自然科学基金项目(SBK2020040311)、江苏省高等学校自然科学基金面上项目(20KJB170001)、南京信息工程大学优秀毕业论文支持计划。

作者简介: 王予, 主要从事极端气候研究。E-mail: 201883300268@nuist.edu.cn

通信作者: 李惠心, 主要从事极端气候研究。E-mail: lihuixin@nuist.edu.cn

**摘要** 对 CMIP6 全球气候模式在中国地区极端降水的模拟能力进行了综合评估。基于 CN05.1 观测数据集和 32 个 CMIP6 全球气候模式的降水数据,采用 8 个常用极端降水指数对极端降水进行了定量描述。研究表明,在极端降水的气候平均态方面,CMIP6 多模式集合对 1961—2005 年中国地区区域平均的 8 个极端降水指数模拟的平均相对误差为 29.94%,相较 CMIP5 降低了 2.95 个百分点。极端降水的气候变率方面,CMIP6 多模式集合对区域平均的 8 个极端降水指数模拟的平均相对误差为 10.10%,相较 CMIP5 降低 5.45 个百分点。此外,利用 TS 评分进行模式间比较,CMIP6 的平均分(0.78)高于 CMIP5(0.75),且模拟能力排名前五的模式中 CMIP6 占 4 个。对比 14 个同源模式的 TS 评分可以发现,CMIP6(0.91)相对于 CMIP5(0.68)的模拟能力显著提高。进一步研究发现,CMIP6 相对于 CMIP5 对不同区域极端降水模拟能力的改进有所区别:CMIP6 对于干旱区平均的气候态和变率方面改进明显,而对于湿润区的改进主要表现在对极端降水空间相关模拟能力的提高。综上,在中国地区,CMIP6 相较于 CMIP5 对极端降水的模拟能力总体上有提升。

**关键词** CMIP6, CMIP5, 极端降水, 模拟评估  
**中图法分类号** P46

## 1 引言

全球气候模式是研究气候系统变化机理和预估气候系统未来变化的重要工具(IPCC, 2013),已经成为当代气候研究中不可或缺的一部分(Eyring, et al, 2016)。国际耦合模式比较计划(Coupled Model Intercomparison Project Phase, CMIP)的模式结果直接支撑着政府间气候变化专门委员会(IPCC)评估报告的撰写(周天军等, 2019, 2020),对古气候的研究、未来气候变化的预估、政府决策的制定、政府间协议的签署等有重要意义(Yang, et al, 2017)。由 CMIP3 至 CMIP5,有众多学者利用 CMIP 模式结果对其相关领域进行充分研究。但是由于中国地处东亚季风区,气候成因复杂,且受到青藏高原大地形以及复杂下垫面的影响,全球气候模式对中国气候降水特征的模拟能力仍有不足(胡琴等, 2014)。研究表明,CMIP5 对华南地区降水的模拟偏小,对西部高原降水的模拟偏大,总体而言模式能较好地模拟降水冬弱夏强的季节变化(陈晓晨等, 2014)。中国中西部,其他研究结果(姜大膀等, 2004; 高学杰, 2007; Jiang, et al, 2015)同样得出 CMIP5 存在较大的虚假降水中心,青藏高原及附近存在较大误差等。但是,CMIP5 对极端降水的模拟能力在区域平均和趋势方面整体上优于 CMIP3(Chen, et al, 2015)。此外,吴佳等(2015)的研究表明,CMIP5 集合模拟的中国区域平均降水对升温的响应较观测弱,而极端降水对升温的响应强。从 2016 年开始,第 6 次耦合模式比较计划(CMIP6)的模拟数据至今已基本提交完毕,相较于前代 CMIP,CMIP6 的主要特点是采用了一种新的、更具联合特色的组织结构,它将许多试验,包括

许多单独设计的模式比较计划纳入联合活动,以此来满足气候学界日益广泛的科学需要(Eyring, et al, 2016)。历史试验作为 CMIP6 的准入门槛之一(O'Neill, et al, 2016),可以用来评价模式再现不同时间尺度气候要素的能力,同时也决定了不同强迫敏感性试验的结果(Pascoe, et al, 2020; Wu, et al, 2019),所以对历史试验的评估相较于其他试验的评估有重要意义。

全球变暖背景下,全球极端降水事件发生的频率显著增大(Easterling, et al, 2016; Berg, et al, 2013; Donat, 2016)。相较于温度的长期持续升高,极端降水事件的变化更容易造成严重的人员伤亡和财产损失(Zhang, et al, 2020),因此对极端降水准确的模拟及预估尤为重要(Prein, et al, 2017; Bai, et al, 2007; Chen, et al, 2012; 周波涛等, 2020)。对于中国大部分区域,从 20 世纪 60 年代开始,降雨日数明显减少(Liu, et al, 2005; Zhai, et al, 1999),但是年降水总量却显著升高(Zhu, et al, 2011; Yao, et al, 2008; Xu, et al, 2008),即极端降水事件的强度明显增大(Wang, et al, 2012; Sun, et al, 2013)。一些学者利用高分辨率区域模式(Gao, et al, 2011; 李东欢等, 2017)、CMIP5 中的耦合试验(李双林等, 2012)对中国未来降水和极端降水的预估结果表明,21 世纪未来中国极端降水事件在全国将普遍增多。此外,不同区域之间也存在显著差别。研究表明,华北和东北中部地区的极端降水事件呈缓慢上升趋势(Qian, et al, 2007; Wang, et al, 2005),而东南沿海和长江中下游地区呈较强的上升趋势(Gemmer, et al, 2008; Li, et al, 2018)。尽管中国大部分区域的降水强度都增大,但是强降雨主要发生在中国东南部,尤其是长江流域下游的南部

(Wang, et al, 2009; Fan, et al, 2014)。此外,吴佳等(2015)研究显示在持续变暖背景下,未来北方地区平均降水对变暖的响应比南方地区要强,表明未来这些区域发生暴雨和洪涝的风险将增大。因此,中国地区极端降水的变化具有明显的区域性差异,CMIP6 模式能否准确模拟中国极端降水的时、空变化特征是值得探讨的科学问题。

目前,已有一些学者开展了关于评估 CMIP6 模拟能力的工作。例如,Chen 等(2020)评估了 CMIP6 模式对全球重点区域极端气候的模拟能力,发现 CMIP6 可以较好地重现中国和北美地区极端降水在东南和西北两地的显著差异,Zhu 等(2020)利用 12 个 CMIP6 模式比较了 CMIP6 与 CMIP5 对中国极端气候模拟能力的差异,表明 CMIP6 多模式集合相较于 CMIP5 多模式集合对气候态和年际变率两方面的模拟能力都有较大改进。但是,由于上述研究较早开展,使用的 CMIP6 模式在数量上相对偏少,且评估的极端降水指数也相对较少,因此利用更多的模式来进一步分析 CMIP6 对中国极端降水的模拟能力非常必要。此外,目前关于 CMIP6 对中国不同干、湿地区模拟能力的研究较少,文中根据中国的降水分布特征将研究区域细分为湿润区、半湿润区、半干旱区、干旱区,并从空间相关、

模式误差、时间序列等方面对极端降水气候平均态和变率的模拟能力进行综合全面的分析。

## 2 资料和方法

文中利用 32 个 CMIP6 模式和 27 个 CMIP5 模式,综合评价其对中国极端降水的模拟能力。各模式数据均可在开放网站(<https://esgf-node.llnl.gov/projects/esgf-llnl/>)下载,CMIP6 和 CMIP5 模式的基本信息分别见表 1 和 2。由于各模式分辨率不同,文中利用最近邻插值法将所有模式的降水资料统一插值到  $1^\circ \times 1^\circ$  的标准网格上。计算多模式集合时,均采用模式集合中位数的方法。用到的观测数据为 CN05.1 数据集中 1961—2018 年的日降水资料,CN05.1 数据集是吴佳等(2013)利用双线性插值法对中国 2416 个地面气象站的观测资料处理后得到的格点数据,其网格分辨率为  $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ 。为方便模式资料与观测资料的比较,同样利用最近邻插值法将观测资料插值到  $1^\circ \times 1^\circ$  的网格上。综合考虑观测资料以及 CMIP5 所覆盖的历史时段,文中对历史时期评估的研究时段定为 1961—2005 年。

采用 Karl 等(1999)定义的 8 个极端降水指数(表 3)描述极端降水的气候特征。

文中定义气候平均态为气象要素在 1961—2005

表 1 32 个 CMIP6 全球气候模式的基本信息

Table 1 CMIP6 global climate models

模式名	研究机构, 国家	分辨率(经向网格数×纬向网格数)	模式名	研究机构, 国家	分辨率(经向网格数×纬向网格数)
ACCESS-CM2*	ACCESS, 澳大利亚	192×144	GFDL-CM4*	GFDL, 美国	288×180
ACCESS-ESM1-5	ACCESS, 澳大利亚	192×145	GFDL-ESM4*	GFDL, 美国	288×180
AWI-ESM-1-1-LR	AWI, 德国	192×96	INM-CM4-8	INM, 俄罗斯	180×120
BCC-CSM2-MR*	BBC, CMA, 中国	320×160	INM-CM5-0*	INM, 俄罗斯	180×120
BCC-ESM1	BBC, CMA, 中国	128×64	IPSL-CM6A-LR*	IPSL, 法国	144×143
CanESM5*	CCCMA, 加拿大	128×64	KACE-1-0-G	NIMS, 韩国	192×144
CESM2-FV2	NCAR, 美国	144×96	MIROC6*	MIROC, 日本	256×128
CESM2-WACCM-FV2	NCAR, 美国	288×192	MPI-ESM-1-2-HAM	MPI, 德国	192×96
CESM2-WACCM	NCAR, 美国	144×96	MPI-ESM1-2-HR	MPI, 德国	384×192
CESM2*	NCAR, 美国	288×192	MPI-ESM1-2-LR*	MPI, 德国	192×96
CMCC-CM2-SR5*	CMCC, 意大利	288×192	MRI-ESM2-0*	MRI, 日本	320×160
EC-Earth3-Veg-LR	EC-Earth, 欧洲10国	320×160	NESM3	NUIST, 中国	192×96
EC-Earth3-Veg	EC-Earth, 欧洲10国	512×256	NorESM2-LM*	NCC, 挪威	144×96
EC-Earth3*	EC-Earth, 欧洲10国	512×256	NorESM2-MM	NCC, 挪威	288×192
FGOALS-f3-L	IAP, CAS, 中国	288×180	SAM0-UNICON	SNU, 韩国	288×192
FGOALS-g3	IAP, CAS, 中国	180×80	TaiESM1	RCEC, 中国	288×192

注: \*表示与表2存在同源模式。

表 2 27 个 CMIP5 全球气候模式的基本信息  
Table 2 Basic information of 27 CMIP5 global climate models

模式名	研究机构, 国家	分辨率(经向网格数×纬向网格数)	模式名	研究机构, 国家	分辨率(经向网格数×纬向网格数)
ACCESS1-0*	ACCESS, 澳大利亚	192×145	INM-CM-4*	INM, 俄罗斯	180×120
BBC-CSM1-1*	BBC, CMA, 中国	128×64	IPSL-CM5A-LR*	IPSL, 法国	96×96
BNU-ESM	GCESS, 中国	128×64	IPSL-CM5A-MR	IPSL, 法国	144×143
CanESM2*	CCCMA, 加拿大	128×64	IPSL-CM5B-LR	IPSL, 法国	96×96
CCSM4	NCAR, 美国	288×192	MIROC-ESM	MIROC, 日本	128×64
CESM1-BGC*	NCAR, 美国	288×192	MIROC-ESM-CHEM	MIROC, 日本	128×64
CMCC-CM*	CMCC, 意大利	480×240	MIROC4h	MIROC, 日本	640×320
CNRM-CM5	CNRM-CERFACS, 法国	256×128	MIROC5*	MIROC, 日本	256×128
CSIRO-Mk3-6-0	CSIRO-QCCCE, 澳大利亚	192×96	MPI-ESM-LR*	MPI, 德国	192×96
EC-EARTH*	EC-Earth, 欧洲10国	320×160	MPI-ESM-MR	MPI, 德国	192×96
GFDL-CM3*	GFDL, 美国	144×90	MPI-ESM-P	MPI, 德国	192×96
GFDL-ESM2G*	GFDL, 美国	144×90	MRI-CGCM3*	MRI, 日本	320×160
GFDL-ESM2M	GFDL, 美国	144×90	NorESM1-M*	NCC, 挪威	144×96
GISS-E2-R	GISS, 美国	144×90			

注: \*表示与表1存在同源模式。

表 3 8 个极端降水指数的定义  
Table 3 Definitions of eight extreme precipitation indices

英文缩写	指数名称	定义	单位
RX1day	最大单日降水量	一年中最大单日降水量	mm
RX5day	最大连续五日降水量	一年中最大连续五日降水量	mm
SDII	简单降水强度指数	$W$ 为日降水量>1 mm 的天数, $W$ 天的平均降水量即为SDII	mm/d
CDD	最大无雨期	一年中日降水量<1 mm 的最长持续天数	d
CWD	最大雨期	一年中日降水量>1 mm 的最长持续天数	d
PRCPTOT	年总降水量	年日降水量>1 mm 的总降水量	mm
R1mm	有雨日数	一年中日降水量>1 mm 的天数	d
R10mm	大雨日数	一年中日降水量>10 mm 的天数	d

年的均值, 为了消除量纲的影响, 本文用相对变率( $s$ )来表征气象要素与均值差异的平均状况, 定义如下

$$s = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{|x_i - \bar{x}|}{\bar{x}} \times 100\% \quad (1)$$

式中,  $x_i$ 表示某气象要素第  $i$  年的值,  $\bar{x}$ 为该气象要素  $n$  年的均值。

进行模式比较时, 采用泰勒图 (Taylor, 2001) 方法, 同时考虑模式与观测的空间相关系数、标准差的比值和中心均方根误差。在此基础上, 计算模式的 TS 评分 (Taylor, 2001), 其定义为

$$TS = \frac{4 \times (1 + R)^2}{\left(\frac{\sigma_m}{\sigma_o} + \frac{\sigma_o}{\sigma_m}\right)^2 \times (1 + R_0)^2} \quad (2)$$

式中,  $\sigma_m$ 和 $\sigma_o$ 分别表示模式和观测值的标准差,  $R$ 表示模式与观测的空间相关系数,  $R_0$ 表示所选模式中  $R$  的最大值。

为了研究模式对中国不同干、湿区极端降水的模拟能力, 根据 1981—2010 年气候态的年累计 200、400、800 mm 等降水线 (袁喆等, 2014), 将中国分为干旱区、半干旱区、半湿润区、湿润区 (图 1) 进行研究和讨论。

### 3 多模式集合的模拟能力

为了对比 CMIP6 和 CMIP5 的模拟能力, 首先评估 CMIP5 对极端降水气候态的模拟能力。图 2 为 1961—2005 年 CMIP5 多模式集合对中国极端降水气候平均态模拟的相对误差, 其中 CDD 为最

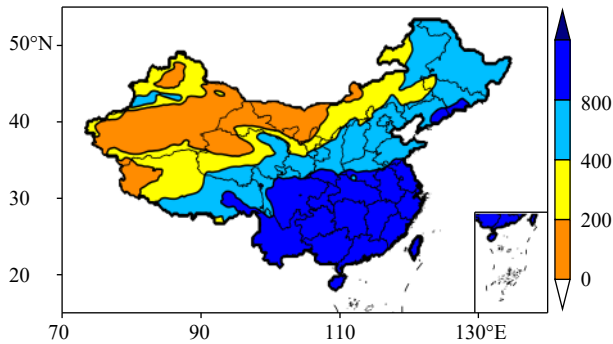


图1 1981—2010年中国年累计降水量(单位:mm)气候态空间分布(干旱区:姜黄色, <200 mm;半干旱区:黄色, 200—400 mm;半湿润区:浅蓝, 400—800 mm;湿润区:深蓝, >800 mm)

Fig. 1 Spatial distribution of climatological annual mean precipitation (unit: mm) in China during 1981—2010 (arid region: ginger, <200 mm; semi-arid region: yellow, 200—400 mm; semi-humid region: light blue, 400—800 mm; humid region: navy blue, >800 mm)

大无雨期,为了方便与其他极端降水指数的比较,在此将其乘以-1。在华南和江南等湿润地区,除了CWD和CDD为正相对误差,剩下6个极端降水指数的模式结果低于观测值6.05%—21.57%。对于华北、黄淮北部等半湿润地区,RX1day、RX5day、SDII、CWD和CDD表现为负相对误差,而PRCPTOT、R1mm和R10mm则较观测大,除了CWD和R10mm,另外6个极端降水指数相对误差的绝对值均在20%以内,而CWD和R10mm的相对误差超过40%,分别为43.57%和42.05%。对于内蒙古东部以及东北地区的半湿润区,除了CDD外,另外7个极端降水指数整体均表现为正相对误差(4.02%—44.97%),表明对该地区极端降水强度和持续时间的模拟均偏大。在西北和西藏等干旱、半干旱地区,受到青藏高原地形以及观测台站密度较小的影响,8个极端降水指数的相对误差为18.63%—55.69%,高于中国其他地区。青藏高原边缘地区,模式结果的相对误差很大,甚至超过观测结果的2倍,除CDD为负相对误差外,其他指数均表现为正相对误差,即存在虚假的降水区域。然而,青藏高原中部的模拟结果则明显优于其边缘地区,这可能是全球气候模式分辨率较低,很难反映高原边缘陡峭的地形、复杂的下垫面所致。

图3为CMIP6多模式集合对中国1961—2005年极端降水气候态的相对误差以及与CMIP5多模

式集合的比较,打点区域为CMIP6多模式集合相对误差小于CMIP5多模式集合相对误差。从图中可见,CMIP6多模式集合对不同极端降水指数气候态模拟能力的提升在空间分布和改进程度上均不同。华南和江南等湿润地区,除了R1mm相对误差的绝对值增大1.51个百分点外,其余7个极端降水指数相对误差的绝对值均减小(1.51—9.76个百分点)。华北、黄淮北部等半湿润地区,除CDD和PRCPTOT外,6个极端降水指数相对误差的绝对值减小0.87—5.93个百分点,而CDD和PRCPTOT相对误差的绝对值分别增大10.59个百分点和6.21个百分点。对于内蒙古东部和东北的半湿润地区,CWD、R1mm和R10mm的相对误差分别减少9.78个百分点、11.82个百分点和5.80个百分点,而其余5个极端降水指数的相对误差增大0.39—8.42个百分点。在西北干旱、半干旱地区,CMIP6对极端降水气候平均态模拟的改进尤为明显,在所选取的8个极端降水指数中,相对误差的绝对值减少2.28—34.73个百分点。由此表明,在气候平均态的模拟能力上,CMIP6模式对CWD、R1mm的改进较为显著。

为了对模式的空间模拟能力进行评估,文中进一步给出了极端降水指数的泰勒图(图4)。图4为各模式模拟的不同极端降水指数与观测的空间相关系数、标准差的比值以及中心均方根误差。结果表明,CMIP6和CMIP5对SDII的模拟能力在8个极端降水指数中均表现最好:模式与观测的空间相关系数最高(整体分布于0.6—0.9),模式与观测的标准差比值接近1,中心均方根误差较小。RX1day和RX5day的泰勒图结果与SDII相似,但模拟与观测标准差的比值较SDII分散,因此CMIP6和CMIP5对RX1day和RX5day的模拟能力仅次于SDII。CMIP6和CMIP5在对PRCPTOT、R1mm和R10mm的模拟中,空间相关系数同样整体为0.6—0.9,但是模拟的标准差较观测大,中心均方根误差也大,整体模拟能力一般。对于CWD和CDD,空间相关系数集中在0.5附近,模式间在模拟与观测标准差的比值方面差异很大,所以在8个极端降水指数的模拟中表现较差,但是CMIP6相较于CMIP5在CDD的空间相关系数方面有明显的提升。多模式集合方面,对RX1day、RX5day、SDII和CDD的模拟能力CMIP6较CMIP5均有改进:空间相关系数更高,

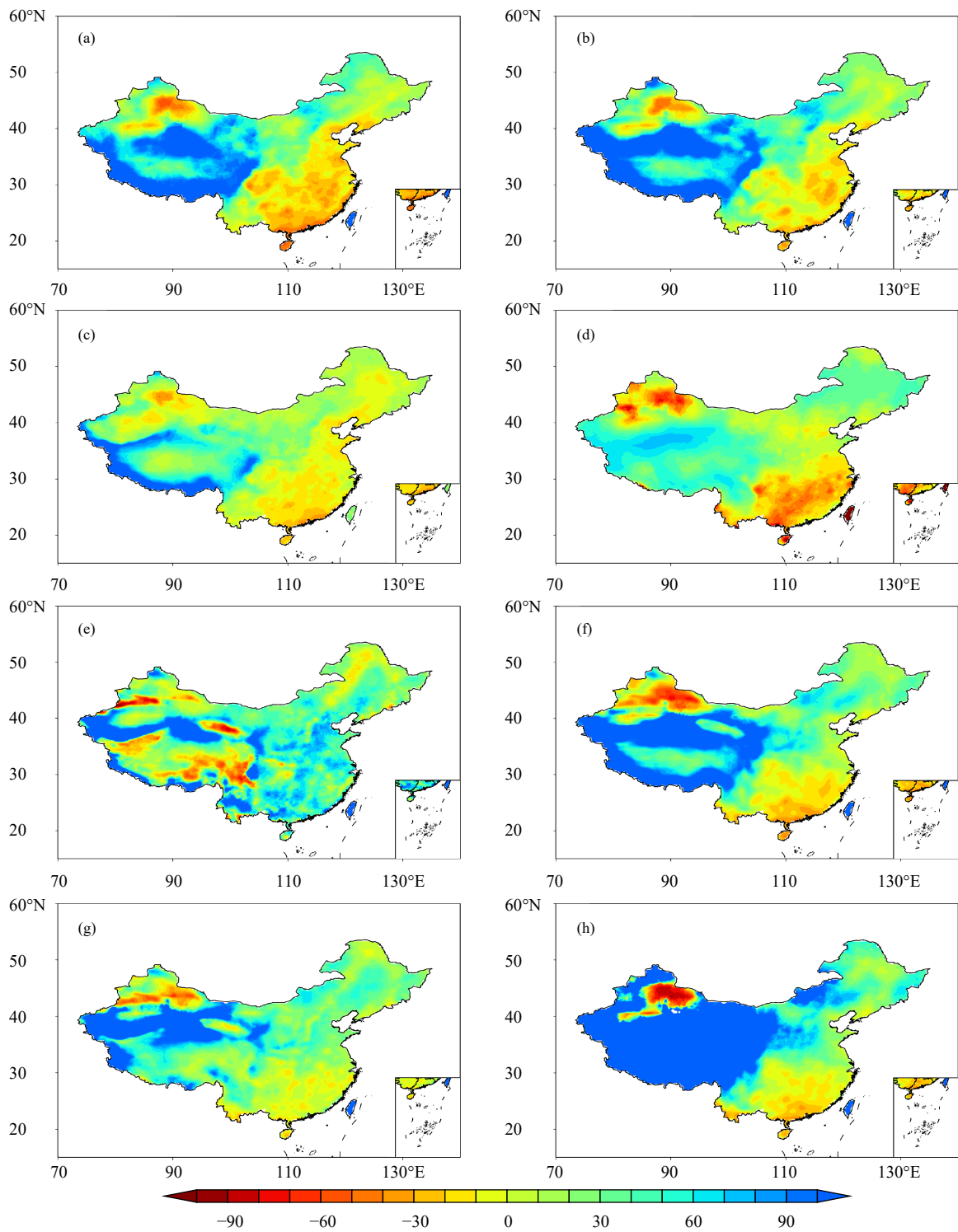


图2 CMIP5 多模式集合对 1961—2005 年中国极端降水气候模拟的相对误差 (与 CN05.1 相比; 空白处为极端降水指数缺失, 下同) (a. RX1day, b. RX5day, c. SDII, d. CDD(CDD $\times$ (-1)), e. CWD, f. PRCPTOT, g. R1mm, h. R10mm; 单位: %)

Fig. 2 Relative errors of climatological means of CMIP5 multi-model ensemble (MME) medians for eight extreme precipitation indices compared with CN05.1 during 1961—2005 in China (Blanks are missing values of extreme precipitation indices, the same below; a. RX1day, b. RX5day, c. SDII, d. CDD(CDD $\times$ (-1)), e. CWD, f. PRCPTOT, g. R1mm, h. R10mm; unit: %)

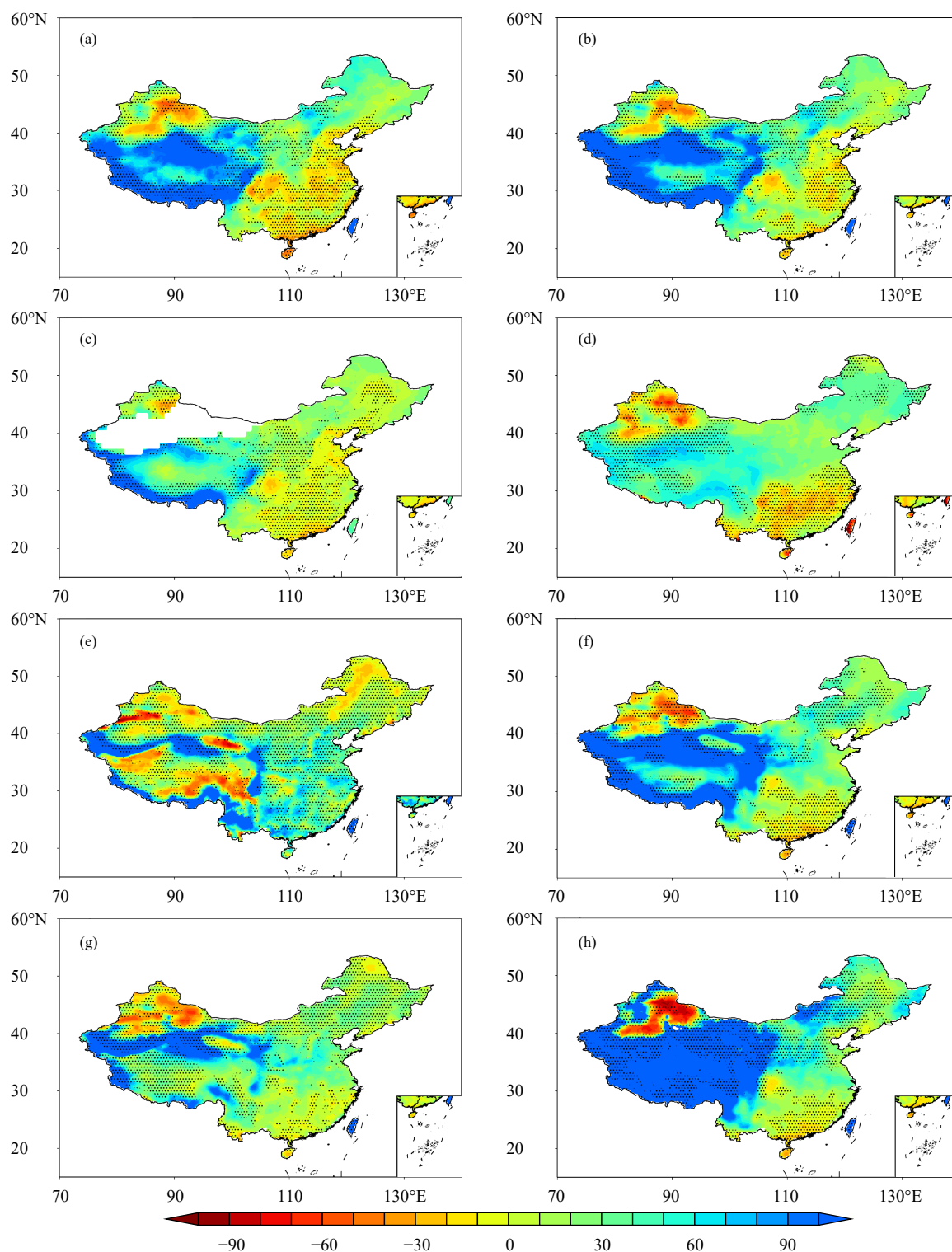


图 3 同图 2, 但为 CMIP6 (打点区域表示 CMIP6 与观测的相对误差小于 CMIP5 与观测的相对误差)

Fig. 3 Same as in Fig. 2 but for CMIP6 (The dotted regions represent areas where the relative errors between CMIP6 and observations are less than those between CMIP5 and observations)

中心均方根误差更小以及标准差的比值更接近 1。而对于剩下的 4 个极端降水指数, 3 个评价指标各

有优劣, 对于 CWD, CMIP6 多模式集合的空间相关系数小于 CMIP5 多模式集合, 但 CMIP6 多模式集

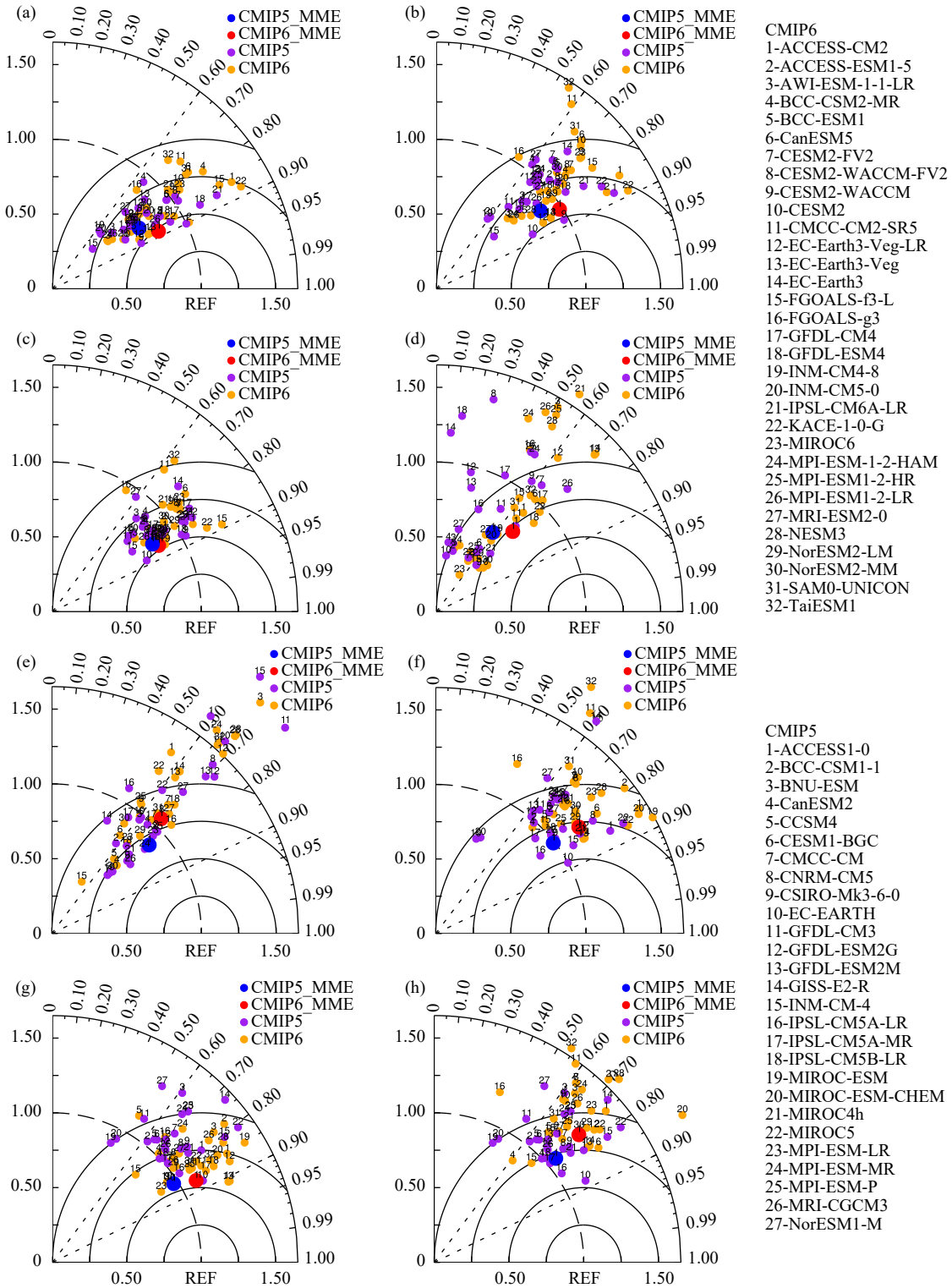


图4 CMIP5/CMIP6对1961—2005年中国8个极端降水指数气候模拟能力的泰勒图 (a. RX1day, b. RX5day, c. SDII, d. CDD, e. CWD, f. PRCPTOT, g. R1mm, h. R10mm; 红色和蓝色分别表示CMIP6和CMIP5多模式集合, 姜黄色和紫色分别表示CMIP6和CMIP5中的模式, 黑色数字表示对应的模式)

Fig. 4 Taylor diagrams of CMIP5/CMIP6 performance of climatological means (1961—2005) for eight extreme precipitation indices in China (a. RX1day, b. RX5day, c. SDII, d. CDD, e. CWD, f. PRCPTOT, g. R1mm, h. R10mm; The ginger, purple, red, blue dots indicate CMIP6 models, CMIP5 models, and MMEs of CMIP6 and CMIP5, respectively, black numbers represent the specific models)



合标准差与观测的比值更接近 1; 对于 PRCPTOT、R1mm 和 R10mm, CMIP6 多模式集合的相关系数高于 CMIP5 多模式集合, 但 CMIP5 多模式集合标

准差与观测的比值更接近 1。

变率是气象要素的另一重要特征, 同样也是衡量模式模拟能力的重要因子。图 5 是 1961—2005

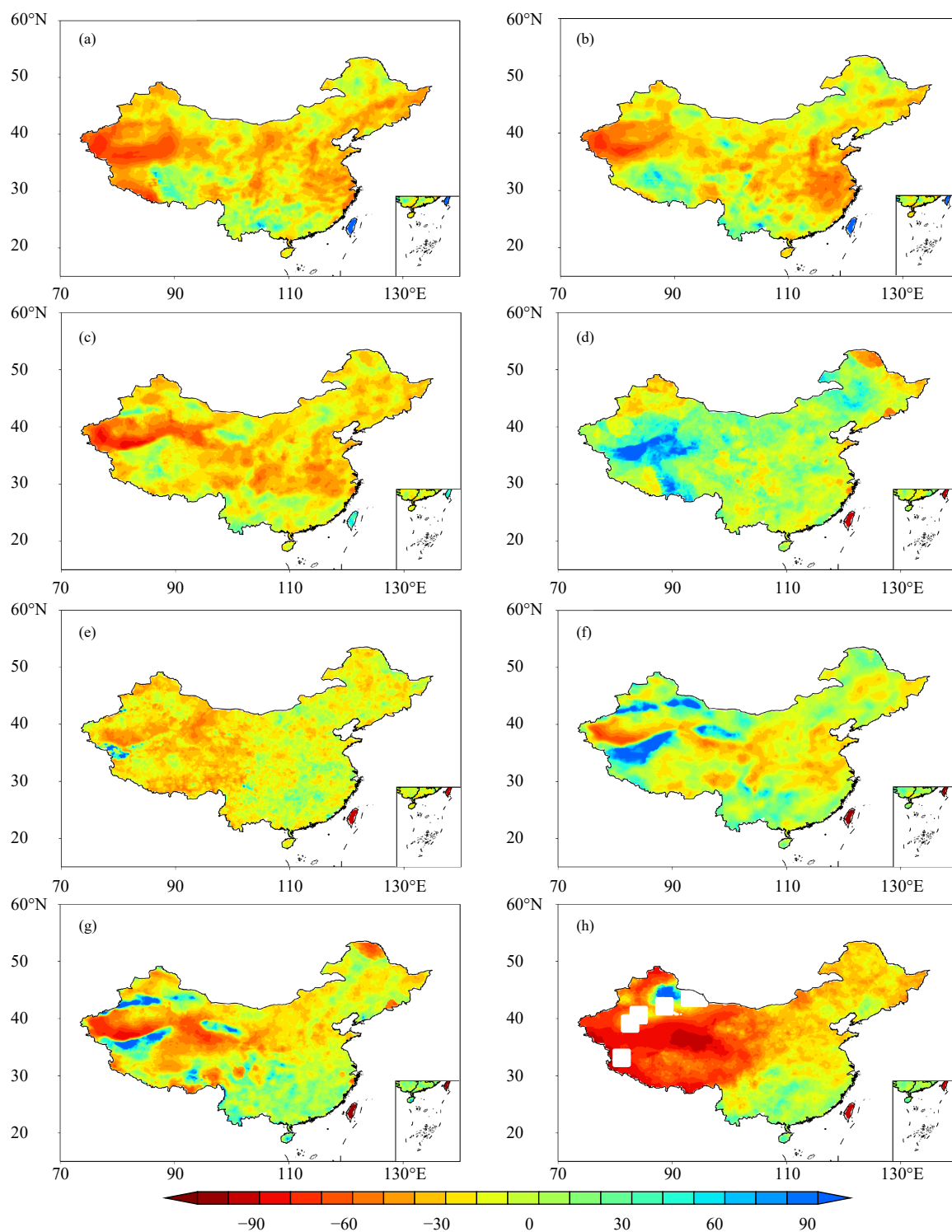


图 5 同图 2, 但为相对变率

Fig. 5 Same as in Fig. 2 but for relative variability

年 CMIP5 多模式集合对中国极端降水相对变率模拟的相对误差。整体而言,除 CDD 和 PRCPTOT 的相对误差为 15.83% 和 5.91% 外,另 6 个极端降水指数的相对误差均为负值(-30.47%—-5.80%),因此,CMIP5 多模式集合对中国的极端降水模拟的相对变率偏小。湿润区,华南和西南地区南部对极端降水相对变率模拟能力较好,相对误差为-4.53%—17.35%,仅有 PRCPTOT、R1mm 和 R10mm 变率的相对误差大于 10%,江淮南部、江南等地,极端降水相对变率的相对误差略高于华南和西南。半湿润地区,华北, RX1day、RX5day 和 SDII 相对变率的相对误差偏大,分别为-20.86%、-26.63% 和-19.86%,其余 5 个极端降水指数相对误差的绝对值均低于 10%,东北 8 个极端降水指数变率的相对误差均在 20% 内。然而,干旱地区相对误差的绝对值较大,西北地区除 CWD 的相对误差为 22.47% 外,其余 7 个极端降水指数相对误差的绝对值均超过 30%,R10mm 的相对误差甚至达到 62.12%。

图 6 为 1961—2005 年 CMIP6 多模式集合对 8 个极端降水指数相对变率的相对误差以及与 CMIP5 多模式集合的比较。相较于极端降水气候态,CMIP6 多模式集合对极端降水变率的模拟能力提升更为显著(8 个极端降水指数的相对误差平均降低 5.45 个百分点),尤其是在 CMIP5 相对误差较大的西北、江南、江淮以及华北地区提升很大。CMIP6 中 RX1day、RX5day、SDII 相对变率的相对误差的分布相仿,表现为江南、江淮和西北地区相对变率的相对误差绝对值较大,超过 30%。相较于 CMIP5,这 3 个极端降水指数在江南、江淮地区相对误差的绝对值降低 5.94—11.11 个百分点,西北地区降低 13.01—17.04 个百分点。CMIP6 对 CWD 和 R10mm 相对变率的模拟能力有明显改进,对中国整体的相对误差分别降低 6.80 个百分点和 17.44 个百分点,对干旱地区的改进尤为明显,相对误差的绝对值分别降低 23.19 个百分点和 34.09 个百分点。然而,对于 CDD、PRCPTOT 和 R1mm 相对变率的模拟能力 CMIP6 不如 CMIP5,整体而言,相对误差的绝对值分别降低 8.45、9.00 和 3.31 个百分点。

图 7 为相对变率研究中极端降水指数的泰勒图,相较于极端降水的气候平均态,相对变率的空间分布仍有较大的提升空间。空间相关系数方面,

PRCPTOT、R1mm 和 R10mm 与观测的相对变率的空间相关系数为 0.5—0.8, RX1day、RX5day、SDII 大体分布在 0.4—0.6,而 CWD 和 CDD 集中在 0.2 附近。在相对变率与观测标准差的比值方面,CMIP5 模式间分布较为集中,且多数小于 1。而对于 CMIP6,除了 CDD 和 R10mm,其他 6 个极端降水指数相对变率与观测标准差比值的分布差异较大,且与观测标准差的比值多数高于 1。对于中心均方根误差,CMIP6 普遍高于 CMIP5。多模式集合方面,与极端降水指数气候态相似,CMIP6 多模式集合对 8 个极端降水指数相对变率的模拟能力高于 CMIP5 多模式集合。在多模式集合与观测标准差的比值方面,除 CDD,CMIP6 多模式集合对另外 7 个极端降水指数的模拟能力均明显优于 CMIP5 多模式集合;与观测空间相关方面,CMIP6 多模式集合的模拟能力也高于 CMIP5 多模式集合(R10mm 除外),对于中心均方根误差,CMIP6 多模式集合同样优于 CMIP5 多模式集合。

为了更直观地体现模式对中国极端降水平均状况的模拟能力,图 8 给出了 1961—2018 年观测和模拟的 8 个极端降水指数中国区域平均的时间序列。结果表明,区域平均后,除了 CDD 以外,其余 7 个极端降水指数都表现为模式模拟的结果高于观测,即模式对中国总体降水以及极端降水的模拟偏多。从中国范围的区域平均来看,CMIP6 相较于 CMIP5 在 RX5day、CWD、R1mm、R10mm 的模拟能力上均有改进。此外,对不同于湿区的模拟能力也进行了相关分析(图略)。干旱、半干旱区域,除了 SDII 和 CDD 外,CMIP6 相较于 CMIP5 对其余 6 个极端降水指数的模拟能力均明显提升。湿润、半湿润区域,CMIP6 相较于 CMIP5 的改进情况在不同的极端降水指数中差异显著,如在半湿润区对 R1mm、R10mm 的模拟中,CMIP6 相较于 CMIP5 一致偏小,与实际观测更加接近,模拟能力增强,而在对湿润区 R1mm、R10mm 的模拟中,CMIP6 较 CMIP5 偏多,与观测的偏差更大,模拟能力减弱。不同干、湿区 CMIP6 和 CMIP5 模拟结果的相对误差(图 9)表明,除了 CWD 外,CMIP6 和 CMIP5 对其余 7 个极端降水指数在中国年累计降水量大于 800 mm 的湿润区的相对误差最小(8 个极端降水指数,CMIP6 平均 16.33%,CMIP5 平均 12.78%),而在年累计降水量小于 200 mm 的干旱区相对误差最

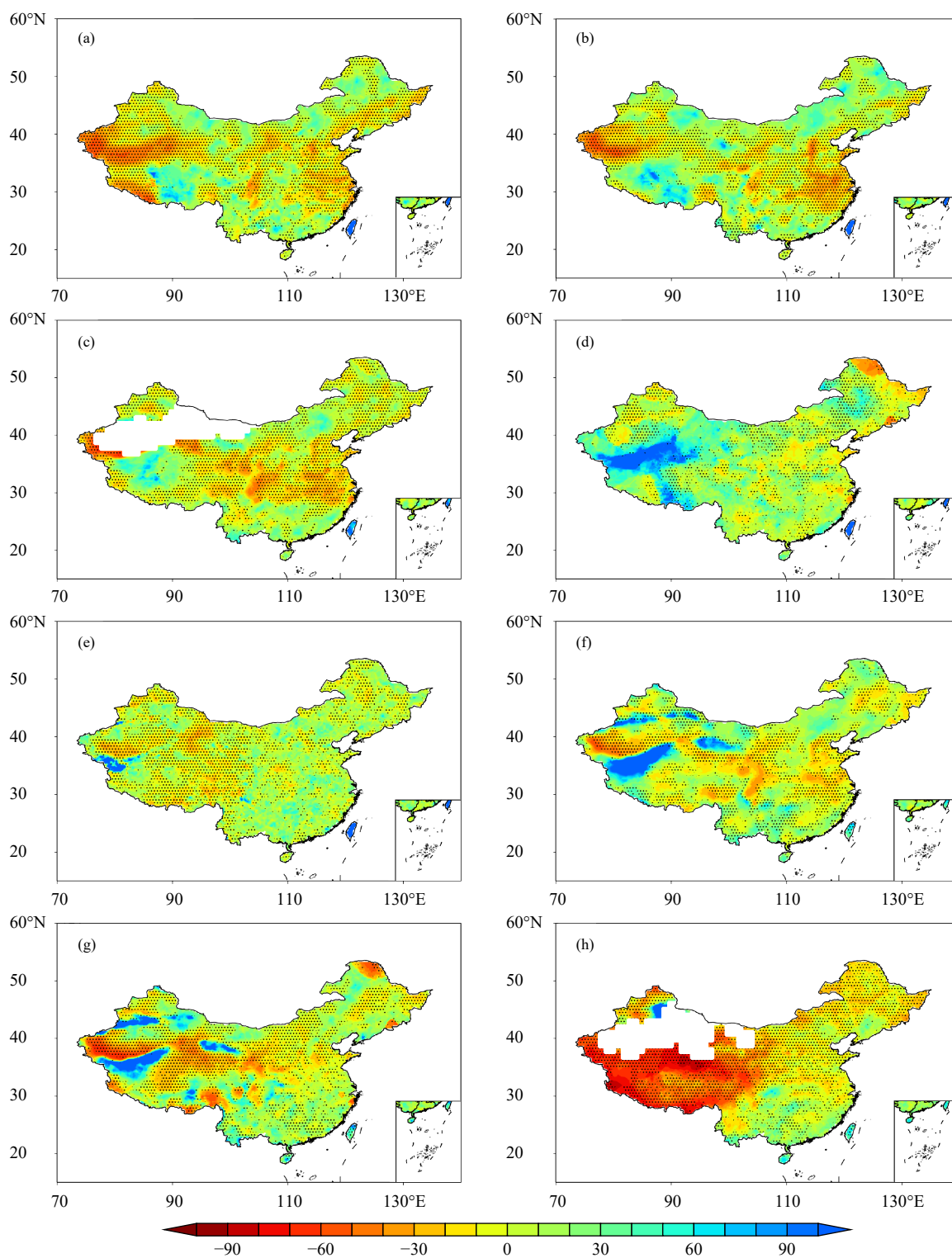


图 6 同图 3, 但为相对变率

Fig. 6 Same as Fig. 3 but for relative variability

大(8个极端降水指数, CMIP6 平均 37.35%, CMIP5 平均 49.50%)。从湿润区、半湿润区、半干旱区到干旱区, CMIP6 和 CMIP5 与观测的相对误差都逐

渐增大, 不同的极端降水指数稍有区别。对于中国整体而言, 相较于 CMIP5, CMIP6 对 8 个极端降水指数的相对误差平均降低 2.95 个百分点。半干旱

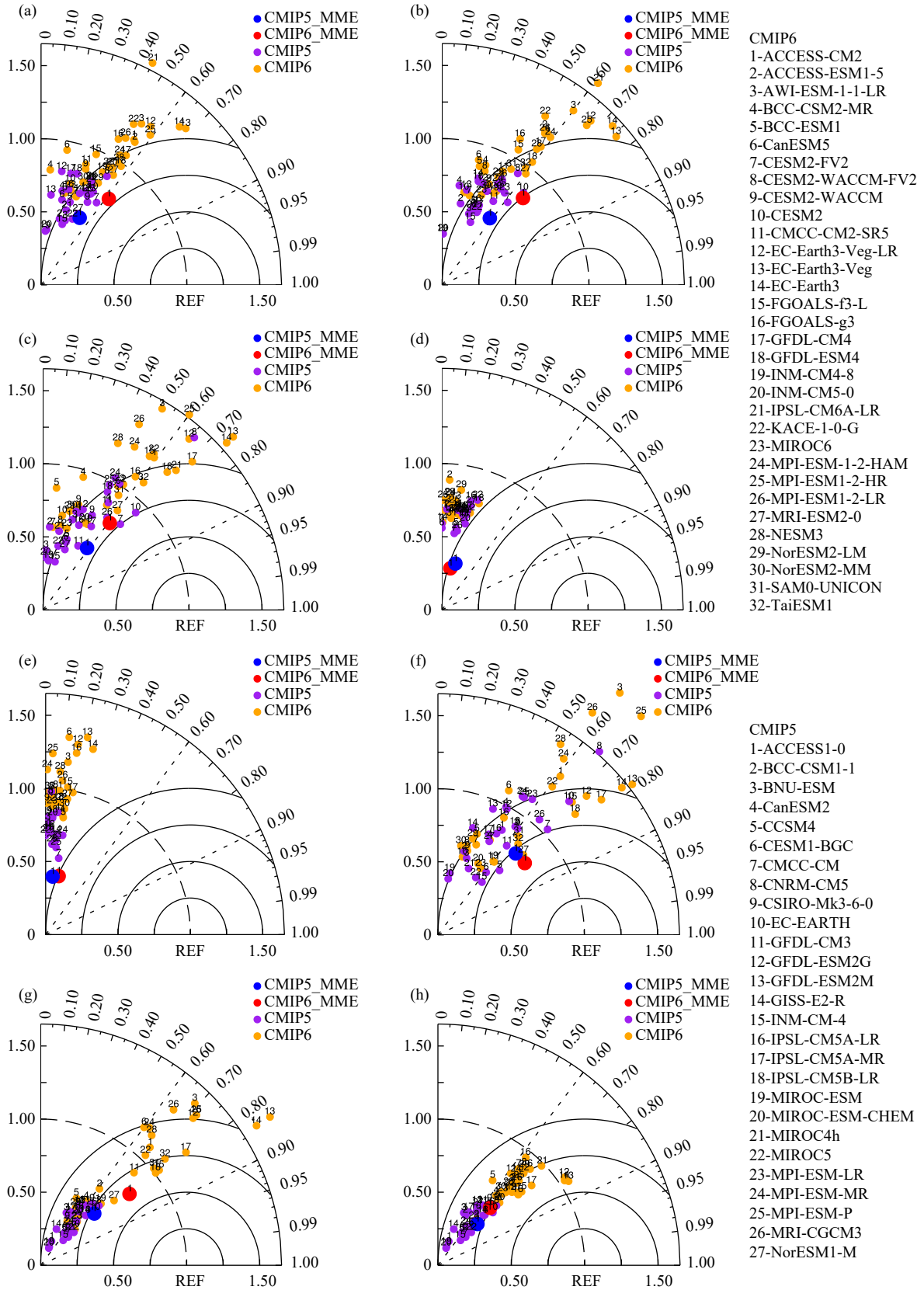


图 7 同图 4, 但为相对变率

Fig. 7 Same as Fig. 4 but for relative variability

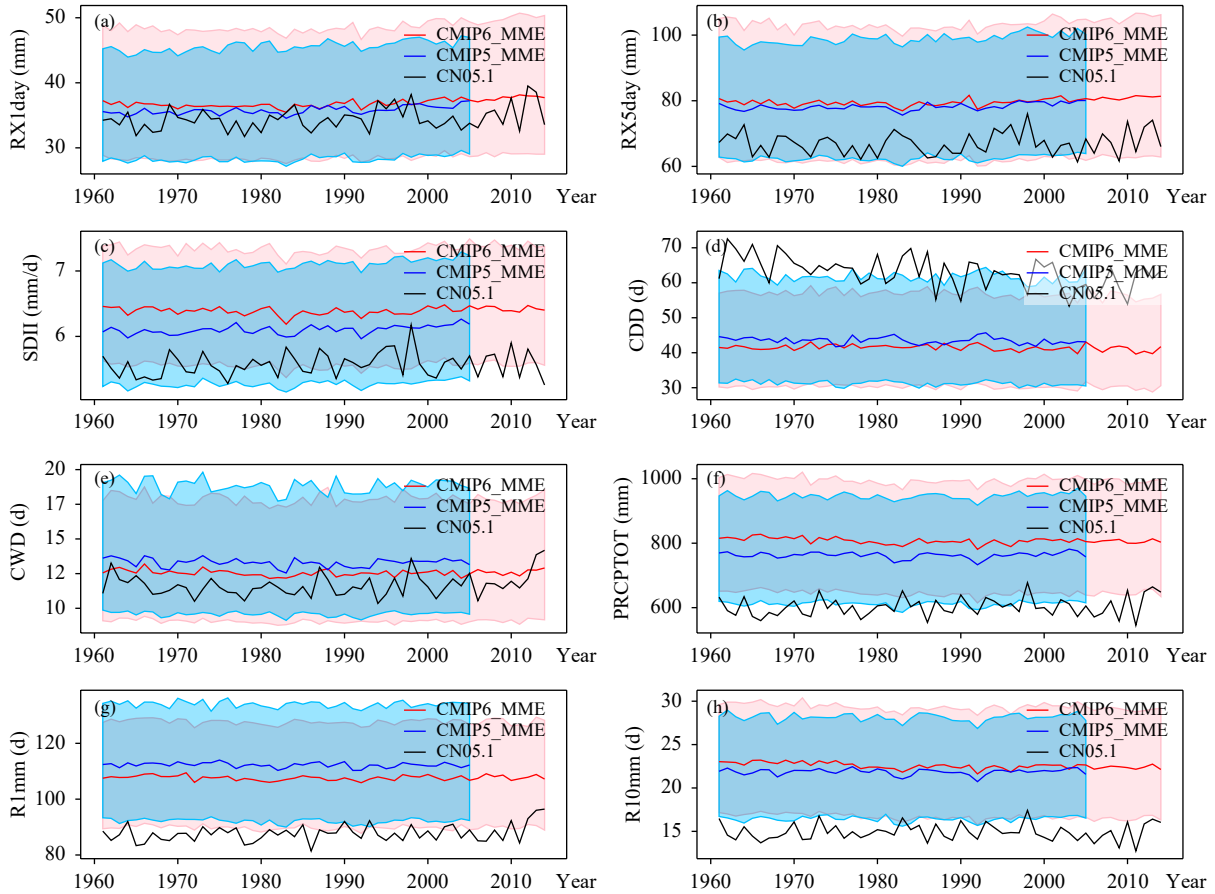


图 8 观测和 CMIP5/CMIP6 模拟的 1961—2018 年中国 8 个极端降水指数区域平均的时间序列 (a. RX1day, b. RX5day, c. SDII, d. CDD, e. CWD, f. PRCPTOT, g. R1mm, h. R10mm; 蓝色、红色和黑色实线分别表示 CMIP5 多模式集合、CMIP6 多模式集合和观测结果, 浅蓝和粉红色区域分别表示 CMIP5 和 CMIP6 模式的 25% 和 75% 分位数)

Fig. 8 Time series of regional averages of eight extreme precipitation indices in China during 1961—2018 (a. RX1day, b. RX5day, c. SDII, d. CDD, e. CWD, f. PRCPTOT, g. R1mm, h. R10mm. The solid blue, red, and black lines represent CMIP5 MME, CMIP6 MME, and observations, respectively. The color shadings represent the model spreads between the 25th and 75th quartiles)

区和半湿润区, 8 个极端降水指数的相对误差平均分别降低 3.49 和 0.95 个百分点。CMIP6 在干旱区的改进尤为明显, 对 8 个极端降水指数的相对误差相较于 CMIP5 平均降低 12.15 个百分点, 而对于湿润区, 相对误差平均上升 3.55 个百分点。由此表明, 对于区域平均的相对误差而言, 干旱区、半干旱区 CMIP6 的模拟能力有较好的提升, 而在半湿润和湿润区 CMIP6 的模拟能力改进不大。

#### 4 模式间及同源模式的比较

前面详细分析了 CMIP6 和 CMIP5 对 8 个极端降水指数对不同干、湿区区域平均的模拟能力, 但是不同模式对极端降水的模拟能力也存在差异, 不同模式的“好坏”如何? 同一模式在 CMIP6 中相较

于 CMIP5 有哪些改进? 区域平均仅能表示部分特征, 空间相关的模拟是否有提升? 为了回答上述问题, 在这一小节中计算了 CMIP6 和 CMIP5 模式的 TS 评分, 并选取 14 组 CMIP6 和 CMIP5 中的同源模式(表 1、2 中加\*的模式)进一步分析, 比较 CMIP6 相较于 CMIP5 模拟能力的变化以及空间分布的模拟能力, 同时也讨论了同源模式对不同干、湿区的模拟能力。由于模式对极端降水变率的模拟能力远不及气候态(图 8), 而且极端降水气候态能直观反映极端降水事件的强度, 因此这一节中仅对气候态的模拟能力进行评估。

图 10 为 1961—2005 年 32 个 CMIP6 模式、27 个 CMIP5 模式以及 CMIP5 和 CMIP6 多模式集合气候态的 TS 评分。CMIP6 多模式集合对 8 个极

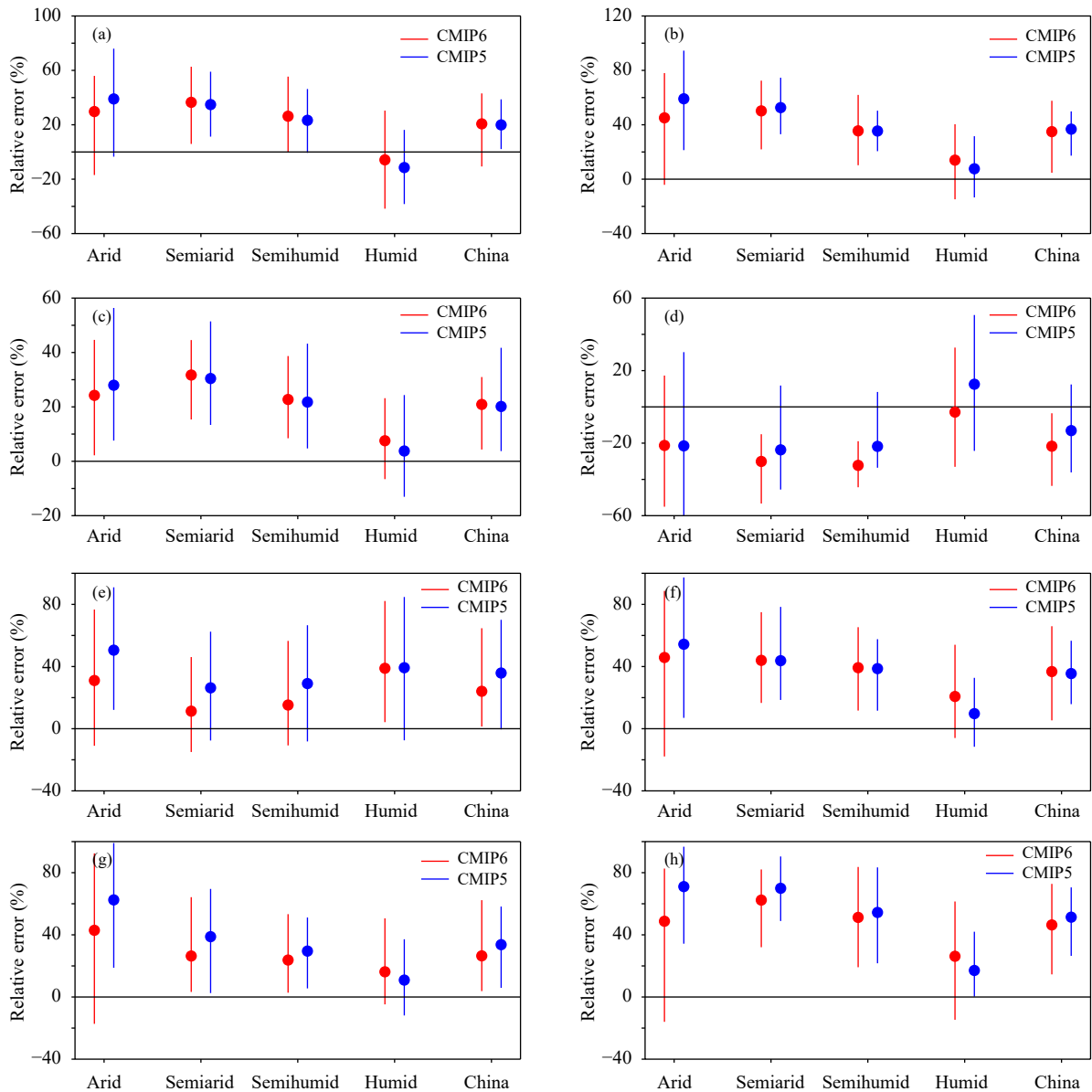


图9 CMIP5/CMIP6在1961—2005年中国不同干湿区对8个极端降水指数气候平均态区域平均的相对误差 (a. RX1day, b. RX5day, c. SDII, d. CDD, e. CWD, f. PRCPTOT, g. R1mm, h. R10mm; 蓝色和红色竖线分别表示CMIP5和CMIP6的模式分布, 圆点表示多模式集合中位数, 水平黑线表示相对误差为0; 单位: %)

Fig. 9 Regionally averaged relative errors of simulations for eight extreme precipitation indices in China during 1961—2005 (a. RX1day, b. RX5day, c. SDII, d. CDD, e. CWD, f. PRCPTOT, g. R1mm, h. R10mm; The solid blue and red lines indicate the spreads of CMIP5 and CMIP6 models, respectively; The dots indicate the MME medians, the horizontal black lines represent zero relative error; unit: %)

端降水指数模拟能力的平均分排第一(0.91), CMIP5多模式集合对8个极端降水指数模拟能力的平均分排第八(0.87), 在排名前五的单个模式中, CMIP6中的模式占4个。因此, 不论是多模式集合或是单模式表现上, CMIP6对中国极端降水气候态空间分布的模拟能力相较于CMIP5均有较大

提升。为了更合理地评价CMIP6相较于CMIP5空间分布的模拟能力是否有提升, 进一步计算了14个CMIP6和CMIP5同源模式多模式集合的TS评分(图11)。结果表明, 在中国范围, CMIP6同源模式多模式集合TS平均为0.91, 相较于CMIP5的0.68有较大提升。除了R10mm外, CMIP6同源

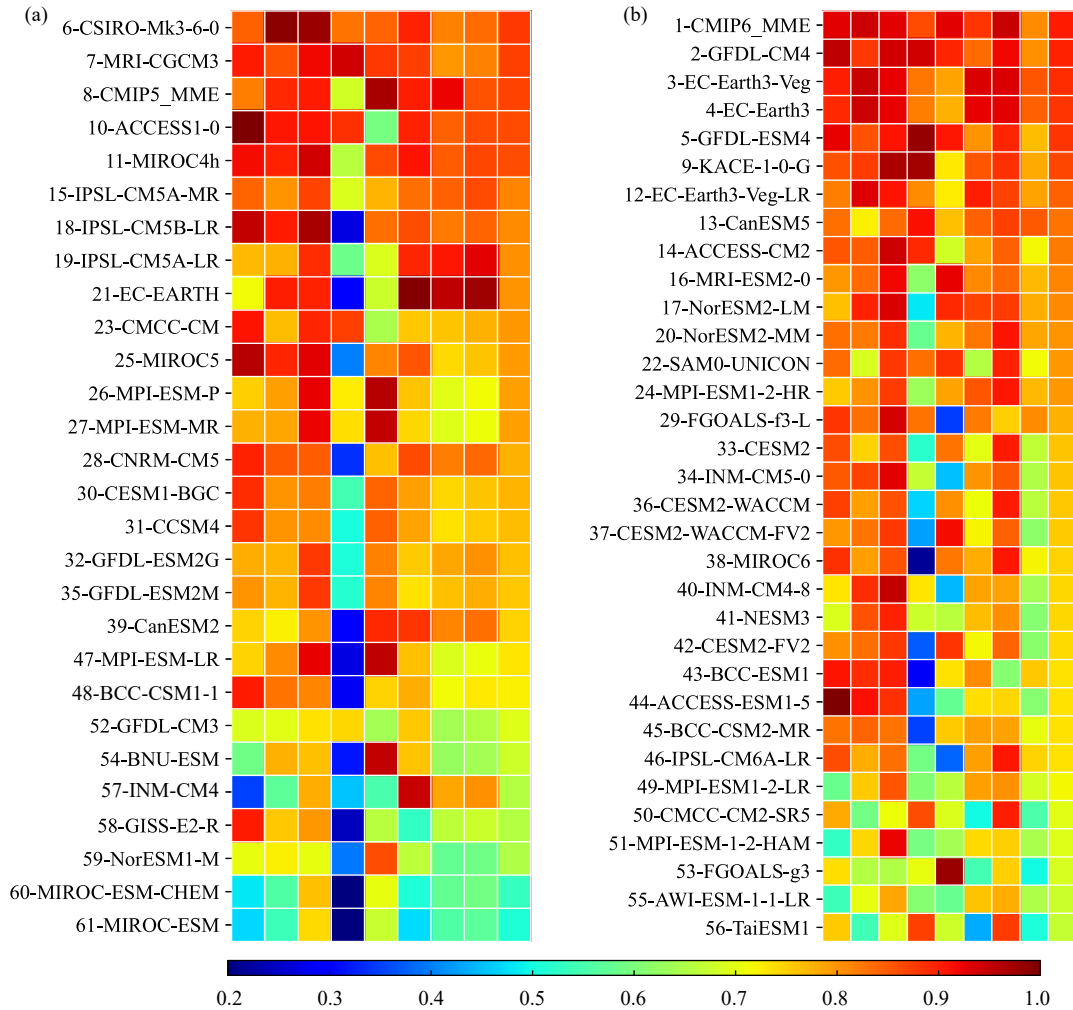


图 10 各模式 8 个极端降水指数气候平均态的 TS 评分 (a. CMIP5, b. CMIP6; 从左至右分别为 RX1day、RX5day、SDII、CDD、CWD、PRCPTOT、R1mm、R10mm 以及平均评分; 模式根据 TS 平均评分由高到低排列, 模式前的序号表示该模式在所有模式中的排名)

Fig. 10 Portrait diagrams for TS score of climatological mean of each extreme precipitation index (From left to right are RX1day, RX5day, SDII, CDD, CWD, PRCPTOT, R1mm, R10mm and average means; The models' names listed on the left follow their ranks; The number before the name is the rank of the model among all models)

模式多模式集合对其余 7 个极端降水指数的 TS 评分均高于 CMIP5 同源模式多模式集合, 且 CMIP6 同源模式多模式集合 R10mm 的 TS 评分仅比 CMIP5 低 0.01。在上一节的分析中, CMIP6 对 8 个极端降水指数在湿润区区域平均的气候态的模拟能力没有明显改进, 但是, 根据图 11 的结果, CMIP6 对湿润区气候态空间分布的模拟能力有明显提升, TS 平均分由 0.40 提高至 0.58。这说明尽管在湿润区区域平均的相对误差方面 CMIP6 相对于 CMIP5 的模拟能力没有明显提升, 但是 CMIP6 对湿润区极端降水空间分布的模拟能力提升显著。对于半湿润区, CMIP6 同源模式多模式集合和 CMIP5 同

源多模式集合两者 TS 平均分均为 0.66。干旱区, CMIP6 和 CMIP5 的表现并无差别 (CMIP6 同源模式多模式集合的 TS 平均分相较于 CMIP5 增大 0.01)。然而, 对于半干旱区, CMIP6 同源模式多模式集合的 TS 评分相较于 CMIP5 略有降低, 但是二者差别并不显著, 主要表现在 SDII、CDD、CWD 和 R1mm 的提高。此外, 对每一组同源模式在中国以及不同干、湿区 8 个极端降水指数的 TS 评分做了进一步分析 (图表文中未给出)。结果表明, 在 14 组同源模式中, 分别有 64.3% 和 71.4% 的 CMIP6 模式在干旱区和半湿润区的 TS 评分高于 CMIP5。湿润区, 有 78.6% 的 CMIP6 模式的 TS 评分高于

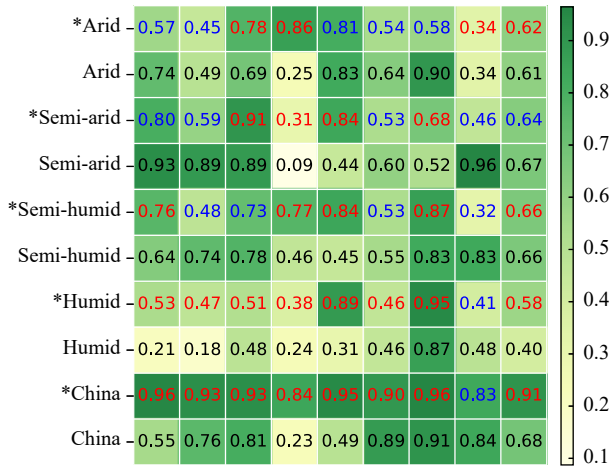


图 11 同源 CMIP6 多模式集合与 CMIP5 多模式集合在中国不同干、湿区 TS 评分的比较 (数值和方框颜色表示 TS 得分, 其中红色 (蓝色) 数值表示 CMIP6 的模拟结果相较于 CMIP5 有 (没有) 提升, 有 (无)\* 表示为 CMIP6 (CMIP5); 从左至右分别为 RX1day、RX5day、SDII、CDD、CWD、PRCPTOT、R1mm、R10mm 以及平均评分)

Fig. 11 Comparison of performances of the CMIP6 MME with their earlier versions in CMIP5 MME in different regions based on TS scores (The text digitals and background colors indicate the TS score, the red (blue) texts represent that the CMIP6 MME performs better(worse) than CMIP5 MME; \* indicates CMIP6 MME results and those without \* indicate the CMIP5 MME results; From left to right are RX1day, RX5day, SDII, CDD, CWD, PRCPTOT, R1mm, R10mm and average means)

CMIP5, 其中 BCC-CSM2-MR、GFDL-CM4、GFDL-ESM4 的 TS 评分较 BCC-CSM1-1、GFDL-CM3、GFDL-ESM2G 有较大提升, 分别提高 0.21、0.38 和 0.23。而在半干旱区, 仅有 50.0% 的 CMIP6 模式的 TS 评分高于 CMIP5 (图略)。综上所述, 对于 8 个极端降水指数在中国的空间分布特征, 同源模式 CMIP6 的模拟能力相较于 CMIP5 有很大提升, 对于不同区域而言, 湿润区的改进尤为明显。

## 5 结论和讨论

评估了 32 个 CMIP6 模式对中国历史极端降水的模拟能力, 并与 27 个 CMIP5 模式进行比较, 通过分析得到的主要结论如下:

(1) 在极端降水的气候态方面, CMIP6 多模式集合对 8 个极端降水指数模拟的相对误差相较 CMIP5 多模式集合平均降低 2.95 个百分点。其中年累计降水量小于 200 mm 的干旱区, CMIP6 多模

式集合的模拟能力改进很大, 8 个极端降水指数的平均相对误差为 37.35%, 比 CMIP5 多模式集合降低 12.15 个百分点, 但仍远高于湿润区 (平均相对误差 16.33%)。此外, 半干旱区和半湿润区, CMIP6 多模式集合对 8 个极端降水指数的平均相对误差为 37.81% 和 32.04%, 相较 CMIP5 改进较小, 平均相对误差分别降低 3.49 和 0.95 个百分点。因此, 相较湿润区, 对半湿润区、干旱区和半干旱区极端降水量的模拟方面 CMIP6 仍有较大改进空间。

(2) 在极端降水的相对变率方面, CMIP6 多模式集合相较于 CMIP5 多模式集合, 对 8 个极端降水指数中国区域平均的相对误差平均降低 5.45 个百分点。不同于气候态, 干旱、半干旱区 CMIP6 多模式集合对相对变率的模拟能力可以与湿润区达到同样的较好水平。但是, 对于不同的极端降水指数, 不同干、湿区 CMIP6 多模式集合相较于 CMIP5 改进的一致性不强, 如对 RX1day、RX5day、SDII, CMIP6 多模式集合模拟能力的提升主要在江南、江西南部等湿润区 (相对误差的绝对值相较于 CMIP5 多模式集合降低 5.94—11.11 个百分点), 而对于 CWD 和 R10mm, CMIP6 多模式集合的改进主要在干旱区 (相对误差的绝对值分别降低 23.19 和 34.09 个百分点)。

(3) CMIP6/CMIP5 的模式间比较, 32 个 CMIP6 模式的 TS 评分平均为 0.78, 27 个 CMIP5 模式的 TS 评分平均为 0.75, 排名前五的模式中 CMIP6 模式占 4 个, 且 CMIP6 多模式集合的 TS 评分高于任何单模式的 TS 评分, 表明 CMIP6 整体较 CMIP5 有很大提升。另外, 对 14 组同源模式的分析, CMIP6 同源模式多模式集合对中国的 TS 平均为 0.91, 相较于 CMIP5 的 0.68 有很大提升, 这进一步说明 CMIP6 的模拟能力提升显著。其中, CMIP6 对湿润区空间分布的模拟能力有很大的改进, 这对未来湿润区极端降水事件的预估有重要意义。

值得注意的是, 在区域平均方面, 干旱、半干旱区域 CMIP6 较 CMIP5 有较大改进, 湿润区无明显改进。而在由 TS 评分所反映的空间分布方面, 湿润、半湿润区, CMIP6 有明显的改进, 干旱、半干旱区改进不明显。即在中国不同干、湿区 CMIP6 对极端降水模拟能力均有改进, 但分别体现在对量级的模拟能力和空间分布的模拟能力上。

多模式集合方面, CMIP6 对干旱、半干旱区极



端降水的模拟能力有明显改进,这可能是由于中国西部下垫面情况复杂,且青藏高原边缘地形陡峭,前代的 CMIP 模式由于分辨率较低,造成干旱、半干旱区对降水模拟的偏差较大。而 CMIP6 更高的分辨率使得模式能够利用更接近真实地形的数据进行数值模拟,使其在区域平均的极端降水上较 CMIP5 有明显改进。由于模式性能的提升不仅只依赖分辨率的提高,故当模式分辨率的提高不足以满足整个模型的性能时,模式的性能不会随分辨率的提高而提升(Wang, et al, 2014),这可能是提高模式分辨率后 CMIP6 对干旱、半干旱区区域平均的极端降水的模拟能力有明显改进,而湿润地区提升不明显的原因。此外,如何减少模式间的不确定性也是提高对降水长期气候预估准确度的研究重点,需要进一步深入(Zhou, et al, 2020a)。

同源模式方面,由于模拟能力的提升受多种因素的影响,如更高的分辨率,更好的参数化方案,更完善的大气气溶胶强迫和地表过程表征,更合理的人类强迫等(Eyring, et al, 2016; Stouffer, et al, 2017; Srivastava, et al, 2020; Zhou, et al, 2020b),湿润区 CMIP6 的空间分布模拟能力明显提升,但干旱区、半干旱区的提升并不明显。相关模式的物理过程、动力学框架等还需进一步深入研究。

需要说明的是,本研究采用的是多模式集合中位数法,对不同模式给定不同权重的方法在多模式集合中是值得深入研究和讨论的。另外,文中对模式的模拟能力进行排序时采用的 TS 评分仅是众多模式评估方法之一,对于不同评估方法的结果可以在今后的研究中进一步讨论。

## 参考文献

- 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. 气候变化研究进展, 10(3): 217-225. Chen X C, Xu Y, Xu C H, et al. 2014. Assessment of precipitation simulations in China by CMIP5 Multi-models. Progressus Inquisitiones De Mutatione Climatis, 10(3): 217-225 (in Chinese)
- 高学杰. 2007. 中国地区极端事件预估研究. 气候变化研究进展, 3(3): 162-166. Gao X J. 2007. Researches in projection of extreme events in China. Adv Climate Change Res, 3(3): 162-166 (in Chinese)
- 胡琴, 姜大膀, 范广洲. 2014. CMIP5 全球气候模式对青藏高原地区气候模拟能力评估. 大气科学, 38(5): 924-938. Hu Q, Jiang D B, Fan G Z. 2014. Evaluation of CMIP5 models over the Qinghai-Tibetan Plateau. Chinese J Atmos Sci, 38(5): 924-938 (in Chinese)
- 姜大膀, 王会军, 郎咸梅. 2004. 全球变暖背景下东亚气候变化的最新情景预测. 地球物理学报, 47(4): 590-596. Jiang D B, Wang H J, Lang X M. 2004. East Asian climate change trend under global warming background. Chinese J Geophys, 47(4): 590-596 (in Chinese)
- 李东欢, 邹立维, 周天军. 2017. 全球 1.5°C 温升背景下中国极端事件变化的区域模式预估. 地球科学进展, 32(4): 446-457. Li D H, Zou L W, Zhou T J. 2017. Changes of extreme indices over China in response to 1.5°C global warming projected by a regional climate model. Adv Earth Sci, 32(4): 446-457 (in Chinese)
- 李双林, 韩乐琼, 卞洁. 2012. 基于 IPCC AR4 部分耦合模式结果的 21 世纪长江中下游强降雨预估. 暴雨灾害, 31(3): 193-200. Li S L, Han L Q, Bian J. 2012. Projecting heavy rainfall events in the middle and lower reach of the Yangtze River valley in the 21st century based on IPCC AR4 simulations. Torrential Rain Disaster, 31(3): 193-200 (in Chinese)
- 吴佳, 高学杰. 2013. 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, 56(4): 1102-1111. Wu J, Gao X J. 2013. A gridded daily observation dataset over China region and comparison with the other datasets. Chinese J Geophys, 56(4): 1102-1111 (in Chinese)
- 吴佳, 周波涛, 徐影. 2015. 中国平均降水和极端降水对气候变暖的响应: CMIP5 模式模拟评估和预估. 地球物理学报, 58(9): 3048-3060. Wu J, Zhou B T, Xu Y. 2015. Response of precipitation and its extremes over China to warming: CMIP5 simulation and projection. Chinese J Geophys, 58(9): 3048-3060 (in Chinese)
- 袁喆, 严登华, 杨志勇等. 2014. 1961—2010 年中国 400 mm 和 800 mm 等雨量线时空变化. 水科学进展, 25(4): 494-502. Yuan Z, Yan D H, Yang Z Y, et al. 2014. Research on temporal and spatial change of 400 mm and 800 mm rainfall contours of China in 1961-2000. Adv Water Sci, 25(4): 494-502 (in Chinese)
- 周波涛, 徐影, 韩振宇等. 2020. “一带一路”区域未来气候变化预估. 大气科学学报, 43(1): 255-264. Zhou B T, Xu Y, Han Z Y, et al. 2020. CMIP5 projected changes in mean and extreme climate in the Belt and Road region. Trans Atmos Sci, 43(1): 255-264 (in Chinese)
- 周天军, 邹立维, 陈晓龙. 2019. 第六次国际耦合模式比较计划(CMIP6)评述. 气候变化研究进展, 15(5): 445-456. Zhou T J, Zou L W, Chen X L. 2019. Commentary on the Coupled Model Intercomparison Project phase 6(CMIP6). Climate Change Res, 15(5): 445-456 (in Chinese)
- 周天军, 陈梓明, 邹立维等. 2020. 中国地球气候系统模式的发展及其模拟和预估. 气象学报, 78(3): 332-350. Zhou T J, Chen Z M, Zou L W, et al. 2020. Development of climate and earth system models in China: Past achievements and new CMIP6 results. Acta Meteor Sinica, 78(3): 332-350 (in Chinese)
- Bai A J, Zhai P M, Liu X D. 2007. Climatology and trends of wet spells in China. Theor Appl Climatol, 88(3): 139-148
- Berg P, Moseley C, Haerter J O. 2013. Strong increase in convective precipitation in response to higher temperatures. Nat Geosci, 6(3): 181-185
- Chen H P, Sun J Q, Chen X L, et al. 2012. CGCM projections of heavy rainfall events in China. Int J Climatol, 32(3): 441-450

- Chen H P, Sun J Q. 2015. Assessing model performance of climate extremes in China: An intercomparison between CMIP5 and CMIP3. *Climatic Change*, 129(1): 197-211
- Chen H P, Sun J, Lin W Q, et al. 2020. Comparison of CMIP6 and CMIP5 models in simulating climate extremes. *Sci Bull*, 65(17): 1415-1418
- Donat M G, Lowry A L, Alexander L V, et al. 2016. More extreme precipitation in the world's dry and wet regions. *Nat Climate Change*, 6(5): 508-513
- Easterling D R, Kunkel K E, Wehner M F, et al. 2016. Detection and attribution of climate extremes in the observed record. *Wea Climate Extrem*, 11: 17-27
- Eyring V, Bony S, Meehl G A, et al. 2016. Overview of the Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6) experimental design and organization. *Geosci Model Dev*, 9(5): 1937-1958
- Fan K, Xu Z Q, Tian B Q. 2014. Has the intensity of the interannual variability in summer rainfall over South China remarkably increased?. *Meteor Atmos Phys*, 124(1-2): 23-32
- Gao X J, Shi Y, Giorgi F. 2011. A high resolution simulation of climate change over China. *Sci China Earth Sci*, 54(3): 462-472
- Gemmer M, Jiang T, Su B D, et al. 2008. Seasonal precipitation changes in the wet season and their influence on flood/drought hazards in the Yangtze River Basin, China. *Quat Int*, 186(1): 12-21
- IPCC. 2013. Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press, 1535pp
- Jiang Z H, Li W, Xu J J, et al. 2015. Extreme Precipitation indices over China in CMIP5 models. Part I: Model evaluation. *J Climate*, 28(21): 8603-8619
- Karl T R, Nicholls N, Ghazi A. 1999. CLIVAR/GCOS/WMO workshop on indices and indicators for climate extremes workshop summary. *Climatic Change*, 42(1): 3-7
- Li W, Jiang Z H, Zhang X B, et al. 2018. Additional risk in extreme precipitation in China from 1.5°C to 2.0°C global warming levels. *Sci Bull*, 63(4): 228-234
- Liu B H, Xu M, Henderson M, et al. 2005. Observed trends of precipitation amount, frequency, and intensity in China, 1960-2000. *J Geophys Res*, 110(D8): D08103
- O'Neill B C, Tebaldi C, Van Vuuren D P, et al. 2016. The Scenario Model Intercomparison Project (ScenarioMIP) for CMIP6. *Geosci Model Dev*, 9(9): 3461-3482
- Pascoe C, Lawrence B N, Guilyardi E, et al. 2020. Documenting numerical experiments in support of the Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6). *Geosci Model Dev*, 13(5): 2149-2167
- Prein A F, Rasmussen R M, Ikeda K, et al. 2017. The future intensification of hourly precipitation extremes. *Nat Climate Change*, 7(1): 48-52
- Qian W H, Fu J L, Yan Z W. 2007. Decrease of light rain events in summer associated with a warming environment in China during 1961-2005. *Geophys Res Lett*, 34(11): L11705
- Srivastava A, Grotjahn R, Ullrich P A. 2020. Evaluation of historical CMIP6 model simulations of extreme precipitation over contiguous US regions. *Wea Climate Extrem*, 29: 100268
- Stouffer R J, Eyring V, Meehl G A, et al. 2017. CMIP5 scientific gaps and recommendations for CMIP6. *Bull Amer Meteor Soc*, 98(1): 95-105
- Sun J Q, Ao J. 2013. Changes in precipitation and extreme precipitation in a warming environment in China. *Chinese Sci Bull*, 58(12): 1395-1401
- Taylor K E. 2001. Summarizing multiple aspects of model performance in a single diagram. *J Geophys Res*, 106(D7): 7183-7192
- Wang C, Zhang L, Lee S K, et al. 2014. A global perspective on CMIP5 climate model biases. *Nature Climate Change*, 4: 201-205
- Wang H J, Sun J Q, Chen H P, et al. 2012. Extreme climate in China: Facts, simulation and projection. *Meteor Z*, 21(3): 279-304
- Wang Y, Yan Z W. 2009. Trends in seasonal precipitation over China during 1961-2007. *Atmos Oceanic Sci Lett*, 2(3): 165-171
- Wang Y Q, Zhou L. 2005. Observed trends in extreme precipitation events in China during 1961-2001 and the associated changes in large-scale circulation. *Geophys Res Lett*, 32(9): L09707
- Wu T W, Lu Y X, Fang Y J, et al. 2019. The Beijing Climate Center Climate System Model (BCC-CSM): The main progress from CMIP5 to CMIP6. *Geosci Model Dev*, 12(4): 1573-1600
- Xu Z X, Gong T L, Li J Y. 2008. Decadal trend of climate in the Tibetan Plateau: Regional temperature and precipitation. *Hydrol Processes*, 22(16): 3056-3065
- Yang K Q, Jiang D B. 2017. Interannual climate variability change during the Medieval Climate Anomaly and Little Ice Age in PMIP3 last millennium simulations. *Adv Atmos Sci*, 34(4): 497-508
- Yao C, Yang S, Qian W H, et al. 2008. Regional summer precipitation events in Asia and their changes in the past decades. *J Geophys Res*, 113(D17): D17107
- Zhai P M, Sun A J, Ren F M, et al. 1999. Changes of climate extremes in China. *Climatic Change*, 42(1): 203-218
- Zhang W X, Zhou T J. 2020. Increasing impacts from extreme precipitation on population over China with global warming. *Sci Bull*, 65(3): 243-252
- Zhou T J, Lu J W, Zhang W X, et al. 2020a. The sources of uncertainty in the projection of global land monsoon precipitation. *Geophys Res Lett*, 47(15): e2020GL088415
- Zhou T J, Zhang W X, Zhang L X, et al. 2020b. The dynamic and thermodynamic processes dominating the reduction of global land monsoon precipitation driven by anthropogenic aerosols emission. *Sci China Earth Sci*, 63(7): 919-933
- Zhu H H, Jiang Z H, Li J, et al. 2020. Does CMIP6 inspire more confidence in simulating climate extremes over China?. *Adv Atmos Sci*, 37(10): 1119-1132
- Zhu Y L, Wang H J, Zhou W, et al. 2011. Recent changes in the summer precipitation pattern in East China and the background circulation. *Climate Dyn*, 36(7): 1463-1473