暴雨灾害
Torrential Rain and Disasters
中国科技核心期刊
中国科技论文统计源期刊

CMIP6气候模式对湖北省极端气候指数模拟能力评估及未来预估

胡一阳 夏智宏 秦鹏程 谢丽凤 王苗

Evaluation and projection of extreme climate indices over Hubei province by CMIP6 climate models

HU Yiyang，XIA Zhihong，QIN Pengcheng，XIE Lifeng，WANG Miao

在线阅读 View online: https://doi.org/10.12406/byzh.2023-229

您可能感兴趣的其他文章 Articles you may be interested in

CMIP6 HighResMIP高分辨率气候模式对青藏高原降水模拟的评估
Evaluation of CMIP6 HighResMIP models in Simulating Precipitation over Tibetan Plateau
暴雨灾害. 2022, 41(2): 215-223 https://doi.org/10.3969/j.issn.1004-9045.2022.02.012

夏季江淮地区降水的气候变化研究进展
A review of studies on climate change of summer precipitation in the Jianghuai region
暴雨灾害. 2020, 39(4): 317-324 https://doi.org/10.3969/j.issn.1004-9045.2020.04.001

Box-Cox正态转换在长江子流域极端降水气候事件判定中的应用
Application of Box-Cox transformation in the determination of extreme precipitation climate events in the Yangtze sub-basins
暴雨灾害. 2022, 41(1): 94-100 https://doi.org/10.3969/j.issn.1004-9045.2022.01.011

未来RCPs情景下淮河流域夏玉米卡脖子旱风险预估
Simulative projection of future choking drought disaster risk of summer maize in the Huaihe River basin under RCPs scenarios
暴雨灾害. 2021, 40(2): 201-207 https://doi.org/10.3969/j.issn.1004-9045.2021.02.012

青藏高原东侧复杂地形区极端降水研究进展
A review of the studies on extreme precipitation in the complex terrain region on the eastern side of the Tibetan Plateau
暴雨灾害. 2024, 43(3): 255-265 https://doi.org/10.12406/byzh.2023-216

近10 a气候变化影响下四川山地暴雨事件的演变特征
Evolution characteristics of mountain rainstorms over Sichuan Province in the past ten years under the influence of climate change
暴雨灾害. 2020, 39(4): 335-343 https://doi.org/10.3969/j.issn.1004-9045.2020.04.003

关注微信公众号，获得更多资讯信息

胡一阳,夏智宏,秦鹏程,等.2025. CMIP6 气候模式对湖北省极端气候指数模拟能力评估及未来预估[J].暴雨灾害,44(6):858−867.
HU Yiyang, XIA Zhihong, QIN Pengcheng, et al. 2025. Evaluation and projection of extreme climate indices over Hubei province by CMIP6 climate models [J]. Torrential Rain and Disasters,44(6):858−867 (in Chinese). doi:10.12406/byzh.2023−229

CMIP6 气候模式对湖北省极端气候指数模拟能力评估及未来预估

胡一阳[1, 3], 夏智宏[2], 秦鹏程[2], 谢丽凤[1], 王苗[2]

(1. 湖北省咸宁市气象局, 咸宁 437100; 2. 湖北省气候中心, 武汉 430074; 3. 中国气象局武汉暴雨研究所 中国气象局流域强降水重点开放实验室/暴雨监测预警湖北省重点实验室, 武汉 430205)

摘　要: 基于第六次国际耦合模式比较计划 (the Coupled Model Intercomparison Project Phase 6, CMIP6) 的 14 个全球气候模式降尺度数据和 CN05.1 格点气象观测资料, 评估了 CMIP6 气候模式对湖北省 15 个极端气候指数的模拟能力, 并预估了在 SSP2-4.5 和 SSP5-8.5 两种共享社会经济路径情景下极端气候指数未来变化趋势。结果表明: (1) CMIP6 气候模式能一定程度上刻画极端气候指数的时空演变特征, 对极端气温的模拟结果优于极端降水, 多模式集合平均优于大部分模式或代表模式的平均水平。(2) CMIP6 气候模式可能低估极端低温指数和极端降水指数, 高估极端高温指数, 模拟误差随极端性的增强而增大。(3) 未来湖北省极端高温指数显著增大, 鄂中和鄂东增幅较其它区域更大; 极端低温指数显著减小, 鄂西和鄂东北减小程度更明显。(4) 未来湖北省极端降水强度与频次均有所增加, 鄂东和鄂南局部地区增幅更大; 干旱指数呈先减轻后加剧的趋势, 鄂西北地区 21 世纪远期 (2081—2100 年) 极端干旱加剧更明显。(5) 湖北省大部地区极端高温指数、极端降水指数和干旱指数在 21 世纪远期增幅达到最大, SSP5-8.5 情景较 SSP2-4.5 情景下高值区域扩大、增幅更大。

关键词: CMIP6; 极端气候指数; 气候变化; 未来预估
中图法分类号: P467　　**文献标志码**: A　　**DOI:** 10.12406/byzh.2023−229

Evaluation and projection of extreme climate indices over Hubei province by CMIP6 climate models

HU Yiyang[1, 3], XIA Zhihong[2], QIN Pengcheng[2], XIE Lifeng[1], WANG Miao[2]

(1. *Xianning Meteorological Bureau of Hubei Provence*, *Xianning* 437100; 2. *Hubei Provincial Climate Center*, *Wuhan* 430074; 3. *China Meteorological Administration Basin Heavy Rainfall Key Laboratory/Hubei Key Laboratory for Heavy Rain Monitoring and Warning Research*, *Institute of Heavy Rain*, *China Meteorological Administration*, *Wuhan* 430205)

Abstract: Based on the downscaled data of 14 global climate models from the Coupled Model Inter-comparison Project Phase 6 (CMIP6) and the gridded meteorological observation dataset of CN05.1, this study evaluated the simulation ability of CMIP6 models for 15 extreme climate indices over Hubei province, and projected the future trends under two Shared Socioeconomic Pathways scenarios (SSP2-4.5 and SSP5-8.5). The results are as follows. (1) All of the models can reasonably reproduce the spatiotemporal evolution of the extreme climate indices, and the performance in simulating extreme temperature indices is better than extreme precipitation indices. The ensemble mean of multiple models is better than most of the models, and it can represent the average simulation ability of the models. (2) Models may overestimate extreme high-temperature indices, and underestimate extreme low-temperature indices and extreme precipitation indices, and the simulation bias will increase with the extreme of the indices intensifying. (3) The extreme high-temperature indices in Hubei province will increase significantly in the future, and the growth rate in central and Eastern Hubei will be higher than that in other regions. The extreme low-temperature indices will decrease considerably, especially in Western and northeastern Hubei. (4) Both the frequency and intensity of heavy precipitation indices are projected to increase, especially in Eastern and southern Hubei. However, the drought indices

收稿日期: 2023−10−31; **定稿日期**: 2024−03−05
资助项目: 中国气象局创新发展专项 (CXFZ2023J51); 湖北省气象局科技发展基金项目 (2023Q18)
第一作者: 胡一阳, 主要从事气候变化评估研究。E-mail: hsimoy@foxmail.com
通信作者: 夏智宏, 主要从事气候变化与气象灾害监测评估研究。E-mail: xiazhihongwrcc@hotmail.com
© Editorial Office of *Torrential Rain and Disasters*. OA under CC BY−NC−ND 4.0

show a trend of initial decrease followed by intensification, with notably extreme drought indices in Northwest Hubei during the late 21st century (2081-2100). (5) In most regions, the -growth rate of extreme high-temperature indices, extreme precipitation indices, and drought indices will reach their maximum in the late 21st century. Under the SSP5-8.5 scenario, both the area of high value and the magnitude of increase are greater than those under the SSP2-4.5 scenario.

Key words: CMIP6; extreme climate indices; climate change; shared socioeconomic pathways; future projection

引　言

极端气候事件是当今社会各界关注的热点问题, 作为世界气候研究计划 (World Climate Research Programme, WCRP) 七大重大科学挑战之一, 也一直是联合国政府间气候变化专门委员会 (Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC) 评估报告的重点内容 (周天军等, 2019a; 王颖等, 2025)。在全球变暖背景下, 地球水文循环不断加剧 (Qiang et al., 2013), 暴雨、干旱、高温等极端气候事件的频次与强度可能进一步加强 (任正果等, 2014; Li et al., 2018; 孙可可和吴小飞, 2024), 由此引发的洪涝、干旱、热浪等自然灾害将对社会生产、自然生态等造成更加严重的影响。因此, 科学预估未来气候变化趋势, 尤其是极端气候事件的频率和强度变化, 对有效应对气候变化的不利影响和潜在风险, 开展适应气候变化行动具有重要的指导意义。

全球气候模式是研究气候变化的最主要工具, 在新一轮国际耦合模式比较计划 (the Coupled Model Intercomparison Project Phase 6, CMIP6) 下, 全球气候模式也取得了长足的发展, 支撑了 IPCC 评估报告的编写和全球气候变化谈判活动 (周天军等, 2019b)。CMIP6 气候模式数据在中国地区也已得到广泛应用, 如胡一阳等 (2021) 评估了 CMIP6 不同分辨率全球气候模式对中国平均降水的模拟能力, 指出高分辨模式对中国月、年平均降水量及其空间分布特征的模拟能力有一定改进; 王予等 (2021) 利用 CMIP6 气候模式对中国地区极端降水模拟能力进行了评估, 发现 CMIP6 气候模式对中国极端降水气候态空间分布的模拟能力相较于 CMIP5 有较大提升; 也有学者利用多套观测资料对 CMIP6 气候模式模拟的中国区域极端降水进行评估及预估 (韩振宇等, 2021; 肖雨佳等, 2022), 认为 CMIP6 气候模式能基本再现研究区极端降水、气温的多年平均分布特征。在区域气候变化研究方面, 相关学者利用 CMIP6 气候模式对长江流域 (吴健等, 2023)、黄河上游地区 (赵梦霞等, 2021)、华北平原 (王慧等, 2021)、西南地区 (黄子立等, 2021) 等开展了系列研究, 结果显示总体上中国不同区域未来均表现为极端暖事件增加、极端冷事件减少, 降水增加。目前国内主要评估及预估研究多集中于大尺度的 CMIP6 气候模式应用, 少有精细化降尺度的研究成果, 对极端气候事件变化的局地差异揭示不够, 关于 CMIP6 气候模式在湖北省的应用同样较少。针对湖北省的研究多使用 CMIP5 资料, 如华中区域气候变化评估报告 (第二次) 主要使用 CMIP5 模式中 RegCM4.4 区域气候模式资料 (刘敏等, 2021), 在 CMIP6 气候模式资料应用方面仅开展了平均态气候模拟及预估 (王苗等, 2021)。而近年来随着气候变化加剧, 湖北省极端气候事件频发, 极端性明显增强, 如 2016、2020 年汛期暴雨洪涝以及 2022 年夏季极端高温干旱强度均突破 1961 年以来历史极值 (夏智宏等, 2023), 给人民生命财产和自然生态系统造成严重损失。因此, 当前开展 CMIP6 气候模式对湖北省极端气候事件的模拟能力评估和未来趋势预估非常必要。

本文利用 CMIP6 中 14 个气候模式的逐日降尺度数据, 评估 CMIP6 气候模式对湖北省极端气候指数时空特征的模拟能力, 并结合 IPCC 第六次评估报告, 在多种未来情景下对极端气候指数开展预估, 以期为 CMIP6 气候模式在湖北地区的应用以及应对气候变化挑战提供参考依据。

1 资料与方法

1.1 资料说明

本文使用基于中国 2 416 站观测资料、采用距平逼近法插值构建的 0.25°×0.25°空间分辨率的格点气象观测资料 CN05.1 (Xu et al., 2009; 吴佳等, 2013) 评估模式模拟能力, 资料来源于国家气候中心。最新收集的 CN05.1 观测资料时间段为 1961—2018 年, 包括逐日平均气温、最高气温、最低气温、降水量等要素。

模式数据来自 CMIP6 中 14 个气候模式 (表 1) 输出的平均气温、最高气温、最低气温和降水量数据, 包含历史 (1961—2014 年) 模拟实验数据以及 SSP2-4.5、SSP5-8.5 两种综合考虑了共享社会经济路径 (Shared Socioeconomic Pathways, SSPs) 和典型浓度路径 (Representative Concentration Pathways, RCPs) 的未来 (2015—2100 年) 情景预估数据。SSP2-4.5 情景代表了中等社会脆弱性与中等辐射强迫的组合, 该情景设定社会维持近几十年现状发展趋势, 实现部分发展目标, 逐步减少对化石燃料的依赖, 与中国未来经济发展趋势较为接近, 符合政府对未来经济

发展、应对气候变化的政策措施; SSP5-8.5 情景是一种极端情景, 二氧化碳排放水平到 2050 年约翻一番, 代表了以化石燃料驱动的发展之路 (张丽霞等, 2019)。

1.2 研究方法

1.2.1 统计降尺度处理方法

表 1 CMIP6 14 个气候模式所属国家及分辨率

Table 1 Basic information of the 14 CMIP6 climate models

序号	模式名称	所属国家	分辨率/(经度格点×纬度格点)
1	ACCESS-CM2	澳大利亚	192×144
2	ACCESS-ESM1-5	澳大利亚	192×144
3	BCC-CSM2-MR	中国	320×160
4	CCCma-CanESM5	加拿大	128×64
5	CNRM-CM6-1	法国	256×128
6	CNRM-ESM2-1	法国	256×128
7	GFDL-CM4	美国	288×180
8	HadGEM3-GC31-LL	英国	192×144
9	INM-CM4-8	俄罗斯	180×120
10	INM-CM5-0	俄罗斯	180×120
11	IPSL-CM6A-LR	法国	144×143
12	MIROC6	日本	256×128
13	MPI-ESM1-2-HR	德国	384×192
14	MRI-ESM2-0	日本	320×160

以格点观测资料 CN05.1 为基准值, 采用空间分解法 (Spatial Disaggregation, SD) (Daniel et al., 1994) 将 CMIP6 气候模式数据降尺度至同等分辨率 (0.25°×0.25°), 该方法假定当前粗分辨率数据中所反映的地形和气候特征在降尺度过程中保持不变。采用等距离累积分布函数匹配法 (Equidistant Cumulative Distribution Functions, EDCDF) (Li et al., 2018) 对降尺度后的模式数据进行偏差纠正, 首先建立实测、模拟、预估数据的累积概率分布函数 (Cumulative Distribution Functions, CDF), 计算未来某一值对应的累积概率, 并假定在此累积概率下对应的实测和模拟值的差值在未来时段保持不变, 最终通过这一差值达到对未来预测值的校正。

1.2.2 极端气候指数及其定义

本文分析的 15 个极端气候指数包括气候变化检测和指数专家组 (Expert Team on Climate Change Detection and Indices, ETCCDI) 定义的 14 个代表性极端气候指数 (指数具体定义见 https://www.wcrp-climate.org/etccdi) 以及表征干旱的标准化降水蒸散发指数 (Standardized Precipitation Evapotranspiration Index, SPEI) (Wang et al., 2014) (表 2), 上述指数覆盖了极端高温指数、极端低温指数、极端降水指数和干旱指数等。其中 SPEI 指数综合考虑了降水和地表潜在蒸散发对干旱的影响, 较适用于气候变暖背景下的干旱监测预评估。

表 2 15 个极端气候指数的定义

Table 2 Definition of extreme climate indices

序号	指数名称	英文缩写	指数定义	指数单位	指数类型
1	最高气温≥35 ℃日数	Tmaxdays35	年内日最高气温≥35 ℃的日数	d	极端高温指数
2	最高气温≥37 ℃日数	Tmaxdays37	年内日最高气温≥37 ℃的日数	d	极端高温指数
3	最低气温≥26 ℃日数	Tmindays26	年内日最低气温≥26 ℃的日数	d	极端高温指数
4	暖昼日数	TX90p	年内日最高气温>第90%分位数的日数	d	极端高温指数
5	夏日指数	SU	年内日最高气温>25 ℃的日数	d	极端高温指数
6	年最高气温最大值	TXx	年内日最高气温的最大值	℃	极端高温指数
7	霜冻日数	FD	日最低气温<0 ℃的日数	d	极端低温指数
8	年最低气温最小值	TNn	年内日最低气温的最小值	℃	极端低温指数
9	大雨日数	R10	年日降水量≥10 mm的总日数	d	极端降水指数
10	极端大雨日数	R20	年日降水量≥20 mm的总日数	d	极端降水指数
11	暴雨日数	R50	年日降水量≥50 mm的总日数	d	极端降水指数
12	最大连续5 d降水量	RX5d	年最大连续5 d的降水量	mm	极端降水指数
13	强降水总量	R95p	日降水量>95%分位数的年累积降水量	mm	极端降水指数
14	日降水强度	SDII	降水量≥1 mm的总量与日数之比	$mm \cdot d^{-1}$	极端降水指数
15	标准化降水蒸散发指数	SPEI	SPEI≤−1.0表示中度干旱, SPEI≤−2.0表示特旱	–	干旱指数

注: “-”表示无。

1.2.3 模拟效果检验评估方法

在评估 CMIP6 气候模式的模拟效果时, 选择 1961—2014 年作为历史时段, 分别计算 14 个气候模式及模式集合平均 (Multi-Model Ensemble, MME) 模拟结果与 CN05.1 的绝对偏差或相对偏差, 进一步使用 Taylor 图 (Taylor, 2001) 定量评估不同模式的模拟结果与观测结果的空间差异, 并通过比较线性趋势来检验极端气候指数趋势特征的模拟效果。Taylor 图常用于评价模型的精度, 其中横纵坐标代表标准差比值, 弧形坐标代表空间相关系数, 蓝色弧线代表中心化均方根误差, 模式结果离观测点越近时, 中心化均方根误差越小, 代表该模式模拟效果越好。

1.2.4 气候变化趋势预估方法

使用 CMIP6 中 14 个气候模式降尺度日数据在 2 种未来预估情景下对湖北省 15 个极端气候指数进行模拟, 使用线性趋势及 Mann-Kendall 趋势检验 (周雪英等, 2013) 来描述极端气候指数未来演变趋势及可信度。参考 IPCC AR6 报告, 选取 1995—2014 年作为气候基准期 (IPCC, 2022), 进一步计算 MME 模拟的 21 世纪近期 (2021—2040 年)、中期 (2041—2060 年)、远期 (2081—2100 年) 与基准期极端气候指数的差值来定量表征未来的变化幅度, 并使用重抽样 (Bootstrap) 后的均值检验以及同号率 (模式相对于基准期偏差与 MME 相对于基准期偏差正负符号一致的模式占比超过 50%) 来检验均值变化的显著性。

2 CMIP6 气候模式对湖北省极端气温和降水的模拟效果评估

2.1 极端气温

MME 模拟的 1961—2014 年湖北省极端气温指数年平均值与观测的偏差结果 (表 3) 显示, 年最高气温 (TXx) 的模拟值较观测值略偏高 0.31 ℃, 反映高温日数的极端气候指数除暖昼日数 (TX90p) 模拟值较观测值略偏低外, 其余大部指数 (最高气温≥35℃日数 Tmaxdays35、最高气温≥37 ℃ 日数 Tmaxdays37、夏日指数 SU) 的模拟结果较观测值的结果偏大 0.01~1.24 d。反映日最低气温变化的极端气候指数, 如年最低气温 (TNn) 和最低气温≥26 ℃ 日数 (Tmindays26) 的模拟值较观测值分别偏低 0.10℃ 和偏少 0.23 d; 而霜冻日数 (FD) 的模拟值较观测值偏高 2.61 d, 且 14 个气候模式中有 11 个气候模式为负偏差。总体上, CMIP6 气候模式降尺度数据对更强的极端高温指数存在高估, 对极端低温指数存在低估, 极端性阈值较高的指标模拟误差更大。

表 3 CN05.1 观测与 MME 模拟的 1961—2014 年湖北省极端气温指数年平均值及其偏差

Table 3 Annual average of extreme temperature indices from CN05.1 observations and MME simulations over Hubei province during 1961-2014 and their bias

参量	数据源	Tmaxdays35/d	Tmaxdays37/d	Tmindays26/d	TX90p/d	FD/d	SU/d	TXx/℃	TNn/℃
平均值	MME	8.24	1.93	8.62	10.29	43.72	128.73	36.14	−6.52
	CN05.1	8.23	1.26	8.84	10.30	46.33	127.49	35.83	−6.42
模拟偏差	/	0.01	0.67	−0.23	−0.01	2.61	1.24	0.31	−0.10

对比不同模式的模拟偏差 (表略) 可知, 各模式模拟结果相对误差离散度较高, 其中 GFDL-CM4、MIRCO6 总体模拟能力最好, 两个模式对表 3 中温度指标的模拟偏差范围分别为−0.30~−0.14℃、0.18~0.24℃, 对时间指标的模拟偏差范围分别为−0.96~0.94 d、−1.40~0.74 d; 其它模式的高相对偏差主要集中在更强的极端高温指数上, 模式对 Tmaxdays37 模拟能力普遍较差, 其中 IPSL-CM6A-LR 模拟能力最差, BCC-CSM2-MR 对 FD 的模拟能力最差, 表明部分模式对较强的极端低温指数模拟能力较差。

图 1 给出观测与 CMIP6 气候模式模拟的 1961—2014 年湖北省多年平均极端高温指数、极端低温指数 Taylor 图。从中可见, 极端高温指数 (图 1a) 中, Tmaxdays37 各模式空间相关系数 (0.90~0.99) 与方差比率 (1.03~1.50) 离散度要大于 Tmaxdays35 与 Tmindays26, 表明模式对于更强的极端高温指数空间分布和变化幅度模拟存在较大分歧; SU、TXx 空间相关系数落区均在 0.98 以上, 且方差比率均接近 1, 模拟效果较好, TX90p 模拟值与观测值相差最大。极端低温指数 (图 1b) 中, TNn、FD 的空间相关系数落区大部在 0.95 以上, 方差比率均接近 1, 模拟效果较好。总体看, 除 TX90p 指数的空间相关性 (−0.28~0.27) 较差外, 其它指数模拟值与观测值的空间相关系数均在 0.9 以上, 表明模式结果和观测的空间分布相似程度较高; 模式集合平均距观测点的距离小于大多数单个模式, 中心化均方根误差更小, 表明多模式集合平均结果优于大部分单个模式或代表模式平均水平。

对比 1961—2014 年极端气温指数 MME 模拟值与观测值每 10 a 的变化趋势 (表 4) 可知, 模拟的极

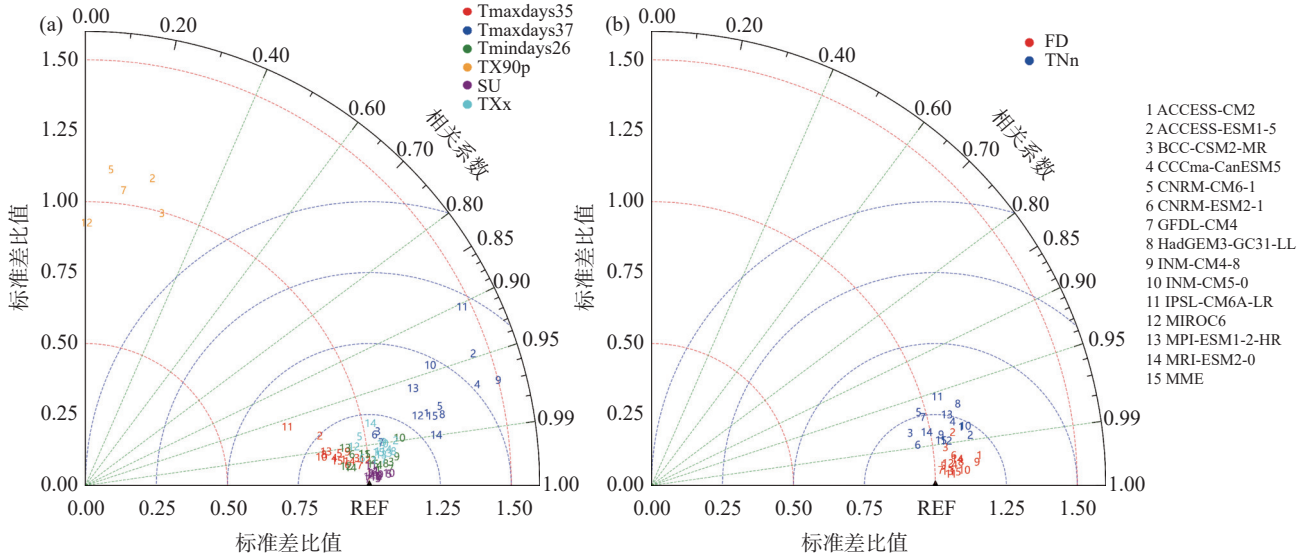


图 1 CN05.1 观测与 CMIP6 气候模式模拟的 1961—2014 年湖北省多年平均极端高温指数 (a)、极端低温指数 (b) Taylor 图 (REF 和黑色三角乡表示观测点, 下同)

Fig. 1 Taylor diagram for the CN05.1 observational and CMIP6 climate models simulated annual (a) extreme high-temperature indices and (b) extreme low-temperature indices during 1961-2014 over Hubei province (REF and black triangle symbols represent observation points, hereafter same)

端气温指数变化趋势与观测基本一致, 除霜冻日数呈一致性减少趋势外, 其余指标均呈增加趋势, 但在大部分极端高温指数上, 模式高估了其变化趋势, 而在极端低温指数上, 低估了其变化趋势。

表 4 CN05.1 观测与 MME 模拟的湖北省 1961—2014 年极端气温指数每 10 a 变化趋势

Table 4 Decadal trends of extreme temperature indices from CN05.1 observations and MME simulations over Hubei province during 1961-2014

数据源	Tmaxdays35/d	Tmaxdays37/d	Tmindays26/d	TX90p/d	FD/d	SU/d	TXx/℃	TNn/℃
MME	0.68*	0.23*	1.58*	0.73*	−1.08*	1.69*	0.14*	0.20*
CN05.1	0.21	0.04	1.14*	1.06*	−3.85*	2.71*	0.06	0.50*

注: *表示通过0.01显著性水平检验, 下同。

2.2 极端降水

MME 模拟的 1961—2014 年湖北省极端降水指数年平均值与观测值的偏差结果 (表 5) 显示, 反映强降水频次的指数除大雨日数 (R10) 偏多 0.55 d 外, 极端大雨日数 (R20)、暴雨日数 (R50) 分别偏少 3.29、0.91 d, 反映强降水极端性、贡献量的指数, 如最大连续 5 d 降水量 (RX5d)、强降水总量 (R95p) 分别偏少 2.84 d、18.61 mm, 反映强降水强度的指数, 如日降水强度 (SDII) 偏少 1.36 mm·d^{-1}。总体上, 降尺度后的 CMIP6 气候模式模拟的大部分指数接近观测, 但对频次、强度、极端性、贡献率均存在一定程度的低估, 同极端气温指数相似, 极端指数阈值更高的指数其模拟误差更大。

对比不同模式的模拟偏差 (表略) 可知, ACCESS-CM2 模式总体模拟能力最好, 各指标相对偏差范围为−6.61%~7.15%, IPSL-CM6A-LR、INM-CM4-8 总体模拟能力最差, 且对所有极端降水指数的模拟均为负偏差, 模式的高相对偏差主要集中于对 R50 的模拟, 其中 MRI-ESM2-0 模拟能力最差。

图 2 给出观测与 CMIP6 模式模拟的 1961—2014 年湖北省多年平均极端降水指数 Taylor 图, 在表征极端降水频次的指数 (图 2a) 中, R10 表现为系统性

表 5 同表 3, 但为极端降水指数

Table 5 Same as Table 3, but for extreme precipitation indices

参量	数据源	R10/d	R20/d	R50/d	RX5d/mm	R95p/mm	SDII/(mm·d^{-1})
平均值	MME	36.10	12.04	1.25	128.06	283.27	8.08
	CN05.1	35.55	15.33	2.16	130.90	301.88	9.44
模拟偏差	/	0.55	−3.29	−0.91	−2.84	−18.61	−1.36

高估, R50 表现为系统性低估, R20 则分布均匀, 说明从各量级降水日数上, 模式对于量级越小的日数倾向于高估, 对量级越大的日数倾向于低估; 离散度上, 各模式模拟的 R50 方差比率差异较大, 表明模式对于极端强降水频次模拟存在更大分歧。在表征极端降水强度的指数 (图 2b) 中, 模式对 SDII 模拟存在一定分歧, 但 MME 模拟效果较好, 对于 RX5d、R95p 指数, 模式结果存在系统性偏小, 表明模式对极端强降水强度的模拟存在低估。可见模式对于极端强降水的模拟存在低估的倾向。

总体来看, R50 指数空间相关系数落区在 0.6~0.9 之间, RX5d 落区在 0.9 附近, 其它极端降水指数大部在 0.9 以上, 其中 R20、R95p、SDII 空间相关系数落区在 0.9~0.95 之间, R10 空间相关系数落区大部位于 0.95 以上, 表明模式结果和观测值的空间分布相似程度总体较高; MME 距观测点的距离小于大多数模式, 中心化均方根误差相对较小, 表明 MME 结果优于大部分单个模式或代表模式平均水平。

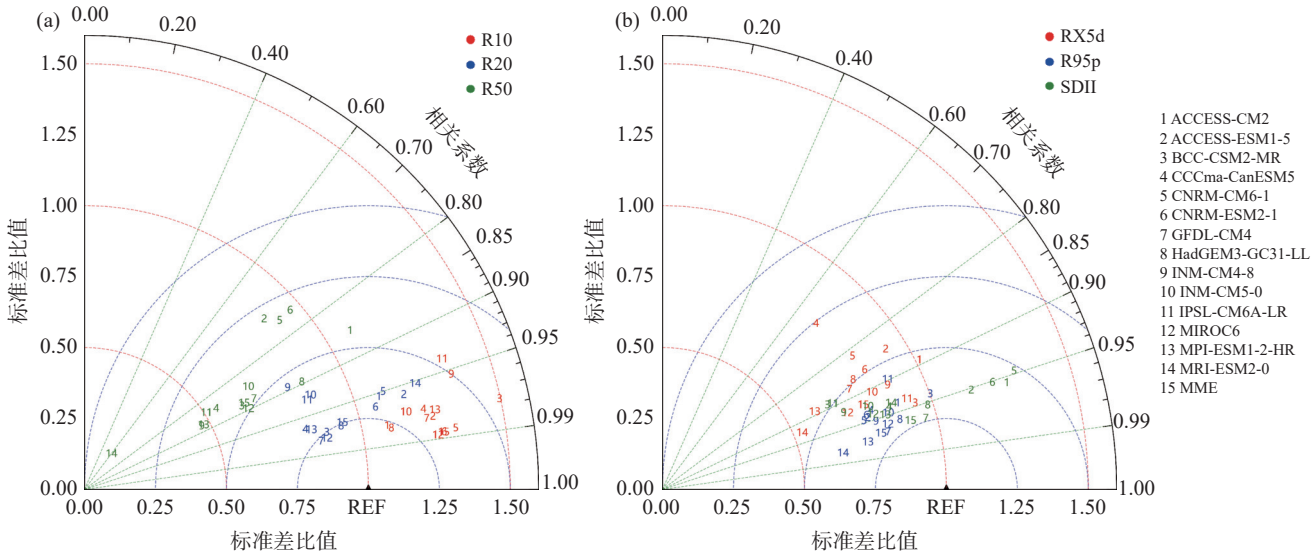


图 2 同图 1, 但为极端降水频次 (a) 和强度 (b) 指数

Fig. 2 Same as Fig. 1, but for the (a) frequency and (b) intensity of extreme precipitation indices

对比 1961—2014 年极端降水指数 MME 模拟值与观测值每 10 a 的变化趋势 (表 6) 可知, 各极端降水指数模拟值和观测值的变化趋势均呈微弱变化趋势 (未通过 0.01 显著性水平检验), 说明 CMIP6 气候模式对降水变化趋势的模拟基本合理, 对比各个模式的模拟结果, ACCESS-CM2、BCC-CSM2-MR 模拟的趋势变化幅度更接近观测 (表略)。

3 湖北省未来极端气候指数预估

3.1 极端气温指数

根据模式对历史时段模拟能力的评估, MME 模拟能力较为稳定。由各模式 (表略) 及 MME (表 7) 模拟的湖北省极端气温指数在 2021—2100 年的区域平均变化趋势可见, 极端低温指数, 如 FD 在 SSP2-4.5 和 SSP5-8.5 情景下每 10 a 分别减少 1.96 d、2.85 d, TNn 每 10 a 分别增加 0.32 ℃、0.62 ℃; 极端高温指数为增加趋势, Tmaxdays37、Tmaxdays35、Tmindays26、TX90p、SU 在 SSP2-4.5 和 SSP5-8.5 情景下, 每 10 a 分别增加 2.14~3.97 d、6.24~9.08 d, TXx 每 10 a 分别增加 0.34℃、0.74℃。总体上, 未来百年湖北省极端低温指数呈显著减少趋势, 极端高温指数呈显著增加趋势, 且在 SSP5-8.5 情景下变化速率普遍高于 SSP2-4.5 情景下。

图 3 给出 SSP2-4.5 和 SSP5-8.5 情景下 MME 模拟的未来不同时期湖北省 Tmaxdays35 距平场, 可见 Tmaxdays35 在不同区域和未来不同时期变化幅度存在一定差异。在 SSP2-4.5 情景下, 21 世纪近期 (图 3a_1), Tmaxdays35 在湖北省范围呈增加趋势, 其中鄂中大部、鄂东局部增加幅度更大, 21 世纪中期 (图 3a_2) 至

表 6 同表 4, 但为极端降水指数

Table 6 Same as Table 4, but for extreme precipitation indices

数据源	R10/d	R20/d	R50/d	RX5d/mm	R95p/mm	SDII/mm·d^{-1}
MME	−0.35	−0.09	0.02	0.75	−0.18	0
CN05.1	−0.28	0.04	0.03	−0.97	3.41	−0.03

表 7 MME 模拟的不同情景下 2021—2100 年湖北省极端气温指数每 10 a 的变化趋势

Table 7 Decadal trends of extreme temperature indices simulated by MME over Hubei province during 2021—2100 under different scenarios

情景	Tmaxdays35/d	Tmaxdays37/d	Tmindays26/d	TX90p/d	FD/d	SU/d	TXx/℃	TNn/℃
SSP2-4.5	3.62*	2.14*	3.61*	3.04*	−1.96*	3.97*	0.34*	0.32*
SSP5-8.5	9.08*	6.56*	8.34*	6.24*	−2.85*	7.50*	0.74*	0.62*

远期 (图 $3a_3$), 增幅变大, 增幅大值区由江汉平原及以北地区、鄂东局部扩大至整个鄂中、鄂东地区; SSP5-8.5 情景下, Tmaxdays35 各时期均呈增加趋势, 相较于 SSP2-4.5 情景下, 在 21 世纪近期 (图 $3b_1$), 增幅大值区范围更大, 21 世纪中期 (图 $3b_2$), 增幅大值区已经扩大至整个鄂中、鄂东地区, 21 世纪远期 (图 $3b_3$) 指数增幅明显大于其他时期。在 SSP2-4.5 情景下, 21 世纪近期, 其它极端气温指数, 如 Tmaxdays37 在湖北省增幅较均匀, Tmindays26 在鄂中、鄂东增幅更大 (图略), 21 世纪中期与远期, Tmaxdays37、Tmindays26 在鄂中、鄂东的增幅大于其它地区, 并逐渐西扩 (图略)。SSP5-8.5 情景下, Tmaxdays37、Tmindays26 变化趋势空间分布与 SSP2-4.5 情景下相似, 强度变强 (图略)。可见反映极端高温频次的指数在未来各个时期均显著增加, 增幅较大的范围集中在中东部且不断西扩, 在高排放情景下, 各极端气温指数增幅更大。反映 90% 分位数极端高温的 TX90p 指数在湖北省的变化趋势总体一致, TXx 和 SU 则表现出西部高海拔地区增幅大于中东部平原地区的特点 (图略), 在未来气候条件下, 湖北省西部地区夏日将明显延长。TNn 在全省的变化趋势基本一致, 但 FD 西部和北部地区减少幅度更明显 (图略)。

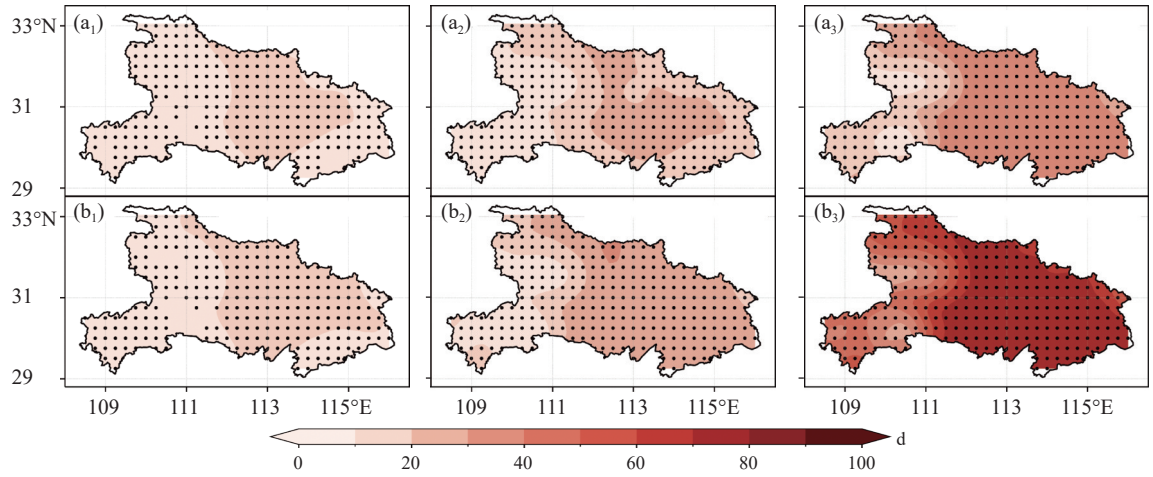


图 3 SSP2-4.5 (a_1, a_2, a_3) 和 SSP5-8.5 (b_1, b_2, b_3) 情景下 MME 模拟的 21 世纪近期 (a_1, b_1)、中期 (a_2, b_2)、远期 (a_3, b_3) 相对于基准期的湖北省 Tmaxdays35 距平场 (打点处表示通过 0.01 显著性水平检验)

Fig. 3 Anomalies of Tmaxdays35 simulated by MME in (a_1, b_1) near, (a_2, b_2) mid- and (a_3, b_3) far future period of the 21st century under the scenarios SSP2-4.5 (a_1, a_2, a_3) and SSP5-8.5 (b_1, b_2, b_3) relative to the baseline period over Hubei province (Dotted area indicates statistical significance at the 99% confidence level)

3.2 极端降水指数

各模式 (表略) 及 MME (表 8) 模拟的湖北省极端降水指数在 2021—2100 年的区域平均变化趋势表明, 在 SSP2-4.5 和 SSP5-8.5 情景下, 表征强降水的 R10、R20、R50、RX5d、R95p、SDII 等极端降水指数均呈显著增加趋势, 表明未来气候变化情景下湖北省极端降水总体趋多、趋强; SSP5-8.5 情景下各极端降水指数增加速率均大于 SSP2-4.5 情景, 表明在高排放情景下强降水的极端性增加趋势更显著。

图 4 给出 SSP2-4.5 和 SSP5-8.5 情景下未来不同时期 MME 模拟的湖北省 R95p 的距平场, 可见在空间分布上, R95p 在不同区域和未来不同时期变化幅度存在一定差异, 在湖北省的变化呈一致性增加趋势。在 SSP2-4.5 情景下, 21 世纪近期 (图 $4a_1$), R95p 增幅较大地区主要位于鄂南, 21 世纪中期 (图 $4a_2$) 至远期 (图 $4a_3$), 转为由鄂西北向鄂东南递增的趋势, 增幅变大; 相较于 SSP2-4.5 情景, SSP5-8.5 情景下, 21 世纪近期 (图 $4b_1$), R95p 鄂东南增幅更加明显, 21 世纪中期 (图 $4b_2$), 高增幅区域范围明显扩大, 21 世纪远期 (图 $4b_3$), 增幅明显大于其它时期, 增幅最大的区域主要位于鄂东和鄂南大部地区。在 SSP2-4.5 情景下, 21 世纪近期, 各极端降水指数的增幅均不大, 21 世纪中期与远期, 表征强降水频次的 R10、R20、R50 和表征强降水强度的 SDII 均呈鄂西

表 8 同表 7, 但为极端降水指数

Table 8 Same as Table 7, but for extreme precipitation indices

情景	R10/d	R20/d	R50/d	RX5d/mm	R95p/mm	SDII/mm·d^{-1}
SSP2-4.5	0.60*	0.30*	0.06*	1.69*	9.70*	0.09*
SSP5-8.5	0.91*	0.53*	0.16*	4.30*	21.76*	0.18*

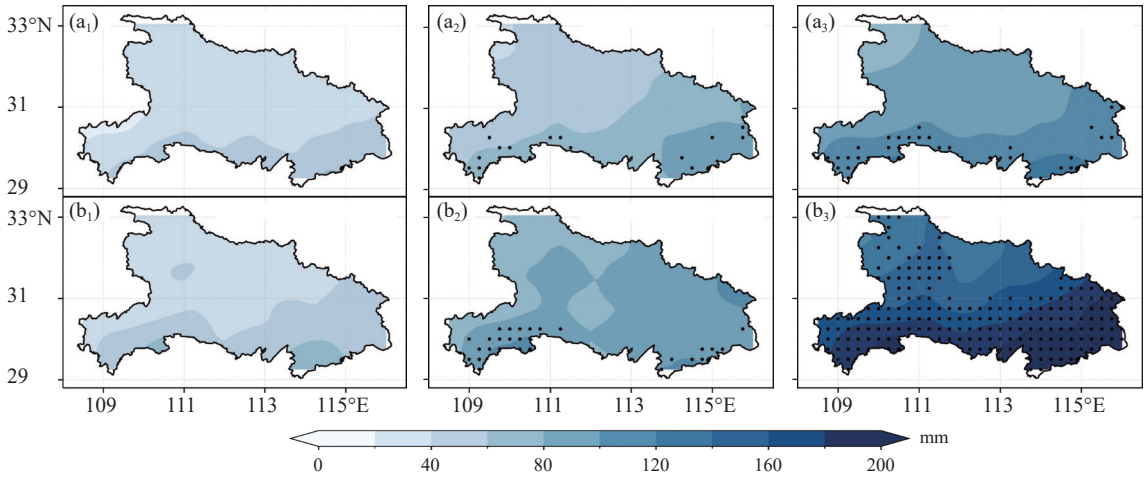


图 4 同图 3, 但为 R95p 距平场

Fig. 4 Same as Fig. 3, but for the anomalies of R95p

北向鄂东南递增的趋势, 且远期增幅更明显 (图略); 而表征极端性的 RX5d, 在 21 世纪中期主要呈自西向东递增的分布特征, 到 21 世纪远期, 增加明显地区位于鄂中 (图略)。SSP5-8.5 情景下, 各极端降水指数变化趋势总体一致, 大部在 21 世纪远期增加幅度达最大, 增幅最大的区域主要位于鄂东和鄂南局部地区 (图略)。综上, 在未来气候条件下, 强降水的空间分布总体也趋多趋强, 在高排放情景下, 鄂东及鄂南局部地区强降水极端性增加。

3.3 干旱指数

选取综合考虑降水和蒸散发的标准化降水蒸散发指数 SPEI 作为干旱指标, 对湖北省未来干旱变化趋势进行预估。多模式集合平均显示, 与基准期相比, SSP2-4.5 情景下, 21 世纪近期 (图 5a$_1$) 和中期 (图 5a$_2$) 的特旱等级干旱日数在湖北省大部呈减少趋势, 而在 21 世纪远期 (图 5a$_3$) 全省大部转为增加趋势, 由鄂东南向鄂西北递增, 表明极端干旱在 21 世纪远期有加剧趋势, 特别是鄂西北地区; 在 SSP5-8.5 情景下, 特旱等级干旱日数在 21 世纪近期 (图 5b$_1$)、中期 (图 5b$_2$) 变化趋势与 SSP2-4.5 情景一致, 21 世纪远期 (图 5b$_2$) 特旱等级干旱日数明显增多, 增加范围显著扩大, 表明在更高温升情景下极端干旱可能加剧, 特别是鄂西北地区。而 SSP2-4.5 情景下的全省年平均干旱日数在 21 世纪近期和中期呈一致性减

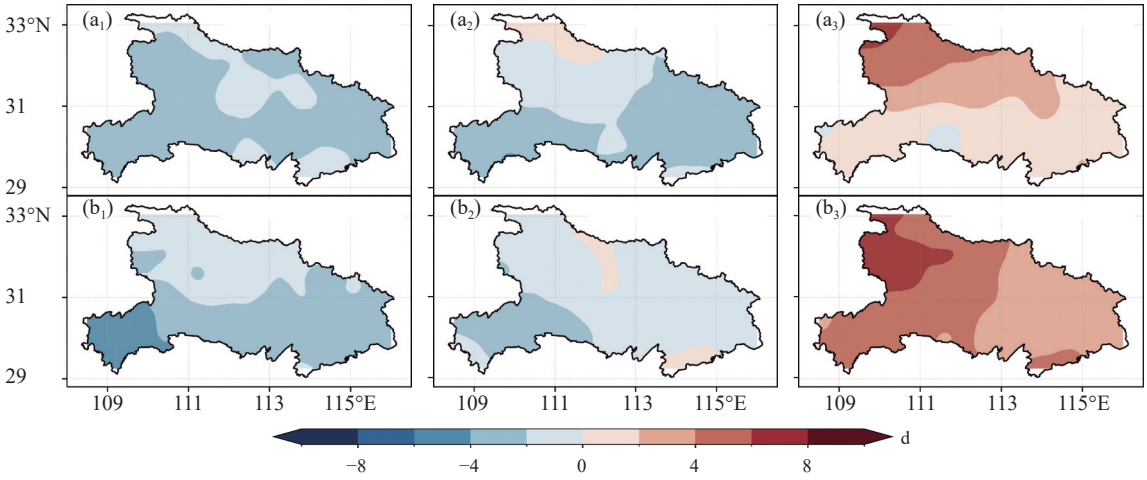


图 5 同图 3, 但为特旱日数距平场

Fig. 5 Same as Fig. 3, but for the anomalies of extreme drought days

少趋势，减少幅度最大的区域主要在鄂东南、鄂西南局部 (图略)，21 世纪远期鄂西北出现干旱日数增加趋势；在 SSP5-8.5 情景下年平均干旱日数在 21 世纪近期、中期变化趋势与 SSP2-4.5 情景一致，21 世纪远期干旱日数明显增多，增加范围显著扩大，表明在更高温升情景下极端干旱可能加剧。但总体上，干旱日数、特旱等级干旱日数的变化趋势均未通过 0.01 显著性水平检验，表明对未来干旱变化趋势的预估仍存在较大的不确定性。

4 结论与讨论

本文基于 CMIP6 中 14 个气候模式降尺度数据和 CN05.1 格点气象观测资料，选择了涵盖极端高温指数、极端低温指数、极端降水指数和干旱指数等 15 个极端气候指数，评估了 CMIP6 气候模式对湖北省极端气候指数的模拟能力，并预估了两种情景下极端气候指数的未来变化趋势。得出主要结论如下：

(1)CMIP6 气候模式降尺度数据可以刻画历史时段湖北省极端气候的时空演变特征，模式对极端气温指数的模拟结果总体优于极端降水指数，多模式集合平均优于大部分模式或代表模式平均水平。

(2) CMIP6 气候模式降尺度数据可能低估极端低温指数和极端降水指数，高估极端高温指数，气候事件极端性越强，模式相对误差也越大。

(3) 与基准期相比，SSP2-4.5 和 SSP5-8.5 情景下湖北省未来极端高温指数增大、极端低温指数减小，夏日明显延长，霜冻日数减少。空间分布上，中东部地区极端高温增加幅度更大，鄂西高海拔地区夏日增加幅度更明显，鄂西和鄂北地区霜冻日数减少最明显。各指数均在 21 世纪远期变化幅度达到最大，SSP5-8.5 情景较 SSP2-4.5 情景下增幅更大，高值区范围更广。

(4) 与基准期相比，SSP2-4.5 和 SSP5-8.5 情景下湖北省未来大雨日数、极端大雨日数、暴雨日数显著增多，最大连续 5 d 降水量、强降水总量、日降水强度显著增加；空间分布上，极端降水的频次与强度变化幅度大部由鄂西北向鄂东南递增，且在 21 世纪远期和高排放情景下增幅最大。湖北省未来干旱呈先减轻后加剧的趋势，21 世纪远期和高排情景下鄂西北地区极端干旱加剧趋势更明显。

利用全球气候模式开展区域极端气候指数的研究已在全球多地取得较多成果，然而这类模拟的效果受到气候模式自身分辨率与物理结构的限制，同时也受到复杂地形及地理位置等因素的影响，因此极端气候指数的模拟结果仍存在较大的不确定性(韩振宇等，2021)。本文利用 CMIP6 中 14 个气候模式降尺度日数据进行湖北省极端气候指数模拟能力的评估和预估，为研究本地区气候变化特征提供了重要参考，但仍存在一些不足。一方面，由于地球气候系统的复杂性，以及模式结构和参数化方案的不确定性，使得全球气候模式对气候系统的模拟存在较大的不确定性；另一方面，不同气象基准数据集和降尺度方案对气象要素极值和时间序列分布特征的刻画存在一定误差，导致对极端气候指数的计算可能存在偏差。未来研究需加强对全球气候模式模拟极端气候指数能力的评估和优选，优化多模式集成方法，开展不同时空分辨率和降尺度方法的降尺度效果评估，提高对极端气候指数的精细刻画和基于这些指数的极端气候事件预估能力。

参考文献 (References)：

韩振宇,高学杰,徐影.2021.多区域模式集合的东亚陆地区域的平均和极端降水未来预估[J].地球物理学报,64(6):1869−1884. Han Z Y, Gao X J, Xu Y. 2021. Mean and extreme precipitation projection over land area of East Asia based on multiple regional climate models [J]. Chinese Journal of Geophysics,64(6):1869−1884 (in Chinese). doi:10.6038/cjg2021O0103

胡一阳,徐影,李金健,等.2021. CMIP6 不同分辨率全球气候模式对中国降水模拟能力评估[J].气候变化研究进展,17(6):730−743. Hu Y Y, Xu Y, Li J J, et al. 2021. Evaluation on the performance of CMIP6 global climate models with different horizontal resolution in simulating the precipitation over China [J]. Climate Change Research, 17(6):730−743 (in Chinese). doi:10.12006/j.issn.1673−1719.2021.005

黄子立,吴小飞,毛江玉.2021.CMIP6 模式水平分辨率对模拟我国西南地区夏季极端降水的影响评估[J].高原气象,40(6):1470−1483. Huang Z L, Wu X F, Mao J Y. 2021. An evaluation for impacts of the horizontal resolution of CMIP6 models on simulating extreme summer rainfall over Southwest China [J]. Plateau Meteorology, 40(6):1470−1483 (in Chinese). doi:10.7522/j.issn.1000−0534.2021.zk010

刘敏,王凯,万素琴,等. 2021. 华中区域气候变化评估报告: 2020 [M]. 北京:气象出版社. Liu M, Wang K, Wan S Q, et al. 2021. Central China Regional Climate Change Assessment Report: 2020 [M]. Beijing: Meteorological Publishing House

任正果,张明军,王圣杰,等.2014. 1961-2011 年中国南方地区极端降水事件变化[J].地理学报,69(5):640−649. Ren Z G, Zhang M J, Wang S J, et al. 2014. Changes in precipitation extremes in South China during 1961-2011 [J]. Acta Geographica Sinica,69(5):640−649 (in Chinese). doi:10.11821/dlxb201405007

孙可可, 吴小飞.2024.FGOALS-f2 气候预测系统对西南地区持续性极端降水的次季节预测评估[J].高原山地气象研究,44(1):21−30. Sun K K, Wu X F. 2024. Sub-seasonal prediction of the regional persistent extreme precipitation in Southwest China by GOALS-f2 climate prediction system [J]. Plateau and Mountain Meteorology Research, 44(1):21−30 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1674−2184.2024.01.003

王慧,肖登攀,赵彦茜,等.2021.基于 CMIP6 气候模式的华北平原极端气

温指数评估和预测[J].地理与地理信息科学,37(5):86−94,142. Wang H, Xiao P D, Zhao Y X, et al. 2021. Evaluation and projection extreme temperature indices in the North China plain based on CMIP6 models [J]. Geography and Geo-Information Science,37(5): 86−94,142 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1672−0504.2021.05.012

王苗,刘敏,任永建.2021.基于高分辨率模拟数据 RCP4.5 情景下的华中区域气候变化预估[J].气象与环境学报,37(3):65−72. Wang M, Liu M, Ren Y J. 2021. Projection of climate change over Centre China by high-resolution simulation data under RCP4.5 scenario [J]. Journal of Meteorology and Environment,37(3):65−72 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1673−503X.2021.03.009

王颖, 王洪丽, 孔凡超, 等.2025.内蒙古东北部“21.7”罕见极端暴雨特征及成因分析[J].暴雨灾害,44(2):177−185. Wang Y, Wang H L, Kong F C, et al. 2025. Analysis of the characteristics and causes of the July 2021 rare extreme rainstorm in northeastern Inner Mongolia [J]. Torrential Rain and Disasters,44(2):177−185 (in Chinese). doi:10.12406/byzh.2023−096

王予,李惠心,王会军,等.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[J].气象学报,79(3):369−386. Wang Y, Li H X, Wang H J, et al. 2021. Evaluation of CMIP6 model simulations of extreme precipitation in China and comparison with CMIP5 [J]. Acta Meteorologica Sinica,79(3):369−386 (in Chinese). doi:10.11676/qxxb2021.031

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[J].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 dataset [J]. Geophys,56(4):1102−1111 (in Chinese). doi:10.6038/cjg20130406

吴健,夏军,曾思栋,等.2023. CMIP6 全球气候模式对长江流域气候变化的模拟评估与未来预估[J].长江流域资源与环境,32(1):137−150. Wu J, Xia J, Zeng S D, et al. 2023. Evaluation of the performance of CMIP6 models and future changes over the Yangtze River Basin [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin,32(1):137−150 (in Chinese). doi:10.11870/cjlyzyyhj202301013

夏智宏,刘敏,秦鹏程,等.2023. 2022 年长江流域高温干旱过程及其影响评估[J].人民长江,54(2):21−28. Xia Z H, Liu M, Qin P C, et al. 2023. Development process of high temperature and drought events over Yangtze River Basinin 2022 and assessment on its influences [J]. Yangtze River,54(2):21−28 (in Chinese). doi:10.16232/j.cnki.1001−4179.2023.02.004

肖雨佳,李建,李妮娜.2022.CMIP6 HighResMIP 高分辨率气候模式对青藏高原降水模拟的评估[J].暴雨灾害,41(2):215−223. Xiao Y J, Li J, Li N. 2022. Evaluation of CMIP6 HighResMIP models in simulating precipitation over Tibetan Plateau [J]. Torrential Rain and Disasters, 41(2):215−223(inChinese).doi:10.3969/j.issn.1004−9045.2022.02.012

张丽霞,陈晓龙,辛晓歌.2019. CMIP6 情景模式比较计划 (ScenarioMIP) 概况与评述[J].气候变化研究进展,15(5):519−525. Zhang L X, Chen X L, Xin X G. 2019. Short commentary on CMIP6 scenario model intercomparison project (ScenarioMIP) [J]. Climate Change Research,15(5):519−525 (in Chinese). doi:10.12006/j.issn.1673−1719.2019.082

赵梦霞,苏布达,姜彤,等.2021. CMIP6 模式对黄河上游降水的模拟及预估[J].高原气象,40(3):547−558. Zhao M X, Su B D, Jiang T, et al. 2021. Simulation and projection of precipitation in the Upper Yellow River Basin by CMIP6 multi-model ensembl [J]. Plateau Meteorology, 40(3):547−558 (in Chinese). doi:10.7522/j.issn.1000−0534.2020.00066

周天军,陈晓龙,吴波.2019a.支撑“未来地球”计划的气候变化科学前沿问题[J].科学通报,64(19):1967−1974. Zhou T J, Chen X L, Wu B. 2019a. Frontier issues on climate change science for supporting Future Earth [J]. Chinese Science Bulletin,64(19):1967−1974 (in Chinese). doi:10.1360/N972018−00818

周天军,邹立维,陈晓龙.2019b.第六次国际耦合模式比较计划 (CMIP6) 评述[J].气候变化研究进展,15(5):445−456. Zhou T J, Zou L W, Chen X L. 2019b. Commentary on the Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6) [J]. Climate Change Research,15(5): 445−456 (in Chinese) doi:10.12006/j.issn.1673−1719.2019.193

周雪英,段均泽,李晓川.2013.近 52 年巴音布鲁克山区日降水变化趋势与突变特征分析[J].沙漠与绿洲气象,7(5):19−24. Zhou X Y, Duan J Z, Li X C. 2013. Analysis on tendency and abrupt change of daily precipitation in recent 52 years in Bayinbuluk Mountains [J]. Desert and Oasis Meteorology,7(5):19−24 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1002−0799.2013.05.004

Daniel E, Jorge A. Ramírez. 1994. Spatial disaggregation for studies of climatic hydrologic sensitivity [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 120(12):1449−1467. doi:10.1061/(ASCE)0733−9429(1994)120:12(1449)

IPCC. 2022. Climate Change 2022: Impacts, adaptation, and vulnerability. contribution of Working Group II to the sixth assessment report of the intergovernmental panel on climate change [M]. Britain:Cambridge University Press

Li D, Zou L W, Zhou T J. 2018. Extreme climate event changes in China in the 1.5 and 2 ℃ warmer climates: results from statistical and dynamical downscaling [J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres,123:18. doi:10.1029/2018JD028835

Qiang Z, Li J, Singh V P, et al. 2013. Spatio-temporal relations between temperature and precipitation regimes: Implications for temperature-induced changes in the hydrological cycle [J]. Global & Planetary Change,111:57−76. doi:10.1016/j.gloplacha.2013.08.012

Taylor, Karl E. 2001. Summarizing multiple aspects of model performance in a single diagram [J]. Journal of Geophysical Research Atmospheres,106(D7):7183−7192. doi:10.1029/2000JD900719

Wang Q, Wu J, Lei T, et al. 2014. Temporal-spatial characteristics of severe drought events and their impact on agriculture on a global scale [J]. Quaternary International,349:28. doi:10.1016/j.quaint.2014.06.021

Xu Y, Gao X, Shen Y, et al. 2009. A daily temperature dataset over China and its application in validating a RCM simulation [J]. Advances in Atmospheric Sciences,26(4):763−772. doi:10.1007/s00376−009−9029−z

(责任编辑　唐永兰)