

文章编号: 2096-1618(2023)02-0181-11

CMIP6 多模式对三江源冬半年极端降水模拟能力评估

蔡铭钰¹, 程志刚^{1,2}, 王俊锋³

(1. 成都信息工程大学/高原大气与环境四川省重点实验室, 四川 成都 610225; 2. 中国民用航空飞行学院, 四川 广汉 618307; 3. 中国人民解放军 78127 部队, 四川 成都 610031)

摘要:为了评估 4 个全球气候模式(CMIP6)在三江源地区冬半年极端降水的模拟能力,基于台站监测资料和模式历史模拟数据,针对 8 个极端降水指数,采用泰勒图及多个统计方法进行量化分析。结果表明:(1)多数模式及其集合平均均能够较好地模拟出三江源冬半年极端降水的年际变化趋势,但模式模拟结果均高于观测;(2)模式对 8 个极端降水指数空间分布模拟能力较强,其空间相关系数较高,大部分达到 0.8 且均通过 0.01 显著性;(3)对不同指数而言,模式模拟差异性较大并且模式对于各极端降水指数的时间变率的模拟能力显著弱于空间分布模拟;(4)对不同台站而言,模式对不同台站间的模拟效果差距明显,但总体依旧是多模式集合平均 MAM 表现最好。

关键词:极端降水;评估;CMIP6 模式;三江源;冬半年

中图分类号:P467

文献标志码:A

doi:10.16836/j.cnki.jcuit.2023.02.009

0 引言

三江源地处青藏高原东端,是黄河、长江和澜沧江的共同源头,有“中华水塔”之称,同时具备了高寒地区野生动植物资源丰富、生态环境脆弱和对气候变迁敏感的特点^[1-4]。三江源的气候变化与其他区域存在明显差异^[5-7],其降水量变化影响着青藏高原腹地的旱涝变化,同时还直接影响黄河、长江和澜沧江旱涝的变化^[8]。唐红玉等^[9-11]研究显示,近几十年来三江源地区的年降水量、降水日数均呈下降趋势,而平均降水强度则呈微弱的上升趋势。李林等^[12-14]研究表明三江源地区气候总体呈现气温升高、降水减少、蒸发增大的干旱化趋势。侯文菊等^[15-17]研究表明三江源地区降水量总体呈下降趋势,冬、春两季降水量略有上升。

IPCC 的第五次气候评估报告(AR5)指出,全球变暖已经成为近百年来区域气候变化的最主要特征,且已对极端天气气候事件的发生频率、持续时间等产生显著影响。已有研究表明,随着气温的升高,全球极端降水事件发生的频率显著增大^[18-21],中国地区极端降水强度明显增大^[22]。全球气候模式是未来气候变化情景预估和气候模拟的重要工具^[23],而第六次全球耦合模式比较计划第六阶段(CMIP6)是 CMIP 项目开展以来接收模式数量最多、数值试验最丰、模拟数据最庞大的一次^[24-25]。王予等^[26]研究表明,相比于 CMIP3 和 CMIP5,CMIP6 对干旱区平均气候态模拟有明显提

高,而对湿润区极端降水空间模拟能力有改善,其中 GFDL-CM4、EC-Earth3、EC-Earth3-Veg、CanESM5 等模式模拟效果较好。向竣文等^[27]认为 CMIP6 模式中对中国地区极端降水效果模拟最好的模式是 EC-Earth3。而张佳怡等^[28]则认为 CMIP6 中 CanESM5、FGOALS-f3-L 模式对青藏高原降水模拟效果较好。随着全球气候变化,未来三江源地区地区冬半年降水会出现何种变化趋势,仍应引起关注。为此,评估不同气候模式在三江源地区模拟性能则显得尤为必要。

1 数据资料与方法

1.1 数据来源

1.1.1 站点数据

选取三江源区域范围为 31°N ~ 36°N, 89°E ~ 102°E。三江源地区现有气象台站 18 个(图 1),剔除含较长时间缺测的 4 个站点后,选取五道梁、兴海、沱沱河等 14 个气象台站资料。气象数据取自中国气象数据网(<http://data.cma.cn/>),时间跨度为 1979 年 10 月 1 日至 2014 年 4 月 30 日。

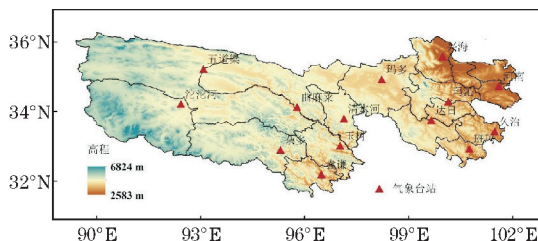


图 1 三江源地区范围及气象台站分布

收稿日期:2022-02-18

基金项目:国家自然科学基金资助项目(41971026)

通信作者:程志刚. E-mail:chengzg@cafu.edu.cn

1.1.2 模式资料

选用 CMIP6 中 4 个气候模式提供的 1980–2014 年的逐日降水历史模拟数据(表 1),数据来自 <https://esgf-node.llnl.gov/projects/cmip6/>。多模式集合(MAM)的计算方法为等权重平均,该方法在国际上被大量采用。

表 1 4 个 CMIP6 全球气候模式基本信息

模式名称	单位名称	所属国家	大气模式分辨率
CanESM5	CCCma	加拿大	64×128
EC-Earth3	EC-Earth-Cons	欧盟	256×512
EC-Earth3-Veg	EC-Earth-Cons	欧盟	256×512
FGOALS-f3-L	CAS	中国	180×288

表 2 8 个极端降水事件指数的定义

英文缩写	指数名称	定义	单位
RX1	1 日最大降水量	年内最大单日降水量	mm
RX5	5 日最大降水量	年内连续 5 日最大降水量	mm
SDII	降水强度	年内降水量与日降水量≥1mm 日数之比	mm/d
PRCPTOT	年总降水量	年内日降水量≥1 mm 降水量之和	mm
CDD	连续干日	年内日降水量连续<1 mm 日数最大值	d
CWD	连续湿日	年内日降水量连续≥1 mm 日数最大值	d
R95P	强降水量	年内日降水量大于 95 百分位阈值的降水量总和	mm
R99P	极端强降水量	年内日降水量大于 99 百分位阈值的降水量总和	mm

1.2.3 气象统计方法

全球数值模式模拟能力检验的客观评价采用相关系数 R 、均方根误差 RSME、平均绝对误差 MAE 和偏差 Bias 4 种检验方法^[29]。4 种指数含义分别为:相关系数 R 值越高,说明模式与实况相关性越好,则模拟效果越好;相反,均方根误差 RSME、平均绝对误差 MAE 的评分值越高,则说明模式结果越偏离实况值,其模拟效果越差;偏差 Bias 介于 $-\infty \sim +\infty$,评分值越接近 1,说明其偏差越小。

(1)相关系数值域为 $-1 \sim 1$,理想值是 1。

$$R = \frac{\sum_{i=1}^N (F_i - \bar{F})(O_i - \bar{O})}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (F_i - \bar{F})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^N (O_i - \bar{O})^2}}$$

(2)均方根误差值域为 $0 \sim +\infty$,理想值是 0。

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (F_i - O_i)^2}$$

(3)平均绝对误差值域为 $0 \sim +\infty$,理想值是 0。

$$MAE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |F_i - O_i|$$

(4)偏差值域为 $-\infty \sim +\infty$,理想值是 1。

$$Bias = \frac{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N F_i}{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N O_i}$$

1.2 方法

1.2.1 冬半年定义

根据青藏高原及其周边地区季节的划分,将上年 10 月至当年 4 月共 7 个月定义为当年的冬半年,例如 1979 年 10 月至 1980 年 4 月为 1980 年的冬半年,由此得到 1980–2014 年三江源冬半年降水序列。

1.2.2 极端降水指数

选用的 8 个极端降水指标由气候变化检测和指标专家组(ETCCDI)定义(表 2)。

2 CMIP6 多模式对三江源极端降水指数模拟能力的评估

2.1 1980–2014 年三江源地区冬半年极端降水指数的演变特征

图 2 给出了三江源地区 1980–2014 年观测、模式集合平均(MAM)和 4 个模式的冬半年平均降水量变化曲线。据此表明,观测值均低于 CMIP6 多模式模拟降水量,并且除模式 CanESM5 模拟的降水量呈下降趋势外,集合平均 MAM 和其他 3 个模式的模拟值及观测降水值都呈上升趋势。模式 EC-Earth3 增加趋势最为显著,达 7.3 mm/10 a;模式 EC-Earth3-Veg 增加趋势最不明显,仅为 0.05 mm/10 a;OBS、MAM 和模式 FGOALS-f3-L 三者冬半年平均降水量增幅则相近。降水量 5 a 滑动平均结果表明,观测降水量在 20 世纪 90 年代以前的增加趋势不明显,而在 90 年代增幅较大;21 世纪初三江源冬半年降水量出现小幅度减少,2005 年后又有所增加。除模式 CanESM5 外,MAM 和其他 3 个模式均能模拟出三江源冬半年降水的年际变化趋势,其中模式 FGOALS-f3-L 模拟结果与观测最为接近。

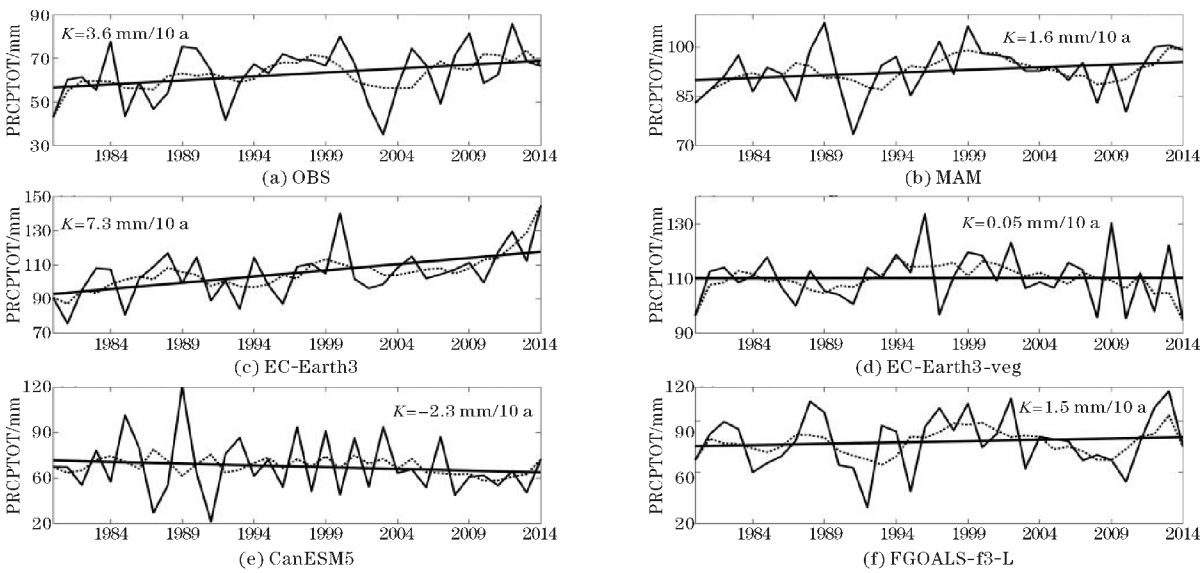


图2 极端降水指数 PRCPTOT 变化特征 (直线是线性拟合,虚线是 5 a 滑动平均,下同)

图 3~5 给出了三江源地区 1980–2014 年观测、模式集合平均 (MAM) 和 4 个 CMIP6 模式的冬半年降水强度 SDII、1 日最大降水量 RX1、5 日最大降水量 RX5 的演变特征曲线。从图中不难看出,除模式 CanESM5 呈减少趋势以外,模式 EC-Earth3、EC-Earth3-Veg、FGOALS-f3-L、MAM 模拟及观测值的 3 个极端降水指数均呈增加趋势,这与指数 PRCPTOT 的结果接近。图 3 分析表明,4 个模式模拟的 SDII 较观测而言均偏低,其中模式 EC-Earth3 的 5 a 滑动平均与观测最为接近。但总体而言,不管是观测值还是模拟值,指数 SDII 的变化趋势都不显著。从指数 RX1 和 RX5 来看,观测的 1 日最大降水量高于模式模拟值,其中模式 EC-Earth3-Veg 的增幅最为微弱,而 MAM、EC-Earth3、FGOALS-f3-L 的增幅则与观测值接近。但从年际变化趋势来看,模式 FGOALS-f3-L 与观测的变化趋势存在明显差异。其中 20 世纪 90 年代之前,MAM 的变化趋势与观测值较为一致;90 年代年际趋势模拟最好的则

是模式 EC-Earth3;21 世纪初,模拟变化趋势最好的则是模式 EC-Earth3-Veg。图 6、7 给出了三江源地区 1980–2014 年冬半年极端降水指数连续干日 CDD、连续湿日 CWD 的演变特征曲线。对指数 CDD,CMIP6 各模式的模拟值相对观测值而言,均偏低。模式模拟和观测的线性拟合曲线表明,MAM 和其中 3 个模式的模拟值及观测值均呈现减少的趋势,只有模式 FGOALS-f3-L 呈现相反变化。与之对应的指数 CWD,各模式的模拟值相对观测值而言,均偏高。模式 EC-Earth3-veg 呈现减少趋势,观测值和其余模式均为增加趋势。图 8、9 给出了三江源地区 1980–2014 年冬半年强降水量 R95P、极端强降水量 R99P 的演变特征曲线。从各模式模拟值和观测值的线性拟合可以看出,MAM 和模式 EC-Earth3、EC-Earth3-Veg、FGOALS-f3-L 3 个模式的模拟值和观测值均呈现增加趋势,只有模式 CanESM5 呈现减少的趋势,且各模式的模拟值相对观测值而言,均偏高。

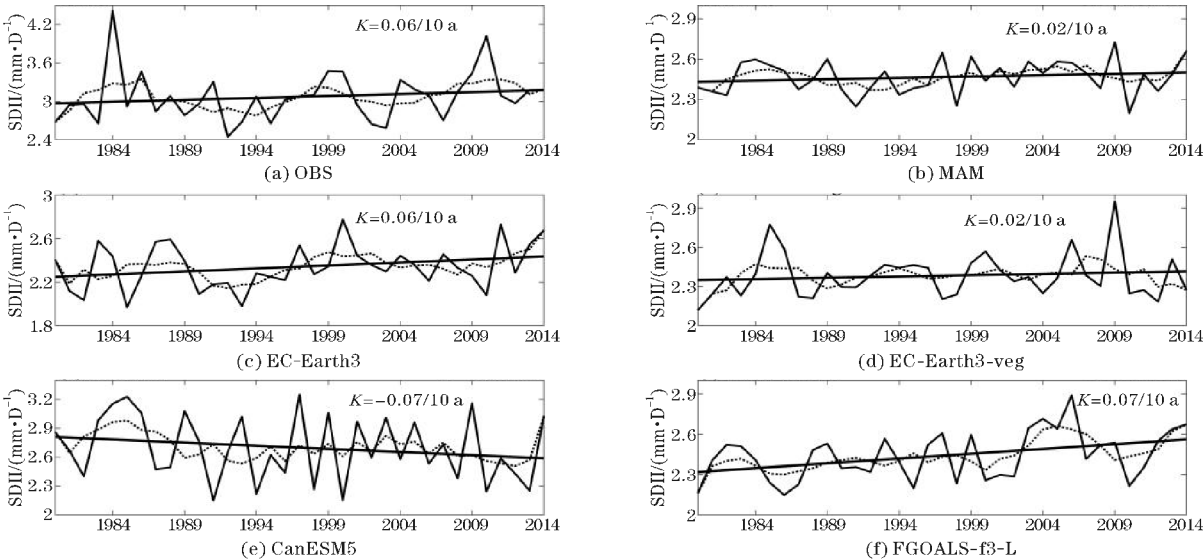


图3 极端降水指数 SDII 变化特征

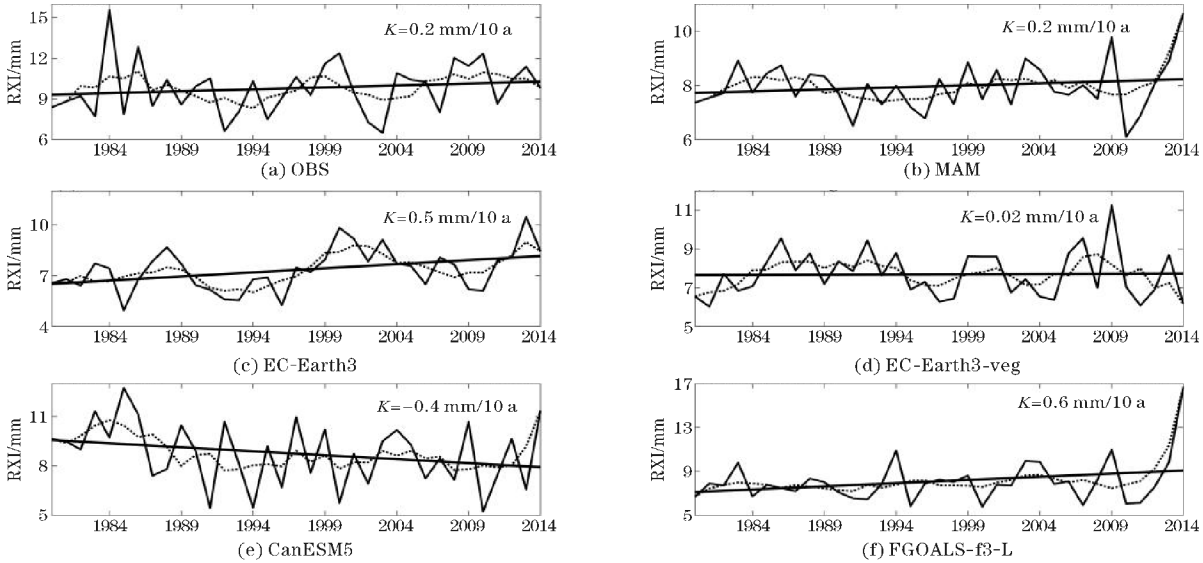


图4 极端降水指数RXI变化特征

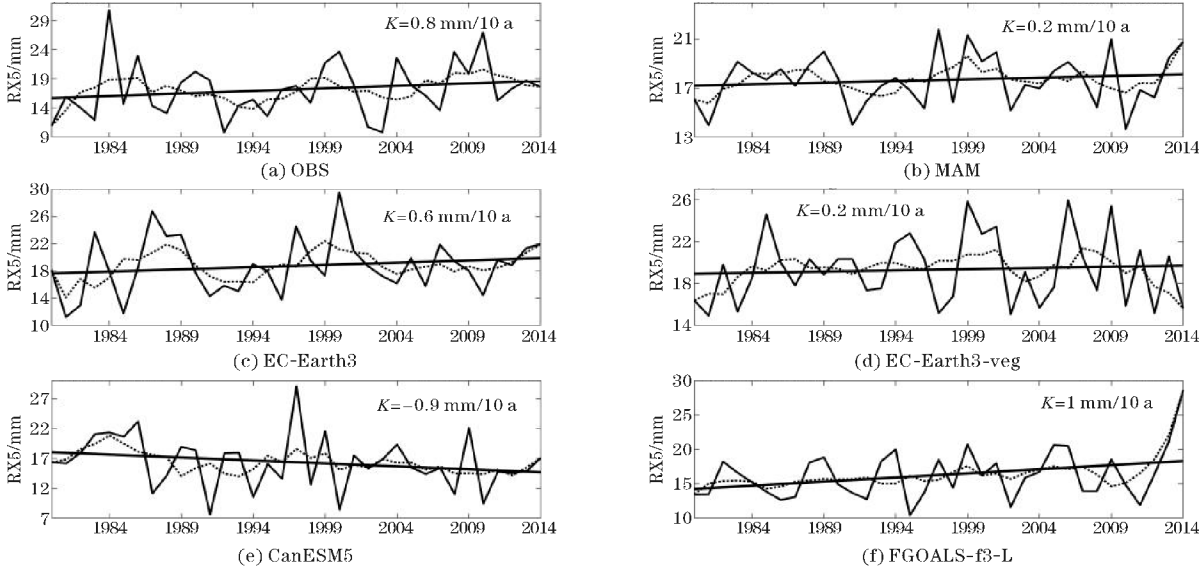


图5 极端降水指数RX5变化特征

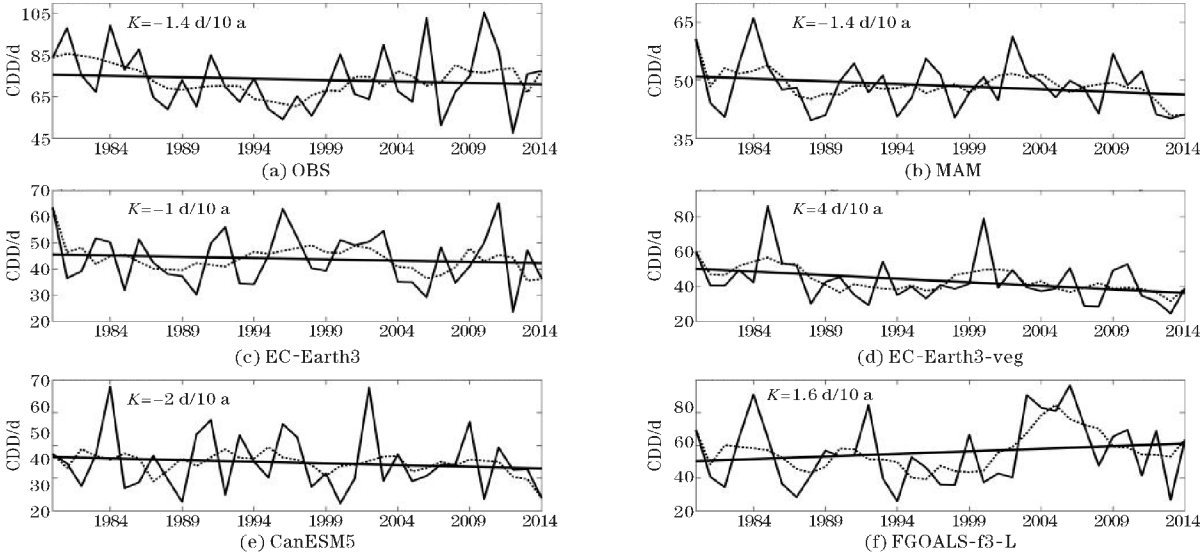


图6 极端降水指数CDD变化特征

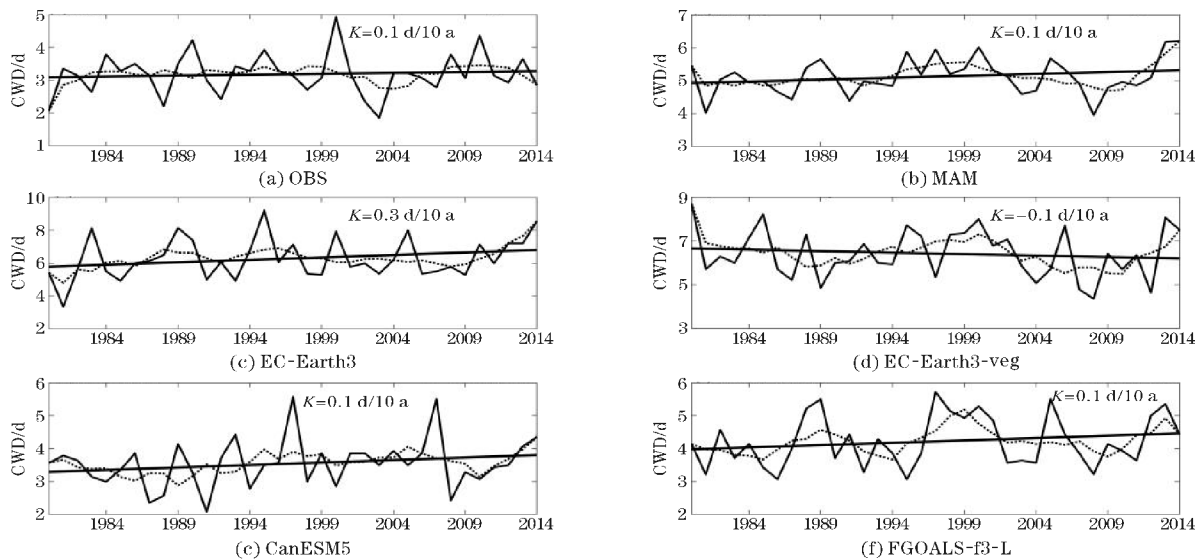


图 7 极端降水指数 CWD 变化特征

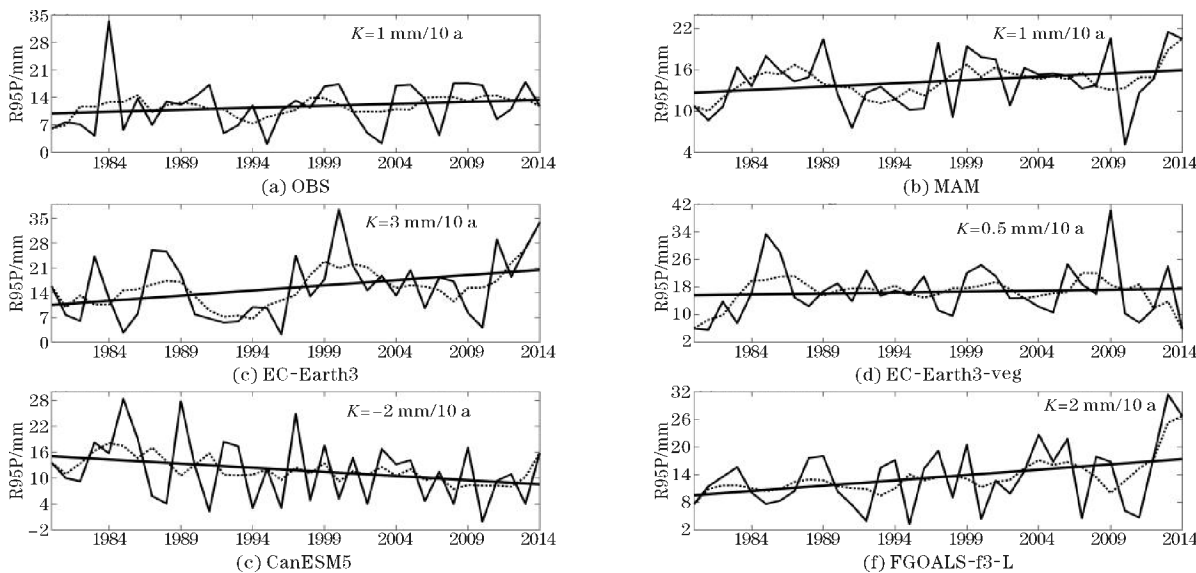


图 8 极端降水指数 R95P 变化特征

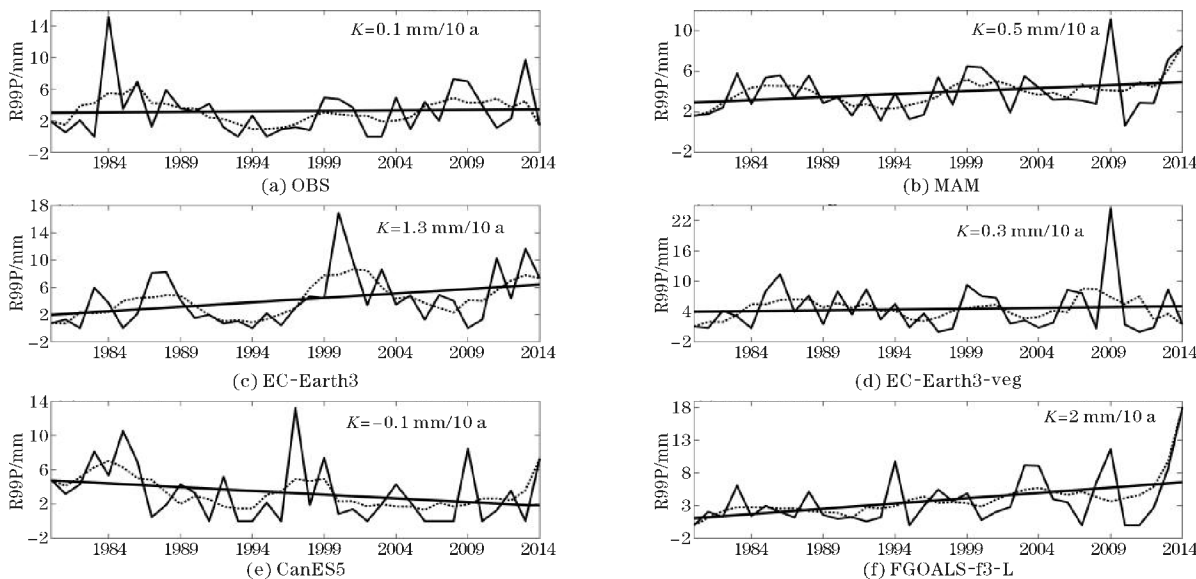


图 9 极端降水指数 R99P 变化特征

2.2 三江源冬半年极端降水空间分布特征

为了客观地衡量三江源地区,4个CMIP6模式及其集合平均MAM对极端降水的模拟能力,此次各自计算了三江源地区1980-2014年标准化后的各冬半年极端降水指数模拟场与观测场的空间相关系数、标

准差之比和均方根误差。Karl E Taylor 等^[30-31]于2001年首先提出泰勒图,气象上主要用来比较多个模式模拟能力,近年来多被用于模式的评估与检验。如图10所示,图中的直角坐标轴代表标准差,弧度轴表示相关系数,虚线代表均方根误差。

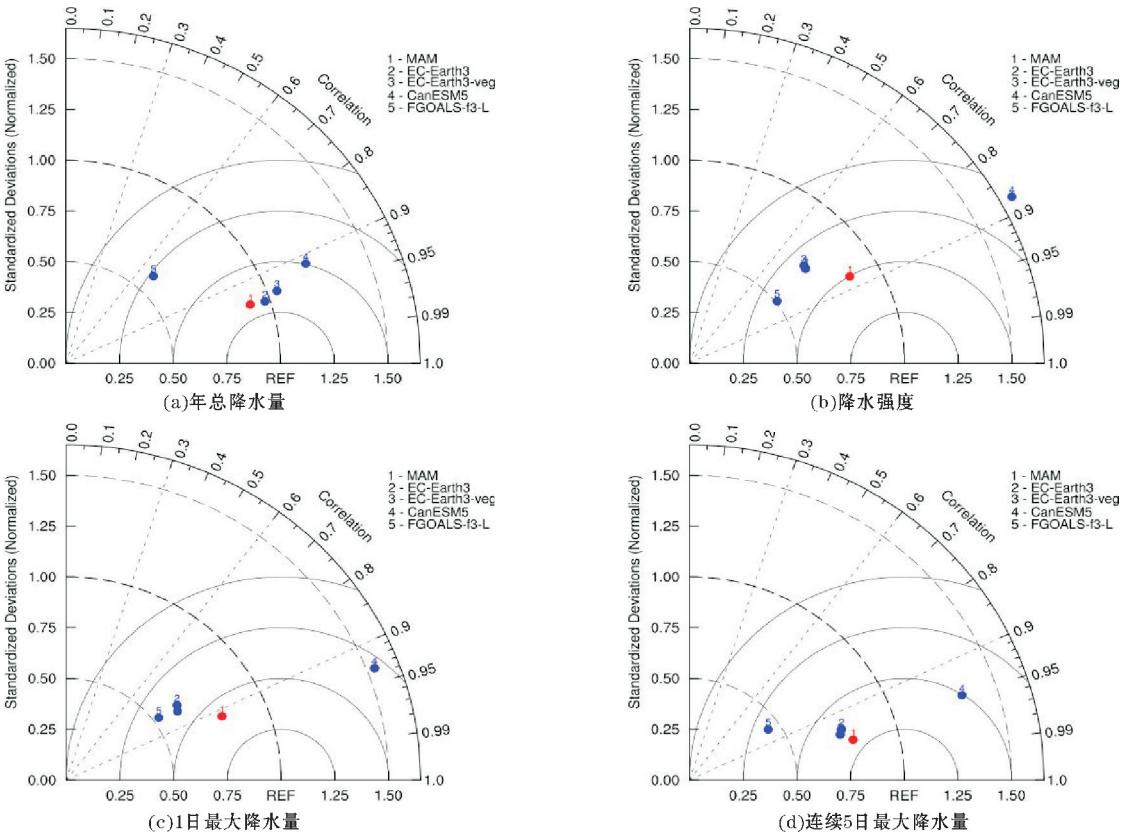


图10 多模式模拟三江源冬半年总降水量、降水强度、1日最大降水量、连续5日最大降水量指数的泰勒图分布

图10给出了4个CMIP6模式及其集合平均MAM模拟三江源冬半年总降水量、降水强度、1日最大降水量、连续5日最大降水量指数的泰勒图分布。可以看到,对这4个指数,4个模式及其MAM对三江源冬半年1980-2014年极端降水空间分布的模拟能力集中且与观测相关性较高。对指数年总降水量(PRCPTOT):空间分布模拟最好的模式为EC-Earth3,其场相关系数超过0.95;模拟场与观测场的标准差最相近的模式为EC-Earth3和EC-Earth3-veg,标准差之比为0.98~1.04;而模拟均方根误差最小的模式是CanESM5,模拟均方根误差为0.53。综合以上指标,对指数PRCPTOT的空间分布,模拟效果较好的为模式EC-Earth3。类似的,对指数降水强度(SDII):空间分布模拟最好的模式为CanESM5,其场相关系数超过0.87;模拟场与观测场的标准差最相近的模式为MAM,标准差之比为0.86;而模拟均方根误差最小的模式是CanESM5,模拟均方根误差为1.26。综合以上

指标,对指数SDII的空间分布,模拟效果较好的为集合平均MAM。对指数1日最大降水量(RX1):空间分布模拟最好的模式为CanESM5,场相关系数超过0.93;模拟场与观测场的标准差最相近的模式为MAM,标准差之比在0.79;而模拟均方根误差最小的模式是CanESM5,模拟均方根误差为0.81。综合以上指标,对指数RX1的空间分布,模拟效果较好的为集合平均MAM。对指数连续5日最大降水量(RX5):空间分布模拟最好的模式为MAM,场相关系数超过0.96;模拟场与观测场的标准差最相近的模式为MAM,标准差之比为0.79;而模拟均方根误差最小的模式也是MAM,模拟均方根误差为0.32。综合以上指标,对指数RX5的空间分布,模拟效果较好的为集合平均MAM。

图11给出了4个CMIP6模式及其集合平均MAM模拟三江源冬半年连续干日、连续湿日、强降水量、极端强降水量指数的泰勒图分布。可以看到,对这4个

指数,4 个模式及其 MAM 对三江源冬半年 1980–2014 年极端降水空间分布的模拟能力较为集中但与观测相关性较低。对指数连续干日(CDD):空间分布模拟最好的模式为 EC-Earth3,场相关系数超过0.86;模拟场与观测场的标准差模拟效果均较差,标准差之比在0.4~0.6;而模拟均方根误差差最小的模式是 CanESM5,模拟均方根误差为0.88。综合以上指标,对指数 CDD 的空间分布,模拟效果较好的为模式 EC-Earth3。类似的,对指数连续湿日(CWD):空间分布模拟最好的模式为 EC-Earth3,场相关系数超过0.83;模拟场与观测场的标准差最相近的模式为 EC-Earth3 和 CanESM5,标准差之比在0.94~0.98;而模拟均方根误差差最小的模式是 CanESM5,模拟均方根误差为0.72。综合以上指标,对指数 CWD 的空间分布,模拟

效果较好的为模式 CanESM5。对指数强降水量(R95P):空间分布模拟最好的模式为 MAM,场相关系数超过0.94;模拟场与观测场的标准差最相近的模式为 EC-Earth3、MAM 和 EC-Earth3-veg,标准差之比在0.91~0.95;而模拟均方根误差差最小的模式是 MAM 和 CanESM5,模拟均方根误差分别为0.58、0.6。综合以上指标,对指数 R95P 的空间分布,模拟效果较好的为集合平均 MAM。对指数极端强降水量(R99P):空间分布模拟最好的模式为 MAM 和 EC-Earth3-veg,场相关系数超过0.91;模拟场与观测场的标准差最相近的模式为 EC-Earth3 和 MAM,标准差之比在0.98~1;而模拟均方根误差差最小的模式是 MAM,模拟均方根误差为0.64。综合以上指标,对指数 R99P 的空间分布,模拟效果较好的为集合平均 MAM。

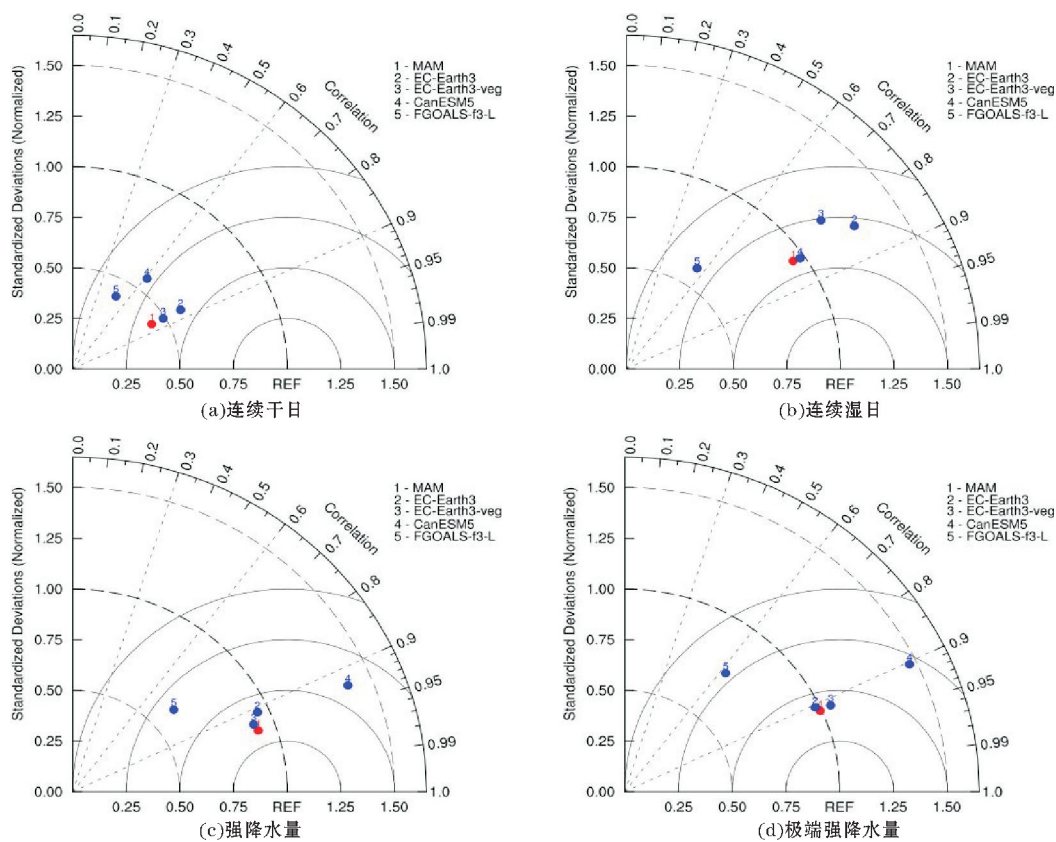


图 11 多模式模拟三江源冬半年连续干日、连续湿日、强降水量、极端强降水量指数的泰勒图分布

基于泰勒图分析,得到多模式集合平均及 4 个模式对这 8 个极端降水指数的模拟能力排名(表 3)。分析发现,对三江源冬半年空间分布模拟效果最好的是多模式集合平均 MAM。

表 3 基于泰勒图的各指数模拟能力排名

模式	PRCPTOT	SDII	RX1	RX5	CDD	CWD	R95P	R99P
MAM	2	1	1	1	3	2	1	1
EC-Earth3	1	5	5	2	1	3	2	2
EC-Earth3-veg	4	4	3	3	3	4	3	3
CanESM5	3	2	2	4	2	1	3	4
FGOALS-f3-L	5	3	4	5	5	5	5	5

2.3 模式对三江源冬半年极端降水空间分布的客观检验

分析表 4 发现这 4 个模式及其 MAM 的 8 个极端降水指数的各项评分参数模拟效果表现不一。对参数 MAE,指数 PRCPTOT、CWD 的模拟综合效果最优的模式为 CanESM5 和 FGOALS-f3-L;指数 RX5 效果最优模式为 MAM 和 EC-Earth3;指数 SDII、RX1、CDD、R95P、R99P 的模拟效果最优的模式则均为 MAM 和

CanESM5。对参数 BIAS,指数 SDII、RX5、CDD、R95P 的模拟效果最优的模式为 MAM 和 CanESM5;指数 PRCPTOT、RX1、CWD、R99P 的模拟效果最优的模式为 CanESM5 和 FGOALS-f3-L。

基于表 3 的模式模拟能力排名和表 4 的参数 MAE 和 BIAS 比较,发现集合平均 MAM、模式 CanESM5、EC-Earth3 对三江源冬半年极端降水的空间分布模拟效果较好,最好的则是多模式集合平均 MAM。

表 4 CMIP6 模式对三江源冬半年极端降水指数模拟的检验结果

参数	模式	PRCPTOT	SDII	RX1	RX5	CDD	CWD	R95P	R99P
MAE	M	1.01	1.33	0.73	0.27	1.07	2.32	0.48	0.55
	M1	1.27	1.6	0.96	0.39	1.27	3.73	0.68	0.72
	M2	1.57	1.52	0.83	0.44	1.3	3.89	0.87	0.88
	M3	0.72	1.07	0.7	0.43	0.67	0.59	0.47	0.59
	M4	0.87	1.4	0.83	0.54	1.31	1.32	0.57	0.63
BIAS	M	0.68	1.25	1.23	0.97	1.51	0.62	0.81	0.83
	M1	0.6	1.31	1.33	0.92	1.67	0.51	0.75	0.78
	M2	0.57	1.29	1.27	0.89	1.69	0.5	0.7	0.72
	M3	0.93	1.14	1.12	1.05	1.14	0.9	0.99	1
	M4	0.71	1.26	1.21	1.05	1.71	0.76	0.6	0.85

注:M、M1、M2、M3、M4 分别为模式 MAM、EC-Earth3、EC-Earth3-veg、CanESM5、FGOALS-f3-L,下同。

3 模式对三江源 14 个台站的极端降水模拟

3.1 模式对极端降水指数 R95P 的客观检验

挑选 8 个极端降水指数中的 R95P 和 R99P 对三江源 14 个台站进行评估检验。综合分析模式对 14 个台站的极端降水指数 R95P 的各项评价参数,分析表 5 中各参数选出效果较好的模式。对台站五道梁和兴海:各模式的相关系数表现都不尽如人意,稍好的模式分别为 CanESM5、FGOALS-f3-L,相关系数别为 0.28、0.27,但都未通过显著性检验;对参数 RMSE、MAE 和 BIAS,表现最好的模式均为 CanESM5,相对不太靠前的模式为 FGOALS-f3-L、EC-Earth3-veg。对台站曲麻莱:相关系数表现最好的模式为 EC-Earth3,相关系数为 0.35,且通过了 0.1 的显著性检验;其余 3 个参数表现最好的模式均为 CanESM5。对台站囊谦:相关系数表现最好的模式为 FGOALS-f3-L,相关系数为 0.45,通过了 0.05 的显著性检验,其次 MAM 相关系数也达到

0.33 且通过了 0.1 的显著性检验;参数 BIAS 表现最好的也是模式 FGOALS-f3-L;而参数 RMSE、MAE 表现最好的则是模式 CanESM5。总体来看,对大部分台站,各模式对其模拟的相关系数都偏低;对参数 RMSE 和 MAE,大部分台站模拟表现最好的模式为 CanESM5;而对参数 BIAS,各模式对各台站的模拟效果不同。

基于以上分析得到模式对 14 个台站指数 R95P 的模拟能力排名(表 6)。大部分台站对指数 R95P 模拟效果最好的为多模式集合平均 MAM,其次为模式 FGOALS-f3-L,而其他模式表现的就稍靠后。与空间分布相比,各模式对单个台站的模拟效果表现较差。

3.2 模式对极端降水指数 R99P 的客观检验

类似的,分析模式对 14 个台站的极端降水指数 R99P 的各项评价参数,可以发现,大部分台站,各模式对其相关系数的模拟效果较之 R95P 有明显的提高;对 RMSE,模拟效果最好的为 MAM;对 MAE,模拟效果最好的模式为 CanESM5;而对 BIAS,各模式模拟效果各有优劣。基于表 7,得到模式对 14 个台站指数 R99P 的模拟能力排名(表 8)。对比对指数 R95P 的模拟,各模式对 R99P 的模拟效果有所提高。

表 5 CMIP6 模式对指数 R95P 的模拟检验结果

参数	模式	五道梁	兴海	沱沱河	杂多	曲麻莱	玉树	玛多	清水河	玛沁	达日	河南	久治	囊谦	班玛
相关参数	M	-0.03	0.17	-0.03	-0.02	0.16	-0.02	0.25	-0.08	-0.05	-0.12	0.06	0.1	0.33 *	0.13
	M1	-0.02	0.13	0.07	-0.15	0.35 *	-0.06	0.23	0.05	0.04	-0.31	0.17	0.27	0.08	-0.1
	M2	-0.06	-0.09	0.06	0.03	-0.03	-0.02	0.07	-0.03	0.02	-0.09	0.03	-0.03	0.11	0.32
	M3	0.28	0.14	-0.13	-0.06	-0.05	-0.21	0.12	-0.3	-0.21	0.14	-0.29	-0.12	0.05	0.03
	M4	-0.12	0.27	-0.09	0.17	-0.04	0.25	0.09	0.02	-0.02	0.05	0.25	0.11	0.45 **	0.09
RMSE	M	1.82	1.24	1.04	1.05	1.08	1.14	1.16	1.12	1.22	1.16	1.11	1.08	0.99	1.13
	M1	2.11	1.85	1.06	1.3	1.38	1.35	1.82	1.41	1.57	1.62	1.36	1.3	1.4	1.54
	M2	2.08	1.89	1.26	1.14	1.75	1.37	1.88	1.46	1.7	1.41	1.47	1.34	1.3	1.11
	M3	1.25	1.15	1.12	1.18	1.28	1.45	1.22	1.38	1.42	1.3	1.6	1.75	1.39	2.01
	M4	3.67	1.32	1.18	1.06	1.39	1.18	1.56	1.28	1.35	1.21	1.09	1.2	1.02	1.27
MAE	M	1.46	1.11	0.65	0.6	0.84	0.95	0.98	0.91	0.99	0.97	0.9	0.91	0.74	0.92
	M1	1.45	1.42	0.66	0.81	0.91	1.06	1.45	1.19	1.28	1.41	1.05	1.04	1.09	1.25
	M2	1.63	1.5	0.87	0.8	1.39	1.14	1.33	1.09	1.26	1.13	1.18	1.09	0.98	0.92
	M3	0.95	0.86	0.53	0.75	0.89	1.14	0.86	1.08	1.15	1.06	1.21	1.39	0.99	1.49
	M4	2.8	0.98	0.73	0.68	1.1	0.98	1.3	1.02	1.03	0.98	0.83	0.93	0.84	1.05
BIAS	M	0.35	0.54	0.79	0.97	0.78	0.8	0.65	1.01	0.69	1	0.77	0.99	0.76	0.86
	M1	0.39	0.43	0.86	0.94	0.65	0.84	0.52	0.82	0.58	0.91	0.69	0.94	0.75	0.87
	M2	0.36	0.43	0.51	0.91	0.6	0.71	0.5	0.78	0.55	0.84	0.67	0.9	0.74	0.85
	M3	0.84	1.03	1.69	0.92	1.67	1.02	1.61	1.83	0.99	1.33	0.8	0.89	0.75	0.74
	M4	0.2	0.57	0.74	1.12	0.75	0.7	0.61	1.11	0.8	1.04	1.01	1.34	0.79	1.03

注: *、** 分别为通过 0.1、0.05 的显著性水平检验,下同

表 6 基于指数 R95P 的模拟能力排名

模式	五道梁	兴海	沱沱河	杂多	曲麻莱	玉树	玛多	清水河	玛沁	达日	河南	久治	囊谦	班玛
M	3	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	1	1	2
M1	2	4	2	5	2	3	4	3	4	5	3	2	5	4
M2	4	5	4	3	5	4	5	4	5	4	4	4	3	1
M3	1	3	3	4	3	5	2	4	3	3	4	5	4	5
M4	5	1	5	2	4	2	3	2	1	2	1	3	1	3

表 7 CMIP6 模式对指数 R99P 的模拟检验结果

参数	模式	五道梁	兴海	沱沱河	杂多	曲麻莱	玉树	玛多	清水河	玛沁	达日	河南	久治	囊谦	班玛
相关参数	M	0.44 **	0.28	0.05	-0.23	0.06	0.25	0.05	-0.09	-0.27	0.12	-0.07	-0.03	0.38 *	0.27
	M1	0.03	0.17	-0.09	-0.11	0.29	0.22	-0.11	0.22	-0.11	0.35 *	-0.22	0.2	-0.11	-0.2
	M2	0.28	0.25	0.22	0.03	-0.09	-0.1	0.01	-0.1	-0.24	-0.1	-0.02	0.01	0.23	0.29
	M3	0.43 **	-0.14	-0.05	-0.19	-0.04	0	0.11	-0.2	-0.07	0.07	0.05	-0.19	0.12	0.34 *
	M4	0.27	0.24	-0.08	-0.16	0.01	0.43 **	0.12	-0.17	-0.11	0	0.04	-0.02	0.53 **	0.07
RMSE	M	1.15	0.99	1.01	1.08	1.13	1.01	1.27	1.14	1.25	1.07	1.11	1.17	0.94	1.03
	M1	1.67	1.35	1.05	1.2	1.17	1.15	1.82	1.16	1.53	1.08	1.4	1.23	1.28	1.58
	M2	1.56	1.21	0.99	1.17	1.7	1.44	2.13	1.58	1.71	1.62	1.28	1.38	1.15	1.19
	M3	1.18	1.3	1.04	1.29	1.27	1.22	1.27	1.24	1.4	1.31	1.34	1.85	1.18	1.58
	M4	2.68	1.18	1.08	1.14	1.32	1.05	1.75	1.33	1.37	1.39	1.22	1.34	0.87	1.32
MAE	M	0.8	0.68	0.29	0.6	0.71	0.71	0.93	0.75	0.89	0.81	0.8	0.89	0.58	0.8
	M1	0.91	0.78	0.3	0.62	0.67	0.71	1.15	0.73	0.96	0.72	0.94	0.76	0.65	1.1
	M2	0.79	0.67	0.3	0.54	0.92	0.89	1.14	0.83	1.09	1.03	0.85	0.86	0.61	0.77
	M3	0.48	0.63	0.24	0.69	0.63	0.63	0.6	0.68	0.76	0.82	0.72	1.16	0.58	0.93
	M4	1.48	0.64	0.32	0.58	0.72	0.68	1.08	0.79	0.76	0.88	0.76	0.91	0.5	0.9
BIAS	M	0.36	0.66	1.34	0.96	0.82	0.68	0.62	1.05	0.74	0.96	0.89	0.89	0.67	0.88
	M1	0.41	0.54	1.38	0.91	0.7	0.72	0.53	0.85	0.59	0.89	0.84	0.89	0.7	0.9
	M2	0.45	0.56	0.99	0.9	0.65	0.59	0.48	0.81	0.63	0.79	0.79	0.83	0.61	0.85
	M3	0.8	1.26	2.62	0.91	1.36	0.94	1.44	1.99	0.91	1.32	0.88	0.77	0.74	0.79
	M4	0.19	0.61	1.14	1.13	0.85	0.58	0.56	1.1	0.98	0.98	1.1	1.16	0.66	1

表8 基于指数 R99P 的模拟能力排名

模式	五道梁	兴海	沱沱河	杂多	曲麻莱	玉树	玛多	清水河	玛沁	达日	河南	久治	囊谦	班玛
M	2	1	1	2	1	1	2	1	3	1	3	2	2	1
M1	4	5	4	3	1	4	4	2	4	1	5	1	5	5
M2	3	4	1	1	5	5	4	5	5	5	4	3	4	4
M3	1	3	3	5	4	2	1	3	2	4	2	5	3	1
M4	5	2	5	3	3	2	3	3	1	3	1	4	1	3

4 结论

利用三江源区域 14 个站点和 4 个 CMIP6 全球耦合模式的历史模拟 1980–2014 年逐日降水资料,定量评估了各模式及其集合平均在三江源区域的极端降水模拟能力,得出如下结论:

(1)除模式 CanESM5 以外,其余 3 个模式及其集合平均均能够较好地模拟出三江源冬半年极端降水的年际变化趋势,但模式模拟结果均高于观测。泰勒图分析表明,模式对 8 个极端降水指数空间分布模拟能力较强,其空间相关系数较高,且均通过0.01显著性。

(2)对不同指数而言,模式模拟差异性较大。在空间模拟能力方面,1 日最大降水量 RX1、连续 5 日最大降水量 RX5、强降水量 R95P 和极端强降水量 R99P 的模拟场与观测场的均方根误差(标准化)、平均绝对误差均小于 1,且相关系数均大于0.8;在时间模拟能力方面,冬半年总降水量 PRCPTOT、连续干日 CDD 和强降水量 R95P 模拟能力较好;但模式对于最大连续湿日 CWD 和降水强度 SDII 的模拟能力较差。总体显示,模式对于各极端降水指数的空间分布的模拟能力显著强于时间变率模拟。

(3)14 个台站的 R95P、R99P 分析表明,模式对不同台站间的模拟效果差距明显,但总体依旧是多模式集合平均 MAM 表现最好。在其指数模拟能力排名中,多个台站的集合平均 MAM 表现最好,排名第一。

(4)尽管使用了多种方法来评估 CMIP6 模式对三江源冬半年极端降水的模拟能力,但是发现大多数模拟效果尤其是对极端降水事件时间变率的模拟仍旧不是太理想。CMIP6 模式对青藏高原三江源地区的极端降水模拟偏高的特征依旧存在。未来的工作仍旧需要更深入的研究来提高模式对三江源地区的极端降水模拟效果。

参考文献:

[1] 董锁成,周长进,王海英.“三江源”地区主要生态环境问题与对策[J]. 自然资源学报,2002(6):713–720.

[2] 赵新全,周华坤.三江源区生态环境退化、恢复治理及其可持续发展[J]. 中国科学院院刊,2005(6):37–42.

[3] 游庆龙,康世昌,李潮流,等.三江源地区 1961 ~ 2005 年气温极端事件变化[J]. 长江流域资源与环境,2008(2):232–236.

[4] 韦晶,郭亚敏,孙林,等.三江源地区生态环境脆弱性评价[J]. 生态学杂志,2015,34(7):1968–1975.

[5] 冯松,汤懋苍,王冬梅.青藏高原是我国气候变化启动区的新证据.科学通报,1998,43(6):633–636.

[6] 韦志刚,黄荣辉,董文杰.青藏高原气温和降水的年际和年代际变化.大气科学,2003,27(2):157–170.

[7] 杨玮,何金海,王盘兴,等.近 42 年来青藏高原年内降水时空不均匀性特征分析.地理学报,2011,66(3):376–384.

[8] 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[J]. 气候变化研究进展,2019,15(5):445–456.

[9] 唐红玉,杨小丹,王希娟,等.三江源地区近 50 年降水变化分析[J]. 高原气象,2007(1):47–54.

[10] 左洪超,吕世华,胡隐樵.中国近 50 年气温及降水量的变化趋势分析[J]. 高原气象,2004(2):238–244.

[11] 易湘生,尹衍雨,李国胜,等.青海三江源地区近 50 年来的气温变化[J]. 地理学报,2011,66(11):1451–1465.

[12] 刘晓琼,吴泽洲,刘彦随,等.1960–2015 年青海三江源地区降水时空特征[J]. 地理学报,2019,74(9):1803–1820.

[13] 李林,李凤霞,朱西德,等.三江源地区极端气候事件演变事实及其成因探究[J]. 自然资源学报,2007(4):656–663.

[14] 李璠,肖建设,颜亮东.1964–2014 年青海省三江源地区日降水格局分析[J]. 干旱地区农业研究,2016,34(5):282–288.

[15] 侯文菊,铁顺富,张世珍.“三江源”地区冬季积雪及气温降水的变化特征[J]. 青海科技,2010,17(1):60–66.

- [16] 董文杰,韦志刚,范丽军. 青藏高原东部牧区雪灾的气候特征分析[J]. 高原气象,2001,20(4):402-406.
- [17] 燕华云,贾绍凤. 近50a来青海水文要素变化特征分析[J]. 冰川冻土,2003,25(2):186-191.
- [18] David R, Easterling. Detection and attribution of climate extremes in the observed record [J]. Weather and Climate Extremes,2016,11:17-27.
- [19] Markus G, Donat. More extreme precipitation in the world's dry and wet regions [J]. Nature Climate Change,2016,6(5):508-513.
- [20] Peter Berg, Christopher Moseley, Jan O. Haerter. Strong increase in convective precipitation in response to higher temperatures [J]. Nature Geoscience,2013,6(3):181-185.
- [21] 葛咏,李强子,凌峰,等. “一带一路”关键节点区域极端气候风险评价及应对策略[J]. 中国科学院院刊,2021,36(2):170-178.
- [22] 吴佳,周波涛,徐影. 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[J]. 地球物理学报,2015,58(9):3048-3060.
- [23] Veronika Eyring. Overview of the Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6) experimental design and organization [J]. Geoscientific Model Development,2016,9(5):1937-1958.
- [24] 赵宗慈,罗勇,黄建斌. 从检验CMIP5气候模式看CMIP6地球系统模式的发展[J]. 气候变化研究进展,2018,14(6):643-648.
- [25] 周天军,陈梓明,邹立维,等. 中国地球气候系统模式的发展及其模拟和预估[J]. 气象学报,2020,78(3):332-350.
- [26] 王予,李惠心,王会军,等. 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,2021,79(3):369-386.
- [27] 向竣文,张利平,邓瑶,等. 基于CMIP6的中国主要地区极端气温/降水模拟能力评估及未来情景预估[J]. 武汉大学学报(工学版),2021,54(1):46-57+81.
- [28] 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[J/OL]. 北京师范大学学报(自然科学版),2021-11-21.
- [29] 廖荣伟,张冬斌,沈艳. 6种卫星降水产品在中国区域的精度特征评估[J]. 气象,2015,41(8):970-979.
- [30] Taylor K E. Summarizing multiple aspects of model performance in a single diagram [J]. J. Geophys. Res,2001,106(D7):7183-7192.
- [31] Taylor K E, Stouffer R J, Meehl G A. An overview of CMIP5 and the experiment design [J]. Bull. Amer. Meteor. Soc,2012,93:485-498.

Evaluation of CMIP6 Multi-model Simulation Ability of Extreme Precipitation in the Three-rivers in Winter Half Year

CAI Mingyu¹, CHENG Zhigang^{1,2}, WANG Junfeng³

(1. Chengdu University of Information Technology/Plateau Atmosphere and Environment Key Laboratory of Sichuan Province, Chengdu 610225, China; 2. Civil Aviation Flight University of China, Guanghan 618307, China; 3. Chinese People's Liberation Army 78127 Unit, Chengdu 610031, China)

Abstract: In order to evaluate the simulation ability of four global climate models (CMIP6) for extreme precipitation in the winter half year in the Three-rivers region, eight extreme precipitation indices were quantitatively analyzed by using Taylor plots and multiple statistical methods based on the monitoring data of stations and model historical simulation data. The results show that: (1) Most of the models and their ensemble averages can well simulate the interannual variation trend of extreme precipitation in the winter half year over the Three-rivers, but the model simulation results of the model are higher than the observed ones; (2) The model has a strong ability to simulate the spatial distribution of the eight extreme precipitation indices, and its spatial correlation coefficient is relatively high, most of which reach 0.8 and pass the significance of 0.01. (3) For different indices, the model simulation has a large difference, and its ability to simulate the temporal variability of extreme precipitation indices is significantly weaker than that of spatial distribution simulation. (4) For different stations, there is a significant difference in the simulation effect of the model on different stations, but the average MAM of the multi-mode set is still the best overall.

Keywords: extreme precipitation; evaluation; CMIP6 Models; the Three-rivers region; Winter half year