

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2025.06.002

基于秩评分方法的 CMIP6 全球气候模式对淮河流域降水和气温模拟能力评估

鞠 琴¹, 马啸赞¹, 刘艳丽², 严 锋³, 刘翠善², 王诗羊¹, 吕卓熙¹, 张乃丰⁴

(1. 河海大学水灾害防御全国重点实验室, 江苏 南京 210098; 2. 南京水利科学研究院水灾害防御全国重点实验室, 江苏 南京 210029; 3. 江苏省水文水资源勘测局南京分局, 江苏 南京 210008; 4. 安徽省·水利部淮河水利委员会水利科学研究院五道沟水文水资源实验站, 安徽 蚌埠 233000)

摘要: 基于国际耦合模式比较计划第六阶段(CMIP6)的 22 个全球气候模式对淮河流域 1985—2014 年降水和气温的模拟数据, 选取 7 个指标采用秩评分方法对各气候模式的模拟能力进行综合评估, 并讨论秩评分对各指标的敏感性, 同时进一步分析了优选气候模式的空间模拟能力。结果表明: 各气候模式对淮河流域月平均降水和气温的模拟能力差异较大, 整体上各气候模式对气温的模拟效果更优, 对月平均降水普遍存在高估; 综合秩评分前五的气候模式依次为 EC-Earth3(7.83)、EC-Earth3-Veg(7.66)、ACCESS-CM2(7.62)、TaiESM1(7.27)、FGOALS-f3-L(7.20); 降水的秩评分结果对标准差、Mann-Kendall 趋势分析的统计量 z 和斜率 β 的敏感性较高, 气温对 z 和 β 的敏感性较高, 不同秩评分指标组合对秩评分有一定的影响; 综合模拟能力相对最优的 EC-Earth3 模式能很好地再现降水空间分布特征, 而对气温空间分布特征模拟略差。

关键词: CMIP6 气候模式; 降水; 气温; 模拟能力; 敏感性分析; 淮河流域

中图分类号: P46 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-1980(2025)06-0012-09

Evaluation for CMIP6 global climate models in simulating precipitation and temperature over the Huaihe River Basin based on rank score method

JU Qin¹, MA Xiaozan¹, LIU Yanli², YAN Feng³, LIU Cuishan², WANG Shiyang¹, LYU Zhuoxi¹, ZHANG Naifeng⁴

(1. The National Key Laboratory of Water Disaster Prevention, Hohai University, Nanjing 210098, China;

2. The National Key Laboratory of Water Disaster Prevention, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China;

3. Nanjing Branch of Jiangsu Province Bureau of Hydrology and Water Resources Survey, Nanjing 210008, China;

4. Wudaogou Hydrology and Water Resources Experimental Station, Water Resources Research Institute of Anhui Province, Bengbu 233000, China)

Abstract: By using simulation data of precipitation and temperature in the Huaihe River Basin from 1985 to 2014 from 22 global climate models (GCMs) of the coupled model intercomparison project in phase 6 (CMIP6), the simulation performance of GCMs was comprehensively assessed by means of a rank score method with seven indexes selected, and the sensitivity of the scores to each index was analyzed. The spatial simulation performance of the selected optimal GCMs was evaluated. The results reveal significant differences in the simulation performance of monthly average precipitation and temperature in the Huaihe River Basin among the models. Overall, the GCMs perform better in simulating temperatures, but there is a general overestimation of monthly average precipitation. The top five models with the best comprehensive rank score are EC-Earth3 (7.83), EC-Earth3-Veg (7.66), ACCESS-CM2 (7.62), TaiESM1 (7.27), and FGOALS-f3-L (7.20). The rank score results for precipitation are most sensitive to the standard deviation, the statistics of Mann-Kendall trend analysis (z), and the slope of Mann-Kendall (β), while those for temperature show high sensitivity to z and β .

基金项目: 国家自然科学基金项目(52179013, 52325902); 江苏省基础研究计划自然科学基金项目(BK20240283); 安徽省·水利部淮河水利委员会水利科学研究院青年科技创新计划项目(KY202307)

作者简介: 鞠琴(1980—), 女, 副教授, 博士, 主要从事气候变化下水文响应研究。E-mail: juqin@hhu.edu.cn

引用本文: 鞠琴, 马啸赞, 刘艳丽, 等. 基于秩评分方法的 CMIP6 全球气候模式对淮河流域降水和气温模拟能力评估[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2025, 53(6): 12-20.

JU Qin, MA Xiaozan, LIU Yanli, et al. Evaluation for CMIP6 global climate models in simulating precipitation and temperature over the Huaihe River Basin based on rank score method [J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2025, 53(6): 12-20.

Different combinations of rank score indexes moderately influence the scores. The EC-Earth3 model, identified as the most optimal, accurately reproduces the spatial distribution of precipitation but performs slightly less effectively for the spatial distribution of temperature.

Key words: CMIP6 climate model; precipitation; temperature; simulation performance; sensitivity analysis; the Huaihe River Basin

近年来全球气候变化显著,极端天气事件频发,给人类社会和自然环境带来了巨大的考验^[1-7]。对此世界气候变化研究计划(WCRP)推出了一系列国际耦合模式比较计划(the coupled model intercomparison projects,CMIPs),目前已发展到第六阶段(CMIP6),CMIP6 集合了全球众多科研机构的气候模式,旨在利用各气候模式模拟试验的结果,预估不同辐射强迫情景下的气候变化趋势,以减缓气候变化并做好应对^[8-10],已在全球气候变化下的水文响应研究中得到了广泛应用^[11-13]。气候模式对气候变量的模拟主要是针对全球尺度,当具体反映到某一区域时,由于模型机理、初始分辨率的不同,气候变量的模拟会具有一定偏差^[14]。如 Ayugi 等^[15]通过 CMIP6 气候模式对东非地区平均降水和极端降水模拟能力的评估指出,部分气候模式仍存在较大不确定性;吴金雨等^[16]将黄河水源涵养区划分为 3 个区域,分别讨论 20 个 CMIP6 气候模式对其降水和气温的模拟能力,发现气候模式对气温的模拟效果优于降水,且在黄河源区的模拟效果最好;Fu 等^[17]提出了一种基于秩评分的优选方法,对 25 个气候模式在澳大利亚东南地区模拟的变量进行多秩评分指标评价,以得分表示气候模式的适用性;张佳怡等^[18]通过秩评分法评估 CMIP6 多模式在青藏高原的适用性,并采用优选的气候模式对未来气候变化进行了预估;吴琛等^[19]基于 19 个 CMIP6 气候模式利用 5 个精度指标对淮河中上游降水和气温的模拟能力进行了评估。然而,目前有关淮河流域气候模式评估方面的研究更多以子流域为研究对象,较少考虑整体流域,且鲜少采用秩评分法对各评分指标的敏感性进行分析。

淮河位于我国东部和中部地区,被视为中国南北方的自然分界线,且淮河流域地处我国南北气候过渡带,降水与气候带的南北波动密切相关,因此流域受全球气候变化影响显著。为更好地了解该区域的气候特点及未来气候变化,本文选取 22 个 CMIP6 气候模式,采用秩评分方法评估所选气候模式对淮河流域降水、气温的综合模拟能力,并对各评分指标的敏感性进行分析,同时基于优选的气候模式分析淮河流域降水、气温的空间分布特征,进一步探讨其在空间尺度上的模拟能力,以期为淮河流域气候变化下水资源规划管理提供参考。

1 研究区概况和研究数据

1.1 研究区概况

淮河流域(30°55'N~36°20'N,111°55'E~121°20'E)位于我国黄河流域和长江流域之间,淮河干流全长约 1 000 km,流域面积约 27 万 km²,地处南北气候过渡带,淮河以北属暖温带半湿润季风气候区,以南属亚热带湿润季风气候区,流域内气候温和湿润、雨量充沛,多年平均降水量约 900 mm。流域降水量年际变化较大,且年内分配不均,因此洪涝灾害频发,淮河也被称为我国最难治理的河流。流域内多为平原(图 1),耕地面积高达 1 333 万 hm²,粮食产量占我国总产量的 1/6,是我国重要的流域单元和粮食产区,特殊的地理位置导致其复杂的气候特征,降水和气温是气候变化的重要指标,研究 CMIP6 全球气候模式的模拟能力对该区域应对气候变化响应具有重要的指导意义^[20]。

1.2 研究数据

本文选用了 CMIP6 中 22 种气候模式 1985—2014 年的月尺度降水和气温数据(<https://esgf-node.llnl.gov/search/cmip6>),各模式基本信息见表 1。中国区域地面气象要素驱动数据集(China meteorological forcing dataset,CMFD)为基于遥感产品、大气强迫数据集、站点数据生成的网格数据^[21],数据为 NETCDF 格式,该数据集时间分辨率和空间分辨率(3 h、0.1°)较高,被广泛应用于气候变化及水文过程研究。本文选用同期 CMFD 作实测数据评估气候模式在淮河流域的模拟能力,由于不同气候模式空间分辨率存在差异,采用双

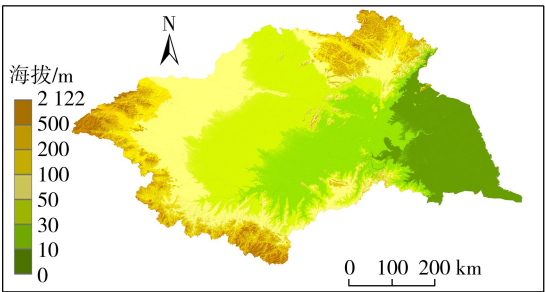


图 1 淮河流域地形

Fig. 1 Topography of the Huaihe River Basin

线性插值法^[22]将气候模式数据插值到 CMFD 数据格点上,降水单位统一为 mm/d,气温单位统一为℃。

表 1 CMIP6 气候模式基本信息

Table 1 Basic information of CMIP6 climate models

气候模式	研究机构	国家/地区	格点数(经向×纬向)	分辨率/(°)
ACCESS-CM2	ACCESS	澳大利亚	192×144	1.875
ACCESS-ESM1-5	ACCESS	澳大利亚	192×145	1.875
BCC-CSM2-MR	BCC	中国	320×160	1.125
CanESM5	CCCMA	加拿大	128×64	2.813
CESM2-WACCM	NCAR	美国	288×192	1.250
CMCC-CM2-SR5	CMCC	意大利	288×192	1.250
CNRM-CM6-1	CNRM	法国	252×128	1.428
EC-Earth3	EC-Earth	瑞典	504×256	0.714
EC-Earth3-Veg	EC-Earth	瑞典	512×256	0.703
FGOALS-f3-L	CAS	中国	360×144	1.000
GFDL-ESM4	GFDL	美国	288×180	1.250
INM-CM4-8	INN	俄罗斯	180×120	2.000
INM-CM5-0	INN	俄罗斯	180×120	2.000
IPSL-CM6A-LR	IPSL	法国	144×143	2.500
MIROC6	MIROC	日本	256×128	1.406
MPI-ESM1-2-HR	MPI	德国	384×192	0.938
MPI-ESM1-2-LR	MPI	德国	192×96	1.875
MPI-ESM2-0	MRI	日本	320×160	1.125
NESM3	NUIST	中国	193×96	1.865
NorESM2LM	NCC	挪威	144×96	2.500
SAM0-UNICON	SNU	韩国	306×193	1.176
TaiESM1	RCEC	中国台湾	288×192	1.250

2 研究方法

秩评分方法具有很强的适应性^[23-24],该方法通过计算气候变量模拟数据和实测数据的各类指标的拟合程度进行评分,给出直观的评价结果。为更好地评价气候模式在淮河流域的模拟能力,本文采用了 7 个秩评分指标(表 2)来综合选取在淮河流域对降水和气温模拟能力相对较好的模式。秩评分指标可根据计算方法分为误差评分指标和非误差评分指标,误差、非误差评分指标的得分 R 分别为

$$R = 10(X_{\max} - X)/(X_{\max} - X_{\min})$$

(1)

$$R = 10(X - X_{\min})/(X_{\max} - X_{\min})$$

(2)

对于均值、标准差、Mann-Kendall(MK)趋势分析的 z 值和 β 值、归一化均方根误差这类误差指标, X 为模拟值与实测值的相对误差(归一化均方根误差为其本身),这类指标 X 越小, R 越高;对于时间相关系数、空间相关系数这类非误差评分指标, X 为相关系数, X 越大, R 越高。

本文进行研究区气候模式适用性评估时,针对降水和气温分别计算不同模式各个秩评分指标的 R ,将每一模式多个秩评分指标 R 加权平均为对该气候变量的秩评分,各秩评分指标权重见表 2^[17],将降水和气温 R 求均值代表该气候模式的综合秩评分。秩评分分布在 0~10 之间,评分越高,代表模拟能力越好。

3 结果与分析

3.1 月平均降水量

由表 3 可知,各气候模式的 σ 、NRMSE 相差并不大,差异主要集中在均值、时空相关性和 MK 趋势分析上。淮河流域实测数据多年平均降水为 2.46 mm/d,而大部分气候模式高估了这一结果,仅有 6 个模式模拟的均值低于实测水平。由模拟结果可知,大部分气候模式高估了研究区 12—5 月的降水量,只有 EC-Earth3、

表 2 秩评分指标及权重

Table 2 Rank score indexes and weights

指标分类描述	秩评分指标	权重
对变量均值和标准差的模拟能力	均值	1.0
	标准差(σ)	1.0
	归一化均方根误差(NRMSE)	1.0
对变量时空相关性的模拟能力	时间相关系数(r_t)	1.0
	空间相关系数(r_s)	1.0
对变量变化趋势的模拟能力	MK 趋势分析统计量(z)	0.5
	MK 趋势分析斜率(β)	0.5

EC-Earth3-Veg 模式较好地模拟了该部分。各气候模式时间相关系数最大为 0.99,最小为 0.54,空间相关系数最大为 0.94,最小为 0.54,降水量时空分布整体模拟效果较好,其中时空相关系数最小值均为 CanESM5 模式,说明该气候模式对研究区降水时空分布模拟欠佳。据实测序列,1985—2014 年淮河流域年降水 MK 趋势分析为增加趋势,而部分气候模式模拟为减少趋势。

表 3 不同气候模式月平均降水量秩评分指标与秩评分

Table 3 Rank score indexes and rank scores of monthly average precipitation for different GCMs									
模式	均值/(mm/d)	σ /(mm/d)	NRMSE	r_t	r_s	z	β	秩评分	排名
CMFD	2.46	2.17				0.18	0.0049		
ACCESS-CM2	2.49	1.79	1.00	0.86	0.86	-0.11	0.0010	7.47	4
ACCESS-ESM1-5	2.73	2.75	1.02	0.97	0.80	-1.46	-0.0189	5.49	16
BCC-CSM2-MR	2.50	1.96	0.97	0.78	0.85	-1.71	-0.0112	6.51	8
CanESM5	3.04	2.31	1.22	0.54	0.54	0.50	-0.0001	3.84	22
CESM2-WACCM	3.52	2.72	1.25	0.85	0.91	1.00	0.0104	4.56	18
CMCC-CM2-SR5	3.66	2.70	1.21	0.85	0.72	0.57	0.0055	4.14	21
CNRM-CM6-1	2.05	1.78	0.97	0.82	0.89	-0.57	-0.0039	6.63	7
EC-Earth3	2.28	1.82	0.82	0.94	0.93	1.11	0.0078	8.36	1
EC-Earth3-Veg	2.33	1.78	0.82	0.95	0.94	1.21	0.0085	8.31	2
FGOALS-f3-L	2.48	1.95	1.03	0.85	0.89	2.03	0.0188	6.77	6
GFDL-ESM4	2.15	1.64	1.04	0.67	0.92	-0.46	-0.0081	5.62	13
INM-CM4-8	3.34	2.49	0.94	0.99	0.70	-1.32	-0.0102	5.54	15
INM-CM5-0	2.84	2.30	0.94	0.94	0.76	-0.18	-0.0059	7.41	5
IPSL-CM6A-LR	2.38	1.92	0.86	0.85	0.79	0.71	0.0056	7.95	3
MIROC6	3.18	2.29	1.14	0.75	0.77	-0.21	0.0028	5.81	12
MPI-ESM1-2-HR	2.79	2.13	1.17	0.56	0.86	-0.18	0.0004	6.02	10
MPI-ESM1-2-LR	2.88	2.04	1.07	0.66	0.66	0.79	0.0066	5.59	14
MRI-ESM2-0	1.80	1.44	0.98	0.80	0.91	2.32	0.0177	4.68	17
NESM3	3.62	2.18	1.20	0.71	0.64	0.96	0.0091	4.30	20
NorESM2-LM	3.30	2.47	1.13	0.82	0.56	-0.14	-0.0036	4.45	19
SAM0-UNICON	3.16	2.32	1.09	0.90	0.77	1.28	0.0050	6.27	9
TaiESM1	3.39	2.61	1.10	0.96	0.86	0.79	0.0091	5.87	11

各气候模式对气候变量的模拟能力不同,秩评分法通过对多种评分指标的评估,可以综合反映气候模式的模拟能力。研究区 22 个气候模式秩评分差异显著,最高分为 8.36,最低分为 3.84,不同气候模式对淮河流域月平均降水的模拟表现具有较大差异。综上,优选出研究区月平均降水秩评分前五的气候模式:EC-Earth3(8.36)、EC-Earth3-Veg(8.31)、IPSL-CM6A-LR(7.95)、ACCESS-CM2(7.47)、INM-CM5-0(7.41)。

3.2 月平均气温

由表 4 可知,绝大部分气候模式对气温的整体模拟效果较好,仅在空间分布上模拟欠佳。淮河流域实测多年平均气温 14.84℃,大部分气候模式低估了平均气温,但整体波动范围不大;各气候模式归一化均方根误差均小于 0.4,且时间相关系数都在 0.99 以上,且模拟结果显示各气候模式很好地呈现了气温年内变化趋势;气候模式对淮河流域气温空间分布的模拟效果较差,空间相关系数最高仅 0.75,最低为 0.42,只有 6 个模式空间相关系数达到 0.7 以上;同时绝大部分气候模式模拟出了 1985—2014 年的增温趋势,但不同气候模式间存在差异。总体上气候模式对淮河流域月平均气温的模拟效果良好,优于对月平均降水的模拟。

研究区各气候模式秩评分最高为 8.67,最低为 3.29,模拟效果差异显著;其中 22 个气候模式秩评分大于 6 的模式有 13 个,而月平均降水秩评分大于 6 的模式有 10 个,进一步说明了气候模式对淮河流域气温的模拟优于降水。月平均气温秩评分前五的模式: TaiESM1(8.67)、ACCESS-ESM1-5(8.11)、ACCESS-CM2(7.77)、CMCC-CM2-SR5(7.72)、FGOALS-f3-L(7.63)。

3.3 秩评分指标的敏感性分析

全球气候模式模拟气候变量的各项评分指标存在差异,如部分模式能精准模拟多年均值等指标,但在模拟空间分布上效果欠佳,因此秩评分受到影响。通过减少某种秩评分指标分析模式秩评分对该指标的敏感性,不仅可以直观地反映各气候模式对某一评分指标的模拟效果,而且能精确描述不同评分指标组合对气候模式秩评分的影响,为进一步的研究提供参考。

表 4 不同气候模式月平均气温秩评分指标与秩评分

Table 4 Rank score indexes and rank scores of monthly average temperature for different GCMs

模式	均值/℃	σ /℃	NRMSE	r_t	r_s	z	β	秩评分	排名
CMFD	14.84	9.17				3.60	0.0423		
ACCESS-CM2	13.65	9.30	0.23	0.998	0.64	3.25	0.0404	7.77	3
ACCESS-ESM1-5	14.40	9.59	0.20	0.996	0.68	3.57	0.0500	8.11	2
BCC-CSM2-MR	12.66	10.65	0.37	0.997	0.67	1.21	0.0203	3.82	20
CanESM5	12.80	10.82	0.37	0.997	0.42	3.18	0.0442	3.29	22
CESM2-WACCM	16.24	9.77	0.26	0.995	0.75	2.43	0.0295	6.28	12
CMCC-CM2-SR5	14.26	9.80	0.21	0.997	0.66	3.89	0.0373	7.72	4
CNRM-CM6-1	13.32	10.70	0.32	0.998	0.72	1.32	0.0215	5.09	18
EC-Earth3	13.52	9.36	0.25	0.997	0.75	2.25	0.0341	7.30	6
EC-Earth3-Veg	13.82	9.32	0.24	0.997	0.73	1.39	0.0181	7.00	8
FGOALS-f3-L	14.02	9.94	0.23	1.000	0.75	1.46	0.0193	7.63	5
GFDL-ESM4	12.79	9.44	0.29	0.996	0.75	3.00	0.0267	6.21	13
INM-CM4-8	13.88	9.00	0.21	0.998	0.50	1.86	0.0124	6.40	11
INM-CM5-0	13.43	9.34	0.23	0.998	0.49	1.28	0.0088	5.70	15
IPSL-CM6A-LR	12.81	11.29	0.39	0.996	0.67	2.78	0.0388	3.58	21
MIROC6	16.19	9.75	0.26	0.999	0.64	3.46	0.0343	7.06	7
MPI-ESM1-2-HR	14.49	9.61	0.24	0.993	0.69	0.29	0.0036	5.61	16
MPI-ESM1-2-LR	14.12	9.42	0.23	0.995	0.60	0.00	-0.0029	5.38	17
MRI-ESM2-0	14.84	10.38	0.24	0.998	0.66	0.18	0.0014	6.45	10
NESM3	12.99	9.92	0.31	0.994	0.54	2.57	0.0369	4.44	19
NorESM2-LM	15.97	9.47	0.25	0.994	0.59	2.68	0.0306	5.89	14
SAM0-UNICON	13.13	9.25	0.27	0.998	0.65	3.39	0.0298	6.94	9
TaiESM1	14.42	9.37	0.19	0.999	0.68	2.85	0.0288	8.67	1

由图 2(a)可知, σ 和 MK 趋势分析(z 和 β) 对秩评分的影响较大, 其他秩评分指标的影响在不同模式也均有波动。EC-Earth3 对月平均降水的模拟效果最好, 秩评分为 8.36, 且减少任一种评分指标后的评分都大于 8, 表明该模式对降水的模拟能力较好, 其中, 减少 σ 后该模式秩评分达到 9.00; EC-Earth3-Veg 展现出相同特点, 甚至减少 σ 后秩评分达到 9.05, 表明这 2 种气候模式在 σ 方面的模拟效果相对较差, 这与 NESM3 模式和实测数据的 σ 相对误差仅为 0.003 有关。

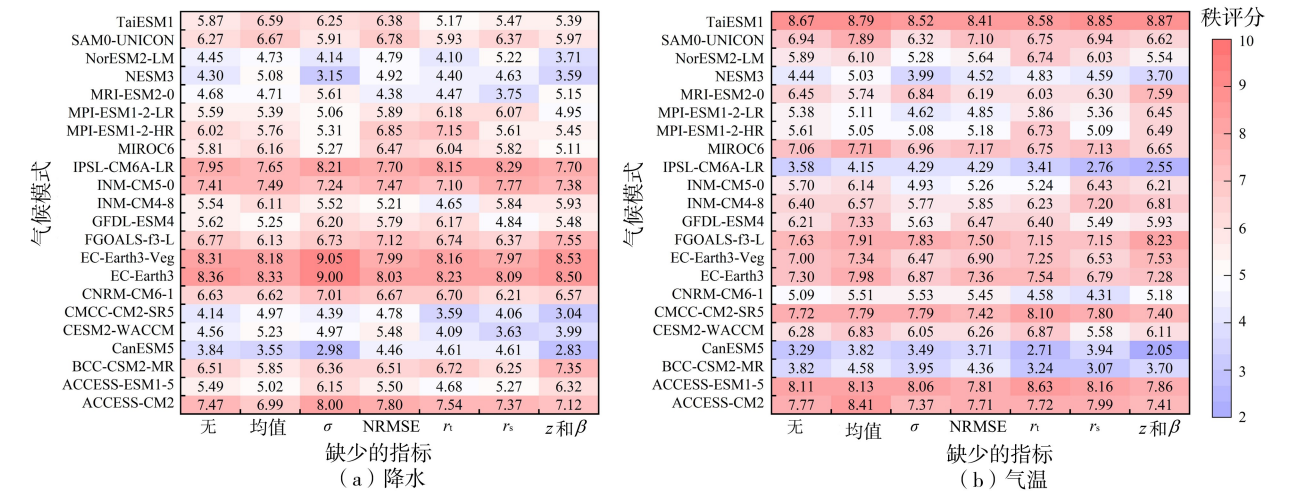


图 2 不同气候模式月平均降水和气温秩评分指标敏感性分析

Fig. 2 Sensitivity analysis of rank score indexes of monthly average precipitation and temperature for different GCMs

由图 2(b)可知, MK 趋势分析(z 和 β) 对月平均气温的评分影响最大, CanESM5、IPSL-CM6A-LR 在减少 MK 评分指标后秩评分分别下降了 1.24 和 1.03, MPI-ESM1-2-HR、MPI-ESM1-2-LR、MRI-ESM2-0 在减少 MK 评分指标后秩评分分别增长了 0.88、1.07 和 1.14, 说明各模式对淮河流域增温趋势的模拟差异较大。其中对气温模拟效果最好的模式 TaiESM1 减少任一指标时秩评分均较高, 该气候模式在考虑所有评分指标组合

时表现都较好。

综上,降水的秩评分结果对 σ 、MK 趋势分析(z 和 β) 指标的敏感性较高,气温对 MK 趋势分析(z 和 β) 的敏感性较高,不同秩评分指标组合对秩评分有一定的影响,进行模式优选时需要多方面考虑秩评分指标的选择。值得注意的是秩评分较高的气候模式对气候变量的各项评分指标模拟效果都很好。

3.4 综合评估

不同气候模式对月平均降水和气温的模拟效果不同,只有 ACCESS-CM2 模式同为降水和气温总评分前五,且部分模式对降水、气温的模拟效果存在较大差异,如 IPSL-CM6A-LR 对月平均降水、气温模拟的评分分别为 7.95、3.58, TaiESM1 对降水、气温模拟的评分分别为 5.87、8.67,因此通过综合评估优选出对淮河流域降水和气温综合模拟能力较好的模式。基于综合秩评分,从 22 个气候模式中优选出综合模拟能力最好的 5 个气候模式: EC-Earth3(7.83)、EC-Earth3-Veg(7.66)、ACCESS-CM2(7.62)、TaiESM1(7.27)、FGOALS-f3-L(7.20),表明这 5 个气候模式对淮河流域月平均降水和气温的模拟能力最好,在淮河流域的适用性最好。值得注意的是,EC-Earth3 气候模式在淮河流域秩评分的表现最佳,这一结果与向竣文等^[25] 在中国主要地区的气候模式评估结果一致,不同的是本文基于月平均降水和气温秩评分评估,而向竣文等^[25] 则侧重于极端降水和极端气温的泰勒图及各种统计参数评估,尽管评估变量与指标存在差异,但两项研究结果都表明, EC-Earth3 模式在多种气候变量下均表现出较强的适应性和稳健性,模拟能力相对最优。

3.5 不同气候模式的空间模拟能力

为进一步探讨气候模式在淮河流域空间上的模拟差异,选取综合秩评分最高(7.83)的 EC-Earth3 模式及最低(3.56)的 CanESM5 模式进行空间分析,并计算与降水、气温实测数据之间的绝对误差,分析这 2 个气候模式对淮河流域降水和气温模拟能力的空间差异特征。

淮河流域 1985—2014 年平均降水量的空间分布如图 3 所示。由实测数据(图 3(a))可见,淮河流域整体雨量丰富,但分布不均,多年平均降水量在 1.5~4.2 mm/d 之间,呈东南多、西北少的分布特征。淮河以南区域降水量明显增多(2.4~4.2 mm/d),这与淮河以南为亚热带湿润季风气候有关。流域最大降水量主要集中在南部大别山地区,这一特征取决于该区域地形抬升导致雨量增多, EC-Earth3、CanESM5 模式都很好地模拟出这一特点。EC-Earth3 模式多年平均降水空间分布与实测数据基本一致,很好地模拟了降水的空间变化特征,但在降水量上存在微小偏差(图 4(a)),低估了大部分区域降水量,局部高估。由表 5 可知, EC-Earth3 模式多年降水平均值与实测数据空间绝对误差分布在 -0.6~0.4 mm/d 范围内,其中面平均绝对误差仅为 0.21 mm/d,平均相对误差为 8.5%,多年降水平均值与实测数据的最大绝对误差和相对误差未超过 0.6 mm/d、24.4%,可见该模式空间尺度多年降水平均值与实测数据十分贴近,模拟效果很好。CanESM5 模式多年平均降水空间分布与实测数据相对偏差较大,该模式下淮河流域降水从西南向东北方向减少,与实际不符,且该模式降水量与实测降水量偏差较大(图 4(b)),对流域西部和中部降水存在明显高估。由表 5 可知, CanESM5 模式多年降水平均值与实测数据绝对误差分布在 -0.4~1.6 mm/d 范围内,面平均绝对误差为 0.61 mm/d,其中绝对误差在 0.6 mm/d 以上的栅格数占比为 54.44%,而 EC-Earth3 模式多年降水平均值与实测数据的最大绝对误差未超过 0.6 mm/d,可见该模式对淮河流域降水的空间分布模拟效果较差。

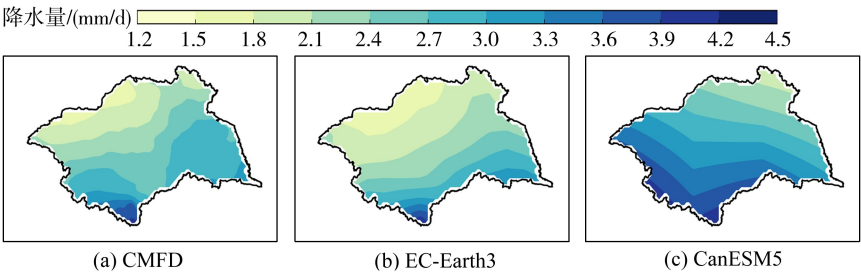


图 3 淮河流域多年平均降水量空间分布实测值与气候模式模拟值比较

Fig.3 Comparison of spatial distribution of multi-year average precipitation between actual observation and model simulation in the Huaihe River Basin

淮河流域 1985—2014 年平均气温的空间分布如图 5 所示。由实测数据(图 5(a))可见,淮河流域多年平均气温为 7.5~16.5℃,其中绝大部分位于 13.5~16.5℃ 范围内,低温集中在流域北部、西部及南部海拔

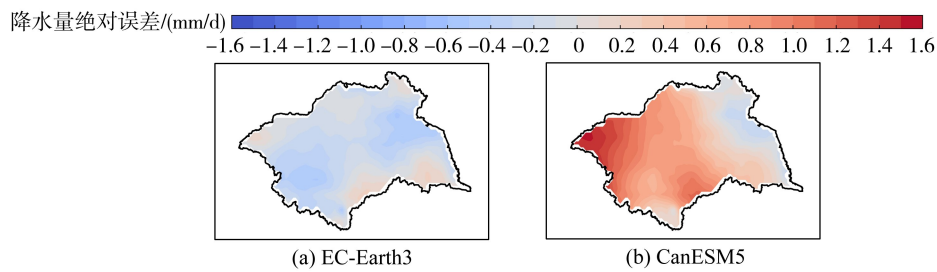


图 4 EC-Earth3 模式和 CanESM5 模式模拟淮河流域多年平均降水量绝对误差空间分布

Fig. 4 Spatial distribution of absolute error between simulated multi-year average precipitation by EC-Earth3 and CanESM5 models in the Huaihe River Basin

表 5 EC-Earth3 模式和 CanESM5 模式模拟多年平均降水、气温与实测值绝对误差统计

降水绝对误差/(mm/d)	EC-Earth3		CanESM5		气温绝对误差/℃	EC-Earth3		CanESM5	
	栅格个数	占比/%	栅格个数	占比/%		栅格个数	占比/%	栅格个数	占比/%
-0.6~-0.4	264	10.85	0	0	-5~-4	0	0	5	0.21
>-0.4~-0.2	913	37.51	79	3.25	>-4~-3	0	0	256	10.52
>-0.2~0	929	38.17	247	10.15	>-3~-2	202	8.30	1 341	55.09
>0~0.2	307	12.61	268	11.01	>-2~-1	1 638	67.30	492	20.21
>0.2~0.4	21	0.86	277	11.38	>-1~0	550	22.60	274	11.26
>0.4~0.6	0	0	238	9.78	>0~1	21	0.86	42	1.73
>0.6~0.8	0	0	578	23.75	>1~2	13	0.53	8	0.33
>0.8~1.0	0	0	323	13.27	>2~3	5	0.21	9	0.37
>1.0~1.2	0	0	212	8.71	>3~4	1	0.04	3	0.12
>1.2~1.4	0	0	129	5.30	>4~5	3	0.12	1	0.04
>1.4~1.6	0	0	83	3.41	>5~6	1	0.04	2	0.08
					>6~7	0	0	1	

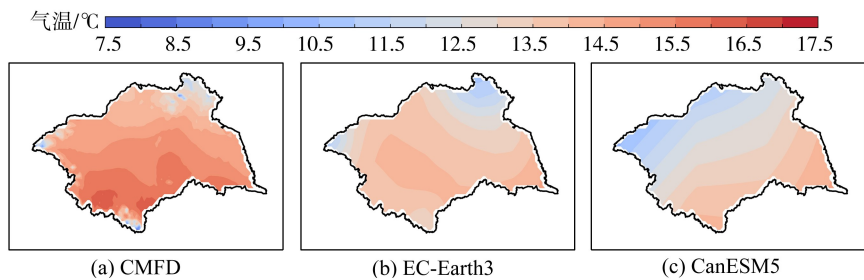


图 5 淮河流域多年平均气温空间分布模式模拟与观测比较

Fig. 5 Comparison of spatial distribution of multi-year average temperature between actual observation and model simulation in the Huaihe River Basin

较高的区域。流域内平均气温总体波动不大,呈南高北低分布。同降水特征相同,受气候影响淮河以南区域气温也略高于其他区域。EC-Earth3 模式多年平均气温分布与实测存在较大误差,该模式对流域西北部气温模拟较好,但对其他区域尤其淮河以南的气温存在低估(图 6(a))。由表 5 可知,EC-Earth3 模式多年平均气温与实测数据空间绝对误差集中在-3~6℃范围内,面平均绝对误差为 1.37℃,各区段中占比最大的是>-2~-1℃,为 67.30%。CanESM5 模式呈现流域东南向西北气温逐渐降低的空间变化特征,且随地理变化过渡明显,与实测数据不符。且该模式显然低估了流域中西部气温(图 6(b)),多年平均气温与实测数据空间绝对误差分布在-5~7℃范围内,误差波动范围大,面平均绝对误差为 2.11℃,各区段中占比最大的是>-3~-2℃,为 55.09%。可见 EC-Earth3、CanESM5 模式均低估了流域大部分区域的气温,而 CanESM5 模式气温绝对误差更大。

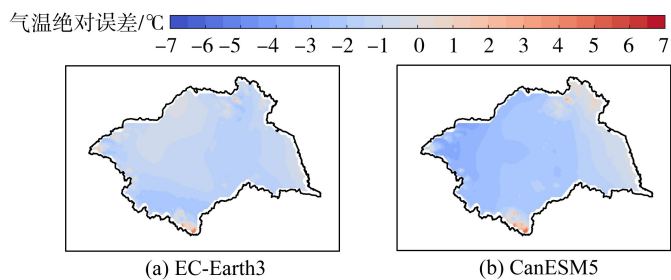


图 6 EC-Earth3 模式和 CanESM5 模式模拟淮河流域多年平均气温的绝对误差空间分布

Fig. 6 Spatial distribution of absolute error between simulated multi-year average temperature by EC-Earth3 and CanESM5 models in the Huaihe River Basin

4 结 论

- a. 各气候模式秩评分结果差异较大,整体上对气温的模拟表现优于降水,气温评分前五的模式评分分布在 7.63~8.67,降水评分前五的模式评分分布在 7.41~8.36,对降水普遍存在高估。降水和气温优选的气候模式并不完全相同,综合评估模拟能力较好的前 5 个气候模式为 EC-Earth3 (7.83)、EC-Earth3-Veg (7.66)、ACCESS-CM2(7.62)、TaiESM1(7.27)、FGOALS-f3-L(7.20)。
- b. 降水秩评分对标准差、MK 趋势分析(z 和 β)的敏感性较高,气温对 MK 趋势分析(z 和 β)指标的敏感性较高,整体上对降水和气温年际变化趋势的模拟差异较大。秩评分指标的不同组合会导致各模式评分不一致,进行模式优选时需要多方面考虑秩评分指标的选择。
- c. 对淮河流域模拟能力最优的 EC-Earth3 模式多年平均降水空间分布与实测基本一致,模拟效果较好,仅在降水量有微小偏差,明显优于 CanESM5 模式模拟效果;而 EC-Earth3 和 CanESM5 这 2 种气候模式对气温空间分布特征模拟略差,模拟值相对多年实测值在空间上均存在较大的低估现象,其中 CanESM5 模式绝对误差更大。

参考文献:

[1] IPCC. Climate change 2007:the physical science basis[M]. Cambridge:Cambridge University Press,2007.

[2] MAXWELL S L,BUTT N,MARON M,et al. Conservation implications of ecological responses to extreme weather and climate events[J]. Diversity and Distributions,2019,25(4):613-625.

[3] 徐凡奇,赵阳,王兴平,等. SDSM 在黄河流域水源涵养区降水和气温降尺度预报中的适用性[J]. 河海大学学报(自然科学版),2025,53(2):19-28. (XU Fanqi,ZHAO Yang,WANG Xingping,et al. Applicability evaluation of SDSM in the downscaling forecast of precipitation and temperature in the water conservation region of the Yellow River Basin[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2025,53(2):19-28. (in Chinese))

[4] 马昱斐,关铁生,刘艳丽,等. 极端来水下三峡水库汛期多目标协同竞争关系[J]. 南水北调与水利科技(中英文),2025,23(3):547-561. (MA Yufei,GUAN Tiesheng,LIU Yanli,et al. Multi-objective coordinated competition relationship of Three Gorges Reservoir during flood season under extreme inflow conditions[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology,2025,23(3):547-561. (in Chinese))

[5] 虞畅,金君良,王国庆,等. 黄河源区典型流域水文要素演变及其对气候变化的响应[J]. 南水北调与水利科技(中英文),2024,22(5):845-855. (YU Chang,JIN Junliang,WANG Guoqing,et al. Evolution of hydrological elements in typical watersheds of the Yellow River source area and their response to climate change[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology,2024,22(5):845-855. (in Chinese))

[6] 谢志高,贾文豪,王霞雨,等. 西江流域极端降水演变规律及其对洪水径流的影响[J]. 水利水电科技进展,2023,43(6):128-136. (XIE Zhigao,JIA Wenhao,WANG Xiayu,et al. Evolution characteristics of extreme rainfall and influence on flood runoff in Xijiang River Basin[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,2023,43(6):128-136. (in Chinese))

[7] GRADIYANTO Fernaldi,PARMANTORO Priyo Nugroho. Impact of climate change on Kupang River flow and hydrological extremes in Greater Pekalongan,Indonesia[J]. Water Science and Engineering,2025,18(1):69-77.

[8] IPCC. Climate change 2013:the physical science basis[M]. Cambridge:Cambridge University Press,2013.

[9] NASHWAN M S, SHAHID S. A novel framework for selecting general circulation models based on the spatial patterns of climate [J]. *International Journal of Climatology*, 2020, 40(10) : 4422-4443.

[10] 鞠琴, 吴金雨, 王兴平, 等. 机器学习算法在降水和气温多模式集成中的应用 [J]. *水资源保护*, 2024, 40(3) : 106-115. (JU Qin, WU Jinyu, WANG Xingping, et al. Application of machine learning algorithms in multimodal integration of precipitation and temperature [J]. *Water Resources Protection*, 2024, 40(3) : 106-115. (in Chinese))

[11] 娄伟, 李致家, 刘玉环. 多模式下泾河上游流域未来降水变化预估 [J]. *南水北调与水利科技(中英文)*, 2020, 18(6) : 1-16. (LOU Wei, LI Zhijia, LIU Yuhuan. Projection of future precipitation changes in upper Jinghe River basin using multiple models [J]. *South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology*, 2020, 18(6) : 1-16. (in Chinese))

[12] 刘文丰, 徐宗学, 李发鹏, 等. 基于秩评分方法定量评估大气环流模式在雅鲁藏布江流域的模拟能力 [J]. *北京师范大学学报(自然科学版)*, 2013, 49(增刊 1) : 304-311. (LIU Wenfeng, XU Zongxue, LI Fapeng, et al. GCM performance on simulating climatological factors in Yarlung Zangbo River Basin based on a ranked score method [J]. *Journal of Beijing Normal University (Natural Science)*, 2013, 49(Sup1) : 304-311. (in Chinese))

[13] 王磊, 曾思栋, 阳林翰, 等. 基于 CMIP6 的气候变化下汉江流域气象干旱特征研究 [J]. *水资源保护*, 2024, 40(5) : 39-45. (WANG Lei, ZENG Sidong, YANG Linhan, et al. CMIP6-based meteorological drought characteristic study under climate change in the Hanjiang River Basin [J]. *Water Resources Protection*, 2024, 40(5) : 39-45. (in Chinese))

[14] MOSS R H, EDMONDS J A, HIBBARD K A, et al. The next generation of scenarios for climate change research and assessment [J]. *Nature*, 2010, 463(7282) : 747-756.

[15] AYUGI B, JIANG Zhihong, ZHU Huanhuan, et al. Comparison of CMIP6 and CMIP5 models in simulating mean and extreme precipitation over East Africa [J]. *International Journal of Climatology*, 2021, 41(15) : 6474-6496.

[16] 吴金雨, 鞠琴, 刘小妮, 等. CMIP6 模式对黄河水源涵养区降水和气温模拟能力的评估 [J]. *水利水运工程学报*, 2023(6) : 1-12. (WU Jinyu, JU Qin, LIU Xiaoni, et al. Assessment of precipitation and temperature in the water conservation region of the Yellow River Basin using CMIP6 models [J]. *Hydro-Science and Engineering*, 2023(6) : 1-12. (in Chinese))

[17] FU Guobin, LIU Zhaoifei, CHARLES S P, et al. A score-based method for assessing the performance of GCMs: a case study of southeastern Australia [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2013, 118(10) : 4154-4167.

[18] 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]. *北京师范大学学报(自然科学版)*, 2022, 58(1) : 77-89. (ZHANG Jiayi, LUN Yurui, LIU Liu, et al. CMIP6 evaluation and projection of climate change in Tibetan Plateau [J]. *Journal of Beijing Normal University (Natural Science)*, 2022, 58(1) : 77-89. (in Chinese))

[19] 吴琛, 王景才, 邵俊博, 等. CMIP6 模式对淮河中上游流域气候要素模拟效果的评估研究 [J]. *人民珠江*, 2023, 44(10) : 105-116. (WU Chen, WANG Jingcai, SHAO Junbo, et al. Simulation effect evaluation of CMIP6 models on climatic elements in Huai River Basin [J]. *Pearl River*, 2023, 44(10) : 105-116. (in Chinese))

[20] 王怀军, 潘莹萍, 陈忠升. 1960—2014 年淮河流域极端气温和降水时空变化特征 [J]. *地理科学*, 2017, 37(12) : 1900-1908. (WANG Huaijun, PAN Yingping, CHEN Zhongsheng. Spatial and temporal patterns of temperature and precipitation extremes in the Huaihe River Basin, China in 1960-2014 [J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2017, 37(12) : 1900-1908. (in Chinese))

[21] HE Jie, YANG Kun, TANG Wenjun, et al. The first high-resolution meteorological forcing dataset for land process studies over China [J]. *Scientific Data*, 2020, 7(1) : 25.

[22] EYRING V, BONY S, MEEHL G A, et al. Overview of the Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6) experimental design and organization [J]. *Geoscientific Model Development*, 2016, 9(5) : 1937-1958.

[23] 蒋昕昊, 徐宗学, 刘兆飞, 等. 大气环流模式在长江流域的适用性评价 [J]. *长江流域资源与环境*, 2011, 20(增刊 1) : 51-58. (JIANG Xinhao, XU Zongxue, LIU Zhaoifei, et al. Evaluating the general circulation models over the Yangtze River Basin [J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2011, 20(Sup1) : 51-58. (in Chinese))

[24] 李发鹏, 徐宗学, 刘星才, 等. 大气环流模式在松花江流域的适用性评价 [J]. *水文*, 2011, 31(6) : 24-31. (LI Fapeng, XU Zongxue, LIU Xingcai, et al. Assessment on performance of different general circulation models in Songhuajiang River Basin [J]. *Journal of China Hydrology*, 2011, 31(6) : 24-31. (in Chinese))

[25] 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. (XIANG Junwen, ZHANG Liping, DENG Yao, et al. Projection and evaluation of extreme temperature and precipitation in major regions of China by CMIP6 models [J]. *Engineering Journal of Wuhan University*, 2021, 54(1) : 46-57. (in Chinese))