

CMIP6模式对黄河水源涵养区降水和气温模拟能力的评估

吴金雨, 鞠琴, 刘小妮, 连子旭, 张译尹, 段远强

Assessment of precipitation and temperature in the water conservation region of the Yellow River Basin using CMIP6 models

WU Jinyu, JU Qin, LIU Xiaoni, LIAN Zixu, ZHANG Yiyin, DUAN Yuanqiang

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.12170/20230215001>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

气候变化下黄河流域未来水资源趋势分析

The future water resources regime of the Yellow River basin in the context of climate change
水利水运工程学报. 2020(2): 1 <https://doi.org/10.12170/20200216001>

黄河流域典型流域水文气象变化与径流过程模拟

Typical hydro-meteorological changes and runoff process simulation in Yellow River basin
水利水运工程学报. 2019(5): 36 <https://doi.org/10.16198/j.cnki.1009-640X.2019.05.005>

深圳市近57年来降水时空演变特征分析

Tempo-spatial changes of precipitation of Shenzhen in last 57 years
水利水运工程学报. 2018(3): 24 <https://doi.org/10.16198/j.cnki.1009-640X.2018.03.004>

黄河流域砒砂岩区地貌-植被-侵蚀耦合研究进展

Research progress of spatial distribution about geomorphology-vegetation-water erosion in Pisha stone area of Yellow River
水利水运工程学报. 2020(4): 64 <https://doi.org/10.12170/20191229002>

近55年京津冀地区降水多尺度分析

Multi-scale analysis of precipitation in the Beijing-Tianjin-Hebei urban agglomeration in the past 55 years
水利水运工程学报. 2020(6): 23 <https://doi.org/10.12170/20191019001>

近50年辽宁省大雨与暴雨时空变化特征分析

Spatiotemporal variation characteristics of heavy rainfall and rainstorm in Liaoning Province over past 50 years
水利水运工程学报. 2017(1): 49 <https://doi.org/10.16198/j.cnki.1009-640X.2017.01.008>



扫码进入官网，阅读更多精彩文章



关注微信公众号，获得更多资讯信息

DOI:10.12170/20230215001

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))

CMIP6 模式对黄河水源涵养区降水和 气温模拟能力的评估

吴金雨^{1,2}, 鞠琴^{1,2}, 刘小妮^{1,2}, 连子旭^{1,2}, 张译尹^{1,2}, 段远强^{1,2}

(1. 河海大学 水灾害防御全国重点实验室, 江苏 南京 210098; 2. 长江保护与绿色发展研究院, 江苏 南京 210098)

摘要: 黄河流域水源涵养区是国家重要的生态屏障, 评估全球气候模式对黄河流域水源涵养区降水和气温的模拟能力至关重要。基于国际耦合模式比较计划第六阶段(CMIP6)的 20 个全球气候模式, 采用相对误差、相关系数、确定性系数和泰勒图等评估指标, 对黄河流域水源涵养区 1985—2014 年降水和气温的模拟能力进行综合评估, 并对优选出的模式进行空间分析。结果表明: 绝大多数气候模式对气温的模拟效果优于降水, 气温的相关系数高达 0.95 以上; 而对降水的模拟普遍存在高估现象, 确定性系数偏低。在对黄河流域水源涵养区分区研究中发现, 大部分模式对 3 个区域(黄河源区、唐乃亥-兰州以上流域和渭河-伊洛河流域)的模拟精度都有待进一步提高, 不同气候模式在不同分区上的模拟能力有差异, 总体上, 20 个模式在黄河源区模拟的降水和气温效果最好, 唐乃亥-兰州以上流域次之, 渭河-伊洛河流域最差。其中, EC-Earth3-Veg 模式在 3 个区域的模拟能力相对最优, 能基本再现降水和气温的年变化特征。降水模拟在黄河源区偏差最大, 唐乃亥-兰州以上流域次之, 渭河-伊洛河流域最好。气温模拟在唐乃亥-兰州以上流域偏差最大, 渭河-伊洛河流域次之, 黄河源区最好。研究结果可为黄河流域水资源管理及气候变化的研究提供参考。

关键词: 黄河流域; 水源涵养区; CMIP6 气候模式; 降水; 气温; 空间分布

中图分类号: P467

文献标志码: A

文章编号: 1009-640X(2023)06-0001-12

全球气候模式(Global Climate Models, GCMs)是模拟气候系统特征的重要工具^[1-4], 广泛应用于研究过去、现在和未来的气候变化^[5-6]。随着国际耦合模式比较计划(CMIP)的不断发展和完善, 与之前的 5 个 CMIP 计划相比, CMIP6 有更多的气候模式参与者、更加完整的设计试验和更为庞大的模拟数据, 并引入了新的 SSP-RCP 组合情景^[7-8]。学者们对全球气候模式的模拟能力开展了众多研究, 如向竣文等^[9]利用 CMIP6 气候模式对 1979—2014 年中国主要地区极端气温与极端降水特征的模拟能力进行评估, 发现其对中国不同地区的极端降水和气温的模拟能力差异较显著; Zhang 等^[10]利用 42 个 CMIP6 模式对新疆 1995—2014 年气温和降水的模拟能力进行了评估, 发现模式普遍高估了新疆地区降水量, 并且大多数模式高估了温度和降水的空间变异性; 陈炜等^[11]评估了 CMIP6 中的 45 个气候模式对青藏高原 1985—2014 年地表气温和降水的模拟能力, 发现大部分模式气温的模拟值偏低, 降水的模拟普遍偏高。由于气候模式本身存在系统误差, 在初始条件与参数化方案设置等方面存在差异, 对不同区域、不同领域的影响程度不同, 导致模拟效果存在一定的差异性^[12]。全球气候变暖对区域生态环境、水资源时空分配及水文循环过程影响

收稿日期: 2023-02-15

基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2021YFC3201104); 江苏省大学生创新创业项目(202310294012Z, 202310294176Y)

作者简介: 吴金雨(1999—), 男, 安徽安庆人, 硕士研究生, 主要从事水文及水资源研究。

E-mail: wjy1231230916@163.com 通信作者: 鞠琴(E-mail: juqin@hhu.edu.cn)

较大^[13]。因此,需要评估 CMIP6 气候模式的模拟能力,优选出比较适合区域气候变化模拟的模式,便于分析气候变化的影响。

本文以黄河流域水源涵养区为研究区域,考虑到生态系统对气候变化的脆弱性在区域之间和区域内部存在显著差异^[14],将研究区分为黄河源区、唐乃亥-兰州以上流域和渭河-伊洛河流域 3 个区域。基于 CMIP6 中 20 种全球气候模式,采用相对误差、相关系数、确定性系数和泰勒图等评价指标,对 3 个区域的降水 and 气温的模拟能力进行评估,优选出各区域模拟效果相对较好的气候模式,分析研究区降水、气温的空间分布特征,进一步认识气候变化对黄河流域水源涵养区的影响,为未来气候变化带来的风险和水资源变化趋势提供参考。

1 数据资料及评估方法

黄河流域水源涵养区位于黄河流域上游,面积为 30.44 万 km²,占黄河流域总面积的 38.3%,包括黄河兰州站以上、渭河华县站以上(不含泾河)和伊洛河流域^[15],是黄河流域主要的水量来源区。研究区域自西向东海拔变化明显,气候条件复杂,降水量空间分布不均(图 1)。

本文选用 20 种 CMIP6 气候模式的降水和气温作为模式数据(表 1),数据来源于 CMIP6 数据官网(<https://esgf-node.llnl.gov/projects/cmip6>)。采用中国区域地面气象要素驱动数据集(CMFD)^[16-17]评估各模式对降水和气温的模拟能力。该数据集时间分辨率为 3 h,空间分辨率为 0.1°。为了便于对比分析,基准期统一为 1985—2014 年,使用双线性插值法^[18]将 20 种气候模式数据空间分辨率降尺度为与 CMFD 数据相同,降水单位统一为 mm/d,温度单位统一为 °C。

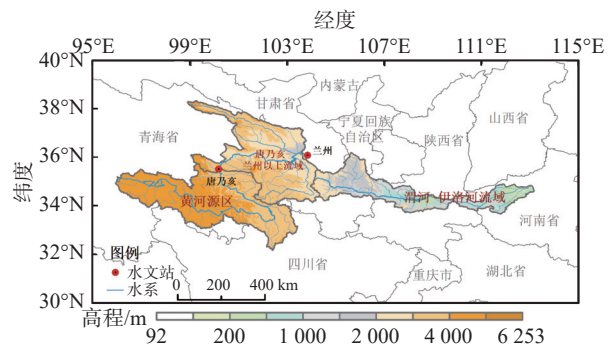


图 1 黄河流域水源涵养区概况

Fig. 1 A comprehensive overview of the Yellow River Basin water conservation region

表 1 CMIP6 全球气候模式基本信息

Tab. 1 Basic information of CMIP6 global climate models

序号	气候模式	研究机构	国家	经向格点数×纬向格点数	分辨率
1	ACCESS-CM2	ACCESS	澳大利亚	192×144	1.875°×1.250°
2	ACCESS-ESM1-5	ACCESS	澳大利亚	192×145	1.875°×1.241°
3	BCC-CSM2-MR	BCC, CMA	中国	320×160	1.125°×1.125°
4	BCC-ESM1	BCC, CMA	中国	128×64	2.813°×2.813°
5	CanESM5	CCCMA	加拿大	128×64	2.813°×2.813°
6	CESM2-WACCM	NCAR	美国	288×192	1.250°×0.938°
7	CMCC-CM2-SR5	CMCC	意大利	288×192	1.250°×0.938°
8	EC-Earth3-Veg	EC-Earth	瑞典	512×256	0.703°×0.703°
9	EC-Earth3-Veg-LR	EC-Earth	瑞典	320×160	1.125°×1.125°
10	GFDL-ESM4	GFDL	美国	288×180	1.250°×1.000°
11	INM-CM4-8	INM	俄罗斯	180×120	2.000°×1.500°
12	INM-CM5-0	INM	俄罗斯	180×120	2.000°×1.500°
13	IPSL-CM6A-LR	IPSL	法国	144×143	2.500°×1.259°
14	MIROC6	MIROC	日本	256×128	1.406°×1.406°
15	MPI-ESM1-2-HR	MPI	德国	384×192	0.938°×0.938°
16	MPI-ESM1-2-LR	MPI	德国	192×96	1.875°×1.875°
17	MRI-ESM2-0	MRI	日本	320×160	1.125°×1.125°
18	NorESM2-LM	NCC	挪威	144×96	2.500°×1.875°
19	NorESM2-MM	NCC	挪威	288×192	1.250°×0.938°
20	TaiESM1	RCEC	中国	288×192	1.250°×0.938°

为评估 20 种气候模式对黄河流域水源涵养区降水和气温的模拟能力, 利用几何平均法计算出 3 个子区域各模式基准期内的逐月面平均量, 选用降水相对误差、气温绝对误差、相关系数和确定性系数作为模拟能力评估指标, 结合泰勒图综合分析, 选取各区域降水和气温模拟能力相对较好的几种模式。

泰勒图^[19]将模式数据与观测数据之间的标准差(S)、均方根误差(R)和相关系数(r)在一张图上展示, 模式对应点与观测点距离越接近, 表明模拟能力越好。

2 研究结果

基于 CMIP6 的 20 种气候模式, 不同气候模式对黄河流域水源涵养区的 3 个区域(黄河源区、唐乃亥-兰州以上流域和渭河-伊洛河流域)的降水和气温的模拟能力差异比较大, 采用降水 and 气温的相关系数大于 0.6、确定性系数大于 0 作为选取模式的标准, 选取各区域降水和气温综合模拟能力均较好的气候模式。

2.1 黄河源区降水和气温模拟能力评估

由各气候模式对黄河源区降水和气温模拟结果与观测值多年平均值的对比结果(表 2)可知, 绝大多数模式对黄河源区的气温模拟能力表现非常好, 相关系数大于 0.95, 其中 ACCESS-ESM1-5 和 TaiESM1 的模式相关系数高达 0.978, EC-Earth3-Veg-LR 模式的相关系数最小(为 0.952), 确定性系数基本在 0.8 以上。绝大多数模式对降水的模拟效果相对较差, 相关系数为 0.5~0.9, EC-Earth3-Veg 模式的相关系数最大(为 0.892), 仅有 EC-Earth3-Veg-LR 和 IPSL-CM6A-LR 两个气候模式确定性系数超过 0.5。由图 2 可知, 不同模式对降水的模拟在泰勒图上分布较为离散, 差异性显著, 离观测点相对较近的模式分别为 BCC-CSM2-MR、EC-Earth3-Veg、EC-Earth3-Veg-LR 和 IPSL-CM6A-LR。不同模式对气温的模拟在泰勒图上分布较为集中, 距离观测点较近, 这表明模拟能力普遍较好。

表 2 GCMs 降水和气温模拟结果与观测值多年平均值的比较(黄河源区)

Tab. 2 Comparative analysis of precipitation and temperature patterns in Global Climate Model (GCM) simulations and observational data (the Yellow River source area)

模式名称	模拟值		降水相对 误差/%	温度绝对 误差/℃	相关系数		确定性系数	
	降水/(mm·d ⁻¹)	温度/℃			降水	温度	降水	温度
ACCESS-CM2	3.1	-1.9	109.9	0.5	0.721	0.976	-1.183	0.927
ACCESS-ESM1-5	3.2	-0.4	114.0	2.0	0.571	0.978	-1.478	0.892
BCC-CSM2-MR	2.3	-3.4	53.6	-1.0	0.840	0.968	0.294	0.898
BCC-ESM1	3.6	-0.6	142.8	1.8	0.839	0.971	-2.454	0.886
CanESM5	3.8	-0.7	154.9	1.7	0.863	0.977	-4.339	0.896
CESM2-WACCM	3.7	-2.1	144.4	0.3	0.873	0.976	-3.040	0.909
CMCC-CM2-SR5	2.1	-3.6	40.6	-1.2	0.844	0.971	-0.175	0.834
EC-Earth3-Veg	2.2	-3.8	46.8	-1.4	0.892	0.955	0.379	0.875
EC-Earth3-Veg-LR	2.0	-3.9	34.5	-1.5	0.878	0.952	0.520	0.858
GFDL-ESM4	2.4	-3.9	59.1	-1.5	0.825	0.970	0.069	0.897
INM-CM4-8	4.6	-1.7	206.7	0.7	0.791	0.974	-6.828	0.826
INM-CM5-0	4.7	-2.1	212.6	0.3	0.820	0.972	-7.465	0.839
IPSL-CM6A-LR	2.0	-7.9	30.9	-5.5	0.814	0.972	0.511	0.414
MIROC6	2.7	0.1	79.4	2.5	0.891	0.969	-0.419	0.827
MPI-ESM1-2-HR	2.7	-2.3	78.1	0.1	0.834	0.971	-0.347	0.937
MPI-ESM1-2-LR	3.1	-0.5	103.3	1.9	0.749	0.977	-1.284	0.899
MRI-ESM2-0	2.6	-3.6	75.1	-1.2	0.850	0.962	-0.213	0.878
NorESM2-LM	3.5	0.6	131.3	3.0	0.870	0.974	-2.637	0.800
NorESM2-MM	3.2	-2.1	112.6	0.3	0.875	0.973	-1.787	0.922
TaiESM1	3.3	-3.7	121.2	-1.3	0.890	0.978	-1.865	0.853

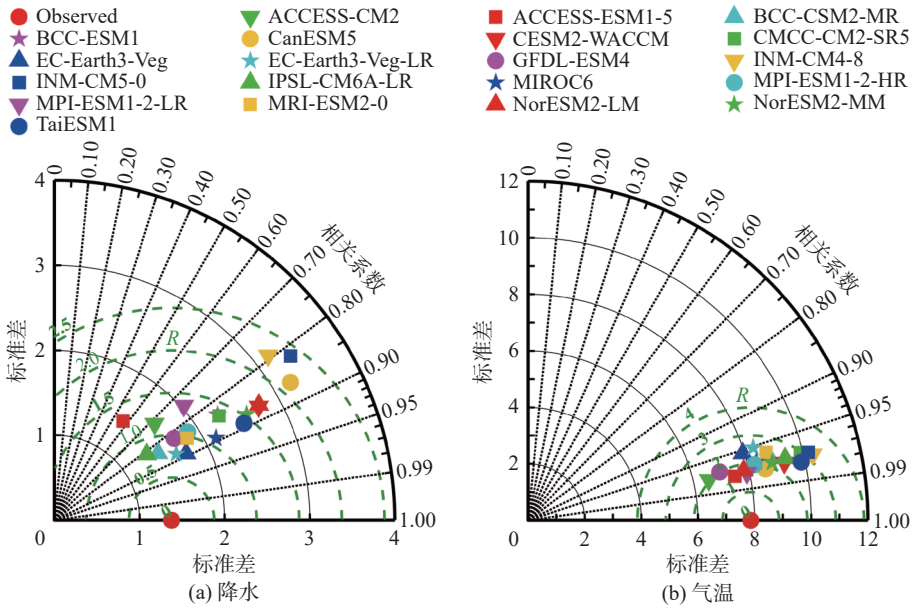


图2 20种CMIP6气候模式降水与气温泰勒图(黄河源区)

Fig. 2 Taylor plots of precipitation and temperature for 20 CMIP6 climate models (the Yellow River source area)

黄河源区 1985—2014 年观测多年面平均降水为 1.5 mm/d, 多年面平均气温为 $-2.4\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。从多年月平均降水(图 3(a))可见, 各气候模式模拟的降水年内月变化普遍大于观测值, 少数模式的降水年内变化与观测值不一致, 观测降水的年内变化趋势为先增后减, 在 6、7 月降水量达到最大, 但部分模式降水峰值出现在不连续的 2 个月。从 GCMs 多年月平均气温模拟与观测比较(图 3(b))可见, 多年月平均气温模拟的总体变化趋势与观测值基本一致, 误差最大的是 IPSL-CM6A-LR 模式。综上所述, 本文优选出在黄河源区模拟能力相对较好的 4 个气候模式, 分别为 BCC-CSM2-MR、EC-Earth3-Veg、EC-Earth3-Veg-LR、GFDL-ESM4。

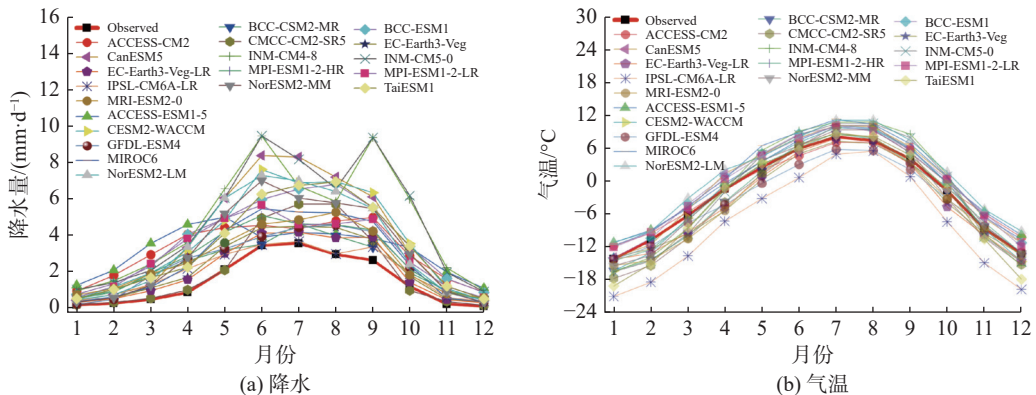


图3 基准期多年平均降水和气温年变化模拟与观测比较(黄河源区)

Fig. 3 Simulation and observation comparison of annual average precipitation and temperature changes in the reference period (the Yellow River source area)

2.2 唐乃亥-兰州以上流域降水和气温模拟能力评估

由各气候模式对唐乃亥-兰州以上流域降水和气温模拟结果与观测值多年平均值的对比结果(表 3)可知, 绝大多数模式对气温的模拟能力表现非常好, 相关系数与确定性系数大部分在 0.9 以上, 绝对误差最大的是 IPSL-CM6A-LR 模式(高达 $-4.2\text{ }^{\circ}\text{C}$), 最小的有 2 个模式(为 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$)。对比各模式对降水的模拟结果可知, 绝大多数模式的相关系数分布在 0.7~0.9, 最大的是 TaiESM1 模式(高达 0.874), 最小的是 ACCESS-

ESM1-5 模式(为 0.588)。确定性系数多为负数,最大的是 IPSL-CM6A-LR 模式(为 0.378);相对误差最大的是 INM-CM5-0 模式(高达 244.3%),最小的是 MRI-ESM2-0 模式(为 39.5%)。由图 4 可知,气温的模拟结果在泰勒图上的分布较密集,离观测点相对较近的模式有 CanESM5 和 NorESM2-MM,离观测点最远的是 CMCC-CM2-SR5 模式。降水的模拟结果在泰勒图分布较为离散,离观测点相对较近的模式有 EC-Earth3-Veg 和 IPSL-CM6A-LR,最远的是 INM-CM5-0 模式。

表 3 GCMs 降水和气温模拟结果与观测值多年平均值的比较(唐乃亥-兰州以上流域)

Tab. 3 Comparative analysis of precipitation and temperature patterns in Global Climate Model (GCM) simulations and observational data (the Tangnaihai-Lanzhou basin)

模式名称	模拟值		降水相对误差/%	温度绝对误差/℃	相关系数		确定性系数	
	降水/(mm·d ⁻¹)	温度/℃			降水	温度	降水	温度
ACCESS-CM2	2.2	1.3	87.2	0	0.709	0.978	-0.419	0.944
ACCESS-ESM1-5	2.2	1.9	86.1	0.6	0.588	0.980	-0.534	0.951
BCC-CSM2-MR	2.4	0.2	98.6	-1.1	0.791	0.973	-0.732	0.919
BCC-ESM1	3.3	2.4	177.3	1.1	0.817	0.980	-3.546	0.936
CanESM5	3.3	3.3	178.3	2.0	0.847	0.987	-5.476	0.916
CESM2-WACCM	3.4	2.5	179.8	1.2	0.858	0.983	-4.487	0.945
CMCC-CM2-SR5	2.4	-1.1	99.6	-2.4	0.833	0.970	-2.206	0.792
EC-Earth3-Veg	1.8	0.8	50.9	-0.5	0.844	0.970	0.308	0.938
EC-Earth3-Veg-LR	1.8	1.3	50.0	0	0.843	0.974	0.323	0.946
GFDL-ESM4	1.9	0.4	58.7	-0.9	0.788	0.979	0.038	0.944
INM-CM4-8	4.1	1.9	240.7	0.6	0.631	0.984	-9.698	0.924
INM-CM5-0	4.1	1.6	244.3	0.3	0.712	0.981	-9.066	0.934
IPSL-CM6A-LR	1.7	-2.9	45.3	-4.2	0.819	0.976	0.378	0.641
MIROC6	2.8	4.5	136.6	3.2	0.865	0.979	-2.210	0.811
MPI-ESM1-2-HR	2.1	2.6	73.4	1.3	0.702	0.979	-0.280	0.928
MPI-ESM1-2-LR	3.0	2.2	151.3	0.9	0.654	0.980	-2.744	0.950
MRI-ESM2-0	1.7	1.2	39.5	-0.1	0.735	0.970	0.326	0.926
NorESM2-LM	2.9	3.8	145.2	2.5	0.867	0.981	-3.086	0.872
NorESM2-MM	2.6	2.7	115.5	1.4	0.845	0.985	-1.910	0.941
TaiESM1	3.0	0.7	147.7	-0.6	0.874	0.983	-2.743	0.951

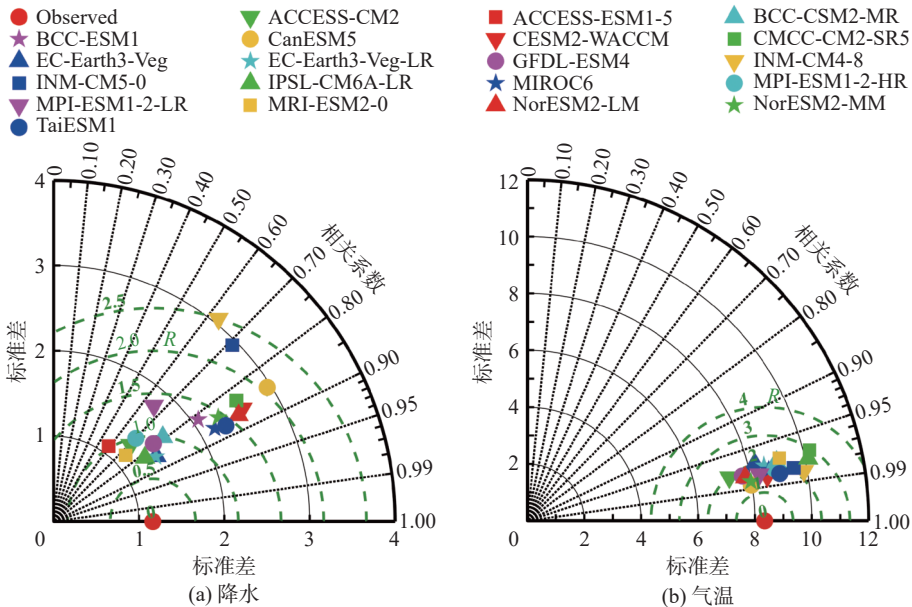


图 4 20 种 CMIP6 气候模式降水与气温泰勒图(唐乃亥-兰州以上流域)

Fig. 4 Taylor plots of precipitation and temperature for 20 CMIP6 climate models (the Tangnaihai-Lanzhou basin)

唐乃亥-兰州以上流域 1985—2014 年观测多年多年面平均气温为 1.3 °C, 面平均降水为 1.2 mm/d, 从 GCMs 多年月平均气温与降水的模拟与观测比较(图 5)可知, 多年月平均气温模拟的总体趋势与观测值基本一致, 夏季误差最大的是 MICRO6 模式, 冬季误差最大的是 IPSL-CM6A-LR 模式。从多年月平均降水来看, 模拟值都大于观测值, 观测降水的年内变化趋势为先增后减, 在 6、7 月降水量达到最大, 但部分模式降水峰值出现在不连续的 2 个月。综上所述, 本文优选出在唐乃亥-兰州以上流域模拟能力相对较好的 4 个气候模式, 分别为 EC-Earth3-Veg、EC-Earth3-Veg-LR、GFDL-ESM4、MRI-ESM2-0。

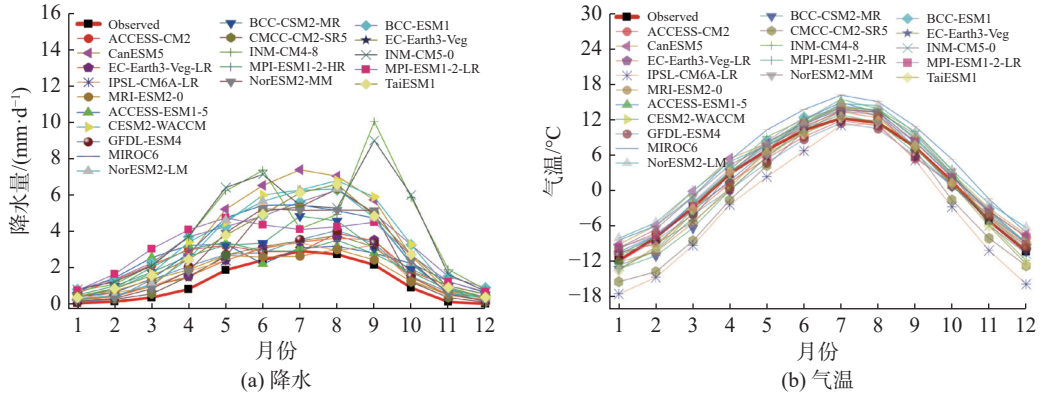


图 5 基准期多年平均降水和气温年变化模拟与观测比较(唐乃亥-兰州以上流域)

Fig. 5 Simulation and observation comparison of annual average precipitation and temperature changes in the reference period (the Tangnaihai-Lanzhou basin)

2.3 渭河-伊洛河流域降水和气温模拟能力评估

由各气候模式对渭河-伊洛河流域降水和气温模拟结果与观测值多年平均值的对比结果(表 4)可知: 绝大多数模式对气温的模拟能力表现非常好, 相关系数都在 0.95 以上, 大多数模式确定性系数在 0.9 以上, 绝对误差最大的是 CMCC-CM2-SR5 模式(高达-3.7 °C), 最小的是 TaiESM1 模式(为 0 °C)。绝大多数模式模拟降水的相关系数为 0.5~0.7, 最大的是 TaiESM1 模式(为 0.724), 最小的是 INM-CM5-0 模式(为 0.441), 相对误差最大的是 CMCC-CM2-SR5 模式(高达 141.3%), 最小的是 MRI-ESM2-0 模式(为-1.1%)。确定性系数多为负数, 最大的是 EC-Earth3-Veg 模式(为 0.204)。由图 6 可知, 气温的模拟结果在泰勒图上的分布较密集, CanESM5、INM-CM4-8、NorESM2-MM 和 TaiESM1 离观测点相对较近。各模式对降水的模拟结果在泰勒图上分布较为离散, 离观测点相对较近的模式有 ACCESS-CM2、ACCESS-ESM1-5、EC-Earth3-Veg 和 EC-Earth3-Veg-LR, 最远的是 CMCC-CM2-SR5 模式。

表 4 GCMs 降水和气温模拟结果与观测值多年平均值的比较(渭河-伊洛河流域)

Tab. 4 Comparative analysis of precipitation and temperature patterns in Global Climate Model (GCM) simulations and observational data (the Weihe-Yiluo River basin)

模式名称	模拟值		降水相对误差/%	温度绝对误差/°C	相关系数		确定性系数	
	降水/(mm·d ⁻¹)	温度/°C			降水	温度	降水	温度
ACCESS-CM2	2.2	8.4	38.1	-0.9	0.638	0.977	-0.023	0.943
ACCESS-ESM1-5	2.3	8.8	43.7	-0.5	0.691	0.983	-0.044	0.945
BCC-CSM2-MR	2.7	7.7	67.9	-1.6	0.616	0.976	-1.134	0.899
BCC-ESM1	3.7	7.6	128.8	-1.7	0.584	0.977	-3.078	0.872
CanESM5	3.5	10.6	118.1	1.3	0.648	0.982	-3.429	0.943
CESM2-WACCM	3.7	9.5	132.6	0.2	0.672	0.982	-3.518	0.959

续表 4

模式名称	模拟值		降水相对误差/%	温度绝对误差/℃	相关系数		确定性系数	
	降水/(mm·d ⁻¹)	温度/℃			降水	温度	降水	温度
CMCC-CM2-SR5	3.9	5.6	141.3	-3.7	0.597	0.972	-5.458	0.667
EC-Earth3-Veg	1.9	8.2	20.6	-1.1	0.663	0.971	0.204	0.919
EC-Earth3-Veg-LR	1.9	8.7	15.8	-0.6	0.607	0.977	0.171	0.938
GFDL-ESM4	1.8	7.8	15.6	-1.5	0.546	0.978	0.010	0.923
INM-CM4-8	3.4	10.7	113.7	1.4	0.583	0.984	-2.712	0.941
INM-CM5-0	3.1	10.5	90.8	1.2	0.441	0.980	-2.089	0.940
IPSL-CM6A-LR	2.1	6.3	30.4	-3.0	0.576	0.978	-0.162	0.769
MIROC6	3.2	11.1	99.1	1.8	0.547	0.972	-2.070	0.891
MPI-ESM1-2-HR	2.2	10.1	34.6	0.8	0.484	0.977	-0.164	0.933
MPI-ESM1-2-LR	3.0	9.1	89.3	-0.2	0.512	0.976	-1.284	0.952
MRI-ESM2-0	1.6	9.4	-1.1	0.1	0.514	0.976	0.116	0.923
NorESM2-LM	3.7	10.3	132.4	1.0	0.695	0.977	-3.594	0.940
NorESM2-MM	3.0	10.2	85.4	0.9	0.623	0.980	-1.847	0.949
TaiESM1	3.3	9.3	107.8	0	0.724	0.983	-1.964	0.963

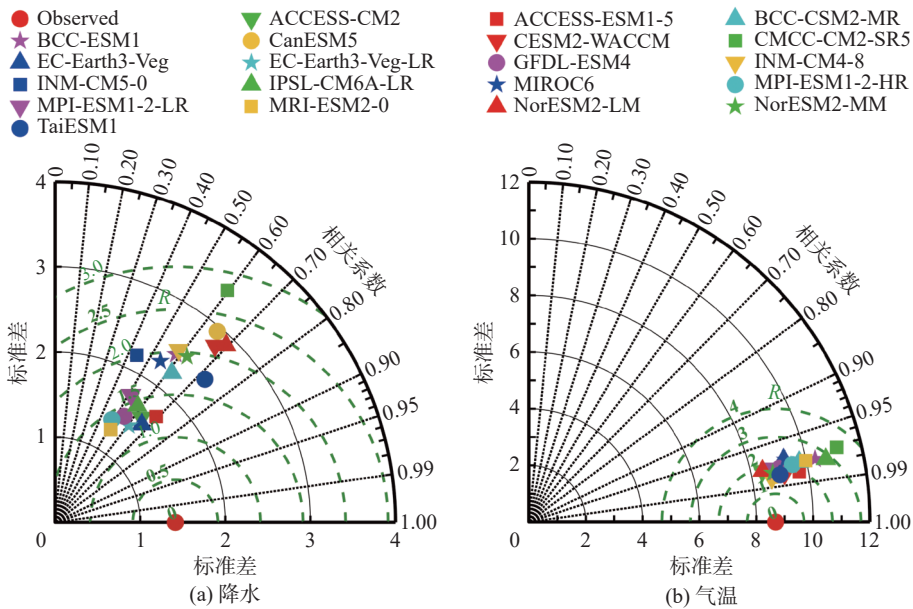


图 6 20 种 CMIP6 气候模式降水与气温泰勒图(渭河-伊洛河流域)

Fig. 6 Taylor plots of precipitation and temperature for 20 CMIP6 climate models (the Weihe-Yiluo River basin)

渭河-伊洛河流域 1985—2014 年观测多年面平均气温为 9.3 ℃, 多年面平均降水为 1.6 mm/d。从 GCMs 多年月平均气温与降水的模拟与观测比较(图 7)可知, 各模式模拟气温的月变化过程十分相近, 夏季误差最大的是 MRI-ESM2-0 模式, 冬季误差最大的是 CMCC-CM2-SR5 和 IPSL-CM6A-LR 模式。从模拟的多年月平均降水(图 7(a))来看, 对降水月变化过程的模拟存在一定的低估和高估现象。综上所述, 本文优选出在渭河-伊洛河流域模拟能力相对较好的 2 个气候模式, 分别为 EC-Earth3-Veg、EC-Earth3-Veg-LR。

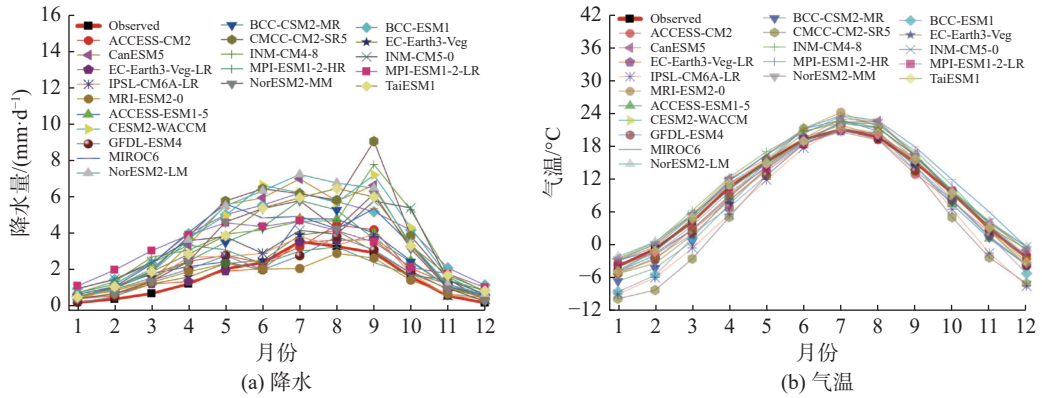


图 7 基准期多年平均降水 and 气温年变化模拟与观测比较(渭河-伊洛河流域)

Fig. 7 Simulation and observation comparison of annual average precipitation and temperature changes in the reference period (the Weihe-Yiluo River basin)

3 空间分析

基于选取模式的标准,选取黄河源区、唐乃亥-兰州以上流域和渭河-伊洛河流域综合模拟能力较好的气候模式(表 5)。其中,EC-Earth3-Veg-LR 模式对兰州以上流域模拟较好,但对渭河-伊洛河流域的模拟效果较差,EC-Earth3-Veg 模式在 3 个区域的模拟能力相对最好,因此,本文采用 EC-Earth3-Veg 模式对黄河流域水源涵养区的降水与气温空间分布特征进一步分析。

表 5 黄河流域水源涵养区降水和气温综合模拟能力较好的 GCMs

Tab. 5 GCMs with good comprehensive simulation ability of precipitation and temperature in three areas of the Yellow River Basin water conservation region

区域	模拟能力较好的GCMs
黄河源区	BCC-CSM2-MR、EC-Earth3-Veg、EC-Earth3-Veg-LR、GFDL-ESM4
唐乃亥-兰州以上流域	EC-Earth3-Veg、EC-Earth3-Veg-LR、GFDL-ESM4、MRI-ESM2-0
渭河-伊洛河流域	EC-Earth3-Veg、EC-Earth3-Veg-LR

3.1 降水分布特征

黄河流域水源涵养区基准期观测多年平均降水空间分布如图 8(a), EC-Earth3-Veg 模式基准期多年平均降水空间分布如图 8(b)。可见,总体上研究区域内观测多年平均降水呈现北少南多的分布特征,降水量为 0.4~2.4 mm/d,大部分区域为 0.4~1.6 mm/d。EC-Earth3-Veg 模式降水分布特征与观测值相近,表明该模式对黄河流域水源涵养区降水有一定的模拟能力,但降水量存在一定偏差,总体上模拟值高于观测值。

EC-Earth3-Veg 模式多年平均降水和观测多年平均降水的差值空间分布见图 9, 3 个区域各范围差值见表 6。可见,多年平均降水在黄河源区的差值分布在 0.3~1.3 mm/d,各区段中占比最大的是 0.6~0.9 mm/d,为 64.89%;在唐乃亥-兰州以上流域的差值分布在-0.3~1.2 mm/d,其中-0.3~0.3 mm/d 占 20.75%,各区段中占比最大的是 0.6~0.9 mm/d,为 51.54%;在渭河-伊洛河流域的差值分布在-0.3~1.2 mm/d,其中-0.3~0.3 mm/d 占 41.34%,各区段中占比最大的是 0.3~0.6 mm/d,为 47.74%。由此可见,空间上,EC-Earth3-Veg 模式在 3 个区域的降水模拟能力存在差异,呈现西高东低的分布特征,即在黄河源区偏差最大,唐乃亥-兰州以上流域次之,渭河-伊洛河流域最好。

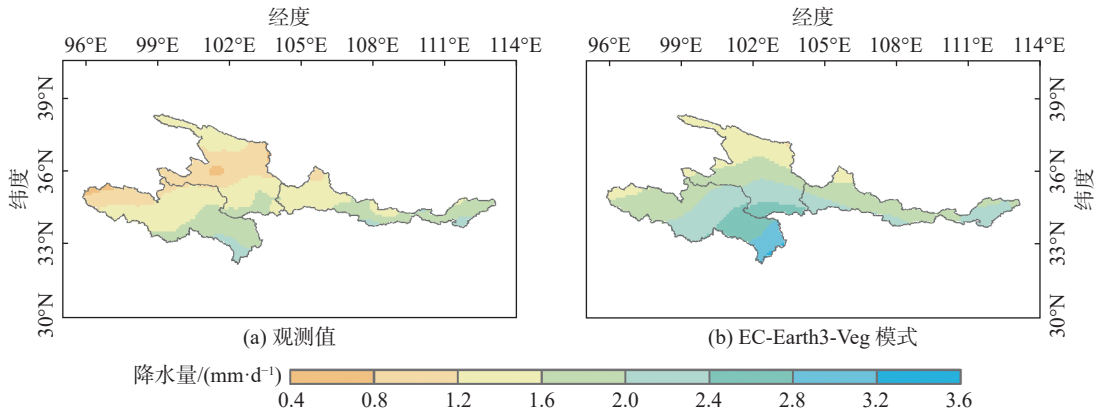


图 8 黄河流域水源涵养区基准期多年平均降水空间分布

Fig. 8 Spatial distribution of multi-year average precipitation in the reference period of the Yellow River Basin water conservation region

表 6 3 个区域 EC-Earth3-Veg 模拟的基准期降水量与观测值差值分布

Tab. 6 Distribution of differences of precipitation between EC-Earth3-Veg's simulation and observation in three areas

差值/ (mm·d ⁻¹)	黄河源区		唐乃亥-兰州以上流域		渭河-伊洛河流域	
	栅格数	占比/%	栅格数	占比/%	栅格数	占比/%
[-0.3,0)	0	0	40	3.86	47	6.84
[0, 0.3)	0	0	175	16.89	237	34.50
[0.3, 0.6)	246	21.17	204	19.69	328	47.74
[0.6, 0.9)	754	64.89	534	51.54	73	10.63
[0.9, 1.2)	155	13.34	83	8.01	2	0.29
[1.2, 1.3]	7	0.60	0	0	0	0
合计	1 162	100	1 036	100	687	100

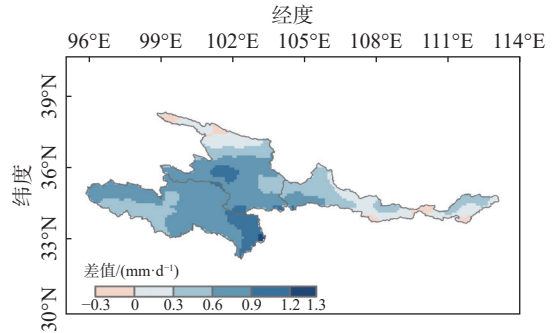


图 9 EC-Earth3-Veg 模拟的基准期降水量与观测值的差异
Fig. 9 Comparison of the values of precipitation in reference period between EC-Earth3-Veg's simulation and observation

3.2 气温分布特征

黄河流域水源涵养区基准期观测多年平均气温空间分布见图 10(a), EC-Earth3-Veg 模式基准期多年平均气温空间分布见图 10(b)。可见, 观测多年平均气温为-10~16 °C, 呈现西低东高的分布特征, 且西部区域与东部区域温差较大。EC-Earth3-Veg 模式多年平均气温空间分布特征与观测值相近, 但随地理变化过渡更明显, 主要温度范围在-8~12 °C。总体上模拟值分布更加紧凑。

EC-Earth3-Veg 模式多年平均气温和观测多年平均气温的差值空间分布见图 11, 3 个区域各范围差值见表 7。可见, 多年平均气温在黄河源区的差值分布在-8~6 °C, 其中-2~2 °C 占 60.68%, 各区段中占比最大的是-2~0 °C, 为 45.96%; 在唐乃亥-兰州以上流域的差值分布在-8~16 °C, 其中-2~2 °C 占 43.05%, -4~4 °C 占 78.38%, 各区段中占比最大的是-2~0 °C, 为 23.84%; 在渭河-伊洛河流域的差值分布在-6~16 °C, 其中-2~2 °C 占 47.74%, -4~4 °C 占 87.19%, 各区段中占比最大的是-4~-2 °C, 为 31.44%。由此得出, 空间上, EC-Earth3-Veg 模式在黄河流域水源涵养区 3 个区域的气温模拟能力存在差异, 即在唐乃亥-兰州以上流域偏差最大, 渭河-伊洛河流域次之, 黄河源区最好。

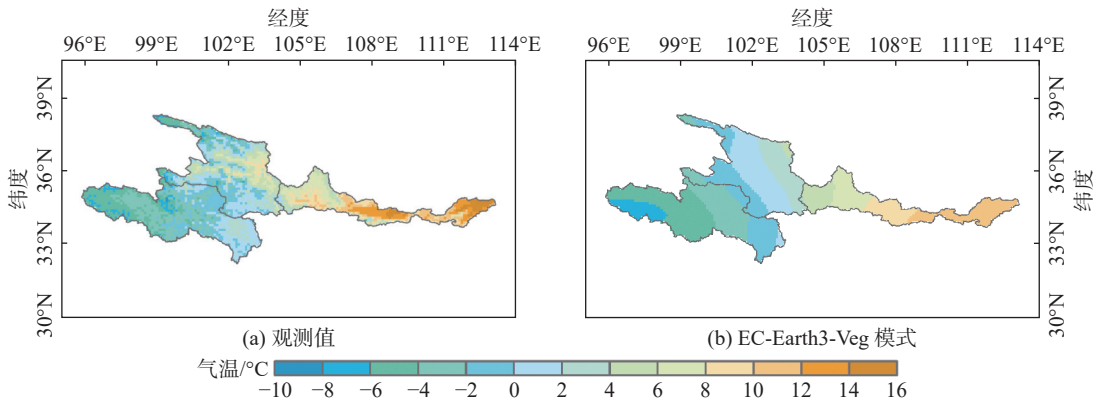


图 10 黄河流域水源涵养区基准期多年平均气温空间分布

Fig. 10 Spatial distribution of multi-year average temperature in the reference period of the Yellow River Basin water conservation region

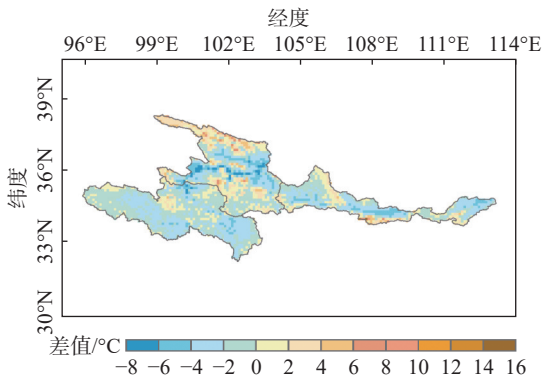


图 11 EC-Earth3-Veg 模拟的基准期气温与观测值的差值

Fig. 11 Comparison of the values of temperature in reference period between EC-Earth3-Veg's simulation and observation

表 7 3 个区域 EC-Earth3-Veg 模拟的基准期气温与观测值差值分布

Tab. 7 Distribution of differences of temperature between EC-Earth3-Veg's simulation and observation in three areas

差值/°C	黄河源区		唐乃亥-兰州以上流域		渭河-伊洛河流域	
	栅格数	占比/%	栅格数	占比/%	栅格数	占比/%
[-8, -6)	5	0.43	34	3.28	0	0
[-6, -4)	38	3.27	109	10.52	66	9.61
[-4, -2)	394	33.91	202	19.50	216	31.44
[-2, 0)	534	45.96	247	23.84	198	28.82
[0, 2)	171	14.72	199	19.21	130	18.92
[2, 4)	19	1.64	164	15.83	55	8.01
[4, 6)	1	0.09	60	5.79	15	2.18
[6, 8)	0	0	18	1.74	5	0.73
[8, 16]	0	0	3	0.29	2	0.29
合计	1 162	100	1 036	100	687	100

4 结 语

本文将黄河流域水源涵养区分成黄河源区、渭河-伊洛河流域、唐乃亥-兰州以上流域 3 个子区域,采用相对误差、相关系数、确定性系数和泰勒图等评估指标综合评估 20 种 CMIP6 气候模式的模拟能力,并利用优选的气候模式分析黄河流域水源涵养区降水、气温的空间分布特征,主要结论如下:

(1)气候模式对气温模拟的相关系数均在 0.95 以上,各区域大多数模式确定性系数在 0.9 以上,泰勒图上的偏差较小。降水普遍存在高估,且相对误差较大,确定性系数多为负数,泰勒图上的偏差较大。总体上,气候模式对气温的模拟效果优于降水,部分模式可以再现黄河流域水源涵养区的气温和降水的年变化特征。

(2)20 个模式在黄河源区的模拟能力最好,唐乃亥-兰州以上流域次之,渭河-伊洛河流域最差。基于选取模式的标准,分别选取了黄河源区、唐乃亥-兰州以上流域和渭河-伊洛河流域综合模拟能力较好的气候模式。经综合比较,EC-Earth3-Veg 模式在 3 个区域的模拟能力最好,以此模式可以进一步分析黄河流域水源涵养区降水和气温的空间分布特征。

(3)EC-Earth3-Veg模式模拟的降水和气温与多年观测值在空间分布上均存在一定差异。降水总体上模拟值高于观测值,在黄河源区偏差最大,唐乃亥-兰州以上流域次之,渭河-伊洛河流域最好。气温在唐乃亥-兰州以上流域偏差最大,渭河-伊洛河流域次之,黄河源区最好。

参 考 文 献:

- [1] LI H X, CHEN H P, WANG H J, et al. Future precipitation changes over China under 1.5 °C and 2.0 °C global warming targets by using CORDEX regional climate models[J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 640/641: 543-554.
- [2] RIVERA J A, ARNOULD G. Evaluation of the ability of CMIP6 models to simulate precipitation over Southwestern South America: climatic features and long-term trends (1901—2014)[J]. *Atmospheric Research*, 2020, 241: 104953.
- [3] GIORGI F, GAO X J. Regional earth system modeling: review and future directions[J]. *Atmospheric and Oceanic Science Letters*, 2018, 11(2): 189-197.
- [4] GAO X J, WU J, SHI Y, ET AL. Future changes in thermal comfort conditions over China based on multi-RegCM4simulations[J]. *Atmospheric and Oceanic Science Letters*, 2018, 11(4): 291-299.
- [5] GUO Hao, BAO Anming, CHEN Tao, et al. Assessment of CMIP6 in simulating precipitation over arid Central Asia[J]. *Atmospheric Research*, 2021, 252: 105451.
- [6] YAZDANDOOST F, MORADIAN S, IZADI A, et al. Evaluation of CMIP6 precipitation simulations across different climatic zones: uncertainty and model intercomparison[J]. *Atmospheric Research*, 2021, 250: 105369.
- [7] 邓鹏,徐进超,王欢. 基于CMIP6的气候变化对鄱阳湖流域径流影响研究[J]. 水利水运工程学报, 2023(4): 71-80. (DENG Peng, XU Jinchao, WANG Huan. Study on the impact of climate change by CMIP6 on the rainfall-runoff process of Poyang Lake Basin[J]. *Hydro-Science and Engineering*, 2023(4): 71-80. (in Chinese))
- [8] 李纯,姜彤,王艳君,等. 基于CMIP6模式的黄河上游地区未来气温模拟预估[J]. 冰川冻土, 2022, 44(1): 171-178. (LI Chun, JIANG Tong, WANG Yanjun, et al. Simulation and estimation of future air temperature in upper basin of the Yellow River based on CMIP6 models[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2022, 44(1): 171-178. (in Chinese))
- [9] 向峻文,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. (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, 81. (in Chinese))
- [10] ZHANG Xiaolu, HUA Lijuan, JIANG Dabang. Assessment of CMIP6 model performance for temperature and precipitation in Xinjiang, China[J]. *Atmospheric and Oceanic Science Letters*, 2022, 15(2): 39-46.
- [11] 陈炜,姜大膀,王晓欣. CMIP6模式对青藏高原气候的模拟能力评估与预估研究[J]. 高原气象, 2021, 40(6): 1455-1469. (CHEN Wei, JIANG Dabang, WANG Xiaoxin. Evaluation and projection of CMIP6 models for climate over the Qinghai-Xizang (Tibetan) plateau[J]. *Plateau Meteorology*, 2021, 40(6): 1455-1469. (in Chinese))
- [12] 吴健,夏军,曾思栋,等. 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, 2023, 32(1): 137-150. (WU Jian, XIA Jun, ZENG Sidong, et al. Evaluation of the performance of CMIP6 models and future changes over the Yangtze River Basin[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2023, 32(1): 137-150. (in Chinese))
- [13] 王小杰,姜仁贵,解建仓,等. 渭河干流径流变化趋势及突变分析[J]. 水利水运工程学报, 2019(2): 33-40. (WANG Xiaojie, JIANG Rengui, XIE Jiancang, et al. Analysis of variation trend and abrupt point of runoff in the mainstream of Weihe River Basin[J]. *Hydro-Science and Engineering*, 2019(2): 33-40. (in Chinese))
- [14] 王蕾,张百超,石英,等. IPCC AR6报告关于气候变化影响和风险主要结论的解读[J]. 气候变化研究进展, 2022, 18(4): 389-394. (WANG Lei, ZHANG Baichao, SHI Ying, et al. Interpretation of the IPCC AR6 on the impacts and risks of climate change[J]. *Climate Change Research*, 2022, 18(4): 389-394. (in Chinese))
- [15] 王国庆. 黄河流域水源涵养区界定[J]. 水文, 2022, 42(2): 65. (WANG Guoqing. Definition of water conservation areas in the Yellow River Basin[J]. *Journal of China Hydrology*, 2022, 42(2): 65. (in Chinese))

- [16] HE J, YANG K, TANG W J, et al. The first high-resolution meteorological forcing dataset for land process studies over China[J]. *Scientific Data*, 2020, 7: 25.
- [17] YANG K, HE J, TANG W J, et al. On downward shortwave and longwave radiations over high altitude regions: observation and modeling in the Tibetan Plateau[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2010, 150(1): 38-46.
- [18] 饶莉娟, 王健林, 张星. 不同插值方法对精细化预报产品在青岛地区的检验比较[J]. *中国农学通报*, 2020, 36(32): 100-108. (RAO Lijuan, WANG Jianlin, ZHANG Xing. Different interpolation methods: comparison for refined forecast products in Qingdao area[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2020, 36(32): 100-108. (in Chinese))
- [19] TAYLOR K E. Summarizing multiple aspects of model performance in a single diagram[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2001, 106(D7): 7183-7192.

Assessment of precipitation and temperature in the water conservation region of the Yellow River Basin using CMIP6 models

WU Jinyu^{1,2}, JU Qin^{1,2}, LIU Xiaoni^{1,2}, LIAN Zixu^{1,2}, ZHANG Yiyin^{1,2}, DUAN Yuanqiang^{1,2}

(1. *The National Key Laboratory of Water Disaster Prevention, Hohai University, Nanjing 210098, China*; 2. *Yangtze Institute for Conservation and Development, Nanjing 210098, China*)

Abstract: It is essential to evaluate the performance of global climate models in simulating precipitation and temperature in the water conservation region of the Yellow River Basin, which serves as a vital ecological barrier. This study employs 20 global climate models from the sixth phase of the International Coupled Model Comparison Program (CMIP6) to comprehensively assess the simulation accuracy of precipitation and temperature in the Yellow River Basin water conservation region from 1985 to 2014. Evaluation metrics such as relative error, correlation coefficient, deterministic coefficient, and Taylor diagram are utilized, and spatial analysis is conducted on the selected models. The findings reveal that the majority of climate models perform better in simulating temperature than precipitation, with temperature exhibiting a correlation coefficient above 0.95. On the other hand, precipitation tends to be overestimated, and the deterministic coefficient is low. Within the Yellow River Basin water conservation region, the accuracy of most models in all three subareas—the Yellow River source area, the Tangnaihais-Lanzhou basin, and the Weihe-Yiluo River basin—requires further improvement. Additionally, different climate models exhibit varying simulation abilities across different subareas. Generally, the 20 models exhibit the most accurate simulation of precipitation and temperature in the Yellow River source area, followed by the Tangnaihais-Lanzhou basin, and the least accurate in the Weihe-Yiluo River basin. Notably, the EC-Earth3-Veg model demonstrates relatively superior simulation capabilities in all three regions and can effectively reproduce the annual variation characteristics of precipitation and temperature. Spatial distribution of the simulated values and multi-year average observed values exhibit some variability. Precipitation deviates most significantly in the Yellow River source area, followed by the Tangnaihais-Lanzhou basin, while the Weihe-Yiluo River basin shows the best agreement. Regarding temperature deviation, the Tangnaihais-Lanzhou basin exhibits the highest deviation, followed by the Weihe-Yiluo River basin, while the Yellow River source area shows the best agreement. The outcomes of this study can provide valuable insights for water resources management and climate change research in the Yellow River Basin.

Key words: the Yellow River Basin; water conservation region; CMIP6 climate models; precipitation; temperature; spatial distribution