

# CMIP6模式新情景 ( SSP-RCP ) 概述 及其在淮河流域的应用

姜彤<sup>1, 3</sup> 吕嫣冉<sup>1</sup> 黄金龙<sup>1</sup> 王艳君<sup>1</sup> 苏布达<sup>1, 2, 3</sup> 陶辉<sup>3</sup>

( 1 南京信息工程大学地理科学学院/灾害风险管理研究院, 南京 210044; 2 国家气候中心, 中国气象局, 北京 100081;  
3 中国科学院新疆生态与地理研究所荒漠与绿洲生态国家重点实验室, 乌鲁木齐 830011 )

**摘要:** 新一轮国际耦合模式比较计划第六阶段 ( CMIP6 ) 将为气候变化预估领域提供更为丰富的全球气候模式数据, 其共享社会经济路径 ( SSPs ) 与典型浓度路径 ( RCPs ) 的科学组合情景融入了社会经济发展的影响, 将提供更可靠的气候变化可能结果。首先对选择包含7个组合情景 ( SSP1-1.9, SSP1-2.6, SSP4-3.4, SSP2-4.5, SSP4-6.0, SSP3-7.0和SSP5-8.5 ) 的5个CMIP6全球模式进行降尺度处理, 并基于此数据开展2021—2100年淮河流域年均气温、降水的时空演变分析。2021—2100年, 除SSP1-1.9情景外, 其余6个组合情景下, 年平均气温都呈递增趋势, 且上升幅度随辐射强迫的增加而增加; 淮河流域年降水都在增加, 降水增加区域主要位于流域中部, 且流域极端洪涝事件更易发生。对比CMIP5预估结果发现, CMIP6情景下未来淮河流域气温增速更快, 降水增幅更大。

**关键词:** CMIP6模式, 情景模式比较计划 ( ScenarioMIP ), 气候变化预估, 淮河流域

**DOI:** 10.3969/j.issn.2095-1973.2020.05.016

## New Scenarios of CMIP6 Model ( SSP-RCP ) and Its Application in the Huaihe River Basin

Jiang Tong<sup>1,3</sup>, Lü Yanran<sup>1</sup>, Huang Jinlong<sup>1</sup>, Wang Yanjun<sup>1</sup>, Su Buda<sup>1,2,3</sup>, Tao Hui<sup>3</sup>

( 1 Institute for Disaster Risk Management/ School of Geographical Sciences, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044 2 National Climate Centre, China Meteorological Administration, Beijing 100081  
3 State Key Laboratory of Desert and Oasis Ecology, Xinjiang Institute of Ecology and Geography, Chinese Academy of Sciences, Urumqi 830011 )

**Abstract:** Phase 6 of the Coupled Model Intercomparison Project ( CMIP6 ) will provide more abundant global climate model data in the field of climate change projection, and its scientific combination scenarios of Shared Socioeconomic Pathways ( SSPs ) and Representative Concentration Pathways ( RCPs ) incorporates the impact of socioeconomic development. The new scenarios will provide more reliable possible results of climate change. The first flood in the Huaihe River Basin ( HRB ) has exceeded the safety guarantee water level. Therefore, research on possible changes in the future climate of the HRB is particularly important. This study downscaled 5 CMIP6 global models which included scenarios of SSP1-1.9, SSP1-2.6, SSP4-3.4, SSP2-4.5, SSP4-6.0, SSP3-7.0, SSP5-8.5, and analysed the spatial and temporal changes of the annual temperature and precipitation in the HRB during 2021—2100. The areal averaged temperature shows an upward trend during 2021—2040 under SSP-RCP scenarios relative to the reference period ( 1995—2014 ) . The areal averaged annual precipitation in the HRB will increase during 2021—2040. The increasing precipitation will be mainly located in the middle of the study area, and extreme floods will most likely to occur in the entire watershed. Comparing with the CMIP5 studies, it is found that under the SSP-RCP, warming will faster in the future, and the precipitation will increase obviously in the HRB.

**Keywords:** CMIP6, ScenarioMIP, Projection of climate change, Huaihe River Basin

收稿日期: 2020年5月25日; 修回日期: 2020年8月12日  
第一作者: 姜彤 ( 1962— ) Email: jiangtong@nuist.edu.cn  
资助信息: 南京信息工程大学灾害风险管理研究院院长基金; 江苏省研究生科研与实践创新计划项目 ( KYCX20\_0957 )

## 0 引言

气候变化是当今社会普遍关注的全球性问题, IPCC第五次评估报告 ( AR5 ) 指出, 人为排放的温室气体增加所引起的气候变化对人类社会和自然系统的影响是毋庸置疑的。近100年以来, 全球气候经历了以变暖为主要特征的变化, 极端天气和气候事件在全

球和区域范围内更易发生<sup>[1]</sup>，并给生态系统带来了巨大的负面影响。气候变化绿皮书指出<sup>[2]</sup>，中国是气候变化敏感区和影响显著区之一，20世纪中叶以来其升温速率明显高于全球同期水平，且气候变化对我国的影响总体弊大于利。因此，开展未来气候变化的可能演变规律研究，对研究区相应的减缓和适应措施有着重要的科学意义。

地球系统模式是理解历史并预测未来潜在气候变化的重要工具，其采用数值模拟的方法研究地球各圈层之间的联系和演变规律<sup>[3]</sup>。为此世界气候研究计划（WCRP）于1995年发起和组织了耦合模式工作组（WGCM），由该工作组发起了国际耦合模式比较计划（CMIP），并在过去的近25年间陆续推进了第二次到第六次比较计划。CMIP计划主要研究的是气候模式模拟能力评估以及未来气候变化的情景预估，是历次IPCC科学评估的重要组成部分，如CMIP5的结果被应用于IPCC的第五次评估报告（AR5）中。同时CMIP计划极大地促进了气候模拟、诊断、归因研究等领域的国际合作。目前，CMIP6正在有序的进行中，自2015年开始<sup>[4]</sup>，第六次国际耦合模式比较计划（CMIP6）已经开展包括地球工程模式比较计划（GeoMIP）、土地利用模式比较计划（LUMIP）、协同区域气候降尺度计划（CORDEX）、情景模式比较计划（ScenarioMIP）等在内的23个子计划，并有超过100个模式组参与其中。截止2020年4月，已经90余个模式发布结果，更多信息可参阅CMIP6官方网站：<https://esgf-node.llnl.gov/search/cmip6/>。其所有气候模式的输出的结果都将共享给各国科学家，并应用于气候变化科学、影响、对策中。CMIP6数据也将为IPCC第六次评估报告提供基础支撑<sup>[5]</sup>。情景模式比较计划（ScenarioMIP）是CMIP6的主要子计划之一。该计划不同于CMIP5中的典型浓度路径（RCPs）情景，CMIP6中的情景是不同共享社会经济路径（SSPs）和RCPs的组合情景，包含了未来社会经济发展的含义。

淮河流域位于中国东部，介于长江和黄河流域之间，流域西部、西南部以及东北部为山地丘陵地区，其余为广阔的平原，地处暖温带和北亚热带气候过渡带，是典型的中纬度副热带季风气候区，水资源充沛、四季分明、雨热同季，有利于农作物生长，是我国重要的粮食产区<sup>[6]</sup>。由于其特殊的地理位置和充沛的降水，使得该区域洪涝灾害频发，对流域内的粮食生产、水资源管理具有重要影响。因此，需加强流域气候变化特征分析及其未来气候变化的预估工作。目前CMIP5数据集已经被广泛应用于对淮河流域的气

温、降水等变化预估研究<sup>[7-9]</sup>，CMIP6也已经开始应用于全球或区域尺度气候变化的研究工作<sup>[10-11]</sup>，但流域尺度（如淮河流域）的应用较少。因此本文将基于CMIP6中包含不同SSP-RCP组合情景的5个全球气候模式，开展淮河流域未来气候变化的时空演变特征分析。

## 1 SSP-RCP情景

情景是对未来发展变化的可能性描述，遵循连贯和内部一致原则，对重要驱动力和关系的假设。预估未来的全球和区域的气候变化需要构建温室气体排放和社会经济等一系列情景，这些情景需要对各种发展可能进行定量或者定性的描述。基于不同情景的气候预估，是历次IPCC报告的重要内容，其结果主要展现不同选择带来的气候变化风险与社会经济影响。政府间气候变化专门委员会（IPCC）依次提出了主要考虑CO<sub>2</sub>加倍平衡的SA90情景<sup>[12]</sup>，将排放情景划分为6种的IS92情景<sup>[13]</sup>，考虑4类不同社会经济情景的SRES情景<sup>[14-15]</sup>，以典型浓度路径描述辐射强迫的RCPs情景<sup>[16]</sup>，更加强调未来辐射强迫情景和共享社会经济情景一致性的RCP-SSP组合情景；每个情景都包括一套化学活性气体、气溶胶和温室气体的排放和浓度，土地利用/覆盖的时间路线，影响着国家不同发展战略路径的选择。不同于CMIP5，CMIP6是利用6个综合评估模型（IAM）<sup>[17-22]</sup>基于共享社会经济路径（SSPs）情景所产生。

共享社会经济路径（SSPs）情景的设定是根据当前国家与区域的实际情况，以及发展规划来获取具体社会经济发展情景。构成SSP的定量元素包含人口、GDP等指标，定性元素包含全球发展的描述，主要涵盖7个方面<sup>[23-25]</sup>：人口和人力资源、经济发展、生活方式、人类发展、环境与自然资源、政策和机构、技术发展。在2012年IPCC AR5专题会议上，明确了5个基础型的SSPs（SSP1-SSP5）分别为：可持续发展路径SSP1、中间路径SSP2、区域竞争路径SSP3、不均衡路径SSP4、传统化石燃料为主的路径SSP5。

ScenarioMIP的方案设计中首先选择强迫场，然后根据所选定的不同强迫场为基础选择相应的SSPs。CMIP6继承了CMIP5中的4种RCP情景（RCP2.6、RCP4.5、RCP6.0、RCP8.5），此外还增加了3种排放路径（RCP1.9、RCP3.4、RCP7.0）。ScenarioMIP根据相对优先级分为一级（Tier-1）和二级（Tier-2）试验共8组未来情景。本文重点介绍其中的SSP1-1.9，SSP1-2.6，SSP4-3.4，SSP2-4.5，SSP4-6.0，SSP3-7.0，SSP5-8.5在内的7个组合情景。

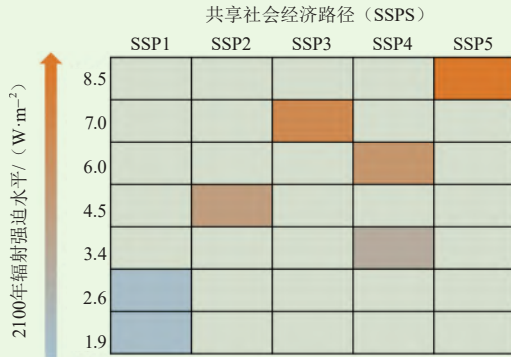


图1 SSP-RCP主要组合情景  
Fig.1 SSP-RCP main scenarios

SSP1-1.9: 目前最低的辐射排放情景。为了能提供全球升温1.5 °C更多信息, ScenarioMIP设计了一个在2100年前强迫低于RCP2.6的情景, 并通过IAM小组综合产生出一个基于SSP1共享社会发展路径, 其辐射强迫在2100年达到约1.9 W/m<sup>2</sup>。因此, 该情景一致被认为可能(大于66%) 在2100年保持全球升温1.5 °C。

SSP1-2.6: CMIP5中RCP2.6的更新版本, 和SSP1-1.9同属于低强迫情景, 2100年辐射强迫稳定在约2.6 W/m<sup>2</sup>。在该情景下, 相对于工业化革命前多模式集合平均的全球平均气温结果将显著低于2 °C。该情景考虑了考虑未来全球森林覆盖面积的增加并伴随大量的土地利用变化, 通过IAM/IAV的综合评估, 形成了低脆弱性、低减缓挑战的特征, 符合SSP1情景。

SSP2-4.5: CMIP5中RCP4.5的更新版本。属于中等辐射强迫情景, 在2100年辐射强迫稳定在约4.5 W/m<sup>2</sup>。该情景常被用于CMIP6的参考, 例如协同区域气候降尺度计划(CORDEX)中的区域降尺度和年代际气候预测计划(DCCP)。此外, 由于SSP2的土地利用和气溶胶路径并不极端, 仅代表结合了一个中等社会脆弱性和中等辐射强迫的情景。

SSP3-7.0: 属于中高等辐射强迫情景, 在2100年辐射强迫稳定在约7.0 W/m<sup>2</sup>。它填补了CMIP5中高强迫情景的空白。SSP3路径代表了中大量的土地利用变化(尤其是全球森林覆盖率下降)和高的气候强迫因子(特别是二氧化硫)。因此SSP3-7.0情景结合相对较高的社会脆弱性(SSP3)和相对较高的辐射强迫。

SSP4-3.4: 属于低辐射强迫情景, 它填补了CMIP5中低强迫情景的空白。2100年辐射强迫达到3.4 W/m<sup>2</sup>的情景中存在很大的减缓效益, 因此决策者关心在2.6 W/m<sup>2</sup>和4.5 W/m<sup>2</sup>之间的减排成本。选择SSP4情景, 是由于此情景减缓挑战相对较低。SSP4-3.4为较低减缓挑战情景与较低辐射强迫情景的组合。

SSP4-6.0: CMIP5中RCP6.0的更新版本。属于中

等排放情景, 2100年辐射强迫为5.4 W/m<sup>2</sup>, 2100年以后稳定在6.0 W/m<sup>2</sup>。该情景与SSP4-3.4的对比可以研究不同全球平均辐射强迫路径的气候影响, 并探索土地利用和气溶胶对区域气候影响。

SSP5-8.5: CMIP5中RCP8.5的更新版本。该属于高强迫情景, 情景还将设计来解决其他MIPs的科学问题。选择SSP5的原因在于SSP5是唯一可以实现至2100年排放高至8.5 W/m<sup>2</sup>的路径。

## 2 淮河流域多模式多情景的结果分析

淮河流域面积约2.7 × 10<sup>5</sup> km<sup>2</sup>, 位于112°—122°E、30°—37°N, 流域地跨安徽、山东、江苏、河南、湖北5个省40个地(市)(图2)。

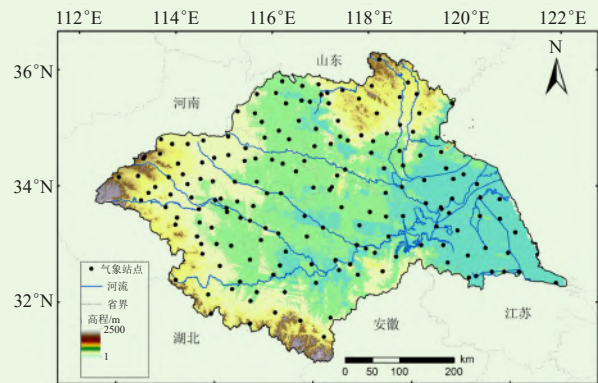


图2 淮河流域及气象站点空间分布  
Fig. 2 Location of meteorological stations in the HRB

1961—2018年淮河流域年均气温为14.4 °C, 呈明显上升趋势(图3a)。自20世纪90年代后气温上升趋势明显, 年均约14.8 °C。流域空间呈现由北向南逐步递增的纬向分布, 流域南部的河南信阳, 安徽蚌埠、江苏盱眙以南为高值区, 年均温约为15.3 °C, 流域北部的山东费县、临沂、日照为低值区, 年均约13.3 °C。1961—2018年淮河流域年均降水为883.0 mm, 无明显变化趋势(图3b), 其中1966年降水最小值为548 mm, 2003年降水量最大为1282 mm。空间分布上, 流域多年平均年降水量南部多于北部, 山区多于平原。南部的安徽六安、霍山以南降水最多, 超过1200 mm, 河南郑州、开封, 山东菏泽等地降水较小, 在750 mm以下。

对未来时期, 学者基于CMIP5数据在淮河流域已开展很多研究。如林慧<sup>[9]</sup>通过利用3个CMIP5模式RCP4.5与RCP8.5情景预估分析淮河流域上游气候变化, 发现2020—2099年气温升温迅速, 而降水却没有明显的变化趋势。Wu等<sup>[7]</sup>利用8个CMIP5模式预估长江—淮河流域未来降水变化, 结果显示在RCP4.5情景下, 相较于21世纪近期、中期, 末期流域(2081—

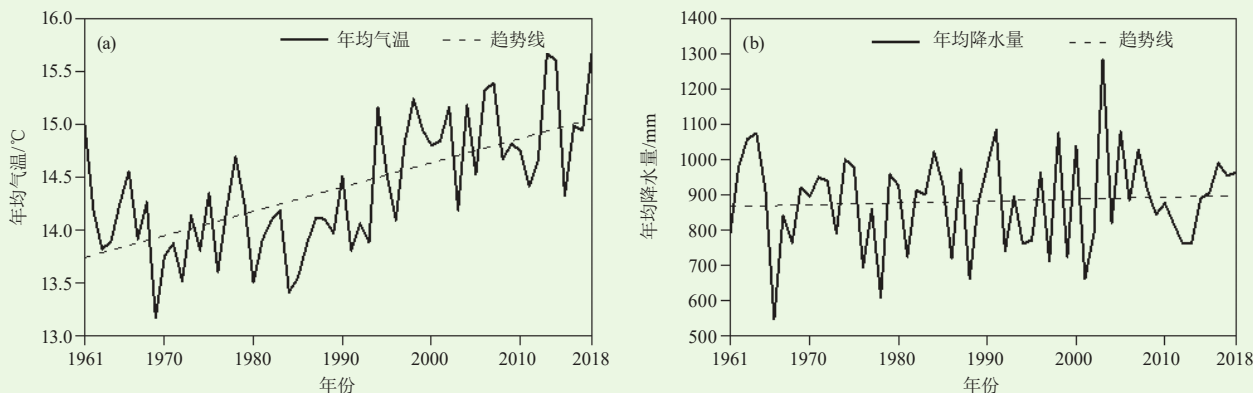


图3 1961—2018年淮河流域年均气温、降水变化

Fig. 3 The change of annual temperature and precipitation in the HRB from 1961 to 2018

2100年)平均降水变化最大,在中后期西部地区呈显著增加趋势。Wu等<sup>[8]</sup>利用6个CMIP5模式降水数据,通过BP神经网络优化多模式集合运算发现,所有模式的降水趋势都随时间而增加,四季中平均降水增幅为冬季>春季>夏季>秋季。

本研究采用的数据为国际耦合模式比较计划第六阶段CMIP6下的情景模式比较计划ScenarioMIP中的5个全球气候模式(表1),这些模式均包含了1901—2014年和7个组合情景(SSP1-1.9, SSP1-2.6, SSP2-4.5, SSP3-7.0, SSP4-3.4, SSP4-6.0, SSP5-8.5)下2015—2100年的模拟数据。为了方便对比分析,本文选用1995—2014年为基准期,格网化观测数据采用基于国家气候信息中心2400余国家级台站的观测数据插值的网格数据集<sup>[26-27]</sup>,时间尺度为1961—2018年,空间分辨率为 $0.5^{\circ} \times 0.5^{\circ}$ 。基于此格网化观测数据,论文使用统计降尺度(Spatial Disaggregation)和Equidistant Cumulative Distribution Functions(EDCDF)偏差订正方法<sup>[28-29]</sup>将模式数据重采样至 $0.5^{\circ} \times 0.5^{\circ}$ 分辨率。

表1 CMIP6 中 5个全球气候模式的基本信息

Table 1 Summary of the 5 CMIP6 models used in this study

模式名称	研究机构	分辨率(经度×纬度)
CanESM5	加拿大环境署	~ $2.8^{\circ} \times 2.8^{\circ}$
CNRM-ESM2-1	法国国家气象中心	$1.4^{\circ} \times 1.4^{\circ}$
IPSL-CM6A-LR	法国皮埃尔西蒙拉普拉斯研究所	$2.5^{\circ} \times 1.2676^{\circ}$
MIROC6	日本海洋地球科学技术处	$1.4063^{\circ} \times 1.4^{\circ}$
MRI-ESM2-0	日本筑波气象研究所	~ $1.125^{\circ} \times 1.12^{\circ}$

## 2.1 淮河流域气候模式模拟能力评估

CMIP5和CMIP6都能较好地捕捉流域气温和降水的空间分布状况(图4),CMIP5中气温和降水的相关系数为0.66和0.65;CMIP6中气温和降水的相关系数为0.75和0.69,并通过了0.05的显著性水平检验。

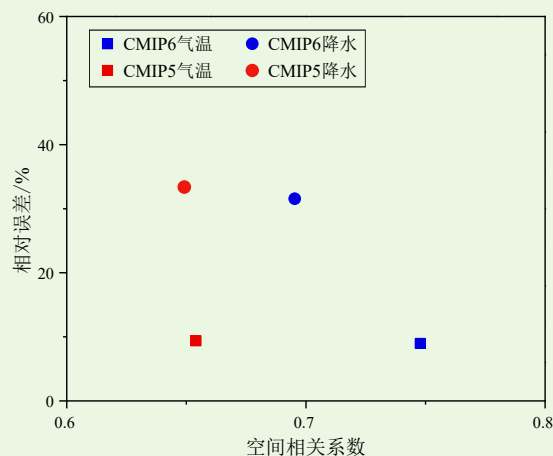


图4 1961—2005年订正前的CMIP5、CMIP6与观测数据比较  
Fig. 4 Comparison of annual temperature and precipitation between original CMIP5, CMIP6 simulations and observations from period 1961—2005

1961—2005年CMIP5多年平均气温和降水量与观测的偏差分别达到了9.4%和33.4%;CMIP6多年平均气温和降水量与观测的偏差分别为8.9%和31.6%。可见,不论是CMIP5还是CMIP6的气候模式都高估了观测气温和降水。但不难发现,相比于CMIP5,CMIP6气候模式在气象要素的空间分布和偏差上都有着一定的提升,这与CMIP6在模式设计、物理过程改进等方面的提升密切相关<sup>[4, 10]</sup>。鉴于,CMIP5和CMIP6分辨率较低难以捕捉流域尺度的气候变化状况以及相比于观测存在较大偏差,论文在开展预估研究之前首先对气候模式数据进行了降尺度与偏差订正处理。偏差订正后,CMIP5、CMIP6模式基本都能很好的模拟逐月的平均气温(图5a),相对误差分别在2.0%和1.2%左右,年平均气温观测数据与多模式集合数据的空间相关系数均大于0.95。月降水中气候模式数据基本偏高于观测数据(图5b),CMIP5与观测数据的相对误差为3.8%,CMIP6与观测数据的相对误差为1.8%。空

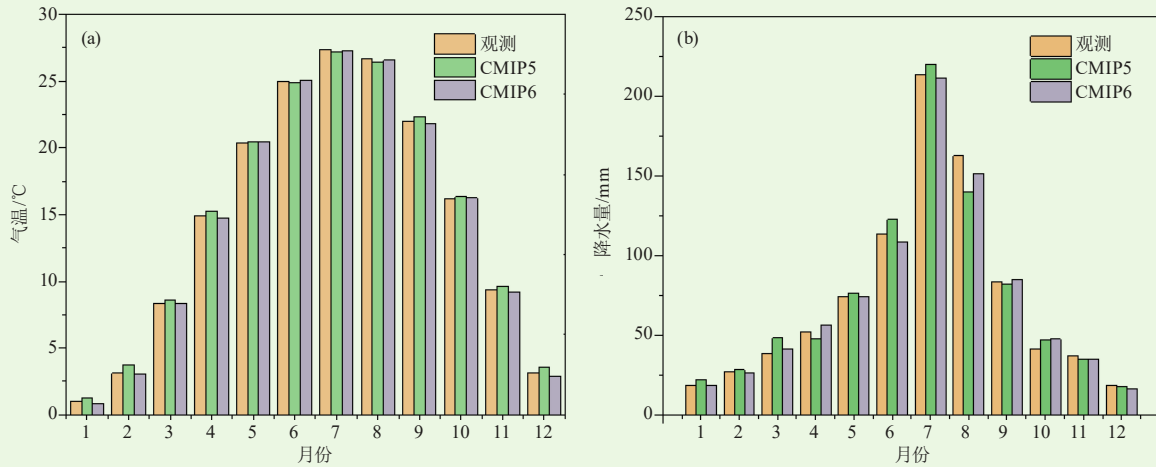


图5 1961—2005年淮河流域CMIP5、CMIP6、观测数据的月均气温 (a) 与降水 (b) 年内分布

Fig. 5 Comparison of CMIP5, CMIP6 with observation in HRB for 1961—2005: multi-year averaged monthly temperature (a) and precipitation (b)

间上, 从图6a、6b和6c可以看出, 偏差订正后CMIP5和CMIP6模式对平均气温的空间分布模拟较好, 模拟出了气温由西南向东北逐渐降低的空间分布特征, 同时也较好的模拟出了西南部驻马店一蚌埠以南的高值

区, 但CMIP5模式在流域西南地区模拟偏高。图6e、6f和6g是偏差订正后多模式年降水与观测值的空间分布, 空间相关系数大于0.95, 但CMIP5模式在流域西北地区模拟偏低。整体而言, CMIP6对流域气温降水

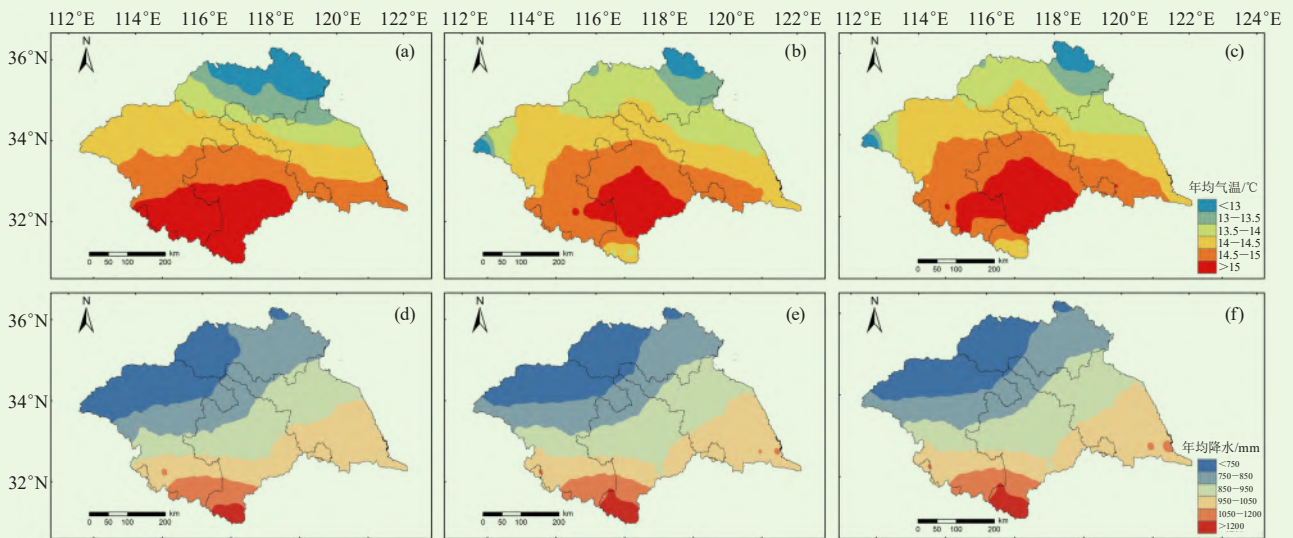


图6 1961—2005年淮河流域CMIP5、CMIP6、观测数据的年均气温 (a、b、c) 和降水 (d、e、f) 空间分布

Fig. 6 Spatial distributions of annual temperature and precipitation for 1961—2005: CMIP5, CMIP6 simulated and observed temperature (a, b, c); CMIP5, CMIP6 simulated and observed precipitation (d, e, f)

的模拟效果更好。

## 2.2 CMIP5、CMIP6 下淮河流域气温与降水预估对比

对于年均气温, 2021—2100年CMIP5中的RCP2.6情景的气温呈现增加趋势, 趋势为 $0.05\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$ ; 在CMIP6的SSP1-2.6情景下, 气温增加速率为 $0.1\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$ ; 在RCP8.5情景下, 增加率为 $0.6\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$ , 相对近期 (2021—2040年), 末期 (2081—2100年)

气温预计将增加 $0.6\text{ }^{\circ}\text{C}$ , 在SSP5-8.5情景下增加速率可达 $0.7\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$ , 相对近期, 末期气温预计将增加 $1.0\text{ }^{\circ}\text{C}$ , (图7a)。CMIP6情景下预估的气温增幅较CMIP5更明显, 尤其在高强度情景中增幅更高。对于降水变化而言, CMIP5的RCP2.6情景下, 降水相对增加速率为 $11.7\text{ mm}/10\text{ a}$ , 在CMIP6的SSP1-2.6情景下年降水变率为 $11.2\text{ mm}/10\text{ a}$ ; RCP8.5情景下增速为 $19.7\text{ mm}/10\text{ a}$ , 而在SSP5-8.5情景下则高至 $27.0\text{ mm}/10\text{ a}$  (图7b)。淮

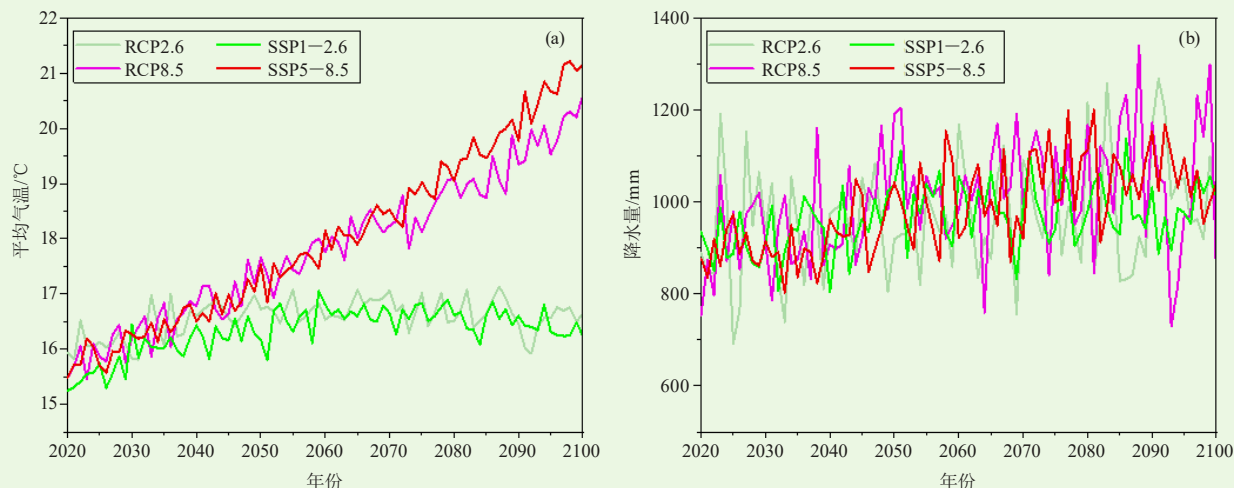


图7 2021—2100年CMIP5中RCP2.6、RCP8.5 (a) 情景与CMIP6中SSP1-1.9、SSP1-2.6、SSP5-8.5 (b) 情景在淮河流域预估气温降水变化的比较

Fig.7 Comparison of the predicted temperature and precipitation changes in the HRB between the RCP2.6 and RCP8.5 scenarios in CMIP5 (a) and the SSP1-1.9, SSP1-2.6 and SSP5-8.5 scenarios in CMIP6 (b) from 2021—2100

河流域降水变化预估中，CMIP6相较于CMIP5结果，波动范围减少，增加速率加快。

### 2.3 CMIP6 情景下淮河流域气温与降水预估

基于多模式集合平均结果得出，相对于基准期1995—2014年，在SSP1-1.9, SSP1-2.6, SSP2-4.5, SSP3-7.0, SSP4-3.4, SSP4-6.0, SSP5-8.5情景下，近期（2021—2040年）平均气温分别增加1.3、1.2、1.2、1.0、1.1、1.2和1.5 °C，中期（2041—2060年）平均气温相对增加1.5、1.7、1.8、1.9、1.7、1.9和2.5 °C，末期（2081—2100年）平均气温相对增加1.3、1.7、2.8、4.0、2.3、3.5和5.6 °C。在低强迫情景（SSP1-1.9, SSP1-2.6, SSP4-3.4）中，年均气温在21世纪前中后期增长幅度趋于平稳；在中等强迫情景（SSP2-4.5, SSP4-6.0）下，增温幅度随时间减缓；

而高强迫情景（SSP5-8.5）流域气温持续增加，且增加幅度高于低、中等强迫情景，中高排放强迫情景（SSP3-7.0）的增温幅度介于中、高强迫情景之间。在空间分布上（图9a、9b、9c），近20年（2021—2040年）随辐射强迫的增加，增温明显集中于流域的西南部，增温幅度约为1.0~2.0°C。

年降水量各情景均呈增加趋势（图8b），相对于基准期1961—2014年，在SSP1-1.9, SSP1-2.6, SSP2-4.5, SSP3-7.0, SSP4-3.4, SSP4-6.0, SSP5-8.5情景下，近期（2021—2040年）年降水量分别变化-0.5%、11.2%、19.9%、32.2%、-6.9%、0.2%、8.7%，中期（2041—2060年）相对增加11.4%、30.8%、33.9%、39.1%、1.8%、3.8%、27.9%，末期（2081—2100年）相对增加13.9%、26.3%、53.4%、

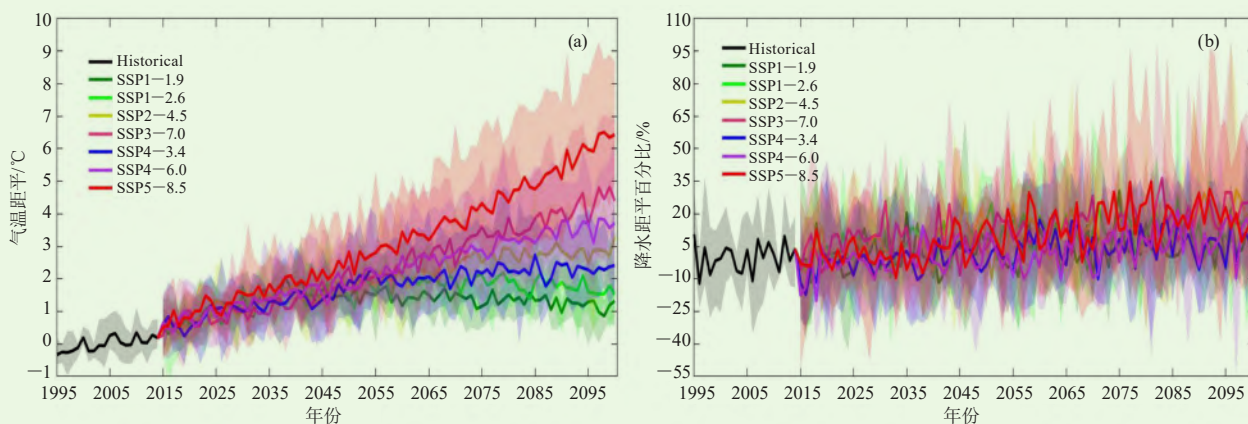


图8 SSP-RCP情景下年均气温 (a)、降水 (b) 相对基准期 (1995—2014年) 变化

Fig. 8 Changes in average temperature (a) and precipitation (b) relative to the baseline period (1995—2014) under the SSP-RCP scenarios

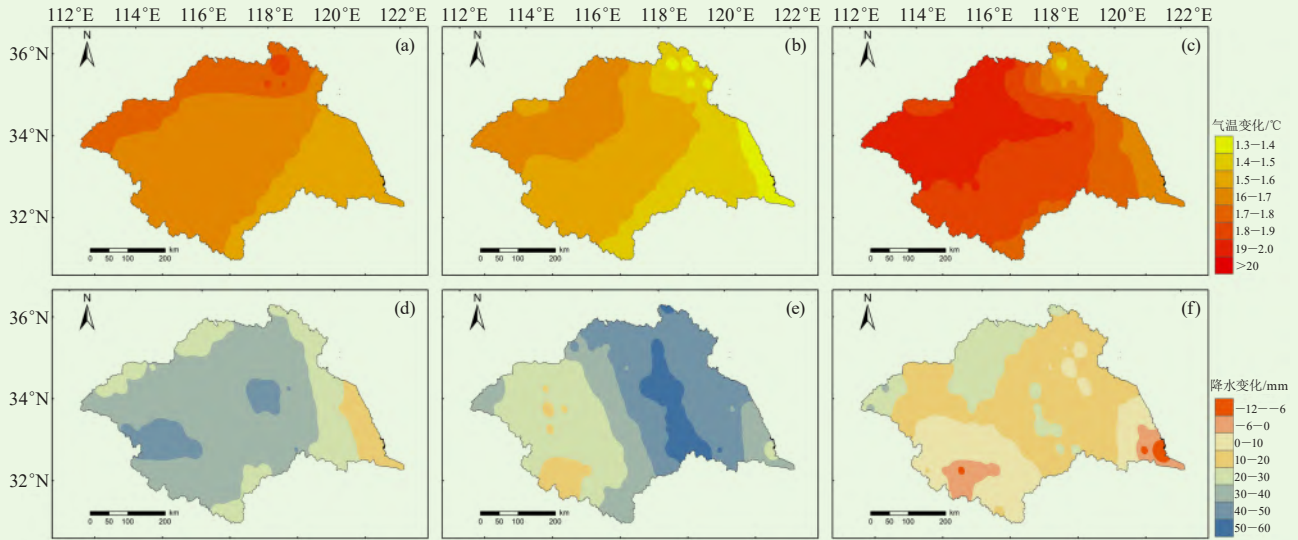


图9 SSP1-1.9 (a、d) , SSP2-4.5 (b、e) , SSP5-8.5 (c、f) 情景下淮河流域2021—2040年平均气温 (a、b、c) 、降水 (d、e、f) 相对于基准期 (1995—2014年) 的变化

Fig. 9 The projected change of average temperature (a, b, c) and precipitation (d, e, f) relative to the baseline period (1995—2014) over HRB in 2021—2040 under SSP1-1.9 (a, d), SSP2-4.5 (b, e), and SSP5-8.5 (c, f) scenario

73.6%、12.5%、15.4%、53.3%。流域年降水量在中高、高强迫情景 (SSP3-7.0、SSP5-8.5) 下增幅最大; 中等辐射强迫情景除SSP4-6.0之外, 增幅超过30%; 低排放情景除SSP4-3.4外增幅超过10%。从空间分布上来看 (图9d、9e、9f), 在2021—2040年SSP2-4.5情景下, 降水在整个流域呈现增加趋势, 降水增加区域主要集中于东南部, 年均增幅约为60 mm, SSP1-1.9情景中流域西南和中部年均增加约30~40 mm。

由于淮河流域夏季降水约占全年降水量的50%以上, 所以夏季降水的多寡是决定当年旱涝情况的重要因素。2021—2040年夏季年降水量概率密度分布如图10所示。在夏季中, 所有情景降水均较基准期增加。且降水概率密度分布函数的变化会使极端降水事件的可能性增加, 也同时意味着近20年夏季季节性洪涝灾害发生的可能性变大。

### 3 结论与讨论

本文主要介绍了国际耦合模式比较计划第六阶段 (CMIP6) 的演变过程, 详述了CMIP6中SSP-RCP组合情景的内容, 并利用CanESM5, CNRM-ESM2-1, IPSL-CM6A-LR, MIROC6, MRI-ESM2-0这5个全球气候模式分析了7个情景SSP1-1.9, SSP1-2.6, SSP2-4.5, SSP3-7.0, SSP4-3.4, SSP4-6.0, SSP5-8.5下淮河流域2021—2100年气候变化的可能趋势。

ScenarioMIP作为CMIP6重要的子计划之一, 为气候变化机理、减缓和适应研究提供了关键数据支撑。

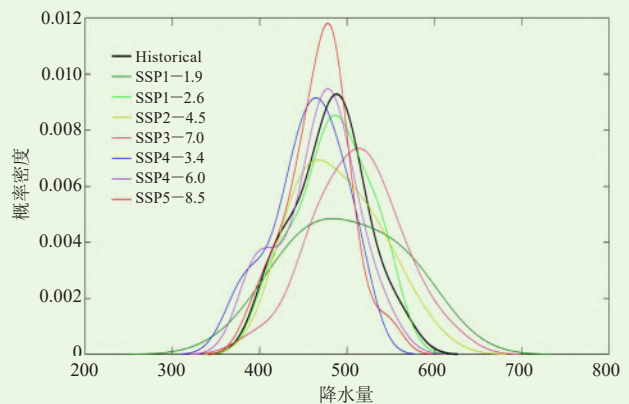


图10 2021—2040年SSP-RCP情景下夏季年降水量与基准期 (1995—2014年) 概率密度分布

Fig. 10 The probability density changes of precipitation in summer relative to the baseline period (1995—2014) under the SSP-RCP scenarios in 2021—2040

相比于CMIP5中的RCPs路径, CMIP6融合了共享社会经济路径, 使减缓的成本与效益评估更加容易。此外, ScenarioMIP的SSP情景包含针对21世纪末不同温控目标的路径 (如SSP1-1.9和SSP1-2.6), 可以更加合理地评估1.5 °C和2 °C温升目标。

1961—2018年流域年平均气温有明显的上升趋势, 尤其在20世纪90年代后上升趋势最为显著, 高温区主要分布在流域西南部; 年均降水无明显变化。应用CMIP6数据对淮河流域气温降水进行预估发现, 相对于基准期 (1995—2014年), 除SSP1-1.9路径外, 2021—2100年其余6个情景下年平均气温均呈递增趋势, 且上升幅度随辐射强迫的增加而增加。不同组合

情景下,淮河流域年降水都呈现增加趋势,其中在SSP3-7.0中增幅最大;降水的季节尺度上,夏季节降水在增加,且洪涝风险增大。

淮河流域气候变化预估作为流域未来水资源研究基础意义重大,在后期工作中,还需要利用日数据,将气候模式与水文模型结合起来,对流域未来气候变化对水文水资源的影响与极端水文事件可能的变化做进一步分析研究。

对比CMIP5的研究,CMIP6模式下淮河流域未来气温和降水变化趋势都更明显,其差异可能受到模式本身及气候情景间的共同影响。对于模式本身,相比于CMIP5,CMIP6在气候要素的空间部分和偏差等方面都有着一定的提升,可能与物理机制(如:模式减小了西北太平洋海温模拟偏差)的提升有关<sup>[4, 10, 11]</sup>;对于气候情景,CMIP5主要采用的是四个典型浓度路径情景,而CMIP6采用融入了未来社会经济发展的SSP-RCP组合情景,使未来预估结果更合理。但具体模式内部灵敏度等机理问题还需要更为专业的物理知识进行解释,有待作者进一步研究。

#### 参考文献

- [1] IPCC. Climate change 2014: Synthesis Report. Cambridge and New York: Cambridge University Press, 2014.
- [2] 谢伏瞻,刘雅鸣. 应对气候变化报告2019: 防范气候风险. 北京: 社会科学文献出版社, 2019.
- [3] 王斌,周天军,俞永强. 地球系统模式发展展望. 气象学报, 2008, (6): 5-17.
- [4] Nature Climate Change. The CMIP6 landscape. Nature Climate Change, 2019, (9): 727.
- [5] 赵宗慈,罗勇,黄建斌. CMIP6的设计. 气候变化研究进展, 2016, (3): 258-260.
- [6] 田红. 淮河流域气候变化影响评估报告. 北京: 气象出版社, 2012.
- [7] Wu D, Jiang Z H, Ma T T. Projection of summer precipitation over the Yangtze-Huaihe River basin using multimodel statistical downscaling based on canonical correlation analysis. Journal of Meteorological Research, 2017, (30): 867-880.
- [8] Wu Y N, Zhong P A, Xu B, et al. Evaluation of global climate model on performances of precipitation simulation and prediction in the Huaihe River basin. Theoretical and Applied Climatology, 2017: 1-14.
- [9] 林慧,王景才,蒋陈娟. CMIP5模式对淮河流域气候要素的模拟评估及未来情景预估. 人民珠江, 2019, 40(12): 43-50.
- [10] Xin X G, Wu T W, Zhang J, et al. Comparison of CMIP6 and CMIP5 simulations of precipitation in China and the East Asian summer monsoon. International Journal of Climatology, 2020, 1-18.
- [11] Chen H P, Sun J Q, Lin W Q, et al. Comparison of CMIP6 and CMIP5 models in simulating climate extremes. Science Bulletin, 2020: 1-4.
- [12] IPCC. Climate change 1990: the IPCC scientific assessment. Cambridge: Cambridge University Press, 1990.
- [13] IPCC. The supplementary report to the IPCC scientific assessment. Cambridge: Cambridge University Press, 1992: 69-95.
- [14] IPCC. Climate change 2001: The scientific basis. Cambridge: Cambridge University Press, 2001.
- [15] IPCC. Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Cambridge: Cambridge University Press, 2007.
- [16] IPCC. Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Cambridge: Cambridge University Press, 2013.
- [17] Fujimori S, Hasegawa T, Masui T, et al. SSP3: AIM implementation of Shared Socioeconomic Pathways. Global Environmental Change, 2017, 42: 268-283.
- [18] Calvin K, Bond-Lamberty B, Clarke L, et al. The SSP4: a world of deepening inequality. Global Environmental Change, 2017, 42: 284-296.
- [19] van Vuuren D, Stehfest E, David E H J, et al. Energy, land-use and greenhouse gas emissions trajectories under a green growth paradigm. Global Environmental Change, 2017, 42: 237-250.
- [20] Fricko O, Havlik P, Rogelj J, et al. The marker quantification of the Shared Socioeconomic Pathway 2: a middle-of-the-road scenario for the 21st century. Global Environmental Change, 2017, 42: 251-267.
- [21] Kriegler E, Bauer N, Popp A, et al. Fossil-fueled development (SSP5): an energy and resource intensive scenario for the 21st century. Global Environmental Change, 2017, 42: 297-315.
- [22] Bosello F, de Cian E. Documentation on the development of damage functions and adaptation in the WITCH model. 2014 [2019-04-10]. <https://www.feem.it/en/publications/feem-working-papers-note-di-lavoro-series/the-witch-2016-model-documentation-and-implementation-of-the-shared-socioeconomic-pathways/>
- [23] O'Neill B C, Kriegler E, Riahi K, et al. A new scenario framework for climate change research: the concept of Shared Socioeconomic Pathways. Climatic Change, 2014, 122(3): 387-400.
- [24] 张杰,曹丽格,李修仑,等. IPCC AR5中社会经济新情景(SSPs)研究的最新进展. 气候变化研究进展, 2013, 9(3): 225-228.
- [25] 姜彤,王艳君,苏布达,等. 全球气候变化中的人类活动视角: 社会经济情景的演变8. 南京信息工程大学学报(自然科学版), 2020, 12(1): 60-80.
- [26] Xu Y, Gao X J, Shen Y, et al. A daily temperature dataset over China and its application in validating a RCM simulation. Advances in Atmospheric Sciences, 2009, 26(4): 763-772.
- [27] 吴佳,高学杰. 一套格点化的中国区域逐日观测资料及与其它资料的对比. 地球物理学报, 2013, 056(004): 1102-1111.
- [28] Li H, Sheffield J, Wood E F. Bias correction of monthly precipitation and temperature fields from Intergovernmental Panel on Climate Change AR4 models using equidistant quantile matching. Journal of Geophysical Research, 2010, 115, D10101.
- [29] Su B D, Huang J L, Fischer T, et al. Drought losses in China may triple between 1.5°C and 2.0°C warming: policy hints of shared socio-economic pathways. PNAS, 2018, 115 (42): 10600-10605.