

# 国际耦合模式比较计划及其 模拟能力研究进展

范雪薇<sup>1,2</sup>, 缪驰远<sup>1\*</sup>, 苟娇娇<sup>1</sup>, 吴 怡<sup>1</sup>, 张 棋<sup>1</sup>

(1. 北京师范大学地表过程与资源生态国家重点实验室, 北京 100875;  
2. 北京师范大学珠海校区流域环境生态工程研发中心, 广东 珠海 519087)

**摘 要:**国际耦合模式比较计划(Coupled Model Intercomparison Project, CMIP)自20世纪90年代中期创建以来迅速发展,为全球气候变化的模拟和未来预估提供了不可替代的数据支持。论文系统回顾了CMIP1到CMIP6的发展历程,包含理论框架、未来情景构建、国际参与情况等方面。在此基础上,论文全面总结了CMIP模式对全球及中国区域气温、降水及其他变量的模拟能力,并重点比较了CMIP3、CMIP5和CMIP6模式的历史试验模拟结果。随CMIP的不断发展,模式在物理参数化方案、空间分辨率等方面有了一定的提高,其模拟能力也随之不断改善。但模式对区域尺度气候特征的模拟能力仍然有限,尤其是对于中小尺度降水变化特征的模拟,并且不同模式的模拟能力存在很大差异。最后,论文针对以上问题展望了CMIP模式的可能发展方向。

**关 键 词:**全球气候模式;国际耦合模式比较计划;发展历程;模拟能力

全球气候模式(global climate models, GCMs)建立在系统的物理、化学和生物基础上,是对地球气候系统各个圈层相互作用和反馈过程的数学表达<sup>[1-2]</sup>。随着科学技术的不断进步和高性能计算机能力的不断提高,全球气候模式得到了迅速的发展。由世界气候研究计划(World Climate Research Programme, WCRP)耦合模拟工作组(Working Group on Coupled Modelling, WGCM)建立的国际耦合模式比较计划(Coupled Model Intercomparison Project, CMIP)是气候模式研究的里程碑,推动了国际学术界和社会各界对气候变化模拟和预估研究的高度重视<sup>[3]</sup>。CMIP的目标是更好地了解过去、现在和未来的气候变化,这些变化是由自然的、非强迫的变化引起的,或是在多模式背景下对辐射强迫变化的响应<sup>[4]</sup>。它强调共享、比较和分析全球气候模式结果以提供高质量气候信息的重要性,在模式试验

制定、模式数据格式标准化、建立数据共享平台等方面发挥了至关重要的作用<sup>[5]</sup>,并为气候评估和谈判提供依据。基于CMIP模式的研究结果为IPCC科学评估报告的撰写奠定了基础,包括对气候变化的理解和对未来气候变化及相关影响的预测,是认识气候变化机制和预估未来气候的有力工具。

随着计算机技术的发展和地球系统科学认识的逐步提高,CMIP自20世纪90年代中期创建以来,已经经历了5个阶段(图1),来自世界各地的气候研究机构共同分享了最先进的全球气候模式模拟结果<sup>[2]</sup>。在进行不同时间尺度上的气候预测之前,对气候模式的可靠性进行评估一直是一个基本的科学问题。因此,本文将在系统回顾CMIP发展历史的基础上,全面总结比较CMIP模式输出的可靠性,以为未来CMIP模式的发展前景提供科学的参考依据。

收稿日期:2022-06-28;修订日期:2023-06-25。

基金项目:国家自然科学基金项目(42041006);地表过程与资源生态国家重点实验室自主课题(2022-ZD-03)。[Foundation: National Natural Science Foundation of China, No. 42041006; State Key Laboratory of Earth Surface Processes and Resource Ecology, No. 2022-ZD-03.]

第一作者简介:范雪薇(1992—),女,新疆昌吉人,博士,研究方向为气候变化及其水文响应。E-mail: xwfan@mail.bnu.edu.cn

\*通信作者简介:缪驰远(1981—),男,福建福安人,教授,主要从事气候变化与流域水文研究。E-mail: miaocy@bnu.edu.cn

引用格式:范雪薇, 缪驰远, 苟娇娇, 等. 国际耦合模式比较计划及其模拟能力研究进展 [J]. 地理科学进展, 2023, 42(6): 1204-1215. [Fan Xuewei, Miao Chiyan, Gou Jiaojiao, et al. Coupled Model Intercomparison Project and its research progress in simulation performance. Progress in Geography, 2023, 42(6): 1204-1215.] DOI: 10.18306/dlkxjz.2023.06.015

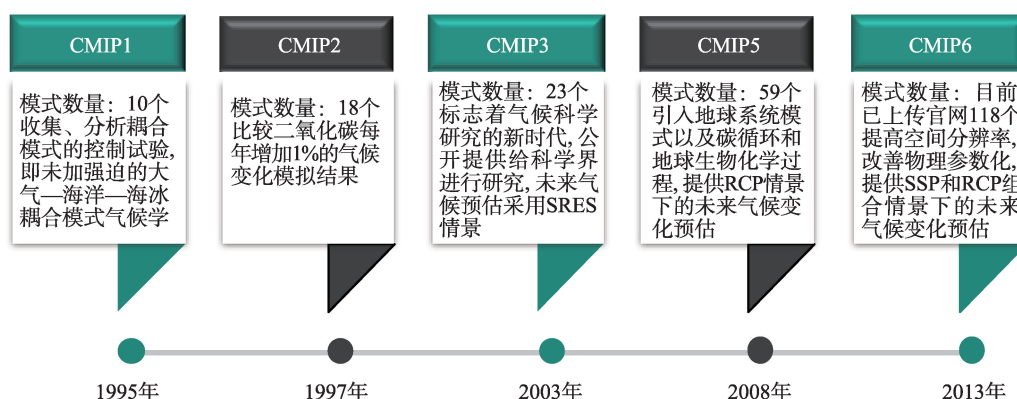


图1 CMIP发展时间轴

Fig.1 Timeline of CMIP development

## 1 CMIP的发展历程

### 1.1 CMIP1和CMIP2: CMIP的开始

CMIP于1995年在WGCM的主持下开始,推出了第一次国际耦合模式比较计划(CMIP1),共有10个模式参与。CMIP1提供了未加强迫的大气—海洋—海冰耦合模式,目的是收集和分析当时耦合模式的控制试验结果,试验中二氧化碳、太阳辐射参数和其他气候外强迫均保持不变<sup>[6]</sup>。国际耦合模式比较计划第二阶段(CMIP2)于1997年初启动,旨在研究模式对给定人为气候强迫情景(二氧化碳以每年1%速率递增)的气候模拟结果,共有18个模式参与<sup>[7]</sup>。由于当时数据处理和归档能力的限制,CMIP1和CMIP2只提供少数较粗时间分辨率的气候变量输出结果,例如月尺度以上时间分辨率的地表气温、降水量和海平面气压等。

### 1.2 CMIP3和CMIP5: CMIP的发展

国际耦合模式比较计划第三阶段(CMIP3)标志着气候科学研究的一个新时代,它将最先进的气候变化模式首次公开提供给国际气候科学界进行研究,使全球气候模式之间的相互比较和分析达到了气候科学领域从未达到的国际协作水平。CMIP3包含了不同模拟试验下超过30 TB的开放性模式资料,共有来自12个国家的23个模式参与。与CMIP1和CMIP2相比,CMIP3的一个主要创新之处在于提供了气候变化情景试验数据,即在不同排放情景下预估未来的气候变化。CMIP3使用IPCC排放情景特别报告(Special Report on Emissions Scenarios, SRES)中的情景,包括历史气候模拟试验(20C3M)和21世纪情景试验(高温温室气体排放

SRES-A2、中等温室气体排放SRES-A1B、低温温室气体排放SRES-B1等试验)<sup>[8]</sup>。CMIP3多模式数据集为数百篇气候变化研究论文提供了基础,并在IPCC第四次评估报告(AR4)中发挥了突出作用。在CMIP3之后, WGCM对CMIP3中进行的试验进行了补充,用于分离人为和自然强迫对20世纪气候的影响<sup>[2,8]</sup>,但其影响力相对较小;并且为了同步CMIP和IPCC评估报告之间的编号系统,这一补充试验并未使用CMIP4进行命名。

IPCC第五次评估报告(AR5)主要依靠国际耦合模式比较计划第5阶段(CMIP5)多模式数据集,帮助认识过去和现在的全球气候变化以及预估不同排放情景下未来气候的可能变化<sup>[9]</sup>。CMIP5官网提供了59个不同模式的输出结果,目标是评估模式模拟历史气候演变的能力,提供近期(到2035年左右)和长期(到2100年及以后)未来气候变化的预估,并了解一些引起模式预估差异的因素<sup>[10]</sup>。参与CMIP5的模式主要完成了3类数值试验:一是年代际气候变化预测试验,二是长期数值试验,三是高分辨率大气模式试验。在传统海气耦合模式的基础上,CMIP5首次引入了地球系统模式以及该模式中的全球碳循环过程和地球生物化学过程,用于模拟和预估人类活动碳排放对气候变化的影响<sup>[11]</sup>。相比较于CMIP3,CMIP5模式的水平分辨率有所提高,并且物理参数化方案更加合理。CMIP5采用了新的气候情景,考虑了大气中温室气体、气溶胶浓度和土地利用的影响,以及未来可能产生的排放不确定性,称为典型浓度路径(representative concentration pathways, RCP)<sup>[12]</sup>。与SRES排放情景相比,RCP涵盖了更广泛的可能性,包括了低排放情景

(RCP2.6, 2100年辐射强迫达 $2.6 \text{ W/m}^2$ )、2个中等排放情景(RCP4.5和RCP6.0, 2100年辐射强迫分别达 $4.5 \text{ W/m}^2$ 和 $6.0 \text{ W/m}^2$ )和高排放情景(RCP8.5, 2100年辐射强迫达 $8.5 \text{ W/m}^2$ )<sup>[13]</sup>。

### 1.3 CMIP6: 目前最先进的CMIP

CMIP在经历了以上阶段后,第六阶段国际耦合模式比较计划(CMIP6)于2013年正式启动。来自全球多个国家的高校及科研机构共享了设计试验更加完善的气候模式输出结果<sup>[4]</sup>,截至2023年6月已有118个模式在官网发布。CMIP6的总体设计框架如图2所示,以WCRP的重大科学挑战为背景,CMIP6旨在解决3个关键科学问题:①地球系统如何响应外强迫变化;②造成模式系统偏差的原因和后果是什么;③如何在内部气候变率、可预测性和情景不确定性影响下预估未来气候变化<sup>[5,14-15]</sup>?与上一代CMIP5模式相比,CMIP6模式在空间分辨率、物理参数化等方面都进行了改进,并增加了额外的地球系统过程和组分,目的是能够更好地模拟未来气候的反馈(如陆地碳吸收及永久冻土过程的氮效应)<sup>[16]</sup>。经过长期和广泛的协商,CMIP6建立了一个新的、更加联合的结构,共由3个主要部分组成:一是常规试验,即DECK(diagnostic, evaluation and characterization of klima, klima为climate的希腊语)试验和CMIP历史气候模拟试验(1850—2014年),与以往阶段的CMIP保持连续性,并有助于记录CMIP不同阶段气候模式的基本特征;二是共同标准、协调、架构和文档,帮助分配模式输出和表征模式集合;三是CMIP批准的模式相互比较项目(CMIP-en-

dorsed model intercomparison Projects, MIPs)集合,在DECK试验和历史模拟试验的基础上构建,以解决大量特定的科学问题并填补之前CMIP阶段的科学空白。DECK试验与历史模拟试验构成了参与CMIP6的“准入卡”,描述模式集合的特征,并根据与观测和气候变化响应的比较来评估其质量<sup>[17]</sup>。

针对气候科学热点问题,自2015年开始,CMIP6已经开展了23个MIPs,并有超过100个模式组参与其中。情景模式比较计划(ScenarioMIP)是CMIP6的重要子计划之一,将不同共享社会经济路径(shared socioeconomic pathways, SSPs)与RCPs进行科学组合,旨在RCP情景中融入社会经济发展的影响,为未来气候变化机理研究以及气候变化减缓和适应研究提供关键的数据支持<sup>[18]</sup>。ScenarioMIP设计中强迫路径的确定分为2步:首先确定未来全球平均的辐射强迫水平,在保持CMIP5辐射强迫水平连续性的基础上,填补CMIP5强迫路径的空白;然后选择每种辐射强迫水平对应的社会经济情景<sup>[19]</sup>。SSP描述了没有气候政策影响下的未来社会发展情况,包括可持续发展(SSP1)<sup>[20]</sup>、中间发展(SSP2)<sup>[21]</sup>、局部发展(SSP3)<sup>[22]</sup>、不均衡发展(SSP4)<sup>[23]</sup>和常规发展(SSP5)<sup>[24]</sup>5种。ScenarioMIP计划依据试验先后优先级,将未来情景分为Tier 1核心试验和Tier 2试验。Tier 1试验涵盖了延续RCP2.6、RCP4.5和RCP8.5辐射强迫水平的SSP1-2.6、SSP2-4.5和SSP5-8.5情景,以及一个新的辐射强迫情景(SSP3-7.0),代表了相对高的辐射强迫与高社会脆弱性的组合。

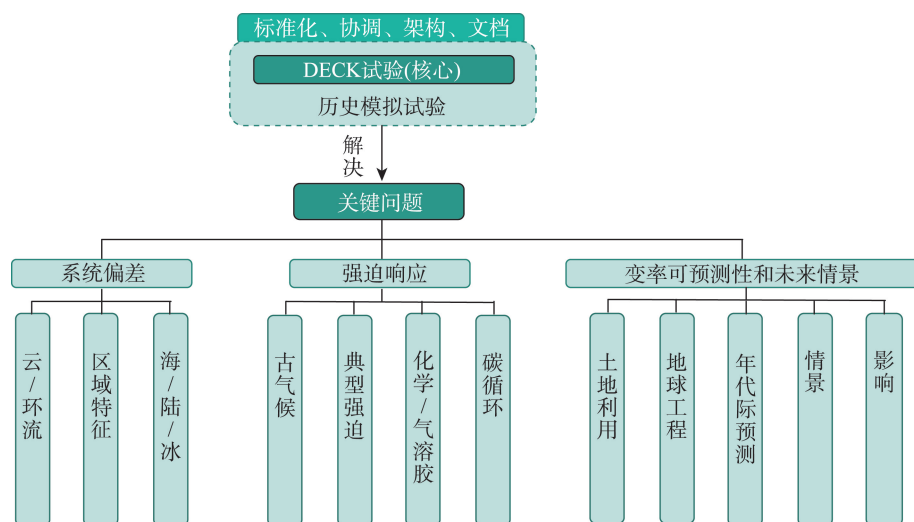


图2 CMIP6的总体设计框架

Fig.2 The general design scheme of CMIP6



## 1.4 中国气候模式的发展

过去几十年来,中国的科研机构也积极参与到气候系统模式的研发工作中。CMIP1计划和CMIP2计划中,参与研发的模式为中国科学院大气物理研究所发展的GOALS2和GOALS4模式<sup>[25-26]</sup>。随后,中国科学院大气物理研究所继续参与了CMIP3计划,研发了FGOALS-g1.0模式<sup>[27]</sup>。中国参与CMIP5计划的气候模式明显增多,共有5个模式,除了中国科学院大气物理研究所以外,国家气候中心、北京师范大学和自然资源部第一海洋研究所也首次发布了他们的研究成果<sup>[28]</sup>。目前正在实施的CMIP6计划中,中国共有14个模式通过地球系统网格联盟(ESGF)正式发布,包括:国家气候中心研发的BCC-ESM1.0、BCC-CSM2-MR和BCC-CSM2-HR模式;中国气象科学研究院研发的CAMS-CSM1-0模式;中国科学院多个研究所合作研发的CAS-ESM2-0模式;清华大学牵头研发的CIESM模式;中国科学院大气物理研究所研发的FGOALS-f3-H、FGOALS-f3-L和FGOALS-g3模式;自然资源部第一海洋研究所研发的FIO-ESM-2-0模式;南京信息工程大学研发的NESM3模式;中国台湾研究机构研发的TaiESM1、TaiESM1-TIMCOM和TaiESM1-TIMCOM2模式。总体来看,从CMIP1到CMIP6,中国气候系统模式的研发工作在模式数量和参与机构体量等方面都有所提高<sup>[2]</sup>。

## 2 CMIP模式的模拟效果检验

基于陆续发布的CMIP1~CMIP6模式比较计划,研究者们对不同时空尺度的气候变化进行了大量研究。使用气候模式进行研究的最终目标是预测不同时空尺度下的气候变化,而评估模式再现“当前气候”和过去气候变化的能力是使用CMIP进行未来气候预估的一个重要前提。模式模拟能力的评估主要侧重3个方面:气候平均态、变率和趋势,一般将观测数据作为参考依据,计算模式模拟结果与观测的偏差、标准差之比、均方误差,以及线性变化趋势等来比较观测和模式模拟结果的一致性<sup>[29-31]</sup>。在此基础上,还有一些研究通过分析模式对气候变化过程、现象和极值的模拟结果来检验模式的可靠性<sup>[32-33]</sup>。随着气候模式数量的不断扩增,使用多模式集合进行气候模拟与预估已经成为了一种常用的方法,研究表明,多模式集合平均结果

提高了模式模拟的可靠性,并且能够减少模拟和预估中存在的 uncertainty<sup>[34-35]</sup>。

### 2.1 气温的模拟评估

地表气温是衡量全球气候变化的重要指标,国内外已有许多研究针对CMIP模式模拟全球和不同区域气温的表现进行了评价。基于纳什效率系数(Nash-Sutcliffe efficiency, NSE)的评估结果表明,CMIP3模式可以较好地表征年平均气温的空间分布规律,其模拟结果的NSE中值为0.97<sup>[36]</sup>。Kumar等<sup>[37]</sup>对19个CMIP5模式模拟20世纪气温趋势的能力进行分析,指出CMIP5模式能够合理地再现全球陆地平均气温的变化趋势。从多角度对CMIP6模式模拟全球地表平均气温的评估结果显示,大多数模式和多模式平均值都能模拟出历史全球气温的变暖趋势,但CMIP6模式对全球气温分布形态特征的模拟需要进一步加强<sup>[38-39]</sup>。在对单一阶段的CMIP模式进行评估的基础上,大量研究通过比较两代以上的CMIP模式对气温的模拟能力来反映全球气候模式的发展。如Reichler等<sup>[40]</sup>评估了CMIP1、CMIP2、CMIP3模拟气温平均态和长期趋势的性能,发现CMIP气候模式的性能随着时间的推移一直在稳步提高;Bock等<sup>[41]</sup>比较了CMIP3、CMIP5以及CMIP6模式与ERA5(the fifth generation ECMWF atmospheric reanalysis)数据的气温空间分布差异,发现所有阶段的CMIP模式均都能够合理地再现全球气温的空间分布特征,全球气温的平均偏差从 $-0.451\text{ }^{\circ}\text{C}$ (CMIP3)改善至 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 左右(CMIP5和CMIP6),均方根差(RMSD)也持续减小;但3个阶段的模式均在某些区域存在偏差,如高海拔地区和南大洋地区。另外,大量研究评估了CMIP模式对区域平均气温的模拟能力,例如北美洲、中亚、澳大利亚,发现虽然CMIP模式能够比较合理地表现出区域气温的时空变化特征,但对区域气温细节特征的模拟水平还有待提高,并且模式间不确定性较大<sup>[30,42-43]</sup>。

近些年来,气温极值作为气温模拟评估的一个重要内容,也受到诸多学者的关注。Sillmann等<sup>[44]</sup>基于日最高(最低)气温计算了极端气温指数,比较了CMIP3和CMIP5两个阶段的模式在模拟气温极值方面的表现,发现CMIP5模式集合在模拟极端气温时的模式间不确定性小于CMIP3模式集合;并且由于CMIP5的模式分辨率更高,CMIP5模式在网格单元尺度上对极端气温的模拟性能更好。

Chen等<sup>[45]</sup>系统评估了CMIP5和CMIP6对气候变化检测和指数专家组(expert team on climate change detection and indices, ETCCDI)提出的极端气温指数的模拟能力,指出CMIP6模式在模拟极端气温及其趋势方面表现出了普遍的改进;并且CMIP6模式间的不确定性明显小于CMIP5模式,尤其是对于高纬度地区而言。

中国学者也评估了CMIP模式对中国气温变化的模拟能力<sup>[29,46-49]</sup>。其中,Yan等<sup>[50]</sup>比较了CMIP3模式和CMIP5模式对中国地表均温的模拟能力,发现尽管CMIP5模式较CMIP3模式在模拟中国均温变化趋势和空间分布方面的能力有所提高,但CMIP5模式仍然对中国气温气候态值存在低估,尤其是中国西部地区,模拟冷偏差约为2.8℃。Sun等<sup>[51]</sup>量化了中国8个子区域内观测日均气温以及日最高(最低)气温与CMIP模拟结果之间的概率密度函数(probability density function, PDF)匹配技能得分,发现CMIP3和CMIP5模式均能模拟出所有子区域的观测PDF分布特征;然而,大多数模式高估了气温低值的概率。与CMIP5模式相比,CMIP6模式对中国区域平均气温和极端气温的模拟能力均得到了一定程度的改善,如CMIP6模式集合平均结果显著降低了在模拟中国西北部分地区年最大日最高气温时存在的暖偏差<sup>[52]</sup>。目前,学者们还评估了CMIP6模式对中国华北平原、青藏高原、黄河上游、澜沧江流域等区域气温变化的模拟能力,均发现CMIP6模式能够较好地模拟出这些区域平均气温的空间分布格局与年际变化特征<sup>[53-56]</sup>。但不同阶段的CMIP模式对青藏高原平均气温和气温极值的模拟能力均存在大于4℃的冷偏差,特别是在寒冷的季节<sup>[52]</sup>,使用综合评分指标的评估结果显示CMIP6模式对青藏高原气温的模拟能力优于CMIP5模式<sup>[57]</sup>。

## 2.2 降水的模拟评估

降水是描述全球水文过程的关键气候变量之一,由极端降水引起的自然灾害将造成严重的人员伤亡和经济损失。气候模式对降水变化的准确模拟可以为应对未来的自然灾害提供重要的参考依据。研究表明,CMIP气候模式对气温变化的模拟效果普遍优于对降水变化的模拟效果,尤其是对中小尺度而言<sup>[58]</sup>。Dai<sup>[59]</sup>评估了CMIP3模式对降水变化的模拟能力,指出大多数CMIP3模式均能模拟出全球降水的分布特征,例如赤道以北的狭窄最大降雨量带以及副热带高压带、北非和中东的干旱地区

等,但在模拟区域性降水时还存在一些误差。针对CMIP5和CMIP6模式的评估结果同样显示,两代CMIP模式均可再现观测降水的空间分布特征<sup>[37,41]</sup>。随着CMIP模式的不断发展,其对降水空间变化的模拟能力也在不断提高,CMIP3、CMIP5和CMIP6模式模拟的年平均降水量与观测年平均降水量的空间相关系数分别为0.69~0.87、0.79~0.88和0.80~0.92;然而,不同阶段的CMIP模式对降水的模拟也存在一些系统偏差,例如所有阶段的模式均在热带地区显示出最大的偏差,约为3.5 mm/d<sup>[41]</sup>。从CMIP3到CMIP6,模式对夏季季风、双热带辐合带以及热带降水日循环的模拟偏差改善较小<sup>[60-61]</sup>。已有研究证明气候模式对热力学和动力学过程的模拟能力是影响区域降水模拟准确性的重要因素,而模式水平分辨率的提高则有助于改善此过程<sup>[62]</sup>。相较于CMIP3和CMIP5,CMIP6新增了高分辨率模式比较计划(HighResMIP),旨在评估水平分辨率提高后气候模式模拟性能的改进效果<sup>[63]</sup>。学者们基于HighResMIP提供的气候模式,比较了不同分辨率的CMIP6模式对全球不同地区降水变化的模拟能力,结果发现具有较高分辨率的模式对降水空间分布特征的模拟具有更好的表现,并且高分辨率模式对降水模拟的系统偏差也有所改善<sup>[58,64-65]</sup>。

关于气候模式对极端降水的模拟能力,相关学者也做了大量的研究。研究发现,与CMIP3相比,CMIP5模式对降水极值的模拟能力也有了一定的提高,如强降水事件、潮湿日数的比例等<sup>[44,66]</sup>。Kim等<sup>[67]</sup>比较了CMIP5和CMIP6在模拟ETCCDI降水极值指数方面的差异,发现CMIP6模式在降水强度和频率指数方面的模拟能力与CMIP5模式的模拟能力相当,但CMIP5模式对热带和亚热带区域降水极值的模拟偏差在CMIP6模式中得到了改善。

从CMIP3开始,中国学者针对气候模式对中国地区降水变化的模拟能力展开了一系列的工作。基于CMIP3模式的降水评估结果显示,大多数模式能较好地模拟出中国区域降水变化的空间分布特征及其线性趋势,但CMIP3模式在青藏高原东侧、高原南部存在虚假的降水中心<sup>[68]</sup>。陈晓晨<sup>[11]</sup>基于多套观测资料评估了CMIP5模式对中国地区降水的模拟能力,发现多模式集合可以再现出与观测相似的降水空间分布特征,但CMIP5模式对青藏高原降水的高估没有得到明显的改善。由于在物理参数化方案、空间分辨率等方面的改善,CMIP6模式对

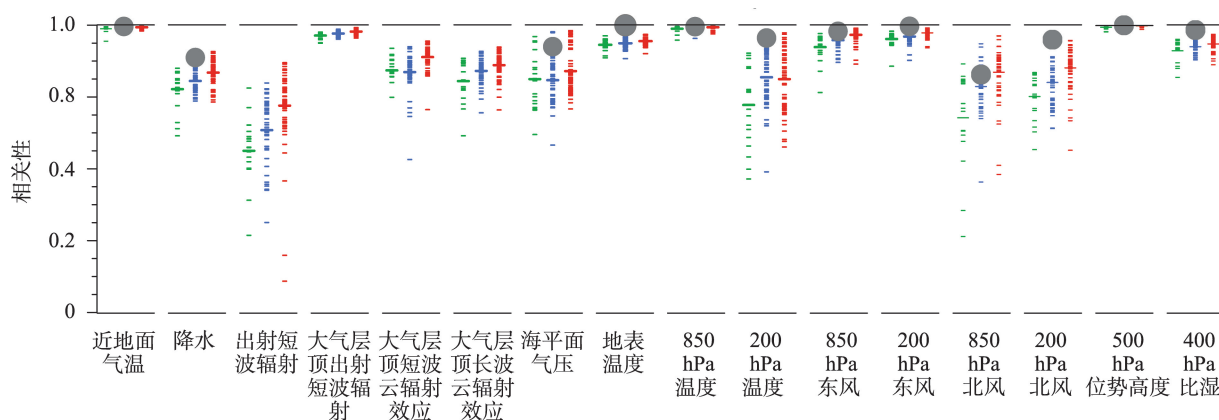


中国区域降水变化的模拟结果较CMIP5有了一定程度的改进,表现为对降水空间分布特征和年循环变化特征的模拟等方面<sup>[58]</sup>。关于模式分辨率对模拟中国区域降水变化的影响,中国许多学者也开展了相关的研究。例如,黄子立等<sup>[69]</sup>探究了高分辨率CMIP6模式对中国西南地区夏季降水的改进程度,发现高分辨率模式与观测的空间相关系数均超过0.8,而低分辨率模式的模拟结果普遍为0.7左右,还指出提高分辨率对地形陡峭区的降水强度改善程度更为明显。对于青藏高原地区,CMIP6的高分辨率模式均能够减小降水模拟中存在的偏差,但模式依然高估了青藏高原地区降水量和降水频率,低估了降水强度<sup>[70]</sup>。CMIP模式对极端降水指数的模拟性能通常低于对极端气温指数的模拟性能,但与CMIP5相比,CMIP6模式对中国极端降水的模拟存在一些改进:CMIP5模式对中国南方降水的模拟普遍存在干偏差,而此类偏差在CMIP6模式中则大大减小,例如,CMIP6模式模拟强降水量的偏差比CMIP5模式降低了50%左右;虽然青藏高原东部强降水量和降水强度的湿偏差在CMIP6模式中仍然存在,但与CMIP5模式相比较小<sup>[52]</sup>。

### 2.3 其他气候变量的模拟评估

CMIP为气候变化相关研究提供了多种气候变量数据,除气温和降水2个基本气候变量外,国内外学者针对CMIP模式对其他气候变量的模拟性能也

开展了广泛的评估工作。目前研究重点关注的变量有海表温度、风速、海平面气压、土壤湿度等。IPCC第六次评估报告(AR6)第一工作组报告使用中心化相关系数系统地比较了CMIP3、CMIP5和CMIP6三代模式对不同气候变量气候态的模拟能力(图3),结果表明:CMIP6模式除了对近地表气温和降水量的模拟能力优于CMIP5和CMIP3以外,对海平面气压、长(短)波辐射、高空温度、比湿和许多其他变量的模拟性能也有所改善<sup>[71]</sup>。当然,CMIP模式对其他气候变量的模拟也存在一定程度的偏差。例如,研究发现CMIP3和CMIP5两个阶段的模式结果均在很大程度上低估了地表太阳辐射通量的年代际变化<sup>[72]</sup>。对于海表温度变率,观测值和模式在北大西洋和南大洋存在较大的偏差,尤其是在较长的时间尺度上(5年滑动平均)<sup>[73]</sup>。Lee等<sup>[74]</sup>利用卫星测量的风应力数据评估了CMIP模式对风应力年平均值和季节周期的模拟效果,结果发现CMIP模式在赤道地区存在显著偏差,并且CMIP5相对于CMIP3的改进有限。Qiao等<sup>[75]</sup>比较了多个再分析土壤水分数据集和CMIP6模式模拟的全球土壤水分之间的一致性,指出CMIP6多模式集合平均值对全球土壤水分的气候态进行了合理的模拟,包括干湿中心、中高纬度地区融雪季节和低纬度地区雨季的土壤水分年峰值等,但在高海拔和高纬度地区,模式模拟的土壤水分和再分析数据结果的相



注:引自IPCC AR6第一工作组报告<sup>[71]</sup>。图中,每个模式仅使用一个集合成员(用短线表示),多模式集合平均值用长线表示(绿色为CMIP3、蓝色为CMIP5、红色为CMIP6;主要参考的观测数据从左到右依次为ERA5、GPCP-SG(Global Precipitation Climatology Project-Satellite Gauge)、CERES-EBAF(Clouds and the Earth's Radiant Energy System-Energy Balanced and Filled)、CERES-EBAF、CERES-EBAF、CERES-EBAF、JRA-55(the Japanese 55-year reanalysis)、ESACCI-SST(the European Space Agency Climate Change Initiative Sea Surface Temperature project)、ERA5、ERA5、ERA5、ERA5、ERA5、ERA5、AIRS(Atmospheric Infrared Sounder)和ERA5;灰色圆圈代表模式和其他观测数据集(从左到右依次为NCEP、GHCN、ERA5、HadISST、NCEP、NCEP、NCEP、NCEP、NCEP、NCEP、NCEP、ERA5和NCEP)之间的相关性。

图3 1980—1999年模式年均气候态和观测年均气候态间的中心化相关系数

Fig.3 Centred pattern correlations between models and observations for the annual mean climatology over the period 1980–1999

关性较低(-0.6~0.3)。Bock<sup>[41]</sup>采用多个评价指标评估了来自CMIP3、CMIP5和CMIP6的不同模式对不同气候变量的模拟性能,指出模式性能因模式的差异和变量的差异而不同,但来自相同模式族的成员性能非常相似;从CMIP3到CMIP6,大部分模式对总云量、海平面气压、500 hPa位势高度、风场、辐射场等变量的模拟能力都存在明显的改进。

近年来,中国学者在中国不同区域进行了多种变量的模式评估工作。例如,宋春阳等<sup>[76]</sup>基于观测和再分析资料评估了CMIP5模式对中国近海海温变化的模拟能力,发现多模式集合虽然能够再现海温的空间分布特征,但其量值上存在一定的低估,尤其是在渤海和黄海。针对模式对中国区域蒸散发的模拟能力,有研究发现CMIP5模式在中国大部分地区存在高估现象,这可能与CMIP5模式在气温模拟中的系统偏差相关<sup>[77]</sup>。Wu等<sup>[78]</sup>比较了CMIP5和CMIP6在模拟中国地面风速方面的能力,结果表明,CMIP6多模式集合平均值能够很好地再现地面风速的空间分布特征,并且CMIP6模式的模拟结果通常优于CMIP5模式;然而,两代模式均未能再现观测中国地面风速的下降趋势。为了解CMIP6土壤湿度数据在青藏高原地区的适用性,陈涛等<sup>[79]</sup>对CMIP6模式的土壤湿度数据进行评估,发现CMIP6模式高估了青藏高原的土壤湿度,并且模式间不确定性较大。胡桃等<sup>[80]</sup>利用CMIP6多模式结果,评估了模式对青藏高原冻土相关的变量(如积雪深度、雪水当量)的模拟能力,发现模式结果与观测数值在除青藏高原东南部以外的地区较为一致,但模式高估了青藏高原的积雪深度。

### 3 总结和展望

CMIP在国际层面上促进了气候科学领域前所未有的协调,取得了较大成功。随着世界上所有主要建模团体的参与,CMIP已经得到了科学界的广泛认可,其结果在IPCC报告中发挥了关键作用。本文回顾了CMIP的发展历程,并重点比较了CMIP3、CMIP5和CMIP6模式的模拟性能。从CMIP3到CMIP6,参与模式研发的队伍体量和模式数量不断增加;同时,模式的模拟性能也在不断提高,但模式模拟结果仍不可避免地存在一些不足:

(1) 不同阶段的模式模拟还存在一些系统性偏差,如双热带辐合带的异常现象。就中国区域而

言,在青藏高原地形复杂以及观测站点稀疏的影响下,CMIP模式对青藏高原的模拟偏差存在放大现象,表现为对地表气温的低估和对降水的高估。即使CMIP6模式的分辨率较CMIP3和CMIP5模式有所改进,但其对高海拔区域(青藏高原)气候的系统性模拟偏差改善仍较小。

(2) 相比较于气候均值,CMIP模式对气候极值的模拟能力还有待进一步改善。具体表现为,模式普遍地高估了冷热极端气温的幅度,并且对热带和亚热带地区极端降水的模拟仍然存在较大的偏差。

(3) 尽管高分辨率模式近年来发展迅猛,但由于其面临计算机运算规模大及动力框架仍需完善等问题,CMIP模式对区域气候(尤其是地形复杂地区)特征的模拟还存在限制。

(4) 多模式集合模拟中还存在一定的不确定性,虽然不同模式均能够模拟出历史气候变化的总体趋势,但模式间比较依然存在很大的差异。

为了弥补CMIP模式在气候变化模拟及预测中的不足,可以从以下几个方面进行完善:

第一,未来有必要采取统计降尺度和动力降尺度方法开展进一步的研究。例如,世界气候研究计划(WCRP)于2009年主导并发起的国际间区域气候降尺度试验(Coordinated Regional Climate Downscaling Experiment, CORDEX),其基于CMIP5和CMIP6的多模式、多情景预估结果,通过动力降尺度技术为全球不同区域提供精细尺度的气候变化预测数据<sup>[81]</sup>。

第二,应继续提高CMIP模式的水平和垂直分辨率,以利于提高模式对陆地降水变化和极端气候的模拟效果并减少模拟中存在的确定性。但对于一些重要的小尺度特征,即使是高分辨率气候模式也无法完全合理地进行模拟。因此,建模机构仍需加强对地球系统各个圈层相互作用和反馈机制的认识,不断完善模式对地球系统细致结构的模拟能力以解释未明确认识的地球系统关键过程及特征。

第三,观测资料的质量提升和数据扩展也是提高CMIP模式模拟能力的重要基础,有助于更准确地表示气候系统各组成部分的初始状态,以便获得更准确的气候预测。

第四,气候模拟和预估可靠性的改进在很大程度上取决于可用的计算资源,因为分辨率的提高、运行时间的延长以及复杂参数化的应用均需要更

大的计算成本。因此,提高计算能力对于改善未来的气候模拟和预测至关重要。

第五,对于模式模拟和预估中存在的不确定性,应从源头出发,完善气候系统机制理解,了解产生不确定性的原因,并发展最优多模式集合技术,以提供可靠的模式模拟及预估数据。

## 参考文献(References)

- [1] 王绍武, 罗勇, 赵宗慈, 等. 气候模式 [J]. 气候变化研究进展, 2013, 9(2): 150-154. [Wang Shaowu, Luo Yong, Zhao Zongci, et al. Climate models. Climate Change Research, 2013, 9(2): 150-154. ]
- [2] 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. [Zhou Tianjun, Chen Ziming, Zou Liwei, et al. Development of climate and earth system models in China: Past achievements and new CMIP6 results. Acta Meteorologica Sinica, 2020, 78(3): 332-350. ]
- [3] Meehl G A, Moss R, Taylor K E, et al. Climate model intercomparisons: Preparing for the next phase [J]. Eos, Transactions American Geophysical Union, 2014, 95(9): 77-78.
- [4] 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.
- [5] 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. [Zhou Tianjun, Zou Liwei, Chen Xiaolong. Commentary on the Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6). Climate Change Research, 2019, 15(5): 445-456. ]
- [6] Meehl G A. Global Coupled General Circulation Models [J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 1995, 76(6): 951-957.
- [7] Meehl G A, Boer G J, Covey C, et al. Intercomparison makes for a better climate model [J]. Eos, Transactions American Geophysical Union, 1997, 78(41): 445-451.
- [8] Meehl G A, Covey C, Delworth T, et al. The WCRP CMIP3 multimodel dataset: A new era in climate change research [J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 2007, 88(9): 1383-1394.
- [9] IPCC. Climate change 2013: The physical science basis [M]. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2013.
- [10] Taylor K E, Stouffer R J, Meehl G A. An overview of CMIP5 and the experiment design [J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 2012, 93(4): 485-498.
- [11] 陈晓晨. CMIP5 全球气候模式对中国降水模拟能力的评估 [D]. 北京: 中国气象科学研究院, 2014. [Chen Xiaochen. Assessment of the precipitation over China simulated by CMIP5 multi-models. Beijing, China: Chinese Academy of Meteorological Sciences, 2014. ]
- [12] 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: 747-756.
- [13] van Vuuren D P, Edmonds J, Kainuma M, et al. The representative concentration pathways: An overview [J]. Climatic Change, 2011, 109(1-2): 5-31.
- [14] Stouffer R J, Eyring V, Meehl G A, et al. CMIP5 scientific gaps and recommendations for CMIP6 [J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 2017, 98(1): 95-105.
- [15] 赵宗慈, 罗勇, 黄建斌. CMIP6 的设计 [J]. 气候变化研究进展, 2016, 12(3): 258-260. [Zhao Zongci, Luo Yong, Huang Jianbin. Design of CMIP6. Climate Change Research, 2016, 12(3): 258-260. ]
- [16] Eyring V, Cox P M, Flato G M, et al. Taking climate model evaluation to the next level [J]. Nature Climate Change, 2019, 9(2): 102-110.
- [17] Simpkins G. Progress in climate modelling [J]. Nature Climate Change, 2017, 7(10): 684-685.
- [18] O'Neill B C, Tebaldi C, van Vuuren D P, et al. The scenario model intercomparison project (ScenarioMIP) for CMIP6 [J]. Geoscientific Model Development, 2016, 9(9): 3461-3482.
- [19] 张丽霞, 陈晓龙, 辛晓歌. CMIP6 情景模式比较计划 (ScenarioMIP) 概况与评述 [J]. 气候变化研究进展, 2019, 15(5): 519-525. [Zhang Lixia, Chen Xiaolong, Xin Xiaoge. Short commentary on CMIP6 scenario model intercomparison project (ScenarioMIP). Climate Change Research, 2019, 15(5): 519-525. ]
- [20] Vuuren D P, Riahi K, Calvin K, et al. The shared socioeconomic pathways: Trajectories for human development and global environmental change [J]. Global Environmental Change, 2017, 42: 148-152.
- [21] 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 [J]. Global Environmental Change, 2017, 42: 251-267.
- [22] Fujimori S, Hasegawa T, Masui T, et al. SSP3: AIM implementation of shared socioeconomic pathways [J]. Global Environmental Change, 2017, 42: 268-283.
- [23] Calvin K, Bond-Lamberty B, Clarke L, et al. The SSP4: A world of deepening inequality [J]. Global Environmental Change, 2017, 42: 284-296.



- [24] Kriegler E, Bauer N, Popp A, et al. Fossil-fueled development (SSP5): An energy and resource intensive scenario for the 21st century [J]. *Global Environmental Change*, 2017, 42: 297-315.
- [25] 吴国雄, 张学洪, 刘辉, 等. LASG 全球海洋—大气—陆地系统模式(GOALS/LASG)及其模拟研究 [J]. *应用气象学报*, 1997, 8(S1): 16-29. [Wu Guoxiong, Zhang Xuehong, Liu Hui, et al. Global ocean-atmosphere-land system model of LASG (GOALS/LASG) and its performance in simulation study. *Journal of Applied Meteorological Science*, 1997, 8(S1): 16-29.]
- [26] Zhou T, Zhang X, Yu Y, et al. Response of IAP/LASG GOALS model to the coupling of air-sea fresh water exchange [J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2000, 17 (3): 473-486.
- [27] Yu Y Q, Yu R C, Zhang X H, et al. A flexible coupled ocean-atmosphere general circulation model [J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2000, 19(1): 169-190.
- [28] 周天军, 邹立维, 吴波, 等. 中国地球气候系统模式研究进展: CMIP 计划实施近 20 年回顾 [J]. *气象学报*, 2014, 72(5): 892-907. [Zhou Tianjun, Zou Liwei, Wu Bo, et al. Development of earth/climate system models in China: A review from the Coupled Model Intercomparison Project perspective. *Acta Meteorologica Sinica*, 2014, 72(5): 892-907.]
- [29] 李晓菲, 徐长春, 李路, 等. CMIP5 模式对西北干旱区典型流域气温模拟能力评估: 以开都—孔雀河为例 [J]. *资源科学*, 2019, 41(6): 1141-1153. [Li Xiaofei, Xu Changchun, Li Lu, et al. Evaluation of air temperature of the typical river basin in desert area of Northwest China by the CMIP5 models: A case of the Kaidu-Kongqi River Basin. *Resources Science*, 2019, 41(6): 1141-1153.]
- [30] Deng X, Perkins-Kirkpatrick S E, Lewis S C, et al. Evaluation of extreme temperatures over Australia in the historical simulations of CMIP5 and CMIP6 models [J]. *Earth's Future*, 2021, 9(7): e2020EF001902. doi: 10.1029/2020EF001902.
- [31] 孙侦, 贾绍凤, 吕爱锋, 等. IPCC AR5 全球气候模式对 1996—2005 年中国气温模拟精度评价 [J]. *地理科学进展*, 2015, 34(10): 1229-1240. [Sun Zhen, Jia Shaofeng, Lv Aifeng, et al. Assessment on precision of temperature simulated by the IPCC AR5 GCMs in China, 1996-2005. *Progress in Geography*, 2015, 34(10): 1229-1240.]
- [32] Bell S S, Chand S S, Tory K J, et al. Eastern North Pacific tropical cyclone activity in historical and future CMIP5 experiments: Assessment with a model-independent tracking scheme [J]. *Climate Dynamics*, 2019, 53: 4841-4855.
- [33] Fu W W, Moore J K, Primeau F, et al. Evaluation of ocean biogeochemistry and carbon cycling in CMIP earth system models with the International Ocean Model Benchmarking (IOMB) software system [J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2022, 127(10): e2022JC018965. doi: 10.1029/2022JC018965.
- [34] Carvalho D, Cardoso Pereira S, Rocha A. Future surface temperatures over Europe according to CMIP6 climate projections: An analysis with original and bias-corrected data [J]. *Climatic Change*, 2021, 167: 10. doi: 10.1007/s10584-021-03159-0.
- [35] Miao C, Duan Q, Sun Q, et al. Assessment of CMIP5 climate models and projected temperature changes over Northern Eurasia [J]. *Environmental Research Letters*, 2014, 9(5): 055007. doi: 10.1088/1748-9326/9/5/055007.
- [36] McMahon T A, Peel M C, Karoly D J. Assessment of precipitation and temperature data from CMIP3 global climate models for hydrologic simulation [J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2015, 19(1): 361-377.
- [37] Kumar S, Merwade V, Kinter J L, et al. Evaluation of temperature and precipitation trends and long-term persistence in CMIP5 twentieth-century climate simulations [J]. *Journal of Climate*, 2013, 26(12): 4168-4185.
- [38] Fan X, Duan Q, Shen C, et al. Global surface air temperatures in CMIP6: historical performance and future changes [J]. *Environmental Research Letters*, 2020, 15(10): 104056. doi: 10.1088/1748-9326/abb051.
- [39] Papalexio S M, Rajulapati C R, Clark M P, et al. Robustness of CMIP6 historical global mean temperature simulations: Trends, long-term persistence, autocorrelation, and distributional shape [J]. *Earth's Future*, 2020, 8(10): e2020EF001667. doi: 10.1029/2020EF001667.
- [40] Reichler T and Kim J. How well do coupled models simulate today's climate? [J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2008, 89(3): 303-312.
- [41] Bock L, Lauer A, Schlund M, et al. Quantifying progress across different CMIP phases with the ESMValTool [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2020, 125(21): e2019JD032321. doi: 10.1029/2019JD032321.
- [42] Martel J L, Brissette F, Troin M, et al. CMIP5 and CMIP6 model projection comparison for hydrological impacts over North America [J]. *Geophysical Research Letters*, 2022, 49: e2022GL098364. doi: 10.1029/2022GL098364.
- [43] Xiong Y, Ta Z, Gan M, et al. Evaluation of CMIP5 climate models using historical surface air temperatures in central Asia [J]. *Atmosphere*, 2021, 12(3): 308. doi: 10.3390/atmos12030308.

- [44] Sillmann J, Kharin V V, Zhang X, et al. Climate extremes indices in the CMIP5 multimodel ensemble: Part 1. Model evaluation in the present climate [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2013, 118(4): 1716-1733.
- [45] Chen H, Sun J, Lin W, et al. Comparison of CMIP6 and CMIP5 models in simulating climate extremes [J]. *Science Bulletin*, 2020, 65(17): 1415-1418.
- [46] 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. [Xiang Junwen, Zhang Liping, Deng Yao, et al. Projection and evaluation of extreme temperature and precipitation in major regions of China by CMIP6 models. *Engineering Journal of Wuhan University*, 2021, 54(1): 46-57. ]
- [47] 谢文强, 王双双, 延晓冬. CMIP6全球气候模式对中国年平均日最高气温和最低气温模拟的评估 [J]. *气候与环境研究*, 2022, 27(1): 63-78. [Xie Wenqiang, Wang Shuangshuang, Yan Xiaodong. Evaluation on CMIP6 global climate model simulation of the annual mean daily maximum and minimum air temperature in China. *Climatic and Environmental Research*, 2022, 27(1): 63-78. ]
- [48] 顾问, 陈葆德, 杨玉华, 等. IPCC-AR4全球气候模式在华东区域气候变化的预估能力评价与不确定性分析 [J]. *地理科学进展*, 2010, 29(7): 818-826. [Gu Wen, Chen Baode, Yang Yuhua, et al. Simulation evaluation and uncertainty analysis for climate change projections in east China made by IPCC-AR4 Models. *Progress in Geography*, 2010, 29(7): 818-826. ]
- [49] 周文翀, 韩振宇. CMIP5全球气候模式对中国黄河流域气候模拟能力的评估 [J]. *气象与环境学报*, 2018, 34(6): 42-55. [Zhou Wenchong, Han Zhenyu. Assessing CMIP5 climate simulations and objective selection of models over the Yellow River Basin. *Journal of Meteorology and Environment*, 2018, 34(6): 42-55. ]
- [50] Yan G, Dong W, Ren F, et al. Surface air temperature simulations over China with CMIP5 and CMIP3 [J]. *Advances in Climate Change Research*, 2013, 4(3): 145-152.
- [51] Sun Q, Miao C, Duan Q. Comparative analysis of CMIP3 and CMIP5 global climate models for simulating the daily mean, maximum, and minimum temperatures and daily precipitation over China [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2015, 120(10): 4806-4824.
- [52] Zhu H, Jiang Z, Li J, et al. Does CMIP6 inspire more confidence in simulating climate extremes over China? [J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2020, 37(10): 1119-1132.
- [53] 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. *Plateau Meteorology*, 2021, 40(6): 1455-1469. ]
- [54] 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. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2022, 44(1): 171-178. ]
- [55] 王慧, 肖登攀, 赵彦茜, 等. 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*, 2021, 37(5): 86-94. [Wang Hui, Xiao Pandeng, Zhao Yanxi, et al. Evaluation and projection of extreme temperature indices in the North China Plain based on CMIP6 models. *Geography and Geo-Information Science*, 2021, 37(5): 86-94. ]
- [56] 张建梅. 基于CMIP6全球气候模式的澜沧江流域气候变化初步评估 [D]. 南京: 南京信息工程大学, 2020. [Zhang Jianmei. Preliminary assessment of climate change in the Lancang River basin based on CMIP6 data set. Nanjing, China: Nanjing University of Information Science and Technology, 2020. ]
- [57] Lun Y, Liu L, Cheng L, et al. Assessment of GCMs simulation performance for precipitation and temperature from CMIP5 to CMIP6 over the Tibetan Plateau [J]. *International Journal of Climatology*, 2021, 41(7): 3994-4018.
- [58] 胡一阳, 徐影, 李金健, 等. 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*, 2021, 17(6): 730-743. [Hu Yiyang, Xu Ying, Li Jinjian, et al. Evaluation on the performance of CMIP6 global climate models with different horizontal resolution in simulating the precipitation over China. *Climate Change Research*, 2021, 17(6): 730-743. ]
- [59] Dai A. Precipitation characteristics in eighteen coupled climate models [J]. *Journal of Climate*, 2006, 19(18): 4605-4630.
- [60] Fiedler S, Crueger T, D'Agostino R, et al. Simulated tropical precipitation assessed across three major phases of the Coupled Model Intercomparison Project (CMIP) [J]. *Monthly Weather Review*, 2020, 148(9): 3653-3680.
- [61] Gusain A, Ghosh S, Karmakar S. Added value of CMIP6 over CMIP5 models in simulating Indian summer monsoon rainfall [J]. *Atmospheric Research*, 2020, 232: 104680. doi: 10.1016/j.atmosres.2019.104680.

- [62] Li L L, Li J, Yu R C. Evaluation of CMIP6 HighResMIP models in simulating precipitation over Central Asia [J]. *Advances in Climate Change Research*, 2022, 13(1): 1-13.
- [63] 王磊, 包庆, 何编. CMIP6 高分辨率模式比较计划 (HighResMIP) 概况与评述 [J]. *气候变化研究进展*, 2019, 15(5): 498-502. [Wang Lei, Bao Qing, He Bian. Short commentary on CMIP6 High Resolution Model Intercomparison Project (HighResMIP). *Climate Change Research*, 2019, 15 (5): 498-502. ]
- [64] Liang J, Tan M L, Hawcroft M, et al. Monsoonal precipitation over Peninsular Malaysia in the CMIP6 HighResMIP experiments: the role of model resolution [J]. *Climate Dynamics*, 2022, 58(9): 2783-2805.
- [65] Roberts M J, Camp J, Seddon J, et al. Projected future changes in tropical cyclones using the CMIP6 HighResMIP multimodel ensemble [J]. *Geophysical Research Letters*, 2020, 47(14): e2020GL088662. doi: 10.1029/2020GL088662.
- [66] Koutroulis A G, Grillakis M G, Tsanis I K, et al. Evaluation of precipitation and temperature simulation performance of the CMIP3 and CMIP5 historical experiments [J]. *Climate Dynamics*, 2016, 47(5): 1881-1898.
- [67] Kim Y H, Min S K, Zhang X, et al. Evaluation of the CMIP6 multi-model ensemble for climate extreme indices [J]. *Weather and Climate Extremes*, 2020, 29: 100269. doi: 10.1016/j.wace.2020.100269.
- [68] 许崇海, 罗勇, 徐影. 全球气候模式对中国降水分布时空特征的评估和预估 [J]. *气候变化研究进展*, 2010, 6 (6): 398-404. [Xu Chonghai, Luo Yong, Xu Ying. Assessment and projection for spatial-temporal distribution of precipitation in China based on global climate models. *Advances in Climate Change Research*, 2010, 6(6): 398-404. ]
- [69] 黄子立, 吴小飞, 毛江玉. 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*, 2021, 40(6): 1470-1483. [Huang Zili, Wu Xiaofei, Mao Jiangyu. An evaluation for impacts of the horizontal resolution of CMIP6 models on simulating extreme summer rainfall over Southwest China. *Plateau Meteorology*, 2021, 40(6): 1470-1483. ]
- [70] 肖雨佳. CMIP6 模式对青藏高原降水的模拟和预估 [D]. 北京: 中国气象科学研究院, 2021. [Xiao Yujia. Simulation and projection of precipitation over Tibetan Plateau by CMIP6 models. Beijing, China: Chinese Academy of Meteorological Sciences, 2021. ]
- [71] IPCC. Climate change 2021: The physical science basis [M]. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2021: 423-552.
- [72] Loew A, Andersson A, Trentmann J, et al. Assessing surface solar radiation fluxes in the CMIP ensembles [J]. *Journal of Climate*, 2016, 29(20): 7231-7246.
- [73] Wang G, Dommenget D, Frauen C. An evaluation of the CMIP3 and CMIP5 simulations in their skill of simulating the spatial structure of SST variability [J]. *Climate Dynamics*, 2015, 44(1): 95-114.
- [74] Lee T, Waliser D E, Li J L F, et al. Evaluation of CMIP3 and CMIP5 wind stress climatology using satellite measurements and atmospheric reanalysis products [J]. *Journal of Climate*, 2013, 26(16): 5810-5826.
- [75] Qiao L, Zuo Z, Xiao D. Evaluation of soil moisture in CMIP6 simulations [J]. *Journal of Climate*, 2022, 35(2): 779-800.
- [76] 宋春阳, 张守文, 姜华, 等. CMIP5 模式对中国近海海表温度的模拟及预估 [J]. *海洋学报*, 2016, 38(10): 1-11. [Song Chunyang, Zhang Shouwen, Jiang Hua, et al. Evaluation and projection of SST in the China seas from CMIP5. *Haiyang Xuebao*, 2016, 38(10): 1-11. ]
- [77] Mueller B, Seneviratne S I. Systematic land climate and evapotranspiration biases in CMIP5 simulations [J]. *Geophysical Research Letters*, 2014, 41(1): 128-134.
- [78] Wu J, Shi Y, Xu Y. Evaluation and projection of surface wind speed over China based on CMIP6 GCMs [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2020, 125 (22): e2020JD033611. doi: 10.1029/2020JD033611.
- [79] 陈涛, 顾忠顺, 代华光, 等. 青藏高原 CMIP6 土壤湿度适用性评估 [J]. *高原山地气象研究*, 2021, 41(1): 41-48. [Chen Tao, Gu Zhongshun, Dai Huaguang, et al. Applicability evaluation of soil moisture from CMIP6 in Tibetan Plateau. *Plateau and Mountain Meteorology Research*, 2021, 41(1): 41-48. ]
- [80] 胡桃, 吕世华, 常燕, 等. CMIP6 模式对青藏高原多年冻土变化的分析预估 [J]. *高原气象*, 2022, 41(2): 363-375. [Hu Tao, Lv Shihua, Chang Yan, et al. Analysis and prediction of permafrost changes in Qinghai-Xizang Plateau by CMIP6 climate models. *Plateau Meteorology*, 2022, 41(2): 363-375. ]
- [81] Giorgi F, Gutowski Jr W J. Regional dynamical downscaling and the CORDEX initiative [J]. *Annual Review of Environment and Resources*, 2015, 40: 467-490.



## Coupled Model Intercomparison Project and its research progress in simulation performance

FAN Xuewei<sup>1,2</sup>, MIAO Chiyuan<sup>1\*</sup>, GOU Jiaojiao<sup>1</sup>, WU Yi<sup>1</sup>, ZHANG Qi<sup>1</sup>

(1. State Key Laboratory of Earth Surface Processes and Resource Ecology, Faculty of Geographical Science, Beijing Normal University, Beijing 100875, China; 2. Research and Development Center for Watershed Environmental Eco-Engineering, Beijing Normal University (Zhuhai), Zhuhai 519087, Guangdong, China)

**Abstract:** The Coupled Model Intercomparison Project (CMIP) has developed rapidly from establishing in the mid-1990s, which provides irreplaceable data support for global climate change simulation and future climate change projection. This paper reviewed systematically the development process from CMIP1 to CMIP6, including theoretical framework, future scenario construction, international participation, etc. On this basis, the paper comprehensively summarized the performance of CMIP models in simulating global and China's temperature, precipitation, and other variables. Furthermore, the simulation results of historical experiment in CMIP3, CMIP5 and CMIP6 was emphatically compared. With the development of CMIP, the simulation performance of global climate models has also been improved due to the improvements of physical parameterization scheme and spatial resolution. However, the performances of CMIP models in simulating climate characteristics at regional scale are still limited, especially for the simulations of precipitation change in small-middle scale, and the simulation performances of different models varies greatly. Finally, the paper looks forward to the possible development directions of CMIP models according to the above problems.

**Keywords:** global climate models; CMIP; development process; simulation performance