

四川区域CMIP6模式模拟能力评估

邢晨辉

成都信息工程大学, 大气科学学院, 四川 成都
Email: xingchenhuicuit@163.com

收稿日期: 2020年12月23日; 录用日期: 2021年1月20日; 发布日期: 2021年1月27日

摘要

为了进一步研究CMIP6模式对四川地区地表温度、降水的模拟能力, 本文使用CMIP6气候模式数据集中14个模式温度数据和8个模式降水数据的历史模拟试验结果, 与CN05.1格点化观测数据进行了对比分析。通过对时间平均结果的对比分析以及空间相关分析, 对CMIP6模式数据关于四川地区的模式降水、模式地表温度在时间平均值和空间分布相关性的模拟能力进行对比分析, 结果表明: 1) 模式对于降水的模拟值偏高1.3 mm/day, 基本都能较好的模拟出四川地区的降水空间分布, MIROC6模式的模拟效果最优, 就相关性而言, 其次为CanESM5、NESM3模式, 就空间分布而言, CESM2、CESM2-WACCM模拟效果也不错。2) 模式对于地表温度的预估值偏低10 K, 基本都能较好的模拟出四川地区气温的空间分布, 但因为气候模型的水平分辨率相对较粗糙, 大多数局部特征难以表征, 尤其是在东南盆地以及中西部地区。关于地表温度、预估量和空间分布的结论比较一致, CESM2、CESM2-WACCM模式在两个方面的模拟效果都是最好, 其次为CNRM-ESM2、CNRM-CM6模式。

关键词

CMIP6, 模式气温, 模式降水, 空间相关分析

Evaluation of CMIP6 Model Simulation Capability in Sichuan Region

Chenhui Xing

School of Atmospheric Sciences, Chengdu University of Information Technology, Chengdu Sichuan
Email: xingchenhuicuit@163.com

Received: Dec. 23rd, 2020; accepted: Jan. 20th, 2021; published: Jan. 27th, 2021

Abstract

This paper used the historical simulation data of CMIP6 model and CN05.1 grid observation data

to evaluate the ability of CMIP6 model of simulation of the surface temperature and precipitation in Sichuan province. Through the time-averaged comparison and spatial correlation analysis, the CMIP6 model is compared and analyzed on the simulation ability of the model surface temperature and precipitation in the Sichuan area. The results show that: 1) The time-averaged estimated precipitation is 1.3 mm/day higher, which can basically simulate the spatial distribution of precipitation in Sichuan. The simulation effect of the MIROC6 is the best, followed by the CanESM5 and NESM3. In terms of spatial distribution, CESM2, CESM2-WACCM simulation results are also good. 2) The estimated surface temperature of the model is 10 K lower, which also can basically simulate the spatial distribution of the temperature in Sichuan. However, because the horizontal resolution of the climate model is relatively rough, most local features are difficult to characterize, especially in the Southeast Basin and the Midwest in Sichuan. Regarding the surface temperature, the conclusions of the estimated amount and the spatial distribution are relatively consistent. The simulation effects of the CESM2 and CESM2-WACCM are the best in two aspects. CNRM-ESM2 and CNRM-CM6 are followed.

Keywords

CMIP6, Model Ground Temperature, Model Precipitation, Spatial Correlation Analysis

Copyright © 2021 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

依照联合国政府间气候变化专门委员会第四次评估报告, 过去百年来全球平均地表气温上升了 $0.74^{\circ}\text{C} \pm 0.18^{\circ}\text{C}$, 这很大程度上是由人类活动引起的, 其中化石燃料的大规模使用影响至关重要。随着经济和社会的发展, 当前和未来的气候和环境变化问题越来越受到关注, 气候变化和海平面上升是人类社会面临的主要挑战。而在全球气候变暖的大背景下, 区域气候未来变化就更为难以预估。四川盆地是中国重要的农业和经济中心, 也是我国南方重要生态屏障和水源涵养地, 有着起伏不均的地势, 相对脆弱的生态环境, 加之众多的人口、大面积高强开发的国土, 易受气候变化不利影响, 依然需要大力开展系统、全面的气候性变化讨论, 以为应对气候变化和可持续发展提供科学依据。在不同时期, 四川省的年际、季节和每月地表温度变化差异很大。从年变化的角度看, 四川省的年际、季节和月地表温度均呈上升趋势, 大部分都通过了 0.05 显著性检验, 与年的相关性也很明显[1]。另一方面, 近几十年来四川的降水量有所减少, 年降水量呈下降趋势, 每 10 年降水减少约 22.9 mm。四川东部地区的年平均降水量和西部地区的年平均降水量平均降雨量相对较低, 中部地区的年平均降水量相对较大[2], 相对湿度和蒸发量也呈上升趋势, 但同时却变得更为干旱。所以四川这一地形复杂、生态环境脆弱的区域, 未来的气候变化仍存在着很大的不确定性。

气候系统模式是研究气候变化的有利工具, 自 1970 年代以来, 它发展迅速, 已成为研究天气和气候变化的重要工具, 例如中国在预测气候变化方面的工作[3] [4]气候变化归因分析[5] [6] [7]。由于气候系统模式对区域尺度的温度模拟存在较大的不确定性, 所以评估气候模式对研究区域模拟性能的可靠性就显得十分重要。目前, 世界气候研究计划(WCRP)正在组织进行第六次国际耦合模式对比计划(CMIP6), 来自全球不同研究机构的气候模式组正在进行多种数值试验, 并已公布部分数值结果, 预计 2020 年底完成全部试验[8], 更多关于数据详情请见 <https://esgf-node.llnl.gov/projects/cmip6/>。其所有模式的全部结果将

提供给各国科学家在研究全球和区域气候变化、影响和对策中使用,已有一些学者已使用 CMIP6 数值结果对全球及中国区域气候变化进行了研究[9] [10],但是对四川区域的模拟情况还未有研究。与上一代 CMIP5 模式相比,CMIP6 模式在模式分辨率和模式物理过程等方面已有不少改进,模式模拟结果的可靠性有所提高,同时降低了模拟不确定性带来的影响[11]。

CMIP 对比计划发展至今,各个模式的准确性已经大大提高,但是对于局部地区的模拟效果仍需研究,其中降水和温度两个气候要素对于气候模式的预估准确与否显得尤为重要。回归本文通过对时间平均、空间分布对比分析,结合相应统计量比较,对 CMIP6 模式对于四川地区的降水、地表温度模拟能力进行评估,以至于未来更好利用气候系统模式在四川区域开展气候变化多尺度研究和预估工作。

2. 资料与方法

2.1. 研究区气候概况

四川由于纬度和地形的影响,气候的区域和垂直变化非常明显,气候类型丰富多样。四川东、西部气候差异很大,高原气候、山区气候和亚热带季风气候等气候分布带共存。正是由于气候类型的不同,产生了数千种物种,因此四川省动植物种类众多,物种资源丰富。根据不同的光照,热量和湿度条件,四川可大致分为三个主要气候区,即四川盆地湿润气候区、四川西南山区亚热带半湿润气候和四川西北高海拔高山气候区。

2.2. 资料概况

根据地表气温和降水资料的可利用性和完整性,本文中使用的数值模式结果为 14 个 CMIP6 模式地表历史时期模拟试验地表气温数据和 8 个 CMIP6 模式地表历史时期模拟试验降水数据,有关模式基本信息请见表 1。对比分析所使用观测数据为 1961~2014 年 CN05.1 格点化观测数据集[12],分辨率为 $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$ 。

Table 1. Basic information of the models

表 1. 各个模式相关基本信息

模式名称	所属国家	所属机构	气温	降水
BCC-CSM2-MR	中国	BCC	√	√
BCC-ESM1	中国	BCC	√	√
CNRM-ESM2	法国	CNRM-CERFACS	√	
CNRM-CM6	法国	CNRM-CERFACS	√	
CESM2	美国	NSF-DOE-NCAR	√	√
CESM2-WACCM	美国	NSF-DOE-NCAR	√	√
CanESM5	加拿大	CCCMA	√	√
CAMS-CSM1	中国	CAMS	√	
HadGEM3-GC31	英国	MOHC	√	
MIROC6	日本	MIROC	√	√
UKESM1-0-LL	英国	MOHC	√	
NESM3	中国	NUIST	√	√
IPSL-CM6A-LR	法国	IPSL	√	
MRI-ESM2-0	日本	MRI	√	√

2.3. 研究方法

为了对比观测数据对模拟结果进行对比评估, 首先将模式结果使用双线性插值方法插值到 $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$ 分辨率, 分析时段为 1961~2014 年。其次, 再提取出四川地区作为研究区域, 对模式数据和观测数据进行气候态平均分析(1961~2014 年), 分析多模式集合平均值 T_{models} 对比观测数据 T_{obs} 的差值 T_d 。

$$T_d = T_{models} - T_{obs}$$

再根据计算出单个模式数据与观测数据的空间相关系数 r 等统计量值, 对观测数据和模式数据的时空相似性进行分析, 空间相关系数 r 为:

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n x_i y_i - \sum_{i=1}^n x_i \sum_{i=1}^n y_i}{\sqrt{\sum_{i=1}^n x_i^2 - (\sum_{i=1}^n x_i)^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n y_i^2 - (\sum_{i=1}^n y_i)^2}}$$

其中 x_i , y_i 分别为模式和观测数据, n 为时间长度。

最后, 综合给出单个模式和多模式集合平均值在四川区域对于地表气温和降水模拟的优劣情况。

3. 结果分析

3.1. 模式与观测降水值对比

降水是最基本和最重要的气象要素之一, 图 1 为 1961~2014 年观测降水平均值和 8 个 CMIP6 模式降水模拟值。由图 1 所示, 四川区域 8 个 CMIP6 模式降水模拟值都比观测降水偏多。

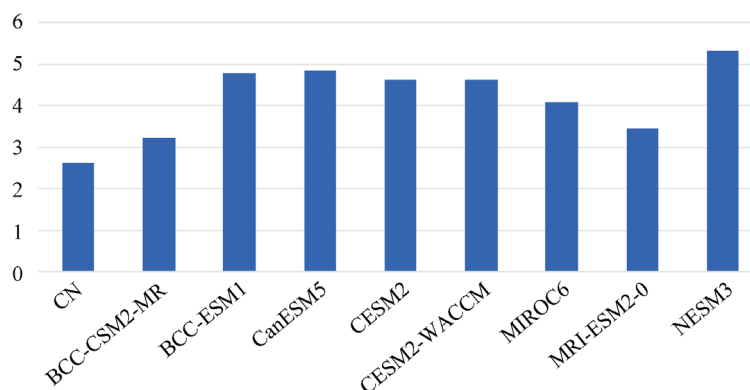


Figure 1. The mean precipitation of 8 CMIP6 models and observation data in Sichuan during 1961~2014

图 1. 1961~2014 年四川区域观测降水平均值(CN)和 8 个 CMIP6 模式降水模拟值

由图 2 所示的观测降水(CN)、等权重平均(AVG)和 8 个模式的 1961 到 2014 年的平均降水分布。降水量对比情况, 模式降水时间平均后, 降水模拟值普遍偏高。CN 观测降水为 2.62 mm/day, BCC-CSM2-MR、MRI-ESM2-0 模式最为接近, 分别为 3.25、3.47 mm/day, NESM3 模式估值最高达到了 5.32 mm/day。

就降水的空间分布而言, CanESM5、NESM3、MIROC6 都能较好的模拟出四川降水的西部特别是西北干旱、东部降水充足, 的空间分布。原因是西部为高原且海拔高度在 5 km 以上, 暖湿空气无法到达; 迎风坡的降水量中部比西北部高。在盆地中部的南坡上, 山脚下的降水量最初随高度的增加而增加。降水在一定高度达到最大值。数值随着高度的增加而逐渐减小。在东部, 南部分支槽的湿热气流对降水的影响比西部更大。就空间分布而言, CanESM5 模拟具有最佳效果。

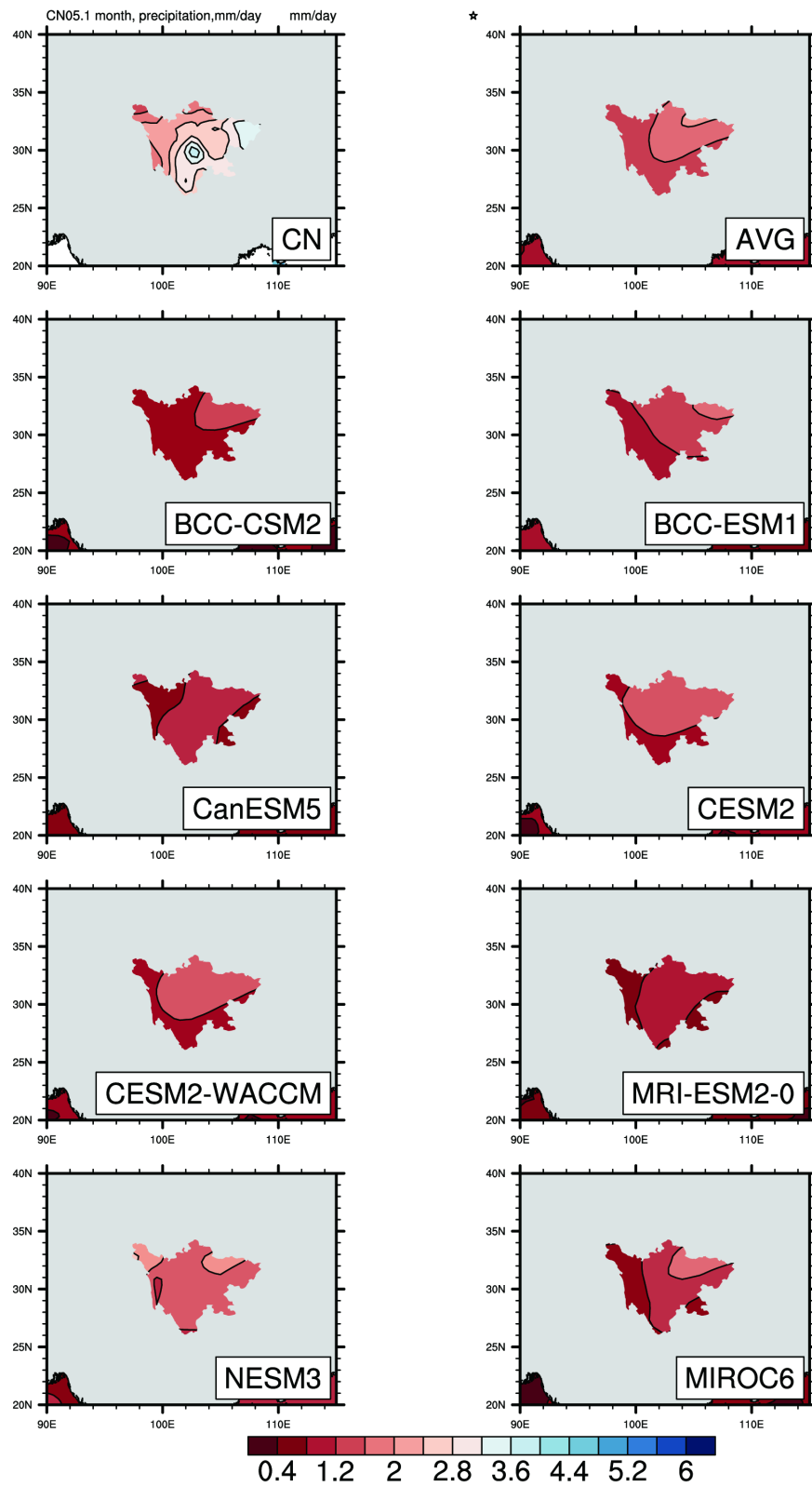


Figure 2. The spatial mean precipitation between models and observation data in Sichuan during 1961~2014

图 2. 1961~2014 年四川区域观测降水平均分布和模式降水平均分布

通过图3四川区域模式降水与观测降水差值分布图可以看出,模式整体年均平均偏高2 mm/day左右,模式都能模拟出西北东南走向的年平均降水分布型。其中 BCC-CSM2-MR、BCC-ESM1、CanESM5 模式的估值都偏高, BCC-ESM1 的估值在广元绵阳地区的估值较高,高出6个 mm/day。而 CanESM5 的估值高值中心位于川西南甘孜凉山一带,高达9 mm/day,原因可能是该地区位于青藏高原东部,地形影响气候复杂多变,权重过高影响了模式的预估;而 MRI-ESM2-0、MIROC6 模式的降水分布模拟的偏低于实际观测的降水分布,尤其是四川东部估值都多于1.3 mm/day; CESM2、CESM2-WACCM、MIROC6 的模拟差值较小。

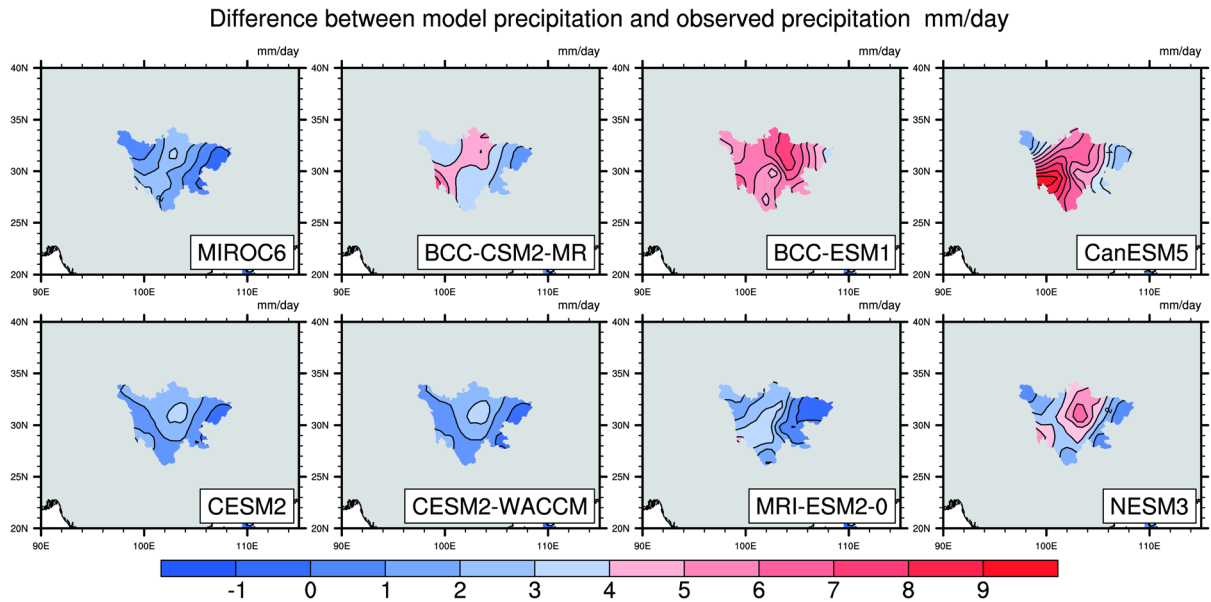


Figure 3. The spatial precipitation difference between models and observation data in Sichuan during 1961~2014
图3. 1961~2014年四川区域模式降水模拟值与观测降水差值空间分布

由1961~2014年四川区域各模式降水与观测降水空间相关系数表(表2)可知, NESM3 的相关性最好,其次为 CanESM5, BCC-CSM2-MR 模式,整体结果表明,CMIP6 模式高估了四川地区年平均地表降水,年均平均偏高2 mm/day左右,模式都能模拟出东北西南走向的年平均降水分布型。综合来看 CanESM5, BCC-CSM2-MR 模拟效果更接近实际观测降水。

Table 2. The correlation coefficients between models and observation data of precipitation in Sichuan
表2. 1961~2014年四川区域各模式降水与观测降水空间相关系数

模式名称	相关系数
BCC-CSM2-MR	0.66
BCC-ESM1	0.56
CESM2	0.58
CESM2-WACCM	0.51
CanESM5	0.72
MIROC6	0.64
NESM3	0.90
MRI-ESM2-0	0.62

3.2. 模式与观测地表气温值对比

地表气温同样也是最基本和最至关重要的气象要素之一，同时也是气候变化研究中最受研究者关注的要素指标。平均模式预估地表温度的数组普遍偏低，而且数值接近。由图 4 可知，CN05.1 观测平均地表温度为 289 K (CN)，CESM2、CESM2-WACCM、MIROC6 模式模拟值接近实际观测值，分别为 280.8、280.98、280.97 K，UKESM1-0-LL 的预估值偏低，为 270.73 K。

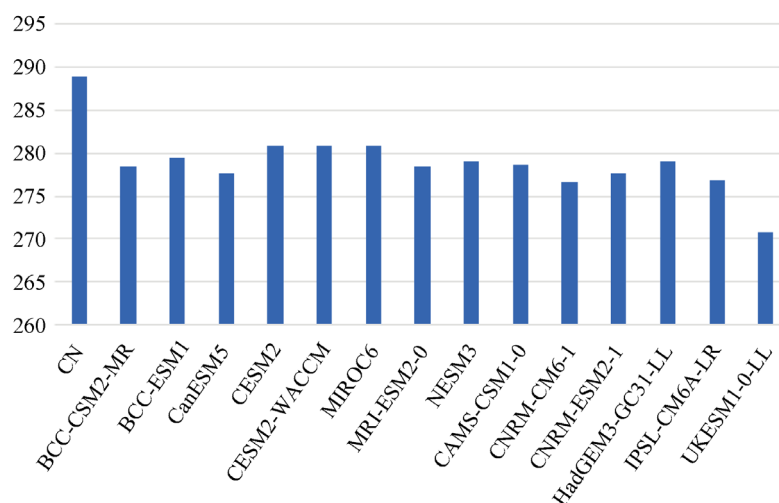


Figure 4. The area mean of 8 CMIP6 models and observation data during 1961~2014

图 4. 1961~2014 年四川区域观测降水平均值(CN)和 8 个 CMIP6 模式地表气温模拟值

由图 5 所示的 1961~2014 年年均地表气温观测数据和模式模拟分布可知，由图分析可知 CMIP6 大部分所选模式等权能够较好地模拟出盆地年均地表气温的主要分布特征，也就是低温中心位于四川西北部高海拔地区，最高温位于四川东南端，温度分布为由东到中再到西的带状分布，不足之处在于，因气候模型水平分辨率相对而言较低，所以模拟的地表温度要比观测场的地表面温度缺少细节刻画，也就是在图像上表现为更平滑，并且大多数局部特征难以表征，尤其是在东南盆地以及中西部地区。其中 CESM2、CESM2-WACCM 模式的空间分辨率较高模拟效果较高，川西高原边缘温度变化地区的细节、四川北部的冷区、位于自贡内江的暖中心也可在模拟中较清晰地分辨出来。UKESM1、NESM3 的模拟效果不理想，分辨率低，只能看出基本的冷暖分布。

分析各个模式地表气温模拟值与观测地表气温差值空间分布图(图 6)可知，模式整体年均平均温度偏低 6 K 左右，模式都能模拟出西北东南走向的年平均降水分布型。CESM2、CESM2-WACCM、CNRM-ESM2、CNRM-CM6-1 模式的模拟效果比较好，偏差都在正负 4 K 以内；其中 CanESM5、IPSL-CM6A 模式的估值都偏高，CanESM 模式的地表温度估值在川西甘孜凉山地区的估值较高，能高出 4~6 K。原因可能是该地区位于青藏高原东部，地形影响气候复杂多变，权重过高影响了模式的预估；而 BCC-ESM1、MIROC6、NESM3 模式的地表温度分布模拟的偏低于实际观测的地表温度分布，尤其是四川东部估值都多于 6 K。

由表 3 可知，CESM2、CESM2-WACCM、MRI-ESM2-0、NESM3 模式地表气温模拟值与观测值的相关系数较高，MIROC6、UKESM1-0-LL 模式与观测的相关系数则较低。根据先前地表温度空间分布的分析结果，CESM2、CESM2-WACCM 模式的相关性是最好的。

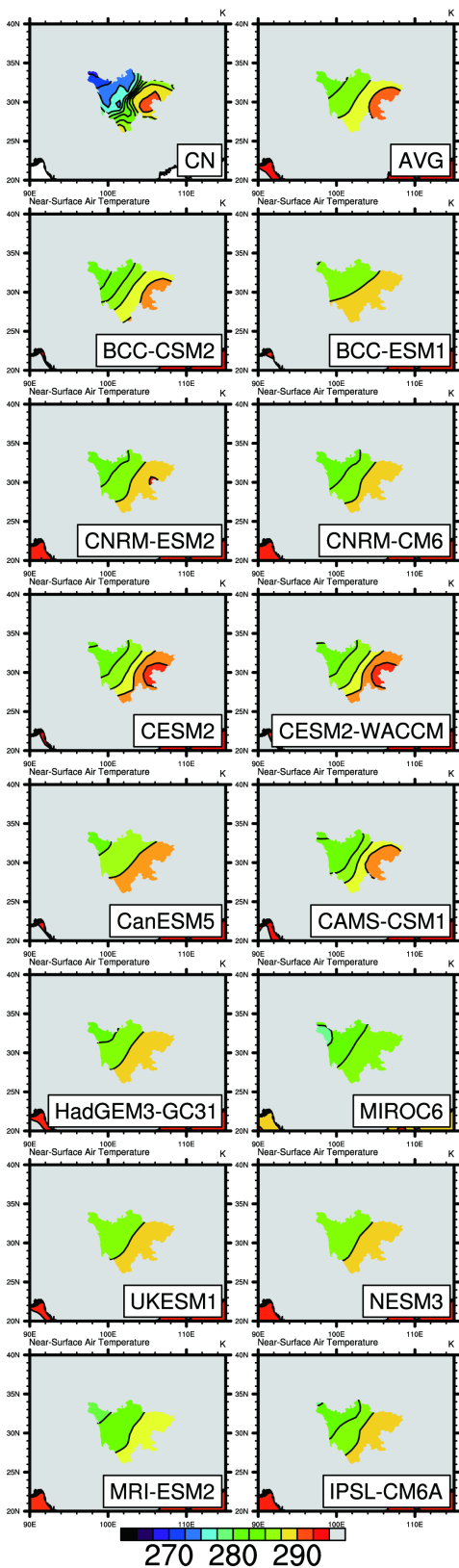


Figure 5. The spatial mean temperature between models and observation data in Sichuan during 1961~2014
图 5. 1961~2014 年四川区域地表气温观测和模式平均分布

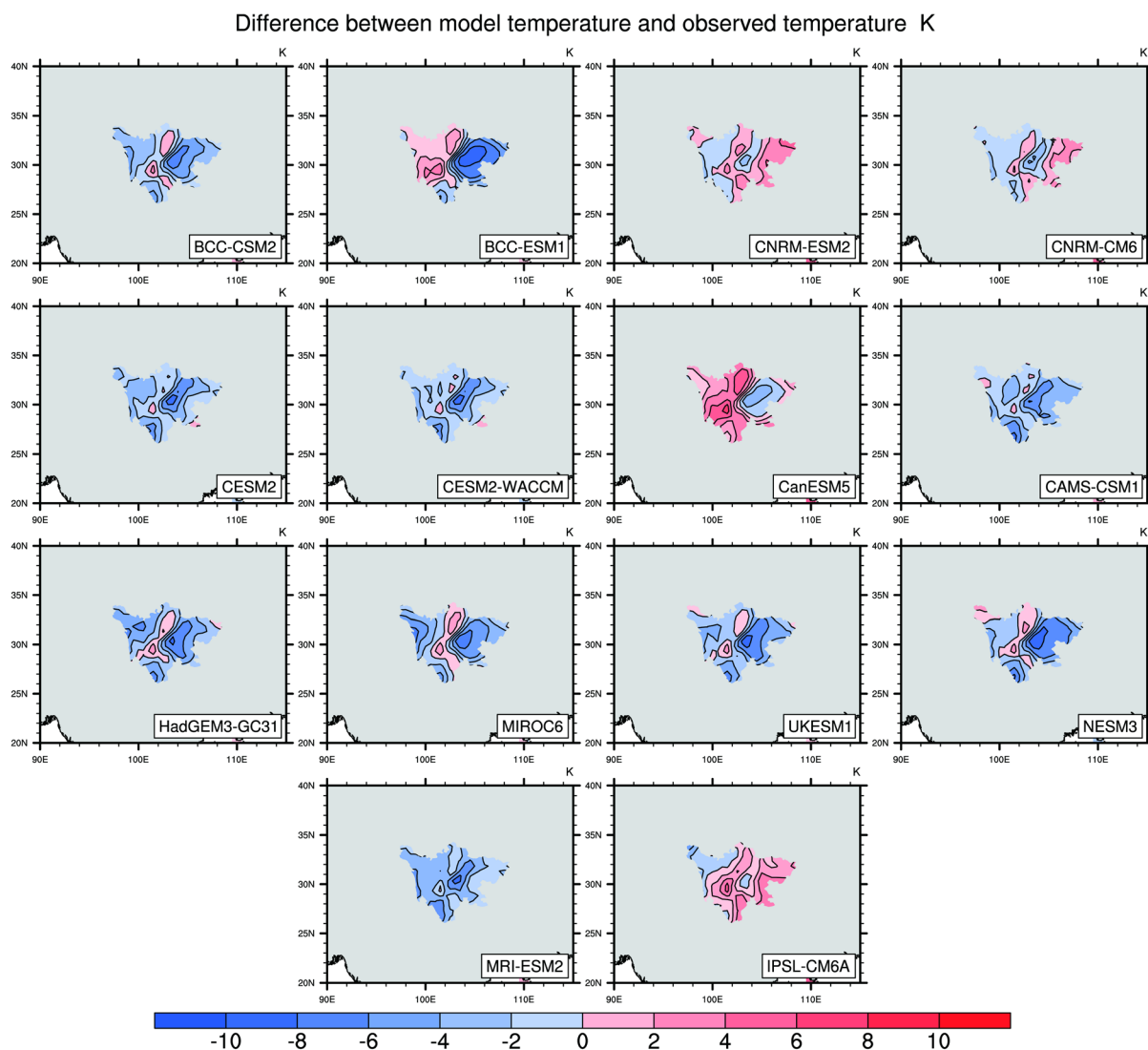


Figure 6. The spatial temperature difference between models and observation data in Sichuan during 1961~2014

图 6. 1961~2014 年四川区域模式地表气温模拟值与观测地表气温差值空间分布

Table 3. The correlation coefficients between models and observation data of temperature in Sichuan

表 3. 1961~2014 年四川区域各模式地表气温与观测地表气温空间相关系数

模式名称	相关系数
BCC-CSM2-MR	0.88
BCC-ESM1	0.89
CNRM-ESM2-1	0.82
CNRM-CM6-1	0.82
CESM2	0.90
CESM2-WACCM	0.90
CanESM5	0.87
CAMS-CSM1-0	0.89

Continued

HadGEM3-GC31-LL	0.86
MIROC6	0.77
UKESM1-0-LL	0.83
NESM3	0.90
MRI-ESM2-0	0.93
IPSL-CM6A-LR	0.87

4. 结论

在本文中, 将所有可用的最新一代 CMIP6 气候模式的历史模拟测试数据与最新的观测数据 CN05.1 相结合, 从空间分布和区域平均的角度评估 14 个全球气候模式模拟四川地表温度的能力和 8 个全球气候模型模拟四川降水的功能。主要结论有:

1) 模式模拟降水方面, 降水量对比情况, 模式降水时间平均后, 降水估值普遍偏高 2 mm/day; CMIP6 大部分所选模式的空间分布都能较好的模拟出四川降水的西部特别是西北干旱、东部降水充足的空间分布。总体来看, MIROC6 模式的模拟效果最好, 就相关性而言, 其次为 CanESM5、NESM3 模式, 就空间分布而言, CESM2、CESM2-WACCM 模拟效果也较好。而其他模式对于四川区域降水模拟效果不理想。

2) 模式气温方面, 平均模式预估地表温度的数组普遍偏低, 而且数值相差 10 K; CMIP6 大部分所选模式能够较好地模拟出盆地年均地表气温的主要分布特征, 即低温中心位于四川西北部高海拔地区, 高温中心位于四川东南端, 温度分布为由东到中再到西的带状分布, 不足之处在于, 因为气候模型的水平分辨率相对较粗糙, 所以模拟的地表温度要比观测场的表面温度更平滑, 并且大多数局部特征难以表征, 尤其是在东南盆地以及中西部地区。关于地表温度、预估量和空间分布的结论比较一致, CESM2、CESM2-WACCM 模式在两个方面的模拟效果都是最好, 其次为 CNRM-ESM2、CNRM-CM6 模式。

参考文献

- [1] 于真. 四川省地表温度时空变化特征及评价模型研究[D]: [博士学位论文]. 成都: 成都理工大学, 2017.
- [2] 次旺顿珠, 白玛多吉, 罗桑丹增. 四川省强降水分布及变化特征研究[J]. 安徽农业科学, 2019, 47(4): 224-230.
- [3] 杨绚, 李栋梁, 汤绪. 基于 CMIP5 多模式集台资料的中国气温和降水预估及概率分析[J]. 中国沙漠, 2014, 34(3): 795-804.
- [4] 郭彦, 董文杰, 任福民, 等. CMIP5 模式对中国年平均气温模拟及其与 CMIP3 模式的比较[J]. 气候变化研究进展, 2013, 9(3): 181-186.
- [5] 胡琴, 姜大膀, 范广洲. 青藏高原未来气候变化预估: CMIP5 模式结果[J]. 大气科学, 2015, 39(2): 260-270.
- [6] 于灏, 周筠珺, 李倩, 等. 基于 CMIP5 模式对四川盆地湿季降水与极端降水的研究[J]. 高原气象, 2020, 39(1): 68-79.
- [7] Chen, X.L., Liu, Y.M. and Wu, G.X. (2017) Understanding the Surface Temperature Cold Bias in CMIP5 AGCMs over the Tibetan Plateau. *Advances in Atmospheric Sciences*, **34**, 1447-1460. <https://doi.org/10.1007/s00376-017-6326-9>
- [8] Eyring, V., Bony, S., Meehl, G.A., et al. (2016) Overview of the Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6) Experimental Design and Organization. *Geoscientific Model Development*, **9**, 1937-1958. <https://doi.org/10.5194/gmd-9-1937-2016>
- [9] Gusain, A., Ghosh, S. and Karmakar, S. (2020) Added Value of CMIP6 over CMIP5 Models in Simulating Indian Summer Monsoon Rainfall. *Atmospheric Research*, **232**, Article ID: 104680. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2019.104680>

-
- [10] Turnock, S.T., *et al.* (2019) 300 Years of Tropospheric Ozone Changes Using CMIP6 Scenarios with a Parameterised Approach. *Atmospheric Environment*, **213**, 686-698. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2019.07.001>
- [11] 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.
- [12] 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[J]. 地球物理学报, 2013, 56(4): 1102-1111.