

文章编号: 2096-1618(2016)06-0645-06

CMIP5 多模式预测 21 世纪中国西南区域 平均降水量及其变化的对比分析

张超¹, 程军², 徐瑞³

(1. 云南省气象服务中心, 云南 昆明 650034; 2. 南京信息工程大学, 江苏 南京 210044; 3. 国家海洋环境预报中心, 北京 100081)

摘要:针对中国西南地区的降水量在 21 世纪变化趋势的问题, 利用第 5 次模式对比计划(CMIP5)中 12 个模式的全球月平均降水模拟资料和 2006 ~ 2010 年的全球月平均降水再分析资料, 采用区域平均函数计算平均降水量, 评估各模式对 21 世纪中国西南地区降水量的预测结果。研究表明: 模式平均的预测结果与再分析资料较接近, 对西南地区的降水具有良好的模拟能力。CMIP5 计划中多模式的平均结果表明, 在 RCP6.0 情景下, 西南地区夏季降水量有增多的趋势, 而冬季降水量变化不明显。并且, 随着人类活动等不确定因素的增加, 多模式预测结果之间的差异性在 2051 年后显著增加, 对比结果失去一致性。

关键词:气象学; 气候变化; CMIP5 模式; 降水模拟; 中国西南地区

中图分类号: P426.6

文献标志码: A

0 引言

由世界气候研究计划(WCRP)推动制定的 CMIP 计划, 是一整套耦合大气环流气候模式的比较计划。该计划旨在通过比较模式的模拟能力评价模式的好坏, 促进气候模式的发展; 同时也为生态、水文、社会经济诸学科在全球变化背景下预估未来环境变化提供可靠的科学依据^[1]。

降水变化是气候变化的一个重要指示器^[2]。气象工作者对中国西南地区的降水做过许多方面的分析总结^[2-11], 得出许多有益的结果。但对西南地区 21 世纪降水变化的预测却少有研究。利用第 5 次模式对比计划(CMIP5)中 12 个模式在全球变暖中等强度试验下(RCP6.0)的 2006 ~ 2100 年月平均模拟降水资料和 2006 ~ 2010 年的全球月平均实际降水资料, 利用区域平均和模式平均的方法, 对 21 世纪西南区域平均降水量进行预测分析, 并对比分析 12 个模式的模拟效果。

1 资料来源和方法

第 5 次模式对比计划(CMIP5)中的 12 个模式的全球月平均降水量资料来源于英国环境数据档案中心, 降水观测资料采用的是美国国家海洋局(NOAA)的再分析资料, 以上资料均为格点资料。其中降水观

测资料的空间分辨率为 192×92 , GFDL-ESM2G 模式、GFDL-ESM2M 模式和 GISS-E2-R 模式为 144×90 , CCSM4 模式为 288×192 , MIROC-ESM 模式和 MIROC-ESM-CHEM 模式为 128×64 , CSIRO-MK3-6-0 模式为 192×96 , HadGEM2-ES 模式为 192×145 , IPSL-CM5A-LR 模式为 96×96 , MIROC5 模式为 256×128 , MRI-CGCM3 模式为 320×160 , NorESM1-M 模式为 144×96 。在处理数据的过程中, 利用 Cressman 客观分析方法将各模式资料与再分析资料均统一插值到 $2.5^\circ \times 2.5^\circ$ 的空间分辨率上, 在相同的分辨率下进行比较。

月平均降水量观测资料采用的是 2006 ~ 2010 年降水率的再分析资料, 单位是 mm/s, 使用时按月换算成月平均降水量(mm)。因为 CMIP5 中的各模式资料为降水率资料, 为具有可比性, 所以降水量观测资料也采用降水率资料。选取 $96^\circ\text{E} \sim 112^\circ\text{E}$, $20^\circ\text{N} \sim 34^\circ\text{N}$ 中国西南地区作为研究区域, 定义每年夏季月平均降水量为 6 月、7 月和 8 月的平均降水量, 冬季月平均降水量为当年 12 月、次年 1 月和 2 月的平均值, 年平均降水量则定义为全年 12 个月平均降水量。从这 3 个角度来比较 CMIP5 中各模式的模拟能力和模拟 21 世纪西南地区降水的变化趋势。

处理资料时, 为便于各模式与再分析资料之间比较, 将区域中的资料进行区域平均, 把 2006 ~ 2010 年这 5 年的再分析资料按照夏季月平均、冬季月平均、年的月平均, 分别处理为一个西南地区降水量的区域平均值, 再把各模式相同时段下的降水模拟结果也进行

区域平均的计算,从而把各模式计算的区域平均值与观测资料进行对比分析。这样的处理方式,相对而言比较简洁,能够快速分辨出各模式的模拟结果与实际结果的差异情况,从而在一定程度上选出模拟能力相对较好的模式。

在进行各模式模拟结果讨论时,也采取计算区域平均值(降水量)的做法,即绘制模拟结果区域平均值的时间序列图(2006~2009年),每个模式分别绘制夏季、冬季、年平均3条时间序列,再把全部模式的模拟结果进行平均,得出CMIP5多模式模拟21世纪西南地区降水变化趋势的平均预测结果。

2 CMIP5多模式模拟预测基本情况

图1给出各模式对西南地区2006~2010年夏季、冬季和年的月平均降水量的模拟结果,并且与同期的实际降水量进行比较。由此可大致看出各模式对中国西南区域降水量的模拟能力。

12个模式对2006~2010年夏季西南地区平均降水量模拟结果为226.81 mm/mon,基本接近254.14 mm/mon的降水实况。各模式间的差异也较小,相对误差在-36.5%~+20.3%。对冬季的模拟结果,各模式差异较大,其中模拟出最高值72.55 mm/mon,相对误差达到+115.4%;最低17.89 mm/mon,相对误差为-46.9%,但模式平均以后得出西南地区冬季降水量为34.66 mm/mon,与33.68 mm/mon的降水实况很接近。对于年降水量而言,各模式模拟的结果差异相对较小,模式平均模拟结果为117.5 mm/mon,也基本接近129.95 mm/mon的实际降水量。

根据区域平均降水量的模拟结果与再分析资料的误差范围由小到大,对于西南区域夏季平均降水量,模拟性能较好的模式有GFDL-ESM2G模式、NorESM1-M模式、GFDL-ESM2M模式和MIROC5模式;对冬季降水量模拟性能较好的模式有NorESM1-M模式、GFDL-ESM2M模式、MRI-CGCM3模式和GFDL-ESM2G模式;对年降水量模拟性能较好的模式有NorESM1-M模式、CCSM4模式、GFDL-ESM2M模式和CSIRO-MK3-6-0模式。总体来看,模式平均的模拟结果与再分析资料较接近。其中NorESM1-M和GFDL-ESM2M这2个模式对西南区域平均降水量(夏季、冬季、年平均)的模拟结果都与再分析资料较为接近,模拟效果相对较好。

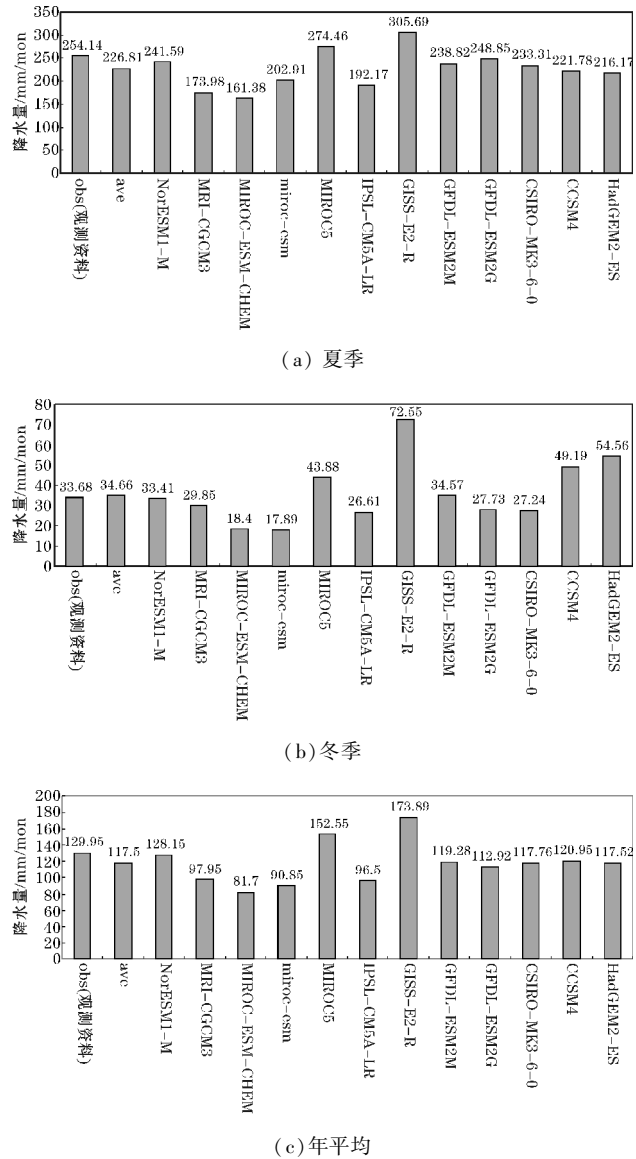


图1 CMIP5多模式对2006~2010年西南区域平均降水量的模拟结果与实际降水量比较(mm/mon)

3 预测结果

考虑到HadGEM2-ES模式模拟的时间序列为2003年11月~2008年11月,与其他11个模式的模拟时间序列2006年1月~2009年12月不一致,这部分讨论将其略去不予考虑,只使用11个模式的预测结果。从前面的讨论中发现,模式平均的模拟结果与实际结果较为接近,因此把11个模式的模拟结果绘制完成以后,再把模式平均的结果重点列出讨论。

3.1 区域平均降水量预测结果的逐年变化

图2为CMIP5多模式对中国西南区域平均降水量的逐年预测结果。由图可见各模式模拟的夏季降水量年际变化情况,大约每隔10a左右,出现一个降水量

峰值(谷值)周期。各模式对西南地区夏季降水量的模拟结果大多在 150 ~ 350 mm/mon;个别模式预测个别年份夏季降水量低于150 mm/mon,MIROC5 模式预测 2076 年有一个大于350 mm/mon的夏季降水量峰值。多模式平均结果对西南区域夏季降水量预测值大致为 220 ~ 250 mm/mon。21 世纪中叶,夏季降水量增加的趋势还不明显,从 2066 年后,夏季降水量增加趋势明显加大。

冬季西南地区高层受偏西干燥急流控制,水汽条件较差,是一年中降水最少的季节。各模式对冬季西南区域平均降水量的模拟结果大多在 20 ~ 80 mm/mon;个别模式预测个别年份冬季降水量低于

20 mm/mon,GISS-E2-R 模式预测 2020 年左右有一个 100 mm/mon的冬季降水量峰值。对多模式取平均后,西南地区冬季降水量大致为 30 ~ 40 mm/mon,其降水量值年际变化不明显。

分析模式模拟的年降水量时间序列,各模式对西南区域平均年降水量的模拟结果大多在 80 ~ 200 mm/mon。模式平均以后,西南区域平均年降水量大约为 110 ~ 130 mm/mon,21 世纪该区域平均年降水量呈增加的变化趋势。考虑到西南地区干湿季节分明的气候特点、夏季降水量占年降水量的一半以上^[3,8],区域平均年降水量的增加很大程度上应当是夏季降水量增多的结果。

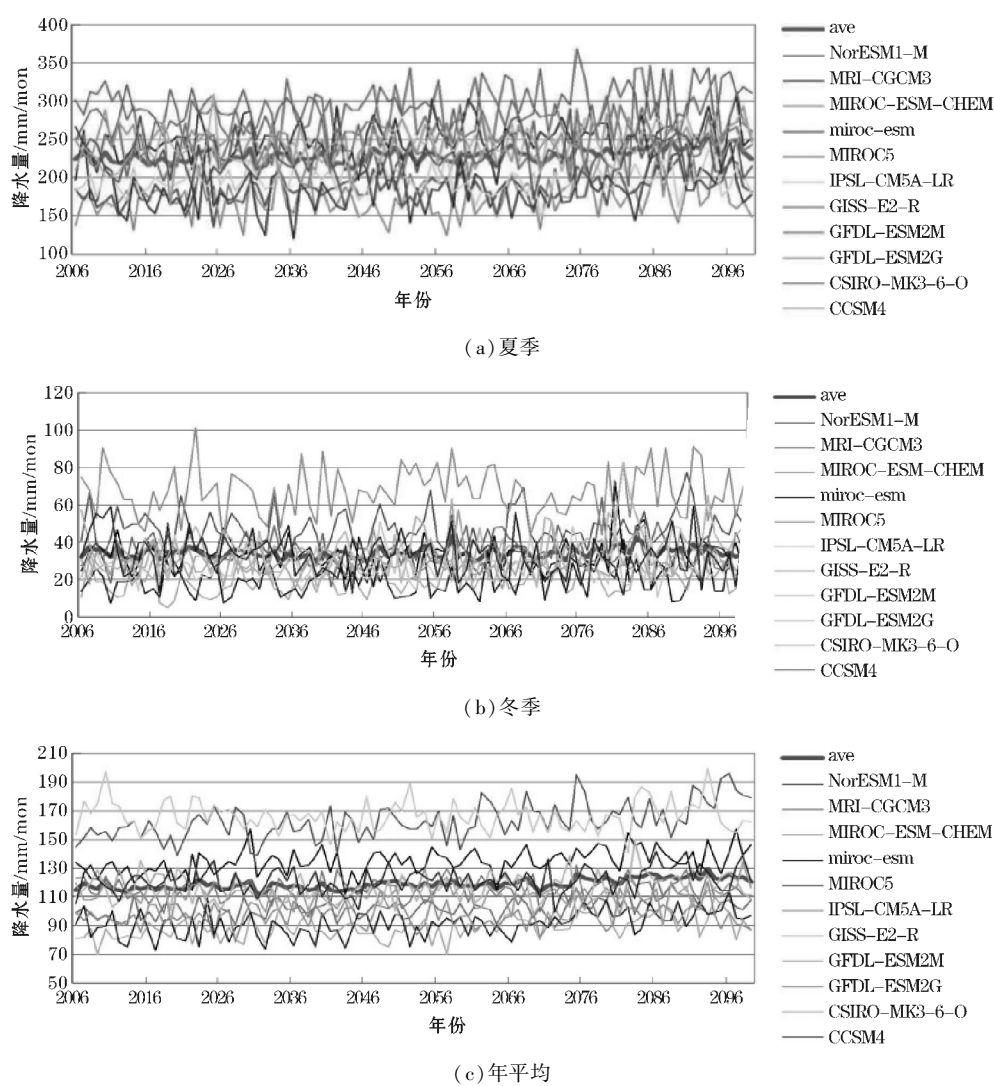


图2 CMIP5 多模式对中国西南区域平均降水量预测结果的逐年变化

3.2 区域平均降水量的变化趋势

西南地区汛期主要是 5 ~ 9 月,云南能持续到 10 月,其中夏季降水量比重大,故分析夏季降水变化趋势十分重要。11 个模式中有 10 个模式预测 21 世纪西

南地区夏季降水量呈增加的变化趋势,其中 MIROC5 模式预测增加趋势幅度最大,线性趋势倾向率达到 0.3858,即夏季降水量每10 a增加3.86 mm/mon,通过信度为95 %的显著性检验;GFDL-ESM2G 模式预测的增加趋势不明显。仅 GISS-E2-R 模式预测 21 世纪夏

季降水量呈负增长,线性倾向率为 -0.0132 ,即夏季降水量平均每10 a减少 0.13 mm/mon ,但没有通过95 %的显著性检验,因此可信度较低。模拟误差范围最小的5个模式都预测西南地区夏季降水量增多;GFDL-ESM2G模式预测每10 a增长 0.33 mm/mon ,NorESM1-M模式预测每10 a增长 2.05 mm/mon ,GFDL-ESM2M模式预测每10 a增长 2.25 mm/mon ,MIROC5模式预测每10 a增长 3.86 mm/mon 和CSIRO-MK3-6-0模式预测每10 a增长 1.16 mm/mon ,除GFDL-ESM2G模式外,均通过95 %的显著性检验。11个模式平均的预测结果是,2006~2009年西南地区夏季(6~8月)降水量变化呈增加的趋势,其线性倾向率为 0.1858 ,即每10 a增长 1.86 mm/mon ,也通过了95 %的显著性检验。由此可见,在RCP6.0情境下,模拟的西南地区夏季平均降水量将会显著增多。

对西南地区冬季降水量的预测,在11个模式中有CCSM4、GFDL-ESM2G、GFDL-ESM2M、IPSL-CM5A-LR和NorESM1-M等5个模式的预测结果呈现负增长趋势,其线性倾向率分别为 -0.0845 、 -0.0284 、 -0.0149 、 -0.0166 、 -0.0043 ,即每10 a冬季降水量分别减少 -0.85 mm/mon 、 -0.28 mm/mon 、 -0.15 mm/mon 、 -0.17 mm/mon 和 -0.04 mm/mon ,但只有CCSM4的结果通过了信度为95 %的显著性检验。另外6个模式预测冬季西南区域平均降水量呈增大趋势,但只有CSIRO-MK-3-6-0(每10 a增加 1.68 mm/mon)和MIROC-ESM-CHEM(每10 a增加 0.88 mm/mon)的结果通过了信度为95 %的显著性检验。根据11个模式预测结果的平均值,中国西南区域的冬季平均降水量在2006~2009年呈增加趋势,线性增长率为 0.0212 ,即每10 a增长 0.21 mm/mon ,增长幅度明显小于夏季。虽然多模式平均的结果显示出冬季降水有增加的趋势且通过了显著性检验,但从各模式的结果来看,大多数模式显示出西南地区降水在未来没有显著变化的趋势,也就是说冬季降水变化不明显。

对于年降水量的模拟,11个模式中只有GFDL-ESM2G模式预测结果呈减少的变化趋势,其趋势线倾向率仅为 -0.0089 ,即平均每10 a降水量减少 0.09 mm/mon (并未通过95 %的显著性检验),其他模式都预测年降水量呈增加趋势,其中预测增加趋势最大的是MIROC5模式,其线性增长率为 0.2587 ,即年降水量每10 a增加 2.59 mm/mon (通过了信度为95 %的显著性检验)。11个模式模拟的平均结果为:2006~2009年中国西南区域年降水量变化呈增加的趋势,其趋势增长速率为 0.0914 ,即每10 a增长 0.91 mm/mon ,结果通过了95 %的显著性检验。其中NorESM1-M模

式预测每10 a增长 1.44 mm/mon ,CCSM4模式预测每10 a增长 0.71 mm/mon ,GFDL-ESM2M模式预测每10 a增长 0.27 mm/mon ,CSIRO-MK3-6-0模式预测每10 a增长 0.89 mm/mon (除GFDL-ESM2M外均通过了95 %的显著性检验),以上对年平均降水模拟误差最小的4个模式,模拟的变化趋势都约为 1 mm/mon/10 a 左右的发展趋势。因此,21世纪西南地区年平均降水量呈显著增加的变化趋势,并且应当是夏季降水量的增加引起的。

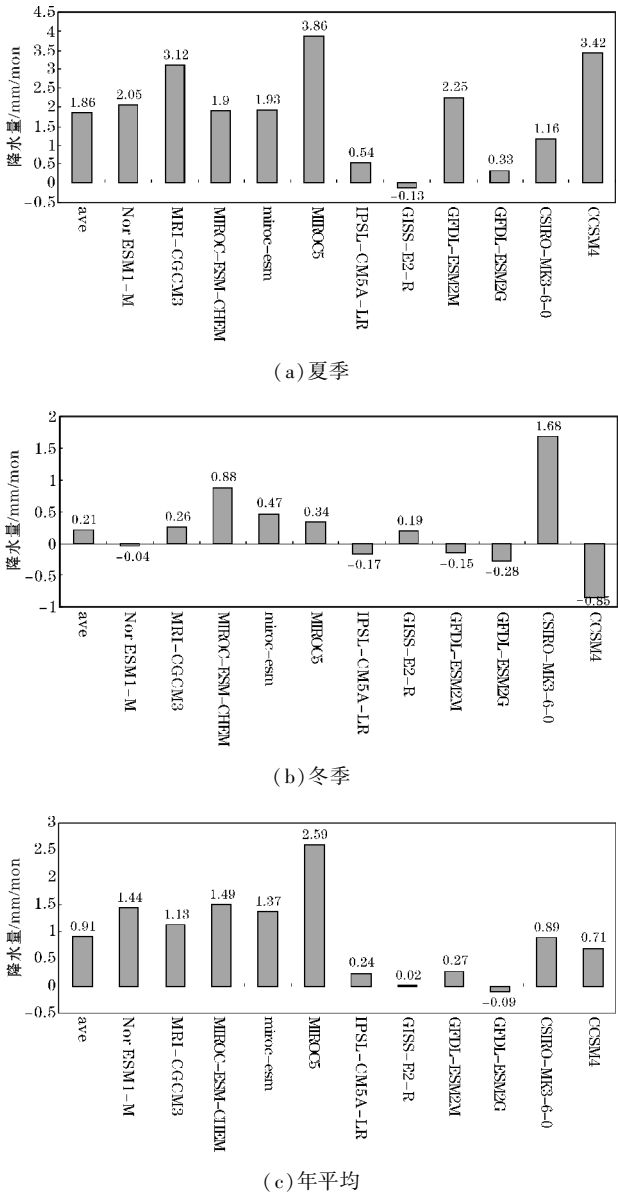


图3 CMIP5多模式模拟中国西南区域平均降水量的线性倾向率(mm/mon/10a)

3.3 多模式预测结果的离散程度及其变化趋势

图4是2006~2009年11个模式对西南地区降水量模拟结果均方差的逐年变化及其趋势。由图可见,夏季、冬季和年平均的模拟结果的均方差都随预测年

份的延后略呈增大变化,表示模式与模式预测结果之间的差异性有逐渐增大的趋势。对夏季降水量的预测,模式之间的离散程度最大,其均方差趋势线斜率为0.0276;年降水量预测结果均方差的趋势线斜率次大,为0.0152;冬季降水量的最小,仅为0.0109。

进一步分析,对于夏季降水量的模拟结果,11个模式在2006~2050年对西南地区降水模拟的标准差为42.4 mm/mon,而在2051~2099年,11个模式间的标准差上升到44.5 mm/mon,两个阶段的差异情况通过了信度为95%的显著性检验。同样的,针对于冬季和全年平均的结果,11个模式间的标准差在2051~2099年,相较于2006~2050年都有显著性的增加。因此说明在RCP6.0情景下,各模式之间对西南地区2051年后的降水模拟结果不一致,差异性显著增大。

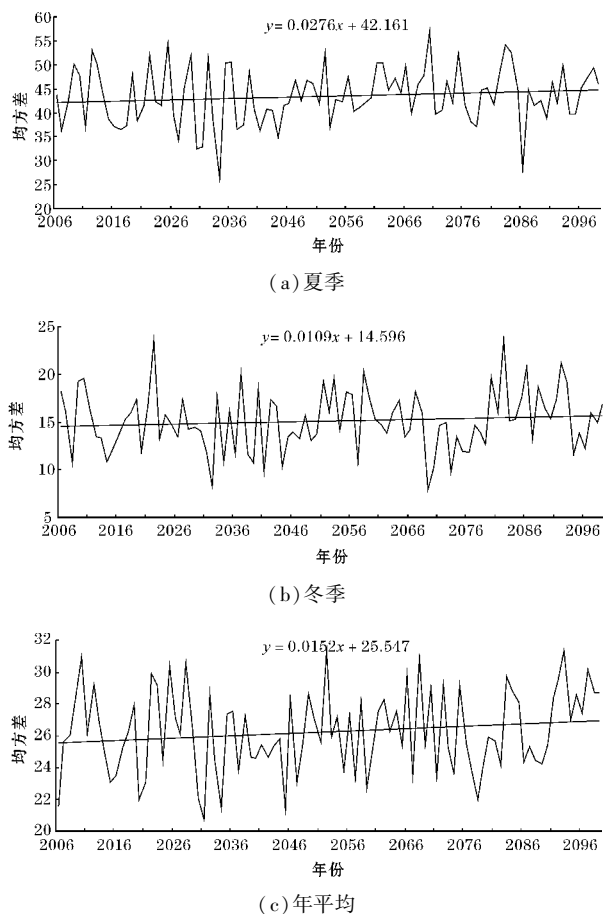


图4 CMIP5多模式对中国西南区域平均降水量模拟预测结果的离散趋势

4 结论

(1) 尽管CMIP5计划中各模式的模拟预测结果仍不可避免的存在一些不足,但模式平均的结果对西南地区季节性降水具有较好的模拟效果,可以为预估西南地区未来气候环境变化提供科学依据。

(2) 根据区域平均降水量的模拟结果与再分析资料的误差范围由小到大,对于西南区域夏季平均降水量,模拟性能较好的模式有GFDL-ESM2G模式、NorESM1-M模式、GFDL-ESM2M模式和MIROC5模式;对冬季降水量,模拟性能较好的模式有NorESM1-M模式、GFDL-ESM2M模式、MRI-CGCM3模式和GFDL-ESM2G模式;对年降水量,模拟性能较好的模式有NorESM1-M模式、CCSM4模式、GFDL-ESM2M模式和CSIRO-MK3-6-0模式。总体来看,多模式模拟的平均结果具有较高的可信度,表现出相对较好的模拟性能。

(3) 随着人类活动增加,全球变暖的趋势下,利用CMIP5模式预测的降水量变化规律,旨在适应和缓解未来气候变化的影响,CMIP5模式在RCP4.5和RCP8.5场景下的模拟结果一致表明,年降水量在中国预计将显著增加^[12]。CMIP5多模式在RCP6.0场景下,预测中国西南地区21世纪年降水量呈增加的变化趋势,其中夏季降水量有较大幅度的增加趋势,冬季降水量的变化趋势不太明显。预测年降水量的增加趋势很大程度上是由于夏季降水量增加造成。根据11个模式预测的平均结果,2006~2099年西南地区夏季降水量的变化趋势为每10a增加1.86 mm/mon;冬季降水量的变化趋势为每10a增加0.21 mm/mon;年降水量的变化趋势为每10a增加0.91 mm/mon。张武龙,张井勇,范广洲^[14]在用CMIP5模式对西南地区干湿季降水的模拟和预估中,也发现虽然各模式对干湿季降水的模拟能力差异较大,但大多数模式模拟的干季和湿季降水偏多。

(4) 值得注意的是,11个模式间的标准差(冬季、夏季、年平均)在2051~2099年,相较于2006~2050年有显著性的增加,因此说明在RCP6.0情景下,各模式对西南地区2051年后的降水模拟差异性显著增大,对比结果失去一致性。

参考文献:

- [1] 王澄海,吴永萍,崔洋. CMIP研究计划的进展及其在中国地区的检验和应用前景[J]. 地球科学进展,2009,24(5):461-468.
- [2] 刘燕,王谦谦,程正泉. 我国西南地区夏季降水异常的区域特征[J]. 南京气象学院学报,2002,25(1):105-110.
- [3] 董谢琼,段旭. 西南地区降水量的气候特征及变化趋势[J]. 气象科学,1998,18(3):239-246.
- [4] 曲迎乐,高晓清,陈文,等. 近50年来我国东、西部地面气温和降水变化对比的初步分析[J]. 高原气象,2008,27(3):524-529.

- [5] 刘晓冉,李国平,范广洲,等.我国西南地区1960–2000年降水资源变化的时空特征[J].自然资源学报,2007,22(5):782–792.
- [6] 唐红玉,顾建峰,俞胜宾,等.西南地区降水日变化特征分析[J].高原气象,2011,30(2):376–384.
- [7] Jiang Xingwen, Li Yueqing. Spatio-temporal variability of winter temperature and precipitation in Southwest China[J]. Geogr. Sci, 2011, 21(2):250–262.
- [8] 陈宗瑜. 云南气候总论[M]. 北京:气象出版社, 2001.
- [9] 琚建华,李绚丽. 云南初夏降水与前期大气环流的关系[J]. 高原气象,1999,18(2):63–70.
- [10] 刘瑜. 云南雨季早迟的气候特征分析[J]. 气象,2000,26(7):45–49.
- [11] 华明. 青藏高原热状况对夏季西南地区气候影响的分析及模拟[J]. 高原气象,2003,22(S1):162–156.
- [12] CHEN HuoPo. Projected change in extreme rainfall events in China by the end of the 21st century using CMIP5 models[J]. Chinese Science Bulletin, 2013, (12):136–146.
- [13] CHEN Xiao Long, ZHOU Tian Jun, GUO Zhun. Climate sensitivities of two versions of FGOALS model to idealized radiative forcing[J]. Science China(Earth Sciences), 2014, (6):227–237.
- [14] 张武龙,张井勇,范广洲. CMIP5模式对我国西南地区干湿季降水的模拟和预估[J]. 大气科学,2015,39(3):117–128.
- [15] Hua Wen jian, Chen Hai shan, Sun Shan lei. Uncertainty in land surface temperature simulation over China by CMIP3/CMIP5 models[J]. Theoretical and Applied Climatology, 2014, (3/4):463–474.
- [16] Xin Xiao ge, Cheng Yan jie, Wang Fang, et al. Asymmetry of surface climate change under RCP2.6 projections from the CMIP5 models[J]. Advances in Atmospheric Sciences, 2013, (3):796–805.

Comparative Analysis on Mean Amounts of Precipitation and its Changes during 21st Century in Southwest China Predicted by CMIP5 Multi-modes

ZHANG Chao¹, CHENG Jun², XU Rui³

(1. Meteorological Service Center of Yunnan Province, Kunming 650034, China; 2. Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China; 3. National Marine Environment Forecast Center, Beijing 100081, China)

Abstract: In order to investigate the precipitation in Southwest China during 21st century, the simulated monthly mean precipitation from 12 coupled models in CMIP5 and the reanalysis data during 2006–2010 are utilized. The precipitation in Southwest China from the 12 models are assessed by comparing them with the reanalysis data. The results show that the multi-modes mean has a favourable simulation for the precipitation in Southwest China. Under the RCP6.0 scenario, the precipitation in Southwest China during summer has an increasing tendency while the variation during winter is not obvious from the multi-modes mean. Moreover, the variation in multi-models has an obvious increase after 2051 due to anthropogenic activities.

Key words: meteorology; climate change; CMIP models; precipitation simulation; southwest China