

DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2024.05.014.

陈侯霏, 韩玉国, 孙明东, 等. 基于 CMIP6 气候模式对长江流域四川段的未来降水变化预估与分析[J]. 水土保持研究, 2024, 31(5): 288-294.

Chen Yufei, Han Yuguo, Sun Mingdong, et al. Prediction and Analysis of Future Precipitation Changes in the Sichuan Section of the Yangtze River Basin Based on the CMIP6 Climate Model[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2024, 31(5): 288-294.

基于 CMIP6 气候模式对长江流域四川段的未来降水变化预估与分析

陈侯霏^{1,2}, 韩玉国¹, 孙明东², 韩乐¹

(1.北京林业大学 水土保持学院, 北京 100083; 2.中国环境科学研究院, 北京 100083)

摘要: [目的] 了解和掌握气象时空变化, 合理预估气候变化的未来趋势, 可为区域应对措施的制定提供重要的理论依据。[方法] 以长江流域四川段作为研究区, 基于 1980—2014 年实测站点资料进行数据分析, 采用偏差订正后的国际耦合模式比较计划第六阶段 (CMIP6) 中情景齐全的 GCM 预估 3 个未来假定气候情景模式 (SSP1-2.6, SSP2-4.5, SSP5-8.5), 分析了区域内降水气候变量的变化情况。[结果] (1) 气候模式模拟长江流域四川段降水量的结果存在一定程度的低估, 在时间尺度上表现为月尺度 > 季尺度 > 年尺度。(2) 对气候模式进行校正和评估后, 数据更加符合实际情况, 分位数映射法对气候模型数据的校正是很有效的。(3) 相对于基准期 (1980—2014 年), 研究区域未来降水量在 3 种情景下均高于历史时期, 表现为 SSP5-8.5 > SSP2-4.5 > SSP1-2.6。(4) 降水量增加较大的区域主要位于研究区的西北部, 呈现西部低东部高的空间格局。[结论] 气候模式对研究区未来降水变化的预估结果为整体呈增长趋势, 但存在一定程度低估。

关键词: CMIP6 模式; 气候变化; 统计降尺度 Delta; 长江流域四川段

中图分类号: P467

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2024)05-0288-07

Prediction and Analysis of Future Precipitation Changes in the Sichuan Section of the Yangtze River Basin Based on the CMIP6 Climate Model

Chen Yufei^{1,2}, Han Yuguo¹, Sun Mingdong², Han Le¹

(1. School of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China; 2. Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100083, China)

Abstract: [Objective] Understanding and grasping the temporal and spatial changes in meteorology and reasonably predicting the future trend of climate change can provide an important theoretical basis for the formulation of regional response measures. [Methods] The Sichuan section of the Yangtze River Basin was selected as the research area. Data analysis was conducted based on measured station data from 1980 to 2014. Three future hypothetical climate scenario models (SSP1-2.6, SSP2-4.5, SSP5-8.5) were estimated using the GCM with complete scenarios in the sixth phase of the International Coupled Model Comparison Plan (CMIP6) after bias correction, and the changes in precipitation climate variables within the region were analyzed. [Results] (1) There is a certain degree of underestimation of precipitation simulation in climate models, with monthly scale > seasonal scale > annual scale in terms of time scale. (2) After the calibration and evaluation of the climate model, the data are more consistent with the actual situation, and the quantile mapping method is very effective for the calibration of the Climate model data. (3) Compared to the benchmark period (1980—2014), the future precipitation in the study area is higher than the historical period

收稿日期: 2023-07-03

修回日期: 2023-10-12

资助项目: 国家重点研发计划项目“近岸海域氮磷污染陆海气协同防治关键技术与示范”(2021YFC3101703)

第一作者: 陈侯霏 (1996—), 女, 内蒙古通辽人, 硕士研究生, 研究方向为水资源管理。E-mail: 2114227007@qq.com

通信作者: 孙明东 (1981—), 男, 山东莱州人, 博士, 工程师, 主要从事水环境规划与管理研究。E-mail: sunmingdong@163.com

<http://stbcyj.paperonce.org>

under three scenarios, with $SSP5-8.5 > SSP2-4.5 > SSP1-2.6$. (4) The areas with significant increases in precipitation are mainly located in the northwest of the study area, showing a spatial pattern of low level in the west and high level in the east. [Conclusion] The climate model's prediction of future precipitation changes in the study area shows an overall increasing trend, but there is underestimation to a certain extent.

Keywords: CMIP6 model; climate change; statistical downscaling; Sichuan section of the Yangtze River Basin

全球气候在过去一个世纪的时间内展示出了主要以变暖为特征的变化。IPCC 第六次评估报告指出,全球地表平均温度在 2011—2020 年比 1850—1900 年高出 $1.1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。全球气候变暖导致全球陆地上的水文循环发生了一定程度的改变,并且全球各地的水资源分布发生了重新调整,因此了解和掌握气象时空变化,合理预估气候变化的未来趋势对于制定应对气候变化的策略具有重要意义^[1]。全球气候模式(Global Climate Models, GCM)是模拟历史气候状态开展未来气候变化最主要的工具^[2],目前被广泛地应用于天气预报中,以理解和预测气候变化。WCRP 在 1995 年建立了国际耦合模式相互比较计划(CMIP),并得到了迅速发展。如今,CMIP 逐渐发展为“以推动模式发展和增进对地球气候系统的科学理解”为目标的庞大计划,同时也是气候系统模拟和预测的重要工具。在此之前,WGCM 已经组织了 4 次格式比较程序(CMIP1, CMIP2, CMIP3, CMIP5)。当前,国际耦合模式相互比较计划已进入第 6 阶段(CMIP6),最新的全球气候模式的模拟数据仍在持续更新。这些气候模式的模拟数据将成为未来 5~10 年全球气候科学研究的重要基础^[2-3]。

气候模式本身的限制,使其在分辨率、物理参数化过程等方面的提升和发展仍旧不够,模拟得出的未来气候变化预估数据同样具有较大的误差和不确定性,为了减少这种误差和不确定性,我们要对数据进行降尺度处理,相同气候模式对不同研究区模拟结果仍有较大不同^[4-5]。陈晓晨等^[6]评估了 CMIP5 模型在预测中国降水能力方面的表现,结果表明气候模式能够较好地模拟中国降水的时空变化。CMIP6 与 CMIP5 相比,增加了新的情景预估试验,同时考虑了温室气体排放和人类社会经济变化^[7-8]。对比于过去 20 多年实施的 CMIP 项目,CMIP6 具有更多的参与模式数量、更完善的科学试验设计以及更大规模的模拟数据库^[9],诸多学者证实 CMIP6 中的 GCM 在中国表现良好^[4]。

近年来,统计降尺度技术在国际上得到了广泛的应用,常见的方法有 SDSM, DELTA, BCSD, ADS。前期研究发现,SDSM 模型在大气温度降尺度模拟方

面往往表现优,但在降水方面则存在不足^[10];Delta 法是一种误差修正型模型,在克服系统误差方面有着明显的优越性,被广泛应用于降水降尺度研究^[11-12]。赵芳芳等^[12]对 Delta 方法表示赞同,Delta 方法既简便又快速,可以同时多个站进行模拟,并且可以很好地模拟出降水变化。

四川省位于中国西南部,地处长江上游,是涉及长江流域面积最多的省份。长江流域受大气环流季节变化的影响,导致流域内降水时空分布不均,洪涝灾害等气象灾害问题十分严重,在全球气候变暖的背景下,这些气象灾害发生的频率和趋势将进一步被提高^[13]。四川省大部分地区因其特殊的地理环境、地质结构复杂和独特的天气气候条件,更易发生各种洪涝灾害、水旱灾害等问题。本文以长江流域四川段作为研究对象,根据统计结果应用分位数映射法进行校正,评估基于 CMIP6 的气候模式在研究区的模拟能力,预估未来降水变化,了解和掌握气象时空变化,以合理预估气候变化的未来趋势,为该区域应对措施的制定提供重要的理论依据。

1 数据资料与方法

1.1 研究区域

四川位于青藏高原向东部中低山的过渡区,介于东经 $92^{\circ}21'$ — $108^{\circ}12'$ 和北纬 $26^{\circ}03'$ — $34^{\circ}19'$,东西长 1 075 km,南北宽 921 km,横跨中国三大构造域,地貌形态差异明显。其水系丰富,地处长江上游,是长江流域面积最多的省份。长江流域在四川境内的面积为 5 507 万 km^2 ,占全省流域总面积的 96%。受季风气候和特殊地形的双重影响,四川省的年降水量从东南向西北逐渐减少,盆地降水由从四周向中间减少;降水主要集中在夏季,占全年降水量 50%~60%,最高可达 60%~75%^[14]。四川流域对全球气候变化相当敏感,被誉为全球气候变化趋势的“晴雨表”。

1.2 研究数据

本研究采用的数据是长江流域四川段 21 个气象站从 1980 年 1 月 1 日至 2014 年 12 月 31 日的逐日降水量资料。逐日降水资料累计求和得到年降水资料,再将研究区各站点年降水资料进行算术平均,得到该区域的年降水资料。气候模式资料分为两个时

期:历史时期(1980—2014 年)和预估时期(2015—2100 年)。历史时期数据作为基准期模拟数据以对气候模式的偏差校正进行校准和验证,预估时期数据则用于对研究区未来降水变化进行预估。对于未来预估数据,本文采用了 3 种气候预估情景,分别为可持续发展 SSP1-2.6 (SSP1 + RCP2.6)、中度发展 SSP2-4.5 (SSP2 + RCP4.5)和高耗能非常规发展 SSP5-8.5 (SSP5 + RCP8.5)。本文采用的是 NCEP 再分析资料近地面降水的逐日资料,各观测数据信息见表 1。

表 1 观测数据详情

Table 1 Details of observed data

数据类型	数据名称	数据描述	来源
观测数据	中国地面降水日值	时间长度为 1980—2014 年	美国国家海洋和大气管理局 (NOAA)
	0.5°×0.5°格点数据集		
CMIP6 模式数据	历史数据	时间长度为 1979—2014 年	美国能源部劳伦斯利弗莫尔国家实验室
	SSP1-2.6	未来情景数据:高强迫情景,2100 年辐射强迫稳定在 2.6 W/m ²	
	SSP2-4.5	未来情景数据:中等强迫情景,2100 年辐射强迫稳定在 4.5 W/m ²	
	SSP5-8.5	未来情景数据:低强迫情景,2100 年辐射强迫稳定在 2.6 W/m ²	
再分析数据	NCEP	NCEP 再分析资料可提供 1979 年 1 月至今的大气等压面数据、地表数据和通量数据。 空间分辨率为 2.5°×2.5°,共 144×73 个网格	美国国家环境预报中心

表 2 降水降尺度初步选取的预测因子

Table 2 Prediction factors of precipitation

downscaling initially selected

预测因子	物理意义	单位
等压变量	hgt500 500 hPa 位势高度	m
	hgt850 850 hPa 位势高度	m
	shum500 500 hPa 比湿	kg/kg
	shum850 850 hPa 比湿	kg/kg
	uwnd500 500 hPa 风速经向分量	m/s
	vwnd500 500 hPa 风速纬向分量	m/s
	uwnd850 850 hPa 风速经向分量	m/s
	vwnd850 850 hPa 风速纬向分量	m/s

1.4 研究方法

1.4.1 降水数据降尺度 由于直接将气象站点数据插值为空间数据存在误差,因此本研究选择了点对点方法来关联数据,即以气象站点资料作为基准^[17],通过提取站点坐标所在格网的降水数据值来分析降水数据的质量精度,并通过 Delta 方法对降水数据进行降尺度。Delta 方法原理为假设每网格单元上气候变化的幅度在未来相对于历史期间将保持恒定。因此,对于某一具体的未来时段,可以通过计算过去和现在气候的差值,并将其应用到站点的未来气候预测上,来预估未来的气候状态。气象站点未来降水计算公式如下:

1.3 数据处理

大气环流模型本身有空间分辨率的限制,系统误差比较大,因此模拟得出的降水数据同样具有较大的误差不确定性,为了得到精度更高的未来气候变化的时空分布资料,需要对数据进行降尺度处理,以此来提高降水数据的可靠性^[15-16]。本文将应用统计分析软件 SPSS 筛选影响力更大的预报因子(表 2),利用经过偏差校正处理的数据通过统计降尺度方法(Delta 方法)输出为更加精细的气候变化数据并加以对比分析。

$$P_f = P_o \times \frac{P_{Gf}}{P_{Go}} \quad (1)$$

式中: P_f 为对未来降水数据降尺度后的重建; P_o 为基准期内实测降水数据的多年平均值; P_{Gf} 为气候模式预估的未来降水数据; P_{Go} 为气候模式所模拟的降水数据在基准期内多年平均值。

1.4.2 模拟结果评估 本研究采用皮尔逊相关系数对历史数据与模拟数据进行相关性分析,表示其相关程度的强弱,以确保模拟数据精准可用。皮尔逊相关系数通常用 r 表示,是研究两随机变量之间线性相关程度。取值范围在 $-1 \sim +1$ 。该系数不仅能反映两个变量之间变化趋势的方向,还能表示相关程度的强弱。当系数为 0 时,表示两个变量之间没有任何相关性;正值表示正相关,即随着一个变量的增加,另一个变量也会增加;负值表示负相关,即随着一个变量的增加,另一个变量会减少;值的绝对值越大,表示相关性越强^[18]。 r 的表达式如下:

$$r = \frac{\sum_{i=0}^n (x_i - \bar{X})(y_i - \bar{Y})}{\sqrt{\sum_{i=0}^n (x_i - \bar{X})^2} \sqrt{\sum_{i=0}^n (y_i - \bar{Y})^2}} \quad (2)$$

式中: r 为相关性指标; n 为样本个数; x_i 为观测值; y_i 为模拟值; \bar{X} 和 \bar{Y} 分别表示两者的样本平均值。

1.4.3 数据精度校正 分位数映射法通过建立模拟

降水和观测降水的传递函数来修正模拟降水数据,可较好的校正气候模式降水数据^[19-21]。传递函数公式如下:

$$x_{mc} = F_{o,c}^{-1} \{ F_{m,c} [x_{m,v}(t)] \}$$
 (3)

式中: x_{mc} 是修正后的模式数据; $F_{o,c}^{-1}$ 为实测数据的 CDFs; $F_{m,c}$ 为历史期气候模式原始数据的 CDFs ; $x_{m,v}(t)$ 为原始的气候模式数据^[3]。

2 结果与分析

2.1 长江流域四川段 1980—2014 年降水模拟效果的评估

本研究选取长江流域四川段内 21 个气象站点的实测数据,并对站点坐标所在网格的降水气候数据进行降尺度处理,我们通过月、季、年 3 个时间尺度对模拟降水数据进行分析评估。

月尺度上,实测数据显示,长江流域四川段降水主要集中在 5—9 月,降水量呈正态分布,7 月降水量最多,达到 200.04 mm,12 月降水量最少,为 9.08 mm。经模拟降水偏差校正后其模拟值整体略低于观测值,但实测数据与模拟数据具有相同变化趋势,且相关性分析 r 为 0.993 627 981,表示模拟效果能够较好表示 1—12 月降水量的变化规律。其中,7 月模拟偏差最大,为 -27.07 mm,11 月模拟偏差最小,仅为 0.76 mm,其余月份模拟偏差值分别为 1 月为 -4.97 mm,2 月为 -6.71 mm,3 月为 -7.10 mm,4 月为 -10.08 mm,5 月为 -7.56 mm,6 月为 -25.58 mm,8 月为 -25.15 mm,9 月为 -6.16 mm,10 月为 8.78 mm,12 月为 -2.84 mm(图 1)。

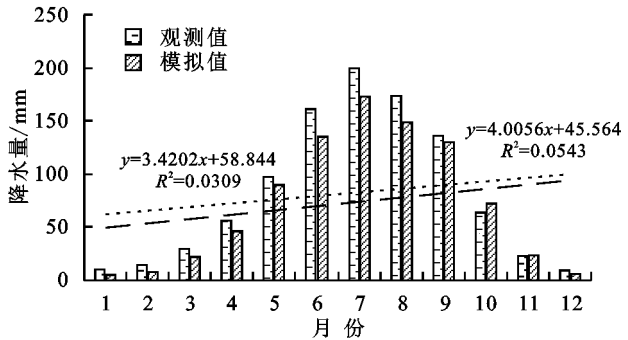


图 1 1980—2014 年长江流域四川段观测降水量和模拟降水量偏差校正后的逐月结果对比
Fig. 1 Comparison of Monthly Results after Correction for Bias between Observed Precipitation and Simulated Precipitation in the Sichuan Section of the Yangtze River Basin from 1980 to 2014

季节尺度上,模式对降水的模拟符合春、冬季水量少;夏、秋季水量多的变化规律。春、夏、冬季模拟降水较观测降水出现一定程度的低估(图 2);对秋季

降水的模拟最好,较观测值多 3.39 mm,其中夏季降水量最丰,占全年的 54%(表 3)。

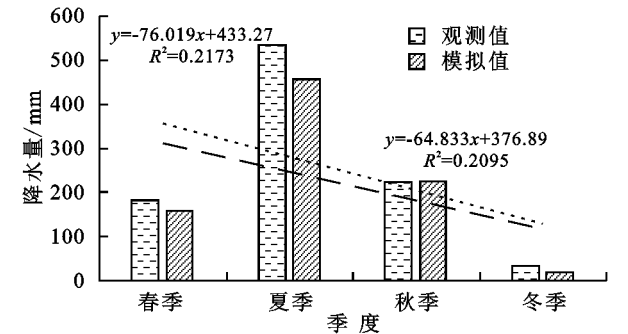


图 2 1980—2014 年长江流域四川段观测降水量和模拟降水量偏差校正后的季尺度结果对比
Fig. 2 Comparison of Seasonal Scale Results of Observed Precipitation and Simulated Precipitation Bias Correction in the Sichuan Section of the Yangtze River Basin from 1980 to 2014

表 3 1980—2014 年季尺度模拟降水与观测值差异
Table 3 Differences between simulated precipitation and observed values at the seasonal scale from 1980 to 2014

气象要素	春季	夏季	秋季	冬季
观测降水/mm	182.65	534.39	222.71	33.15
模拟降水/mm	157.90	456.59	226.10	18.62

从图 3 可以看出,年尺度上,历史时段(1980—2014 年)经偏差校正(CDFs)后的模型数据,降水模拟值与观测值更为接近,通过了显著性检验。气候模式和观测数据在年尺度上相关性明显增加。偏差校正前,气候模式对降水的模拟效果呈高估趋势;偏差校正后,气候模式对降水的模拟效果得到了大幅度校正,呈部分低估。

2.2 未来降水量变化预估

基于基准期(1980—2014)均值,3 种情景下模式预估 2015—2100 年研究区降水量具有一定差异,均有不同程度的增加,其变化百分比范围分别为 SSP1-2.6 (-19.45%~19.96%)、SSP2-4.5 (-18.97%~22.95%)、SSP5-8.5 (-15.80%~38.84%)。21 世纪近期与中期降水量虽有所增加,但不明显。到 21 世纪末期(2081—2100 年),在 SSP5-8.5 情景下降水的变化幅度最大,上升趋势最为明显,降水量增长也最多。其次是 SSP2-4.5,在 SSP1-2.6 情景下预计增加最少(图 4)。

2.3 降水的时空分布

SSP1-2.6 情景下预估降水量大致呈现自西向东递减的分布形势,降水量增幅最大区位于西偏南(-347.93 mm)、减幅最大则与之相反(131.23 mm);SSP2-4.5 情景下预估降水量大致呈现自西北向东南

递减的分布形势,降水量除东南部明显降低(-242.02 mm),其他区域大致呈稳定增长;SSP5-8.5情景下则完全不同,预估降水量大致呈现为自东北向西南递减的分布形式,研究区降水预估均呈增长趋势,降水量

最大增幅为 670.68 mm,最低增幅为 129.89 mm,其中东北与中部降水量增幅显著。预估的 3 种排放情景下,126 模式降水量增长最低、585 模式降水量增长最高(图 5)。

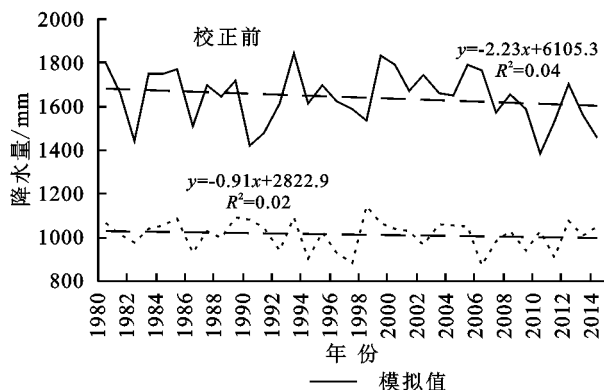


图 3 1980—2014 年研究区观测降水量和模拟降水量偏差校正前后的逐年变化

Fig. 3 Yearly changes in observed precipitation and simulated precipitation bias before and after correction in the study area from 1980 to 2014

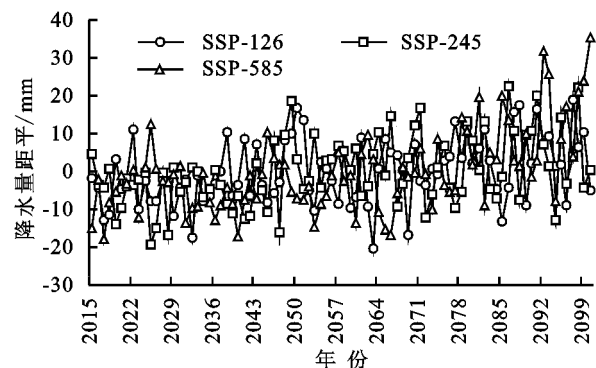


图 4 2015—2100 年气候模式预估的 3 种排放情景下研究区降水量距平变化

Fig. 4 Precipitation anomaly changes in the study area under three emission scenarios estimated by climate models from 2015 to 2100

3 讨论

从以上各评估结果中可以看出,对研究区进行气候模式的模拟进行校正后仍存在一定的误差,降水呈

不同程度的低估。模拟效果在不同时间尺度表现为月尺度>季尺度>年尺度。不同季节气候模式表现为春、冬季模拟效果要明显优于夏、秋季。经过分位数映射法校正后,数据的精度得到明显的提高,说明该方法是对气候模式数据校正有效的一种数据预处理方法。同时,此方法对于极端降水情况的校正还存在一定的缺陷,未来可进一步从针对极端降水校正方面进行进一步研究。根据降水距平变化分析和空间分布特征,发现在 3 种未来情景下研究区总体降水量都基本高于历史时期,表现为增长趋势,在同一时期不同情景下降水量的增长速率也不同,表现为 SSP5-8.5>SSP2-4.5>SSP1-2.6。未来降水变化在 SSP1-2.6(-19.45%~19.96%)和 SSP2-4.5(-18.97%~22.95%)2 种情景下,在 21 世纪近期和中期有所下降,但从整体来看,呈持续不稳定增加。而在 SSP5-8.5 情景下(-15.80%~38.84%),降水量随着时间长度的增加而增加,波动幅度加剧。

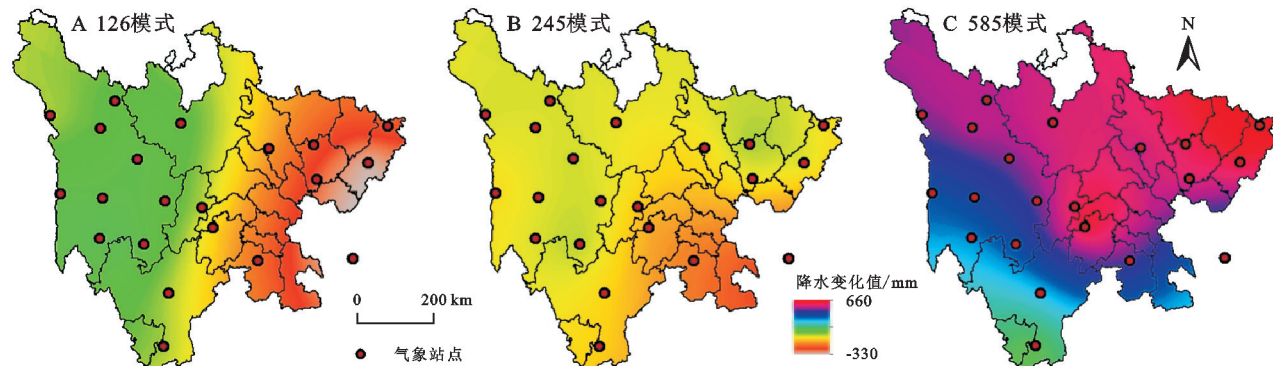


图 5 2015—2100 年长江流域四川段气候模式预估情景降水量空间分布

Fig. 5 Spatial distribution of precipitation in the Sichuan section of the Yangtze River Basin from 2015 to 2100 based on climate model estimation scenarios

值得注意研究区的未来降水量是可能发生增长及分布不均的,由于降水量的季节分布不均,导致季节性缺水或过丰,因此洪旱灾害时有发生。3种情景下降水量分布存在较大差异,但总体来看流域大部分区域降水量呈增多趋势且时空分布不均衡,未来四川地区极端天气出现强度和频度将会明显增加。时间上5—9月四川地区降水量显著增多,这种时空分布的不均衡将导致四川地区季节性、区域性、水质性缺水,容易引发水旱灾害,因此建议未来四川地区做好防汛抗旱的应急预案,加强水旱灾害、洪涝灾害的防治措施,居民夏季注意洪涝灾害预警以及学习在洪涝灾害突发时如何自救,最大程度保障自身的生命健康权。

本研究对气候模式模拟数据进行了降尺度和偏差校正后,大大提高了数据的准确性,使数据更加符合实际情况,但CMIP6气候模式在分辨率、物理参数化过程等方面的提升和发展仍旧不够,对预估未来气候变化仍存在一定的误差^[22]。气候模式对降水的模拟效果得了大幅度校正,呈部分低估。希望在未来的研究中,可以进一步降低气候模式的不确定性。

4 结论

(1) 气候模式能较好地模拟研究区降水的月、季、年变化,模拟的降水量稍低于观测值。模式对春、冬季降水的模拟性能明显优于夏秋、春季,基准期对年均降水量模拟最优,仅比观测值偏少7.49 mm。

(2) 在对气候模式进行校正和评估后,数据更加符合实际情况,分位数映射法对气候模型数据的校正是十分有效的。

(3) 模式预估未来3种情景下研究区降水均呈增多趋势,时间尺度上表现为远期>中期>近期。在空间上表现为SSP1-2.6与SSP2-4.5情景下,研究区降水量预估有部分区域呈下降趋势,整体仍呈增长趋势,自西北向东南递减的分布形式,SSP5-8.5情景下降水量增幅最为明显,呈东北向西南递减的分布形势,降水量增幅最高达670.68 mm。

参考文献(References):

- [1] 岳艳琳.气候变化下长江流域未来径流与旱涝变化特征研究[D].上海:华东师范大学,2022.
Yue Y L. The Changes of future runoff and drought and flood in the Yangtze River basin under climate change [D]. Shanghai: East China Normal University, 2022.
- [2] 张琴,张利平,邓瑶,等.气候模式与水文模拟关键技术研究进展及展望[J].气象科技进展,2021,11(3):126-134.

- Zhang Q, Zhang L P, Deng Y, et al. The research progress and prospects of climate model and hydrological simulation key technology[J]. Advances in Meteorological Science and Technology, 2021,11(3):126-134.
- [3] 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 J, Xia J, Zeng S D, 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.
- [4] 向竣文,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 J W, Zhang L P, Deng Y, 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.
- [5] 吴晶,王宝鉴,杨艳芬,等. CMIP3 与 CMIP5 模式对中国西北干旱区气温和降水的模拟能力比较[J].气候变化研究进展,2017,13(3):198-212.
Wu J, Wang B J, Yang Y F, et al. Comparing simulated temperature and precipitation of CMIP3 and CMIP5 in arid areas of Northwest China[J]. Climate Change Research, 2017,13(3):198-212.
- [6] 陈晓晨,徐影,许崇海,等. CMIP5 全球气候模式对中国地区降水模拟能力的评估[J].气候变化研究进展,2014,10(3):217-225.
Chen X C, Xu Y, Xu C H, et al. Assessment of precipitation simulations in China by CMIP5 multi-models[J]. Progressus Inquisitiones De Mutatione Climatis, 2014,10(3):217-225.
- [7] 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 L X, Chen X L, Xin X G. Short commentary on CMIP6 scenario model intercomparison project(ScenarioMIP) [J]. Climate Change Research, 2019,15(5):519-525.
- [8] Iqbal Z, Shahid S, Ahmed K, et al. Evaluation of CMIP6 GCM rainfall in mainland Southeast Asia[J]. Atmospheric Research, 2021,254:105525.
- [9] 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 T J, Zou L W, Chen X L. Commentary on the coupled model intercomparison project phase 6(CMIP6) [J]. Climate Change Research, 2019,15(5):445-456.
- [10] 刘卫林,熊翰林,刘丽娜,等.基于CMIP5模式和SDSM

- 的赣江流域未来气候变化情景预估[J].水土保持研究, 2019, 26(2):145-152.
- Liu W L, Xiong H L, Liu L N, et al. Estimate of the climate change in Ganjiang River Basin using SDSM method and CMIP5[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2019, 26(2):145-152.
- [11] 冯椰林, 贺中华, 焦树林, 等. 基于 CMIP6 气候模式的贵州省极端降水情景预估[J]. 水土保持研究, 2023, 30(1):282-290.
- Feng Y L, He Z H, Jiao S L, et al. Scenario prediction of extreme precipitation in Guizhou Province based on CMIP6 climate model[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2023, 30(1):282-290.
- [12] 赵芳芳, 徐宗学. 统计降尺度方法和 Delta 方法建立黄河源区气候情景的比较分析[J]. 气象学报, 2007, 65(4):653-662.
- Zhao F F, Xu Z X. Comparative analysis on down-scaled climate scenarios for headwater catchment of Yellow River using SDS and Delta methods[J]. Acta Meteorologica Sinica, 2007, 65(4):653-662.
- [13] 张素兰, 张碧, 刘翔, 等. 四川省生态环境保护与绿色发展研究[J]. 环境生态学, 2021, 3(11):43-48.
- Zhang S L, Zhang B, Liu X, et al. Study on ecological environment protection and green development in Sichuan Province[J]. Environmental Ecology, 2021, 3(11):43-48.
- [14] 苏鹏程, 刘希林, 郭洁. 四川泥石流灾害与降雨关系的初步探讨[J]. 自然灾害学报, 2006, 15(4):19-23.
- Su P C, Liu X L, Guo J. Primary analysis of relationship between debris flows and rainfalls in Sichuan Province[J]. Journal of Natural Disasters, 2006, 15(4):19-23.
- [15] 黄金龙, 王艳君, 苏布达, 等. RCP4.5 情景下长江上游流域未来气候变化及其对径流的影响[J]. 气象, 2016, 42(5):614-620.
- Huang J L, Wang Y J, Su B D, et al. Future climate change and its impact on runoff in the upper reaches of the Yangtze River under RCP4.5 scenario[J]. Meteorological Monthly, 2016, 42(5):614-620.
- [16] 易东英. 基于 CMIP6 气候模式的黄河源区径流模拟与分析[D]. 陕西杨凌: 西北农林科技大学, 2022.
- Yi D Y. Simulation and analysis of runoff in the source region of the Yellow River based on CMIP6 climate model [D]. Yangling, Shaanxi: Northwest A&F University, 2022.
- [17] 丁光旭, 郭家力, 汤正阳, 等. 多种降水再分析数据在长江流域的适用性对比[J]. 人民长江, 2022, 53(9):72-79.
- Ding G X, Guo J L, Tang Z Y, et al. Evaluation on applicability of various reanalysis datasets of precipitation in Changjiang River Basin[J]. Yangtze River, 2022, 53(9):72-79.
- [18] 程娟娟. 高校科研与教学关系实证研究: 基于皮尔逊相关系数的分析[J]. 中国高校科技, 2022(10):46-52.
- Cheng J J. Empirical Study on the Relationship between Scientific Research and Teaching in Universities: Analysis based on Pearson Correlation coefficient[J]. Science and Technology in Chinese Universities, 2022(10):46-52.
- [19] Li B X, Huang Y, Du L J, et al. Bias correction for precipitation simulated by RegCM4 over the upper reaches of the Yangtze River based on the mixed distribution quantile mapping method[J]. Atmosphere, 2021, 12(12):1566.
- [20] Tong Y, Gao X J, Han Z Y, et al. Bias correction of temperature and precipitation over China for RCM simulations using the QM and QDM methods[J]. Climate Dynamics, 2021, 57(5):1425-1443.
- [21] 雷华锦, 马佳培, 李弘毅, 等. 基于分位数映射法的黑河上游气候模式降水误差订正[J]. 高原气象, 2020, 39(2):266-279.
- Lei H J, Ma J P, Li H Y, et al. Bias correction of climate model precipitation in the upper Heihe River basin based on quantile mapping method[J]. Plateau Meteorology, 2020, 39(2):266-279.
- [22] 肖登攀, 赵彦茜, 柏会子, 等. CMIP5 全球气候模式对华北平原气候的模拟和预估[J]. 地理与地理信息科学, 2020, 36(2):75-82.
- Xiao D P, Zhao Y X, Bai H Z, et al. Simulation and projection of climate change in North China Plain by CMIP5 multi-model[J]. Geography and Geo-Information Science, 2020, 36(2):75-82.