
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¹

吴健^{1,2,3} 夏军^{2,3,4} 曾思栋^{2,3*} 刘欣^{2,3} 樊迪^{2,3}

(1. 重庆交通大学, 重庆 400074;

2. 中国科学院重庆绿色智能技术研究院, 重庆 400714;

3. 中国科学院大学重庆学院, 重庆 400714;

4. 武汉大学水资源与水电工程科学国家重点实验室, 湖北武汉 430072)

【摘要】:以全球变暖为主要特征的全球气候变化对自然环境和社会经济发展产生了巨大影响。长江流域作为中国最大的流域,对气候变化的影响非常敏感,对未来气候变化的预测可以为应对未来的不确定性提供重要的科学依据。为了更准确地预测长江流域未来的温度和降水,针对第六次国际耦合模式比较计划(CMIP6)对长江流域26个气候模式进行评估,选择并校正性能更好的模式,讨论了长江流域未来的气温和降水。主要结论如下:(1)气候模式在温度上的模拟效果优于降水,在时间尺度上表现为月尺度>日尺度>年尺度。温度模拟存在一定程度的低估,降水模拟存在一定程度的高估。(2)区域尺度利用气候模式进行研究工作前的评估和校正是必要的,经过评估优化和季节校正后,数据的精度得到了显著提高,分位数映射法可以应用于气候模型数据的校正,但对于极端降水和温度的校正仍存在一些不足。(3)在SSP1-2.6情景中,未来温度和降水变化将在一段时间内持续不稳定增加,然后随着时间趋于稳定。在其他3种情景下,变化的速度随着时间的推移而加快。未来长江流域的降水和气温在所有情景下都将高于历史时期,表现为SSP5-8.5>SSP3-7.0>SSP2-4.5>SSP1-2.6。从季节上看,春季和冬季温度变化较大,降水在春季、夏季和冬季变化较大。在空间上,降水量增加较大的区域主要位于长江上游和东北部,而气温增加较大的区域主要位于长江上游和上游。

【关键词】:气候模式;长江流域;气候变化;排放情景;未来预估

【中图分类号】:P467 **【文献标识码】**:A **【文章编号】**:1004-8227(2023)01-0137-14

【DOI】:10.11870/cjlyzyyhj202301013

¹ **【收稿日期】**:2022-02-28; **【修回日期】**:2022-04-21

【基金项目】:中国科学院青年创新促进会资助项目(2021385);美丽中国生态文明建设科技工程专项(XDA23040500);中央引导地方科技发展专项资金项目(2021000069)

【作者简介】:吴健(1998~),男,硕士研究生,主要研究方向为气候变化、生态水文。E-mail:wujian@cigit.ac.cn

【*通讯作者 E-mail】:zengsidong@cigit.ac.cn

联合国政府间气候变化专门委员会(IPCC)第六次评估报告指出,2001~2020 的全球地表平均温度比 1850~1900 的平均温度高出 0.99℃。在气候变化背景下,全球陆地水循环的改变,导致全球不同尺度水资源的重新分配,这种水资源的时空格局的改变加之不合理的水土资源开发活动,将影响生态环境和人类社会经济的发展^[1]。

全球气候模式(GCMs)是模拟历史气候状态并预估未来气候变化的重要工具,气候模式被证明可以再现近期气候和过去气候变化的观测特征,已经被广泛用于全球气候变化预估的研究^[2,3]。1995 年世界气候研究组织的耦合模拟工作组(WGCM)发起并组织了国际耦合模式比较计划(CMIP),从此 CMIP 计划快速发展逐渐成为推动模式发展和增进对地球气候系统的科学理解的庞大计划。到目前为止, WGCM 通过各个阶段的实验设计和计算,先后组织了 5 次模式比较计划,分别为 CMIP1、CMIP2、CMIP3、CMIP5、CMIP6。现阶段,CMIP6 正在进行中,目前不断有研究机构在 CMIP6 中上传更新不同模型的最新输出结果,这些模式输出结果将作为未来 5~10 年的全球气候方面的科学研究的重要支撑^[4]。

由于气候模式本身存在系统误差,在机理、初始条件设置、参数化方案设置、空间分辨率等存在差异,导致模式对未来气候变化的预估存在较大不确定性,并且在不同区域模拟效果具有明显的差异^[5,6]。因此,评估 GCMs 在不同区域的适用性是进一步进行气候变化研究工作的基础。目前已有大量评估工作集中在 CMIP3 和 CMIP5 中,比如陈晓晨等^[5]评估了 CMIP5 对中国降水能力的模拟能力,并指出气候模式可以较好地模拟出中国降水的空间分布格局;吴晶等^[6]比较了 CMIP5 和 CMIP3 对西北干旱区的评估能力,指出 CMIP5 对于温度和降水的模拟能力都要强于 CMIP3。CMIP6 是 CMIP 实施 20 多年来参与的模式数量最多、设计的科学试验最完善、提供的模拟数据最庞大的一次,相比于 CMIP5 考虑了更加复杂的物理过程,设置了新的组合情景^[7]。已经有研究证明 CMIP6 的 GCMs 在世界各地包括中国^[8]、东南亚^[9]、加拿大^[10]等地都表现良好,并且有学者指出将多种模式集合更能提高模拟的精度^[11]。

长江全长 6 236 km,是中国的第一大河,流域面积约 180 万 km²,流域内人口众多,由于受到季风气候的影响,导致降水分布不均,水旱灾害频发,洪涝灾害和干旱缺水等问题十分突出,而气候变化进一步加剧了这些问题发生的频率和趋势^[12]。评估 GCMs 在长江流域的模拟能力以及预估未来气候变化,可为应对气候变化、水资源保护以及制定有关决策提供重要的科学依据^[13]。此前虽然有很多学者应用 GCMs 对长江流域的气候变化进行评估与预测,但也都集中于应用 CMIP3^[14]和 CMIP5^[15,16]进行研究工作,对于最新一代的 CMIP6,仍缺乏评估的具体分析。因此,本文针对长江流域,选取多个统计特征值对 CMIP6 的 26 个气候模式进行评估。按照评估结果优选出 4 个模式进行集合,根据统计结果应用分位数映射法进行校正,最终对未来长江流域的气候变化进行预估,以期长江流域的相关部门制定未来气候变化的应对策略提供科学支撑。

1 数据资料和方法

1.1 研究区域

长江流域(图 1)是世界第三大流域,位于 24° N~35° N,90° E~122° E,水系复杂,横跨中国东部、中部和西部的 19 个省、市和自治区。流域总面积 180 万 km²,占中国国土面积的 18.8%。长江流域降水丰沛,多年平均降水量为 1 126 mm,但空间分布不均,呈现自东南向西北递减的趋势^[17]。这种不均匀的时空分布格局再加上气候变化,导致长江流域洪涝灾害和极端气候发生的趋势不断加强^[12]。

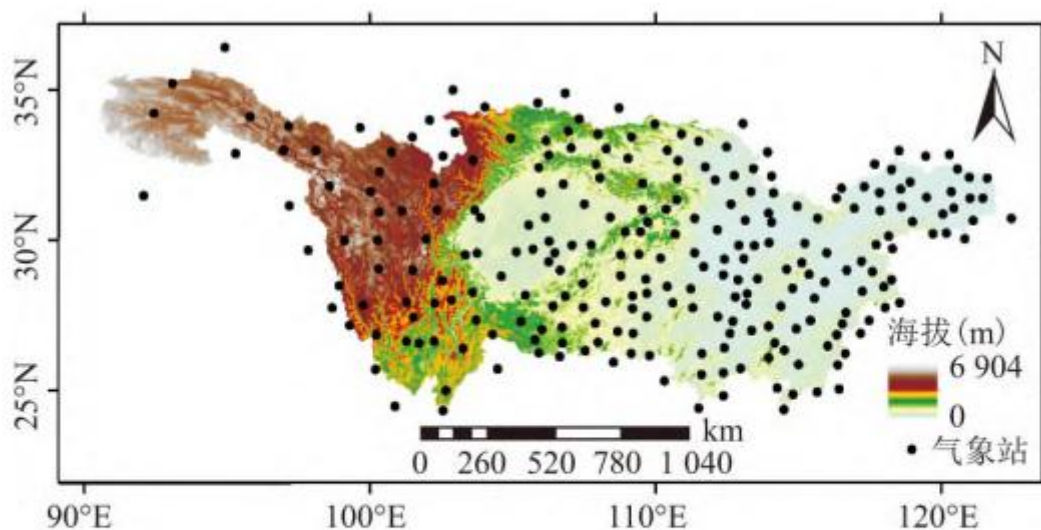


图 1 研究区地形及气象站点分布
 Fig. 1 Distribution of topographic and meteorological stations in study area

1.2 研究数据

本文中采用的观测数据来自中国气象局国家信息中心，包括长江流域内外共计 249 个气象站点 1960~2014 年逐日温度、降水数据，各气象站位置如图 1 所示。选择的全球气候模式资料为 CMIP6 中的 26 个气候模式模拟的逐日降水和气温数据，其中包括 1960~2014 年的基准期模拟数据和 4 种不同的未来预估情景下至 2100 年的未来模拟数据，4 种未来情景综合考虑了共享社会经济路径 (SSPs) 和典型浓度路径 (RCPs)，分别为 SSP1-2.6、SSP2-4.5、SSP3-7.0、SSP5-8.5，有关各个气候模式的详细信息如表 1 所示。

1.3 研究方法

1.3.1 评估方法

泰勒图最早由 Taylor^[18] 提出，通过两个场之间的标准差、中心均方根误差和相关系数这 3 个统计量来比较他们的相似程度，泰勒图曾被 IPCC 广泛应用于各种模式预报能力评估以及复杂模式之间的相互比较^[19]。此外本文除应用泰勒图进行判断外，还引入一个量化指标 S，将模拟场和观测场之间的相关系数和标准差量化，来评估不同模式之间的优劣程度^[8]：

$$S = \frac{4(1+R)^4}{(\sigma_f + 1/\sigma_f)^2(1+R_0)^4} \quad (1)$$

式中：R 为模拟场和观测场的相关系数；R₀ 为可以达到的最大相关系数；σ_f 为模拟场和观测场标准差的比值。

1.3.2 校正方法

分位数映射法旨在通过建立传递函数来最小化模式数据的经验累积分布函数(CDFs)与观测数据的差异^[20]。然后利用该传递函数修正未来气候模式数据,传递函数可表示为:

表 1 CMIP6 提供的 26 种 GCM 模式信息

模式名称	来源国家	分辨率(°)	模式名称	来源国家	分辨率(°)
ACCESS-CM2	澳大利亚	144*192	EC-Earth3	欧洲	256*512
ACCESS-ESM1-5		145*192	EC-Earth3-Veg		256*512
BCC-CSM2-MR	中国	160*320	IPSL-CM6A-LR		143*144
FGOALS-g3		80*180	INM-CM4-8	俄罗斯	120*180
CESM2	美国	192*288	INM-CM5-0	韩国	120*180
CESM2-WACCM		192*288	KACE-1-0-G		144*192
GFDL-CM4		180*288	MIROC6	日本	128*256
GFDL-ESM4		180*288	MRI-ESM2-0		160*320
CMCC-CM2-SR5	意大利	192*288	MPI-ESM1-2-HR	德国	192*384
CNRM-CM6-1	法国	128*256	MPI-ESM1-2-LR		96*192
CNRM-CM6-1-HR		360*720	NoRESM2-LM	挪威	96*144
CNRM-ESM2-1		128*256	NoRESM2-MM		192*288
CanESM5	加拿大	64*128	UKESM1-0-LL	英国	144*192

$$x_{mc} = F_{o,c}^{-1} \{ F_{m,c} [x_{m,v}(t)] \} \quad (2)$$

式中: x_{mc} 是校正之后的模式数据; $x_{m,v}(t)$ 为原始的气候模式数据; $F_{m,c}$ 为历史时期原始气候模式数据的 CDFs; $F_{o,c}^{-1}$ 为观测数据的 CDFs。

2 结果与分析

2.1 气象数据的模拟评估

对长江流域内 249 个气象站数据和降尺度到各个气象站的气候模式数据,从日月年尺度对长江流域平均温度和降水进行评

估,以反映不同模式对于长江流域整体的评估效果。从泰勒图(图 2)中可以看出,气候模式对不同的气象因子的模拟效果不同,并且在不同时间尺度的模拟精度也不同。其中,对温度的模拟精度在日尺度,相关性可以达到 0.9~0.95 之间;在月尺度气候模式与观测值的相关性接近 0.99,具有极高的相关性;在年尺度,不同气候模式与观测数据的相关性存在较大差异,相关性较低的气候模式只能达到 0.2,相关性较高的气候模式可以达到 0.7 左右。对于降水来说,在日尺度,气候模式和观测数据的相关性在 0.25~0.4 之间,在月尺度,气候模式和观测数据的相关性可以达到 0.8~0.9 之间,在年尺度,气候模式和观测数据的相关性都在 0.3 以下。总的来看,气候模式对温度和降水的模拟效果在不同的时间尺度表现为月尺度>日尺度>年尺度。

根据公式 1 计算定量指标 S,得到不同气候模式在年月日尺度的 S,进行平均,得到温度和降水的综合排名。根据排名结果,优选出对温度模拟效果排名前四的模式:ACCESS-ESM1-5、CESM2-WACCM、NorESM2-MM、GFDL-CM4。降水排名前四的模式:IPSL-CM6A-LR、MPI-ESM1-2-LR、EC-Earth3-Veg、FGOALS-g3。

分别将降水和温度排名前四的模型进行集合平均,从图 3 中可以看出,经过优选并集合平均的数据更加接近历史实测数据,相比较于温度,由于原始的气候模式数据误差较大,是否经过优选对于降水影响更大,未经优选的气候模式和实测数据误差最大可以达到 1 000 mm 左右,经过优选后的数据也依旧存在一定的误差,同时温度存在一定程度的低估,降水存在一定程度的高估。

经过多年平均分季节的空间关系分析,如图 4、图 5 所示,气候模式对于温度的空间模拟效果在所有季节都能表现出由东南向西北递减的趋势,但对于中下游区域的温度模拟存在明显的低估现象,其中在夏季和秋季的低估现象更加明显。相比较于温度,气候模式对于降水的空间模拟效果较差,在春季和冬季,气候模式对于降水的模拟效果可以表现出由东南向西北递减的趋势,而在夏季和秋季可以很明显可以看出气候模式高估了西南区域的降水,并且秋季和冬季对于东南区域降水也存在一定程度的低估。总体来看,无论对于温度还是降水,气候模式可以较为准确的捕捉到东南区域和西北区域的特征,而对于温度的模拟存在一定程度的低估,降水存在一定的高估,并且降水的高估主要集中在西南地区。

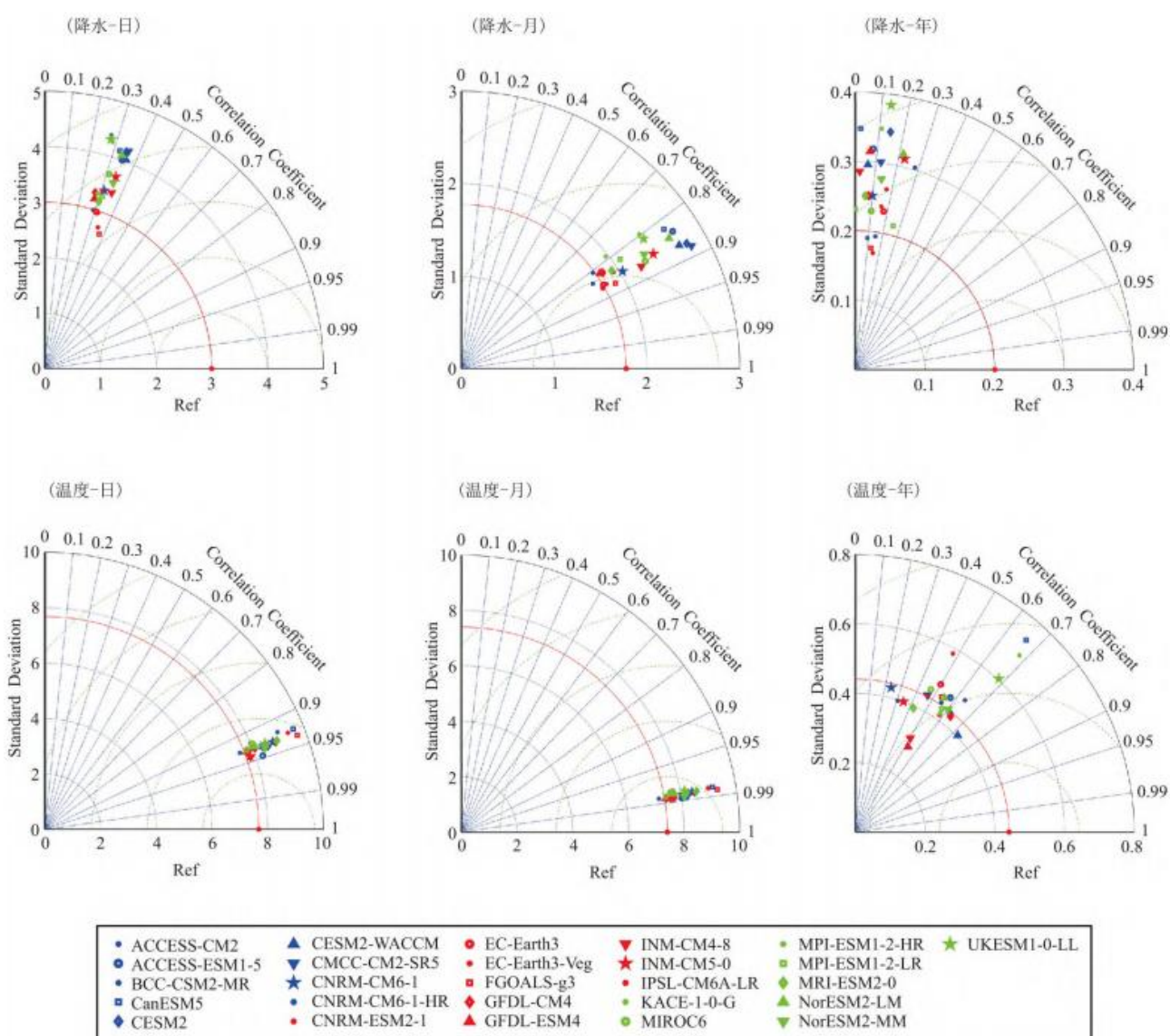


图 2 不同时间尺度温度和降水的泰勒图

Fig. 2 Taylor diagram for temperature and precipitation at different time scales

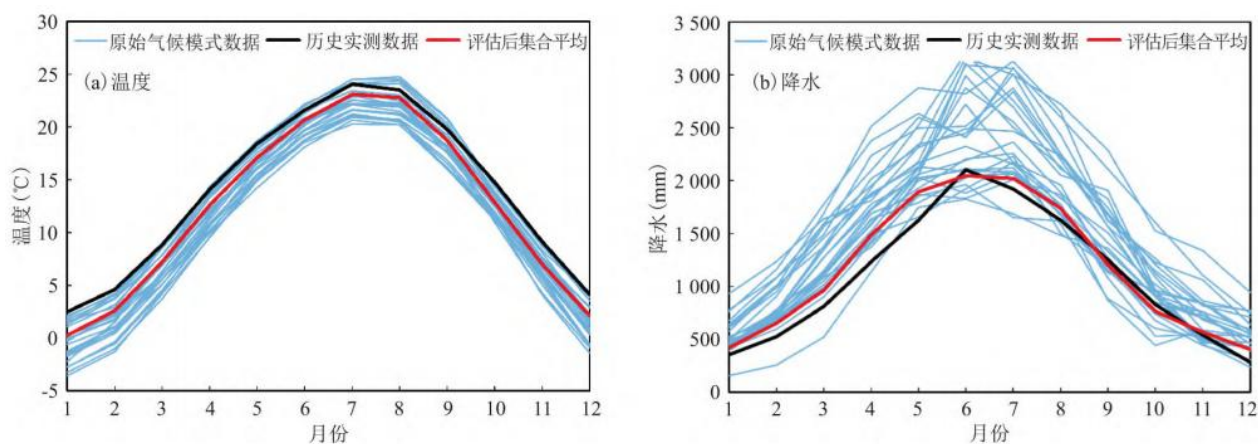


图 3 经过评估优选温度 (a) 和降水 (b) 数据与原始气候模式数据在月尺度上的对比

Fig. 3 Comparison of evaluated preferred temperature (a) and precipitation (b) data with original climate model data on a monthly scale

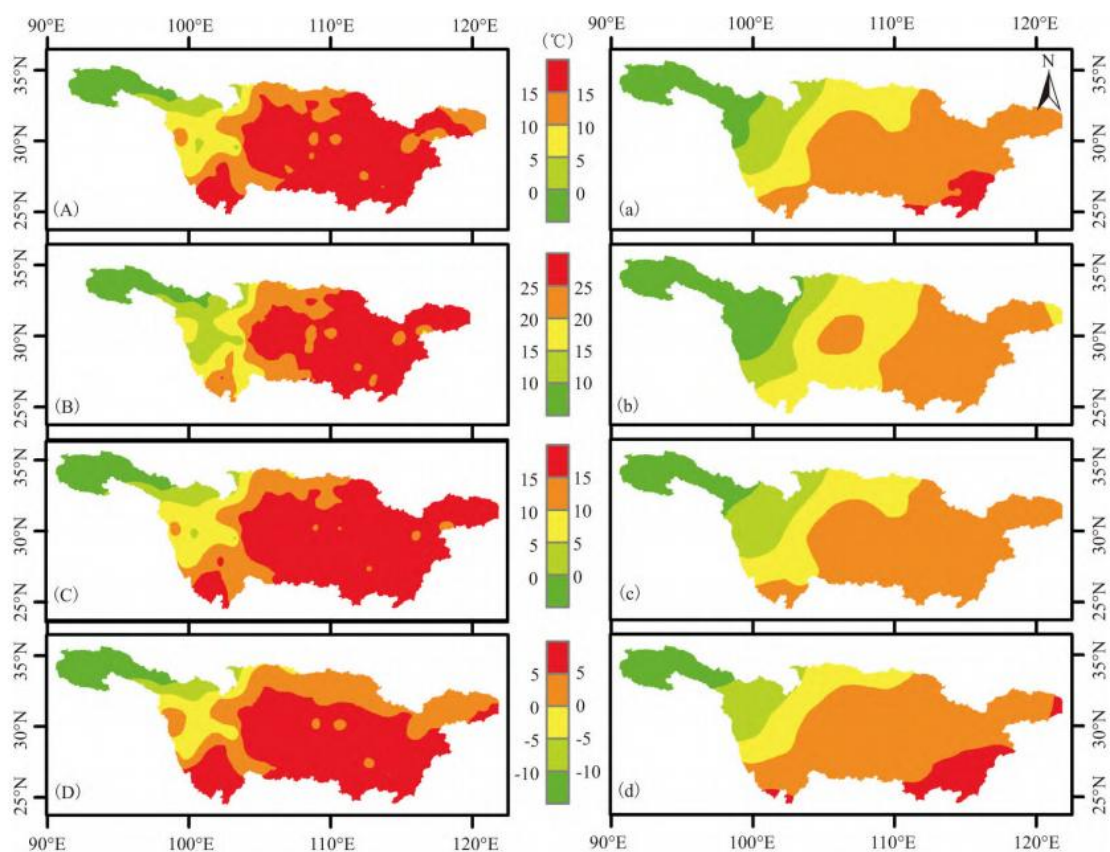


图 4 长江流域多年平均温度 (°C) 在春季 (A-a)、夏季 (B-b)、秋季 (C-c)、冬季 (D-d) 空间分布, 其中大写字母表示观测数据插值结果, 小写字母表示气候模式数据插值结果

Fig. 4 Spatial distribution of annual mean temperature in Yangtze River Basin in spring (A-a), summer (B-b), autumn (C-c) and winter (D-d), where upper case letters represent interpolation results of observed data, and lower-case letters represent interpolation results of climate model data.

2.2 气温和降水的校正

由于不同季节气候模式的模拟精度差异较大，不同季节可能对校正效果产生影响，如果分不同季节来进行校正则可以减少一定的误差。从图6中可以看出，在年际、春季和夏季，经过普通校正后的降水存在一定程度的高估，秋季和冬季存在一定程度的低估，分不同季节校正后，无论是在年际尺度还是在不同季节尺度，校正后的降水都更为接近观测值。温度经过普通校正后的误差虽然不大，但在夏季和冬季也有一定程度的高估和低估，通过季节校正后，夏季温度的高估和冬季温度的低估都有了一定的减少。

从分位数图中(图7、图8)可以看出，经过校正后的数据比校正前更加接近观测数据，并且温度的校正效果要优于降水。校正后的降水在一定程度上会高估强降水并且随着降水的增加这种高估也有一定的增强，其中在春季对于80%以上的降水存在一定的高估，在夏季对于85%以上的降水存在高估，并且这种高估最为明显，在秋季对于75%以上的降水存在高估，冬季校正效果较好，校正后的数据基本分位数分布基本与观测数据一致。校正后的温度在春季、秋季和冬季的校正效果较好，在春季和秋季存在一个较小的高估或低估，在夏季存在较程度的高估，在20%以上的温度存在高估。

从校正后的空间相对误差图(图9、图10)中可以看出，在未校正之前无论是温度还是降水都可以很明显的看出相对误差呈现西北高东南低的特点，经过校正之后的数据，温度几乎在所有季节的相对误差都在10%以下，春季、秋季和冬季有极小的区域相对误差达到90%以上；降水的校正效果虽然比不上温度，但在所有季节也基本控制在20%以下，并且夏季几乎大多数区域的相对误差都在10%以下。

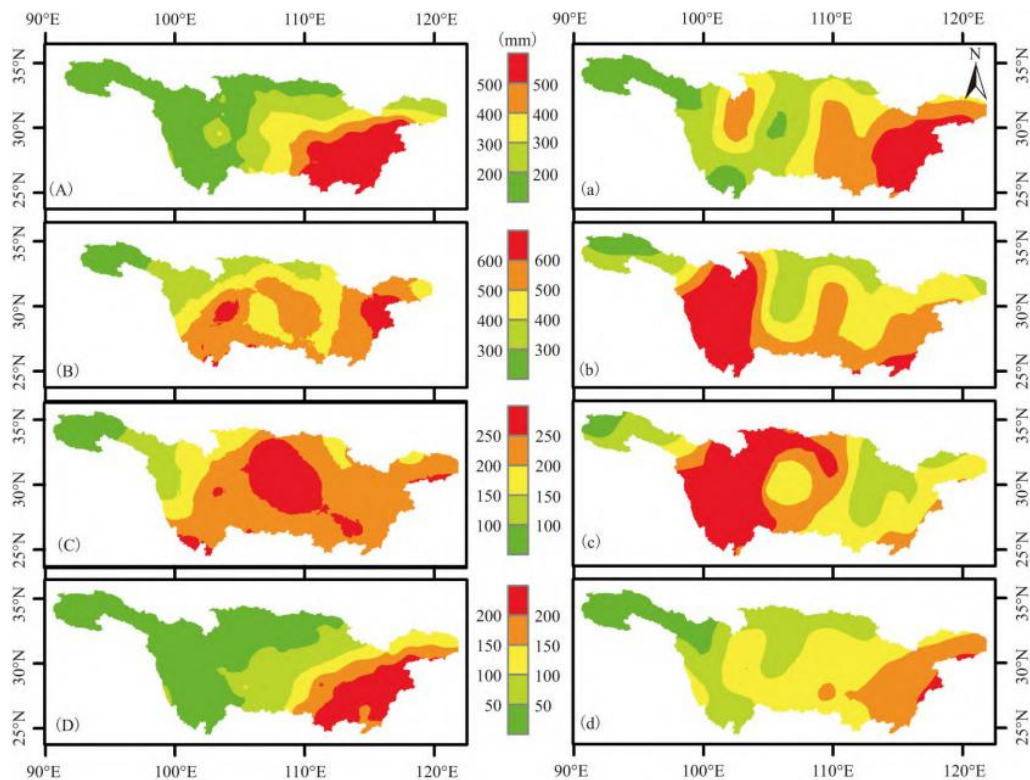


图5 长江流域多年平均降水(mm)在春季(A-a)、夏季(B-b)、秋季(C-c)、冬季(D-d)空间分布，其中大写字母表示观测数据插值结果，小写字母表示气候模式数据插值结果
 Fig. 5 Spatial distribution of annual mean precipitation in Yangtze River Basin in spring (A-a), summer (B-b), autumn (C-c) and winter (D-d), where upper case letters represent interpolation results of observed data, and lower-case letters represent interpolation results of climate model

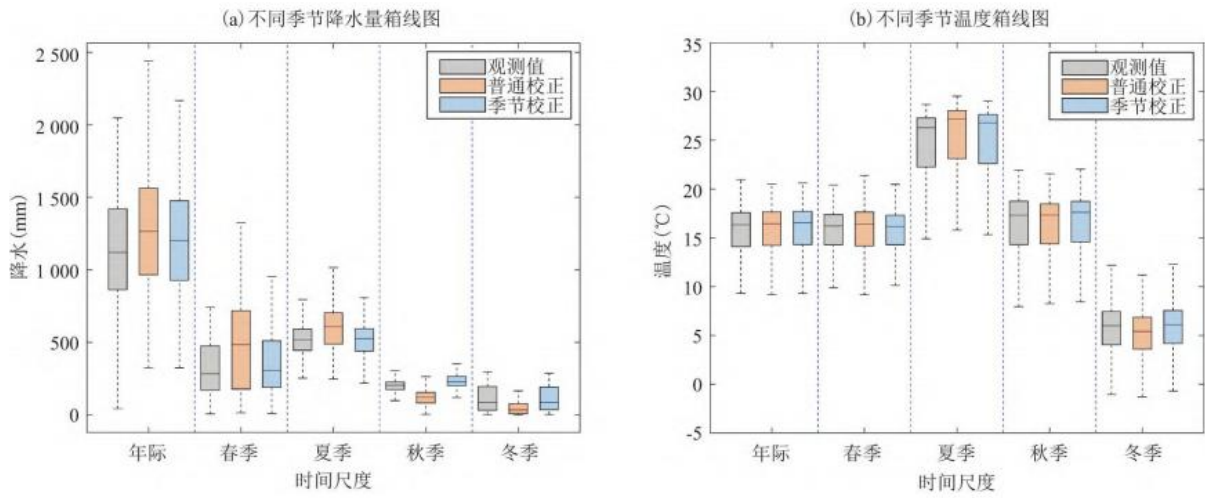


图 6 经不同校正方法校正后的 249 个气象站降水(a)和温度(b)在不同时间尺度箱线图
 Fig. 6 Box plots of precipitation (a) and temperature (b) at 249 meteorological stations in different time scales corrected by different correction methods

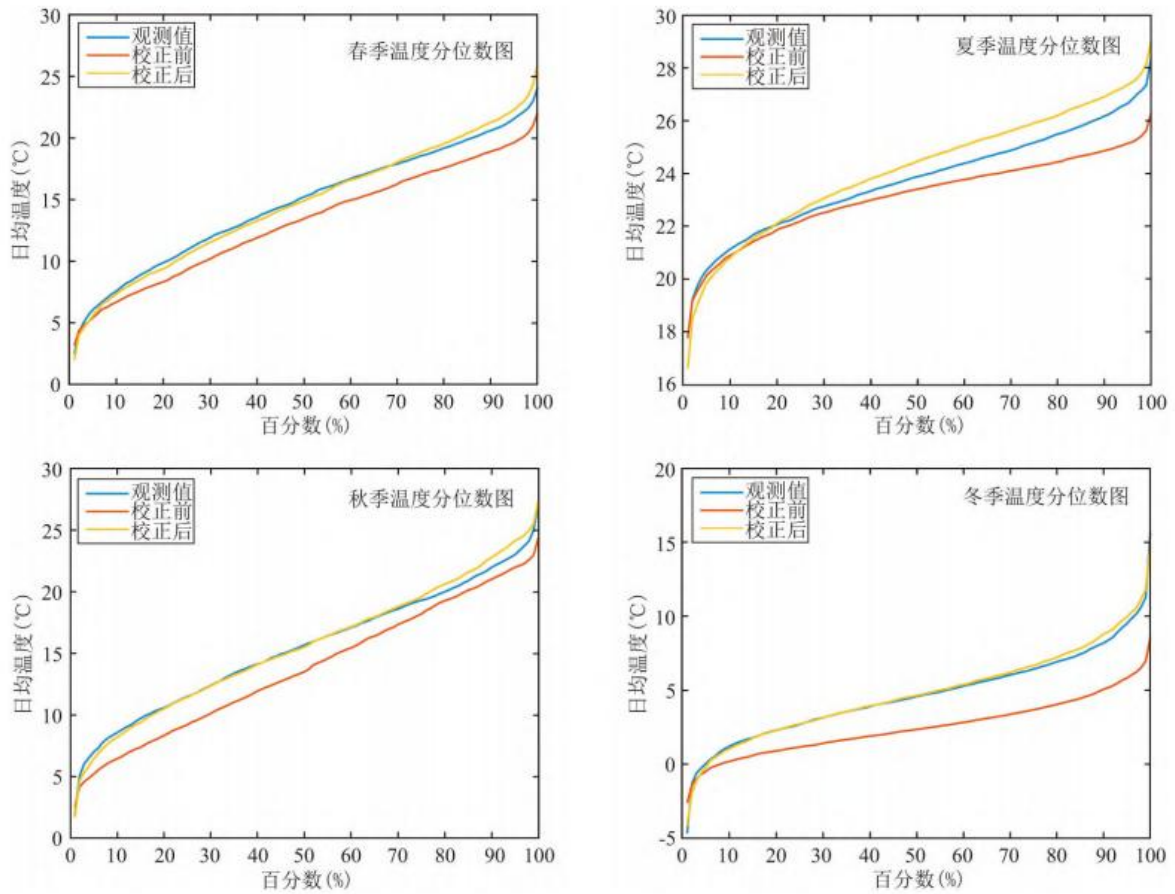


图 7 长江流域不同季节温度分布校正结果
 Fig. 7 Correction results of temperature distribution in different seasons in Yangtze River Basin

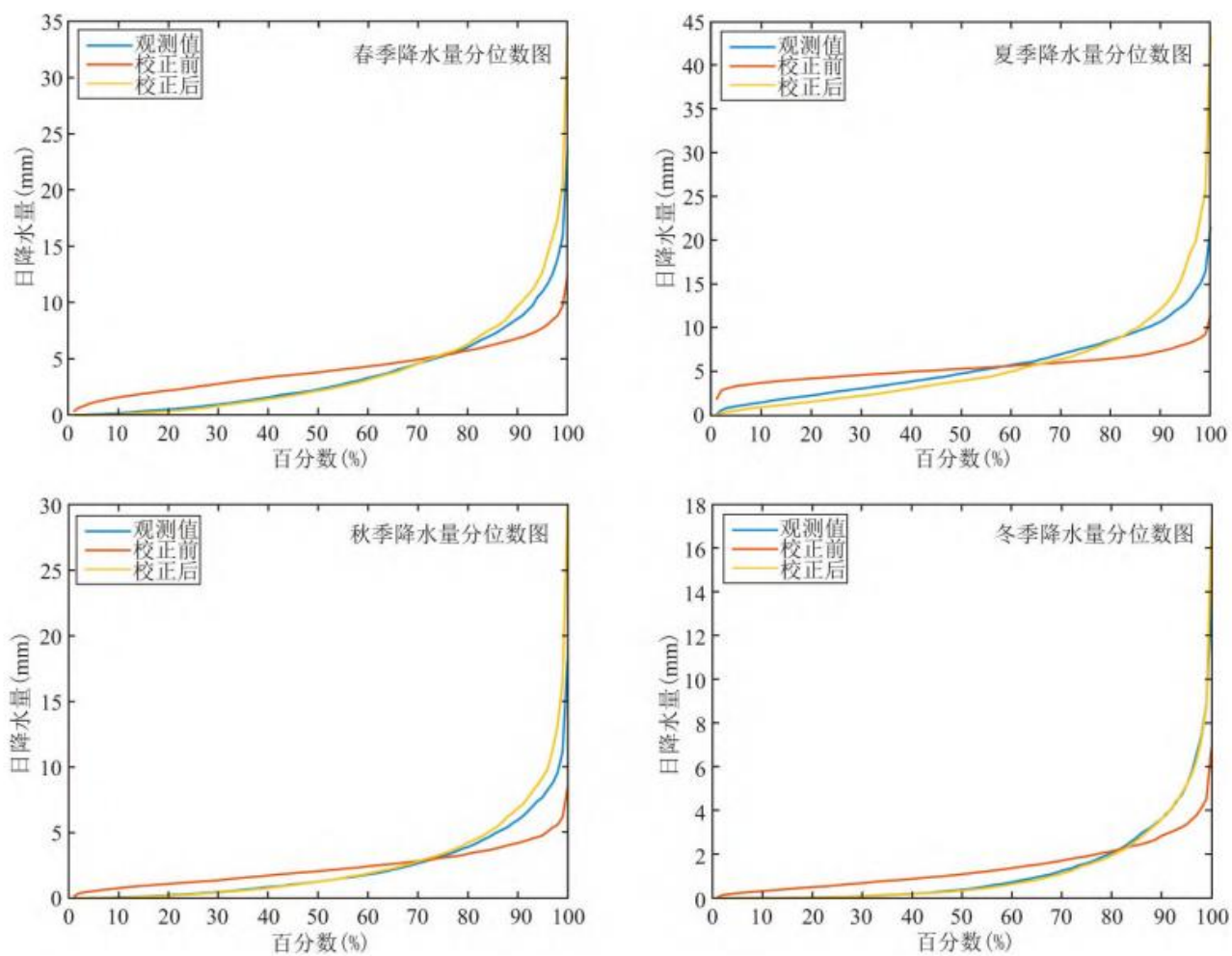


图 8 长江流域不同季节降水分布校正结果

Fig. 8 Correction results of precipitation distribution in Yangtze River Basin in different seasons

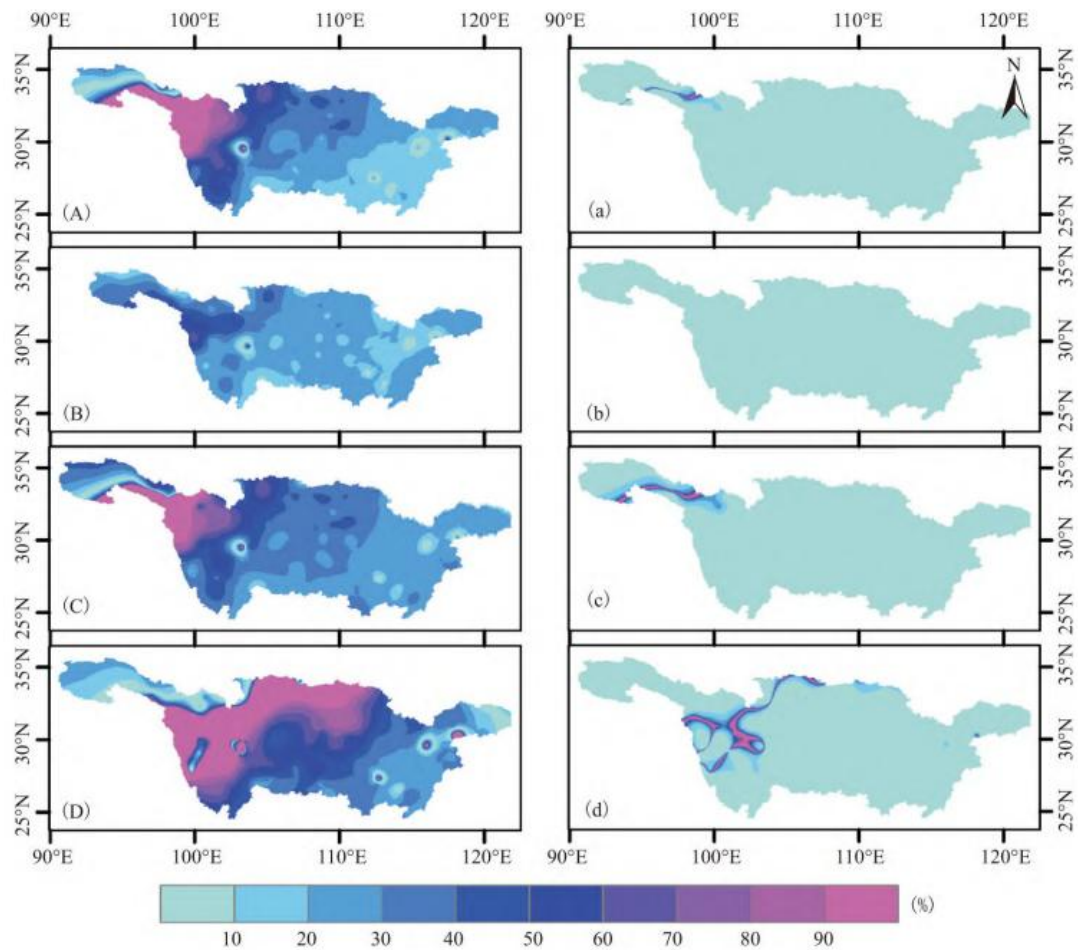


图9 长江流域温度在春季(A-a)、夏季(B-b)、秋季(C-c)、冬季(D-d)的校正相对误差分布, 其中大写字母表示校正前的误差分布结果, 小写字母表示校正后的误差分布结果

Fig. 9 Correction relative error distribution of temperature in Yangtze River Basin in spring (A-a), summer (B-b), autumn (C-c) and winter (D-d), where upper case letters represent error distribution results before correction, and lower case letters represent error distribution results after correction

2.3 未来气候变化预估

从经过校正后的未来降水数据中(图 11)可以看出, 在 S1 阶段(2015~2040 年)所有情景的降水量在稍高于历史均值的水平上下波动, 在 S2 阶段(2041~2070 年)降水量相较于历史均值有了一个较为明显的增加, 并且波动变化也更大, 在 S3 阶段(2071~2100 年)降水量比历史均值有了明显的增加, 波动也最大。其中, SSP5-8.5 的情景下降水的变化幅度最大, 增长趋势也最明显, 降水量增长也最多。长江流域未来温度整体都要高于历史均值, 在不同情景下温度变化有着明显的差异, 表现为 SSP5-8.5 > SSP3-7.0 > SSP2-4.5 > SSP1-2.6, 和历史平均温度相比, 到 2100 年, 在 SSP1-2.6 情景下温度差异在 2℃左右, 在 SSP2-4.5 情景下温度差异在 4℃左右, 在 SSP3-7.0 情景下温度差异在 5.5℃左右, 在 SSP5-8.5 情景下温度差异在 7.5℃左右。

从未来不同情景下不同季节的温度和降水变化(图 12)中可以看出温度和降水在未来的不同季节变化不同。温度在夏季和冬季变化较大, 在 SSP1-2.6 情景上升 3℃左右, 在 SSP2-4.5 和 SSP3-7.0 上升 3.5℃左右, 在 SSP5-8.5 情景上升 5℃左右; 春季和秋季温度变化较小, SSP1-2.6、SSP2-4.5 和 SSP3-7.0 情景下上升 2℃到 2.5℃左右, SSP5-8.5 情景下上升 3℃左右。降水在 SSP1-2.6 情景下, 在春季和冬季变化较大, 变化率可以达到 35%, 在夏季和秋季变化较小, 达到 20%; 在 SSP2-4.5 情景下, 春

季、夏季和冬季变化都较大分别变化 35%左右和 25%左右, 秋季变化较小, 为 10%左右; 在 SSP3-7.0 情景下, 春季、夏季和冬季变化在 35%左右和 20%左右, 秋季变化为 10%左右; 在 SSP5-8.5 情景下, 春季和夏季变化在 40%左右, 冬季变化为 35%左右, 秋季变化为 20%左右。

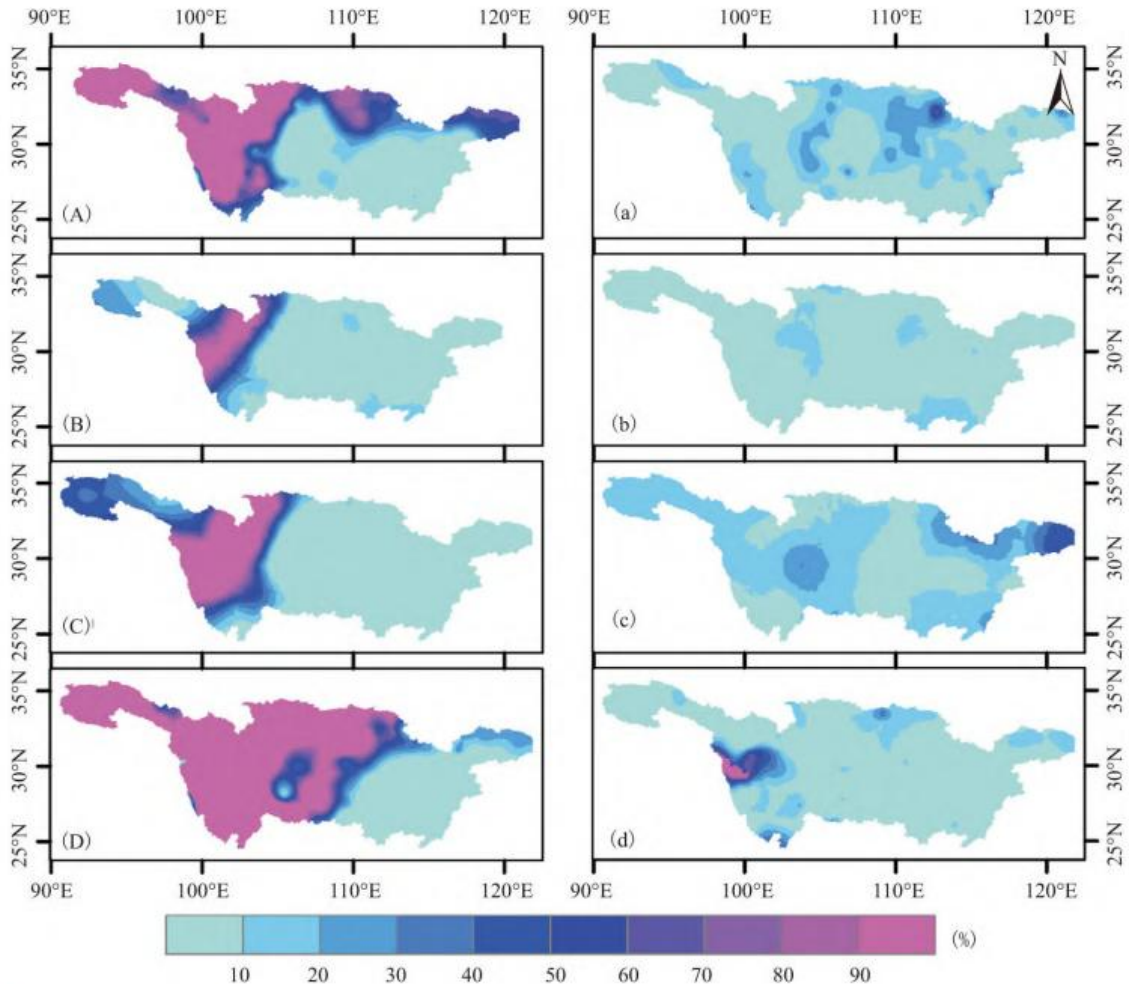


图 10 长江流域降水在春季(A-a)、夏季(B-b)、秋季(C-c)、冬季(D-d)的校正相对误差分布, 其中大写字母表示校正前的误差分布结果, 小写字母表示校正后的误差分布结果

Fig. 10 Correction relative error distribution of precipitation in Yangtze River Basin in spring (A-a), summer (B-b), autumn (C-c) and winter (D-d), where upper case letters represent error distribution results before correction, and lower case letters represent error distribution results after correction

从未来空间的降水和温度变化图中(图 13)可以看出, 对于未来的降水变化来说, 长江流域在各个情景下降水量都比历史基准要高, 其中在 SSP1-2.6、SSP2-4.5 和 SSP3-7.0 的情景下, 长江流域的降水增加量维持在 30%左右, 在 SSP5-8.5 的情景下, 长江流域的降水增加量维持在 40%左右, 有些区域甚至可以达到 50%以上。降水量增加较多的区域集中在长江源头和东北部区域。对于未来的温度变化来说, 在 SSP1-2.6 情景下, 长江流域增加的温度维持在 2℃左右, 在 SSP2-4.5 情景下, 长江流域增加的温度维持在 2.5℃左右, 在 SSP3-7.0 情景下, 长江流域增加的温度维持在 3℃左右, 在 SSP5-8.5 情景下, 长江流域增加的温度维持在 4℃左右, 温度增长较大的地区主要集中在长江上游, 并且靠近长江源头处增长更为明显。

3 讨论

从评估结果中可以看出气候模式对于整个长江的模拟存在一定的误差，对温度和降水都存在一定程度的高估，并且不同时间尺度的模拟效果不同，模拟精度表现为月尺度>日尺度>年尺度，结合不同季节的分析结果可以看出，导致这一情况出现的原因可能是一年中的某些月的模拟效果较差从而影响了年尺度的模拟效果，从上文中的季节分析中也可以看出，气候模式在春季和冬季的模拟效果要明显优于夏季和秋季。同时有学者指出，气候模式对东亚地区的夏季风模拟效果较差^[22]，这也可能成为了导致夏季和秋季降水模拟效果较差的原因之一。经过校正后的数据精度得到了明显的提高，证明分位数映射法可以被应用于气候模式数据的校正。而且通过区分季节进行校正，尤其是对于降水而言，相比较于普通的校正方法，可以进一步提高气候模式数据的精度。此外，由于只是通过统计方法对气候模式进行校正，很多学者发现经过分位数映射法校正的数据容易夸大极端事件相对趋势的量级^[23]，从上文中也可以看出此方法对于极端的降水和温度的校正还存在一定的缺陷。

未来在所有情景下长江流域的总体降水量都基本高于历史时期，并且呈现一个上升趋势，同时每年的变化幅度也比历史时期要大，这种变化幅度、偏离于历史时期降水量水平和上升趋势都会随着时间的推移而增大。并且在不同时期不同情景下的增长速率也不同，总体表现为 SSP5-8.5>SSP3-7.0> SSP2-4.5> SSP1-2.6，这与之前的研究得到的结论类似^[24]。综合来看，未来温度和降水变化在 SSP1-2.6 的情景下会持续一段时间的不稳定增加，随后会随时间变化趋于稳定。而在其他三种情景下，随着时间长度的增加，温度和降水的变化速度会加快，并且波动也会加剧。从季节变化中可以看出，温度在夏季和冬季变化较大，SSP1-2.6 情景下降水在春季和冬季变化较大，其他情景下只有秋季变化较小，并且 SSP1-2.6 变化幅度最小，SSP5-8.5 变化幅度最大，这种季节变化在前人的研究中也体现^[25]，但我们得到的结果与他们得到的秋季变化率为负的研究结果相反，结合图 4 来看，可能是由于我们区分了季节进行校正，校正了秋季气候模式数据模拟值偏低的偏差，这也证明了对于降水校正需要区分季节校正的必要性。未来这种温度和降水在不同季节的变化很可能加大洪涝干旱等极端事件的发生，尤其是季节交替时期影响可能会更大。从空间变化中可以看出，长江流域的温度和降水在未来都有所增加，并且在不同情景下的增加程度表现为 SSP5-8.5> SSP3-7.0> SSP2-4.5> SSP1-2.6，值得注意的是长江源头的温度升高和降水增加表现都最为明显，这种温度升高可能会导致未来长江源头的冰川融化加速，再加之未来可能增长的降水量，从而影响未来长江流域的径流变化。

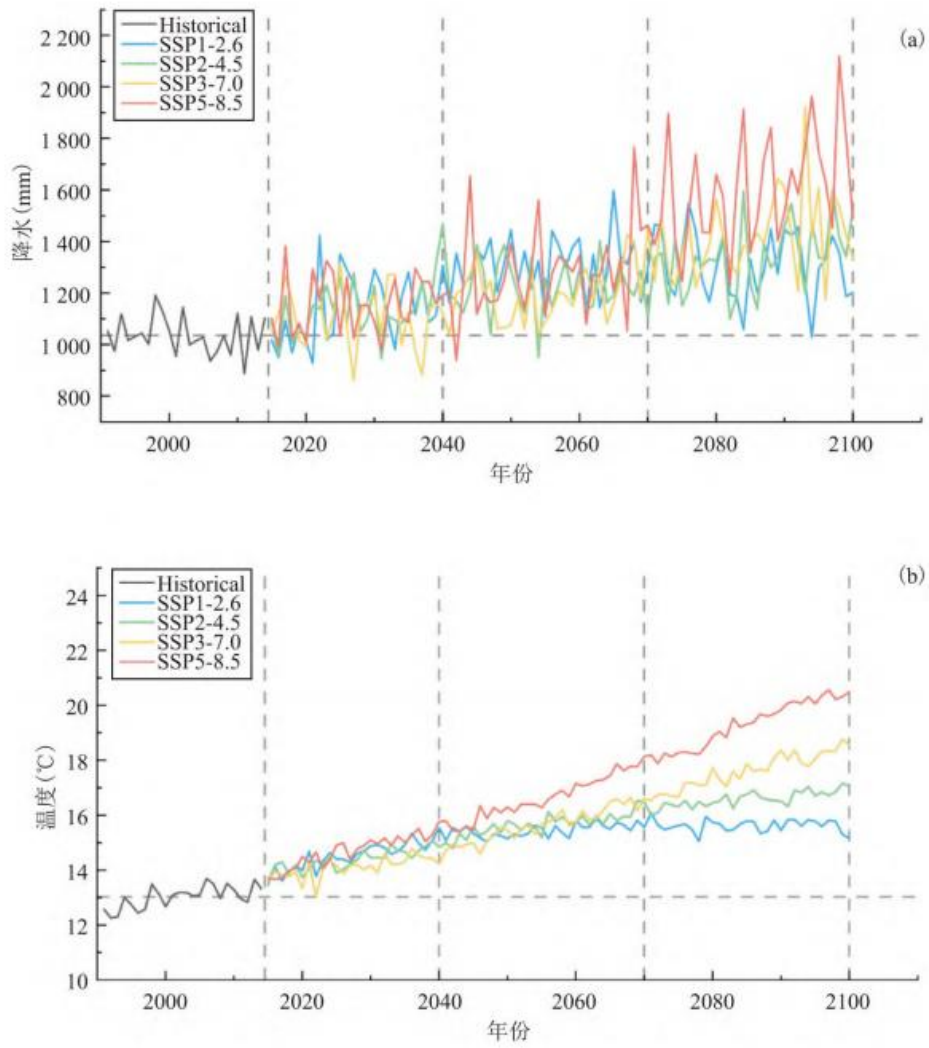


图 11 未来降水(a)和温度(b)在不同情景下的变化

Fig. 11 Changes of future precipitation (a) and temperature (b) under different scenarios

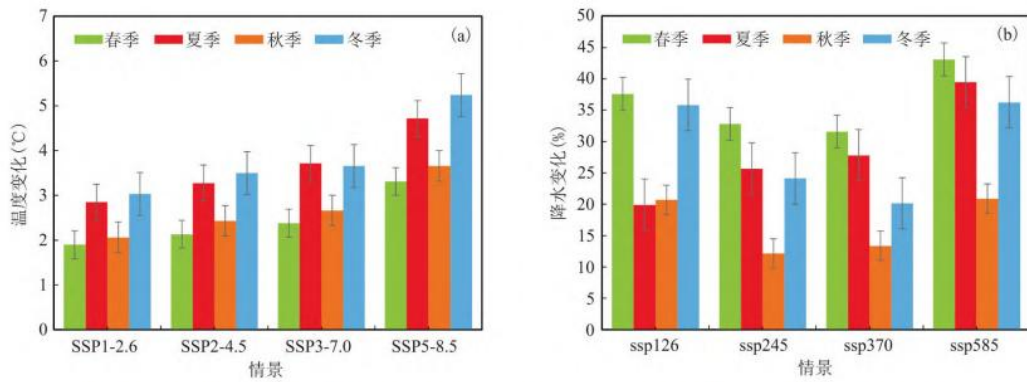


图 12 基于历史时期未来不同气候情景下不同季节长江流域温度(a)和降水(b)的变化

Fig. 12 Future precipitation (a) and temperature (b) changes in different seasons based on historical benchmarks

虽然 CMIP6 气候模式在分辨率、物理参数化过程等方面有了一定程度的提升和发展，但由于受其本身及外部条件等多重因素的影响，对未来气候变化的预估仍具有一定的不确定性^[26]。相较于温度，降水具有更大的不确定性，并且如图 14 所示，随着时间尺度的增加，气候模式对降水的模拟效果也有一定程度的降低，这表示不确定性可能也会随着时间尺度的增加而加大。虽然本文对气候模式进行评估、优选、校正后可以降低一部分的不确定性，但对于极端的降水和温度的校正还存在一定的不确定性，在未来的研究中，可以通过对极端事件的研究来进一步降低气候模式的不确定性。

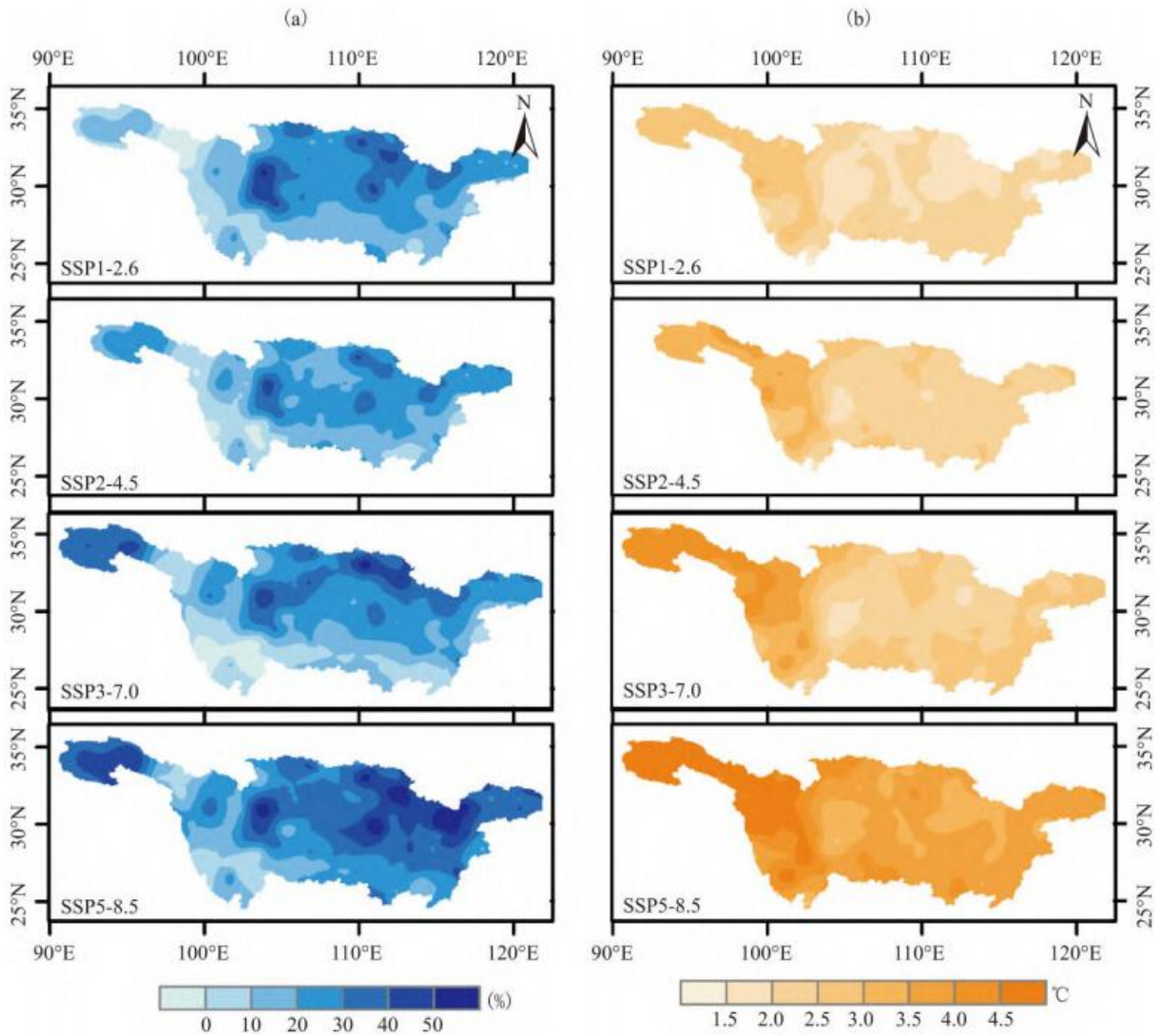


图 13 基于历史基准未来降水 (a) 和温度 (b) 的变化

Fig. 13 Future precipitation (a) and temperature (b) changes based on historical benchmarks

4 结论

本文通过对 CMIP6 的 26 个气候模式进行评估、校正后，对长江流域未来不同情境下的温度和降水进行预估，得到了以下结论：

(1) 气候模式对温度的模拟效果要优于降水，在不同的时间尺度表现为月尺度>日尺度>年尺度。气候模式可以反映出长江流域的温度和降水的空降变化，对于温度的模拟存在一定程度的低估，降水存在一定的高估。

(2) 区域尺度利用气候模式进行研究工作前的评估和校正是必要的, 区分季节经过校正后的数据精度得到了明显的提高, 分位数映射法可以被应用于气候模式数据的校正, 但对于极端的降水和温度的校正还存在一定的缺陷。

(3) 未来温度和降水变化在 SSP1-2.6 的情景下会持续一段时间的不稳定增加, 随后会随着时间变化趋于稳定。在其他三种情景下, 变化速度会随着时间长度的增加而加快。未来在所有情景下长江流域的降水量和温度都高于历史时期, 总体表现为 SSP5-8.5 > SSP3-7.0 > SSP2-4.5 > SSP1-2.6。季节上, 温度在春季和冬季变化较大, 降水在春季、夏季和冬季变化较大。空间上, 降水量增加较多的区域集中在长江源头和东北部区域, 温度增长较大的地区主要集中在长江上游和长江源头处。

参考文献

[1] 陈亚宁, 李稚, 范煜婷, 等. 西北干旱区气候变化对水文水资源影响研究进展[J]. 地理学报, 2014, 69(9):1295-1304. CHEN Y N, LI Z, FAN Y T, et al. Research progress on the impact of climate change on water resources in the arid region of Northwest China[J]. Acta Geographica Sinica, 2014, 69(9):1295-1304.

[2] MISHRA A K, SINGH V P. Analysis of drought severity-area-frequency curves using a general circulation model and scenario uncertainty[J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2009, 114(D6).

[3] CHEN J, BRISSETTE F P, LUCAS-PICHER P. Assessing the limits of bias-correcting climate model outputs for climate change impact studies[J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2015, 120(3):1123-1136.

[4] 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.

[5] 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]. Advances in Climate Change Research, 2014, 10(3):217-225.

[6] 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]. Advances in Climate Change Research, 2017, 13(3):198-212.

[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):7. ZHANG L X, CHEN X L, XIN X G. Short commentary on CMIP6 Scenario Model Intercomparison Project (ScenarioMIP)[J]. Advances in Climate Change Research, 2019, 15(5):7.

[8] 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):13. 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):13.

[9] IQBAL Z, SHAHID S, AHMED K, et al. Evaluation of CIMP6 GCM rainfall in mainland Southeast Asia[J]. Atmospheric Research, 2021, 254:105525.

-
- [10] MASUD B, CUI Q, AMMAR M E, et al. Means and extremes: Evaluation of a CMIP6 multi-model ensemble in reproducing historical climate characteristics across Alberta, Canada[J]. *Water*, 2021, 13(5):737.
- [11] DUAN Y, KUMAR S, KINTER J L. Evaluation of Long-term Temperature Trend and Variability in CMIP6 Multimodel Ensemble[J]. *Geophysical Research Letters*, 2021, 48(10):e2021GL093227.
- [12] 初祁, 徐宗学, 刘文丰, 等. 24 个 CMIP5 模式对长江流域模拟能力评估[J]. *长江流域资源与环境*, 2015, 24(1):81-89. CHU Q, XU Z X, LIU W F, et al. Assessment on 24 global climate models in the CMIP5 over the Yangtze River[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2015, 24(1):81-89.
- [13] 周天军, 李立娟, 李红梅, 等. 气候变化的归因和预估模拟研究[J]. *大气科学*, 2008, (4):906-922. ZHOU T J, LI L J, LI H M, et al. Progress in climate change attribution and projection studies[J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 2008, (4):906-922.
- [14] TAO H, GEMMER M, JIANG J, et al. Assessment of CMIP3 climate models and projected changes of precipitation and temperature in the Yangtze River Basin, China[J]. *Climatic Change*, 2012, 111(3):737-751.
- [15] SUN Q, MIAO C, DUAN Q. Projected changes in temperature and precipitation in ten river basins over China in 21st century[J]. *International Journal of Climatology*, 2015, 35(6):1125-1141.
- [16] 张杰, 罗岚心, 韩晓令, 等. CMIP5 模式对长江流域年降水的模拟与预估[C]. //贵州省气象学会. 气象学会 2013 年学术年会论文集. 贵州省: 贵州省科学技术协会, 2013:113-118. ZHANG J, LUO L X, HAN X L, et al. Simulation and prediction of annual precipitation over the Yangtze River Basin using CMIP5 model[C]. //Guizhou Meteorological Society. Proceedings of the annual Meeting of meteorological Society 2013. Guizhou: Guizhou Association for Science and Technology, 2013:113-118.
- [17] 曾小凡, 翟建青, 姜彤, 等. 长江流域年降水量的空间特征和演变规律分析[J]. *河海大学学报: 自然科学版*, 2008, 36(6):727-732. ZENG X F, ZHAI J Q, JIANG T, et al. Spatial characteristics and evolutionary trends of annual precipitation in the Yangtze River basin[J]. *Journal of Hohai University(Natural Sciences)*, 2008, 36(6):727-732.
- [18] TAYLOR K E. Summarizing multiple aspects of model performance in a single diagram[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2001, 106(D7):7183-7192.
- [19] 苏琪骅. 基于 CMIP5 模式在中国地区温度与降水的模拟评估及集合预报方法研究[D]. 中国科学技术大学, 2017. SU Q H. Evaluation and Ensemble Forecast of the Surface Air Temperature and Precipitation in China Based on CMIP5 Multi-models[D]. University of Science and Technology of China, 2017.
- [20] TONG Y, GAO X, HAN Z, 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] GUDMUNDSSON L, BREMNES J B, HAUGEN J E, et al. Technical Note: Downscaling RCM precipitation to the station scale using quantile mapping—a comparison of methods[J]. *Hydrology and Earth System Sciences*. 2012, 9(5):6185-6201.

[22] DONG T, DONG W. Evaluation of extreme precipitation over Asia in CMIP6 models[J]. *Climate Dynamics*, 2021, 57(7):1751-1769.

[23] CANNON A J, SOBIE S R, MURDOCK T Q. Bias Correction of GCM Precipitation by Quantile Mapping: How Well Do Methods Preserve Changes in Quantiles and Extremes?[J]. *Journal of Climate*, 2015, 28(17):6938-6959.

[24] YING L A, DY B, HUI P A, et al. Evaluation of precipitation in CMIP6 over the Yangtze River Basin - ScienceDirect[J]. *Atmospheric Research*, 2020, 253.

[25] 李晓蕾, 王卫光, 张淑林. 基于CMIP6多模式的长江流域未来降水变化趋势分析[J]. *中国农村水利水电*, 2022(03):1-7, 12. LI X L, WANG W G, ZHANG S L. A trend analysis of future precipitation in the Yangtze River Basin based on CMIP6 multi-model[J]. *China Rural Water and Hydropower*, 2022(3):1-7, 12.

[26] 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-mode[J]. *Geography and Geo-Information Science*, 2020, 36(2):75-82.