

伍清, 蒋兴文, 谢洁, 等. 基于CMIP5资料的西南地区2020—2050年气温多模式集合预估[J]. 干旱气象, 2018, 36(6): 971—978, [WU Qing, JIANG Xingwen, XIE Jie, et al. Multimodel Superensemble Prediction of Air Temperature in Southwestern China During 2020—2050 Based on CMIP5 Data[J]. Journal of Arid Meteorology, 2018, 36(6): 971—978], DOI:10.11755/j.issn.1006-7639(2018)-06-0971

基于CMIP5资料的西南地区2020—2050年 气温多模式集合预估

伍清¹, 蒋兴文¹, 谢洁², 朱桦³

(1. 中国气象局成都高原气象研究所/高原与盆地暴雨旱涝灾害四川省重点实验室, 四川 成都 610072;
2. 江苏省苏州市吴中区气象局, 江苏 苏州 215100; 3. 安徽省公共气象服务中心, 安徽 合肥 230031)

摘要: 利用1961—2005年西南地区2 m气温的观测资料及同期CMIP5的11个全球气候系统模式的历史模拟数据, 对比分析模式模拟、统计降尺度方法模拟、多模式集合模拟、统计降尺度和多模式集合相结合方法模拟的西南地区及不同分区气温误差。结果表明统计降尺度方法和多模式集合方法都能有效降低模拟误差, 多模式集合的模拟误差相对较小。选取多模式集合方法预估RCP4.5中等偏低辐射强迫情景下2020—2050年西南地区2 m气温的变化, 发现2020—2050年西南地区年平均及四季气温都呈显著上升趋势, 冬季气温增幅相对较高, 夏季相对较低; 气温增幅较高的区域主要位于102°E以西, 较低的区域位于四川西南部和云南西北部交界处。

关键词: 西南地区; CMIP5; 2 m气温; 预估

文章编号: 1006-7639(2018)06-0971-08 DOI:10.11755/j.issn.1006-7639(2018)-06-0971

中图分类号: P467

文献标志码: A

引言

西南地区地处青藏高原东南侧, 具有复杂的地形地貌, 并且受到热带季风、副热带季风和高原季风等多气候系统的共同影响, 形成了西南独特的天气、气候^[1-4]。西南地区气温的变化具有明显的区域特色, 如四川盆地在1980—1990年代中期存在显著的年代际偏冷, 与全球变暖存在非同步性^[5]。西南区域青藏高原的增温幅度显著高于其他区域, 且增温幅度在一定程度上表现出明显的海拔依赖性^[6]。1961—2005年西南地区大部年平均气温表现出明显的增温趋势, 上升趋势最显著的地区在西藏高原等高海拔地区, 而在四川的东北部及云南北部存在降温中心^[7]。此外, 西南区域是我国重要的农业生产区^[8], 也是我国水资源最丰富的地区之一^[9-10], 随着全球变暖, 西南地区极端天气气候事件频发, 给人民生活及社会经济造成严重影响。因此, 正确认识西南区域未来气候的可能变化及其影响有着重要

的意义。

现阶段全球气候系统模式是进行当代气候模拟和不同排放情景下未来气候变化预估的重要工具。国际耦合模式比较计划第5阶段(CMIP5)包括全球大约20多个研究机构或组织的50多个模式^[11], 为提高人们对气候的认识、预估未来气候变化可能出现的后果提供了大量数据。但是, 由于目前全球气候模式的空间分辨率较低, 缺少区域气候信息, 很难对区域气候情景做精确的预测。目前有2种方法可以弥补气候模式预测区域气候变化情景的不足, 一是发展更高分辨率的模式; 另一种是降尺度法。由于提高模式空间分辨率需要的计算量很大, 而且也不可能无限地提高区域模式的分辨率, 因此降尺度方法是更为可选的方法^[12]。降尺度方法主要包括动力降尺度和统计降尺度2种, 由于动力降尺度需要高配置的计算机, 耗费大量的机时, 并且在应用于不同的区域时需要重新调整模式参数。统计降尺度方法相对简便易行, 其研究区域及具体实施方案又

收稿日期: 2018-04-26; 改回日期: 2018-06-27

基金项目: 国家自然科学基金项目(91337107、41661144019)、四川省气象局科学技术研究开发课题青年基金(川气课题2014-青年-02)及高原大气与环境四川省重点实验室开放课题(PAEKL-2016-C3)共同资助

作者简介: 伍清(1984—), 女, 贵州安顺人, 助理研究员, 主要从事气候变化研究。E-mail: xianqing_612326@163.com。

有较大的灵活性,不失为一种能够进行空间尺度精细化预测的有效途径^[13-14]。近年来,多模式集成技术受到国内外研究者的广泛关注,该技术充分利用各中心模式预报结果以减小模式的系统性偏差。作为一种多模式集成技术,KRISHNAMURTI 等^[15]提出的超级集合预报技术是预报效果较好的方法之一。KUMAR 等^[16]利用超级集合方法对飓风的路径和强度进行预报试验,发现超级集合预报效果优于单个模式和多模式集合平均。CARTWRIGHT 等^[17]集合 9 个模式成员,通过超级集合预报方法对美国东南部夏季降水进行定量预报,应用 ETS 评分与 FAR 评分对降水量预报效果进行检验,发现超级集合预报对降水的定量预报评分优于最好的模式成员,也优于简单的集合平均和消除偏差的集合平均。智协飞等^[18]利用 IPCC-AR4 的 8 个全球气候系统模式对 20 世纪气候模拟情景下地面气温的模拟结果,进行多模式集成处理,发现多模式超级集合方法能有效地减小模式回报的均方根误差。

近年来一些学者使用降尺度方法或多模式集合技术对我国未来气候变化进行了预估^[19-23],且结果表明降尺度方法、多模式集合技术能够明显改善对气温、降水等的模拟效果,并且气温模拟好于降水模拟。IPCC 第 5 次评估报告,第 3 次气候变化国家评估报告^[24]中指出,相对 1986—2005 年,到 21 世纪末(2081—2100 年),RCP4.5 情景下全球平均地表温度的增幅为 $1.8 \pm 0.5 \text{ }^\circ\text{C}$;在 3 种典型浓度路径(RCPs)情景下,中国区域平均温度将持续上升,2011—2100 年在 RCP4.5 情景下的增温趋势为 $0.26 \text{ }^\circ\text{C} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$,其结果主要是利用简单平均方法进行多模式集合,给出全球区域或中国区域平均地表气温的变化。本文主要针对西南区域及其不同分区,着重探讨 CMIP5 模式对西南地区气温模拟的效果,统计降尺度方法和多模式超级集合方法改善模式模拟结果效果,以及未来 30 a(2020—2050 年)西南地区气温的时空变化特征。

1 资料与方法

1.1 资料

使用国家气象信息中心提供的“中国地面气候资料日值数据集(V3.0)”中的近地面 2 m 气温日值数据作为观测资料,经过质量筛选挑选出西南地区 115 个站点(图 1)1961—2005 年的日平均气温资料。选取西南地区范围为 21°N — 35°N , 97°E — 110°E ,主要指四川、云南、贵州、重庆地区。由于研究区域地形复杂,海拔高度差异大,天气气候特征有较大不

同,因此根据不同的海拔将西南地区分为 3 个区: I 区主要包括川西高原以及云南北部海拔大于 2000 m 的站点,共 27 个; II 区主要包括云贵高原、四川南部海拔高度在 1000 ~ 2000 m 之间的站点,共 36 个; III 区主要包括四川、重庆丘陵、盆地区域海拔小于 1000 m 的站点,共 52 个。模式资料为 CMIP5 提供的全球气候系统模式在历史气候模拟试验(简称“historical”)以及 RCP4.5 中等偏低辐射强迫情景下的近地面 2 m 气温(以下简称“气温”)输出结果。伍清等^[25]评估了 40 个参与 CMIP5 的模式对西南地区气温的模拟能力,根据评估结果,并结合 RCP4.5 情景下资料的可利用性,挑选出 11 个气候模式,模式基本信息见表 1(<http://cmip-pcmdi.llnl.gov/cmip5/>)。观测资料及 historical 模拟资料的时间范围取 1961—2005 年,RCP4.5 预估资料时间范围取 2006—2050 年。鉴于各个模式具有不同的水平分辨率,为便于集合以及同观测资料进行比较,使用双线性插值法^[26-27]将各模式的数据统一插值到观测站点上。为便于分析,以 12 月至翌年 2 月为冬季、3—5 月为春季、6—8 月为夏季、9—11 月为秋季生成序列。

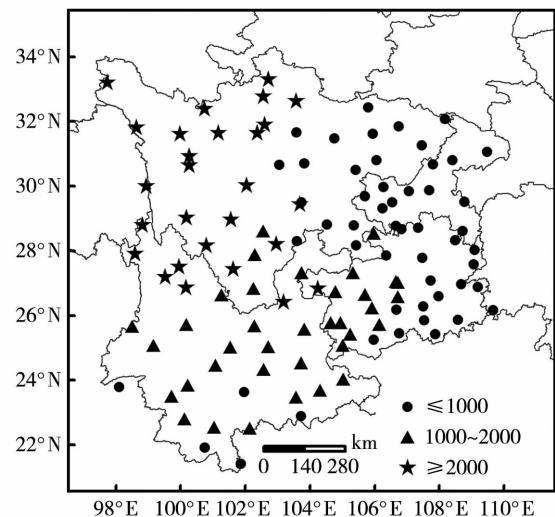


图 1 西南区域气象站点及海拔高度(单位:m)分布

Fig. 1 The distribution of meteorological stations and the altitude (Unit:m) in southwestern China

1.2 方法

1.2.1 统计降尺度方法

采用一元线性回归法统计降尺度^[13]。该方法首先使用双线性内插值法将不同分辨率的模式模拟结果插值到“观测场”的站点上,然后选取一定长度的训练期,在每一个站点上,建立起模式模拟值与“观测值”之间的统计关系,具体公式如下:

表1 11个气候模式的基本信息

模式序号	模式名称	所属国家	经纬向格点数
1	CanESM2	加拿大	128 × 64
2	GISS - E2 - H - CC	美国	144 × 90
3	GISS - E2 - R	美国	144 × 90
4	GISS - E2 - R - CC	美国	144 × 90
5	INM - CM4	俄罗斯	180 × 120
6	IPSL - CM5A - LR	法国	96 × 96
7	IPSL - CM5A - MR	法国	144 × 143
8	MIROC5	日本	256 × 128
9	MIROC - ESM	日本	128 × 64
10	MRI - CGCM3	日本	320 × 160
11	NorESM1 - ME	挪威	144 × 96

$$Y_i = aX_i + b \quad (1)$$

式中: X_i 为模式模拟结果; Y_i 是相对应的站点观测值序列; a 、 b 为回归系数。利用该关系式,对预报期的模式预报值进行回归订正。对各模式降尺度结果的检验采用独立检验方法。

1.2.2 多模式超级集合

多模式超级集合是一项统计技术^[15],该方法把时间序列分为训练期和预报期2部分,在训练期对多模式模拟和观测数据做多元线性回归分析,确定参与集成的模式权重系数,相应的权重系数用于预报期的超级集合预报。在一个给定的格点或站点上,对于某一气象要素,超级集合预报由以下公式定义:

$$S_t = \bar{O} + \sum_{i=1}^n a_i (F_{i,t} - \bar{F}_i) \quad (2)$$

式中: S_t 为超级集合预报值; \bar{O} 为训练期观测值的平均; $F_{i,t}$ 为第*i*个模式的模拟值; \bar{F}_i 为第*i*个模式在训练期的模拟值平均; a_i 为回归系数(权重); t 为时间; n 为参与超级集合的模式总数。在训练期,回归系数 a_i 由下式中的误差项*G*最小化计算而得:

$$G = \sum_{i=1}^N (S_t - O_t)^2 \quad (3)$$

式中: O_t 为第*t*时刻的观测值; N 为训练期时间样本总数。应用最小二乘法原理使训练期中模拟误差*G*最小,并确定参与超级集合的各个模式的回归(权重)系数 a_i 。权重 a_i 随空间变化但随时间不变,相应的权重系数代入公式(2)用于预报期的超级集合预报。

为讨论统计降尺度方法、多模式超级集合方法、结合2种方法的模拟效果,设计4种方案进行对比:

(1)单独使用统计降尺度方法(statistical downscaling,以下简称“DS”);(2)单独使用多模式超级集合方法(superensemble,以下简称“SUP”);(3)先进行统计降尺度,再利用降尺度结果做多模式集合(以下简称“DS-SUP”);(4)先进行多模式集合,再对集合结果做统计降尺度(以下简称“SUP-DS”)。在评估以上4种方案时,均取1961—2005年CMIP5的历史气候模拟资料与同期观测资料进行对比分析,其中1961—1990年作为模拟时段,1991—2005年作为检验时段,对模拟结果使用均方根误差(RMSE)进行检验。此外,用*t*检验方法预估气温线性趋势的显著性。

2 模拟结果检验

图2为模式模拟及DS、SUP、DS-SUP和SUP-DS模拟的1991—2005年西南地区气温的均方根误差。图中序号1~11分别表示模式CanESM2、GISS-E2-H-CC、GISS-E2-R、GISS-E2-R-CC、INM-CM4、IPSL-CM5A-LR、IPSL-CM5A-MR、MIROC5、MIROC-ESM、MRI-CGCM3和NorESM1-ME。从图2(a)可以看出,11个模式模拟的1991—2005年的西南地区年平均气温均方根误差为3.8~6.0℃,经过统计降尺度后,模式均方根误差显著降低至0.6~0.8℃,降低幅度为3.2~5.2℃。11个模式的四季气温均方根误差春季为4.2~5.6℃、夏季为3.0~4.5℃、秋季为3.4~6.3℃、冬季为4.7~8.9℃,总体上,春、冬季误差比夏、秋季大,且夏季误差相对最小。统计降尺度处理后均方根误差:春季1.2~1.6℃、夏季0.7~1.3℃、秋季0.9~1.4℃、冬季1.1~1.4℃。由图2(b)可以看出,11个模式经过单独使用多模式超级集合(SUP)处理后,年及春、夏、秋、冬季平均气温的均方根误差分别为:0.6、0.9、0.6、0.7、0.9℃,相对于统计降尺度模拟的均方根误差略有减小。且SUP模拟和DS-SUP模拟的均方根误差一致,这可能是由于在做多模式超级集合时会调配各模式的权重系数使得训练期内模拟误差最小。SUP-DS模拟的年及春、夏、秋、冬季平均气温的均方根误差分别为0.7、1.0、1.0、0.8、1.1℃,比SUP模拟的误差略大。从西南地区各分区的均方根误差(图略)来看,SUP模拟结果优于其他3种优化方案,其年及春、夏、秋、冬季平均气温的均方根误差分别是:Ⅰ区为0.6、0.9、0.6、0.8、1.0℃,Ⅱ区为0.6、0.8、0.6、0.7、1.0℃,Ⅲ区为0.5、0.8、0.7、0.7、0.8℃,其中海拔较高的Ⅰ区模拟误差相对略大。

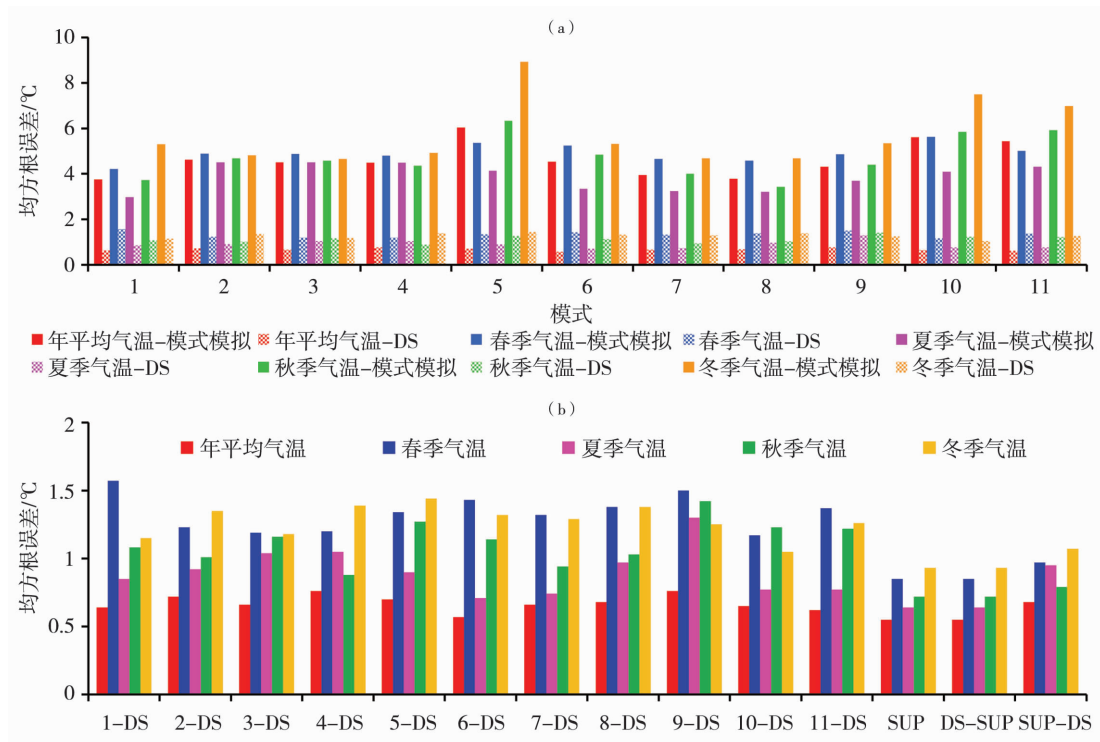


图2 1991—2005年西南地区气温的平均均方根误差

(a) 模式模拟及模式统计降尺度(DS), (b) DS、SUP、DS-SUP、SUP-DS

Fig. 2 The mean RMS errors of air temperature in southwestern China from 1991 to 2005

(a) simulated by models and DS; (b) simulated by DS、SUP、DS-SUP、SUP-DS

鉴于使用 SUP 模拟和 DS-SUP 模拟的均方根误差一致,因此比较 DS、SUP 及 SUP-DS 模拟的结果。从 1991—2005 年西南地区年和四季平均气温均方根误差随时间变化曲线(图 3)来看,总体上 SUP 模拟的误差相对较小。同时从西南 I 区、II 区和 III 区 DS、SUP、SUP-DS 模拟的 1991—2005 年平均气温均方根误差随时间变化(图略)也可看出 SUP 模拟的均方根误差相对较小。

为进一步探讨 DS、SUP、SUP-DS 模拟的西南地区气温均方根误差空间分布,选取 11 个模式中模拟均方根误差较小的模式(CanESM2),利用其结果与 CanESM2 的 DS 模拟、SUP 模拟、SUP-DS 模拟结果进行比较(图 4)。可以看出,模式 CanESM2 直接输出的模拟结果[图 4(a)],其均方根误差范围约为 2~12 °C,四川中部、西部、南部均有误差大值中心,最大误差约为 8 °C;四川与西藏交界处的误差最大,中心值约为 12 °C。将模式 CanESM2 的模拟结果进行统计降尺度后[图 4(b)],误差范围约为 0.4~1.8 °C,均方根误差得到有效降低,误差大值中心主要在四川西南部,最大误差值约为 1.8 °C。值得注意的是西藏及川西高原地区,模式直接输出的模拟结果误差约为 12 °C,加入观测资料进行统计

降尺度模拟后,均方根误差降至 0.8 °C,相对于别的地区误差降幅较大,说明模式对西藏及川西高原地区的模拟能力较差,观测资料对该地区的研究至关重要。利用 11 个模式模拟结果进行 SUP 模拟后均方根误差范围约为 0.4~1.8 °C[图 4(c)],与模式 CanESM2 进行 DS 后的误差分布大致相同,误差大值中心位置基本一致,但 SUP 模拟的误差大值区的范围有所减小。SUP-DS 模拟的均方根误差相比 DS 模拟和 SUP 模拟,其误差大值中心有所增加,最大误差值也增至 2.0 °C[图 4(d)]。同时从春、夏、秋及冬季气温的均方根误差空间分布(图略)来看,也得到了同样的结论。综上所述,SUP 模拟的误差相对较小,因此,以下采用多模式超级集合方法来预估 RCP4.5 情景下西南地区的气温变化。

3 RCP4.5 情景下西南地区未来气温的可能变化

图 5、图 6 分别给出 RCP4.5 中等偏低辐射强迫情景下 2020—2050 年西南地区及不同分区的年平均气温、四季气温随时间的演变,年平均气温、四季平均气温与时间的相关系数均通过 $\alpha = 0.05$ 的显著性检验。从图 5 可以看出,2020—2050 年西

南地区不同分区年平均气温均呈显著上升趋势, I 区、II 区、III 区线性增温速率分别为 0.28 、 0.25 、 $0.26 \text{ } ^\circ\text{C} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$, 即 I 区增温相对较高。从不同季节气温随时间的演变来看, I 区、II 区和 III 区的四季气温也都表现出一致的增温趋势。I 区春、夏、秋、冬季的增温速率分别为 0.28 、 0.20 、 0.36 、

$0.31 \text{ } ^\circ\text{C} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$, 即冬季增温幅度最高, 夏季最低; II 区四季气温增温速率分别为 0.27 、 0.22 、 0.25 、 $0.25 \text{ } ^\circ\text{C} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$, 即增温幅度夏季最低, 春季最高, 秋、冬季相当; III 区四季气温增温速率分别为 0.31 、 0.23 、 0.20 、 $0.31 \text{ } ^\circ\text{C} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$, 即春、冬季气温增温幅度最大, 秋季最小。

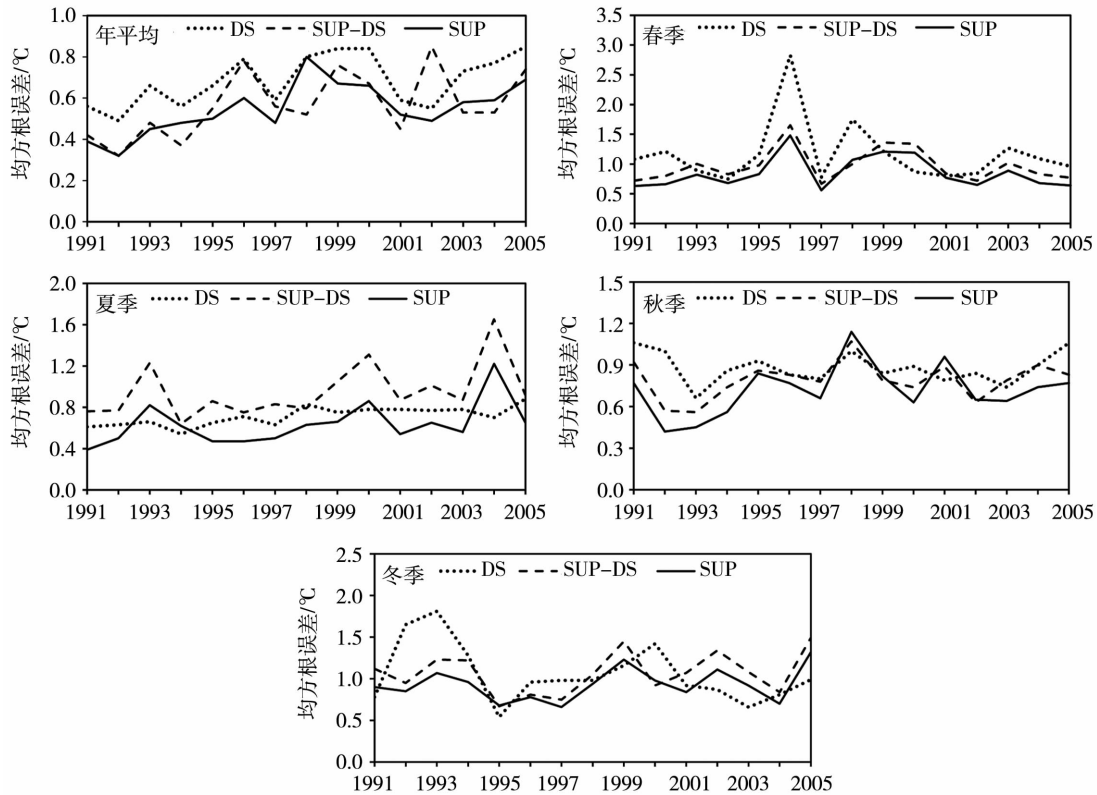


图 3 DS、SUP、SUP - DS 模拟的 1991—2005 年西南地区年及四季平均气温均方根误差的 annual 变化

Fig. 3 The annual variation of mean air temperature RMS errors for annual and different seasons simulated by DS, SUP and SUP - DS in southwestern China from 1991 to 2005

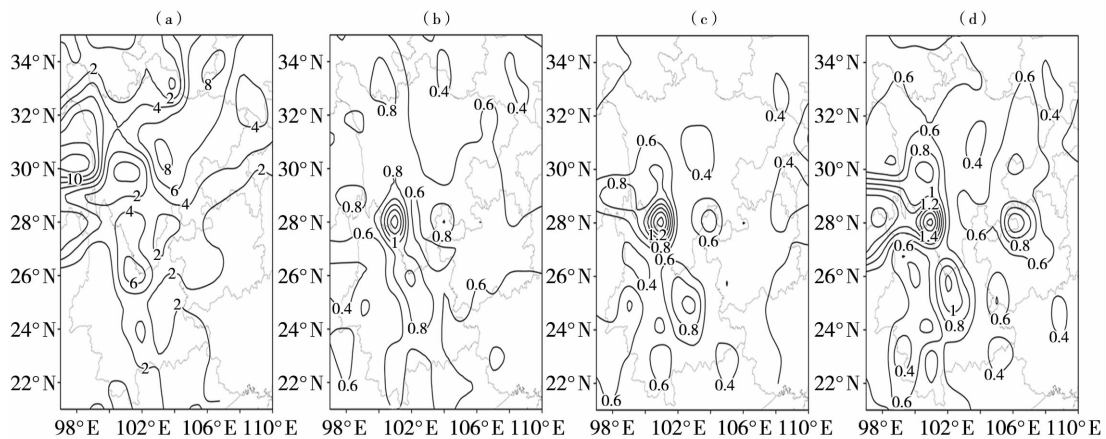


图 4 1991—2005 年西南地区年平均气温的均方根误差空间分布 (单位: $^\circ\text{C}$)

(a) 模式 CanESM2, (b) DS, (c) SUP, (d) SUP - DS

Fig. 4 The spatial distribution of mean RMS errors of annual mean temperature in southwestern China from 1991 to 2005 (Unit: $^\circ\text{C}$)

(a) CanESM2, (b) DS, (c) SUP, (d) SUP - DS

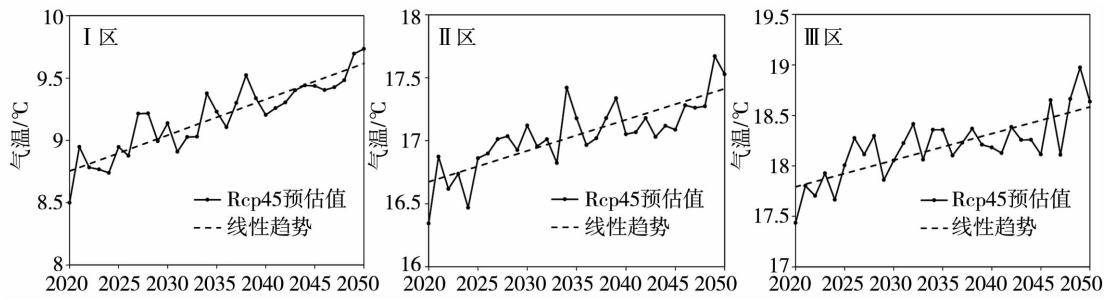


图5 2020—2050年西南地区不同分区年平均气温随时间的演变

Fig. 5 The temporal evolution of annual mean temperature for different regions in southwestern China from 2020 to 2050

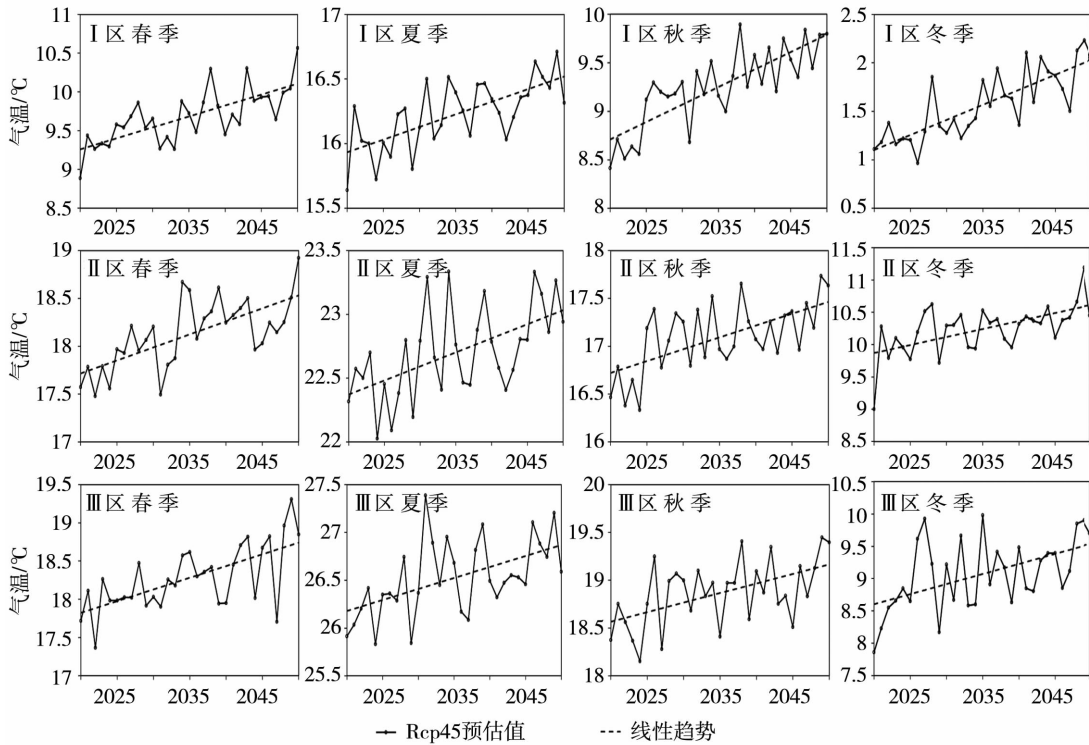


图6 2020—2050年西南地区各分区四季气温随时间的演变

Fig. 6 The temporal evolution of seasonal temperature for different regions in southwestern China from 2020 to 2050

图7为2020—2050年西南地区年及四季平均气温变化趋势的空间分布。可以看出,年平均气温显著升高,增温幅度较高的地区主要在西藏、川西高原地区、云南西北部地区,增温幅度在 $0.30\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot(10\text{ a})^{-1}$ 以上;四川西北部与青海东南部交界处,有一个增温大值中心,在 $0.42\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot(10\text{ a})^{-1}$ 以上;在四川西南部和云南西北部交界处,有一个增温小值区,最小增幅小于 $0.18\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot(10\text{ a})^{-1}$ 。春季气温增温幅度超过 $0.30\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot(10\text{ a})^{-1}$ 的地区主要分布在四川、青海、甘肃三省交界处,四川中东部,以及云南西部及西南部地区;在四川西南部和云南西北部交界处、云南东北部,分别有一个增温低值区,最小增幅均小于 $0.15\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot(10\text{ a})^{-1}$,但这2个中心的变化趋势没有通过0.05的显著性检验;四川北部偏西,也有一

个低值区,最小增幅小于 $0.20\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot(10\text{ a})^{-1}$ 。夏季气温增温大值区主要集中在云南中部及西北部地区,变化趋势最大约为 $0.36\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot(10\text{ a})^{-1}$;四川西南部的增温幅度较小,约为 $0.09\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot(10\text{ a})^{-1}$,四川中部、川西高原的增幅也相对较小,增温幅度分别约为 0.12 、 $0.15\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot(10\text{ a})^{-1}$,且前者未通过显著性检验。秋季气温的增幅相对春夏季略高,西南大部分地区气温增长率在 $0.20\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot(10\text{ a})^{-1}$ 以上,四川西北部与甘肃交界处有一增温大值中心,最大增幅约为 $0.65\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot(10\text{ a})^{-1}$ 。除云南外,西南地区冬季气温增幅基本在 $0.30\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot(10\text{ a})^{-1}$ 以上,其中,四川西北部与甘肃交界处有个增温大值中心,约为 $0.55\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot(10\text{ a})^{-1}$,云南冬季气温增幅相对较小,约为 $0.15\sim 0.25\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot(10\text{ a})^{-1}$ 。

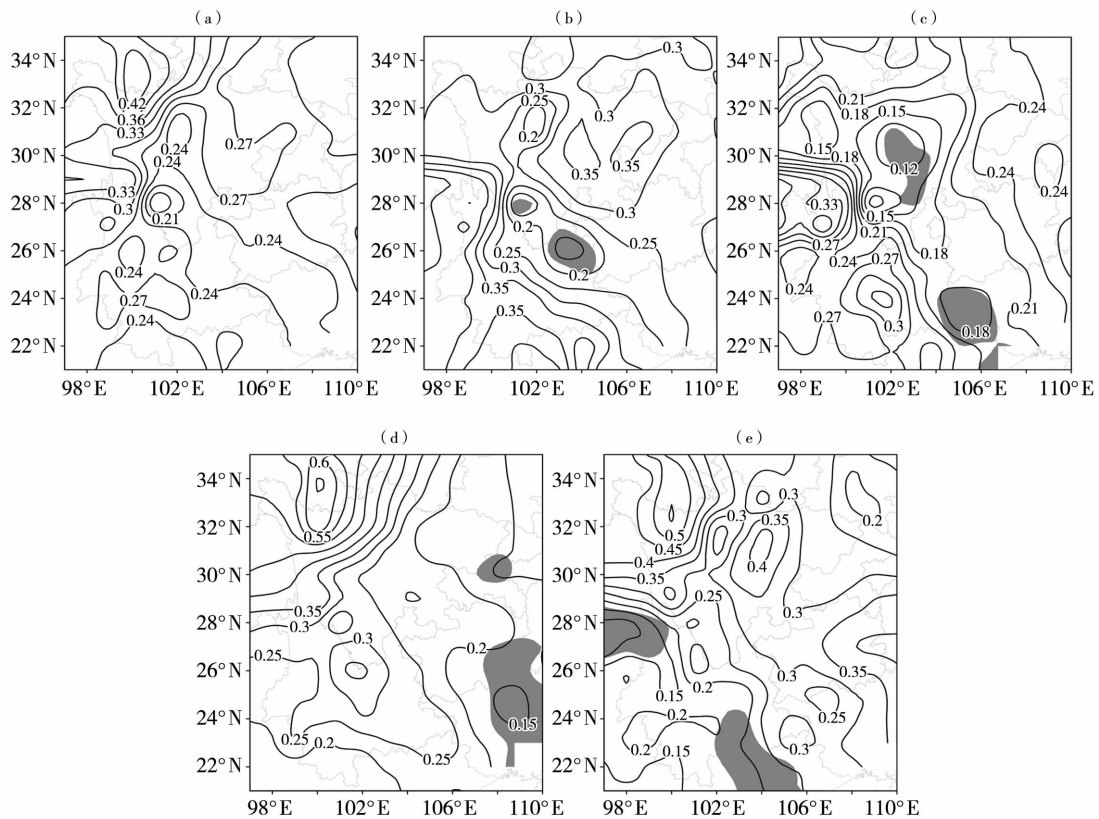


图7 2020—2050年西南地区年及四季平均气温变化趋势的空间分布[单位: $^{\circ}\text{C} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$]
(a)年,(b)春季,(c)夏季,(d)秋季,(e)冬季
(阴影区表示未通过0.05的显著性检验)

Fig. 7 The spatial distribution of variation trend of annual and seasonal mean temperature in southwestern China from 2020 to 2050 (Unit: $^{\circ}\text{C} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$)
(a) annual, (b) spring, (c) summer, (d) autumn, (e) winter
(The shaded areas not passing the 0.05 significance test)

4 结论与讨论

(1)CMIP5的11个模式模拟的西南地区以及不同分区的年及四季平均气温均方根误差较大,经过统计降尺度方法、多模式超级集合方法、统计降尺度和多模式集合相结合方法处理后,均方根误差均得到有效降低,降低幅度约为 $3.0 \sim 5.0 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 。对比使用统计降尺度、多模式超级集合、先统计降尺度再做多模式超级集合、先多模式超级集合再做统计降尺度方法,结果表明多模式超级集合的均方根误差相对最小。

(2)在RCP4.5中等偏低辐射强迫情景下,2020—2050年西南地区气温呈显著上升趋势。I区、II区、III区年平均气温增幅分别为 0.28 、 0.25 和 $0.26 \text{ }^{\circ}\text{C} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$;I区、II区和III区的四季气温也都表现出一致的增温趋势,但不同区域的增温幅度有所差异。年及四季平均气温增温幅度较高的

地区主要集中在 102°E 以西的云南、西藏及四川西北部、四川和青海及甘肃交界处地区。年、春季及夏季平均气温在四川西南部和云南西北部交界处均有气温变化趋势小值区,增温幅度相对较低;冬季气温增幅相对较高,夏季相对较低。

文中使用的多模式超级集合方法虽然改善了模拟结果,但由于西南地区复杂的地形,观测台站相对较少,由此插值所得的格点化资料存在不确定性,再加上未来情景预估的不确定性,因此对西南地区未来气温的预估也存在不确定性。

参考文献:

- [1] 徐晓,肖天贵,麻素红. 西南地区气候季节划分及特征分析[J]. 高原山地气象研究,2010,30(1):35-40.
- [2] 齐冬梅,李英,李跃清,等. 2006年高原夏季风强弱变化及其与西南地区东部夏季气温和降水的关系[J]. 干旱气象,2015,33(4):555-565.
- [3] 胡豪然. 青藏高原东部积雪异常与西南地区春季降水的关系

- [J]. 干旱气象, 2016, 34(3): 423 - 430.
- [4] 周长艳, 李跃清, 房静, 等. 高原东侧川渝盆地东西部夏季降水及其大尺度环流特征[J]. 高原山地气象研究, 2008, 28(2): 1 - 9.
- [5] 马振锋, 彭骏, 高文良, 等. 近 40 年西南地区的气候变化事实[J]. 高原气象, 2006, 25(4): 633 - 642.
- [6] LIU X D, CHEN B D. Climatic warming in the Tibetan Plateau during recent decades[J]. International Journal of Climatology, 2000, 20(14): 1729 - 1742.
- [7] 尹文有, 田文寿, 据建华. 西南地区不同地形台阶气温时空变化特征[J]. 气候变化研究进展, 2010, 6(6): 429 - 435.
- [8] 彭国照. 川西高原农业气象研究综述[J]. 高原山地气象研究, 2012, 32(1): 88 - 96.
- [9] 周亮广, 王崇, 戴仕宝, 等. 长江 2006 年汛期特枯径流分析[J]. 自然资源学报, 2009, 24(3): 448 - 456.
- [10] 王顺久. 青藏高原东部气候变化及其对长江上游水资源的可能影响[J]. 高原山地气象研究, 2008, 28(1): 42 - 46.
- [11] 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: 485 - 498.
- [12] 范丽军, 符淙斌, 陈德亮. 统计降尺度法对未来区域气候变化情景预估的研究进展[J]. 地球科学进展, 2005, 20(3): 320 - 329.
- [13] CHAKRABORTY A, KRISHNAMURTI T N. Improving global model precipitation forecasts over India using downscaling and the FSU superensemble. Part II: seasonal climate [J]. Monthly Weather Review, 2009, 137: 2736 - 2757.
- [14] KRISHNAMURTI T N, MISHRA A K, CHAKRABORTY A. Improving global model precipitation forecasts over India using downscaling and the FSU superensemble. Part I: 1 - 5 - Day Forecasts [J]. Monthly Weather Review, 2009, 137: 2713 - 2735.
- [15] KRISHNAMURTI T N, KISHTAWAL C M, LAROW T E, et al. Improved weather and seasonal climate forecasts from multimodel superensemble[J]. Science, 1999, 285: 1548 - 1550.
- [16] KUMAR T S V, KRISHNAMURTI T N, FIORINO M, et al. Multimodel superensemble forecasting of tropical cyclones in the Pacific [J]. Monthly Weather Review, 2003, 131: 574 - 583.
- [17] CARTWRIGHT T J, KRISHNAMURTI T N. Warm season mesoscale superensemble precipitation forecasts in the southeastern United States[J]. Weather and Forecasting, 2007, 22: 873 - 886.
- [18] 智协飞, 伍清, 白永清, 等. 基于 IPCC - AR4 模式资料的地面气温超级集合预测[J]. 气象科学, 2010, 30(5): 708 - 714.
- [19] 范丽军. 统计降尺度方法集合预估华东气温的初步研究[J]. 高原气象, 2010, 29(2): 392 - 402.
- [20] 姚遥, 罗勇, 黄建斌. 8 个 CMIP5 模式对中国极端气温的模拟和预估[J]. 气候变化研究进展, 2012, 8(4): 250 - 256.
- [21] 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.
- [22] 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.
- [23] 张冰, 巩远发, 徐影, 等. CMIP5 全球气候模式对中国地区干旱变化模拟能力评估[J]. 干旱气象, 2014, 32(5): 694 - 700.
- [24] 《第三次气候变化国家评估报告》编写委员会. 第三次气候变化国家评估报告[M]. 北京: 科学出版社, 2015: 13 - 245.
- [25] 伍清, 蒋兴文, 谢洁. CMIP5 模式对西南地区气温的模拟能力评估[J]. 高原气象, 2017, 36(2): 358 - 370.
- [26] 任雪娟, 张耀存, 马开玉. 数值计算方法[M]. 北京: 气象出版社, 2007.
- [27] 徐振亚, 任福民, 杨修群. 日最高温度统计降尺度方法的比较研究[J]. 气象科学, 2012, 32(4): 395 - 402.

Multimodel Superensemble Prediction of Air Temperature in Southwestern China During 2020 - 2050 Based on CMIP5 Data

WU Qing¹, JIANG Xingwen¹, XIE Jie², ZHU Hua³

(1. Institute of Plateau Meteorology, China Meteorological Administration, Heavy Rain and Drought - Flood Disasters in Plateau and Basin Key Laboratory of Sichuan Province, Chengdu 610072, China;

2. Wuzhong District Meteorological Bureau of Suzhou, Suzhou 215100, Jiangsu, China;

3. Anhui Public Meteorological Service Center, Hefei 230031, China)

Abstract: Based on the observed data of 2 m air temperature in southwestern China from 1961 - 2005 and the corresponding period data simulated by 11 global climate system models of CMIP5, the 2 m air temperature biases in different regions in southwestern China from the models simulation and that obtained by the statistical downscaling, multi - mode ensemble simulation, as well as the joint combination of the both methods were analyzed. The results show that both statistical downscaling and multi - mode ensemble simulation method could effectively reduce simulated errors, and the RMS (root - mean - square) error from the latter was relatively small. Based on the multi - mode ensemble simulated results under the RCP4.5 scenario, the annual and seasonal averaged 2 m air temperature in southwestern China showed obviously increasing trend during 2020 - 2050, which was relatively larger in winter and smaller in summer. The increasing amplitude of 2 m air temperature was higher in the west of the 102°E in southwestern China, and relatively lower in the junction of southwestern Sichuan and northwestern Yunnan.

Key words: southwestern China; CMIP5; 2 m air temperature; prediction