

周秀华, 肖子牛. 2014. 基于 CMIP5 资料的云南及周边地区未来 50 年气候预估 [J]. 气候与环境研究, 19 (5): 601–613, doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2013.13080. Zhou Xiuhua, Xiao Ziniu. 2014. Climate projection over Yunnan Province and the surrounding regions based on CMIP5 data [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 19 (5): 601–613.

基于 CMIP5 资料的云南及周边地区未来 50 年气候预估

周秀华¹ 肖子牛^{2,3}

¹ 中国气象科学研究院, 北京 100081

² 中国气象局气象干部培训学院, 北京 100081

³ 中国科学院大气物理研究所, 北京 100029

摘 要 利用 CRU (Climatic Research Unit) 高分辨率观测数据及云南省 124 站资料, 检验了参与 IPCC AR5 (政府间气候变化专门委员会第 5 次评估报告) 的 7 个全球海气耦合模式 (Coupled Model Intercomparison Program 5, CMIP5) 及模式集合平均对云南及周边地区气温和降水的模拟性能, 同时进行该区域不同温室气体排放量情景下 2006~2055 年的气候预估。结果表明: 全球海气耦合模式对该区域气温和降水气候场空间分布、气温的线性趋势和春、夏季降水的年代际振荡特征具有一定的模拟能力, 且模式集合能力优于单一模式, 气温模拟优于降水模拟, 但春、夏季的降水好于其他季节, 使得全年的总降水好于秋、冬两季。对未来情景预估表明, 研究区域未来 50 年气温呈现显著的线性上升趋势, 降水量保持年代际振荡特征并有所增加, 2020 年之前我国云南及其南部区域将经历相对的干旱时期。

关键词 全球海气耦合模式 CMIP5 云南地区 气候预估

文章编号 1006-9585 (2014) 05-0601-13

中图分类号 P467

中图分类号 A

doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2013.13080

Climate Projection over Yunnan Province and the Surrounding Regions Based on CMIP5 Data

ZHOU Xiuhua¹ and XIAO Ziniu^{2,3}

¹ Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081

² China Meteorological Administration Training Center, Beijing 100081

³ Institute of Atmosphere Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029

Abstract Based on high-resolution CRU (Climatic Research Unit) data and observations at 124 stations in Yunnan Province, the performance of seven global coupled ocean-atmosphere models (Coupled Model Intercomparison Program 5, CMIP5) from the IPCC AR5 (Intergovernmental Panel on Climate Change 5th Assessment Report) in simulating the climatology over Yunnan Province and the surrounding regions was evaluated. The projected change in climate over these regions under different greenhouse gas emissions scenarios from 2006–2055 was also studied. Results show that global coupled ocean-atmosphere models can simulate the spatial structure of temperature and precipitation climatology, the linear temperature rising trend, and the decadal oscillation characteristics of spring and summer precipitation. The

收稿日期 2013-05-08 收到, 2013-07-22 收到修定稿

项目资助 国家自然科学基金项目 41175051, 国家自然科学基金项目 U1133603

作者简介 周秀华, 女, 1987 年出生, 硕士研究生, 研究方向为气候与亚洲季风活动。E-mail: xiuxiu000945@163.com

通讯作者 肖子牛, E-mail: xiaozn@cma.gov.cn

multi-model ensemble (MME) shows better skill than the single model, and the temperature simulation results are better than the precipitation results. Spring and summer precipitation results are superior to those in other seasons, making the total annual mean precipitation simulation results better than those for autumn and winter. Future scenario projections indicate that the temperature over the study regions will show a significant linear rising trend. Precipitation will maintain its decadal oscillation characteristics, and increase over the next 50 years. A few regions, including Yunnan Province and its southern regions, will undergo a drought period before 2020.

Keywords Global ocean-atmosphere coupled models, CMIP5, Yunnan regions, Climate projection

1 引言

利用气候模式模拟气候变化是气候研究中的重要方法之一,气候模式也是的预估未来气候变化唯一的工具。许多学者对全球气候模式的模拟能力进行了检验。研究认为全球气候模式对中国区域气候具有一定的模拟能力,其中对气温的模拟效果最佳,对降水的模拟存在数值偏差以及空间分布上的虚假中心(赵宗慈, 1990; 赵宗慈等, 1995; 高学杰等, 2003, 2004)。

世界气候研究计划(WCRP)建立的耦合模式比较计划(Coupled Model Intercomparison Project, CMIP)开展了五个阶段。其中 IPCC AR4 的全球海气耦合模式(CMIP3)对陆地降水的模拟结果,比 IPCC TAR 有了较大的提高(Phillips et al., 2006)。其对中国地区地面气温年变化及空间分布的模拟结果均较好,对降水模拟效果仍不够理想,尤其是年际变化特征(徐影等, 2002; 刘敏和江志红, 2009; 郝振纯等, 2010);多数模式对中国东部季风区夏季雨带北抬的过程有一定的模拟能力(Zhou and Yu, 2006; 许崇海等, 2007; 江志红等, 2009)。

CMIP5 为 IPCC AR5 组织了系列气候模拟和预测预估试验(Taylor et al., 2012)。通过分析第五阶段的模拟数据,该阶段的模式模拟能力又将得到检验,也对未来气候做了预估(Lau et al., 2012; Chen, 2012; Liu et al., 2012)。检验工作发现,由 CO_2 增加带来的全球变暖,将加大洪水、干旱等灾害的发生几率(Lau et al., 2012)。也有研究发现模式也许低估了全球降水对温度的正向响应(Liu et al., 2012)。针对中国区域, Xu and Xu (2012a) 对其中 18 个海气耦合模式的评估工作表明,模式能较好的模拟中国 1961~2005 年的温度降水分布特征,对历史的增温趋势能很好的再现,但对降水的变率模拟能力很有限。大多数模式存在对温度的低估,却高估了降水量,中国西部的温度模拟偏差较大,降

水是在中国南部偏大。

CMIP5 采用了针对辐射强迫而设定的典型浓度路径(Representative Concentration Pathway, RCP)排放情景,主要包括 RCP2.6、RCP4.5、RCP6.0 和 RCP8.5 (Meinshausen et al., 2011)。其中, RCP4.5 (中等辐射强迫情景)是指到了 2100 年辐射强迫稳定在约 4.5 W/m^2 , RCP8.5 (高辐射强迫情景)是指到了 2100 年辐射强迫大于 8.5 W/m^2 。利用 RCP 情景模拟数据对未来进行分析, Xu and Xu (2012b) 的研究认为, 2011~2100 年增温现象将出现在整个中国,并且中国北部比南部增温更大;全国平均降水将增加,同样是北方更显著。另外, 2011~2040 年中国南方降水出现减少趋势。季风的模拟效果对于中国地区气候的预估效果非常关键。Lee and Wang (2012) 对季风区域、季风降水量、季风的建立时间的改变等方面进行了预估,其中一个重要结果是:北半球的季风会提早建立并且延后撤退时间,因而带来更大的季风性降水量。

我国云南地处低纬高原,受到南亚季风和南海季风的共同影响,以及青藏高原大地形作用,是我国气候变化研究高度重视的敏感区和脆弱区之一。该地区气候冬暖夏凉,年内温差较小;而其降水时空分布变化很大,降水空间分布不均,并有明显的干湿季之分,雨季(5~10 月)降水量约占全年的 85%以上,干季(11 月至次年 4 月)仅占 15%左右(段旭等, 2000)。前人针对全球海气耦合模式对全球、东亚地区、中国气候特征,包括东亚季风的模拟能力的评估工作相关领域已经开展了大量研究,并利用不同未来情景下模拟结果对气候变化做出了初步预估。但是,特别针对我国云南及周边地区的模式模拟效果探究较少,并且很少对各季节分别做出分析。因此,本文考察了全球海气耦合模式实验的 CMIP5 结果对我国云南及周边地区的气候特征的模拟能力,在此基础上,本文主要利用模式集合平均在 RCP4.5 和 RCP8.5 下的模拟结果,对未来气候的变化趋势做出预估。关注气候模式对云南

及周边地区气候的模拟，进而预估未来气候，尤其是降水的变化趋势对我们的防灾减灾工作提供信息。

2 资料和方法

2.1 资料

气温和降水观测数据主要采用 1956~2005 年 CRU (Climatic Research Unit) 高分辨率[0.5°(纬度)×0.5°(经度)]全球格点月平均观测数据，用于评估 CMIP5 资料对研究区域历史气候的模拟能力。在考察气象要素时间序列时，文中还用到云南省 124 站 1961~2011 年观测资料做出对比。

本文使用的 CMIP5 逐月资料来自于参与 IPCC AR5 的其中 7 个全球海气耦合模式针对相关试验的模拟结果。模式的基本信息参见表 1，各模式详情可以登录 <http://pcmdi-cmip.llnl.gov/cmip5/availability.html>[2013-05-01]了解。为了与观测资料作对比，上述模式结果均被双线性插值到与 CRU 实测数据一致的 0.5°(纬度)×0.5°(经度)分辨率的格点上。截取 Historical 试验中 1956~2005 年数据(用 Historical 表示)，用于与观测资料作对比分析；未来情景中提取 2006~2055 年共 50 年数据对未来气候做出预估，包括 RCP4.5、RCP8.5 试验，分别代表温室气体中等排放量和高排放量(Taylor and Stouffer, 2008; Taylor et al., 2012)。

表 1 本文使用的 7 个气候模式的基本信息

Table 1 The informations of the seven climate models used in current study

序号	模式名称	所属研究机构	分辨率 (纬度×经度)
1	BCC-CSM1-1	中国气象局国家气候中心	2.8°×2.8°
2	CCSM4	美国国家大气研究中心	0.94°×1.25°
3	FGOALS-g2	中国科学院大气物理研究所大气科学和地球流体力学数值模拟国家重点实验室；清华大学地球系统科学研究中心	2.8°×2.8°
4	FGOALS-s2	中国科学院大气物理研究所大气科学和地球流体力学数值模拟国家重点实验室	1.66°×2.8°
5	GFDL-CM3	美国国家海洋和大气管理局地球流体动力实验室	2.0°×2.5°
6	HadGEM2-AO	韩国气象科学研究所/韩国气象局	1.25°×1.875°
7	MPI-ESM-LR	德国马克斯普朗克气象研究所	1.87°×1.875°

2.2 方法

在本文中，选择云南及周边地区(10°N~30°N，

90°E~115°E)作为研究区域。比较模式模拟结果与观测结果时，采用常规的相关分析，最小二乘法线性趋势分析，滑动平均处理和经验正交函数(EOF)分析等方法。其中泰勒图方法能够将几个模式针对同一变量的相关信息在同一个图中集中表现出来(Taylor, 2001)。这些信息包括相关系数、相对标准差(相对观测资料)、均方根误差，具体计算公式可以见参考文献(张宏芳和陈海山, 2011)。图上一点即可以表示一个模式的信息，直观的体现其模拟结果与观测数据的相似程度，总体来说就是该点离参考点(观测数据)越近，则相似性越高。另外，文中多模式集合(MME)平均简单采用等权重算术平均。

3 CMIP5 资料的模拟性能检验

3.1 空间分布特征

3.1.1 气温模拟

从云南及周边地区温度分布CRU观测气候场与各模式模拟气候场的泰勒图(图1)中，代表各个模式的三角形相对集中，大多数模式的模拟空间相关系数达到0.9以上，并且相对标准差在1左右。可见，对于研究区域的温度空间分布特征的模拟，模式的性能很好，模式在各个季节模拟效果差异不大。从模式集合与CRU的差值场看(图2)，春季温度模拟在云南以及中南半岛中部地区偏高1~3℃，夏季在上述区域则偏低-3~-1℃，秋冬两季在数值上存在的偏低区域较多。各个季节青藏高原南麓均存在模拟偏低的现象，最低达-7℃以上偏差。

3.1.2 降水模拟

模式在各个季节模拟效果不一致，总体上秋季降水模拟相似度相对较好，大多数模式的模拟空间相关系数达到0.6以上(图1c)。除冬季外，相对标准差基本小于1，表明模式对这些季节降水空间不均匀这一特征有所削弱，即模式对研究区域降水空间分布模拟过于平滑，这与模式分辨率较粗有关。从各季节中较分散的圆圈可以看出，在同一季节，模式的模拟效果也相差较大。以夏季为例(图1b)，点6(HadGEM2-AO模式)表现最好；而各个季节降水模拟，模式集合(点8)效果相对优于单一模式。模式集合模拟偏差的空间分布在图3中给出。冬季降水模拟数值各地普遍偏大，冬季是云南的干旱季节，降水很少，模式高估了该季节的降

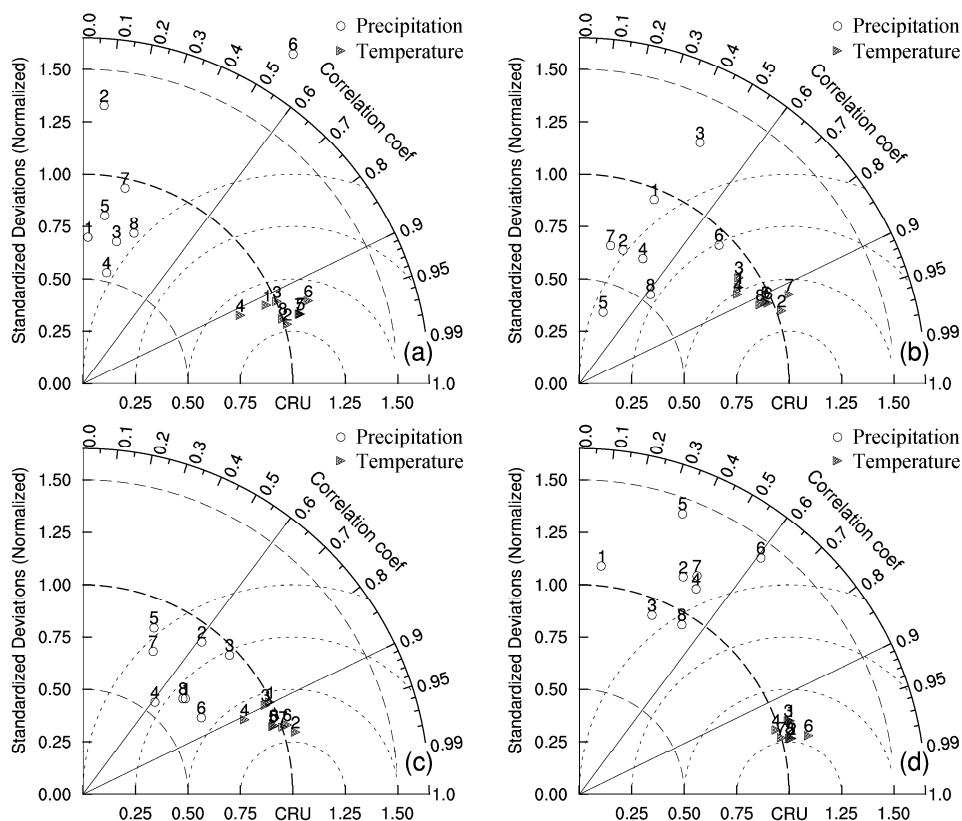


图1 1956~2005年气温(三角形)和降水(圆形)气候场与CRU气候场的泰勒图:(a)春季(MAM);(b)夏季(JJA);(c)秋季(SON);(d)冬季(DJF)。图中参考点为CRU。各个模式距离原点的半径距离代表其相对于CRU的标准差;模式在图中方位角的余弦代表模式场与CRU的相关系数;模式到参考点的距离代表其均方根误差。数字为模式序号(见表1),数字8为模式集合平均

Fig. 1 Taylor diagram of climate average temperature (triangle) and precipitation (circle) simulated by the seven models compared to CRU (Climatic Research Unit) during 1956–2005: (a) Spring (MAM); (b) summer (JJA); (c) autumn (SON); (d) winter (DJF). The reference point is the CRU data. The radial distance of model code point from the origin is proportional to the standard deviation of the modeled climatology relative to the CRU. The correlation coefficient between the model's pattern and the CRU's pattern is shown by the cosine of the azimuthal angle of model code point, and their root mean square difference is given by the distance of model code point from the reference point. The numbers denote models ordered in Table 1, and "8" denotes multi-model ensemble mean

水量。此外各个季节青藏高原东南角均存在虚假降水区,此虚假降水中心的存在是由于全球模式的分辨率不足引起的(Gao et al., 2006, 2012)。

3.2 年内变化特征

3.2.1 气温模拟

图4a中,大多数模式显示出温度模拟值比CRU观测资料值偏小,模拟的温度年内变化振幅稍偏大。对于月平均温度最高值的月份,模式FGOALS-s2和HadGEM2-AO稍有误差(两者都模拟出5月为月平均气温最高月份)。就模式集合平均而言,模拟的春季各月(3~5月)平均气温与实况基本一致,四个季节中最为吻合。各模式的模拟效果差异不大,模式集合平均能代表其的平均水平。

3.2.2 降水模拟

各模式对研究区域降水量的模拟偏差情况不一,对于冬季降水模拟均偏高;而对月平均降水大值,即夏季降水量的模拟差异最大,如BCC-CSM1-1偏高,MPI-ESM-LR偏低(图4b)。模式集合平均对研究区域平均降水量季节变化模拟性能较好,明显地优于其他单一模式,对于降水年内变化走势有很好的吻合度。因此,基于模式集合平均较好的模拟能力,下文仅利用模式集合平均数据来做分析对比与未来预测,不再考虑单一模式的情形。

3.3 变化趋势分析

3.3.1 气温模拟

本节中,我们添加了云南省内124站实测资料(1961~2011年)的时间序列做出对比。图5a CRU序列和云南省台站数据体现出云南及周边地区

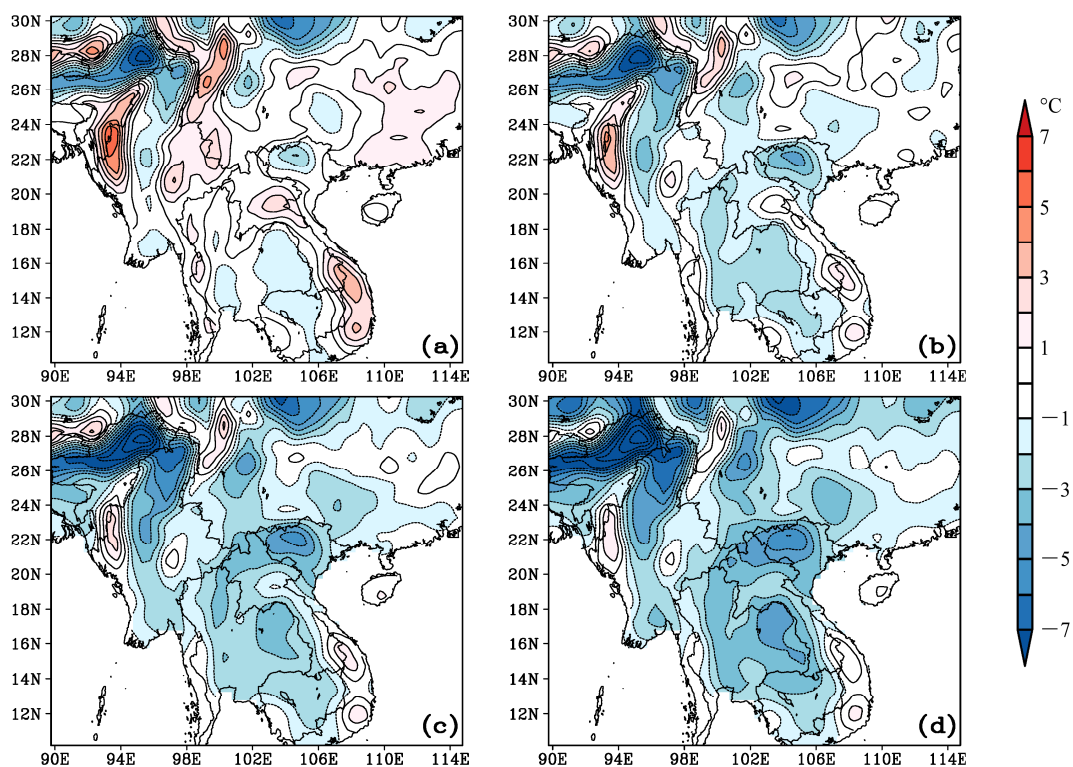


图2 1956~2005 年模式集合平均气温与 CRU 的差值场 (单位: $^{\circ}\text{C}$): (a) 春季; (b) 夏季; (c) 秋季; (b) 冬季

Fig. 2 Temperature difference ($^{\circ}\text{C}$) between MME (Multi-Model Ensemble) simulations averaged and CRU during 1986–2005: (a) MAM; (b) JJA; (c) SON; (d) DJF

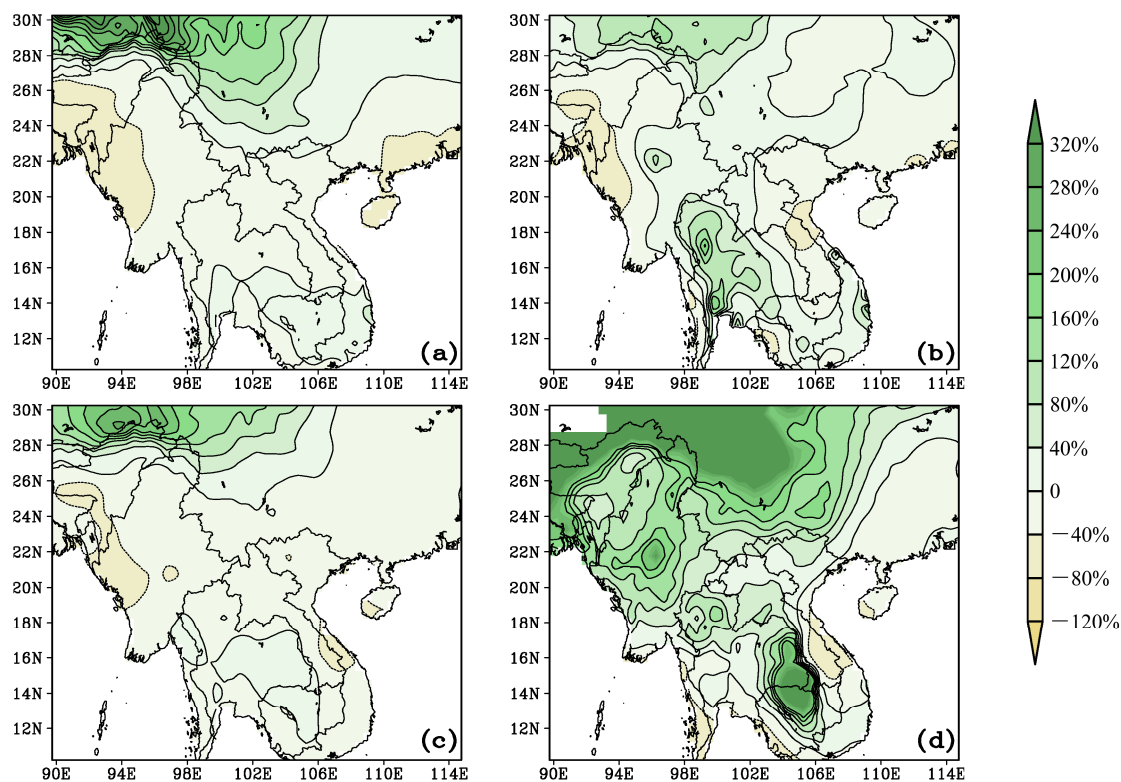


图3 1956~2005 年模式集合平均降水与 CRU 的差值场 (偏差百分率): (a) 春季; (b) 夏季; (c) 秋季; (b) 冬季

Fig. 3 Precipitation difference (deviation percentage) between MME simulations averaged and CRU during 1986–2005: (a) MAM; (b) JJA; (c) SON; (d) DJF

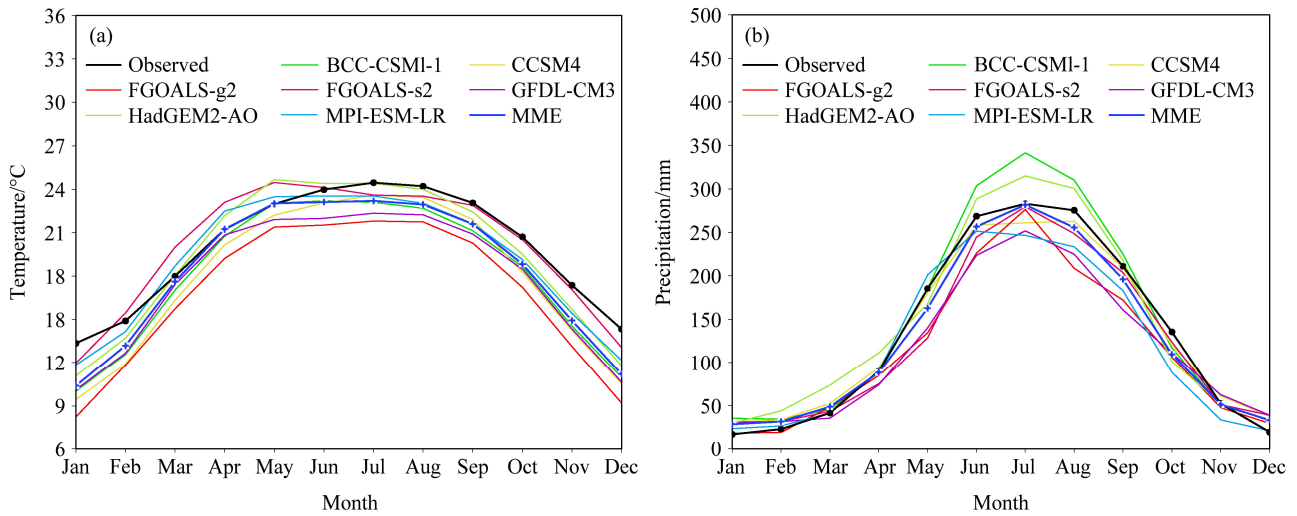


图4 1956~2005年模式模拟与观测的(a)气温和(b)降水量年内变化比较

Fig. 4 Annual cycle of simulated and observed (CRU) (a) temperature and (b) precipitation during 1956–2005

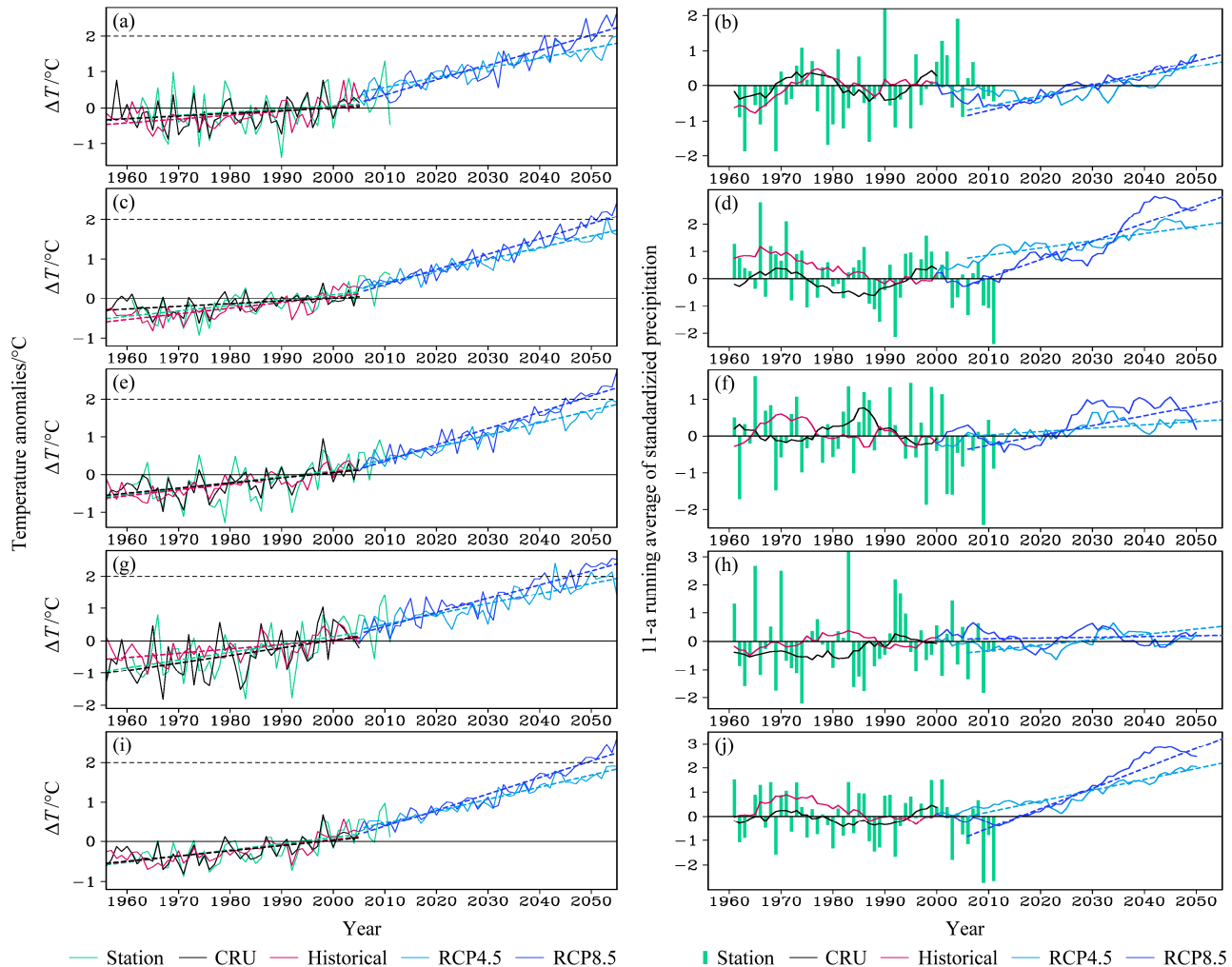


图5 气温距平(左列)和11 a滑动平均标准化降水量(右列)时间序列(相对于1986~2005年气候值): (a、b)春季; (c、d)夏季; (e、f)秋季; (g、h)冬季; (i、j)年平均。“Station”表示云南省台站资料,台站降水序列未做平滑;虚线表示相应线性趋势

Fig. 5 Time series of temperature anomalies (left panel) and 11-a running mean standardized precipitation (right panel, relative to the climatic values of 1986–2005): (a, b) MAM; (c, d) JJA; (e, f) SON; (g, h) DJF; (i, j) annual mean. “Station” stands for stations observations in Yunnan Province, the station precipitation series haven’t been smoothed; dashed lines indicate linear trend

1956~2005 年气温的年际变化特征明显,其中冬季气温振幅最大。模式集合平均(红线)对各个季节气温模拟的年际变幅偏小,这是由于对模式结果做平均处理后削弱了气温变化的方差。利用最小二乘法对序列做了线性回归,发现气温上升趋势明显,CRU 序列四季及全年的线性趋势分别为:0.73、0.68、1.36、2.32、0.51 $^{\circ}\text{C} (100 \text{ a})^{-1}$,除春季外均超过置信水平为 99% 的显著性检验,云南站点资料也体现出类似结论。模式集合平均对上述线性趋势的模拟为:1.06、1.44、1.58、1.32、1.69 $^{\circ}\text{C} (100 \text{ a})^{-1}$,全都超过置信水平为 99% 的显著性检验,对其模拟略有偏高(冬季偏低)。总体上,模式集合平均对于该区域气温变化的线性趋势有很好的把握。

3.3.2 降水模拟

1956~2005 年云南及周边地区的降水序列线性趋势不明显,主要以年际和年代际变化为主要特征(图 5b)。与气温模拟一样,模式集合平均对各

个季节降水量的年际变幅模拟偏小(图略)。将降水标准化序列做了 11 a 滑动平均计算后对比结果发现,各季节相比,春、夏季和全年的降水序列模拟效果相对较好,能定性模拟出其年代际振荡位相变化;而秋季较差,甚至模拟出相反的距平位相。模式模拟的降水滑动平均曲线与云南省内台站降水序列变化趋势相比较,同样是春季与夏季相对一致。可见,模式对降水的年代际变化特征的模拟具有一定的模拟能力,能抓住降水量较大季节的降水特征,但秋冬季节降水模拟明显不如春夏季。

3.4 时空变化特征综合分析

利用经验正交函数(EOF)方法,对变量标准化数据再做出时空变化特征主要成分的综合分析。此处我们只讨论模式集合平均情况。

3.4.1 气温模拟

分析结果表明(图 6),年平均实测气温变化的第一模态呈现出以 23 $^{\circ}\text{N}$ 为界南北温度异常反相的

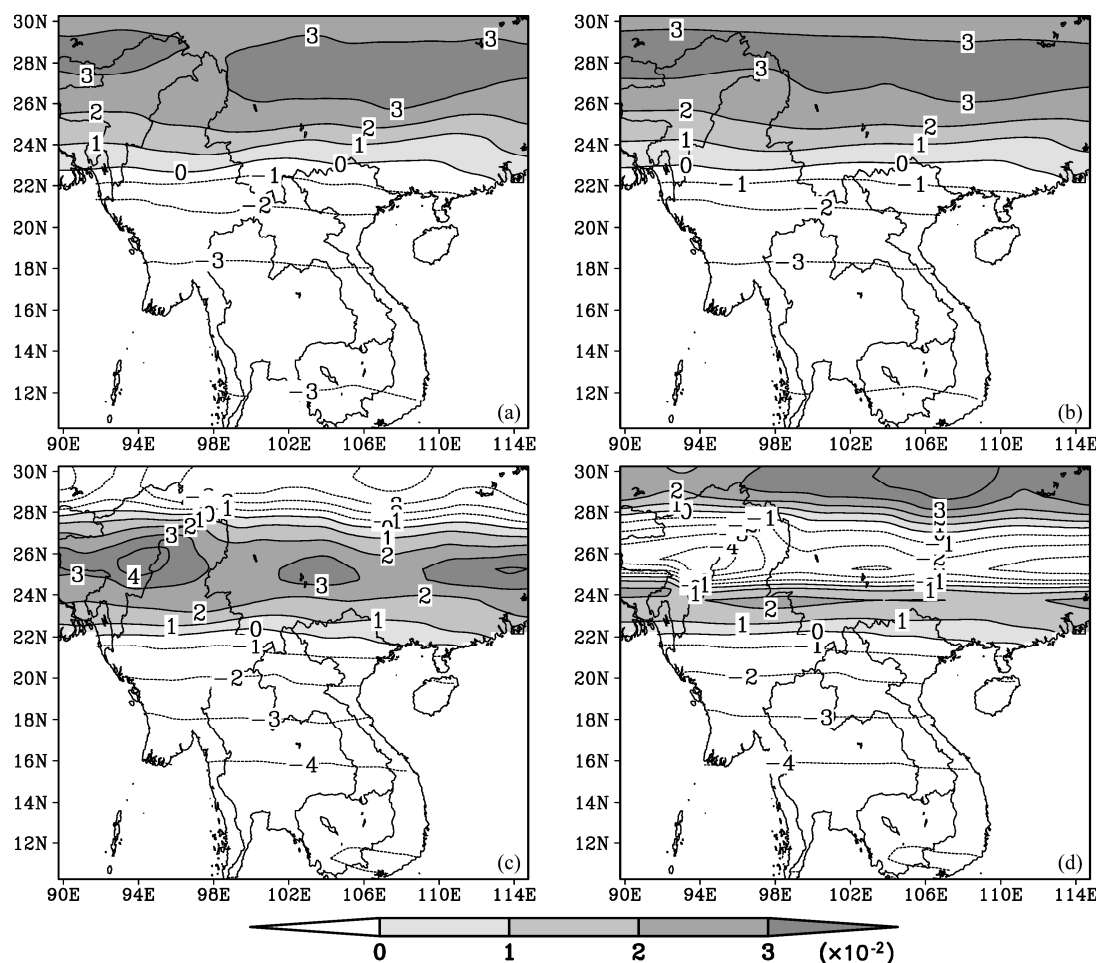


图 6 年平均气温 EOF 分析空间分布: (a) 观测第一模态; (b) 模式集合第一模态; (c) 观测第二模态; (d) 模式集合第二模态

Fig. 6 Spatial patterns of annual mean temperature: (a) The first EOF (Empirical Orthogonal Function) mode of observation; (b) the first EOF mode of MME; (c) the second EOF mode of observation; (d) the second EOF mode of MME

分布特征,占 41.8%的方差贡献率。结合第一模态的时间系数(图 7)看出,该模态以 3 年左右的周期振荡性变化。第二模态方差贡献占 28.7%,呈现的是南北方向“+ - +”的异常分布型;时间系数方面主要体现的是 2~3 年的周期变化,在 20 世纪 80 年代之后类似叠加了一个 8 年左右的周期性变化成分。

模式对上述两个主要模态都有很好的体现,前两模态所占方差贡献率大小与实测情况相当。尤其对第一模态,无论是空间分布特征还是时间系数的变化规律,相似度很高(图 6b)。模拟的第二模态空间上在 22°N 以北呈现出更多层次的正负异常带状分布,与实测数据存在少许差异。

分四季情况考察,EOF 分析的模拟相似性比全年好(图略)。第二模态不存在上述带状层次不一致的差异,甚至第三、第四模态体现的温度时空变化特征也很吻合,此处不再赘述。可见,模式能够抓住温度的很大比重的时空变化特点。

3.4.2 降水模拟

同温度模拟 EOF 分析类似,全年实测降水变化第一模态呈现出以 23°N 为界南北降水异常反相的分布特征,占 31.5%的方差贡献率(图 8a)。时间系数上看(图 9),同样呈现的是年际振荡变化特征,存在

3 年左右的周期,在 20 世纪 80 年代之前类似叠加了一个 7~8 年的周期性变化。模式对此模态的模拟也较吻合(图 8b)。而第二模态的模拟效果稍差(图略)。

另外,春、夏、冬三个季节第一模态分析与全年情况差异不大。唯独秋季,模拟出来的第一模态表现出与实测较大的差异(图 8c、6d):空间上的异常分布为南北向的“- + -”;时间系数上看,主要体现出较实测更高频次的年际变化,另外还存在以 8~9 年为周期的振荡(图 9d)。

显然,与温度相比,模式对研究区域降水的时空变化模拟能力稍弱:首先,模拟的较好的主要模态的方差贡献率不一,可以大致认为,模式能抓住温度变化的 60%,降水变化的 30%;另外,如上所述秋季降水模拟较差。当然,降水量是与温度差别很大的一个气象要素,它在时间和空间上都没有很强的连续性,因此是一个模式较难把握的要素。

4 模式集合对未来气候的情景预估

4.1 线性趋势预估

4.1.1 气温变化

利用模式集合平均对研究区域未来 50 年气温

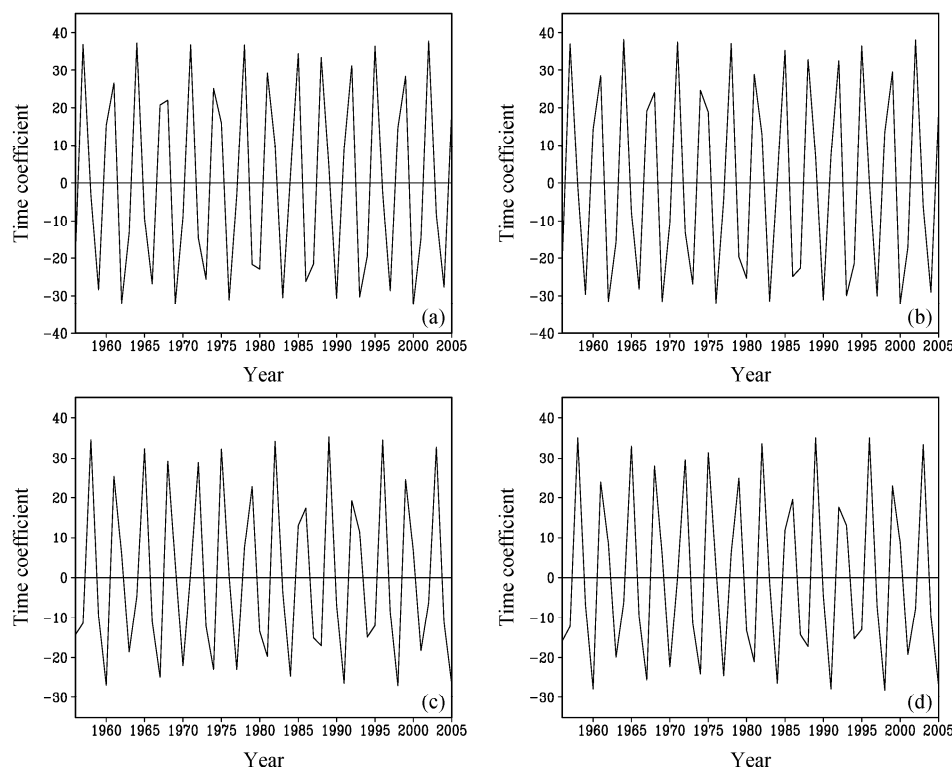


图 7 同图 6, 但为年平均气温 EOF 的时间系数

Fig. 7 Same as Fig. 6, but for time coefficient

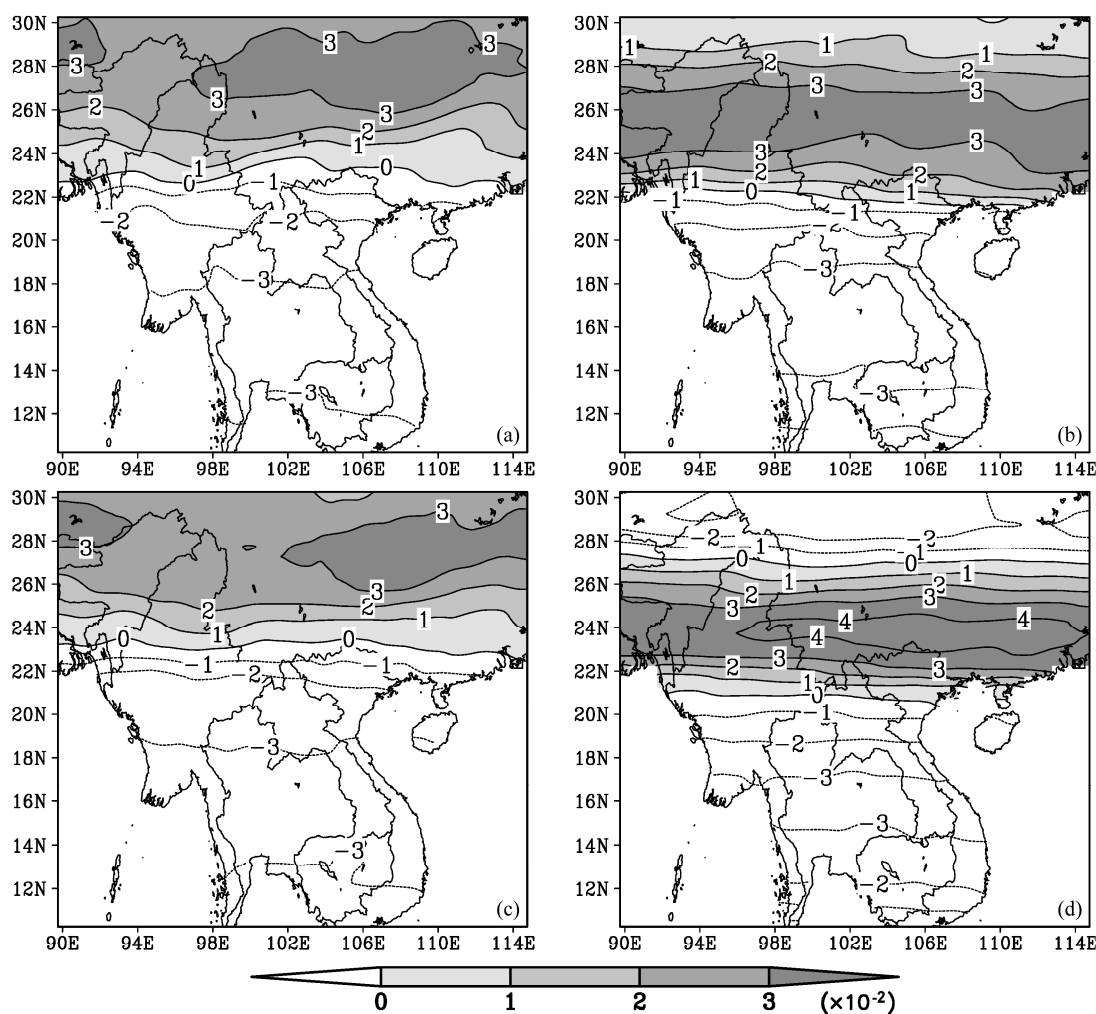


图 8 降水量 EOF 分析第一模态空间分布: (a) 年平均观测降水; (b) 年平均耦合模式降水; (c) 秋季观测降水; (d) 秋季耦合模式降水

Fig. 8 Spatial pattern of the first EOF mode of precipitation: (a) Annual mean precipitation of observation; (b) annual mean precipitation of MME; (c) autumn precipitation of observation; (d) autumn precipitation of MME

变化作出预估, 包括 RCP4.5、RCP8.5 两个情景。图 5a 中, 各个季节温度的年际变化特征显著, 线性的上升趋势特征也十分明显。RCP4.5 预估的 2006~2055 年春、夏、秋、冬及年平均气温线性趋势分别为: 2.75 、 2.95 、 3.25 、 3.20 、 3.05 $^{\circ}\text{C} (100 \text{ a})^{-1}$, 均超过置信水平为 99% 的显著性检验; RCP8.5 则预估更显著的 4 $^{\circ}\text{C} (100 \text{ a})^{-1}$ 以上增温趋势。两种情景差异主要出现在 2040 年以后, 表现为 RCP4.5 情景下增温变得相对平缓。另外, 2040 年以后也是到达增温 2 $^{\circ}\text{C}$ 的时间段, 其中是春季和冬季较先达到。全球增温 2 $^{\circ}\text{C}$ 的时间和相应气候变化受到许多国家和国际组织的关注, 是温室气体减排的参考 (姜大膀和富元海等, 2012)。

4.1.2 降水变化

图 5b 中, 滑动后的各季节未来降水序列具有明显年代际振荡特征, 振幅相比历史降水有所增大。RCP4.5 预估的 2006~2055 年春季及年平均降水线性趋势超过置信水平为 95% 的显著性检验, 分别为: 40.7 、 129.8 $\text{mm} (100 \text{ a})^{-1}$, RCP8.5 则预估春季、夏季、和年平均降水线性趋势超过置信水平为 99% 的显著性检验, 分别为: 55.1 、 142.2 、 228.4 $\text{mm} (100 \text{ a})^{-1}$ 。其中 RCP8.5 情景下夏季降水在 2030 年以后出现迅速增多, 降水量异常超出 1 个标准差以上; 全年降水总量随之变化, 特征表现相似。未来两种情景相比, RCP8.5 情景将带来更大的降水异常振幅, 2030 年后也体现出更大的降水上升趋势。

总之, 由温室气体带来的全球变暖, 将引起云南及周边地区未来 50 年的主要降水在保持年代际

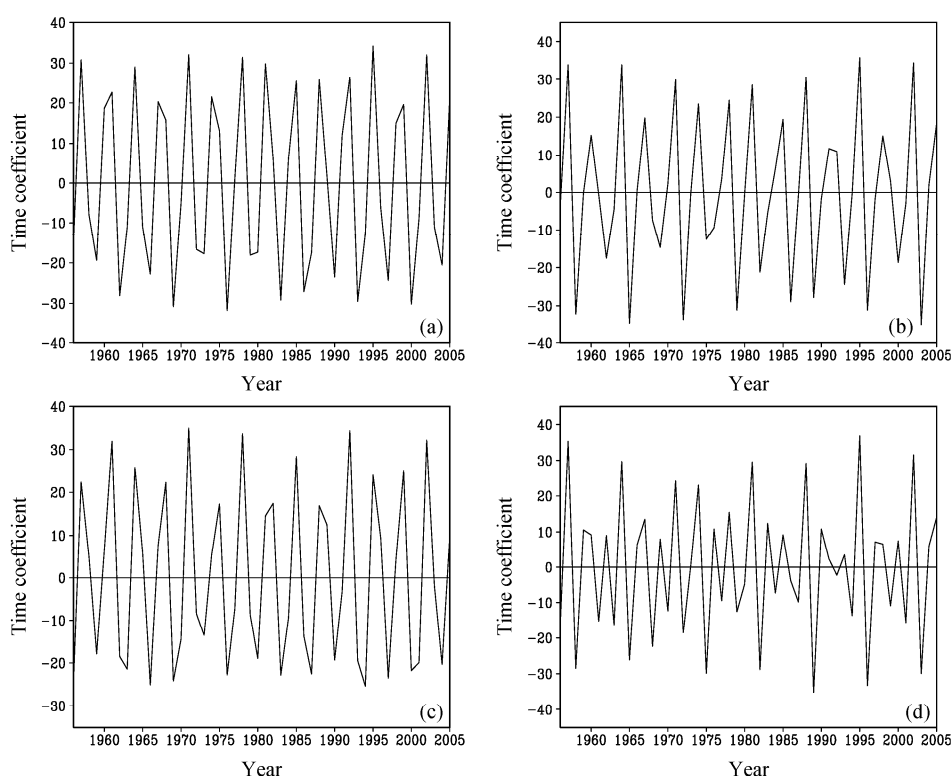


图9 同图8, 但为降水量 EOF 的时间系数

Fig. 9 Same as Fig. 8, but for time coefficient

振荡特征的同时, 出现明显增加趋势。值得注意的是, 高排放量情景(RCP8.5)下, 模式结果预估 2020 年之前可能先出现相对的干旱阶段, 在秋季春季有明显体现。云南台站实测降水也显示在 2000 年以后夏秋两季呈现降水偏少的趋势。

4.2 年内变化预估

将未来 50 年时间分三段来进一步预估气候异常的变化状况。2006~2020 年月平均增温在 0.7°C 以下, 2021~2040 年增温为 1.1°C 左右, 而且上述两个时段两种排放情景下增温幅度差异很小。2041 年以后, 增温发展到 1.5°C 以上, 尤其在 RCP8.5 情景下, 各月增温平均超过 1.9°C 。总体上看(图 10a、10c、10e), 预估未来 50 年, 云南及周边地区增温随时间逐渐加大, 相比之下冬春两季的增温幅度较大。

降水方面(图 10b、10d、10f), 2006~2020 年除了 RCP4.5 情景下 5~8 月降水增加明显外, 其他时间出现降水负异常, 可能经历相对的干旱时期。2021~2040 年夏季降水增加明显, RCP4.5 下 6 月增量最大, RCP8.5 下 8 月增量最大, 区域平均达 10 mm。2040 年以后 5~9 月降水继续增加, 增量

达到 10~20 mm。另外, 预估在 2006~2040 年之间, 春季(尤其是 4 月)均会有负异常降水出现。

4.3 空间变化预估

4.3.1 气温变化

根据模式集合平均的预估, 未来 50 年整个区域年平均增温明显。如图 11a, 各地增幅随时间加大, 2020 年之前增温不超过 0.7°C , 2021~2040 年增幅在 $0.9\sim 1.3^{\circ}\text{C}$ 。两种预估情景下的温度异常差异主要出现在 2040 年以后, 各地增温在 RCP8.5 下平均比 RCP4.5 高 $0.3\sim 0.5^{\circ}\text{C}$ 。而以上异常分布形态的差异并不大, 均呈现增温幅度由南向北递增、内陆较沿海增温大的变化特征。

4.3.2 降水变化

图 11b 所示, 2020 年之前我国云南及其东部省份、中南半岛大部分区域全年平均降水明显偏少。RCP4.5 情景降水距平百分率负值中心位于北部湾沿岸, RCP8.5 情景下, 中南半岛和我国云南达 -2% 以上的降水异常。2021~2040 年期间, 降水负异常范围减小, RCP4.5 情景出现在我国云贵地区, 而 RCP8.5 情景下, 中南半岛南部降水偏少, 缅甸附近降水增加明显。2040 年后, 大部分区域降水显著偏

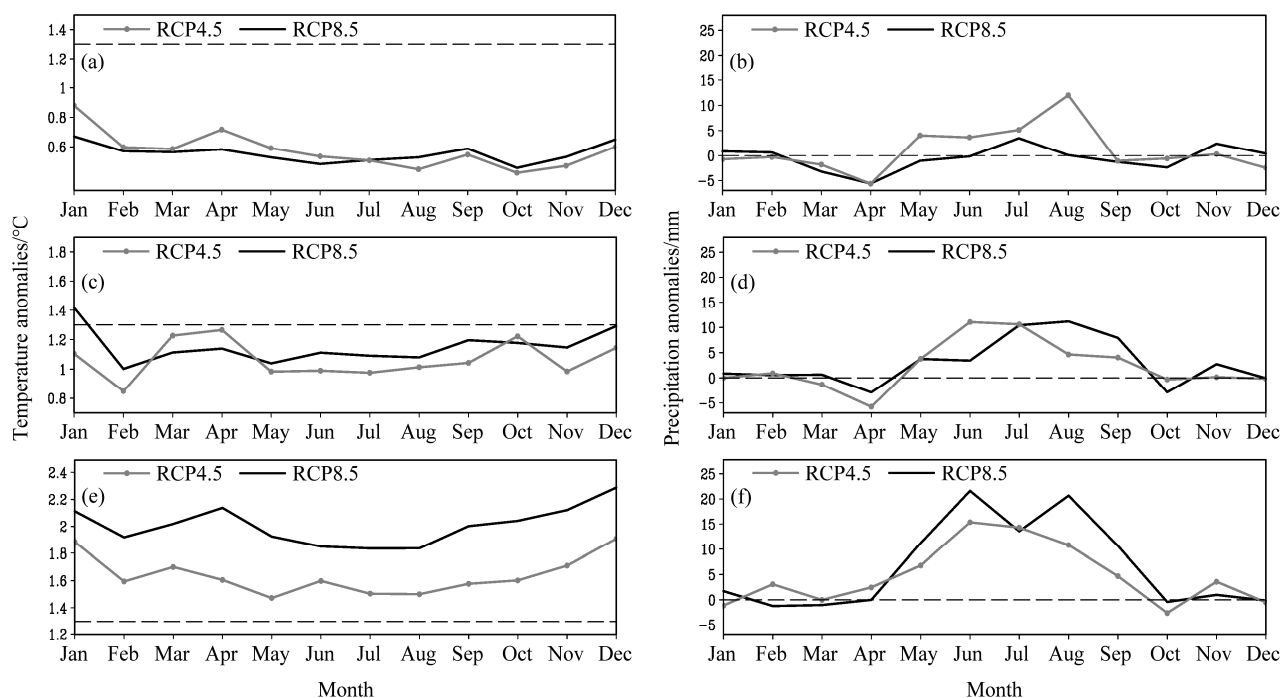


图 10 模式集合预估的不同情景下研究区域 (a、b) 2006~2020 年、(c、d) 2021~2040 年和 (e、f) 2041~2055 年月平均气温距平 (左列, 虚线为 1.3 °C 参考线) 和降水距平 (右列) (相对于 1986~2005 年气候值)

Fig. 10 Monthly mean (a) temperature anomalies and (b) precipitation anomalies projected by MME (relative to the climatic values of 1986~2005) under different scenarios during (a, b) 2006~2020, (c, d) 2021~2040, and (e, f) 2041~2055, the 1.3 °C dashed line in (a, c, e) is for reference

多, 尤其是 RCP8.5 情景下青藏高原东南边缘及其南部大片区域, 有 6% 以上的距平百分率。相比之下, RCP8.5 情景下的降水异常更突出, 旱涝灾害发生的可能性更大。

5 结论与讨论

以 CRU 高分辨率的气温降水观测数据及云南省 124 站资料为基础, 检验参与 IPCC AR5 的 7 个全球海气耦合模式的及多模式集合对云南及周边地区的气候的模拟能力。并进一步对 RCP4.5、RCP8.5 两种温室气体排放情景下该区域未来 50 年 (2006~2055 年) 的气候变化特征进行预估。本文研究得到以下主要结论:

(1) 全球海气耦合模式对云南及周边地区的历史气候特征具有一定的模拟能力。气温方面几个模式的表现差异不大, 模拟的温度气候场的空间相关系数达到 0.9 左右, 各季节模拟效果相似, 除春季外其他季节存在模拟比实况偏低的系统偏差。而对降水的模拟, 模式在各个季节模拟效果不一致, 模

式表现存在差异, 如夏季表现最好的是 HadGEM2-AO 模式, 模拟空间相关系数大于 0.6。对冬季降水量模拟偏大, 另外各个季节青藏高原东南角普遍存在虚假降水区。

(2) 综合对时间变化特征的考虑, 模式集合平均能够代表模式模拟能力的平均水平, 对降水的模拟模式集合平均甚至明显优于单一模式。模式集合平均对研究区域气温变化的线性趋势有很好模拟效果。另外通过 EOF 分析可知, 模式集合能掌握气温的第一、第二模态的主要特征, 累计方差贡献率为 60% 左右, 说明模式在一定程度上能抓住其变化的潜在机制。对降水的模拟能力有限, 模式集合仅能模拟出其第一特征模态, 但仍能定性模拟出春季夏季降水的年代际振荡位相变化。

(3) 由温室气体带来的全球变暖, 同样使得云南及周边地区未来 50 年气温呈现显著的 $3 \sim 4$ °C (100 a)⁻¹ 的线性上升趋势。各地增幅随时间加大, 2040 年后区域平均增幅 RCP4.5 下达 1.5 °C, RCP8.5 下在 2 °C 左右。各地增温程度不同, 增温幅度由南向北加大, 内陆较沿海增温大。同时引起

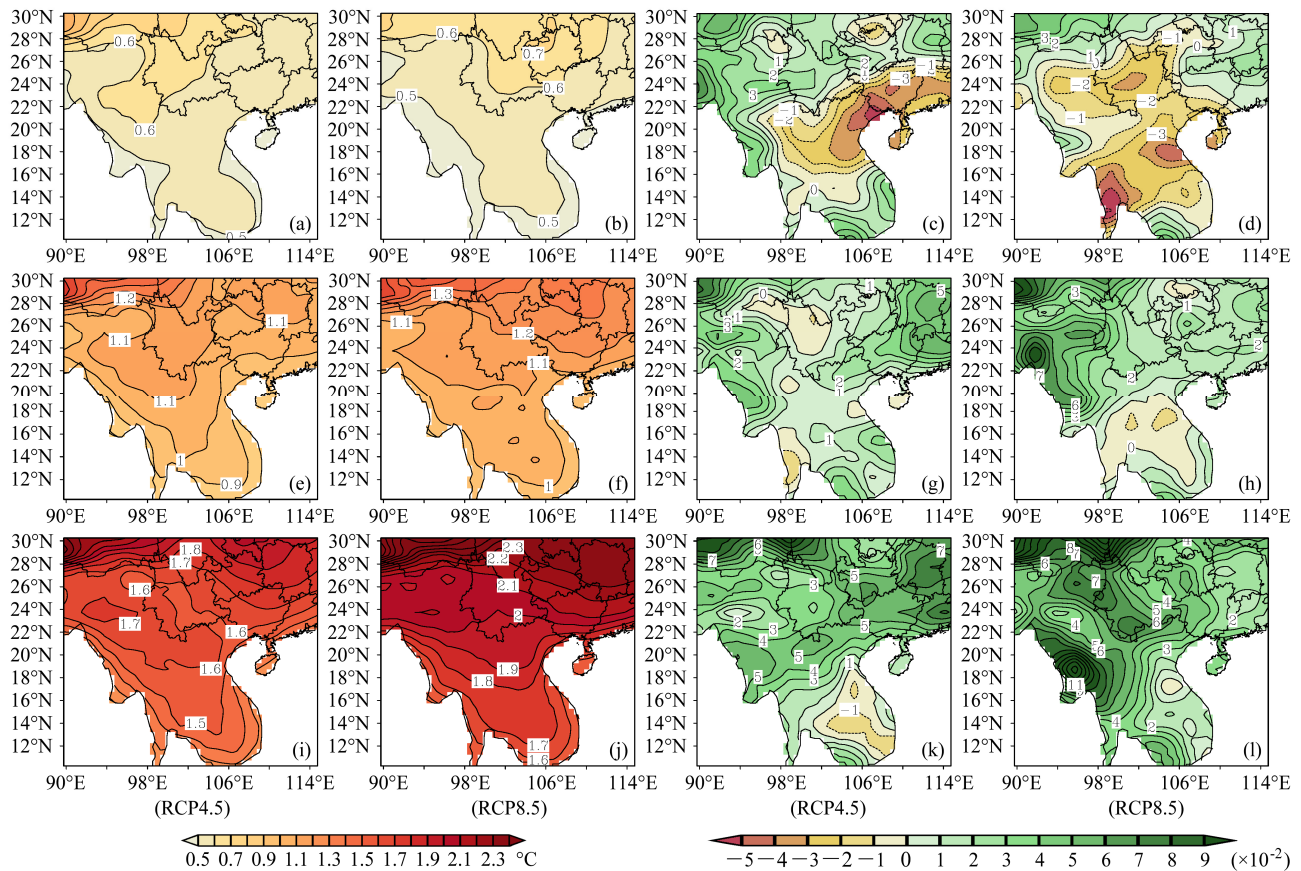


图 11 模式集合预估的 RCP4.5 (第 1 列、第 3 列)、RCP8.5 (第 2 列、第 4 列) 情景下 2006~2020 年 (上)、2021~2040 年 (中) 和 2041~2055 年 (下) 年平均气温变化 (单位: $^{\circ}\text{C}$, 左两列) 和降水距平百分率 ($\times 10^{-2}$, 右两列) 空间分布 (相对于 1986~2005 年气候值)

Fig. 11 Spatial structure of annual mean (a) temperature anomaly (left two column, units: $^{\circ}\text{C}$) and (b) precipitation anomaly percentage (right two column, units: $\times 10^{-2}$) projected by MME (relative to the climatic values of 1986–2005) under different scenarios RCP4.5 (first and third column) and RCP8.5 (second and fourth column) during 2006–2020 (top), 2021–2040 (middle), and 2041–2055 (bottom)

该区域降水量在保持年代际振荡特征的同时, 出现明显增加趋势; 全年降水线性趋势显著, 两种情景下分别为: 129.8 、 $228.4 \text{ mm} (100 \text{ a})^{-1}$ 。模式结果预估 2020 年之前冬春连旱的可能性大, 是相对的干旱时期, RCP8.5 情景下干旱区域出现在我国云南及中南半岛大部分地区。2020 年之后, 该区域各地以降水偏多为主。

本文利用 CMIP5 资料与观测数据的时空特征对比分析, 表明新一代全球海气耦合模式对云南及周边地区的气候模拟能力仍然很有限。在空间分布和时间变化方面, 各模式对降水场的模拟偏差均比气温场模拟偏差大, 对地形复杂且位于季风区域降水量的准确模拟是模式发展的难题。因此, 应用于预估工作必然存在不确定性。同时文中也分析发现模式对于该区域夏季降水的年代际变化特征能够有所把握, 却对秋季降水模拟效果很差, 可见模拟

效果因影响各季节降水的关键因素的改变而不同。要想进一步解释其中原因需要开展更全面的评估工作。对于区域尺度的气候变化模拟分析, 可以考虑利用一些降尺度方法, 包括区域气候模式的使用, 如 Gao et al. (2013) 利用 RegCM4.0 对中国区域气候的模拟, 其结果能提供空间上更详细的气候变化信息。

致谢 两位审稿人细心指出了文稿的不足之处, 并详细提供了宝贵的修改建议, 在此表示感谢。

参考文献 (References)

- Chen H P. 2012. Projected change in extreme rainfall events in China by the end of the 21st century using CMIP5 models [J]. Chinese Science Bulletin, 58(12): 1462-1472.
- 段旭, 尤卫红, 郑建萌. 2000. 云南旱涝特征 [J]. 高原气象, 19 (1):

- 84–90. Duan Xu, You Weihong, Zhen Jianmeng. 2000. The drought and flood feature in Yunnan [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 19 (1): 84–90.
- 高学杰, 周广庆, 陈嘉滨. 2003. 仅引入质量守恒律的 T63 模式对全球大气环流和中国气候的模拟 [J]. 气候与环境研究, 8 (3): 339–347. Gao Xuejie, Zhou Guangqing, Chen Jiabin. 2003. Simulation of global circulation and climate in China by T63 model with mass conservation law [J]. Climatic and Environment Research (in Chinese), 8 (3): 339–347.
- 高学杰, 林万涛, Fred K, 等. 2004. 实况海温强迫的 CCM3 模式对中国区域气候的模拟能力 [J]. 大气科学, 28 (1): 78–90. Gao Xuejie, Lin Wantao, Fred K, et al. 2004. A simulation of regional climate in China by using CCM3 and observed SST [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 28 (1): 78–90.
- Gao X J, Xu Y, Zhao Z C, et al. 2006. On the role of resolution and topography in the simulation of East Asia precipitation [J]. Theoretical and Applied Climatology, 86 (1–4): 173–185.
- Gao X J, Shi Y, Zhang D F, et al. 2012. Uncertainties of monsoon precipitation projection over China: Results from two high resolution RCM simulations [J]. Climate Research, 52: 213–226.
- Gao X J, Wang M L, Giorgi F. 2013. Climate change over China in the 21st century as simulated by BCC_CSM1.1-RegCM4.0 [J]. Atmospheric and Oceanic Science Letters, 6 (5): 381–386.
- 郝振纯, 鞠琴, 余钟波, 等. 2010. IPCC AR4 气候模式对长江流域气温和降水的模拟性能评估及未来情景预估 [J]. 第四纪研究, 30 (1): 127–137. Hao Zhenchun, Ju Qin, Yu Zhongbo, et al. 2010. Evaluation of the simulation performance and scenario analysis for temperature and precipitation by IPCC AR4 global climate models on Yangtze River basin [J]. Quaternary Sciences (in Chinese), 30 (1): 127–137.
- 姜大膀, 富元海. 2012. 2 °C 全球变暖背景下中国未来气候变化预估 [J]. 大气科学, 36 (2): 234–246. Jiang Dabang, Fu Yuanhai. 2012. Climate change over China with a 2 °C global warming [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 36 (2): 234–246.
- 江志红, 陈威霖, 宋洁, 等. 2009. 7 个 IPCC AR4 模式对中国地区极端降水指数模拟能力的评估及其未来情景预估 [J]. 大气科学, 33 (1): 109–120. Jiang Zhihong, Chen Weilin, Song Jie, et al. 2009. Projection and evaluation of the precipitation extremes indices over China based on seven IPCC AR4 coupled climate models [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 33 (1): 109–120.
- Lau K M, Wu H T, Kim K M. 2012. A robust response of precipitation to global warming from CMIP5 models. NASA, <http://ntrs.nasa.gov/search.jsp?R=20120015974>
- Lee J Y, Wang B. 2012. Future change of global monsoon in the CMIP5 [J]. Climate Dyn., doi:10.1007/s00382-012-1564-0.
- Liu C L, Allan R P, Huffman G J. 2012. Co-variation of temperature and precipitation in CMIP5 models and satellite observations [J]. Geophys. Res. Lett., 39, L13803, doi:10.1029/2012GL052093.
- 刘敏, 江志红. 2009. 13 个 IPCC AR4 模式对中国区域近 40 a 气候模拟能力的评估 [J]. 南京气象学院学报, 32 (2): 256–268. Liu Ming, Jiang Zhihong. 2009. Simulation ability evaluation of surface temperature and precipitation by thirteen IPCC AR4 coupled climate models in China during 1961–2000 [J]. Journal of Nanjing Institute of Meteorology (in Chinese), 32 (2): 256–268.
- Meinshausen M, Smith S J, Calvin K, et al. 2011. The RCP greenhouse gas concentrations and their extensions from 1765 to 2300 [J]. Climatic Change, 109 (1–2): 213–241, doi:10.1007/s10584-011-0156-z.
- Phillips T J, Gleckler P J. 2006. Evaluation of continental precipitation in 20th-century climate simulations: The utility of multi-model statistics [J]. Water Resour. Res., 42, doi:10.1029/2005WR004313.
- Taylor K E. 2001. Summarizing multiple aspects of model performance in a single diagram [J]. J. Geophys. Res., 106 (D7): 7183–7192.
- Taylor K E, Stouffer R J. 2008. A summary of experiments proposed for CMIP5 [R/OL]. http://www.clivar.org/organization/wgcm/wgcm-12/reports/Taylor_CMIP5_expts7.pdf.
- Taylor K E, Stouffer B J, Meehl G A. 2012. An overview of CMIP5 and the experiment design [J]. Bull. Amer. Meteor. Soc., 93 (4): 485–498.
- 许崇海, 沈新勇, 徐影. 2007. IPCC AR4 模式对东亚地区气候模拟能力的分析 [J]. 气候变化研究进展, 3 (5): 287–292. Xu Chonghai, Shen Xinyong, Xu Ying. 2007. An analysis of climate change in East Asia by using the IPCC AR4 simulations [J]. Advance in Climate Change Research (in Chinese), 3 (5): 287–292.
- Xu Y, Xu C H. 2012a. Preliminary assessment of simulations of climate changes over China by CMIP5 multi-models [J]. Atmospheric and Oceanic Science Letters, 5 (6): 489–494.
- Xu C H, Xu Y. 2012b. The projection of temperature and precipitation over China under RCP scenarios using a CMIP5 multi-model ensemble [J]. Atmospheric and Oceanic Science Letters, 5 (6): 527–533.
- 徐影, 丁一汇, 赵宗慈. 2002. 近 30 年人类活动对东亚地区气候变化影响的检测与评估 [J]. 应用气象学报, 13 (5): 513–525. Xu Ying, Ding Yihui, Zhao Zongci. 2002. Detection and evaluation of effect of human activities on climatic change in East Asia in recent 30 years [J]. Journal of Applied Meteorological Science (in Chinese), 13 (5): 513–525.
- 张宏芳, 陈海山. 2011. 21 个气候模式对东亚夏季环流模拟的评估 I: 气候态 [J]. 气象科学, 31 (2): 119–128. Zhang Hongfang, Chen Haishan. 2011. Evaluation of summer circulation simulation over East Asia by 21 climate models. Part I: Climatology [J]. Journal of the Meteorological Sciences (in Chinese), 31 (2): 119–128.
- 赵宗慈. 1990. 全球环流模式在中国部分模拟效果评估 [J]. 气象, 16 (9): 13–17. Zhao Zongci. 1990. Assessment on validation of general circulation models (GCMs) in China [J]. Meteorological Monthly (in Chinese), 16 (9): 13–17.
- 赵宗慈, 丁一汇, 李晓东, 等. 1995. 海气耦合模式在东亚地区的可靠性评估 [J]. 应用气象学报, 6 (增刊): 9–18. Zhao Zongci, Ding Yihui, Li Xiaodong, et al. 1995. Evaluation of CGCM climate simulation in East Asia region [J]. Journal of Applied Meteorological Science (in Chinese), 6 (S1): 9–18.
- Zhou T J, Yu R C. 2006. 20th century surface air temperature over China and the globe simulated by coupled climate models [J]. J. Climate, 19 (22): 5843–5858.