

张武龙, 张井勇, 范广州. 2015. 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, 39 (3): 559–570, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1408.14136. Zhang Wulong, Zhang Jingyong, Fan Guangzhou. 2015. Evaluation and projection of dry- and wet-season precipitation in southwestern China using CMIP5 models [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 39 (3): 559–570.

# CMIP5 模式对我国西南地区干湿季降水的模拟和预估

张武龙<sup>1,2</sup> 张井勇<sup>2</sup> 范广州<sup>3</sup>

<sup>1</sup> 四川省气象台, 成都 610072

<sup>2</sup> 中国科学院大气物理研究所季风系统研究中心, 北京 100190

<sup>3</sup> 成都信息工程学院大气科学学院, 成都 610225

**摘 要** 利用降水观测资料, 评估了参加国际耦合模式比较计划第五阶段 (CMIP5) 的 34 个全球模式对 1986~2005 年我国西南地区干湿季降水的模拟能力。结果表明, 34 个 CMIP5 模式中分别有 30 和 25 个模式模拟的干季和湿季降水偏多。34 个模式对我国西南地区干湿季降水的模拟能力差异较大, 大约半数模式的模拟值与观测值的空间相关系数通过了 99% 的信度检验, 且标准差之比小于 2。利用两个技巧评分标准, 分别挑选出了对干湿季降水模拟最优的 9 个模式。最优模式集合平均结果要优于 34 个模式的集合平均, 更要优于大多数单个模式。进一步利用最优的 9 个模式的集合平均对 RCP4.5 和 RCP8.5 两种典型浓度路径下我国西南地区干湿季降水的变化进行了预估。相对于 1986~2005 年气候平均态, 在 21 世纪初期 (2016~2035 年), 我国西南地区干季降水变化表现为川西高原降水增多, 而四川盆地及攀西地区、重庆、贵州和云南的大部分地区降水减少; 湿季降水变化表现为川西高原、贵州和广西大部分地区降水增多, 而四川盆地及攀西地区和云南降水减少。在 21 世纪中期 (2046~2065 年) 和末期 (2080~2099 年), 西南地区干湿季降水普遍增多。在 RCP8.5 情景下, 降水的变化幅度要强于 RCP4.5 情景。

**关键词** CMIP5 西南地区 干湿季降水 评估和预估

文章编号 1006-9895(2015)03-0559-12

中图分类号 P467

文献标识码 A

doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1408.14136

## Evaluation and Projection of Dry- and Wet-Season Precipitation in Southwestern China Using CMIP5 Models

ZHANG Wulong<sup>1,2</sup>, ZHANG Jingyong<sup>2</sup>, and FAN Guangzhou<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Sichuan Meteorological Observatory, Chengdu 610072

<sup>2</sup> Center for Monsoon System Research, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190

<sup>3</sup> Department of Atmospheric Sciences, Chengdu University of Information Technology, Chengdu 610225

**Abstract** In this study, we use observational datasets to evaluate the performance of 34 models participating in the Coupled Model Intercomparison Project Phase 5 (CMIP5) in simulating dry- and wet-season precipitation over southwestern China during 1986–2005. Of the 34 CMIP5 models, 30 and 25 models overestimate dry- and wet-season precipitation, respectively. The ability of 34 models to simulate dry- and wet-season precipitation is found to differ significantly. Moreover, approximately half of the models show that spatial correlation coefficients with the observations are significant at the 99% confidence level and the ratios of the simulated standard deviations to the observed values are

收稿日期 2014-03-05; 网络预出版日期 2014-08-22

资助项目 国家自然科学基金项目 41275089, 国家重点基础研究发展计划 (973 计划) 项目 2012CB955604, 中国科学院“百人计划”项目

作者简介 张武龙, 男, 1988 年出生, 硕士研究生, 主要从事区域气候变化、陆气相互作用研究。E-mail: zwl@mail.iap.ac.cn

less than 2. On the basis of the two skill scores, we select the nine best models for simulating dry- and wet-season precipitation. The 9-model ensemble mean performs better than the ensemble mean of all 34 models and most of the individual models. Therefore, we further use nine-model ensemble mean to project dry- and wet-season precipitation changes under Representative Concentration Pathways RCP4.5 and RCP8.5 scenarios over southwestern China. Compared with the climatology of 1986–2005, the dry-season mean precipitation is projected to increase in the west Sichuan plateau and decrease in the Sichuan Basin, the Panxi region, Chongqing, Guizhou, and the most of Yunnan province during 2016–2035. During the same period, the wet-season mean precipitation is projected to increase in west Sichuan plateau and most of Guizhou and Guangxi and decrease over Sichuan basin, the Panxi region, and Yunnan Province. Both dry- and wet-season precipitation is projected to increase throughout nearly the entire southwestern China region under the two scenarios in the middle and late 21st century. Under the RCP8.5 scenario, the changes in magnitude of dry- and wet-season precipitation are stronger than those under the RCP4.5 scenario.

**Keywords** CMIP5, Southwestern China, Dry- and wet-season precipitation, Evaluation and Projection

## 1 引言

气候系统模式是研究气候变化机理和预测未来气候变化最重要的工具。近几十年来,在世界各国科学家的共同努力下,气候模式有了长足的发展,并得到了广泛应用(Lambert and Boer, 2001; Flato, 2004; Behrens et al., 2012; Torres and Marengo, 2014)。国际耦合模式比较计划(CMIP)在大气模式比较计划(AMIP)的基础上发展起来,在经历了CMIP1、CMIP2和CMIP3几个阶段之后(Meehl et al., 1997, 2000, 2005, 2007; 王澄海等, 2009; Xin et al., 2013a),于2008年9月,启动了第五阶段计划——CMIP5(Taylor et al., 2012)。CMIP5旨在解决IPCC第四次评估过程中出现的一些突出科学问题(IPCC, 2007, 2013),相对于CMIP3,该计划试验设计增加了年代际近期预测试验、包含碳循环的气候试验和诊断气候反馈的敏感性试验。这不仅增强了对气候系统变化的机理性认识,更提高了气候模式的预估能力(Guo et al., 2013; Jiang and Tian, 2013; Joetzer et al., 2013; Yao et al., 2013; Zhang et al., 2013)。因此,有必要利用CMIP5提供的最新气候系统模拟试验数据,研究在全球变暖背景下的气候变化(Diffenbaugh and Giorgi, 2012; Hu et al., 2013; Kharin et al., 2013; Xin et al., 2013b)。

关于CMIP3和CMIP5模式对东亚、中国气候变化的模拟,研究者已开展了许多的评估工作。徐崇海等(2007)评估了22个IPCC AR4模式对东亚地区当前气候的模拟能力,发现虽然所有模式对东亚地区的气候都有一定的模拟能力,但各模式模拟效果差异较大;并且多数模式的温度模拟值偏低,降水模拟值偏高。江志红等(2008, 2009)分析了IPCC AR4模式数据,预估21世纪中国气候将显著

变暖、变湿;极端降水强度可能增强,干旱也将加重,且变化幅度与排放强度成正比。张宏芳和陈海山(2011a, 2011b)的评估结果发现IPCC AR4全球气候模式对东亚夏季环流气候态模拟较好,但对东亚夏季环流年际变率的模拟较差。Qu et al. (2013)评估了16个CMIP5模式对东亚夏季降水的模拟能力,并预估全球增暖背景下,东亚夏季降水将持续增加。Jiang and Tian (2013)在CMIP3和CMIP5分别选取了23和19个气候模式的试验结果预估了21世纪东亚季风的变化,结果表明21世纪东亚冬季风强度整体上变化不大,夏季风略有加强。朱献和董文杰(2013)评估了23个CMIP5模式对北半球3~4月积雪面积的模拟能力,并通过多模式集合预估未来几十年北半球3~4月积雪将继续减少。Xu and Xu (2012)评估了18个CMIP5模式对1961~2005年中国气温和降水的模拟能力,指出模式普遍能够模拟出气温和降水的主要空间分布特征,但是气温模拟值偏低而降水模拟值偏多。李振朝等(2013)检验了8个CMIP5模式气温和降水资料在北半球及青藏高原的模拟效果,发现各模式对北半球气温和降水模拟较好,对青藏高原模拟较差。Chen (2013)利用16个CMIP5模式预估了21世纪末中国极端降水事件的变化,并指出中国年降水量将显著增加,降水有趋于极端化发展趋势。Wang and Chen (2013)利用35个CMIP5模式集合预估了中国气温、降水和气象干旱在21世纪的变化,他们发现我国冬季增温较强,夏季增温较弱;我国大范围降水增加,气象干旱和极端降水事件发生概率也在增大。这些针对东亚和中国的气候变化研究提高了我们对气候变化的认识,并将有助于中国更好地应对未来气候变化。但是,需要指出的是,针对像我国西南等地区的更细致的评估和预估尚

不多见。

我国西南地区位于东北—西南走向的气候生态过渡带的南端;世界上海拔最高、地形最复杂的青藏高原、云贵高原、横断山区和四川盆地等构成了该地区大陆地貌的主要特征。我国西南地区是气候变化的敏感区和脆弱区之一。研究表明近 40 年来西南地区的青藏高原、川西高原、云贵高原气温上升趋势显著,四川盆地、重庆则存在明显的下降趋势(马振峰等, 2006);西部高原地区降水呈增加趋势,而东部除重庆地区外,大部分地区降水减少(刘晓冉等, 2007)。近几十年,西南地区极端气候事件频发(胡豪然, 2008;陈海山等, 2009),对人民群众的生产生活和经济社会发展产生了严重影响。对我国西南地区气候变化进行更细致的评估和预估将有助于更好地应对该地区未来的气候变化。张武龙等(2014)的研究表明西南地区受其地形,地理位置以及季风的影响,降水的季节性差异很大,干湿季分明(如图 1 所示);湿季(5~9 月)降水量约占全年的 75.7%,干季(10 月至次年 4 月)降水量仅占全年的 24.3%左右。本文评估了 34 个 CMIP5 模式对我国西南地区(包括四川省、重庆市、贵州省、云南省和广西壮族自治区)干湿季降水的模拟能力,并预估了 RCP4.5 和 RCP8.5 两种典型浓度路径下未来该地区干湿季降水的变化。

2 数据和方法

2.1 数据来源

本文所采用的降水观测资料是国家气候中心根据 2416 个中国地面气象台站的逐日观测记录,通过插值程序建立起来的一套 1961~2010 年中国区域水平分辨率为 0.5°×0.5°的格点数据集——CN05.2(吴佳和高学杰, 2013)。

本文分析的 34 个 CMIP5 模式概况见表 1(模式更详细的信息请参见 [http://cmip-pcmdi.llnl.gov/cmip5/\[2013-05-15\]](http://cmip-pcmdi.llnl.gov/cmip5/[2013-05-15])),使用的模拟数据是 CMIP5 必做试验中的历史长期模拟试验数据,该试验的详细介绍请参考文献 Taylor et al. (2012)。在模式评估中,使用 1986~2005 年逐月平均降水观测和模拟数据。由于各模式输出的数据分辨率差异较大,为了便于模式间的相互比较,以及与观测值进行对比分析,将所有的数据统一双线性插值到 0.5°×0.5°的格点上。对于预估试验数据,选用 RCP4.5 和 RCP8.5 两种情景下模式输出的 2006~2100 年逐月

平均降水数据,并将所有数据统一双线性插值到 0.5°×0.5°的格点上。

表 1 34 个 CMIP5 气候模式概况

Table 1 Information of 34 CMIP5 climate models

| 序号 | 模式名            | 所属国家 | 大气模式分辨率 |
|----|----------------|------|---------|
| 1  | ACCESS1-0      | 澳大利亚 | 192×145 |
| 2  | ACCESS1-3      | 澳大利亚 | 192×145 |
| 3  | BCC-CSM1.1     | 中国   | 128×64  |
| 4  | BCC-CSM1.1(m)  | 中国   | 320×160 |
| 5  | BNU-ESM        | 中国   | 128×64  |
| 6  | CanESM2        | 加拿大  | 128×64  |
| 7  | CCSM4          | 美国   | 288×192 |
| 8  | CESM1-BGC      | 美国   | 288×192 |
| 9  | CESM1-CAM5     | 美国   | 288×192 |
| 10 | CMCC-CM        | 意大利  | 480×240 |
| 11 | CMCC-CMS       | 意大利  | 192×96  |
| 12 | CNRM-CM5       | 法国   | 256×128 |
| 13 | CSIRO-Mk3-6-0  | 澳大利亚 | 192×96  |
| 14 | FGOALS-s2      | 中国   | 128×108 |
| 15 | GFDL-CM3       | 美国   | 144×90  |
| 16 | GFDL-ESM2G     | 美国   | 144×90  |
| 17 | GFDL-ESM2M     | 美国   | 144×90  |
| 18 | GISS-E2-H      | 美国   | 144×90  |
| 19 | GISS-E2-R      | 美国   | 144×90  |
| 20 | HadCM3         | 英国   | 96×73   |
| 21 | HadGEM2-CC     | 英国   | 192×145 |
| 22 | HadGEM2-ES     | 英国   | 192×145 |
| 23 | INM-CM4        | 俄罗斯  | 180×120 |
| 24 | IPSL-CM5A-LR   | 法国   | 96×96   |
| 25 | IPSL-CM5A-MR   | 法国   | 144×143 |
| 26 | IPSL-CM5B-LR   | 法国   | 96×96   |
| 27 | MIROC5         | 日本   | 256×128 |
| 28 | MIROC-ESM      | 日本   | 128×64  |
| 29 | MIROC-ESM-CHEM | 日本   | 128×64  |
| 30 | MPI-ESM-LR     | 德国   | 192×96  |
| 31 | MPI-ESM-MR     | 德国   | 192×96  |
| 32 | MRI-CGCM3      | 日本   | 320×160 |
| 33 | NorESM1-M      | 挪威   | 144×96  |
| 34 | NorESM1-ME     | 挪威   | 144×96  |

2.2 方法介绍

本文首先利用偏差考察各模式对我国西南地区干湿季平均降水的模拟能力,然后采用泰勒图方法(Taylor, 2001)评估各模式对干湿季降水气候态的模拟能力。泰勒图能将模拟与观测的空间相关系数和标准差之比以及模拟相对于观测场的均方根误差 3 个统计量显示在一张图中,直观地给出模式的评估结果以及模式间的差异,较为全面地反映多个模式的模拟能力。模拟和观测之间的空间相关系数可以表示模式对主要中心位置的描述能力,标准差之比可表示模式对中心振幅的模拟能力,均方

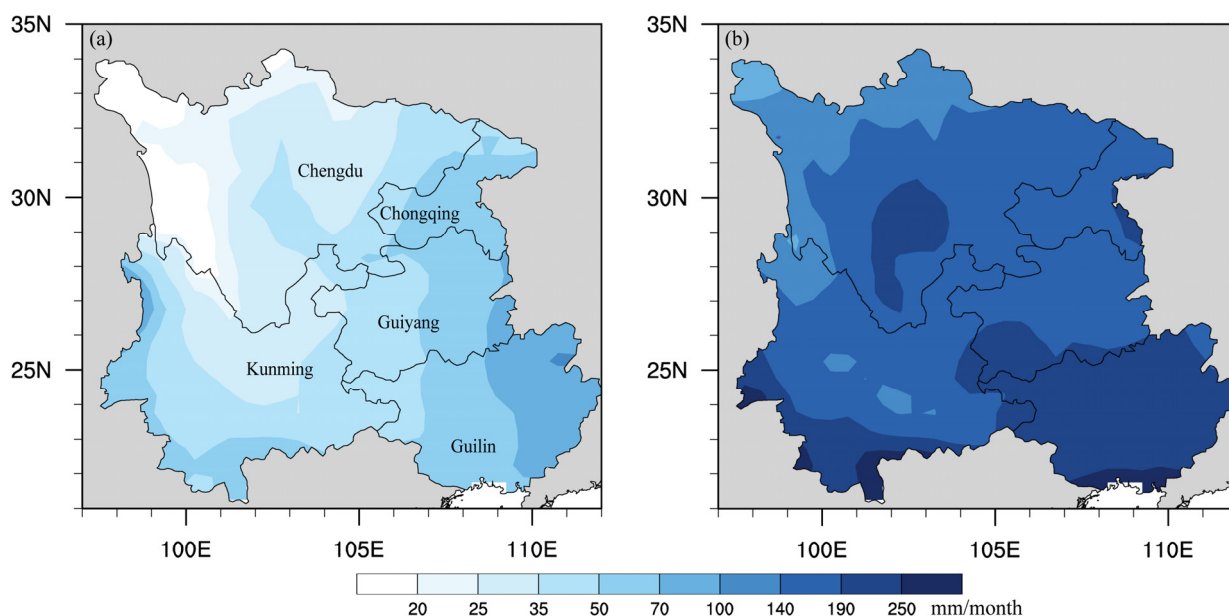


图1 1986~2005年我国西南地区(a)干季和(b)湿季的月平均降水量(单位: mm/month)

Fig. 1 The monthly averages of (a) dry- and (b) wet-season precipitation over southwestern China for the period of 1986–2005 (units: mm/month)

根误差则表示模拟型态与观测的相似性(均方根误差越接近0表示模拟能力越高)。

其次,为了定量描述模式的模拟能力,根据Taylor (2001)的研究,选取两个技巧评分 $S_1$ 和 $S_2$ 来定量评估每个模式对西南地区干湿季降水的模拟能力,技巧评分值越大说明该模式的模拟能力越好,即:

$$S_1 = \frac{4(1+R)}{(\hat{\sigma}_f + 1/\hat{\sigma}_f)^2(1+R_0)}, \quad (1)$$

$$S_2 = \frac{4(1+R)^4}{(\hat{\sigma}_f + 1/\hat{\sigma}_f)^2(1+R_0)^4}, \quad (2)$$

其中, $R$ 为模拟值和观测值之间的相关系数, $R_0$ 为可得到的最大相关系数, $\hat{\sigma}_f$ 为模拟值与观测值的标准差之比。当模拟值的方差接近观测值的方差时,模拟值和观测值的空间相关系数越接近 $R_0$ ,而技巧评分愈接近单位1。当方差比值接近0或无限大或相关系数接近-1时,技巧评分接近0。技巧评分 $S_1$ 重点考虑了方差的性能,而技巧评分 $S_2$ 更侧重于考虑模拟值和观测值之间的空间相关系数。

在模式评估阶段,我们评估了所有34个模式等权重集合平均(MME)的模拟性能(Jiang et al., 2005; 徐崇海等, 2007)以及单个模式的模拟能力。此外,在技巧评分 $S_1$ 和 $S_2$ 中都排名前10位模式的

等权重集合平均(MME-S)也参与模式评估,为多模式集合预估未来的气候变化奠定基础。

### 3 模式评估

图2给出了1986~2005年模式模拟的我国西南地区干湿季平均降水偏差。如图2所示,34个模式中有30个模式模拟的干季降水偏多,25个模式模拟的湿季降水偏多。对于干季降水,大部分模式的模拟偏差在-20%~60%之间,还有四个模式的模拟偏差超过了60%;对于湿季降水,大部分模式的模拟偏差在-20%~40%之间。下面利用泰勒图分析1986~2005年34个模式对干湿季降水的模拟性能。

图3给出了1986~2005年我国西南地区干湿季降水泰勒图分析的结果,表2给出了模拟值与观测值的标准差之比 $\hat{\sigma}_f$ 、空间相关系数 $R$ 及技巧评分( $S_1$ ,  $S_2$ )。结合图3a和表2,我们可以发现所有34个模式中有18个模式能模拟出西南地区干季降水的主要空间分布特征,其模拟与观测场的空间相关系数均通过了99%的信度水平检验,最高为ACCESS1-0的0.71;其中有16个模式的模拟与观测场标准差之比小于2。另一方面,所有34个模式有17个模式能模拟出西南地区湿季降水的主要空间分布特征(图3b),其模拟与观测场的空间相关

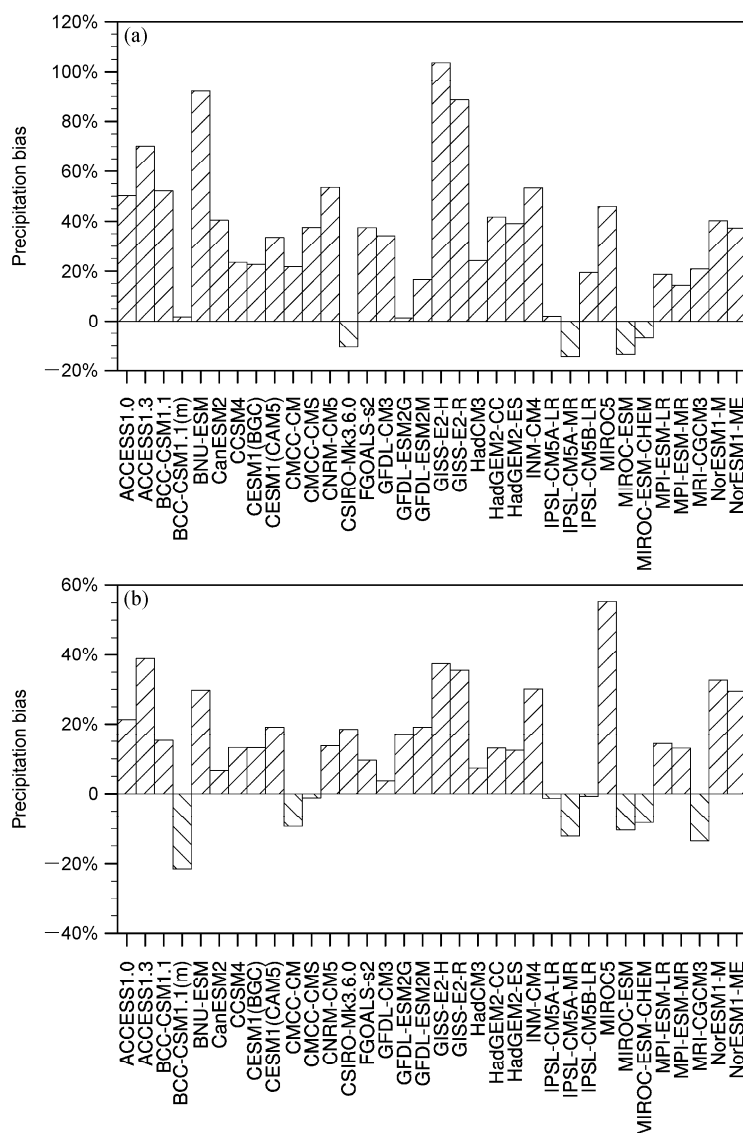


图2 相对于观测值, CMIP5 模式模拟的 1986~2005 年我国西南地区 (a) 干季和 (b) 湿季平均降水偏差

Fig. 2 With reference to observation, the averaged (a) dry- and (b) wet-season precipitation biases over southwestern China for the period of 1986–2005 as derived from CMIP5 models

系数均通过了 99% 的信度水平检验, 最高为 HadGEM2-ES 的 0.69; 其中有 15 个模式的模拟与观测场标准差之比小于 2。综合上述评估结果, 我们发现 34 个 CMIP5 模式对我国西南地区干湿季降水的模拟能力差异比较大, 有部分模式模拟的空间相关系数甚至出现了负值, 这意味着挑选一些对西南地区干湿季降水模拟能力相对较优的模式看来是必要的。

我们分别计算了所有 34 个模式模拟干湿季降水的技巧评分  $S_1$  和  $S_2$  (见表 2), 在技巧评分  $S_1$  和  $S_2$  中排名前 10 的模式用星号标注。结果表明对干季

降水模拟最优的模式包括: ACCESS1-0, ACCESS1-3, CanESM2, CMCC-CM, HadCM3, HadGEM2-CC, HadGEM2-ES, MIROC5, MRI-CGCM3, 选为干季降水的 MME-S 成员; 对湿季降水模拟最优的模式包括: ACCESS1-0, ACCESS1-3, HadCM3, HadGEM2-CC, HadGEM2-ES, inmcm4, IPSL-CM5A-LR, IPSL-CM5A-MR, MRI-CGCM3, 选为湿季降水的 MME-S 成员。

图 4 给出了 1986~2005 年我国西南地区干湿季降水的多模式集合平均相对于观测值差异的空间分布, 从图中可以看到多模式集合平均对西南大

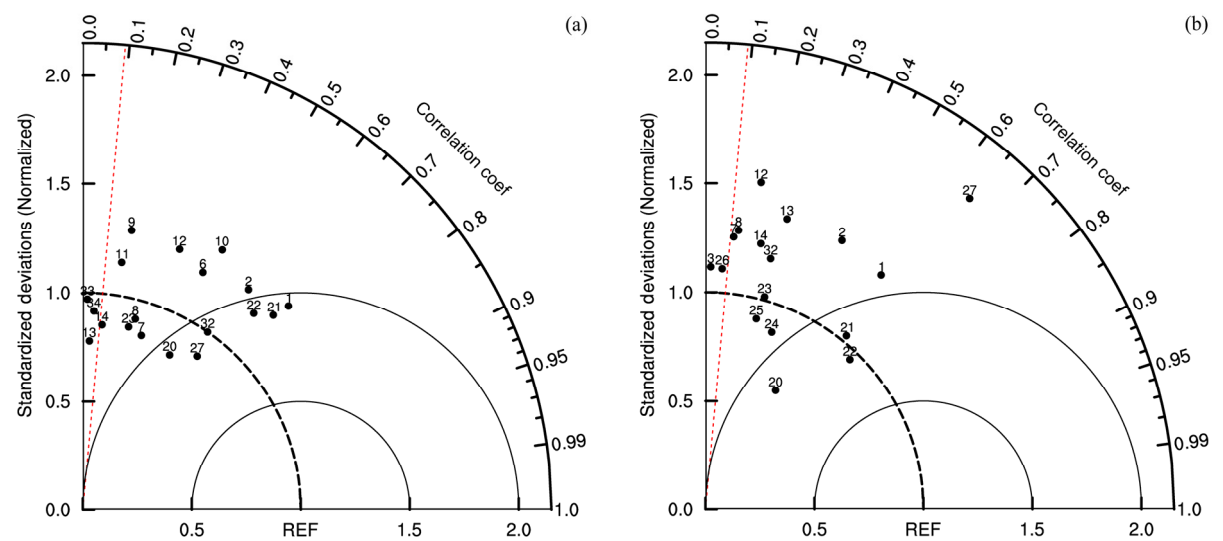


图3 在参照时段1986~2005年,CMIP5模式模拟我国西南地区(a)干季和(b)湿季降水相对于观测场的泰勒图。红虚线代表空间相关系数99%信度水平;REF:观测;方位角:空间相关系数;半径:标准差之比;到REF的距离:均方根误差

Fig. 3 Taylor program for (a) dry- and (b) wet-season precipitation over southwestern China between CMIP5 models and observations for the period of 1986–2005. Red dotted line corresponds to the 99% confidence level; REF: observation; azimuthal position: spatial correlation coefficient; radial distance: ratio of standard deviation; distance from REF point: root mean square error

表2 34个CMIP5模式模拟和观测的干湿季降水标准差之比 $\hat{\sigma}_f$ 、空间相关系数 $R$ 、技巧评分( $S_1, S_2$ )

Table 2 The ratios of standard deviation  $\hat{\sigma}_f$ , the spatial correlation coefficient  $R$ , and the skill scores ( $S_1$  and  $S_2$ ) of dry- and wet-season precipitation between 34 CMIP5 climate models and observations

| 模式<br>序号 | 干季               |        |        |        | 湿季               |        |        |        |
|----------|------------------|--------|--------|--------|------------------|--------|--------|--------|
|          | $\hat{\sigma}_f$ | $R$    | $S_1$  | $S_2$  | $\hat{\sigma}_f$ | $R$    | $S_1$  | $S_2$  |
| 1        | 1.331            | 0.709  | 0.788* | 0.492* | 1.347            | 0.598  | 0.732* | 0.374* |
| 2        | 1.268            | 0.600  | 0.756* | 0.387* | 1.387            | 0.452  | 0.653* | 0.250* |
| 3        | 0.691            | −0.204 | 0.348  | 0.022  | 1.117            | 0.022  | 0.505  | 0.067  |
| 4        | 0.873            | −0.273 | 0.357  | 0.017  | 0.880            | −0.042 | 0.471  | 0.052  |
| 5        | 1.501            | −0.410 | 0.251  | 0.006  | 1.077            | −0.539 | 0.229  | 0.003  |
| 6        | 1.224            | 0.450  | 0.696* | 0.265* | 1.014            | −0.188 | 0.406  | 0.027  |
| 7        | 0.847            | 0.317  | 0.641* | 0.183  | 1.261            | 0.103  | 0.523  | 0.088  |
| 8        | 0.912            | 0.264  | 0.627  | 0.158  | 1.293            | 0.117  | 0.523  | 0.091  |
| 9        | 1.305            | 0.172  | 0.546  | 0.110  | 1.604            | −0.061 | 0.378  | 0.039  |
| 10       | 1.357            | 0.472  | 0.671* | 0.267* | 1.365            | −0.072 | 0.422  | 0.042  |
| 11       | 1.153            | 0.155  | 0.566  | 0.109  | 1.042            | −0.212 | 0.393  | 0.024  |
| 12       | 1.279            | 0.347  | 0.635  | 0.194* | 1.525            | 0.167  | 0.491  | 0.098  |
| 13       | 0.779            | 0.039  | 0.488  | 0.068  | 1.388            | 0.270  | 0.571  | 0.146  |
| 14       | 0.857            | 0.103  | 0.539  | 0.090  | 1.249            | 0.203  | 0.573* | 0.125  |
| 15       | 1.183            | −0.131 | 0.422  | 0.035  | 1.014            | −0.147 | 0.426  | 0.033  |
| 16       | 1.107            | −0.381 | 0.306  | 0.009  | 0.836            | −0.015 | 0.477  | 0.057  |
| 17       | 1.160            | −0.351 | 0.318  | 0.011  | 0.804            | −0.178 | 0.392  | 0.027  |
| 18       | 2.955            | 0.360  | 0.251  | 0.079  | 3.781            | 0.147  | 0.140  | 0.026  |
| 19       | 3.140            | 0.339  | 0.224  | 0.067  | 4.141            | 0.159  | 0.121  | 0.023  |
| 20       | 0.818            | 0.487  | 0.714* | 0.293* | 0.637            | 0.505  | 0.618* | 0.263* |
| 21       | 1.252            | 0.698  | 0.807* | 0.494* | 1.029            | 0.628  | 0.813* | 0.439* |
| 22       | 1.198            | 0.655  | 0.801* | 0.453* | 0.958            | 0.692  | 0.844* | 0.511* |
| 23       | 0.869            | 0.241  | 0.609  | 0.146  | 1.016            | 0.267  | 0.633* | 0.161* |
| 24       | 0.846            | −0.297 | 0.342  | 0.015  | 0.872            | 0.349  | 0.662* | 0.203* |
| 25       | 0.675            | −0.054 | 0.407  | 0.043  | 0.909            | 0.256  | 0.622* | 0.154* |
| 26       | 0.951            | −0.218 | 0.390  | 0.023  | 1.111            | 0.069  | 0.529  | 0.081  |
| 27       | 0.882            | 0.595  | 0.785* | 0.398* | 1.875            | 0.646  | 0.568  | 0.317* |
| 28       | 0.489            | −0.265 | 0.229  | 0.011  | 0.554            | −0.533 | 0.168  | 0.002  |
| 29       | 0.473            | −0.285 | 0.214  | 0.010  | 0.563            | −0.471 | 0.193  | 0.004  |
| 30       | 1.161            | −0.076 | 0.452  | 0.045  | 1.141            | −0.044 | 0.470  | 0.051  |
| 31       | 1.146            | −0.106 | 0.439  | 0.039  | 1.246            | −0.083 | 0.437  | 0.042  |
| 32       | 1.000            | 0.573  | 0.786* | 0.382* | 1.192            | 0.251  | 0.606* | 0.148* |
| 33       | 0.971            | 0.022  | 0.510  | 0.068  | 1.318            | −0.285 | 0.331  | 0.015  |
| 34       | 0.918            | 0.056  | 0.524  | 0.077  | 1.284            | −0.240 | 0.357  | 0.020  |

\*为技巧评分排名前十的模式



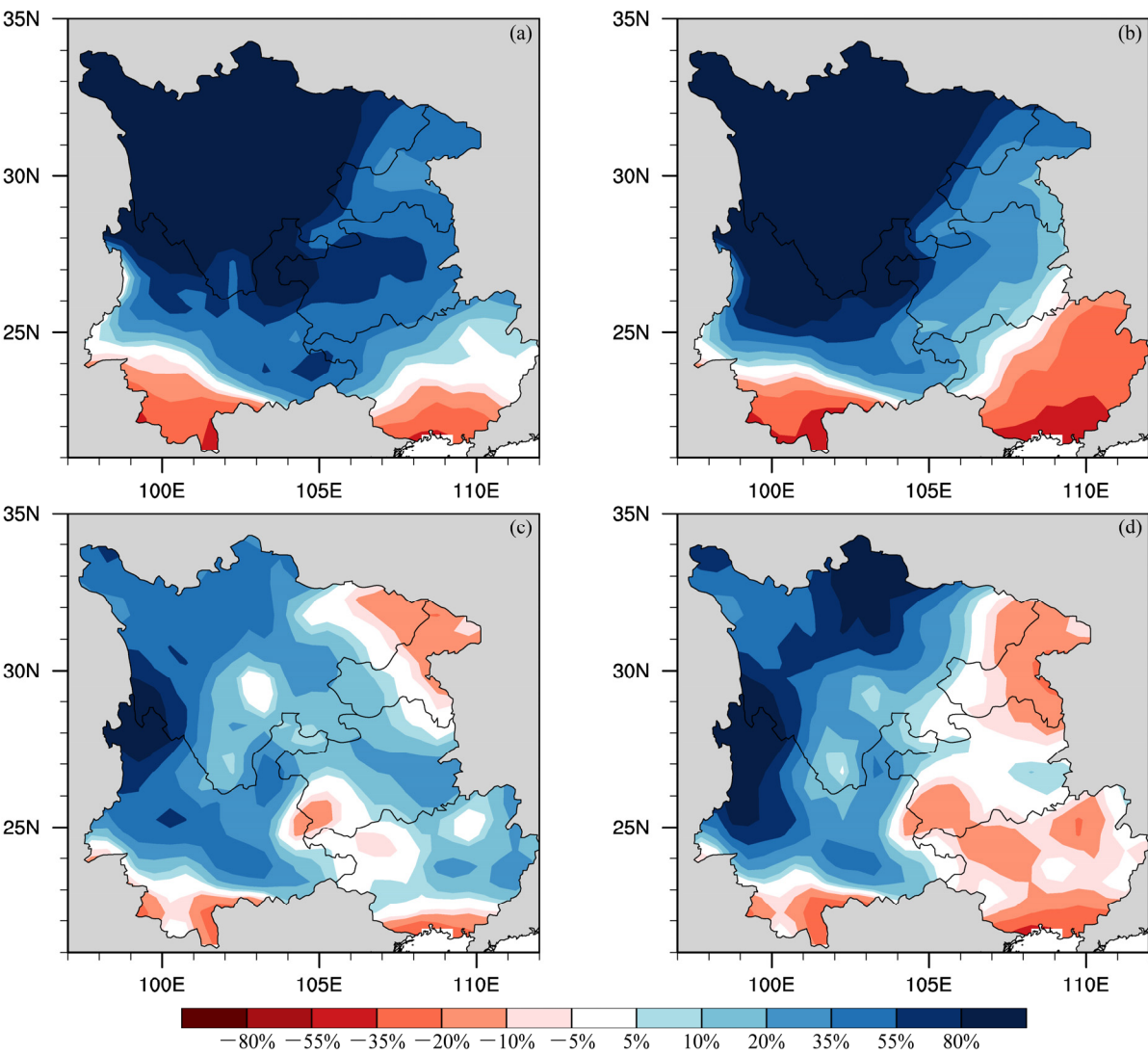


图 4 1986~2005 年我国西南地区 (a, b) 干季和 (c, d) 湿季降水的多模式集合平均相对于观测值差异的空间分布场: (a, c) MME-S; (b, d) MME。MME-S: 最优模式集合平均; MME: 34 个 CMIP5 模式集合平均

Fig. 4 Spatial distribution of (a, b) dry- and (c, d) wet-season precipitation differences between the multi-model ensemble means and observations over southwestern China for the period of 1986–2005: (a, c) MME-S; (b, d) MME. MME-S: the ensemble mean of optimum models; MME: the 34-model ensemble mean

部分地区的干湿季降水存在高估。在干季，MME 高估了除云南南部和广西大部区域的降水，尤其是四川和云南北部的降水高估更为明显。在湿季，MME 高估了西南地区西部降水，低估了东部降水。相对干季和湿季，MME-S 都比 MME 普遍有更小的模拟误差，这表明选择最优模式集合有助于改善对我国西南地区干湿季降水的模拟能力。表 3 给出了多模式集合平均和观测值的标准差之比  $\hat{\sigma}_f$ 、空间相关系数  $R$  及技巧分 ( $S_1$ ,  $S_2$ )，我们可以看到 MME-S 较 MME 都有更好的表现，MME-S 提高了模拟值与观测值的空间相关系数和标准差之比，并

且 MME-S 的技巧分也远远大于 MME。

表 3 多模式集合平均和观测干湿季降水的标准差之比  $\hat{\sigma}_f$ 、空间相关系数  $R$ 、技巧评分 ( $S_1$ ,  $S_2$ )

Table 3 The ratios of standard deviation  $\hat{\sigma}_f$ , the spatial correlation coefficient  $R$ , and the skill scores ( $S_1$  and  $S_2$ ) of dry- and wet-season precipitation between the multi-model ensemble means and observations

| 模式序号  | 干季               |       |       |       | 湿季               |       |       |       |
|-------|------------------|-------|-------|-------|------------------|-------|-------|-------|
|       | $\hat{\sigma}_f$ | $R$   | $S_1$ | $S_2$ | $\hat{\sigma}_f$ | $R$   | $S_1$ | $S_2$ |
| MME-S | 0.97             | 0.69* | 0.85  | 0.51  | 0.80             | 0.58* | 0.75  | 0.37  |
| MME   | 0.75             | 0.28* | 0.59  | 0.16  | 0.86             | 0.17* | 0.57  | 0.11  |

注：MME-S 表示最优模式集合平均，MME 表示 34 个 CMIP5 模式集合平均。\*表示通过 0.01 的显著性水平检验。

## 4 未来预估

在模式评估阶段, 我们不仅评估了单个模式的模拟能力, 还比较了 MME 和 MME-S 的模拟性能。总体而言, MME-S 的表现优于 MME, 更普遍优于大多数单个模式, 我们选用 MME-S 对 RCP4.5 和 RCP8.5 两种情景下我国西南地区干湿季降水的变化进行了预估。需要指出的是, 虽然 MME-S 对于降水值的模拟仍存在较大误差, 但是 MME-S 提高了模拟值与观测值的空间相关系数和标准差之比。这里的预估是相对于 1986~2005 年气候平均态, MME-S 对于 21 世纪西南地区干湿季降水相对变化空间分布的预估, 而不是对降水变化值本身的预估。

图 5 给出了在 RCP4.5 和 RCP8.5 两种情景下, 相对于 1986~2005 年气候平均态, MME-S 预估 21 世纪初期 (2016~2035 年)、中期 (2046~2065 年) 和末期 (2080~2099 年) 我国西南地区干季降水变化的空间分布。在 RCP4.5 情景下, 21 世纪初期我国西南地区干季降水变化表现为川西高原和广西降水增多, 而四川盆地及攀西地区、重庆、贵州和云南的大部分地区降水减少; 21 世纪中期和末期整个西南地区干季降水普遍增多。在 RCP8.5 情景下, 21 世纪初期西南地区平均干季降水变化表现为川西高原降水增多, 而四川盆地及攀西地区、重庆、贵州、云南和广西的大部分地区降水减少; 21 世纪中期和末期, 除小部分面积外, 西南地区干季降水增多。

图 6 给出了在 RCP4.5 和 RCP8.5 两种情景下, 相对于 1986~2005 年气候平均态, MME-S 预估 21 世纪初期、中期和末期我国西南地区湿季降水变化的空间分布。在 RCP4.5 情景下, 21 世纪初期西南地区湿季降水变化表现为川西高原、贵州和广西大部分地区降水增多, 而四川盆地及攀西地区、重庆和云南降水减少; 21 世纪中期和末期, 除部分地区外, 西南地区湿季降水增多, 且东部降水增加明显。在 RCP8.5 情境下, 21 世纪初期西南地区湿季降水变化表现为川西高原、重庆、贵州和广西大部分地区降水增多, 而四川盆地及攀西地区和云南降水减少; 21 世纪中期和末期, 与 RCP4.5 情景类似, 西南地区湿季降水增加, 且东部降水增加明显, 幅度较 RCP4.5 情景大。

## 5 结论和讨论

基于 CN05.2 降水观测资料, 评估了 34 个

CMIP5 耦合模式对我国西南地区干湿季降水的模拟能力, 并预估了 RCP4.5 和 RCP8.5 两种情景下干湿季降水的未来变化。主要结论如下:

34 个 CMIP5 模式中有 30 个模式模拟的干季降水偏多, 大部分模式的模拟偏差在  $-20\% \sim 60\%$  之间, 有 4 个模式的模拟偏差超过了 60%; 25 个模式模拟的湿季降水偏多, 大部分模式的模拟偏差在  $-20\% \sim 40\%$  之间。

(1) 通过泰勒图方法, 我们发现 34 个模式对我国西南地区干湿季降水的模拟能力差异较大。对于干季降水, 34 个模式中有 16 个模式的模拟值与观测值的空间相关系数通过了 99% 的信度水平检验, 且标准差之比小于 2。对于湿季降水, 34 个模式有 15 个模式的模拟值与观测值的空间相关系数通过了 99% 的信度水平检验, 且标准差之比小于 2。

(2) 我们分别挑选出了对干湿季降水模拟最优的 9 个模式参与模式集合评估。最优模式集合平均对西南地区干湿季降水气候态的空间分布模拟较好, 但大部分地区高估了降水值。最优模式集合平均的模拟能力要优于 34 个模式的集合平均, 更要优于大多数单个模式。

(3) 进一步利用最优的 9 个模式对我国西南地区未来降水变化进行了预估。相对于 1986~2005 年气候平均态, 21 世纪初期西南地区干季降水变化表现为川西高原降水增多, 而四川盆地及攀西地区、重庆、贵州和云南的大部分地区降水减少; 21 世纪中期和末期, 除小部分地区外, 西南地区干季降水增多。21 世纪初期西南地区湿季降水变化表现为川西高原、贵州和广西大部分地区降水增多, 而四川盆地及攀西地区和云南降水减少; 21 世纪中期和末期, 除部分地区外, 西南地区湿季降水增多, 且东部降水增加明显。在 RCP8.5 情景下, 降水的变化幅度要强于 RCP4.5 情景。

相比 CMIP3, CMIP5 模式已有较程度的发展, 在模式分辨率和试验设计等方面有一定的改进 (Taylor et al., 2012), 但模式模拟结果仍然存在较大的不确定性 (Yao et al., 2012; Chen, 2013; Hua et al., 2013)。我国西南地区地理位置特殊、地形复杂, 模式对这一地区的准确模拟的难度更大。其次, 相对于我国西南地区空间范围而言, 大部分模式的分辨率依然比较粗, 为了与观测值作比较, 我们将模式数据统一插值到  $0.5^\circ \times 0.5^\circ$  的格点上, 增加了模式结果应用中的不确定性。因此, 虽然部分 CMIP5



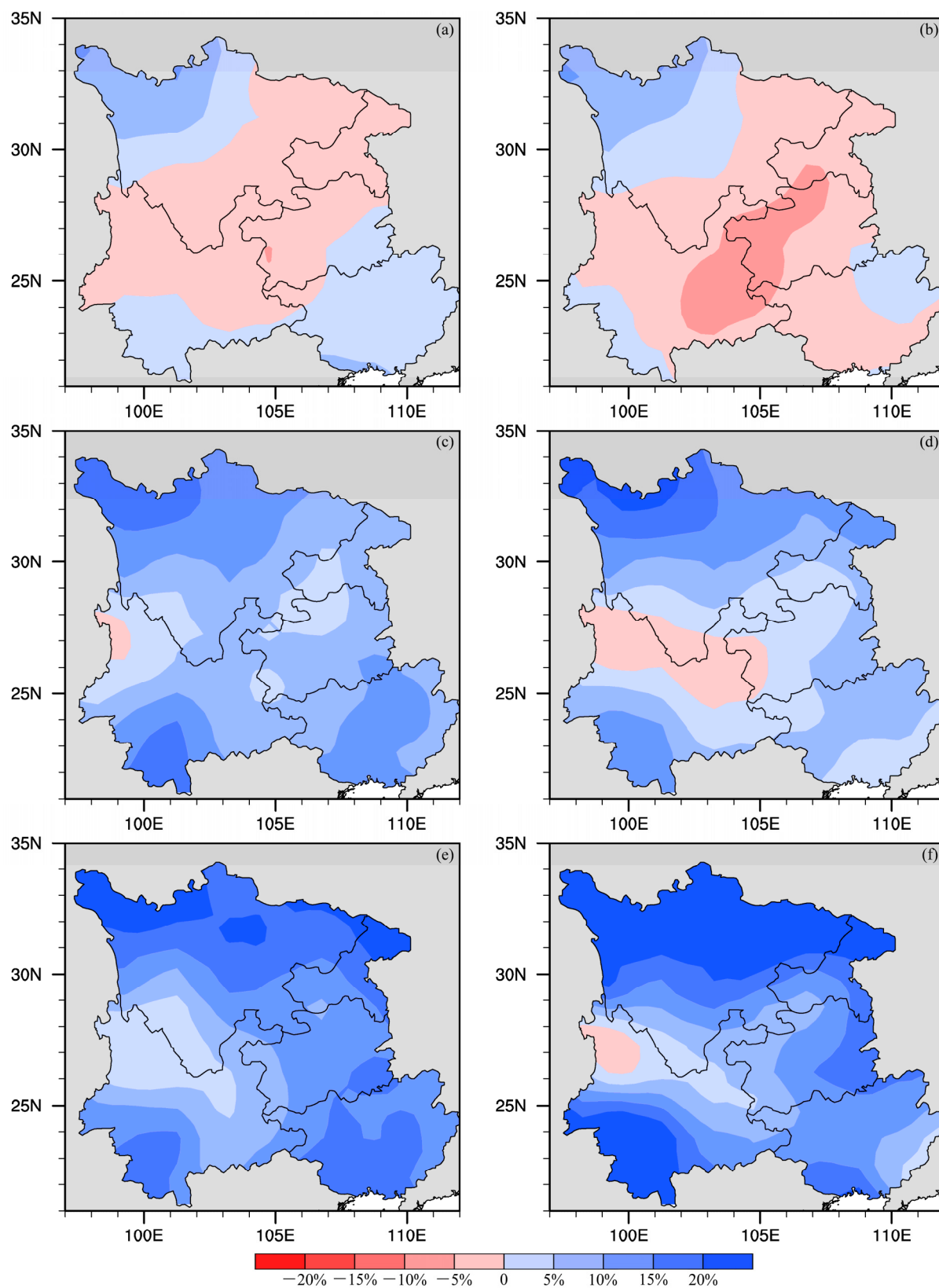


图5 相对于1986~2005年气候平均态, 21世纪(a, b)初期(2016~2035)、(c, d)中期(2046~2065)和(e, f)末期(2080~2099)我国西南地区于季降水变化的空间分布: (a, c, e) RCP4.5; (b, d, f) RCP8.5

Fig. 5 Spatial distribution of projected changes in dry-season precipitation over southwestern China from the reference period (1986–2005) to (a, b) beginning-of-century (2016–2035), (c, d) mid-century (2046–2065), and (e, f) end-of-century (2080–2099) under two emissions scenarios (a, c, e) RCP4.5 and (b, d, f) RCP8.5

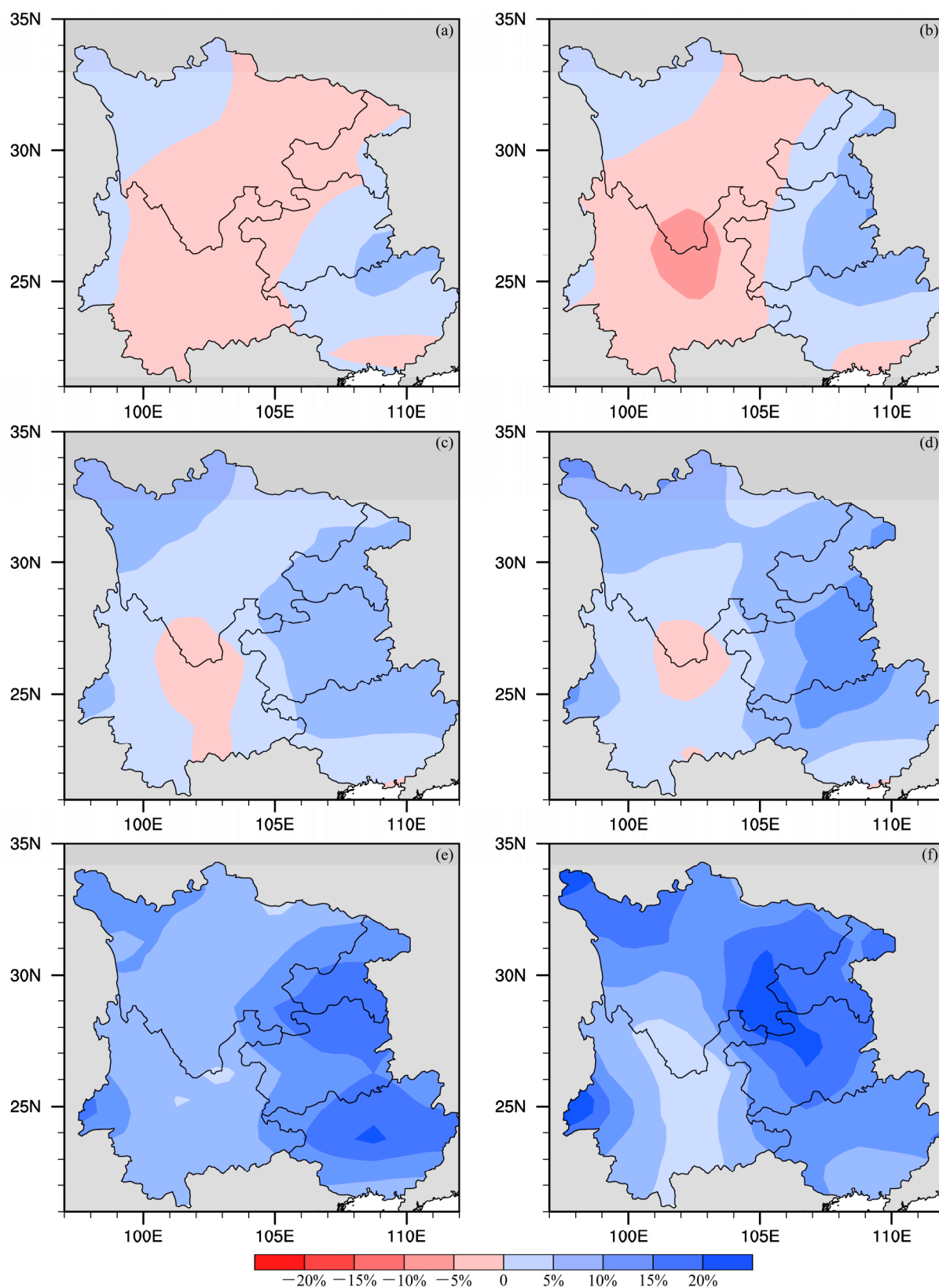


图6 相对于1986~2005年气候平均态, 21世纪(a, b)初期(2016~2035)、(c, d)中期(2046~2065)和(e, f)末期(2080~2099)我国西南地区湿季降水变化的空间分布: (a, c, e) RCP4.5; (b, d, f) RCP8.5

Fig. 6 Spatial distribution of projected changes in wet-season precipitation over southwestern China from the reference period (1986–2005) to (a, b) beginning-of-century (2016–2035), (c, d) mid-century (2046–2065), and (e, f) end-of-century (2080–2099) under two emissions scenarios (a, c, e) RCP4.5 and (b, d, f) RCP8.5

模式能较好的模拟出我国西南地区干湿季降水的气候态特征,但模式模拟能力仍有不足,我们的预估结果可能仍存在较大的不确定性。将来为了更好地对我国西南地区气候变化进行模拟和预估,我们将采用高分辨率的区域气候模式模拟等降尺度方法(Zhang et al., 2008; Feng et al., 2011; Gao et al., 2011; Wang et al., 2011)。另外,还应注意由于模式物理参数化方案、对外强迫的响应能力等不同,如何利用更有效的多模式集合方法,如加权平均方法(Xu et al., 2010),提高模式集合的模拟能力,更好的为我们的评估和预估工作服务也是值得研究的问题。

### 参考文献 (References)

- Behrens L K, Martin T, Semenov V A, et al. 2012. The Arctic sea ice in the CMIP3 climate model ensemble—Variability and anthropogenic change [J]. *The Cryosphere Discussions*, 6 (6): 5317–5344.
- Chen H P. 2013. Projected change in extreme rainfall events in China by the end of the 21st century using CMIP5 models [J]. *Chin. Sci. Bull.*, 58 (12): 1462–1472.
- 陈海山, 范苏丹, 张新华. 2009. 中国近 50 a 极端降水事件变化特征的季节性差异 [J]. *大气科学学报*, 32 (6): 744–751.
- Chen Haishan, Fan Sudan, Zhang Xinhua. 2009. Seasonal differences of variation characteristics of extreme precipitation events over China in the last 50 years [J]. *Transactions of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 32 (6): 744–751.
- Diffenbaugh N S, Giorgi F. 2012. Climate change hotspots in the CMIP5 global climate model ensemble [J]. *Climatic Change*, 114 (3–4): 813–822.
- Feng L, Zhou T J, Wu B, et al. 2011. Projection of future precipitation change over China with a high-resolution global atmospheric model [J]. *Adv. Atmos. Sci.*, 28 (2): 464–476.
- Flato G M. 2004. Sea-ice and its response to CO<sub>2</sub> forcing as simulated by global climate models [J]. *Climate Dyn.*, 23 (3–4): 229–241.
- Gao X J, Shi Y, Giorgi F. 2011. A high resolution simulation of climate change over China [J]. *Sci. China Earth Sci.*, 54 (3): 462–472.
- Guo Y, Dong W J, Ren F M, et al. 2013. Surface air temperature simulations over China with CMIP5 and CMIP3 [J]. *Advances in Climate Change Research*, 4 (3): 145–152.
- 胡豪然, 毛晓亮, 梁玲. 2008. 近 50 年川渝地区夏季极端高温事件的时空演变特征 [J]. *高原山地气象*, 28 (3): 15–20.
- Hu Haoran, Mao Xiaoliang, Liang Ling. 2008. Temporal and spatial variations of extreme High-temperature event of summer over Sichuan and Chongqing region in last 50 years [J]. *Plateau and Mountain Meteorology Research (in Chinese)*, 28 (3): 15–20.
- Hu Y Y, Tao L J, Liu J P. 2013. Poleward expansion of the Hadley circulation in CMIP5 simulations [J]. *Adv. Atmos. Sci.*, 30 (3): 790–795.
- Hua W J, Chen H S, Sun S L. 2013. Uncertainty in land surface temperature simulation over China by CMIP3/CMIP5 models [J]. *Theor. Appl. Climatol.*, 17 (3–4): 463–474, doi:10.1007/s00704-013-1020-z.
- IPCC. 2007. *Climate Change 2007: The Physical Science Basis* [M]. Solomon S, Qin D, Manning M, et al., Eds. Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA: Cambridge University Press, 1–940.
- IPCC. 2013. Summary for policymakers [M/OL]// IPCC. *Climate Change 2013: The Physical Science Basis*. Cambridge: Cambridge University Press, in press. 2013-09-30 [2013-09-30]. [http://www.climate2013.org/images/uploads/WGI\\_AR5\\_SPM\\_brochure.pdf](http://www.climate2013.org/images/uploads/WGI_AR5_SPM_brochure.pdf).
- Jiang D B, Tian Z P. 2013. East Asian monsoon change for the 21st century: Results of CMIP3 and CMIP5 models [J]. *Chinese Science Bulletin*, 58 (12): 1427–1435.
- Jiang D B, Wang H J, Lang X M. 2005. Evaluation of East Asian climatology as simulated by seven coupled models [J]. *Adv. Atmos. Sci.*, 22 (4): 479–495.
- 江志红, 张霞, 王冀. 2008. IPCC-AR4 模式对中国 21 世纪气候变化的情景预估 [J]. *地理研究*, 27 (4): 787–799.
- Jiang Zhihong, Zhang Xia, Wang Ji. 2008. Projection of climate change in China in the 21st century by IPCC-AR4 models [J]. *Geographical Research (in Chinese)*, 27 (4): 787–799.
- 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.
- Joetzier E, Douville H, Delire C, et al. 2013. Present-day and future Amazonian precipitation in global climate models: CMIP5 versus CMIP3 [J]. *Climate Dyn.*, 41 (11–12): 2921–2936.
- Kharin V V, Zwiers F W, Zhang X, et al. 2013. Changes in temperature and precipitation extremes in the CMIP5 ensemble [J]. *Climate Change*, 119 (2): 345–357.
- Lambert S J, Boer G J. 2001. CIMP1 evaluation and intercomparison of coupled climate models [J]. *Climate Dyn.*, 17 (2–3): 83–106.
- 李振朝, 韦志刚, 吕世华, 等. 2013. CMIP5 部分模式气温和降水模拟结果在北半球及青藏高原的检验 [J]. *高原气象*, 32 (4): 921–928.
- Li Zhenchao, Wei Zhigang, Lü Shihua, et al. 2013. Verifications of surface air temperature and precipitation from CMIP5 model in Northern Hemisphere and Qinghai-Xizang plateau [J]. *Plateau Meteorology (in Chinese)*, 32 (4): 921–928.
- 刘晓冉, 李国平, 范广洲, 等. 2007. 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*, 22 (5): 783–792.
- Liu Xiaoran, Li Guoping, Fan Guangzhou, et al. 2007. Spatial and temporal characteristics of precipitation resource in Southwest China during 1961–2000 [J]. *Journal of Natural Resources (in Chinese)*, 22 (5): 783–792.
- 马振峰, 彭骏, 高文良, 等. 2006. 近 40 年西南地区的气候变化事实 [J]. *高原气象*, 25 (4): 633–642.
- Ma Zhenfeng, Peng Jun, Gao Wenliang, et al. 2006. Climate variation of Southwest China in recent 40 years [J]. *Plateau Meteorology (in Chinese)*, 25 (4): 633–642.
- Meehl G A, Boer J, Covey C, et al. 1997. Intercomparison makes for a better climate model [J]. *Eos, Trans. Amer. Geophys. Union*, 78 (41): 445–451.
- Meehl G A, Boer J, Covey C, et al. 2000. The Coupled Model

- Intercomparison Project (CMIP) [J]. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 81: 313–318.
- Meehl G A, Covey C, McAvaney B, et al. 2005. Overview of the coupled model intercomparison project [J]. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 86 (1): 89–93.
- Meehl G A, Covey C, Delworth T, et al. 2007. The WCRP CMIP3 multimodel dataset: A new era in climate change research [J]. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 88 (9): 1383–1394, doi:10.1175/BAMS-88-9-1383.
- Qu X, Huang G, Zhou W. 2013. Consistent responses of East Asian summer mean rainfall to global warming in CMIP5 simulations [J]. *Theor. Appl. Climatol.*, 117 (1–2): 123–131, doi:10.1007/s00704-013-0995-9.
- Taylor K E. 2001. Summarizing multiple aspects of model performance in a single diagram [J]. *Journal of Geophysical Research*, 106 (D7): 7183–7192.
- Taylor K E, Stouffer R J, Meehl G A. 2012. An overview of CMIP5 and the experiment design [J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 93(4): 485–498.
- Torres R R, Marengo J A. 2014. Climate change hotspots over South America: From CMIP3 to CMIP5 multi-model datasets [J]. *Theoretical and Applied Climatology*, 117 (3–4): 579–587, doi:10.1007/s00704-013-1030-x.
- Wang L, Chen W. 2013. A CMIP5 multimodel projection of future temperature, precipitation, and climatological drought in China [J]. *Int. J. Climatol.*, 34 (6): 2059–2078. doi: 10.1002/joc.3822
- 王澄海, 吴永萍, 崔洋. 2009. 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*, 24 (5): 461–468. Wang Chenghai, Wu Yongping, Cui Yang. 2009. Evaluating the progress of the CMIP and its application prospect in China [J]. *Advances in Earth Science (in Chinese)*, 24 (5): 461–468.
- Wang H J, Yu E T, Yang S. 2011. An exceptionally heavy snowfall in Northeast China: Large-scale circulation anomalies and hindcast of the NCAR WRF model [J]. *Meteor. Atmos. Phys.*, 113 (1–2): 11–25
- 吴佳, 高学杰. 2013. 一套格点化的中国区域逐日观测资料及与其它资料的对比 [J]. *地球物理学报*, 56 (4): 1102–1111. Wu Jia, Gao Xuejie. 2013. A gridded daily observation dataset over China region and comparison with the other datasets [J]. *Chinese Journal of Geophysics (in Chinese)*, 56(4): 1102–1111.
- Xin X G, Wu T W, Zhang J. 2013a. Introduction of CMIP5 experiments carried out with the climate system models of Beijing Climate Center [J]. *Advances in Climate Change Research*, 4 (1): 41–49.
- Xin X G, Cheng Y J, Wang F, et al. 2013b. Asymmetry of surface climate change under RCP2.6 projections from the CMIP5 models [J]. *Adv. Atmos. Sci.*, 30 (3): 796–805.
- 徐崇海, 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]. *Advances in Climate Research (in Chinese)*, 3 (5): 287–292.
- Xu Y, Xu C H. 2012. Preliminary assessment of simulations of climate changes over China by CMIP5 multi-models [J]. *Atmos. Oceanic Sci. Lett.*, 5 (6): 489–494.
- Xu Y, Gao X, Giorgi F. 2010. Upgrades to the reliability ensemble averaging method for Producing Probabilistic climate-change Projections [J]. *Climate Research*, 41 (1): 61–81.
- Yao Y, Luo Y, Huang J B. 2012. Evaluation and projection of temperature extremes over China based on CMIP5 model [J]. *Advances in Climate Change Research*, 3 (4): 179–185.
- Yao Y, Luo Y, Huang J B, et al. 2013. Comparison of monthly temperature extremes simulated by CMIP3 and CMIP5 models [J]. *J. Climate*, 26 (19): 7692–7707.
- 张宏芳, 陈海山. 2011a. 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. 2011a. Evaluation of summer circulation simulation over East Asia by 21 climate models. Part I: Climatology [J]. *Scientia Meteorologica Sinica (in Chinese)*, 31 (2): 119–128.
- 张宏芳, 陈海山. 2011b. 21 个气候模式对东亚夏季环流模拟的评估 II: 年际变化 [J]. *气象科学*, 31 (3): 247–257. Zhang Hongfang, Chen Haishan. 2011b. Evaluation of summer circulation simulation over East Asia by 21 climate models. Part II: Interannual variability [J]. *Scientia Meteorologica Sinica (in Chinese)*, 31 (3): 247–257.
- Zhang J, Li L, Zhou T J, et al. 2013. Evaluation of spring persistent rainfall over East Asia in CMIP3/CMIP5 AGCM simulations [J]. *Adv. Atmos. Sci.*, 30 (6): 1587–1600.
- Zhang J Y, Wang W C, Leung L R. 2008. Contribution of land-atmosphere coupling to summer climate variability over the contiguous United States [J]. *J. Geophys. Res.*, 113, D22109, doi:10.1029/2008JD010136.
- 张武龙, 张井勇, 范广洲. 2014. 我国西南地区干湿季降水的主模态分析 [J]. *大气科学*, 38 (3): 590–602. Zhang Wulong, Zhang Jingyong, Fan Guangzhou. 2014. Dominant modes of dry- and wet-season precipitation in southwestern China [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 38 (3): 590–602.
- 朱献, 董文杰. 2013. CMIP5 耦合模式对北半球 3–4 月积雪面积的历史模拟和未来预估 [J]. *气候变化研究进展*, 9 (3): 173–180. Zhu Xian, Dong Wenjie. 2013. Evaluation and projection of Northern Hemisphere March–April snow covered area simulated by CMIP5 coupled climate models [J]. *Adv. Clim. Change Res. (in Chinese)*, 9 (3): 173–180.