

张蓓, 戴新刚. 2016. 2006~2013 年 CMIP5 模式中国降水预估误差分析 [J]. 大气科学, 40 (5): 981-994. Zhang Bei, Dai Xin'gang. 2016. Assessment of the deviation of China precipitation projected by CMIP5 models for 2006-2013 [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 40 (5): 981-994, doi: 10.3878/j.issn.1006-9895.1511.15212.

2006~2013 年 CMIP5 模式中国降水预估误差分析

张蓓^{1,2} 戴新刚²

1 兰州大学大气科学学院, 兰州 730000

2 中国科学院东亚区域气候-环境重点实验室, 北京 100029

摘 要 用第五次耦合模式比较计划 (CMIP5) 的 10 个模式模拟结果与英国东安格利亚大学 (UEA) 气候研究机构 (CRU) 的最新降水格点分析资料比较, 评估了三种典型浓度路径 (RCPs) 排放情景下模式集合对 2006~2013 年中国降水预估误差, 结果发现模式间年降水预估在西北和东部沿海地区差异较明显, 在沿海地区模式降水估计偏少, 在西部和北方大部分地区偏多; 冬半年大部分地区模式降水明显偏多, 部分地区甚至偏多一倍以上; 夏半年东部季风区降水估计偏少, 但西部仍然偏多。模式降水误差随时间变化, 夏半年误差变化明显的区域主要集中在北方和东部地区, 冬半年在东北南部、华东及华南等地。此外, 提高排放情景对年降水量估计影响明显的地区主要集中在我国西部的部分地区, 加剧了西北模式降水估计偏多程度, 但对东部地区影响不大。El Niño 与 La Niña 年的模式降水误差分布相似, 仅在沿海部分地区和华北北部差异较明显, 逐年误差分布特征也与此相似。各种误差的对比分析表明, 模式降水误差可能多来自模式本身存在的问题, 如积云对流参数化、固体降水物理过程、地形处理及分辨率等。这些误差特征说明, 直接使用 CMIP5 模式集合情景输出资料估计未来降水的方法存在较大的不确定性, 必须对其进行评估, 以降低潜在用户或决策者们制定未来规划的风险。

关键词 中国降水 CMIP5 RCPs 排放情景 集合预估 误差分析

文章编号 1006-9895(2016)05-0981-14

中图分类号 P467

文献标识码 A

doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1511.15212

Assessment of the Deviation of China Precipitation Projected by CMIP5 Models for 2006-2013

ZHANG Bei^{1,2} and DAI Xin'gang²

1 College of Atmospheric Sciences, Lanzhou University, Lanzhou 730000

2 Key Laboratory of Regional Climate-Environment for East Asia, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029

Abstract This study focuses on investigating the deviation of 2006-2013 mean precipitation projected by the multi-model ensemble over China using the outputs of 10 CMIP5 climate models under various RCP scenarios, in comparison with the latest grid precipitation from the CRU, University of East Anglia. The results show that there are obvious differences in projected precipitation among the 10 models for Northwest China and the eastern coastal zone. The model-ensemble precipitation is overestimated in northern and western parts of China and underestimated in the coastal zone. In the winter-half year, the precipitation is obviously overestimated in most parts of China, even double or more

收稿日期 2015-06-09; 网络预出版日期 2015-11-20

作者简介 张蓓, 女, 1993 年出生, 硕士研究生, 主要从事气候变化研究。E-mail: zhangb13@lzu.edu.cn

通讯作者 戴新刚, E-mail: daixg@tea.ac.cn

资助项目 国家重点基础研究发展计划 (973 计划) 项目 2013CB430201, 国家自然科学基金项目 41475075、41075058

Funded by National Basic Research Program of China (973 Program, Grant 2013CB430201), National Natural Science Foundation of China (NSFC) (Grant 41475075, 41075058)

than observed, but underestimated in the coastal zone; while in the summer-half year, it is underestimated in the eastern monsoon zone and overestimated in western China. The deviation changes with time, and its trend is apparent in northern and eastern parts in the summer-half year, and in Northeast, eastern and southern China in the winter-half year. In addition, the overestimation of precipitation is intensified in the northwest of China if using RCP8.5 scenario, but relatively weaker for the scenarios in East or South China. Besides, although the patterns of deviation are similar in El Niño and La Niña years, the interannual difference of the deviation is still obvious in some parts of North China and coastal areas. The different deviation seemingly results from defects in the models themselves, such as their physical processes, cumulus convection parameterizations, representation of solid precipitation, topography treatment, and spatial resolution. The deviation reveals that there would be severe uncertainty if estimating China precipitation directly using CMIP5 model outputs. Hence, it is necessary to estimate the uncertainty before using the output data, so as to reduce the potential risk for users or decision-makers responsible for future development plans.

Keywords China precipitation, CMIP5 (Coupled Model Intercomparison Project Phase 5), RCPs (Representative Concentration Pathways) scenarios, Ensemble estimate, Deviation analysis

1 引言

政府间气候变化组织 (IPCC) 第五次评估报告 (AR5) 的最新评估结果表明, 工业化革命以来全球气候变暖毋庸置疑 (IPCC, 2013a)。自 20 世纪 50 年代以来, 仪器观测到的一系列气候变化是过去几十年, 甚至近千年以来史无前例的, 反映了人类活动可能是其主要原因之一 (沈永平和王国亚, 2013)。自那时以来全球地表持续升温, 1880~2012 年间全球平均温度已升高了约 0.85°C , 地球上大部分地区都经历了升温过程。气候暖化体现在地表气温和海洋温度上升、海平面上升、冰盖消融或冰川退缩、极端气候事件频率增加等方面 (钱忠华等, 2011; 赵俊虎等, 2011; 秦大河和 Stocker, 2014)。有关研究表明, 未来全球气候暖化仍可能持续, 对气候系统的影响也不会结束 (IPCC, 2013b)。如果任其发展, 气候变化势必会对人类和地球生态系统造成严重的、普遍的, 甚至是不可逆转的影响。因此, 在全球气候暖化背景下如何较准确地预估未来气候变化, 并据此制定相应的适应与减缓措施已成为各国科学家、公众乃至决策者们共同关心的重大问题。

全球气候暖化已经导致降水的时空分布发生改变, 并对水资源、生态系统和社会经济发展等方面产生了深远影响 (翟建青等, 2014; 苏涛和封国林, 2014)。中国东部属于东亚季风区, 西部为青藏高原和内陆干旱区, 地形复杂, 降水量空间分布极不均匀且年际变化很大, 降水预测很困难。如何较准确地预估中国未来十年甚至几十年的降水变化趋势一直是一个具有挑战性的艰巨任务。加强相关问题的研究对于制定我国未来经济规划及防灾

减灾的战略部署等都具有重要的现实意义 (许崇海等, 2010)。

全球气候模式是进行气候模拟及预估的重要工具之一。近年来, 相关的研究已经取得了很大的进展 (Taylor et al., 2012; 董文杰等, 2014)。基于模式模拟结果, 科学家群体对气候模拟和气候变化预估做了大量的研究, 取得了一系列很有意义的结果。受全球气候系统的复杂性、气候模式的代表性及可靠性等因素的影响, 模式对气候变化的模拟尚存在许多不足和局限性 (Masson and Knutti, 2011)。以往的检验表明, 多数气候模式基本上都能模拟出全球降水的大尺度特征, 不过, 对区域尺度降水模拟仍存在不少问题 (IPCC, 2007)。一些研究表明, 一般全球气候模式对中国的气候态都具有一定的模拟能力, 但对东亚季风降水的模拟能力仍然有限 (陈晓晨等, 2014), 可能与模式分辨率、季风系统的复杂性和青藏高原等因素有关 (高学杰等, 2006; 姜燕敏等, 2015)。目前, 一些学者已基于 CMIP5 模式资料, 评估了其对中国历史降水的模拟能力 (刘敏和江志红, 2009; Xu Y and Xu, 2012; 田芝平和姜大膀, 2013; Song and Zhou, 2014), 结果发现, 大部分模式都能够模拟出中国降水的空间分布特征和季节循环, 但模拟精度的区域性差别较大, 高估了中国大部分地区的降水, 低估了沿海季风区降水; 模式对降水演变模拟能力也十分有限。一般模式集合的模拟能力优于大部分单个模式 (陈晓晨等, 2014)。此外, 有关研究结果还表明 (Chen, 2013; 江志红等, 2009), 到 21 世纪末, 中国年降水量可能显著增加, 降水有趋于极端化的发展趋势。在几种 AR5 的典型路径排放情景下, 区域性平均降水将增加, 其幅度在北方地区大于南方

地区 (Xu C H and Xu, 2012)。此外, 为了提高精度, 还有部分学者利用 CMIP5 全球气候模式结果驱动区域气候模式, 通过动力降尺度方法对中国未来降水进行估计, 得到了较好的结果 (Gao et al., 2013; Zou and Zhou, 2013)。

我们注意到, 已有的研究主要集中在模式对历史气候模拟能力的检验或评估方面, 或是仅根据 CMIP5 模式的情景输出资料对未来气候直接进行预估, 几乎都未涉及未来气候情景下预估的不确定性问题, 其中有些研究仅考虑了模式间气候预估的离散度。然而, 模式预估的不确定性会对未来气候变化, 特别是降水变化预估精度带来很大影响, 甚至可能对潜在的用户造成误导。因此, 在预估未来气候变化的同时, 必须对其不确定性进行评估。CMIP5 模式的未来气候预估数据始于 2006 年, 距今已经有 8~9 年, 可以用气象观测记录对其进行检验, 评估其不确定性。本文利用 2006~2013 年 CMIP5 模式情景预估数据与重叠期的英国气候研究机构 (CRU) 的格点降水分析资料, 对模式降水预估进行误差评估, 力图揭示其基本特征。下文第 2 节介绍模式、数据和方法; 第 3 节对模式预估的年降水误差空间分布、趋势及情景差异等进行分析; 第 4 节给出冬、夏半年模式降水误差分析; 第 5 节分析 El Niño 年和 La Niña 年模式降水误差分布特征及其差异, 以及逐年模式降水误差分布差异; 最后一节是结论及简短的讨论。

2 数据与方法

第五次耦合模式比较计划 (CMIP5) 采用了以稳定浓度为特征的一套新的典型浓度路径 (Representative Concentration Pathways, 记为 RCPs) 排放情景, 其中包括 RCP8.5、RCP6.0、RCP4.5、RCP2.6 等 4 种路径情景, 每种情景都提供了一种受社会经济发展条件影响的温室气体排放路径, 并给出直到 2100 年的相应辐射强迫序列值 (Meinshausen et al., 2011)。其中, RCP2.6 为低排放情景, 该情景下的辐射强迫先增加后减少, 到 2100 年辐射强迫稳定在约 2.6 W m^{-2} (van Vuuren et al., 2011); RCP4.5 属于中等强度排放情景, 到 2100 年辐射强迫稳定在约 4.5 W m^{-2} (Thomson et al., 2011); RCP8.5 属于高排放情景, 到 2100 年辐射强迫大于 8.5 W m^{-2} (Riahi et al., 2011); RCP6.0 介于 RCP4.5 与 RCP8.5 之间。所选取的 10 个 CMIP5

全球气候模式的参数列在表 1 中, 其中只给出 RCP8.5、RCP4.5 和 RCP2.6 情景的信息, 因为这些模式资料比较完整。

表 1 所用 10 个 CMIP5 模式的参数信息

Table 1 Information on the 10 CMIP5 models

模式名称	单位及所属国家	水平分辨率 (经向格点数× 纬向格点数)	RCP 试验
BCC-CSM1-1-m	BCC, 中国	320×160	RCP2.6, RCP4.5, RCP8.5
CanESM2	CCCMA, 加拿大	128×64	RCP2.6, RCP4.5, RCP8.5
CNRM-CM5	CNRM-CERFACS, 法国	256×128	RCP2.6, RCP4.5, RCP8.5
FGOALS-g2	LASG-CESS, 中国	128×60	RCP2.6, RCP4.5, RCP8.5
GISS-E2-H-CC	NASA GISS, 美国	144×90	RCP4.5, RCP8.5
HadCM3	MOHC, 英国	96×73	RCP4.5
HadGEM2-AO	NIMR/KMA, 韩国/ 英国	192×145	RCP2.6, RCP4.5, RCP8.5
IPSL-CM5A-LR	IPSL, 法国	96×96	RCP2.6, RCP4.5, RCP8.5
MPI-ESM-LR	MPI-M, 德国	192×96	RCP2.6, RCP4.5, RCP8.5
MRI-CGCM3	MRI, 日本	320×160	RCP2.6, RCP4.5, RCP8.5

我们选取 2006~2013 年 CRU (Mitchell and Jones, 2005) 的格点月降水分析资料 (CRU_TS_v.3.22) 作为模式降水误差评估的参考态, 或视其为观测降水, 其分辨率为 $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ 。考虑到各个模式的分辨率不同, 我们采用双线性插值方法将不同分辨率的模式降水资料插值到 $1.0^\circ \times 1.0^\circ$ 的格点上, 再进行误差分析。

此外, 文中还计算了各模式间中国年平均降水预估的标准差及其相对标准偏差来大致刻画模式预估结果的离散度和模式集合平均结果的不确定性。同时还给出了 2006~2013 年中国模式年降水误差的年际标准差及误差百分率的年际标准差, 以此分析模式降水预估误差的年际变化。

3 年降水预估误差

本文中的模式降水量误差, 指所选的 10 个 CMIP5 模式输出的 2006~2013 年平均降水量与对应的 CRU 格点分析降水量 (CRU_TS_v.3.22) 之差, 偏多或正误差表示模式降水预估高于观测值, 反之, 低于观测值。在下文中, 当降水估计误差或误差趋势 > 20% 时, 称之为明显偏多或增加趋势明显;

当其 $<-20\%$ 称之为明显偏少；若介于二者之间，均视为误差不明显或接近于观测值。下文中的“模式降水”均指由这 10 个模式集合平均估计的降水量。

3.1 年降水量误差

在三种典型浓度路径情景（RCP8.5、RCP4.5、RCP2.6）下，模式对中国大陆 2006~2013 年平均降水量的预估均能再现东南多、西北少的气候特征以及降水的季节循环（图略）。因三种情景下模式估计的年降水量误差分布比较相似，这里仅对中等排放情景 RCP4.5 下的误差进行分析。

从图 1a 中可以看到，全国大部分地区模式降水量估计偏多，仅在东部沿海、华南沿海及青藏高原南部个别地区偏少，青藏高原东部平均偏多达到 800 mm 以上，华南沿海偏少 400 mm 以上。从降水估计的相对误差 $[(\text{模式降水}-\text{观测})/\text{观测}]$ 看，模式年降水量估计明显偏多 ($>20\%$) 的地区有：青藏高原大部、云贵高原、西北大部、华北大部和东北大部等地区（图 1b），其中对青藏高原大部、西北西部和南部、云贵高原西部及华北北部的降水量估计偏多 80%，或以上；年降水量估计明显偏少 ($<-20\%$) 的地区主要集中在华南沿海、山东半岛、海南岛和青藏高原南部等个别地区。这种误差分布特征与他人对 CMIP5 模式历史气候模拟检验结果基本一致 (Xu Y and Xu, 2012; Song and Zhou, 2014; 刘敏和江志红, 2009)，说明造成误差的主要原因可能是模式分辨率低，或地形处理不当，或海气耦合过程的描述不够完善等所致 (高学杰等, 2004; Jiang et al., 2005; Phillips and Gleckler, 2006; 张莉等, 2008)。

10 个模式各自对降水估计的偏差不一致。计算的模式间降水预估的标准差表明，各模式对 40°N 以北的地区降水预估的一致性较高，对西藏、西南、江南和华南等地区模式间预估差异较大（图 2a），这同样与 CMIP5 模式历史气候模拟结果基本一致 (陈晓晨等, 2014)，其主要原因也可能是模式分辨率及地形影响 (高学杰等, 2006; 江志红等, 2009)。从相对误差来看（图 2b），对于中国大部分地区年平均降水预估模式间相对标准偏差在 40% 以下，东北和黄淮东部地区为 20% 以下，只有西北北部和青藏高原南部地区相对标准偏差较高，尤其是在西北北部大部分地区达 80% 以上。图 2b 与图 1b 对比可知，由于东部地区模式降水预估误差百分率相对西部地区较低，所以模式间年平均降水预估

差异在西北北部和东部沿海地区都较明显。因此，集合平均方法在一定程度上能减少模式降水估计的误差。

3.2 年降水误差趋势

模式年降水误差会随时间变化，其线性趋势可以作为这种变化的一种度量。该误差趋势等价于模式降水量趋势与 CRU 格点降水量趋势之差。为了避免趋势估计中的小样本问题，我们采用每一格点 2010~2013 年模式降水量误差平均值（图 3b）减去 2006~2009 年的对应值（图 3a），近似表示这一时段模式降水量误差趋势或模式降水趋势误差（图 3c）；用该趋势除以 2006~2009 年模式降水误差的绝对值就得到模式降水误差百分率趋势（图 3d）。

因三种典型路径排放情景（RCP8.5, RCP4.5, RCP2.6）下模式降水误差趋势分布很接近，故只分析其中等排放情景（RCP4.5）。从图 3c 可以看出，华北、东北、河套南部、青藏高原西南端、辽东半岛、江南中东部、长江下游和华南沿海等地模式年降水量误差趋势为负，其中华北、东北大部、辽东半岛、江南中东部、长江下游和华南沿海等地误差趋势达到 $-200 \text{ mm} (8a)^{-1}$ 及其以下，其误差百分率趋势也均小于 $-20\% (8a)^{-1}$ （图 3d）；在河套以东的黄河与淮河之间、西南大部及山东半岛等地年降水量误差趋势为正，其中西南大部、河南省和辽东半岛等地的模式降水误差趋势达 $200 \text{ mm} (8a)^{-1}$ 以上，其降水误差百分率趋势均超过 $20\% (8a)^{-1}$ 。可见，中国东部 CMIP5 模式降水误差随时间变化比较快，西部变化相对较慢。不难推知，在 2006~2009 年间模式降水估计偏多地区（见图 3a），正（负）的误差趋势意味着该地模式降水估计偏多状况趋于增强（减弱），即误差变大（小）；在其间模式降水估计偏少地区，正（负）的误差趋势意味着该地模式降水估计偏少情况趋于减弱（增强），即误差变小（大）。对比图 3d 和图 3a 可知，在华北、东北大部、河套及其南部、江苏沿海等地模式降水误差趋于减弱；在辽东半岛、河套以东的黄淮之间、西南大部、华南沿海等地的模式降水误差趋于增强。这些模式降水误差演变的复杂特征增加了使用 CMIP5 模式输出资料估计未来中国降水长期变化的不确定性。

3.3 排放情景差异

尽管三种情景下模式估计的年降水量误差分布非常相似，但是误差大小是有差异的。高排放情

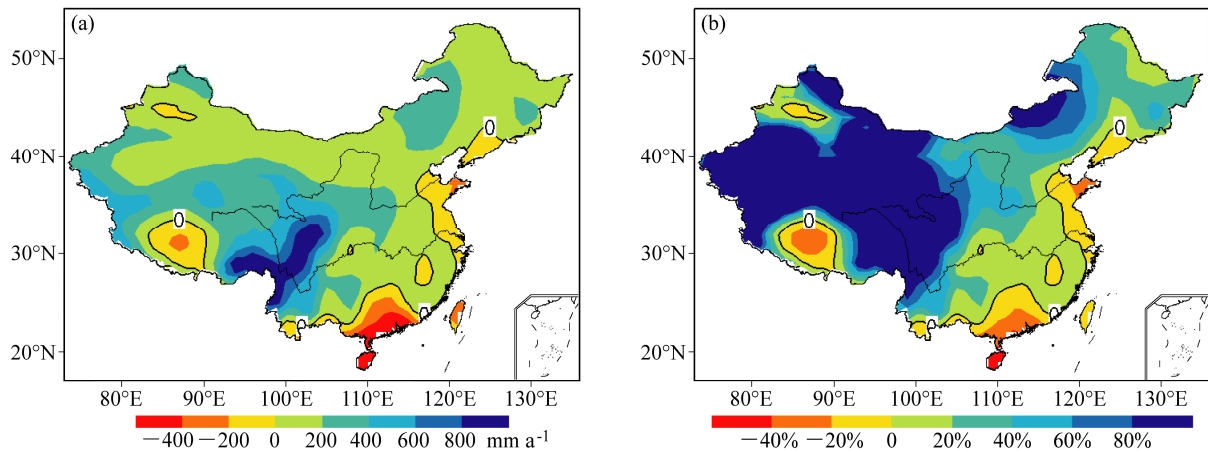


图 1 RCP4.5 情景下 10 个 CMIP5 模式集合平均对中国 2006~2013 年平均降水估计误差: (a) 降水量误差 (模拟-观测); (b) 降水误差百分率 [(模拟-观测)/观测]

Fig. 1 Differences between observations and projected annual precipitation in China by 10 CMIP5 models under RCP4.5 scenario for 2006–2013: (a) Precipitation difference; (b) difference percentage

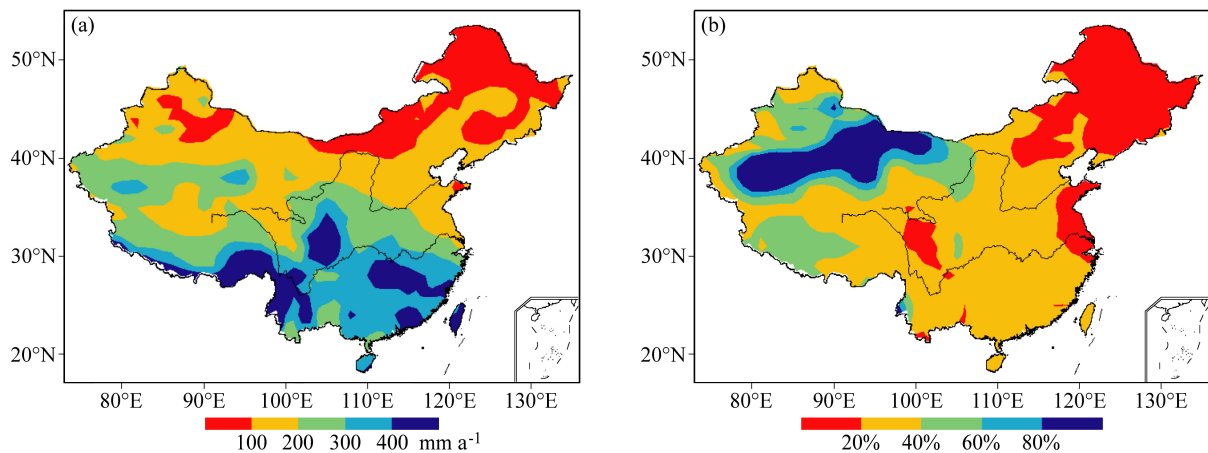


图 2 RCP4.5 情景下 10 个 CMIP5 模式对 2006~2013 年中国年降水预估的 (a) 标准差及 (b) 相对标准偏差

Fig. 2 The (a) standard deviation and (b) relative standard deviation among 10 CMIP5 models for 2006–2013 precipitation under RCP4.5 scenario

景 (RCP8.5) 与低排放情景 (RCP2.6) 之间的模式降水估计误差等价于两种情景下模式降水量的估计差异。计算表明这两种情景下年降水量误差的差异在一些地区比较明显, 尽管 CMIP5 模式的情景预估仅积分了 8 年 (2006~2013)。图 4a 显示, RCP8.5 相对于 RCP2.6 的年降水量估计在西北、长江至黄河之间地区、南方沿海及云南省等地偏多, 在华北和东北大部、青藏高原南部和江西北部等地偏少, 其中四川盆地、云南省、华南沿海和福建沿海偏多 60 mm 以上, 在青藏高原南部、云贵高原东部, 降水估计偏少 60 mm 以上, 在华北和东北南部偏少 20~40 mm。从相对差异来看 (图 4b), 全国大部分地区差异并不明显, 只在西北西部的部分地区年降水误差差异达到 40%~60%, 个别地区达到

80%, 在青藏高原西部的部分地区降水误差减小 20% 以上。因此, 提高排放情景对年降水量估计影响明显的地区主要集中在我国西部的部分地区, 对东部地区影响不大。鉴于三种情景下模式降水误差分布的相似性, 对比图 4b 和图 1b 不难发现, 高排放情景使得西北大部和青藏高原北部的年降水量估计偏多的现象增强, 但使得华北、东北大部、辽东半岛、山东半岛、东南沿海、华南沿海及云贵高原大部的降水量估计误差变小。因此, 不同地区模式年降水量估计的精度随排放路径情景而变, 对于全国而言并不存在一致的模式降水最优排放路径情景。这可能与模式或集合模式本身的误差分布特征有关。因此, 对于一个地区而言, 应该选择最适合于当地的模式情景降水估计, 尽管它可能与实际

的排放情景偏离较远。

4 模式季节降水估计误差

通常，所谓季节是指天文季节，它是根据地球的公转将一年划分为四个季节，即春季、夏季、秋

季和冬季，并规定每个季节长度为三个月。这种季节划分在中纬度能基本契合气候的变化特征，但在较低纬度却不尽然（侯威等，2011）。例如，一般在热带地区仅有雨季和旱季之分。中国大部分地区属于东亚季风区，华南沿海的季风降水即华南前汛

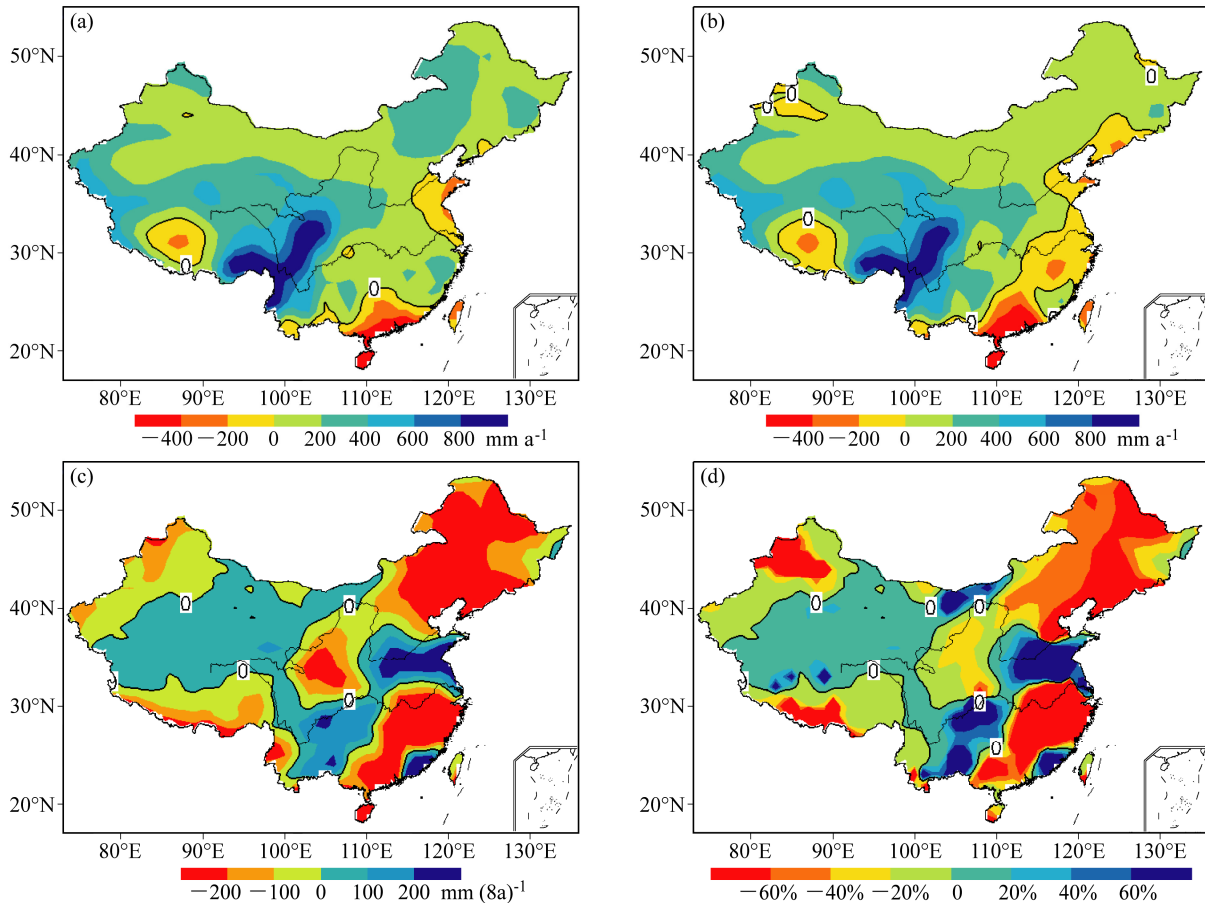


图3 RCP4.5 情景下 (a) 2006~2009 及 (b) 2010~2013 模式年降水量误差和 (c) 2006~2013 年降水量误差趋势及其 (d) 百分率
Fig. 3 Deviation of projected precipitation for (a) 2006~2009 and (b) 2010~2013, (c) trend of precipitation for 2006~2013 and (d) its percentage, under RCP4.5 scenario

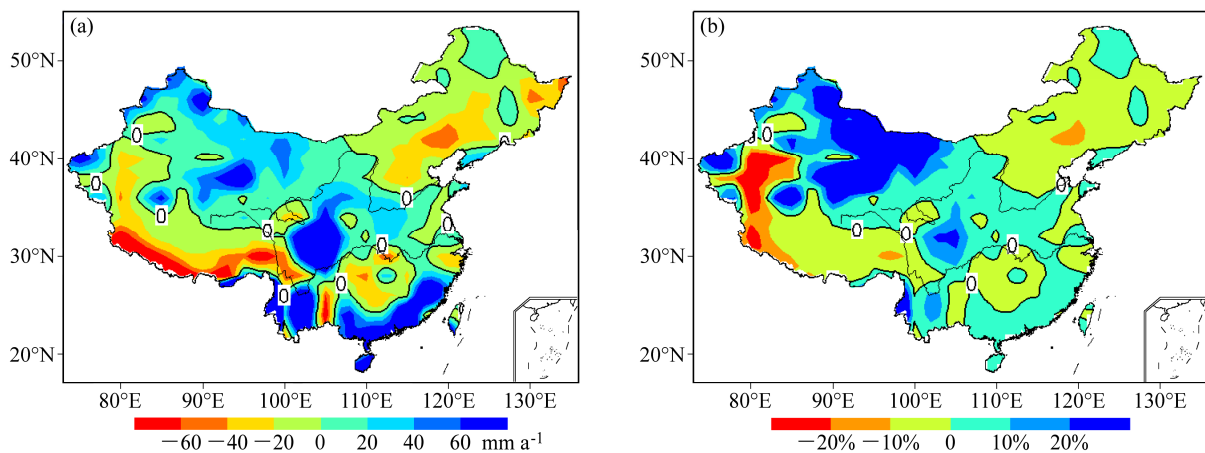


图4 RCP8.5 与 RCP2.6 情景下模式 2006~2013 年降水量 (a) 差异及其 (b) 百分率
Fig. 4 Difference in projected precipitation between RCP8.5 and RCP2.6 scenarios in China for 2006~2013: (a) Precipitation difference; (b) difference percentage

期降水始于 5 月, 南海季风爆发或更早。因此, 为了兼顾南方与北方气候降水的差异, 我们仅将 12 个月划分为夏半年和冬半年, 前者定义为 5 月至 10 月, 属于季风影响的季节, 后者定义为当年 11 月至来年 4 月。考虑到所研究的序列长度太短, 在计算冬半年降水时, 将当年 1~4 月和 11~12 月合并近似作为冬半年。

4.1 降水误差

10 个模式集合在三种典型路径排放情景下估计的 2006~2013 年夏半年或冬半年降水量均存在明显的误差。相对而言, 冬半年模式降水量估计偏多区域明显大于夏半年。对于 RCP4.5 情景, 夏半年在中国东部和南部沿海、青藏高原南部和新疆的天山山区等地, 模式降水偏少, 其余地区均偏多(图 5a); 在冬半年, 除了在华南沿海的部分地区及海南省的模式降水量偏小外, 全国其余地区普遍偏多(图 5c)。从模式降水估计的相对误差看, 夏半年模式降水明显偏多($>20\%$)地区, 除了华北北部

和东北西部外, 主要集中在中国西部; 模式降水明显偏少($<-20\%$)的地区, 除了青藏高原南部和新疆的个别地区外, 主要集中在中国东部和海南沿海、海南岛及台湾等地(图 5b)。在冬半年, 模式降水明显偏少的地区只有海南省和广东沿海, 在中国北方、西南及青藏高原大部分地区模式降水明显偏多(图 5d)。对比冬、夏半年模式降水误差分布的差异可以发现, 模式降水估计偏多地区多位于山区和冬季, 说明这些误差可能与模式分辨率低、固体降水物理过程描述不完善等有关。另一方面, 模式降水估计明显偏少的地区主要集中在夏半年的东亚季风区的东南沿海, 说明, 除了模式分辨率问题外, 这些误差可能还与其积云对流参数化方案不完善, 或季风过程模拟不好等有关。

4.2 季节降水误差趋势

模式季节降水误差也随时间变化, 其趋势等价于模式季节降水趋势与 CRU 格点降水趋势之差。同样, 季节降水误差趋势也由其 2010~2013 年平

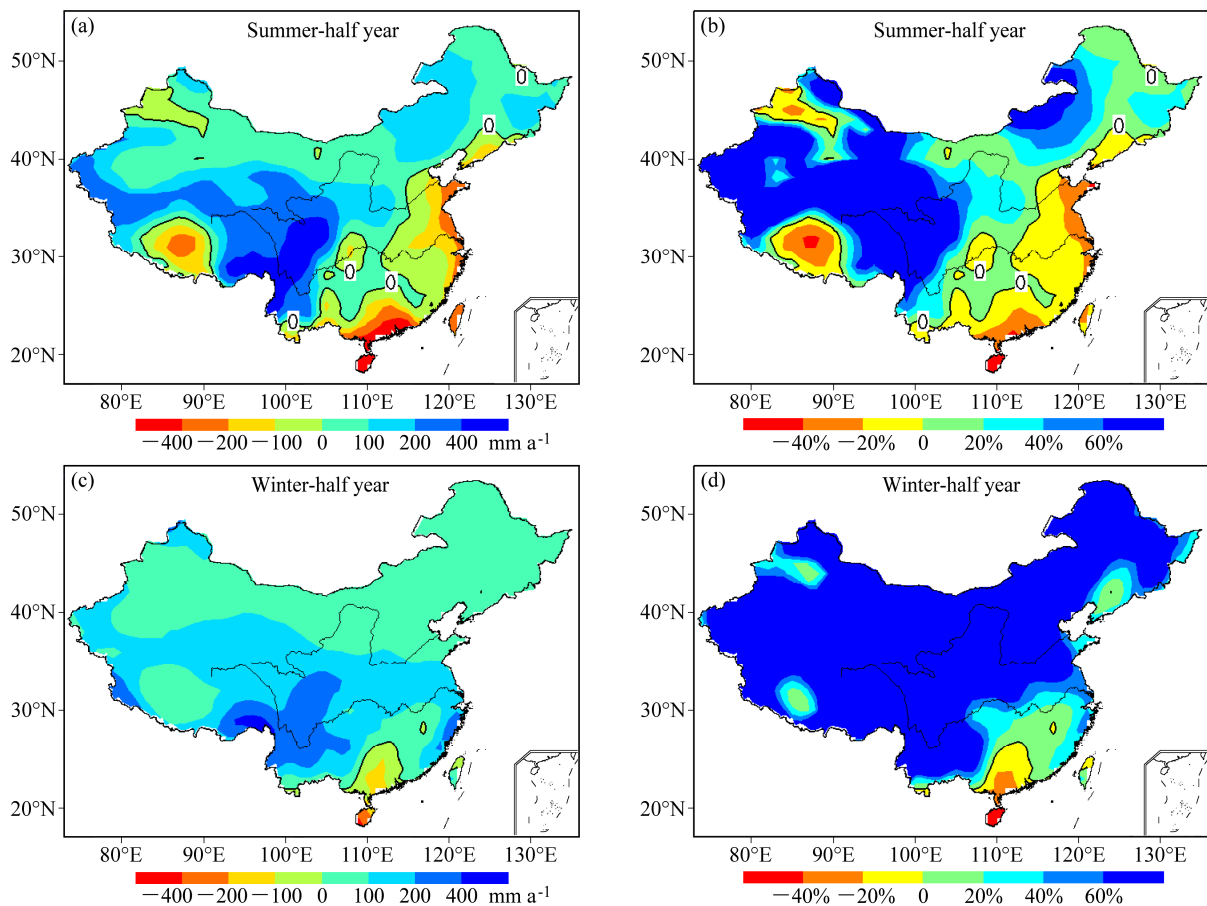


图 5 RCP4.5 情景下中国 2006~2013 夏半年(5~10 月)和冬半年(11~4 月)模式降水误差(左)及其百分率(右): (a, b) 夏半年; (c, d) 冬半年
Fig. 5 Deviation in projected precipitation (left) and its percentage (right) in China for 2006–2013 by CMIP5 models under RCP4.5 scenario: (a, b) Summer-half year (May–October); (c, d) winter-half year (November–April)

均值减去 2006~2009 年的平均值算得。计算表明, 三种路径情景(RCP2.6, RCP4.5, RCP8.5)下 2006~2013 年冬半年或夏半年的降水误差趋势分布均非常相似(图略), 这里仅给出 RCP4.5 的结果。

在 RCP4.5 情景下, 夏半年模式降水误差趋势为负的地区主要出现在东北、华北、河套、青藏高原南端、江南中东部及华南沿海等地, 其余大部分地区模式降水误差趋势为正(图 6a), 在华北、东北及河套等地模式降水误差趋势达到 -200 mm (8a)⁻¹及其以下, 其误差百分率趋势也均小于 -20% (8a)⁻¹(图 6b); 在西北西部的部分地区、西南大部及黄淮之间等地, 模式降水误差呈明显增强趋势($>20\%$); 在冬半年, 全国大部分地区模式降水误差趋势为正(图 6c), 其中河套、华北西部、江南西部、广东及海南省等地区模式降水误差趋势明显, 仅在东北南部、江南东部和新疆北部等部分地区模式降水误差趋势为负值, 呈明显下降趋势(图 6d)。

一个地区模式降水误差的未来趋势也与当地误差特征本身有关。对于前四年(2006~2009)冬或夏半年模式降水估计偏多地区, 正(负)的模式降水误差趋势意味着降水偏多情形趋于增强(减弱); 在模式降水估计偏少地区, 正(负)的模式降水误差趋势意味着降水偏少情形趋于减弱(增强)。因此, 比较图 6b 和图 7a 可以发现, 夏半年模式降水估计误差趋于明显减小 [$<-20\%$ (8a)⁻¹] 的地区有, 东北、华北大部及河套等地; 模式降水误差趋于明显增加 [$>20\%$ (8a)⁻¹] 的地区出现在辽东半岛、淮河流域、西北西部、西南部分地区等。对比图 6d 和图 7b 不难发现, 冬半年模式降水误差呈明显增加趋势的地区位于河套、华北西部、江南西部、广东及海南省等地; 模式降水误差趋于明显减弱的地区出现在东北南部、江南东部及新疆北部等地。因此, CMIP5 模式的季节降水误差分布形势复杂, 且是非定常的。这增加了未来降水预估误差订正的难度。

4.3 排放情景差异

对于季节降水而言, RCP8.5 和 RCP2.6 情景下的模式降水量误差也存在差异, 且等价于两种情景下的季节降水量差异。2006~2013 年期间, 夏半年 RCP8.5 相对于 RCP2.6 的降水量在华北、东北大部、青藏高原南部、西南及江南西部等地偏少, 其余地区偏多(图 8a); 冬半年, 在东北南部、黄河流域、

长江中下游及青藏高原南部降水估计偏小, 其余地区偏多(图 8c)。

从模式降水量的相对差异看(图 8b), 随着温室气体排放增强, 夏半年 RCP8.5 相对于 RCP2.6 降水量明显增长($>20\%$)的地区主要集中在中国西北部和四川盆地的部分地区, 明显减弱($<-20\%$)的地区位于青藏高原西部和华北的部分地区, 其余地区变化不明显; 在冬半年, RCP8.5 模式降水量明显增大区域扩大, 包括西北大部、华北北部和云贵高原等地, 降水量明显减少的地区主要在青藏高原南部和西部、甘肃南部等地, 其余地区变化不大(图 8d), 即排放情景对当地降水的影响不大。对于 2006~2013 年 RCP2.6 模式降水估计偏多地区, RCP8.5 相对于其模式降水明显偏多(少), 意味着该地区的降水估计偏多现象会随着排放强度增加而明显增强(减弱), 即误差明显增大(变小); 反之, 对于 RCP2.6 模式降水偏少地区, RCP8.5 的模式降水量明显偏多(少), 意味着该地区的降水估计偏少现象会随着排放强度增加而明显减弱(增强), 即误差明显变小(增大)。鉴于三种典型路径排放情景下模式降水误差相似的特点, 对比图 8b, 8d 和图 7b, 7d 不难发现, 夏半年模式降水误差随排放强度明显增加的地区出现在西北中部、四川盆地及青藏高原西部等部分地区, 模式降水误差随排放强度减小的地区只有青藏高原西端的个别地区; 在冬半年, 模式降水误差随排放强度明显增加的地区有西北大部、华北北部、云贵高原及青藏高原北部等地, 降水误差随排放强度明显减小的地区位于甘肃东部、青藏高原南部和西部等地。这些复杂的模式误差特征表明, 不同路径情景下不同季节、不同地区的 CMIP5 模式集合降水估计的不确定性是不一样的。

5 年际降水预估误差与 ENSO 循环

ENSO (El Niño/La Niña and Southern Oscillation) 循环对全球气候的年际变化有最为显著的影响 (Huang et al., 1998), 与每年中国的旱涝分布密切相关 (王小玲和宋文玲, 2009)。ENSO 是指发生在热带中、东太平洋的大尺度海气相互作用的过程 (张人禾和巢纪平, 2002)。其中 El Niño 是指赤道中东太平洋海表温度明显偏暖的现象, 属于 ENSO 的正位相, 或称之为暖位相; La Niña 是指赤道中东太平洋海温明显偏冷的现象, 属于 ENSO 的负位

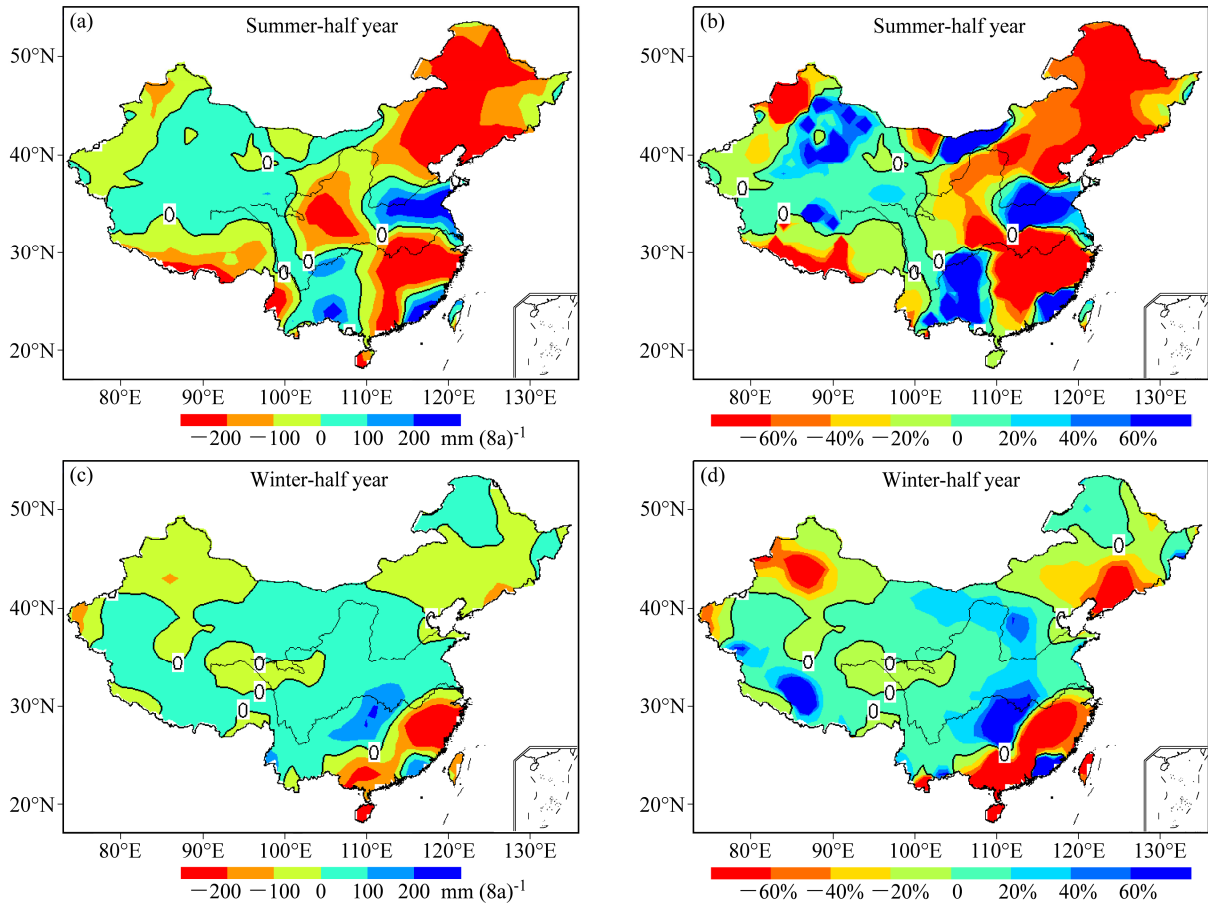


图 6 RCP4.5 情景下中国 2006~2013 夏半年和冬半年降水量误差趋势 (左) 及其百分率 (右): (a, b) 夏半年; (c, d) 冬半年
 Fig. 6 2006-2013 trend of precipitation deviation between the model ensemble and observation (left) and its percentage (right) under RCP4.5 scenario: (a, b) Summer-half year; (c, d) winter-half year

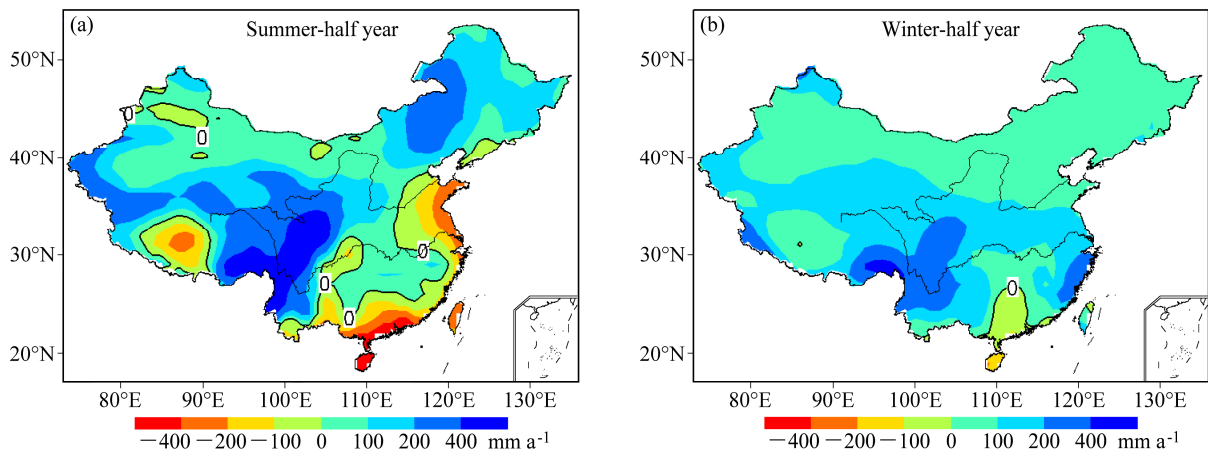


图 7 RCP4.5 情景下中国 2006~2009 (a) 夏半年和 (b) 冬半年模式降水量误差分布
 Fig. 7 Deviation in projected 2006-2009 precipitation by 10 CMIP5 models under RCP4.5 scenario for the (a) summer-half year and (b) winter-half year

相, 或称之为冷位相。而南方涛动 (SO) 是在广阔的热带太平洋和印度洋海平面气压场之间存在的跷跷板现象, 与 ENSO 循环关联。根据日本气象厅 (JMA) 公布的 ENSO 指数 (<http://coaps.fsu.edu/jma>), 2006~2013 年期间共出现了两次 El Niño 事件和两次 La Niña 事件, 其中 2006 年和 2009 年定为 El Niño 年, 2007 和 2010 年定为 La Niña 年, 即每个 El Niño 事件后紧跟着一个 La Niña 事件。众

相, 或称之为冷位相。而南方涛动 (SO) 是在广阔的热带太平洋和印度洋海平面气压场之间存在的跷跷板现象, 与 ENSO 循环关联。根据日本气象厅 (JMA) 公布的 ENSO 指数 (<http://coaps.fsu.edu/jma>), 2006~2013 年期间共出现了两次 El Niño 事件和两次 La Niña 事件, 其中 2006 年和 2009 年定为 El Niño 年, 2007 和 2010 年定为 La Niña 年, 即每个 El Niño 事件后紧跟着一个 La Niña 事件。众

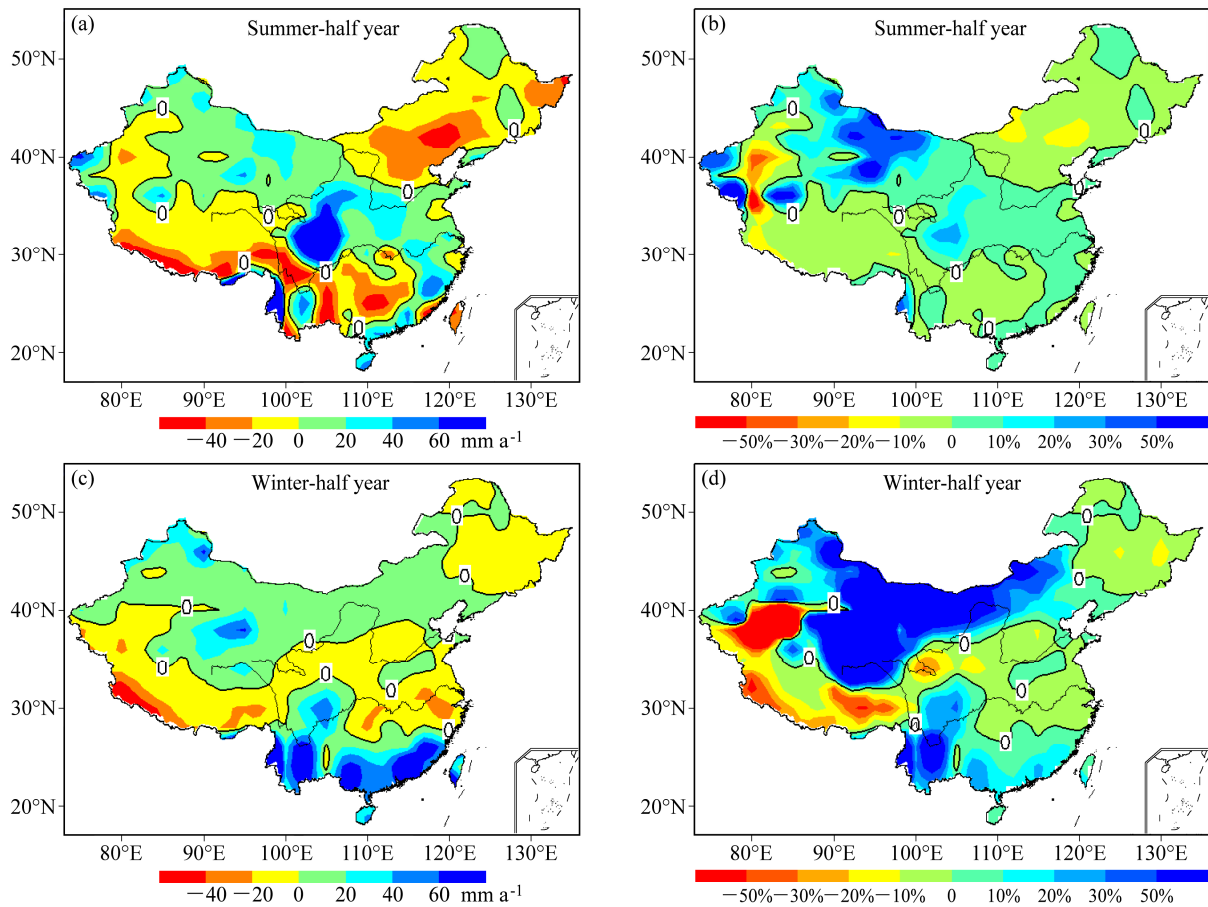


图8 RCP8.5与RCP2.6情景下2006~2013年模式降水量估计误差差异(左)及其百分率(右):(a,b)夏半年;(c,d)冬半年

Fig. 8 Difference in projection deviation between RCP8.5 and RCP2.6 scenarios (left) and its percentage (right) for 2006~2013: (a, b) Summer-half year; (c, d) winter-half year

所周知,一般这两种事件均在圣诞节前后达到最强,通常次年5月是个转换点。因此,若根据天文定年,会将一个完整的El Niño或La Niña事件撕裂,不利于完整刻画一个ENSO事件及其对年平均气温或降水的影响。为此,科学家不得不将其分为El Niño/La Niña当年及次年。为了克服天文定年的缺陷,我们用5月至次年4月定义一个ENSO“年”(简记为年,下同),即2006年/2009年5月至2007年/2010年4月定义为El Niño年,2007年/2010年5月至2008年/2011年4月定义为La Niña年,并将两个相同事件的年降水量平均作为该事件的合成降水分布。

在RCP4.5情景下,模式对El Niño年的降水估计,除了在东南沿海一带偏少外,其余地区均偏多(图9a),其中青藏高原东部偏多600~800 mm以上,广东沿海偏少400 mm左右。从降水误差百分率看,在El Niño年中国西部和华北北部模式降水

估计明显偏多(>20%),仅在东部沿海和海南省明显偏少(<-20%) (图9b);而在La Niña年中国大部分地区的模式降水误差分布与El Niño年相近(图9c),仅在东南沿海部分地区转为明显偏多,在山东半岛和辽宁省等部分地区转为明显偏少(图9d)。这两种事件下相似的模式降水误差分布说明,大范围的模式降水估计误差可能是模式本身存在问题,赤道太平洋海温变化引起的降水误差变化仅仅局限于环渤海湾及东南沿海的部分地区。这表明热带海温的异常强迫对中国大陆的模式降水误差分布影响不大。

尽管El Niño和La Niña年的模式降水估计误差比较接近,分布也类似,但进一步的计算表明,模式降水年际之间的差异依然比较明显。计算的RCP4.5情景下的2006~2013年际降水误差的标准差,呈现东南大、西北小的走势(图10a),与年降水量的气候分布类似。模式年际降水误差百分率间

的标准差显示 (图 10b), 在中国大部分地区差异较小, 大多都在 40% 以下, 东部地区多低于 20%, 华北北部略高, 青藏高原西北部和新疆东部误差百分率年际差异较大, 超过 80%。这些结果表明, CMIP5 模式集合对于降水的年际变化估计, 在中国的中、

东部有一定的参考价值, 但在西北误差较大。

6 结论与讨论

综上所述, 在三种典型路径排放情景下, 所选的 10 个 CMIP5 模式对 2006~2013 年中国年及季

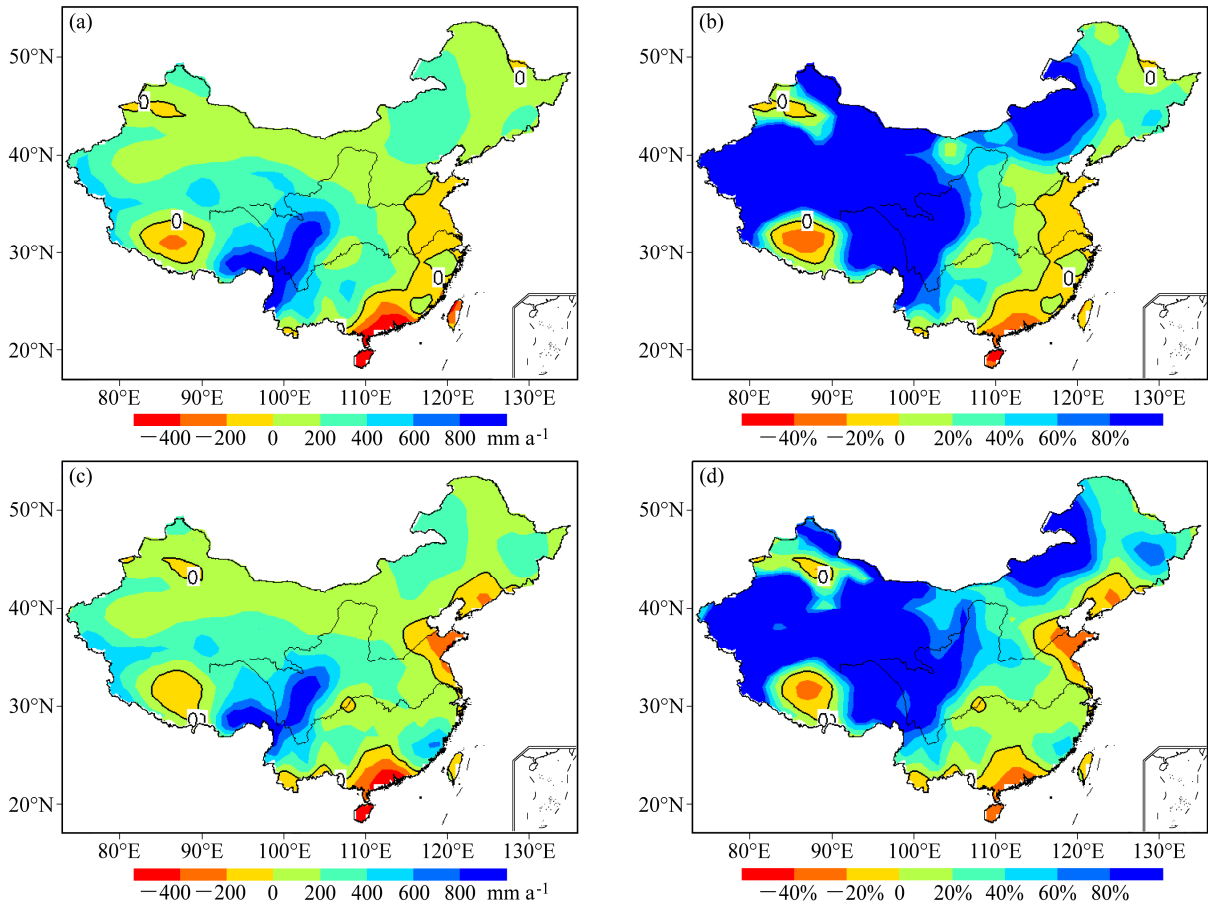


图 9 RCP4.5 情景下 (a, b) El Niño 和 (c, d) La Niña 年 (5 月至来年 4 月) 中国年降水量误差 (左) 及其百分率 (右)
 Fig. 9 Deviation in projected precipitation by the model ensemble (left) and its percentage (right) for (a, b) El Niño and (c, d) La Niña years under RCP4.5 scenario

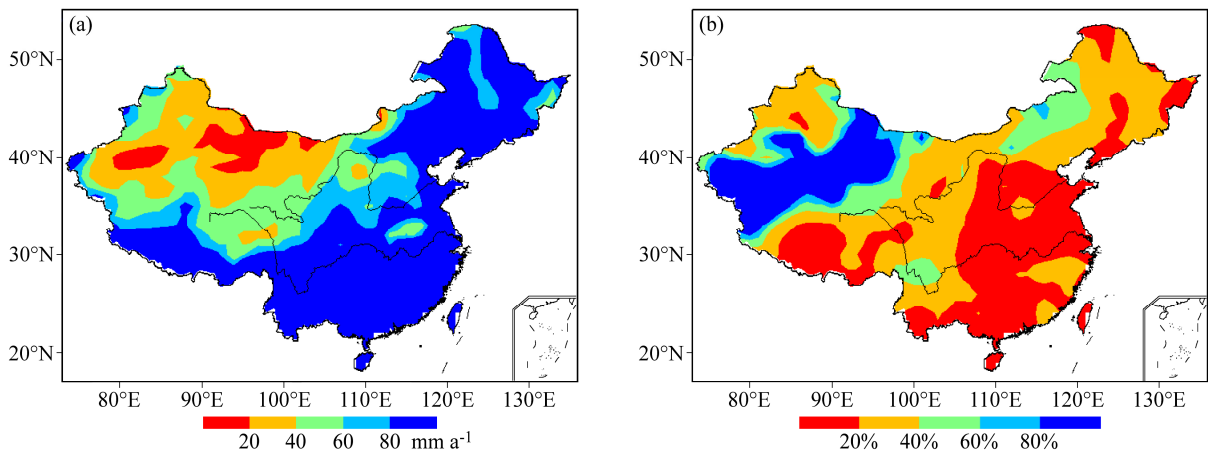


图 10 RCP4.5 情景下 2006~2013 年 CMIP5 模式估计的中国年降水误差的 (a) 年际标准差及 (b) 误差百分率间的年际标准差
 Fig. 10 Standard deviation of (a) interannual precipitation bias and (b) its percentage for projected 2006–2013 annual precipitation in China under RCP4.5 scenario

节降水的预估都存在一定的误差,其地理分布也比较相似,其主要特征简述如下:

(1) 模式集合估计的年降水量在大部分地区都偏多,东南和华南沿海偏少,明显偏多地区主要位于西部,明显偏少的地区仅局限于华南沿海、海南省和山东半岛等地。

(2) 模式降水估计在冬半年明显偏多,仅广东沿海和海南岛偏少;夏半年在东部季风区误差较小,明显偏多地区集中在青藏高原及西北部分地区,沿海地区降水估计明显偏少。

(3) 2006~2013 年间模式降水量估计的误差趋势在东部季风区和东北地区比较明显,夏半年趋势相似于年降水量,但冬半年在中国大部分地区降水误差呈增加趋势,只有东北南部、新疆北部、江南中部等个别地区降水误差呈减少趋势。

(4) 模式降水误差随排放路径情景变化。RCP8.5 相对于 RCP2.6 的年降水差异明显的地区主要集中在西北西部和青藏高原西端,高排放导致西北的模式降水偏多现象加剧,但青藏高原的降水误差减少。夏半年的情形类似于年降水量,但在冬半年,除了青藏高原南部外,RCP8.5 情景下模式降水误差均偏大,即高排放情景导致西北、华北、青藏高原北部及云贵高原模式降水偏多情形加重。

(5) El Niño 与 La Niña 年的模式降水误差分布相似,仅在沿海的部分地区和华北北部误差比较明显。2006~2013 年模式降水误差年际变化呈现东南大、西北小的走势,但其误差百分率的年际差异在西北较大,中东部地区较小。

各类 CMIP5 模式降水误差特征及其差异主要反映了模式本身存在问题,如物理过程参数化的缺陷、模式分辨率不足或地形处理不够完善等;另一方面,也反映了排放情景或季节背景等对模式降水预估精度存在一定影响。分析这些误差特征可以发现改进模式的线索,提高模拟水平。例如,在沿海地区,模式降水偏少的现象主要出现在夏半年,说明模式模拟的季风降水偏弱,可能与模式的积云对流化方案或海气相互作用等物理过程描述不完善有关,也可能是无法模拟台风或热带气旋降水所致。再如,冬季模式降水普遍偏多的现象可能是由于模式固体降水或降雪物理过程存在较大缺陷。这些误差的存在说明,直接用 CMIP5 模式集合输出资料估计未来降水变化存在很大的不确定性,可能会误导潜在用户或决策者,增加未来经济发展规划

制定的不确定性。因此,在使用基于未来社会经济情景的 CMIP5 模式输出资料估计未来气候变化时,需要对其不确定性进行评估,降低风险。

参考文献 (References)

- Chen H P. 2013. Projected change in extreme rainfall events in China by the end of the 21st century using CMIP5 models [J]. *Chinese Sci. Bull.*, 58 (12): 1462–1472, doi:10.1007/s11434-012-5612-2.
- 陈晓晨, 徐影, 许崇海, 等. 2014. 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*, 10 (3): 217–225. Chen Xiaochen, Xu Ying, Xu Chonghai, et al. 2014. Assessment of precipitation simulations in China by CMIP5 multi-models [J]. *Adv. Climate Change Res. (in Chinese)*, 10 (3): 217–225, doi:10.3969/j.issn.1673-1719.2014.03.011.
- 董文杰, 周天军, 郭彦, 等. 2014. 气候现象及其与未来区域气候变化的联系 [J]. *气候变化研究进展*, 10 (1): 60–64. Dong Wenjie, Zhou Tianjun, Guo Yan, et al. 2014. Climate phenomena and their relevance for future regional climate change [J]. *Adv. Climate Change Res. (in Chinese)*, 10 (1): 60–64, doi:10.3969/j.issn.1673-1719.2014.01.013.
- 高学杰, 林万涛, Kucharsky F, 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, Kucharsky F, et al. 2004. A simulation of regional climate in China by using CCM3 and observed SST [J]. *Chinese J. Atmos. Sci. (in Chinese)*, 28 (1): 78–90, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2004.01.08.
- 高学杰, 徐影, 赵宗慈, 等. 2006. 数值模式不同分辨率和地形对东亚降水模拟影响的试验 [J]. *大气科学*, 30 (2): 185–192. Gao Xuejie, Xu Ying, Zhao Zongci, et al. 2006. Impacts of horizontal resolution and topography on the numerical simulation of East Asian precipitation [J]. *Chinese J. Atmos. Sci. (in Chinese)*, 30 (2): 185–192, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2006.02.01.
- 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]. *Atmos. Oceanic Sci. Lett.*, 6 (5): 381–386, doi:10.3878/j.issn.1674-2834.13.0029.
- 侯威, 孙树鹏, 张世轩, 等. 2011. 东亚地区大气环流的季节划分及其时空变化特征 [J]. *物理学报*, 60 (10): 781–789. Hou Wei, Sun Shupeng, Zhang Shixuan, et al. 2011. Season division and its temporal and spatial variation features of general atmospheric circulation in East Asia [J]. *Acta Physica Sinica (in Chinese)*, 60 (10): 781–789, doi:10.7498/aps.60.109201.
- Huang J P, Higurashi K, Shabbar A. 1998. The relationship between the North Atlantic Oscillation and El Niño–Southern Oscillation [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 25 (14): 2707–2710.
- IPCC. 2007. *Climate Change 2007: The Physical Science Basis* [M]. Solomon S D, Qin M, Manning Z, et al., eds. Cambridge, UK and New York, NY, USA: Cambridge University Press, 1009pp.
- IPCC. 2013a. *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Final Draft Underlying Scientific–Technical Assessment* [M]. Stocker T F, Qin D, Plattner G K, et al., eds. Cambridge, UK and New York, NY, USA: Cambridge University Press, 5.
- IPCC. 2013b. *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Summary*

- for Policymakers [M]. Stocker T F, Qin D, Plattner G K, et al., eds. Cambridge, UK and New York, NY, USA: Cambridge University Press, 19.
- 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, doi:10.1007/BF02918482.
- 姜燕敏, 黄安宁, 吴昊旻. 2015. 不同水平分辨率 BCC_CSM 模式对中亚地面气温模拟能力评估 [J]. *大气科学*, 39 (3): 535–547. Jiang Yanmin, Huang Anning, Wu Haomin. 2015. Evaluation of the performance of Beijing climate center climate system model with different horizontal resolution in simulating the annual surface temperature over Central Asia [J]. *Chinese J. Atmos. Sci. (in Chinese)*, 39 (3): 535–547, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1408.14133.
- 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 J. Atmos. Sci. (in Chinese)*, 33 (1): 109–120, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2009.01.10.
- 刘敏, 江志红. 2009. 13 个 IPCC AR4 模式对中国区域近 40a 气候模拟能力的评估 [J]. *南京气象学院学报*, 32 (2): 256–268. Liu Min, 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, doi:10.3969/j.issn.1674-7097.2009.02.013.
- Masson D, Knutti R. 2011. Spatial-scale dependence of climate model performance in the CMIP3 ensemble [J]. *J. Climate*, 24 (11): 2680–2692, doi:10.1175/2011JCLI3513.1.
- 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.
- Mitchell T D, Jones P D. 2005. An improved method of constructing a database of monthly climate observations and associated high-resolution grids [J]. *Int. J. Climatol.*, 25 (6): 693–712, doi:10.1002/joc.1181.
- Phillips T J, Gleckler P J. 2006. Evaluation of continental precipitation in 20th century climate simulations: The utility of multimodel statistics [J]. *Water Resour. Res.*, 42 (3): W03202, doi:10.1029/2005WR004313.
- 钱忠华, 侯威, 杨萍, 等. 2011. 最概然温度背景下不同气候态中国夏季极端温度事件时空分布特征 [J]. *物理学报*, 60 (10): 819–830. Qian Zhonghua, Hou Wei, Yang Ping, et al. 2011. Characteristics of spatiotemporal distribution of extreme temperature events over China mainland in different climate states against the backdrop of most probable temperature [J]. *Acta Physica Sinica (in Chinese)*, 60 (10): 819–830, doi:10.7498/aps.60.109204.
- 秦大河, Stocker T. 2014. IPCC 第五次评估报告第一工作组报告的亮点结论 [J]. *气候变化研究进展*, 10 (1): 1–6. Qin Dahe, Stocker T. 2014. Highlights of the IPCC Working Group I Fifth Assessment Report [J]. *Adv. Climate Change Res. (in Chinese)*, 10 (1): 1–6, doi:10.3969/j.issn.1673-1719.2014.01.001.
- Riahi K, Rao S, Krey V, et al. 2011. RCP8.5—A scenario of comparatively high greenhouse gas emissions [J]. *Climatic Change*, 109 (1–2): 33–57, doi:10.1007/s10584-011-0149-y.
- 沈永平, 王国亚. 2013. IPCC 第一工作组第五次评估报告对全球气候变化认知的最新科学要点 [J]. *冰川冻土*, 35 (5): 1068–1076. Shen Yongping, Wang Guoya. 2013. Key findings and assessment results of IPCC WGI Fifth Assessment Report [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology (in Chinese)*, 35 (5): 1068–1076, doi:10.7522/j.issn.1000-0240.2013.0120.
- Song F, Zhou T. 2014. Interannual variability of East Asian summer monsoon simulated by CMIP3 and CMIP5 AGCMs: Skill dependence on Indian Ocean–western Pacific anticyclone teleconnection [J]. *J. Climate*, 27 (4): 1679–1697, doi:10.1175/JCLI-D-13-00248.1.
- 苏涛, 封国林. 2014. 中国夏季大气水分循环特征及再分析资料对比分析 [J]. *物理学报*, 63 (24): 249201-1–249201-13. Su Tao, Feng Guolin. 2014. The characteristics of the summer atmospheric water cycle over China and comparison of ERA-Interim and MERRA reanalysis [J]. *Acta Phys. Sin. (in Chinese)*, 63 (24): 249201-1–249201-13, doi:10.7498/aps.63.249201.
- Taylor K E, Stouffer R J, Meehl G A. 2012. An overview of CMIP5 and the experiment design [J]. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 93 (4): 485–498, doi:10.1175/BAMS-D-11-00094.1.
- Thomson A M, Calvin K V, Smith S J, et al. 2011. RCP4.5: A pathway for stabilization of radiative forcing by 2100 [J]. *Climatic Change*, 109 (1–2): 77–94, doi:10.1007/s10584-011-0151-4.
- 田芝平, 姜大膀. 2013. 不同分辨率 CCSM4 对东亚和中国气候模拟能力分析 [J]. *大气科学*, 37 (1): 171–186. Tian Zhiping, Jiang Dabang. 2013. Evaluation of the performance of low- to high-resolution CCSM4 over East Asia and China [J]. *Chinese J. Atmos. Sci. (in Chinese)*, 37 (1): 171–186, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2012.12050.
- van Vuuren D P, Stehfest E, den Elzen M G J, et al. 2011. RCP2.6: Exploring the possibility to keep global mean temperature increase below 2°C [J]. *Climatic Change*, 109 (1–2): 95–116, doi:10.1007/s10584-011-0152-3.
- 王小玲, 宋文玲. 2009. ENSO 与登陆我国热带气旋的关系研究 [J]. *热带气象学报*, 25 (5): 576–580. Wang Xiaoling, Song Wenling. 2009. A study on relationships between ENSO and landfalling tropical cyclones in China [J]. *J. Trop. Meteor. (in Chinese)*, 25 (5): 576–580, doi:10.3969/j.issn.1004-4965.2009.05.008.
- 许崇海, 罗勇, 徐影. 2010. 全球气候模式对中国降水分布时空特征的评估和预估 [J]. *气候变化研究进展*, 6 (6): 398–404. Xu Chonghai, Luo Yong, Xu Ying. 2010. Assessment and projection for spatial-temporal distribution of precipitation in China based on global climate models [J]. *Adv. Climate Change Res. (in Chinese)*, 6 (6): 398–404, doi:10.3969/j.issn.1673-1719.2010.06.002.
- Xu C H, Xu Y. 2012. The projection of temperature and precipitation over China under RCP scenarios using a CMIP5 multi-model ensemble [J]. *Atmos. Oceanic Sci. Lett.*, 5 (6): 527–533.
- 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, doi:10.1080/16742834.2012.11447041.
- 翟建青, 占明锦, 苏布达, 等. 2014. 对 IPCC 第五次评估报告中有关淡水资源相关结论的解读 [J]. *气候变化研究进展*, 10 (4): 240–245. Zhai Jianqing, Zhan Mingjin, Su Buda, et al. 2014. The interpretation of freshwater resources in the Fifth Assessment Report of IPCC [J].

- Advances in Climate Change Research (in Chinese), 10 (4): 240–245, doi:10.3969/j.issn.1673-1719.2014.04.002.
- 张莉, 丁一汇, 孙颖. 2008. 全球海气耦合模式对东亚季风降水模拟的检验 [J]. 大气科学, 32 (2): 261–276. Zhang Li, Ding Yihui, Sun Ying. 2008. Evaluation of precipitation simulation in East Asian monsoon areas by coupled ocean–atmosphere general circulation models [J]. Chinese J. Atmos. Sci. (in Chinese), 32 (2): 261–276, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2008.02.06.
- 张人禾, 巢纪平. 2002. 对 ENSO 循环机理的一些新认识 [J]. 气候与环境研究, 7 (2): 175–183. Zhang Renhe, Chao Jiping. 2002. Some new aspects in understanding of ENSO cycle [J]. Clim. Environ. Res. (in Chinese), 7 (2): 175–183, doi:10.3969/j.issn.1006-9585.2002.02.005.
- 赵俊虎, 封国林, 张世轩, 等. 2011. 近 48 年中国的季节变化与极端温度事件的联系 [J]. 物理学报, 60 (9): 099205. Zhao Junhu, Feng Goulin, Zhang Shixuan, et al. 2011. Seasonal changes in China during recent 48 years and their relationship with temperature extremes [J]. Acta Physica Sinica (in Chinese), 60 (9): 099205.
- Zou L W, Zhou T J. 2013. Near future (2016–40) summer precipitation changes over China as projected by a regional climate model (RCM) under the RCP8.5 emissions scenario: Comparison between RCM downscaling and the driving GCM [J]. Adv. Atmos. Sci., 30 (3): 806–818, doi:10.1007/s00376-013-2209-x.