

吴蔚, 穆海振, 梁卓然, 等. 2016. CMIP5 全球气候模式对上海极端气温和降水的情景预估 [J]. 气候与环境研究, 21 (3): 269–281. Wu Wei, Mu Haizhen, Liang Zhuoran, et al. 2016. Projected changes in extreme temperature and precipitation events in Shanghai based on CMIP5 simulations [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 21 (3): 269–281, doi: 10.3878/j.issn.1006-9585.2016.14225.

CMIP5 全球气候模式对上海极端气温和降水的情景预估

吴蔚¹ 穆海振¹ 梁卓然² 刘校辰¹

¹ 上海市气候中心, 上海 200030

² 杭州市气象局, 杭州 310008

摘 要 基于国际耦合模式比较计划第五阶段 (Coupled Model Intercomparison Project Phase 5, 以下简称 CMIP5) 28 个模式的数值模拟结果和 1981~2010 年华东和上海气温和降水观测数据, 评估了该 28 个气候模式对华东和上海气温和降水的模拟能力, 并预估了 RCP4.5 (Representative Concentration Pathway 4.5) 情景下上海 2021~2030 年极端气温和降水气候的变化趋势和不确定性。结果表明: 与观测值相比, 模式对华东和上海年平均气温的模拟大多均值偏高、方差偏低; 对年总降水量的模拟大多均值偏高, 但方差以华东偏高、上海偏低为主; 26 个模式的气温变化趋势和 12 个模式的降水变化趋势与观测值相同。选出 8 个模式的预估结果表明: 与 2001~2010 年相比, 2021~2030 年上海冬天极端低温的出现日数 (冷夜日数) 呈减少趋势, 不确定性最小; 夏天暖夜日数呈增加的趋势, 不确定性较小; 其他极端气温事件的变化趋势则存在较大的不确定性, 冷夜指标的不确定性最大。强降水发生日数和强降水的强度都呈现增加的趋势, 且不确定性较小。

关键词 CMIP5 模式模拟 极端事件 预估 不确定性

文章编号 1006-9585 (2016) 03-0269-13

中图分类号 P467

文献标识码 A

doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2016.14225

Projected Changes in Extreme Temperature and Precipitation Events in Shanghai Based on CMIP5 Simulations

WU Wei¹, MU Haizhen¹, LIANG Zhuoran², and LIU Xiaochen¹

¹ Shanghai Climate Center, Shanghai 200030

² Hangzhou Meteorological Office, Hangzhou 310008

Abstract Based on climate and climate change scenarios simulated by 28 CMIP5 (Coupled Model Intercomparison Project Phase 5) models and observations of temperature and precipitation, the authors evaluate the performance of the 28 CMIP5 models in simulating temperature and precipitation in East China and Shanghai. Future changes in extreme temperature and precipitation events under the RCP4.5 (Representative Concentration Pathways 4.5) scenario are presented and uncertainties are assessed for the time period from 2021 to 2030. Compared with observations, annual mean temperature is overestimated while the variance is underestimated by most of the CMIP5 models in both East China and Shanghai. Analysis of precipitation indicates that the annual mean total precipitation simulated by most of the CMIP5 models are higher than that from observations, whereas the variance is higher in East China and lower in Shanghai than

收稿日期 2014-10-16; 网络预发表日期 2016-01-26

作者简介 吴蔚, 女, 1986 年出生, 硕士, 工程师, 研究方向为气候及气候变化。E-mail: ruogan0000@163.com

资助项目 2015 年节能降耗和应对气候变化基础工作和能力建设项目 SHXM-00-20150924-1712, 国家自然科学基金 41401661、41571044

Funded by 2015 Shanghai Capacity Building Project on Energy Saving, Emission Reduction and Response to Climate Change (Grant SHXM-00-20150924-1712), National Natural Science Foundation of China (Grants 41401661 and 41571044)

that from observations. For the historical simulation of climate change in Shanghai, the temperature trends simulated by 26 models and precipitation trends by 12 models are similar to the observation during 1986–2005. Based on the above results, eight CMIP5 global climate models have been selected to predict future extreme event changes in Shanghai. The results show that the number of extreme low temperature events (cold nights) is likely to decrease with the lowest level of uncertainty, while the number of extreme warm nights is likely to increase with a lower level of uncertainty. Large uncertainties exist in the projection of other climate variable indices, which may also change in the future. In particular, great uncertainties are found in the prediction of cold night index change. Both the frequency and intensity of heavy rain events are predicted to increase and uncertainties in such predictions are low.

Keywords CMIP5 simulation, Climate extreme, Projection, Uncertainty

1 引言

全球气候模式是进行全球以及区域尺度气候变化预估的主要手段。近年来国内外学者利用世界气候研究计划 (World Climate Research Program, 以下简称 WCRP) 的耦合模式比较计划第三阶段 (Coupled Model Intercomparison Project Phase 3, 以下简称 CMIP3) 全球气候模式的模拟结果对其在全球和区域气候变化的模拟能力进行了评估, 并对未来预估方面作了大量的研究 (许崇海等, 2007; Walsh et al., 2008; 江志红等, 2009)。尽管研究表明全球气候模式在全球尺度上有一定的预估能力, 但对区域乃至更小尺度的气候变化模拟能力缺乏系统的评价。

最近国际耦合模式比较计划第五阶段 (Coupled Model Intercomparison Project Phase 5, 以下简称 CMIP5) 数据已陆续对外发布, 这些模式代表了当前国际主要先进模式的最新版本, 较之前参与第四次评估报告的模式有了较大的改进, 情景实验设计也更为合理 (Taylor et al., 2012)。目前, 相关分析也已初步开展 (Xu C H and Xu Y, 2012; Xu Y and Xu C H, 2012; 杨绚等, 2014; 陈晓晨等, 2014; 周秀华和肖子牛, 2014)。

基于极端气候事件对经济、社会和自然生态系统的显著影响, 国内在极端事件的模拟检验和未来气候变化的预估方面, 早期已有了大量工作 (Gao et al., 2002; 许吟隆等, 2005; Zhang et al., 2006)。近年来, 任福民等 (2014) 回顾了关于极端事件的研究进展, 总结了国内在极端事件预测的主要方法。陈活泼 (2013) 利用 CMIP5 耦合模式结果对 RCP4.5 (Representative Concentration Pathway 4.5) 和 RCP8.5 (Representative Concentration Pathway 8.5) 情景下的中国不同级别降水未来演变特征进行了预估研究。徐影等 (2014) 利用 22 个 CMIP5 全球气候模式模拟结

果, 结合社会经济以及地形高度数据分析了 RCP8.5 排放情景下中国洪涝灾害风险。但是这些研究主要针对全国范围, 很少有针对特定区域, 尤其是城市尺度。而上海处在副热带季风区, 在全球变暖的大背景下, 其未来的气候变化趋势也将十分复杂, 因此有必要开展上海地区未来气候变化的情景预估研究。

本文通过对比 CMIP5 中 28 个模式 (表 1) 在当代气候 (1986~2005 年) 背景下对华东区域和上海区域年平均气温和年总降水量的均值、均方根误差、时间和空间相关系数、方差、趋势、差异性等参数的模拟结果, 挑选出适用于上海地区未来极端气温和降水事件预估的模式, 并据此预估了上海 2021~2030 年极端气温和降水事件的变化特征。

2 数据和方法

2.1 数据来源和方法

本文所用模式数据来自 CMIP5 模式 1901~2005 年历史情景和 2006~2030 年的 RCP4.5 未来情景 ([http://www.iiasa.ac.at/web-apps/tnt/RcpDb/dsd?Action=htmlpage&page=welcome\[2009-12-01\]](http://www.iiasa.ac.at/web-apps/tnt/RcpDb/dsd?Action=htmlpage&page=welcome[2009-12-01])) 下的逐月和逐日的最高气温、最低气温、平均气温、降水量资料, 其中 RCP4.5 情景是指到 2100 年辐射强迫稳定在约 4.5 W/m^2 , 相当于 CO_2 浓度达到了 650 ppm (parts per million, $1 \text{ ppm}=10^{-6}$), 略高于 SRES B1 (Special Report on Emissions Scenario B1) 情景下的 550 ppm。本文中用到的观测资料包括: 1) 1986~2005 年华东区域 478 个气象站 (图 1) 年平均气温和年总降水量; 2) 1986~2005 年上海 11 个气象观测站年平均气温和年总降水量; 3) 上海徐家汇站 1981~2010 年日最高气温、日最低气温和日降水量。由于不同资料之间水平分辨率各不相同, 为了方便比较, 把模式和观测资料全部插值到 1° (纬度) $\times 1^\circ$ (经度) 的分辨率。分析时华东区

表 1 28 个 CMIP5 气候模式的基本信息

Table 1 Basic informations of the 28 CMIP5 models

模式名称	研究机构	分辨率
ACCESS1-0	澳大利亚联邦科学与工业研究组织和 澳大利亚气象局 (CSIRO-BOM)	192×144
ACCESS1-3	CSIRO-BOM	192×144
BCC-CSM1-1	中国气象局北京气候中心 (BCC, CMA)	128×64
BNU-ESM	北京师范大学全球变化与地球系统科 学学院 (GCESS)	128×64
CanESM2	加拿大气候模式与分析中心 (CCCMA)	128×64
CCSM4	NCAR	288×192
CESM1-CAM5-1-FV2	NCAR	288×192
CMCC-CM	意大利欧洲地中海气候研究中心 (CMCC)	480×240
CMCC-CMS	CMCC	192×96
CSIRO-Mk3-6-0	澳大利亚联邦科学与工业研究组织和 昆士兰州气候变化卓越中心 (CSIRO- QCCCE)	192×96
EC-EARTH	欧洲中期天气预报中心 (ECMWF)	320×160
FGOALS-g2	中国科学院大气物理研究所 (CAS) 和 清华大学 (Tsinghua)	128×96
FIO-ESM	中国国家海洋局第一海洋研究所 (SOA)	128×64
GFDL-CM3	NOAA	144×90
GFDL-ESM2G	NOAA	144×90
GFDL-ESM2M	NOAA	144×90
GISS-E2-H	NASA	144×90
GISS-E2-R	NASA	144×90
HadGEM2-AO	英国气象局哈德来气候预测与研究 中心 (UKMO)	96×96
INMCM4	俄罗斯数值数学研究院 (INM)	180×120
IPSL-CM5A-LR	法国皮埃尔-西蒙拉普拉斯研究所 (IPSL)	96×96
IPSL-CM5A-MR	IPSL	144×143
MIROC5	日本气候系统研究中心 (CCSR), 国家 环境研究所 (NIES)	256×128
MIROC-ESM	日本海洋科学与技术中心 (JAMSTEC), 大气海洋研究所和国家环境研究所 (AORI&NIES)	128×64
MIROC-ESM-CHEM	JAMSTEC, AORI&NIES	128×64
MPI-ESM-LR	德国马克斯-普朗克气象研究所 (MPIM)	192×96
MRI-CGCM3	日本气象研究所 (MRI)	320×160
NorESM1-M	挪威气候中心 (NCC)	144×96

域范围选取 (22.5°N~38.5°N, 113°E~123°E), 共 187 个格点, 上海的范围选取 (30.5°N~31.5°N, 120°E~123°E), 共 8 个格点。

本文对气候事件未来变化趋势用百分率 E 来表示, 计算公式为

$$E = (X_f - X_h) \times 100\% / X_h, \quad (1)$$

其中, X_f 为气候事件的未来值, X_h 为气候事件的历史值。本文以 2001~2010 年作为基准期, 预估上海极端气温和降水事件的未来可能变化趋势, 表征未来极端天气气候事件较 2001~2010 年的变化趋

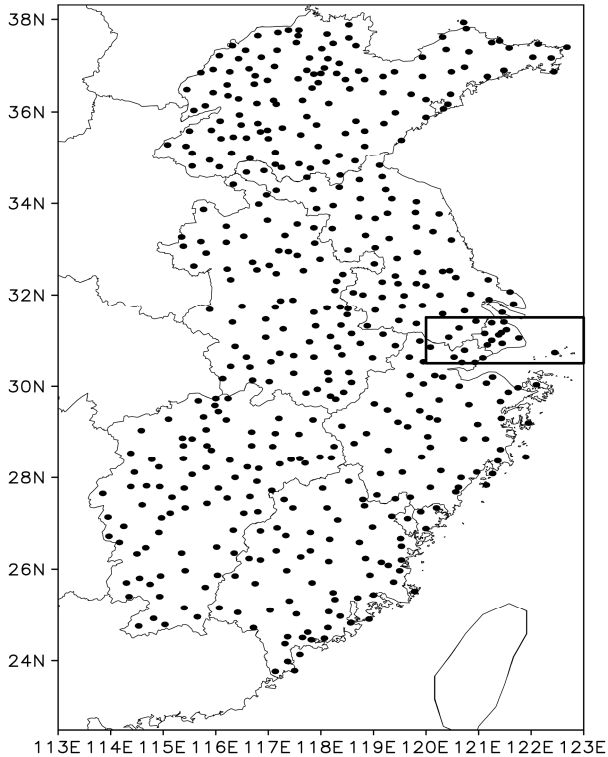


图 1 华东区域气象站点 (黑点) 分布 (矩形框表示文中所选上海区域范围)

Fig. 1 Distribution of meteorological stations (black dots) in East China (rectangle shows the grid point range of Shanghai selected in this study)

势。

采用差异系数 C 来表示模式预估结果的不确定性, 计算公式为

$$C = \left[\sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \times 100\% \right] / |\bar{x}|, \quad (2)$$

其中, x_i 为所研究变量的各模式结果, $\bar{x}$ 为多模式平均的结果, $|\bar{x}|$ 为多模式平均结果的绝对值, n 为所使用模式个数。差异系数越小, 说明模式预估结果的离散程度越小, 不确定性越小, 反之则越大。

2.2 极端气候事件定义

根据世界气象组织 (World Meteorological Organization, WMO) 气候委员会 (Commission for Climatology, CCI)/ WCRP 气候变化与可预测性项目 (Climate Variability and Predictability, CLIVAR) 气候变化检测、监测和指标专家组 (Expert Team on Climate Change Detection and Indices, ETCCDI) 定义 (<http://www.clivar.org/organization/etccd> [2013-11-17]), 本文中极端气温、降水事件的定义见表 2。

表 2 极端气温、降水事件的定义
Table 2 Definitions of the extreme temperature and precipitation events

极端气候事件名称	极端气候事件定义
暖昼指标	逐日最高气温序列的第 90 分位数数值, 如 1981~1990 年逐日最高气温从低到高排序, 取序列的第 90 分位数数值即为 1981~1990 年的暖昼指标, 文中取 10 年为一个序列, 观测数据时间段为 1981~2010 年共 30 年, 包括 3 个 10 年, 即 3 个暖昼指标, 模式数据时间段为 1981~2030 年共 50 年, 包括 5 个 10 年, 即 5 个暖昼指标
暖夜指标	同暖昼指标, 但为最低气温
冷夜指标	同暖夜指标, 但为第 10 分位数数值
暖昼日数	按照 30 年为一个基准年, 将 1981~2010 年的逐日最高气温从低到高排序, 取序列的第 90 分位数数值记为 T_{M90h} , 每年的暖昼日数为每年大于 T_{M90h} 的日数。文中观测数据时间段为 1981~2010 年共 30 年, 即 30 个暖昼日数; 模式数据时间段为 1981~2030 年共 50 年, 即 50 个暖昼日数
暖夜日数	同暖昼日数, 但为最低气温
冷夜日数	按照 30 年为一个基准年, 将 1981~2010 年的逐日最高气温从低到高排序, 取序列的第 10 分位数数值记为 T_{M10h} , 每年的冷夜日数为每年小于 T_{M10h} 的日数。文中观测数据时间段为 1981~2010 年共 30 年, 即 30 个冷夜日数; 模式数据时间段为 1981~2030 年共 50 年, 即 50 个冷夜日数
连续 6 日暖昼次数	按照暖昼日数的定义, 每年中满足至少连续 6 日 (包括 6 日) 为暖昼日数的出现次数
连续 6 日暖夜次数	同连续 6 日暖昼次数, 但为暖夜日数
强降水指标	雨日逐日降水量序列的第 99 分位数数值, 如 1981~1990 年雨日逐日降水量从低到高排序, 取序列的第 99 分位数数值即为 1981~1990 年的强降水指标, 文中取 10 年为一个序列, 观测数据时间段为 1981~2010 年共 30 年, 包括 3 个 10 年, 即 3 个强降水指标, 模式数据时间段为 1981~2030 年共 50 年, 包括 5 个 10 年, 即 5 个强降水指标
强降水日数	按照 30 年为一个基准年, 将 1981~2010 年的雨日逐日降水量从低到高排序, 取序列第 99 分位数数值记为 R_{99h} , 每年的强降水日数为每年大于 R_{99h} 的日数。文中观测数据时间段为 1981~2010 年共 30 年, 即 30 个强降水日数; 模式数据时间段为 1981~2030 年共 50 年, 即 50 个强降水日数

3 全球气候模式的模拟能力评价

3.1 华东区域气温和降水的模拟能力评估

本文评估了 28 个模式对当代气候(1986~2005 年)华东区域年平均气温和年总降水量的模拟性能, 可以看出, 各个模式对华东区域气温和降水的模拟存在较大的差异。分别以华东年平均气温和年总降水量的观测值作为参考序列, 对 28 个模式的模拟结果做差异性 t 检验。结果表明, 除了 ACCESS1-3 模拟的气温序列和 BCC-CSM1-1、CCSM4、MPI-ESM-LR、NorESM1-M 模拟的降水序列, 其他模式模拟的气温和降水序列与观测值的差异均通过 95% 的显著性检验; 28 个模式集合平均 (以下简称集合模式) 的气温和降水序列与观测值的差异也通过了 95% 的显著性检验。

从气温的模拟结果来看, 均值模拟 (图 2a) 偏高有 19 个模式, 偏低有 9 个模式, 与观测结果最为接近的是 ACCESS1-3 (比观测偏高 0.04 °C), 相差最大的是 INMCM4 (比观测值偏低 2.28 °C), 集合模式的结果比观测值偏高 0.33 °C; 模式对空间相关系数 (图略) 的模拟结果均通过 0.01 显著性水平检验 (187 个格点); 除了 FIO-ESM 和 GISS-E2-H, 其他 26 个模式和集合模式都模拟出了当代气候华

东区域气温线性增加的事实 (图略); 均方根误差 (图 3a) 最小的模式为 ACCESS1-3, 最大的为 INMCM4, 这与均值的模拟效果相同, 集合模式的均方根误差仅大于 ACCESS1-3; 方差模拟 (图 4a) 偏高有 12 个模式, 偏低有 16 个模式, 与观测值最为接近的模式为 CSIRO-Mk3-6-0, 集合模式的方差偏低, 结果仅优于 2 个模式 (MIROC-ESM 和 MIROC5); 与观测值的时间相关系数 (图略) 最大的模式为 CCSM4。

从降水的模拟结果来看, 均值模拟 (图 2b) 16 个模式偏多, 12 个模式偏少, 与观测最为接近的是 NorESM1-M (比观测偏高 3.06 mm), 相差最大的是 ACCESS1-3 (比观测值偏高 524.31 mm), 而此模式对华东年平均气温均值的模拟效果却最好, 集合模式比观测值偏高 32.88 mm; 模式对空间相关系数 (图略) 的模拟结果均通过 0.01 水平的显著性检验 (187 个格点); 华东区域年降水量并没有明显的线性变化趋势; 均方根误差 (图 3b) 最小的模式为 BCC-CSM1-1, 最大的为 ACCESS1-3, 集合模式的均方根误差最小; 方差模拟 (图 4b) 与观测值最为接近的模式为 INMCM4, 但此模式对华东年平均气温的均方根误差和均值的模拟效果最差, 集合模式的方差偏低, 结果优于 8 个模式; 与观测值的时间相关系

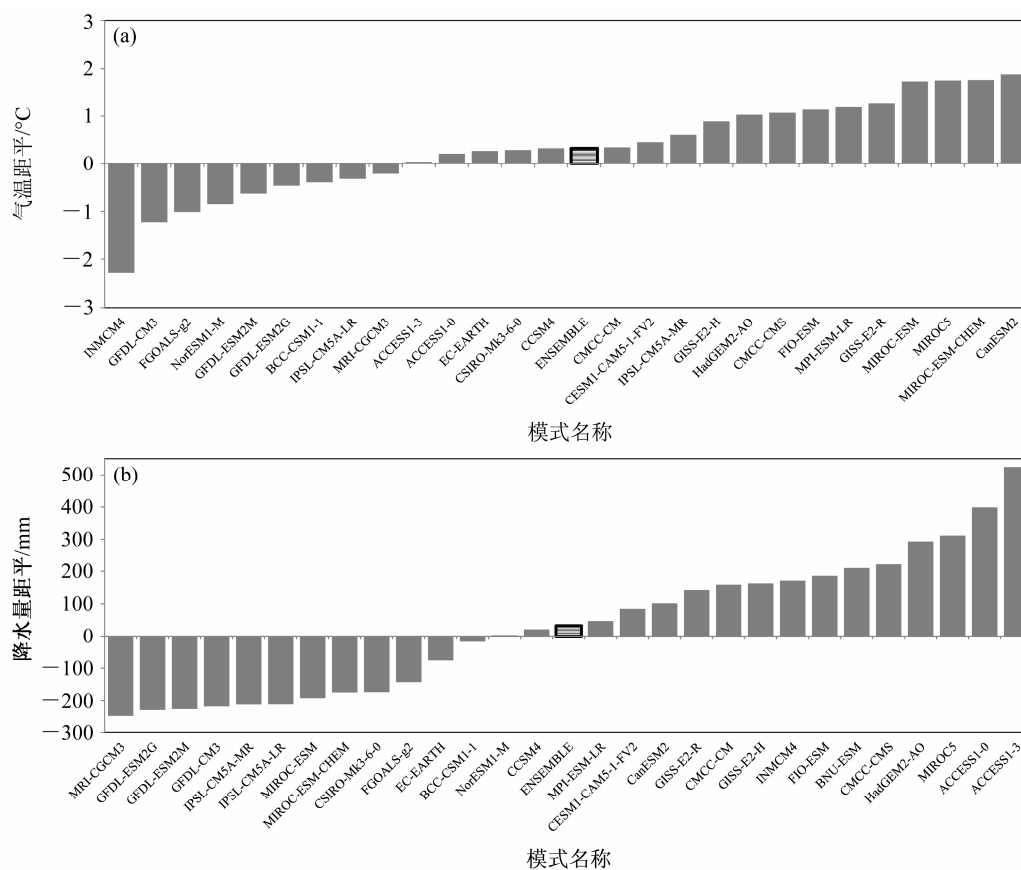


图2 CMIP5 的 28 个全球模式模拟的华东 1986~2005 年 (a) 年平均气温和 (b) 年总降水量与观测值的偏差

Fig. 2 Differences between observations and simulation of (a) annual mean temperature and (b) annual total precipitation from the 28 CMIP5 models in East China during 1986–2005

数 (图略) 最大的模式为 CMCC-CMS。

综合考虑以上参数的模拟结果:

(1) 均值和均方根误差在一定程度上都反映了模式对平均态的模拟能力, 两个参数在模式性能的比较上表现出几乎相同的特征, 因此选取均方根误差作为挑选模式的一个衡量标准。

(2) 模式对气温和降水的空间相关系数的模拟结果均通过 0.01 水平的显著性检验, 因此以此参数为标准所有模式均符合要求。

(3) 26 个模式 (除了 FIO-ESM 和 GISS-E2-H) 均模拟出气温的线性增加的趋势, 而华东区域年总降水量并未表现出明显的线性趋势, 因此华东区域线性趋势这个参数值无法用来衡量模式的模拟性能。同时, 模式中所模拟的时间与实际的时间并非完全吻合, 时间相关系数在一定程度上并不能完全反映模式的性能。因此, 线性趋势和时间相关系数不作为挑选模式的衡量标准。

(4) 集合模式的结果对均值的模拟偏高, 对方差的模拟偏低。与单个模式相比, 没有明显的优越

性。

(5) 大多数模式和集合模式对气温和降水序列的模拟与观测值有着显著的差异性。

本文按照反映模式结果平均态的均方根误差和反映模式结果偏离平均态分布的方差作为挑选模式的依据, 选取对均方根误差和方差模拟结果均在前 10 位的模式。因此, 对华东区域气温的评估结果表明, ACCESS1-0、CCSM4、CSIRO-Mk3-6-0、MRI-CGCM3 四个模式对华东区域气温的模拟能力比其他模式强。对华东区域降水的评估结果表明, BCC-CSM1-1、CSIRO-Mk3-6-0、EC-EARTH、NorESM1-M 四个模式对华东区域降水的模拟性能比其他模式强。

3.2 上海地区气温和降水的模拟能力评估

本文同时评估了 28 个模式和集合模式对上海年平均气温和年总降水量的模拟性能。分别以上海年平均气温和年总降水量的观测值作为参考序列, 对 28 个模式模拟的序列做差异性 t 检验。结果表明, 除了 BCC-CSM1-1、BNU-ESM、EC-EARTH、

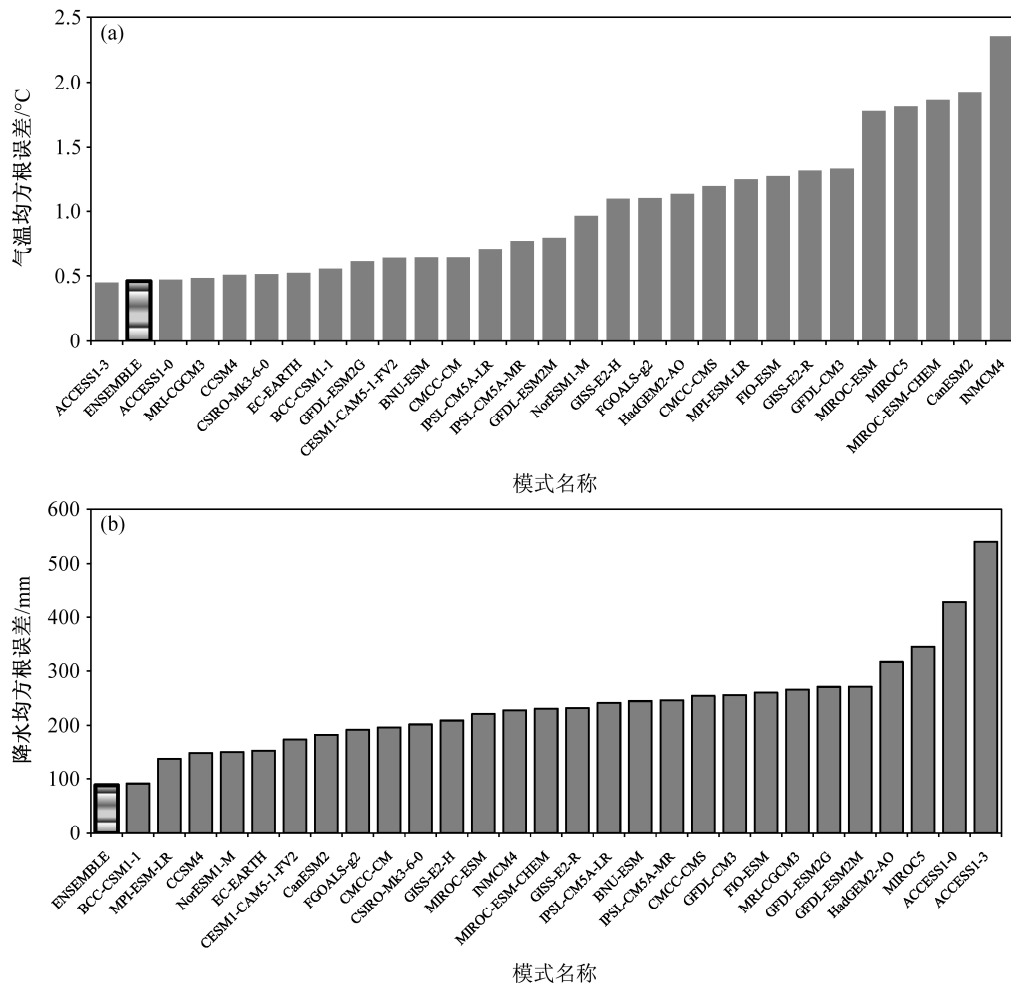


图3 CMIP5的28个全球模式模拟的华东1986~2005年(a)年平均气温和(b)年总降水量与观测值的均方根误差

Fig. 3 Root-mean-square errors of observations and simulation of (a) annual mean temperature and (b) annual total precipitation from the 28 CMIP5 models in East China during 1986–2005

GISS-E2-H、HadGEM2-AO 模拟的气温序列和 CSIRO-Mk3-6-0、GFDL-CM3、GFDL-ESM2M、GISS-E2-H、GISS-E2-R、MIROC-ESM、MIROC-ESM-CHEM、MPI-ESM-LR 模拟的降水序列,其他模式模拟的气温和降水序列与观测值的差异均通过 95%的显著性检验;集合模式的降水序列与观测值的差异通过了 95%的显著性检验,气温则没有。

从年平均气温的模拟结果来看,均值模拟(图略)13 个模式偏低,15 个模式偏高,与观测值最为接近的是 BCC-CSM1-1(比观测偏低 0.14°C),相差最远的是 CanESM2(比观测值偏高 3.33°C);集合模式的均方根误差(图 5a)最小,28 个模式中均方根误差最小的为 BCC-CSM1-1,最大的为 CanESM2;方差模拟(图 6a)26 个模式偏低,2 个模式偏高,与观测值最为接近的为 IPSL-CM5A-

MR,集合模式的方差最小,与观测值相差较大;与观测值的时间相关系数最大的模式为 MIROC-ESM;除了 FIO-ESM 和 GISS-E2-H,其他 26 个模式和集合模式都模拟出了 1986~2005 年上海气温线性增加的事实(图 7a)。

从年总降水量的模拟结果来看,均值模拟(图略)最好的是 MIROC-ESM-CHEM(比观测偏低 0.19 mm),最差的是 CMCC-CM(比观测值偏高 530.94 mm);均方根误差(图 5b)最小的模式为 GFDL-ESM2G,最大的为 ACCESS1-0,集合模式的均方根误差高于其中 3 个模式;方差模拟(图 6b)与观测值最为接近的模式为 CCSM4,集合模式模拟的方差最小,与观测值相差较大;与观测值的时间相关系数最大的模式为 GFDL-ESM2G;上海年降水量并没有显著的线性变化趋势(图 7b)。

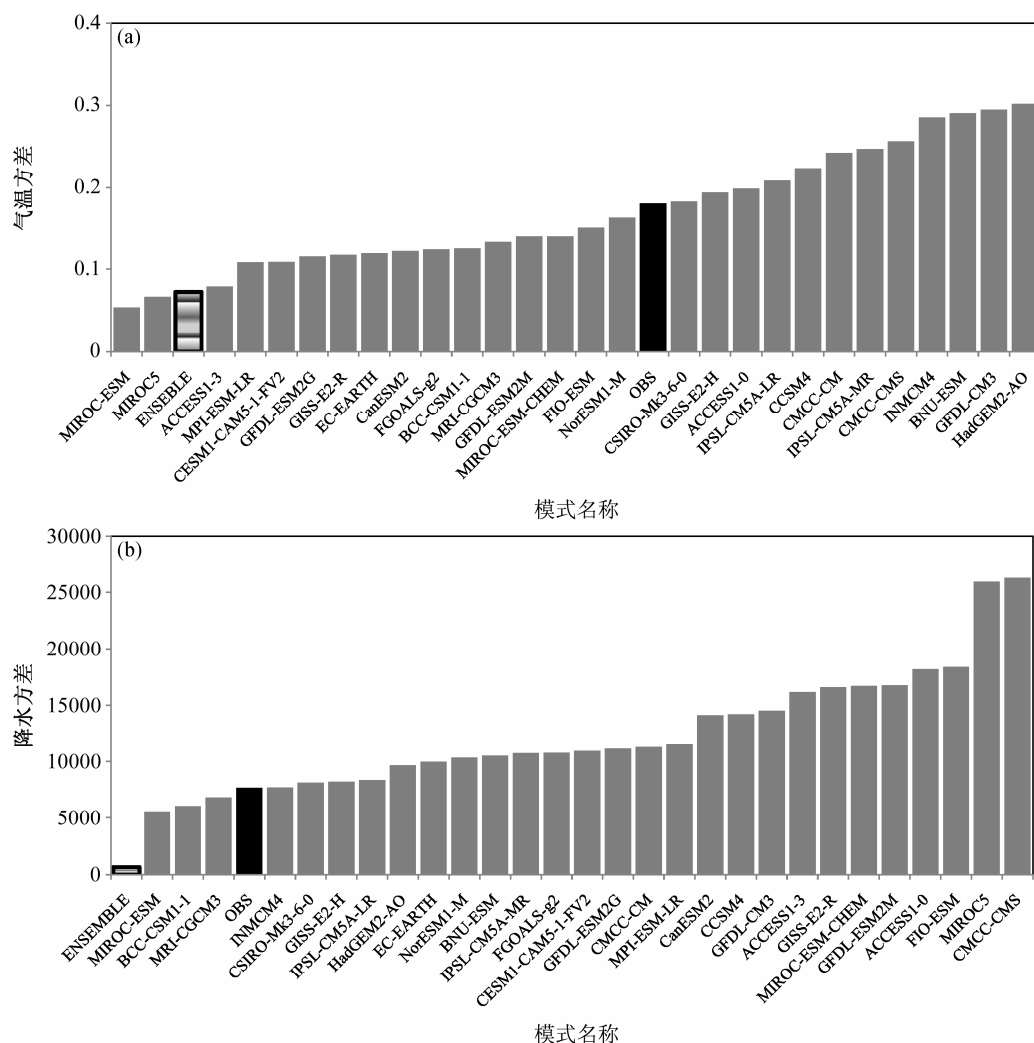


图4 CMIP5 的 28 个全球模式模拟的华东 1986~2005 年 (a) 年平均气温和 (b) 年总降水量与观测值的方差

Fig. 4 Variances of observations and simulation of (a) annual mean temperature and (b) annual total precipitation from the 28 CMIP5 models in East China during 1986–2005

总体来说,各个模式对上海气温和降水的模拟存在较大的差异,与华东区域的模拟结果也存在较大差异。模式对华东和上海年平均气温的均值和方差的模拟一致性较高,以均值偏高、方差偏低与观测值为主;对华东和上海年总降水量的均值模拟一致性较高,以偏高于观测值为主;对华东和上海年总降水量的方差模拟则相反,华东以偏高于观测值为主,上海以偏低于观测值为主。集合模式模拟的均方根误差优于单个模式,但方差偏小观测值较多。

按照对华东区域模式挑选标准,对上海地区气温的评估结果表明,CCSM4、BNU-ESM、HadGEM2-AO、IPSL-CM5A-MR 和 CMCC-CM 五个模式对上海气温的模拟能力比其他模式好;对上海区域降水的评估结果表明,GFDL-ESM2G 和 CCSM4 对上海

降水的模拟能力比其他模式好。

3.3 上海地区气温和降水变化趋势检验

考虑到本文主要利用模式结果对上海气温和降水的未来变化趋势进行预估,因此,需要重点检验模式对趋势的模拟能力。

1986~2005 年,上海年平均气温以 $0.87\text{ }^{\circ}\text{C}\text{ (10 a)}^{-1}$ 的线性趋势增加,升温趋势通过了 99.9% 的信度检验。从 28 个模式模拟结果(图 7a)来看,26 个模式和集合模式的模拟结果为线性增温,但是升温趋势都比观测值低,13 个模式的线性趋势通过 90% 的信度检验,其中 6 个模式和集合模式的结果通过 99% 的信度检验。26 个升温趋势的模式中, HadGEM2-AO 的升温趋势最大 [$0.58\text{ }^{\circ}\text{C}\text{ (10 a)}^{-1}$], ACCESS1-3 的升温趋势最小 [$0.01\text{ }^{\circ}\text{C}\text{ (10 a)}^{-1}$]。集合模式的升温趋势为 $0.29\text{ }^{\circ}\text{C}\text{ (10 a)}^{-1}$ 。

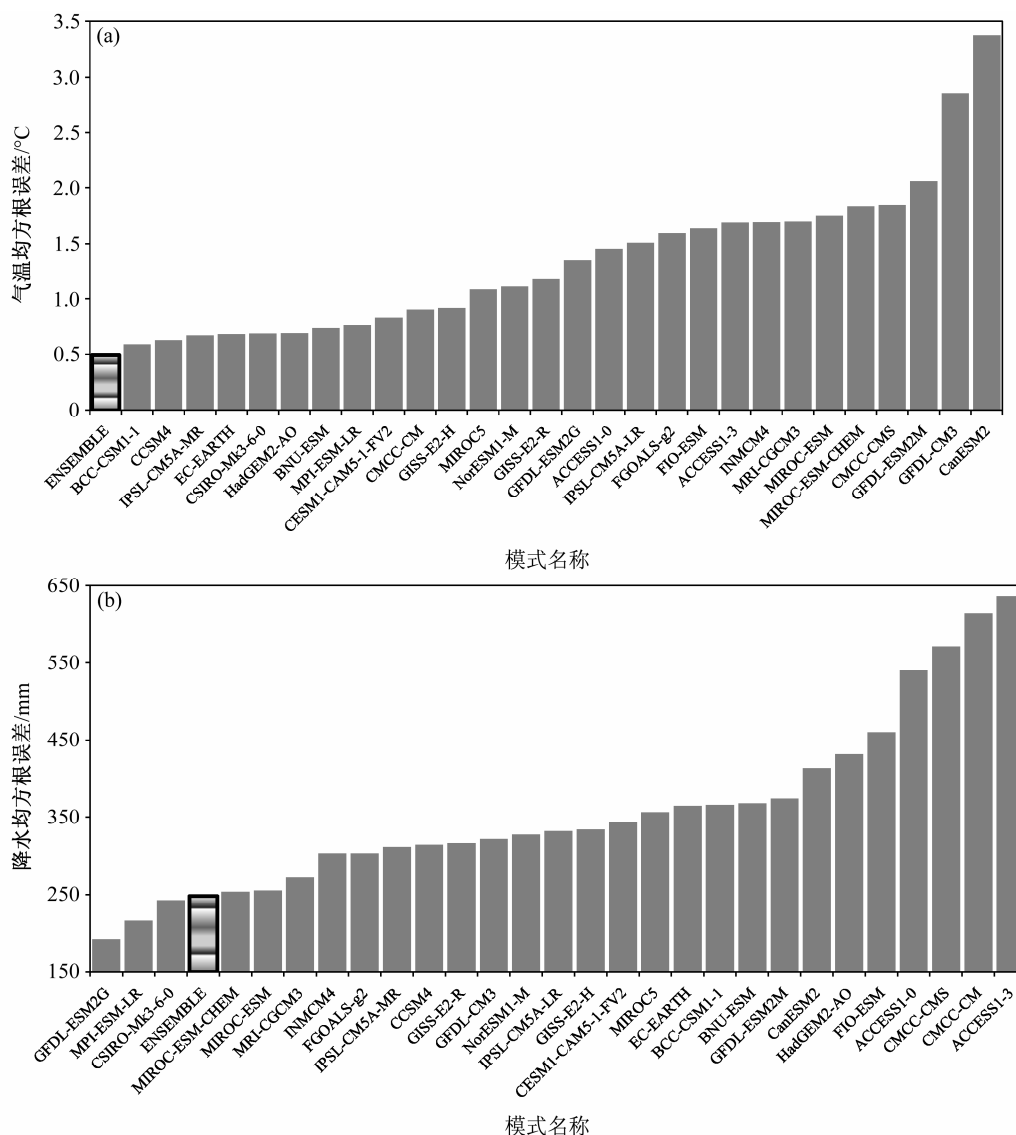


图5 同图3, 但为上海

Fig. 5 Same as Fig. 3, except for Shanghai

1986~2005 年, 上海平均年总降水量以 $26.65 \text{ mm (10 a)}^{-1}$ 的线性趋势减少, 减少趋势不显著。从 28 个模式的模拟结果 (图 7b) 来看, 12 个模式和集合模式的模拟结果为线性减少, GISS-E2-H 的减少趋势最小 [$-1.33 \text{ mm (10 a)}^{-1}$], CCSM4 的减少趋势最大 [$-173.60 \text{ mm (10 a)}^{-1}$], 集合模式的减少趋势为 $-1.81 \text{ mm (10 a)}^{-1}$ 。

4 上海极端气温和降水事件的情景预估

研究表明 (Lambert and Boer, 2001; Walsh et al., 2008), 没有任何一个气候模式对所有的气象要素模

拟的结果都好, 因此根据以上的分析结果, 同时考虑数据的可获得性, 本文选取 RCP4.5 情景下 BCC-CSM1-1、CCSM4、CSIRO-Mk3-6-0、EC-EARTH、GFDL-ESM2G、IPSL-CM5A-MR、MRI-CGCM3、NorESM1-M 8 个模式的预估数据对上海极端气温和降水事件的未来变化趋势进行预估。

4.1 上海市极端气温和降水事件的模拟评估

观测表明, 2001~2010 年较 1981~1990 年相比, 上海冷夜指标、暖昼指标和暖夜指标均呈现增暖趋势, 其中冷夜指标增暖趋势最大 (增加 6.5 倍); 暖昼日数、暖夜日数、连续 6 日暖昼次数和连续 6 日暖夜次数均呈现增加的趋势, 增加比例分别为 112%、91.2%、350% 和 146%; 冷夜日数呈现减少

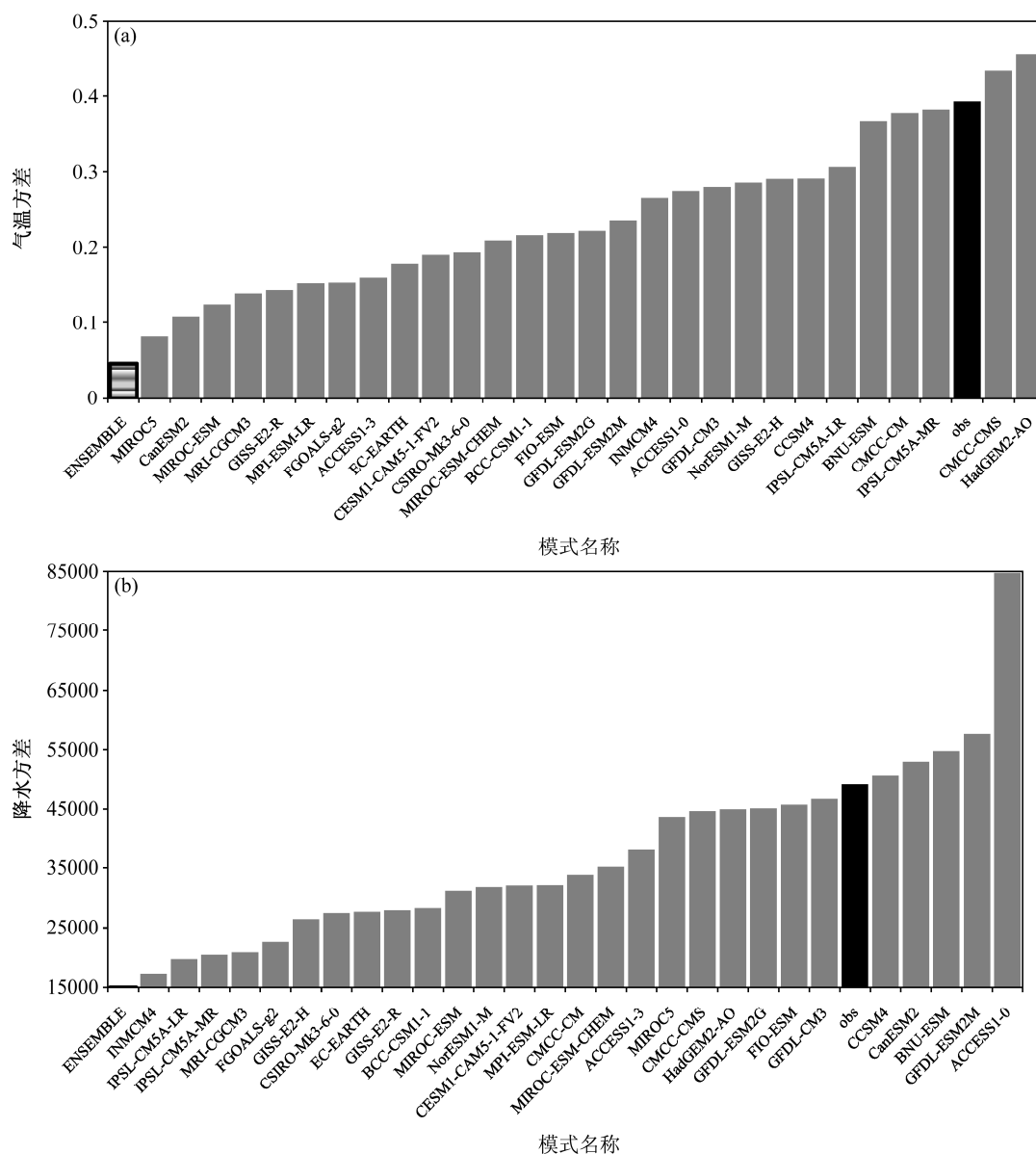


图6 同图4, 但为上海

Fig. 6 Same as Fig. 4, except for Shanghai

趋势(46.2%);强降水指标和强降水日均呈现减少的趋势。也就是说,上海近30年极端气温事件的气候指标增暖、发生日(次)数增加,强降水指标和日数减少。

表3给出了8个模式和8个模式集合平均的结果(以下简称8集合模式)对1981~2010年上海极端气温和降水事件的模拟相对误差。模式对冷夜日数、暖昼指标、暖夜指标、暖夜日数、连续6日暖夜次数和强降水指标的模拟值以偏低为主,对连续6日暖昼次数和强降水日数模拟值以偏高为主,对冷夜指标的模拟相对误差最大,对暖昼日数的模

拟相对误差最小。除了冷夜指标和强降水日数,8集合模式对其他极端气温和降水事件相对误差的模拟均高于8个模式的误差绝对值平均。

从各个极端气候事件模拟的相对误差大小来看,暖昼日数、冷夜日数、暖夜日数、暖夜指标、连续6日暖昼次数和连续6日暖夜次数的相对误差较小,平均每个模式均在10%以内,暖昼日数最小(低于1%),而平均每个模式对冷夜指标、暖昼指标、强降水指标和强降水日数模拟的相对误差均在10%以上,尤其是冷夜指标,相对误差最大(-132%~226%)。可以看出,模式对极端气温和降水事件气候

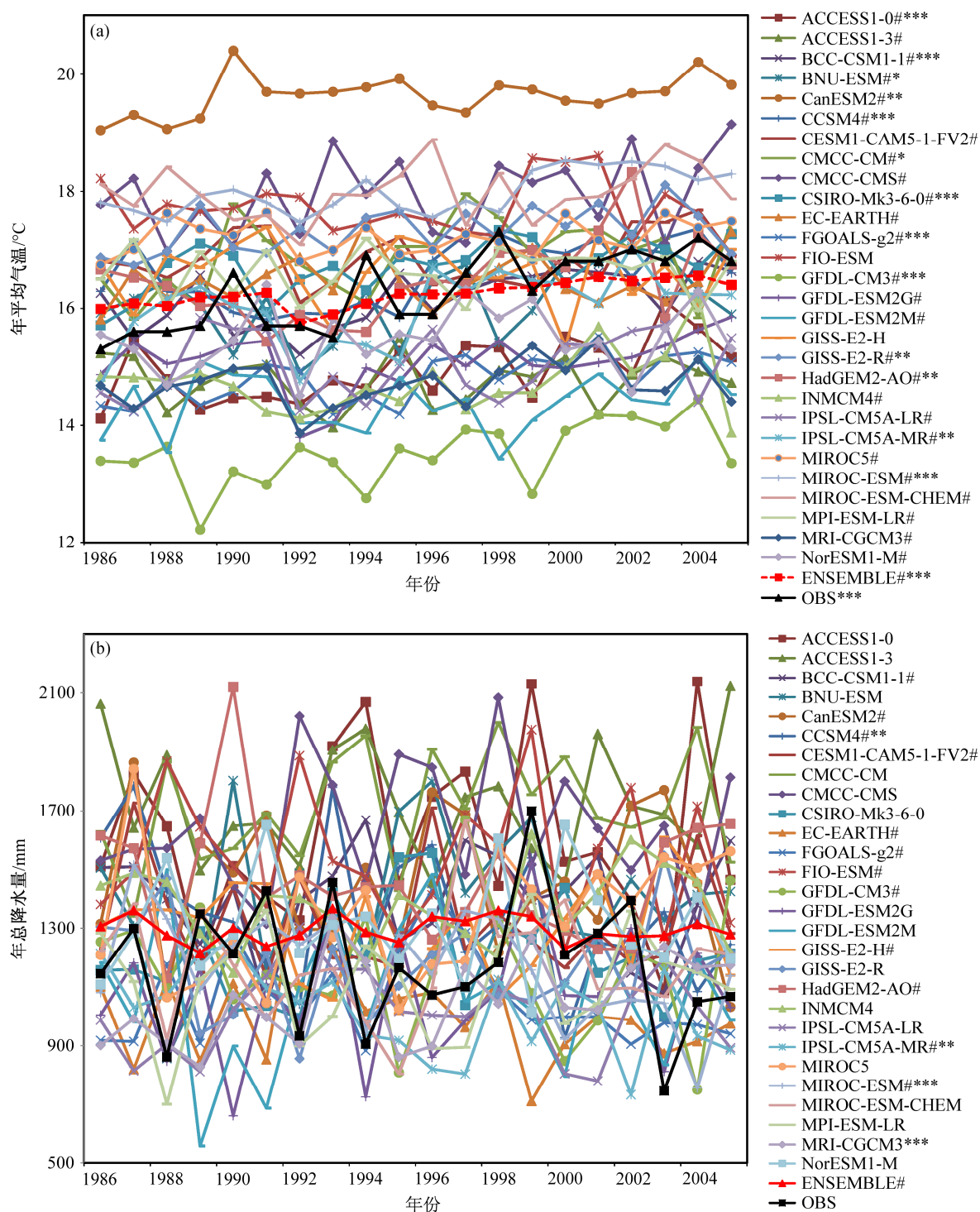


图7 不同模式模拟的1986~2005年上海(a)年平均气温和(b)年总降水量变化曲线。模式后面带#表示变化趋势与观测值相同,***、**、*分别表示变化趋势通过99%、95%、90%信度水平的检验

Fig. 7 Changes in (a) annual mean temperature and (b) annual total precipitation in Shanghai simulated by 28 CMIP5 models during 1986–2005. Models that produce similar changing trend to that from observations are marked by #. The changing trends that are statistically significant at the 99%, 95%, and 90% confidence levels are marked by ***, **, and *

指标(暖昼指标、冷夜指标、暖夜指标、强降水指标)的模拟相对误差要大于对极端气温和降水事件发生日(次)数的模拟相对误差,这可能是由于模

式本身的系统误差造成,冷夜指标的相对误差最大也反映了模式对冬季低温的模拟差异性较大。

从每个模式的模拟能力(图略)来看,IPSL-

表3 8个模式对1981~2010年上海极端气温和降水事件的模拟相对误差

Table 3 Relative errors between observations and simulated extreme temperature and precipitation indices from eight CMIP5 models in Shanghai during 1981–2010

极端气候事件	观测值	误差范围	误差绝对值平均	8 集合模式误差
冷夜指标	1.80 °C	−131.67%~226.48%	105.28%	10.00%
冷夜日数	37.07 d	−1.44%~−0.45%	1.14%	−0.54%
暖昼指标	32.73 °C	−18.20%~−7.97%	11.77%	−12.86%
暖昼日数	36.57 d	−0.91%~0.46%	0.24%	1.00%
暖夜指标	25.80 °C	−9.59%~−1.26%	4.34%	−5.39%
暖夜日数	37.20 d	−1.79%~−0.63%	1.38%	−1.52%
连续 6 日暖昼次数	1.67	−6.0%~22.0%	9.75%	16.00%
连续 6 日暖夜次数	2.17	−10.77%~3.08%	7.12%	−23.08%
强降水指标	51.93 mm	−53.18%~−27.78%	39.13%	−76.00%
强降水日数	3.3 d	11.11%~12.12%	11.24%	11.11%

CM5A-MR 对所有极端气候事件模拟的相对误差绝对值总和最小(114%),BCC 最大(绝对值为 330%),其他 6 个模式的相对误差绝对值总和依次为 CSIRO (233%)、NorESM1-M (221%)、MRI-CGCM3 (191%)、CCSM (159%)、EC-EARTH (152%)、GFDL-ESM2G (136%)。8 集合模式的相对误差绝对值总和为 158%,优于其中的 5 个模式结果。

4.2 上海市极端气温和降水事件的趋势预估及不确定性分析

图 6 给出了 2021~2030 年上海极端气温和降水事件的未来变化趋势和不确定性。可以看出,与 2001~2010 年相比,各模式对上海冷夜指标预估的不确定最大(430%,图略),未来变化趋势范围为−300%~228.2%,而对冷夜日数预估的不确定性则最小(0.9%),主要呈现减少的趋势(−70.4%~12.5%)。其他极端气温事件的预估中暖昼指标的不确定性最大(22.8%),未来变化趋势范围为−2.2%~2.5%;暖夜指标的不确定性最小(1.9%),主要呈现增暖的趋势(−2.5%~3.4%),暖昼日数、暖夜日数、连续 6 日暖昼次数和连续 6 日暖夜日数预估的不确定性分别为 14.7%、3.0%、2.8%和 2.9%,预估的变化趋势范围分别为 −34.2%~44.5%、−60.0%~40.7%、−27.6%~100%和 −22.7%~29.6%。模式对强降水日数预估的不确定性为 0.97%,主要呈现增加的趋势(−16.7%~71.9%),对强降水指标预估的不确定性为 1.1%,主要呈现增加的趋势(−4.9%~13.7%)。从不确定性(图 8b)

来看,各模式对极端气温事件预估的不确定性(59.9%)要大于极端降水事件(1.0%),对极端气候事件气候指标预估的不确定性(114.1%)要大于极端事件发生日(次)数(4.2%),虽然冷夜指标预估结果的不确定性较大,但是即使去除冷夜指标,以上结论仍然成立。8 模式集合的结果表明,未来冷夜指标将增加 40.61%,而冷夜日数将减少 58.36%,暖昼指标和暖昼日数分别减少 0.21%和 8.11%,暖夜指标和暖夜日数分别增加 0.94%和 10.18%,连续 6 日暖昼次数增加 13.82%,连续 6 日暖夜次数减少 9.19%,强降水指标和强降水日数分别增加 5.07%和 26.97%。

总体来说,与 2001~2010 年相比,上海 2021~2030 年冬天极端低温的出现日数(冷夜日数)呈减少趋势,不确定性最小,但是冬天最低气温序列分布(冷夜指标)的变化不确定性较大;夏天最低气温均值(暖夜指标)和极大值出现日数(暖夜日数)均呈增加的趋势,不确定性较低;夏天极端高温的出现日数(暖昼日数)变化趋势不确定性较大;夏季出现连续高温和连续暖夜也存在一定的不确定性。强降水发生日数和强降水的强度都呈现增加的趋势,且不确定性较小。

5 主要结论

本文通过评估 CMIP5 28 个模式对华东以及上海的年平均气温和年总降水量的模拟性能,挑选出适用于上海极端气温和降水事件预估的 8 个模式。基于 8 个模式在 RCP4.5 情景下的预估结果,分析了 2021~2030 年上海未来极端气温和降水事件的变化趋势和不确定性,主要结论如下:

(1) 从均值和方差的模拟效果来看,模式对华东和上海年平均气温的均值和方差模拟一致性较高,以均值偏高、方差偏低观测值为主;对华东和上海年总降水量的均值模拟一致性较高,以偏高观测值为主,方差则相反,华东以偏高观测值为主,上海以偏低观测值为主。与上海的模拟结果相比,有更多的模式通过了华东区域年平均气温和年总降水量模拟结果的差异性显著检验。集合模式的模拟效果没有明显的优越性。

(2) 1986~2005 年,上海年平均气温呈现显著(通过 99%信度检验)增温趋势 $[0.87\text{ °C}(10\text{ a})^{-1}]$,26 个模式和集合模式的气温趋势模拟结果与观测

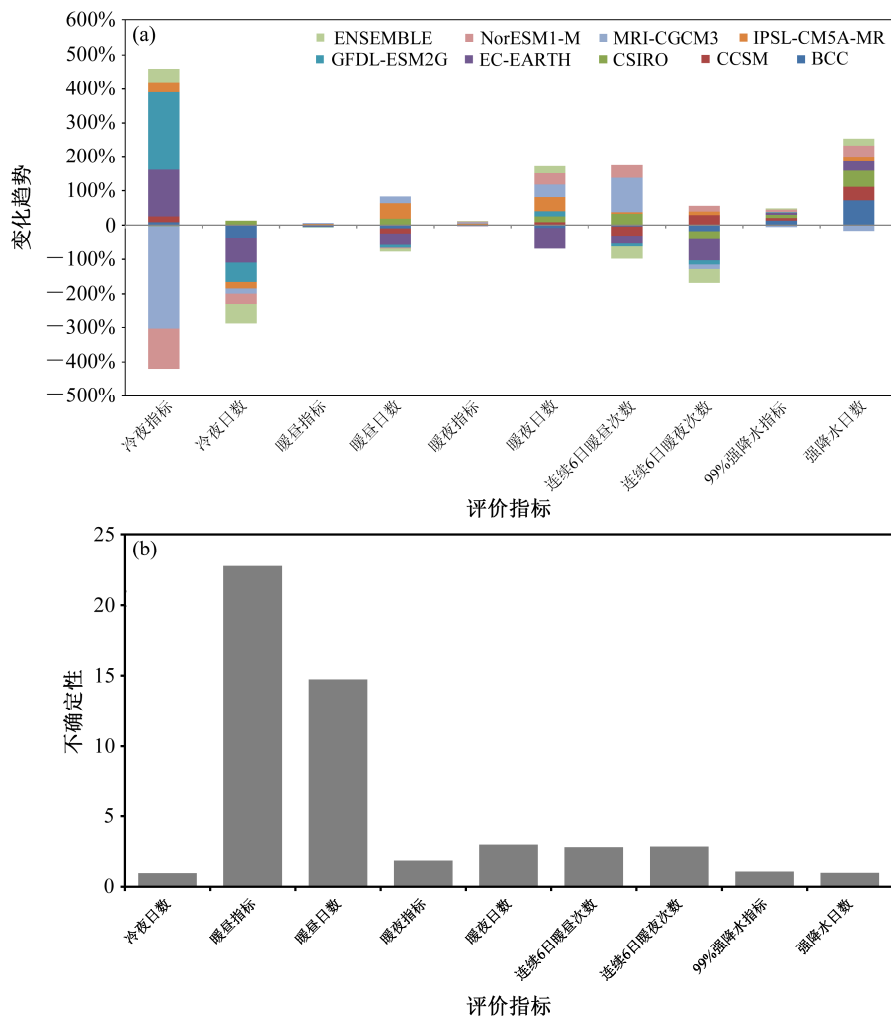


图8 8个全球气候模式预估的RCP4.5情景下上海2021~2030年极端气温和降水事件的未来变化趋势(a)和不确定性(b)

Fig. 8 Projected (a) change trends and (b) uncertainties in extreme temperature and precipitation events in Shanghai during 2021–2030 from eight CMIP5 models under the RCP4.5 scenario

一致,但是增温趋势比观测值低,13个模式和集合模式的增温趋势通过90%的信度检验。1986~2005年,上海年总降水量呈现减少趋势[26.65 mm (10 a)⁻¹],未通过信度检验,12个模式和集合模式的降水趋势模拟结果与观测结果一致。

(3) 基于模式对华东和上海气温和降水的均方根误差、方差和线性趋势的模拟评估结果,挑选出效果较好的8个模式用于上海未来极端气温和降水事件的预估,8个模式分别为BCC-CSM1-1、CCSM4、CSIRO-Mk3-6-0、EC-EARTH、GFDL-ESM2G、IPSL-CM5A-MR、MRI-CGCM3、NorESM1-M。

(4) 1981~2010年,上海极端气温的气候指标增暖、发生日数增加,强降水指标和日数减少。从8个模式对各项指标模拟的相对误差大小来看,对极端气候事件发生日(次)数的模拟要优于对极端

气候事件气候指标的模拟,冷夜指标的相对误差最大(-132%~226%)。从每个模式的模拟能力来看,IPSL-CM5A-MR对所有指标模拟的相对误差绝对值总和最小(114%),BCC最大(绝对值为330%),8个集合模式的相对误差绝对值总和为158%,优于其中的5个模式结果。

(5) 与2001~2010年相比,上海2021~2030年冬天极端低温的出现天数(冷夜日数)呈减少趋势,不确定性最小,但是冬天最低气温序列分布(冷夜指标)的变化不确定性较大;夏天最低气温均值(暖夜指标)和极大值出现日数(暖夜日数)均呈增加的趋势,不确定性较低;夏天极端高温的出现日数(暖昼日数)变化趋势不确定性较大;夏季出现连续高温和连续暖夜也存在一定的不确定性。强降水发生日数和强降水的强度都呈现增加的趋势,

且不确定性较小。

本文只是基于全球模式在 RCP4.5 排放情景下对上海未来极端气温和降水事件的情景预估,其结果存在某些不确定性。CMIP5 中不同模式的物理参数化过程、气候强迫、分辨率等不同,对气候变率的模拟性能也不同。另外,用分辨率较粗的全球模式预估上海一个点,特别是对极端气候变化事件的预估,也增加了结果的不确定性。今后将进一步利用降尺度方法和多模式集合,更好地了解气候变化背景下上海极端事件的响应。

致谢 本研究所使用的全球气候模式气候变化预估数据是由国家气候中心徐影研究员对数据进行的整理、分析和惠许使用。原始数据由各模式组提供,由 WGCM (JSC/CLIVAR Working Group on Coupled Modeling) 组织 PCMDI (Program for Climate Model Diagnosis and Intercomparison) 搜集归类。多模式数据集的维护由美国能源部科学办公室提供资助。特别感谢徐影研究员在文章的研究方法和后期修改方面给予的指导。

参考文献 (References)

- 陈活泼. 2013. CMIP5 模式对 21 世纪末中国极端降水事件变化的预估 [J]. 科学通报, 58 (8): 743–752. Chen Huopo. 2013. 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, 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]. Progressus Inquisitiones De Mutatione Climatis (in Chinese), 10 (3): 217–225.
- Gao X J, Zhao Z C, Giorgi F. 2002. Changes of extreme events in regional climate simulations over East Asia [J]. Advances in Atmospheric Sciences, 19 (5): 927–942, doi: 10.1007/s00376-002-0056-2.
- 江志红, 陈威霖, 宋洁, 等. 2009. 7 个 IPCCAR4 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.
- Lambert S J, Boer G J. 2001. CMIP1 evaluation and intercomparison of coupled climate models [J]. Climate Dyn., 17 (2): 83–106, doi: 10.1007/PL00013736.
- 任福民, 高辉, 刘绿柳, 等. 2014. 极端天气气候事件监测与预测研究进展及其应用综述 [J]. 气象, 40 (7): 860–874. Ren Fumin, Gao Hui, Liu Lüliu, et al. 2014. Research progresses on extreme weather and climate events and their operational applications in climate monitoring and prediction [J]. Meteorological Monthly (in Chinese), 40 (7): 860–874.
- 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, doi: 10.1175/BAMS-D-11-00094.1.
- Walsh J E, Chapman W L, Romanovsky V, et al. 2008. Global climate model performance over Alaska and Greenland [J]. J. Climate, 21 (23): 6156–6174, doi: 10.1175/2008JCLI2163.1.
- Xu C H, Xu Y. 2012. 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, doi:10.1080/16742834.2012.11447042.
- 许崇海, 沈新勇, 徐影. 2007. IPCCAR4 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 Change 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]. Atmospheric and Oceanic Science Letters, 5 (6): 489–494, doi:10.1080/16742834.2012.11447041.
- 徐影, 张冰, 周波涛, 等. 2014. 基于 CMIP5 模式的中国地区未来洪涝灾害风险变化预估 [J]. 气候变化研究进展, 10 (4): 268–275. Xu Ying, Zhang Bing, Zhou Botao, et al. 2014. Projected risk of flooding disaster in China based on CMIP5 models [J]. Progressus Inquisitiones De Mutatione Climatis (in Chinese), 10 (4): 268–275.
- 许吟隆, 黄晓莹, 张勇, 等. 2005. 中国 21 世纪气候变化情景的统计分析 [J]. 气候变化研究进展, 1 (2): 80–83. Xu Yinlong, Huang Xiaoying, Zhang Yong, et al. 2005. Statistical analyses of climate change scenarios over China in the 21st century [J]. Advances in Climate Change Research (in Chinese), 1 (2): 80–83.
- 杨绚, 李栋梁, 汤绪. 2014. 基于 CMIP5 多模式集合资料的中国气温和降水预估及概率分析 [J]. 中国沙漠, 34 (3): 795–804. Yang Xuan, Li Dongliang, Tang Xu. 2014. Probability assessment of temperature and precipitation over China by CMIP5 multi-model ensemble [J]. Journal of Desert Research (in Chinese), 34 (3): 795–804.
- Zhang Y, Xu Y L, Dong W J, et al. 2006. A future climate scenario of regional changes in extreme climate events over China using the PRECIS climate model [J]. Geophys.Res.Lett., 33 (24): L24702, doi: 10.1029/2006GL027229.
- 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. Zhou Xiuhua, XiaoZiniu. 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, doi: 10.3878/j.issn.1006-9585.2013.13080.