

中国大陆地区温度集合预报的最优权重模型设计及其区域应用

苏琪骅¹,周任君¹,柯宗建²,刘长征²,杜良敏³,颜妍¹

(1.中国科学技术大学地球和空间科学学院,安徽合肥 230026;2.国家气候中心,北京 100081;3.武汉区域气候中心,湖北武汉 430074)

摘要: 本文采用耦合模式比较计划第五阶段(CMIP5)中的多模式,针对中国大陆地区的温度集合预报,提出了一种区域最优权重模型(Op-SE),并将Op-SE与等权集合方法(EE)和传统的超级集合方法(SE)作对比.研究发现:①就模式预报与实测的距平相关系数(ACC)来说,在大部分区域Op-SE表现最优,EE最差,尤其在中国东部Op-SE优势明显,均通过了 $\alpha=0.1$ 的显著性检验,其中华东地区最高;②对于均方根误差(RMSE)而言,EE效果也相对最差,Op-SE在中国东部要优于SE,而在四川盆地等少数地区则比SE差;③综合ACC和RMSE评估,Op-SE在东北地区、华北地区、华东地区、西南地区和西北地区表现最优,而在四川盆地和甘肃南部等地区较SE没有明显改进.Op-SE给集合预报提供了新的成员择优方法,得到模式在集合预报中的区域最优权重,在一定程度上可以进一步改善区域气候预报的效果.

关键词: 全球气候模式;CMIP5;多模式集合;温度;区域应用

中图分类号: P456.7 **文献标识码:** A **doi:** 10.3969/j.issn.0253-2778.2018.03.004

引用格式: 苏琪骅,周任君,柯宗建,等. 中国大陆地区温度集合预报的最优权重模型设计及其区域应用[J]. 中国科学技术大学学报,2017,48(3):199-209,228.

SU Qihua, ZHOU Renjun, KE Zongjian, et al. Optimal weighted model for ensemble forecast of the surface air temperature in mainland China and its regional applications[J]. Journal of University of Science and Technology of China, 2017,48(3):199-209,228.

Optimal weighted model for ensemble forecast of the surface air temperature in mainland China and its regional applications

SU Qihua¹, ZHOU Renjun¹, KE Zongjian², LIU Changzheng², DU Liangmin³, YAN Yan¹

(1. School of Earth and Space Sciences, University of Science and Technology of China, Hefei 230026;

2. National Climate Center, China Meteorological Administration, Beijing 100081; 3. Wuhan Regional Climate Center, Wuhan 430074)

Abstract: Based on Coupled Model Intercomparison Project, Phase5 (CMIP5) multi-models, an optimal weighted model for ensemble forecast (Op-SE) of the surface air temperature in mainland China was presented. In order to assess the capability of Op-SE, it was compared with equally-weighted ensemble (EE) and superensemble (SE), and anomaly correlation coefficient (ACC) and root-mean-square-error (RMSE) were chosen to evaluate their forecasting skills. As shown from the results, ACC between Op-SE and observation is optimal in most of China, especially eastern China, which indicates that ACC has passed the significance test at 0.5 level. However EE has poor performance in ACC. As for RMSE, EE is also relatively weak. And Op-SE is better than SE in eastern China, while SE is better in a few other areas like

收稿日期:2017-04-10;修回日期:2017-06-02

基金项目:国家自然科学基金(61473001,71071045,71131002)资助.

作者简介:苏琪骅,女,1992年生,硕士.研究方向:气候预测和集合方法研究. E-mail:suqh10@mail.ustc.edu.cn

通讯作者:周任君,博士/副教授. E-mail:zrj@ustc.edu.cn

Sichuan Basin. The comprehensive assessments of ACC and RMSE show that the forecast skill of Op-SE is best in northeast, north, eastern, southwest and northwest of China, but is not good enough in Sichuan Basin and southern Gansu. In conclusion, Op-SE provides a new method on selecting outstanding models into ensemble climate forecast, which can improve the forecast skill in regions to some extent.

Key words: global climate model; CMIP5; multi-model ensemble; temperature; regional application

0 引言

全球气候模式是未来气候变化情景预估和气候模拟的重要工具.自从 20 世纪 80 年代以来,随着高性能计算机的不断发展和全球气候观测系统的完善,气候数值模拟也得到较快的发展^[1].而气候模式研究的一个重要问题就是提高气候预测的可靠性^[2],利用全球气候模式开展未来气候的情景评估,必须先评估模式对当前气候的模拟能力^[3].因为全球气候模式的分辨率低、物理和参数化过程不够完善等因素,气候变化的模拟研究存在较大的不确定性.而中国由于地形复杂,包含青藏高原和黄土高原,又处在季风区,是世界上受气候变化影响最为显著的地域之一^[4],因此做好我国的气候预测有重要意义.

为更好地实现数据共享和模式比较,世界气候研究计划(WCRP)开始耦合模式比较计划,目前已发展至第 5 阶段(CMIP5),其作为联合国政府间气候变化专门委员会(Intergovernmental Panel on Climate Change,IPCC)第 5 次评估报告(AR5)重点评估的全球气候模式^[5],为全球气候变化研究提供了重要依据.针对 CMIP5 对中国的气候模拟评估,我国学者也展开了一系列的工作.Guo 等^[6]研究发现,CMIP5 多模式模拟的中国气温线性趋势较 CMIP3 模拟结果更接近于观测.Xu 等^[7]评估了其中 18 个模式在我国的气候模拟结果,发现模式能较好模拟出温度的空间分布特征,但存在普遍性低估,尤其在中国西部地区.张艳武等^[8]对 29 个气候模式在中国的气温模拟进行了评估,研究表明模式在中国中部和南部一致性较高,且在众多模式中有 7 个模式表现较优.另外,研究也表明多模式等权集合平均的模拟效果优于大多数单模式^[9-14].

多模式集成方法是一种提高模式预测准确率的非常有效的后处理统计方法,它把不同水平的模式进行组合得到集合值,以此把某些模式误差和随机

误差平均掉^[15].等权集合平均是最简单的一种集成方法,即将所有参与集合的预报值作平均得到.超级集合也是常用的集合预报方法,它由 Krishnamurti 等^[16]最早提出,通过训练期数据利用线性回归方法对模式进行权重计算,从而集成得到预报模型.超级集合预报方法较等权集合平均有更高的预报技巧^[17-20].智协飞等^[21]也基于 CMIP5 多模式回报资料对地面气温进行了超级集合研究,发现超级集合可以改善地面气温的回报效果.

但由于 CMIP5 作为气候模拟的自由交流平台,并未严格限制模式加入平台的条件,使得参与 CMIP5 的模式在模拟效果上存在差别,集合预报模拟结果的可信度实际上会被性能较差的模式影响^[22].胡岑^[23]根据泰勒图分析得到 5 个在青藏高原地区温度模拟表现相对优异的模式,发现对择优挑选的模式进行集合平均能提高总体的模拟能力.

因此选择表现优异的有效模式参与集合是有必要的.但目前对于模式择优的方法较为定性,且中国地域辽阔,模式在不同地区的模拟效果存在差异,而对于 CMIP5 在中国不同区域气候模拟的评估还较少.本文将设计一种区域最优权重模型(Op-SE),并参考第 2 次气候变化国家评估报告^[24],将中国大陆地区分为 8 个区域,评估 CMIP5 中 27 个模式在中国 8 个区域的温度模拟效果.此外,将 Op-SE 与等权集合方法(EE)和经典的超级集合方法(SE)作对比,评估该方法在区域的适用性,并用 Op-SE 对未来不同典型浓度情景(RCPs)下中国大陆地区的温度变化做出预估.

1 资料与方法

1.1 观测资料

本文使用的观测资料是由中国气象数据网提供的中国大陆地区地面气候资料月平均数据集^①.该数据集是根据中国 756 个基本、基准地面气象观测站及自动站的日观测数据作月平均得到,其观测站点

① 国家气象科学数据共享服务平台.[2016-03-30].<http://data.cma.cn/data/>.

分布如图 1 所示。

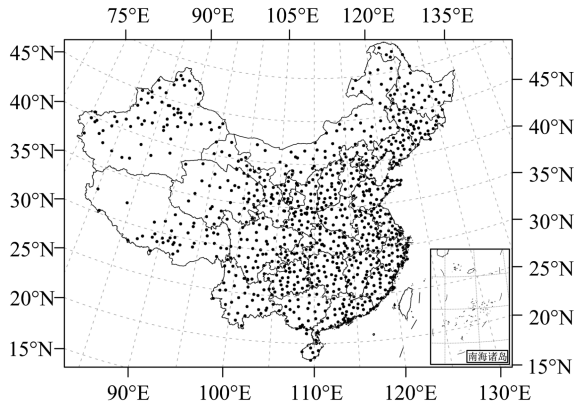


图 1 观测资料的站点分布

Fig.1 Position of observation stations

1.2 模式资料

本文使用 CMIP5 计划中的历史模拟试验 (historical) 和 21 世纪预估试验 (RCP), 选用同时包含这两个试验的 27 个模式中温度的月数据. 表 1 给出了 27 个模式的基本信息^①. 其中使用历史模拟试验中 1961~2005 年的历史资料, 与观测资料保持一致, 使用 21 世纪预估试验中 RCP2.6, RCP4.5, RCP8.5 三种不同排放情景的预估结果, 试验情景具体描述见表 2^[25].

表 1 27 个 CMIP5 全球气候模式基本信息^①

Tab.1 Basic information of 27 global climate models from CMIP5^①

模式名称	单位名称及所属国家	大气模式分辨率
BCC-CSM1.1	BCC, 中国	128 × 64
BCC-CSM1.1-m	BCC, 中国	320 × 160
BNU-ESM	GCESS, 中国	128 × 64
CanESM2	CCCMA, 加拿大	128 × 64
CCSM4	NCAR, 美国	288 × 192
CESM1-CAM5	NSF-DOE-NCAR, 美国	288 × 192
CNRM-CM5	CNRM-CERFACS, 法国	256 × 128
CSIRO-Mk3.6.0	CSI RO-QCCCE, 澳大利亚	192 × 96
FGOALS-g2	LASG-CESS, 中国	128 × 60
FIO-ESM	FIO, 中国	128 × 64
GFDL-CM3	NOAA GFDL, 美国	144 × 90
GFDL-ESM2G	NOAA GFDL, 美国	144 × 90
GFDL-ESM2M	NOAA GFDL, 美国	144 × 90
GISS-E2-H	NASA GISS, 美国	144 × 90
GISS-E2-R	NASA GISS, 美国	144 × 90

续表 1

模式名称	单位名称及所属国家	大气模式分辨率
HadGEM2-AO	NIMR/KMA, 韩国/ 英国	192 × 145
HadGEM2-ES	UKMO, 英国	192 × 145
IPSL-CM5A-LR	IPSL, 法国	96 × 96
IPSL-CM5A-MR	IPSL, 法国	144 × 143
MIROC-ESM	MIROC, 日本	128 × 64
MIROC-ESM-CHEM	MIROC, 日本	128 × 64
MIROC5	MIROC, 日本	256 × 128
MPI-ESM-LR	MPI-M, 德国	192 × 96
MPI-ESM-MR	MPI-M, 德国	192 × 96
MRI-CGCM3	MRI, 日本	320 × 160
NorESM1-M	NCC, 挪威	144 × 96
NorESM1-ME	NCC, 挪威	144 × 96

表 2 未来排放情景试验^[25]

Tab.2 Rcps (Representative Concentration Pathway) scenarios^[25]

情景	2010~2100 年辐射强迫	温室气体排放
RCP2.6	中期达强迫峰值 3W/m ² (约等效于体积分数 490 × 10 ⁻⁶ CO ₂ 相当浓度) 随后减少, 至 2100 年为 2.6W/m ²	低
RCP4.5	辐射强迫稳定增长至 2100 年的 4.5W/m ² (约等效于体积分数 650 × 10 ⁻⁶ CO ₂ 相当浓度)	中等
RCP8.0	辐射强迫增长至 2100 年的 8.0 W/m ² (约等效于体积分数 1370 × 10 ⁻⁶ CO ₂ 相当浓度)	高

1.3 数据预处理

由于资料分辨率各不相同, 为方便研究, 用双线性插值法^[26]将模式资料和观测资料插值到 1° × 1° 的网格上, 得到 1961~2005 年的网格数据。

1.4 区域最优权重模型

由于气候变化的不确定性, 它与外强迫作用 (如太阳和火山活动、温室气体、气溶胶、土地利用变化等) 和气候系统的内部变率均有密切的关系^[15]. 各气候模式由于对外强迫作用的响应不同和内部变率模拟差别, 导致模式的差异性. 在集合预报中加入过多模拟性能较差的模式, 会使模式集合后丢失一部

① Program for Climate Model Diagnosis & Intercomparison. [2016-03-30]. <http://cmip-pcmdi.llnl.gov/cmip5/>.

分年际和年代际信号,影响预报效果.另外,由于模式在不同地区的模拟效果存在差异,因此需要分区域对预报成员进行择优.

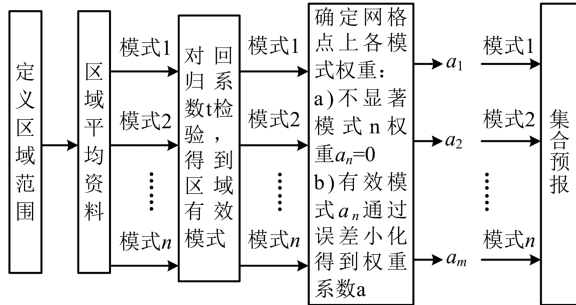


图 2 区域最优权重模型流程图
Fig.2 Flow diagram of Op-SE

本文设计的区域最优权重模型(图 2)是以超级集合方法^[16]为基础,根据多模式在区域的模拟效果调整集合预报成员,以消除性能较差的模式对于集合结果的影响.首先定义分区,参考第二次气候变化国家评估报告^[24],将中国大陆地区划分为 8 个区域,如图 3 所示.通过显著性检验选取各区域有效模式,再由最小二乘法拟合得到有效模式在集合预报中的权重,从而获得有区域特征的模式最优权重.具体方法如下:

(I) 将多模式资料做区域平均,得到多模式在分区的平均模拟温度,并与对应观测资料进行线性回归,拟合回归方程:

$$F_{\text{region}} = a + b_1 F_{1,t} + b_2 F_{2,t} + \dots + b_n F_{m,t} \quad (1)$$

式中, b_1, b_2, \dots, b_n 为回归系数, F_{region} 为区域拟合结果.

(II) 对回归系数 b_1, b_2, \dots, b_n 进行显著性检验,选取回归系数通过 $\alpha=0.1$ 显著性检验的 m 个模式作为该区域的有效模式.

(III) 确定每个网格参与集合预报的模式权重.首先判断网格所在区域,得到该区域通过显著性检验的有效模式.将数据分为训练期和检验期,通过训练期数据分析各有效模式在集合预报中的权重,从而得到网格的最优权重模型:

$$F_t = \bar{O} + a_1(F_{1,t} - \bar{F}_1) + a_2(F_{2,t} - \bar{F}_2) + \dots + a_m(F_{m,t} - \bar{F}_m) \quad (2)$$

式中, F_t 为最优权重模型的预报值; \bar{O} 为训练期观测值平均; $F_{i,t}$ 为第 i 个有效模式的预报值; \bar{F}_i 为第 i 个模式在训练期的预报值平均; n 为参加有效模式的个数; t 为时间; a_i 为回归系数,由最小二乘法得

到,即使误差项 G 最小化:

$$G = \sum_{i=1}^{N_{\text{train}}} (F_t - O_t)^2 \quad (3)$$

式中, O_t 为观测值; N_{train} 为训练期时间样本总数.

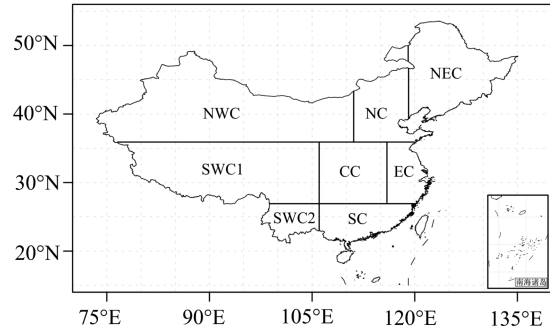


图 3 中国大陆地区 8 个分区分布图
Fig.3 Position of 8 regions in mainland China
NEC: 东北地区; NC: 华北地区; EC: 华东地区; CC: 华中地区; SC: 华南地区; SWC1: 青藏高原地区; SWC2: 西南地区; NWC: 西北地区

图 3 中国大陆地区 8 个分区分布图

Fig.3 Position of 8 regions in mainland China

2 区域最优权重模型在中国大陆地区的应用

2.1 区域最优权重模型的建立

将各模式在不同区域的模拟结果与观测值进行线性回归,得到各个模式在各区域的权重(图 4),权重越大,表明该模式在该区域模拟能力越强,图中虚线为 27 个模式等权集合的权重线.从图 4 中可以看到,模式在不同区域的模拟效果有一定区别,因此分区挑选有效模式是有必要的.从温度的权重分布可以看到, CESM1-CAM5, HadGEM-AO, HadGEM-ES 在大多数区域拥有较高权重, NorESM1-M 在西北地区的模拟能力突出;而 MIROC-ESM-CHEM,

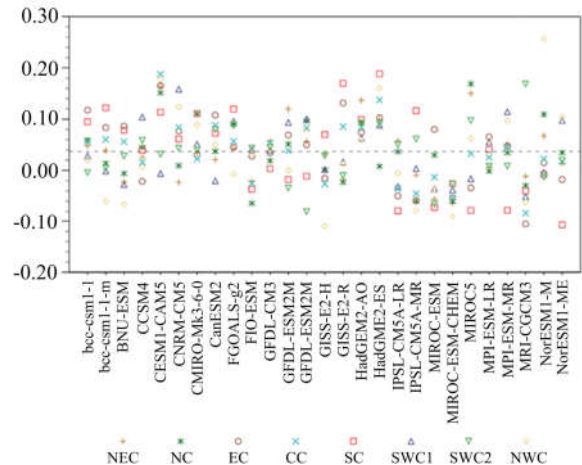


图 4 各分区模式权重分布

Fig.4 Weight of models in each region

MRI-CGCM3 的模拟能力较弱,在 8 个区域的权重均低于等权重线.

对分区各模式线性回归得到系数进行 T 检验,得到各模式在不同区域的显著性结果如表 3 所示.可以看到 CESM1-CAM5, HadGEM2-AO, HadGEM2-ES 在大多数分区的温度模拟上均具有较好的显著性,尤其是 HadGEM2-AO 在所有区域

均通过了显著性水平 0.05 以上的检验.而 CCSM4, FIO-ESM, GISS-E2-H, IPSL-CM5A-LR, MPI-ESM-LR 的显著性较弱,只在一个分区通过检验.每个分区通过检验的模式个数在 7~15 个,其中华南地区通过检验的模式数最多,东北地区通过检验的模式数最少.本文将通过显著水平 0.1 检验的模式选取成为有效模式.

表 3 27 个模式模拟温度在不同区域的显著性分析

Tab.3 significance analysis of 27 global climate models

	NEC	NC	EC	CC	SC	SWC1	SWC2	NWC
BCC-CSM1.1		.	* * *	*	* *			
BCC-CSm1.1-m			* *	* *	* * *			.
BNU-ESM			* * *	*	* *			.
CanESM2			* * *		* *		* * *	
CCSM4						* * *		
CESM1-CAM5	* * * *	* * * *	* * * *	* * * *	* *			* * * *
CNRM-CM5			* *	* *		* * * *		* * *
CSIRO-Mk3.6.0		* * *		* * *	* *			*
FGOALS-g2		* *		*	* * * *	* * *	* * *	
FIO-ESM		.						
GFDL-CM3				*			*	
GFDL-ESM2G	* * *		* *			* * *		
GFDL-ESM2M		* * *		* * *		* * *	* * * *	*
GISS-E2-H								* *
GISS-E2-R			* * *	* *	* * * *			
HadGEM2-AO	* * * *	* * *	* *	* * *	* * *	* *	* *	* *
HadGEM2-ES	* *		* * *	* * * *	* * * *	* * *	* *	* * * *
IPSL-CM5A-LR					*			
IPSL-CM5A-MR					* *		*	*
MIROC-ESM			.		.		* *	
MIROC-ESM-CHEM	*	*						* *
MIROC5	* * *	* * * *					* *	
MPI-ESM-LR			.					
MPI-ESM-MR					* *	* * *		* *
MRI-CGCM3			* * *	* *			* * * *	
NorESM1-M	.	* * *						* * * *
NorESM1-ME					* *	* *		* * *

* * * *, * * *, * *, * 分别表示回归系数通过显著性水平 $\alpha = 0.001, 0.01, 0.05, 0.1$ 的检验.

本文将资料分成训练期和检验期两部分.由于训练期的长短会影响集合预报的效果,而资料时间长度有限,为尽量增大训练期的样本,本文将 1996~2005 年作为检验期,用 1961~1995 年的时间长度进行训练期检验.经过比较发现,训练期时间越长,预报与观测的均方根误差越小,且相关系数越高,与智协飞^[21]的研究结果基本一致.因此选取 1961~1995 年数据样本作为训练期,分析得到各网格上有效模式在集合预报中的权重,建立区域最优权重模型.

2.2 区域最优权重模型效果评估

本文将 Op-SE 在检验期(1996~2005 年)的温度预报结果与 EE 和 SE 结果作对比,EE 和 SE 的计算方法可参考文献^[16,21].

2.2.1 回归统计量分析

对权重优化前后的回归方程进行统计分析,发现 R^2 均在 0.96 以上,均表现出了较好的拟合程度,而优化后的模型 R^2 略高于优化前.表 4 给出了优化前后方程的 F 统计量.F 统计量在一定程度上表现了回归方程整体的显著性.从表中可以看出,优化后回归方程的 F 统计量明显高于优化前,表明优化后回归方程的显著性明显提高.从区域来看,温度在华南和西南地区的 F 统计量最低.

表 4 优化前后的 F 统计量

Tab.4 F-statistics of SE and Op-SE

	SE	Op-SE
NEC	1648	3466
NC	1595	3634
EC	1236	1977
CC	1222	2215
SC	545.4	872.2
SWC1	1809	3092
SWC2	672.6	1224
NWC	1693	2882

2.2.2 时间距平相关系数评估

对比 Op-SE, SE, EE 3 种集合方法预报结果与观测值的时间距平相关系数(ACC),可以看到 Op-SE 的相关系数普遍优于 SE 和 EE(图 5),尤其在中国中东部(东北地区、华北地区、华东地区、华中地区)改进明显,均通过了显著性水平 $\alpha=0.1$ 的显著性检验,具有一定的预报技巧,其中华东地区改进后

的相关系数最高,达到 0.18,EE 的效果较差;而在华南地区,EE 的模拟结果较其他地区明显突出,SE 和 Op-SE 较 EE 没有改进,但 Op-SE 要优于 SE;对于青藏高原地区,由于单模式的模拟效果有限,因此 3 种集合方法没有明显的优劣性,另外,由于青藏高原地区观测站点较少,因此观测资料也存在一定误差.图 6 给出了相关系数的平面图,比较图 6(a)~(c)可以发现,3 种集合方法在西北北部和东北北部的相关系数都欠优,但 SE 和 Op-SE 在大多数区域都明显优于 EE;由图 6(d)得到 Op-SE 在中国大部分区域的相关系数均高于 SE,尤其在东北大部分地区,相关系数提高了 0.1 以上,而在西北和青藏高原少数地区,Op-SE 没有得到改进或改进不明显.

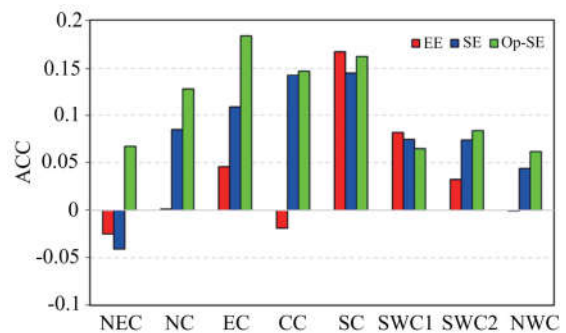


图 5 集合方法在不同分区的时间距平相关系数

Fig.5 ACC between ensemble and observation in each region

2.2.3 均方根误差评估

比较不同集合方法模拟温度与观测值在不同区域的均方根误差(表 5),发现 SE 和 Op-SE 较 EE 有明显的改进,尤其在青藏高原地区有着显著优化,由 7.66°C 改进到 1.4°C ,这是由于各模式模拟温度的模式间标准差在青藏高原地区最大,离散度高,因此根据模式模拟效果确定权重后的集合预报值能得到较大改进.图 7 给出了 Op-SE 和 SE 与观测间值均方根误差的差值场,可以看到 Op-SE 与观测的均方根误差在中国大部分区域要优于 SE,尤其在中国东部地区,而在四川盆地和甘肃南部的误差则要高于 SE,其中 Op-SE 在新疆西藏的交界处误差要明显高于 SE.比较各模式模拟温度的模式间标准差(图略),发现模式在青藏高原、西北地区的标准差相对较高,而 Op-SE 在模式间标准差高的区域优势不明显.这是由于地形等原因导致单模式的模拟性能在这些区域表现较差,因此多模式模拟的一致性不高,从而选取的有效模式的模拟效果也有限,达不到太多提高的效果,甚至没有改进.

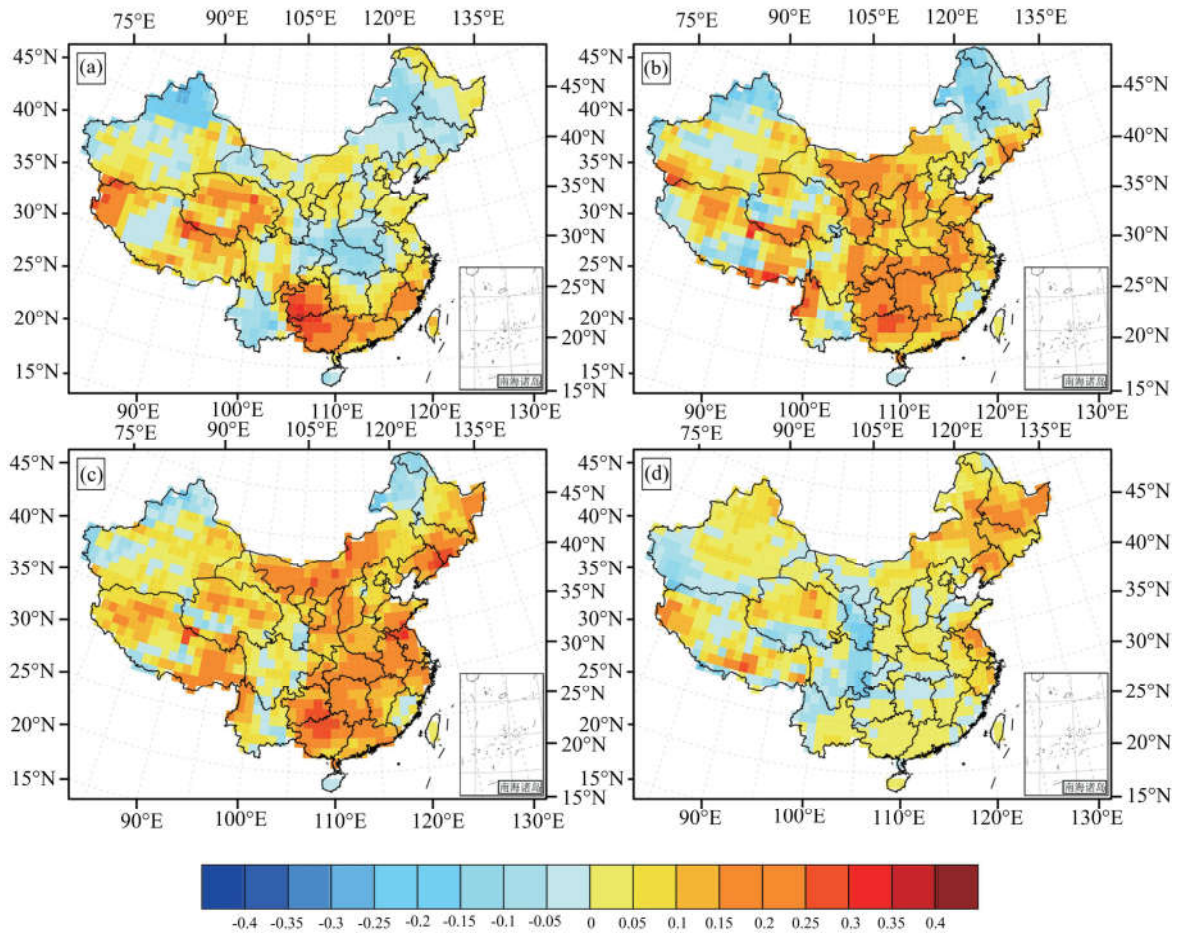


图 6 不同集合方法模拟温度与观测值的时间距平相关系数(ACC)分布图
 Fig.6 The geographical distributions of ACC between ensemble and observation

表 5 不同集合方法模拟温度与观测值在中国大陆地区不同区域的均方根误差(单位: °C)

Tab.5 RMSE between ensemble and observation in each region of mainland China (unit: °C)

地区 集合方法	NEC	NC	EC	CC	SC	SWC1	SWC2	NWC
EE	2.79	2.65	1.69	2.64	1.70	7.66	2.80	5.00
SE	2.04	1.78	1.31	1.29	1.20	1.38	1.09	1.71
Op-SE	2.04	1.73	1.25	1.30	1.16	1.44	1.08	1.70

综上所述,在东北地区、华北地区、华东地区、西南地区和西北地区,Op-SE 不管在 RMSE 还是 ACC 上表现均最优;在青藏高原地区,EE 与观测值的 ACC 相对最高,但该方法的 RMSE 明显劣于其他两种集合方法,其中,SE 与观测值的 RMSE 最优,Op-SE 次优,综合 ACC 和 RMSE,得到 SE 在青藏高原相对最优;在华中地区,SE 和 Op-SE 在 ACC 和 RMSE 上的模拟效果均相当,EE 最差;在华南地区,EE 和 Op-SE 与观测的 ACC 值差别不

大,但在 RMSE 上,EE 表现相对最差,Op-SE 最优.因此,相比 EE 和 SE,Op-SE 在中国大部分区域表现出更优的模拟能力.

2.3 21 世纪未来温度变化预估

利用各模式在 21 世纪预估试验的数据,并基于训练期建立的最优权重模型,得到温度在未来不同排放情景下的预估值.图 8 给出了中国大陆地区的平均温度相对于 1986~2005 年的距平时间序列预估,图中可见,温度在不同情景下的升高趋势都十分

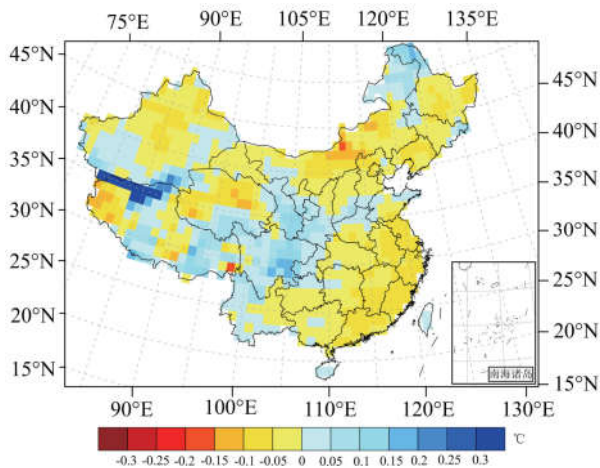
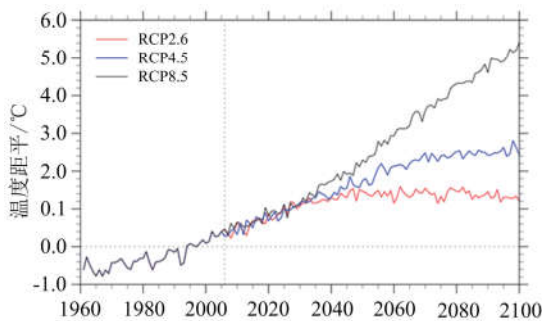


图 7 区域最优权重模型模拟温度的均方根误差与超级集合预报均方根误差的差值场

Fig.7 Differences in RMSE between Op-SE and SE

明显.在 2006~2035 年间,3 种排放情景的差异不大,距平变化由 0.5℃增加至 1.2℃,之后随着时间增加,3 种情景下的温度距平差别逐渐增大.RCP2.6 情景下的温度距平在 2050 年后趋于稳定在 1.4℃左右;RCP4.5 情景下增温在 2050 年后变化缓慢,线性趋势在 0.1℃/10a;而 RCP8.5 的增温趋势明显,线性趋势在 0.6℃/10a.对比中国大陆地区在不同情景和不同时间阶段的平均温度距平,发现年变化一致,均为秋冬季距平温度最高,春季最低.



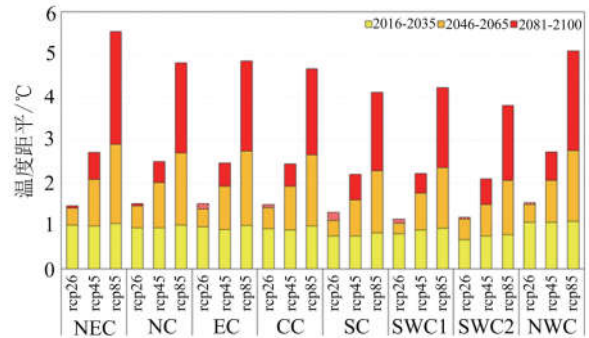
相对 1986~2005 年;其中 1960~2005 年为历史回报,2006~2100 为不同情景下的温度距平序列.

图 8 中国大陆地区平均温度距平时间序列

Fig.8 Anomaly time series relative to the 1986~2005 mean of annual mean surface air temperature over mainland China

图 9 给出了中国不同区域在 21 世纪不同阶段的气温距平变化.由图发现各区域在 21 世纪前期差别均不明显,温度距平均在 1℃左右;在 21 世纪中后期差别开始明显,中国东北地区和西北地区最先变暖,尤其在后期,RCP8.5 情景下的温度距平要比 RCP4.5 情景下的高出 1 倍左右.从图 10 也可以看到,在 RCP2.6 情景下,温度距平的时间变化不大,

21 世纪后期各区域变化在 0.87~1.23℃之间;在 RCP4.5 情景下各区域的变化在 1.81~2.29℃;而在 RCP8.5 情景下的温度变化更加明显,温度距平在后期变化均超过了 3.5℃,其中东北地区和西北地区超过 5℃,而西南地区的温度变化最小.



虚线图案表示对应时间段的温度距平减小.

图 9 中国大陆地区不同区域在不同情景下的 21 世纪不同阶段温度距平变化

Fig.9 Anomaly of surface air temperature in 8 regions in mainland China under different Rcps scenarios

对比 Op-SE 对未来温度距平的平均预估 (2006~2100 年)与 EE、SE 的预估结果(图 11)发现,Op-SE 在新疆北部、华东地区、湖北、重庆等地区的增温预估高于 EE,在青藏高原地区、部分西北地区、华北地区和东北西南部的预估则低于 EE,其中青藏高原地区的差异最大,在 0.4℃以上.而相较于 SE,Op-SE 在东北北部、新疆北部、青海、华中、华东地区预估的增温均高于 SE 0.1℃以上,在青藏高原地区、华南地区的预估值则低于 SE,同样在青藏高原地区相差最大.另外,也可以看到随着未来温室气体排放的增加,不同集合方法对于温度距平的预估值差别也在增加,在 RCP8.5 的情景下,Op-SE 与 EE,SE 的差值达到最大.

3 结论

本文提出了一种区域最优权重模型,并评估了 CMIP5 中 27 个模式在中国大陆地区 8 个区域的模拟温度效果.将 Op-SE 与传统的 EE 和 SE 进行了比较,并且对中国大陆地区 21 世纪未来温度变化进行了预估,得到以下结论:

(I)根据各模式结果和观测值在各区域线性回归得到的权重来看,模式在不同区域的模拟效果存在差异,但 CESM1-CAM5, HadGEM-AO, HadGEM-ES 在大多数区域有较好的模拟效果, NorESM1-M 在西北地区的模拟能力突出;而

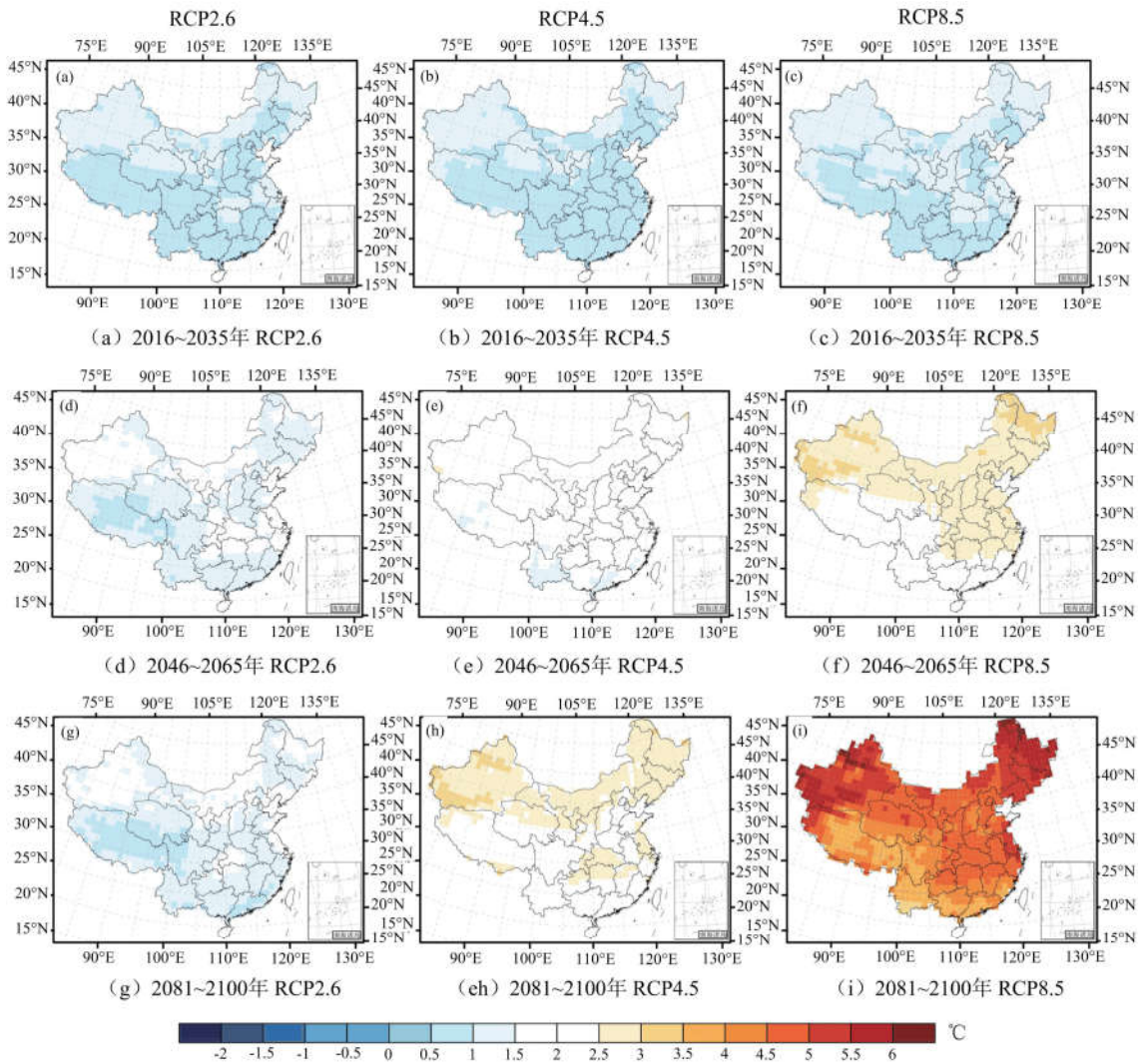


图 10 中国大陆地区在 21 世纪初期(2016~2035 年)、中期(2046~2065 年)、后期(2081~2100 年)平均温度距平在 3 种排放情景下的空间分布

Fig.10 Spatial distributions of the changes in the annual mean surface air temperature over mainland China in early (2016~2035), mid(2046~2065), and end(2081~2100) of the 21st century

MIROC-ESM-CHEM, MRI-CGCM3 在所有区域的模拟能力均较弱,各分区域通过 $\alpha = 0.1$ 的显著性检验的模式个数在 7~15 个,其中华南地区通过检验的模式数最多,东北地区最少,将通过显著性检验的模式作为对应区域的有效模式,从而建立最优权重模型。

(II) O_p-SE 模拟结果与 EE, SE 进行对比发现,优化后回归方程的 F 统计量较优化前有显著提高;将 3 种集合方法进行时间距平相关系数的评估发现, O_p-SE 的相关系数普遍高于 EE 和 SE,尤其在中国中东部改进明显,均通过了显著性水平 $\alpha = 0.1$ 的显著性检验,具有一定的预报技巧,其中华东地区相关系数最高,达到 0.18,而在西北和青藏高原

部分地区, O_p-SE 没有得到改进或改进不明显;各区域均方根误差约在 1~2℃ 之间, SE 和 O_p-SE 较 EE 有明显的改进,尤其在青藏高原地区,由 7.66℃ 改进到 1.4℃. O_p-SE 与观测值的均方根误差在中国大部分区域要优于 SE,尤其在中国东部地区,而在四川盆地等少数地区的误差则要高于 SE.综合 ACC 和 RMSE 评估, EE 表现最差, O_p-SE 在中国绝大部分地区(东北地区、华北地区、华东地区、西南地区和西北地区)表现最优,而在四川盆地和甘肃南部等地区 O_p-SE 较 SE 改进不明显。

(III) 使用训练期建立的最优权重模型预估中国大陆地区 21 世纪未来气温变化发现,在 21 世纪前期,3 种不同情景下的温度模拟差别不大,在 21 世

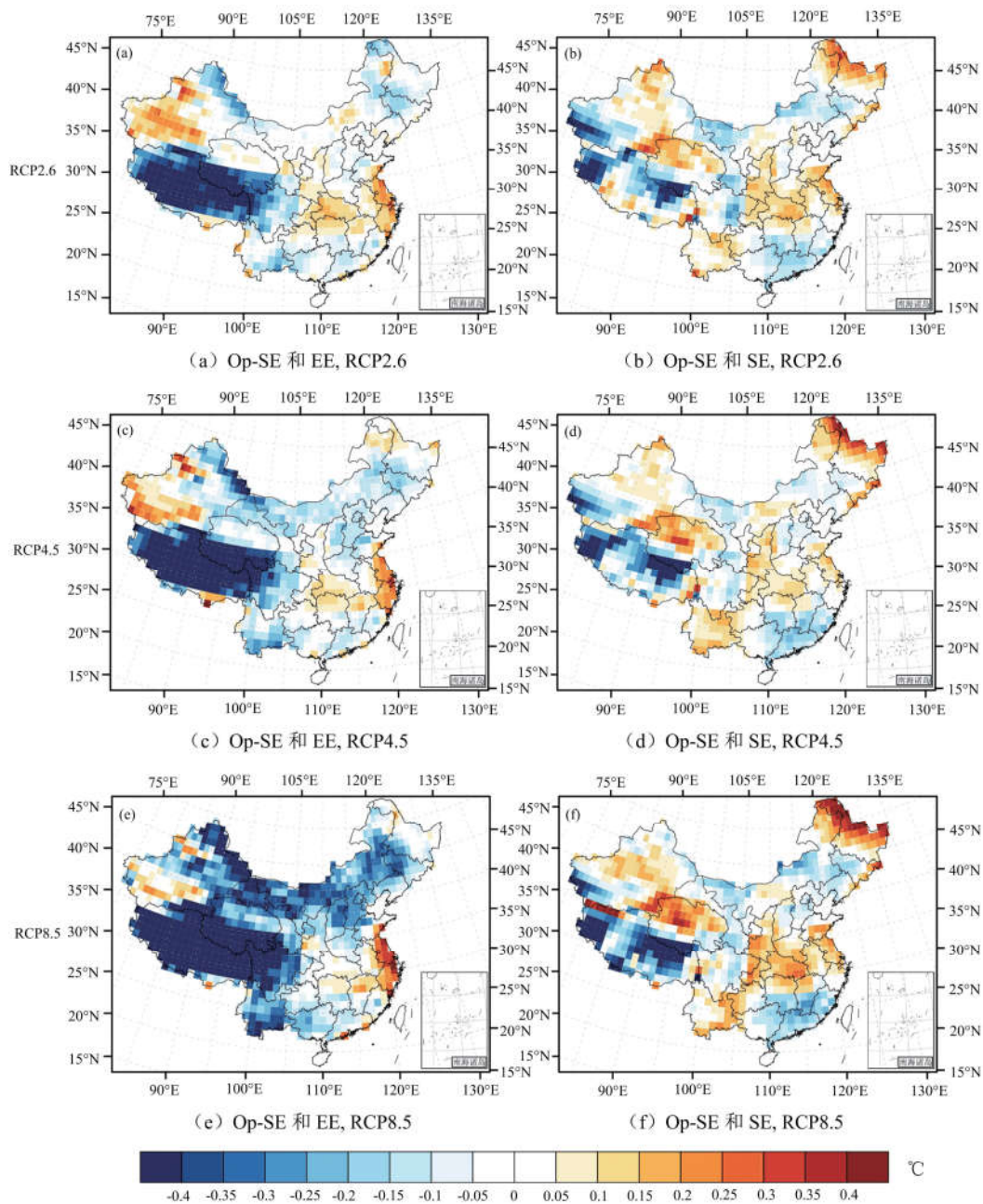


图 11 Op-SE 对未来温度距平的平均预估值与另外两种集合方法预估值的结果差值空间分布

Fig.11 Differences in projection of the changes in surface air temperature

纪中后期差别开始明显,中国东北地区 and 西北地区最先变暖,尤其在后期,RCP8.5 情景下的温度变化更加明显,温度距平在后期变化均超过了 3.5℃,其中东北地区 and 西北地区超过 5℃,而西南地区的温度变化最小.3 种情景在不同时间阶段表现出一致的年变化,均是秋冬季温度距平最高,夏季温度距平最低.对比 3 种集合方法对 21 世纪温度距平的预估结果,Op-SE 在青藏高原地区、内蒙古、华南等地区的增温预估值低于 EE 和 SE,而在新疆北部、华东地区、湖北、重庆等地区预估高于 EE,在东北北部、

新疆北部、青海、华中、华东等地区高于 SE,其中在青藏高原的差别最大,且 Op-SE 与 EE 的差异较 SE 更大.另外,随着未来温室气体排放的增加,不同集合方法对于增温预估的差异也不断增加.

从本文可以看到,Op-SE 在集合成员的选择上提供了一种新的择优方法,其建立的区域最优权重模型,在一定程度上可以进一步改善区域气候预报的效果,为中国的区域气候预报研究提供了参考.由于集合预报的效果取决于单模式的模拟能力,因此对于部分模式模拟能力有限的区域如青藏高原,还

需要对模式进行进一步改进.另外,由于各模式气候内部变率不一致,对外强迫作用的响应也不同,导致不同模式对于气候变化的模拟有差别,而由于气候模态的不断变化,当预报时间远离训练期时,在训练期分析得到的模式权重可能会失效,因此对于 21 世纪中后期的预估结果仍存在不确定性,还需要根据最新的观测结果及时调整权重.

参考文献 (References)

- [1] 冯锦明, 符淙斌. 不同区域气候模式对中国地区温度和降水的长期模拟比较[J]. 大气科学, 2007, 31(5): 805-814.
FENG Jinming, FU Congbin. Inter-comparison of long-term simulations of temperature and precipitation over China by different regional climate models [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2007, 31(5): 805-814.
- [2] 叶笃正, 季劲钧. 迎接大气科学发展即将到来的新飞跃[J]. 地球科学进展, 2005, 20(10): 1047-1052.
YE Duzheng, JI Jingjun. Prospect the overflying development of atmospheric science [J]. Advances in Earth Science, 2005, 20(10): 1047-1052.
- [3] 刘敏, 江志红. 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, 2009, 32(2): 256-268.
LIU Min, JIANG Zhibong. 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, 2009, 32(2): 256-268.
- [4] ZENG N, DING Y, PAN J, et al. Climate change: The Chinese challenge [J]. Science, 2008, 319 (5864): 730-731.
- [5] TAYLOR K E, STOUFFER B J, MEEHL G A. An overview of CMIP5 and the experiment design [J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 2012, 93 (4): 485-498.
- [6] GUO Y, DONG W J, REN F M, et al. Surface air temperature simulations over China with CMIP5 and CMIP3 [J]. Advances in Climate Change Research, 2013, 4 (3): 145 - 152.
- [7] XU Ying, XU Chonghai. Preliminary assessment of simulations of climate changes over China by CMIP5 multi-models [J]. Atmospheric and Oceanic Science Letters, 2012, 5(6): 489-494.
- [8] 张艳武, 张莉, 徐影. CMIP5 模式对中国地区气温模拟能力评估与预估[J]. 气候变化研究进展, 2016, 12 (1): 10-19.
ZHANG Yanwu, ZHANG Li, XU Ying. Simulations and projections of the surface air temperature in China by CMIP5 models [J]. Advances in Climate Change Research, 2016, 12(1): 10-19.
- [9] 姜大膀, 王会军, 郎咸梅. 全球变暖背景下东亚气候变化的最新情景预测[J]. 地球物理学报, 2004, 47(4): 590-596.
JIANG Dabang, WANG Huijun, LANG Xianmei. East Asian climate change trend under global warming background [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2004, 47(4): 590-596.
- [10] ZHOU T, YU R. Twentieth-century surface air temperature over China and the globe simulated by coupled climate models [J]. Journal of Climate, 2006, 19(22): 5843-5858.
- [11] 李振朝, 韦志刚, 吕世华, 等. 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, 2013, 32(4): 921-928.
LI Zhenchao, WEI Zhigang, LV Shihua, et al. Verifications of surface air temperature and precipitation from CMIP5 model in Northern Hemisphere and Qinghai-Xizang Plateau [J]. Plateau Meteorology, 2013, 32(4): 921-928.
- [12] 张冰, 巩远发, 徐影, 等. CMIP5 全球气候模式对中国地区干旱变化模拟能力评估[J]. 干旱气象, 2014, 32 (5): 694-700.
ZHANG Bing, GONG Yuanfa, XU Ying, et al. Evaluation on the simulation of the drought change in China based on global climate models from CMIP5 [J]. Journal of Arid Meteorology, 2014, 32(5): 694-700.
- [13] SONG F, ZHOU T. Interannual variability of East Asian summer monsoon simulated by CMIP3 and CMIP5 AGCMs; Skill dependence on Indian Ocean - western Pacific anticyclone teleconnection [J]. Journal of Climate, 2014, 27(4): 1679-1697.
- [14] 陈晓晨, 徐影, 许崇海, 等. CMIP5 全球气候模式对中国地区降水模拟能力的评估[J]. 气候变化研究进展, 2014, 10(3): 217-225.
CHEN Xiaochen, XU Ying, XU Chonghai, et al. Assessment of precipitation simulations in China by CMIP5 Multi-models [J]. Advances in Climate Change Research, 2014, 10(3): 217-225.
- [15] 丁一汇. 季节气候预测的进展和前景[J]. 气象科技进展, 2011, 1(3): 14-27.
DING Yihui. Progress and prospects of seasonal climate prediction [J]. Advances in Meteorological Science and Technology, 2011, 1(3): 14-27.
- [16] KRISHNAMURTI T N, KISHTAWAL C M, LAROW T E, et al. Improved weather and seasonal climate forecasts from multimodel superensemble [J]. Science, 1999, 285(5433): 1548-1550.