

云翔,程嘉艺,李庆祥,2020. CMIP5 气候模式对亚洲升温幅度的模拟与预估[J]. 气象,46(2):145-157. Yun X, Cheng J Y, Li Q X, 2020. Estimation of CMIP5 multi-mode on the extent of rise in air temperature in Asia[J]. Meteor Mon, 46(2):145-157 (in Chinese).

CMIP5 气候模式对亚洲升温幅度的模拟与预估*

云翔^{1,2} 程嘉艺² 李庆祥^{2,3}

1 中国气象科学研究院,北京 100081

2 中山大学大气科学学院,广州 510275

3 中山大学一带一路研究院,珠海 519082

提 要: 基于新的全球表面温度数据集 CMST (China merged surface temperature), 全面评估了参加国际耦合模式比较计划第 5 阶段 (CMIP5) 的 27 个全球气候模式 1900—2017 年的气候模拟结果 (1900—2005 年为模式历史模拟, 2006—2017 年为不同典型浓度路径下的预估)。泰勒图及各种统计参数的对比表明, 一些模式无论在历史模拟时段, 还是在历史模拟和近期预估拼接时段, 都稳定、较好地模拟出了观测序列的变化特征。利用筛选出模拟效果相对较优的 9 个模式, 系统比较了其集合平均 MT9 (mean model top 9) 与所有模式的集合平均 MAM (mean all models)。分析结果表明: 无论在何种排放路径下, 不管是时间变化, 还是从空间分布方面, 多数模式可能高估了亚洲区域增暖趋势, 导致 MAM 过高估计了亚洲区域温度变化幅度与长期趋势, 而优选的模式集合 MT9 明显比 MAM 更接近于观测值。进一步, 采用了 MT9 的预估结果分析了 2018—2099 年的亚洲区域预估的地表升温幅度: 到 2099 年, 在 RCP2.6 浓度路径下, MT9 预估亚洲地区的升温幅度较小, 约为 0.08℃; 在 RCP4.5 浓度路径下, 升温约为 1.20℃; 在 RCP8.5 浓度路径下, 升温将达 3.54℃, 这些结果均略小于所有模式集合 MAM 的升温幅度, 因而更加合理; 同时还基于 MT9 预估分析了 2018—2099 年的温度距平的空间变化。

关键词: 表面温度, CMIP5 模式, 气候变化, 亚洲

中图分类号: P423, P467

文献标志码: A

DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2020.02.001

Estimation of CMIP5 Multi-Mode on the Extent of Rise in Air Temperature in Asia

YUN Xiang^{1,2} CHENG Jiayi² LI Qingxiang^{2,3}

1 Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081

2 School of Atmospheric Sciences, Sun Yat-Sen University, Guangzhou 510275

3 Institute of One Belt One Road, Sun Yat-Sen University, Zhuhai 519082

Abstract: Based on the new global surface temperature data set CMST (China merged surface temperature), we systematically evaluated the historical climate simulation results of the 27 global climate models which are participating in the International Coupling Model Comparison Plan Phase 5 (CMIP5) from 1900 to 2017. Historic model simulations for the period of 1900—2005 and projections for the 3 different representative concentration pathways (RCP2.6, RCP4.5, RCP8.5) for 2006—2017. According to the comparison of various parameters in Taylor diagram, 9 models with better simulation results (MT9) are selected to present the models ensemble simulations. Compared with the ensemble average of mean all models

* 国家重点研发计划 (2018YFC150129, 2017YFC1502301) 共同资助

2019 年 3 月 29 日收稿; 2019 年 7 月 22 日收修定稿

第一作者: 云翔, 主要从事气候变化研究. Email: yunxiang_1991@126.com

通讯作者: 李庆祥, 主要从事气候变化研究. Email: liqingx5@mail.sysu.edu.cn

(MAM), under any of the three RCPS, MT9 is significantly closer to the observed value (MAM overestimates the temperature change) in both spatial distribution and time variation. On this basis, this paper uses the prediction results of MT9 to analyze the amplitude of Asia surface air temperature rises during 2018—2099. The result showed that MT9 is expected to have smaller temperature warming than those of MAM under all the RCPs in the Asian region, which is about 0.08°C for RCP 2.6, 1.20°C for RCP4.5 and 3.54°C for RCP8.5. These results are all smaller than those from the MAM ensembles, thus are more reasonable. In addition, this paper also analyzed the spatial distribution of the surface temperature anomalies in Asia based on the MT9.

Key words: air temperature, CMIP5 models, climate change, Asia

引 言

自从工业革命以来,全球变暖问题日趋严重,并且对全球的生态系统和人类社会产生了不可忽视的影响(丁婷等,2017;董李丽等,2015;黄海玲等,2015;Schneider et al,2007;王萌等 2016;王铭昊等,2018;向辽元和陈星,2006)。随着影响的逐渐增加,全球温度变化的研究受到越来越多的政府和研究机构的重视,成为气候变化研究中的重要议题(苏京志等,2016;Stocker et al,2013)。

气候系统模式可以模拟和预估未来的温度变化,其可靠性一直以来受大家所关注,耦合模式比较计划(Coupled Model Intercomparison Project, CMIP)由世界气候研究计划所组织,其目的是在统一的框架下进行多模式的比较(张莉等,2013;赵宗慈等,2018)。目前,政府间气候系化专门委员会(IPCC)已发布 5 次评估报告(AR)。相对于 CMIP3 (AR4 评估中的模式),CMIP5 (AR5 中的气候系统模式)对表面温度的模拟在许多重要方面得到改善。通过在同样水平分辨率上评估 25 个气候模式对中国年均地表气温 1906—2005 年气候态和变化趋势的模拟能力,郭彦等(2013)指出 CMIP5 模式具备合理的模拟能力,同时较 CMIP3 模式有所改进。全球年平均表面温度的历史时期的变化过程,尤其是迅速增暖期(20 世纪下半叶)以及迅速降温期(几次大火山爆发后),都被 CMIP5 模式较好地重现出来。但 AR5 也指出,模式模拟与观测的温度趋势在 1998—2012 年期间存在较大的差异,大多数模式低估了过去 30 多年来平流层长期的降温趋势,却高估了热带对流层的增温趋势。虽然 AR5 中指出近十几年全球的增温趋势有明显的“减缓”,但已有学者指出全球温度持续升高仍然是不可否认的(Schmidt

et al,2014);而近期更多的研究表明,这种所谓的“减缓”实际是在一段时期内的阶段性特征而已(Huang et al,2017;2018;Li et al,2019)。

许多学者在关于全球和区域性模式模拟的评估方面取得了一系列有价值的结论。由于观测序列数据存在一定的误差,以往的模拟研究并不能很好地反映气温的长期变化趋势,现今评估气候模式的基准数据则更加精确(Li et al,2017)。Kim et al (2012)认为大部分 CMIP5 气候模式高估了 1960—2010 年全球平均表面温度的增暖趋势;魏萌和乔方利(2016)利用集合经验模态分解方法分析了 CMIP5 模式模拟的 1851—2014 年全球温度变化,认为模式无法模拟出最近的增暖减缓现象主要是由于其在长期趋势和多年代际尺度上的不足;Li et al (2017)通过比较 1900 年以来的中国气温变化序列(经均一化和抽样偏差纠正)和 CMIP5 模拟结果,发现模式能够较好地模拟出气温变化的年代际特征与长期趋势,同时也使得经均一化订正的观测数据和模拟结果的可信程度得到进一步提升;Gao et al (2012)通过分析 1901—1999 年中国平均气温,表明 CMIP5 的模拟结果较 CMIP3 更接近于观测值,即 CMIP5 的模拟结果优于 CMIP3;Xu and Xu(2012)分析 CMIP5 模式近 45 年中国气温、降水变化,评估中国当前气候的模拟效果,并指出模型在再现变暖趋势方面表现良好,但对降水的模拟能力有限;陶纯苇等(2016)利用观测资料和 CMIP5 模式模拟结果,分析中国东北三省(1961—2005 年)模式的气温和降水的模拟能力,同样认为模式对气温的模拟效果优于降水,此外,他们还发现模式对空间分布的模拟能力优于时间变化;周秀华和肖子牛(2014)基于 CMIP5 未来 50 年的预估数据,发现 CMIP5 对于云南及周边地区气温和降水的空间分布具有一定的模拟能力,与 Xu and Xu(2012)相同,他们也认为气温

模拟优于降水模拟模式,此外他们还指出模式集合模拟效果优于单一模式。

基于 Li et al(2017)的研究成果,本文将研究区域扩充到更大尺度上的亚洲区域(包括陆地和海洋)。采用最新发展的全球数据集产品,考察 CMIP5 模式能否将该区域表面温度变化较好的模拟出来,从而减小温度变化的不确定性,为未来温度变化预估提供更为可靠的支撑。

1 资料和方法

本文研究区域为亚洲地区($5^{\circ} \sim 60^{\circ} \text{N}$, $60^{\circ} \sim$

180°E),区域划分参考 Jones and Moberg(2003)。在该区域中,陆地占总面积的 53.5%,海洋占 46.5%(海陆分布数据^①由美国 UCAR 提供)。

在 CMIP5 的众多模式中,参与历史和未来全球气候变化模拟试验的共有 50 多个。本文选取了其中同时含有历史气候模拟试验以及不同浓度路径(representative concentration pathways, RCP^②)的 RCP2.6、RCP4.5 和 RCP8.5 情景下的气候变化预估数据的 27 个气候模式(表 1,考虑到 RCP6.0 试验的模式较少,本文没有采用该浓度路径的结果)进行评估和分析。模式评估数据均选取全强迫试验(包括历史模拟试验和典型 RCP 未来情景预估试验)

表 1 本文选用的 27 个模式及其模拟数据概况

Table 1 Description of the 27 models selected in this paper

编号	模式名称	研发国家	分辨率/($^{\circ}$)	资料起止年月			
				历史气候	RCP2.6	RCP4.5	RCP8.5
1	BCC-CSM1.1	中国	64×128	185001—201212	200601—230012	200601—230012	200601—230012
2	BCC-CSM1.1(m)	中国	160×320	185001—201212	200601—210012	200601—210012	200601—209912
3	BNU-ESM	中国	64×128	185001—200512	200601—210012	200601—210012	200601—210012
4	CanESM2	加拿大	64×128	185001—200512	200601—230012	200601—230012	200601—210012
5	CCSM4	美国	192×288	185001—200512	200601—230012	200601—229912	200601—230012
6	CESM1(CAM5)	美国	192×288	185001—200512	200601—230012	200601—230012	200601—210012
7	CNRM-CM5	法国	128×256	185001—200512	200601—210012	200601—230012	200601—230012
8	CSIRO-Mk3.6.0	澳大利亚	96×192	185001—200512	200601—210012	200601—230012	200601—230012
9	FGOALS-g2	中国	60×128	185001—200512	200601—210112	200601—227512	200601—210112
10	FIO-ESM	中国	64×128	185001—200512	200601—210012	200601—210012	200601—210012
11	GFDL-CM3	美国	90×144	186001—200512	200601—210012	200601—210012	200601—210012
12	GFDL-ESM2G	美国	90×144	186101—200512	200601—210012	200601—210012	200601—210012
13	GFDL-ESM2M	美国	90×144	186101—200512	200601—210012	200601—220012	200601—220012
14	GISS-E2-H	美国	90×144	185001—200512	200601—230012	200601—230012	200601—230012
15	GISS-E2-R	美国	90×144	185001—200512	200601—230012	200601—230012	200601—230012
16	HadGEM2-AO	韩国	145×192	186001—200512	200601—210012	200601—210012	200601—210012
17	HadGEM2-ES	英国	145×192	185912—200511	200512—229012	200512—229912	200512—229912
18	IPSL-CM5A-LR	法国	96×96	185001—200512	200601—230012	200601—230012	200601—230012
19	IPSL-CM5A-MR	法国	143×144	185001—200512	200601—210012	200601—230012	200601—210012
20	MIROC5	英国	128×256	185001—201212	200601—210012	200601—210012	200601—210012
21	MIROC-ESM-CHEM	日本	64×128	185001—200512	200601—210012	200601—210012	200601—210012
22	MIROC-ESM	德国	64×128	185001—200512	200601—210012	200601—230012	200601—210012
23	MPI-ESM-LR	德国	96×192	185001—200512	200601—230012	200601—230012	200601—230012
24	MPI-ESM-MR	日本	96×192	185001—200512	200601—210012	200601—210012	200601—210012
25	MRI-CGCM3	挪威	160×320	185001—200512	200601—210012	200601—210012	200601—210012
26	NorESM1-ME	挪威	96×144	185001—200512	200601—210112	200601—210212	200601—210012
27	NorESM1-M	俄罗斯	96×144	185001—200512	200601—210012	200601—230012	200601—210012

^①下载地址: <http://www.ncl.ucar.edu/Applications/Data/cdf/landsea.nc>

^②RCP 代表未来可能的排放路径。根据人口增长和能源生产、粮食生产和土地利用的发展,各种排放路径都是可能的。通过简单的碳循环气候模型,计算了二氧化碳、其他温室气体和气溶胶的浓度。这些浓度对应于辐射变化,每个浓度路径名称对应于 2100 年达到的辐射强迫($2.6, 4.5$ 和 $8.5 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$)。

的模拟结果, 27 个耦合模式模拟和预估数据均为公开提供下载的数据^③。规定历史模拟试验的时间段为 1900 年 1 月至 2005 年 12 月(其中 HadGEM2-ES 模式历史模拟试验的时间段为 1900 年 1 月至 2005 年 11 月, 年时间序列为 1900—2004 年)。而对不同情景下的模式预估, 时间段则都为 2006 年 1 月至 2099 年 12 月。为了方便比较, 参考赵天保等(2014)研究, 首先计算表面温度的距平值^④, 然后利用双线性插值方法将该数据插值到 $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ 的网格上。

验证模式所使用的全球表面温度观测数据为 CMST(China merged surface temperature)(Li et al, 2019; Yun et al, 2019), 该数据集的陆地部分数据来自中国、英国、加拿大、澳大利亚和美国等联合团队研发的全球陆地均一化和整合逐月气温数据 C-LSAT(Xu et al, 2018), 海洋数据来自美国国家海洋和大气管理局国家环境信息中心最新升级订正的逐月海洋表面温度数据 ERSSTv5(Huang et al, 2017)。C-LSAT 数据集在亚洲地区, 尤其是亚洲陆地地区的站点多于其他英、美研发的全球陆地气温数据集产品, 且具有较好的数据质量(Xu et al, 2018; Yun et al, 2019), 全球海洋表面温度数据 ERSSTv5 采用了更为准确的浮标数据作为订正基准, 所以使用该数据集检验各模式对亚洲地区近表面温度的模拟情况。该数据集的空间分辨率为 $5^{\circ} \times 5^{\circ}$, 起始时间为 1900 年 1 月, 目前已更新到 2017 年 12 月。

2 亚洲区域表面温度的时间变化

图 1 给出表面温度月平均距平值的时间演变特征, 所有模式的集合平均值称为 MAM(mean all models)。模式与观测之间以及各模式之间在 20 世纪 60 年代之前的差异很大; 在此之后一致性都有所提高。此外, 20 世纪 20—40 年代实际观测的温度略低于模式模拟, 其原因可能是, 与其他海洋表面温度数据(比如 HadSST3、COBE)相比, ERSSTv5 略有低估(Huang et al, 2017)。

与其他的研究相似, 采用泰勒图(Taylor, 2001)的方法定量评估各个模式与观测值的差异。根据标准偏差、中心模式均方根误差[计算方法见 Taylor

(2001)]和相关系数的比值, 泰勒图可以简要统计模拟与观测之间的匹配性, 从而直观地反映多模式模拟能力及彼此之间的差异。图 2a 为 1900—2005 年历史模拟, 图 2b~2d 分别为 1900—2017 年 RCP 衔接模拟(其中, 1900—2005 年采用历史模拟, 2006—2017 年分别使用不同排放情景预估)。从图中可以看出: 除个别模式外, 大部分模式历史模拟和 RCP 衔接模拟的标准偏差为 0.2~0.4, 与观测值的标准偏差相差 ± 0.1 ; 模拟结果的变率都比较小, 多数模式历史模拟和 RCP 衔接模拟的中心模式均方根误差在 0.2~0.3; 值得指出的是, RCP 衔接模拟的模式与观测的相关性优于历史模拟(前者相关系数 0.6~0.9, 后者 0.3~0.9)。并且, 与任意某个模式相比, 在历史模拟中亦或在 RCP 衔接模拟中, MAM 均更接近于观测值。从上述分析看来, 增加 2006—2017 年的预估数据后, CMIP5 模式能更好、更真实地反映亚洲地区真实的温度变化特征。

在泰勒图中, 往往通过中心模式均方根误差来统计与观测值的接近程度, 该值越小, 意味着与观测值越接近(Taylor, 2001)。所以, 我们对中心模式均方根误差(历史模拟以及 RCP 衔接模拟)排序, 该值排名前十的模式用阴影标记(表 2)。然后, 统计各模式在历史模拟和 RCP 衔接模拟中, 中心模式均方根误差排在前十的次数。无论是历史模拟还是衔接模拟中, 模拟效果都较好的模式是比较稳定的, 这也说明这些模式对亚洲地区温度长期变化的模拟是相对比较成功的。根据表 2, 选出次数 ≥ 3 次的模式共 9 个: BCC-CSM1.1、FGOALS-g2、FIO-ESM、GFDL-ESM2M、GISS-E2-H、GISS-E2-R、MPI-ESM-MR、NorESM1-M 和 CESM1(CAM5), 将这 9 个模式记为 Top9。

将 Top9 模式的集合平均值记为 MT9(mean top 9 models)。分别在历史模拟和 RCP 衔接模拟下, 计算观测与 MT9、MAM 年时间序列之间的均方根误差[计算方法见张宏芳和陈海山(2011)]、平均绝对误差、相关系数、中心模式均方根误差, 以便定量比较 MT9、MAM 与观测值的相似性, 计算结果见表 3。在历史模拟和 RCP 衔接模拟中, 与 MAM 相比, MT9 的均方根误差减小 0.04, 平均绝对误差减小 0.03 左右, 相关系数均有所增加, 所以从时间序列

^③下载地址: <https://cera-www.dkrz.de/WDCC/ui/cersearch/>

^④本文计算结果均为距平值, 除特别标注外, 均以 1961—1990 年作为参考时期。

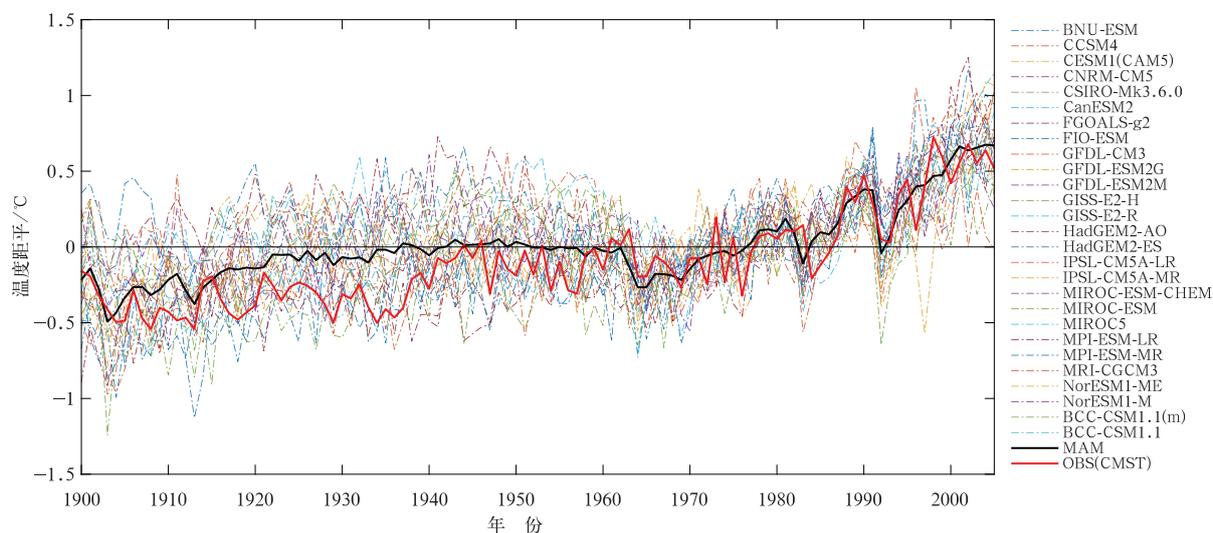


图 1 1900—2005 年亚洲地区 27 个模式、MAM 和观测的温度距平时间序列
 Fig. 1 Time series of 27 models, MAM and observation temperature anomalies in Asia from 1900 to 2005

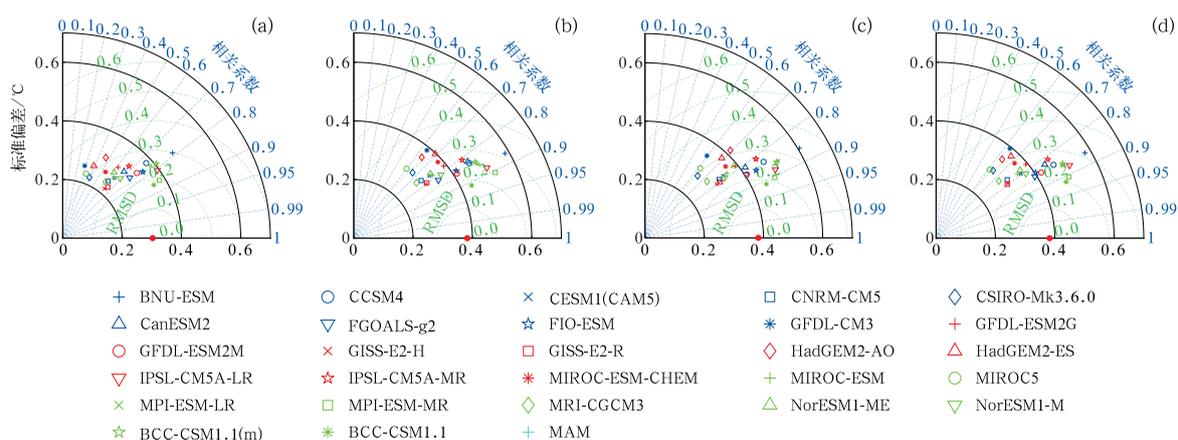


图 2 年平均温度距平在历史模拟和不同辐射强迫路径下预估的泰勒图*
 (a) 历史模拟, (b) RCP2.6 衔接模拟, (c) RCP4.5 衔接模拟, (d) RCP8.5 衔接模拟
 (横坐标红点代表观测值)

(注:历史模拟:1900—2005 年的模式模拟;RCP 衔接模拟:从 1900—2017 年的模式模拟,其中 1900—2005 年使用历史模拟,2006—2017 年分别使用 RCP2.6、RCP4.5、RCP8.5 下的情景预估,下同)

Fig. 2 Taylor diagram of annual average temperature anomalies under historical and different RCPs scenarios*
 (a) historical simulation, (b) RCP2.6 scenario, (c) RCP4.5 scenario, (d) RCP8.5 scenario
 (Red dot on the abscissa represents observation)

(Note: The historical simulation is from 1900 to 2005. And the RCP scenarios are from 1900 to 2017 in which 1900—2005 is historical simulation and 2006—2017 are the forecasting from RCP2.6, RCP4.5, and RCP8.5, the same below)

列的分析来看,MT9 与观测值的一致性更好;此外,MT9 的中心模式均方根误差比 MAM 小(前者比后者小 0.02 左右),根据前面的分析可知,若绘制泰勒图,则在图中 MT9 更接近于观测值(图略);对于不同 RCP 衔接模拟的 MT9,虽然 RCP2.6 和 RCP4.5

的均方根误差和平均绝对误差较小,RCP4.5 的相关系数较大,但不同 RCP 衔接模拟之间的差异很小,所以说明 3 种衔接模拟的预估值差异较小,与观测也较为接近。

表 4 为 1900—2005 年历史模拟的温度趋势和

表 2 温度距平在历史模拟和不同 RCP 下衔接模拟的中心模式均方根误差(单位:°C)

Table 2 The centered pattern RMS (root-mean-square) difference (unit:°C) of annual average temperature anomalies under historical and different RCPs scenarios

模式名称	中心模式均方根误差				在不同情景下 排名前十的次数
	历史模拟	RCP2.6	RCP4.5	RCP8.5	
BCC-CSM1.1	0.181	0.180	0.186	0.199	4
FGOALS-g2	0.219	0.219	0.220	0.215	4
FIO-ESM	0.227	0.232	0.231	0.227	4
GFDL-ESM2M	0.227	0.222	0.220	0.225	4
GISS-E2-H	0.233	0.230	0.230	0.233	4
GISS-E2-R	0.229	0.232	0.230	0.232	4
MPI-ESM-MR	0.198	0.242	0.213	0.218	4
NorESM1-M	0.230	0.233	0.234	0.233	4
CESM1(CAM5)	0.241	0.247	0.242	0.239	3
IPSL-CM5A-LR	0.231	0.248	0.240	0.256	2
MIROC-ESM	0.243	0.244	0.245	0.243	2
CNRM-CM5	0.244	0.249	0.239	0.244	1
BCC-CSM1.1(m)	0.253	0.259	0.266	0.257	0
BNU-ESM	0.297	0.314	0.336	0.313	0
CanESM2	0.245	0.260	0.245	0.251	0
CCSM4	0.256	0.255	0.260	0.250	0
CSIRO-Mk3.6.0	0.296	0.289	0.294	0.298	0
GFDL-CM3	0.335	0.328	0.329	0.332	0
GFDL-ESM2G	0.267	0.257	0.257	0.263	0
HadGEM2-AO	0.315	0.314	0.313	0.312	0
HadGEM2-ES	0.312	0.305	0.298	0.306	0
IPSL-CM5A-MR	0.257	0.266	0.269	0.268	0
MIROC5	0.312	0.312	0.307	0.308	0
MIROC-ESM-CHEM	0.275	0.277	0.267	0.280	0
MPI-ESM-LR	0.246	0.254	0.271	0.250	0
MRI-CGCM3	0.247	0.254	0.259	0.258	0
NorESM1-ME	0.258	0.251	0.259	0.251	0

表 3 MT9、MAM 年平均温度距平的中心模式均方根误差、均方根误差、平均绝对误差(单位:°C)和相关系数

Table 3 The centered pattern RMS difference, root mean square error, mean absolute error (unit:°C), and correlation coefficient of the annual average temperature anomalies of MT9 and MAM

	历史模拟			
	中心模式均方根误差	均方根误差	平均绝对误差	相关系数
MT9	0.139	0.150	0.120	0.888
MAM	0.158	0.189	0.153	0.853
	RCP2.6			
	中心模式均方根误差	均方根误差	平均绝对误差	相关系数
MT9	0.140	0.173	0.136	0.922
MAM	0.156	0.189	0.152	0.912
	RCP4.5			
	中心模式均方根误差	均方根误差	平均绝对误差	相关系数
MT9	0.138	0.196	0.149	0.914
MAM	0.158	0.192	0.156	0.910
	RCP8.5			
	中心模式均方根误差	均方根误差	平均绝对误差	相关系数
MT9	0.141	0.197	0.148	0.912
MAM	0.158	0.192	0.156	0.909

表 4 1900—2005 年和 1900—2017 年各模式、MT9、MAM 的线性温度趋势[单位: $^{\circ}\text{C} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$]Table 4 Temperature linear trends of 27 models, MT9 and MAM from 1900 to 2005, and from 1900 to 2017 [unit: $^{\circ}\text{C} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$]

模式名称	1900—2005	1900—2017
BNU-ESM	0.12±0.009	0.146±0.009
CCSM4	0.091±0.008☆☆	0.112±0.007
CESM1(CAM5)	0.049±0.007	0.069±0.007
CNRM-CM5	0.037±0.007	0.057±0.007
CSIRO-Mk3.6.0	0.017±0.007	0.042±0.007
CanESM2	0.053±0.008	0.089±0.009☆
FGOALS-g2	0.074±0.006☆☆	0.091±0.006☆☆
FIO-ESM	0.093±0.007☆	0.105±0.006☆
GFDL-CM3	0.009±0.008	0.050±0.009
GFDL-ESM2G	0.045±0.009	0.072±0.008
GFDL-ESM2M	0.075±0.008☆☆	0.095±0.007☆☆
GISS-E2-H	0.048±0.005	0.068±0.005
GISS-E2-R	0.043±0.006	0.063±0.006
HadGEM2-AO	0.026±0.010	0.053±0.009
HadGEM2-ES	0.013±0.009	0.054±0.009
IPSL-CM5A-LR	0.097±0.008☆	0.122±0.008
IPSL-CM5A-MR	0.070±0.008☆☆	0.101±0.008☆☆
MIROC-ESM-CHEM	0.050±0.007	0.076±0.007
MIROC-ESM	0.048±0.007	0.07±0.007
MIROC5	0.016±0.007	0.041±0.007
MPI-ESM-LR	0.106±0.007	0.129±0.007
MPI-ESM-MR	0.103±0.007	0.127±0.007
MRI-CGCM3	0.051±0.006	0.062±0.005
NorESM1-ME	0.054±0.007	0.076±0.007
NorESM1-M	0.053±0.007	0.074±0.007
BCC-CSM1.1(m)	0.103±0.008	0.122±0.007
BCC-CSM1.1	0.095±0.007☆	0.115±0.006
MAM	0.061±0.005	0.085±0.005
MT9	0.070±0.004	0.090±0.005

注:“☆☆”表示该模式的温度趋势比 MT9、MAM 接近观测;“☆”表示该模式的温度趋势仅比 MAM 更接近观测。

Note:“☆☆” indicates that the temperature trend of the model is closer to observation than MT9 and MAM;

“☆” indicates that the temperature trend of the model is closer to observation than MAM.

1900—2017 年 3 种 RCP 衔接模拟的平均值(由于 1900—2017 年 RCP2.6、RCP4.5 和 RCP8.5 温度趋势差异不大,所以取三者的平均值),不确定区间均已通过 0.05 的显著性水平检验。为了便于比较与观测温度趋势的接近程度,我们分别计算了各模式、MT9 和 MAM 与观测温度趋势差值的绝对值。观测在 1900—2005 年的温度趋势为 $0.081 \pm 0.005 \text{ } ^{\circ}\text{C} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$,历史模拟中 MT9 的温度趋势比 23 个模式、MAM 的温度趋势比 20 个模式更接近于观测(前者优于 85.19% 的模式,后者优于 74.07% 的模式)。观测在 1900—2017 年的温度趋势为 $0.097 \pm 0.005 \text{ } ^{\circ}\text{C} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$,RCP 衔接模拟中 MT9 比 24 个模式、MAM 比 22 个模式更接近观测的温度趋势(前者优于 88.89% 的模式,后者优于 81.48% 的模

式)。综上,与绝大多数的模式相比,MT9 和 MAM 的温度趋势式更接近观测。此外,从温度趋势方面看,MT9 与观测的一致性比 MAM 更好。

1900—2017 年不同浓度路径下各模式、MT9 集合、MAM 集合模拟和观测的时间序列如图 3 所示。其中,1900—2005 年为各模式的历史模拟,2006—2017 年为各模式在不同浓度路径下的预估。虽然各模式和观测均表现出一致的升温特征,但是 MAM 模拟的升温幅度一直大于实际上温度上升的幅度,也就是说 MAM 的预估略高估了 CMST 观测温度的变化。这和 Kim et al(2012)认为大多数模式对近几十年的全球表面温度变化趋势模拟偏高的结果也非常一致。从图 3 中还可以看到,在 2006—2017 年间,即使最小的辐射强迫路径下 MAM 衔接

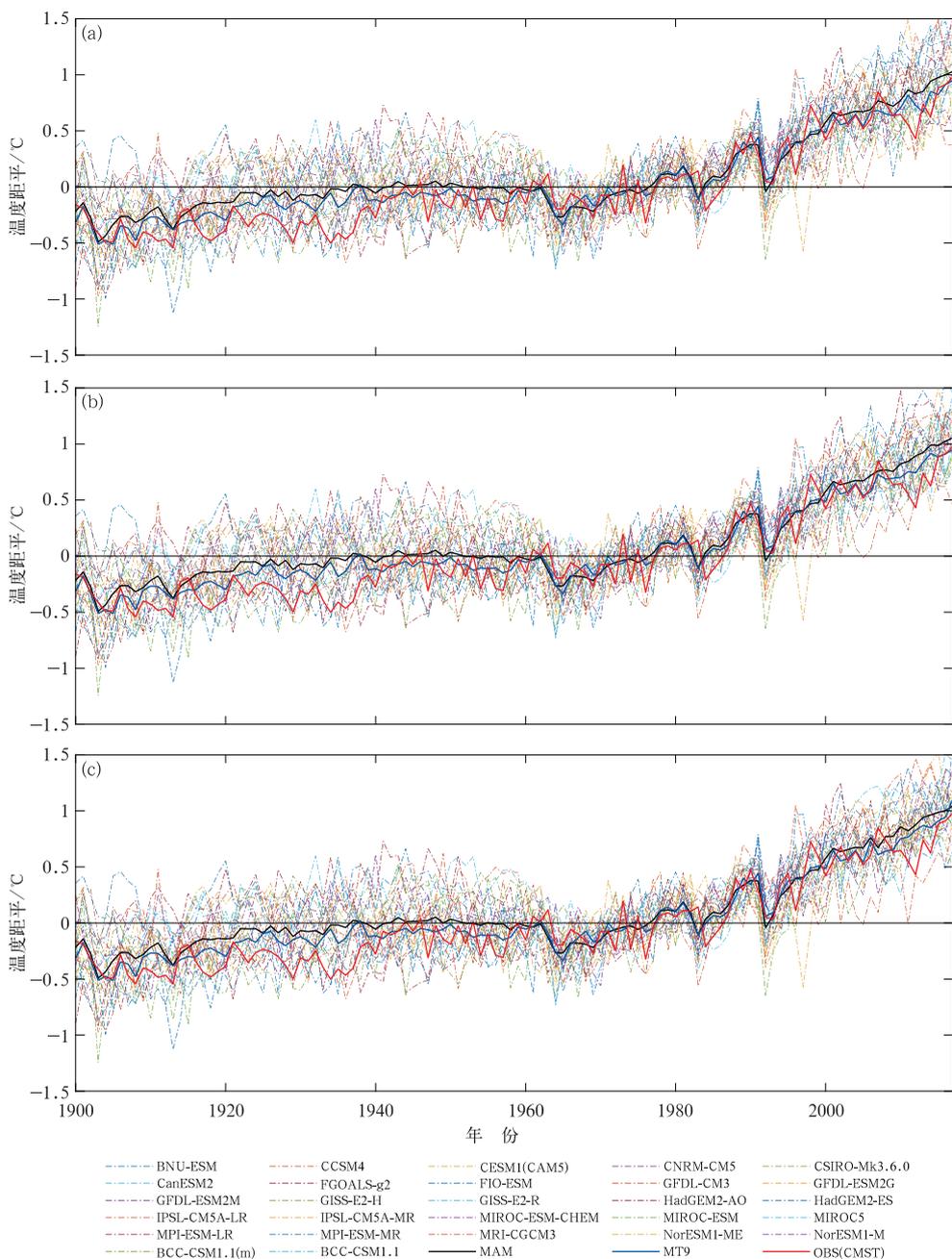


图 3 1900—2017 年亚洲地区 27 个模式、MT9、MAM 和观测年平均温度距平时间序列

(a)RCP2.6,(b)RCP4.5,(c)RCP8.5

Fig. 3 Time series of 27 models, MT9, MAM and observation annual temperature anomalies in Asia from 1900 to 2017

(a) RCP2.6, (b) RCP4.5, (c) RCP8.5

模拟的升温幅度依旧大于实际升温幅度,而 MT9 则与观测值则更加接近,甚至在近两三年,在各种不同浓度路径下 MT9 都基本与观测值重合。由此可以认为 MT9 的结果比 MAM 更为可靠。

3 亚洲区域表面温度距平的空间分布

总体来说,历史模拟(图 4a、4b)、RCP 衔接模拟

(图 4c~4h)中,MT9 和 MAM 与观测的正相关程度均较高,具体表现为在太平洋低纬度地区、阿拉伯海和孟加拉湾相关系数达 0.7 以上;但是仍有局部地区(比如太平洋中纬度地区、亚洲大陆的东南区域和印度半岛)相关性略低。从图 4 直观来看,MT9 与 MAM 相关系数空间分布差异并不大。但是通过计算相关系数的空间平均值,发现无论是历史模拟(MT9 为 0.476, MAM 为 0.453)还是 RCP 衔接模拟(RCP2.6: 0.599, 0.575; RCP4.5: 0.597, 0.580; RCP8.5: 0.596, 0.578), MT9 均略大于 MAM;此外,还发现任一 RCP 衔接模拟与观测值的一致性均优于历史模拟。

与相关系数空间分布相似,在亚洲区域温度距

平的空间分布上,MT9 也略优于 MAM。2006—2017 年观测平均温度距平显示:除印度半岛外,亚洲陆地的大部分格点的温度距平都在 0.6°C 以上,亚洲海洋的温度距平在 0.3°C 以上(图 5a)。虽然在模式模拟中,MAM、MT9 在亚洲海面上都存在温度距平值在 0.6°C 以上的格点,但在不同浓度路径下的 MAM 温度距平大于 0.6°C 的格点更多;与 MT9 相比,MAM 在不同路径下都过高估计了亚洲海洋地区和西西伯利亚平原附近的温度距平(图 5b~5g)。所以在温度距平的空间分布中,MT9 对温度距平的模拟更接近观测值。除此之外,在三种不同浓度路径中,RCP4.5 的浓度路径的温度距平与观测值最为接近。

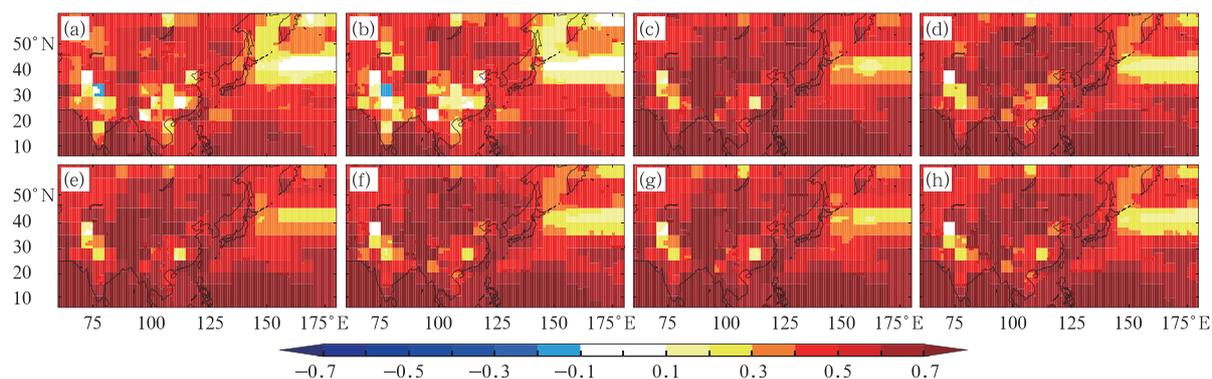


图 4 亚洲地区 MT9(a,c,e,g),MAM(b,d,f,h)模式模拟与观测的年平均温度距平时间序列相关系数空间分布
(a,b)历史模拟,(c,d)RCP2.6 衔接模拟,(e,f)RCP4.5 衔接模拟,(g,h)RCP8.5 衔接模拟

Fig. 4 Spatial distribution of correlation coefficient between the MT9 (a, c, e, g) and MAM (b, d, f, h) simulated and observed annual average temperature anomalies in Asia
(a, b) historical, (c, d) RCP2.6, (e, f) RCP4.5, (g, h) RCP8.5

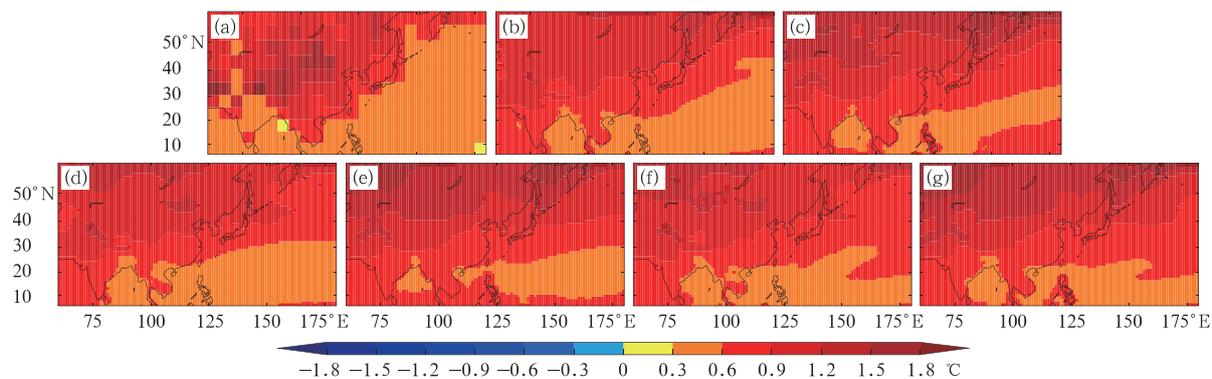


图 5 亚洲地区观测(a)和 MT9(b,d,f)、MAM(c,e,g)模式预估的 2006—2017 年平均温度距平
(b,c)RCP2.6,(d,e)RCP4.5,(f,g)RCP8.5

Fig. 5 Average temperature anomalies for observation (a) and model estimates of MT9 (b, d, f) and MAM (c, e, g) in Asia from 2006 to 2017
(b, c) RCP2.6, (d, e) RCP4.5, (f, g) RCP8.5

综上,无论是从模式与观测的年平均温度距平的相关性,还是从温度距平分布来看,与历史模拟相比,衔接模拟与观测值的一致性更好(相关系数上还有所提高);与 MAM 相比,MT9 与观测的接近程度更高。此外,在 MT9 的 3 种 RCP 衔接模拟中,RCP4.5 情景模拟下的预估最接近观测值(但三者差异很小)。

4 亚洲区域 21 世纪温度预估

4.1 升温幅度

通过前面的分析,在长期(118 a)的模拟中,MT9 比 MAM 更接近观测,说明这 9 个模式优于其他模式的模拟效果且较为稳定,因此以 MT9 作为未来温度变化预估的参考可能会更接近于真实的温度变化。所以,下面对比分析 MAM、MT9 对未来温度的预估的差别。

图 6 为 MAM、MT9 分别在不同 RCP 下的预估结果。总的来说,MT9 预估的未来的升温幅度都略小于 MAM,也就是说 MAM 过高估计了未来温度的变化。在 RCP2.6 浓度路径下,温度距平从 2018 年开始一直上升,MAM 和 MT9 分别在 2049、2052 年达到最大值(分别为 1.693、1.397 $^{\circ}\text{C}$),随后逐渐趋于平缓下降,到 2099 年升温幅度分别约为 0.081、0.322 $^{\circ}\text{C}$,增温趋势(2018—2099 年)分别为 0.039 \pm 0.005、0.010 \pm 0.005 $^{\circ}\text{C}\cdot(10\text{ a})^{-1}$;在 RCP4.5 浓度路径下,温度一直增加,到 21 世纪 70 年代增温趋势开始减缓,到 2099 年升温幅度分别为

1.200、1.605 $^{\circ}\text{C}$,增温趋势(2018—2099 年)分别为 0.196 \pm 0.006、0.146 \pm 0.006 $^{\circ}\text{C}\cdot(10\text{ a})^{-1}$;在 RCP8.5 浓度路径下,温度持续上升,到 2099 年升温幅度分别为 3.541、4.184 $^{\circ}\text{C}$,增温趋势(2018—2099 年)分别为 0.510 \pm 0.004、0.432 \pm 0.003 $^{\circ}\text{C}\cdot(10\text{ a})^{-1}$ 。

联合国气候变化框架公约的第 21 次缔约方会议上,将 2 $^{\circ}\text{C}$ 阈值纳入国际条约《巴黎协定》,其中,除了要求较工业化前(1861—1900 年),升温幅度控制在 2 $^{\circ}\text{C}$ 以内,还提出尽量把升温控制在 1.5 $^{\circ}\text{C}$ 以内(胡婷等,2017)。通过 MT9、MAM 集合平均值工业化前的历史模拟数据,计算两者 1861—1900 年的平均距平温度(MT9: -0.318 $^{\circ}\text{C}$,MAM: -0.265 $^{\circ}\text{C}$)。在 RCP2.6、RCP4.5 和 RCP8.5 情景下,相对工业化前 MAM 亚洲地区平均气温距平升温首次大于 1.5 $^{\circ}\text{C}$ 的时间分别出现在 2023 年,2025 年和 2023 年;MT9 升温首次大于 1.5 $^{\circ}\text{C}$ 的时间分别出现在 2027 年,2026 年和 2025 年。从低排放到高排放,MT9 首次出现升温大于 1.5 $^{\circ}\text{C}$ 的时间不断提前,因而更为合理。在 RCP2.6 浓度路径下,MAM、MT9 的升温都不超过 2 $^{\circ}\text{C}$,对于 RCP4.5 和 RCP8.5 浓度路径,MAM 升温首次大于 2 $^{\circ}\text{C}$ 的时间分别出现在 2043 年和 2036 年;MT9 升温首次大于 2 $^{\circ}\text{C}$ 的时间分别为 2047 年和 2039 年。不管是 1.5 $^{\circ}\text{C}$ 阈值还是 2 $^{\circ}\text{C}$ 阈值,MT9 达到该阈值的时间均比 MAM 更晚。

4.2 空间分布

通过 MT9 在这三种浓度路径下的平均温度距平分布预估未来温度的变化(图 7)。发现 MT9 在不

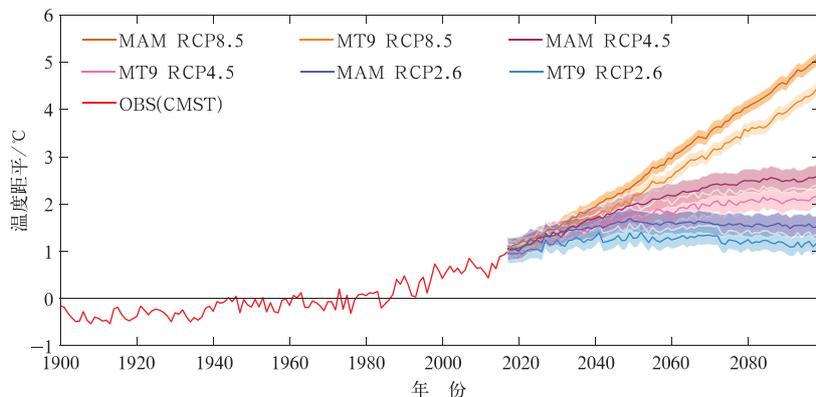


图 6 1900—2099 年 MAM、MT9 在不同浓度路径下的预估的未来温度距平
(阴影区表示模式模拟 ± 1.96 倍标准误差)

Fig. 6 Estimated future temperature anomalies for MAM and MT9 under different RCPs from 1900 to 2099
(Shaded areas indicate ± 1.96 times of standard error)

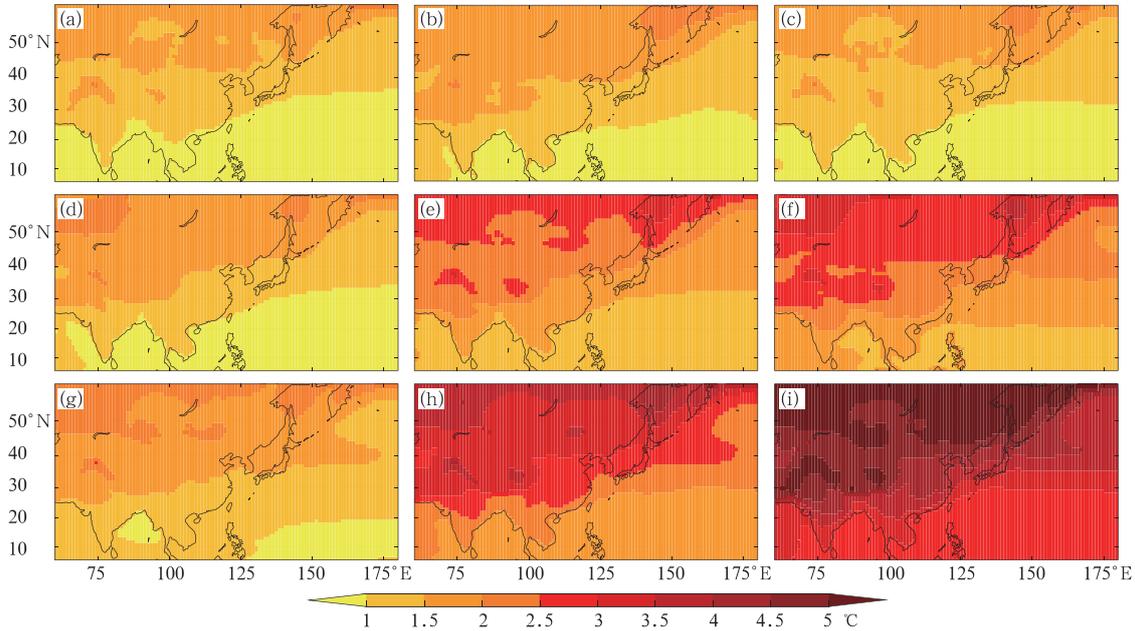


图 7 MT9 在 RCP2.6(a,b,c),RCP4.5(d,e,f),RCP8.5(g,h,i)浓度路径下
预估的未来温度距平分布

(a,d,g)2018—2044 年,(b,e,h)2045—2071 年,(c,f,i)2072—2099 年

Fig.7 Distribution of MT9 estimated temperature anomalies under
RCP2.6 (a, b, c), RCP4.6 (d, e, f) and RCP8.5 (g, h, i)

(a, d, g) 2018—2044, (b, e, h) 2045—2071, (c, f, i) 2072—2099

同 RCP 下的预估的未来温度距平分布比较一致,增温幅度都呈现北高南低。若未来温室气体浓度不变的情况下,即在 RCP2.6 下,2018—2044 年,2045—2071 年和 2072—2099 年,亚洲的温度距平均在 0~2.5℃。在这 3 个时间段内,在鄂霍次克海附近有较大的升温中心,随着时间的变化,升温中心覆盖范围先变大后变小。在帕米尔高原附近也有一个升温中心,随着时间的变化,升温中心覆盖范围同样先变大后变小。在 RCP4.5 下,2018—2044 年的温度距平在 0~2.5℃,其中 0~1℃的格点远小于 RCP2.5,2045—2071 年的温度距平在 1~3.5℃,2072—2099 年温度距平在 1~4℃。在鄂霍次克海和帕米尔高原附近依旧存在升温中心,随着时间变化,升温中心越来越强。在 2018—2044 年和 2072—2099 年西西伯利亚平原也存在升温中心。在 RCP8.5 下,2018—2044 年的温度距平为 0~3℃,在 2045—2071 年的温度距平为 1~5℃,2072—2099 年的温度距平为 2.5~5℃,同样在帕米尔高原附近和鄂霍次克海附近存在升温中心。

总之,不同 RCP 下,未来的亚洲地区的温度变化距平分布基本相似,都是以增温为主,高 RCP 下

增温效应更为显著;温度距平的空间分布也基本相似,都是呈现北高南低的分布格局。在这三种不同浓度路径下,在帕米尔高原和鄂霍次克海均存在升温中心,不同浓度路径下升温中心的强度有所不同。

5 结论和讨论

基于新研发的全球表面温度数据集 CMST,系统地评估 CMIP5 中的 27 个模式(这些模式均含有 RCP2.6、RCP4.5、RCP8.5 预估),根据历史模拟和 RCP 衔接模拟下模式温度时间变化和空间分布的评估结果,进一步地预估分析未来的温度变化。主要结论如下:

20 世纪 60 年代之前,亚洲地区模式与观测之间、各模式之间的差异比较大。而 20 世纪 60 年代及之后,一致性均有所提高。无论历史模拟或 RCP 衔接模拟,一些模式的模拟能力较好且较稳定。根据各模式历史模拟的泰勒图分析,发现其中 9 个模式模拟结果较优,分别为 BCC-CSM1.1、FGOALS-g2、FIO-ESM、GFDL-ESM2M、GISS-E2-H、GISS-E2-R、MPI-ESM-MR、NorESM1-M 和 CESM1(CAM5)。经

过对比发现,筛选出的 9 个模式的集合平均值(MT9)在历史模拟和 RCP 衔接模拟均比 MAM 更接近于观测,同时发现亚洲地区表面温度的增暖幅度在 MAM 模拟中明显偏高。

2018—2099 年的温度预估中,MAM 在任何 RCP 情景模拟下均比 MT9 高估亚洲区域的升温幅度。在不同浓度路径下,亚洲地区均呈现一致的增温趋势,但增温幅度则明显有所不同。若以 MT9 预估 2099 年温度,在 RCP2.6、RCP4.5、RCP8.5 浓度路径下,亚洲地区的升温幅度将达到 0.081、1.200、3.541℃,比 MAM 的预估分别减小 0.241、0.404、0.643℃。与 MAM 相比,MT9 升温较工业前达到 1.5℃和 2℃的时间均有所推迟。在 RCP2.6、RCP4.5 和 RCP8.5 浓度路径下,MT9 平均温度距平值升温 1.5℃[较工业化前(1861—1900 年)]分别出现在 2027 年、2026 年和 2025 年;RCP2.6 浓度路径下升温没有达到 2℃,在 RCP4.5 和 RCP8.5 浓度路径下,MT9 分别在 2047 年和 2039 年达到 2℃。结合 MAM 的模式对表面温度的模拟偏高的不足,本文选取的 9 个模式的预估结果更加可靠。从空间分布来看,MT9 的温度都是呈现北高南低的分布,在帕米尔高原附近和鄂霍次克海附近都存在升温中心。

尽管 MT9 的模拟结果比 MAM 更接近于观测数据,但每种典型浓度路径下的预估仍存在一定的不确定性,并且预估结果的不确定性随着预估时间的增加而增大。气候模式预估是存在不确定性的,主要表现为模式本身的不确定性和未来排放情景设计中的不确定性。当前国际仍有很多研究针对以下几个方面进行探讨:如何准确估计未来气候变化预估的不确定性,如何确定模式模拟中产生不确定性的过程并定量评估,如何改进物理过程以减少不确定性等,这些问题仍然是今后模式研究努力的方向。因此,未来仍有很多气候变化的问题亟待解决。

参考文献

丁婷,王永光,柯宗建,等,2017. 2016/2017 年冬季北半球大气环流及对我国冬季气温的影响[J]. 气象,43(7):887-893. Ding T, Wang Y G, Ke Z J, et al, 2017. Northern Hemisphere atmospheric circulation in winter 2016/2017 and its impact on temperature in China[J]. Meteor Mon, 43(7):887-893(in Chinese).

董李丽,李清泉,丁一汇,2015. 全球变暖背景下我国春季气温的时空变化特征[J]. 气象,41(10):1177-1189. Dong L L, Li Q Q, Ding Y H, 2015. Spatial and temporal characteristics of air tempera-

ture over China in spring under the background of global warming[J]. Meteor Mon, 41(10):1177-1189(in Chinese).

郭彦,董文杰,任福民,等,2013. CMIP5 模式对中国年平均气温模拟及其与 CMIP3 模式的比较[J]. 气候变化研究进展,9(3):181-186. Guo Y, Dong W J, Ren F M, et al, 2013. Assessment of CMIP5 simulations for China annual average surface temperature and its comparison with CMIP3 simulations[J]. Adv Climate Change, 9(3):181-186(in Chinese).

胡婷,孙颖,张学斌,2017. 全球 1.5 和 2℃ 升温时的气温和降水变化预估[J]. 科学通报,62(26):3098-3111. Hu T, Sun Y, Zhang X B, 2017. Temperature and precipitation projection at 1.5 and 2℃ increase in global mean temperature[J]. Chin Sci Bull, 62(26):3098-3111(in Chinese).

黄海玲,江志红,王志福,等,2015. CMIP5 模式对东亚 500 hPa 高度场主要模态时空结构模拟能力的评估[J]. 气象学报,73(1):110-127. Huang H L, Jiang Z H, Wang Z F, et al, 2015. The evaluation of the 500 hPa geopotential height's main modes in East Asia as done by the CMIP5 models[J]. Acta Meteor Sin, 73(1):110-127(in Chinese).

苏京志,温敏,丁一汇,等,2016. 全球变暖趋缓研究进展[J]. 大气科学,40(6):1143-1153. Su J Z, Wen M, Ding Y H, et al, 2016. Hiatus of global warming: a review[J]. Chin J Atmos Sci, 40(6):1143-1153(in Chinese).

陶纯苇,姜超,孙建新,2016. CMIP5 模式对中国东北气候模拟能力的评估[J]. 气候与环境研究,21(3):357-366. Tao C W, Jiang C, Sun J X, 2016. Evaluation of CMIP5 models performance on climate simulation in Northeast China[J]. Clim Environ Res, 21(3):357-366(in Chinese).

王萌,武胜利,郑伟,等,2016. 长时间序列卫星遥感渤海海冰时空分布特征及与气温关系分析[J]. 气象,42(10):1237-1244. Wang M, Wu S L, Zheng W, et al, 2016. Temporal spatial distribution of Bohai Sea sea ice in long time series and its correlation with air temperature[J]. Meteor Mon, 42(10):1237-1244(in Chinese).

王铭昊,李焕连,孙小婷,2018. 中国 6 个 CMIP5 模式对全球降水年际-年代际变率模拟的定量评估[J]. 气象,44(5):634-644. Wang M H, Li H L, Sun X T, 2018. Quantitative evaluation on the interannual and interdecadal precipitation variability simulated by six CMIP5 models of China[J]. Meteor Mon, 44(5):634-644(in Chinese).

魏萌,乔方利,2016. CMIP5 气候模式模拟的 1850~2014 年全球温度变化的集合经验模态分解[J]. 中国科学:地球科学,46(12):1675-1688. Wei M, Qiao F L, 2017. Attribution analysis for the failure of CMIP5 climate models to simulate the recent global warming hiatus[J]. Sci China: Earth Sci, 60(2):397-408.

向辽元,陈星,2006. 近 55 年中国大陆气温突变的区域特征和季节特征[J]. 气象,32(6):44-47. Xiang L Y, Chen X, 2006. Regional and seasonal features of abrupt temperature change in China in recent 55 years[J]. Meteor Mon, 32(6):44-47(in Chinese).

张莉,丁一汇,吴统文,等,2013. CMIP5 模式对 21 世纪全球和中国年平均地表气温变化和 2℃ 升温阈值的预估[J]. 气象学报,71

- (6):1047-1060. Zhang L, Ding Y H, Wu T W, et al, 2013. The 21st century annual mean surface air temperature change and the 2°C warming threshold over the globe and China as projected by the CMIP5 models[J]. *Acta Meteor Sin*, 71(6): 1047-1060(in Chinese).
- 张宏芳,陈海山,2011. 21 个气候模式对东亚夏季环流模拟的评估 I:气候态[J]. *气象科学*, 31(2): 119-128. Zhang H F, Chen H S, 2011. Evaluation of summer circulation simulation over East Asia by 21 climate models. Part I: climatology[J]. *J Meteor Sci*, 31(2): 119-128(in Chinese).
- 赵天保,陈亮,马柱国,2014. CMIP5 多模式对全球典型干旱半干旱区气候变化的模拟与预估[J]. *科学通报*, 59(12): 1148-1163. Zhao T B, Chen L, Ma Z G, 2014. Simulation of historical and projected climate change in arid and semiarid areas by CMIP5 models[J]. *Chin Sci Bull*, 59(4): 412-429.
- 赵宗慈,罗勇,黄建斌,2018. 从检验 CMIP5 气候模式看 CMIP6 地球系统模式的发展[J]. *气候变化研究进展*, 14(6): 643-648. Zhao Z C, Luo Y, Huang J B, 2018. The detection of the CMIP5 climate model to see the development of CMIP6 earth system models[J]. *Adv Climate Change*, 14(6): 643-648(in Chinese).
- 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 X H, Xiao Z N, 2014. Climate projection over Yunnan Province and the surrounding regions based on CMIP5 data[J]. *Clim Environ Res*, 19(5): 601-613(in Chinese).
- Gao X J, Shi Y, Zhang D F, et al, 2012. Climate change in China in the 21st Century as simulated by a high resolution regional climate model[J]. *Chin Sci Bull*, 57(10): 1188-1195.
- Huang B Y, Angel W, Boyer T, et al, 2018. Evaluating SST analyses with independent ocean profile observations[J]. *J Climate*, 31(13): 5015-5030.
- Huang B Y, Thorne P W, Banzon V F, et al, 2017. Extended reconstructed sea surface temperature, version 5 (ERSSTv5): upgrades, validations, and intercomparisons[J]. *J Climate*, 30(20): 8179-8205.
- Jones P D, Moberg A, 2003. Hemispheric and large-scale surface air temperature variations: an extensive revision and an update to 2001[J]. *J Climate*, 16(2): 206-223.
- Kim H M, Webster P J, Curry J A, 2012. Evaluation of short-term climate change prediction in multi-model CMIP5 decadal hindcasts[J]. *Geophys Res Lett*, 39(10): L10701.
- Li Q X, Yun X, Huang B Y, et al, 2019. An update evaluation on the global surface temperature change trends since the start of the 20th Century[J]. *J Climate*, in revision.
- Li Q X, Zhang L, Xu W H, et al, 2017. Comparisons of time series of annual mean surface air temperature for China since the 1900s: observations, model simulations, and extended reanalysis[J]. *Bull Amer Meteor Soc*, 98(4): 699-711.
- Schmidt G A, Shindell D T, Tsigaridis K, 2014. Reconciling warming trends[J]. *Nat Geosci*, 7(3): 158-160.
- Schneider S H, Semenov S, Patwardhan A, et al, 2007. Assessing key vulnerabilities and the risk from climate change[M]// Parry M L, Canziani O F, Palutikof J P, et al. *Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 779-810.
- Stocker T F, Qin D, Plattner G K, et al, 2013. *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [M]. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 1535.
- Taylor K E, 2001. Summarizing multiple aspects of model performance in a single diagram[J]. *J Geophys Res: Atmos*, 106(D7): 7183-7192.
- Xu W H, Li Q X, Jones P, et al, 2018. A new integrated and homogenized global monthly land surface air temperature dataset for the period since 1900[J]. *Climate Dyn*, 50(7-8): 2513-2536.
- 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.
- Yun X, Huang B Y, Cheng J Y, et al, 2019. A new merge of global surface temperature datasets since the start of the 20th Century [J]. *Earth Syst Sci Data*, doi:10.5194/essd-2019-80.