

中国地球气候系统模式的发展及其模拟和预估*

周天军^{1,2} 陈梓明^{1,2} 邹立维¹ 陈晓龙¹ 俞永强¹ 王 斌¹ 包 庆¹
 鲍 颖³ 曹 剑⁴ 何 编¹ 胡 帅^{1,2} 李立娟¹ 李 建⁵ 林岩鑫⁶
 马利斌⁴ 乔方利³ 容新尧⁵ 宋振亚³ 唐彦丽¹ 吴 波¹
 吴统文⁷ 辛晓歌⁷ 张 贺⁸ 张明华⁸

ZHOU Tianjun^{1,2} CHEN Ziming^{1,2} ZOU Liwei¹ CHEN Xiaolong¹ YU Yongqiang¹ WANG Bin¹
 BAO Qing¹ BAO Ying³ CAO Jian⁴ HE Bian¹ HU Shuai^{1,2} LI Lijuan¹ LI Jian⁵ LIN Yanluan⁶
 MA Libin⁴ QIAO Fangli³ RONG Xinyao⁵ SONG Zhenya³ TANG Yanli¹ WU Bo¹
 WU Tongwen⁷ XIN Xiaoge⁷ ZHANG He⁸ ZHANG Minghua⁸

1. 中国科学院大气物理研究所大气科学和地球流体力学数值模拟国家重点实验室, 北京, 100029

2. 中国科学院大学地球与行星科学学院, 北京, 100049

3. 自然资源部第一海洋研究所, 青岛, 266061

4. 南京信息工程大学大气科学学院, 南京, 210044

5. 中国气象科学研究院, 北京, 100081

6. 清华大学, 北京, 100084

7. 国家气候中心, 北京, 100081

8. 中国科学院大气物理研究所国际气候与环境科学中心, 北京, 100029

1. *LASG, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China*

2. *College of Earth and Planetary Sciences, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*

3. *First Institute of Oceanography, Ministry of Natural Resources, Qingdao 266061, China*

4. *School of Atmospheric Science, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China*

5. *Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081, China*

6. *Tsinghua University, Beijing 100084, China*

7. *National Climate Center, China Meteorological Administration, Beijing 100081, China*

8. *International Center for Climate and Environment Sciences, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China*

2019-09-20 收稿, 2020-01-19 改回.

周天军, 陈梓明, 邹立维, 陈晓龙, 俞永强, 王斌, 包庆, 鲍颖, 曹剑, 何编, 胡帅, 李立娟, 李建, 林岩鑫, 马利斌, 乔方利, 容新尧, 宋振亚, 唐彦丽, 吴波, 吴统文, 辛晓歌, 张贺, 张明华. 2020. 中国地球气候系统模式的发展及其模拟和预估. 气象学报, 78(3): 332-350
Zhou Tianjun, Chen Ziming, Zou Liwei, Chen Xiaolong, Yu Yongqiang, Wang Bin, Bao Qing, Bao Ying, Cao Jian, He Bian, Hu Shuai, Li Lijuan, Li Jian, Lin Yanluan, Ma Libin, Qiao Fangli, Rong Xinyao, Song Zhenya, Tang Yanli, Wu Bo, Wu Tongwen, Xin Xiaoge, Zhang He, Zhang Minghua. 2020. Development of climate and earth system models in China: Past achievements and new CMIP6 results. *Acta Meteorologica Sinica*, 78(3):332-350

Abstract The Earth-climate system model (ECSM) is an important platform for multi-disciplinary and multi-sphere integration research, and its development is at the frontier of international geosciences, especially in the field of global change study. The

* 资助课题: 中国科学院“国际伙伴计划——国际大科学计划培育专项”(134111KYSB20160031)、国家自然科学基金项目(41875132)。

作者简介: 周天军, 主要从事气候模拟、海-气相互作用和季风变率研究。E-mail: zhoutj@lasg.iap.ac.cn

research and development (R&D) of ECSM in China began in the 1980s and great progress has been achieved in the past 10 years. In China, ECSMs are now mainly developed at the Chinese Academy of Sciences, various ministries and universities; thus, a tripartite situation has formed regarding the model development. Following a brief review of the development history of ECSMs in China, this paper summarizes the technical characteristics of the nine Chinese ECSMs participating in the Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 and preliminarily assesses the basic performances of four Chinese models in global climate simulation and climate simulation in East Asia. The projected changes in global precipitation and temperature and associated relationship with the equilibrium climate sensitivity under four shared socioeconomic path scenarios are also discussed. Finally, combined with the international situation and from the perspective of model development, eight directions are proposed for the future development of Chinese ECSMs.

Key words Chinese Earth-climate system models, Coupled model inter-comparison project phase 6, Model performance, Climate prediction and projection, Outlook

摘要 地球气候系统模式是开展多学科、多圈层集成研究的重要平台,其发展是国际地学领域特别是全球变化领域竞争的前沿。中国的地球气候系统模式研发工作始于20世纪80年代,最近10年得到快速发展。研发格局上已经形成中国科学院、有关部委和高校三足鼎立的局面。文中在简要回顾中国地球气候系统模式早期发展历史的基础上,总结了我国参加第6次耦合模式比较计划的9个地球气候系统模式的技术特点,初步评估了中国4个模式对全球和东亚气候模拟的基本性能,分析了其在4种共享社会经济路径情景下对全球降水与温度的预估变化及其与平衡态气候敏感度的联系。最后,结合国际态势,从发展的角度提出未来中国气候模式研发工作需要加强的8个方向。

关键词 中国地球气候系统模式, 耦合模式比较计划第6阶段(CMIP6), 模拟性能, 气候预测与预估, 未来展望
中图法分类号 P435

1 引言

20世纪后半叶以来,现代气候学研究的一个重要进展是提出气候系统的概念,强调需要把大气圈、水圈、冰冻圈、岩石圈和生物圈5个圈层作为一个整体来加以研究,从多圈层相互作用的角度来理解过去和现代气候的变化规律与机理,预测和预估其未来变化。与气候学研究范畴的拓展相对应,推动现代气候学研究的两大技术进步是数值模拟技术和卫星遥感技术。数值模拟技术已经和理论研究、观测研究共同成为支撑现代气候学研究的三大手段之一。

气候系统模式,简言之就是封装了大量自然定律的计算机程序,是对气候系统中物理、化学和生态过程的数学表达,它包括大气、海洋、陆面和海冰4个基础子系统。地球系统模式是在气候系统模式的基础之上,进一步考虑气候系统中的碳、氮循环等生物地球化学循环过程,其核心依然是大气-海洋-陆面-海冰多圈层耦合的物理气候系统。为便于讨论,文中将气候系统模式和地球系统模式泛称为地球气候系统模式。地球气候系统模式的研发工作需要基于对气候系统基本规律的认识,需要多学科交叉、高性能计算机和海量存储系统等高技术支

撑。地球气候系统模式能够合理描述多圈层相互作用的物理和化学过程,使得大气科学和地球气候系统科学成为一门“可实验的科学”。地球气候系统模式是近30余年来地学领域发展最快的一个前沿方向,已经成为理解气候变化机理的重要工具和预测、预估未来气候的不可或缺的手段。

地球气候系统模式是开展多学科、多圈层集成研究的重要平台,其发展是国际地学领域特别是全球变化领域竞争的前沿,模式发展水平的高低已经成为衡量一个国家科技综合实力的重要指标之一。世界上多数发达国家先后启动国家级的模式研发计划,以推动本国气候模式的发展和应用(王斌等,2008)。美国制定了《推动气候模拟的美国国家战略》,明确指出“气候模式是人类发展的最为复杂的模拟工具之一,是理解和预测气候及其变化的基础,是支撑气候相关决策的重要工具。未来20年,美国气候模拟事业必须快速发展以适应国家需求、保持国际竞争力”(推动气候模拟国家战略委员会,2014),从中足见其重视程度。

中国的地球气候系统模式研发工作已经走过30余年的历史,目前已经进入快速发展期。文中在概述中国地球气候系统模式早期发展情况的基础上,重点对近5年的进展做了总结,并展望了中国

地球气候系统模式的未来发展方向。

2 国际态势与中国气候系统模式研发的格局

过去 40 余年间,国际上气候模式的发展经历了以下几个阶段:(1)20 世纪 70 年代中期,大气环流模式得到快速发展;(2)80 年代中期,开始实现大气环流模式与陆面过程模式的耦合,而海冰则是给定的;(3)90 年代初期,大气环流模式实现与“沼泽”海洋耦合,并用于政府间气候变化专门委员会(IPCC)第 1 次评估报告的气候预估试验;(4)1995 年前后,大气环流模式开始考虑硫酸盐气溶胶和火山气溶胶,开始纳入完整的海洋环流模式,海-陆-气-冰耦合模式开始用于 IPCC 第 2 次评估报告的气候预估试验;(5)2001 年前后,陆面模式引入径流过程以闭合水循环,大气模式对气溶胶的处理日臻完善,海洋模式能够描述经圈翻转环流,许多模式开始考虑气候系统中的碳循环过程,支撑 IPCC 第 3 次评估报告的模式系统较之以往物理过程考虑更为完善;(6)2007 年前后,陆面模式开始引入动态植被,大气模式开始考虑大气化学过程,并支撑了 IPCC 第 4 次评估报告的气候预估试验。在这个阶段,海-气耦合技术的一个重要进步是多数模式无需再使用“通量订正”技术;(7)2013 年前后,气候系统模式逐步进入地球系统模式阶段,具体体现是海洋模式的生态系统模块、陆面模式的全球植被动力学模块对生物地球化学循环过程的模拟能力得到全面提升。

在上述每个阶段,伴随着高性能计算机的性能提高,模式的分辨率也不断得到提高,但进展最快的还是最近 5 年,大气模式逐渐向对流分辨尺度、海洋模式逐渐向涡旋分辨方向发展。

全球范围内,世界气候研究计划(WCRP)在推动气候模式发展和应用领域的国际协作方面发挥

了举足轻重的作用。由 WCRP 耦合模拟工作组(WGCM)发起的耦合模式比较计划(CMIP),自 1995 年以来已经组织了 6 次,在制定气候模式试验和模式检验标准、统一数据格式、规范数据共享国际机制等方面发挥了不可替代的作用。CMIP 数据被广泛地应用于国际气候研究,支撑了 IPCC 评估报告的编写和气候变化谈判活动。

中国的气候模式发展始于 20 世纪 80 年代,几乎与发达国家同步。经过 30 多年的努力,中国在大气环流模式、海洋环流模式、陆面过程模式及其相互耦合等方面取得了令人瞩目的成绩(王斌等, 2008)。与模式发展对应,研发队伍不断壮大。以参加历次 IPCC 科学评估报告和 CMIP 计划的中国模式(表 1)为例,可以清晰地看出中国气候系统模式研发的格局变化。IPCC 第 1 次评估报告(FAR)补充报告于 1992 年发布,参与的中国模式是中国科学院(CAS)大气物理研究所(IAP)发展的一个 2 层大气耦合混合层海洋模式(Wang, et al, 1993); IPCC 第 2 次评估报告(SAR)于 1995 年发布,参与的中国模式是中国科学院大气物理研究所发展的 20 层海-气耦合模式(M+20),其中在海洋模式中加入了一个热力学海冰模式,海-气耦合过程采用了“通量订正”技术(Zhang, et al, 1992; 陈克明等, 1997a, 1997b);随后基于 20 层海洋模式和 9 层大气环流谱模式建立了一个海-陆-气-冰耦合模式 GOALS, GOALS 第 2 版(GOALS2)参与了第 1 次国际耦合模式比较计划 CMIP1(吴国雄等, 1997; Yu, et al, 1998); IPCC 第 3 次评估报告(TAR)于 2001 年发布,引用了 CMIP2 的模式结果,参与的中国模式是中国科学院大气物理研究所发展的海-陆-气-冰耦合模式 GOALS4,较之 GOALS2 主要完善了太阳辐射的日变化(邵慧等, 1998)和海-气耦合的淡水通量交换过程(周天军等, 2000); IPCC 第 4 次评估报告于 2007 年发布,引用了 CMIP3 的模

表 1 参加第 1 到第 4 次 IPCC 科学评估报告的中国模式
Table 1 The models from China used for IPCC AR1-4

IPCC	CMIP	模式名称	大气模式水平分辨率	海洋模式分辨率
FAR	-	IAP	4°×5°, L2	混合层海洋模式
SAR	CMIP1	GOALS2	4°×5°, L2	4°×5°, L20
TAR	CMIP2	GOALS4	R15(4.5°×7.5°), L9	4°×5°, L20
AR4	CMIP3	FGOALS-g1.0	2.8°×2.8°, L26	1.0°×1.0°, L30

*FAR: 第1次评估报告, SAR: 第2次评估报告, TAR: 第3次评估报告, AR4: 第4次评估报告。

式结果,参与的中国模式是中国科学院大气物理研究所发展的气候系统模式 FGOALS-g1.0,它基于耦合器框架在中国首次实现了无“通量订正”的直接耦合(Yu, et al, 2004)。从 IPCC 第 1 次评估报告到第 4 次评估报告的近 20 年间,来自中国科学院的气候系统模式支撑着中国参与气候模拟和预估领域的国际竞争。从 CMIP1 到 CMIP3,参与的国际模式数量从 10 个逐渐增加到 18 和 23 个,中国科学院的模式是唯一来自发展中国家的模式(周天军等, 2014)。这种研发格局在 CMIP5 得到根本性改变。

IPCC 第 5 次评估报告于 2013 年发布,引用了 CMIP5 的模式结果。参与 CMIP5 的全球模式有 35 个,其中有 6 个来自中国(表 2),分别是:中国科学院大气物理研究所气候系统模式 FGOALS-g2(Li, et al, 2013)和 FGOALS-s2(Bao, et al, 2013)、

国家气候中心气候系统模式 BCC_CSM1.1 及其包含碳循环的版本 BCC_CSM1.1(m)(Wu, et al, 2014)、北京师范大学地球系统模式 BNU-ESM(Ji, et al, 2014)、国家海洋局第一海洋研究所地球系统模式 FIO-ESM(Qiao, et al, 2013),其中 BNU-ESM 和 FIO-ESM 都是基于第 3 版的公共气候系统模式(CCSM3)(Collins, et al, 2006)发展的,前者更新了海洋环流模式并引入自主发展的陆面模式,而后者首次将小尺度海浪通过垂向混合作用引入气候系统模式,发现海浪在上层海洋和气候中起控制作用(周天军等, 2014)。参与 CMIP 的中国模式数量从 1 到 5 的转变,反映的是模式研发队伍的壮大,中国气候模式研发的格局,自此也从中国科学院一枝独秀进入中国科学院、有关部委和高校三足鼎立的局面,这一格局在 CMIP6 中得到进一步加强(周天军等, 2019)。

表 2 参加 IPCC 第 5 次科学评估报告和 CMIP5 的中国模式
Table 2 The models from China participated in CMIP5 and used for IPCC AR5

模式名称	所属机构	大气模式分辨率	海洋模式分辨率
BCC_CSM1.1	BCC	2.8°×2.8°	0.8°×1.0°
BCC_CSM1.1(m)	BCC	1.1°×1.1°	0.8°×1.0°
BNU-ESM	BNU	2.8°×2.8°	0.9°×1.0°
FGOALS-g2	LASG-CESS	3°×2.8°	0.9°×1.0°
FGOALS-s2	LASG	1.7°×2.8°	0.9°×1.0°
FIO-ESM	FIO	2.8°×2.8°	0.9°×1.0°

3 参加 CMIP6 的中国气候系统模式和地球系统数值模拟装置建设

3.1 参加 CMIP6 的中国气候系统模式

CMIP6 自 2013 年开始设计、2016 年正式启动,目前正在实施中。CMIP6 将直接支撑 IPCC 第 6 次评估报告的编写。参与 CMIP6 的国际模式研发团队有 33 家,较之 CMIP5 新增 13 家,这 33 家机构注册参加 CMIP6 的模式版本有 112 个^①。中国有 9 家机构报名参加 CMIP6,较之 CMIP5 新增的、首次参加 CMIP 的团队包括中国科学院地球系统模式团队、中国气象科学研究院、南京信息工程大学、清华大学和来自中国台湾的“中研院”环境变化研究中心(周天军等, 2019)。

中国大陆参与 CMIP6 的气候模式数量尽管较之 CMIP5 显著增多,但研发机构的基本格局不变,即呈现中国科学院、有关部委和高校三足鼎立的局面。来自中国科学院的模式版本有 3 个,分别是 CAS FGOALS-g3、CAS FGOALS-f3 和 CAS-ESM;来自中央部委的模式有 3 个,分别是国家气候中心的 BCC-CSM 及 BCC-ESM,中国气象科学研究院的 CAMS-CSM,来自自然资源部第一海洋研究所的 FIO-ESM v2.0;来自高校系统的模式有 3 个,分别是北京师范大学地球系统模式 BNU-ESM-1-1、清华大学地球系统模式 CIESM 和南京信息工程大学地球系统模式 NESM v3。高校积极参与气候系统模式的研发是近 5 年中国气候系统模式研发领域的一个新动向,这对于模式研发人才的培养具有积

^① https://rawgit.com/WCRP-CMIP/CMIP6_CVs/master/src/CMIP6_source_id.html

极意义。文中参与CMIP6的中国模式的主要特点从其主要技术指标(表3)可见,其中的3个地球气候系统模式是以美国国家大气研究中心(NCAR)的公共地球系统模式(CESM)为基础改进而来,还有3个地球气候系统模式的海洋分量模式是基于美国地球物理流体力学实验室(GFDL)的模块化海洋模式(MOM)发展而来。其中北京师范大学的模式拟采用CMIP5的版本,在此前关于中国参与CMIP5模式的综述中已经介绍过(周天军等,2014),此处不再赘述。以下是其余9个模式版本的概况。

国家(北京)气候中心(BCC)参与CMIP6的新版本模式包括地球系统模式BCC-ESM1.0、中等分辨率气候系统模式BCC-CSM2-MR和高分辨率气候系统模式BCC-CSM2-HR。3个模式中的海冰模

式分量均为GFDL的海冰模式SIS,陆面模式分量均为BCC-AVIM2。相对BCC-AVIM1.0,BCC-AVIM2改进了土壤冻融临界温度方案、积雪反照率方案,在植被生长模块增加水稻田方案等(Li W P, et al, 2019)。BCC-ESM1.0和BCC-CSM2-MR模式的海洋分量模式为MOM4-L40,采用三级网格,在热带区域分辨率为0.3°,从热带到极地分辨率逐渐降低到1°。BCC-CSM2-HR模式的海洋分量为MOM5-L50,分辨率为0.25°。BCC-ESM1.0、BCC-CSM2-MR和BCC-CSM2-HR模式的大气模式分量存在较大差别。BCC-ESM1.0中的大气模式分量为BCC-AGCM3-Chem,水平分辨率为T42(~280 km),垂直方向为26层,模式层顶为2.917 hPa,加入了大气化学模块以及气溶胶过程。BCC-CSM2-

表3 中国参与CMIP6的地球/气候系统模式技术指标概况
Table 3 Metrics of current earth/climate system models from China participated in CMIP6

模式名称	研发单位	大气模式	海洋模式	陆面模式	海冰模式	耦合器
BCC-ESM1.0	国家气候中心	BCC-AGCM3-Chem (T42, ~280 km, L26)	MOM4-L40 gx1v1	BCC-AVIM2	SIS	CPL5
1 BCC-CSM2-MR	国家气候中心	BCC-AGCM3-MR (T106, ~120 km, L46)	MOM4-L40 gx1v1	BCC-AVIM2	SIS	CPL5
BCC-CSM2-HR (Wu et al, 2019, 2020; 辛晓歌等, 2019)	国家气候中心	BCC-AGCM3-HR (T266, 45 km, L56)	MOM5-L50(0.25°)	BCC-AVIM2	SIS	CPL5
2 BNU-ESM-1-1 (Ji, et al, 2014)	北京师范大学	CAM3.5 (2.8°[~280 km], L26)	MOM4p1(高纬度地区1.0°, 接近赤道加密至0.3°, L40)	CoLM	CICE4.1	CPL
3 CAMS-CSM (容新尧等, 2019)	中国气象科学研究院	ECHAM5 (T106, ~120 km, L31)	MOM4(高纬度地区1.0°, 赤道经向加密至0.3°, L50)	CoLM	SIS	FMS-coupler
4 CAS-ESM	中国科学院大气物理研究所ICCES等	IAP AGCM5 (1.4°[~140 km], L35)	LICOM2(1.0°, 赤道经向加密至0.5°, L30)	CoLM	CICE4.0	CPL7
5 CAS FGOALS-f3 (包庆等, 2019)	中国科学院大气物理研究所 LASG	FAMIL2.2 (100 km, 25 km, L32)	LICOM3 (1°/L30, 0.1°/L55)	CLM4.0	CICE4	CPL7
6 CAS FGOALS-g3 (唐彦丽等, 2019)	中国科学院大气物理研究所 LASG	GAMIL3 (2°[~200 km], L26)	LICOM3(1.0°, 赤道经向加密至0.5°, L30)	CAS-LSM	CICE4	CPL7
7 CIESM (林岩奎等, 2019)	清华大学地球系统科学系	Modified CAM5 (~100 km, L30)	POP2(1°, L60)	CLM4.0	CICE4.1	C-coupler2
8 FIO-ESM v2.0 (宋振亚等, 2019)	自然资源部第一海洋研究所	CAM5(~100 km, L30)	POP2(高纬度地区1.1°, 赤道地区加密为0.3°-0.5°, L61)	CLM4.0	CICE4	CPL7
9 NESM v3 (曹剑等, 2019)	南京信息工程大学	ECHAM v6.3 (T63, ~200 km, L47)	NEMO v3.4(高纬度地区1.0°, 赤道地区加密至0.3°, L46)	JABACH	CICE4.1	OASIS3-MCT
10 TaiESM ^①	台湾“中研院”环境变化研究中心	CAM5.3 (~100 km, ~200 km, L30)	POP2(1.0°, L70)	CLM4.0	CICE4.0	CPL7

① Zhou Tianjun. 2017. Overview of Chinese Contribution to CMIP6: Status and challenges. *Pan-WCRP modelling Meeting*, Met Office, Exeter, Oct 9th-13th.

MR 的大气模式分量为 BCC-AGCM3-MR, 水平分辨率为 T106 (~120 km), 垂直分层提高到 46 层, 模式层顶为 1.459 hPa。BCC-AGCM3-MR 对大气辐射、深对流过程和重力波方案进行了改进, 引入了气溶胶间接效应 (Wu, et al, 2019)。BCC-CSM2-HR 的大气模式分量为 BCC-AGCM3-HR, 大气模式水平分辨率为 45 km, 垂直分层提高到 56 层, 模式层顶为 0.1 hPa。具体细节参见辛晓歌等(2019)。

中国气象科学研究院研发的气候系统模式 CAMS-CSM, 其大气分量由德国马普气象研究所的 ECHAM5(v5.4) 改进而来, 模式水平分辨率为 T106 (~120 km), 垂直方向 31 层, 模式顶为 10 hPa。相较于 ECHAM5, CAMS-CSM 大气模式的主要改进包括: (1) 水汽平流采用了跳点格式的两步保形平流方案; (2) 辐射方案采用了国家气候中心发展的相关 k 分布辐射传输方案 BCC_RAD。CAMS-CSM 海洋分量为 GFDL 的 MOM4。MOM4 采用三极格点, 纬向分辨率为 1° , 经向分辨率在 10°S — 10°N 为 $(1/3)^\circ$, $10^\circ\text{S}(\text{N})$ — $30^\circ\text{S}(\text{N})$ 由 $(1/3)^\circ$ 逐渐过渡到 1° , 其他区域为 1° 。垂直方向共 50 层, 其中最上面 23 层分辨率为 10 m。海冰分量为 GFDL 的 SIS。陆面分量为 Common Land Model (CoLM), 并在 CoLM 模式中考虑了土壤未冻水过程。具体细节可见容新尧等(2019)。

中国科学院地球系统模式 CAS-ESM 的大气分量是 IAP 第 5 代大气环流模式 IAP AGCM5, 其水平分辨率为 1.4° (~140 km)。相比第 4 代大气环流模式 IAP AGCM4 (Zhang, et al, 2013), IAP AGCM5 的垂直分辨率由 30 层提高到 35 层, 设计了高纬度灵活性跳点格式以替换滤波; 物理过程方面, 设计了全新的基于双烟流模式的对流参数化方案及新的云宏观物理参数化方案, 对云微物理参数化方案 (Xie, et al, 2015) 及大气边界层参数化方案进行了改进, 并采用考虑次网格地形分布的新的地形重力波参数化方案。海洋分量模式 LICOM2, 水平分辨率为 1.0° 、赤道经向加密至 0.5° , 设计了考虑实盐通量的适定的盐度边界条件, 引入新的海气湍流通量计算方案——Fairall 方案。陆面模式分量为 CoLM, 发展了多层土壤有机碳方案及三维植被冠层辐射传输方案, 改进了对冻土碳反馈过程和陆表能量收支的描述。海冰模式分量为洛斯阿拉莫国家实验室 (LANL) 发展的 CICE4.0, 耦合器为 CPL7, 并增

加了三维变量插值和数据交换的功能。

中国科学院大气物理研究所发展的气候系统模式 CAS FGOALS-f3, 包括大气-海洋-陆地-海冰 4 个分量模式和 1 个耦合器。根据分辨率的不同, FGOALS-f3 模式包括低分辨率 (FGOALS-f3-L) 和高分辨率 (FGOALS-f3-H) 两个版本 (包庆等, 2019; He B, et al, 2019; Li J X, et al, 2019)。两个版本的大气分量是 IAP-LASG 大气环流模式 FAMIL2.2, 采用有限体积立方球面网格的动力框架 (Zhou L J, et al, 2015)。低分辨率版本 FGOALS-f3-L 大气模式水平分辨率大约为 1° (~100 km), 高分辨率版本 FGOALS-f3-H 的大气模式水平分辨率为 0.25° (~25 km)。垂直方向分为 32 层, 采用混合坐标系, 模式层顶为 2.16 hPa (~45 km)。FAMIL2.2 模式物理过程参数化中使用了 IAP-LASG 研发的显式对流降水方案, 提高了热带气旋、热带季节内震荡 (MJO) 和极端降水的模拟能力 (Li J X, et al, 2019; He B, et al, 2019; He S C, et al, 2019); 陆面分量采用公共陆面模式 (CLM) 4.0; 海洋分量采用 IAP-LASG LICOM3 模式, 使用三极网格方案, 低分辨率版本 FGOALS-f3-L 海洋分辨率相当于 1° , 垂直方向有 30 层; 高分辨率 FGOALS-f3-H 海洋水平分辨率为 0.1° , 垂直方向有 55 层; 海冰分量采用 CICE4 模式; 耦合器为 CPL7。

中国科学院大气物理研究所发展的另一个耦合气候模式 CAS FGOALS-g3, 其大气分量为 GAMIL3, 与前一版本相比, 分辨率从 2.8° 提升到 2° (~200 km), 进一步修正了水汽平流方案, 严格保证了极区的水汽守恒; 模式的剖分方式由一维剖分升级为二维剖分 (Liu L, et al, 2014); 物理过程方面, 增加了对流动量输送和平流层气溶胶的考虑 (Nie, et al, 2019)、采用了基于估算逆温 (EIS) 的层积云方案 (Guo, et al, 2014)、新的层云量生成方案、基于湍流动能 (TKE) 的边界层方案及德国马普气象研究所的气溶胶模块 (MACv2-SP) 等。海洋分量为 LICOM3, 水平分辨率是 1° , 并在赤道区域加密为 0.5° , 水平网格从经纬度网格升级为三极网格, 采用了新的动力框架, 改进了 GM (Gent-McWilliams) 垂直混合、潮汐混合等海洋参数化方案。陆面为基于 CLM4.5 发展的 CAS-LSM, 耦合了自主发展的考虑地下水侧向流动、人类取用水活动、土壤冻结融化界面变化以及河流氮输送过程影响的方案。

海冰为 CICE4.0, 耦合器为 CPL7。具体细节可见唐彦丽等(2019)。

清华大学牵头发展的联合地球系统模式 CIESM 1.1 版本, 其基础是 CESM1.2.1。其大气分量模式基于公用大气模式(CAM5), 水平分辨率约为 100 km, 垂直分辨率为 30 层, 模式层顶高度为 1 hPa。针对大气积云对流参数化、短波辐射传输、云宏物理、微物理方案以及气溶胶的处理进行了系统改进。海洋模式基于 LANL 的 POP2 模式, 水平分辨率为 1°, 有 60 个垂直层。在海洋网格、正压求解器、混合方案以及海-气通量交换的计算等方面进行了一系列改进。陆面模式基于 CLM4.0, 并对土壤参数集、地表热力学粗糙度参数化等做了一系列改进。海冰模式基于 CICE4.1, 与海洋模式使用相同的网格, 在海冰物理和动力过程方面做了改进, 如结冰温度考虑盐度影响, 考虑浮冰大小对侧向融化的影响。自主研发的耦合器 C-coupler2 用于处理 CIESM 模式中的各种耦合过程, 包括数据传输和插值等。具体细节参见林岩銮等(2019)。

自然资源部第一海洋研究所发展的地球气候系统模式 FIO-ESM v2.0, 其大气分量为 CAM5, 水平分辨率约为 100 km; 陆面分量模式为 CLM4.0, 水平分辨率与大气分量一致; 海洋分量模式为 POP2, 纬向水平分辨率为 1.1°, 经向分辨率为 0.27°—0.54°, 垂向分辨率加密到 61 层, 第 1 层为海表温度日变化参数化方案诊断的 0 m 海温层; 海冰模式为 LANL 发展的 CICE4, 水平分辨率与海洋分量一致; 海浪模式为自然资源部第一海洋研究所自主研发的 MASNUM 海浪模式, 并作为子程序直接嵌入到 POP2 中。物理过程方面, FIO-ESM v2.0 引入了浪致混合、海浪斯托克斯漂流速度对海-气通量的作用、海浪飞沫对热通量作用和海表温度日变化等 4 个全球的特色物理过程。具体细节参见宋振亚等(2019)。

南京信息工程大学发展的 NESM v3, 其大气分量模式是德国马普气象研究所的 ECHAM v6.3 模式, 水平分辨率为 T63 (~200 km), 垂直方向上有 47 层, 从地面至 0.01 hPa, 改进了模式的边界层方案与对流参数化方案, 调整了云物理过程。采用的陆面模式是德国马普气象研究所发展的 JABACH。海洋分量模式是欧盟联合开发的 NEMO v3.4, 水平

分辨率约为 1°, 经向方向在热带地区加密到 (1/3)°, 垂直层数为 46 层, 增加了海洋混合层的盐析过程、海水状态方程的“刚性化”处理。海冰分量模式是 LANL 开发的 CICE v4.1 海冰模式, 经向分辨率为 1°, 纬向分辨率为 0.5°; 垂直方向上分为 5 层, 分别是 4 层海冰和 1 层冰上积雪, 改进了冰雪反照率的处理, 使模式能够更真实反映海冰的平均态和季节变化。具体细节参见曹剑等(2019)。

中国台湾“中研院”的地球系统模式 TaiESM 是 CESM 1.2.2 的改进版, 其大气模式为 CAM5.3, 包括 100 和 200 km 两种水平分辨率, 垂直 30 层; 海洋模式为 POP2, 水平分辨率 1.0°, 垂直 70 层; 陆面模式为 CLM4.0、海冰模式为 CICE4.0。较之 CESM1.2.2 版本, TaiESM 的陆面、海洋和海冰分量都保持不变, 主要改进在于大气模式的深对流参数化方案、云宏观物理过程、气溶胶模块和地形对太阳辐射的影响。

3.2 国家十二五重大科技基础设施“地球系统数值模拟装置”建设

过去 5 年, 中国除地球/气候系统模式的研发取得显著进展外, 在地球系统模式研发平台建设方面, 亦取得相当进展。国家十二五重大科技基础设施“地球系统数值模拟装置”经历了项目申请报告、可行性研究报告、初步设计书及概算等论证过程, 得到国家发展改革委员会批复并已于 2018 年秋正式开工。该装置由中国科学院大气物理研究所和清华大学承建, 装置包括地球系统模式数值模拟软件、区域高精度环境模拟软件、超级模拟支撑与管理、支撑数据库和资料同化及可视化、面向地球科学的高性能计算机 5 大系统, 总投资超过 12 亿元人民币, 建设周期 4 a。

地球系统数值模拟装置的科学目标是, 深入认识地球环境复杂系统基本规律, 探索地球系统大气圈、水圈、冰冻圈、生物圈、岩石圈的物理、化学、生物过程, 探究各圈层及其相互作用对地球系统整体和中国区域环境的影响; 融合模拟与观测数据提高预测的准确性, 实现对地球系统复杂过程在中尺度分辨率的定量描述与模拟, 为国家防灾减灾、应对气候变化、大气环境治理等重大问题提供科学支撑; 推动地球系统科学不同学科的交叉与融合, 促进中国地球系统科学整体向国际一流水平跨越。

地球系统数值模拟装置的硬件建设目标为，峰值不低于 15 Petaflops、存储不低于 80 PB 的专用结构高性能计算机系统，总体性能将显著超过目前专用于地球系统科学数值模拟的其他高性能计算机系统。拟建设的地球系统模式包括大气、海洋、陆表层、气溶胶和大气化学、陆地植被生态系统、海洋生化系统、陆地生化系统等分系统及其耦合模式，有完整、自治和严谨的全套动力、物理、化学和生态过程，具有中国自主知识产权和独创特色，分辨率达到世界先进水平。地球系统模式的水平分辨率将可以达到 10—25 km，显著改善模式对过去和未来气候变化的模拟能力。同时还将针对中国及周边区域的云可分辨率尺度天气、大气污染、长期气候变化风险和农业旱灾的高精度模拟问题，建设全国空间分辨率 1—3 km 的高精度区域环境模式。

4 中国 CMIP6 模式的历史气候模拟和未 来预估

到目前为止，已经正式通过地球系统网格数据

节点(ESG data node)向地球系统网格联盟(ESGF)正式发布 CMIP6 数据的中国模式有 4 个：BCC-CSM2-MR、CAMS-CSM1-0、FGOALS-g3 和 NESM3。为展示参与 CMIP6 的中国模式的基本性能，从气候平均态、20 世纪历史气候变化和未来预估的角度，给出以上 4 个模式的集合平均结果。其中，BCC-CSM2-MR 选择历史气候模拟的第 3 个成员结果，而其他 3 个模式选择第 1 个成员结果。

图 1 给出模式模拟的 1995—2014 年平均表面温度及其相对观测的偏差。相对于观测，中国模式的集合平均能够较好模拟观测气温的气候态空间分布，但是显著高估了大部分海洋、欧亚大陆东北部冬季和中部夏季表面气温(0.50—4.00℃)，低估了陆地和北极圈区域的气温(-0.50—-4.00℃)。北半球冬季高纬度地区的模拟冷偏差可能与模拟海冰偏多有关。4 个模式的集合平均结果的技巧要明显高于单一模式的结果(表 4)。

图 2 给出模式模拟的 1995—2014 年平均降水及其相对观测的模拟偏差。观测中，降水主要集中在

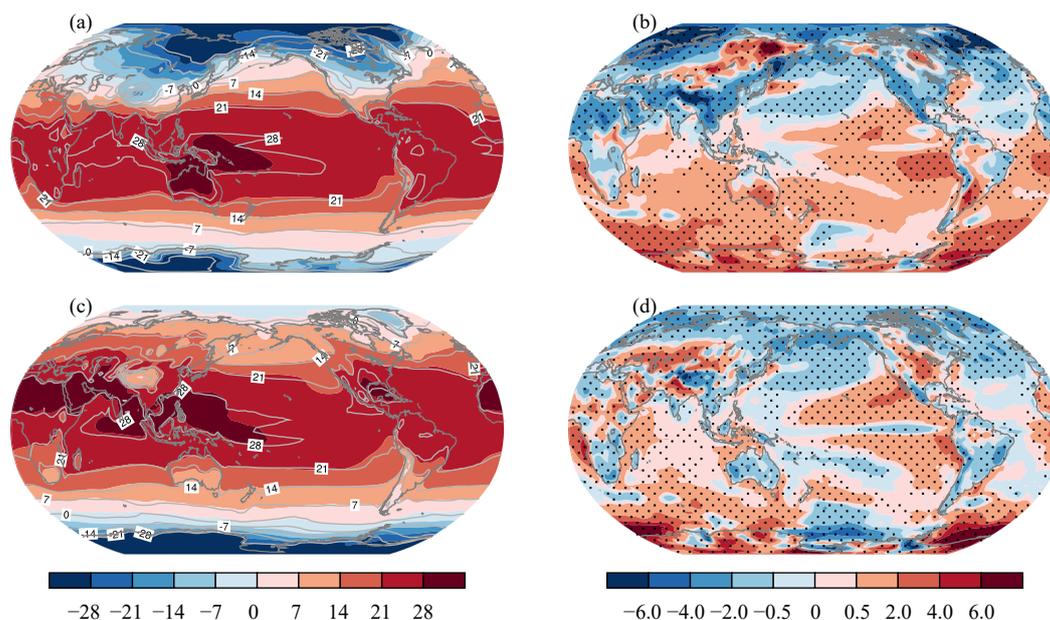


图 1 (a、c) 观测(色阶)和 CMIP6 四个中国模式集合平均模拟(等值线)的 1995—2014 年表面气温分布；
(b、d) CMIP6 四个中国模式集合平均的模拟偏差(打点区域表示偏差通过 95% 的置信度；
观测的表面气温来自 HadCRU4 和 BEST 资料的算术平均)
(a、b. 北半球冬季, c、d. 北半球夏季; 单位: °C)

Fig. 1 (a, c) Spatial patterns of 1995—2014 mean surface air temperature derived from the observations (shadings) and multi-model ensemble mean (contours) of four Chinese models that participated in CMIP6 (a, b (c, d) is for DJF (JJA) mean); (b, d) The simulation biases (the dotted areas are for biases passing the 95% confidence level, the observations are the average of HadCRU4 and BEST data, unit: °C)

在热带海洋(7.00—10.00 mm/d)和全球季风区的夏季(约 7.00 mm/d)。4 个中国模式集合平均能够较好再现观测降水的空间分布(表 4),但高估了热带赤道辐合带(ITCZ)区域、南亚季风区南部夏季、大洋洲季风区、东亚冬季、北美西海岸和南半球冬季大部分地区的降水(0.50—4.00 mm/d),低估了欧亚大陆北部、东亚夏季和南亚季风区北部、南美北部、南半球夏季和南大西洋冬季降水(约 2.00 mm/d)。在热带地区,模拟降水呈现明显的“双 ITCZ”偏差。该偏差普遍存在于 CMIP3 和 CMIP5 的模式中(Lin, 2007; Li, et al, 2014),可能与模式中 Bjerknes 反馈和海表温度-潜热通量反馈偏强、海表温度-短波反馈偏弱(Lin, 2007)、中太平洋海表温度初始场

的偏差(Liu, et al, 2012)和大气模式对低云的模拟偏差(Li, et al, 2014)有关。

为了考察中国 4 个模式在国际上的水平,以模式模拟的全球表面气温与降水的均方根误差为指标,对比了中国 4 个模式与另外 16 个同样参与 CMIP6 的模式模拟性能(图 3)。与国际上其他模式相比,中国模式对冬季表面气温和降水的模拟误差略大或者属于模拟偏差大的一类模式(图 3a);但在夏季,中国模式的模拟性能与国际主流模式水平相近(图 3b)。从空间分布上看,中国模式中的偏差也普遍存在于其他模式中(图略)。中国 4 个模式集合平均的模拟偏差小于国际上大部分模式的模拟偏差,接近 20 个模式集合平均的水平。

表 4 CMIP6 四个中国模式及其集合平均模拟的全球表面气温和降水空间相关系数和均方根误差
Table 4 Pattern correlation coefficients and root mean square errors of surface air temperature and precipitation between observations and historical simulations by four Chinese models and multi-model ensemble mean

模式名称	温度(°C)				降水(mm/d)			
	空间相关系数		均方根误差		空间相关系数		均方根误差	
	夏季	冬季	夏季	冬季	夏季	冬季	夏季	冬季
MME	0.99	0.99	1.65	2.11	0.84	0.85	1.44	1.42
BCC-CSM2	0.99	0.99	2.83	2.47	0.82	0.82	1.66	1.74
CAMS-CSM	0.99	0.98	2.10	3.18	0.74	0.76	1.93	1.74
FGOALS-g3	0.99	0.99	2.17	2.96	0.71	0.81	2.10	1.69
NESM3	0.99	0.99	1.92	2.35	0.80	0.76	1.75	1.89

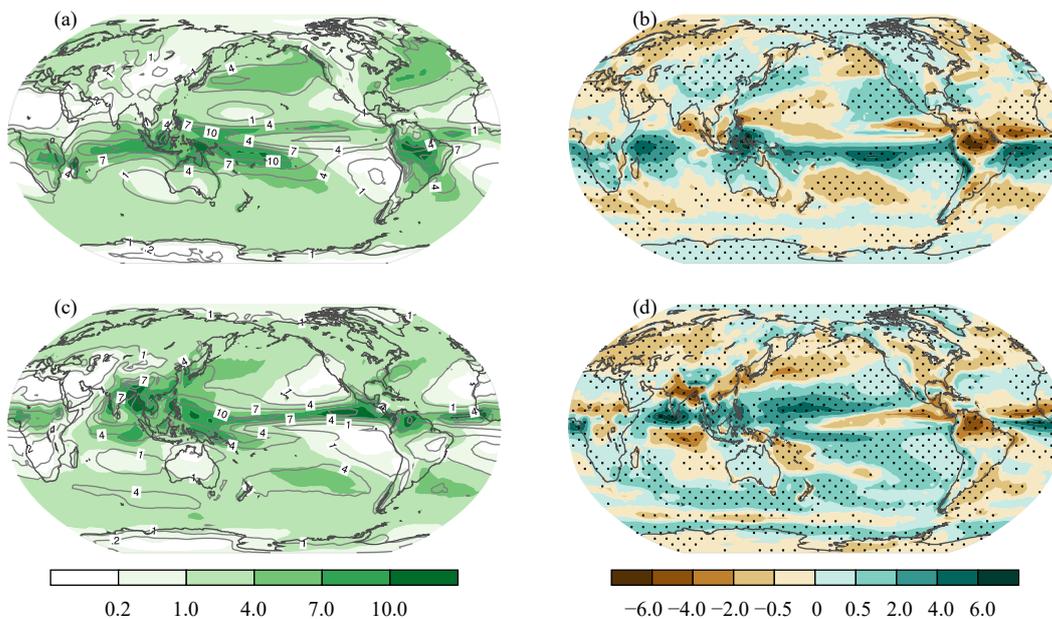


图 2 同图 1, 但为降水(单位: mm/d; 观测数据来自 GPCP 资料)

Fig. 2 Same as Fig.1 but for precipitation (unit: mm/d; the observed precipitation is derived from GPCP data)

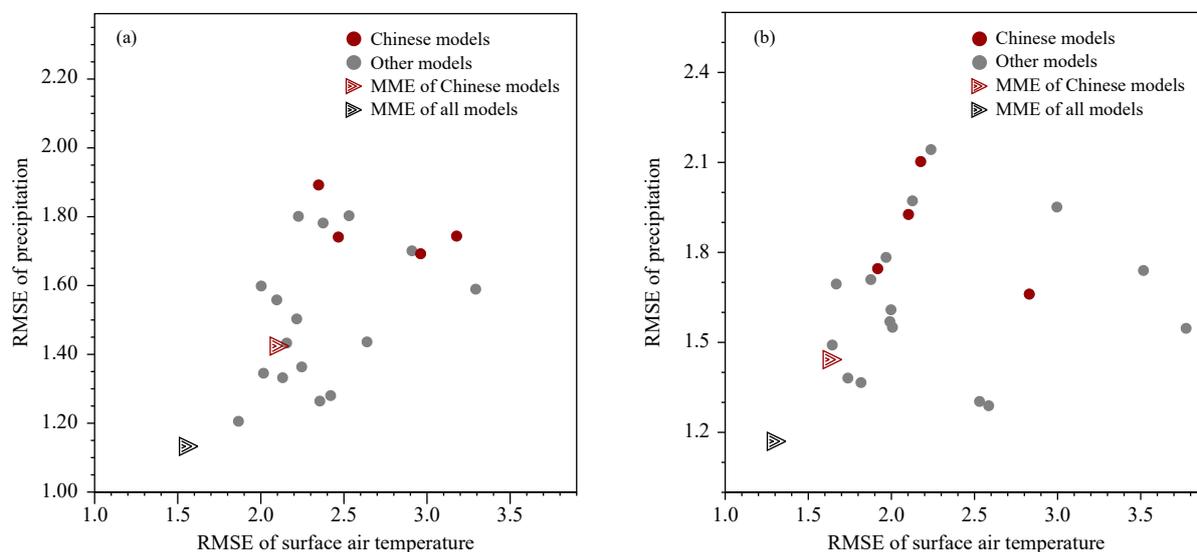


图3 中国参与CMIP6的4个模式(红)和CMIP6其他16个模式(灰)模拟全球表面气温(单位: $^{\circ}\text{C}$)和降水(单位: mm/d)的均方根误差, 以及中国4个模式(红色三角形)和20个CMIP6模式(黑色三角)集合平均的均方根误差(a. 北半球冬季, b. 北半球夏季)

Fig. 3 Root mean square errors (RMSEs) of global surface air temperature (unit: $^{\circ}\text{C}$) and precipitation (unit: mm/d) simulated by four Chinese models (red) and other 16 models (gray) that participated in CMIP6. The RMSEs of four Chinese models ensemble mean (red triangles) and 20 CMIP6 models ensemble mean (black triangles) are also presented (a. DJF mean, b. JJA mean)

中国地处季风区, 季风的模拟向来是中国模式研发重点关注的对象。图4给出模式模拟的北半球夏季平均850 hPa风场及其相对JRA55再分析资料的偏差。模式能够较好地再现亚洲夏季风环流空间分布($\text{PCC}=0.96$), 但是模拟的西北太平洋副热带高压和南亚夏季风偏弱。西北太平洋副热带高压的位置和强度决定着东亚夏季风雨带的水汽输送, 其模拟偏差将直接影响到季风降水的模拟效果。

历史温度变化的模拟是衡量气候模式性能的基本指标, 图5给出观测和4个模式模拟的1900—2014年的南北纬 60° 之间年均表面温度距平序列。3套观测资料(GISTEMP、BEST、HadCRUT4)显示, 1900—2014年平均温度升高了 0.74 [0.71 — 0.79] $^{\circ}\text{C}$, 4个模式模拟平均升温趋势是 0.73 [0.63 — 0.91] $^{\circ}\text{C}$, 与观测非常接近; 模拟的升温趋势最强的是FGOALS-g3(0.91°C)、最弱的是CAMS-CSM1-0(0.63°C), 介于二者之间的是NESM3(0.68°C)和BCC-CSM2-MR(0.71°C)。其中对于FGOALS-g3, 相比于CMIP5, CMIP6外强迫(主要指温室气体和气溶胶)的变化是其升温趋势模拟更加显著的重要

原因(Nie, et al, 2019)。观测中, 全球陆地降水呈增多趋势, 模式的结果与观测差异较大, 原因之一是观测资料本身不确定性较大, 特别是在20世纪早期; 同时, 降水的变化局地性较强、受内部变率的影响较大。

CMIP6的核心气候预估试验包括SSP1-2.6、SSP2-4.5、SSP3-7.0和SSP5-8.5四种情景。图6给出4种情景下预估的全球平均温度和陆地平均降水变化。在近期(2021—2040年)气候预估中, 各情景之间的升温 and 降水差异不大, 升温 0.55 — 0.71°C , 降水增大 0.76% — 1.63% ; 中期(2041—2060年)预估中, 不同排放情景之间的升温差异逐渐显现, 但是降水的差异还不明显; 到远期(2081—2100年), 全球平均表面升温 0.72 — 3.13°C , 不同情景之间的差异显著。相比之下, 降水变化在不同情景之间的差异不如温度明显, 存在较大的模式不确定性。

图7给出SSP1-2.6和SSP5-8.5两种排放情景下预估的远期(2081—2100年)温度变化。升温最大的区域位于北半球高纬度地区, 陆地升温要比海洋更大。两情景的升温差异比较大。SSP5-8.5情景下北半球高纬度地区的升温已经超过 7.00°C ,

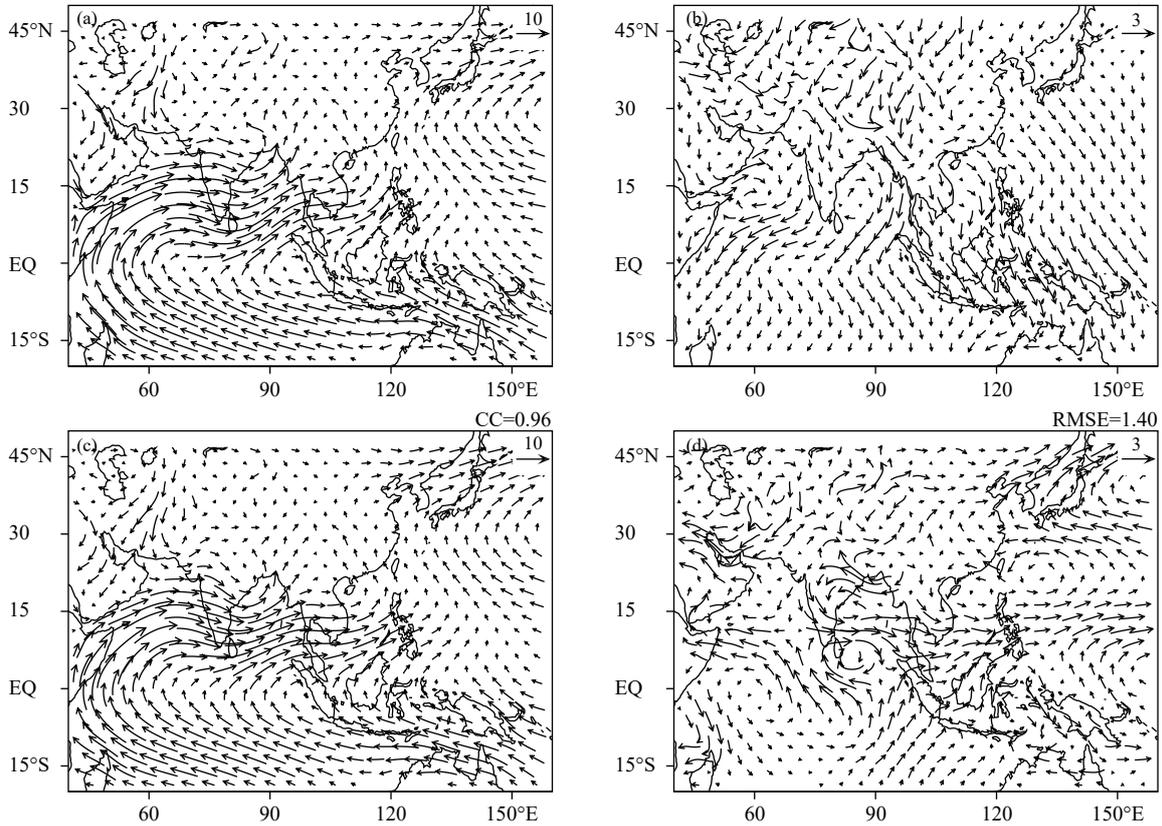


图4 1995—2014年6—9月平均850 hPa风场(单位:m/s)空间分布

(a. JRA55, c. CMIP6 四个中国模式历史气候试验集合平均模拟结果, b. 再分析资料ERA-Interim与JRA55之差, d. 相对于JRA55和ERA-Interim资料平均, 四个中国模式历史气候试验集合平均的模拟偏差)

Fig. 4 Spatial patterns of June-July-August-September (JJAS) mean low-level wind field (unit: m/s) at 850 hPa averaged from 1995–2014 derived from (a) the JRA55 and (c) the multi-model ensemble mean of historical simulations from four Chinese models that participated in CMIP6, and (b) the differences between ERA-Interim and JRA55 and (d) the simulated biases by Chinese models with respect to the mean of JRA55 and ERA-Interim data

SSP1-2.6 情景下的升温只有 1.00—2.00℃。4 个模式间预估的温度差异也较大, 如表 5 所示, 在 SSP1-2.6 情景下, 预估的全球升温最强的是 NESM3, 达到 1.18 ± 0.13 ℃; 升温最弱的是 FGOALS-g3, 只有 0.48 ± 0.10 ℃; 介于二者之间的是 BCC-CSM2-MR 的 0.72 ± 0.09 ℃ 和 CAMS-CSM1-0 的 0.67 ± 0.16 ℃。在高排放的 SSP5-8.5 情景下, 预估的全球升温最强的是 NESM3, 达到 4.27 ± 0.37 ℃; 升温最弱的是 CAMS-CSM1-0, 只有 2.52 ± 0.20 ℃; 介于二者之间的是 BCC-CSM2-MR 的 3.13 ± 0.23 ℃ 和 FGOALS-g3 的 2.75 ± 0.23 ℃。

图 8 给出 SSP1-2.6 和 SSP5-8.5 两种排放情景下预估的远期(2081—2100 年)降水变化。预估的两种情景下的降水变化空间型高度相似, 在强度上 SSP5-8.5 远强于 SSP1-2.6。21 世纪远期, 赤道海

洋和高纬度部分地区的降水显著增多(0.50—3.00 mm/d); 副热带地区显著减少(−0.50—−1.00 mm/d)(夏季北半球的副热带太平洋、亚洲季风区和北非季风区除外)。

如何理解在相同的排放情景驱动下不同模式预估的气候变化存在显著差异? 这与不同模式对温室气体强迫的敏感度不同有直接关系。度量模式敏感度的指标之一是平衡态气候敏感度(Equilibrium Climate Sensitivity, ECS), 它表示 2 倍于工业革命前 CO₂ 浓度下全球平均温度(GMST)最终上升的幅度。ECS 是表征模式对温室气体响应敏感性的核心指标, 与远期气候预估的不确定性密切相关(Zhou, et al, 2015b; Chen, et al, 2015)。中国 5 个 CMIP6 模式(BCC-CSM2-MR、CAMS-CSM1-0、FGOALS-f3、FGOALS-g3、NESM3)的 ECS

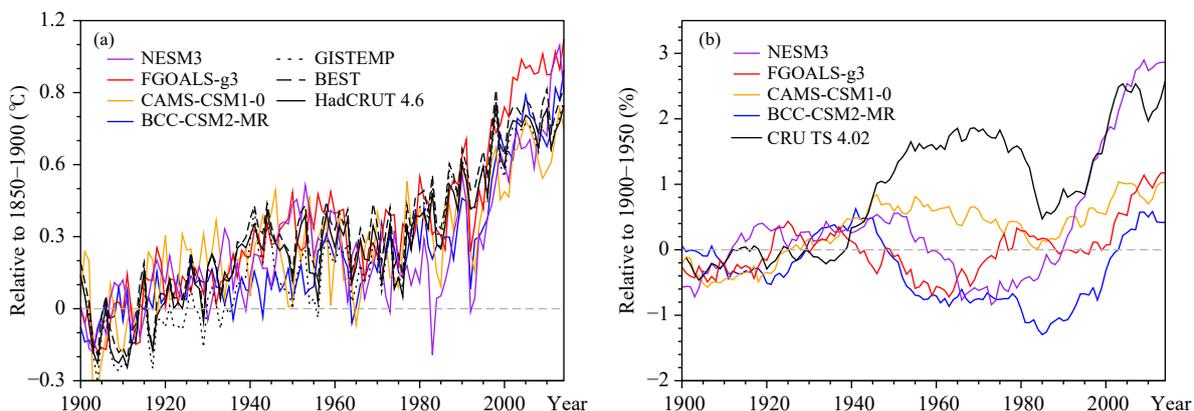


图5 观测和CMIP6四个中国模式历史气候试验集合平均模拟,在南北纬60°之间的年平均温度距平序列(a)和全球陆地年平均降水距平变化率序列(b)
(温度场气候态取1850—1900年平均;降水气候态取1900—1950年,除以气候态平均值得到变化率,并经过20 a滑动平均)

Fig. 5 Annual mean surface air temperature anomalies between 60°S and 60°N (a), and the rate of global land averaged rainfall anomalies (b) from observations and multi-model ensemble mean of historical simulations by four Chinese models (Surface air temperature (global land averaged rainfall) anomalies were calculated as departures from the annual mean of 1850—1900 (1900—1950). The precipitation anomalies were normalized by the mean of 1900—1950. A 20 year running average was applied to precipitation anomalies)

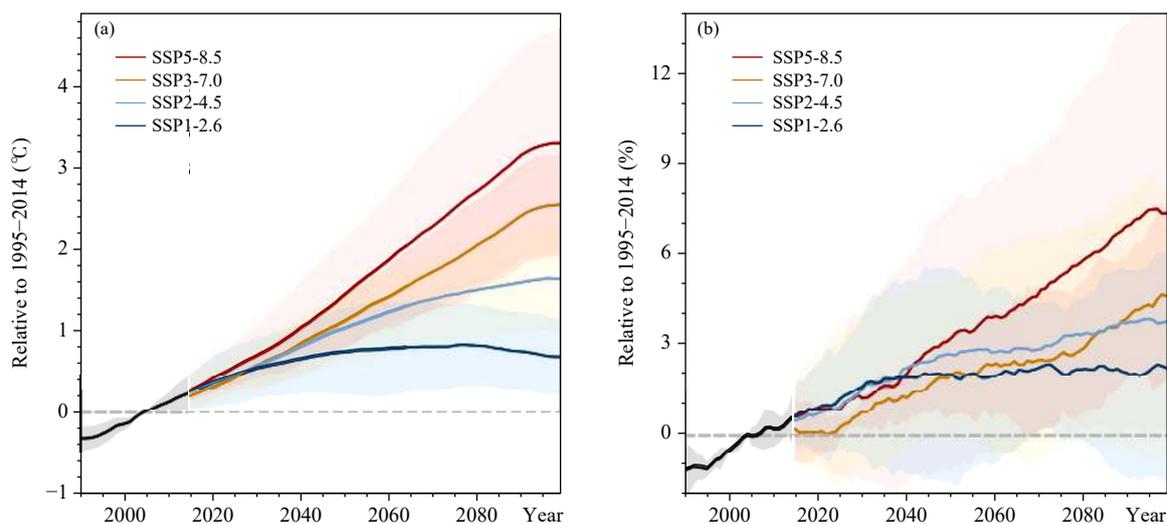


图6 参与CMIP6的中国4个模式预估的SSP1-2.6、SSP2-4.5、SSP3-7.0、SSP5-8.5情景下全球平均表面气温(a)和全球陆地降水(b)变化序列(相对1995—2014年平均;各序列都经过20 a滑动平均,2014年之前的是历史气候模拟试验;实线表示4个模式集合平均的结果,阴影表示第5—95百分位的范围)

Fig. 6 Projected changes of global mean surface air temperature (a) and percentages changes of global land averaged rainfall (b) relative to the period 1995—2014 under SSP1-2.6, SSP2-4.5, SSP3-7.0, SSP5-8.5 scenarios simulated by four Chinese models (A 20 year running average was applied to the anomalies; The data before 2014 are from historical simulations; the solid lines denote the multi-model ensemble mean of four models, while the shadings denote the uncertainty range of 5th to 95th)

分别为3.03℃(Wu, et al, 2020)、2.27℃(Chen, et al, 2019)、2.98℃、2.84℃、4.65℃;5个模式平均为3.16±0.89℃(±1个标准差)。图9给出了其中4个模式预估的远期(2081—2100年)全球平均温度变化(表5)与ECS的关系(FGOALS-f3缺少预估数

据,NESM3缺少SSP3-7.0预估)。可见,模式的气候敏感度越高,预估的未来升温幅度也越大。由于高排放情景(例如SSP5-8.5)下的气候变化主要是由温室气体驱动的,因此这种正相关关系比在低排放情景时(例如SSP1-2.6)要更加显著。

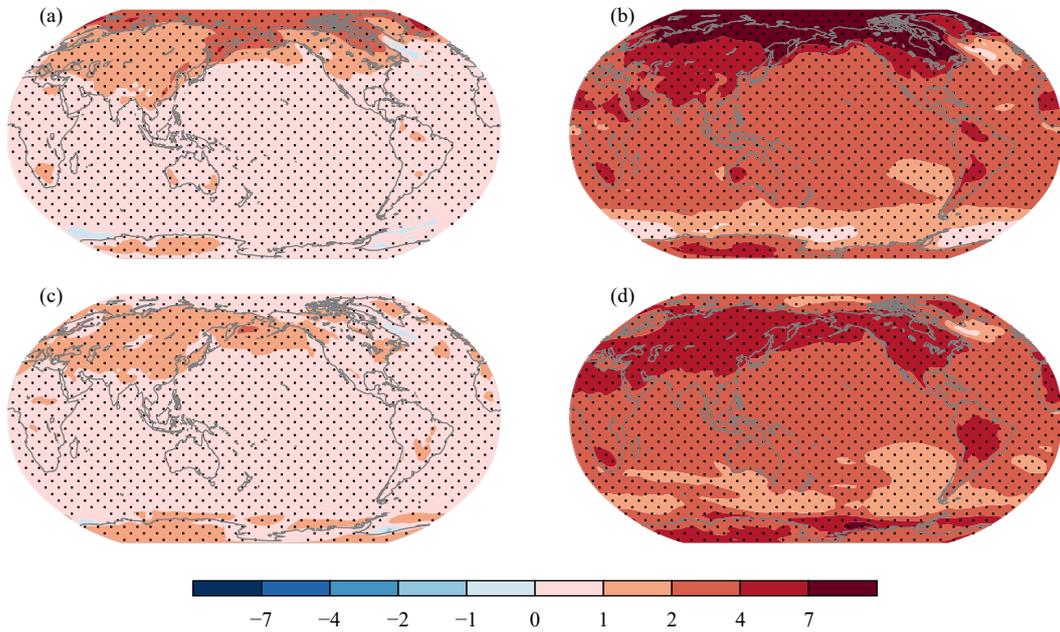


图7 中国参与CMIP6的4个模式预估的SSP1-2.6(a、c)和SSP5-8.5(b、d)情景下2081—2100年北半球冬季(a、b)和夏季(c、d)集合平均表面气温(单位: $^{\circ}\text{C}$)变化(相对于1995—2014年气候态;打点区域表示至少3个模式的变化同号)

Fig. 7 Spatial patterns of projected changes of surface air temperature (unit: $^{\circ}\text{C}$) in DJF (a, b) and JJA (c, d) under SSP1-2.6 (a, c) and SSP5-8.5 (b, d) scenarios for the period 2081—2100 relative to the period 1995—2014 based on multi-model ensemble mean of four Chinese models that participated in CMIP6 (Dotted areas indicate that the projected changes are with the same sign in at least three models)

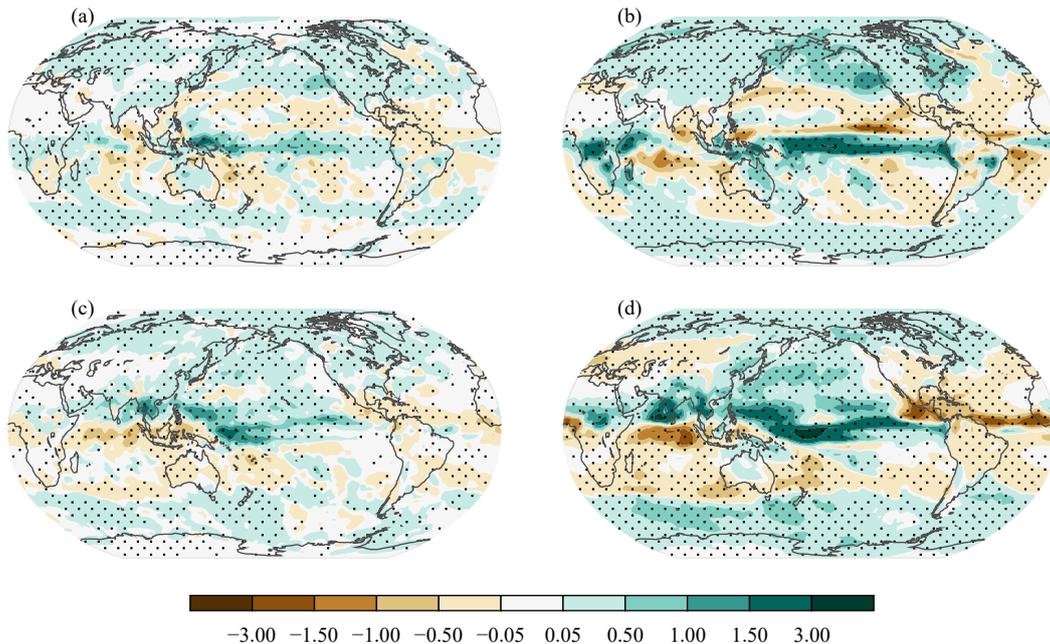


图8 中国参与CMIP6的4个模式预估的SSP1-2.6(a、c)和SSP5-8.5(b、d)情景下2081—2100年北半球冬季(a、b)和夏季(c、d)集合平均降水(单位: mm/d)变化(相对于1995—2014年气候态;打点区域表示至少3个模式的变化同号)

Fig. 8 Spatial patterns of percentage changes of projected rainfall (unit: mm/d) in DJF (a, b) and JJA (c, d) under SSP1-2.6 (a, c) and SSP5-8.5 (b, d) scenarios for the period 2081—2100 relative to climatological rainfall averaged for the period 1995—2014 based on multi-model ensemble mean of four Chinese models that participated in CMIP6 (Dotted areas indicate that the projected changes are with the same sign in four models)

表 5 参与 CMIP6 的 4 个中国模式在 SSP1-2.6, SSP2-4.5, SSP3-7.0, SSP5-8.5 情景下预估的全球平均表面气温变化 (表中列出±1 个标准差范围, 括号中为 5%—95% 预估范围 (基于高斯假设))

Table 5 CMIP6 annual mean surface air temperature anomalies from the 1995–2014 reference period for selected time periods and SSPs. The multi-model mean±1 standard deviation ranges across the individual models are listed and the 5%–95% ranges from the models’ distribution (based on a Gaussian assumption and obtained by multiplying the CMIP6 ensemble standard deviation by 1.64) are given in brackets. The values tabulated here are for single simulations from the four models that have contributed to the CMIP6 exercise. The models are BCC-CSM2-MR、CAMS-CSM1-0、FGOALS-g3 and NESM3

模式名称和时段	SSP1-2.6 (°C)	SSP2-4.5 (°C)	SSP3-7.0 (°C)	SSP5-8.5 (°C)
MME: 2021–2040年	0.55±0.22 (0.18, 0.87)	0.59±0.21 (0.24, 0.93)	0.58±0.09 (0.42, 0.73)	0.71±0.23 (0.33, 1.08)
2041–2060年	0.75±0.33 (0.21, 1.29)	1.05±0.26 (0.62, 1.47)	1.14±0.19 (0.82, 1.45)	1.46±0.43 (0.76, 2.16)
2081–2100年	0.76±0.30 (0.28, 1.25)	1.61±0.37 (1.00, 2.22)	2.43±0.38 (1.81, 3.04)	3.17±0.78 (1.89, 4.44)
BCC-CSM2-MR:				
2081–2100年	0.72±0.09 (0.57, 0.87)	1.63±0.13 (1.42, 1.84)	2.84±0.23 (2.46, 3.21)	3.13±0.23 (2.75, 3.51)
CAMS-CSM1-0:				
2081–2100年	0.67±0.16 (0.42, 0.93)	1.31±0.12 (1.12, 1.51)	2.10±0.21 (1.75, 2.44)	2.52±0.20 (2.20, 2.84)
FGOALS-g3:				
2081–2100年	0.48±0.10 (0.32, 0.64)	1.36±0.10 (1.19, 1.53)	2.34±0.26 (1.92, 2.77)	2.75±0.23 (2.38, 3.12)
NESM3:				
2081–2100年	1.18±0.13 (0.97, 1.39)	2.13±0.11 (1.94, 2.32)	–	4.27±0.37 (3.67, 4.87)

注: NESM3未提供SSP3-7.0预估数据。

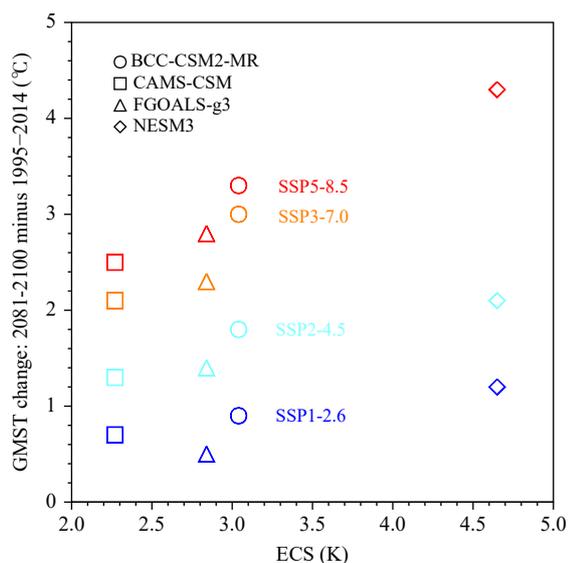


图 9 中国 4 个 CMIP6 模式在 4 种社会经济路径下 (SSP1-2.6, SSP2-4.5, SSP3-7.0, SSP5-8.5) 全球平均温度的远期预估 (2081—2100 年相对于 1995—2014 年的变化) 与平衡态气候敏感度 (ECS) 的关系

Fig. 9 The Equilibrium Climate Sensitivity (ECS) versus the projected changes in global mean surface temperature (GMST) for the period 2081–2100 relative to 1995–2014 under four Shared Socioeconomic Pathways (SSP1-2.6, SSP2-4.5, SSP3-7.0, SSP4-8.5 scenarios simulated by four Chinese models that participated in CMIP6)

5 短期和近期气候预测

除了支撑气候变化研究之外, 中国气候系统模式发展的一个重要方向是支撑短期气候预测业务。例如, 国家气候中心基于多圈层耦合的气候系统模式 BCC-CSM (Wu, et al, 2010, 2013) 成功研制了中国新一代气候预测业务模式系统 (吴统文等, 2013), 该系统包含月尺度气候预测模式、季节尺度气候预测模式, 以及次季节至季节尺度 (S2S) 气候预测模式 3 个分系统, 均已投入业务化运行, 在中国气象部门推广应用。BCC-CSM 季节气候预测模式对于厄尔尼诺-南方涛动现象 (ENSO) 的预报时效超过 6 个月, 对 Webster-Yang 夏季风指数以及西北太平洋、东南亚、南亚、印度夏季风指数的预测技巧较高 (Liu X W, et al, 2014, 2015)。BCC 的 S2S 预测模式系统于 2014 年作为中国唯一模式参与了世界气象组织 (WMO) 的国际次季节至季节预测 (S2S) 计划, 通过改进初始化方案、优化模式等一系列工作, 模式对次季节尺度关键指标热带季节内振荡的预测技巧可达到 23 d, 与国际 S2S 多模式的先进水平相当 (Liu, et al, 2017, 2019)。

近年来, 中国科学院亦开始重视科研型模式在业务预测中的应用。例如, 中国科学院大气物理研

究所基于气候系统模式 CAS FGOALS-f2 研发了天气-气候动力集合预报预测系统(包庆等, 2019)。FGOALS-f2 预测系统的初始化方法为“Nudging”, 利用该初始化系统完成了与 2018 年印度洋公开航次探空资料的比对分析工作(Wang, et al, 2019)。FGOALS-f2 研发团队发展了包括延伸期预报到季节预测的无缝隙气象预报预测技术, 采用“时间滞后方法”开展集合预测, 建立了覆盖全球和重点区(包括厄尔尼诺/南方涛动、北极海冰和“一带一路”国家地区等)的试验性实时预报、预测系统。经过多次回报试验的评估, 预测系统在 ENSO、MJO、热带气旋等方面展现出较高的预测技巧。目前该系统已经纳入国家气候中心的多模式集合(CMME)业务预测系统(Ren, et al, 2019)。

科研型模式与业务型模式的融合还体现在一些新生的“科研型业务应用”方面。例如, 面向未来 1—10 a 的近期气候预测是气候预测领域新的研究热点, 受到决策者和农业、城市规划、医疗健康、民用航空业等领域的利益攸关者的广泛关注。近期气候预测填补了季节—年际预测和中长期气候预

估之间的空隙, 是“无缝隙”气候服务的重要一环, 国际上主要模式中心都在积极研发近期气候预测系统。基于耦合气候系统模式 FGOALS-s2 和新发展的集合最优差值-分析增量更新(EnOI-IAU)初始化方案, 中国科学院大气物理研究所建立了近期预测系统 IAP-DecPreS(吴波等, 2017; Wu, et al, 2018)。EnOI-IAU 初始化方案通过同化海洋上层 700 m 的温度廓线观测资料 EN4 以及格点化海表温度资料 HadISSTv1.1, 在耦合框架下对模式进行初始化。系统的年代际回报试验表明, IAP-DecPreS 对中纬度北太平洋和热带大西洋等气候系统内部年代际变率关键区具有较高的预测技巧(图 10)。IAP-DecPreS 预测结果参加了英国气象局发起、多国参与的“年代际预测交流”(Decadal forecast exchange)计划。这是 WMO 组织的年代际预测准业务运行的先期尝试。此外, IAP-DecPreS 也被用来研究全场同化和异常场同化对短期气候预测的影响等科学问题(Sun, et al, 2018; 胡帅等, 2019; Hu, et al, 2019)。目前, EnOI-IAU 初始化方案已经移植到中国气象科学研究院和国家气候中心的耦合模式上。

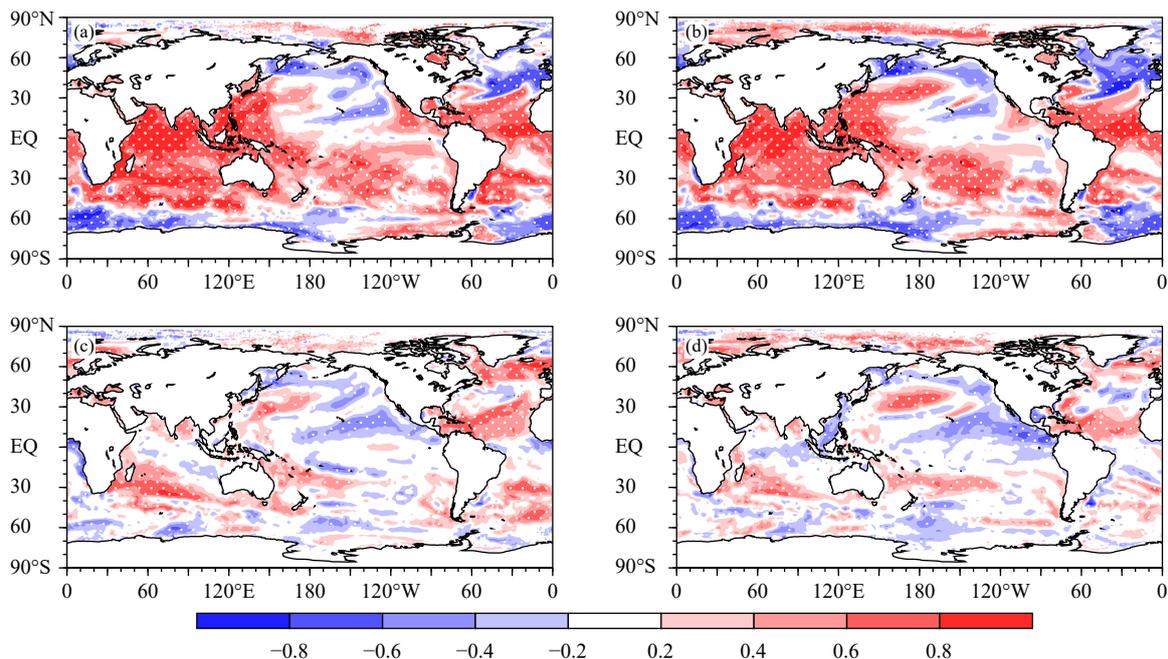


图 10 年代际预测回报试验分别对回报年 2—5 a (a, c) 和 6—9 a (b, d) 平均海表温度的时间相关系数技巧的空间分布 (a, c. 原始场的相关系数, b, d. 去趋势场的相关系数; 打白色点部分为通过 5% 显著性水平; Wu 等, 2018)

Fig. 10 (a, c) Temporal correlation skill of annual mean SSTs derived from the decadal prediction experiments averaged over the hindcast years 2—5 (White dots denote values passing the 5% significance levels), (b, d) As in Fig (a, c) but for detrended SSTAs over the hindcast years 6—9 (Wu, et al, 2018)

除此之外,基于耦合气候系统模式 FGOALS-g2 和降维投影四维变分(DRP-4DVar)同化方法(Wang, et al, 2010),建立了国际上最早的基于四维集合-变分混合同化方法的初始化系统和相应的年代际预测系统(He, et al, 2017),并开展了年代际后报试验。结果表明,先进的同化方法能够明显提高 FGOALS-g2 对年代际变率的预测能力,包括对全球、海洋和陆地平均近地面气温距平的年代际变率(He, et al, 2017)、北太平洋海表温度、太平洋年代际振荡(PDO)、阿留申低压、太平洋-北美遥相关型(PNA)和北大西洋年代际振荡(AMO)等的预测技巧。

6 未来展望

经过 30 多年的努力和积累,中国的气候系统模式研发工作在最近 5 年取得了突破性的进展,这在参与 CMIP 的模式数量、模式的性能以及从事模式研发队伍的体量等方面都有体现。在看到成绩的同时,也应看到中国的气候模式发展尚存在“多而不强”的问题,有低水平重复、碎片化发展的倾向,成果的原创性和国际影响力都有待提高。借鉴发达国家的成功经验,解决这一问题需要加强顶层设计以及科研经费管理部门的统筹协调。为此,中国学者曾多方呼吁和提出各种意见建议(王会军等, 2004; 王斌等, 2008; 周天军等, 2014)。统筹协调是一个国际性难题,“任何涉及机构优化或经费管理优化的举措都难免带来明显紧张的气氛,因为这将触及从事气候模式研发的各个机构及其管理部门的利益”(推动气候模拟国家战略委员会, 2014)。这里结合国际态势,从发展的角度,提出未来中国气候模式研发工作需要加强的几个方向。

(1)无缝隙天气-气候预报模式的发展问题。传统的天气预报多采用高分辨率大气模式(耦合了陆面模式),不考虑与海洋、海冰的耦合。而传统的气候模拟和预测虽考虑了完整的海-陆-气耦合过程,但其分辨率大多低于天气预报模式。目前国际上隔离天气和气候的鸿沟在逐渐缩小,支撑无缝隙预测的天气、气候一体化模式是未来 5—10 a 的发展热点,在科学上这涉及到适合多尺度的大气模式动力框架的研发、多尺度适应的模式参数化问题、耦合同化问题等,在研发组织上这涉及科研型模式

和业务应用型模式的有效衔接问题,中国应尽早布局。

(2)地球系统模式研发和物理气候系统模式研发的合作问题。地球系统模式的基础是物理气候系统模式,但是由于地球系统模式关注的生物地球化学循环过程,计算量极大,因此,单就分辨率来说,在国际上地球系统模式一般落后物理气候系统模式大约 10 年。如何把物理气候系统模式研发的最新成果及时应用于地球系统模式是目前国际关注的议题之一。对于物理气候系统模式研发而言,物理过程特别是海洋混合、海-气通量以及云物理过程的深入研究是从本质上改进气候模式的关键。

(3)高分辨率区域气候的模拟问题。传统的区域气候模拟多是利用分辨率较高的区域气候模式来对分辨率相对较低的全球模式结果进行“动力降尺度”。近年来全球气候模式的分辨率提高很快,参加 CMIP6 的大气模式最高分辨率已经达到 25 km,这和传统的区域气候模式的分辨率接近。国际上已经开始有把千米分辨率的对流相容模式 CPM 用于气候预估研究。如何在区域模拟中协调高分辨率全球模式和区域模式的发展是未来需要关注的问题。

(4)模拟基础设施、资料标准和协议问题。随着高性能计算机的发展和模式分辨率的提高,海量数据的存储及其共享成为一个突出问题,构建支撑数值模拟工作的工程技术协议国际标准愈发重要。从气候模拟和预估的角度,WCRP WGCM 已经意识到规范标准的重要性,故专门成立基础设施工作组(Infrastructure Panel)来负责制定模式数据共享政策和技术标准(周天军等, 2019),但这些措施还远不能解决目前所面临的挑战。

(5)卫星遥感等新观测资料在模式检验中的应用,以及气候模式在设计、发展和优化观测系统中的重要作用。观测资料既是检验模式性能的事实标准,同时,数值模拟和预测也会对观测系统建设提出新的需求,模拟研究还能够为观测系统的构建和优化提供指导。

(6)气候模式的诊断、评估和观测标准的构建问题。作为检验和评估数值模式性能的标准,传统上把天气模式和气候模式区别对待,用于检验二者性能的观测标准也明显不同。但是随着天气、气候

一体化模式的发展,亟需构建新的检验模式性能的一观测事实标准;同时,参照国际上的成功做法,还需要建立与模式研发工作相匹配的观测网。

(7)多模式集合技术和模拟预估不确定性研究。从气候模拟和预估的角度,决策者需要可靠的预测预估结果;当前模式结果的不确定性来自3个方面,包括模式之间因动力框架和物理过程等不同而造成的不确定性、同一模式因采用不同的参数选择所带来的不确定性、同一模式采用不同初值所造成的内部变率对结果的影响等。3种模式集合技术对应3种不同的不确定性来源,发展最优集合技术,事关向用户提供可靠的模拟和预估产品问题。

(8)如何实现模式和用户的良好衔接。气候模拟和预测、预估在支撑基础科学研究的同时,更好地服务于社会有助于推动模式自身的发展。“未来地球”计划强调通过协同设计研究,加强科学家、科研资助机构以及用户的联系,提倡以解决问题为导向的研究、做有用的科学。WCRP为解决人类社会面临的可持续发展问题,提出冰冻圈消融及其全球影响、云-环流和气候敏感度、气候系统的碳反馈、天气和气候极端事件、粮食生产用水、区域海平面上升及其对沿海地区的影响,以及近期气候预测这七大科学挑战问题,目的也是更好地服务于社会。通过加强与未来地球计划的衔接与合作,中国的气候模拟研究工作有望更好地服务于全球环境变化研究、服务于社会。

参考文献

- 包庆, 吴小飞, 李矜霄等. 2019. 2018~2019 年秋冬季厄尔尼诺和印度洋偶极子的预测. *科学通报*, 64(1): 73-78. Bao Q, Wu X F, Li J X, et al. 2019. Outlook for El Niño and the Indian Ocean Dipole in autumn-winter 2018-2019. *Chinese Sci Bull*, 64(1): 73-78 (in Chinese)
- 曹剑, 马利斌, 李娟等. 2019. NUIST-ESM 模式及其参与 CMIP6 的方案. *气候变化研究进展*, 15(5): 566-570. Cao J, Ma L B, Li J, et al. 2019. Introduction of NUIST-ESM model and its CMIP6 activities. *Climate Change Res*, 15(5): 566-570 (in Chinese)
- 陈克明, 张学洪, 金向泽等. 1997a. 一个用于全球气候变化研究的海洋大气环流耦合模式 I: 模式的形成及性能. *海洋学报*, 19(3): 21-32. Chen K M, Zhang X H, Jin X Z, et al. 1997a. A global ocean-atmosphere general circulation model for global climate change research I: Model configuration and performance. *Acta Oceanol Sinica*, 19(3): 21-32 (in Chinese)
- 陈克明, 张学洪, 金向泽等. 1997b. 一个用于全球气候变化研究的海洋大气环流耦合模式 II: 模式气候漂移和增强温室效应的初步分析. *海洋学报*, 19(4): 26-40. Chen K M, Zhang X H, Jin X Z, et al. 1997b. A global ocean-atmosphere general circulation model for global climate change research II: Preliminary analysis on model drift and increased greenhouse gases effect. *Acta Oceanol Sinica*, 19(4): 26-40 (in Chinese)
- 胡帅, 吴波, 周天军. 2019. 近期气候预测系统 IAP-DecPreS 对印度洋偶极子的回报技巧: 全场同化和异常场同化的比较. *大气科学*, 43(4): 832-846. Hu S, Wu B, Zhou T J. 2019. Predictive skill of the near-term climate prediction system IAP-DecPreS for the Indian Ocean dipole: A comparison of full-field and anomaly initializations. *Chinese J Atmos Sci*, 43(4): 832-846 (in Chinese)
- 林岩崧, 黄小猛, 梁逸爽等. 2019. 清华大学 CIESM 模式及其参与 CMIP6 的方案. *气候变化研究进展*, 15(5): 545-550. Lin Y L, Huang X M, Liang Y S, et al. 2019. The Community Integrated Earth System Model(CIESM) from Tsinghua University and its plan for CMIP6 experiments. *Climate Change Res*, 15(5): 545-550 (in Chinese)
- 容新尧, 李建, 陈昊明等. 2019. CAMS-CSM 模式及其参与 CMIP6 的方案. *气候变化研究进展*, 15(5): 540-544. Rong X Y, Li J, Chen H M, et al. 2019. Introduction of CAMS-CSM model and its participation in CMIP6. *Climate Change Res*, 15(5): 540-544 (in Chinese)
- 邵慧, 钱永甫, 王谦谦. 1998. 太阳辐射日变化对 R15L9 气候模拟效果的影响. *高原气象*, 17(2): 158-169. Shao H, Qian Y F, Wang Q Q. 1998. The effects of the diurnal variation of solar radiation on climate modeling of R15L9. *Plateau Meteor*, 17(2): 158-169 (in Chinese)
- 宋振亚, 鲍颖, 乔方利. 2019. FIO-ESM v2.0 模式及其参与 CMIP6 的方案. *气候变化研究进展*, 15(5): 558-565. Song Z Y, Bao Y, Qiao F L. 2019. Introduction of FIO-ESM v2.0 and its participation plan in CMIP6 experiments. *Climate Change Res*, 15(5): 558-565 (in Chinese)
- 唐彦丽, 俞永强, 李立娟等. 2019. FGOALS-g 模式及其参与 CMIP6 的方案. *气候变化研究进展*, 15(5): 551-557. Tang Y L, Yu Y Q, Li L J, et al. 2019. The introduction of FGOALS-g model and the experiment design in CMIP6. *Climate Change Res*, 15(5): 551-557 (in Chinese)
- 推动气候模拟国家战略委员会. 2014. 推动气候模拟的美国国家战略. 周天军, 邹立维, 译. 北京: 气象出版社, 1-307. National Research Council. 2014. National Strategy for Advancing Climate Modeling. Zhou T J, Zou L W, trans. Beijing: China Meteorological Press, 1-307 (in Chinese)
- 王斌, 周天军, 俞永强等. 2008. 地球系统模式发展展望. *气象学报*, 66(6): 857-869. Wang B, Zhou T J, Yu Y Q, et al. 2008. A perspective on earth system model development. *Acta Meteor Sinica*, 66(6): 857-869 (in Chinese)
- 王会军, 徐永福, 周天军等. 2004. 大气科学: 一个充满活力的前沿科学. *地球科学进展*, 19(4): 525-532. Wang H J, Xu Y F, Zhou T J, et al. 2004. Atmospheric science: A vigorous frontier science. *Adv Earth Sci*, 19(4): 525-532 (in Chinese)
- 吴波, 周天军, 孙倩. 2017. 海洋模式初始化同化方案对 IAP 近期气候预测系统回报试验技巧的影响. *地球科学进展*, 32(4): 342-352. Wu B, Zhou T J, Sun Q. 2017. Impacts of initialization schemes of oceanic states on the predictive skills of the IAP near-term climate prediction system.

- Adv Earth Sci*, 32(4): 342-352 (in Chinese)
- 吴国雄, 张学洪, 刘辉等. 1997. LASG 全球海洋-大气-陆面系统模式 (GOALS/LASG) 及其模拟研究. *应用气象学报*, 8(S1): 15-28. Wu G X, Zhang X H, Liu H, et al. 1997. Global Ocean-Atmosphere-Land system model of LASG (GOALS/LASG) and its performance in simulation study. *Quart J Appl Meteor*, 8(S1): 15-28 (in Chinese)
- 吴统文, 宋连春, 刘向文等. 2013. 国家气候中心短期气候预测模式系统业务化进展. *应用气象学报*, 24(5): 533-543. Wu T W, Song L C, Liu X W, et al. 2013. Progress in developing the short-range operational climate prediction system of China National Climate Center. *J Appl Meteor Sci*, 24(5): 533-543 (in Chinese)
- 辛晓歌, 吴统文, 张洁等. 2019. BCC 模式及其开展的 CMIP6 试验介绍. *气候变化研究进展*, 15(5): 533-539. Xin X G, Wu T W, Zhang J, et al. 2019. Introduction of BCC models and its participation in CMIP6. *Climate Change Res*, 15(5): 533-539 (in Chinese)
- 周天军, 张学洪, 俞永强. 2000. 气候系统模式中海-气-水通量交换的耦合方法. *科学通报*, 45(19): 2097-2100. Zhou T J, Zhang X H, Yu Y Q. 2001. The coupling procedure of air-sea freshwater exchange in climate system models. *Chinese Sci Bull*, 46(1): 83-85
- 周天军, 邹立维, 吴波等. 2014. 中国地球气候系统模式研究进展: CMIP 计划实施近 20 年回顾. *气象学报*, 72(5): 892-907. Zhou T J, Zou L W, Wu B, et al. 2014. Development of earth/climate system models in China: A review from the coupled model intercomparison project perspective. *Acta Meteor Sinica*, 72(5): 892-907 (in Chinese)
- 周天军, 邹立维, 陈晓龙. 2019. 第六次国际耦合模式比较计划 (CMIP6) 评述. *气候变化研究进展*, 15(5): 445-456. Zhou T J, Zou L W, Chen X L. 2019. Commentary on the Coupled Model Intercomparison Project phase 6 (CMIP6). *Climate Change Res*, 15(5): 445-456 (in Chinese)
- Bao Q, Lin P F, Zhou T J, et al. 2013. The Flexible Global Ocean-Atmosphere-Land System model, spectral version 2: FGOALS-s2. *Adv Atmos Sci*, 30(3): 561-576
- Chen X L, Zhou T J. 2015. Distinct effects of global mean warming and regional sea surface warming pattern on projected uncertainty in the South Asian summer monsoon. *Geophys Res Lett*, 42(21): 9433-9439
- Chen X L, Guo Z, Zhou T J, et al. 2019. Climate sensitivity and feedbacks of a new coupled model CAMS-CSM to idealized CO₂ forcing: A comparison with CMIP5 models. *J Meteor Res*, 33(1): 31-45
- Collins W D, Bitz C M, Blackmon M L, et al. 2006. The Community Climate System Model version 3 (CCSM3). *J Climate*, 19(11): 2122-2143
- Guo Z, Zhou T J. 2014. An improved diagnostic stratocumulus scheme based on estimated inversion strength and its performance in GAMIL2. *Sci China Earth Sci*, 57(11): 2637-2649
- He B, Bao Q, Wang X C, et al. 2019. CAS FGOALS-f3-L model datasets for CMIP6 historical atmospheric model intercomparison project simulation. *Adv Atmos Sci*, 36(8): 771-778
- He S C, Yang J, Bao Q, et al. 2019. Fidelity of the observational/reanalysis datasets and global climate models in representation of extreme precipitation in East China. *J Climate*, 32(1): 195-212
- He Y J, Wang B, Liu M M, et al. 2017. Reduction of initial shock in decadal predictions using a new initialization strategy. *Geophys Res Lett*, 44(16): 8538-8547
- Hu S, Wu B, Zhou T J, et al. 2019. A comparison of full-field and anomaly initialization for seasonal prediction of Indian Ocean basin mode. *Climate Dyn*, 53(9): 6089-6104
- Ji D, Wang L, Feng J, et al. 2014. Description and basic evaluation of Beijing Normal University Earth System Model (BNU-ESM) version 1. *Geosci Model Dev*, 7(5): 2039-2064
- Li G, Xie S P. 2014. Tropical biases in CMIP5 multimodel ensemble: The excessive equatorial pacific cold tongue and double ITCZ problems. *J Climate*, 27(4): 1765-1780
- Li J X, Bao Q, Liu Y M, et al. 2019. Evaluation of FAMIL2 in simulating the climatology and seasonal-to-interannual variability of tropical cyclone characteristics. *J Adv Model Earth Syst*, 11(4): 1117-1136
- Li L J, Lin P F, Yu Y Q, et al. 2013. The Flexible Global Ocean-Atmosphere-Land System model, grid-point version 2: FGOALS-g2. *Adv Atmos Sci*, 30(3): 543-560
- Li W P, Zhang Y W, Shi X L, et al. 2019. Development of land surface model BCC_AVIM2.0 and its preliminary performance in LS3MIP/CMIP6. *J Meteor Res*, 33(5): 851-869
- Lin J L. 2007. The double-ITCZ problem in IPCC AR4 coupled GCMs: Ocean-atmosphere feedback analysis. *J Climate*, 20(18): 4497-4525
- Liu H L, Zhang M H, Lin W Y. 2012. An investigation of the initial development of the Double-ITCZ warm SST biases in the CCSM. *J Climate*, 25(1): 140-155
- Liu L, Li R Z, Yang G W, et al. 2014. Improving parallel performance of a finite-difference AGCM on modern high-performance computers. *J Atmos Oceanic Technol*, 31(10): 2157-2168
- Liu X W, Wu T W, Yang S, et al. 2014. Relationships between interannual and intraseasonal variations of the Asian-western Pacific summer monsoon hindcasted by BCC_CSM1.1(m). *Adv Atmos Sci*, 31(5): 1051-1064
- Liu X W, Wu T W, Yang S, et al. 2015. Performance of the seasonal forecasting of the Asian summer monsoon by BCC_CSM1.1(m). *Adv Atmos Sci*, 32(8): 1156-1172
- Liu X W, Wu T W, Yang S, et al. 2017. MJO prediction using the sub-seasonal to seasonal forecast model of Beijing Climate Center. *Climate Dyn*, 48(9-10): 3283-3307
- Liu X W, Li W J, Wu T W, et al. 2019. Validity of parameter optimization in improving MJO simulation and prediction using the sub-seasonal to seasonal forecast model of Beijing Climate Center. *Climate Dyn*, 52(7-8): 3823-3843
- Nie Y, Li L J, Tang Y L, et al. 2019. Impacts of changes of external forcings from CMIP5 to CMIP6 on surface temperature in FGOALS-g2. *SOLA*, 15: 211-215
- Qiao F L, Song Z Y, Bao Y, et al. 2013. Development and evaluation of an

- Earth System Model with surface gravity waves. *J Geophys Res Oceans*, 118(9): 4514-4524
- Ren H L, Wu Y J, Bao Q, et al. 2019. The china multi-model ensemble prediction system and its application to flood-season prediction in 2018. *J Meteor Res*, 33(3): 540-552
- Sun Q, Wu B, Zhou T J, et al. 2018. ENSO hindcast skill of the IAP-DecPreS near-term climate prediction system: Comparison of full-field and anomaly initialization. *Atmos Oceanic Sci Lett*, 11(1): 54-62
- Wang B, Liu J J, Wang S D, et al. 2010. An economical approach to four-dimensional variational data assimilation. *Adv Atmos Sci*, 27(4): 715-727
- Wang H J, Zeng Q C, Zhang X H. 1993. The numerical simulation of the climatic change caused by CO₂ doubling. *Sci China Ser B Chem*, 36(4): 451-462
- Wang L, Bao Q, Li J X, et al. 2019. Comparisons of the temperature and humidity profiles of reanalysis products with shipboard GPS sounding measurements obtained during the 2018 Eastern Indian Ocean Open Cruise. *Atmos Oceanic Sci Lett*, 12(3): 177-183
- Wu B, Zhou T J, Zheng F. 2018. EnOI-IAU initialization scheme designed for decadal climate prediction system IAP-DecPreS. *J Adv Model Earth Syst*, 10(2): 342-356
- Wu T W, Yu R C, Zhang F, et al. 2010. The Beijing Climate Center atmospheric general circulation model: Description and its performance for the present-day climate. *Climate Dyn*, 34: 123-147
- Wu T W, Li W P, Ji J J, et al. 2013. Global carbon budgets simulated by the Beijing Climate Center Climate System Model for the last century. *J Geophys Res Atmos*, 118(10): 4326-4347
- Wu T W, Song L C, Li W P, et al. 2014. An overview of BCC climate system model development and application for climate change studies. *J Meteor Res*, 28(1): 34-56
- Wu T W, Lu Y X, Fang Y J, et al. 2019. The Beijing Climate Center Climate System Model (BCC-CSM): The main progress from CMIP5 to CMIP6. *Geosci Model Dev*, 12(4): 1573-1600
- Wu T W, Zhang F, Zhang J, et al. 2020. Beijing Climate Center Earth System Model version 1(BCC-ESM1): Model description and evaluation. *Geosci Model Dev*, 13: 977-1005
- Xie X, Zhang M H. 2015. Scale-aware parameterization of liquid cloud inhomogeneity and its impact on simulated climate in CESM. *J Geophys Res Atmos*, 120(16): 8359-8371
- Yu Y Q, Zhang X H. 1998. A modified air-sea flux anomaly coupling scheme. *Chinese Sci Bull*, 43(8): 866-870
- Yu Y Q, Zhang X H, Guo Y F. 2004. Global coupled ocean-atmosphere general circulation models in LASG/IAP. *Adv Atmos Sci*, 21(3): 444-455
- Zhang H, Zhang M H, Zeng Q C. 2013. Sensitivity of simulated climate to two atmospheric models: Interpretation of differences between dry models and moist models. *Mon Wea Rev*, 141(5): 1558-1576
- Zhang X H, Bao N, Yu R C, et al. 1992. Coupling scheme experiments based on an atmospheric and an oceanic GCM. *Chinese J Atmos Sci*, 16(2): 129-144
- Zhou L J, Bao Q, Liu Y M, et al. 2015. Global energy and water balance: Characteristics from finite-volume Atmospheric Model of the IAP/LASG(FAMIL1). *J Adv Model Earth Syst*, 7(1): 1-20
- Zhou T J, Chen X L. 2015b. Uncertainty in the 2°C warming threshold related to climate sensitivity and climate feedback. *J Meteor Res*, 29(6): 884-895