

北京气候中心气候系统模式研发进展 ——在气候变化研究中的应用^{*1}

吴统文¹ 宋连春¹ 李伟平¹ 王在志¹ 张华¹ 辛晓歌¹ 张艳武¹ 张莉¹
李江龙¹ 吴方华¹ 刘一鸣¹ 张芳¹ 史学丽¹ 储敏¹ 张洁¹ 房永杰¹
汪方¹ 路屹雄¹ 刘向文¹ 魏敏² 刘茜霞¹ 周文艳¹ 董敏¹ 赵其庚¹
季劲钧^{1,3} Laurent Li^{1,4} 周明煜^{1,5}

WU Tongwen¹ SONG Lianchun¹ LI Weiping¹ WANG Zaizhi¹ ZHANG Hua¹ XIN Xiaoge¹ ZHANG Yanwu¹
ZHANG Li¹ LI Jianglong¹ WU Fanghua¹ LIU Yiming¹ ZHANG Fang¹ SHI Xueli¹ CHU Min¹ ZHANG Jie¹
FANG Yongjie¹ WANG Fang¹ LU Yixiong¹ LIU Xiangwen¹ WEI Min² LIU Qianxia¹ ZOU Wenyan¹
DONG Min¹ ZHAO Qigeng¹ JI Jinjun^{1,3} Laurent Li^{1,4} ZHOU Mingyu^{1,5}

1. 中国气象局国家气候中心,北京,100081
2. 中国气象局国家气象信息中心,北京,100081
3. 中国科学院大气物理研究所,北京,100029
4. 法国动力气象国家实验室,巴黎,75005
5. 国家海洋局海洋环境预报中心,北京,100081

1. *Nation Climate Center, China Meteorological Administration, Beijing 100081, China*
2. *National Meteorological Information Center, China Meteorological Administration, Beijing 100081, China*
3. *Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China*
4. *Laboratoire de Météorologie Dynamique, Paris, 75005, France*
5. *National Marine Environmental Forecasting Center, Beijing 100081, China*

2013-03-19 收稿,2013-06-20 改回.

吴统文,宋连春,李伟平,王在志,张华,辛晓歌,张艳武,张莉,李江龙,吴方华,刘一鸣,张芳,史学丽,储敏,张洁,房永杰,汪方,路屹雄,刘向文,魏敏,刘茜霞,周文艳,董敏,赵其庚,季劲钧,Laurent Li,周明煜. 2014. 北京气候中心气候系统模式研发进展——在气候变化研究中的应用. 气象学报, 72(1): 12-29

Wu Tongwen, Song Lianchun, Li Weiping, Wang Zaizhi, Zhang Hua, Xin Xiaoge, Zhang Yanwu, Zhang Li, Li Jianglong, Wu Fanghua, Liu Yiming, Zhang Fang, Shi Xueli, Chu Min, Zhang Jie, Fang Yongjie, Wang Fang, Lu Yixiong, Liu Xiangwen, Wei Min, Liu Qianxia, Zou Wenyan, Dong Min, Zhao Qigeng, Ji Jinjun, Laurent Li, Zhou Mingyu. 2014. An overview on progress in Beijing Climate Center Climate System Model—Its development and application to climate change studies. *Acta Meteorologica Sinica*, 72(1): 12-29

Abstract This paper presents an overview on progress in the development of the Beijing Climate Center Climate System Model (BCC_CSM) and its four components: atmosphere, land surface, ocean and sea ice. It focuses on the two recent versions, i. e., BCC_CSM1.1 with a coarse atmospheric resolution (approximately $2.8125^\circ \times 2.8125^\circ$) and BCC_CSM1.1(m) with a medium atmospheric resolution (approximately $1.125^\circ \times 1.125^\circ$). Both versions of BCC_CSM are fully-coupled climate-carbon cycle models involving terrestrial and oceanic carbon cycle and vegetation dynamics. They can well simulate the atmospheric CO₂ con-

* 资助课题:国家重点基础研究发展计划项目(2010CB951902)、公益性行业科研专项项目(201306048)。

作者简介:吴统文,主要从事气候系统模式发展与数值模拟研究。E-mail: twwu@cma.gov.cn

centration and its temporal evolution when forced by anthropogenic emissions of CO₂. They contribute to the CMIP5 efforts supporting the IPCC AR5. A large amount of simulations from BCC_CSM1.1 and BCC_CSM1.1(m) are available for studies on global climate and future climate projection.

This paper also shows a few examples using BCC_CSM. There is an evaluation of BCC_CSM1.1 and BCC_CSM1.1(m) in reproducing present-day climate (especially the spatial pattern and seasonal feature of precipitation and surface air temperature, at global scale and in East Asia), in simulating paleoclimate during the last millennium, and in projecting climate change up to 2100. The results show that both BCC_CSM1.1 and BCC_CSM1.1(m) have good performances compared with the other CMIP5 models. It seems that BCC_CSM1.1(m) with a higher horizontal resolution has a better performance for climate mean state at regional scales than BCC_CSM1.1 does.

Key words Beijing Climate Center Climate System Model (BCC_CSM), Atmospheric general circulation model, Land surface model, Oceanic general circulation model

摘要 较全面地介绍了北京气候中心气候系统模式(BCC_CSM)研发所取得的一些进展及其在气候变化研究中的应用,重点介绍了全球近 280 km 较低分辨率的全球海-陆-气-冰-生物多圈层耦合的气候系统模式 BCC_CSM1.1 和 110 km 中等大气分辨率的 BCC_CSM1.1(m),以及大气、陆面、海洋、海冰各分量模式的发展。BCC_CSM1.1 和 BCC_CSM1.1(m)气候系统模式均包含了全球碳循环和动态植被过程。当给定全球人类活动导致的碳源排放后,就可以模拟和预估人类活动对气候变化的影响。BCC_CSM1.1 和 BCC_CSM1.1(m)已应用于 IPCC AR5 模式比较,为中外开展气候变化机理分析和未来气候变化预估提供了大量的试验数据。还介绍了 BCC_CSM1.1 和 BCC_CSM1.1(m)参与国际耦合模式比较计划(CMIP5)的大量试验分析评估结果,BCC_CSM 能够较好地模拟 20 世纪气温和降水等气候平均态和季节变化特征,以及近 1000 年的历史气候变化,所预估的未来 100 年气候变化与国际上其他模式的 CMIP5 试验预估结果相当。初步的分析表明,分辨率相对高的 BCC_CSM1.1(m)在区域气候平均态的模拟上优于分辨率较低的 BCC_CSM1.1。

关键词 北京气候中心气候系统模式(BCC_CSM), 大气环流模式, 陆面过程模式, 海洋环流模式

中图法分类号 P456.7

1 引言

以全球变暖为主要特征的全球气候环境变化问题已成为人类社会可持续发展面临的严峻挑战之一。气候和环境变化是气候系统五大圈层(气圈、水圈、岩石圈、冰雪圈、生物圈)相互作用的结果,要正确认识气候系统的变化规律和预测其未来的演变,就必须建立能正确反映各圈层相互作用和反馈的理论与方法。气候系统模式是客观描述多圈层相互作用及其对气候和气候变化影响研究的有效工具。

自 1995 年中国气象局国家气候中心成立以来,在“九五”国家重中之重科技项目《我国短期气候预测系统的研究》支持下,集中了中国气象局、中国科学院、教育部、农业部、水利部的专家开展了中国短期气候预测模式系统的研制开发工作(国家“九五”重中之重 96-908 科技项目执行专家组, 2000),研发了第一代全球大气环流模式 BCC_AGCM1.0(董敏, 2001),发展了一套能够用于短期气候预测和气候变化研究的海-气耦合模式 BCC_CM1.0。该模

式系统自 2005 年以来,已在中国短期气候预测业务和气候变化研究中发挥了重要作用(董敏等, 2000; 丁一汇等, 2002, 2004, 2006; 李维京等, 2005; 张培群等, 2004; 赵宗慈等, 2005; Luo, et al, 2005)。

中国气象局国家气候中心于 2005 年正式启动新一代气候系统模式研发工作,迄今已研发了第二代全球大气环流模式 BCC_AGCM2.0、BCC_AGCM2.1 和 BCC_AGCM2.2 版本;基于 NCAR-CLM3 和季劲钧等发展的动态植被与土壤碳循环模型 AVIM2(Ji, 1995; Ji, et al, 2008),发展了第一代陆面过程模式 BCC_AVIM1.0;在美国地球物理流体动力学实验室(GFDL)研发的全球海洋环流模式 MOM4 的基础上,发展了包含海洋碳循环的全球海洋环流模式 MOM4_L40。这些分量模式为研发全球近 280 km 分辨率的海-陆-气-冰-生多圈层耦合的气候系统模式 BCC_CSM1.1 和 110 km 中等大气分辨率的 BCC_CSM1.1(m)奠定了基础。本文重点介绍 BCC_CSM1.1 和 BCC_CSM1.1(m)模

式研发及其在气候变化研究方面取得的进展。

2 气候系统模式发展概述

2.1 全球大气环流模式

2.1.1 第二代全球大气环流模式 BCC_AGCM2.0

BCC_AGCM2.0 是全球大气环流谱模式(Wu, et al, 2008, 2010), 水平分辨率可调(缺省为 T42 波, 全球 $2.8125^\circ \times 2.8125^\circ$), 垂直 26 层。该模式基于 NCAR CAM3 (Community Atmosphere Model version3.0)(Collins, et al, 2004) 框架, 引入了独特的参考大气和参考地面气压, 该参考大气更适用于对流层中上层和平流层的大气热力结构, 这样的处理可以减少由于模式垂直分层的不均匀性和地形截断误差等的影响。温度和地面气压本身不再是预报变量, 预报对象变为温度与参考大气温度、地面气压与参考地面气压之间的偏差; 除水汽、云水、云冰等预报方程采用半拉格朗日方法求解外, 涡度、散度、温度偏差和地面气压偏差预报方程均采用显式或半隐式欧拉方法求解, 有关模式动力框架的详细介绍参见 Wu 等(2008)。模式物理参数化方案大多仍以 CAM3 为基础, 有以下几个方面的改进: 调整了 Zhang 等(1995) 质量通量型积云对流参数化方案(Wu, et al, 2010); 引入了整层位温守恒干绝热调整方案; 采用 Wu 等(2004) 提出的积雪面积覆盖度参数化方案; 考虑到海浪的影响, 提出了对洋面感热和潜热通量的改进参数化方案(Wu, et al, 2010), 陆面过程利用 CLM3 参数化方案(Oleson, et al, 2004)。该模式对当今气候平均基本态和季节变化(Wu, et al, 2010)、东亚降水和亚澳季风年代际变化(Chen, et al, 2012; 王璐等, 2009)、极端温度和降水变化(Dong, et al, 2012; 陈海山等, 2011)、云的辐射强迫(郭准等, 2011)、热带季节内振荡(董敏等, 2009)、江淮梅雨降水(沈瑛等, 2011)、强降水过程(颀卫华等, 2010) 等都具有较高的模拟能力。

近年来, 在 BCC_AGCM2.0 基础上, Zhang 等(2012a) 实现了与中国气象科学研究院基于加拿大气候模式(CAM)(Gong, et al, 2002, 2003) 所发展的 CUACE 气溶胶模式的耦合(简称 BCC_AGCM2.0.1_CAM)。CUACE 模式是粒径分档模式, 包含了多分量的物理化学过程, 包括 5 种典型种类气溶胶(硫酸盐、黑碳、有机碳、沙尘和海盐) 的排放、传输、化学转化、与云的相互作用以及沉降过程。

气溶胶的排放数据来自气溶胶观测与模式比较项目 AeroCom (<http://aerocom.met.no/aerocom-home.html>), 还包括了气态化学过程, 为模拟气溶胶变化及其对气候的影响提供了工具。BCC_AGCM2.0.1_CAM 对 5 种典型气溶胶(硫酸盐、黑碳、有机碳、沙尘和海盐) 和气候要素的模拟结果表明, 模式对 5 种典型气溶胶的模拟总体上比较合理。利用 BCC_AGCM2.0.1_CAM, Zhang 等(2012a) 还计算了 3 种人为气溶胶(黑碳、有机碳和硫酸盐) 和 2 种自然气溶胶(沙尘和海盐) 的全球辐射强迫, 计算结果参与了第 2 期气溶胶观测与模式比较项目(AerCOM), 与国际其他模式计算的气溶胶辐射强迫结果的比较见 Myhre 等(2012)。

利用 BCC_AGCM2.0 还开展了大量的云-辐射物理过程参数化研究。荆现文等(2012) 将一种新的、可以灵活给出云的次网格结构的蒙特卡洛独立气柱近似(McICA) 云-辐射方案应用于 BCC_AGCM2.0, 结果表明, McICA 随机误差引起的模拟扰动很小, 随机误差对所模拟的各种气候变量影响也很小, 全球平均值与作为参考的精确独立气柱近似(ICA) 计算的差别都在 0.01% 量级, 模拟结果的纬向分布、垂直分布和典型区域内的分布等气候特征都基本上与 ICA 一致。在 BCC_AGCM2.0 中应用 McICA 云-辐射方案具有较高的可信度。在 McICA 方案下, 更新了 BCC_AGCM 2.0 的辐射过程, 采用了自主研发的 BCC-RAD 参数化方案, 其中, 温室气体的计算采用 K-分布模式(Zhang, et al, 2003, 2006a, 2006b; Shi, et al, 2007), 气溶胶光学性质计算采用了 Zhang 等(2012a) 和卫晓东等(2011) 的研究成果, 目前 BCC-RAD 参与了 AeroCom 项目组织的辐射模式比较计划。由于 McICA 框架下, 云和辐射过程是各自独立的, 云的结构调整和辐射模式的改进都更为简便, 因此, 为 BCC_AGCM 在未来的发展提供了更为广阔的空间和应用前景。

2.1.2 第二代全球大气环流模式 BCC_AGCM2.1 和 BCC_AGCM2.2

在 BCC_AGCM2.0 基础上, 研发了 BCC_AGCM2.1 版本(全球 T42 分辨率) 和 BCC_AGCM2.2 版本(T106 中等分辨率, 全球近 110 km)。(1) 引入了由 Wu(2012) 在国际上现有质量通量型积云深对流参数化方案基础上发展的积云对

流参数化新方案。该方案通过单气柱模式的检验,利用 1995 和 1997 年夏季 ARM (大气辐射测量) 试验的观测数据,检验了该方案对美国大平原夏季降水的模拟能力。该方案结合 Hack 浅对流方案 (Hack, 1994), 以及大尺度凝结降水参数化方案 (Rasch, et al, 1998; Zhang, et al, 2003), 能够模拟再现主要的降水过程和降水强度 (Wu, 2012); (2) 进一步优化改进云量等计算相关参数; (3) 增加了对全球平均大气 CO_2 浓度的预报选项; (4) 陆面过程采用 BCC_AVIM1.0 参数化方案, 能够模拟陆气碳通量交换过程。BCC_AGCM2.1 和 BCC_AGCM2.2 分别是 BCC_CSM1.1 和 BCC_CSM1.1 (m) 的大气分量模式。

通过 AMIP 试验, 在给定海温和海冰分布及太阳活动、气溶胶、温室气体等观测场驱动下, BCC_AGCM2.1 和 BCC_AGCM2.2 模式对当今气候具有一定的模拟能力 (图 1), 两大气环流模式对全球陆面平均气温的年际和年代际变化具有较强的模拟能力, 所模拟的 1978—2006 年陆面气温与 CRU 观测值 (Brohan, et al, 2006) 的相关系数分别高达 0.90 和 0.87。能较好地再现 1979—2008 年冬、夏季降水观测空间分布 (图 2)。无论是 BCC_AGCM2.1 还是 2.2 版本, 对夏季东亚地区尤其是中国东部降水的模拟与实况偏差仍较明显, 如中国东部的多雨带偏西, 对这一地区模拟的夏季降水模拟偏少现象在多数国际气候模式中普遍存在, 原因是多方面的, 这与青藏高原陆面过程和对西太平洋副热带高压的模拟误差较大有一定的关联, 需要加强这方面的深入研究。尽管如此, 对区域降水的模拟能力分辨率较高的 BCC_AGCM2.2 明显优于 BCC_AGCM2.1, 即便是在中国西南、华南一带, 以及南亚、东南亚季风区, 观测的强降水中心在 BCC_AGCM2.2 高分辨率模式中均得到较好的模拟。

陆春晖等 (2014) 对 BCC_AGCM2.1 的 1979—2008 年的 AMIP 试验结果进行了分析评估, 在观测海温、二氧化碳、气溶胶等外强迫的驱动下, 模式能够合理地再现出与再分析资料一致的平流层纬向平均风场、温度场的分布特征和季节变化过程, 对平流层极涡的季节变化特征的模拟较好。但对流层顶区域和平流层高层模拟的温度普遍偏低, 模拟的温度廓线和高空急流与再分析资料的主要差别出现在南、北半球冬季的中高纬度地区。陆春晖等 (2014)

指出, 这可能与模式中的波动过程有关。从 $E-P$ 通量的分析显示, 模式得到的波动强度较弱, 向赤道和向极地传播的两支波导都弱于观测结果。同时, 模拟结果中的行星波向赤道波导更强, 大多数的波动能量都沿着这支波导向低纬度地区输送; 而极地波导较弱 (箭头短小), 且能够到达平流层中高层的波动大多以向上传播为主, 可以影响极涡的向极地传播很弱。这可能是在模式结果中北半球冬季的平流层极涡偏强、温度偏低的一个重要原因。 $E-P$ 通量散度的分布显示, 在行星波的发源地对流层中纬度地区 ($30^\circ-60^\circ\text{N}$) 存在着一个很强的 $E-P$ 通量辐合区, 波动能量在这里聚集、辐合后向上传播; 同时在对流层高层、平流层低层的副热带地区也有一个 $E-P$ 通量辐合区, 对这一区域的副热带急流进行调节, 模拟结果比再分析资料中的位置略高, 但强度和范围相差不大, 因此模式得到的行星波向赤道波导与观测结果十分接近。然而, 在中高纬度 (60°N 附近) 的平流层中、高层 (20—100 hPa), 模式结果存在着较大的误差, EC-Interim 资料中在这一区域有一个很强的 $E-P$ 通量辐合区, 而在模式结果中, 这一 $E-P$ 通量辐合中心非常弱, 导致模拟得到的绕极西风急流偏强, 波动很难进入极区影响平流层极涡。

BCC_AGCM2.1 和 BCC_AGCM2.2 也已在

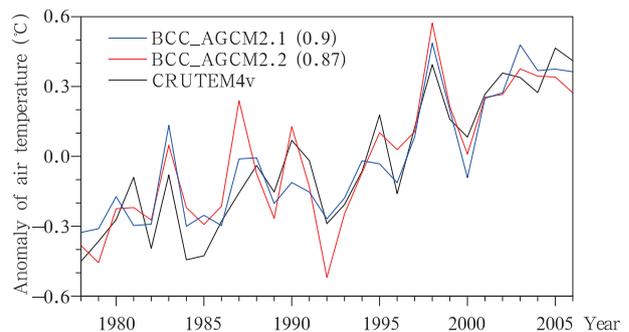


图 1 BCC_AGCM2.1 和 BCC_AGCM2.2 所模拟的全球陆面格点平均的表面气温年变化与 CRU 资料的对比 (模拟和观测值都已扣除 1978—2006 年时段平均气候值, 两模式的模拟值和观测值的相关系数在图例的括号中给出)

Fig. 1 Surface air temperature ($^{\circ}\text{C}$) over global land areas from BCC_AGCM2.1, BCC_AGCM2.2, and the CRU data (The averaged values over 1978 to 2006 are subtracted)

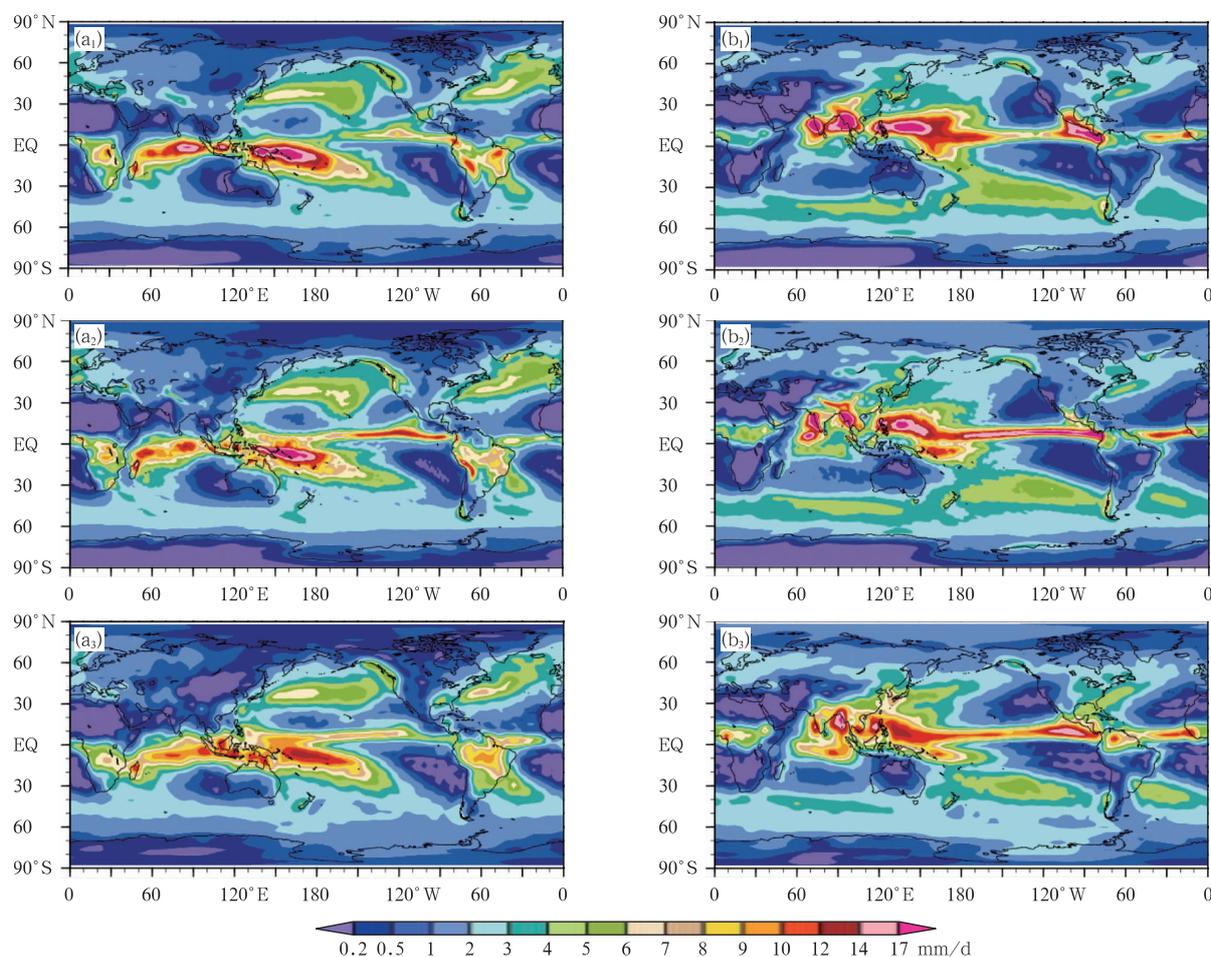


图2 BCC_AGCM2.1(a₁, b₁)和BCC_AGCM2.2(a₂, b₂)在给定海温、海冰分布、太阳活动、温室气体、火山活动、气溶胶等外强迫下模拟的1979—2008年冬季(a₁, a₂)和夏季(b₁, b₂)平均降水空间分布及Xie-Arkin观测气候场(a₃, b₃)

Fig. 2 Precipitation in DJF (a₁, a₂, a₃) and JJA (b₁, b₂, b₃) for the two versions of the atmospheric general circulation model, BCC_AGCM2.1 (a₁, b₁) and BCC_AGCM2.2 (a₂, b₂), and for the observational climatology from the Xie and Arkin's data (a₃, b₃)

6—15 d 延伸期天气过程和降水预测中得到应用, Jie 等(2013)研究表明,通过时间滞后预报集合方法可提高对夏季6—15 d 逐日1和5 mm 阈值降水的预报能力,尤其是中国多雨区的降水预报,主要集中在中国中部到南部,东北部以及青藏高原东南部地区。

2.2 陆面过程模式

陆面过程模式是描述土壤内部以及陆-气界面物质、能量交换过程的数值模型,是气候系统模式的重要分量。中国学者在陆面模式发展方面开展了大量的研究工作。Ji(1995)发展了AVIM 大气-植被相互作用模式,该模式在反映植被、土壤、大气之间

热量和水分交换的生物物理过程的同时,也包含了植被光合作用、植被呼吸等生物化学过程。Ji 等(2008)在AVIM 基础上进一步改进发展了AVIM2,包含3个模块:描述植被-大气-土壤之间辐射、水分、热量交换过程的陆面物理过程模块;基于植被生态生理过程(如光合、呼吸、光合同化物的分配、物候等)的植被生长模块;土壤碳分解模块。

BCC_CSM1.1 的陆面分量BCC_AVIM1.0 是在NCAR CLM3(Oleson, et al, 2004)和AVIM2 基础上发展而来的。其特征是:(1)基于CLM3 土壤水热传输模块,下垫面类型包括土壤、湿地、湖泊、冰川四类,土壤沿垂直方向分10层,植被1层,积雪

依据厚度最多划分 5 层。陆地植被按功能型分为 15 类,每个网格中包含最多 4 种植被功能型(Oleson, et al, 2004)。(2)融合了 AVIM2 的动态植被和土壤碳分解模块(Ji, 1995; Ji, et al, 2008),包含了能够描述植被光合作用固定 CO_2 、植被生长、植被凋落、土壤呼吸释放 CO_2 返回大气的陆地碳循环过程。(3)由于 CLM3 普遍低估积雪覆盖率(李伟平等, 2009),BCC_AVIM1.0 采用了修订的积雪覆盖率参数化方案,考虑多种因子(积雪深度、地面粗糙度以及次网格地形起伏)对积雪覆盖率的影响,改进了对地形起伏较大地区积雪覆盖率的模拟。BCC_AVIM1.0 作为气候系统模式 BCC_CSM1.1 和 BCC_CSM1.1(m)的陆面分量,已经用于耦合比较计划 CMIP5 试验,对 20 世纪陆面碳循环和陆地生态系统已具有一定的模拟能力(Wu, et al, 2013)。

目前正在研发的 BCC_AVIM2.0 版本,修订了 BCC_AVIM1.0 中根据经验给定落叶植物的展叶和凋落日期,根据植物自身光合产物的收支来确定落叶植被展叶、生长、凋落的日期;改进对土壤冻融临界温度的判别方法(夏坤等, 2011),引入植被冠层四流辐射传输方案(周文艳等, 2010)等,改进对地表能量平衡的模拟等。

2.3 全球海洋环流模式

全球海洋环流模式是气候系统模式中非常重要的分量。MOM4_L40 是在美国地球流体力学实验室的海洋环流模式 MOM4 基础上发展起来的全球海洋环流模式。这一模式有如下主要特点:(1)采用全球三极网格,将北极点放在北美和欧亚大陆上。模式水平分辨率为全球纬向 1° ,经向南北纬 30° 以外为 1° ,南北纬 30° 以内逐渐递减至赤道为 $\frac{1}{3}^\circ$;垂直方向 40 层,其中,上层 200 m 每 10 m 一层。(2)采用了一些成熟的物理过程方案(Griffies, et al, 2005),如:三阶 Swedy 示踪物平流方案,等密度面混合示踪物扩散,拉普拉斯形式水平摩擦方案,KPP 垂直混合方案,完全对流调整方案,海底边界/陡峭地形处理溢出方案,使得重力不稳定流体微团能够借助迎风平流方案向下坡方向流动。太阳短波辐射穿透计算考虑了叶绿素空间分布的影响。(3)在 MOM4_L40 中引入了 MOM4 FMS 版本中的海洋碳循环模块,使 MOM4_L40 能够模拟海洋碳循环过程。这个海洋碳循环模块是在海洋碳循环比较计划(OCMIP2)海洋生物碳模式基础上发展起来的,

包括了较为完整的海洋碳循环过程。

作为 BCC_CSM1.1 和 BCC_CSM1.1(m)模式的海洋分量模式,MOM4_L40 针对 BCC_CSM1.1 和 BCC_CSM1.1(m)耦合模式中的不同海陆地形,分别开发了 MOM4_L40v1 和 MOM4_L40v2 版本。热带水平分辨率加密使得 MOM4_L40v1 模拟的赤道流场和海温结构与观测接近(Wu, et al, 2013)。在 MOM4_L40v2 中调整了 MOM4_L40v1 中不合理的海陆分布,尽量避免出现孤立的内海。通过 IPCC AR5 多模式比较试验表明,MOM4_L40v2 能够合理模拟全球大洋的基本特征和海洋碳收支,大尺度海洋的主要变率也能够得到再现。在下一版本中,为了考虑波浪的作用,将引入中国科学院青岛海洋研究所的波致混合方案(Qiao, et al, 2004; 宋振亚等, 2007)。

2.4 海冰动力热力学模式

海冰是地球气候系统的一个重要组成部分,通过与大气、海洋的非线性相互作用对全球气候变化产生重大的影响。BCC_CSM1.1 和 BCC_CSM1.1(m)中的海冰分量模式是美国地球物理流体动力学实验室开发的全球海冰热力学-动力学海冰模式 SIS(Winton, 2000),模式的水平分辨率和海陆分布分别与 MOM4_L40v1 和 MOM4_L40v2 海洋分量模式相同。该模式对海冰热力学过程的描述以 Semtner (1976)发展的模式为基础,在垂直方向上分为 3 层,包括 1 层积雪和 2 层海冰,其中,2 层海冰的厚度相同,并根据厚度的不同将海冰分为 5 类。在模式中,假设积雪层是没有热容量的,而海冰层均有感热容量,特别是上层海冰考虑了高盐水泡的影响。在动力学过程上,模式采用弹粘塑流变学计算海冰的内部应力,用迎风方案计算守恒量,如海冰密集度、冰总量、冰的热含量等的平流过程。CMIP5 多模式结果比较表明,BCC_CSM1.1 模式对南半球海冰的模拟较好,但模拟的北半球冬半年的海冰明显偏多,夏半年偏少,总体对 20 世纪年代际变化仍有一定的模拟能力。

2.5 多圈层耦合的气候系统模式

(1) 气候系统模式 BCC_CSM1.0

BCC_CSM1.0 是以 NCAR CCSM2 为基础发展的气候系统模式初级版本,实现了全球大气环流模式 BCC_AGCM2.0 与陆面过程模式 CLM3、全球海洋环流模式 POP 和全球海冰动力热力学模式 CISM 的动态耦合,该版本于 2008 年年底完成。该气候系统模

式 BCC_CSM1.0 版本性能稳定,通过类似 IPCC AR4 的 CMIP3 多模式比较的 20 世纪类似模拟试验,在给定温室气体、太阳常数、硫酸盐气溶胶、火山活动等外强迫数据的条件下,模式模拟的 1900—2000 年全球年平均地表气温与相应时段的 HadCRUT3 观测值 (Brohan, et al, 2006) 时间序列比较,能够再现全球地表气温在 19 世纪末至 20 世纪末的升高趋势,与 IPCC AR4 其他耦合模式的性能相当(《第二次气候变化国家评估报告》编写委员会, 2011)。

BCC_CSM1.0 能够模拟出全球降水的基本气候状态、季节变化、季节内振荡、年际变化等特征(董敏等, 2013; Zhang, et al, 2012b)。BCC_CSM1.0 对东亚夏季降水气候具有较强的模拟能力(图 3)。在东亚地区或中国范围, BCC_CSM1.0 模拟的夏季(6—8 月)平均的 1979—2000 年逐年变化与 Xie-Arkin 观测降水的相关相对较高、且均方根误差又相对较小。对东亚极端降水和温度具有一定的模拟能力(Zhang, et al, 2011)。

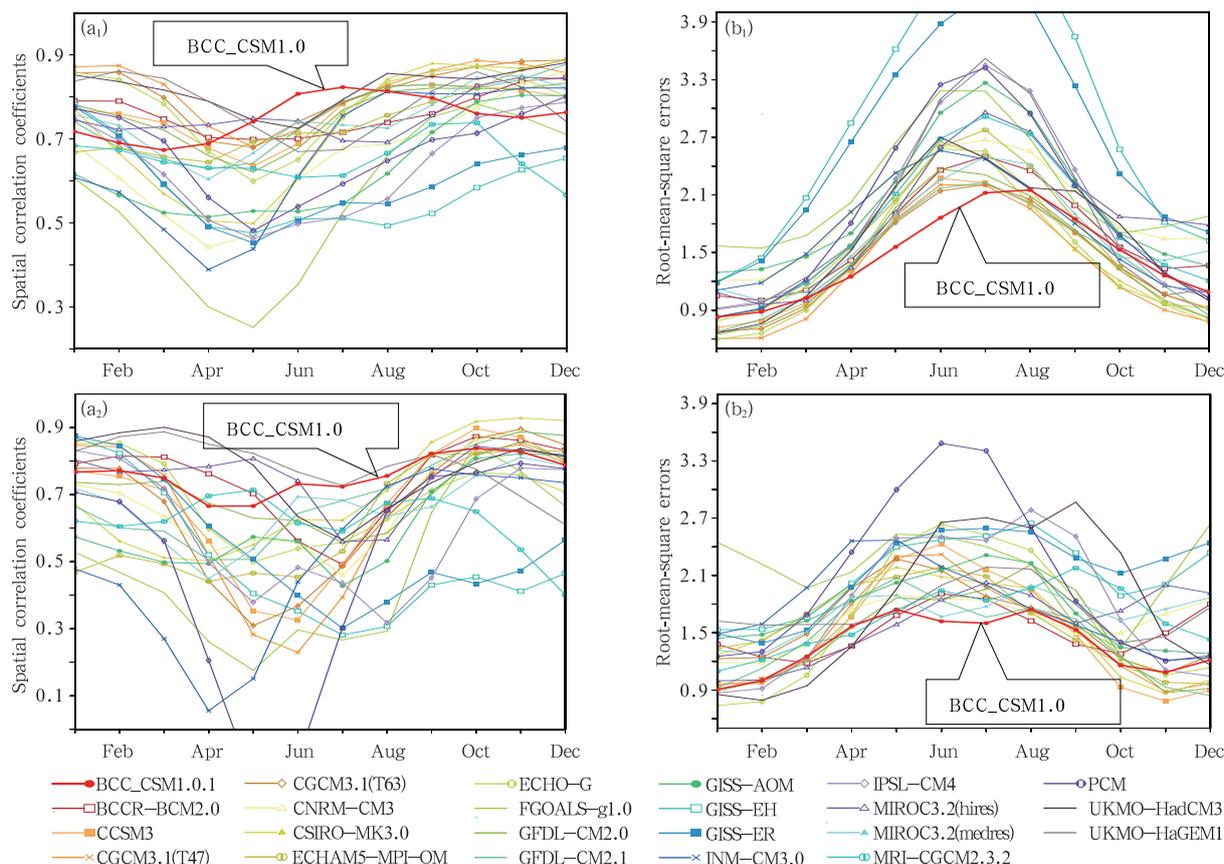


图 3 BCC_CSM1.0 对中国(a_1 、 b_1)和东亚(a_2 、 b_2)范围 1—12 月逐月 1979—1999 年月平均降水序列与同期观测的 Xie-Arkin 降水资料的空间相关(a_1 、 a_2)和均方根误差(b_1 、 b_2)变化(图中其他模式的模拟数据来自参与 IPCC AR4 耦合模式对 20 世纪气候的模拟试验结果)

Fig. 3 Spatial correlation coefficients (a_1 , a_2) and root-mean-square errors (b_1 , b_2) between the models and the Xie-Arkin observation, plotted against the averaged months over 1979—1999 (a_1 , and b_1 are for the area over China, a_2 and b_2 are for the whole East Asia)

(2) 气候系统模式 BCC_CSM1.1 和 BCC_CSM1.1(m)

BCC_CSM1.1 是全球海洋-陆地-海冰-大气多圈层耦合的全球气候-碳循环耦合模式,以美国国家大气研究中心(NCAR)气候系统模式 CCSM3 的流量耦合器为基础,实现全球大气环流模式 BCC-AGCM2.1、陆面过程模式 BCC_AVIM1.0、全球海

洋环流模式 MOM4_L40v1 和全球动力热力学海冰模式 SIS 的完全耦合,模式详细介绍请参见 Wu 等(2013)。模式能够模拟人类活动碳排放引起大气 CO_2 浓度变化及其对全球气候的影响,是目前参与 IPCC AR5 多模式比较中的少数地球系统模式之一,对 20 世纪全球碳循环(Wu, et al, 2013)及其对

气候的反馈(Arora, et al, 2013)具有较高的模拟性能。

BCC_CSM1.1(m)是 BCC_CSM1.1 的升级版,大气和陆面的水平分辨率为 T106(全球 110 km),海洋和海冰分辨率与 BCC_CSM1.1 相同。大气模式分量为 BCC_AGCM2.2,海洋分量模式为 MOM4_L40v2。

目前,BCC_CSM1.1 和 BCC_CSM1.1(m)已完成 CMIP5 的大部分试验(辛晓歌等, 2012),为气候变化研究提供了大量的数据。截至 2013 年 11 月,基于包含 BCC_CSM1.1 和 BCC_CSM1.1(m)在内的 CMIP5 数值模拟结果,已有 180 多篇学术论文在中外学术期刊发表(<http://cmip.llnl.gov/cmip5/publications/model>)。BCC_CSM1.1 和 BCC_CSM1.1(m)对当前云的微物理特征和碳与气候的反馈等的模拟与国际上同等分辨率的气候系统模式性能相当(Arora, et al, 2013; Jiang, et al, 2012; Su, et al, 2013)。BCC_CSM1.1 对东亚对流层高层急流及其相关联的瞬变涡活动具有较理想的模拟结果(Xiao, et al, 2012)。对年代际预测试验结果

表明,对 10 年尺度全球地表温度有一定的预测能力,在区域尺度上,年代际预测试验相对于传统试验方法具有一定优势,高预测技巧区主要分布在南半球印度洋中高纬度、热带西太平洋以及热带大西洋区域(高峰等, 2012)。下面将重点针对 BCC_CSM1.1 和 BCC_CSM1.1(m)对当代和近 1000 年历史气候的模拟,以及对未来 100 年气候变化预估结果进行分析评估。

3 BCC_CSM 对气候变化的模拟评估与预测

3.1 对当代气候的模拟评估

(1) 地表气温

耦合模式对当今气候平均状态的再现是反映模式模拟能力的重要依据。在包括温室气体、气溶胶、火山、臭氧、太阳常数等外强迫条件下,BCC_CSM1.1 和 BCC_CSM1.1(m)对 20 世纪气候进行了模拟,结果显示,两个模式基本上都能够模拟出 1971—2000 年全球地表气温的空间分布特征(图 4)。模拟与 ERA-40 再分析资料的显著误差主要

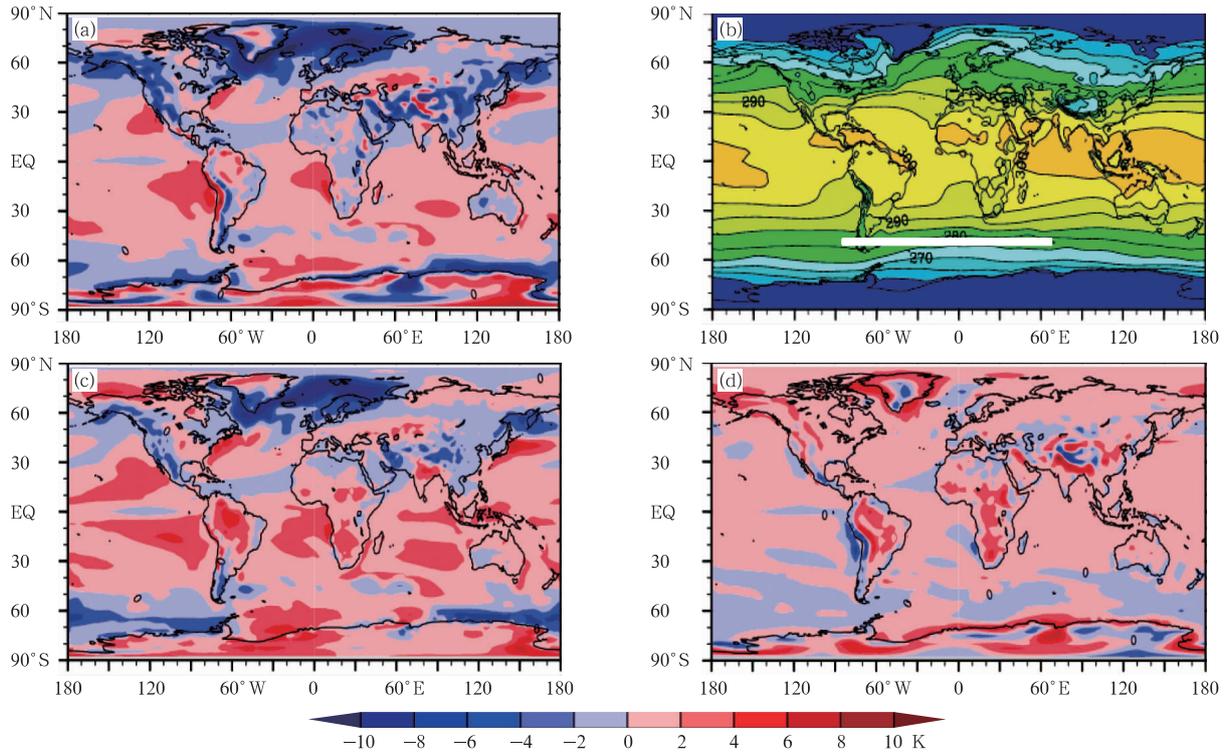


图 4 1971—2000 年 ERA-40 再分析的气候平均地表气温(b,单位:K),BCC_CSM1.1 和 BCC_CSM1.1(m)

模拟的同期与 ERA-40 再分析的气候平均地表气温的差异(a,c)以及两模式模拟的差值分布(d)(色阶)

Fig. 4 Annual-mean surface air temperature (K) from the ERA-40 reanalysis (b), and anomalies of BCC_CSM1.1 and BCC_CSM1.1(m) in relative to the ERA-40 reanalysis (a,c), as well as their difference (d)(shaded)

出现在极区和有地形剧变的地区,包括南极、格陵兰岛、青藏高原、非洲东岸和南美洲西岸的安第斯山脉地区。其中,格陵兰岛周边海域偏低 10 K 以上,南极部分地区和青藏高原偏高 6 K 以上。模式在格陵兰岛和南极地区的模拟误差与模式模拟的海冰偏差有关,而青藏高原地区的差异则可能是由于谱模式地形与实际地形存在偏差造成的。除这些区域之外,大部分地区的绝对误差值在 2 K 以内,与政府间气候变化专门委员会(IPCC)第 4 次评估报告(AR4)(Trenberth, et al, 2007)中的国际上多模式平均的结果接近。与 BCC_CSM1.1 相比, BCC_CSM1.1(m)模拟的地表气温气候场总体上有改进,均方根误差由 2.37 K 降低到 2.07 K,部分区域误差减小,如格陵兰地区偏差明显减小,东亚地区地表

气温的偏差也有所减小。

(2) 降水

降水是评估模式性能非常重要的物理量。对 20 余个 IPCCAR5 气候系统模式的评估分析发现,模式能够抓住降水的大尺度纬向分布特征。从 BCC_CSM1.1 和 BCC_CSM1.1(m)对历史气候的模拟试验可知,这两个模式均能模拟出降水的大尺度纬向分布特征(图 5),全年每月降水的气候态与观测的空间相关系数均在 0.8 以上(张莉等, 2013),说明这两个模式能够较合理地模拟出大气环流的基本特征,但同时模拟结果也存在一定偏差。

从图 5 可知, BCC_CSM1.1 和 BCC_CSM1.1(m)均能较合理地再现全球年平均和季节平均降水的主要分布特征,能够模拟出位于沿赤道太平洋的

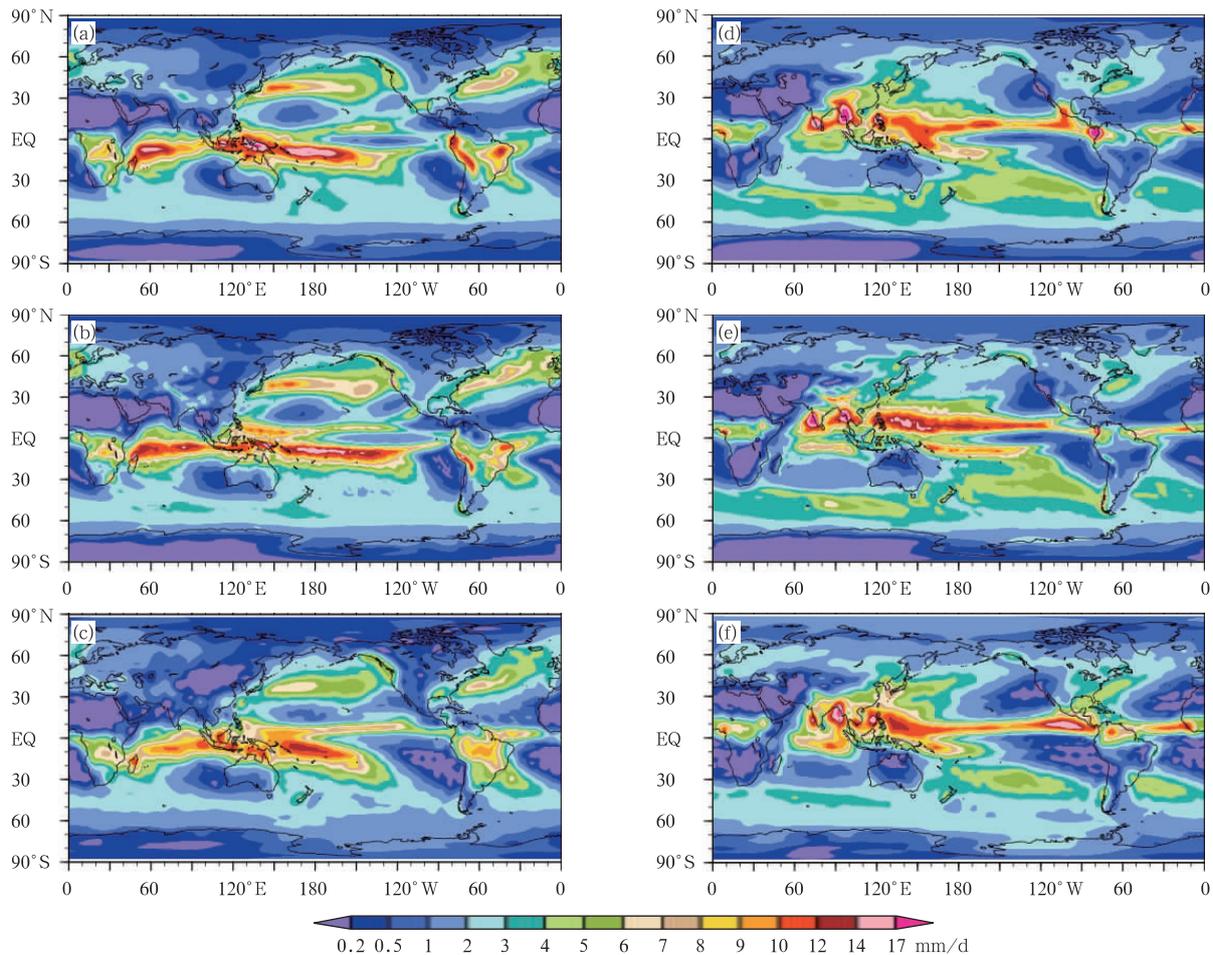


图 5 1971—2000 年平均的冬(a,b,c)、夏季(d,e,f)平均降水气候分布
(a,d, BCC_CSM1.1, b,e, BCC_CSM1.1(m), c,f, Xie-Arkin observations)

Fig. 5 Mean precipitation for DJF (a,b,c) and JJA (d,e,f) from BCC_CSM1.1 (a,d),
BCC_CSM1.1(m) (b,e) and the Xie-Arkin observations (c,f)

赤道辐合带(ITCZ)、南太平洋辐合带(SPCZ)、西北太平洋地区、赤道南印度洋和非洲赤道地区的多雨带,且降水在南北、东西方向存在明显的非对称特征,同时也存在明显差异,如 BCC_CSM1.1 模拟的冬季(图 5)和春季(图略)热带太平洋地区存在非常明显的赤道双辐合带现象,BCC_CSM1.1(m)更为明显。年平均降水(图略),BCC_CSM1.1 的模拟偏差主要表现为:赤道太平洋辐合带降水区位置偏北、降水强度偏弱,南太平洋中东部地区降水偏多,导致中东太平洋近赤道地区由北向南存在正、负、正的偏差区;印度洋海区降水明显偏少;北太平洋主要的降水区位置稍偏北,降水大值中心强度偏强;南美西北部近赤道地区降水明显偏多,南美东北部至大西洋的近赤道地区降水偏少;赤道非洲地区降水偏多;欧亚大陆大部分地区降水偏多,青藏高原及其周边地区降水偏多较明显。

与 BCC_CSM1.1 相比,BCC_CSM1.1(m)模拟的南印度洋降水有所增大、偏差减小,南美西北部地区降水正偏差减小,青藏高原及其周边地区的降水正偏差幅度减小,赤道西太平洋的负偏差变为正偏差。虽然 BCC_CSM1.1(m)对降水气候态空间分布的模拟有一定程度的改进(Su, et al, 2013),但是,BCC_CSM1.1(m)在东亚地区的降水负偏差幅度增大,且赤道双辐合带现象比 BCC_CSM1.1 更明显,南太平洋辐合带降水过于东伸、南伸不够,南太平洋中部的正偏差比 BCC_CSM1.1 更大。

此外,BCC_CSM1.1 和 BCC_CSM1.1(m)均能较合理再现热带降水年循环模态的基本分布特征,这包括季风模态中降水与环流关于赤道反对称的特征,热带太平洋和大西洋地区春秋非对称模态南北反位相特征,相关内容张莉等(2013)已详细阐述。

以 110° — 120° E 平均和 130° — 140° E 平均的降水季节推进分别代表东亚陆地和海上的降水季节进程,将模拟结果与观测进行对比(图 6),总的来看,BCC_CSM1.1 和 BCC_CSM1.1(m)均能模拟出东亚降水的季节进退过程,只是具体的时间和降水量相对观测存在偏差。从 110° — 120° E 平均的雨带季节进退来看(图 6a—c),模式模拟的冬季 5° — 10° S 的降水中心位置偏北,强度偏强,且持续时间偏长;关注 4 mm/d 等雨量线最早出现在长江以南地区的时间发现,模拟比观测明显偏晚,观测在 2 月初,模拟结果在 3 月初,且位置稍偏北,BCC_CSM1.1(m)的这一偏差更明显。两个模式对东亚雨带降水量的

模拟均存在明显偏差,BCC_CSM1.1 模拟的 30° N 以南地区尤其是中国的华南地区雨季降水明显偏少, 30° N 以北地区模拟的降水较大, 30° — 40° N 的降水偏多超过 2 mm/d ,模拟雨带能够达到比观测更北的位置;BCC_CSM1.1(m)模拟的 35° N 以南地区降水也明显少, 35° N 以北地区降水稍多;但 BCC_CSM1.1(m)模拟的降水强度总体上比 BCC_CSM1.1 有所减弱。

从 130° — 140° E 平均的雨带季节进退来看(图 6d—f),观测资料显示,12 月至次年 2 月主雨带位于 10° S 附近,并稳定维持, 30° — 40° N 也存在弱的降水区,两个模式均能模拟出这一基本特征,但 BCC_CSM1.1 模拟的南半球雨带中心位置明显偏北,持续时间偏长,强度偏强,雨带中心强度偏强超过 4 mm/d ,北方的弱降水区强度也偏强,位置稍偏北,BCC_CSM1.1(m)模拟的赤道以南地区降水强度更接近观测。观测中 5 月初到达 5° N 左右的降水中心,BCC_CSM1.1 的模拟结果迟至 5 月底 6 月初,且强度弱、持续时间短;BCC_CSM1.1(m)的模拟结果比观测稍晚,雨带位置稍偏北,强度与观测接近;比较而言,BCC_CSM1.1(m)比 BCC_CSM1.1 在时间进程、雨带位置和强度方面都更接近观测。观测中 30° N 附近的降水中心,两个模式的模拟结果均较弱,但从 2 mm/d 等雨量线的范围来看,模拟雨带能够达到更北的位置。

3.2 对近千年历史气候的模拟

虽然自工业革命以来气候系统受人类活动的影响很大,但是,当前观测到的气候变化特征及物理机制实际上是自然变率与人为因素共同作用的结果,只是各因子间的反馈过程更加复杂。因此,非常有必要在更长时间尺度的气候背景下讨论 20 世纪气候暖期(20CW),以深入了解并正确理解气候变化的形成机制及演变趋势。中世纪气候异常期(MCA)和小冰期(LIA)是近千年全球尺度的典型冷暖时期。重建结果指出,至少在某些地区,中世纪气候异常期的温暖程度可能接近或超过 20 世纪(Moberg, et al, 2005; Guiot, et al, 2010)。因此,通过比较中世纪气候异常期、小冰期和 20 世纪气候暖期的气候特征,特别是通过比较中世纪自然变暖和近百年变暖,能够揭示出自然变率和人类活动影响在千年气候演变不同时期的作用和贡献,并探讨不同时期气候演变的机理。

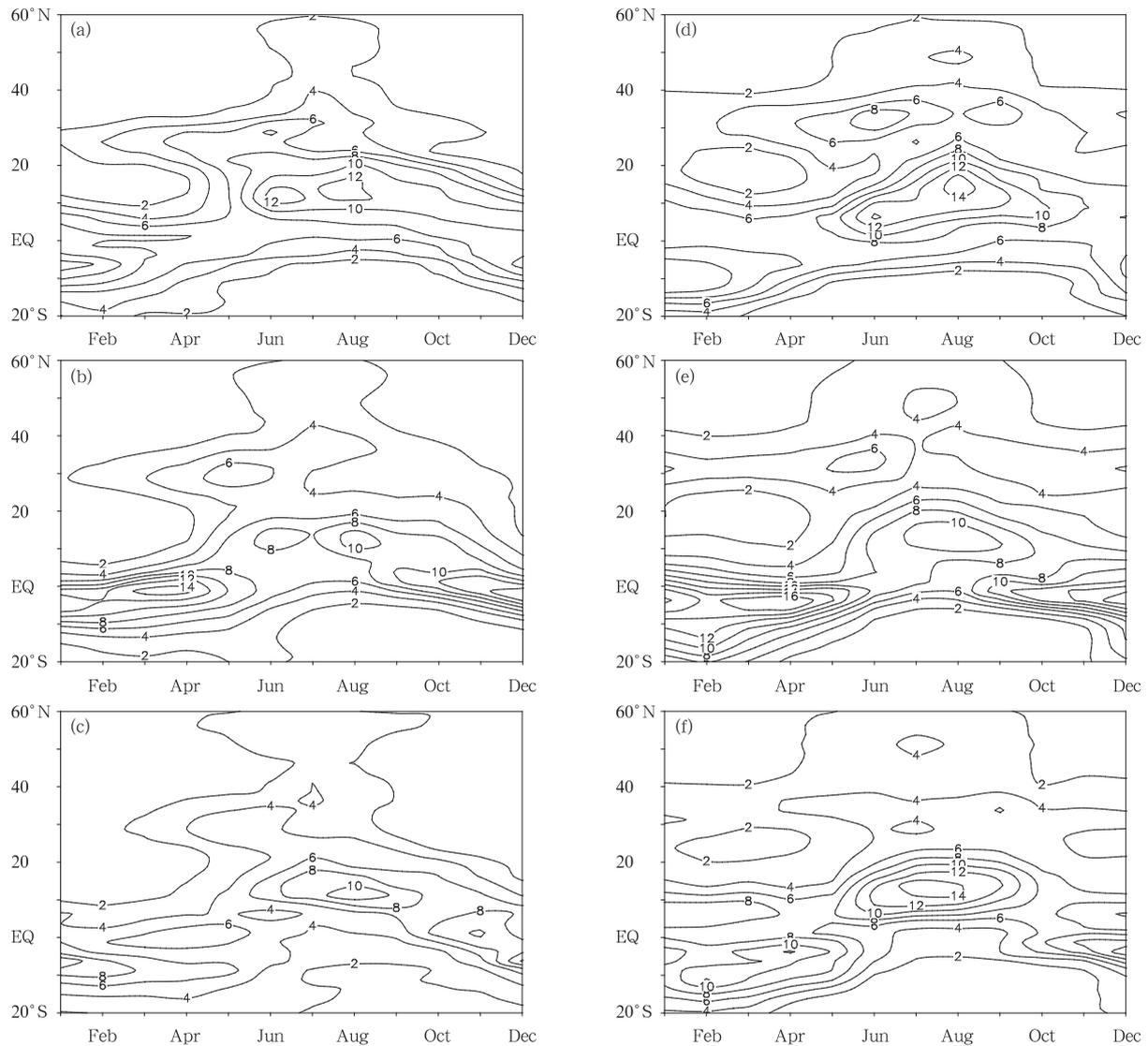


图6 观测和模拟的东亚降水(mm/d)季节进程 110° — 120° E(a—c)、 130° — 140° E(d—f)平均
(a,d. CMAP, b,e. BCC_CSM1.1, c,f. BCC_CSM1.1(m))

Fig. 6 Seasonal march of the averaged precipitation (mm/d) in East Asia over 110° to 120° E (a, b, c), and 130° to 140° E (d, e, f) from CMAP (a,d), BCC_CSM1.1 (b,e) and BCC_CSM1.1(m) (c,f)

作为CMIP5的核心试验之一,过去千年气候模拟(past 1000 试验)是连续积分时间最长的连续模拟试验。该试验有助于评估模式稳定性及在不同瞬变外强迫下模式的响应能力。在past 1000 试验中,外强迫场设为850—2000年逐年变化的太阳常数、火山活动和温室气体含量。图7中黑色实线为BCC_CSM1.1模拟的北半球平均表面温度序列,彩色实线为11条北半球平均表面重建温度序列。由于受代用资料数量及质量的限制,中世纪表面温度的重建结果差别较大,即不确定性较大。相对于重

建结果,中世纪气候异常期表面温度的模拟结果略偏低。这除了受重建表面温度不确定性的可能影响外,可能也与用于强迫模式的重建外强迫场不确定性以及模式给定初始场的温暖程度有关。小冰期重建和模拟序列的相似性较高。模式可以基本再现小冰期的3个冷期,即Spörer(1450—1540年)、Maunder(1645—1715年)和Dalton(1790—1820年)。对比参加IPCC AR5的其他4个模式(CCSM4、CSIRO-Mk3L、GISS-E2-R、MPI-ESM-P),BCC_CSM1.1模拟的近千年的气候演变结果及

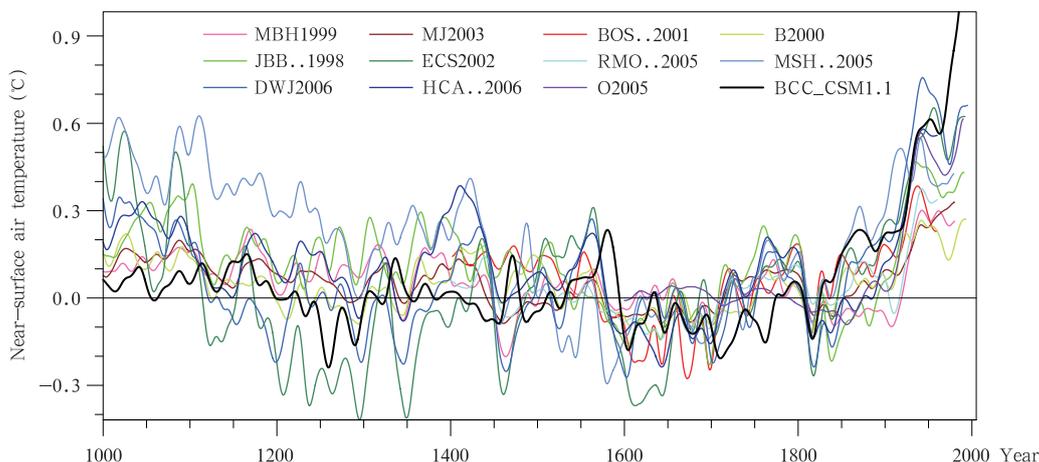


图7 BCC_CSM1.1 模拟的北半球年平均表面气温异常序列

(相对于1500—1899年的平均值,所有序列均经过30年低通滤波,彩色实线为11条北半球平均表面温度重建序列,参见Jansen等,2007)

Fig.7 Anomalies of surface temperature (with respect to averages from

1500 to 1899) over the Northern Hemisphere simulated by BCC_CSM1.1 and the

11 reconstructive series of surface temperature (Jansen et al. 2007).

All curves are smoothed with a 30-year low-pass filter

气候敏感性均较为合理。5个模式模拟的中世纪气候异常期较小冰期偏暖的幅度在 $0.05\text{—}0.21\text{ }^{\circ}\text{C}$,其中,BCC_CSM1.1的结果约为 $0.11\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

3.3 对近百年气候变化的模拟及未来气候变化预估

气候系统模式对过去历史气候的再现能力是衡量模式性能的重要指标,也是判断模式对未来气候变化预估是否可信的一个标准。Xin等(2013b)评估了中国国家气候中心两个气候系统模式以及18个CMIP5模式模拟的1861—2005年全球平均气温变化(图8a)。所有模式基本都能较好再现20世纪出现的变暖趋势,尤其是20世纪后50年的显著变暖。中国气象局国家气候中心的两个模式与多模式集合平均结果较为一致,与观测相比,略高估了20世纪的变暖趋势。至21世纪初(2000—2005年),两个模式模拟的变暖幅度相对于1971—2000年均值分别为 $0.45\text{ }^{\circ}\text{C}$ (BCC_CSM1.1)和 $0.62\text{ }^{\circ}\text{C}$ (BCC_CSM1.1(m)),二者均大于观测值 $0.33\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。BCC_CSM1.1模拟的升温幅度相对于BCC_CSM1.1(m)更接近于多模式平均($0.48\text{ }^{\circ}\text{C}$)。这是因为BCC_CSM1.1的气候灵敏度与多模式平均更加接近,而BCC_CSM1.1(m)的气候灵敏度稍高(Zhang, et

al, 2012b)。模拟与观测的年际相关系数可以反映模式能否捕捉历史气候的年际变化特征。结果显示,1861—2005年,BCC_CSM1.1模拟与观测的相关系数为0.88,BCC_CSM1.1(m)模拟为0.83,多模式集合平均结果为0.88。研究认为,多模式集合平均结果由于消除了模式误差,相对于单个模式能更好地代表模式的模拟水平(Zhou, et al, 2006; Sun, et al, 2008; Annan, et al, 2011)。所以,就全球平均温度年际变化而言,BCC_CSM1.1模式已经达到了较高的模拟效果。值得注意的是,几乎所有的耦合模式很难再现20世纪前期(1920—1940年)的相对暖期。如果要增强对这一现象的模拟,可能还需同时考虑太阳辐射和火山活动等自然外强迫因子的影响以及气候系统内部变率的共同作用。而在20世纪60—70年代的相对偏冷期,可能与1963年西印度爆发的强火山有密切关联,在近150年,历史上还有几次强火山爆发,如1883年Krakatoa火山,1902年Pele火山,1991年Pinatubo火山,由于火山气溶胶的辐射冷却作用,几乎都导致了全球平均温度出现短暂的下降。

图8b为20个模式对中国平均气温的模拟。其中,中国为3个区域($28^{\circ}\text{—}50^{\circ}\text{N}$, $80^{\circ}\text{—}97.5^{\circ}\text{E}$; 22.5°—

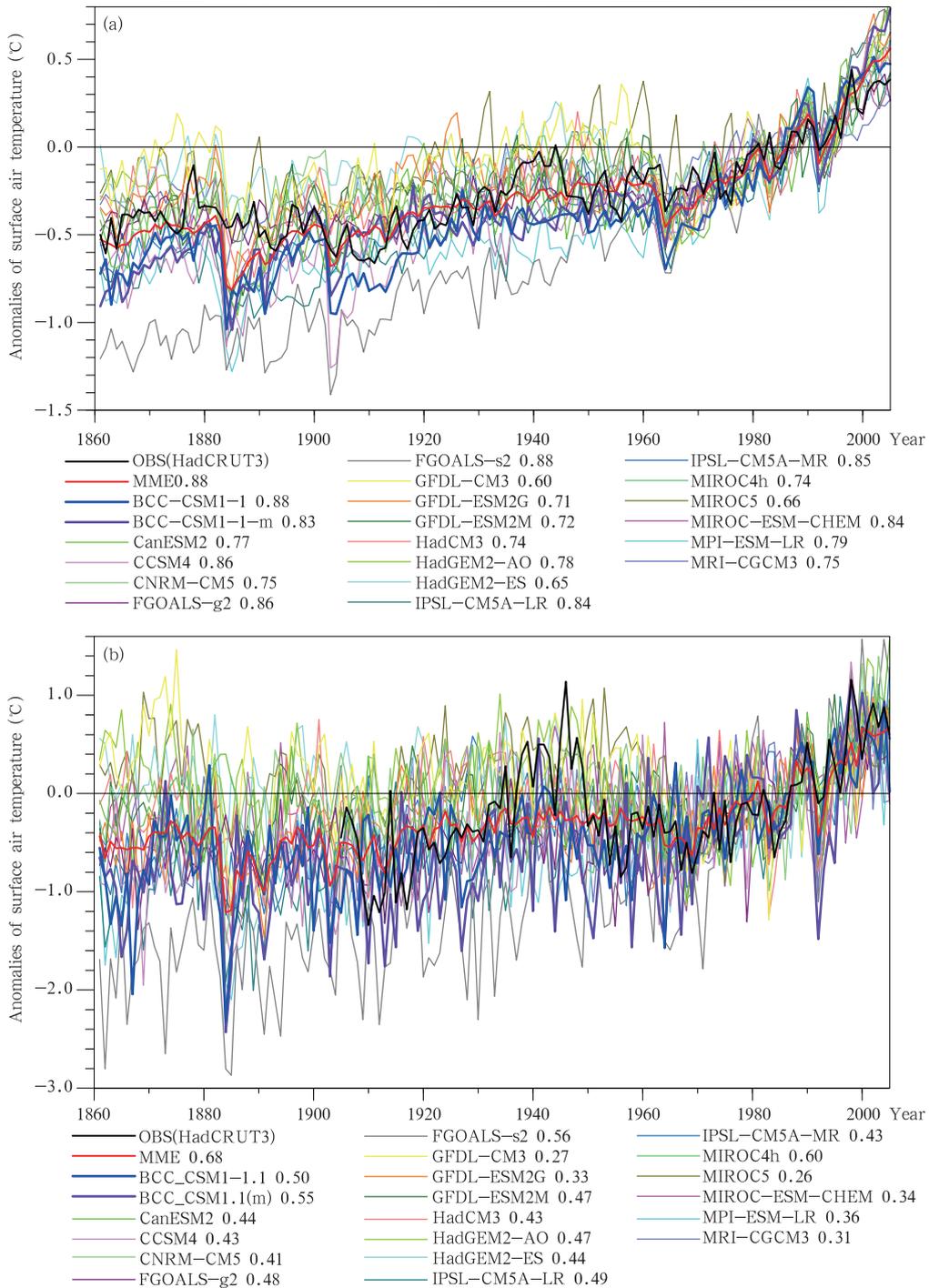


图 8 BCC_CSM1.1 和 BCC_CSM1.1(m)以及 18 个 CMIP5 模式模拟的 1861—2005 年全球(a)和中国(b)平均地表气温相对于 1971—2000 年均值的异常序列(黑色粗线表示观测,红色粗线表示 20 个模式的集合平均,其他细线表示单个模式提交 CMIP5 的第一个样本(r1i1p1)结果,色标模式后数字表示该模式与观测的相关系数,全球观测资料来自 HadCRUT3(Brohan, et al, 2006),中国观测资料来自唐国利等(2005),依据 Xin 等(2013b)重新绘制)

Fig.8 Anomalies of annual-averaged surface air temperature (°C) over 1861 to 2005 with respect to the averaged values over 1971 to 2000 for the whole globe (a) and for China (b). The results are from BCC_CSM1.1, BCC_CSM1.1(m) and the 18 other CMIP5 models (only their first samples r1i1p1). The thick black curve is from the observation, the thick red curve is the ensemble average of the 20 models, and the other thin curves are from the individual models. The numbers behind models acronyms indicate the correlation coefficients with observations (the global observation from HadCRUT3, Brohan et al. 2006; the China data from Tang, et al (2005), redrawn from Xin, et al (2013b))

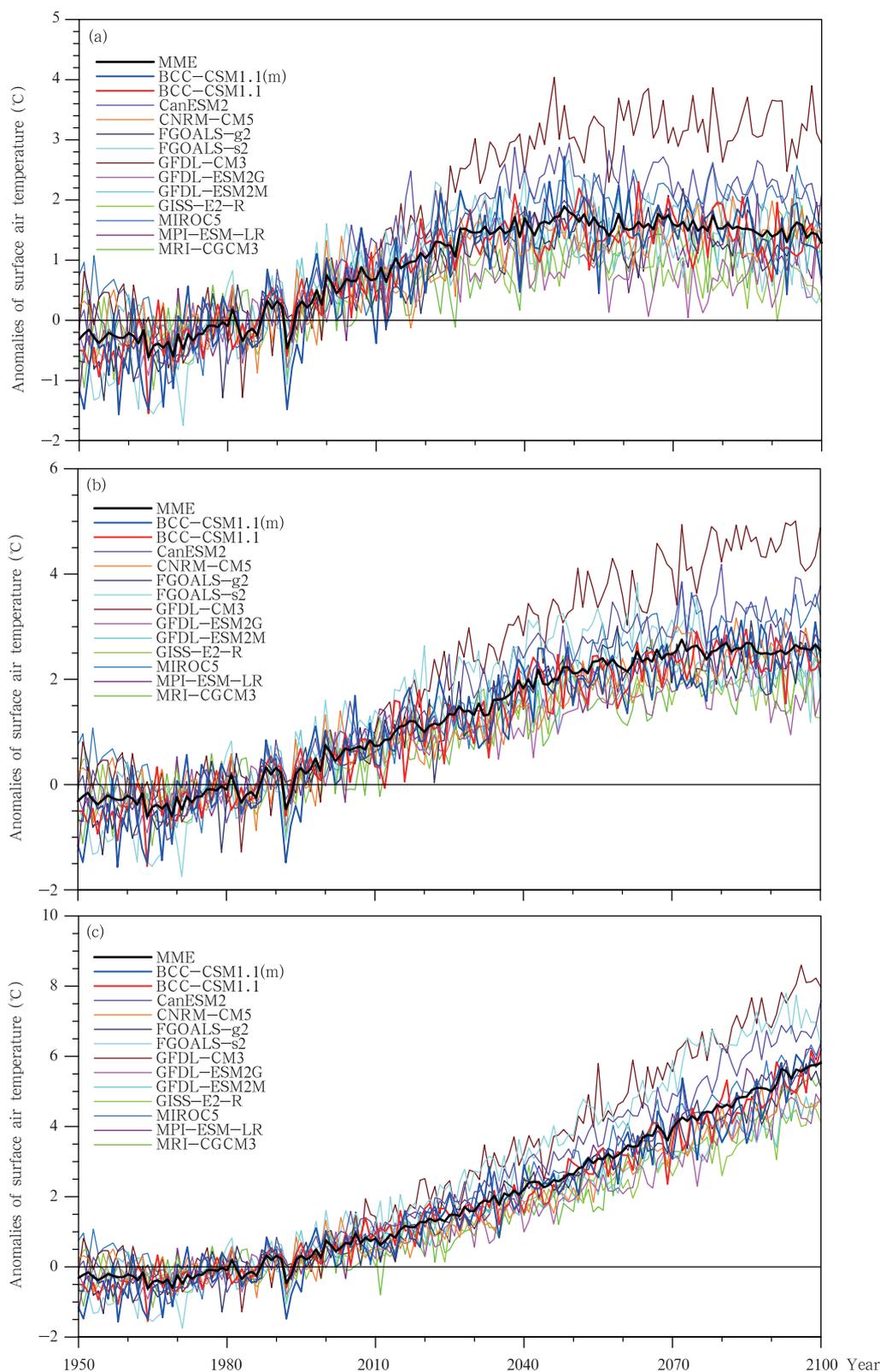


图9 3种未来排放情景下参与CMIP5的部分气候模式对中国平均地表气温相对于1971—2000年平均异常的模拟 (a. RCP2.6, b. RCP4.5, c. RCP8.5; 粗黑实线代表多模式集合平均结果, 彩色细线表示各个模式结果)

Fig. 9 Anomalies of annual-mean surface air temperature (°C) with respect to averages from 1971 to 2000 for (a) RCP2.6, (b) RCP4.5, and (c) RCP8.5 emission scenarios in a few CMIP5 models (The thick black line shows the ensemble average, the other thin curves are from the individual models)

43°N, 97.5°—122.5°E; 43°—54°N, 117.5°—130°E) 的平均。相对于全球平均而言, 模式对中国平均地表气温的离散度更大。不过, BCC_CSM1.1 和 BCC_CSM1.1(m) 的模拟结果与多模式集合平均结果也较为接近, 均能够较好模拟中国气候在 20 世纪的变暖现象。至 21 世纪初(2000—2005 年), 两个模式模拟相对于 1971—2000 年均值的上升均为 0.48°C, 低于多模式集合平均结果(0.63°C) 和观测结果(0.69°C)。1906—2005 年, BCC_CSM1.1 模拟结果与观测的相关系数为 0.50, BCC_CSM1.1(m) 模式的相关系数为 0.55。所以, 两个模式对过去百年中国地表气温的年际变化也具有一定的模拟能力, 分辨率较高的模式 BCC_CSM1.1(m) 具有更强的模拟能力。对于日本 3 个模式而言, 分辨率最高的模式 MIROC4h 对中国气温年际变化具有更高的模拟能力, 相关系数达到 0.6。已有研究对 BCC_CSM1.1 模拟的近几十年中国气候变化空间分布也进行了分析, 发现该模式对中国东部春季降水变化有较强的模拟能力(Xin, et al, 2013a)。这里不再赘述。

在 CMIP5 试验中, 采用了新的典型浓度路径(RCP) 作为 21 世纪的排放情景, 该排放情景以 2100 年达到的辐射强迫大小命名, 由高到低分别为 RCP8.5、RCP6、RCP4.5 和 RCP2.6。图 9 分别给出了 CMIP5 中 13 个气候模式(包括中国国家气候中心模式 BCC_CSM1.1 和 BCC_CSM1.1(m) 在 RCP2.6、RCP4.5 和 RCP8.5 情景下对中国区域平均气温的预估结果。在 3 种情景下, 几乎所有气候模式预估的中国气温都持续升高。在 RCP2.6 情景下, 随着排放情景的变化, 中国平均气温在 2050 年前后达到升温峰值, 2050—2070 年基本保持不变, 21 世纪后 30 年出现降温趋势。这种特征与全球平均气温变化类似(Xin, et al, 2012)。在 RCP4.5 情景下中国气温在 21 世纪持续上升, 约在 21 世纪末升高趋势变缓。在 RCP8.5 情景下, 所有模式模拟的中国平均气温在 21 世纪持续上升。BCC_CSM1.1 和 BCC_CSM1.1(m) 对 3 种情景下气温变化的模拟与多模式集合平均基本一致。21 世纪末, 多模式集合平均在 RCP2.6、RCP4.5 和 RCP8.5 情景下的中国平均升温幅度分别达到 1.4、2.5 和 5.7°C。Xin 等(2013c) 还分析了 BCC_CSM1.1 对 4 个典型浓度路径情景下 21 世纪末东亚降水的变化特征, 指出在

中、高情景下, 东亚季风增强, 长江流域降水减少, 华北区域降水增多(图略)。

4 结 语

全面回顾了中国气象局国家气候中心在全球大气环流模式、陆面过程模式、海洋环流模式、海冰模式、多圈层耦合气候系统模式等方面取得的一些进展, 重点介绍了中国气象局国家气候中心研发的气候系统模式及各分量模式的主要特点及其基本性能评估。基于 BCC_CSM1.1 和 BCC_CSM1.1(m) 参与 CMIP5 国际耦合模式相互比较计划的大量数值模拟试验结果, 评估了对当代气候尤其是降水和温度的模拟性能, 分析了对近千年历史气候的模拟结果, 评估了同参与 CMIP5 的其他气候模式对近百年气候变化的模拟及未来百年气候变化预估结果的差异。主要结论有以下几点:

(1) 第 2 代全球大气环流模式 BCC_AGCM2.0、BCC_AGCM2.1 和 BCC_AGCM2.2 在动力框架和部分物理过程改进与发展方面有特色, 对地面气温、降水、平流层温度和大气环流等当今气候平均基本态和季节变化、极端气温和强降水过程、热带季节内振荡等都具有较高的模拟性能。BCC_AGCM 水平分辨率的提高对降水区域性特征的模拟得到一定程度上的改进。

(2) 研发的陆面过程模式 BCC_AVIM 有其特点, 已具备对动态植被和陆面碳循环过程的模拟能力, 是 BCC_CSM1.1 和 BCC_CSM1.1(m) 的陆面分量模式。

(3) 研发的多圈层耦合气候系统模式 BCC_CSM1.0、BCC_CSM1.1 和 BCC_CSM1.1(m) 在给定的观测温室气体、气溶胶、火山、臭氧、太阳常数等外强迫条件下, 对 20 世纪平均温度平均气候及其年际变化长期趋势都已具有较强的模拟能力。全球平均气温变化的模拟值都分别同参与 CMIP3 和 CMIP5 的多模式模拟平均值接近。在全球分布上, 较大的模拟误差主要出现在极区和青藏高原及周边地形复杂地区。相对于 BCC_CSM1.1 模式, 较高水平分辨率的 BCC_CSM1.1(m) 模拟的地表气温气候场有所改进。

(4) BCC_CSM1.1 和 BCC_CSM1.1(m) 均能较合理的再现当今全球年平均和季节平均降水的主要空间分布特征, BCC_CSM1.1(m) 对区域性降水

的模拟误差相对 BCC_CSM1.1 有一定程度的改善,但在热带太平洋地区仍存在非常明显的赤道双辐合带现象,BCC_CSM1.1(m)更为明显。模拟的东亚地区降水强度均较观测弱。

(5) BCC_CSM1.1 对近千年历史气候的模拟表明,可以再现中世纪气候异常期和小冰期近千年全球尺度的典型暖冷时期。

(6) BCC_CSM1.1 和 BCC_CSM1.1(m)对全球百年气候变化已具有一定的模拟能力,与国际上同等分辨率的气候系统模式性能相当。两个模式与 CMIP5 多模式集合平均值较为一致,与观测相比,略高估了 20 世纪的变暖趋势。在 RCP2.6、RCP4.5 和 RCP8.5 典型浓度路径情景下,在中国区域平均的增温幅度分别达到 1.4、2.5 和 5.7℃,与 CMIP5 多模式集合平均值相当。

(7) BCC_CSM1.1 和 BCC_CSM1.1(m)属简单的地球系统模式,在给定人类活动碳排放情况下,可以模拟全球大气 CO₂ 浓度年际变化特征,对全球碳循环已具备初步的模拟能力。

参考文献

- 陈海山,施恩,周品. 2011. BCC 气候模式对中国近 50 a 极端气候事件的模拟评估. 大气科学学报, 34(5): 513-528
- 《第二次气候变化国家评估报告》编写委员会. 2011. 第二次气候变化国家评估报告. 北京: 科学出版社, 710pp
- 丁一汇,刘一鸣,宋永加等. 2002. 我国短期气候动力预测模式系统的研究及试验. 气候与环境研究, 7(2): 236-246
- 丁一汇,李清泉,李维京等. 2004. 中国业务动力季节预报的进展. 气象学报, 62(5): 598-612
- 丁一汇,任国玉,石广玉等. 2006. 气候变化国家评估报告(I): 中国气候变化的历史和未来趋势. 气候变化研究进展, 2(1): 3-8
- 董敏,陈嘉宾,季仲贞等. 2000. 季节预测大气模式研制和应用进展//96-908 项目办公室,项目执行专家组编. 短期气候预测业务动力模式的研制. 北京: 气象出版社, 63-69
- 董敏. 2001. 国家气候中心大气环流模式——基本原理和使用说明. 北京: 气象出版社, 152pp
- 董敏,吴统文,王在志等. 2009. 北京气候中心大气环流模式对季节内振荡的模拟. 气象学报, 67(6): 912-922
- 董敏,吴统文,王在志等. 2013. 气候系统模式(BCC_CSM1)对 20 世纪降水及其变率的模拟. 应用气象学报, 24(1): 1-11
- 高峰,辛晓歌,吴统文. 2012. BCC_CSM1.1 对 10 年尺度全球及区域温度的预测研究. 大气科学, 36(6): 1165-1179
- 国家“九五”重中之重 96-908 科技项目执行专家组. 2000. 短期气候预测业务动力模式的研制. 北京: 气象出版社, 500pp
- 郭准,吴春强,周天军等. 2011. LASG/IAP 和 BCC 大气环流模式模拟的宇辐射强迫之比较. 大气科学, 35(4): 739-752
- 颀卫华,吴统文. 2010. 全球大气环流模式 BCC_AGCM2.0.1 对 1998 年夏季江淮流域强降水过程的回报试验研究. 大气科学, 34(5): 962-978
- 荆现文,张华. 2012. McICA 云-辐射方案在国家气候中心全球气候模式中的应用与评估. 大气科学, 36(5): 945-958
- 李维京,张培群,李清泉等. 2005. 动力气候模式预测系统业务化及其应用. 应用气象学报, 16(增刊): 2-11
- 李伟平,刘新,聂肃平等. 2009. 气候模式中积雪覆盖率参数化方案的对比研究. 地球科学进展, 24(5): 512-522
- 陆春晖,丁一汇,张莉. 2014. BCC_AGCM2.1 模式对平流层环流变化特征的数值模拟研究. 气象学报, 72(1): 49-61
- 沈瑛,张耀存,肖卉等. 2011. BCC_AGCM2.0.1 模式系统对江淮梅雨期降水的模拟能力. 气象, 27(11): 1336-1342
- 宋振亚,乔方利,雷晓燕等. 2007. 大气-海浪-海洋环流耦合数值模式的建立及北太平洋 SST 模拟. 水动力学研究与进展, 22(5): 543-548
- 唐国利,任国玉. 2005. 近百年中国地表气温变化趋势的再分析. 气候与环境研究, 10(4): 791-798
- 王璐,周天军,吴统文等. 2009. BCC 大气环流模式对亚澳季风年际变率主导模态的模拟. 气象学报, 67(6): 973-982
- 卫晓东,张华. 2011. 非球形沙尘气溶胶光学特性的分析. 光学学报, 31(5): 1-8
- 夏坤,罗勇,李伟平. 2011. 青藏高原东北部土壤冻融过程的数值模拟. 科学通报, 56(22): 1828-1838
- 辛晓歌,吴统文,张洁. 2012. BCC 气候系统模式开展的 CMIP5 试验介绍. 气候变化研究进展, 8(5): 378-382
- 张莉,吴统文,辛晓歌等. 2013. BCC_CSM 模式对热带降水年循环模态的模拟. 大气科学, 37(5): 994-1012
- 张培群,李清泉,王兰宁等. 2004. 我国动力气候模式预测系统的研制及应用. 科技导报, (7): 17-20
- 赵宗慈,王绍武,徐影等. 2005. 近百年我国地表气温趋势变化的可能原因. 气候与环境研究, 10(4): 808-817
- 周文艳,罗勇,李云梅. 2010. 陆面过程中冠层四流辐射传输模式的模拟性能检验. 气象学报, 68(1): 12-18
- Annan J D, Hargreaves J C. 2011. Understanding the CMIP3 multimodel ensemble. J Climate, 24(16): 4529-4538
- Arora V, Boer G, Friedlingstein P, et al. 2013. Carbon-concentration and carbon-climate feedbacks in CMIP5 Earth system models. J Climate, doi:10.1175/JCLI-D-12-00494.1
- Brohan P, Kennedy J J, Harris I, et al. 2006. Uncertainty estimates in regional and global observed temperature changes: A new dataset from 1850. J Geophys Res, 111(D12), D12106, doi:10.1029/2005JD006548
- Chen H M, Yu R C, Li J, et al. 2012. The coherent interdecadal changes of East Asia climate in mid-summer simulated by BCC_AGCM 2.0.1. Climate Dyn, 39(1-2): 155-163
- Collins W D, Rasch P J, Boville B A, et al. 2004. Description of the NCAR Community Atmosphere Model (CAM3.0). NCAR/TN-464+STR, 214pp
- Dong M, Wu T W, Wang Z Z, et al. 2012. A simulation study on

- the extreme temperature events of the 20th century by using the BCC_AGCM. *Acta Meteor Sinica*, 26(4): 489-506
- Gong S L, Barrie L A, Lazare M. 2002. Canadian Aerosol Module (CAM): A size-segregated simulation of atmospheric aerosol processes for climate and air quality models 2. Global sea-salt aerosol and its budgets. *J Geophys Res*, 107(D24): 4779, doi: 10.1029/2001JD002004
- Gong S L, Barrie L A, Blanchet J P, et al. 2003. Canadian Aerosol Module: A size-segregated simulation of atmospheric aerosol processes for climate and air quality models 1. Module development. *J Geophys Res*, 108, doi:10.1029/2001JD002002
- Griffies S M, Gnanadesikan A, Dixon K W, et al. 2005. Formulation of an ocean model for global climate simulations. *Ocean Sci*, 1(1): 45-79
- Guiot J, Corona C, ESCARSEL members. 2010. Growing season temperatures in Europe and climate forcings over the past 1400 years. *PLoS ONE*, 5(4): e9972
- Hack J J. 1994. Parameterization of moist convection in the National Center for Atmospheric Research Community Climate Model (CCM2). *J Geophys Res*, 99(D3): 5551-5568
- Jansen E, Overpeck J, Briffa K R, et al. 2007. *Palaeoclimate//Solomon S, Qin D, Manning M, et al. Climate Change 2007: The Physical Science Basis*. Cambridge, United Kingdom and New York: Cambridge University Press
- Ji J. 1995. A climate-vegetation interaction model-simulating the physical and biological process at the surface. *J Biogeography*, 22(2-3): 445-451
- Ji J, Huang M, Li K. 2008. Prediction of carbon exchange between China terrestrial ecosystem and atmosphere in 21st century. *Sci China Series D: Earth Sci*, 51(6): 885-898
- Jiang J H, Su H, Zhai C, et al. 2012. Evaluation of cloud and water vapor simulations in CMIP5 climate models using NASA "A-Train" satellite observations. *J Geophys Res*, 117, doi: 10.1029/2011JD017237
- Jie W H, Wu T W, Wang J, et al. 2013. The improvement of 6-15 day precipitation forecast using a time-lagged ensemble method. *Adv Atmos Sci*, doi:10.1007/s00376-013-3037-8
- Luo Y, Zhao Z C, Xu Y, et al. 2005. Projections of climate change over China for the 21st century. *Acta Meteor Sinica*, 19(4): 400-406
- Moberg A, Sonechkin D M, Holmgren K, et al. 2005. Highly variable Northern Hemisphere temperatures reconstructed from low- and high-resolution proxy data. *Nature*, 433(7026): 613-617
- Myhre G, Samset B H, Schulz M, et al. 2012. Radiative forcing of the direct aerosol effect from AeroCom Phase II simulations. *Atmos Chem Phys Discuss*, 12(8): 22355-22413
- Oleson K W, Dai Y, Bonan G, et al. 2004. Technical Description of the Community Land Model (CLM). NCAR/TN-461 + STR, NCAR, Boulder, Colorado
- Qiao F L, Yuan Y L, Yang Y Z, et al. 2004. Wave-induced mixing in the upper ocean; Distribution and application to a global ocean circulation model. *Geophys Res Lett*, 31(11), L11303, doi:10.1029/2004GL019824
- Rasch P J, Kristjansson J E. 1998. A comparison of the CCM3 model climate using diagnosed and predicted condensate parameterizations. *J Climate*, 11(7): 1587-1614
- Semtner A J. 1976. A model for the thermodynamic growth of sea ice in numerical investigations of climate. *J Phys Ocean*, 6(3): 27-37
- Shi G Y, Zhang H. 2007. The relationship between absorption coefficient and temperature and their effect on the atmospheric cooling rate. *J Quant Spectr Radiat Transfer*, 105(3): 459-466
- Su H, Jiang J H, Zhai C, et al. 2013. Diagnosis of regime-dependent cloud simulation errors in CMIP5 models using "A-Train" satellite observations and reanalysis data. *J Geophys Res*, doi: 10.1029/2012JD018575
- Sun Y, Ding Y H. 2008. An assessment on the performance of IPCC AR4 climate models in simulating interdecadal variations of the East Asian summer monsoon. *Acta Meteor Sinica*, 22(4): 472-488
- Winton M. 2000. A reformulated three-layer sea ice model. *J Atmos Ocean Tech*, 17(4): 525-531
- Wu T W, Wu G X. 2004. An empirical formula to compute snow cover fraction in GCMs. *Adv Atmos Sci*, 21(4): 529-535
- Wu T W, Yu R C, Zhang F. 2008. A modified dynamic framework for the atmospheric spectral model and its application. *J Atmos Sci*, 65(7): 2235-2253
- 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(1): 123-147
- Wu T W. 2012. A mass-flux cumulus parameterization scheme for large-scale models: Description and test with observations. *Climate Dyn*, 38(3-4): 725-744
- 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: 1-22
- Xiao C L, Zhang Y C. 2012. The East Asian upper-level jet streams and associated transient eddy activities simulated by a climate system model BCC_CSM1. 1. *Acta Meteor Sinica*, 26(6): 700-716
- Xin X G, Cheng Y J, Wang F, et al. 2012. Asymmetry of surface climate change under RCP2. 6 projections from the CMIP5 models. *Adv Atmos Sci*, 30(3): 796-805
- Xin X G, Wu T W, Li J L, et al. 2013a. How well does BCC_CSM1. 1 reproduce the 20th century climate change over China? *Oceanic Sci Lett*, 6(1): 21-26
- Xin X G, Wu T W, Zhang J. 2013b. Introduction of CMIP5 experiments carried out with the climate system models of Beijing Cli-

- mate Center. *Adv Clim Change Res*, 4(1): 41-49
- Xin X G, Zhang L, Zhang J, et al. 2013c. Climate change projections over East Asia with BCC_CSM1. 1 under RCP scenarios. *J Meteor Soc Japan*, 91(4):413-429
- Trenberth K E, Jones P D, Ambenje P, et al. 2007. Observations: Surface and atmospheric climate change// Solomon S, Qin D, Manning M, et al. *Climate Change 2007: The Physical Science Basis*. Cambridge, United Kingdom and New York: Cambridge University Press
- Zhang G J, McFarlane N A. 1995. Sensitivity of climate simulations to the parameterization of cumulus convection in the Canadian Climate Centre general circulation model. *Atmos Ocean*, 33(3): 407-446
- Zhang H, Nakajima T, Shi G Y, et al. 2003. An optimal approach to overlapping bands with correlated k-distribution method and its application to radiative calculations. *J Geophys Res*, 108: 4641-4654
- Zhang H, Shi G Y Nakajima T, et al. 2006a. The effects of the choice of k-interval number on radiative calculations. *J Quant Spectr Radiat Transfer*, 2006, 98(1): 31-43
- Zhang H, Suzuki T, Nakajima T, et al. 2006b. Effects of band division on radiative calculations. *Opti Engine*, 45(1): 016002, doi:10.1117/1.2160521
- Zhang L, Dong M, Wu T W. 2011. Changes in precipitation extremes over Eastern China simulated by the Beijing Climate Center Climate System Model (BCC_CSM1. 0). *Climate Res*, 50(2): 227-245
- Zhang H, Wang Z L, Wang Z Z, et al. 2012a. Simulation of direct radiative forcing of aerosols and their effects on East Asia climate using an interactive GCM-Aerosol coupled system. *Climate Dyn*, 38(7-8): 1675-1693
- Zhang L, Wu T W, Xin X G, et al. 2012b. Projections of annual mean air temperature and precipitation over the globe and in China during the 21st century by the BCC climate system model BCC_CSM1. 0. *Acta Meteor Sin*, 26(3): 362-375
- Zhang M H, Lin W Y, Bretherton C S, et al. 2003. A modified formulation of fractional stratiform condensation rate in the NCAR community atmospheric model CAM2. *J Geophys Res*, 108(D1), doi: 10.1029/2002JD002523
- Zhou T J, Yu R C. 2006. Twentieth-century surface air temperature over China and the globe simulated by coupled climate models. *J Climate*, 19(22): 5843-5858