

中国地球气候系统模式研究进展： CMIP 计划实施近 20 年回顾^{*1}

周天军^{1,2} 邹立维¹ 吴波¹ 金晨曦^{1,3} 宋丰飞^{1,3} 陈晓龙^{1,3} 张丽霞¹

ZHOU Tianjun^{1,2} ZOU Liwei¹ WU Bo¹ JIN Chenxi^{1,3} SONG Fengfei^{1,3} CHEN Xiaolong^{1,3} ZHANG Lixia¹

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. 中国科学院气候变化研究中心,北京,100029

3. 中国科学院大学,北京,100049

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

2. Climate Change Research Center, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China

3. University of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

2014-01-01 收稿,2014-07-14 改回。

周天军,邹立维,吴波,金晨曦,宋丰飞,陈晓龙,张丽霞. 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 Tianjun, Zou Liwei, Wu Bo, Jin Chenxi, Song Fengfei, Chen Xiaolong, Zhang Lixia. 2014. Development of earth/climate system models in China: A review from the Coupled Model Intercomparison Project perspective. *Acta Meteorologica Sinica*, 72 (5): 892-907

Abstract The development of coupled earth/climate system models in China over almost the past 20 years is reviewed, including a comparison with other international models that participated in the Coupled Model Intercomparison Project (CMIP) from phase 1 (CMIP1) to phase 4 (CMIP4). The Chinese contribution to CMIP is summarized, and the major achievements from CMIP1 to CMIP3 are listed as a reference for assessing the strengths and weaknesses of Chinese models. After a description of CMIP5 experiments, the five Chinese models that participated in CMIP5 are then introduced. Furthermore, following a review of the current status of international model development, both the challenges and opportunities for the Chinese climate modeling community are discussed. The development of high-resolution climate models, earth system models, and improvements in atmospheric general circulation and oceanic general circulation models, which are core components of earth/climate system models, are highlighted. To guarantee the sustainable development of climate system models in China, the need for national-level coordination is discussed, along with a list of the main components and supporting elements identified by the US National Strategy for Advancing Climate Modeling.

Key words Coupled Model Intercomparison Project (CMIP), IPCC Assessment Report, Atmospheric general circulation model, Oceanic general circulation model, Climate system model, Earth system model, High-resolution model

摘要 在系统总结过去 20 年从 CMIP1 到 CMIP4 世界各国模式的综合情况基础上,回顾了中国气候模式参与 CMIP 科学试验的概况。在此基础上,概述了 CMIP5 的试验设计,总结了参加 CMIP5 的 5 个中国气候模式的特点。随后,从高分辨率模式研发、地球系统模式研发、地球气候系统模式最为关键的分量——大气环流模式和海洋环流模式研发的角度,提出了中国地球气候系统模式发展面临的挑战,指出了中国模式发展面临的机遇。针对如何从国家层次协调以实现地球气候模式的可持续发展问题,给出了美国国家科学院最近发布的《推动气候模拟的国家战略》所提出的九条措施作为参考。

* 资助课题:国家自然科学基金项目(41125017,41330423, 41205080)。

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

关键词 耦合模式比较计划(CMIP), IPCC 报告, 大气环流模式, 海洋环流模式, 气候系统模式, 地球系统模式, 高分辨率模式
中图法分类号 P435

1 引言

20 世纪 70 年代以来, 气候学研究的重要进展之一是研究范畴从单纯关注大气的温、压、湿等要素, 拓展到海洋、冰雪、陆面等圈层, 并提出“气候系统”这一概念。现代气候学研究明确定义气候系统由大气圈、水圈、冰冻圈、岩石圈和生物圈等 5 个圈层组成。地球气候的变化包括由气候系统各圈层相互作用过程引起的内部变率、自然因子变化(包括地球轨道参数、太阳活动、火山活动)引起的自然变率、与人类活动相关的因子变化(温室气体和气溶胶等大气成分变化、土地利用变化等)造成的人为变化 3 部分组成, 能够模拟上述过程的是考虑了大气-海洋-陆面-海冰之间复杂的相互作用的气候系统模式。气候系统模式是理解气候系统的变化规律、再现其过去演变过程、预测和预估其未来变化的重要工具。

世界气候研究计划(WCRP)在推动大气模式、气候系统模式(CSM)乃至地球系统模式(ESM)的发展发挥了重要作用。在过去 20 多年中, WCRP 相继组织了从“大气模式比较计划”(AMIP)(Gates, et al, 1992)到“耦合模式比较计划”(CMIP)(Meehl, et al, 1997, 2000)等一系列国际模式比较计划。这些计划的实施促进了耦合模式研发和气候模拟领域的国际合作, 是迄今为止地学领域组织得最为成功的国际计划之一, 推动了国际学术界和社会各界对气候变化模拟和预估问题的高度重视。利用 CMIP 计划的气候模拟和预估结果所发表的大量学术论文, 构成了大致每 5 年颁布一次的“政府间气候变化专门委员会”(IPCC)科学评估报告的重要组成部分。

中国在气候模式的发展方面具有长期的雄厚积累。自 20 世纪 70 年代末开始, 中国就开始发展气候模式, 并将其应用于气候过程的模拟研究, 在气候系统分量模式的发展及其相互耦合作用方面具有丰富的经验。中国科学院大气物理研究所(IAP)大气科学和地球流体力学数值模拟国家重点实验室(LASG)的主攻方向就是气候模式系统的发展和研

究。实验室自 1985 年成立以来, 坚持不懈地致力于大气环流模式、海洋环流模式、陆面过程模式、海冰模式及其耦合的气候系统模式的研究, 相继发展了不同版本的气候系统模式(张学洪等, 1999)。IAP/LASG 近 30 年模式研发的一条成功经验就是国际化, IAP/LASG 研发的各版本耦合模式参与了历次“国际耦合模式比较计划”(CMIP), 其结果被历次 IPCC 报告所引用。通过参与国际合作跟踪国际学科前沿、通过参加国际比较寻找自身不足、进而发展和完善自己的模式系统, 这是 IAP/LASG 长期以来坚持的模式研发道路。最近 10 年来, 包括中国国家气候中心在内的中国诸多研究机构, 相继投入力量从事气候模式的研发, 并踊跃参加 CMIP 等国际计划, 壮大了中国气候模式的研发队伍, 提升了中国在本领域的国际影响力。

当前国际气候模式的发展, 正在从只考虑大气、海洋、陆面、海冰各圈层间能量和水通量交换过程的物理气候系统模式, 走向进一步考虑碳、氮循环等生物地球化学过程的地球系统模式(王会军等, 2004; 王斌等, 2008)。未来 10 年, 将是地球系统模式发展的黄金时期。近年来, 随着中国综合国力的增强, 中国在地球/气候系统模式研发和模拟上的投入逐年加大, 逐渐有更多的部委、高校相继投入人力、物力进行气候模式系统的研发, 中国的气候模拟研究队伍逐步壮大, 模式研发水平不断提高, 国际参与度和国际话语权日渐提高。同时, 中国高性能计算机技术已经达到世界先进水平, 为气候模式的研发和模拟提供了坚实的计算平台。不过, 机遇与挑战并存, 气候模式研发和模拟研究领域的国际竞争日趋激烈, 如何总结中国在气候模式研发领域的经验, 客观评估当前面临的机遇和挑战, 并以此为基础, 瞄准国际前沿, 在国家层次上合理布局、统筹协调, 争取在未来的国际竞争中, 使中国的气候模式研发和模拟综合水平居国际前沿, 是中国气候学界乃至地学界和超级计算学界迫切需要思考的问题。

WCRP 推动的诸多国际模式比较计划中影响力最大的 CMIP 计划, 自 1995 年实施以来, 迄今已有近 20 年的时间。参与该计划的中国模式, 从最初只有 IAP/LASG 一个模式, 发展到有 5 个模式参加最新的 CMIP5, 未来将有更多的中国模式参与

CMIP6,队伍迅速壮大。本文的目的在于总结过去近20年中国模式参加历次CMIP计划的情况,在此基础上,针对正在执行中的第5次国际耦合模式比较计划(CMIP5),通过将中国的模式与国际模式进行比较,提出中国地球/气候系统模式研发领域迫切需要解决的问题,藉此推动中国模式研发整体水平的提高。注意地球系统模式的基础定义,是在物理气候系统模式的基础上,进一步增加模拟陆地和海洋碳循环过程的模块。为便于讨论,本文将气候系统模式和地球系统模式泛称“地球气候系统模式”。

2 CMIP1 到 CMIP4 回顾及中国模式参与情况

WCRP 通过其联合科学委员会/气候变率和可预报性国际计划(JSC/CLIVAR)“耦合模拟工作组”(WGCM),于1995年推出第1次国际耦合模式比较计划CMIP1。随后近20年,又陆续推出了第2到第5次比较计划。CMIP计划关于气候模式性能的评估、对当前气候变化的模拟以及未来气候变化的情景预估结果,被相应大致每隔5年出版一次的IPCC气候变化评估报告所引用。例如CMIP1的结果被1995年出版的IPCC第2次评估报告(SAR)

所引用,CMIP2的结果被2001年出版的IPCC第3次评估报告(TAR)所引用,CMIP3的结果被2007年出版的IPCC第4次评估报告(AR4)所引用。CMIP5结果被于2014年出版的IPCC第5次评估报告(AR5)引用。

CMIP计划所推动的国际间气候模式数据共享,极大地促进了气候模拟和诊断、气候变化归因和气候变化预估等领域的国际合作。基于CMIP数据的大量科学论文,是IPCC编写其历次科学评估报告的基础。不过需要指出的是,CMIP计划并非专门为IPCC报告所组织的,经常见诸学术论文或报告中的“IPCC模式”的称谓其实欠准确,因为只有“CMIP模式”、而并不存在“IPCC模式”。客观上,CMIP和IPCC报告存在彼此推动的关系。早在WCRP于1995年推出CMIP1计划之前,1990年发布的IPCC第1次评估报告(FAR),就引用了22个大气模式(AGCM)耦合混合层海洋模式的结果、以及4个AGCM耦合海洋模式(OGCM)的完全环流耦合模式的结果(表1)。IPCC1990年发布的FAR以及1992年发布的FAR补充报告,推动了气候学界对气候模式研究的重视,这是促使WCRP于1995年推出CMIP计划的重要原因之一。

表1 IPCC第1次评估报告引用模式及其分辨率

Table 1 The models used for IPCC FAR

模式	所属机构(国别)	大气模式水平分辨率	海洋模式水平分辨率
	GFDL(美国)	R15, 4.5×7.5, L9	4.5×3.75, L12
	MPI(德国)	T21, 5.6×5.6, L19	4×4, L11
	NCAR(美国)	R15, 4.5×7.5, L9	5×5, L4
	UKMO(英国)	2.5×3.75, L11	2.5×3.75, L17
	BMRC(澳大利亚)	R21, 3.2×5.6, L9	混合层海洋模式
CCM1	YALE(美国)	R15, 4.5×7.5, L12	混合层海洋模式
CCM1	SUNY(美国)	R15, 4.5×7.5, L12	混合层海洋模式
	CSIRO	R21, 3.2×5.6, L9	混合层海洋模式
CCM	NCAR(美国)	R21, 3.2×5.6, L9	混合层海洋模式
	LMD(法国)	5×7.5, L11	混合层海洋模式
	IAP(中国)	4×5, L2	混合层海洋模式

中国的气候模式参与CMIP计划有很长的历史。在2007年(对应CMIP3)之前,中国参加CMIP计划的耦合气候模式,只有中国科学院大气物理研究所发展的模式系统。1992年发布的IPCC FAR的补充报告,引用了IAP发展的一个两层AGCM

耦合混合层海洋的气候预估结果(Wang, et al, 1993),这是中国较早的关于气候变暖的环流模式(GCM)模拟结果(表1),表明中国在推动CMIP计划的组织实施方面具有重要贡献。

表 2 IPCC 第 2 次评估报告所用模式及其分辨率

Table 2 The models used for IPCC SAR

模式所属机构(国别)	大气模式分辨率	海洋模式分辨率
BMRC(澳大利亚)	R21, 3.2×5.6, L9	3.2×5.6, L12
CCC(澳大利亚)	T32, 3.8×3.8, L10	1.8×1.8, L29
CERFACS(法国)	T42, 2.8×2.8, L31	1×2, L20
COLA(美国)	R15, 4.5×7.5, L9	3×3, L16
CSIRO(澳大利亚)	R21, 3.2×5.6, L9	3.2×5.6, L12
GFDL(美国)	R30, 2.25×3.75, L14	2×2, L18
GISS(美国)	4×5, L9	4×5, L13
GISS(美国)	4×5, L9	4×5, L16
IAP(中国)	4×5, L2	4×5, L20
LMD/OPA(法国)	3.6×2.4, L15	1×2, L20
MPI(德国)	T21, 5.6×5.6, L19	5.6×5.6, L11
MPI E2/OPY(德国)	T21, 5.6×5.6, L19	2.8×2.8, L9
MRI(日本)	4×5, L15	(0.5—2)×2.5, L21
NCAR(美国)	R15, 4.5×7.0, L9	1×1, L20
UCLA(美国)	4×5, L9	1×1, L15
UKMO(英国)	2.5×3.8, L19	2.5×3.8, L20

参加 CMIP1 的国际模式有 10 个(Meehl, et al, 1997, 2000),中国参加的模式是 IAP/LASG 的气候系统模式 GOALS2(吴国雄等,1997;Zhang, et al, 2000),由一个 9 层 R15 分辨率的 AGCM、20 层的 $5^{\circ} \times 4^{\circ}$ 水平分辨率的 OGCM、SSiB 陆面模式和热力学海冰模式组成,海-气耦合过程采用了“通量订正”技术(Yu, et al, 1998);海-气耦合过程只考虑热通量交换和风应力作用,未考虑淡水通量交换,盐度都向气候态恢复。CMIP1 结果被 1995 年出版的 IPCC SAR 引用(表 2)。

参加 CMIP2 的国际模式有 18 个(Meehl, et al, 2005),中国参加的模式是 IAP/LASG 的气候系统模式 GOALS4。较之此前参加 CMIP2 的版本 GOALS2, IAP/LASG 与南京大学合作在 GOALS3 中引入了太阳辐射的日变化(邵慧等, 1998); GOALS4 进一步在海-气耦合过程中,考虑了淡水通量交换过程(周天军等,2000;Zhou, et al, 2000b),这是模拟和研究大洋热盐环流对全球增暖的响应所必须考虑的过程。CMIP2 的结果被 2001 年出版的 IPCC TAR 所引用(表 3)。

注意在参加 CMIP1 的 10 个模式和参加 CMIP2 的 18 个模式中, IAP 的气候系统模式是唯

一来自发展中国家的模式系统。因此, IAP 模式客观上反应了发展中国家在 CMIP 计划中的声音。这是 IAP/LASG 在 2000 年度国家重点实验室评估获得优秀的代表性成果之一(周天军,2000)。

参加 CMIP3 的模式有 23 个,中国国家气候中心和 IAP/LASG 的模式都参与了 CMIP3。 IAP/LASG 模式为 FGOALS-g1.0 (Yu, et al, 2002, 2004),其大气分量模式垂直 26 层、水平分辨率为 $2.8^{\circ} \times 2.8^{\circ}$,海洋分量模式垂直 30 层、水平分辨率为 $1.0^{\circ} \times 1.0^{\circ}$,陆面模式和海冰模式则分别为美国大气研究中心(NCAR)发展的通用陆面模式 CLM 和海冰模式 CSIM,大气、海洋、陆面和海冰分量通过 NCAR CCSM (Community Climate System Model)耦合器耦合在一起(Yu, et al, 2004, 2008; Zhou, et al, 2007)。CMIP3 的结果被 2007 年出版的 IPCC AR4 引用(表 4)。 IAP/LASG 同期发展的 FGOALS 模式的另外一个版本 FGOALS-s1.0 (周天军等,2005a, 2005b; Zhou, et al, 2007),由于其大气模式辐射模块不具备处理各种温室气体和气溶胶的作用而未参加 CMIP3。中国国家气候中心的气候系统模式由于技术原因,后来退出了 CMIP3。

表3 IPCC第3次评估报告所用模式及其分辨率

Table 3 The models used for IPCC TAR

模式	所属机构(国别)	大气模式水平分辨率	海洋模式水平分辨率
ARPEGE/OPA1	CERFACS(法国)	T21, 5.6×5.6, L30	2.0×2.0, L31
ARPEGE/OPA2	CERFACS(法国)	T31, 3.9×3.9, L19	2.0×2.0, L31
BMRCa	BMRC(澳大利亚)	R21, 3.2×5.6, L9	3.2×5.6, L12
BMRCb	BMRC(澳大利亚)	R21, 3.2×5.6, L17	3.2×5.6, L12
CCSR/NIES	CCSR/NIES(日本)	T21, 5.6×5.6, L20	2.8×2.8, L17
CGCM1	CCCma(加拿大)	T32, 3.8×3.8, L10	1.8×1.8, L29
CGCM2	CCCma(加拿大)	T32, 3.8×3.8, L10	1.8×1.8, L29
COLA1	COLA(美国)	R15, 4.5×7.5, L9	1.5×1.5, L20
COLA2	COLA(美国)	T30, 4×4, L18	3.0×3.0, L20
CSIRO MK2	CSIRO(澳大利亚)	R21, 3.2×5.6, L9	3.2×5.6, L21
CSM1.0	NCAR(美国)	T42, 2.8×2.8, L18	2.0×2.4, L45
CSM1.3	NCAR(美国)	T42, 2.8×2.8, L18	2.0×2.4, L45
ECHAM1/LSG	DKRZ(德国)	T21, 5.6×5.6, L19	4.0×4.0, L11
ECHAM3/LSG	DKRZ(德国)	T21, 5.6×5.6, L19	4.0×4.0, L11
ECHAM4/OPYC3	DKRZ(德国)	T42, 2.8×2.8, L19	2.8×2.8, L11
GFDL_R15a	GFDL(美国)	R15, 4.5×7.5, L9	4.5×3.7, L12
GFDL_R15b	GFDL(美国)	R15, 4.5×7.5, L9	4.5×3.7, L12
GFDL_R30_c	GFDL(美国)	R30, 2.25×3.75, L14	1.875×2.25, L18
GISS1	GISS(美国)	4.0×5.0, L9	4.0×5.0, L16
GISS2	GISS(美国)	4.0×5.0, L9	4.0×5.0, L13
GOALS	IAP/LASG(中国)	R15, 4.5×7.5, L9	4.0×5.0, L20
HadCM2	UKMO(英国)	2.5×3.75, L19	2.5×3.75, L20
HadCM3	UKMO(英国)	2.5×3.75, L15	1.25×1.25, L20
IPSL_CM1	IPSL/LMD(法国)	5.6×3.8, L15	2.0×2.0, L31
IPSL_CM2	IPSL/LMD(法国)	5.6×3.8, L15	2.0×2.0, L31
MRI1	MRI(日本)	4.0×4.0, L15	2.0×2.5, L21
MRI2	MRI(日本)	T42, 2.8×2.8, L30	2.0×2.5, L23
NCAR1	NCAR(美国)	R15, 4.5×7.5, L9	1.0×1.0, L20
NRL	NRL(美国)	T47, 2.5×2.5, L18	1.0×2.0, L25
DOE PCM	NCAR(美国)	T42, 2.8×2.8, L18	0.67×0.67, L32
CCSR/NIES2	CCSR/NIES(日本)	T21, 5.6×5.6, L20	2.8×3.8, L17
BERN2D	PIUB(瑞士)	10×ZA(纬向平均), L1	10×ZA(纬向平均), L15
UVIC	UVIC(加拿大)	1.8×3.6, L1	1.8×3.6, L19
CLIMBER	PIK(德国)	10×51, L2	10×ZA(纬向平均), L11

CMIP3是迄今为止组织得最为成功、影响力最大的一次国际耦合模式比较计划。据统计至2010年底,利用CMIP3数据发表的国际SCI论文超过550篇,全球超过3000个用户,从PCMDI下载的数据总量超过1 Pbyte;在2004—2010年,从PCMDI服务器下载CMIP3数据的日峰值最高达到1 TB。截止目前,依然有许多基于CMIP3的研究成果在陆续发表。

在CMIP3之后,WCRP WGCM又组织了CMIP4计划,分别考虑自然变率和人为外强迫来模拟20世纪全球气候变化(Meehl, et al, 2007)。CMIP4实际上是CMIP3和CMIP5的过渡计划,影响力相对较少,其设计的自然变率和人为外强迫分

离的试验,习惯上常被视作CMIP3的外围试验。但是这一组试验由于其在气候变化检测和归因研究中的重要性,随后被CMIP5继续列为外围试验,这组试验结果在气候变化归因研究中得到广泛应用。

目前正在实施中的CMIP5计划,有来自全球20多个研究组、40余个气候系统模式和地球系统模式参加(Taylor, et al, 2012)。中国参与CMIP5的气候系统模式有5个(表5)。一个国家有超过2个以上的模式参与CMIP计划,这种情况此前只出现在美国、法国、日本、澳大利亚和英国,参加CMIP5的中国模式数量上的增多,反映了中国气候模式研发队伍的迅速发展和壮大。

表 4 IPCC 第 4 次评估报告所用模式及其分辨率

Table 4 The models used for IPCC AR4

模式	所属机构(国别)	大气模式分辨率	海洋模式分辨率
BCC_CM1.0	BCC(中国)	T63, 1.9×1.9, L16	T63, 1.9×1.9, L30
BCCR_BCM2.0	BCCR(挪威)	T63, 1.9×1.9, L31	0.5—1.5×1.5, L35
CCSM3	NCAR(美国)	T85, 1.4×1.4, L26	0.3—1×1, L40
CGCM3.1(T47)	CCCma(加拿大)	T47, 2.8×2.8, L31	1.9×1.9, L29
CGCM3.1(T63)	CCCma(加拿大)	T63, 1.9×1.9, L31	0.9×1.4, L29
CNRM-CM3	CNRM(法国)	T63, 1.9×1.9, L45	0.5—2×2, L31
CSIRO-MK3.0	CSIRO(澳大利亚)	T63, 1.9×1.9, L18	0.8×1.9, L31
ECHAM5/MPI-OM	MPI(德国)	T63, 1.9×1.9, L31	1.5×1.5, L40
ECHO-G	MIUB/MRI(德国-韩国)	T30, 3.9×3.9, L19	0.5—2.8×2.8, L20
FGOALS_g1.0	IAP/LASG(中国)	T42, 2.8×2.8, L26	1.0×1.0, L16
GFDL_CM2.0	GFDL(美国)	2.0×2.5, L24	0.3—1.0×1.0
GFDL_CM2.1	GFDL(美国)	2.0×2.5, L24	0.3—1.0×1.0
GISS_AOM	GISS(美国)	3×4, L12	3×4, L16
GISS_EH	GISS(美国)	4×5, L20	2×2, L16
GISS_ER	GISS(美国)	4×5, L21	4×5, L13
INM-CM3.0	INM(俄罗斯)	4×5, L21	2×2.5, L33
IPSL_CM4	IPSL(法国)	2.5×3.75, L19	2×2, L31
MIROC3.2(hires)	UT, JAMSTEC(日本)	T106, 1.1×1.1, L56	0.2×0.3, L47
MIROC3.2(medres)	UT, JAMSTEC(日本)	T42, 2.8×2.8, L20	0.5—1.4×1.4, L43
MRI-CGCM2.3.2	MRI(日本)	T42, 2.8×2.8, L30	0.5—2.0×2.5, L23
PCM	NCAR(美国)	T42, 2.8×2.8, L26	0.5—0.7×1.1, L40
UKMO-HadCM3	UKMO(英国)	2.5×3.75, L19	1.25×1.25, L20
UKMO_hadGEM1	UKMO(英国)	1.3×1.9, L38	0.3—1.0×1.0, L40

表 5 IPCC 第 5 次评估报告所用模式及其分辨率

Table 5 The models used for IPCC AR5

模式	所属机构(国别)	大气模式分辨率	海洋模式分辨率
ACCESS1-0	CSIRO-BOM(澳大利亚)	1.3°×1.9°	0.6°×1.0°
BCC_CSM1.1	BCC(中国)	2.8°×2.8°	0.8°×1.0°
BCC_CSM1.1(m)	BCC(中国)	1.1°×1.1°	0.8°×1.0°
BNU-ESM	BNU(中国)	2.8°×2.8°	0.9°×1.0°
CanCM4	CCCMA(加拿大)	2.8°×2.8°	0.9°×1.4°
CanESM2	CCCMA(加拿大)	2.8°×2.8°	0.9°×1.4°
CCSM4	NCAR(美国)	0.9°×1.3°	0.6°×0.9°
CNRM-CM5	CNRM-CERFACS(法国)	1.4°×1.4°	0.6°×1.0°
CSIRO-Mk3-6-0	CSIRO-QCCCE(澳大利亚)	1.9°×1.9°	1.9°×0.9°
EC-Earth	EC-Earth(欧盟)	1.1°×1.1°	1.0°×1.0°
FGOALS-g2	LASG-CESS(中国)	3°×2.8°	0.9°×1.0°
FGOALS-s2	LASG(中国)	1.7°×2.8°	0.9°×1.0°
GFDL-CM3	GFDL(美国)	2.0°×2.5°	0.9°×1.0°
GFDL-ESM2M	GFDL(美国)	2.0°×2.5°	0.9°×1.0°
GISS-E2-R	GISS(美国)	2.0°×2.5°	1.0°×1.3°
HadGEM2-CC	Hadley Center(英国)	1.3°×1.9°	0.8°×1.0°
HadCM3	Hadley Center(英国)	2.5°×3.8°	1.3°×1.3°
inmcm4	INM(俄罗斯)	1.5°×2°	0.5°×1.0°
IPSL-CM5A-LR	IPSL(法国)	1.9°×3.8°	1.2°×2.0°
MIROC5	AORI-NIES-JAMSTEC(日本)	1.4°×1.4°	0.8°×1.4°
MIROC4h	AORI-NIES-JAMSTEC(日本)	0.6°×0.6°	0.2°×0.3°
MIROC-ESM	AORI-NIES-JAMSTEC(日本)	2.8°×2.8°	0.7°×1.2°
MIROC-ESM-CHEM	AORI-NIES-JAMSTEC(日本)	2.8°×2.8°	0.7°×1.2°
MPI-ESM-LR	MPI-M(德国)	1.9°×1.9°	0.8°×1.4°
MRI-CGCM3	MRI(日本)	0.6°×0.6°	0.5°×1.0°
NorESM1-M	NCC(挪威)	1.9°×2.5°	0.5°×1.1°

3 从 CMIP1 到 CMIP4 气候模式的进步

从 CMIP1 到 CMIP4, 气候系统模式从结构到物理过程上都取得了飞速的发展。每次的 IPCC 评估报告, 都设有“模式评估”一章, 以系统总结以 5 年为一个时间段内的模式研发进展。基于 IPCC 第 1 次评估报告 FAR、第 2 次评估报告 SAR、第 3 次评估报告 TAR 和第 4 次评估报告 AR4 的相关章节, 对模式研发在大致每 5 年内的主要进展总结如下:

IPCC FAR 及其补充报告中指出 (Gates, et al, 1990, 1992), 参加 CMIP1 的海-气耦合模式对海洋和大气的大尺度结构有一定的模拟能力, 但技术上这些模式多使用了“通量订正”校正模拟的海表通量。虽然模式中对云的处理愈加复杂, 但云仍是气候变化模拟的最大不确定性来源。报告中同时指出, 观测数据的缺乏严重阻碍了模式的评估和发展。

IPCC SAR 指出 (Gates, et al, 1995), 尽管模式中依然普遍使用“通量订正”技术, 此时的耦合模式中加入了海冰和陆面分量。尤其需要指出的是, 陆面过程的模拟较之 FAR 有了很大提高, 模拟的海温、盐度和海冰的大尺度分布也有了明显的改进。出现了能够模拟海洋中尺度涡的高分辨率海洋模式。模式中不确定性较大的地方, 包括云及其辐射效应、陆面的水文平衡和海表的热量平衡。耦合模式及其分量模式的综合诊断和评估是模式发展的重要方面, 但缺少足够的观测数据, 需要建立全球气候综合观测系统。

到了 IPCC TAR (McAvaney, et al, 2001), 耦合模式模拟云和水汽的能力有了很大的提高, 一些模式不需要“通量订正”也能够保持长期积分的稳定, 且其模拟性能有一定保证。考虑温室气体和硫酸盐气溶胶的辐射强迫后, 一些耦合模式可以再现 20 世纪表面气温的增暖趋势。耦合模式模拟的 ENSO 有了很大改进, 尽管其强度等的模拟仍存在偏差; 季风和北大西洋涛动等在模式中也能较合理地得以再现。耦合模式已成为进行未来气候预估的合适工具。需要指出的是, 并不存在一个“最好”的模式, 有必要使用多个耦合模式的结果。

到了 AR4 (Randall, et al, 2007), 绝大多数的模式已不再使用通量订正, 且对模式分辨率、计算方法和参数化都持续进行了改进。在多数模式中引进了额外的过程 (如交互的气溶胶模块), 一些气候模

式和中等复杂程度的地球系统模式已引进显式处理的碳循环模块。模式改进了对气候变率中的重要模态、极端事件和温带气旋的模拟, 但大多数模式模拟的南大洋存在系统性偏差。一些气候模式在给定初值条件后, 对天气预报和季节预测亦有一定的技巧。边界层云和一部分中层云的短波反馈、深对流云对全球变暖的响应以及冰雪反馈是模式模拟不确定性的主要来源。

4 CMIP5 科学试验及 CMIP5 模式特点

目前正在组织实施的 CMIP5, 其科学试验可概括为三大类 (Taylor, et al, 2012):

第一类是长期模拟试验, 积分时间在百年以上。其核心试验包括: (1) 大气模式试验, 观测海温驱动下的百年长度 AMIP 积分; (2) 物理气候系统模式试验, 包括有外强迫变化的气候系统模式控制试验、气候系统模式 20 世纪气候模拟试验、气候系统模式 RCP4.5 和 RCP8.5 未来气候变化预估试验、年递增 1% CO₂ 的气候增暖试验、突增 4 倍 CO₂ 的气候增暖试验、固定 1 倍和 4 倍 CO₂ 的气候增暖试验; (3) 地球系统模式试验, 包括长期控制积分、20 世纪气候模拟试验、RCP8.5 情景的气候预估试验。以上核心试验总积分时间为 1718 模式年。

CMIP5 的长期模拟试验, 除了核心试验之外, 还设计了外围试验, 供各个模拟中心根据自己的计算资源酌情开展模拟试验。其第一外围试验 (Tier-1) 包括: 全新世大暖期 (6 ka) 和末次冰期冰盛期 (21 ka) 气候模拟试验、只考虑自然因子和只考虑温室气体变化的 20 世纪气候模拟试验、20 世纪气候演变的 AMIP 和物理气候系统模式集合模拟试验、RCP2.6 和 RCP6 预估试验、RCP4.5 试验延伸至 2300 年、突增 4 倍 CO₂ 的气候增暖试验集合模拟、2000 年气溶胶强迫试验、水球试验等。第二外围试验 (Tier-2) 包括: 过去 1000 年气候模拟、检测与归因集合模拟试验、不同强迫因子分离的模拟试验、RCP8.5 和 RCP2.6 试验延伸至 2300 年、CO₂ 增加 1 倍或者 CO₂ 每年递增 1% 或者“20C + RCP4.5” (20C 指在 20 世纪的外强迫条件下的历史气候模拟) 的地球系统模式模拟试验等。

CMIP5 的 21 世纪气候变化预估试验包含 4 种温室气体和气溶胶等排放的“典型浓度路径” (Representative Concentration Pathways, RCPs) (表

6),分别为 RCP2.6/4.5/6.0/8.5,每种情景包括一套温室气体、气溶胶和化学活性气体的排放和浓度,以及土地利用/土壤覆盖的时间路线(Moss, et al, 2009)。这是 IPCC 第 5 次评估报告新设计的气候变化情景试验,其中 RCP8.5 路径接近 CMIP3 SRES A1F1 的情形,而 RCP4.5 路径则和 CMIP3

SRES B1 情景有些接近(Rogelj, et al, 2012)。注意“Representative”意味着只是可以达到特定辐射强迫特征的众多可能情景中的一种,而“Pathway”强调了不仅仅关注长期浓度水平,还包含了达到这个量的过程。

表 6 CMIP5 未来气候变化典型浓度路径

Table 6 The Representative Concentration Pathways (RCPs) for CMIP5

情景	2010—2100 辐射强迫	温室气体排放
RCP2.6(缓解)	中期达强迫峰值 3 W/m^2 (约等效于 $490 \times 10^{-6} \text{ CO}_2$)随后减少,至 2100 年为 2.6 W/m^2	很低
RCP4.5(中等)	强迫稳定增长至 2100 年的 4.5 W/m^2 (约等效于 $650 \times 10^{-6} \text{ CO}_2$)	很低
RCP6.0(中等)	强迫稳定增长至 2100 年的 6.0 W/m^2 (约等效于 $850 \times 10^{-6} \text{ CO}_2$)	中等
RCP8.5(严重)	辐射强迫增长至 2100 年的 8.5 W/m^2 (约等效于 $1370 \times 10^{-6} \text{ CO}_2$)	高

4 种典型浓度路径所蕴含的排放情景具体如下:

RCP8.5:这是最高的温室气体排放情景(Riahi, et al, 2011)。该情景假定人口最多、技术革新率不高、能源改善缓慢、收入增长慢。这导致长时间高能源需求及高温室气体排放,而缺少应对气候变化的政策。这个情景是根据国际应用系统分析研究所(IIASA)的综合评估框架和能源供应选择及其总环境影响(MESSAGE)模式建立的。与过去的情景相比,它考虑了大气污染预估的空间分布,且加强了土地利用和陆面变化的预估。

RCP6.0:该情景反映了生存期长的温室气体和生存期短的物质的排放,以及土地利用/陆面变化,导致 2100 年辐射强迫稳定在 6.0 W/m^2 (Masui, et al, 2011)。根据亚洲-太平洋综合模式(AIM),温室气体排放的峰值大约出现在 2060 年,以后持续下降。2060 年前后能源改善强度为每年 $0.9\%—1.5\%$ 。通过全球排放权的交易,任何时候减少排放均物有所值。在该情景中,用生态系统模式估算地球生态系统之间通过光合作用和呼吸作用交换的 CO_2 。

RCP4.5:在该情景下,2100 年辐射强迫稳定在 4.5 W/m^2 (Thomson, et al, 2011)。该情景用全球变化评估模式(GCAM)模拟得到,考虑了与全球经济框架相适应的、长期存在的全球温室气体和生存期短的物质的排放,以及土地利用/陆面变化。模式的改进包括历史排放及陆面覆盖信息,并遵循用最低代价达到辐射强迫目标的途径。为了限制温室气体排放,要改变能源体系,多用电能、低排放能源技术,开展碳捕获及地址储藏技术。通过降尺度得到模拟的排放及土地利用的区域信息。

RCP2.6:这是把全球平均温度上升限制在 2°C 之内的情景(van Vuuren, et al, 2011)。这是最低端的情景,在 21 世纪后半叶能源应用为负排放。应用的是全球环境评估综合模式(IMAGE),采用中等排放基准,假定所有国家均参加。2010—2100 年累计温室气体排放比基准年减少 70% 。为此要彻底改变能源结构及非 CO_2 温室气体的排放,特别提倡应用生物质能、恢复森林。但是,仍有许多工作要做,例如研究气候系统对辐射强迫峰值的反应,社会削减排放率的能力,以及进一步减排非 CO_2 温室气体的能力等。

第二类 CMIP5 试验是短期模拟试验,主要是年代际气候变化预测试验。即利用物理气候系统模式,通过同时考虑外强迫变化(温室气体、气溶胶、太阳辐射、火山气溶胶等)和海洋的年代际惯性作用(通过在海洋模式中考考虑同化过程来加以实现),来进行 10 和 30 年长度的气候预测试验。其核心试验包括以 1960,1965, ..., 2005 年为初值的 10 年长度回报和预测集合试验、以 1960,1980 和 2005 年为初值的 30 年长度的回报和预测集合试验,每组试验要求至少有 3 个集合成员。其外围试验包括每间隔 1 年进行的年代际回报和预测试验、不同初始化方案的比较试验、集合成员从 3 增加到 10;考虑大气化学、气溶胶、区域环境质量过程的年代际回报和预报试验;运行到 2010 年增加考虑类似“皮纳图博”火山效应的年代际预测试验;不考虑火山影响的回报试验等。第二类 CMIP5 试验的核心试验为 480 年,第一外围试验总积分长度超过 1700 年。

第三类 CMIP5 试验为高分辨率大气模式试验。这类试验是利用需要大量计算资源的高分辨率气候模式和数值预报模式的模拟试验。核心试验是

1979—2008 年的 AMIP 试验、未来气候变化的 2026—2035 年片段模拟试验。第一外围试验包括 AMIP 试验增加集合成员、未来气候变化片段模拟试验增加集合成员、考虑 4 倍 CO₂ 的 AMIP 试验、分布不均匀的异常海温型驱动的试验、水球试验；第二外围试验包括均匀分布的异常海温驱动试验。第三类 CMIP5 试验的核心试验长度为 40 年，第一外围试验超过 185 年，第二外围试验为 30 年。尽管积分时间相对较短，但是由于模式分辨率高、总的计算量依然巨大。

三类 CMIP5 试验对模式的分辨率要求不同。第 1 类长期模拟试验积分时间长(物理气候系统模式)或者模式过程复杂(地球系统模式)，故需要的计算资源多，因此，多采用中低分辨率。第 2 类短期模拟试验的特点是积分时段短，故最初设计要求采用高分辨率模式，但实际研究中发现决定年代际预报技巧的主要不是模式分辨率、而是初始化方案，故实际多采用中等分辨率的模式；第 3 类试验是针对高分辨率大气模式或数值预报模式的。

在参加 CMIP5 的 35 个模式中，气候系统模式有 24 个，其中 13 个模式包含大气化学模式分量；地球系统模式有 11 个，其中 5 个包含完整的陆地、海洋碳循环以及大气化学过程，5 个只包含海洋和陆地碳循环，1 个只包含海洋碳循环(Flato, et al, 2013)。

分辨率与计算资源需求直接相关，是衡量模式

发展水平的有效指标之一。对应分辨率的提高，模式对东亚—西北太平洋气候的模拟能力有显著提高(He, et al, 2014; Song, et al, 2014a; Sperber, et al, 2013)。图 1a 给出了参加 CMIP5 的大气模式、耦合模式的大气分量的水平分辨率分布，其中最高分辨率已经达到 20 km；除了中国国家气候中心的一个模式版本外，总的说来，中国的大气环流模式分辨率明显低于国际模式平均水平。如果按照分辨率来统计模式的数目(图 1b)，参加 CMIP5 的中国模式分辨率几乎都位于最低端。进一步统计，CMIP5 模式在分辨率方面有以下特点：

(1)同时参加长期模拟试验和年代际预估试验的耦合模式，其大气模式水平分辨率最高为 0.8°、最低为 2.8°，平均 1.5°，海洋模式水平分辨率最高为 0.5°、最低为 2.0°，平均 1.0°。

(2)只参加长期模拟试验的耦合模式，其大气模式水平分辨率最高为 1.1°、最低为 4.5°，平均 2.1°，海洋模式水平分辨率最高为 0.2°、最低为 2.0°，平均 0.9°。

(3)只参加年代际预测试验的耦合模式，其大气模式水平分辨率最高为 0.5°、最低为 2.5°，平均 1.3°，海洋模式水平分辨率最高为 0.3°、最低为 1.3°，平均 0.8°。

(4)只参加“片段”积分的高分辨率大气模式，水平分辨率最高为 0.2°、最低为 0.6°，平均 0.4°。

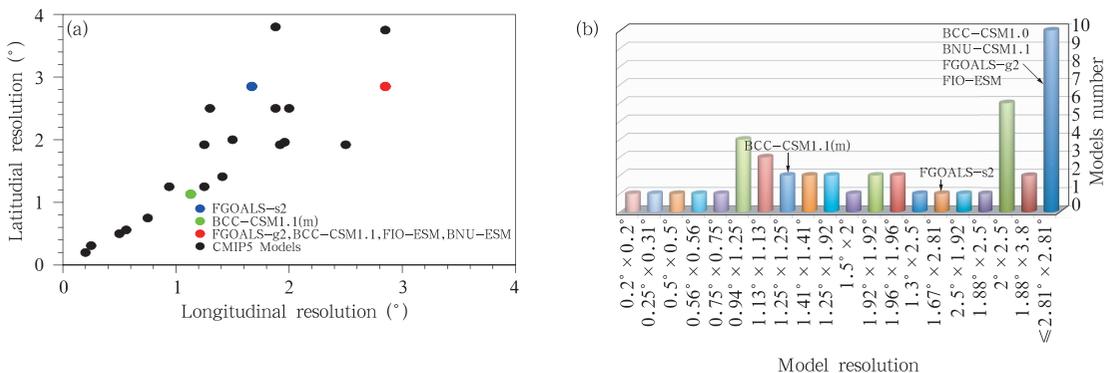


图 1 参加 CMIP5 的大气模式及耦合模式大气分量的水平分辨率比较

(a. 模式分辨率大小,横坐标为经向分辨率,纵坐标为纬向分辨率,一个圆点表示一个模式;

b. 各分辨率的模式数量(单位:个),横坐标为分辨率,纵坐标为模式数量;

其中参加 CMIP5 的中国模式在(a)和(b)中分别以彩色打点和文字标识出来)

Fig. 1 A comparison of AGCM horizontal resolutions of CMIP5 AGCMs and CGCMs

(a. The abscissa is for the longitudinal resolution while the ordinate is for the latitudinal resolution, and one dot corresponds to one CMIP5 model; b. total number of models at different horizontal resolutions,

the abscissa is for the model resolution while the ordinate is the number of models at different horizontal resolutions; The Chinese models are marked)

中国的 5 个气候系统模式主要开展了上面的第 1 和第 2 类模拟试验,相对而言,来自中国的模式分辨率明显低于国际同期水平(表 5,图 1)。模式分辨率的提高,不单纯是一个技术问题,既与高性能计算平台的性能有关,更涉及模式研发队伍的整体能力以及与高性能计算队伍的协作问题。如何在气候模拟领域有效利用中国世界领先的高性能计算机资源,提高中国气候模式的总体水平,这是气候模拟领域和高性能计算领域需要共同面对的问题。

CMIP5 较之 CMIP3 的另外一个重要进步是有更多的地球系统模式(ESM)参与。参加 CMIP5 的模式中,同时包含陆面碳循环模块和海洋碳循环模块的模式有 10 个(Anav, et al, 2013)(表 7)。其中,包含海洋生物过程的碳循环模式主要有 3 种类型:(1)基于营养盐的模式,碳向表层海水以下的输出是表层营养盐的函数;(2)营养盐恢复模式,该模

式中生物碳通量等于需要维持观测到的营养盐浓度梯度的速率;(3)显式描述生态系统的模式,涉及到营养盐、浮游植物、浮游动物和有机碎屑的食物链的模式。第 3 种类型是主流,绝大多数海洋碳循环模式为显式描述生态系统的模式。显式描述生态系统的模式由 7 部分组成,包括营养盐(磷酸盐、硝酸盐和铁)、浮游植物、浮游动物、溶解的有机物质(DOM)、下沉的颗粒有机物质(碎屑)等。

模拟陆地碳循环过程的是全球植被动力学模式(Anav, et al, 2013; Shao, et al, 2013),包括 3 个主要部分:(1)生物地理学模块,用于描述各植被类型生存所需的气候条件;(2)生物地球化学模块,用于模拟植被的生长(如光合作用、呼吸作用——其中许多部分与陆面模式相通);(3)植被动力学模块,用于描述各植被类型的生态特征变化(如物候学、生理学、形态学和物种竞争等)。

表 7 CMIP5 模式使用的碳循环模块汇总

Table 7 Summary of names, land and ocean carbon cycle components of CMIP5 ESMs

模式	陆地碳模块	海洋碳模块	参考文献
BCC_CSM1.1	BCC_AVIM1.0	OCMIP2	Wu, et al, 2013
BCC_CSM1.1(M)	BCC_AVIM1.0	OCMIP2	Wu, et al, 2013
BNU-ESM	CoLM + BNU-DGVM	iBGC	吴其重等, 2013
CanESM2	CLASS2.7 + CTEM1	CMOC	Arora, et al, 2011
CESM1-BGC	CLM4	BEC	Long, et al, 2013
FIO-ESM	CASA	OCMIP2	Qiao, et al, 2013
GFDL-ESM2G	LM3	TOPAZ2	Dunne, et al, 2012
GFDL-ESM2M	LM3	TOPAZ2	Dunne, et al, 2012
HadGEM2-CC	JULES + TRIFFID	Diat-HadOCC	Collins, et al, 2011 Jones, et al, 2011
HadGEM2-ES	JULES + TRIFFID	Diat-HadOCC	Collins, et al, 2011 Jones, et al, 2011
INM-CM4	Simple model into INM-CM4 atmospheric component	Simple model into INM-CM4 ocean component	Volodin, et al, 2010
IPSL-CM5A-LR	ORCHIDEE	PISCES	Dufresne, et al, 2013
IPSL-CM5A-MR	ORCHIDEE	PISCES	Dufresne, et al, 2013
IPSL-CM5B-MR	ORCHIDEE	PISCES	Dufresne, et al, 2013
MIROC-ESM-CHEM	MATSIRO + SEIB-DGVM	NPZD	Watanabe, et al, 2011
MIROC-ESM	MATSIRO + SEIB-DGVM	NPZD	Watanabe, et al, 2011
MPI-ESM-LR	JSBACH + BETHY	HAMOCC5	Ilyina, et al, 2013 Giorgetta, et al, 2013
MPI-ESM-MR	JSBACH + BETHY	HAMOCC5	Ilyina, et al, 2013 Giorgetta, et al, 2013
NorESM-ME	CLM4	HAMOCC5	Tjiputra, et al, 2013

5 参加 CMIP5 的中国模式及其特点

中国参加 CMIP5 科学试验的模式有 5 个(表 5),其技术要点概括如下:

(1)中国科学院大气物理研究所的气候系统模式 FGOALS

该模式有两个版本进行了 CMIP5 试验,第 1 个版本是 FGOALS-g2(Li, et al, 2013),其大气分量

为格点模式 GAMIL, 水平分辨率 $2.8^\circ \times 2.8^\circ$ 、垂直 26 层, 海洋水平分辨率为 $1.0^\circ \times 1.0^\circ$ 、垂直 30 层, 陆面模式和海冰模式分别为 CLM3 和 CICE4, 采用耦合器 CPL6; 该模式调试和基础控制试验在 IAP/LASG 完成, 其余试验在清华大学计算机系的计算平台上完成。第 2 个版本是 FGOALS-s2 (Bao, et al, 2013), 其大气分量为 SAMIL, 水平分辨率 R42 (约 $2.8^\circ \times 1.4^\circ$)、垂直 26 层, 耦合架构同 FGOALS-g2, 但是其海冰模式为 CSIM5, 全部科学试验在 IAP 完成。这两个模式版本均完成了 CMIP5 的涉及物理气候系统模式的全部核心试验和部分外围试验。FGOALS-s2 还在陆面过程引入陆地碳循环模式 Vegas、考虑海洋碳循环过程, 形成一个地球系统模式版本 FGOALS-s2-ESM, 完成了 CMIP5 的 ESM 核心试验。此外, 为解决千年气候模拟试验的巨大计算量问题, IAP 还利用 FGOALS 的一个低分辨率版本 FGOALS-gl, 完成了过去千年气候演变的模拟试验 (Zhou, et al, 2008; 满文敏等, 2011; Zhang, et al, 2013)。

(2) 中国国家气候中心的气候系统模式 BCC-CSM 和地球系统模式 BCC-ESM

BCC 有两个版本参加了 CMIP5 试验, 一是 BCC_CSM1.1, 其大气模式为 BCC_AGCM2.1, 水平分辨率为 T42 (相当于 2.8°)、垂直 26 层; 海洋模式为 MOM4, 水平分辨率为 $1/3^\circ$ (约 30 km)、垂直 40 层; 其陆面分量为 BCC_AVIM1.0。二是 BCC_CSM1.1(m), 其与 BCC_CSM1.1 的主要区别, 是大气模式为 BCC_AGCM2.2, 水平分辨率提高到 T106 (相当于 1.1°)。两个模式系统都考虑了简单的碳循环过程, 属于地球系统模式 (ESM) 系列。BCC 模式完成了 CMIP5 的关于物理气候系统模式和地球系统模式的全部核心试验以及部分外围试验 (Wu, et al, 2010, 2013, 2014; 辛晓歌等, 2012; 吴统文等, 2013)。

(3) 北京师范大学地球系统模式 BNU-ESM

该模式是基于 CCSM2 发展的地球系统模式, 它基于 NCAR 的耦合器, 把大气环流模式 CAM3.5、海冰模式 CICE4.0、北京师范大学的通用陆面模式 CoLM3.0、以及美国地球流体动力学实验室 (GFDL) 的海洋模式 MOM4p1 耦合起来。其大气分辨率约为 T42 (相当于 2.8°)、垂直 26 层 (吴其重等, 2013; Ji, et al, 2014)。

(4) 中国国家海洋局第一海洋研究所地球系统模式 FIO-ESM

该模式也是基于 CCSM2 发展的地球系统模式。其大气分量为 CAM3.5, 分辨率为 T42L26 (相当于 2.8°); 海洋分量为 POP2, 水平分辨率 1.1° , 但赤道地区加密为 $0.3^\circ - 0.5^\circ$, 垂直 40 层。其陆面和海冰分量分别为 CLM3 和 CICE4。该模式的一个重要特色, 是耦合了一个波浪模式 MASNUM, 其分辨率为 $2.0^\circ \times 2.0^\circ$ 。该 ESM 的陆地碳循环模式为 CASA, 海洋碳循环模式为 OCMIP-2。该模式完成了物理气候系统模式部分的核心科学试验、部分外围试验, 以及地球系统模式的控制试验 (Qiao, et al, 2004, 2013; Song, et al, 2011, 2012)。

参加 CMIP5 的 5 个中国模式, 在模拟气候系统平均态、从季节内振荡到 ENSO 年际变率、全球和东亚季风、以温度变化为主要特征的 20 世纪气候演变、主要的大气遥相关型等方面, 都显示出较为合理的性能 (Bellenger, et al, 2013; Sperber, et al, 2013; Zhou, et al, 2014; Song, et al, 2014a, 2014b; He, et al, 2014)。但是, 在模式对温室气体的敏感度上, 几个模式间的差异则较大 (陈晓龙等, 2014; Chen, et al, 2014; Zhou, et al, 2014)。

CMIP5 的试验设计、计算量和数据量较之以往都是空前的。较之以往历次 CMIP 计划, IAP/LASG 参加 CMIP5 的一个新的特点, 就是联合和协作。例如, IAP/LASG 联合中国国家海洋局第一海洋研究所, 完成了 FGOALS2 的耦合框架; IAP/LASG 联合清华大学计算机系和地学中心, 对大气模式 GAMIL 和 FGOALS-g2 的模式代码进行了优化、提升了计算效率, 并在其高性能计算机上完成了 FGOALS-g2 的大部分气候预估试验; IAP/LASG 联合中国科学院大气物理研究所大气边界物理和大气化学国家重点实验室 (IAP/LAPC), 发展了 FGOALS 地球系统模式 FGOALS-s2-ESM 的初始版本。“联合与协作”应该成为中国地球系统模式研发领域所倡导的科学文化。

6 中国地球气候系统模式发展面临的挑战

考察气候模式研发整体水平的指标有多种, 其中对 CMIP5 模式的比较, 是其中的有效指标。以 CMIP5 模式为参照标准, 中国当前气候模式与国际领先模式的差距主要体现在:

首先,在所用模式的分辨率上,中国落后于国际平均水平,高分辨率模式的研发滞后。对比参加 CMIP5 的国际模式情况,中国的气候系统模式分辨率明显偏低(表 5,图 1a)。当前国际上用于长期气候模拟试验的大气模式,平均分辨率已经达到 1.5° 左右,一些国际领先的气候模拟中心的模式分辨率已经高于 1.0° 。而用于短期气候模拟试验的大气模式,已经开始有分辨率介于 0.2° — 0.6° 的高分辨率大气环流模式出现。但是,中国参加 CMIP5 的模式,其大气分辨率多在 2.8° 左右,明显低于同期国际平均水平(图 1b)。

高分辨率的气候模式能直接分辨更精细时空尺度的物理过程,从而有更高的模式性能;同时,高分辨率气候模式还能模拟中低分辨率模式所不能模拟的一些基本大气和海洋现象,例如大气中的热带气旋、梅雨锋结构、海洋的中尺度涡旋等,因此,分辨率是衡量气候模式能力的重要标尺。尽管中国参加 CMIP5 的气候模式总数达到 5 个,应当承认中国气候模式研发的整体水平与发达国家相比还有明显差距,特别是在高分辨率气候模式的研发方面,中国与国际先进水平的差距在加大。而东亚气候的独特性(Yu, et al, 2004),使得只有依靠中国自己的力量,才能完成适应东亚气候的物理过程参数化方案的研发。

其次,在地球系统模式的研发上,中国起步较晚,差距大。参加 CMIP5 的国际模式,其中地球系统模式有 11 个(Anav, et al, 2013)。中国参加 CMIP5 的模式中,尽管 BCC、BNU、FIO 和 FGOALS-s2 模式都包含碳循环过程,但是其对陆地和海洋碳循环过程的处理都相对简单。如何在原有的物理气候系统模式研究基础之上,进一步完善陆地和海洋碳循环过程,特别是把中国在陆地和海洋生物地球化学循环分量模式研发领域的成果,集成到耦合的地球系统模式中,构成一个整体,使得中国的地球系统模式的研发与国际同步,这是目前需要加强的工作。

第三,在地球气候系统模式的关键组成部分大气环流模式和海洋环流模式的研发上,中国的研发力量依然偏弱。中国目前在研的气候/地球系统模式已经达到 10 个(表 8),但是,作为耦合系统核心组成部分的大气环流模式,目前主要的开发单位还是中国科学院大气物理研究所和中国国家气候中心,而从事具有自主知识产权的大洋环流模式研发工作的则只有中国科学院大气物理研究所。一些新近从事耦合模式研发的单位,主要还是采用国外的大气和海洋分量,这使得将来进行多模式集合模拟时,模式的独立样本数大大降低。

表 8 中国现有的地球/气候系统模式技术指标概览
Table 8 Metrics of current Earth/climate system models in China

模式	研发单位	大气模式	海洋模式	陆面模式	海冰模式	耦合器
1 BCC-ESM (Wu, et al, 2014)	中国国家气候中心	BCC-AGCM ($2.8^\circ \times 2.8^\circ$)	MOM4(高纬度地区 1.0° , 接近赤道加密至 0.3°)	AVIM	CICE	CPL
2 BNU-ESM (Ji, et al, 2014)	北京师范大学	CAM3.5 ($2.8^\circ \times 2.8^\circ$)	MOM4p1(高纬度地区 1.0° , 接近赤道加密至 0.3°)	CoLM	CICE4	CPL
3 CAMS-CSM	中国气象科学研究院	ECHAM5 ($2.8^\circ \times 2.8^\circ$)	MOM4(高纬度地区 2.0° , 赤道经向加密至 0.3°)	JSBACH	FMS-SIS	FMS-coupler
4 CAS-ESM (孙泓川等,2012)	中国科学院大气物理研究所 ICES	IAP4 AGCM ($1.4^\circ \times 1.4^\circ$)	LICOM(1.0° , 赤道经向加密至 0.5°)	CLM	CICE	CPL
5 FIO-ESM (Qiao, et al, 2013)	国家海洋局一所	CAM3.5 ($2.8^\circ \times 2.8^\circ$)	POP2(高纬度地区 1.1° , 赤道地区加密至 0.3° — 0.5°)	CLM	CICE	CPL
6 FGOALS-s2 (Bao, et al, 2013)	中国科学院大气物理研究所 LASG	SAMIL ($1.6^\circ \times 2.8^\circ$)	LICOM(1.0° , 赤道经向加密至 0.5°)	CLM	CICE	CPL
7 FGOALS-g2 (Li, et al, 2013)	中国科学院大气物理研究所 LASG	GAMIL ($2.8^\circ \times 2.8^\circ$)	LICOM(1.0° , 赤道经向加密至 0.5°)	CLM	CICE	CPL
8 CICSIM/CIESM (Wang, 2013)	清华大学地学中心	FDAM ($1.0^\circ \times 1.0^\circ$ / $2.8^\circ \times 2.8^\circ$)	FDOM($0.5^\circ \times 0.5^\circ$ / $1.0^\circ \times 1.0^\circ$)	CLM4	CICE4-LASG	C-coupler
9 ICM (Huang, et al, 2014)	中国科学院大气物理研究所季风中心	ECHAM5 ($3.75^\circ \times 3.75^\circ$)	NEMO2.3(高纬度地区 2.0° , 接近赤道加密至 0.5°)	JSBACH	LIM2	OASIS3
10 NIUST Model 1.0	南京信息工程大学	ECHAM4 ($2.8^\circ \times 2.8^\circ$)	NEMO(高纬度地区 3.0° , 赤道地区加密至 0.6°)	JSBACH	CICE	OASIS3

总结上述 3 个方面,其实可以归纳为一点,即中国在气候系统模式研发方面的创新能力的不足。模式的发展涉及到对大气动力学、热力学、大气、海洋、海冰、陆面、生物过程的认知、以及它们之间相互作用过程的认识;涉及到将这些认识用数学方式表达出来,并最终在高性能计算机上把这种表达用计算结果体现出来。中国在这几个方面较之国际先进水平有差距,缩短与国际先进水平的差距尚需要长期不懈的努力。

7 中国地球气候系统模式发展面临的机遇

中国地球气候系统模式的发展,也面临着前所未有的良好机遇,这主要体现在以下方面。

(1)国家的高度重视和财力支持。中国目前已经通过中国科学技术部的 973 和 863 项目、中国科学院的战略先导项目、中国气象局和中国国家海洋局的行业专项项目、中国国家自然科学基金等经费渠道,加大对气候模式研发工作的支持力度。据统计,目前在研的 973 项目中,与气候模式研发直接相关的已经有多个。例如,全球变化重大科学计划项目《高分辨率气候系统模式的研制评估》的目标,是建立具有 50 km 左右水平分辨率,具有良好稳定性和物理守恒性动力框架的大气环流模式,30—50 km 分辨率的海洋环流模式;《碳循环关键过程及其与气候系统耦合的研究》项目的目标,是实现大气、陆地与海洋碳循环-气候的三维耦合,提升中国碳循环与气候变化相互作用的研究水平;《生态和环境系统模式的研制与改进》项目的目标,是建成中国自己的全球植被生态系统动力学模式、全球气溶胶和大气化学模式、全球陆地和海洋生化过程模式(以碳氮循环为主),形成完整的生态和环境系统模式;863 计划重点项目《地球系统模式中的高效并行算法研究与并行耦合器研制》的目标,是研究地球系统模式的高效并行算法、形成并行应用框架,建立具有中国自主知识产权的模块化并行耦合器,将创新的高性能算法和软件实现技术应用于物理气候系统模式的开发中;中国科学院战略性先导科技专项项目《气候模式模拟和预估中的不确定性问题》,旨在通过联合科学院内外的力量,发展中国科学院地球系统模式,针对显著影响气候模式模拟不确定性的关键物理过程,发展参数化方案,通过耦合集成,建成一个中国科学院地球气候系统模式。

(2)中国高性能计算机的快速发展为开展地球系统模式研发、参与国际竞争提供了坚实的计算平台。以“天河一号”、“天河二号”超级计算机的研制成功为标志,中国已经成为世界上少数能够研制千万亿次超级计算机的国家。以 IAP 为例,在“天河一号”超级计算机上,IAP/LASG 已经于 2012 年利用千核进行了准全球 10 km 分辨率的大洋环流模拟试验,随后又利用万核计算资源,成功地进行了全球 12.5 和 6 km 分辨率的全球大气环流模拟试验。这极大地推动了中国高分辨率气候模式的研发工作。

(3)气候模式研发队伍逐渐壮大,青年人才成长很快。近年来,中国能够培养气候模式研发人才的教学和科研机构逐渐增多,除了传统的中国科学院大气物理研究所、南京大学、中国海洋大学、北京大学等单位之外,近年来北京师范大学、清华大学、南京信息工程大学、中国气象科学研究院等单位,亦开始建立专门的系所或者研究中心,启动气候模式的研发工作,同步培养模式研发人才。因此,中国气候模式研发的队伍在逐年壮大,青年人才储备有保障。在国家层次上,气候模式研发队伍唯有保持一定的体量,才能通过竞争与协作的良性互动,提升中国气候模式研发的整体水平。

8 结 语

当前气候模式的发展,正处在从物理气候系统模式走向地球系统模式的关键时期。发展物理气候系统模式的目的,在于理解多圈层相互作用的物理规律;发展地球系统模式的目的,在于通过研究大气、陆地和海洋之间的能量、动量和物质交换,来了解地球能量过程、生态过程和新陈代谢过程的运行规律,并了解土地陆表覆盖、土地利用变化和温室气体排放通过这些过程所引起的气候响应;特别是理解碳、氮和铁循环的生物地球化学耦合过程在气候系统中的作用、以及人类活动对这些循环过程的影响。多学科交叉的特点,决定了地球系统模式的发展必须是开放的、合作的,这也是发达国家发展地球/气候系统模式的成功经验。

中国目前在研的气候/地球系统模式已经达到 10 个(表 8),如何通过国家层次上的协调实现中国气候/地球系统模式的有序发展,这已经成为国家研发经费管理部门当前面临的问题。在此方面,世界

各国作法各自不同,本文不拟对此进行讨论,在此列出美国国家科学院发布的《推动气候模拟的国家战略》的 9 条措施作为本文结语。该战略报告由美国国家研究理事会(NRC)制定,用于指导美国国家的气候模拟事业在未来 10—20 年的发展。NRC 为此成立了“推动气候模拟的国家战略”委员会,该委员会制定的“推动未来 20 年气候模拟事业(美国)国家战略”,包括 4 个主要的组成部分以及 5 个支撑要素(周天军等译,2014)。

(1)推动发展一个通用的、国家级的软件平台,用于支撑一系列围绕不同目的研制的、各种层级上的模式。该软件平台能够支持在超大规模的计算平台上改进气候模式;

(2)组织年度气候模拟论坛,推动对美国的区域和全球模式更为紧密、协调和更为连续的评估,同时推动模式研发和用户间的联系;

(3)培育统一的天气-气候模式,更好地利用天气预报、资料同化和气候模拟之间的协同优势;

(4)开发培训、委派和继续教育“气候释用人员”,使其成为连接模式研究和各种用户的双向界面。

与此同时,国家应该培育和加强:

(5)维持把国家最先进的计算机系统提供给气候模拟使用;

(6)继续支持强大的国际气候观测系统,以全面描述长期的气候趋势和气候变率;

(7)发展培训和奖励体系,吸引最为优秀的计算机和气候科学家从事气候模式发展工作;

(8)加强国家和国际的信息技术(IT)平台建设,更好地支撑气候模拟数据共享和分发;

(9)追求气候科学和不确定性研究方面的进步。

参考文献

陈晓龙,周天军,郭准. 2014. 影响气候系统模式温室气体敏感度的反馈过程:基于 FGOALS 模式的研究. 中国科学:地球科学, 44(2): 322-332

满文敏,周天军. 2011. 外强迫驱动下气候系统模式模拟的近千年大气涛动. 科学通报, 56(25): 2096-2106

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(4): 158-168

孙泓川,周广庆,曾庆存. 2012. IAP 第四代大气环流模式的气候系统模式模拟性能评估. 大气科学, 36(2): 215-233

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

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): 31-38

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(增刊): 15-28

吴其重,冯锦明,董文杰等. 2013. BNU-ESM 模式及其开展的 CMIP5 试验介绍. 气候变化研究进展, 9(4): 291-294

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

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

张学洪,郭裕福,袁重光等. 1999. 中国科学院大气物理研究所环流模式(GCM)研究的成就//陶诗言, Ricnes M R, 陈洋勤等. 《温室效应与气候变化研究》:中国科学院、美国能源部“二氧化碳导致的气候变化”联合研究进展(1984—1999). 北京:海洋出版社, 5-13

周天军. 2000. LASG 海陆气耦合模式的发展与应用. 2000 年地球科学领域国家重点实验室评估代表性成果学术报告. 中国科学院大气物理研究所, 2000 年 3 月 3

周天军,张学洪,俞永强. 2000. 气候系统模式中气-水-冰-海-陆耦合的耦合方法. 科学通报, 45(19): 2097-2100

周天军,王在志,宇如聪等. 2005a. 基于 LASG/IAP 大气环流谱模式的气候系统模式. 气象学报, 63(5): 702-715

周天军,宇如聪,王在志等. 2005b. 大气环流模式 SAMIL 及其耦合模式 FGOALS-s. 北京:气象出版社, 288pp

周天军,邹立维等译. 2014. 推动气候模拟的美国国家战略. 北京:气象出版社, 出版中

Anav A, Friedlingstein P, Kidston M, et al. 2013. Evaluating the land and ocean components of the global carbon cycle in the CMIP5 Earth System Models. J Climate, 26(18): 6801-6843

Arora V K, Scinocca J F, Boer G J, et al. 2011. Carbon emission limits required to satisfy future representative concentration pathways of greenhouse gases. Geophys Res Lett, 38(5): L05805, doi:10.1029/2010GL046270

Bao Q, Lin P P, Zhou T J, et al. 2013. The flexible global ocean-atmosphere-land system model, spectral version 2; FGOALS-s2. Adv Atmos Sci, 30(3): 561-5760, doi:10.1007/s00376-012-2113-9

Bellenger H, Guilyardi E, Leloup J, et al. 2013. ENSO representation in climate models: From CMIP3 to CMIP5. Climate Dyn, 42: 1999-2018, doi:10.1007/s00382-013-1783-z

Chen X L, Zhou T J, Guo Z. 2014. Climate sensitivities of two versions of FGOALS model to idealized radiative forcing. Sci China Earth Sci, 57(6): 1363-1373, doi:10.1007/s11430-013-4692-4

Collins W J, Bellouin N, Boucher M D, et al. 2011. Development and evaluation of an Earth-System model-HadGEM2. Geosci Model Dev, 4(2): 997-1062, doi:10.5194/gmdd-4-997-2011

Dufresne J L, Foujols M A, Denvil S, et al. 2013. Climate change projections using the IPSL-CM5 earth system model: From CMIP3 to CMIP5. Climate Dyn, 40: 2123-2165

Dunne J P, John J G, Adcroft A J, et al. 2012. GFDL's ESM2 global coupled climate-carbon earth system models. Part I: Physi-

- cal formulation and baseline simulation characteristics. *J Climate*, 25(19): 6646-6665
- Flato G, Marotzke J, Abiodun B, et al. 2013. Evaluation of climate models// Stocker T F, Qin D, Plattner GK, et al. *Climate Change 2013. The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA: Cambridge University Press, 741-866
- Gates W L, Rowntree P R, Zeng Q C, et al. 1990. Validation of climate model// Houghton J T, Jenkins G J, Rphraume J J. *Climatic Change 1990: The IPCC Scientific Assessment. Report prepared for Intergovernmental Panel on Climate Change by Working Group I Cambridge, Great Britain, New York, NY, USA and Melbourne, Australia; Cambridge University Press*
- Gates W L, Mitchell J F B, Boer G J, et al. 1992. Climate modeling, climate prediction and model validation// Houghton J T, Callander B A, Varney S K. *Climate Change 1992: The Supplementary Report to the IPCC Scientific Assessment. Report prepared for Intergovernmental Panel on Climate Change by Working Group I combined with Supporting Scientific Material*. Cambridge, Great Britain, New York, NY, USA, and Victoria, Australia; Cambridge University Press
- Gates W L, Henderson-Sellers A, Boer G J, et al. 1995. Climate models evaluation// Houghton J T, Meira Filho L G, Callander B A, et al. *Climate Change 1995: The Science of Climate Change. Contribution of Working Group I to the Second Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge Great Britain, New York, NY, USA, and Melbourne, Australia; Cambridge University Press
- Giorgetta M A, Jungclaus J, Reick C H, et al. 2013. Climate and carbon cycle changes from 1850 to 2100 in MPI-ESM simulations for the Coupled Model Intercomparison Project phase 5. *J Adv Model Earth Syst*, 5(3): 572-597, doi:10.1002/jame.20038
- He C, Zhou T J. 2014. The two interannual variability modes of the Western North Pacific Subtropical High simulated by 28 CMIP5-AMIP models. *Climate Dyn*, doi:10.1007/s00382-014-2068-x (in press)
- Huang P, Wang P, Hu K, et al. 2014. An introduction to the Integrated Climate Model of the Center for Monsoon System Research and its simulated influence of El Niño on East Asian-western North Pacific climate. *Adv Atmos Sci*, doi: 10.1007/s00376-014-3233-1
- Ilyina T, Six K D, Segsneider J, et al. 2013. Global ocean biogeochemistry model HAMOCC: Model architecture and performance as component of the MPI-Earth system model in different CMIP5 experimental realizations. *J Adv Model Earth Syst*, 5(2): 287-315, doi:10.1029/2012MS000178
- Ji D, Wang L, Feng J, et al. 2014. Description and basic evaluation of BNU-ESM version 1. *Geosci Model Dev Discuss*, 7(2): 1601-1647
- Jones C D, Hughes J K, Bellouin N, et al. 2011. The HadGEM2-ES implementation of CMIP5 centennial simulations. *Geosci Model Dev*, 4(3): 543-570, doi: 10.5194/gmd-4-543-2011
- Li L J, Lin P F, Yu Y G, et al. 2013. The flexible global ocean-atmosphere-land system model; Grid-point version 2; FGOALS-g2. *Adv Atmos Sci*, 30(3): 543-560
- Long M C, Lindsay K, Peacock S, et al. 2013. Twentieth-century oceanic carbon uptake and storage in CESM1 (BGC). *J Climate*, 26(18): 6775-6800
- Masui T, Matsumoto K, Hijioka Y, et al. 2011. An emission pathway for stabilization at 6 W/m² radiative forcing. *Climatic Change*, 109(1-2): 59-76
- McAvaney B J, Covey C, Joussaume S, et al. 2001. Model evaluation// Houghton J T, Ding Y, Griggs D J, et al. *Climate Change 2001: The Science Basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA: Cambridge University Press
- Meehl G A, Boer J, Covey C, et al. 1997. Intercomparison makes for a better climate model. *Eos, Trans Amer Geophys Union*, 78(41): 445-451
- Meehl G A, Boer J, Covey C, et al. 2000. The Coupled Model Intercomparison Project (CMIP). *Bull Amer Meteor Soc*, 81: 313-318
- Meehl G A, Covey C, McAvaney B, et al. 2005. Overview of the coupled model intercomparison project. *Bull Amer Meteor Soc*, 86(1): 89-93
- Meehl G A, Covey C, Delworth T, et al. 2007. The WCRP CMIP3 multimodel dataset: A new era in climate change research. *Bull Amer Meteor Soc*, 88(9): 1383-1394, doi:10.1175/BAMS-88-9-1383
- Moss R H, et al. 2009. Towards new scenarios for analysis of emissions, climate change, impacts, and response strategies. *IPCC Expert Meeting Report, IPCC, Geneva, 25pp*
- Qiao F L, Yuan Y L, Yang Y Z, et al. 2004. Wave-induced mixing in the upper ocean: Distribution and application in a global ocean circulation model. *Geophys Res Lett*, 31: L11303, doi: 10.1029/2004GL019824
- 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, doi:10.1002/jgrc.20327
- Randall D A, Wood R A, Bony S, et al. 2007. Climate models and their evaluation// Solomon S, Qin D, Manning M, et al. *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge, United Kingdom, and New York, NY, USA: Cambridge University Press
- Riahi K, Rao S P, Krey V, et al. 2011. RCP8.5: A scenario of comparatively high greenhouse gas emissions. *Climatic Change*, 109(1-2): 33-57
- Rogelj J, Meinshausen M, Knutti R. 2012. Global warming under

- old and new scenarios using IPCC climate sensitivity range estimates. *Nature Climate Chang*, 2(4): 248-253
- Shao P, Zeng X B, Sakaguchi K, et al. 2013. Terrestrial carbon cycle: Climate relations in eight CMIP5 Earth System Models. *J Climate*, 26(22): 8744-8764
- Song F F, Zhou T J. 2014a. Interannual variability of East Asian summer monsoon simulated by CMIP3 and CMIP5 AGCMs: Skill dependence on Indian Ocean-Western Pacific anticyclone teleconnection. *J Climate*, 27(4): 1679-1697
- Song F F, Zhou T J, Qian Y. 2014b. Responses of East Asian summer monsoon to natural and anthropogenic forcings in the 17 latest CMIP5 models. *Geophys Res Lett*, 41(2): 596-603, doi: 10.1002/2013GL058705
- Song Y J, Qiao F L, Song Z Y. 2012. Improved simulation of the South Asian summer monsoon in a coupled GCM with a more realistic ocean mixed layer. *J Atmos Sci*, 69(5): 1681-1690
- Song Z Y, Qiao F L, Wang C Z. 2011. The correctness to the spuriously simulated semi-annual cycle of the sea surface temperature in the equatorial eastern Pacific. *Sci China Earth Sci*, 54(3): 438-444, doi:10.1007/s11430-011-4176-3
- Sperber K R, Annamalai H, Kang I S, et al. 2013. The Asian summer monsoon: An intercomparison of CMIP5 vs. CMIP3 simulations of the late 20th century. *Climate Dyn*, 41(9-10): 2711-2744
- Taylor K E, Stouffer R J, Meeh G A. 2012. An overview of CMIP5 and the experiment design. *Bull Amer Meteor Soc*, 93(4): 485-498
- Thomson A M, Calvin K V, Smith S J, et al. 2011. RCP4.5: A pathway for stabilization of radiative forcing by 2100. *Climatic Change*, 109: 77-94
- Tjiputra J F, Roelandt C, Bentsen M, et al. 2013. Evaluation of the carbon cycle components in the Norwegian Earth System Model (NorESM). *Geosci Model Dev*, 2: 845-887
- van Vuuren D P, Stehfest E, den Elzen M G J, et al. 2011. RCP2.6: Exploring the possibility to keep global mean temperature increase below 2°C. *Climatic Change*, 109: 95-116
- Volodin E M, Dianskii N A, Gusev A V. 2010. Simulating present day climate with the INMCM4.0 coupled model of the atmospheric and oceanic general circulations. *Izv Atmos Ocean Phys*, 46(4): 414-431
- Wang B. 2013. Preparing for CMIP6 in China. WGCM17 Meeting, 1-3 Oct, 2013, Victoria, Canada
- Wang H J, Zeng Q C, Zhang X H. 1993. The numerical simulation of the climatic change caused by CO₂ doubling. *Sci China Chem*, 36(4): 451-462
- Watanabe S, Hajima T, Sudo K, et al. 2011. MIROC-ESM: Model description and basic results of CMIP5-20c3m experiments. *Geosci Model Dev Discuss*, 4(2): 1063-1128, doi:10.5194/gmdd-4-1063-2011
- 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, doi:10.1007/s00382-008-0487-2
- 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: 4326-4347, doi:10.1002/jgrd.50320
- 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, doi:10.1007/s13351-014-3041-7
- Yu Rucong, Wang Bin, Zhou Tianjun. 2004. Climate effects of the deep continental stratus clouds Generated by Tibetan Plateau. *J Climate*, 17: 2702-2713
- Yu Y, Zhang X. 1998. A modified air-sea flux anomaly coupling scheme. *Chin Sci Bull*, 43: 866-870
- Yu Y Q, Yu R C, Zhang X H, et al. 2002. A flexible coupled ocean-atmosphere general circulation mode. *Adv Atmos Sci*, 19: 169-190
- 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
- Yu Y Q, Zhi H, Wang B, et al. 2008. Coupled model simulations of climate changes in the 20th century and beyond. *Adv Atmos Sci*, 25(4): 641-654
- Zhang J, Li L, Zhou T J, et al. 2013. Variation of surface temperature during the last millennium in a simulation with the FGOALS-gl climate system model. *Adv Atmos Sci*, 30(3): 699-712, doi:10.1007/s00376-013-2178-0
- Zhang X H, Shi G, Liu H, et al. 2000. IAP Global Ocean-Atmosphere-Land System Model. Beijing: Science Press, 251pp
- Zhou T J, Zhang X H, Wang S W. 2000a. The relationship between the thermohaline circulation and climate variability. *Chin Sci Bull*, 45(11): 1052-1056
- Zhou T J, Zhang X H, Yu Y Q, et al. 2000b. Response of IAP/LASG GOALS model to the coupling of air-sea freshwater exchange. *Adv Atmos Sci*, 17(3): 473-486
- Zhou T J, Yu Y Q, Liu H L, et al. 2007. Progress in the development and application of climate ocean models and ocean-atmosphere. *Adv Atmos Sci*, 24(6): 1109-1120
- Zhou T J, Wu B, Wen X Y, et al. 2008. A fast version of LASG/IAP climate system model and its 1000-year control integration. *Adv Atmos Sci*, 25(4): 655-672
- Zhou T, Chen X, Dong L, et al. 2014. Chinese contribution to CMIP5: An overview of five Chinese models' performances. *J Meteor Res*, 28(4): 481-510, doi: 10.1007/s13351-014-4001-y.