

BCC 气候系统模式开展的 CMIP5 试验介绍

Introduction of CMIP5 experiments carried out by BCC climate system model

辛晓歌, 吴统文, 张洁

中国气象局国家气候中心, 北京 100081

气候系统模式是研究气候变化机理和预测气候未来变化不可替代的工具。世界气候研究计划(WCRP)组织的耦合模式比较计划(CMIP), 为国际耦合模式的评估和后续发展提供了重要的平台。参与该计划的试验数据资料被广泛应用于气候变化相关机理以及未来气候变化特征预估等方面的研究, 其研究结果是政府间气候变化专门委员会(IPCC)评估报告的重要内容之一。CMIP 在经历了 CMIP1、CMIP2 和 CMIP3 几个阶段之后, 于 2008 年 9 月, 启动了第五阶段的模式试验计划(CMIP5)。该试验计划新增了一些模式试验, 目的是解决从第四次评估过程中涌现出的主要科学问题, 以丰富现有气候变化理论和提高对未来气候变化的预估的能力。如过去的 CMIP 计划一样, 试验的评估研究结果将为 IPCC 第五次评估报告(IPCC AR5, 计划在 2013 年出版)提供有价值的科学参考信息。

目前, CMIP5 试验的开展已成为国内外气候模式工作组的首要工作之一。国家气候中心新发展的气候系统模式参与了 CMIP5 试验计划。自 CMIP5 试验设计^[1]在 2009 年 10 月公布以来, 国家气候中心开始致力于试验数据的准备、输出物理量添加和试验的开展。目前, 除个别不具备开展条件的试验外, 大部分试验均已顺利完成。模式试验资料在经过 CMOR 后处理之后, 已经发布到 PCMDI 网站(<http://pcmdi3.llnl.gov/esgset/>), 可供国内外学者下载使用。

相对于 CMIP3, CMIP5 试验设计增加了年代际近期预测试验、包含碳循环的气候试验和诊断气候反馈的敏感性试验。试验数目较多, 且彼此间存在联系, 需要使用者投入较大精力进行了解。本文的目的是对国家气候中心开展的 CMIP5 试验进行分类介绍, 给出各个试验的主要信息, 以方便气候研究领域的科学家了解和使用, 提高试验资料的利用率。根据试验目的和方法的不同, 以下第一部分简要介绍 BCC 气候系统模式和强迫场, 第二部分介绍 BCC 气候系统模式开展的 CMIP5 试验; 第三部分分析 BCC 两个气候模式的瞬时气候灵敏度。

1 BCC 模式和强迫场介绍

参与 CMIP5 试验的 BCC 气候系统模式有两个版本: BCC_CSM1.1 和 BCC_CSM1.1-M, 二者的区别仅在于大气模式的水平分辨率。BCC_CSM1.1 的大气模式分量为 BCC-AGCM2.1, 分辨率为 T42, 网格距约为 2.8°; 而 BCC_CSM1.1-M 的大气模式分量为 BCC-AGCM2.2, 水平分辨率为 T106, 网格距约为 1°; 两个大气模式的垂直方向均为 26 层, 使用了相同的动力框架和物理过程。已有工作对 BCC-AGCM2.1 模式基本性能进行了评估^[2-3]。

BCC_CSM1.1 和 BCC_CSM1.1-M 两个气候模式版本使用了同样的陆面、海洋、海冰分量模式, 分别为 BCC-AVIM、MOM4 和 SIS。陆面模式分量 BCC-AVIM1.0 是一个大气植被相互作用模式, 在 NCAR 陆面模式 CLM3 物理模块的基础上, 引入了国内发展的动态植被和土壤碳循环模型 AVIM2^[4]。海洋分量模式为 GFDL 发展的 MOM4_L40, 水平分辨率是 1°×1°, 经向在热带地区加密到 1/3°, 垂直 40 层。海冰分量为 GFDL 发展的模式 SIS, 水平分辨率与 MOM_L40 相同。两个气候系统模式均加入了 OCMIP 碳循环模块, 满足 CMIP5 中碳循环试验设计的要求。

收稿日期: 2012-05-02 ; 修回日期: 2012-05-10

资助项目: 国家重点基础研究发展规划项目(2010CB951903); 国家自然科学基金项目(41105054); 公益性行业(气象)科研专项(GYHY201106022)

作者简介: 辛晓歌, 女, 副研究员, 从事气候模式评估和气候变化研究, xinxg@cma.gov.cn

试验所使用强迫场资料包括温室气体、气溶胶、臭氧、太阳常数和碳排放均是 CMIP5 统一提供的：温室气体包括 CO₂、N₂O、CH₄、CFC11 和 CFC12，资料的时间分辨率为 1 年；气溶胶包括硫酸盐、海盐、黑炭、有机碳和沙尘，资料间隔为 10 年，目前模式中只考虑了气溶胶的直接效应；臭氧为逐月平均观测资料；太阳常数和碳排放资料为逐年平均资料。同时模式还使用了 Ammann 等整理的逐月火山气溶胶资料^[5]，用硫酸盐的光学厚度表示。该资料被用于 NCAR CCSM3 气候模式开展的 CMIP3 20 世纪模拟试验^[6]。

2 BCC 气候系统模式开展的 CMIP5 试验

根据试验性质不同，可将 CMIP5 试验分为长期气候试验、碳循环气候试验和年代际预测试验，针对试验的模拟时间、样本数目和强迫场等主要信息进行详细介绍。

2.1 长期气候试验

BCC 模式开展的长期气候试验包括工业革命前控制试验、历史试验、未来情景试验、气候归因试验、古气候试验和气候灵敏度试验。下文中所列试验名称即为 CMIP5 标准试验简称*。

工业革命前控制试验：piControl。该试验是将温室气体、气溶胶、臭氧和太阳常数固定在 1850 年的基础上循环积分，在积分稳定以后取 500 年，得到工业革命前气候的平衡状态，是历史试验、气候灵敏度等试验的参照试验，并为其提供初始场资料。该试验多用来分析无外强迫变化时的模式内部变率，与历史试验和其它强迫试验进行对比，还可以研究外强迫的响应。

历史试验：historical。相当于 IPCC AR4 中的 20 世纪模拟试验（20C3M）。该试验是在 piControl 试验的基础上选取初始场进行积分，积分时间为 1850 至 2012 年。采用随时间变化的强迫场包括温室气体、太阳常数、火山活动、臭氧和气溶胶。其中，1850-2005 年的强迫场为观测值，2006-2012 年选取 rcp85 的强迫场资料。Historical 试验共开展三个样本，每个样本的不同仅在于初始场。

RCP 未来情景试验：rcp85、rcp60、rcp45 和 rcp26。试验名称 RCP 后的数字代表该情景在 2100 年达到的辐射强迫约分别为 8.5、6.0、4.5 和 2.6 W m⁻²。在 2006-2099 年的情景预测中，无火山气溶胶的变化，温室气体、太阳常数、臭氧、气溶胶均随时间变化，但太阳常数为包含 11 年周期的稳定状态。rcp60 试验的积分时间为 2006 至 2099，其它三种情景的积分时间均延续了 200 年，这后 200 年的强迫场只有温室气体和太阳常数的变化，臭氧、气溶胶强迫场均固定在 2100 年。

气候归因试验：historicalGhg 和 historicalNat。historicalGhg 的强迫场中只有温室气体随时间变化，historicalNat 是只包含自然强迫（太阳常数和火山气溶胶）变化的试验，积分时段同 historical，为 1850-2012 年。historicalGhg 的温室气体强迫场在 2005 年之后采用 RCP8.5 的强迫资料。这两个试验主要用来检验气候变化的归因。

古气候试验：midHolocene 和 past1000。这两个试验也是古气候模式比较计划 PMIP3 的试验内容。MidHolocene 是全新世中期古气候试验，轨道参数和温室气体固定在全新世中期水平上保持不变，其它强迫条件同 piControl 试验，在 piControl 试验基础上进行滚动积分，达到稳定之后取 100 年的试验结果。Past1000 为过去千年气候瞬变模拟试验，要求采用逐年变化的太阳常数、火山气溶胶、温室气体以及轨道参数。各强迫场的具体说明参见 Schmidt 等^[7]。试验中臭氧、硫酸盐、植被、地形等设置同 piControl。该试验在 850 年的基础上进行 spin-up 调整，稳定后从 850 年积分至 1850 年。

气候灵敏度试验：1pctCO₂ 和 abrupt4xCO₂。这两个试验中仅有 CO₂ 浓度随时间变化，1pctCO₂ 试验中的 CO₂ 浓度每年增加 1%，其它强迫条件同 piControl，从 piControl 选取初始场，积分 140 年，这时 CO₂ 浓度达到原来的 4 倍左右。abrupt4xCO₂ 试验的初始场与 1pctCO₂ 相同，但 CO₂ 浓度在积分的第一年就增加至工业革命前的 4 倍，然后循环积分 150 年。1pctCO₂ 试验用来诊断瞬时气候灵敏度。abrupt4xCO₂ 试验用来诊断平衡气候灵敏度，也是可以用来诊断 CO₂ 变化时辐射的快速响应。

BCC_CSM1.1 开展了所有以上长期气候试验，BCC_CSM1.1-M 未开展古气候试验，其它试验均开展完成。

* http://cmip-pcmdi.llnl.gov/cmip5/docs/cmip5_data_reference_syntax.pdf

2.2 碳循环气候试验

碳循环气候试验与长期气候试验的不同在于，前者用来强迫模式的是碳排放，后者是 CO₂ 浓度。在碳循环气候试验中，CO₂ 浓度是由模式通过碳循环自身模拟的。对于模式来说，CO₂ 浓度模拟的好坏也是衡量模式能否合理再现碳循环的指标之一。碳循环气候试验包括工业革命前控制试验、历史试验、未来 RCP8.5 情景试验和诊断碳反馈试验。

碳循环工业革命前控制试验：**esmControl**。该试验的强迫条件同 **piControl** 试验，但 CO₂ 浓度是在无碳排放源条件下模式积分结果，在达到稳定后取 250 年的模式输出。

碳循环历史试验：**esmHistorical**。在该试验中，除 CO₂ 浓度外，试验条件与 **historical** 试验相同。在 **esmHistorical** 试验中，由观测的碳排放资料驱动模式，积分时间为 1850 年至 2012 年。2005 年以后的强迫场采用 RCP8.5 情景资料。

碳循环 RCP8.5 情景试验：**esmRcp85**。由碳排放情景资料强迫模式，其它强迫条件与 **rcp85** 相同。该试验可以用来评估在碳-气候反馈影响大气 CO₂ 浓度和气候的条件下，未来的气候如何变化。

碳-气候反馈诊断试验：**esmFixClim** 和 **esmFdbk**。这两个试验均为诊断碳-气候反馈强度的敏感性试验，**esmFixClim** 是保持模式中辐射部分的 CO₂ 浓度在 **piControl** 的水平上不变，而碳循环模块的 CO₂ 随时间变化。根据 CO₂ 变化的不同又分为 **esmFixClim1** 和 **esmFixClim2**。其中，**esmFixClim1** 试验中 CO₂ 浓度每年增加 1%，积分时间为 140 年；**esmFixClim2** 中 CO₂ 浓度是观测（1850-2005）和 RCP4.5 情景（2006-2100 年）的浓度值，积分时间为 1850-2100 年。**esmFdbk** 试验是将碳循环部分的 CO₂ 浓度保持不变，辐射模块中 CO₂ 浓度随时间变化。根据 CO₂ 变化的不同又分为 **esmFdbk1** 和 **esmFdbk2**。其中，**esmFdbk1** 中 CO₂ 浓度每年增加 1%，积分 140 年；**esmFdbk2** 中 CO₂ 浓度是观测（1850-2005）和 RCP4.5 情景（2006-2100 年）的浓度值，积分时间为 1850-2100 年。

BCC_CSM1.1 模式开展了所有的碳循环试验，BCC_CSM1.1-M 仅开展了碳循环工业革命前控制试验、碳循环历史试验和碳循环 RCP8.5 情景试验。

2.3 年代际预测试验

年代际预测试验是将模式的初始状态用观测海洋资料进行初始化，在外强迫作用下进行 10-30 年的模拟预测。BCC 模式使用的观测海洋资料是 Simple Ocean Data Assimilation (SODA) 全球月平均海洋各层温度再分析资料^[8]，采用的是把模式模拟的海洋温度向 SODA 海洋温度观测资料恢复 (**nudging**) 的方法，恢复时间尺度为 1 天。只有 BCC_CSM1.1 模式版本参与了年代际预测试验。

CMIP5 中第一组年代际预测试验是将海洋的初始条件在 1960、1965、1970、1975、1980、1985、1990、1995、2000、2005 年进行初始化，然后积分至第 10 年，至少开展 3 个样本，可以增加至 10 个样本；第二组试验是在 1960、1980 和 2005 年初始化的试验开展 30 年的积分，至少 3 个样本，选择性的增加至 10 个样本。在 BCC_CSM1.1 开展的年代际预测试验(**decadalXXXX**)中，这 10 个年份开始预测的试验均开展了 30 年，共 4 个样本。4 个样本中将模式模拟向观测资料 **nudging** 的时间为积分年 1 月 1 日至 9 月 1 日、11 月 1 日、12 月 1 日和次年 1 月 1 日。另外，除了这 10 个年份的初始化积分，应 CMIP5 要求，还在 1960-2006 年中其余每一年都开展了年代际预测试验，积分时间为 10 年，共 3 个样本，3 个样本中将模式模拟向观测资料 **nudging** 的时间为积分年 1 月 1 日至 9 月 1 日、11 月 1 日和次年 1 月 1 日。这些试验的强迫场在 2005 年之前同历史试验 **historical** 的强迫场完全一致，在 2005 年之后采用 RCP4.5 情景的强迫场。

BCC_CSM1.1 模式还开展了无火山强迫的年代际预测试验(**noVolcXXXX**)。该试验是指在 1960、1975、1980、1985、1990 年进行初始化的试验中无火山气溶胶强迫的作用，共开展 3 个样本。**volcIn2010** 试验，是指在 2005 年底进行初始化并预测的试验中，在 2010 年施加一个 **Pinatubo** 火山强迫，开展 10 年的积分，共 3 个样本。这两类试验可以用来研究火山对年代际气候预测的作用。

3 BCC 不同版本模式瞬时气候灵敏度

瞬时气候灵敏度是衡量模式对温室气体强迫响应的重要指标，指模式在 CO₂ 每年增加 1% 的条件下，

CO₂ 浓度增加至原来 2 倍时，全球平均气温增加的幅度。这一指标能够给利用模式研究气候变化和响应的科学家以重要的参考。图 1 给出了 BCC 两个版本气候系统模式 1pctCO₂ 试验模拟的全球平均地表气温相对于第一年的异常序列。由于 CO₂ 浓度每年增加 1%，两个模式模拟的温度随着时间基本呈线性增加。在前 70 年，BCC_CSM1.1-M 模式模拟的增温略高于 BCC_CSM1.1 模式，而在之后低于 BCC_CSM1.1 模式。在 CO₂ 浓度为初始值 2 倍时（第 70 年），BCC_CSM1.1 的全球平均地表气温增加了 1.85℃，而 BCC_CSM1.1-M 增加 1.94℃。在 IPCC AR4 多模式结果中，气候灵敏度的可信度范围为 1℃-3℃，平均值为 1.8℃，所以，BCC_CSM1.1 模式的气候灵敏度与过去多模式平均结果更为接近。

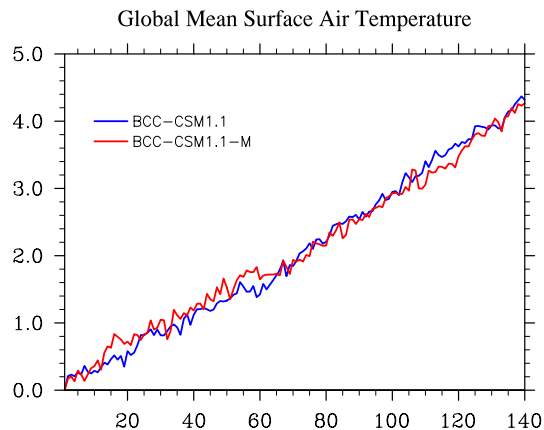


图 1 BCC_CSM1.1 和 BCC_CSM1.1-M 模式开展的 1pctCO₂ 试验模拟的全球平均地表气温异常(相对于第一年)。

Figure 1 Global mean surface air temperature anomalies relative to the first year simulation in 1pctCO₂ experiment with BCC_CSM1.1 and BCC_CSM1.1-M.

参考文献

- [1] Taylor K E, Stouffer R J, Meehl G A. An overview of CMIP5 and the experiment design [J]. Bull Amer Meteorol Soc, 2011, doi: 10.1175/BAMS-D-11-00094.1
- [2] Wu Tongwen, Yu Rucong, Zhang Fang, et al. The Beijing Climate Center for Atmospheric General Circulation Model (BCC-AGCM2.0.1): Description and its performance for the present-day climate [J]. Clim Dyn, 2010, 34: 123-147
- [3] Wu Tongwen,.: A mass-flux cumulus parameterization scheme for large-scale models: description and test with observations [J]. Clim Dyn, 2011, DOI: 10.1007/s00382-011-0995-3
- [4] Ji Jin Jun, Huang Mei, Li Kerang. Prediction of carbon exchange between China terrestrial ecosystem and atmosphere in 21st Century [J]. Science in China series D: Earth Science, 2008, 51: 885-898
- [5] Ammann C M, Meehl G A, Washington W M, et al. A monthly and latitudinally varying volcanic forcing dataset in simulations of 20th century climate [J]. Geophys Res Lett, 2003, 30, 1657, doi:10.1029/2003GL016875
- [6] Miller R L, Schmidt G A, Shindell D T. Forced annular variations in the 20th century Intergovernmental Panel on Climate Change Fourth Assessment Report models [J]. J Geophys Res, 2006, 111, D1801, doi:10.1029/2005JD006323
- [7] Schmidt G A, Jungclaus J H, Ammann C M, et al. Climate forcing reconstructions for use in PMIP simulations of the last millennium (v1.0) [J]. Geosci Model Dev, 2011: 33-45, doi:10.5194/gmd-4-33-2011
- [8] Carton J A, Giese B S, Grodsky S A. Sea level rise and the warming of the oceans in the SODA ocean reanalysis [J]. J Geophys Res, 2005, 110.C09006, doi:10.1029/2004JC002817

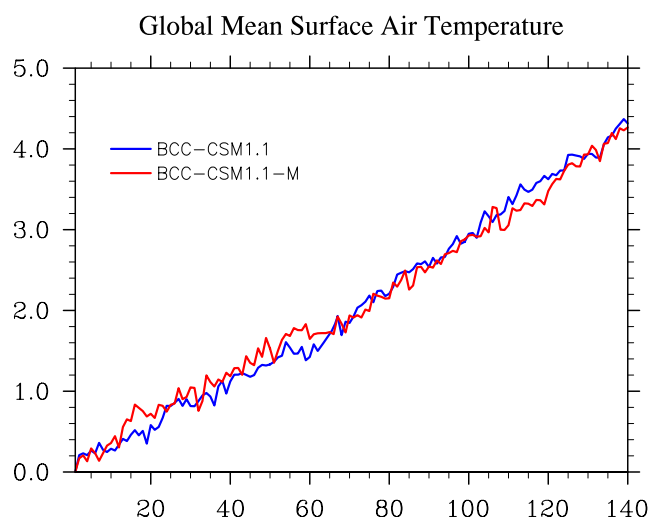


图 1 BCC_CSM1.1 和 BCC_CSM1.1-M 模式开展的 1pctCO₂ 试验模拟的全球平均地表气温异常（相对于第一年）。

Figure 1 Global mean surface air temperature anomalies relative to the first year simulation in 1pctCO₂ experiment with BCC_CSM1.1 and BCC_CSM1.1-M.