两种不同减排情景下 21 世纪气候变化的数值模拟*

辛晓歌 吴统文 王在志

XIN Xiaoge WU Tongwen WANG Zaizhi

中国气象局国家气候中心气候系统模式室,北京,100081

Division of Climate System Modeling, National Climate Center, China Meteorological Administration, Beijing 100081, China 2008-08-04 收稿, 2009-04-10 改回.

Xin Xiaoge, Wu Tongwen, Wang Zaizhi. 2009. Numerical simulation of climate change in 21 century under two different mitigation scenarios. *Acta Meteorologica Sinica*, 67(6):935-946

Abstract The climate system model BCC– CSM1. 0, newly developed by National Climate Center, is used to simulate climate influences of two mitigation scenarios (De90 and De07) on global and China climate compared to the B1 emissions scenario. The mitigation scenarios De90 and De07 represent CO₂ emissions are linearly decreased during 2012-2050, and mitigated to half of that in 1990 and 2007 by 2050, respectively. Results show that the global mean surface air temperature simulated by the model under the two mitigation scenarios has been lower than that under the B1 scenario since 2040s. This is twenty years later than when the concentrations of the mitigation scenarios are less than that of the B1 scenario. Although the stabilization emission level of De90 scenario is lower than De07 after 2050, the global warming amplitude under De90 scenario has been lower than that under De07 scenario since 2070. Such delay effect may be related to the inertia of the coupled system (mainly the ocean). By the end of 21 century, the warming amplitudes of De90 and De07 will be lowered by 0.4 °C and 0.2 °C, respectively. Globally, the warming amplitude during 2070–2099 under B1 scenario will be the largest in the high amplitudes of the North Hemisphere and the North Pole. The mitigation scenarios significantly mitigate the warming in those regions. In China, regional mean warming amplitude by the end of 21 century will be higher than the global mean by about 1.2 °C. This will be lowered by De90 and De07 scenario about 0.4 °C and 0.3 °C, respectively. Northern China will be warmer than that in southern China and the southern coasts during 2070–2099. The mitigation emission scenarios significantly decrease the warming amplitude in western China. Seasonally, the global warming during 2070–2099 will be the largest in winter. De90 and De07 can mitigate the warming in each season by about 17% and 10%, respectively.

Key words Climate system model, Greenhouse gases, Mitigation scenarios, Climate change, Simulation

摘 要 利用国家气候中心最新发展的气候系统模式 BCC-CSM1.0 模拟了相对于 B1 排放情景,两种不同减排情景(De90 和 De07,表示按照 B1 情景排放到 2012 年,之后线性递减,至 2050 年时 CO₂ 排放水平分别达到 1990 和 2007 年排放水平一半的情景)对全球和中国区域气候变化的影响。结果表明:两种减排情景下模式模拟的全球平均地表气温在 21 世纪 40 年代以后明显低于 B1 情景,比减排情景浓度低于 B1 的时间延迟了 20 年左右;尽管 De90 减排情景在 2050 年所达到的稳定排放水 平低于 De07 情景,但 De90 情景下的全球增温在 2070 年以后才一致低于 De07 情景,这种滞后可能与耦合系统(主要是海洋)的惯性有关;至 21 世纪末,De90 和 De07 情景下的全球增温幅度分别比 B1 情景降低了 0.4 和 0.2 ℃;从全球分布来看,B1 情景下 21 世纪后 30 年的增温幅度在北半球高纬度和极地地区最大,减排情景能够显著减少这些地区的增温幅度,减排程度越大,则减少越多;在中国区域,B1 情景下 21 世纪末平均增温比全球平均高约 1.2 ℃,减排情景 De90 和 De07 分别比 B1 情景降低了 0.4 和 0.3 ℃,中国北方地区增温幅度高于南方及沿海地区,减排情景能够显著减小中国西部地区的增温幅度;B1 情景下 21 世纪后 30 年全球增温在冬季最高,De90 和 De07 情景分别能够降低各个季节全球升温幅度的 17%和 10%左右。 关键词 气候系统模式,温室气体,减排,气候变化,模拟

* 资助课题:国家科技支撑计划(2007BAC03A01、2007BAC29B03、2009BAC51B03),财政部/科技部公益性行业专项(GYHY200806006、 GYHY200706010)。

通讯作者:吴统文,主要从事气候变化与数值模式模拟研究。E-mail:twwu@cma.gov.cn

1 引 言

工业革命以来,随着经济和社会的发展,以石化 为主的能源消耗逐年增加,随之大气中的温室气体 浓度也不断增加,改变了太阳-大气-地球之间的辐 射平衡,使全球地面大气的温度增高。全球增暖已 经对脆弱的生态系统造成了严重影响,并受到国际 社会的普遍关注。政府间气候变化委员会(IPCC: Intergovernmental Panel on Climate Change)已组 织各国科学家进行了4次气候变化及其影响评价的 研究工作。IPCC第4次评估报(IPCC,2007)指出: 过去100年(1906—2005年)全球平均地表气温升 高约0.74℃,近50年观测到的全球平均气温的升 高,在很大程度上可能是由于人类活动所排放的温 室气体增加引起的。

未来温室气体排放的多少势必影响气候变化的 程度,温室气体的排放情景受到人类社会经济发展 途径、政府政策干预程度以及人类自身环境意识等 因素的影响。为此,国际上通过对未来社会经济可 能发展途径做出一定假设,来定量估计未来温室气 体的排放情景。IPCC 第4次评估报告采用了6种 SRES(Special Report on Emission Scenarios)排放 情景,依照排放强度从低到高分别为 B1、A1T、B2、 A1B、A2 和 A1F1。SRES 的 6 种情景不包括额外 的气候干预政策,这意味着不包括明确假定执行《联 合国气候变化框架公约》或《京都议定书》排放目标 的各种情景,并且被认为具有同等的合理性。在第 4次评估报告中,包括中国国家气候中心和中国科 学院大气物理研究所 LASG 的气候系统模式在内 的全球共24个模式参加了未来气候变化的情景预 估试验。研究指出,21世纪全球温度变化幅度因温 室气体排放情景高低而不同,在 B1、A1B 和 A2 情 景下,2090-2099 年全球平均温度较之 1980-1999 年分别增暖 1.8、2.8 和 3.4℃(IPCC,2007)。周天 军等(2008)总结了近年气候变化预估研究的主要进 展,指出全球平均温度在21世纪将继续增暖,增温 幅度因不同排放情景而异。中国国家气候中心第一 代海气耦合模式 NCC/IAP T63 的模拟结果表明, 在 A2、A1B 两种情景下,21 世纪全球温度将分别以 3. 6℃/(100 a)和 2. 5℃/(100 a)的速率上升,中高 纬度地区比低纬度地区增温明显;降水量在大部分

区域(一些亚热带地区除外)都有所增加,其结果与 其他模式预估结果大体一致(Xu, et al, 2005)。未 来 100 年,模式预估的中国区域平均增温趋势高于 全球平均,其中在东北、西北和西南地区增温幅度较 大,降水在中国东北、江淮流域及以南大部分地区明 显增强(姜大膀等,2004;Ding, et al, 2005;汤剑平 等,2008)。

近年来,减缓气候变化已成为国际气候变化研究的热点问题,也是 IPCC AR4 第 3 工作组报告的 主要内容。温室气体减排已经成为世界各国间争论 的热点问题之一,成为影响国家间竞争力的重要因 素。目前国际上一个关键的政策问题是在 21 世纪 中期(《京都议定书》承诺期以后)需要什么程度的排 放量。气候系统模式在温室气体减缓排放情景下对 于未来气候的预估,无疑将为此提供一定的依据。 本文将选取 B1 排放情景作为基准情景,在此基础 上,设计两个减缓情景,利用一个气候系统模式对这 些情景进行模拟,对比减排情景与 B1 情景的模拟 结果,预估温室气体减排所起的作用,以期对政府机 构评估气候变化影响,进而提出适应对策提供一定 的参考依据。

2 模式和试验方案介绍

2.1 模式介绍

近年来,国内外地球气候系统模式得到了快速 发展(王斌等,2008)。中国国家气候中心自 2004 年 开始发展新一代多圈层耦合的气候系统模式 (BCC_CSM),目前已建立了其初级版本 BCC_ CSM1.0,该模式独立于中国国家气候中心参与 IPCC AR4 的前一代耦合模式版本 BCC_CM1.0。 新发展的耦合模式 BCC_CSM1.0 是基于美国国家 大气研究中心(National Center for Atmospheric Research, NCAR)的气候系统模式 CCSM2.0(Kiehl, et al, 2004)发展而来的,包括4个分量模式:大 气、陆面、海冰和海洋。BCC_CSM1.0 与 CCSM2.0 的主要区别在于大气模式和陆面模式,大气模式使 用的是 BCC_ AGCM2. 0. 1, 陆面模式为 CLM3 (Community Land Surface Model version3, Dickinson, et al, 2006)。海冰和海洋模式同 CCSM2.0,分别使 用的是 CSIM4 (Community Sea Ice Model version 4, Briegleb, et al, 2004)和POP^① (ParallelOceanProgram)。

① Smith R D, Gent P R. 2002. In Reference Manual for the Parallel Ocean Program (POP): Ocean Component of the Community Climate System Model (CCSM-2). [Available at http://www.ccsm.ucar.edu/models/ccsm2.0.1/pop/]

各模式分量之间的通讯采用的是 NCAR CCSM2 的 耦合器 CPL5(Kauffman,2006),周天军等(2004)详 细介绍了该耦合器的特点和发展历程。在本文模拟 中,海洋和海冰模式均采用的是三级网格,水平分辨 率约为 1°,海洋模式垂直方向分为 40 层。

该耦合模式的大气分量模式BCC-AGCM2.0.1 是在 NCAR 大气环流模式 CAM3.0 (Community Atmosphere Model version 3, Collins, et al, 2006)的 基础上发展而来的,模式的水平分辨率为 T42,垂直 分为26层。在CAM3.0动力框架的基础上引入了 独特的参考大气和参考地面气压(Wu, et al, 2008), 该参考大气更加适合于对流层中上层和平流层的大 气热力结构;温度和地面气压本身不再是预报变量, 而是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;除水汽预报方程采用半隐式半拉格 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 (Wu, et al, 2008)。模式的物理参数化方案在 CAM3.0 的基础上有以下几个方面的改变(Wu,et al,2010):引入了 Zhang 等(2005)最新质量通量型 积云对流参数化方案,并对其作了进一步调整;引入 了钱正安等(1987)的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,对洋面感热和潜热通量 参数化方案也作了调整。通过 AMIP(Atmospheric Model Intercomparison Project) 试验结果表明, BCC_AGCM2.0.1模式对降水、气温、大气热力结 构和大气环流等的气候态和季节变化有较好的模拟 能力(Wu,et al,2008)。

为了检验模式的稳定性,利用该气候系统模式 进行了 500 年的控制试验积分。耦合积分方法与 Kiehl 等(2006)验证 CCSM2.0 稳定性所采用的方 法一样,即各个分量模式直接进行耦合,海洋模式分 量温度和盐度的初始场采用了 Levitus 等(1994)的 1月观测资料,大气、陆面和海冰分别采用由各个分 量模式单独积分得到的1月物理量场。这种耦合积 分方法的优点是海洋起始于一个与观测接近的物理 量场,缺点是海洋模式分量的积分需要调整足够长 的时间以达到平衡。积分结果表明,模式经历了 200 年的调整期后,耦合系统基本达到平衡(图略)。 中国科学院大气物理研究所耦合模式较早版本 GOALS 采用的耦合方法是,先利用盐度恢复条件 强迫海洋模式到平衡态,接着将恢复条件转换为通 量条件,积分平衡之后与大气模式进行耦合(周天军 等,2000)。其当前耦合模式版本 FGOALS-s 采用 的方法是,先使用数据版的海洋和海冰子模式,即取 观测气候表层海温和气候海冰强迫,进行"陆-气"耦 合的 50 年积分,使得陆面和大气模式达到平衡态, 在此基础上,再将数据版的海洋和海冰模式转换为 实际的海洋和海冰模式,开始进行完全的"海-陆-气-冰"耦合的模式积分(周天军等,2005a,2005b;Zhou, et al, 2008)。

2.2 试验方案

本文利用耦合模式 BCC_CSM1.0 共进行了 5 组实验:工业革命前控制试验、20 世纪气候模拟试 验、B1 情景试验和两个减缓情景试验。工业革命前 控制试验是在原控制试验达到平衡的基础上,将温 室气体和太阳常数设置在 1870 年的水平上进行滚 动积分,在积分 150 年以后,耦合系统已经达到平 衡。在此基础上进行 20 世纪模拟试验,从 1870 年 积分至 1999 年,在积分过程中,采用实际的外强迫 (自然强迫和人为强迫)来驱动模式。在本文模拟 中,所采用的自然强迫为太阳常数的变化,人为外强 迫因子主要考虑温室气体的变化,包括 CO_2 、 CH_4 、 N_2O 、CFC11和 CFC12。

选取 IPCC SRES 情景中排放程度最低的 B1 情 景作为参照,在其基础上设定两种减排情景:一种是 假定 CO₂ 温室气体按照 B1 排放情景排放到 2012 年(《京都议定书》结束年),每年线性递减,至 2050 年时减排到 1990 年温室气体排放水平的一半,并维 持至 2099 年;另一种假定同前一种,不同的是,到 2050 年时减排到 2007 年 CO₂ 排放水平的一半,并 维持至 2099 年。由于这两种减排情景唯一不同之 处在于 2050 年时,分别减排至 1990 年、2007 年 CO₂ 气体排放水平的一半,把这两个试验分别记作 De90 和 De07。

De07 和 De90 两种减排情景均假定了 CO₂ 排 放水平的变化情况,但是在数值试验中,用来强迫模 式的是 CO₂ 浓度,所以需要根据排放水平确定浓度 情景。图 1 给出的是利用实际观测资料得到的每年 CO₂ 排放量和浓度变化情况,排放量资料是由已有 的研究^①综合美国橡树岭国家实验室 CO₂ 信息分析 中心(CDIAC)、世界资源研究所(WRI)和美国能源

① 中国科学院学部专题研究报告. 国际温室气体排放量评价与减排应对策略研究. 2008,75pp



部能源信息管理局(EIA)的数据整理得到的。可以 看出,在20世纪后半期,CO₂排放量水平达到一定 程度后,每年浓度变化量与每年的排放量基本呈线 性关系。

由此可以假定,在未来100年里,CO₂排放量和 浓度变化量应遵循这样的线性关系。根据试验方 案,CO₂浓度变化量在2012—2050年呈线性递减, 即可确定 2012—2050 年每年的浓度变化量。ΔC 表示浓度变化量,在De90情景下,第*i*年浓度变化 量的计算公式为

$$\Delta C_i = \Delta C_{2012} + \frac{\Delta C_{2050} - \Delta C_{2012}}{2050 - 2012} \times (i - 2012)$$

式中 $\Delta C_{2050} = \Delta C_{1990} / 2$ 。

对于 De07 情景,将 ΔC_{1990} 替换为 ΔC_{2007} 即可。 图 2a 和 2c 分别是所得到的 De07 和 De90 减排情景 的浓度变化量。可以看出,两种情景的浓度变化量 均是在 2012—2050 年呈线性递减,在 2050 年以后 浓度变化量稳定至一个水平,De07 情景稳定在 1.02 ×10⁻⁶ (V/V),De90 情景稳定在 0.78×10⁻⁶ (V/V)。

将这样的浓度变化情景在初始年份的浓度值上进行累加,即可得到减排情景的浓度序列,(图 2b 和 2d)。可以看出,De07 和 De90 情景的 CO₂ 浓度均 是在 21 世纪 20 年代以后明显低于 B1 情景,且 De90 情景的 CO₂ 浓度低于 De07 情景。减排试验 De07 和 De90 正是利用这样的浓度序列分别强迫模式进行模拟的。这两个减排试验同 B1 试验一样,也是在 20 世纪模拟试验的基础上进行分枝 (branch)积分,从 2000 年积分至 2099 年。



3 耦合模式对 20 世纪气候模拟结果的检验

为了检验模式的模拟性能,有必要利用观测资料对 BCC_CSM1.0 模拟的 20 世纪模拟结果进行简要的评估。从模拟和 XIE-ARKIN 观测资料 (Xie, et al, 1997)的 1979—1998 年平均夏季降水的分布以及二者之差(图 3)可以看出,模式能够较好

地再现出全球降水多雨带和少雨带的分布,对一些 强降水中心如热带西太平洋、孟加拉湾和印度半岛 以西的降水中心具有较好的模拟能力,也能够克服 在大多数模式中出现的双赤道辐合带现象。模式的 模拟偏差主要表现为:副热带太平洋、青藏高原和阿 拉伯海等地区的降水偏多;孟加拉湾、印度尼西亚地 区和热带大西洋等地区降水偏少。



Fig. 3 Simulation (a), observation (b), and their difference (c) for the mean summer precipitation during 1979-1998 (unit, mm/d)

对 1979—1998 年平均地表气温的模拟以及与 NCAR/NCEP 资料(Kalnay, et al, 1996)的对比(图 4)表明,模式能够较好地模拟出温度由热带地区向 两极地区的递减分布,也能够较为准确地再现热带 地区高温和南极地区低温的幅度和范围。存在的模 拟偏差主要表现为:陆地区域气温比 NCAR/NCEP 资料偏高,北半球太平洋和大西洋地区气温比 NCAR/NCEP 资料偏低。



图 4 同图 3,但为年平均地表气温的情况(单位:K) Fig. 4 Same as Fig. 3 except for the annual mean surface air temperature (unit: K)

图 5 给出了模拟和观测的 1870—1999 年全球 平均地表气温的演变序列。这里所用的观测资料是 英国 CRU(Climate Resarch Unit)资料(Jones, 1994; Mitchell, et al, 2005)。与观测一致, 模拟的全 球平均温度是逐渐递增的, 这种增加趋势在 20 世纪 70 年代以后最为明显。与观测不同的是, 模式没有 再现出 20 世纪 40 年代中期的增暖峰值,这可能与 模式使用的太阳入射强迫资料有关(Meehl, et al, 2006)。将模式的模拟结果与其他模式以及多模式 平均(Zhou, et al, 2006)比较可知,该模式模拟的 20 世纪末增温比多模式集合平均高 0.2℃左右,是模 拟较偏高的模式之一。由于硫酸盐气溶胶具有冷却 效应,模式未使用硫酸盐气溶胶作为外强迫可能是 原因之一。



通过上述比较可知,耦合模式 BCC-CSM1.0 对降水和地表气温气候平均分布的模拟是比较合理 的,同时也较好地模拟出了全球平均气温在 20 世纪 的演变特征。这为利用该耦合模式进行未来情景预 估试验 B1 和减缓情景 De07、De90 试验得到的结果 增加了可信性。

4 B1 和减排试验结果对比分析

4.1 全球地表气温和降水

从 B1 情景和两种减排情景下模式模拟的 1870—2099 年全球平均地表气温和降水量(图 6)。 可以看出,3 种情景下全球平均地表气温在 21 世纪 都是持续增加的。自 21 世纪 40 年代以后,两种减 排情景下的全球平均增温一致低于 B1 情景,这比 减排情景浓度低于 B1 的时间延迟了 20 年左右。 对比 De07 和 De90 情景下的温度序列可知,二者在 减排截止后的 20 年(2050—2070 年),全球平均增 温幅度基本一致,而在 2070—2099 年,De90 情景下 的温度增幅则一致低于 De07 情景。由此看来,尽 管 2050 年时减排到的 CO₂ 排放水平不同,但全球 增温差异在 20 年后才会体现出来,这种滞后效应可 能与耦合系统(主要是海洋)的惯性有关。

2 ℃阈值是欧盟提出的一个衡量全球增温的指标,指全球平均增温在超过工业革命前2 ℃以后会对地球产生威胁性的后果(Meinshausen,2005)。 从本文试验结果可以看出,在 B1 情景下,全球平均 增温与 1870—1899 年平均相比,于 2042 年超过 2 ℃。而在 De90 和 De07 情景下,全球平均增温达到 2 ℃的时间分别比 B1 情景向后延迟了 7 和 6 年。 至 2099 年时,B1 情景模拟的全球平均增温为 2.7 ℃,而 De90 和 De07 情景分别为 2.3 和 2.5 ℃,分 别比 B1 情景减少了 0.4 和 0.2 ℃。



图 6 B1、De07 和 De90 情景下模式模拟的全球平均地表气温(a,单位: ℃) 和降水 (b,单位: mm/d)序列(图中值为相对于 1870—1899 年均值异常序列的 9 点滑动平均) Fig. 6 The global mean surface air temperature (a, unit: ℃) and precipitation (b, unit: mm/d) simulated by the model under B1, De07 and De90 scenarios (the values in the figures are the 9-point running series of the anomalies from the averaged value during 1870-1899)



942

与地表气温相比,全球平均降水量的年际波动 幅度较大(图 6b)。随着 CO₂ 气体浓度的持续增加, 3 种情景模拟的全球降水量的总体趋势均是增加 的。减排情景下模式模拟的降水增加幅度在 2070 年以后才明显低于 B1 情景。至 2099 年时,B1 情景 的降水增幅达0.1 mm/d,De07情景为0.092 mm/d, De90 情景为 0.088 mm/d。

B1 情景下模式模拟的 2070-2099 年 30 年平 均年地表气温相对于气候基准值(1961-1990年平 均)的变化见图 7a。从全球分布来看,陆地的升温 普遍比海洋要高,增温幅度最大位于北半球高纬度 地区,北极部分地区的增温可超过6℃。减排情景 De07 和 De90 下模式模拟结果具有类似的分布特征 (图略),只是升温幅度均有所降低,二者与 B1 情景 的差异见图 7b 和 c。减排情景 De07 能够显著降低 北极地区、北太平洋北部和亚欧副热带地区的地表 气温,降低幅度都在 0.3℃以上。减排情景 De90 (图 7c)比 De07 情景模拟的降温效果更为明显。在 除了欧洲西部的部分地区,几乎所有陆地的温度都 比 B1 情景降低了 0.3℃以上,在极地和北太平洋北 部最为显著,降低幅度达到了 0.9℃。De90 情景下热 带大洋的降温幅度普遍比 De07 情景更大。所以 CO2 减排程度越大,则在全球范围内产生的降温效果越明 显,减排会使北极冰盖遭遇全球增暖的威胁性降低。

4.2 中国地表气温

B1和两种减排情景下模式模拟的中国区域平 均气温序列演变见图 8。这里中国区域取以下 3 个 矩形区域之和表示: $(28^{\circ}-50^{\circ}N, 80^{\circ}-97.5^{\circ}E)$ 、 $(22.5^{\circ}-43^{\circ}N, 97.5^{\circ}-122.5^{\circ}E)$ 和 $(43^{\circ}-54^{\circ}N,$ $117.5^{\circ}-130^{\circ}E)$ 。可以看出, 3 种情景下模式模拟 的中国平均地表气温在 21 世纪逐渐增加,至 2099 年时, B1 情景下中国地表气温比 1870—1899 年平 均增高了 3.9℃, 比全球平均高约 1.2℃, 减排情景 De07 和 De90 下增温分别为 3.6 和 3.5℃, 分别比 B1 情景降低了 0.3 和 0.4℃。与全球平均一样, 减 排情景 De07 和 De90 对于中国区域的降温效果也 具有滞后性, 于 21 世纪 60 年代开始低于 B1 情景。 De90 情景下的气温在 21 世纪 70 年代后低于 De07 情景。



9-point running series of the anomalies from the mean value during 1870-1899)

B1 情景下,模式模拟的 2070—2099 年平均地 表气温相对于气候基准值的变化在中国的分布见图 9a。可以看出,中国北方增温幅度高于南方及沿海 地区,新疆北部、内蒙古北部和东北地区的增温幅度 最大,可达 3 ℃。De07 和 De90 情景下的增温分布 具有类似的特征,只是增温幅度略小(图略)。图 9b 和 c 分别给出 De07 和 De90 情景下模式模拟的 2070—2099 年平均地表气温与 B1 情景的差别。可 见,减排情景 De07 的降温效果在中国西部地区最 明显,比 B1 情景降低 0.45 ℃以上。De90 情景的降 温效果比 De07 情景更明显,在全国大部分地区的 降温都在 0.45 ℃以上。

4.3 各个季节的减排效果

进一步从季节的角度分析全球和中国区域在 B1 情景下的升温幅度以及减排情景的降温效果。 表1给出了各个季节 2070—2099 年全球平均地表 气温相对于 1961—1999 年平均的变化情况。可以 看出,在 B1 情景下,冬季的升温最为明显,可达 2.27 ℃,其次是秋季,夏季的升温幅度最小。这意 味着温室气体浓度增加减小了季节间的温度差异。 相对于 B1 情景的升温,De07 情景能够降低各个季 节升温幅度的 10%左右,De90 情景则能够降低升 温幅度的 17%左右。因此,减排量越多,则越能够 有效的降低全球增温的幅度。



图 9 同图 7,但为中国的地表气温(单位:℃) Fig. 9 The same as Fig. 7 but for the surface air temperature in China (unit: ℃)

5 总结和讨论

本文简要评估了气候系统模式 BCC-CSM1.0 对 20 世纪气候的模拟情况。并利用该模式对 B1 情景和 2 种减排情景下的气候进行了模拟,详细分 析了 B1 情景和减排情景模拟的全球和中国区域气 候的变化。主要结论如下:

(1) 耦合模式 BCC_CSM1.0 对 1979—1998 年

平均降水和地表气温分布的模拟是比较合理的,也 较好地模拟出了全球平均气温在 20 世纪的演变特 征,为利用该耦合模式所得到的未来情景预估试验 结果增加了可信性。

(2) 尽管在 2012 年开始减排,并在 2050 年达 到稳定,两种减排情景下模式模拟的全球平均增温 在 21 世纪 40 年代以后才一致低于 B1 情景,比减排 情景浓度低于 B1 的时间延迟了 20 年左右。虽然 De90 情景在 2050 年时达到的排放水平低于 De07 情景,但是 De90 情景下的全球增温在 2070 年才开 始一致低于 De07 情景,这种滞后可能与耦合系统 (主要是海洋)的惯性有关。至 21 世纪末,De07 和 De90 情景下全球增温幅度分别比 B1 情景降低了 0.2 和 0.4℃。

表 1 B1 情景下 21 世纪后 30 年全球地表 气温(℃)在各个季节的升温幅度

和减排情景降低该增温幅度的百分率

Table 1Increase of global mean surface air temperatureduring 2070-2099 compared to the mean during 1961-1990

simulated by the model under B1 scenario, and the

percent lowered by the mitigation emission scenario

	春季	夏季	秋季	冬季
B1 情景下全球升温幅度(℃) (2070—2099 年平均减去 1961—1990 年平均)	1.95	1.88	2.1	2.27
相对于 B1 情景, De07 情景降低 全球升温幅度的百分率(%)	9.9	10.6	10.6	10.5
相对于 B1 情景, De90 情景降低 全球升温幅度的百分率(%)	17.5	19.4	18.1	17.4

(3) B1 情景下模式模拟的 21 世纪后 30 年的 增温在北半球高纬度和极地地区最大,减排情景对 这些地区的降温效果也最明显,De90 情景比 De07 情景产生的降温效果更明显。

(4) B1 情景下模式模拟的 21 世纪末中国区域 平均增温比全球平均高约 1.2℃,在 21 世纪后 30 年,中国北方增温幅度高于南方及沿海地区,尤以新 疆北部、内蒙古北部和东北地区幅度最大。两种减 排情景下模式模拟的中国平均气温在 21 世纪 60 年 代以后明显低于 B1 情景。De90 情景下中国区域增 温在 2070 年以后一致低于 De07 情景。至 21 世纪 末, De07 情景和 De90 情景下模式模拟的中国区域 增温分别比 B1 情景低了 0.3 和 0.4℃。

(5) 在 B1 情景下,21 世纪后 30 年全球升温在 冬季最为明显,夏季的升温幅度最小。De07 情景能 够降低各个季节升温幅度的 10%左右,De90 情景 则能够降低升温幅度的 17%以上。

本文所做的试验分析得到了一些有意义的结果,但在试验设计方面仍存在不足之处。例如减排 情景的设计较为简单,所使用的方案是线性减排,而 目前国际上已经有较多复杂和详尽的排放路径设 计,在以后的工作中有必要采用更合理的减排情景 进行模拟试验。另一方面,模式的外强迫因子未考 虑硫酸盐气溶胶,由于硫酸盐气溶胶具有降温效果, 所以模式模拟的 20 世纪气温与观测相比具有升温 较快的特征,这对模式对未来情景的预估和减排试 验的模拟结果具有一定的影响。此外,由于计算条 件和储存空间所限,本文所做的试验均是单样本的, 在未来条件允许的情况下,有必要进行多样本的集 合,使得模拟结果更加可信。

References

- Briegleb B P, Hunke E C, Bitz C M, et al. 2004. The sea-ice simulation of the community climate system model version two. NCAR Tech. Note NCAR/TN-451STR, 34pp
- Collins W D, Rasch P J, Boville B A, et al. 2006. The formulation and atmospheric simulation of the Community Atmosphere Model version 3 (CAM3). J Clim, 19:2144-2166
- Dickinson R E, Oleson K W, Bonan G, et al. 2006. The community land model and its climate statistics as a component of the community climate system model. J Clim, 19:2302-2324
- Ding Y H, Xu Y, Zhao Z C, et al. 2004. Climate change scenarios over East Asia and China in the future 100 years. Newsletter Clim Change 2003/2004, 1:2-4
- IPCC. 2007. Climate Change 2007: The Physical Science Basis, Summary for Policymakers. UK: Cambridge University Press, 1-10
- Jiang D B, Wang H J, Lang X M. 2004. East Asian climate change trend under global warming background. Chinese J Geophys (in Chinese), 47(4): 590-596
- Jones P D. 1994. Hemispheric surface air temperature variations: A reanalysis and update to 1993. J Clim, 7: 1794-1802
- Kalnay E, Kanamitsua M, Kistlera R, et al. 1996. The NCEP/ NCAR 40-year reanalysis project. Bull Amer Meteor Soc, 77: 437-472
- Kauffman B G, Large W G. 2002. The CCSM coupler version combined user's guide, source code reference and scientific description. National Center for Atmospheric Research, U S A, 1-46
- Kiehl J T, Gent P R. 2004. The community climate system model, version 2. J Clim, 17:3666-3682
- Levitus S, Burgett R, Boyer T P. 1994. World ocean atlas 1994 volume 3: Salinity. NOAA Atlas NESDIS3, 99pp
- Meinshausen M. 2005. On the risk of overshoot 2 °C // Scientific Symposium "Avoiding Dangerous Climate Change". Met Office, Exeter, United Kingdom
- Mitchell T, Jones P D. 2005. An improved method of constructing a database of monthly climate observations and associated high-resolution grids. Int J Clim, 25: 693-712
- Meehl G A, Washington W M, Santer B D, et al. 2006. Climate change projections for the Twenty-First century and climate

change commitment in the CCSM3. J Clim, 19:2597-2616

- Qian Z A, Yan H, Gu H D, et al. 1987. A comparative test of the dry adiabatic adjustment schemes. Plateau Meteor(in Chinese), 6(Suppl 2):160-170
- Tang J P, Chen X, Zhao M, et al. 2008. Numerical simulation of regional climate change under A2 scenario in China. Acta Meteor Sinica (in Chinese), 66(1): 13-25
- Wang B, Zhou T J, Yu Y Q, et al. 2008. A perspective on earth system model development. Acta Meteor Sinica (in Chinese), 66 (6): 857-869
- Wu T W, Wu G X. 2004. An empirical formula to compute snow cover fraction in GCMs. Adv Atmos Sci, 21: 529-535
- Wu T W, Yu R C, Zhang F. 2008a. A modified dynamic framework for atmospheric spectral model and its application. J Atmos Sci, 65:2235-2253
- Wu T W, Yu R C, Zhang F, et al. 2010. The Beijing Climate Center Atmospheric General Circulation Model (BCC- AGCM2. 0.
 1): Description and its performance for the present-day climate. Clim Dyn, 34: 123-147
- Xie P, Arkin P A. 1997. Global Precipitation: A 17-year monthly analysis based on gauge observations, satellite estimates and numerical model outputs. Bull Amer Meteor Soc, 78: 2539-2558
- Xu Y, Zhao Z C, Luo Y, et al. 2005. Climate change projections for the 21st century by the NCC/IAP T63 with SRES scenarios. Acta Meteor Sinica, 19:407-417
- Zhang G J, Mu M. 2005. Effects of modifications to Zhang-McFarlane convection parameterization on the simulation of the tropical precipitation in the National Center for Atmospheric Research Community Climate Model, version 3. J Geophys Res, 110 (D09109), doi,10.1029/2004 JD005617
- Zhou T J, Zhang X H, Yu Y Q. 2001. On the coupling procedure of air-sea freshwater exchange in climate system models. Chinese Sci Bull, 46(1):83-85
- Zhou T J, Wang Z Z, Yu R C, et al. 2005a. The climate system

model FGOALS-s using LASG/IAP spectral AGCM SAMIL as its atmospheric component. Acta Meteor Sinica(in Chinese), 63 (5): 702-715

- Zhou T J, Yu R C , Wang Z Z, et al. 2005b. The Atmospheric General Circulation Model SAMIL and the Associated Coupled Model FGOALS-s (in Chinese). Beijing: China Meteorological Press, 288pp
- Zhou T J, Yu R C. 2006. Twentieth Century surface air temperature over China and the globe simulated by coupled climate models. J Clim, 19:5843-5858
- Zhou T J, Li L J, Li H M, et al. 2008. Progress in climate change attribution and projection studies. Chinese J Atmos Sci(in Chinese), 32(4):906-922
- 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

附中文参考文献

- 姜大膀,王会军,郎咸梅.2004.全球变暖背景下东亚气候变化的 最新情景预测.地球物理学报,47(4):590-596
- 钱正安,颜宏,顾宏道等.1987.干绝热对流调整方案的对比试验. 高原气象,6(增刊2):160-170
- 汤剑平,陈星,赵鸣等. 2008. IPCC A2 情景下中国区域气候变化的 数值模拟. 气象学报,66(1):13-25
- 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
- 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
- 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, 字如聪, 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,李立娟,李红梅等. 2008. 气候变化的归因和预估研究. 大 气科学,32(4):906-922