

石英, 高学杰. 温室效应对我国东部地区气候影响的高分辨率数值试验. 大气科学, 2008, 32 (5): 1006~1018

Shi Ying, Gao Xuejie. Influence of greenhouse effect on eastern China climate simulated by a high resolution regional climate model. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 2008, 32 (5): 1006~1018

温室效应对我国东部地区气候影响的高分辨率数值试验

石英^{1, 2} 高学杰²

¹ 中国气象科学研究院, 北京 100081

² 国家气候中心, 北京 100081

摘 要 使用 RegCM3 区域气候模式, 单向嵌套 NASA/NCAR 的全球环流模式 FvGCM 的输出结果, 对中国东部地区进行了在实际温室气体浓度下当代 1961~1990 年和在 IPCC A2 温室气体排放情景下 21 世纪末期 2071~2100 年各 30 年时间长度, 水平分辨率为 20 km 的气候变化模拟试验。首先分析全球和区域模式对中国东部地区当代气候的模拟情况, 结果表明全球模式对中国东部地区气温的总体分布型模拟较好, 但存在冷偏差, 区域模式在对这个冷偏差有所纠正的同时, 提供了气温地理分布更详细的信息。全球模式模拟的年降水中心位于长江流域, 与观测差别较大, 区域模式对此同样也有改进, 降水高值区主要位于区域南部, 并表现出较强的地形强迫特征。区域模式的模拟结果还表明, 至 21 世纪末期, 在温室效应作用下, 中国东部的气温将明显升高, 年平均气温的升高值在 2.7~4.0℃之间, 其中北部升温大于南部, 冬季升温大于夏季。冬季升温表现出明显的随纬度增加而增加的分布型。模拟区域内年平均降水将增加, 增加值一般在 10% 以上, 部分地区达到 30%。降水增加在夏季较明显, 区域内以普遍增加为主, 冬季降水自山东半岛至湖南地区将减少, 其他地区增加。此外, 对夏季高温日数和冬季低温日数及年平均大雨日数的变化也进行了分析。

关键词 区域气候模式 气候变化 中国东部

文章编号 1006-9895 (2008) 05-1006-13

中图分类号 P461

文献标识码 A

Influence of Greenhouse Effect on Eastern China Climate Simulated by a High Resolution Regional Climate Model

SHI Ying^{1, 2} and GAO Xuejie²

¹ Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081

² National Climate Center, China Meteorological Administration, Beijing 100081

Abstract This study analyses the influence of greenhouse warming on eastern China climate simulated by a high resolution regional climate model. The regional model RegCM3 is nested in one-way mode within a NASA/NCAR finite volume element AGCM (FvGCM). Two sets of multi-decadal simulations at 20-km grid spacing for present day (1961-1990) and future climate (2071-2100, IPCC A2 emission scenario) are conducted.

Firstly the FvGCM and RegCM3's simulations of present climate in eastern China are analyzed. Results show that FvGCM is able to reproduce some basic features of the observed mean surface climate, including surface air

收稿日期 2007-01-29, 2007-04-29 收修定稿

资助项目 国家重点基础研究发展规划项目 2006CB400506, 中国气象局气候变化专项项目 CCSF2008-16

作者简介 石英, 女, 1981 年出生, 博士研究生, 主要从事气候模式以及气候变化方面的研究。E-mail: shiying@cma.gov.cn

temperature and precipitation, over eastern China. Comparing with FvGCM, results from RegCM3 simulations show that the high resolution regional model further improves the simulations of both surface air temperature and precipitation climatologies. It can reproduce more detailed structures of surface temperature distribution and reduce, in some extent, cold bias in the FvGCM simulations. Furthermore, it reveals that the observed heavy precipitation center in southeastern China is better simulated by RegCM3 although it may overestimate rainfall induced by topographic forcing. FvGCM gives a wrong location of the high rainfall center with its heavy rainfall belt over the Yangtze River basin.

Significant warming is simulated by RegCM3 at the end of the 21st century under IPCC A2 scenario. The warming of annual temperature ranges from 2.7°C to 4.2°C, with greater warming in the north of the domain. Greater warming is also simulated in winter with a strong latitudinal gradient. A higher rise of the minimum temperature than the maximum temperature is simulated in the winter half of the year, which leads to a decrease in temperature diurnal variation. This feature is more significant in the northern part of the domain. Increase in the maximum temperature and the minimum temperature may cause more hot spell days in summer and less cold spell days in winter, as well as warmer winter and warmer night.

General increase in annual mean precipitation is simulated by RegCM3, in a range of less than 10% to exceeding 30%. Higher increase is found to the north of the Yellow River and in South China. While a reduction of precipitation is found in broad areas in winter, in summer an increase in rainfall dominates the regions. Significant increase in summer precipitation can be found along the Yangtze River, in the southern part of Hebei Province and in South China. Increase of heavy precipitation days are simulated in the whole domain, with substantial increase found in the west and the south of Shanxi Province, the south of Hebei Province and in the north of Fujian Province, the west of Hunan Province. This can consequently lead to a higher frequency of floods in the future.

Key words climate change, regional climate model, eastern China

1 引言

研究表明, 近百年来地球气候正经历一次以全球变暖为主要特征的显著变化。根据对近 100 年(1906~2005 年)全球气温观测资料的分析, 全球平均地面气温已升高 0.74°C (0.56~0.92°C), 而近 50 年的线性增暖趋势几乎是近 100 年的两倍, 究其原因, 很可能是由于人类使用矿物燃料所排放的大量 CO₂ 等温室气体的增温效应造成的。到 21 世纪末, 温室效应导致的全球平均气温升高值将在 1.1~6.4°C 之间^[1]。由此引起的气候变化问题已经成为国际社会共同关注的热点, 在国内外学术界得到了越来越多的重视。

全球环流模式是气候变化研究的主要工具。在未来气候变化预估方面, 各国科学家使用不同的全球环流模式, 进行了大量模拟试验, 取得了很多成果^[1]。中国科学家在这方面也进行了许多工作, 早

期如 Wang 等^[2]的研究, 近年来如中国科学院大气物理研究所和国家气候中心为 IPCC 第 4 次评估报告所进行的模拟等^[3~5, ①, ②]。

但由于计算条件的限制, 全球模式的分辨率一般较低(水平分辨率在一百至几百公里), 从而在区域尺度的气候模拟及气候变化试验等方面产生较大偏差。特别是中国位于东亚季风区, 全球模式对这里气候的模拟经常存在很多问题^[6~8]。Zhou 等^[9]对 IPCC AR4 19 个全球海-气耦合模式的分析结果表明, 尽管多数耦合模式能够部分再现冬季气温变暖的南北梯度, 但在模拟区域性 20 世纪气温演变上有很大的局限性, 从而在预估未来气温变化的地区性特征方面显示了很大不足。这为东亚和中国地区高分辨率区域气候模式的应用提供了广阔的空间。同时有研究表明, 在东亚地区数值模式需要较高的分辨率才能对中国地区大尺度季风降水的分布和东亚梅雨降水有较好的模拟^[10, 11]。

① Yu Yongqiang. IAP global coupled climate model FGOALS and its application in climate change. MOST-DOE Science Team Meeting, 9-11 June, 2005, Beijing

② Xu Ying, Luo Yong, Zhao Zongci, et al. Detection of climate change in the 20th century by the NCC T63. Special Report on Climate Change, National Climate Center, 2005, 4: 1~15

近年来,随着计算机技术的发展,在使用区域气候模式进行气候变化预估方面,国际气候化学界开始普遍由以前的使用 50 km 以上分辨率,进行数月至数年积分,发展到现在使用 20 km 或更高分辨率,进行多年代际时间尺度的气候模拟和气候变化预估^[12~15]。亚洲地区相应工作较少,主要为日本科学家进行的一些试验^[11, 16~18]。

我们使用 RegCM3 区域气候模式,单向嵌套一个全球环流模式(FvGCM),进行中国东部地区 20 km 水平分辨率 2×30 年的气候变化预估试验。首先,在第 2 节对所使用的全球和区域模式、试验设计及所使用的观测资料进行简要介绍,随后在第 3 节分析模式对中国地区气温和降水的模拟能力。在此基础上,讨论未来中国东部地区的气候变化(第 4 部分)。文章最后给出一些结论和讨论。

2 模式简介和试验设计

2.1 全球模式

一般来说,全球模式和区域模式水平分辨率之间的差距,以 3~5 倍比较合适,不宜超过 10 倍。此外,全球模式所进行的气候变化试验,需要保存有每隔 6 小时一次的输出场才能够驱动区域模式,而由于存储条件的限制,一般的模式组并不保留这些结果。这样虽然进行过气候变化试验的全球模式有很多,但具体能够用来嵌套 20 km 分辨率区域模式进行气候变化试验的选择余地仍然相对较少。

我们选用意大利国际理论物理中心(The Abdus Salam International Center for Theoretical Physics, 简称 ICTP)使用 NCAR/NASA 的全球环流模式 FvGCM (high-resolution Finite-volume General Circulation Model, 文中简称全球模式)^[19, 20]所进行的气候变化试验结果。其水平分辨率为 $1^\circ \times 1.25^\circ$ (纬度 $\times$ 经度),垂直方向上为 18 层。模拟试验分为两个时间段,一是从 1961 年 1 月 1 日~1990 年 12 月 31 日,即控制试验(简称 RF);另一段是 21 世纪末从 2071 年 1 月 1 日~2100 年 12 月 31 日,在 IPCC SRES A2 温室气体排放情景^[21]下的试验(简称 A2)。SRES A2 是一个排放量较高的情景,至 2100 年 CO_2 的含量达到 850×10^{-6} (工业革命前为约 280×10^{-6} , 1990 年为 355×10^{-6} , 2005 年为 379×10^{-6})。文中以模式 A2 与 RF 试验结果之差,表示温室效应引起的未来中国东部地区

的气候变化。

FvGCM 是一个大气模式,其动力框架采用有限体积元方法。模式的物理过程除云辐射方案外,主要与 NCAR CCM3 相同,如晴空辐射传输方案以 Kiehl 参数化方案为基础,考虑了温室气体、大气气溶胶和云相互作用的影响,边界过程采用非局地的 Holtslag 方案,陆面过程则通过 Bonan 陆面模型来描述等。此外, FvGCM 使用了一个新的云方案 McRAS,它是基于 Arakawa-Schubert 松弛方案上的一种方法,并耦合进更新了的 Chou & Suarez 云辐射方案。

在上述气候变化试验中所使用的海温和海冰分布, RF 阶段使用的是实际观测资料。A2 阶段,使用的是在逐月观测资料基础上,叠加了英国 Hadley 中心 HadCM3 海气耦合模式 A2 和 RF 试验海温之差后的结果。关于此试验更详细的介绍以及在全球范围的结果,可以参见文献[22]。

2.2 区域模式

区域气候模式使用 ICTP 于近年间研制开发的区域气候模式 RegCM2^[23, 24]的改进版 RegCM3^[25](可在网站 <http://www.ictp.it/~pubregcm> 得到,文中简称区域模式)。较之以往版本, RegCM3 在物理过程等多方面有了许多改进,如在物理过程方面,使用 CCM3 辐射方案,改进大尺度云和降水的参数化过程使其可以解决次网格尺度云的变化问题,采用新的海表通量参数化方案,增加了更多对流参数化方案如 Emanuel 等。此外,模式的输入和输出等部分也更加简便,易于操作,同时在计算方面采用并行算法,极大地提高了计算效率。RegCM3 本身也在不断的发展之中。

本研究工作试验中,辐射采用 NCAR CCM3 方案、海表通量参数化方案使用 Zeng 方案、行星边界层方案使用 Holtslag 方案、积云对流参数化方案选择基于 Arakawa-Schubert 闭合假设的 Grell 方案。

模式中心点取为 (33.5°N , 116°E), 南北方向的格点数为 109, 东西方向的格点数为 100, 水平分辨率取为 20 km, 范围为中国东部地区。模式垂直方向分 18 层, 顶层高度为 100 hPa。

模式使用的地形由美国地质勘探局 (United States Geological Survey, USGS) 制作的 $10' \times 10'$ (纬度 $\times$ 经度) 地形资料插值得到, 植被使用 USGS

基于卫星观测反演的 GLCC (Global Land Cover Characterization) 资料。初始场和侧边界值均由全球模式 FvGCM 得到。侧边界场采用指数松弛边界方案, 每 6 h 输入模式一次, 缓冲区设为 12 个格点。海温的选取与 FvGCM 相同。

图 1a、b 分别给出 FvGCM 和 RegCM3 的地形分布, 由图可以看到, 由于较高分辨率, 区域模式较全球模式能够更细致和精确地描述海岸线及地形分布, 如区域中部山东地区的胶东半岛丘陵和以泰

山为主峰的鲁中南低山丘陵等, 在全球模式地形中基本得不到反映, 而在区域模式中则得到了较准确的刻画。

与全球模式的模拟相同, RegCM3 的试验也分为两个时间段, 即 1961~1990 年的 RF 试验和 2071~2100 年的 A2 试验。同样, 在 RF 试验中 CO₂ 等温室气体的浓度以实际观测值输入, 在 A2 试验中使用 IPCC A2 情景下的数值。

用于检验全球和区域模式 RF 试验模拟结果的

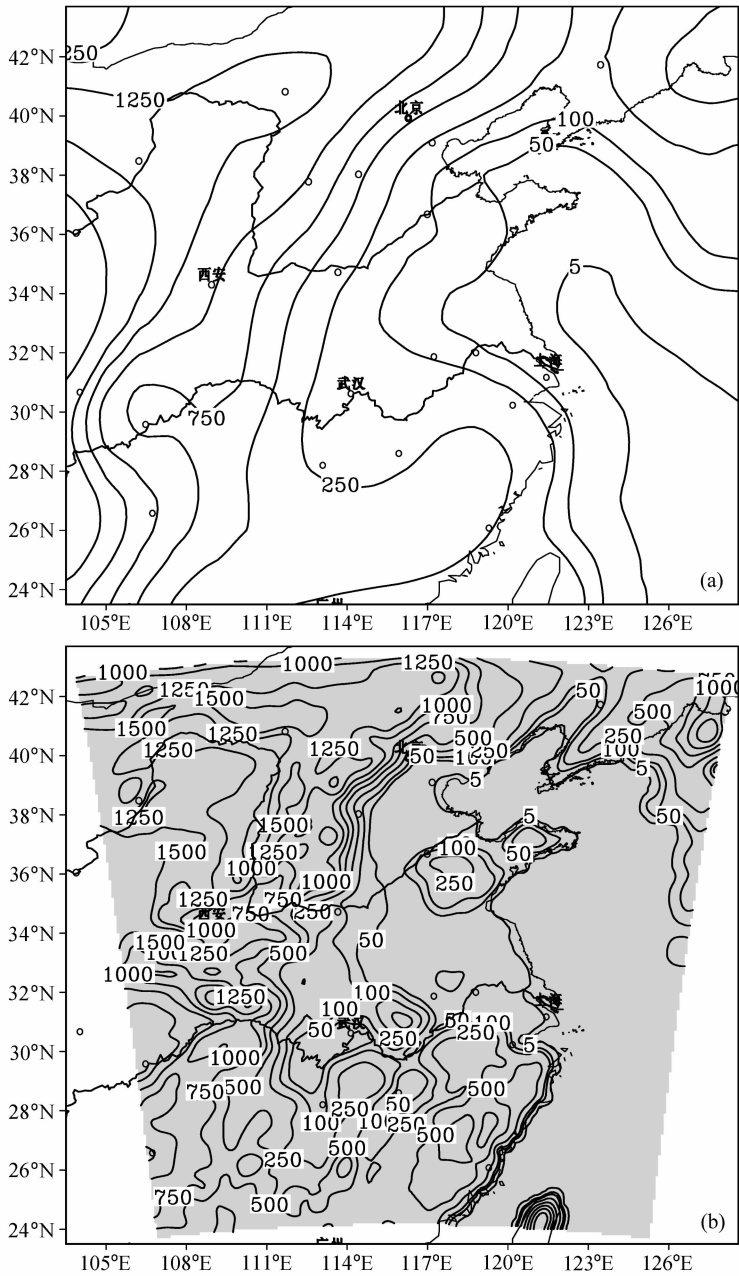


图 1 试验所使用的地形分布 (单位: m): (a) 全球模式; (b) 区域模式, 阴影为模拟范围
Fig. 1 Model topography (m): (a) FvGCM; (b) RegCM3, the simulation domain is shaded

观测资料,地面气温采用的是同期 $0.5^{\circ} \times 0.5^{\circ}$ CRU^[26] 资料,降水则采用国家气候中心气候变化室根据中国 2615 个观测站点的月平均降水所整理得到的 $0.2^{\circ} \times 0.2^{\circ}$ 的同期资料。

3 模式对中国东部地区地面气温和降水的模拟和检验

由于区域模式的模拟范围相对较小(约为 $2000 \text{ km} \times 2000 \text{ km}$),其模拟的大范围环流场与全球模式差别很小,所以,讨论将主要集中于气温和降水这 2 个最基本要素的气候多年平均场(1961~1990 年)上。为了对模拟效果进行定量检验,参照文献[27, 28]的方法,计算了模式模拟与观测空间分布上的误差标准差和相关系数。

误差标准差定义为:

$$E = \left\{ \frac{\sum_{i=1}^N [(\phi_i - \phi_m) - (\varphi_o - \varphi_m)]^2}{N} \right\}^{\frac{1}{2}},$$

其中, ϕ_i 、 φ_o 分别为每一格点上的模拟值和观测值, ϕ_m 、 φ_m 分别为其模拟和观测的平均值, N 为格点的数目。

相关系数定义为

$$R = \frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^N (y_i - \bar{y})^2}},$$

其中, x_i 、 y_i 分别为各格点上的模拟值和观测值, $\bar{x}$ 、 $\bar{y}$ 分别为模拟和观测的区域平均值。

3.1 地面气温

根据上面所给出的公式,计算了地面气温模拟与观测各月的误差标准差(E)和相关系数(R)。由于全球模式对气温空间分布的模拟已很好, R 值一般都在 0.91 以上,区域模式对此改进不大,文中不再给出。 E 值参见图 2 中 A、B 曲线,从图中可以看出,区域模式的误差标准差与全球模式相比,除夏季的 6、7 月份改进不大外,其他各月均有一定程度的改善,特别是在冬季,如 1 月份全球模式的 E 值为 2.4,区域模式则为 1.2 等。区域模式 E 最大值出现在冬半年的 11 和 12 月,均为 1.8,较全球模式(分别为 2.4 和 3.0)亦有所改进。上述改进反映在气候平均场上,即为区域模式对全球模式冷偏差的纠正(参见下文)。

图 3 给出中国东部地区年平均气温全球和区域模式的模拟及观测(为绘图方便和消除缓冲区影响,这里和下文中的绘图范围较模拟区域稍小),从图中可以看出,两个模式对中国东部气温北方低、南方高及东部高、西部低的基本分布型模拟较好,与观测接近。对比图 3a 和图 3c 可以看出,与观测相比,全球模式模拟的不足主要有:等值线比较平滑,没有出现由小地形引起的温度波动及温度梯度的变化;在区域南部,全球模式模拟的等值线

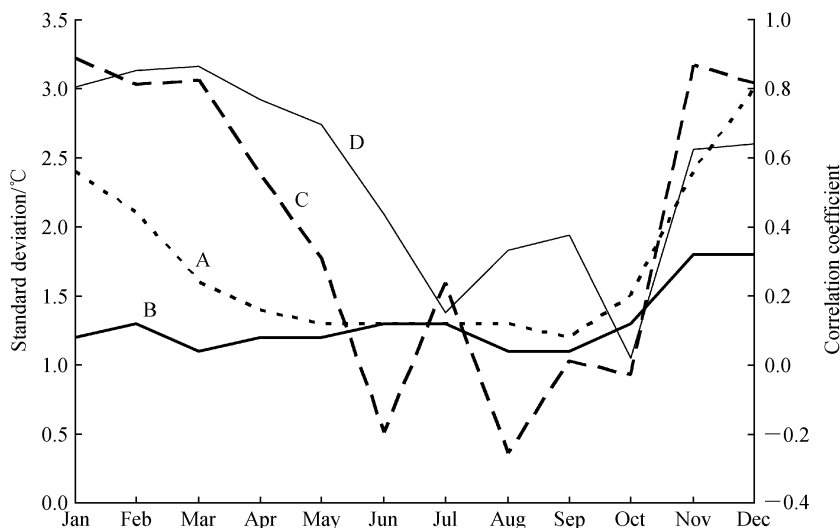


图 2 中国东部地区逐月平均气温的误差标准差(A、B)和降水模拟与实况的相关系数(C、D)。曲线 A、C: 全球模式; 曲线 B、D: 区域模式

Fig. 2 The standard deviation of simulated monthly mean temperature error (A, B) compared with observations and spatial correlation (C, D) between simulated and observed monthly mean precipitation in eastern China. Lines A, C: FvGCM; Lines B, D: RegCM3

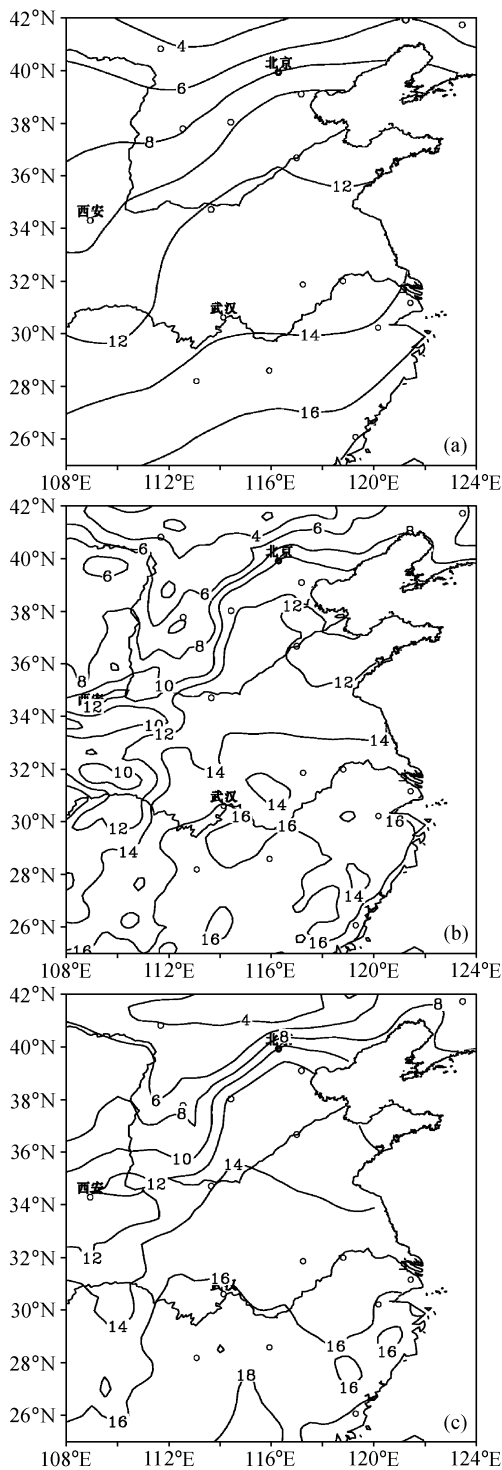


图3 中国东部地区年平均气温(单位:℃): (a) 全球模式的模拟; (b) 区域模式的模拟; (c) 观测
Fig. 3 Annual mean surface air temperature (°C) in eastern China: (a) Simulation by FvGCM; (b) simulation by RegCM3; (c) observation

分布近于东北-西南走向,而观测中更近于东西走向。此外,的一个主要不足是模式模拟的温度较观测

偏低,存在一个明显的冷偏差(cold bias),这个偏差在南方和华北平原地区较明显,达到-2℃以上。与全球模式相比,区域模式的模拟(图3b)有了较大改进。由于较高分辨率,其模拟的地面气温分布更加复杂,符合实际情况,区域南部温度等值线也更类似于观测,近于东西走向。区域模式对全球模式冷偏差也起了一定的纠正作用,但仍然普遍存在-1℃左右的偏差,这与大多数区域模式的模拟类似^[29]。其数值在湖北与四川交界处达到-2.5℃,这可能是由于在这一带高山上缺乏相应观测引起的大巴山区,主峰为神农架)。

3.2 降水

区域模式对降水模拟与观测各月的误差标准差,较全球模式改进不大,反映了区域模式对降水量误差的修正不大,但区域模式所模拟的降水空间分布较全球模式有了一定改进(参见图2中C、D曲线)。从图2中C、D曲线可以看出,冬半年全球模式对降水的模拟较好,11~3月的相关系数值一般在0.8以上,区域模式对此改进不大,有些月份甚至更低。但区域模式对夏半年降水模拟的改进较大,如5月相关系数值从全球模式的0.31提高到0.70,6月从-0.20提高到0.44,8月从-0.26提高到0.33,9月从0.01提高到0.38。7月和10月的改进不大,这段时间是东亚夏季风完全建立和后撤的时间,反映了数值模式对东亚季风模拟能力上的不足。

图4给出全球和区域模式对中国东部地区多年平均降水的模拟和观测。由图4a可以看到,全球模式模拟的中国东部雨带位于长江流域一带,中心值一般在1250~1500 mm之间,而观测中(图4c),长江以南降水均大于1250 mm,降水中心位于东南地区,强度达到1750 mm,模拟与观测的差别很大。此外,全球模式模拟的北方降水偏多,偏多的数值一般大于50%,部分地区达到一倍以上。

区域模式的模拟(图4b)较全球模式有了较大改进,总体来说其降水中心现在位于区域南部,区域东部的1000 mm等值线,由全球模式的黄河下游一带,南移至长江中下游地区,与观测更加接近。北方降水除在山地偏多外,数值也普遍下降。但区域模式对全球模式南方降水不足的误差改进不大。值得关注的一点是,区域模式模拟的降水表现出很强的地形强迫作用,模拟出的降水大值区分

散在各个大的山地附近，如位于南方的大别山 (31°N, 116°E)、神农架 (30°N, 111°E)、秦岭-伏牛山 (34°N, 108~103°E)，以及位于北方的太行山-燕山的降水中心等。需要指出的是，除去模式可

能对地形强迫过于敏感的因素外，山区特别是山的迎风坡由于气流抬升形成的上升运动，是容易产生降水的地方，而这里观测资料往往较少，大部分气象观测台站位于山区的谷地，这样由简单插值得到的山区“实况”降水容易产生较小的偏差。但扣除这个因素，与观测相比，区域模式的模拟仍然表现出北方偏多，南方（除大地形外地区）偏少的误差，与其在再分析资料驱动下的误差类似^[30]。

4 21 世纪末 A2 情景下中国东部地区未来气温和降水的可能变化

4.1 气温

温室效应引起的直接气候效应，就是地表气温的上升。首先将模式区域以 33°N 线为界分为南北 2 个分区，分别称为北区和南区（对应区域中淮河以北和以南地区），在表 1 中给出区域模式模拟的 2 个分区逐月气温变化。

从表 1 可以看出，整个区域在全年所有月份中气温都是增加的，其中北区增加大于南区，12 个月平均分别为 3.5℃ 和 2.8℃。南区气温的升高在年内变化较小，最大值出现在 9 月和 8 月，分别为 3.7℃ 和 3.3℃，最小值出现在 1 月和 4 月 (2.4℃)。北区和南区气温变化在 4~11 月相差不大，北区的数值略高 0.1~0.6℃。但北区气温变化的一个明显特征是冬季增温明显，在 1 月和 2 月分别达到 4.4℃ 和 4.5℃，最低值出现在 4 月 (2.8℃)。

图 5 给出全球和区域模式模拟的年平均和区域模式模拟的冬、夏季气温的变化，由图中可以看到，在 A2 情景下，中国东部气温的变化表现为一

表 1 区域气候模式模拟的 A2 情景增长情况下逐月平均地面气温的变化 (单位: °C)

Table 1 Simulated monthly mean temperature change (°C) in eastern China at the end of the 21st century by RegCM3

北区		南区	北区		南区
1 月	4.4	2.4	8 月	3.9	3.3
2 月	4.5	2.7	9 月	3.8	3.7
3 月	3.7	3.0	10 月	3.3	3.1
4 月	2.8	2.4	11 月	2.9	2.7
5 月	3.2	2.7	12 月	3.8	2.7
6 月	3.1	2.5	平均	3.5	2.8
7 月	3.0	2.8			

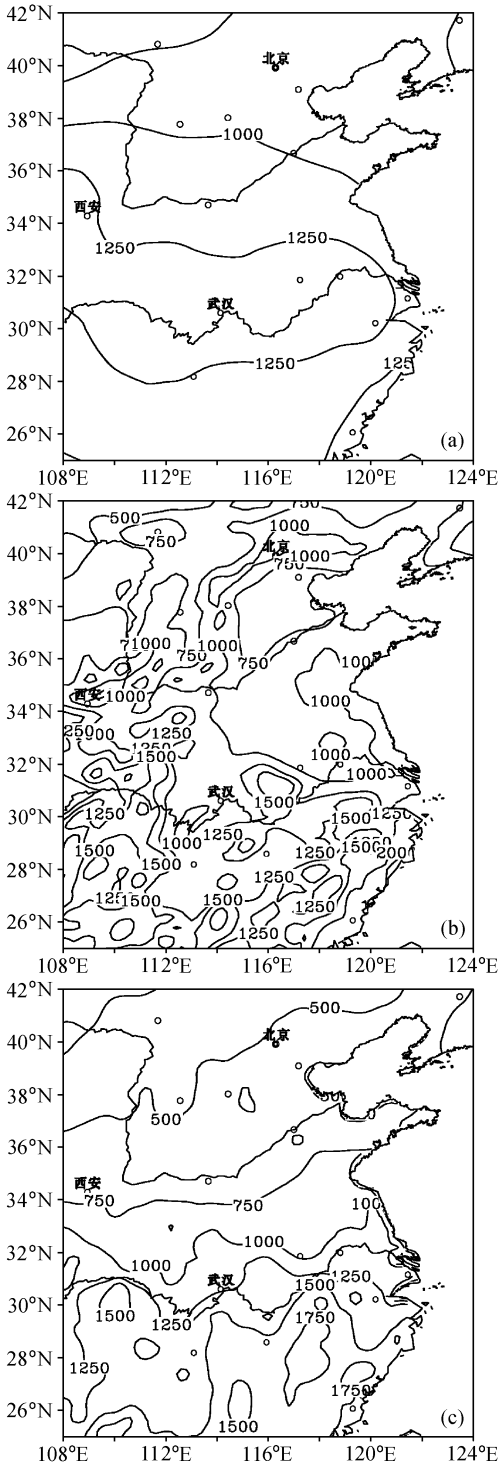


图 4 同图 3，但为年平均降水 (单位: mm)
Fig. 4 Same as Fig. 3, but for annual mean precipitation (mm)

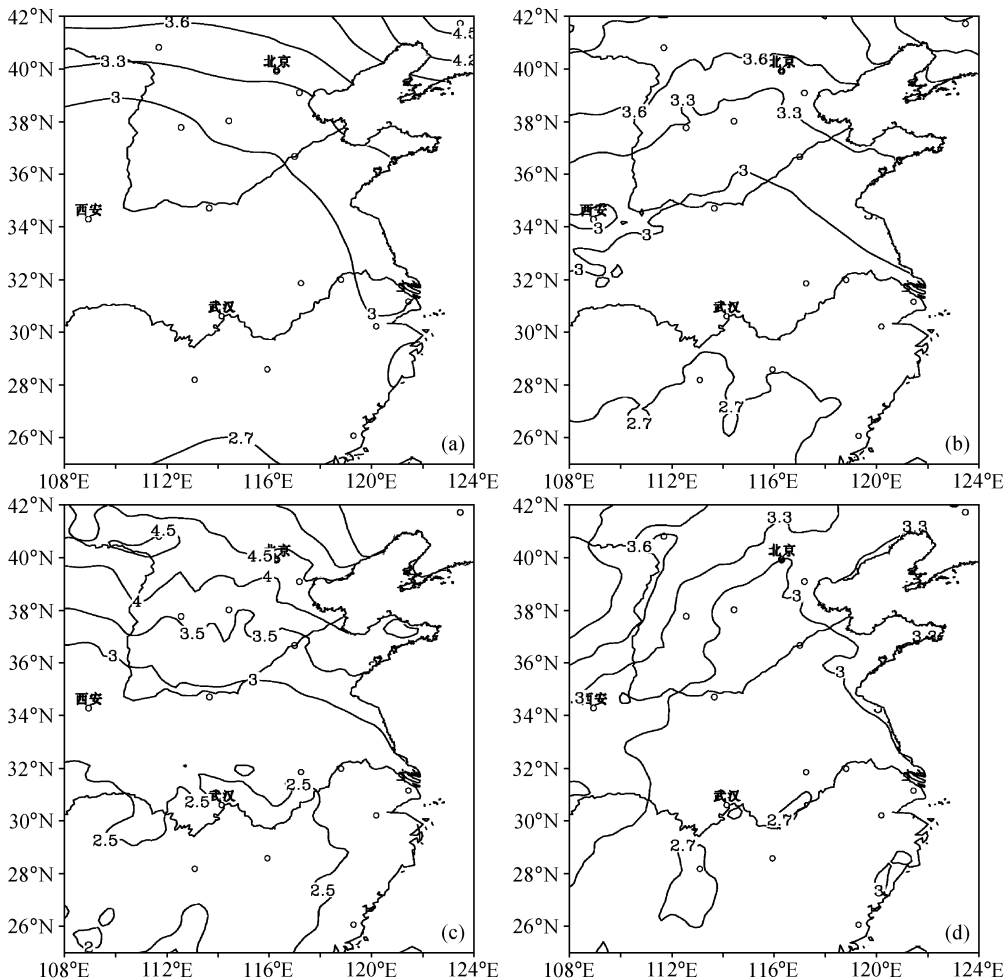


图 5 中国东部地区 21 世纪末气温的变化 (单位: $^{\circ}\text{C}$): (a) 全球模式模拟的年平均变化; (b) 区域模式模拟的年平均变化; (c) 区域模式模拟的冬季变化; (d) 区域模式模拟的夏季变化

Fig. 5 Simulated temperature change in eastern China at the end of the 21st century ($^{\circ}\text{C}$): (a) Annual mean change by FvGCM; (b) annual mean change by RegCM3; (c) change in winter by RegCM3; (d) change in summer by RegCM3

致增加。全球和区域模式模拟的年平均气温变化分布型比较类似,基本都为在区域南部较低,北部较高(图 5a、b),数值一般从南部的上升不足 2.7°C 到北部的上升 3.6°C 以上,但全球模式模拟的数值较区域模式偏低一些,特别是在北部地区。

区域模式模拟冬季升温的南北梯度较大,数值从区域最南部的 2°C 以下到辽宁一带的 5.5°C 以上(图 5c),纬向型分布明显,尤其是在北方,这可能是由于这里积雪融化和气温升高之间的正反馈作用引起的。夏季南方大范围地区气温的升高值在 $2.7\sim 3.0^{\circ}\text{C}$ 间,升温有向西北方向增加的趋势,最大值出现在河套地区为 3.9°C 及以上(图 5d),其原因可能与这一地区降水增加较少有关(参见下文图 6d)。

4.2 降水

温室气体的增加对降水也将产生很大影响。图 6 给出全球和区域模式模拟的年平均和区域模式模拟的冬、夏季降水变化。从图 6a 可以看出,全球模式模拟的降水除了长江流域一带增加小于 10% 外,其他地区的增加一般在 10% 以上,其中自山东半岛至山西中部一带增加较多,数值大于 20% 。区域模式的模拟(图 6b)与全球模式相比,首先是其模拟的整个区域降水增加量一般在 $10\%\sim 30\%$ 间,小于 10% 的地区很少,其次是其模拟的北方降水增加中心的范围更大、强度更强,此外在福建、江西和河南南部也出现了一个 $20\%\sim 30\%$ 以上的增加区。

区域模式模拟的冬季降水变化,为自东南地区开始,向西北方向呈先减少后增加的分布。其中自

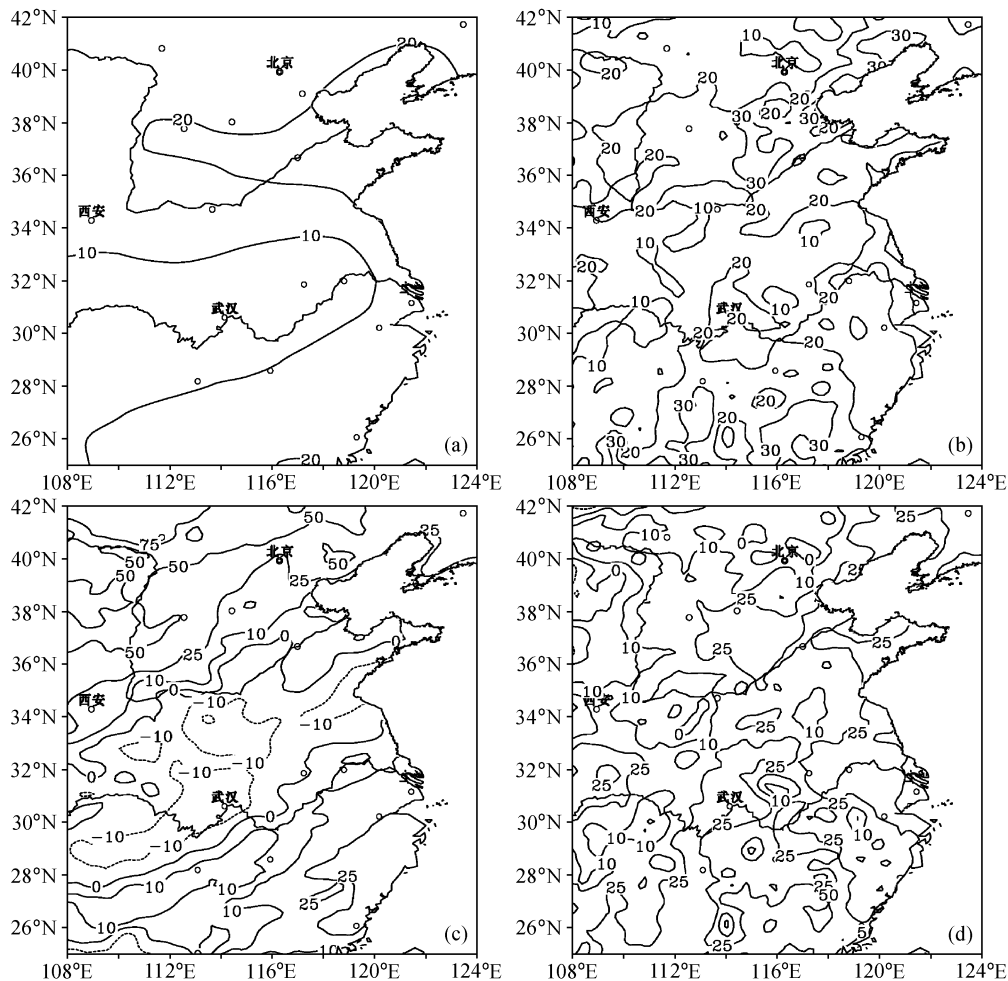


图 6 同图 5，但为降水的变化 (%)

Fig. 6 Same as Fig. 5, but for precipitation change (%)

山东半岛至湖南地区降水将减少，减少最大在 -10% 以上。区域西北部降水则将明显增加，内蒙古等地增加达到 50% 以上 (图 6c)。夏季降水除个别地区 (如华北北部、陕西西部等) 外大范围增加 (图 6d)，几个大的中心包括长江流域，河北、河南和山东交界地带，以及华南地区等。值得注意的是沿长江流域几个大值中心的存在，意味着未来长江发生洪涝灾害的可能性变大。由于夏季降水在全年降水中占较大比例，因而年平均降水变化分布与夏季降水变化分布表现出较大的一致性 (图 6b、d)。

由上述分析可以看出，与 FvGCM 和 RegCM3 对中国当代气候的模拟表现出差异类似，它们各自对未来气候变化的模拟也表现出了一定的不同，特别是降水。

4.3 日最高、最低气温的变化

表 2 给出区域模式模拟的南北两区区域平均的逐月日最高、最低气温的变化，从表中可以看出，无论是最高还是最低气温，在各月都是增加的，两个分区年平均增加值分别为 3.4°C 、 3.8°C 和 2.7°C 、 2.9°C 。其中北区的增加一般大于南区，特别是在冬半年。两个分区中日最高、最低气温在各月的变化，和平均气温的情况类似，北区最高最低气温的上升在冬半年特别是 1、2 月份明显高于其他月份，南区年内变化不明显，最大增加出现在 8 月和 9 月，这可能和云量的变化有关，有待进一步的分析。北区冬半年的 9~3 月份，日最低气温的增加大于最高气温，使得这个时段日较差减小，其中以 1 月份差值最大 (0.9°C)，其次为 11 月和 2 月 (0.8°C)。南区日较差有类似变化，但幅度较小。

表 2 区域气候模式模拟的中国东部地区 21 世纪末逐月平均日最高 ($T_{\max}$)、最低 ($T_{\min}$) 气温的变化 (单位: $^{\circ}\text{C}$)

Table 2 Simulated monthly mean daily maximum ($T_{\max}$) and minimum ($T_{\min}$) temperature change in eastern China at the end of the 21st century by RegCM3 (units: $^{\circ}\text{C}$)

	北区		南区			北区		南区	
	$T_{\max}$	$T_{\min}$	$T_{\max}$	$T_{\min}$		$T_{\max}$	$T_{\min}$	$T_{\max}$	$T_{\min}$
1 月	4. 2	5. 1	2. 3	2. 9	8 月	3. 9	3. 9	3. 5	3. 2
2 月	4. 1	4. 9	2. 7	2. 6	9 月	3. 5	4. 1	3. 5	3. 9
3 月	3. 6	3. 9	3. 0	3. 0	10 月	2. 9	3. 5	2. 6	3. 4
4 月	2. 7	2. 9	2. 4	2. 5	11 月	2. 5	3. 3	2. 5	2. 9
5 月	3. 2	3. 3	2. 8	2. 7	12 月	3. 7	4. 1	2. 5	2. 7
6 月	3. 2	3. 0	2. 3	2. 5	平均	3. 4	3. 8	2. 7	2. 9
7 月	3. 1	3. 0	2. 7	2. 8					

4. 4 极端事件的变化

气候变化包括平均态变化和极端事件的变化。近年来,随着极端天气气候事件的频繁发生,这一问题引起了人们越来越多的关注。在本文中,我们使用夏季高温日数和冬季低温日数及大雨日数作为简单的评价指标,对温室气体以 A2 情景增长情况下,各指数未来的变化进行了简要分析。

4. 4. 1 夏季高温日数、冬季低温日数的变化

一般说来,日最高气温的升高将导致夏季高温日数、热浪发生频率的增加,日最低气温一般出现于夜间,它的升高使得冬季低温日数减少、暖冬事件增多,同时会造成全年暖夜的增多。为此,我们将区域模式模拟结果中,夏季日最高气温 $\geq 35^{\circ}\text{C}$ 的天数定义为高温日数,冬季日平均气温低于 0°C 的天数定义为低温日数,分别统计 RF 和 A2 试验中各模式格点上多年平均的两指数值,相减得到两指数差的分布,在图 7a、b 中给出。

由图 7 中可以看到,在 A2 排放情景下,未来中国东部夏季高温日数将有明显增加,增加值一般在 10 天以上,南方部分地区(洞庭湖附近)会达到 30 天以上。计算得到的区域平均夏季高温日数,由当代的 36 天,增加到未来的 66 天,上升率达 80%之多。同时,未来冬季低温日数将大大减少,其中在华北平原的东部减少达到 30 天以上,区域平均的低温日数将由当代的 35 天,减少为 23 天,减少率为 34%。

4. 4. 2 大雨日数的变化

参照以往工作^[31],将区域模式模拟结果中日降水量 $\geq 35\text{ mm}$ 的日数定义为大雨日数,分别统计

在 A2 与 RF 试验中各模式格点上的年平均大雨日数,得到两者的差,在图 7c 给出其百分率变化分布。从图 7c 中可以看出,未来中国东部大部分地区的大雨日数将增加,其中两个明显的大值区,一个由陕西渭河开始向东至黄河中下游以北,包括山西西部、南部和山东北部、西北部及河北西南部等;另一个位于湖南东部及福建西北部,增加值均达到 50%以上。夏季区域内大雨日数,除了上述两个大值区外,在长江中游和下游大范围地区,也将有很大幅度的增加(图略)。大雨日数的这种变化,表明中国东部特别是在以上大值区,未来发生暴雨天气的几率将增大,由暴雨可能引发的如洪涝、泥石流等自然灾害也会相应增多,威胁到当地的社会经济生活和生态环境。

5 结论和讨论

使用 RegCM3 区域气候模式单向嵌套 FvGCM 全球环流模式的输出结果,对中国东部地区进行了 20 km 水平分辨率、当代(1961~1990 年)和 A2 温室气体排放情景下 21 世纪末(2071~2100 年)2 个各 30 年时间长度的数值积分试验。首先对全球和区域模式的性能进行了检验,在此基础上分析了 A2 情景下,中国东部地区未来气候变化的情况。下面给出一些主要结果:

(1) 对 FvGCM 全球模式控制试验结果的分析表明,模式对中国东部当代气候具有一定模拟能力,其结果可以用来制作驱动区域模式所需的初始场和侧边界。由于较高分辨率和较完善的物理过程,RegCM3 提供了对地面气温空间分布更细致的

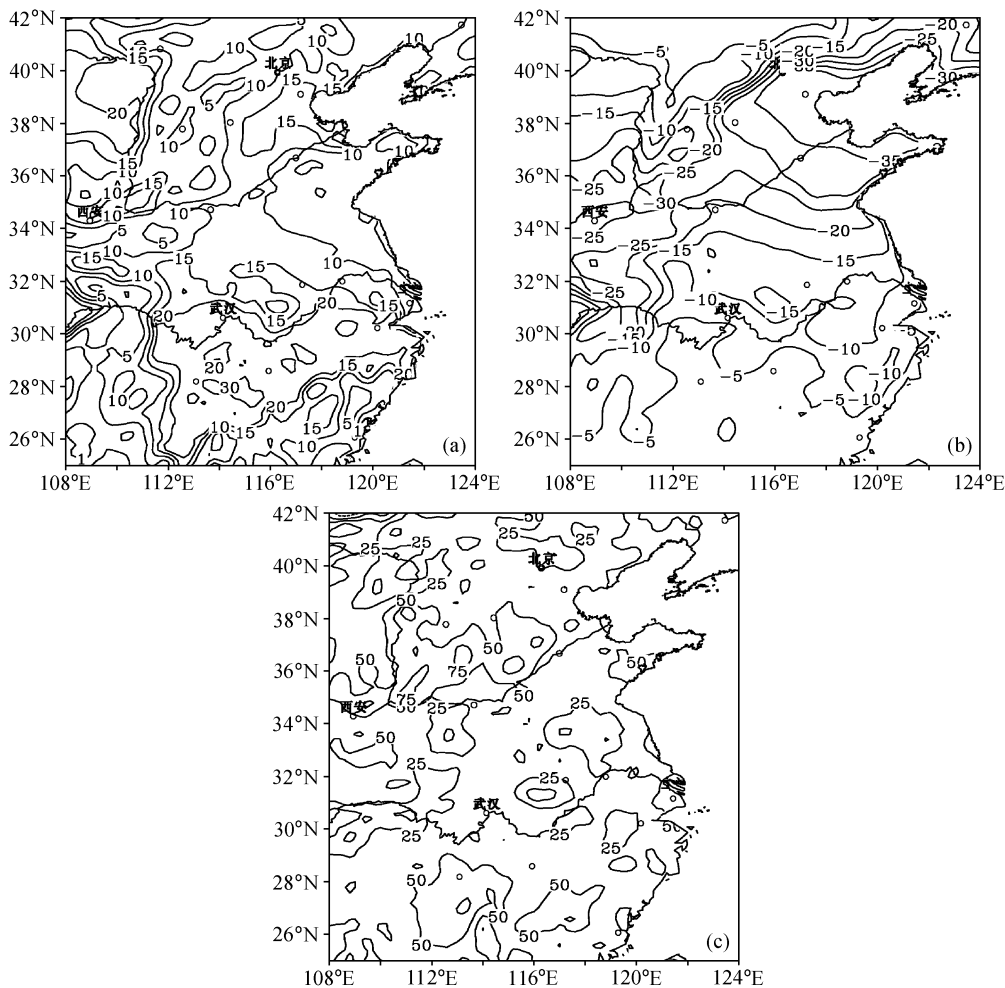


图 7 区域气候模式模拟的中国东部地区 21 世纪末极端事件的变化: (a) 夏季高温日数 (单位: d); (b) 冬季低温日数 (单位: d); (c) 大雨日数 (%)

Fig. 7 Simulated change of extreme events in eastern China at the end of the 21st century by RegCM3: (a) Hot days in summer (d); (b) cold days in winter (d); (c) annual mean heavy rain days (%)

模拟,同时它降低了 FvGCM 模拟中产生的较大冷偏差。RegCM3 对降水的分布和数值的模拟也较 FvGCM 有了一定改善,包括北方降水量的减少、雨带位置更加合理等。

(2) 根据区域气候模式的模拟和预估,未来在 21 世纪末期 A2 排放情景下,中国东部气温将明显增加,年平均气温的增加值北方大于南方,气温增加的纬向型分布在冬季更明显,数值也更大。日最高、最低气温也将明显升高,其中在冬半年尤其是冬季,最低气温的升高明显大于最高气温,从而导致日较差的减小。此外,夏季高温日数将增多,冬季低温日数将减少,从而导致热浪、暖冬和暖夜等事件的发生概率增大。

(3) 未来中国东部年平均降水将普遍增加,增

加较多的 2 个地方分别位于黄河以北和华南地区。冬季降水在河北北部、内蒙古至陕西南部,浙江、福建等地为增加,从山东至湖北、湖南北部地区降水将减少。夏季降水则一般以增加为主,其中以长江流域、河北南部和华南等地的增加较多。大雨日数在中国东部也将普遍增多,以山西西部和南部及河北南部,福建北部、湖南西部增多最为明显,表明未来这些地区发生暴雨洪涝灾害的可能性加大。

受计算资源等多方面条件的限制,对 RegCM3 的模拟仅限于中国东部,从而不能考察气候变化对诸如华北、西北等其他重要地区的影响。RegCM3 在模拟中表现出过强的地形强迫作用,这也许与模拟区域偏小有关。与以往模拟类似,RegCM3 存在着对中国东部地区北方降水模拟偏多、南方降水模

拟偏少的误差。同时受篇幅限制, 本文没有给出对诸如趋势 (trend)、变率等的分析结果, 对极端事件的分析也仅局限于夏季高温日数、冬季低温日数和大雨日数上。进一步提高 RegCM3 对中国地区气候的模拟性能, 对整个中国地区进行高分辨率气候变化模拟预估以及加强对极端事件变化的分析等, 是未来进一步工作中需要注意的问题。此外, 关于气候变化情景模拟结果的模式依赖性问题的, 亦有待通过多模式比较加以讨论^[32]。

参考文献 (References)

- [1] IPCC. *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group 1 to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Solomon S, Qin D, Manning M, et al. Eds. Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA: Cambridge University Press, 2007
- [2] Wang Huijun, Zeng Qingcun, Zhang Xuehong. The numerical simulation of the climatic change caused by CO₂ doubling. *Science in China (Series B)*, 1993, **36** (4): 451~462
- [3] Yu Yongqiang, Yu Rucong, Zhang Xuehong, et al. A flexible global coupled climate model. *Adv. Atmos. Sci.*, 2002, **19**: 169~190
- [4] 周天军, 王在志, 宇如聪, 等. 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
Zhou Tianjun, Wang Zaizhi, Yu Rucong, et al. The climate system model FGOALS_s using LASG/IAP special AGCM SAMIL as its atmospheric component. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 2005, **63** (5): 702~715
- [5] Xu Ying, Zhao Zongci, Luo Yong, et al. Climate change projections for the 21st century by the NCC/IAP T63 with SRES scenarios. *Acta Meteorologica Sinica*, 2005, **19** (4): 407~417
- [6] Gao Xuejie, Zhao Zongci, Ding Yihui, et al. Climate change due to greenhouse effects in China as simulated by a regional climate model. *Adv. Atmos. Sci.*, 2001, **18** (6): 1224~1230
- [7] Zhou T J, Li Z X. Simulation of the East Asian summer monsoon by using a variable resolution atmospheric GCM. *Climate Dyn.*, 2002, **19**: 167~180
- [8] 高学杰, 林万涛, Fred K, 等. 实况海温强迫的 CCM3 模式对中国区域气候的模拟能力. *大气科学*, 2004, **28** (1): 78~90
Gao Xuejie, Lin Wantao, Fred K, et al. A simulation of regional climate in China by using CCM3 and observed SST. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 2004, **28** (1): 78~90
- [9] Zhou Tianjun, Yu Rucong. Twentieth century surface air temperature over China and the globe simulated by coupled climate models. *J. Climate*, 2006, **19**: 5843~5858
- [10] 高学杰, 徐影, 赵宗慈, 等. 数值模式不同分辨率和地形对东亚降水模拟影响的试验. *大气科学*, 2006, **30** (2): 185~192
Gao Xuejie, Xu Ying, Zhao Zongci, et al. Impacts of horizontal resolution and topography on the numerical simulation of East Asia precipitation. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 2006, **30** (2): 185~192
- [11] Kusunoki S, Yoshimura J, Yoshimura H, et al. Change of Baiu rain band in global warming projection by an atmospheric general circulation model with a 20-km grid size. *J. Meteor. Soc. Japan*, 2006, **84**: 581~611
- [12] Leung L R, Qian Y, Bian X, et al. Mid-century ensemble regional climate change scenarios for the western United States. *Climate Change*, 2004, **62**: 75~113
- [13] Christensen O B, Christensen J H. Intensification of extreme European summer precipitation in a warmer climate. *Global Planet. Change*, 2004, **44**: 107~117
- [14] Diffenbaugh N S, Pal J S, Trapp R J, et al. Fine-scale processes regulate the response of extreme events to global climate change. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, 2005, **102** (44): 15774~15778, doi: 10.1073/pnas.0506042102
- [15] Gao X J, Pal J S, Giorgi F. Projected changes in mean and extreme precipitation over the Mediterranean region from a high resolution double nested RCM simulation. *Geophys. Res. Lett.*, 2006, **33**: L03706, doi: 10.1029/2005GL024954
- [16] Kanada S, Muroi C, Wakazuki Y, et al. Structure of mesoscale convective systems during the late Baiu season in the global warming climate simulated by a non-hydrostatic regional model. *SOLA*, 2005, **1**: 117~120
- [17] Oouchi K, Yoshimura J, Yoshimura H, et al. Tropical cyclone climatology in a global-warming climate as simulated in a 20 km-mesh global atmospheric model: Frequency and wind intensity analyses. *J. Meteor. Soc. Japan*, 2006, **84**: 259~276
- [18] Yasunaga K, Muroi C, Kato T, et al. Changes in the Baiu frontal activity in the future climate simulated by super-high-resolution global and cloud-resolving regional climate models. *J. Meteor. Soc. Japan*, 2006, **84**: 199~220
- [19] Lin S, Rood R. Multidimensional flux-form semi-Lagrangian transport schemes. *Mon. Wea. Rev.*, 1996, **124**: 2046~2070
- [20] Lin S, Atlas R, Yeh K. Global weather prediction and high-end computing at NASA. *Comput. Sci. Eng.*, 2004, **6**: 29~35
- [21] IPCC. *Special Report on Emissions Scenarios*. Nakicenovic N, et al. Eds. New York: Cambridge University Press, 2000. 599 pp
- [22] Coppola E, Kucharski F, Giorgi F, et al. Bimodality of the

- North Atlantic Oscillation in simulations with greenhouse gas forcing. *Geophys. Res. Lett.*, 2005, **32**: L23709, doi: 10.1029/2005GL024080
- [23] Giorgi F, Marinucci M R, Bates G T. Development of a second-generation regional climate model (RegCM2). Part I: Boundary-layer and radiative transfer processes. *Mon. Wea. Rev.*, 1993, **121**: 2794~2813
- [24] Giorgi F, Marinucci M R, Bates G T, et al. Development of a second-generation regional climate model (RegCM2). Part II: Convective processes and assimilation of lateral boundary conditions. *Mon. Wea. Rev.*, 1993, **121**: 2814~2832
- [25] Pal J S, Giorgi F, Bi X Q, et al. The ICTP RegCM3 and RegCNET: Regional climate modeling for the developing world. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 2007, **88** (9), 1395~1409
- [26] New M, Lister D, Hulme M, et al. A high-resolution data set of surface climate over global land areas. *Climate Res.*, 2002, **21**: 1~25
- [27] 周天军, 钱永甫. 一个有限域嵌套细网格模式的设计及其预报结果的检验. 热带气象学报, 1995, **11** (4): 342~353
Zhou Tianjun, Qian Yongfu. The design and forecast verification of an one-way nested fine-mesh limited area numerical model. *Journal of Tropical Meteorology* (in Chinese), 1995, **11** (4): 342~353
- [28] Gao Xuejie, Zhao Zongci, Ding Yihui, et al. Climate change due to greenhouse effects in China as simulated by a regional climate model. *Adv. Atmos. Sci.*, 2001, **18** (6): 1224~1230
- [29] 冯锦明, 符淙斌. 不同区域气候模式对中国地区温度和降水的长期模拟比较. 大气科学, 2007, **31** (5), 805~814
Feng Jinming, Fu Congbin. Inter-comparison of long-term simulations of temperature and precipitation over China by different regional climate models. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 2007, **31** (5): 805~814
- [30] 张冬峰, 欧阳里程, 高学杰, 等. RegCM3 对东亚环流和中国气候模拟能力的检验. 热带气象学报, 2007, **23** (5): 444~452
Zhang Dongfeng, Ouyang Licheng, Gao Xuejie, et al. Simulation of the atmospheric circulation over East Asia and climate in China by RegCM3. *Journal of Tropical Meteorology* (in Chinese), 2007, **23** (5): 444~452
- [31] Gao Xuejie, Zhao Zongci, Giorgi F. Changes of extreme events in regional climate simulations over East Asia. *Adv. Atmos. Sci.*, 2002, **19** (5): 927~942
- [32] 符淙斌, 王淑瑜, 熊喆, 等. 亚洲区域气候模式比较计划的进展. 气候与环境研究, 2004, **9** (2): 225~239
Fu Congbin, Wang Shuyu, Xiong Zhe, et al. Progress report on regional climate model intercomparison project for Asia. *Climatic and Environmental Research* (in Chinese), 2004, **9** (2): 225~239