RegCM3 对 21 世纪中国区域气候变化的高分辨率模拟

高学杰^①, 石英^①, 张冬峰^②, GIORGI Filippo^③

① 中国气象局国家气候中心, 北京 100081;

② 山西省气候中心, 太原 030006;

③ The Abdus Salam International Centre for Theoretical Physics, Trieste, 34100, Italy

E-mail: gaoxj@cma.gov.cn

2011-09-30 收稿, 2011-11-25 接受

国家重点基础研究发展计划(2009CB421407)、(中-英-瑞)中国适应气候变化项目(ACCC)和林业公益性行业科研专项(200804001)资助

摘要 使用 RegCM3 区域气候模式, 单向嵌套日本 CCSR/NIES/FRCGC 的 MIROC3.2_hires 全球模式输出结果, 对中国及东亚地区进行了 1951~2100 年, 在 IPCC SRES A1B 温室气体排放情景下, 水平分辨率为 25 km 的连续气候变化模拟试验. 首先分析了区域模式对当代气候的模拟能力, 结果表明, 模式可较好地再现中国地区地面气温和降水的空间分布及数值. 对未来 21 世纪中期和末期气候变化的模拟表明, 未来平均气温将明显升高, 且随时间推移, 气温升高幅度增大, 升温高值区集中在高纬度和高海拔(青藏高原)地区. 21 世纪中期, 冬季降水除青藏高原外以增加为主, 夏季降水在中国西部西北地区增加、青藏高原减少; 东部地区降水变化呈正负相间的分布. 21 世纪末期, 降水变化分布除个别地方外, 和 21 世纪中期一致, 但变化幅度增大. 此外, 将此模拟结果与以往 RegCM3 在另一个全球模式驱动下的结果进行了对比, 以了解中国地区气候变化预估中的不确定性.

关键词

气候变化
区域气候模式
中国区域
数值模拟
不确定性

观测表明, 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, 其原因很可能(>90%可能)是由于人类活动所排放的温室气体增温效应造成的. 到 21 世纪末(2090~2099 年), 预估全球平均气温升高 1.1~6.4℃(相对于 1980~1999 年)^[1].

全球海气耦合模式(AOGCM)是未来气候变化预估的首要工具, 但由于其分辨率较低, 对区域尺度气候及其变化的模拟存在不足. 针对这一问题, 发展了高分辨率的区域气候模式(RCM)^[2], 并在对 AOGCM 结果进行动力降尺度方面有了越来越多的应用^[3], 同时其所得到的高分辨率气候变化情景, 对于进行区域和局地尺度的影响评估研究, 也非常重要. 以往研究表明, RCM 所具有的更加真实合理的地形强迫, 使得其对降水变化的预估往往和其驱动场表现出很大的不同^[4~6]. 东亚地区具有复杂的地形和独特的气候特点, 因而进行高分辨率数值模拟更为重要^[3,5,7~13].

我们使用一个 RCM(RegCM3), 进行了中国及东亚地区 25 km 水平分辨率 1951~2100 年的连续气候变化模拟试验, 并对此模拟的主要结果进行了分析, 分析主要集中于冬季、夏季的气温和降水.

1 模式简介和试验设计

本研究所使用的模式, 为意大利国际理论物理中心(The Abdus Salam International Center for Theoretical Physics, ICTP)在 Giorgi 等人^[14,15]的 RegCM2 基础上所发展的区域气候模式 RegCM3^[16]. 模拟中模式的水平分辨率取为 25 km, 范围覆盖整个中国及周边地区(图 1), 垂直方向分 18 层, 顶层高度为 10 hPa. 模式中辐射采用 NCAR CCM3 方案^[17], 海表通量由 Zeng 等人^[18]方法计算得到, 行星边界层方案使用 Holtslag 等人^[19]方案, 大尺度降水采用 SUBEX 方案^[20], 积云对流参数化选择基于 Fritsch-Chappell 闭

英文版见: Gao X J, Shi Y, Zhang D F, et al. Climate change in China in the 21st century as simulated by a high resolution regional climate model. Chin Sci Bull, 2012, 57, doi: 10.1007/s11434-011-4935-8

图1 区域模式的模拟范围和地形分布(m)

合假设的 Grell 方案^[21,22], 陆面过程使用 BATS1e(生物圈-大气圈传输方案)^[23].

模式使用的植被覆盖在中国区域内使用实测资料^[24], 中国区域外使用 USGS 基于卫星观测反演的 GLCC(Global Land Cover Characterization)资料. 初始场和每 6 小时一次输入模式的侧边界值由全球模式 CCSR/NIES/FRCGC MIROC3.2_hires^[25]在 IPCC SRES A1B 温室气体排放情景下的模拟试验结果得到. MIROC3.2_hires 中大气模式分量水平分辨率为 T106(~125 km), 是 CMIP3(耦合模式比较计划-阶段 3)中分辨率最高的模式, 对当代气候特别是在东亚地区有较好的模拟能力^[26,27].

所进行的试验积分时间为 1948 年 1 月 1 日到 2100 年 12 月 31 日, 共计 153 年, 其中 1948~1950 年 3 a 作为模式初始化时段, 不予分析. 分析中将 1981~2000 年作为当代, 2001~2100 年作为未来, 此外将 2041~2060 年作为 21 世纪中期, 2081~2100 年作为 21 世纪末期. 注意到就作者所知, 这是迄今为止 RCM 在东亚地区所进行的分辨率最高的 21 世纪区域气候变化模拟.

用于检验模式当代模拟的地面气温和降水观测资料, 分别采用了同期 $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ 分辨率的 CN05^[28]和 Xie 等人^[29]资料. 为了便于分析, 首先把模式输出结果和观测资料统一双线性插值到了 $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ (经纬度)格点上.

2 模式对当代气候的模拟和检验

2.1 地面气温

首先通过与观测资料的对比, 检验了模式对当代气温(1981~2000 年)的模拟性能. 由图 2(a)和(c)可

以看到, 模式对中国区域冬季(12~2 月)平均地面气温的空间分布特征和数值都有较好的模拟, 对如准噶尔、柴达木和四川等盆地的高温中心, 以及如昆仑山地区的低温带及天山、祁连山等较小地形引起的低温区, 均有较好的描述. 在大部分地区模拟气温与观测的偏差在 $\pm 1^\circ\text{C}$ 之间, 但在东北和西北部分地区模拟的气温有达到数度的偏暖, 而在青藏高原地区模拟存在普遍的较大冷偏差. 需要指出的是 RegCM3 在高纬度地区冬季气温模拟的偏暖, 是其主要不足之一, 这种现象即使在使用再分析资料驱动时, 也可明显看到^[30], 可能与其不能较好地反映西伯利亚及周边地区冬季较强的地面逆温有关.

模式对夏季(6~8 月)气温的空间分布和数值的模拟总体也较好(图 2(b)和(d)), 模拟与观测的差异主要为在华北和西北沙漠地区偏高 $1\sim 3^\circ\text{C}$, 而在青藏高原和华南、西南部分地区偏低 $1\sim 2^\circ\text{C}$. 冬季、夏季气温模拟和观测间的空间相关系数分别为 0.95 和 0.98.

2.2 降水

图 3 给出区域模式对中国区域冬季、夏季平均降水的模拟和观测. 冬季观测中的降水由东南向西北逐渐减少, 东南部降水中心值在 250 mm 以上(图 3(a)). 区域模式的模拟(图 3(c))基本呈现了观测中南多北少的空间分布, 模拟的主要不足在南方地区为数值偏小, 在降水大值区出现 2 个中心, 而观测中仅为 1 个; 在北方地区则为降水模拟数值偏大. 在以往使用再分析资料和其他全球模式输出结果, 驱动 RegCM3 所进行的试验中也存在上述类似的结果^[30,31]. 冬季模拟和观测降水的空间相关系数为 0.58.

夏季模拟和观测降水的空间相关系数为 0.82. 由图 3(b)和(d)可以看到, 总体而言区域模式较好地模拟了观测降水的空间分布特征和数值范围. 区域模式对西北地区地形引起的降水有较好的描述, 如天山的降水高值区以及天山南北两个盆地的降水低值区等. 主要不足为在东部存在东南沿海降水模拟数值偏少, 而东北地区偏多的问题.

3 中国地区未来气候变化

3.1 地面气温

图 4 给出区域模式模拟的 21 世纪中期和末期冬季、夏季地面气温变化的分布. 从图中可以看到, 未

图2 中国区域冬季、夏季平均气温(°C)

(a) 冬季观测; (b) 夏季观测; (c) 冬季区域模式的模拟; (d) 夏季区域模式的模拟

图3 同图2, 但为平均降水(mm)

图4 区域模式模拟中国区域平均地面气温的变化(°C)

(a) 21 世纪中期冬季; (b) 21 世纪末期冬季; (c) 21 世纪中期夏季; (d) 21 世纪末期夏季

来整个区域内冬季、夏季气温将一致增加,且末期升温幅度比中期更大。

冬季,21 世纪中期北方地区和青藏高原地区升温较南方地区明显(图 4(a)),如南方地区上升不足 2.4°C,而青藏高原南部升温在 4.2°C 以上。与 21 世纪中期相比,21 世纪末期升温空间分布型态和中期相似,但升温幅度更大。西南地区升温低值区中心数值在 4.2°C 以下,青藏高原地区升温高值区中心数值在 7°C 以上,其余大部分地区升温值在 4.5~6.5°C 之间(图 4(b))。21 世纪中期和末期区域平均升温值分别为 3.1 和 5.5°C。

夏季,21 世纪中期大于 4.2°C 的升温大值区从华北向东北延伸,南方地区升温较小,大都低于 2.4°C,青藏高原地区升温值在 2.7~3.3°C 之间(图 4(c))。与冬季类似,夏季 21 世纪末期升温空间分布与中期相似,升温幅度比中期更大,如东北地区升温中心值在 7°C 以上(图 4(d))。21 世纪中期和末期区域平均升温值分别为 3.0 和 5.0°C。

图 5 给出中国地区区域平均的 1981~2100 年冬

图5 1981~2100 年中国区域平均地面气温的变化(°C)

蓝色, 冬季; 红色, 夏季; 黑色, 年平均

季、夏季和年平均气温的变化。虽然冬季、夏季和年平均气温变化在空间分布上各自表现出不同,但在区域平均尺度上三者的逐年升温值相近。2021~2100 年冬季、夏季和年平均气温分别以每 10 年 0.61、0.51 和 0.53°C 的速率上升。

值得注意的是许多全球模式模拟中国地区未来冬季升温更大^[7,9],观测也表明近几十年来中国地区冬季升温更明显^[32],而本研究试验显示出冬季、夏季和年平均气温增温量级相似,相同的结论在其他研究中也出现过^[31]。未来需要更多的研究去了解这种

变化的机制. 同时由图 5 可以看到, 模拟得到的未来升温速度较一般全球模式快^[33], 这主要是与用来嵌套的全球模式 MIROC3.2_hires 本身敏感度较高有关^[34].

3.2 降水

图 6 给出区域模式模拟 21 世纪中期和末期冬季、夏季降水的变化分布. 从图中可以看到, 冬季 21 世纪中期大部分地区降水增加值在 10% 以上, 西北部分地区和东北、华北是降水增加的大值区, 增加值在 25% 以上, 青藏高原、云南西部以及四川盆地部分地区则为降水减少区, 减少值在 10%~50% 之间(图 6(a)). 21 世纪末期降水变化空间分布型(图 6(b))和中期相似, 但北方地区增加数值比中期大, 此外长江以南降水变化为减少. 21 世纪中期和末期区域平均降水变化分别为增加 11.3% 和 8.4%.

夏季, 21 世纪中期降水变化在西部地区呈“偶极子”结构分布, 为西北地区降水增加, 青藏高原大部分地区减少. 东部地区从东北向南至东南沿海, 降水近似呈“负-正-负-正”分布. 21 世纪末期降水变化空间

分布型态(图 6(d))和中期相似, 但降水增加的量级普遍比中期大. 区域平均的降水变化 21 世纪中期为略微增加 0.59%, 末期为增加 4.3%.

图 7 给出中国地区区域平均的 1981~2100 年冬季、夏季和年平均降水的变化. 从图中可以看出, 区域平均尺度上冬季、夏季和年平均降水变化呈现出较强的年际变化, 特别是冬季较为明显(主要是由于冬季降水值相对较小引起的). 2021~2100 年冬季、夏季和年平均降水分别以每 10 年 0.61%, 0.71% 和 1.32% 的速率增加.

3.3 与另一个区域气候模式模拟结果的对比

高学杰等人^[31]使用和本文相同的区域气候模式 (RegCM3), 嵌套另一个全球模式 (FvGCM/CCM3), 进行过类似的模拟. 和本次模拟相比, 两者分辨率接近, 模拟范围也基本一致, 但温室气体排放情景有所不同, 分别为 A1B 和 A2. 由于本文所使用的全球模式 MIROC3.2_hires 具有较大的气候敏感度^[34], 因此两者相对具有一定的可比性. 我们统一选取两者重合的时段, 即当代 1961~1990 年和未来 2071~2100 年,

图 6 同图 4, 但为平均降水的变化(%)

图7 同图5, 但为中国区域平均降水的变化(%)
蓝色, 冬季; 红色, 夏季; 黑色, 年平均

分析了两个全球模式和它们各自驱动下区域模式所预估的降水增加或减少的一致情况, 在图8中给出.

从图中可以看出, 两个全球模式模拟的未来冬季中高纬度降水增加具有一致性, 与对未来极端降雪事件变化预估的空间分布大体一致^[35], 在CMIP3多全球模式结果的集合平均中, 中高纬度降水也是增加的, 但中低纬度为减少^[11]. 对于夏季和年平均降水, 两个全球模式都给出了除个别地区外普遍增

图8 两个全球模式和它们各自驱动下的区域模式所模拟未来降水变化的一致率

蓝色为一致增加, 红色为一致减少. (a) 全球模式冬季; (b) 区域模式冬季; (c) 全球模式夏季; (d) 区域模式夏季; (e) 全球模式年平均; (f) 区域模式年平均

加的结果,这也和多全球模式平均类似^[1].对比图8(b)和(a),可以看到冬季区域模式结果一致性的总体特征和全球模式相近,但两次区域模式的模拟,都给出了在青藏高原地区降水将减少的特点.夏季区域模式模拟结果在西部比较一致,以西北地区的增加、青藏高原和西南地区的减少为主,但在东部季风影响区则相符的地方很少,两者基本呈相反趋势(参见图6(d)和文献[31]中图7(f)),这主要是由于区域模式对全球模式较小的环流变化产生的放大作用产生的(详细讨论将在另文中给出),反映了中国东部夏季降水预估中所存在的很大不确定性.但从年平均降水的变化看,区域模式模拟的中国大部分地方降水一致性仍较好,以青藏高原和西南地区降水减少,其他地区增加为主.

4 小结和讨论

使用 RegCM3 区域气候模式,嵌套 MIROC3.2_hires 全球模式输出结果,在 IPCC SRES A1B 温室气体排放情景下,对中国及东亚地区进行了 25 km 高水分分辨率 150 a 时间长度的数值积分试验.首先对区域模式的性能进行了检验,表明其对中国地区冬季、夏季地面气温和降水的模拟较好,特别是对夏季(汛期)降水型的模拟与观测基本吻合.在此基础上分析了中国地区未来的气候变化,主要结论包括:

(1) 未来冬季、夏季平均气温均将升高,且气温

升高幅度随时间增加.冬季升温大值区位于青藏高原地区,夏季则在华北、东北地区增温更明显.21 世纪中期和末期冬季、夏季升温空间分布大致相同.

(2) 区域模式模拟冬季、夏季区域平均降水将逐渐增加,但增加值不大.21 世纪中期和末期降水变化的空间分布大致相同.冬季北方地区(华北、东北和西北)降水增加,青藏高原和南方地区降水减少;夏季西部地区降水变化的空间分布和冬季相似,东部地区降水变化的空间分布由北部向南方沿海,呈现出一定的负正相间分布型.

(3) 与以往 RegCM3 在另一个全球模式驱动下的结果相比,在两个全球模式所预估的降水增(加)减(少)一致率较好的情况下,一方面区域模式与全球模式结果在冬季、夏季均有所不同,另一方面区域模式的结果在夏季中国东部的一致率很低,反映了预估中所存在的不确定性.未来需要进行更多的模式模拟集合^[36],以了解和减少这种不确定性,最终得到中国地区气候变化更多和更可靠的信息.

受篇幅限制,我们对未来气候变化的分析仅局限于对气温和降水的平均场上,未来将针对其变率和极端事件等开展进一步研究.同时本文中驱动模式 MIROC3.2_hires 结果的对比也较初步,需进行更深入的分析.最后本模拟得到的数据,可应用于影响评估领域,了解中国区域 21 世纪气候变化对农业、水文和生态等不同行业的影响.

致谢 日本国立环境研究所 Seita Emori 博士和 Manabu Abe 博士为本研究提供了 MIROC3.2_hires 模式驱动场资料,在此表示感谢.

参考文献

- 1 IPCC. Climate change 2007: The physical science basis. In: Solomon S, Qin D, Manning M, et al, eds. Contribution of Working Group 1 to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge, United Kingdom and New York: Cambridge University Press, 2007. 1–18
- 2 Giorgi F. Simulation of regional climate using a limited area model nested in a general circulation model. *J Clim*, 1990, 3: 941–964
- 3 Christensen J H, Hewitson B, Busuioc A, et al. Regional climate projections. In: Solomon S, Qin D, Manning M, et al, eds. Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of WGI to the IPCC AR4. Cambridge, United Kingdom and New York: Cambridge University Press, 2007. 847–940
- 4 Hirakuchi H, Giorgi F. Multiyear present-day and 2×CO₂ simulations of monsoon climate over eastern Asia and Japan with a regional climate model nested in a general circulation model. *J Geophys Res*, 1995, 100: 21105–21125
- 5 Gao X J, Zhao Z C, Ding Y H, et al. Climate change due to greenhouse effects in China as simulated by a regional climate model. *Adv Atmos Sci*, 2001, 18: 1224–1230
- 6 Gao X J, Shi Y, Song R Y, et al. Reduction of future monsoon precipitation over China: Comparison between a high resolution RCM simulation and the driving GCM. *Meteorol Atmos Phys*, 2008, 100: 73–86

- 7 姜大膀, 王会军, 郎咸梅. SRES A2 情景下中国气候未来变化的多模式预测结果. 地球物理学报, 2004, 47: 776–784
- 8 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
- 9 Zhou T J, Yu R C. Twentieth century surface air temperature over China and the globe simulated by coupled climate models. *J Clim*, 2006, 19: 5843–5858
- 10 Ju L X, Wang H J, Jiang D B. Simulation of the Last Glacial Maximum climate over East Asia with a regional climate model nested in a general circulation model. *Palaeogeogr Palaeoclimatol Palaeoecol*, 2007, 248: 376–390
- 11 Xu Y, Gao X J, Giorgi F, et al. Upgrades to the REA method for producing probabilistic climate change predictions. *Clim Res*, 2010, 41: 61–81
- 12 Yu E T, Wang H J, Sun J Q. A quick report on a dynamical downscaling simulation over china using the nested model. *Atmos Ocean Sci Lett*, 2010, 3: 325–329
- 13 Wang H J, Yu E T, Yang S. An exceptionally heavy snowfall in Northeast china: Large-scale circulation anomalies and hindcast of the NCAR WRF model. *Meteorol Atmos Phys*, 2011, 113: 11–25
- 14 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 Weather Rev*, 1993, 121: 2794–2813
- 15 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 Weather Rev*, 1993, 121: 2814–2832
- 16 Pal J S, Giorgi F, Bi X Q, et al. The ICTP RegCM3 and RegCNET: Regional climate modeling for the developing world. *Bull Amer Meteorol Soc*, 2007, 88: 1395–1409
- 17 Kiehl J, Hack J, Bonan G, et al. Description of the NCAR Community Climate Model (CCM3). NCAR Technical Note, NCAR/TN-420 STR. 1996
- 18 Zeng X, Zhao M, Dickinson R E. Intercomparison of bulk aerodynamic algorithms for the computation of sea surface fluxes using toga coare and tao data. *J Clim*, 1998, 11: 2628–2644
- 19 Holtslag A, de Bruijin E, Pan H L. A high resolution air mass transformation model for short-range weather forecasting. *Mon Weather Rev*, 1990, 118: 1561–1575
- 20 Pal J S, Small E E, Eltahir E. Simulation of regional-scale water and energy budgets: Representation of subgrid cloud and precipitation processes within RegCM. *J Geophys Res*, 2000, 105: 29579–29594
- 21 Grell G. Prognostic evaluation of assumptions used by cumulus parameterizations. *Mon Weather Rev*, 1993, 121: 764–787
- 22 Fritsch J M, Chappell C F. Numerical prediction of convectively driven mesoscale pressure systems. Part I. Convective parameterization. *J Atmos Sci*, 1980, 37: 1722–1733
- 23 Dickinson R E, Kennedy P J, Henderson-Sellers A, et al. Biosphere-atmosphere transfer scheme (bats) for the ncar community climate model. Technical Report, National Center for Atmospheric Research. 1986
- 24 刘纪远, 刘明亮, 庄大方, 等. 中国近期土地利用变化的空间格局分析. 中国科学 D 辑: 地球科学, 2003, 46: 373–384
- 25 K-1 model developers. K-1 coupled model (MIROC) description. K-1 Technical Report 1. In: Hasumi H, Emori S, eds. Center for Climate System Research. Tokyo: University of Tokyo, 2004
- 26 Lucarini V, Calmanti S, Dell'Aquila S, et al. Intercomparison of the northern hemisphere winter mid-latitude atmospheric variability of the IPCC models. *Clim Dyn*, 2007, 28: 829–848
- 27 许崇海, 沈新勇, 徐影. IPCC AR4 多模式对东亚地区气候模拟能力的分析. 气候变化研究进展, 2007, 3: 287–292
- 28 Xu Y, Gao X J, Shen Y, et al. A daily temperature dataset over China and its application in validating a RCM simulation. *Adv Atmos Sci*, 2009, 26: 763–772
- 29 Xie P P, Yatagai A, Chen M Y, et al. A gauge-based analysis of daily precipitation over East Asia. *J Hydrol*, 2007, 8: 607–626
- 30 Zhang D F, Gao X J, Ouyang L C, et al. Simulation of present climate over East Asia by a regional climate model. *J Trop Meteorol*, 2008, 14: 19–23
- 31 高学杰, 石英, Giorgi F. 中国区域气候变化的一个高分辨率数值模拟. 中国科学: 地球科学, 2010, 40: 911–922
- 32 唐红玉, 翟盘茂. 1951–2002 年中国东、西部地区地面气温变化对比. 地球物理学报, 2005, 48: 526–534
- 33 姜大膀, 张颖, 孙建奇. 中国地区 1–3℃变暖的集合预估分析. 科学通报, 2009, 54: 3870–3877
- 34 Randall D A, Wood R A, Bony S, et al. Climate models and their evaluation. In: Solomon S, Qin D, Manning M, et al, eds. *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of WGI to the IPCC AR4*. Cambridge, United Kingdom and New York: Cambridge University Press, 2007. 589–662
- 35 Sun J Q, Wang H J, Yuan W. Spatial-temporal features of intense snowfall events in China. *J Geophys Res Lett*, 2010, 115: D16110, doi: 10.1029/2009JD013541
- 36 Giorgi F, Jones C, Asrar G, et al. Addressing climate information needs at the regional level: The CORDEX framework. *WMO Bull*, 2009, 58: 175–183