

# 数值模式不同分辨率和地形对东亚降水模拟影响的试验

高学杰<sup>1</sup> 徐影<sup>1</sup> 赵宗慈<sup>1</sup> Jeremy S. PAL<sup>2</sup> Filippo GIORGI<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 中国气象局气候研究开放实验室, 国家气候中心, 北京 100081

<sup>2</sup> The Abdus Salam International Centre for Theoretical Physics, Trieste, Italy

**摘要** 为探讨东亚地区降水数值模拟中水平分辨率和地形的作用, 使用 RegCM2 区域气候模式, 采用不同的模式分辨率和地形, 对东亚降水进行对比模拟试验。结果表明, 东亚地区降水的模拟效果取决于模式的水平分辨率, 模式分辨率越高, 模拟的效果越好。使用实际地形的模拟效果好于使用平滑地形的。但同时, 使用较高分辨率的平滑地形的模拟, 效果好于使用次高分辨率的实际地形的模拟。这表明在东亚地区降水模拟中, 分辨率与地形相比, 起着至少同样重要的作用。结果指出, 对东亚地区降水的模拟而言, 使用 60 km 及以上分辨率可能是必需的。

**关键词** 东亚降水 区域气候模式 分辨率 地形

**文章编号** 1006-9895(2006)02-0185-08

**中图分类号** P461

**文献标识码** A

## Impacts of Horizontal Resolution and Topography on the Numerical Simulation of East Asian Precipitation

GAO Xue-Jie<sup>1</sup>, XU Ying<sup>1</sup>, ZHAO Zong-Ci<sup>1</sup>, Jeremy S. PAL<sup>2</sup>, and Filippo GIORGI<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Laboratory for Climate Studies, National Climate Center, China Meteorological Administration, Beijing 100081

<sup>2</sup> The Abdus Salam International Centre for Theoretical Physics, Trieste, Italy

**Abstract** Traditionally General Circulation Models (GCMs) have shown a poor performance in simulating the East Asian monsoon precipitation patterns. The precipitation center simulated by GCMs is usually located too far north over central China. This can be found in many GCM simulations, e. g., the Australia CSIRO model. However, in our previous work, after nesting the above mentioned CSIRO model results to a regional climate model (RegCM2) which has a much higher resolution, the simulation of the precipitation is highly improved. Not only regional details but also the large scale spatial distribution becomes closer to reality.

To investigate the role the resolution and topography play in the simulation of East Asian precipitation, a series of experiments with different settings of them are conducted using RegCM2 nested in one-way mode within the CSIRO global coupled atmosphere-ocean model. Two sets of RegCM experiments are performed and intercompared; in one set both topography and resolution change across the range from 45 to 360 km (referred to as R45, R60, R90, ..., R360); in the second set only the resolution changes while the topography remains the same as that of the CSIRO GCM (referred to as G60, G90, ..., G360).

It is found that the simulated East Asian large-scale precipitation patterns are significantly affected by resolution. More specifically, simulated precipitation is increasingly realistic with grid point refinement. For coarser reso-

lutions the precipitation maximum is displaced too far north and west compared to observations, which is similar to the GCM simulation. Spatial correlation coefficients between simulated and observed annual mean precipitation are calculated to more quantitatively analyze the model simulation of precipitation spatial patterns at the 160 China stations. In general, it can be seen that the coefficient increases as the model resolution increases. R45 shows the highest value of 0.81, while R60 is 0.78, R90 is 0.71, etc.

The effect of resolution is the most important during the mid to late monsoon months when smaller scale convective processes dominate. For example, although Meiyu front is a synoptic scale system, studies show that the precipitation is mainly caused by the (sub-GCM grid) medium and mesoscale convection systems. Coarse resolution does not allow the description of them and therefore the moisture from the sea is not efficiently removed over the coastal regions and can more easily reach the interior of the continent (central China) and precipitate there. During the winter months, the model reproduces well the large-scale distribution of precipitation over East Asia regardless of the resolution.

Summer is the main rain season over China, precipitation is probably mainly caused by mesoscale convective systems. Coarse resolution does not allow the description of these systems and therefore the moisture from the sea is not efficiently removed over the coastal regions and can more easily reach the interior of the continent (central China) and precipitate there.

While real topography is important, it is also shown that the simulations using a higher resolution but the coarse CSIRO topography perform better than the simulations using the coarser model resolution with real model topography. For example, the above mentioned coefficient is 0.75 for G60, 0.71 for R90, and it is 0.60 for G90, 0.53 for R120, etc. This suggests that over East Asia it is more important to have adequate spatial resolution of the physical and dynamical processes than topography.

Lastly, the results indicate that model resolutions of 60 km or higher are needed to accurately simulate the distribution of precipitation over China and East Asia.

**Key words** East Asian precipitation, regional climate model, horizontal resolution, topography

## 1 引言

全球环流模式是进行气候模拟和气候变化研究的重要工具。但由于计算条件限制,其分辨率一般较低(现在水平分辨率一般在 200~500 km),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。为此人们开始提出和使用区域气候模式<sup>[1~3]</sup>。

中国地处东亚季风区,降水的模拟较难进行。全球环流模式模拟的中国降水,经常会在中国中西部出现一个大的虚假降水中心,如应用很广的美国 NCAR CCM3 模式、国家气候中心 T63 AGCM 等<sup>[4, 5]</sup>。

在以往工作中,我们使用 60 km×60 km 分辨率的 RegCM2 区域气候模式<sup>[6, 7]</sup>,单向嵌套澳大利亚 CSIRO R21L9 全球环流模式(水平分辨率约为 5.6°经度×3.2°纬度)<sup>[8]</sup>,进行东亚和中国地区的气候模拟和气候变化试验<sup>[9~11]</sup>。发现 CSIRO 模式模拟的中国降水,同样在中国中西部出现一个大的降水中心,但嵌套的区域模式则除了提供对模拟量更细致的空间分布描述外,还极大地改进了对中国降

水型的模拟,消除了上述虚假降水中心,降水大值位于中国南方,和实况一致。

这种改进的原因可能有许多方面,如物理过程不同、分辨率的提高等。针对其中的分辨率和地形问题,我们使用 RegCM2 模式,采用不同的水平分辨率和地形进行了一系列试验,以考察它们在东亚和中国季风降水中所起的作用。

## 2 试验设计

与以往工作相同<sup>[9~11]</sup>,采用的区域气候模式为 RegCM2,并继续使用 CSIRO 全球模式控制试验的结果产生驱动区域模式所需的初始和边界场。除分辨率以及相应的边界缓冲数目、地形外,模式的其他设置亦与以往工作相同,其中模式覆盖范围可参阅文献<sup>[10]</sup>图 1,边界缓冲区由指数松弛技术设置,湿度方案取为显式,陆面过程使用 BATS,对流参数化选用 Grell 方案,行星边界层为非局地 Holtslag 方案。

试验分为 2 组。第 1 组试验的区域模式使用了

分别为 45 km、60 km、90 km、120 km、180 km、240 km 和 360 km 格距的水平分辨率, 地形资料由 NCAR 30' 的“实际地形”插值而来, 在下文中分别用 R45、R60、R90、R120、R180、R240 和 R360 表示。第 2 组试验中模式使用的分辨率与第 1 组相同(除 45 km 外), 但地形由非常平滑的 CSIRO 模式地形插值得到, 分别用 G60、G90、G120、G180、G240 和 G360 表示。图 1a、b 给出 R60、G60 在中国地区的地形分布, 可以看到, 由 NCAR 30' 资料得来的地形比较真实, 如区域内的海岸线分布, 我国西南部的四川盆地、东南部的武夷山脉、东北地区的长白山脉等, 在其中都得到较详细描述, 而由

CSIRO 模式得到的 G60 的地形则过于平滑, 不能分辨这些地形特征。

各试验积分时间长度均为 5 年。分析集中在对中国地区降水的简要分析上, 为方便起见, 与以往工作相同<sup>[9~11]</sup>, 将模式输出结果插值到了中国 160 观测站上。

### 3 试验结果

首先, 在图 2a 中给出中国地区多年平均降水的实况分布, 由图中可以看到, 我国的主要降水区位于长江及以南地区, 其中 1000 mm 等值线基本位于长江沿线的北侧, 大陆沿海地区出现 1500 mm

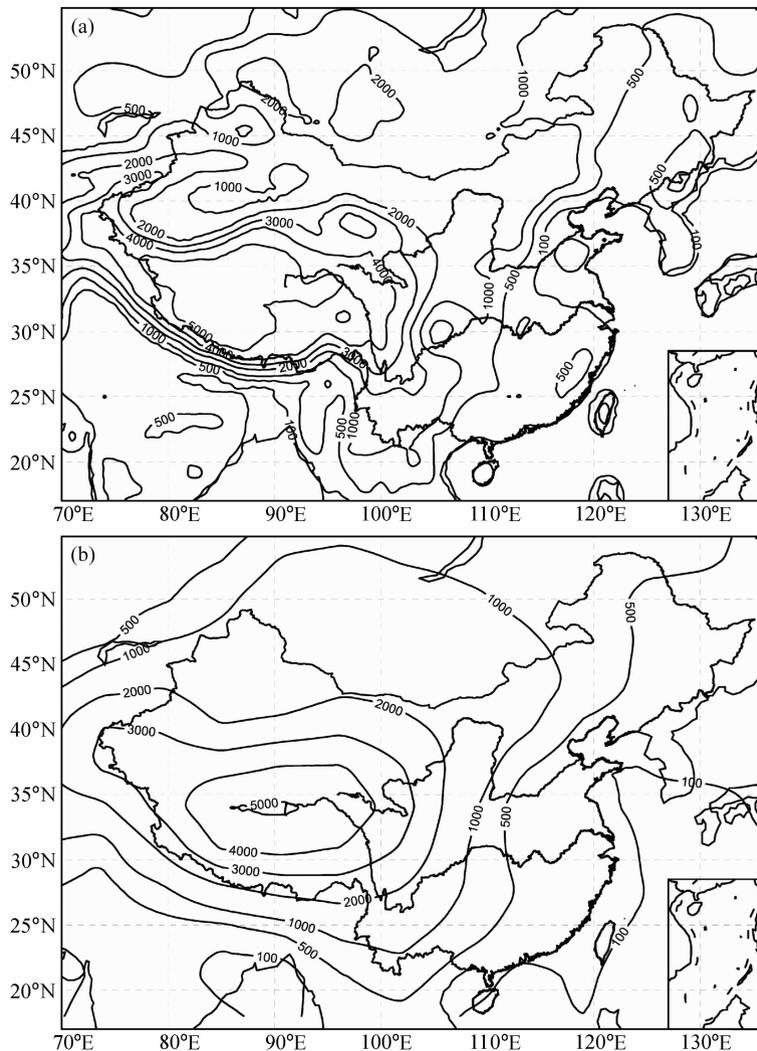


图 1 部分试验使用的地形分布(单位: m): (a) R60; (b) G60。R60 代表使用实际地形的 60 km 分辨率的试验, G60 代表使用全球模式地形的 90 km 分辨率的试验, 下文中 R90, G90 等的含义相同

Fig. 1 Topography used for some of the experiments (units: m): (a) R60; (b) G60. R60 refers to 60 km resolution experiment using real topography, while G60 refers to 60 km resolution experiment using CSIRO topography. Similar for R90, G90, etc., hereafter

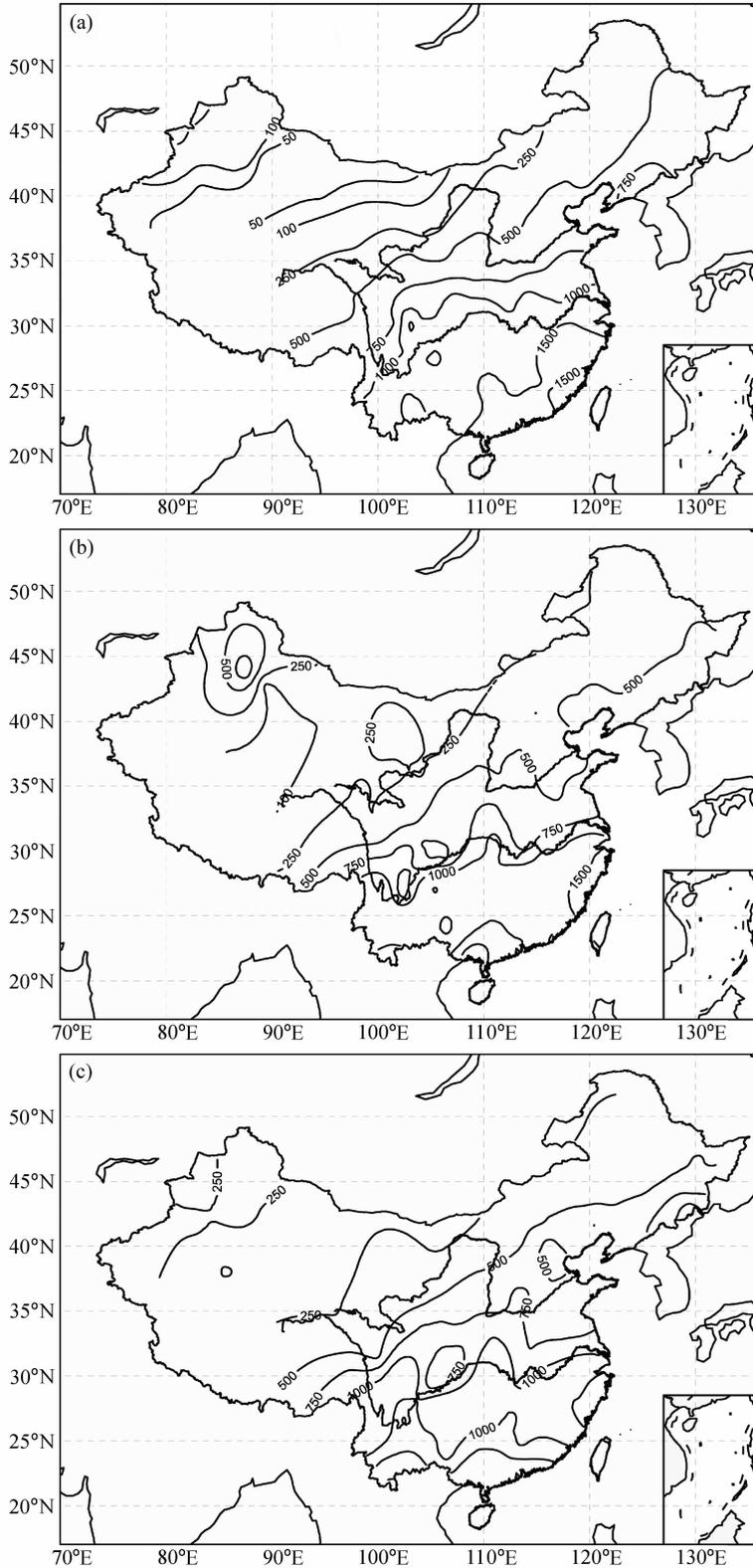


图 2 中国年平均降水(单位: mm): (a) 实况(1961~1990 平均); (b) R60 的模拟; (c) R90 的模拟; (d) R120 的模拟; (e) R240 的模拟; (f) G90 的模拟

Fig. 2 Annual mean precipitation in China (units; mm) (a) observed (1961 - 1990 mean) and simulated by (b) R60, (c) R90, (d) R120, (e) R240, (f) G90

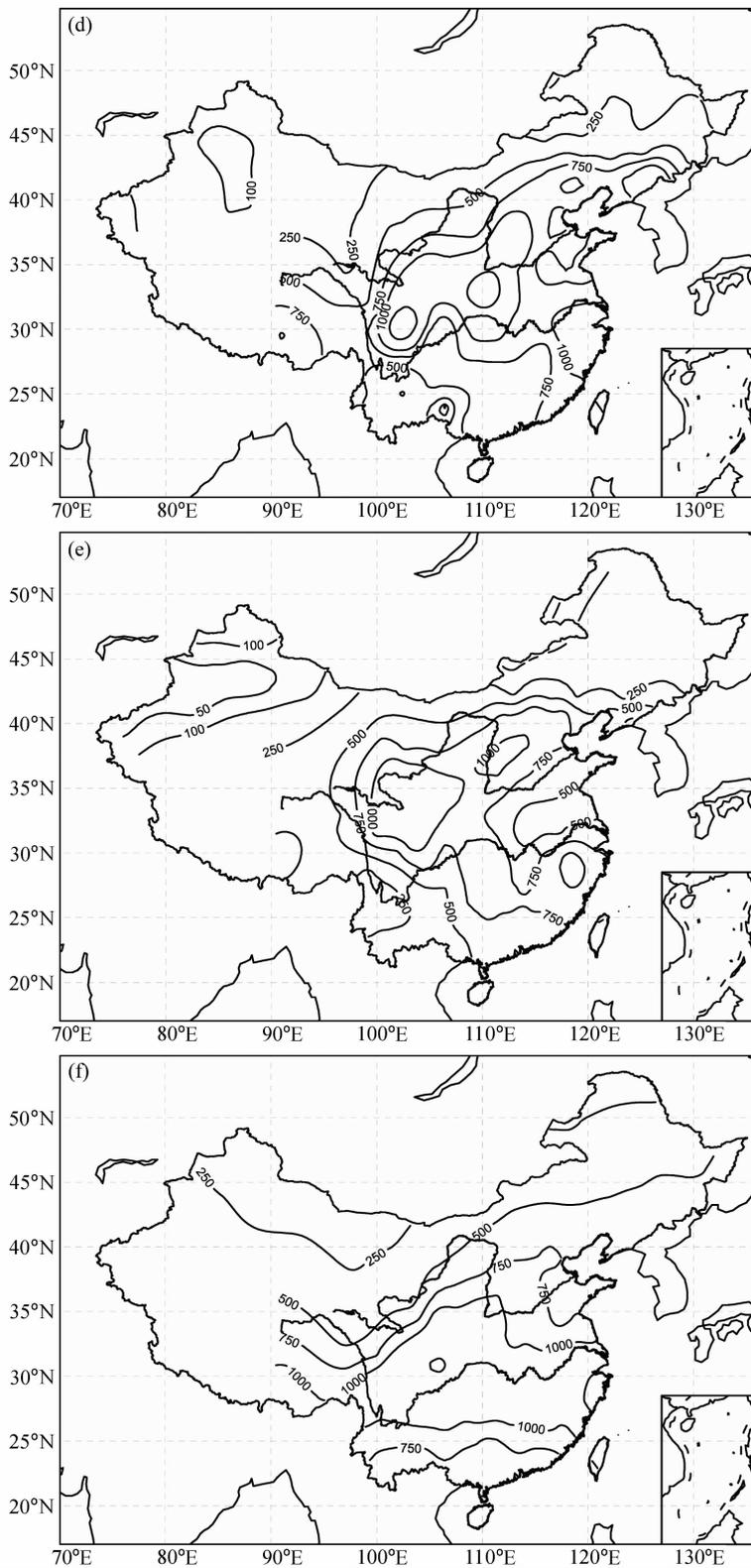


图 2 (续)

Fig. 2 (Continued)

的降水高值区。

R60 模拟的中国年平均降水分布(图 2b)中, 1000 mm 降水等值线北端位于长江沿线, 与实况接近, 但模式模拟的中国南部沿海降水偏少。在 R90 的模拟(图 2c)中, 1000 mm 降水等值线的北端虽然还停留在长江沿线, 但其南端已有一定北移, 到达广东、广西与福建、江西、湖南和贵州交界的地区。另外, 从 R60 到 R90, 可以看到模式随分辨率降低, 所模拟降水的空间分布形式也趋于平滑。

R120 时, 模拟的大于 1000 mm 降水区的主体移到到长江中上游及以北地区, 南部沿海地区的降水量降低到 600 mm 左右(图 2d)。此后的 R180(图略)、R240(图 2e)和 R360 的模拟(图略)试验, 随着分辨率降低, 大于 1000 mm 降水区的主体继续向北和向西移动, 最后到达中国中西部, 表现出与

全球模式模拟的结果有很大一致性(参阅文献[4]图 6b、文献[5]图 2b、文献[9]图 2a)。

使用全球模式地形的试验结果, 图 2f 给出 G90 的例子。与 R90 相比, G90 对中国降水的模拟效果要差, 一方面中国降水的空间分布过于平滑, 另一方面模拟的大于 1000 mm 降水区位置较 R90 偏北, 但偏北的程度较 R120(图 2d)为低。从这个意义上讲, G90 的模拟效果要好于 R120。

为进行定量分析, 计算了各试验模拟的年平均降水与气候实况降水(1961~1990)空间分布的相关系数(图 3a)。从图 3a 中可以看到, 随着分辨率降低, 模式对中国降水的模拟能力也整体呈下降趋势, 其中分辨率最高的 R45 的相关系数值最高, 为 0.81; 分辨率最低的 R360 的相关系数值则最低, 仅略高于 0.2 (*t* 检验 99% 信度)。

同时可以看出, 在同样分辨率情况下, R 试验

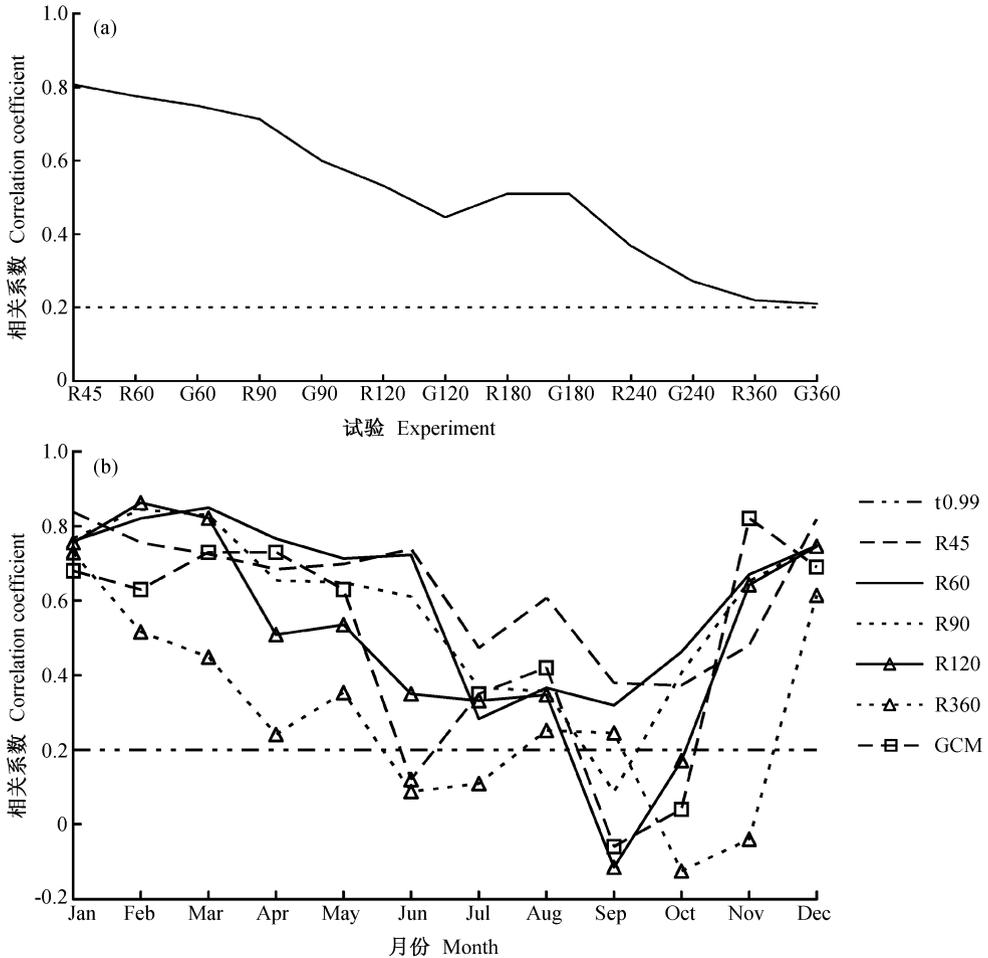


图 3 不同试验对中国降水模拟与实况空间分布的相关系数(点虚线为 *t* 检验达到 99% 信度): (a) 年平均降水; (b) 月平均降水  
Fig. 3 Spatial correlation coefficient between simulated and observed precipitation in China; (a) Annual mean precipitation; (b) monthly mean precipitation. Dot-dashed line is for 0.99 significant level

的模拟一般好于 G 试验, 如  $C_{R60} = 0.78$ ,  $C_{G60} = 0.75$  ( $C_{R60}$ 、 $C_{G60}$  及下文类似符号分别表示下标所指试验模拟的年平均降水与气候降水空间分布的相关系数);  $C_{R90} = 0.71$ ,  $C_{G90} = 0.60$ ;  $C_{R120} = 0.53$ ,  $C_{G120} = 0.45$  等, 反映了实际地形的重要性。注意到当分辨率降低到一定程度时, R 试验和 G 试验的地形趋于一致, 相关系数值也趋于一致。另外, 从图 3a 也可以看到, G 试验中高分辨率情况下的模拟结果, 好于 R 试验中分辨率低一级的模拟结果, 如  $C_{G90} = 0.60$ , 而  $C_{R120} = 0.53$  等。

图 3b 给出 CSIRO 模式和部分 R 试验模拟的各月降水与实况的相关系数。可以看到, 在冬半年 1~3 月和 11~12 月, 除 R360 外, 各试验的模拟效果都较好, 相关系数值一般在 0.6~0.8 间。在夏半年 4~10 月, 试验之间差别则较大, 一般说来模拟效果随分辨率降低而降低, 特别是处于季节转换期的 6 月和 9~10 月。以 6 月为例, 各试验的相关系数值分别为:  $C_{R45} = 0.74$ ,  $C_{R60} = 0.72$ ,  $C_{R90} = 0.61$ ,  $C_{R120} = 0.35$ ,  $C_{R360} = 0.09$  (GCM 的相关系数值为 0.12)。全年各月中, 东亚夏季风南退的 9 月是较难模拟的时期, 各试验中只有 R45 ( $C_{R60} = 0.38$ ) 和 R60 ( $C_{R60} = 0.32$ ) 的  $t$  检验达到 99% 信度, 说明在中国降水模拟中, 如果各个月的模拟都要达到可信程度的话, 60 km 及高于 60 km 的分辨率是必需的。

G 试验对月降水模拟的情况类似(图略), 相关系数值一般也是随分辨率的降低而降低, 如在 6 月份,  $C_{G60} = 0.67$ ,  $C_{G90} = 0.46$ ,  $C_{G120} = 0.29$  等。与 R 试验比较, 同样发现各月在相同分辨率情况下, R 试验的模拟好于 G 试验; 但 G 试验高一级分辨率的模拟则好于次一级分辨率的 R 试验。

## 4 结论和讨论

使用 RegCM2 区域气候模式, 进行不同水平分辨率和地形对东亚和中国降水模拟的数值试验。试验结果表明, 数值模式的水平分辨率对东亚和中国降水的模拟是非常重要的, 60 km 或高于 60 km 的分辨率可能是很好地模拟中国降水所必需的。分辨率不够时, 模式将不能很好地模拟出东亚和中国季风降水的主要特征。

分辨率提高对降水模拟改善的效果在冬半年不明显, 而在夏半年明显。注意到中国夏半年降水在

全年降水占重要地位, 在大部分地方, 5~9 月的降水会占到全年降水的 60%~85%。分辨率对中国冬半年降水模拟影响不大的原因, 可能是因为这时的降水以大尺度降水为主, 从而对模式的分辨率不敏感。而夏半年降水以局地对流性降水为主, 对应的天气和气候系统尺度较小, 模式在分辨率不够高的情况下, 这些较小尺度的系统不能被反映, 而导致模拟失败。以影响我国长江中下游地区的梅雨为例, 许多研究表明, 虽然形成降水的梅雨锋是一个天气尺度系统, 但梅雨锋上造成暴雨的直接环流系统却是中尺度对流系统<sup>[12]</sup>。

此外, 在以往的研究中, 一般强调复杂地形对降水模拟的重要性<sup>[13]</sup>。但我们的试验结果表明, 使用平滑地形但分辨率较高, 与使用实际地形但分辨率较低相比较, 会取得更好的模拟结果。说明在东亚地区降水模拟中, 与地形相比, 模式分辨率起着至少同样重要的作用。

最后需要指出的是, 东亚季风是数值模式较难模拟的系统。我们的工作只是使用一个模式就水平分辨率和地形作用问题进行一些初步探讨, 对其中物理机制的分析还不够深入。这方面还需要更多的研究才能得到更深入和可靠的结论。

## 参考文献 (References)

- [1] Giorgi F, Bates G T. The climatological skill of a regional model over complex terrain. *Mon. Wea. Rev.*, 1989, **117**: 2325~2347
- [2] Giorgi F. Sensitivity of simulated summertime precipitation over the western United States to different physics parameterizations. *Mon. Wea. Rev.*, 1991, **119**: 2870~2888
- [3] 赵宗慈, 罗勇. 二十世纪九十年代区域气候模拟研究进展. *气象学报*, 1998, **56**: 225~246  
Zhao Zongci, Luo Yong. Advances in regional climate modeling since 1990. *Acta Meteorologica Sinica*, 1997, **11**: 385~406
- [4] 高学杰, 周广庆, 陈嘉滨. 使用气候海温的 T63/NCC 模式对北半球大气环流和中国气候的模拟. *气候与环境研究*, 2003, **8**(3): 339~347  
Gao Xuejie, Zhou Guangqing, Chen Jiabin. Simulation of global circulation and climate in China by T63 model with mass conservation law. *Climatic and Environmental Research* (in Chinese), 2003, **8**(3): 339~347
- [5] 高学杰, 林万涛, Kucharsky F, 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, Kucharsky F, et al. Simulation of climate and short-term climate prediction in China by CCM3 driven by observed SST. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 2004, **28**(1): 63~76
- [ 6 ] 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
- [ 7 ] 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
- [ 8 ] Gordon H B. A flux formulation of the spectral atmospheric equations suitable for use in long-term climate modeling. *Mon. Wea. Rev.*, 1981, **109**: 56~64
- [ 9 ] 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
- [10] 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
- [11] Gao Xuejie, Luo Yong, Lin Wantao, et al. Simulation of effects of landuse change on climate in China by a regional climate model. *Adv. Atmos. Sci.*, 2003, **20**(4): 583~592
- [12] 陶诗言. 中国之暴雨. 北京: 科学出版社, 1980. 94~121  
Tao Shiyuan. *Heavy Rainfall in China* (in Chinese). Beijing: Science Press, 1980. 94~121
- [13] Giorgi F, Mearns L O. Approaches to regional climate change simulations; A review. *Rev. Geophys.*, 1991, **29**: 191~216