

董思言, 熊喆, 延晓冬. 2014. RIEMS2.0 模式提高分辨率对中国气温模拟能力的影响 [J]. 气候与环境研究, 19 (5): 627–635, doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2013.13088. Dong Siyan, Xiong Zhe, Yan Xiaodong. 2014. Influence of increasing RIEMS2.0 model's resolution on mean air temperature over China [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 19 (5): 627–635.

RIEMS2.0 模式提高分辨率对中国气温模拟能力的影响

董思言¹ 熊喆² 延晓冬³

¹ 国家气候中心, 北京 100081

² 中国科学院大气物理研究所东亚区域气候—环境重点实验室, 北京 100029

³ 北京师范大学, 北京 100875

摘 要 利用区域环境集成系统模式 (RIEMS2.0) 在 60 km 和 30 km 两种分辨率下进行中国区域的长期模拟试验 (1991~2000 年), 开展不同分辨率下中国气温平均气候态和年际变率的模拟能力分析研究。结果表明: (1) RIEMS2.0 能较好模拟出多数分区多年平均气温的空间分布, 与观测空间分布较接近。随着水平分辨率的提高, 模式模拟的气温空间分布模拟更精细, 使得平均气温的模拟冷偏差减小, 模拟结果更趋于实测。对年均温和冬季气温来说, 中国及多数分区模拟与观测的偏差减少, 且通过显著性检验 ($P < 0.01$); 对夏季气温来说, 中国及多数分区的偏差增加, 气温的模拟能力没有明显提高。(2) 对年际变率来说, 随着水平分辨率的提高, 大部分区域模拟能力有一定程度的提高。特别是年均温和冬季气温的年际变率, 多数地区模拟改进效果较好; 而夏季气温年际变率的模拟在中国大部分地区没有明显改善。

关键词 RIEMS2.0 水平分辨率 中国气温 数值模拟

文章编号 1006-9585 (2014) 05-0627-09

中图分类号 P461

文献标识码 A

doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2013.13088

Influence of Increasing RIEMS2.0 Model's Resolution on Mean Air Temperature over China

DONG Siyan¹, XIONG Zhe², and YAN Xiaodong³

¹ National Climate Center, Beijing 100081

² Key laboratory of Regional Climate-Environment Research for Temperate East Asia, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Science, Beijing 100029

³ Beijing Normal University, Beijing 100875

Abstract Climate simulations (1991–2000) at 60-km and 30-km resolutions using the Regional Environmental Integration Model System (RIEMS2.0) were made to test its ability to simulate the mean temperature and inter-annual variability of temperature in China and to comprehensively evaluate the influence of horizontal resolution on temperature simulation. The results showed that, (1) whether at high or low horizontal resolution, RIEMS2.0 can simulate the spatial distribution of mean temperature to a degree that is similar to observational data results. With an improvement in horizontal resolution, results show a systematic cold bias which is even closer to observational data results. In the winter and annual system, the cold bias is reduced in China and in a majority of the regions, and these reductions are significant ($P < 0.01$). In summer, however, a warm bias around China and in the majority of its regions increased, but the simulation ability was not improved with an

收稿日期 2013-05-17 收到, 2013-09-16 收到修定稿

资助项目 国家重点基础研究发展计划项目 2009CB421100, 国家自然科学基金项目 91025003, 中国科学院战略性先导科技专项 XDA05090206

作者简介 董思言, 男, 1982 年生, 博士, 助理研究员, 主要从事气候变化及气候模拟研究。E-mail: dongsy@cma.gov.cn

通讯作者 熊喆, E-mail: xzh@tea.ac.cn

increase in resolution. (2) Simulation capabilities for the temperature inter-annual variability were significantly improved with increased resolution. In particular, the inter-annual variability of the annual temperature and winter temperature improved the most, and the ability to simulate the inter-annual variability in the winter temperature and the annual temperature in China, and in most of its regions, were also greatly improved. However, the ability to simulate the inter-annual variability of the summer temperature in China and in most of its regions worsened.

Keywords RIEMS2.0, Resolution, Chinese air temperature, Numerical simulation

1 引言

全球大气环流模式难以较好地描述区域地形和中小尺度物理和化学等作用, 所以造成的较大模拟偏差 (IPCC, 2007; Xu et al., 2010; 田芝平和姜大膀, 2013), 而区域气候模式具有较高分辨率和较完善的物理过程, 在表现较大尺度上环流强迫特征的同时, 通过对区域内中小尺度的地形、下垫面情况等更细致地描述, 可以得到局地气候以及气候变化的更细节特征 (Giorgi and Mearns, 1999)。区域气候模式中包含辐射传输和陆面过程等更为复杂的物理参数化方案, 对局地强迫引起的气候特征具有较好的模拟能力 (赵宗慈和罗勇, 1998; 郑益群等, 1999; Giorgi et al., 2001)。因此, 区域气候模式是进行区域气候变化研究的主要工具。

过去进行的中国区域气候模拟研究工作表明, 区域气候模式对中国气温的模拟效果较好, 但多数区域气候模式模拟气温在中国区域都存在系统冷偏差, 特别在冬季偏差更大, 这是区域气候模拟普遍存在的问题 (Fu et al., 2005)。区域环境集成系统模式 RIEMS2.0 也有同样的问题 (熊喆等, 2009; 赵得明等, 2009), 这可能与模式水平分辨率有密切相关。

从理论上来说, 区域气候模式水平分辨率越高, 所描述的地形地貌和所能刻画的大气物理和化学等作用过程越精细, 试验结果就越接近实际气候系统。然而, 相关研究表明模式水平分辨率的提高不一定会带来模拟结果的显著改善 (廉丽姝等, 2011; 刘金波等, 2011), 模式模拟结果对分辨率的敏感性较为复杂, 并不是分辨率越高模拟效果就越好, 不同区域、不同月份区域平均气候值对分辨率的敏感性存在明显差异 (陈跃浩等, 2012)。关于区域气候模式随着水平分辨率的提高是否提高模式模拟能力一直存在不同看法, 同时国内外研究模拟的多数时间较短, 因此本文利用区域气候模式开展在两种不同水平分辨率条件下长时间的模拟研

究工作, 重点考察该模式对中国区域气温的模拟能力。

2 模式及试验设计

本研究采用中国科学院大气物理研究所全球变化东亚区域研究中心研究开发的区域环境集成系统模式 (RIEMS2.0), 它是在 RIEMS1.0 基础上开发的区域气候模式, 该模式对于季风亚洲区多年平均环流特征、气温和降水具有较好的模拟性能 (赵得明等, 2009; 熊喆等, 2009; Zhao, 2013), 并参加区域气候模式比较计划 RMIP (Regional climate Model Inter-comparison Project) (Fu et al., 2005), 在区域气候模拟方面有良好的表现, 对东亚和中国区域工作涉及气候异常事件模拟分析以及气候变化研究等也有很好的表现 (Xiong et al., 2003; Zhao, 2013)。

本文设计两个试验进行比较分辨率试验, 它们基本参数一致, 其中模拟区域中心点位于 (40°N, 102°E), 投影方式采用兰勃托正形投影方式, 模式模拟的范围包括整个中国区域, RIEMS2.0 采用辐射方案为 NCAR CCM3 (National Center for Atmospheric Research Community Climate Model 3) 方案 (Kiehl et al., 1997), 陆面过程使用 BATS1e (Biosphere-Atmosphere Transfer Scheme 1e) (Dickinson et al., 1993), 行星边界层方案使用 MRF (Medium Research Forecast) 方案, 积云对流参数化方案选择 Grell 方案 (Grell, 1993)。

初始场和侧边界场由美国国家环境预测中心的 NCEP 再分析资料 II 得到, 侧边界方案采用指数松弛边界方案。两个试验积分模拟时间从 1990 年 1 月 1 日到 2000 年 12 月 31 日, 其中 1990 年为积分开始时间, 分析 1991 年 1 月 1 日到 2000 年 12 月 31 日一共 10 年的数据。

第一个试验为低分辨试验 (称为 G60), 模式水平分辨率为 60 km [格点数 89 (纬向) × 101 (经向)]。第二个试验为高分辨试验 (称为 G30), 模

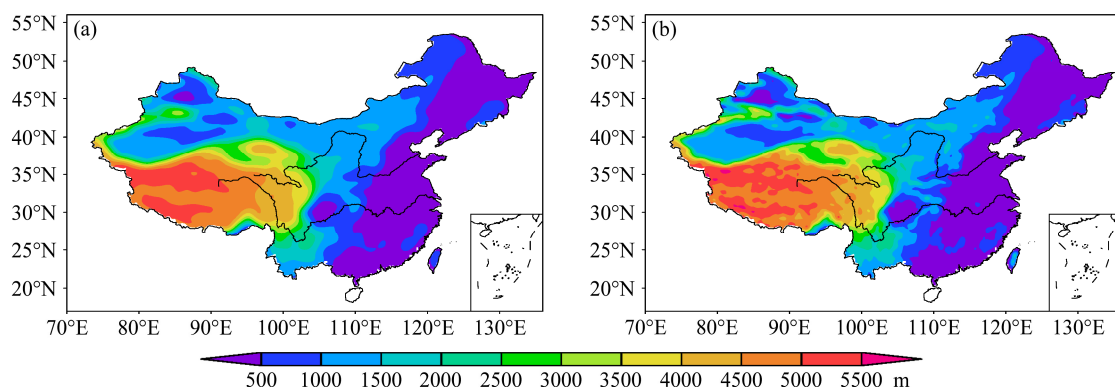


图 1 (a) G60、(b) G30 模拟区域地形

Fig. 1 Model domain and topography of (a) G60 and (b) G30

式水平分辨率为 30 km [格点数 161 (纬向) × 191 (经向)]。在 RIEMS2.0 中, 试验所用的地形资料由 NCAR30' 地形抛物线插值而来, 从 NCAR30' 资料插值出来不同试验的地形可以看出: 中国西南部的四川盆地、东北地区的长白山脉, 山西太行山脉等, 在 30 km 分辨率试验中对这些地形中有更细致地刻画, 而 60 km 分辨率试验的地形过于平滑 (图 1)。

3 验证资料及分析方法

3.1 验证资料

用于检验模拟的气温资料是 CN05 资料 (Xu et al., 2009)。该资料是参照英国 East Anglia 大学的 CRU (Climatic Research Unit) 资料 (New et al., 1999, 2000) 的插值方法制作的, 对于气候场的插值, 使用了薄板样条方法, 通过 ANUSPLIN 软件实现 (Hutchinson, 1999)。CN05 在高分辨模式的模拟检验中, 得到了广泛的应用 (高学杰等, 2010)。CN05 是根据 751 个观测站的气温资料所整理得到的 0.5° (纬度) × 0.5° (经度) 格点资料, 由于水平分辨率不同, 为了便于与模拟数据进行定量比较, 将观测资料采用双线性插值的方法, 插值到不同分辨率模拟格点上。

同时, 为了研究方便根据中国的气候特性和地理特点, 将中国分成 7 个重点分区 (图 2), 包括东北 (NE) (120°E 以东)、华北 (NC) (35°N ~ 41°N, 105°E 以东)、西部东部 (NWE) (35°N 以北, 100°E ~ 120°E)、西北西部 (NWW) (35°N 以北, 100°E 以西)、西南 (SW) (35°N 以南, 98°E ~ 110°E)、华中 (CC) (25°N ~ 35°N, 110°E 以东) 和华南 (SC) (25°N 以南, 105°E 以东)。同时按照季节分析, 重

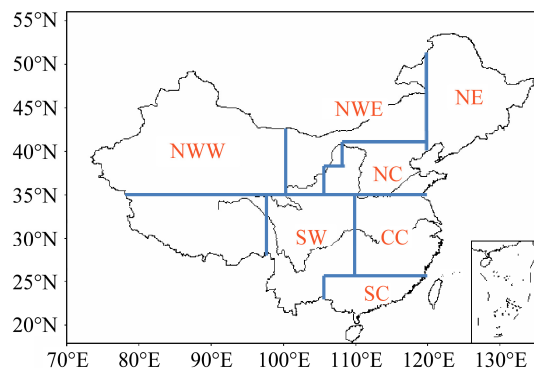


图 2 中国区域分区

Fig. 2 Domain and focused regions of China

点分析夏季和冬季, 夏季包括 6 月、7 月和 8 月, 冬季包括 12 月、1 月和 2 月。

3.2 分析方法

首先对平均气温的空间分布形势和偏差进行了对比分析, 然后利用 Taylor 图对模拟和观测场进行更加直观的统计分析。因为, 在进行多模式比较时, Taylor 图可以较为直观的反映出各个模式模拟能力的好坏通过 Taylor 图还可以看出模式改进所造成的模拟性能变化等, 同时也为进行模式技巧评分提供了依据 (Taylor, 2001)。本文利用 Taylor 进行不同分辨率模拟性能的比较, 主要从两个方面综合考查平均气温的相匹配的程度, 分别为模拟与观测的空间相关系数和它们的空间标准差之比。

空间分布相关系数 (COR) 的计算公式为

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

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, N 为区域内格点数目。

标准差 (STD) 的计算公式为

$$\text{STD} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}, \quad (2)$$

其中, x_i 为各格点上的观测或模拟值; $\bar{x}$ 为各格点上观测或模拟的多年平均值; n 是格点的数目。最后, 为了研究气温的年际变率, 对中国及分区的模拟和观测气温求标准差和距平。

4 结果分析

4.1 对平均气温的影响

图 3 为多年平均气温观测和模拟的空间分布形势, 从图中可以看出, RIEMS2.0 在两种分辨率下对中国区域平均气温空间分布模拟效果较好, 均能够较好地模拟出气温场的分布形势, 除青藏高原外, 大致呈现由南向北逐渐降低的趋势, 青藏高原的冷中心及南疆盆地、四川盆地的暖中心, 这些与观测结果基本一致。从不同分辨率试验比较可以看出, G60 模拟的等值线比较平滑 (图 3d、3e、3f)。水平分辨率提高后, G30 模拟中国年均温和夏季气温的模拟与观测空间相关系数没有增加, 中国只有冬季气温空间分布南向北逐渐降低的趋势更符合实际观测的结果 (图 3g、3h、3i), 空间相关系数由 0.97 增加到 0.98。但是, 从不同分区来看, 大部分分区的平均气温与观测的空间相关系数增加, 其中西北西部、华中和华南平均气温空间相关系数都增加较大, 华中年均气温、夏季气温和冬季气温的空间相关系数, 分别增加到 0.93、0.88 和 0.92, 这说明提高水平分辨率后更好地反映小区域气温的空间分布。另外, 从图也可以发现: 高分辨率试验的模拟结果给出了更多的气温分布细节, 这也有助于改善各区域模拟形势, 如对西北柴达木盆地、准格尔盆地的高温地带和昆仑山地区的低值区、天山等较小地形引起的低值中心也有较好的模拟。总之, 模式随着水平分辨率的提高, 模式能够更好地出温度的区域特征, 特别是观测气温在夏季长江下游的高值中心 (图 3h)。

图 4 为中国区域多年平均气温模拟和观测偏差的空间分布。从 G60 和 G30 模拟的结果可以看出, RIEMS2.0 模拟温度在中国大部分地区与观测偏差

为冷偏差, 对于塔里木盆地和准格尔盆地一带年平均温度也存在暖偏差 2~3 °C。从偏差的空间分布来看, 冬季冷偏差较夏季大, 除去大地形及附近地区, 中国大部分地区冷偏差在 3 °C 以上, 东部以及青藏高原地区冷偏差超过 2 °C, 夏季气温模拟的冷偏差主要集中在中国东部地区。在不同的季节, 高大地形地区容易产生大的冷偏差, 较大的温度模拟偏差出现在青藏高原以及附近, 原因可能是青藏高原地区观测站稀疏和观测地形与模式模拟的地形存在差异有关, 另外由于观测资料的水平分辨率为 0.5°, 而模式的水平分辨率为 30 km, 因此在中国西部地区存在系统偏差。

随着模式水平分辨率的提高, 可以清楚的看出: 对年平均来说 (图 4a、4d), 模拟的气温尽管大部分地区较观测来说仍然存在冷偏差, 但随着水平分辨率的提高, 温度的冷偏差有所减小 (表 1)。对中国区域来说, 气温模拟与观测的偏差减少 0.77 °C, 通过显著性检验 ($P < 0.01$), 对中国东部大部分区域来说, 偏差减少更为明显, 大约 1 °C, 多数地区模式模拟气温较观测偏差都有所减小, 且都通过显著性检验 ($P < 0.01$)。对于夏季来说 (图 4b、4e), 在中国东部很大面积模拟与观测的冷偏差减少到 -1~1 °C, 青藏高原部分模拟与观测的冷偏差消失, 更加接近观测。对于东北和华中地区来说, 气温的冷偏差分别减少 0.34 °C 和 0.59 °C, 通过显著性检验 ($P < 0.01$), 其他分区的偏差增加。对冬季来说 (图 4c、4f), 中国气温模拟与观测的偏差减少 0.74 °C, 通过显著性检验 ($P < 0.01$), 各分区除了西北西部和华南外气温的偏差都减少, 且都通过显著性检验 ($P < 0.01$)。总之, 随着模式水

表 1 中国及分区气温模拟与观测的偏差

Table 1 Temperature bias of simulations and observations in China and its regions

	年平均气温模拟 与观测的偏差		夏季平均气温模 拟与观测的偏差		冬季平均气温模拟 与观测的偏差	
	G60	G30	G60	G30	G60	G30
中国	-1.08	-0.31	0.01	1.06	-2.33	-1.59
NE	-2.82	-2.20	-0.81	-0.49	-7.03	-5.83
NC	-1.61	-0.93	-0.30	0.67	-2.51	-1.78
NWE	-0.92	0.23	0.33	2.20	-2.43	-1.39
NWW	0.15	1.23	1.84	3.71	-0.34	0.55
SW	-0.82	0.27	0.02	1.02	-1.45	-0.39
CC	-1.44	-0.47	-0.71	0.20	-2.82	-1.93
SC	0.60	0.33	0.52	0.98	-0.16	0.67

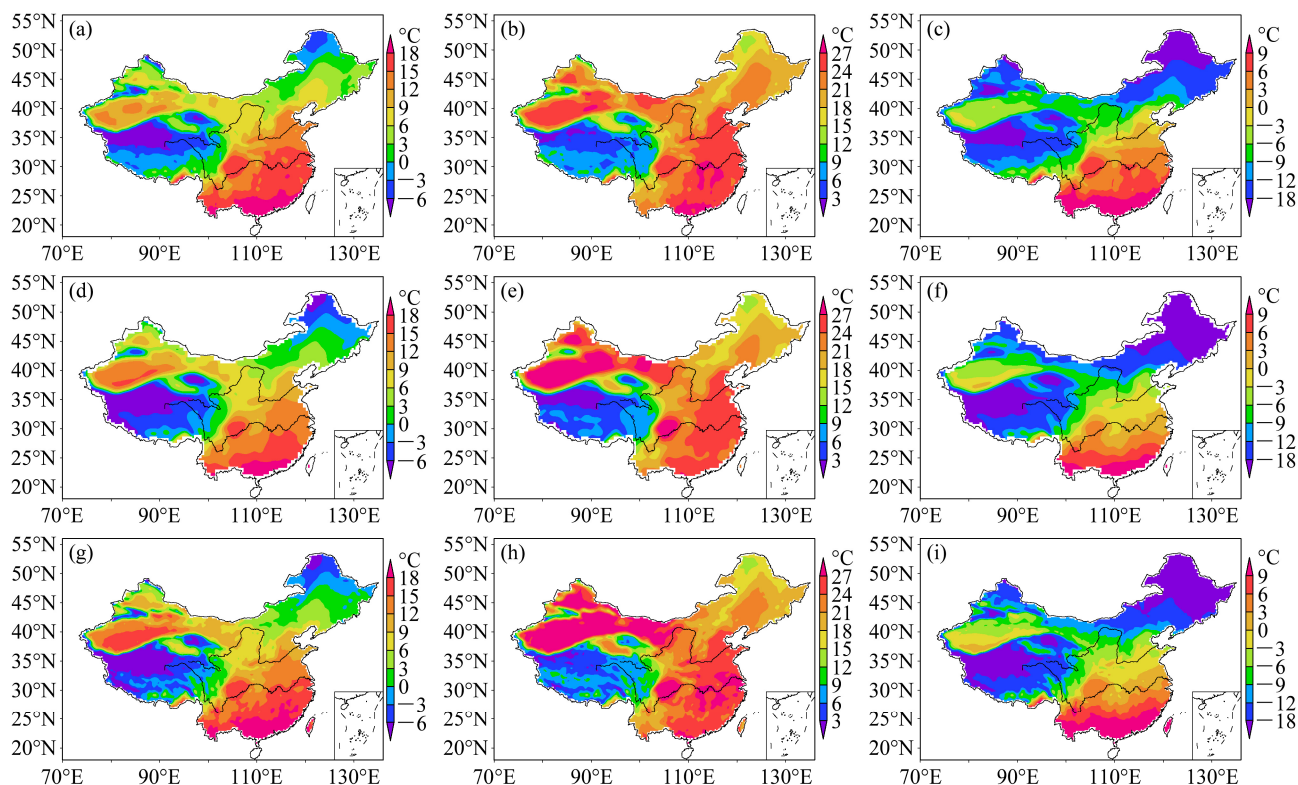


图 3 多年平均观测气温 (上) 和 G60 (中)、G30 (下) 模拟气温的空间分布: (a, d, g) 年平均; (b, e, h) 夏季平均; (c, f, i) 冬季平均

Fig. 3 Spatial distributions of multi-year mean observed (top), G60 modeled (middle), and G30 modeled (bottom) temperature: (a, d, g) Annual mean; (b, e, h) summer mean; (c, f, i) winter mean

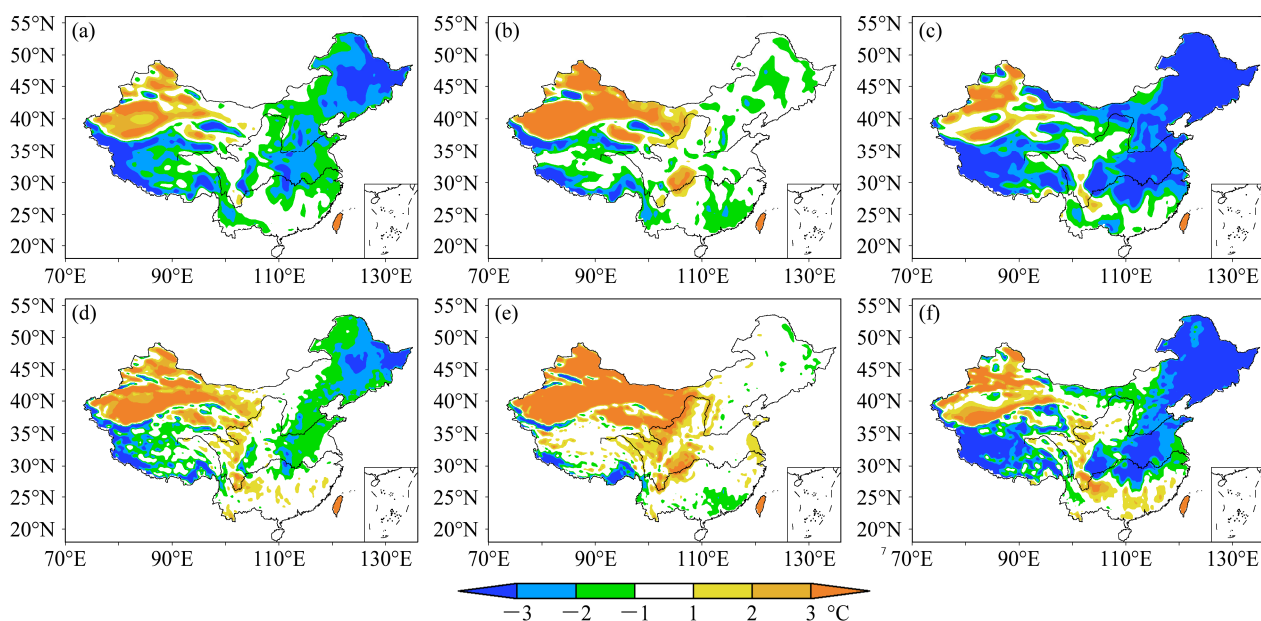


图 4 G60 (上) 和 G30 (下) 模拟气温与观测气温偏差的空间分布: (a, d) 年平均; (b, e) 夏季平均; (c, f) 冬季平均

Fig. 4 Spatial distributions of multi-year mean temperature bias between G60 (top) and G30 (bottom) modeled and observed: (a, d) Annual mean; (b, e) summer mean; (c, f) winter mean

平分分辨率的提高,模式模拟的气温较观测之间的差异,不同季节偏差也有所不同。同时,也发现高水平分辨率下更优于多个全球模式的集合模拟结果(Jiang et al., 2005)。

图5给出了RIEMS2.0不同分区下年均温和不同季节温度的Taylor图,其中红色数字分别表示不同分区下温度的模拟情况。从图中可以发现,RIEMS2.0在季节和年均温上,均与观测值有较高的空间相关系数。提高分辨率后,从空间相关系数来看,中国只有冬季气温模拟与观测的空间相关系数增加,各分区中东北、西北西部、华南年均温和季节气温的空间相关系数都增加,而西南年均温和季节气温的空间相关系数都没有提高。从相对标准差来看,中国平均温度的相对标准差没有改善,多数分区的平均气温的相对标准差模拟值的在Taylor图中的位置较接近参考值(REF),模拟和观测的夏季气温相对标准差之比接近1.0(图5b、5e),多数分区对平均气温的模拟有改善,其中华北年均温和季节气温的相对标准差都更接近参考值1.0,西北西部的平均温度相对标准差模拟效果变差。总体而言,Taylor图显示:提高水平分辨率后,中国的模拟能力几乎没有改变,而多数分区的相对标准差或空间相关系数的模拟有改善,并且模式模拟部分分区夏季气温的相关系数和相对标准差都改善,东北、华北和华南这两个指标的模拟同时都有改善。因此,提高分辨率使得多数分区平均气温的模拟能力略有提高。

4.2 对气温年际变率的影响

气候年际变率的模拟也是检验区域气候模式模拟能力的一个重要方面,在气温平均态和年内气温变化的分析基础上,对气候的年际变化进行分析。首先,通过计算两个试验年均温和不同季节气温的标准差分布形式,可以了解对模拟气温年际变率模拟的影响,揭示不同分辨率试验条件下对气温年际变率影响的特点,其中采用的实况资料同样为CN05资料。

图6为观测和模式不同分辨率模拟中国多年平均气温的标准差分布。从图中可以看到,RIEMS2.0模式对中国多年平均气温的标准差分布形式与观测标准差分布形式基本吻合,年际变率基本呈从南到北递增的分布,模式可以较好地模拟不同季节年际变率的差异,其中冬季的年际变率值最大。模拟与观测标准差之间差异在夏季最大,在冬季和全年

中多数分区的差异小于0.1℃。随着水平分辨率提高,无论是从区域平均和空间分布形式来看(图6和表2)。中国及大部分分区的年均温和冬季气温的标准差的模拟能力有极大地提高(图6g、6i),对冬季气温的变率模拟能力提高的效果最好。对夏季气温只有在西南、华中和华南的模拟能力有提高,其他地区模拟能力没有明显的提高(表2)。

表2 中国及分区气温模拟与观测的标准差
Table 2 Temperature standard deviation of simulations and observations in China and its regions

	年平均气温			夏季平均气温			冬季平均气温		
	标准差			温标准差			温标准差		
	G60	G30	CN05	G60	G30	CN05	G60	G30	CN05
中国	0.54	0.49	0.41	0.64	0.68	0.49	0.95	0.79	0.70
NE	0.44	0.51	0.49	0.61	0.73	0.57	0.89	0.92	0.90
NC	0.48	0.41	0.52	0.69	0.73	0.67	0.83	0.63	0.63
NWE	0.57	0.57	0.50	0.87	1.03	0.69	0.75	0.62	0.77
NWW	0.59	0.45	0.42	0.71	0.80	0.55	1.07	0.85	0.77
SW	0.54	0.45	0.31	0.75	0.53	0.32	0.88	0.69	0.60
CC	0.48	0.49	0.40	0.47	0.50	0.50	0.68	0.59	0.55
SC	0.44	0.41	0.24	0.44	0.39	0.27	0.76	0.66	0.56

为了进一步分析揭示不同分辨率试验对气温变化年际变化的模拟能力,对气温距平的年际变化进行分析,通过计算两个试验年均温和不同季节气温的距平,可以消除模拟结果中的系统偏差,也可以更清楚地发现,提高分辨率对气温年际变率的影响。因此分析中国及各区不同季节和年均温与观测距平的曲线的相关系数,并进行相关分析(表3)。RIEMS2.0不同分辨率条件下,对气温距平变化都有较高的模拟能力,如西北西部可以达到

表3 中国及分区模拟与观测气温距平的相关系数
Table 3 Temperature anomaly correlation between simulations and observations in China and its regions

	年平均气温模拟与观测的相关系数		夏季平均气温模拟与观测的相关系数		冬季平均气温模拟与观测的相关系数	
	G60	G30	G60	G30	G60	G30
中国	0.81**	0.89**	0.87**	0.80**	0.96**	0.88**
NE	0.43	0.85**	0.87**	0.98**	0.64	0.77*
NC	0.72*	0.87**	0.27	0.52	0.85**	0.77*
NWE	0.89**	0.92**	0.66*	0.72*	0.88**	0.81**
NWW	0.92**	0.98**	0.87**	0.91**	0.92**	0.95**
NWW	0.85**	0.80*	0.18	0.16	0.94**	0.85**
CC	0.75*	0.75*	0.20	0.24	0.90**	0.74*
SC	0.69*	0.80*	0.53	0.49	0.69	0.62

*表示通过置信度95%的显著性检验、**表示通过置信度99%的显著性检验

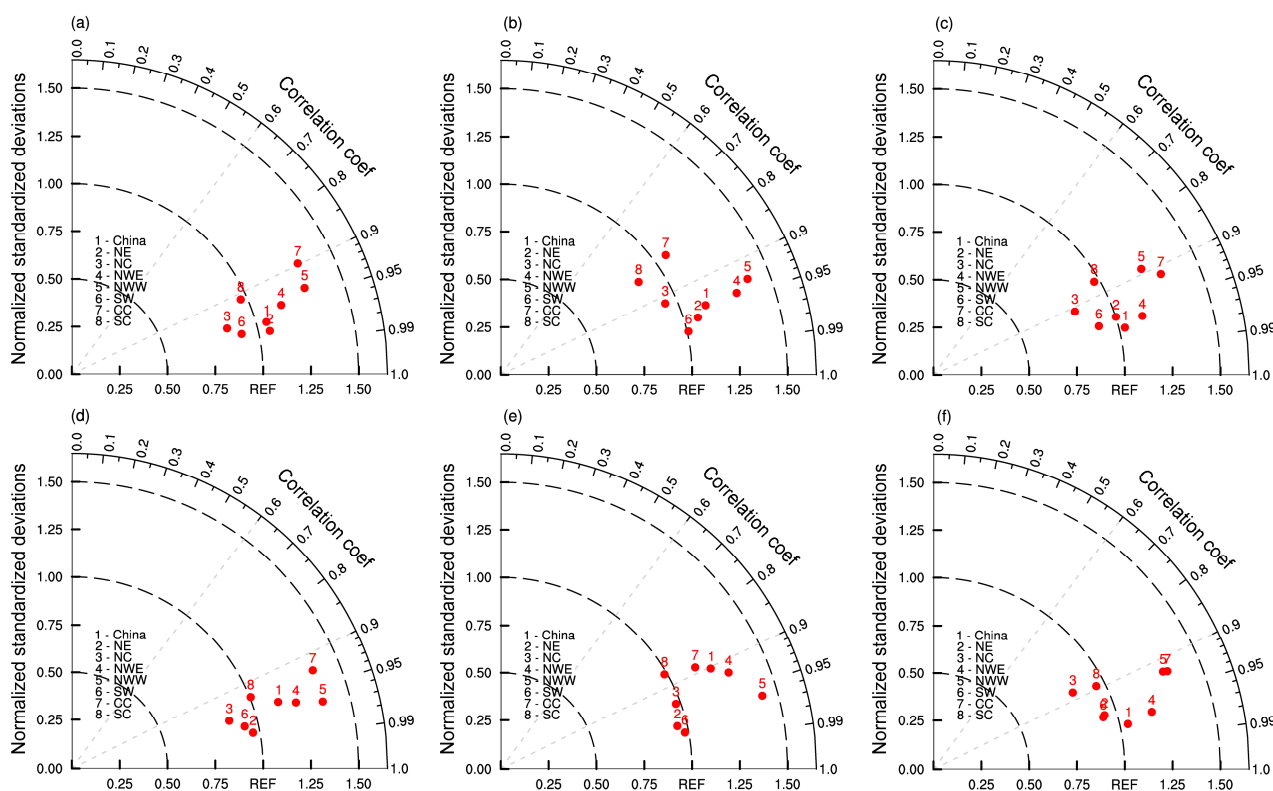


图5 中国及不同分区多年平均 G60 (上)、G30 (下) 模拟气温 Taylor 图: (a, d) 年平均; (b, e) 夏季平均; (c, f) 冬季平均

Fig. 5 Taylor diagrams of multi-year mean G60 (top) and G30 (bottom) modeled temperature in China and different regions: (a, d) Annual mean; (b, e) summer mean; (c, f) winter mean

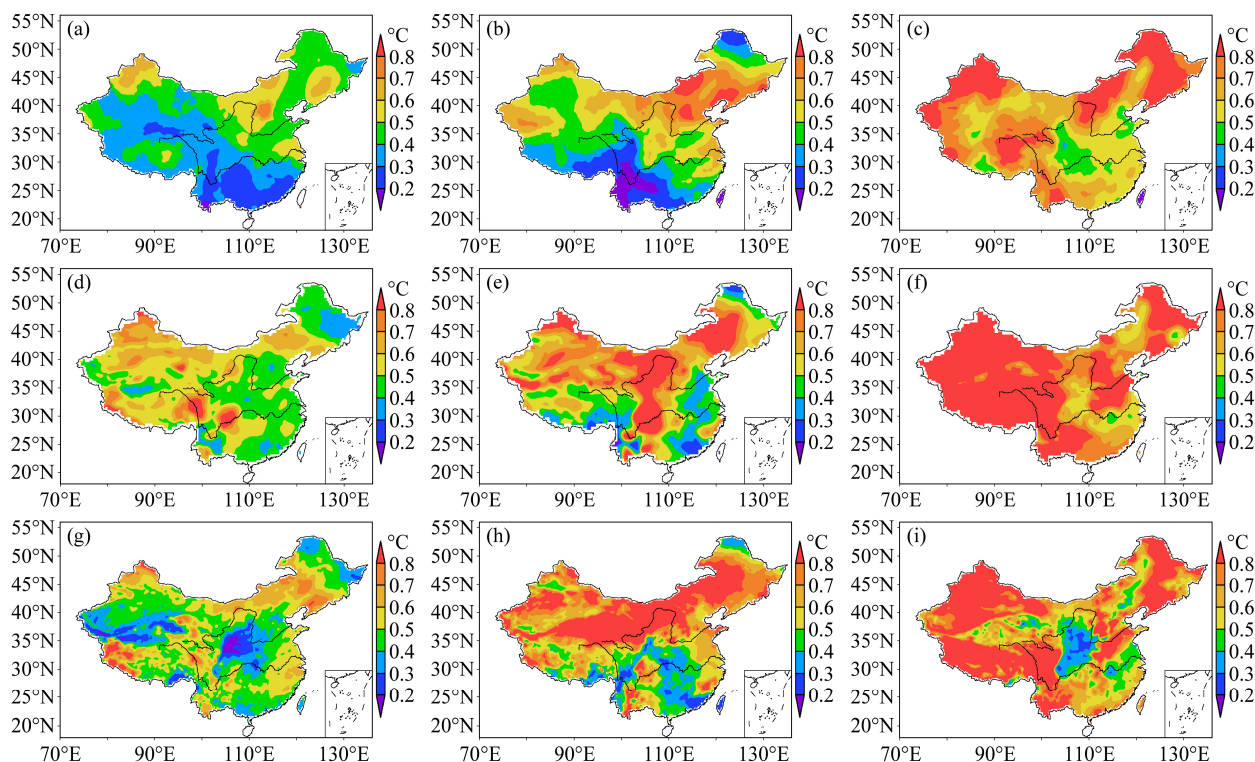


图6 多年平均观测气温(上)和 G60(中)、G30(下)模拟气温标准差的空间分布: (a, d, g) 年平均; (b, e, h) 夏季平均; (c, f, i) 冬季平均

Fig.6 Standard deviation pattern of multi-year mean observed (top), G60 modeled (middle), and G30 modeled (bottom) temperature: (a, d, g) Annual mean; (b, e, h) summer mean; (c, f, i) winter mean

相关系数 0.9 以上。提高分辨率后, 中国的年均温距平变化曲线与观测更为一致, 距平变化模拟与观测的相关系数, 由 0.81 增加到 0.89, 对年均温距平变化模拟能力提高, 各分区中除西南和华中外, 距平变化模拟与观测的相关系数都增加, 其中东北和华北增加明显, 东北由原来未通过显著性检验, 变为通过显著性检验 ($P < 0.01$), 而华北相关系数由显著相关变为极显著相关。夏季气温距平变化模拟与观测的相关系数各分区中东北、华北、西部东部、西北西部和华中的相关系数增加, 对距平变化的模拟能力提高。冬季气温距平变化在中国及多数分区模拟与观测的相关系数没有增加, 只有东北和西北西部的相关系数增加, 其中东北增加明显, 相关系数由未通过显著性检验, 变为通过显著性检验 ($P < 0.05$)。

5 结论与讨论

本文采用区域环境集成系统模式 (RIEMS2.0), 针对中国区域设置不同水平分辨率开展 1991~2000 年长期模拟研究工作, 分析了不同分辨率条件下区域气候模式对中国气温的模拟能力。主要结论有:

(1) 无论采用哪种分辨率, RIEMS2.0 都能较好模拟出多数分区多年平均气温的空间分布, 与观测空间分布较接近。随着水平分辨率的提高, 模式模拟的气温空间分布模拟更精细。对温度偏差来说, 随着水平分辨率的提高, 使得平均气温的模拟冷偏差减小, 模拟结果更趋于实测。对年均温和冬季气温来说, 中国及多数分区模拟与观测的偏差减少, 且通过显著性检验 ($P < 0.01$); 对夏季气温来说, 中国及多数分区的偏差增加, 气温偏差的模拟能力没有明显提高。

(2) 对气温年际变率来说, 随着水平分辨率的提高, 对于大部分区域来说, 模式模拟能力有一定程度的提高。对于年均气温和冬季气温来说, 中国及大部分分区气温标准差的模拟能力有提高, 对冬季气温的标准差模拟的改善效果最好, 对于夏季气温来说, 西南, 华中和华南气温标准差一定程度的改善。中国及除西南和华中外分区年均温的距平变化模拟与观测的相关系数增加, 与观测距平变化更接近, 年际变率的模拟能力提高, 东北和华北明显改善。除西南和华南外分区夏季气温距平变化相关

系数增加, 东北和西北西部冬季距平变化相关系数都增加, 年际变率的模拟能力提高, 东北更加明显。总之, 随着模式水平分辨率的提高, RIEMS2.0 模拟气温的能力有一定改进, 特别是在年际变率上也有所提高。

(3) 同时应该指出, 模式分辨率越高, 由对动力框架进行离散化数值表达而引起的截断误差也会越小, 模拟结果应越接近实际, 但是本研究发现对 RIEMS2.0 在部分分区平均气温的能力有一定改进, 并不是所有分区各种评价指标的模拟能力都有提高。随着水平分辨率的提高, 模拟性能与模式中物理过程中参数化方案模拟区域与缓冲区、侧边界方案等方面都有很大关系 (Leung and Qian, 2003; 汤剑平等, 2006; 高学杰等, 2006), 在未来研究将对这些问题进行进一步探讨。

参考文献 (References)

- 陈跃浩, 景元书, 高庆先, 等. 2012. RegCM3 不同分辨率对西北地区夏季温度和降水模拟结果的影响 [J]. 资源科学, 2012, 34 (8): 1422-1429. Chen Yuehao, Jing Yuanshu, Gao Qingxian, et al. 2012. The influence of RegCM3's different resolutions on simulation of summer temperature and precipitation in Northwest China [J]. Resources Science (in Chinese), 34 (8): 1422-1429.
- Dickinson R E, Henderson-Sellers A, Kennedy P J, et al. 1993. Biosphere-Atmosphere Transfer Scheme (BATS) Version as coupled to the NCAR Community Climate Model [R]. NCAR Technical Report, NCAR/TN-387+STR.
- Fu C, Wang S, Xiong Z, et al. 2005. Regional climate model intercomparison project for Asia[J]. Bull. Amer. Meteor. Soc., 86 (2): 257-266.
- 高学杰, 徐影, 赵宗慈, 等. 2006. 数值模式不同分辨率和地形对东亚降水模拟的影响研究 [J]. 大气科学, 30 (2): 185-192. Gao Xuejie, Xu Ying, Zhao Zongci, et al. 2006. Impacts of horizontal resolution and topography on the numerical simulation of East Asian precipitation [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 30 (2): 185-192.
- 高学杰, 石英, Giorgi F. 2010. 中国区域气候变化的一个高分辨率数值模拟 [J]. 中国科学 (地球科学), 40 (7): 911-922. Gao Xuejie, Shi Ying, Giorgi F. 2010. A high resolution simulation of climate change over China [J]. Science China Earth Sciences, 54 (3): 462-472.
- Giorgi F, Mearns L O. 1999. Introduction to special section: Regional climate modeling revisited [J]. J. Geophys. Res., 104 (D6): 6335-6352.
- Giorgi F, Hewitson B, Christensen J, et al. 2001. Regional Climate Information-Evaluation and Projections. Chapter 10 of Climate Change 2001; The Scientific Basis, Contribution of WGI to the Third Assessment Report of IPCC, Edited by J T Houghton, et al. Cambridge University Press, Cambridge, U K.
- Grell G A. 1993. Prognostic evaluation of assumptions used by cumulus

- parameterizations [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 121 (3): 764–787.
- Hutchinson M F. 1999. ANUSPLIN Version 4.0 User Guide [M]. Centre for Resources and Environmental Studies, Australian Nation University, Canberra ACT0200, Australia.
- IPCC. 2007. Climate Change 2007: The Physical Science Basis [M]// Solomon S, Qin D, Manning M, et al. Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA: Cambridge University Press, 590–662, 848–940.
- Jiang D B, Wang H J, Lang X M. 2005. Evaluation of East Asian climatology as simulated by seven coupled models [J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 22 (4): 479–495.
- Kiehl J T, Hack J J, Bonan G B, et al. 1997. Description of the NCAR Community Climate Model (CCM3) [R]. Technical Report NCAR/TN-420_ST, NCAR, Colorado, 160pp.
- Leung L R, Qian Y. 2003. The sensitivity of precipitation and snowpack simulations to model resolution via nesting in regions of complex terrain [J]. *Journal of Hydrometeorology*, 4 (6): 1025–1043.
- 廉丽姝, 束炯, 李志富. 2011. RegCM3 对中国区域气候模拟的敏感性试验 [J]. *气象科技*, 39 (2): 129–136. Lian Lishu, Shu Jong, Li Zhifu. 2011. Sensitivity experiments of regional climate simulation in China with RegCM3 [J]. *Meteorological Science and Technology (in Chinese)*, 39 (2): 129–136.
- 刘金波, 曾新民, 郑益群. 2011. 区域气候模式分辨率对中国夏季气温模拟影响的评估 [J]. *气象学报*, 69 (3): 534–543. Liu Jinbo, Zeng Xinmin, Zheng Yiqun. 2011. An assessment of the effects of the resolution of a regional climate model on simulated summer temperatures in China [J]. *Acta Meteorologica Sinica (in Chinese)*, 69 (3): 534–543.
- New M, Hulme M, Jones P. 1999. Representing twentieth-century space–time climate variability. Part 1: Development of a 1961–90 mean monthly terrestrial climatology [J]. *J. Climate*, 12 (3): 829–856.
- New M, Hulme M, Jones P. 2000. Representing twentieth-century space–time climate variability. Part 2: Development of a 1901–1996 mean monthly field [J]. *J. Climate*, 13 (13): 2217–2238.
- 汤剑平, 赵鸣, 苏炳凯. 2006. 分辨率对区域气候极端事件模拟的影响 [J]. *气象学报*, 64 (4): 433–441. Tang Jianping, Zhao Ming, Su Bingkai. 2006. Effects of model resolution on the simulation of regionally climatic extreme events [J]. *Acta Meteorologica Sinica (in Chinese)*, 64 (4): 433–441.
- Taylor K E. 2001. Summarizing multiple aspects of model performance in a single diagram [J]. *J. Geophys. Res.*, 106 (D7): 7183–7192.
- 田芝平, 姜大膀. 2013. 不同分辨率 CCSM4 对东亚和中国气候模拟能力分析 [J]. *大气科学*, 37 (1): 171–186. Tian Zhiping, Jiang Dabang. 2013. Evaluation of the performance of low- to high-resolution CCSM4 over East Asia and China [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 37 (1): 171–186.
- 熊喆, 符淙斌, 延晓冬. 2009. 区域环境集成系统模式以及对我国夏季季风的模拟研究 [J]. *科学通报*, 54 (18): 2826–2834. Xiong Zhe, Fu Congbin, Yan Xiaodong. 2009. Regional integrated environmental model system and its simulation of East Asia summer monsoon [J]. *Chinese Science Bulletin*, 54 (16): 4253–4261.
- Xiong Z, Wang S Y, Zeng Z M, et al. 2003. Analysis of simulated heavy rain over the Yangtze River valley during 11–30 June 1998 using RIEMS [J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 20 (5): 815–824.
- Xu Y, Gao X J, Shen Y, et al. 2009. A daily temperature dataset over China and its application in validating a RCM simulation [J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 26 (4): 763–772.
- Xu Y, Gao X J, Giorgi F. 2010. Upgrades to the reliability ensemble averaging method for producing probabilistic climate-change projections [J]. *Climate Research*, 41 (1): 61–81.
- 赵宗慈, 罗勇. 1998. 二十世纪九十年代区域气候模拟研究进展 [J]. *气象学报*, 56 (2): 225–246. Zhao Congci, Luo You. 1998. Advance on investigations of regional climate modeling since 1990 [J]. *Acta Meteorologica Sinica (in Chinese)*, 56 (2): 225–246.
- Zhao D M. 2013. Performance of regional integrated environment modeling system (RIEMS) in precipitation simulations over East Asia [J]. *Climate Dyn.*, 40 (7–8): 1767–1787.
- 赵得明, 符淙斌, 延晓冬. 2009. 区域环境集成环境模拟系统 RIEMS2.0 对中国多年降水和气温模拟能力分析 [J]. *科学通报*, 16: 2379–2387. Zhao Deming, Fu Congbin, Yan Xiaodong. 2009. Testing the ability of RIEMS2.0 (Regional Integrated Environment Modeling System) to simulate multi-year precipitation and air temperature in China [J]. *Chinese Science Bulletin*, 54: 3101–3111.
- 郑益群, 苗曼倩, 钱永甫. 1999. 湍流动能闭合方法在区域气候模式中的应用 [J]. *气象学报*, 57 (6): 641–650. Zheng Yiqun, Miao Manqian, Qian Yongfu. 1999. Turbulence kinetic energy closure scheme applied into regional climate modeling [J]. *Acta Meteorologica Sinica (in Chinese)*, 57 (6): 641–650.