

Application of Regional Climate Model-RegCM4 in The Simulation of Precipitation and Temperature in Hanjing Basin*

Yu Cheng, Hua Chen, Jiali Guo, Chongyu Xu

State Key Laboratory of Water Resources and Hydropower Engineering Science, Wuhan University, Wuhan
Email: chengyu199319@live.com

Received: Sep. 7th, 2013; revised: Oct. 22nd, 2013; accepted: Oct. 25th, 2013

Abstract: This work simulated climate factors in Hanjiang Basin by using dynamical downscaling method, transforming large scale observed climate variables into station precipitation and temperature. A 10-year (1991-2000) numerical integration simulation of climate over Hanjiang Basin was conducted with the latest version of a regional climate model RegCM4 nested in one-way ERA40 Re-analysis data. The Grell, Anthes-Kuo, MIT-Emanuel and Tiedtke cumulus convection parameterization schemes were applied in the running of RegCM4 to test their capability in simulating precipitation and temperature of Hanjiang Basin. The results demonstrated that RegCM4 was capable of well simulating the values and the changing trend of ground temperature during a year. In most cases, the error between simulated mean monthly temperature and observation was within 2°C, but there existed systematic “cold bias”. However, the simulation accuracy of precipitation is not as optimal as that of temperature. Different cumulus convection parameterization schemes displayed different capability in simulating annual precipitation. Among all 4 cumulus convection parameterization schemes, the MIT-Emanuel scheme had been proven to be the most accurate in simulating monthly precipitation. The accuracy of the scheme also showed great difference in simulated station interpolation of precipitation, which urges the improvement for the simulation capability of spatial distribution of precipitation.

Keywords: Regional Climate Model; RegCM4; Precipitation; Temperature; Hanjiang Basin

应用 RegCM4 模拟汉江流域降水和气温*

程 昱, 陈 华, 郭家力, 许崇育

武汉大学水资源与水电工程科学国家重点实验室, 武汉
Email: chengyu199319@live.com

收稿日期: 2013 年 9 月 7 日; 修回日期: 2013 年 10 月 22 日; 录用日期: 2013 年 10 月 25 日

摘 要: 本文使用动力降尺度方法模拟汉江流域气象因素, 将大尺度气象观测值转化到流域上, 得到流域站点降水和气候模拟值。使用 RegCM4 区域气候模式, 嵌套 ERA40 再分析资料, 分别采用 Grell 方案、Kuo 方案、Emanuel 方案和 Tiedtke 方案等积云对流方案, 对汉江流域进行了 10 年(1991~2000 年)模拟试验, 重点分析了 RegCM4 对汉江流域地表气温和降水的模拟结果。结果表明, 模式对汉江流域地表气温温度值和变化趋势具有较好的模拟能力。月平均温度模拟值与实测值误差小于 2°C, 但存在系统性的“冷偏差”。该模式对降水的模拟精度比温度模拟要差。对年降雨量的模拟, 不同积云对流方案模拟结果相差较大; 在几种对流方案比较中, Emanuel 方案对月平均降水量相对模拟效果最

*基金项目: 国家自然科学基金(51279138)。

作者简介: 程昱(1992-), 湖北人, 主要研究方向水文水资源; 陈华(1977-), 福建建瓯人, 主要从事水文水资源研究。

好; 然而 RegCM4 对不同站点的插值模拟效果差异比较大, 表明模式对降水的空间分布还有待改进。

关键词: 区域气候模式; RegCM4; 降水; 地表温度; 汉江流域

1. 引言

汉江流域是南水北调中线工程的水源地, 同时其下游是湖北省的重要经济走廊, 2012 年已成为国家最严格的水资源管理唯一试点流域。汉江流域地处亚热带季风区, 具有明显的季风气候变化特点, 干旱和洪涝发生的频率高。已有一些研究结果表明, 季风系统对全球增暖的响应较为敏感, 是研究区域气候变化的重要地区^[1]。同时汉江流域在 20 世纪下半叶大部分地区气温呈上升趋势、20 世纪 90 年代降水明显减少^[2], 因此, 研究该地区气候变化对汉江流域水文水资源的影响和汉江流域可持续发展的战略问题有重要意义。RegCM 系列模式在东亚和中国区域得到了广泛应用, 包括气候变化、土地利用、当代气候模拟以及古气候研究等很多方面。鞠丽霞等^[3]研究认为 RegCM2 基本准确地模拟出了东亚现代气候年平均地面气温的空间分布形势, 包括对局地冷暖中心位置的模拟, RegCM2 也很好地模拟了地面气温的季节循环。RegCM2 模拟出了中国区域内雨带由东南向西北逐渐递减的趋势, 对区域内几个强弱降水中心的模拟与观测有很好的对应降水的季节循环也得到较好模拟。高学杰等^[4]研究表明中国地区的土地利用/植被覆盖改变, 通过影响环流和改变地表能量平衡状态等, 对降水和气温等都产生了较大影响。罗勇等^[5]研究认为 RegCM3 具有一定的再现该特大异常降水过程的时空分布以及模拟和预测东亚环流异常的能力, 可以作为研究该地区季风降水物理机制和短期气候预测的基本工具。以上研究表明区域气候模式 RegCM 系列对于中国区域降水和温度等气候要素的模拟是合适的, 同时也需要深入的模拟研究为区域气候模式的改进做出试验。

区域气候模式对降水模拟的精度要明显优于全球气候模型, 同时尺度上能和流域水文模型的尺度相匹配, 已经在气候变化对水文水资源影响研究中得到了应用。本文通过建立汉江流域区域气候模型 RegCM4(Regional Climate Model4), 比较不同的边界层和积云对流参数化方案对降水和气温场的影响。所

建立的区域气候模型将为评估气候变化对汉江流域水文水资源的影响提供重要的气候情景输入。

2. RegCM4 及实验方案

很多研究表明, 提高气候模式水平分辨率对改进其模拟性能可能是十分重要的, 特别是对东亚地区气候的模拟^[6]。但由于计算机条件的限制, 全球气候模式的分辨率至今依然较低。RegCM 系列区域气候模式建立在美国宾西法尼亚州立大学(PSU)和美国国家大气研究中心(NCAR)联合创建的 MM4 和 MM5 的基础上, 具有较高的时空分辨率, 能够描述中小尺度地形、地表特征和其他因子对区域气候变化的影响。RegCM4 是在 RegCM3 基础上发展改进而来, 较旧版本的不同特点: RegCM4/CLM3.5 耦合器; 在采用 Zeng 方案计算 SSST 海平面温度时, 预后方案可用; 海冰 SeaIce 被引入 SST 海温边界; RegCM3 中的 Dust/Chemistry 包得到修改和改进。RegCM4 有多种参数化方案, 而且不同方案在不同气候区域的气候因子模拟结果有比较大的区别, 因此在建立 RegCM4 区域气候模型过程中, 需要综合比较不同参数化方案对模拟结果的影响, 最终确定一种最优方案。

2.1. 模拟区域设置

汉江流域地处我国华中地区, 位于东经 105~115 度, 北纬 29.5~35.5 度。实验采用 Lambert 投影, 模拟区域中心位于北纬 32.1 度, 东经 110 度, 模式水平分辨率为 20 km, 南北、东西方向格点数分别为 44 和 28, 包括整个汉江流域及周边地区。大气模式积分时间步长为 30 s, 模式垂直方向非均匀分为 18 层, 顶层气压 5 hPa; 模拟实验从 1990 年 1 月 1 日积分到 2000 年 12 月 31 日, 其中 1990 年作为模式的初始化时段, 不进行分析。

2.2. 模型参数化方案选择

本试验工作在 RegCM4 中模式侧边界采用指数松弛方案, 缓冲区 12 圈, 压力梯度方案为流体静力递

推方案, 行星边界层方案采用 Holtslag PBL 方案, 大尺度降水法案采用 SUBEX^[7], 压力梯度方案采用 full fields 方案, 海表通量方案采用 Zeng 方案(Zeng et al., 1998)。由于积云对流参数化方案对区域气候有关键的影响, 试验中分别采用了 Grell 方案、Kuo 方案、Emanuel 方案和 Tiedtke 方案, 对区域气候场景进行模拟。

2.3. 模型输入数据

汉江流域总的地势是: 流域地势西北高, 东南低, 地质构造大致以浙川 - 丹江口 - 南漳为界, 以西为褶皱隆起中低山区; 东以平原丘陵为主。构建模型过程中, 模型输入的资料有: 美国地质勘探局(USGS)制作的 GTOPO30 的 $10' \times 10'$ (经度 \times 纬度)地形资料; USGS 基于卫星观测反演的分辨率为 $10'$ 的全球陆地覆盖特征(GLCC)数据库资料(植被和土地利用); 美国国家海洋大气局(NOAA)分辨率为 1 km 的 OISST 周平均海表温度资料; 利用 European Centre for Medium-Range Weather Forecasts(ECMWF, the Centre)每日 4 次、水平分辨率 $2.5^\circ \times 2.5^\circ$ 格点的再分析资料(ERA40), 并插值到模式各层, 为模式提供初始场合边界值。

3. 试验结果分析

RegCM4 的输出气象因子有: 温度、降水、蒸发、气压、显热通量、表面短波直射反照率和风速等。其中地表温度和降水是许多动力过程和物理过程相互作用的结果和检验模式模拟效果的重要参数, 也是流域水文模型的主要输入。由于在此研究中最终关注的是气候变化对汉江流域未来水文水资源的影响, 因此这里重点分析降水和气温的模型结果。气象实测资料来自中国气象科学数据共享服务网, 通过比较实测降水和气温数据与 RegCM4 的 Emanuel, Kuo, Tiedtke 和 Grell 等积云对流模式的模拟结果, 对 RegCM4 的模拟效果进行评估。

3.1. 降水模拟结果分析

图 1 为采用 Grell, Kuo, Emanuel 和 Tiedtke 等 4 种积云对流方案对汉江流域 1991 年到 2000 年十年各月月平均降水的模拟。由图可知: 1) 这四种模拟方案都能模拟出一年中降水量随月份的变化趋势, 即 6~9

月份降水较多, 其他月份降水较少。2) 从模拟的年平均降水总量来看, Emanuel 方案和 Grell 方案模拟的年平均降水量偏大, 分别偏大比实际值偏大 17.9% 和 41%, Kuo 方案和 Tiedtke 方案模拟的年平均降水量偏少, 分别偏少 35.3% 和 52.9%。根据 10 年的模拟情况可知, Emanuel 对年平均降水量的模拟效果最好, Kuo 方案次之, Tiedtke 方案则模拟的相对最差。3) 对降水强度较大的 6~9 月的模拟情况, Emanuel 方案和 Grell 方案比较明显的模拟出降水强度大的月份, 且都比实测降水值大, 而 Kuo 方案和 Tiedtke 方案对强降水的月份降水情况也有显示但是不太明显。事实上, 从图 1 中数据可知, 对于降水不多的月份如 1 月、2 月、11 月、12 月等个模拟方案与实测值差值都不太大, 影响模拟降水方案准确性的主要是夏季降水的准确程度, Emanuel 方案在这点上也最佳。

表 1 是将 RegCM4 模式输出降水插值到安康等 10 个汉江流域典型站点的比较结果。从表中可以看出: 1) 对各个站点的模式输出插值进行比较, 可知 1991~2000 这 10 年年平均降水量 Emanuel 与实际偏差最小, Grell 方案也比实测值大, Kuo 方案和 Tiedtke 方案插值到站点的降水比实测值分别小 36.2% 和 59.6%; 这与以上得到的四种模拟方案所得汉江流域月平均降水量与实测值差值所吻合。2) 同一种模拟方案对不同站点的插值模拟结果相差较大, 模拟效果较好的 Emanuel 方案所得降水量在钟祥站与实测值仅相差 3%, 但在略阳站与实测值相差 30.3%; 其他模拟方案与在不同站点的模拟值与实测值的差值也相差较大。3) 对于略阳站的模拟各种模拟方案与实测值都相差 30% 以上, 这可能是由于该地区处于模拟区域边缘,

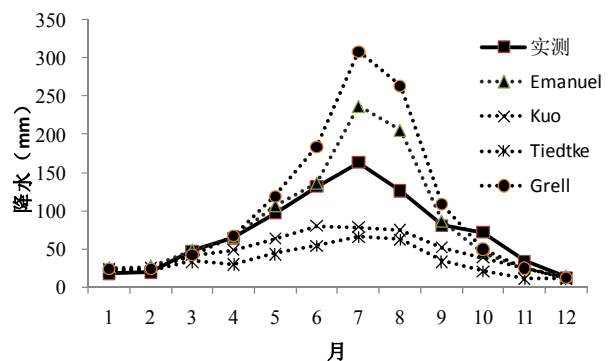


Figure 1. Comparison of mean monthly precipitation between observation and RegCM4 simulation over the Hanjiang Basin
图 1. 汉江流域降水 RegCM4 模拟和实测多年月平均比较

Table 1. Comparison of mean annual precipitation between observation and RegCM4 simulation in 10 hydrological stations in Hanjiang Basin

表 1. 汉江流域降水 RegCM4 模拟和实测站点多年年平均比较

测站	模拟均值								
	实测	Emanuel	RE(%)	Kuo	RE(%)	Tiedtke	RE(%)	Grell	RE(%)
安康	737.5	878.1	19.1	575.6	-22.0	609.3	-17.4	859.0	16.5
佛坪	804.0	961.6	19.6	402.9	-49.9	218.0	-72.9	734.3	-8.7
汉中	737.5	928.3	25.9	685.5	-7.0	423.2	-42.6	860.2	16.6
栾川	794.4	828.3	4.3	444.3	-44.1	247.2	-68.9	806.5	1.5
略阳	680.2	474.1	-30.3	376.7	-44.6	130.1	-80.9	891.2	31.0
尚州	612.5	590.8	-3.5	463.9	-24.3	224.7	-63.3	763.0	24.6
石泉	797.5	942.1	18.1	453.9	-43.1	398.3	-50.1	839.1	5.2
天门	1188.8	1045.5	-12.1	577.7	-51.4	228.0	-80.8	1381.6	16.2
镇安	687.8	854.1	24.2	454.1	-34.0	369.7	-46.2	744.5	8.3
钟祥	997.4	1027.2	3.0	691.3	-30.7	402.6	-59.6	1573.4	57.8
平均值	803.8	853.0	6.1	512.6	-36.2	325.1	-59.6	945.3	17.6

而且下垫面地形及地表状况较为复杂, 给出的侧边界条件不够充分所致。3) RegCM4 降水模拟方案对于具体站点的模拟效果不太好, Kuo 方案和 Tiedtke 方案对天门、钟祥的于强较大的站点没有做出较符合实测降水值的预测, Grell 方案对钟祥站的模拟降水则比实测值大很多。表明模式对降水中心的模拟的精度还有待提高。

表 2 为插值到各站点的年降水标准方差比较。从表中可以看出: 1) Grell 方案的 1991~2000 年降水标准差与实测值最为接近, 能够较好的反应降水的年际分布离散程度, Emanuel 方案模拟的标准方差比实测值偏小 17.1%, 对降水年分布离散程度模拟稍差, 模拟结果最不好是 Tiedtke 方案, 与实测值相差 40.9%。2) 同一种模拟方案对这 10 个不同站的插值模拟标准差与实测值比较差别比较大, Emanuel 方案对略阳站的标准方差模拟比实际值偏小 46.5%, 对佛坪站的模拟币实际值偏大 29.3%, 表明模拟方案对具体站点的历年降水分布离散程度的近似还不够精确。其他各方案对不同站点的标准方差模拟结果也有类似情况。3) 对于某些站点的模拟出现 4 种方案普遍较差的情况, 比如天门站, Emanuel、Kuo 和 Tiedtke 方案对其年际降水分布的离散程度刻画都偏小较大, 而 Grell 方案则偏大达 47.6%, 说明对于该站点附近的降

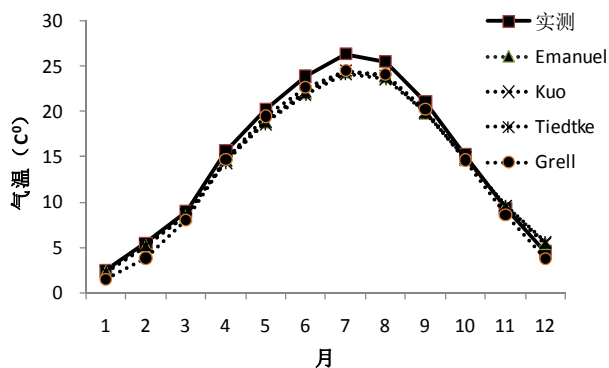


Figure 2. Comparison of mean monthly temperature between observation and RegCM4 simulation over the Hanjiang Basin
图 2. 汉江流域 RegCM4 模拟和实测气温多年月平均比较

水年际离散变化模拟情况都不太好, 可能与天门站在模拟边界附近而受到影响有关。

3.2. 温度模拟结果分析

图 2 为采用 Grell、Kuo、Emanuel、Tiedtke 等 4 种积云对流方案对汉江流域 1991 年到 2000 年这十年各月月平均地表温度的模拟。由图可知: 1) 各方案都能较好的模拟出一年中气温变化的总趋势, 一年中夏季 7 月份温度最高, 向两端呈递减趋势。2) 各模拟方案对各月地表平均温度模拟准确程度都较高, 对所有月份的地表温度平均值模拟与实际值相差都不超过 2

Table 2. Comparison of standard deviation of annual precipitation between observation and RegCM4 simulation in 10 hydrological stations in Hanjiang Basin

表 2. 汉江流域 RegCM4 模拟和实测站点多年年降水方差比较

测站	标准方差								
	实测	Emanuel	RE(%)	Kuo	RE(%)	Tiedtke	RE(%)	Grell	RE(%)
安康	144.61	128.97	-10.8	114.33	-20.9	186.39	28.9	163.37	13.0
佛坪	143.59	185.61	29.3	87.18	-39.3	56.34	-60.8	152.56	6.2
汉中	160.61	122.25	-23.9	127.18	-20.8	86.10	-46.4	98.13	-38.9
栾川	168.85	204.98	21.4	86.67	-48.7	75.43	-55.3	122.48	-27.5
略阳	118.97	63.59	-46.5	52.13	-56.2	23.87	-79.9	127.83	7.4
尚州	134.34	96.33	-28.3	109.16	-18.7	61.37	-54.3	186.68	39.0
石泉	137.60	122.51	-11.0	100.67	-26.8	146.27	6.3	185.02	34.5
天门	197.73	121.41	-38.6	141.12	-28.6	53.27	-73.1	291.94	47.6
镇安	106.64	86.75	-18.7	70.34	-34.0	91.23	-14.5	89.52	-16.1
钟祥	216.16	135.06	-37.5	178.32	-17.5	123.66	-42.8	271.58	25.6
平均值	152.9	126.7	-17.1	106.7	-30.2	90.4	-40.9	168.9	10.5

℃; 而且对所有月份的月平均地表温度的模拟都偏小, 存在系统性的“冷偏差”, 与张冬峰等^[8]研究符合。

3) 从模拟的年平均地表温度来看, Kuo 方案与实测值最为接近, 其次是 Emanuel 方案, 表明这些方案在模拟汉江流域地表温度是比较有效的, 对于整个区域的年平均地表温度模拟状况与梁玲等^[9]研究相符。4) 除 Grell 方案外, 其他方案模拟出的年末(11 月、12 月)年平均地表温度表现出偏暖的特征, 高学杰等^[10,11]指出, RegCM3 在高纬度地区冬季气温模拟偏暖在使用再分析资料驱动时也可以明显看到。

表 3 是 RegCM4 模式输出结果插值到安康等 10 个汉江流域典型站点和实测值的比较结果。从表中可以看出: 1) 对各个站点的模式输出插值进行比较, 可知 1991~2000 这 10 年年平均地表温度 Kuo 方案和 Tiedtke 方案模拟值与实测值偏差最小, Emanuel 方案和 Grell 方案插值到站点的降水比实测值分别小 0.8℃和 1.3℃; 这与以上得到的四种模拟方案所得汉江流域月平均地表温度与实测值的差值所吻合。2) 同一种模拟方案对不同站点的插值模拟结果相差较大, 模拟效果较好的 Kuo 方案所得降水量在钟祥站与实测值仅相差 0.3℃, 但在安康站与实测值相差 2.3℃; 其他模拟方案与在不同站点的模拟值与实测值的差值也相差较大。3) 对于安康站的模拟各种模拟方案与实测

值都相差 2℃以上, 对汉中站的模拟基本上较大, 反应 RegCM4 模式对具体站点地表温度的模拟还存在不够准确之处, 即温度场的模拟的高低温中心不准确。4) RegCM4 温度模拟总体效果比降水要好, 表现为月平均值比较准确, 具体站点的误差也比降水模拟小。

4. 结论

通过区域气候模式对汉江流域 1991~2000 年的数值模拟研究, 分析了其对汉江流域的模拟性能, 得到以下主要结论:

1) 积云对流参数化方案的选取对降水模拟结果影响较大。本次试验中, Emanuel 方案对月平均降水量的模拟与实测值最为接近, 比 Kuo 方案更为精确, 这与李建云等^[12]得出的 RegCM3 模式中 Kuo 方案对降水的模拟结果好于 Emanuel 有所差距, 应该指出的是李建云等所做的分析为 2003 年 6 月~8 月, 水平分辨率为 60 km, 而本文模拟 1991~2000 这 10 年水平分辨率为 20 km, 得到的结论差异可能由于模式本身设置上的不同引起的; 另外, 本次模拟的区域范围较小, 以往的研究^[13,14]所模拟的范围大多比本次模拟大很多, 影响到 RegCM 的模拟效果, 更为深入地比较不同积云对流模式的差异还需要更多的 RegCM 模拟实验。在本次模拟中 Tiedtke 方案得到的月平均降水量

Table 3. Comparison of mean annual temperature between observation and RegCM4 simulation in the whole Hanjiang Basin
表 3. 汉江流域 RegCM4 模拟和实测站点多年平均气温比较(°C)

测站	均值								
	实测	Emanuel	Difference	Kuo	Difference	Tiedtke	Difference	Grell	Difference
安康	15.85	13.08	-2.8	13.55	-2.3	13.68	-2.2	12.68	-3.2
佛坪	12.02	11.50	-0.5	13.17	1.1	12.97	1.0	11.53	-0.5
汉中	14.71	12.64	-2.1	12.57	-2.1	13.60	-1.1	12.28	-2.4
栾川	12.33	12.67	0.3	12.66	0.3	13.70	1.4	11.90	-0.4
略阳	13.71	14.16	0.5	14.25	0.5	15.20	1.5	12.53	-1.2
尚州	12.97	10.99	-2.0	11.13	-1.8	12.28	-0.7	10.36	-2.6
石泉	14.75	13.48	-1.3	15.21	0.5	14.67	-0.1	13.32	-1.4
天门	17.02	16.38	-0.6	16.24	-0.8	17.56	0.5	16.10	-0.9
镇安	13.86	12.11	-1.7	13.19	-0.7	13.16	-0.7	12.16	-1.7
钟祥	16.53	16.42	-0.1	16.88	0.3	17.80	1.3	15.79	-0.7
平均值	14.2	13.4	-0.8	13.9	-0.3	14.5	0.3	12.9	-1.3

总体偏大较多,可能是该方案在本次实验区域边界条件下不能表现其较好的性能,另外,这一方案在以往的试验中尚未有比较明显的模式效果评价,对 Tiedtke 方案的降水模拟效果还需要更多更普遍的试验。

2) 对汉江流域地表温度的模拟效果四种模拟方案都比降水模拟效果要好,表现为模拟月均值与实测值相差较小,而且地表温度的模拟一年中随月份的变化其趋势也比降水模拟要好。四种模拟方案对这十年的月平均地表温度都表现为系统性的冷偏差,具体原因可能是 RegCM4 模式对热量转移、地气辐射等过程存在系统偏差, Kuo 方案和 Emanuel 方案对地表温度的模拟相比 Grell 方案和 Tiedtke 方案月平均值更接近实测值。

3) 本次试验中采用 ERA40 在分析数据,张东峰等^[6]认为 ERA40 资料在东亚地区也存在一定的问题,尽管 KieuThiXin 等^[15]对比了 NCEP、ERA40 和 ECMWF 三种不同初始条件对模拟东南亚典型湿年和典型干年的影响发现,使用 ERA40 的效果最好,但是针对不同的下垫面条件和模拟边界设置仍然需要可以采用其他的在分析资料来进行比较,以找到较合适的模拟分析资料。高学杰等研究^[16]表明高分辨率的区域气候数值模拟能有效地改善模式的模拟能力,分辨率和地形对区域气候模拟有同等重要作用,更高的分辨率对下垫面的复杂地形有更准确的描述,比较不

同分辨率的区域气候模式模拟效果有助于确定合适的分辨率。

4) 本次试验对于温度和降水的模拟结果有待于今后更多高分辨率和对小范围地区的区域气候模式的检验,更加具有说服力的结论有赖于今后对 RegCM4 应用于不同地区、采用不同参数化方案和分辨率的模拟中,以便将 RegCM4 修改以适应于不同地区的区域气候模拟中。

参考文献 (References)

- [1] 符淙斌,叶笃正. 全球变化和我国未来的生存环境[J]. 大气科学, 1995, 19(1): 116-126.
FU Congbin, YE Duzheng. Global change and the future trend of ecological environment evolution in China. Scientia Atmospherica Sinica, 1995, 19(1): 116-126. (in Chinese)
- [2] 陈华,郭生练,郭海晋,徐高洪,徐德龙. 汉江流域 1951~2003 年降水气温时空变化趋势分析[J]. 长江流域资源与环境, 2006, 15(3): 340-345.
CHEN Hua, GUO Shenglian, GUO Haijin, XU Gaohong and XU Delong. Temporal and spatial trend in the precipitation and temperature from 1951 to 2003 in the Hanjiang Basin. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2006, 15(3): 340-343. (in Chinese)
- [3] 鞠丽霞,王会军. 用全球大气环流模式嵌套区域气候模式模拟东亚现代气候[J]. 地球物理学报, 2006, 49(1): 52-60.
JU Lixia, WANG Huijun. Modern climate over East Asia simulated by a regional climate model nested in a global gridpoint general circulation mode. Chinese Journal of Geophysics, 2006, 49(1): 52-60. (in Chinese)
- [4] 高学杰,张冬峰,等. 中国当代土地利用对区域气候影响的数值模拟[M]. 《中国科学》杂志社, 地球科学, 2007, 37(3): 397-404.

- GAO Xuejie, ZHANG Dongfeng, et al. Numerical simulation of the Impact of contemporary Chinese land use on regional climate change. Science in China Press, Earth Science, 2007, 37(3): 397-404. (in Chinese)
- [5] 罗勇, 赵宗慈. NCAR RegCM 对东亚区域气候的模拟试验[J]. 应用气象学报, 1997, 9: 124-133.
LUO Yong, ZHAO Zongci. Numerical simulation of East Asian regional climate with NCAR regional climate model RegCM2. Quarterly Journal of Applied Meteorology, 1997, 9: 124-133. (in Chinese)
- [6] 张冬峰, 欧阳里程, 高学杰, 赵宗慈, PAL, J.S. and GIORGI, F. RegCM3 对东亚环流和中国气候模拟能力的检验[J]. 热带气象学报, 2007, 23(5): 444-452.
ZHANG Dongfeng, OUYANG Licheng, GAO Xuejie, ZHAO Zongci, PAL, J.S. and GIORGI, F. Simulation of the atmospheric circulation over East Asia and climate in China by RegCM3. Journal of Tropical Meteorology, 2007, 23(5): 444-452. (in Chinese)
- [7] PAL, J.S., SMALL, E.E. and ELTAHIR, E. Simulation of regional-scale water and energy budgets: Representation of sub-grid cloud and precipitation processes within RegCM. Journal of Geophysical Research, 2000, 105: 29579-29594.
- [8] 张冬峰, 高学杰, 赵宗慈, PAL, J.S. and GIORGI, F. RegCM3 区域气候模式对中国气候的模拟[J]. 气候变化研究进展, 2005, 1(3): 119-121.
ZHANG Dongfeng, GAO Xuejie, ZHAO Zhongci, PAL, J.S. and GIORGI, F. Simulation of climate in China by RegCM3 model. Advances in Climate Change Research, 2005, 1(3): 119-121. (in Chinese)
- [9] 梁玲, 李跃清, 胡豪然, 毛晓亮. RegCM3 模式对青藏高原温度和降水的模拟及检验[J]. 气象科学, 2009, 29(5): 611-617.
LIANG Ling, LI Yueqing, HU Haoran and MAO Xiaoliang. Simulation of air temperature and precipitation over Qinghai-Xizang Plateau with RegCM3 model. Scientia Meteorologica Sinica, 2009, 29(5): 611-617. (in Chinese)
- [10] 高学杰, 石英, 张冬峰, GIORGI, F. RegCM3 对 21 世纪中国区域气候变化的高分辨率模拟[M]. 科学通报, 2012, 57 (5): 374-381.
- GAO Xuejie, SHI Ying, ZHANG Dongfeng and GIORGI, F. Climate change in China in the 21st century as simulated by a high resolution regional climate model. Chinese Science Bulletin, 2012, 57(10): 1188-1195. (in Chinese)
- [11] ZHANG, D.F., GAO, X.J., OUYANG, L.C., et al. Simulation of present climate over East Asia by a regional climate model. Journal of Tropical Meteorology, 2008, 14(1): 19-23.
- [12] 李建云, 王汉杰. RegCM3 积云参数化方案对中国南方夏季强降雨过程模拟的影响[J]. 气候与环境研究, 2008, 13(2): 149-160.
LI Jianyun, WANG Hanjie. Influences of modeling the summer heavy rain process in Southern China using cumulus convective parameterization schemes. Climatic and Environmental Research, 2008, 13(2) 149-160. (in Chinese)
- [13] 吴迪, 裴源生. 区域气候模式 RegCM3 在海河流域的应用[J]. 水电能源科学, 2010, 28(11): 5-8.
WU Di, PEI Yuansheng. Application of regional climate model to Haihe River Basin. Water Resources and Power, 2010, 28(11): 5-8. (in Chinese)
- [14] 刘晓东, 江志红, 罗树如, 等. RegCM3 模式对中国东部夏季降水的模拟试验[J]. 南京气象学院学报, 2005, 28(3): 351-359.
LIU Xiaodong, JIANG Zhihong, LUO Shuru, et al. A simulation of summer precipitation over Eastern China with RegCM3. Journal of Nanjing Institute of Meteorology, 2005, 28(3): 351-359. (in Chinese)
- [15] XIN, K.T., DUC, L. and Ha, H.T.M. Simulation of Southeast Asia rainfall using RegCM3 and problems. Reported on the 6th International Study Conference on GEWEX in Asia and GAME, Kyoto International Community House, Kyoto, 2004.
- [16] 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[J]. 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 Asian precipitation. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2006, 30(2): 185-192. (in Chinese)