0577-6619/2012/70(2)-0253-60 *Acta Meteorologica Sinica* 气象学报

RegCM3 对中国淮河流域降水模拟能力的检验及分析*

宗培书[1,2] 王会军[1]

ZONG Peishu[1,2] WANG Huijun[1]

1. 中国科学院大气物理研究所,北京,100029
2. 中国科学院研究生院,北京,100049
1. *Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100029, *China*
2. *Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100049, *China*

2010-05-20 收稿,2011-07-25 改回.

Zong Peishu, Wang Huijun. 2012. Evaluation and analysis of RegCM3 simulated summer rainfall over the Huaihe River basin of China. *Acta Meteorologica Sinica*, 70(2):253-260

Abstract This study evaluates the ability of the Abdus Salam International Center for Theoretical Physics (ICTP) version 3 Regional Climate Model (RegCM3) to simulate the summer rainfall amounts and distribution and large-scale circulation over the Huaihe river basin(30°55′—36°36′N,111°55′—121°25′E) of China. We conducted the simulation for the period of 1982－2001 and one wet year of 2003 to test the RegCM3 ensemble simulation capacity. First, by comparing both rainfall amounts and distribution simulations against the observations, it turned out that RegCM3 can capture the rainfall patterns and annual variations. In addition, the simulated spatial pattern of the 850 hPa wind vectors and specific humidity field are close to the observation, while the RegCM3 output wind speed and specific humidity are larger than observation. Finally, the ensemble simulation of RegCM3 for the 2003 summer cannot capture the spatial center of the precipitation anomalies and underestimated the magnitude of the anomalies.

Key words Regional climate model, The Huaihe river basin, Precipitation, Ensemble simulation

摘 要 检验了区域气候模式 RegCM3 (Regional Climate Model version 3)对中国淮河流域(30°55′—36°36′N,111°55′—121°25′E)1982—2001 年夏季降水及大尺度环流场的模拟能力,并选取降水明显偏多的 2003 年夏季为个例,评估了 RegCM3 模式对该年淮河流域夏季降水的集合模拟能力。模拟的 20 a 降水的空间分布与实测资料对比表明,RegCM3 成功地模拟出了淮河流域夏季降水的空间分布和年际变化;通过分析对比 RegCM3 模拟出的低层 850 hPa 流场结构和水汽输送状况与实测情况,可知 RegCM3 能模拟出低层流场结构的大致分布和水汽输送特点,但模拟所得风速和湿度均比实况偏大。对 2003 年淮河流域夏季降水的集合模拟结果表明,RegCM3 对中小尺度极端强降水的降水量和降水中心的模拟能力尚有待进一步提高。

关键词 区域气候模式,淮河流域,降水,集合模拟

中图法分类号 P463.1

* 资助课题:国家 973 项目(2009CB421406)、国家自然科学基金项目(40875048、40631005)和中国科学院重要方向性项目(KZCX2-YW-Q1-02)。

作者简介:宗培书,主要从事短期气候预测的研究。E-mail: zongpeishu@126.com

1 引 言

淮河流域(30°55′—36°36′N,111°55′—121°25′E)地处中国东部,介于长江和黄河两流域之间,流域面积27万km²。淮河流域降水的季节变化具有单峰特征,夏季是一年中降水集中的时段,尤其是6—7月,常常会有2—3周的持续阴雨天气,是降水异常的频发季节。

淮河流域夏季降水异常与大气环流异常有直接关系。夏季风和中纬度西风带系统的异常决定了淮河流域夏季降水的多少。淮河流域多雨年,孟加拉湾的印度西南季风加强,32°—35°N以南的副热带西南季风加强,与北方中东路偏北距平风相遇,冷暖气流在淮河流域辐合,造成淮河流域夏季持续多雨。淮河流域少雨年,18°N以北印度西南季风减弱,32°—35°N以南的副热带西南季风减弱,出现东北风距平,北方冷空气偏弱,出现南风距平,淮河流域处于距平辐散区中,导致淮河流域少雨(王慧等,2002)。

2003年6月下旬—7月上旬淮河流域出现了1954年以来的第2大洪水,共发生7次暴雨过程,累积面平均降水量达487 mm,为常年同期的2.2倍。章国材等(2004)利用NCEP再分析资料对2003年淮河强降水的大尺度环流特征及成因分析后发现,中高纬度两槽一脊的稳定维持,副热带高压(副高)脊线持续稳定在22°—25°N,淮河流域恰好位于高空急流的右前方,低空急流的左前方,是造成2003年6—7月淮河流域连续性暴雨的主要原因。

对于这次过程,全球模式未能够预报出来,原因主要是由于全球模式的分辨率较粗,对于较小空间尺度的物理参数化方案有限。本文试图考察分辨率较高的区域气候模式是否能够提供有用的信息。

自20世纪90年代以来,区域气候模式(RCM)被广泛地应用于气候的模拟与预测。李巧萍等(2004)、汤剑平等(2006)指出,与全球气候模式相比,区域气候模式的分辨率更高,能够获取中小尺度地形和下垫面强迫效应,从而能够更加精确地描述各种物理过程,并且,具有节省计算时间、能够应用于不同尺度天气和气候事件的模拟等优点。李维京等(2005)、Ding等(2006a, 2006b)利用中国国家气候中心开发的与全球大气-海洋耦合模式嵌套运行的高分辨率区域气候模式(RegCM_NCC),对2003年夏季淮河流域的多雨区,给出了很好的预测。Castro(2007)所做的工作显示,对于北美地区而言,区域气候模式模拟出的结果比全球模式所得结果更接近实际情况。

RegCM2和RegCM3是区域气候模式的典型代表,已经先后在美国、欧洲地区、非洲、澳大利亚、东亚-西太平洋等地区做过模拟研究,并取得显著成效。

Im等(2006)用RegCM3对韩国2000年10月1日—2003年9月30日进行了双层嵌套模拟,结果表明该方法可以用于韩国的气候模拟。Segele等(2009)利用RegCM3模式,选取不同的对流参数化方案,对非洲索马里地区的降水情况进行了模拟,结果表明,Emanuel方案对于降水量明显偏少的1984年、明显偏多的1996年和18 a平均降水都有很好的模拟能力。

Liu等(1994,1996)利用RegCM模式成功地模拟出了1990年6—8月东亚夏季风降水及1991年东亚洪涝期间的极端降水。刘晓东等(2005)利用RegCM3对1998年5—8月中国东部降水进行了模拟试验,考察了模式对降水和大尺度环流系统的模拟能力,并得出该模式可应用于中国东部夏季风降水模拟的结论。Liu等(2008)对包括青藏高原在内的中国及周边地区2005年夏季气候进行了模拟,结果表明,RegCM3具有模拟中国夏季降水主要分布特征的能力,尤其是能较好地模拟出包括整个青藏高原在内的中国区域降水的月际尺度变化和空间分布等基本特征,但对中国东南地区的夏季降水模拟能力有待进一步提高。张冬峰等(2007)使用RegCM3模式对东亚地区进行了15 a(1987—2001年)数值积分试验,结果表明,模式对东亚平均环流的特征及中国的降水、地面气温的年、季分布和季节变化特征均具有一定的模拟能力,对气温和降水年际变率的模拟也较好。李建云等(2008)利用区域气候模式RegCM3,选择Anthes-Kuo、MIT-Emanuel和Grell等3种积云参数化方案,对2003年7月发生在淮河流域的强降水过程进行了多组模拟试验,发现RegCM3对中国南方夏季强降水具有较高的模拟能力,而以Anthes-Kuo方案的模拟结果为最佳。

在模拟区域和分辨率的选取方面,杨雅薇等(2008)将RegCM_NCC应用在华东地区的业务中所作的敏感性试验显示,较小的积分步长、包含青藏

高原的模拟范围及较高分辨率的试验模拟效果较好。Ding 等(2006a)用 RegCM_NCC 在对中国地区雨季回报工作中进行了敏感性试验,选取的分辨率为 60 km;实际回报的结果也证实在该分辨率下,RegCM_NCC 能够准确地模拟出淮河流域的极端多雨。高学杰等(2006)利用 RegCM2 对东亚地区的模拟也得出了模式分辨率越高则模拟效果越好的结论。

虽然现在区域模式在气候模拟与预测方面的应用已相当多,但其模拟结果与实况的关系还很不稳定,常表现出部分地区或季节存在缺陷,而且,未能完全避免虚假降水中心的产生。此外,目前 RegCM3 模式基本都应用在东亚、华南、华北等较大尺度的区域,而很少在较小范围内进行高分辨率精细化的气候模拟和预测。因此,本文利用 RegCM3 对中国的淮河流域(30°55′—36°36′N,111°55′—121°25′E)降水进行 20 a(1982—2001 年)气候平均态模拟,并对 2003 年夏季降水进行了集合模拟,以检验 RegCM3 模式在该区域的适用性,为该模式是否适合中国东部的降水模拟提供依据。

2 RegCM3 模式简介

区域气候模式 RegCM3 采用 MM5 的动力框架,垂直方向为 σ 坐标,水平方向采用 Arakawa B 交错网格。模式的主要物理过程包括辐射方案、陆面过程、行星边界层方案、积云对流降水方案、大尺度降水方案和气压梯度方案。RegCM3 共有固定边界、线性松弛边界、时间相关边界、时间变化与流入流出边界、海绵边界和指数松弛边界 6 种侧边界处理方案供选择。气压梯度方案可选择正常方式或静力平衡扣除方式。模式输出包括大气模式、地面模式和辐射模式,输出的物理量有 40 余种。

与 RegCM2 相比,RegCM3 主要有如下改进:(1) 用 NACR CCM3 的辐射传输方案代替了原来的 CCM2 方案。(2) 改进了云和降水的物理过程:引入次网格显式湿度方案(SUBEX),以更好地处理非对流性云和降水过程,减少数值点风暴的产生;积云对流降水方案除原来的 Grell 方案和 Kuo 方案外,新增了 Bette-Miller 方案;海洋表面通量增加了新的参数化过程。(3) 用 USGS 的全球陆地覆盖特征和全球 30′高度资料创建模式地形,使模式能更精确地描述下垫面的状况。(4) 改进了程序的设计,使模式更易于调试和应用。

最新版的 RegCM3 又进一步在物理过程等多方面作了改进,并在模式中加入气溶胶模块,同时,在计算方面采用并行算法,极大地提高了计算效率。

3 模拟试验方案与观测资料

利用每日 4 次、水平分辨率为 2.5°×2.5°的再分析资料为模式驱动场,该资料包括气温、位势高度、垂直速度、相对湿度、经、纬向风和地面气压场,插值到模式各层为模式提供初边值;海温为 NCEP/NCAR 的周平均海温资料;地形和植被资料选用分辨率都为 2′的全球陆地覆盖特征(GLCC)资料。

模式模拟区域中心选择(35°N,105°E),水平分辨率为 50 km,南北方向 93 个格点,东西方向 112 个格点,垂直分为 18 层,模式层顶气压为 5 hPa,积分时间步长 150 s。选择指数松弛侧边界、Holtslag 边界层、MIT-Emanuel 对流参数化、CCM3 辐射参数化方案。积云参数化方案选取 Anthes-Kuo 方案。对于 20 a 夏季(6—8 月)降水的模拟,模式积分时间为 1982 年 1 月 1 日—2001 年 12 月 31 日;对 2003 年降水的集合模拟,则分别采用 2003 年 5 月 1—7 日为初始时间,积分至 2003 年 9 月 1 日,再将 7 个初始场产生的结果进行集合平均,从而生成 2003 年夏季降水的最终模拟结果。

用于降水模拟检验的实况资料分别为 2.5°×2.5°的 CMAP 降水资料和中国 730 站的月平均降水资料。用于基本要素场分析的实测资料为水平分辨率 2.5°×2.5°的 NCEP 再分析资料。

为了客观、定量地评价模拟结果,本文选取相关系数(COR)、均方根误差(RMSE)及偏差(BIAS)等统计量来检验模式对天气尺度特征的模拟能力。在计算统计量的过程中,均将模拟降水场插值到实测值所在点上,定性和定量地评估 RegCM3 对夏季气候特征的模拟能力。

4 结果分析

4.1 RegCM3 对淮河流域夏季气候特征的模拟

对模拟和实测的淮河流域夏季降水情况(图 1)作了定性、直观的比对分析,可见模拟与实测降水的等值线走势基本一致。实况降水资料显示淮河流域夏季主要降雨带位于安徽、江苏两省沿淮地区,RegCM3 模式基本模拟出了降水中心强度及位置。

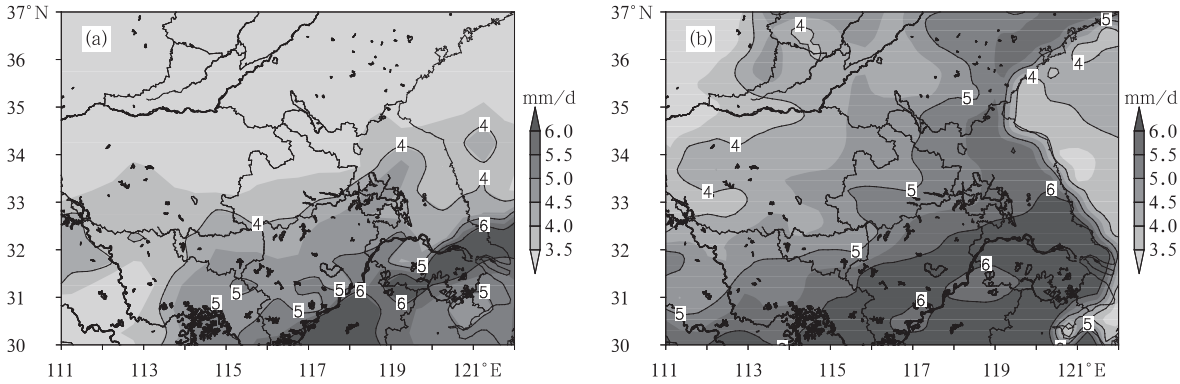


图 1 淮河流域 1982—2001 年夏季平均降水量（a. 观测，b. RegCM3 模拟）

Fig. 1 Mean precipitation in summer for 1982－2001 over the Huaihe River basin from (a) observation and (b) RegCM3

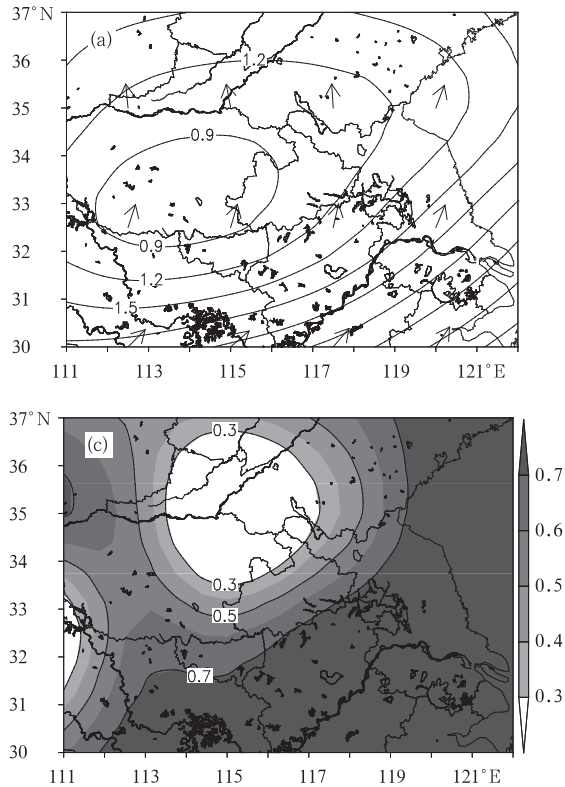


图 2 1982—2001 年 850 hPa 夏季平均风场(m/s)（a. 观测，b. RegCM3，c. 观测与 RegCM3 的相关系数，阴影部分为通过显著性检验区域）

Fig. 2 Mean 850 hPa wind vectors (m/s) for 1982－2001. (a) Observation, (b) RegCM3, and (c) the COR between the observation and RegCM3 The shaded area passes the significance test

对比观测实况与模拟所得 850 hPa 高度上 20 a 夏季平均风场(图 2a、b)可见，RegCM3 能模拟出风场的大致分布特点，但是，模拟所得风速值明显偏大。模拟与实况的相关系数为 0.4 左右(图 2c)，在南部的相关系数要比北部大一些。对比 850 hPa 平均比湿场，实况与模拟结果(图 3)可知，RegCM3 较好地模拟出与西南气流相伴随的水汽输送以及湿舌的位置，10.5 g/kg 等比湿线的走向和位置与实况十分一致，但整体而言，模拟所得的湿度显然略大于实况。相关系数的空间分布(图 3c)在淮河流域，实况和模拟所得 850 hPa 比湿的相关系数为0.5左右，沿海地区的相关系数较高，可超过 0.75。需要注意的是，对比检验所用的 NCEP 资料分辨率相对较低，不能很好地反映该地区 850 hPa 水汽场的实际分布，可能是导致模拟的水汽场相对偏高的原因。

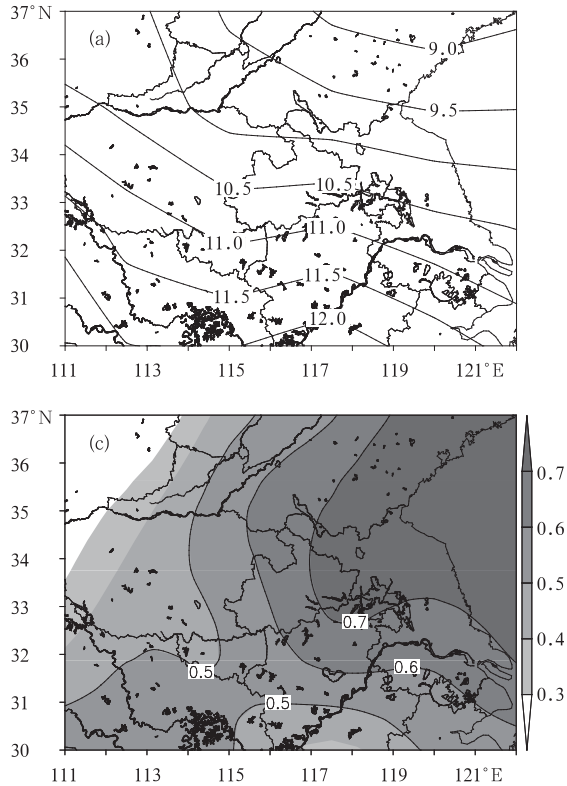


图 3 同图 2,但为夏季平均比湿场 (g/kg)

Fig. 3 As in Fig. 2, but for summer mean specific humidity field (g/kg)

4.2 RegCM3 对淮河流域夏季降水的模拟

图 4 为站点实测资料和 RegCM3 模拟所得夏季淮河流域区域内平均降水的年变化曲线,可以看出,两条曲线走势基本一致,相关系数为 0.70,显示出 RegCM3 对淮河流域夏季降水年际变率有较强模拟能力。此外,从图 4 中站点实测淮河流域夏季降水的年变化曲线可见,淮河流域夏季降水存在着一个 2—3 a 的周期,且该周期与严重洪涝年关系密切。

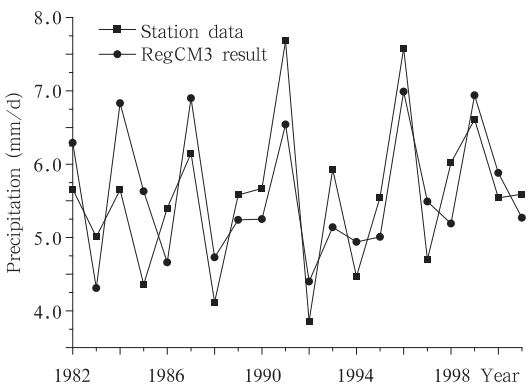


图 4 站点资料和 RegCM3 模式模拟淮河流域夏季 1982—2001 年平均降水的年变化

Fig. 4 Mean summer precipitation in the Huaihe River basin during 1982 - 2001

上面检验了 RegCM3 对淮河流域夏季降水年际变化的模拟能力,下面将利用统计学方法对 RegCM3 模拟降水的空间分布与实测降水进行定量地对比。

由淮河流域 RegCM3 模拟结果与实测 1982—2001年夏季降水量的相关系数的分布情况(图5),

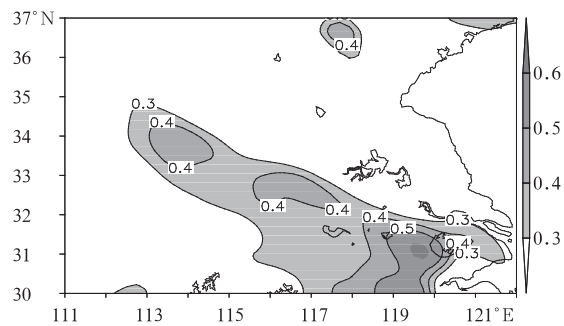


图 5 RegCM3 模拟与站点资料所得 1982—2001 年夏季降水量的空间相关系数

(阴影部分超过 95% 显著水平检验)

Fig. 5 Spatial distribution of the correlation coefficient between the summer precipitation in RegCM3 and station observation from 1982 to 2001

(The shaded area are significant at the 95% confindence level)

可见模拟与实测降水量的相关系数在淮河流域南部区域大一些,基本在0.4以上,在北部区域的相关系数小一些。总之,RegCM3能够在一定程度上模拟出淮河流域夏季降水的年际变率。

表1是RegCM3模拟的夏季淮河流域区域内平均降水量的20 a时间序列与实况经过统计计算所得的相关系数、均方根误差及偏差。可以看出,不但模式结果与站点资料的相关系数可高达0.70,而且偏差也比较小,只有0.03 mm/d,占实测气候平均值的0.60%。综合来看,RegCM3模拟降水的气候平均态与实测降水场的相似度较高。

表1 RegCM3模拟的1982—2001年夏季淮河流域区域平均降水与站点实测结果的相关系数、均方根误差及偏差

Table 1 The COR, RMSE, and bias between RegCM3 and station observation for summer-averaged precipitation over the Huaihe River basin from 1982 to 2001

相关系数	均方根误差(mm/d)	偏差(mm/d)
0.70	0.72	0.03

4.3 RegCM3对2003年淮河流域夏季降水的模拟

下面,将RegCM3对2003年淮河流域夏季集合模拟的分月降水做一些简要分析。由于所用的实况资料为中国730站的观测资料,而在(30°—37°N,111°—115°E)范围内,站点资料很少,故图6、7和8的经度是自115°E开始的。

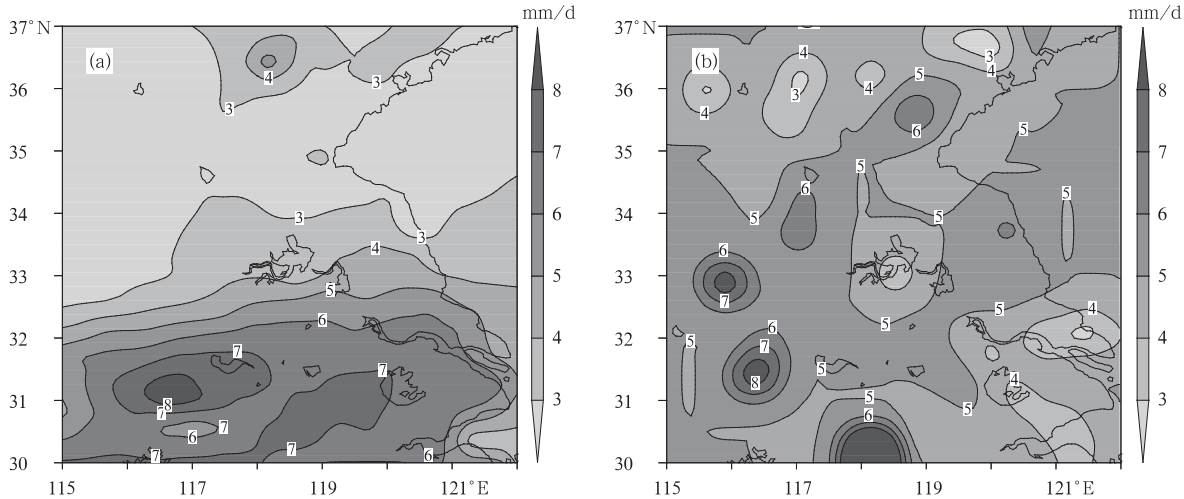


图6 2003年6月淮河流域降水(a. RegCM3, b. 观测)

Fig. 6 June 2003 rainfall over the Huaihe river basin (a) RegCM3 and (b) station observation

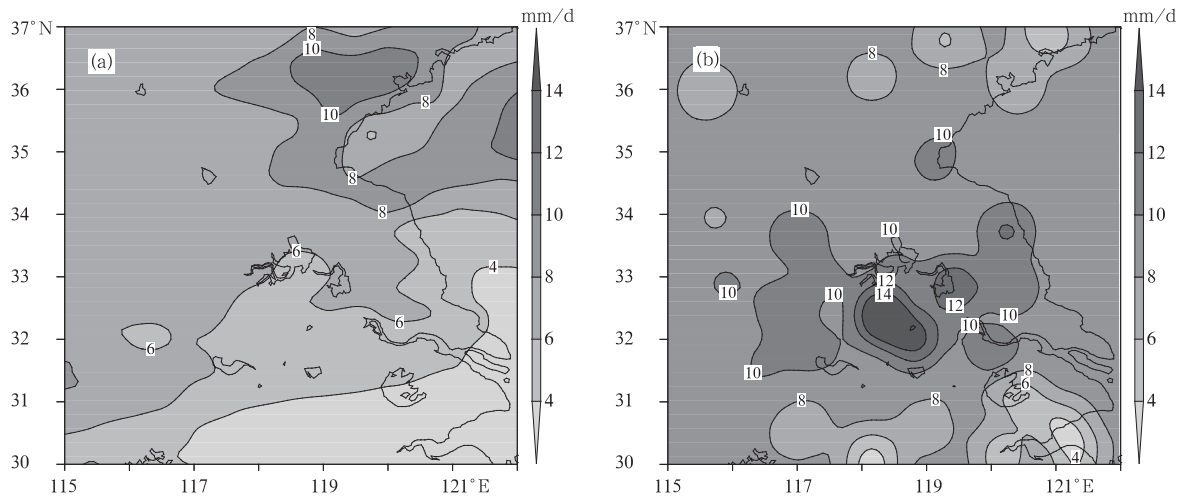


图7 同图6,但为2003年7月

Fig. 7 As in Fig. 6, but for July 2003

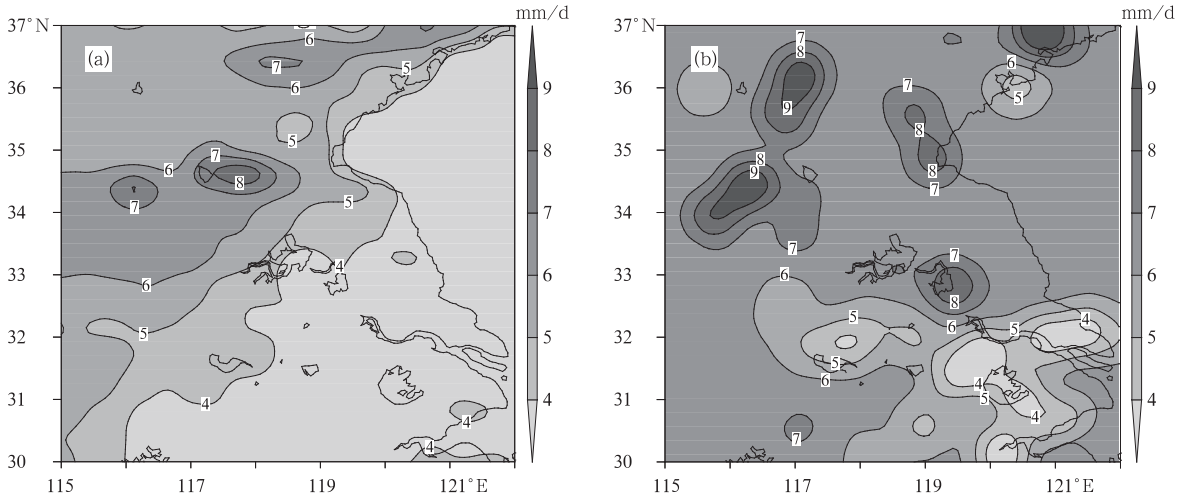


图 8 同图 6,但为 2003 年 8 月

Fig. 8 As in Fig. 6, but for August 2003

从模拟和实测淮河流域 2003 年 6、7 和 8 月的降水分布(图 6、7 和 8)可以看出,模拟结果基本上再现了 6 和 8 月降水中心的空间分布,只是模拟的降水量比实测低 1—2 mm/d。实况降水中也是 7 月的降水量偏大,模式也模拟出了 7 月降水偏大,但是,降水大值区明显偏北。表 2 列出了 RegCM3 模拟的 2003 年夏季淮河流域各月平均降水与实况的相关系数、均方根误差及偏差,可见 RegCM3 对 2003 年 8 月降水的模拟效果较好,而对 6 和 7 月降水几乎没有模拟能力,模拟的降水量具体数值也与实况相差较大。这主要是因为 2003 年 6 和 7 月出现了几次主要由中小尺度暴雨云团形成的极端强降水,给 RegCM3 的模拟带来了很大的难度,可见其对于小尺度强降水的模拟能力还有待提高。

表 2 RegCM3 模拟的 2003 年夏季淮河流域各月平均降水与站点实测结果的相关系数、均方根误差及偏差

Table 2 The COR, RMSE, and bias between RegCM3 and observation for monthly average precipitation over the Huaihe River basin in summer 2003

	相关系数	均方根误差(mm/d)	偏差(mm/d)
6 月	0.17	0.15	−0.58
7 月	0.13	0.79	−2.88
8 月	0.40	0.49	−1.80

5 结 论

利用区域气候模式 RegCM3 对中国淮河流域 1982—2001 年夏季降水进行了集合模拟试验,并选取淮河流域发生汛期暴雨的 2003 年作为特例进行了研究。通过模拟结果与实测降水及环流场资料的对比分析,得出以下主要结论:

(1) RegCM3 能够模拟出淮河流域夏季的主要降水带分布和年际变率。淮河流域夏季的主要降水带一般位于安徽、江苏两省沿淮地区;淮河流域夏季降水存在 2—3 a 的变化周期,且该周期与严重洪涝年关系密切。RegCM3 模拟的降水与实况的统计分析结果表明,RegCM3 对淮河流域夏季降水气候平均态有较强模拟能力。

(2) 对于低层 850 hPa 流场结构和水汽输送,RegCM3 能模拟出前者的大致分布和水汽输送特点,但是模拟的风速和湿度均比实况偏大。

(3) 对 2003 年的个例研究表明,RegCM3 能够模拟出该年淮河流域降水比平均态偏大,但未能模拟出该年会出现极端大降水量的特点。RegCM3 能够较为准确地集合模拟出 2003 年 8 月的降水,却未能模拟出 6 和 7 月的极端强降水,尤其是对降水中心的模拟偏差很大,可见 RegCM3 对于小尺度强降水的模拟能力还有待提高。

致谢:感谢祝亚丽博士在本文写作过程中提供的有益讨论。

参考文献

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影响的试验. 大气科学,30(2):185-192

李建云,王汉杰. 2008. RegCM3 积云参数化方案对中国南方夏季强降水过程模拟的影响. 气候与环境研究,13(2):149-160

李巧萍,丁一汇. 2004. 区域气候模式对东亚季风和中国降水的多年模拟与性能检验. 气象学报,62(2):140-153

李维京,张培群,李清泉等. 2005. 动力气候模式预测系统业务化及其应用. 应用气象学报,16(3):1-11

刘晓东,江志红,罗树如等. 2005. RegCM3 模式对中国东部夏季降水的模拟试验. 南京气象学院学报,28(3):351-359

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. 气象学报,64(4):432-442

王慧,王谦谦. 2002. 近 49 年来淮河流域降水异常及其环流特征. 气象科学,22(2):149-158

杨雅薇,陈伯民,董广涛等. 2008. 区域气候模式 RegCM_NCC 在华东地区的业务应用Ⅱ:10 年夏季回报试验. 高原气象,27(增刊):32-41

张冬峰,欧阳里程,高学杰等. 2007. RegCM3 对东亚环流和中国气候模拟能力的检验. 热带气象学报,23(5):444-452

章国材,毕宝贵,鲍媛媛等. 2004. 2003 年淮河流域强降水大尺度环流特征及成因分析. 地理研究,23(6):795-804

Castro C L. 2007. Investigation of the summer climate of the contiguous United States and Mexico using the regional atmospheric modeling system (RAMS) Part I: Model climatology (1950 - 2002). J Climate, 20: 3844-3865

Ding Yihui, Shi Xueli, et al. 2006a. Multi-year simulations and experimental seasonal predictions for rainy seasons in China by using a nested regional climate model (RegCM_NCC) Part Ⅰ: Sensitivity study. Adv Atmos Sci, 23: 323-341

Ding Yihui, Liu Yiming, et al. 2006b: Multi-year simulations and experimental seasonal predictions for rainy seasons in China by using a nested regional climate model (RegCM_NCC) Part Ⅱ: The experimental seasonal prediction. Adv Atmos Sci, 23: 487-503

Im E-S, Park E-H, Kwon W-T, et al. 2006. Present climate simulation over Korea with a regional climate model using a one-way double-nested system. Theor Appl Climatol, 86: 187-200

Liu Y Q, Giorgi F, Washington W M. 1994. Simulation of summer monsoon climate over East Asia with a NCAR regional climate model. Mon Wea Rev, 122: 2331-2348

Liu Y Q, Avissar R, Giorgi F. 1996. A simulation with the regional climate model RegCM2 of extremely anomalous precipitation during the 1991 East Asian flood: An evaluation study. J Geophys Res, 101: 26199-26215

Liu Yaqin, Fan Guangzhou, Zhou Dingwen. 2008. Numerical simulation of summer precipitation in China by using a regional climate model (RegCM3). J Chengdu Univ Inform Tech(成都信息工程学院学报), 23: 442-447

Segele Z T, Leslie L M, Lamb P J. 2009. Evaluation and adaptation of a regional climate model for the Horn of Africa: Rainfall climatology and interannual variability. Int J Climatol, 29: 47-65