

徐璇, 陆日宇, 石英. 2011. 全球和区域气候模式对中国东部夏季降水季节演变模拟的比较 [J]. 大气科学, 35 (6): 1177–1186. Xu Xuan, Lu Riyu, Shi Ying. 2011. Comparison between the results on seasonal evolution of summer precipitation over eastern China simulated by a regional climate model and the driving GCM [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 35 (6): 1177–1186.

全球和区域气候模式对中国东部夏季 降水季节演变模拟的比较

徐璇^{1, 3} 陆日宇¹ 石英²

1 中国科学院大气物理研究所大气科学和地球流体力学数值模拟国家重点实验室, 北京 100029

2 中国气象局国家气候中心, 北京 100081

3 中国科学院研究生院, 北京 100049

摘 要 本文利用全球海气耦合模式 (MIROC3.2_hires) 和区域气候模式 (RegCM3) 的模拟结果, 分析了东亚地区夏季降水和大气环流的季节演变特征, 并与 NCEP/DOE 再分析资料和降水观测资料进行了对比分析。结果表明, 全球和区域气候模式都能反映出中国东部地区夏季平均环流场和降水场气候态分布的基本特征, 但全球模式模拟的雨带范围偏大, 几乎覆盖整个华南地区, 区域气候模式则较好地模拟出华南沿海地区的降水大值中心, 与实际观测更相符。对于季节演变特征而言, 全球模式模拟的华南前汛期和江淮梅雨期的主要降水中心均位于华南地区, 未能反映出北推过程, 而区域模式能够模拟出中国东部地区夏季雨带随时间呈现出的北推过程, 即华南前汛期、江淮梅雨期和华北与东北雨季三个阶段。区域模式对东亚高空急流和对流层低层南风场随时间北移的模拟能力明显优于全球模式, 这可能是区域模式能够改进对降水季节演变模拟的重要原因。

关键词 区域气候模式 夏季降水 中国东部 季节演变

文章编号 1006–9895 (2011) 06–1177–10

中图分类号 P426

文献标识码 A

Comparison between the Results on Seasonal Evolution of Summer Precipitation over Eastern China Simulated by a Regional Climate Model and the Driving GCM

XU Xuan^{1,3}, LU Riyu¹, and SHI Ying²

1 State Key Laboratory of Numerical Modeling for Atmospheric Sciences and Geophysical Fluid Dynamics, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029

2 National Climate Center, China Meteorological Administration, Beijing 100081

3 Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049

Abstract The authors compared the simulations of seasonal evolution of rainfall over eastern China and the associated large-scale circulation during summer by a coupled general circulation model (CGCM, MIROC3.2_hires) and the nested regional climate model (RegCM3). Results show that both the MIROC3.2_hires and RegCM3 can reproduce the basic features of summer mean atmospheric circulation, and the spatial distribution of precipitation in China

收稿日期 2011–01–19, 2011–06–10 收修定稿

资助项目 国家自然科学基金委—云南联合基金重点项目 U0933603, 国家重点基础研究发展规划项目 2009CB421407, 国家自然科学基金金资助项目 40975041

作者简介 徐璇, 女, 1986 年出生, 硕士研究生, 主要从事大气动力学方面的研究。E-mail: xx1516@163.com

通讯作者 陆日宇, E-mail: lr@mail.iap.ac.cn

characterized by a decrease from the southeast to northwest of China. Compared with observations, the MIROC3.2_hires simulates a more extensive area of heavy rainfall over South China, while the RegCM3 presents more reasonable spatial distribution of rainfall over this region.

The improvement of simulation by RegCM3 is more evident in the seasonal evolution than that by the driving CGCM. It is found that the MIROC3.2_hires fails to reproduce the seasonal evolution of rain band by presenting the precipitation maximum stagnating over South China during the whole summer period. Meanwhile, the RegCM3 can basically capture the seasonal evolution of rainfall over eastern China during summer, characterized by three stepwise stages, i. e. pre-summer rainy season in South China, Meiyu period in the Yangtze River valley, and rainy season in North China. It suggests that the better simulation of seasonal evolution of wind in both the lower and upper troposphere may be important for the improvements of RegCM3 in simulating the seasonal rainfall evolution.

Key words regional climate model, summer precipitation, eastern China, seasonal evolution

1 引言

现在全球气候模式能够较好地模拟和再现全球降水特征,在东亚地区也能够模拟出夏季降水的大尺度空间分布特征,但由于东亚复杂的地形和季风气候特点,它们对东亚夏季降水的细节结构,特别是对夏季雨带向北推进过程的模拟还存在较多问题(Jiang et al., 2005; IPCC, 2007)。

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(Sperber et al., 1994; 高学杰等, 2006; Kusunoki et al., 2006)。但由于计算机条件的限制,全球气候模式的分辨率至今仍然较低,这促使区域气候模式得到了更快的发展和应用。其中,RegCM系列区域气候模式自20世纪80年代产生后,先后形成了RegCM1(Giorgi and Bates, 1989)、RegCM2(Giorgi et al., 1993a, 1993b)以及RegCM3(Pal et al., 2007)等版本。RegCM系列模式在东亚和中国区域得到了广泛的应用,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(罗勇和赵宗慈, 1997; Gao et al., 2001; 鞠丽霞和王会军, 2006; 高学杰等, 2007; 张冬峰等, 2007)。

中国东部雨带经向尺度较小,锋面结构复杂,除受到高空急流、低层西南暖湿气流和西太平洋副高的影响外,还受到次天气尺度扰动的影响,变化机制十分复杂。此外,中国东部雨带还具有明显的季节演变特点,雨带在初夏出现在华南,之后不断北移,于盛夏期间到达华北及东北地区(陶诗言和卫捷, 2006)。气候模式能否准确地模拟出这种雨带的季节演变,对提高中国东部地区夏季气候的模

拟及预测、预估能力十分重要。本文即基于一个全球模式驱动下的高分辨率区域气候模式的长时间积分模拟结果(石英, 2010; Gao et al., 2011),从降水和大气环流场两个角度出发,对比分析了此全球和区域气候模式对中国东部夏季降水季节演变的模拟能力。

本文第2节给出模式简介与数据资料;第3节比较了全球和区域气候模式对降水及其相关要素气候态的模拟能力;第4节对比分析了两个模式中降水和尺度环流的季节演变特征;最后第5节给出结论。

2 模式简介与数据资料

模拟中的全球模式为由日本东京大学气候系统研究中心、日本环境研究所和日本地球环境研究中心(CCSR/NIES/FRCGC)联合开发的MIROC3.2_hires(简称全球模式)。该模式是MIROC系列模式的高分辨率版本,水平分辨率为T106(约100 km),顶层高度为40 km,垂直方向共分为56层,包括大气模式(AGCM5.7)、陆面模式(MATSIRO)、海洋模式和海冰模式(COCO3.4)4个部分(Hasumi and Emori, 2004)。一些研究利用该模式分析了东亚地区的降水和环流(Kimoto, 2005; 王东阡和张耀存, 2009)。在参加“国际耦合模式比较计划阶段3(CMIP3)”试验的20多个全球模式中,MIROC3.2_hires是对东亚季风区气候平均态模拟较好的模式之一(许崇海等, 2007)。

区域气候模式为RegCM3(简称区域模式),其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、气压梯度等方案(Pal et al., 2007)。试验中,区域模

式的中心点取为 (35°N, 109°E)，东西方向格点数为 288，南北方向为 219，模式的水平分辨率取为 25 km，顶层高度为 10 hPa，垂直方向分 18 层，覆盖整个中国及周边地区。初始场和每 6 小时更新一次的侧边界值由上述全球模式 MIROC3.2_hires 提供。试验的积分时段为 1948 年 1 月 1 日~2100 年 12 月 31 日，共计 153 年，其中 1948~1950 年 3 年作为模式初始化阶段。

为分析全球和区域模式对中国东部地区夏季降水和环流气候平均态的模拟能力，我们截取了两个模式中 1951~2000 年共 50 年的数据作为模式的气候平均态。用于检验模式的资料中，包括 NCEP/DOE 再分析资料 (Kanamitsu et al., 2002) 的 850 hPa 风场、850 hPa 相对湿度 (本文转化为比湿) 和 200 hPa 风场的逐日数据，其水平分辨率为 $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$ ，以 1979~2000 年共 22 年的平均作为气候态；Xie et al. (2007) 发展的东亚地区日降水数据集，其水平分辨率为 $0.5^{\circ} \times 0.5^{\circ}$ ，该数据集自 1962 年开始，取 1962~2000 年共 39 年的平均作为气候态。

3 对中国东部夏季降水平均态的模拟

图 1 给出了夏季 (6~8 月) 平均降水场的观测和模拟结果，从图中可以看到，全球模式 (图 1b) 和区域模式 (图 1c) 都能很好地表现出观测中 (图 1a) 降水自南向西北递减的分布特征。但在全球模式结果中，华南雨带的范围明显偏大，主要分布在广东大部、福建、江西、湖南和云贵高原等广大地区。区域模式模拟的华南雨带则主要集中在广东，与观测 (图 1a) 十分接近。其次区域模式对青藏高原南部的降水强度也有了一定的改进，这可能是由于其更高的水平分辨率能够更好地刻画青藏高原地区复杂地形特征引起的。另外，两个模式都模拟出了天山等大地形地区的较强降水，这一特征在区域模式中更为明显，但较观测中偏大，其原因除模式本身的误差外，这些地区观测台站偏少也有可能给所使用的观测数据带来一定的不确定性 (Gao et al., 2008)。区域模式的不足主要体现在东北地区，模拟的降水范围偏大，强度偏强，与 Park et al. (2008) 的研究结果一致。

图 2 给出 850 hPa 风场和比湿场的气候态分布。由再分析资料 (图 2a) 可以看到，影响中国夏

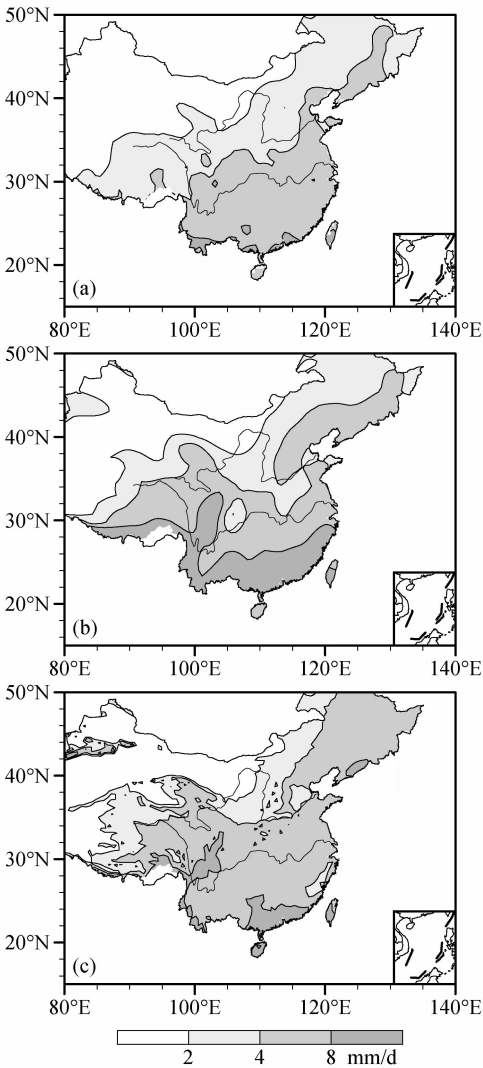


图 1 夏季 (6~8 月) 平均降水场分布 (单位: mm/d): (a) 观测资料; (b) 全球模式; (c) 区域模式。阴影: 大于 2 mm/d
Fig. 1 Climatological summer (JJA) mean precipitation: (a) Observations; (b) simulations by the MIROC (MIROC3.2_hires) model; (c) simulations by the RCM (RegCM3) model. Areas with precipitation larger than 2 mm/d are shaded

季降水水汽输送主要有两支气流：一支是来自孟加拉湾的西南气流，另一支是来自南海的偏南气流。这两支气流的强度和比湿的分布都直接影响着降水的空间分布。全球模式 (图 2b) 和区域模式 (图 2c) 均模拟出了风场和比湿场的基本分布特点。但与再分析资料相比，全球模式模拟的孟加拉湾西南风气流和南海偏南风气流明显偏强。Kimoto (2005) 对 MIROC3.2_hires 模拟结果的分析中也出现了上述问题。这些低层风场的偏强可能是华南雨带在全球模式中范围偏大的主要原因。区域模式

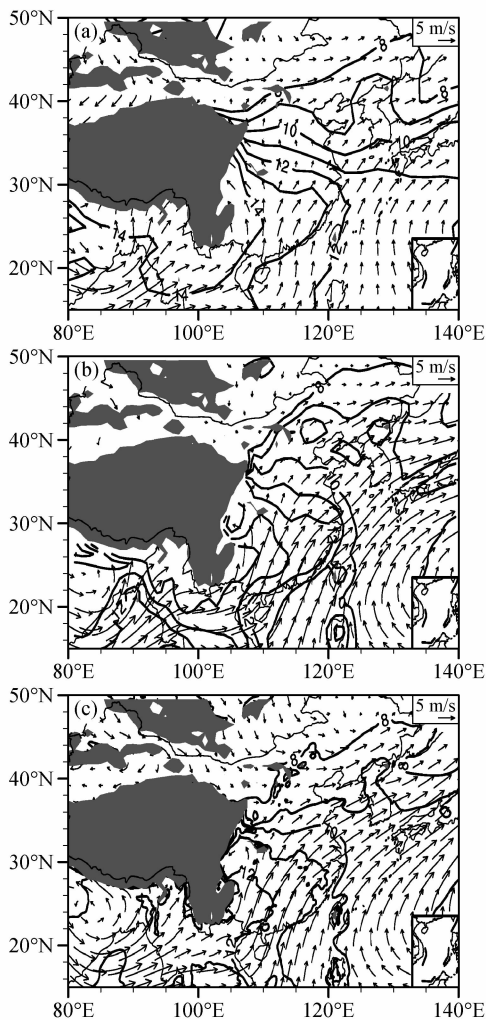


图2 夏季(6~8月)平均850 hPa风场(矢量)和比湿场(等值线,单位: g/kg)的分布: (a) NCEP/DOE R2; (b) 全球模式; (c) 区域模式。阴影: 海拔高度>1500 m地区

Fig. 2 Climatological summer (JJA) mean wind at 850 hPa (arrows) and specific humidity (contours, units: g/kg): (a) NCEP/DOE R2; (b) simulations by the MIROC model; (c) simulations by the RCM model. Areas with elevation greater than 1500 m are shaded

对此则有较好的改进,模拟的孟加拉湾西南气流和南海偏南气流更接近再分析资料,这可能是华南雨带的范围在区域模式中得到改进的原因之一。此外,区域模式模拟的风场在塔里木盆地附近地区也较全球模式有所改进。不足的是,区域模式对东北地区的风场模拟较差,特别是(45°N, 120°E)附近,再分析资料中主要为偏西风,而区域模式中该地区表现为偏北风,造成了虚假的辐合,这可能是区域模式在东北地区模拟降水偏多的原因。两个模式模拟的比湿强度都比再分析资料弱一些。

4 对中国东部夏季降水季节演变的模拟

中国东部雨带具有明显的季节演变特征,而现阶段的数值模拟分析在这方面涉及相对较少。在下面的分析中,我们将考察两个模式对中国东部雨带季节演变的模拟能力。首先分析降水场在北推过程中的空间分布特征,之后,再以时间—纬度剖面图的形式进一步考察一些气象要素的季节演变特征。

4.1 各时段雨带的空间分布

中国东部夏季雨带的北推南撤过程与东亚夏季风的进退密切相关。研究指出中国东部雨带具有明显的随时间向北推进的特征,并且在此过程中呈现出两次突跳(涂长望和黄仕松, 1944)。许多学者(江志红等, 2006; 陶诗言和卫捷, 2006; 苏同华和薛峰, 2010)都对雨带的推进过程作了研究,认为两次突跳分别发生在6月中上旬和7月中下旬,相应的雨季可分别表示为华南前汛期、江淮梅雨期和华北与东北雨季几个时段。综合以上研究,我们将华南前汛期界定为5月15日~6月10日,此时降水中心位于华南地区;将江淮梅雨期界定为6月16日~7月15日,此时降水主要集中于长江淮河流域;将华北和东北雨季界定为7月20日~8月15日,降水中心北推到中国华北及东北地区。

图3为华南前汛期降水量的空间分布。观测结果(图3a)显示华南前汛期的降水分布呈现如下特征:降水中心(>8 mm/d)主要集中在广东、广西、江西和福建的南部。与观测相比,全球模式(图3b)模拟的降水中心几乎覆盖整个江南和华南地区,范围明显偏大;华北、东北地区的降水也较观测偏强。与全球模式相比,区域模式(图3c)模拟的降水中心范围明显减小,和观测较为接近,同时,区域模式表现出了此汛期内东北地区降水比华北地区多的特点。区域模式的不足之处在于模拟华北与东北地区的降水较观测略强。

图4给出江淮梅雨期的降水分布。从观测(图4a)中可以看到,降水中心带已经由华南地区向北推进到了江淮流域,华南地区进入相对少雨期(<8 mm/d),华北地区雨量开始增大,长白山地区雨量较大(>4 mm/d)。与观测相比,全球模式(图4b)模拟的降水中心仍然分布在华南地区,没有表现出北推过程,华北与东北地区的降水则明显偏

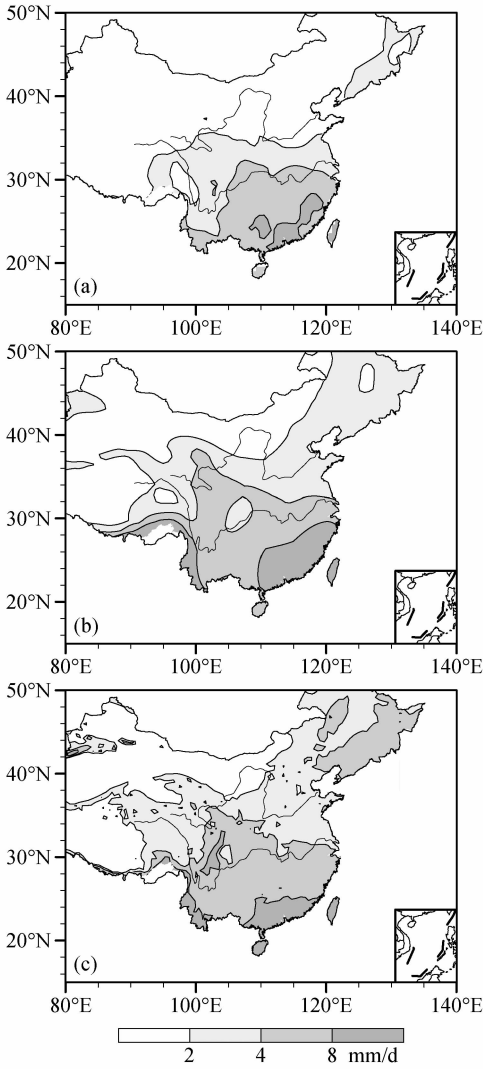


图3 华南前汛期降水分布(单位: mm/d): (a) 观测; (b) 全球模式; (c) 区域模式。阴影: 大于2 mm/d 地区
Fig. 3 Climatological precipitation averaged during the pre-summer rainy season in South China; (a) Observations; (b) simulations by the MIROC model; (c) simulations by the RCM model. Areas with precipitation larger than 2 mm/d are shaded

多。区域模式(图4c)则模拟出了观测中位于长江流域的降水大值区,即降水中心出现北移,同时华南地区的降水大值区域范围也较全球模式有所缩小。

图5为华北与东北雨季的降水分布。此时,华北与东北地区降水增多,江淮降水明显减少,华南降水有所增加(图5a)。与观测相比,全球模式(图5b)虽然模拟出了江淮地区降水的减少,但是华南地区的降水中心(>8 mm/d)范围相对较大,主要的降水高值地区仍然集中在华南。区域模式的模拟

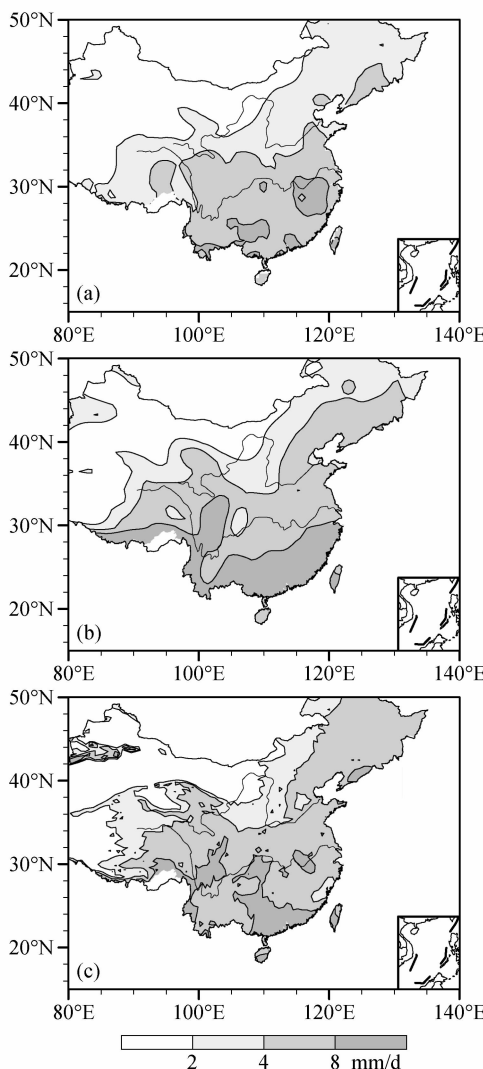


图4 同图3, 但为江淮梅雨期
Fig. 4 Same as Fig. 3, but for the Meiyu rainy season

(图5c)相对全球模式有所改进,主要表现在华南的降水中心(>8 mm/d)范围明显缩小,从而与观测更接近,并能够表现出东北地区的降水中心,同时能显示出华南和华北地区降水比长江流域多的特点。

综上所述,全球模式模拟降水北移过程的能力较差,特别是在江淮梅雨期,全球模式无法模拟出降水中心由华南地区北移至江淮的特点。全球模式还存在华南地区降水比观测明显偏强的问题,这与朱坚等(2009)的研究结果一致。区域模式则较好地体现了降水中心北移的季节演变特征,模拟的范围和位置均明显优于全球模式,但也存在模拟的华北和东北地区降水明显偏强的问题。

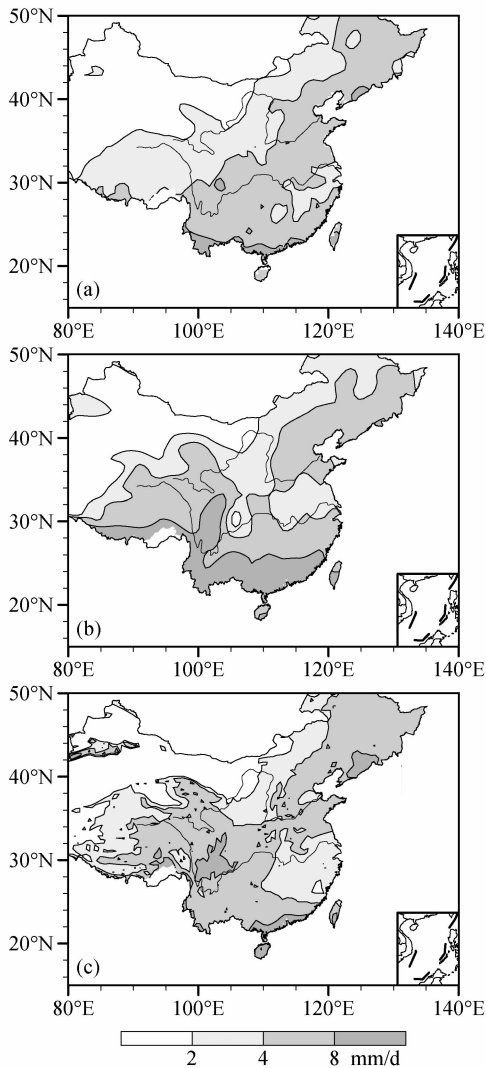


图5 同图3, 但为华北和东北雨季
Fig. 5 Same as Fig. 3, but for the rainy season in North China

4.2 对雨带和环流场北移过程的模拟

在 4.1 节中我们分析了中国夏季三个时段的降水分布特点。由于模式对降水的模拟和大气环流等要素密切相关, 因而有必要进一步讨论与降水相关的气象要素季节演变特征。

我们采用 6 mm/d 的雨量等值线来描述雨带的季节演变过程。图 6 为 115°E~120°E 平均的降水时间—纬度剖面图。从降水观测资料 (图 6a) 中看到, 进入 6 月以后, 中国东部主要呈现出两条雨带。一条维持在 20°N 以南的南海东北侧地区, 基本上贯穿整个夏季。另一条是位于 20°N 以北的雨带, 它随着时间向北推进: 在 6 月 15 日附近有一次北跳, 降水大值中心 (>10 mm/d) 区域约从 23°N

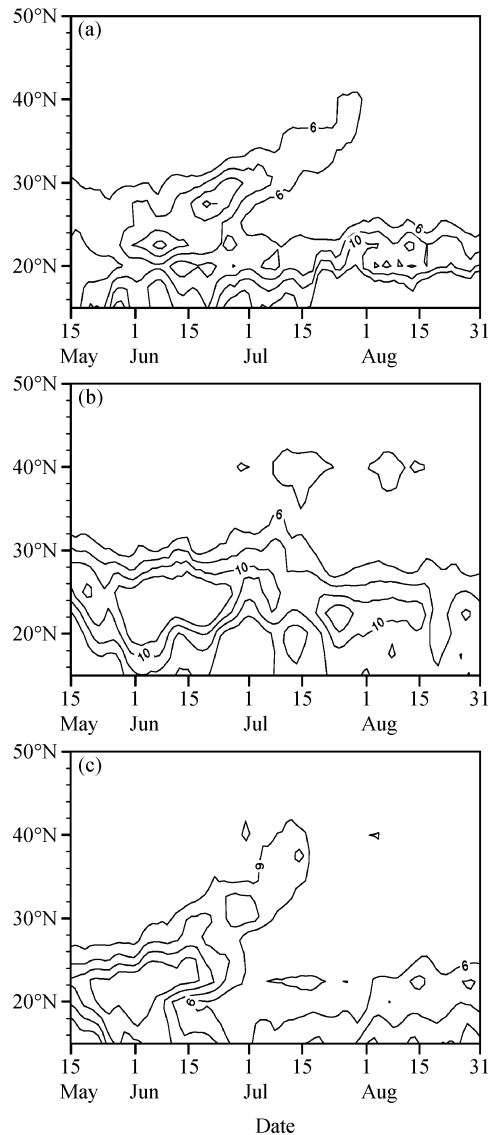


图6 降水时间—纬度剖面图 (115°E~120°E) (单位: mm/d):
(a) 观测; (b) 全球模式; (c) 区域模式
Fig. 6 Latitude-time cross sections of climatological precipitation averaged along 115°E~120°E (units: mm/d): (a) Observations; (b) simulations by the MIROC model; (c) simulations by the RCM model

跳至 27°N 附近; 在 7 月下旬, 雨带 (>6 mm/d) 有一次明显的北抬过程, 由 36°N 北抬至 40°N 附近。全球模式 (图 6b) 模拟的雨带只表现为一支, 且始终维持在 20°N~30°N, 未能表现出雨带的向北推进过程。区域模式 (图 6c) 则能够模拟出中国东部的两支雨带, 北侧雨带有明显的向北推进过程, 和观测结果相比, 该雨带的向北推进速度过快。

高空西风急流的经向位移与雨带的进退密切相

关 (Lin and Lu, 2008)。图 7 为 $115^{\circ}\text{E}\sim 120^{\circ}\text{E}$ 平均 200 hPa 纬向风的时间—纬度剖面图。从再分析资料 (图 7a) 中可以看到, 西风急流中心在 5 月中旬至 7 月中旬之间呈现出缓慢北移的特征, 在 7 月底发生北跳之后, 又逐渐南移。全球模式 (图 7b) 模拟的急流北移过程时间较短, 北移的幅度偏小, 且模拟的急流中心强度也偏弱。区域模式 (图 7c) 则较好地模拟出了急流中心 7 月底前的缓慢北移过程, 不仅北移的时间和幅度比全球模式都有所改进, 而且模拟的急流中心强度也比全球模式更接近于再分析资料。

夏季东亚地区低层大气盛行的偏南风从海洋带

来大量水汽。图 8 为 $115^{\circ}\text{E}\sim 120^{\circ}\text{E}$ 平均 850 hPa 经向风的时间—纬度剖面图。再分析资料显示 (图 8a), 南风的风速中心趋势线呈现出北移的过程, 另外, 4 m/s 等值线北界的变化也呈现出先缓慢北移至 30°N , 7 月下旬之后又迅速减弱的特征。全球模式 (图 8b) 模拟的中心趋势线北移幅度比再分析资料偏小, 模拟的 4 m/s 等值线虽然在 7 月底之前呈现出缓慢北移的特征, 但模拟的强度明显偏大, $>4\text{ m/s}$ 的强南风在 25°N 以南地区几乎持续了整个夏季, 也未能表现出南风在 7 月下旬后急速减弱的特征。区域模式模拟的南风强度比全球模式有较大改进, 其中心趋势线也表现出与再分析资料更为

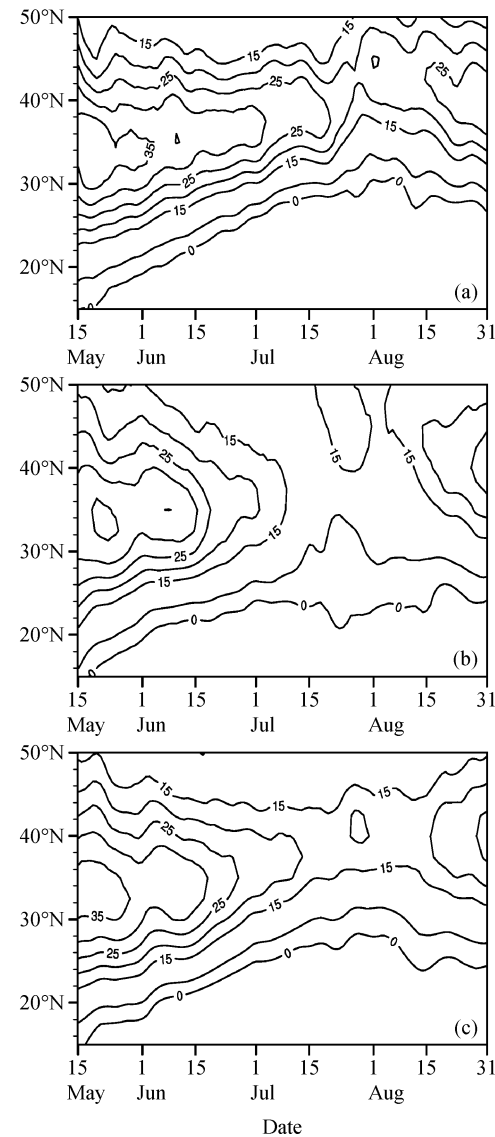


图 7 同图 6, 但为 200 hPa 纬向风 (单位: m/s)
Fig. 7 Same as Fig. 6, but for zonal wind at 200 hPa (units: m/s)

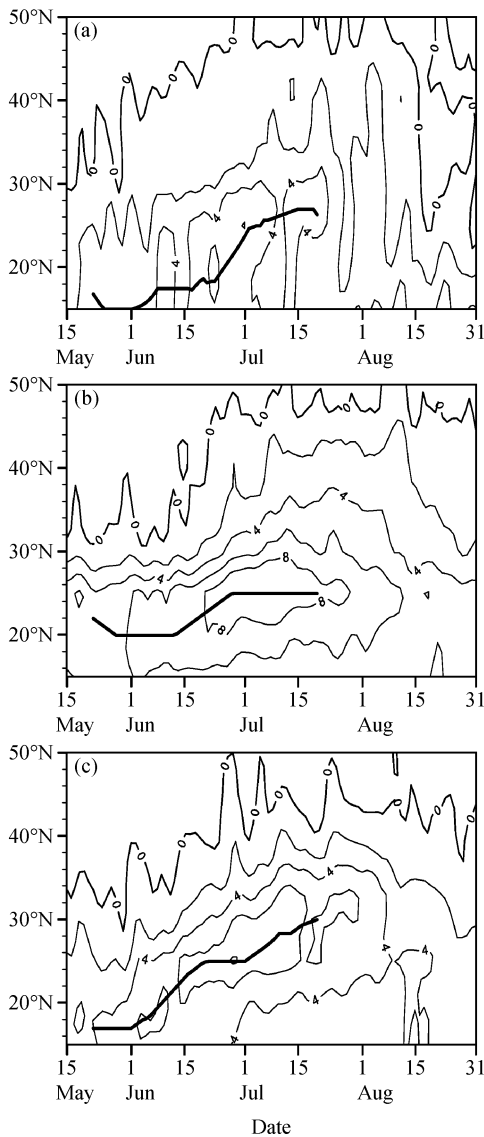


图 8 同图 6, 但为 850 hPa 经向风 (单位: m/s , 粗实线为趋势线)
Fig. 8 Same as Fig. 6, but for meridional wind at 850 hPa (units: m/s). The thick solid line represents the trend

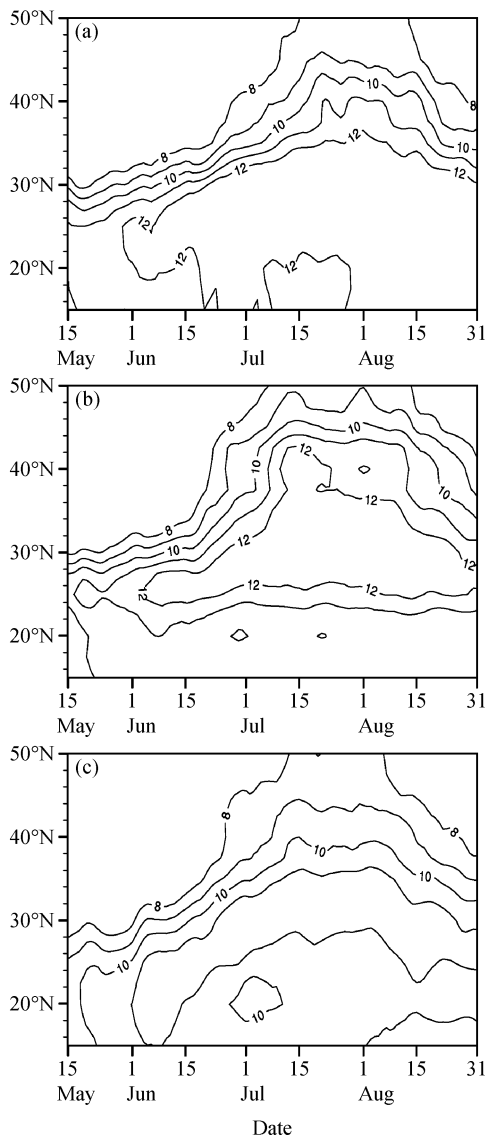


图9 同图6, 但为 850 hPa 比湿 (单位: g/kg)
Fig. 9 Same as Fig. 6, but for specific humidity at 850 hPa (units: g/kg)

一致的北移特征, 不过北移的幅度略大, 在 7 月中旬中心趋势线已经到达 30°N 附近, 这可能是区域模式中模拟的北方地区降水得以偏多的重要原因。区域模式中 4 m/s 等值线也表现出迅速减弱的特点, 但时间略晚。

水汽条件是影响降水的另一个重要因素。图 9 为 115°E~120°E 平均 850 hPa 比湿时间—纬度剖面图。从再分析资料 (图 9a) 中看到, 水汽增加主要发生在 5 月底南海季风爆发之后。6 月中旬后, 水汽大值中心 (>12 g/kg) 开始向北扩展。全球模式 (图 9b) 模拟的水汽大值中心在 7 月中旬迅速北

抬至 40°N 附近, 这有可能是造成全球模式在 7 月中旬于 40°N 附近突现一个降水中心的重要原因 (图 6b)。区域模式模拟的比湿强度偏小。这也从另一方面说明区域模式中降水季节演变模拟的改进可能主要是由于模式对风场的模拟能力提高而造成的。

5 结论

本文利用 NCEP/DOE 再分析资料和 Xie et al. (2007) 降水资料作为参考, 对比分析了全球气候模式 MIROC3.2_hires 及其所驱动的区域气候模式 RegCM3 的模拟结果 (石英, 2010), 侧重分析了这两个模式对中国东部地区夏季降水北推过程的模拟能力, 得到以下主要结论:

(1) 区域气候模式能够更好地模拟出中国东部夏季降水的季节演变。全球模式的模拟存在华南前汛期和江淮梅雨期降水大值中心均分布在华南地区的问题, 模拟不出雨带向北推进的过程, 而区域模式清晰地反映出雨带的北推过程, 尽管北推过程较观测偏快了一些。

(2) 相对于全球模式, 区域气候模式更好地模拟出东亚高空急流和对流层低层偏南风的北推。这可能是区域模式能够改进对雨带季节演变过程模拟能力的重要原因。

(3) 中国东部夏季降水及其演变是气候模式的模拟难点之一。高分辨率的区域气候模式相对于全球模式有所改进, 但还存在很大不足, 需要在模式发展和完善方面进行更多的工作, 以进一步提高其模拟能力, 为其在气候机理研究和预测、预估方面的应用提供更坚实的基础。

致谢 中国气象局国家气候中心高学杰研究员、中国科学院大气物理研究所陈卫博士在本文的修改过程中提出了很多有益的意见。两位审稿人详细地指出了文稿中诸多的不足之处和修改建议, 在此一并深表谢意。

参考文献 (References)

Gao X J, Zhao Z C, Ding Y H, et al. 2001. Climate change due to greenhouse effects in China as simulated by a regional climate model [J]. *Adv. Atmos. Sci.*, 18 (6): 1224–1230.
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 [J]. *大气科学*, 30 (2): 185–192.
Gao Xuejie, Xu Ying, Zhao Zongci, et al. 2006. Impacts of horizon-

- tal 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, 张冬峰, 陈仲新, 等. 2007. 中国当代土地利用对区域气候影响的数值模拟 [J]. *中国科学 (D辑)*, 37 (3): 397–404. Gao Xuejie, Zhang Dongfeng, Chen Zhongxin, et al. 2007. Land use on climate in China as simulated by a regional climate model [J]. *Science in China (Ser. D)*, 50 (4): 620–628.
- Gao X J, Shi Y, Song R, et al. 2008. Reduction of future monsoon precipitation over China: Comparison between a high resolution RCM simulation and the driving GCM [J]. *Meteor. Atmos. Phys.*, 100 (1): 73–86.
- Gao X J, Shi Y, Zhang D F, et al. 2012. Uncertainties in monsoon precipitation projections over China: Results from two high resolution RCM simulations [J]. *Clim. Res.*, in press.
- Giorgi F, Bates G T. 1989. The climatological skill of a regional model over complex terrain [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 117 (11): 2325–2347.
- Giorgi F, Marinucci M R, Bates G T. 1993a. Development of a second-generation regional climate model (RegCM2). Part I: Boundary-layer and radiative transfer processes [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 121 (10): 2794–2813.
- Giorgi F, Marinucci M R, Bates G T, et al. 1993b. Development of a second-generation regional climate model (RegCM2). Part II: Convective processes and assimilation of lateral boundary conditions [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 121 (10): 2814–2832.
- Hasumi H, Emori S. 2004. K-1 Coupled Model (MIROC) description, K-1 technical report 1 [R]. Center for Climate System Research, University of Tokyo, 34pp. <http://www.ccsr.u-tokyo.ac.jp/kyosei/hasumi/MIROC/tech-repo.pdf>. [2011–01–19]
- IPCC. 2007. Regional Climate Projections in Climate Change 2007: The Physical Science Basis [M]. Solomon S, et al., Eds. Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA: Cambridge University Press, 880–881.
- Jiang Dabang, Wang Huijun, Lang Xianmei. 2005. Evaluation of East Asian climatology as simulated by seven coupled models [J]. *Adv. Atmos. Sci.*, 22 (4): 479–495.
- 江志红, 何金海, 李建平, 等. 2006. 东亚夏季风推进过程的气候特征及其年代际变化 [J]. *地理学报*, 61 (7): 675–686. Jiang Zhihong, He Jinhai, Li Jianping, et al. 2006. Northerly advancement characteristics of the East Asian summer monsoon with its interdecadal variations [J]. *Acta Geographica Sinica* (in Chinese), 61 (7): 675–686.
- 鞠丽霞, 王会军. 2006. 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*, 49 (1): 52–60. Ju Lixia, Wang Huijun. 2006. Modern climate over East Asia simulated by a regional climate model nested in a global gridpoint general circulation model [J]. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 49 (1): 52–60.
- Kanamitsu M, Ebisuzaki W, Woollen J, et al. 2002. NCEP-DOE AMIP-II reanalysis (R-2) [J]. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 14 (2): 1631–1643.
- Kimoto M. 2005. Simulated change of the East Asian circulation under global warming scenario [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 32, L16701. doi: 10.1029/2005GL023383.
- Kusunoki S, Yoshimura J, Yoshimura H, et al. 2006. Change of Baiu rain band in global warming projection by an atmospheric general circulation model with a 20-km grid size [J]. *J. Meteor. Soc. Japan*, 84 (4): 581–611.
- Lin Zhongda, Lu Riyu. 2008. Abrupt northward jump of the East Asian upper-tropospheric jet stream in mid-summer [J]. *J. Meteor. Soc. Japan*, 86 (6): 857–866.
- 罗勇, 赵宗慈. 1997. NCAR RegCM2 对东亚区域气候的模拟试验 [J]. *应用气象学报*, 8 (增刊): 124–133. Luo Yong, Zhao Zongci. 1997. Numerical simulation of East Asian regional climate with NCAR RegCM2 [J]. *Quarterly Journal of Applied Meteorology* (in Chinese), 8 (Suppl.): 124–133.
- Pal J S, Giorgi F, Bi X Q, et al. 2007. Regional climate modeling for the developing world: The ICTP RegCM3 and RegCNET [J]. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 88 (9): 1395–1409.
- Park E H, Hong S Y, Kang H S. 2008. Characteristics of an East Asian summer monsoon climatology simulated by the RegCM3 [J]. *Meteor. Atmos. Phys.*, 100 (1): 139–158.
- 石英. 2010. RegCM3 对 21 世纪中国区域气候变化的高分辨率模拟 [D]. 中国科学院大气物理研究所博士学位论文. Shi Ying. 2010. A high resolution climate simulation of the 21st century over East Asia by RegCM3 [D]. Ph. D. dissertation (in Chinese), Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences.
- Sperber K R, Hameed S, Potter G L, et al. 1994. Simulation of the northern summer monsoon in the ECMWF model: Sensitivity to horizontal resolution [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 122 (11): 2461–2481.
- 苏同华, 薛峰. 2010. 东亚夏季环流和雨带的季节内变化 [J]. *大气科学*, 34 (3): 611–628. Su Tonghua, Xue Feng. 2010. The intraseasonal variation of summer monsoon circulation and rainfall in East Asia [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 34 (3): 611–628.
- 陶诗言, 卫捷. 2006. 再论夏季西太平洋副热带高压的西伸北跳 [J]. *应用气象学报*, 17 (5): 513–525. Tao Shiyan, Wei Jie. 2006. The westward and northward advance of subtropical high over the west Pacific in summer [J]. *Journal of Applied Meteorological Science* (in Chinese), 17 (5): 513–525.
- 涂长望, 黄仕松. 1944. 夏季风的进退 [J]. *气象杂志*, 18: 1–20. Tu Changwang, Huang Shisong. 1944. The advance and retreat of the summer monsoon [J]. *Meteorological Magazine* (in Chinese), 18: 1–20.
- 王东阡, 张耀存. 2009. 气候系统模式 MIROC 对中国降水和地面风场日变化的模拟 [J]. *南京大学学报 (自然科学版)*, 45 (6): 724–733. Wang Dongqian, Zhang Yaocun. 2009. Diurnal vari-

- ations of precipitation and circulation simulated by model for interdisciplinary research on climate [J]. Journal of Nanjing University (Natural Sciences) (in Chinese), 45 (6): 724 – 733.
- Xie P P, Chen M Y, Yang S, et al. 2007. A gauge-based analysis of daily precipitation over East Asia [J]. J. Hydrometeor., 8 (3): 607 – 626.
- 许崇海, 沈新勇, 徐影. 2007. IPCC AR4 模式对东亚地区气候模拟能力的分析 [J]. 气候变化研究进展, 3 (5): 287 – 292. Xu Chonghai, Shen Xinyong, Xu Ying. 2007. An analysis of climate change in East Asia by using the IPCC AR4 simulations [J]. Advances in Climate Change Research (in Chinese), 3 (5): 287 – 292.
- 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 [J]. 热带气象学报, 23 (5): 444 – 452. Zhang Dongfeng, Ouyang Licheng, Gao Xuejie, et al. 2007. Simulation of the atmospheric circulation over East Asia and climate in China by RegCM3 [J]. Journal of Tropical Meteorology (in Chinese), 23 (5): 444 – 452.
- 朱坚, 张耀存, 黄丹青. 2009. 全球变暖情景下中国东部地区不同等级降水变化特征分析 [J]. 高原气象, 28 (4): 889 – 896. Zhu Jian, Zhang Yaocun, Huang Danqing. 2009. Analysis of changes in different-class precipitation over Eastern China under global warming [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 28 (4): 889 – 896.