

李涛, 周广庆, 王芳栋. 2013. 区域海气耦合模式模拟中国夏季降水能力分析 [J]. 气候与环境研究, 18 (6): 701–709, doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2012.12058. Li Tao, Zhou Guangqing, Wang Fangdong. 2013. Simulation capability of China summer precipitation with a regional air–sea coupled model [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 18 (6): 701–709.

区域海气耦合模式模拟中国夏季降水能力分析

李涛^{1,2} 周广庆³ 王芳栋⁴

1 国家海洋环境预报中心, 北京 100081

2 国家海洋局海洋灾害预报技术研究重点实验室, 北京 100081

3 中国科学院大气物理研究所, 北京 100029

4 北京飞行控制中心, 北京 100094

摘 要 基于 OASIS3 (Ocean Atmosphere Sea Ice Soil version 3) 耦合器, 耦合区域气候模式 RegCM3 (Regional Climate Model version 3) 和海洋模式 HYCOM (Hybrid Coordinate Ocean Model), 建立一个区域海气耦合模式, 并通过嵌套方法处理海洋模式的侧边界问题。运用该耦合模式对 1982~2001 年包括中国在内的东亚地区气候进行连续模拟, 重点分析其对中国夏季 (6~8 月) 降水的模拟性能。结果表明: 耦合模式基本可以模拟出中国夏季降水的空间分布特征, 模拟的降水量值和年际变化在靠近海洋的沿海区域比参照试验有一定程度的改善; 能够再现观测夏季降水经验正交函数第一模态 (EOF1) 的空间分布特征, 与观测 EOF1 的时间相关性也比参照试验有较大提高; 前 6 个模态的组合分析也表明耦合模式对长江中下游、山东半岛、海南岛等区域夏季降水的较大时间尺度气候分量的模拟改善更显著。

关键词 区域 耦合模式 夏季降水 OASIS3 耦合器

文章编号 1006-9585 (2013) 06-0701-09

中图分类号 P467

文献标识码 A

doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2012.12058

Simulation Capability of China Summer Precipitation with a Regional Air–Sea Coupled Model

LI Tao^{1,2}, ZHOU Guangqing³, and WANG Fangdong⁴

1 National Marine Environmental Forecasting Center, Beijing 100081

2 Key Laboratory of Research on Marine Hazards Forecasting of State Oceanic Administration, Beijing 100081

3 Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029

4 Beijing Aerospace Control Center, Beijing 100094

Abstract Based on an OASIS3 (Ocean Atmosphere Sea Ice Soil version 3) coupler, a regional air–sea coupled model is developed by coupling the regional climate model RegCM3 (Regional Climate Model version 3) and the ocean model HYCOM (Hybrid Coordinate Ocean Model). The nesting method is used to properly handle the issue of the ocean lateral boundary conditions. A continuous integration of East Asia, including China, is conducted (1982–2001). The focus point is to verify the simulation capability of the summer precipitation (June–August) over China. The simulation results show that the coupled model can reproduce the spatial distribution of the summer precipitation over China. When compared with the uncoupled experiment, the coupled model shows a better performance in simulating the rainfall amount and the interannual variation over the near-sea regions. The coupled model can also capture the distribution of the first mode of

收稿日期 2012-04-07 收到, 2012-06-29 收到修定稿

资助项目 国家重点基础研究发展计划项目 2010CB951901, 国家高技术研究发展计划项目 2010AA012401, 国家海洋公益性行业科研专项 201105019

作者简介 李涛, 男, 1981 年出生, 博士, 助研, 主要从事区域气候模式及风暴潮预警技术研究。E-mail: litao@nmefc.gov.cn

observation with the empirical orthogonal function (EOF) and the corresponding time correlation with the observational EOF1 (the first EOF mode) is enhanced when compared to the uncoupled model. Moreover, combined analysis of the first six modes indicates that there is further improvement for the large temporal scale climate component of the summer precipitation over the mid-low valley of the Yangtze River, Shandong Peninsula, and the Hainan Island after coupling.

Keywords Regional, Coupled model, Summer precipitation, OASIS3 coupler

1 引言

中国是世界上受季风气候影响最典型的地区之一,东亚季风系统的年际及年代际变化对中国降水的时空变化特征有重要影响,其中尤以对降水量占主导的夏季降水最为显著(张庆云等, 2003; 吕俊梅等, 2004; 黄荣辉等, 2008)。夏季降水多少引发的洪涝、干旱等灾害每年都会给中国造成严重的损失,所以能够准确模拟中国夏季降水的时空变化,进而预估未来夏季降水的变化趋势将对防灾减灾工作具有重要意义。

中国夏季降水受诸多因子影响,包括不同的时空尺度,而由于各种影响因子之间相互作用过程复杂,因此给利用模式进行模拟和预测带来了一定的难度。当前的大气环流模式在海温的驱动下,对东亚—西北太平洋季风区降水的模拟能力很低,因此,合理模拟季风区降水需要发展海气耦合模式(Zhou et al., 2009)。而通过对 IPCC AR4 中使用的 22 个全球尺度的海气耦合模式的模拟进行检验后发现其中只有 9 个可以对东亚尤其是中国地区降水的气候平均态、年代际和年际尺度信号等有较好的模拟能力,但同时也存在模拟的降水季节进程较差、部分地区降水量偏低、小雨日数较多、大雨日数偏少等诸多问题(张莉, 2008)。作为全球尺度模式的补充,通过动力降尺度方法发展出的区域气候模式(Giorgi and Bates, 1989)从其发展之初就致力于改善区域降水的模拟与预测,许多的研究(Gao et al., 2001; 许吟隆等, 2005; 张冬峰等, 2005a, 2005b; 高学杰等, 2006; 赵得明等, 2009; 石英等, 2010; 杨红龙等, 2010)都检验评估了区域气候模式对东亚及我国夏季降水的模拟与预测能力。

近些年来考虑海气相互作用的区域海气耦合模式也正逐渐地被用来对东亚季风区尤其是中国夏季降水进行模拟研究,已有的研究(Ren and Qian, 2005; 姚素香和张耀存, 2008)表明,区域海气耦合模式对中国夏季降水的模拟要比单独的

大气模式存在一定程度的改善。但也应该发现,他们的研究成果均不是基于长时间连续海气相互作用下的试验积分结果,而潜在的气候漂移风险将可能影响区域海气耦合模式模拟中国夏季降水的能力。为此,本文以 OASIS3 (Ocean Atmosphere Sea Ice Soil version 3) 为结构框架,将区域气候模式 RegCM3 (Regional Climate Model version 3) 与海洋模式 HYCOM (Hybrid Coordinate Ocean Model) 耦合,并利用模式嵌套来处理海洋模式的侧边界问题,从而建立了一个区域海气耦合模式。该耦合模式在通量订正下的模拟能力详见 Li and Zhou (2010),本文则主要检验和评估在无通量订正、长期连续积分情况下该耦合模式对中国夏季降水的气候态、年际变率及空间模态的模拟性能。

2 模式及资料介绍

2.1 模式构成

以耦合器为结构框架的气候系统模式是目前耦合模式的主流技术发展方向(周天军等, 2004),因此本文中也使用 OASIS3 耦合器来控制子模式在耦合时所发生的表面通量交换。该耦合器是由“欧洲计算科学研究和高级培训中心”(CERFACS)研制开发,具有较高的可移植性和灵活性,可以确保不同子模式间通量交换时的总质量和总能量守恒。

区域海气耦合模式的大气分量为区域气候模式 RegCM3 (Pal et al., 2007),该模式为可压的、静力平衡的有限差分模式,垂直方向上采用 σ 坐标。该版本包括改进的大尺度云和降水参数化方案(Pal et al., 2000),从而可以包含次网格尺度云的变化,采用新的海表通量参数化方案等(Zeng et al., 1998),增加了如 Emanuel (1991) 等的对流参数化方案,使用美国大气研究中心耦合的全球海气模式(NCAR CCSM3)辐射方案(Kiehl et al., 1996)、BATS1e (Biosphere-Atmosphere Transfer Scheme version 1e) 陆面过程(Dickinson et al., 1986)、Holtslag 行星边界层方案(Holtslag et al., 1990)以及基于 Arakawa-Schubert 闭合假设的 Grell 积云对

流参数化方案 (Grell, 1993)。该模式目前已被广泛地应用于区域气候模拟及预测的研究当中, 已开展的研究 (张冬峰等, 2005a, 2005b; 高学杰等, 2007) 表明该模式对东亚以及我国区域的气候具有较好的模拟能力。

海洋模式选用了挪威南森环境遥感中心 (NERSC) 改进后的混合坐标海洋模式 HYCOM (Bleck, 2002), 具体改动包括: 水平网格的选取方法, 潮汐模块、生态模块以及海冰模块的添加, 以及最为重要的模式单向嵌套方面的处理。从而使得 HYCOM 模式适用于浅海、非层化稳定海域以及深海等区域的海洋状况模拟。

2.2 资料

单独的大气模式 RegCM3 的海表温度条件由美国海洋大气局 (NOAA) 的 1° (纬度) $\times 1^\circ$ (经度) 周平均最优插值海温分析数据 (OISST) (Reynolds et al., 2002) 提供; 耦合前后的初始场和侧边界条件均由欧洲中期天气预报中心的 2.5° (纬度) $\times 2.5^\circ$ (经度) 再分析资料 ERA-40 (Uppala et al., 2005) 提供。此外, ERA-40 还提供 HYCOM 模式的海表边界条件, 而 HYCOM 模式在气候态运行所需的边界强迫则取自美国海军 GDEM (Generalized Digital Environmental Model) 模式 (Teague et al., 1990) 输出结果。用于和模拟结果对比的降水资料则是 Xie et al. (2007) 所整理的东亚陆面逐日降水格点资料。

3 试验设计

区域海气耦合模式中的大气模式模拟区域为 ($10^\circ\text{N}\sim 50^\circ\text{N}$, $70^\circ\text{E}\sim 150^\circ\text{E}$) (图 1 方框区域), 采用墨卡托投影, 水平分辨率为 60 km, 垂向为非均匀的 18 层, 顶层气压 10 hPa, 侧边界采用指数松弛方案, 选用 Grell 积云对流方案。海洋模式和大气模式模拟区域和投影方式一致, 但分辨率提高至 33 km, 垂向分为 22 层; 同时, 为了克服区域海洋模拟时海洋观测资料以及再分析资料的不足, 将海洋模式作为内模式, 单向嵌套进一个范围更大 ($50^\circ\text{S}\sim 60^\circ\text{N}$, $30^\circ\text{E}\sim 290^\circ\text{E}$)、分辨率粗 0.75° (纬度) $\times 0.75^\circ$ (经度)、垂向分层和内模式一样的外模式中 (图 1), 由其提供内模式所需的海洋侧边界。该嵌套的最大特点是海洋模式中的正压和斜压过程分别进行考虑 (<http://hycom.org/attachments/>

067_boundary.pdf [2012-04-07]), 并通过在内模式边界处的一个有限长度的缓冲区域内 (本文设置为 12 个格点) 进行。

整个耦合过程采用在 OASIS3 耦合器控制下的通量耦合方案, 耦合频次为每 6 h 交换一次。大气模式将模拟得到的风应力和热量通量输送给海洋模式, 同时得到海洋模式模拟的海表温度 (SST), 交换过程中没有进行任何的通量订正。同时, 海洋模式的侧边界由外模式积分结果来提供逐日变化的海温、盐度、海流和界面压强强迫, 大气模式则是由 ERA-40 再分析资料提供。此外, 由于模拟区域所包含的阿拉伯海区域已完全受外模式侧边界影响, 为简便起见, 在耦合过程中在海洋模式中将其设置为陆地, 其海表温度和单独的大气模式一样由 OISST 提供。在上述设置下, 将区域海气耦合模式以及单独的大气模式从 1982 年一直连续积分到 2001 年, 共 20 年, 分别定义为耦合试验 (简称 CPL) 和参照试验 (简称 CTL), 这其中海洋模式的初始场和侧边界条件以及旋转加强过程可参见 Li and Zhou (2010)。

4 模拟结果分析

耦合模式在运行之初均有一个自我调整适应过程, 故不分析耦合模式的第 1 年 (1982 年) 输出模拟结果, 下面的对中国夏季降水能力的评估分析均是基于后 19 年积分 (1983~2001 年) 的结果。

4.1 基本气候态

图 2 为观测、参照试验以及耦合试验模拟的中国区域 1983~2001 年平均的夏季降水, 观测 (图 2a) 表明, 降水大值区主要位于中国的南部及东部地区, 等雨量线大体呈西南—东北走向, 耦合试验 (图 2c) 也能较好地模拟出中国夏季降水这一空间分布特征, 但和观测相比还存在明显误差, 在观测降水较多的两广大部、四川盆地以及台湾岛中南部等地区模拟的降水量偏高于观测, 如模拟的四川盆地的降水中心强度超过 1000 mm, 比观测偏多可以达到 250 mm 以上; 此外, 观测降水相对少的东北地区以及干旱但地形较陡的西北部分地区模拟的增水也偏强, 和观测存在一定的差距。不过, 这些误差在参照试验 (图 2b) 也均可以发现, 因此耦合模式对夏季降水气候平均态的模拟误差主要是由于大气模式分量本身缺陷引起。尽管如此, 耦合模

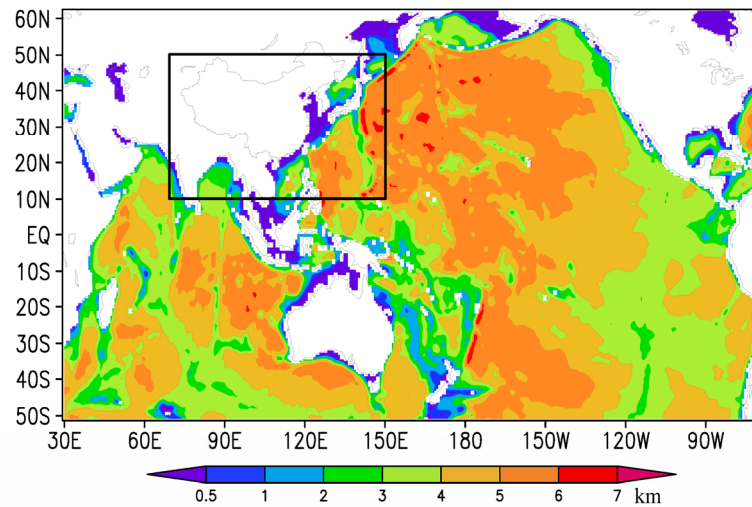


图1 模拟区域和海洋模式地形设置 (图内方框为耦合模式及单独大气模式的模拟区域, 整个区域为海洋外模式模拟区域)

Fig. 1 Model domain and topography of the ocean model (the square frame depicts the simulation area of the couple model and the atmospheric model alone, the whole region depicts the simulation area of the outer ocean model)

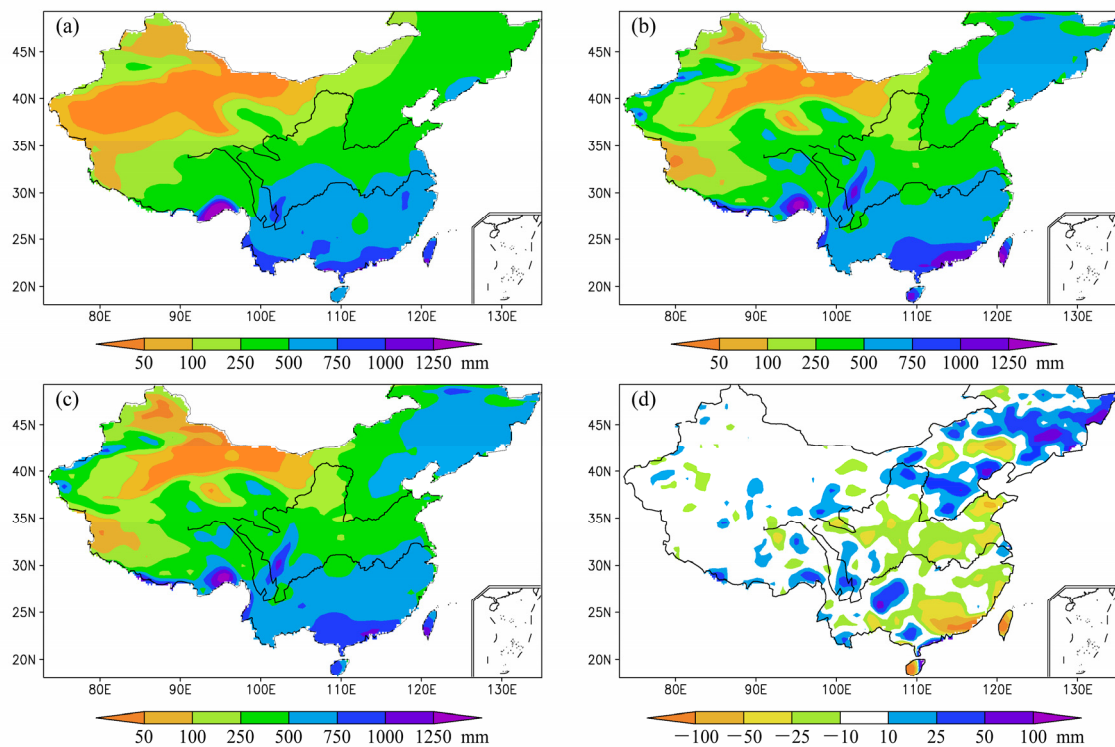


图2 中国区域 1983~2001 年夏季平均 (a) 观测、(b) 参照试验、(c) 耦合试验降水以及 (d) 耦合试验与观测的均方根误差减去参照试验与观测的均方根误差

Fig. 2 Mean summer (a) observation, (b) CTL (control run), and (c) CPL (coupling run) precipitation in China during 1983–2001 and (d) the difference between the root-mean-square errors of CPL and CTL from observations

式相比于参照试验还是存在一定程度的改善 (图 2d), 在中国东部沿海大部分地区耦合模式与观测的均方根误差明显小于参照试验, 尤其是中国华南、江淮流域、山东半岛以及海南岛中西部和台湾岛等地区, 多年平均夏季降水量改善超过 50 mm,

约占多年平均夏季降水量的 10%; 但同时东北中东部及中国西南部分地区的模拟效果变差。耦合前后的差异初步表明海气相互作用对沿海地区的降水量影响较显著, 对远离海洋的内陆少雨地区则因平均降水量较少而差异不明显, 也证明了区域模式在

中国夏季降水模拟中考虑海气之间反馈的重要性。

4.2 年际变化

东亚夏季降水显著的年际变化也是造成我国夏季灾害频发的一个主要原因。本文用变异系数来表征夏季降水的年际变率, 即

$$C_v = \frac{\sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (p_i - \bar{p})^2}}{\bar{p}} \times 100\%, \quad (1)$$

其中, p_i 为第 i 年的夏季降水, $\bar{p}$ 为 N 年平均的夏季降水, $N=19$, C_v 即为夏季降水的变异系数。图 3 给出观测与模拟的夏季降水变异系数的空间分布, 变异系数的大小对应于各自的年际变率程度。从观测分析可以看到 (图 3a), 夏季降水年际变率较小的地区为青藏高原中东部、中国西南和中国东北的东部, 变率较大的地区则主要集中于青藏高原西南及西北地区, 观测降水较多的华南地区降水年际变率幅度在 20%~40%。耦合试验 (图 3c) 和参照试验 (图 3b) 均可以基本模拟出观测夏季降水年际变率的空间分布特征, 和观测的最大偏差是模拟中国西北北部地区的降水年际变率明显偏强, 观测的年际变率在 20%~40%, 而两个试验模拟的变率基本上超过 40%, 中心变率超过 80%。尽管耦合试验和参照试验在华南沿海地区以及变率较大的西北北部等区域之间存在差别, 但总体而言, 两个试验之间模拟的降水年际变率差别不明显。

进一步分析模拟与观测降水距平相关可以发现, 耦合试验 (图 4b) 模拟的降水与观测在中国绝大部分地区以正相关为主, 在降水较多的区域中, 长江中下游、山东半岛和海南岛这 3 个地区表现最突出, 可以通过 95% 的信度检验。和耦合试验相比, 参照试验 (图 4a) 虽在长江中下游地区和观测降水的相关性可以通过 95% 的显著性检验, 但相关性明显要低于耦合试验 (图 4c); 而对于山东半岛和海南岛这两个地区, 参照试验模拟的夏季降水与观测之间的相关性普遍低于 0.4, 没有通过 95% 的信度检验, 模拟能力明显弱于耦合试验。上述分析表明, 尽管耦合前后降水变异系数变化不大, 但在长江中下游、山东半岛和海南岛等区域, 耦合试验模拟的夏季降水与观测降水的相关性得到明显提高, 耦合模式模拟的夏季降水年际变化优于单独的大气模式, 和观测更为接近。

4.3 模态分析

模式对中国夏季降水年际变率主要空间分布

特征的模拟能力也是验证模式模拟性能的一个重要方面。研究表明 (张莉, 2008) 全球海气耦合模式中只有小部分可以模拟出东亚夏季降水的部分主要模态, 且正、负位相的位置和强度与观测相比存在一定偏差; 而 Shi et al. (2009) 的研究显示高分辨率的区域气候模式对中国东部夏季降水主要类型有一定的模拟能力。这里本文也采用经验正交函数 (EOF) 分解方法对观测和模拟的中国夏季降

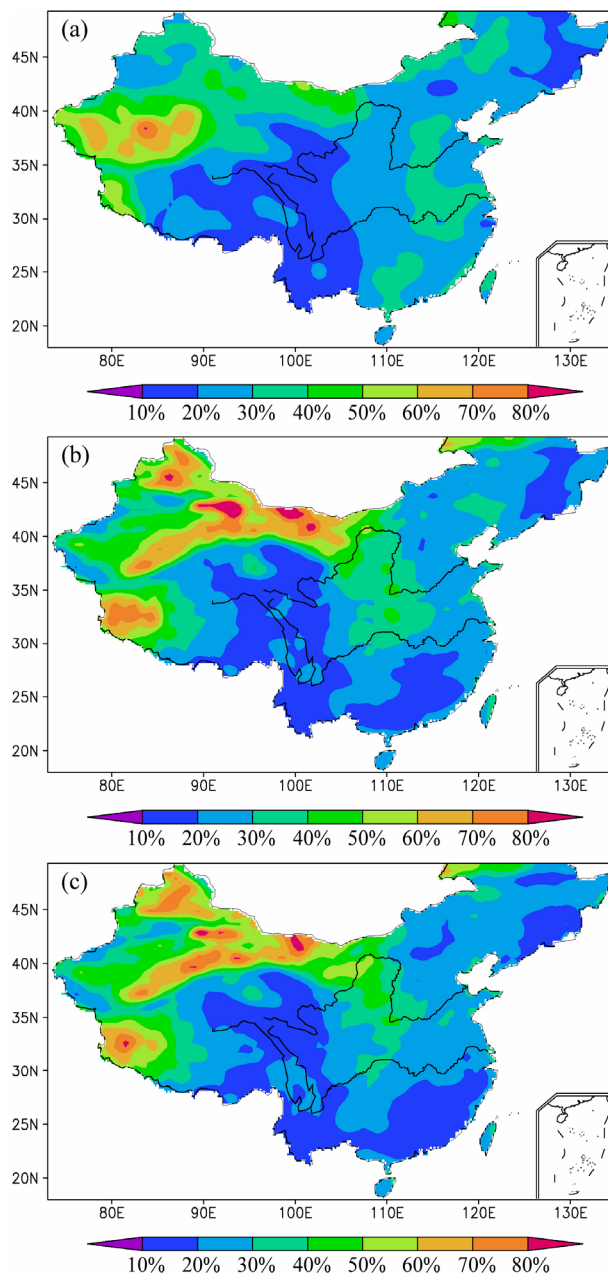


图 3 中国区域 1983~2001 年夏季降水的年际变率 (变异系数): (a) 观测; (b) 参照试验; (c) 耦合试验

Fig. 3 Interannual variability (coefficient of variation) of summer precipitation in China during 1983–2001: (a) Observation; (b) CTL; (c) CPL

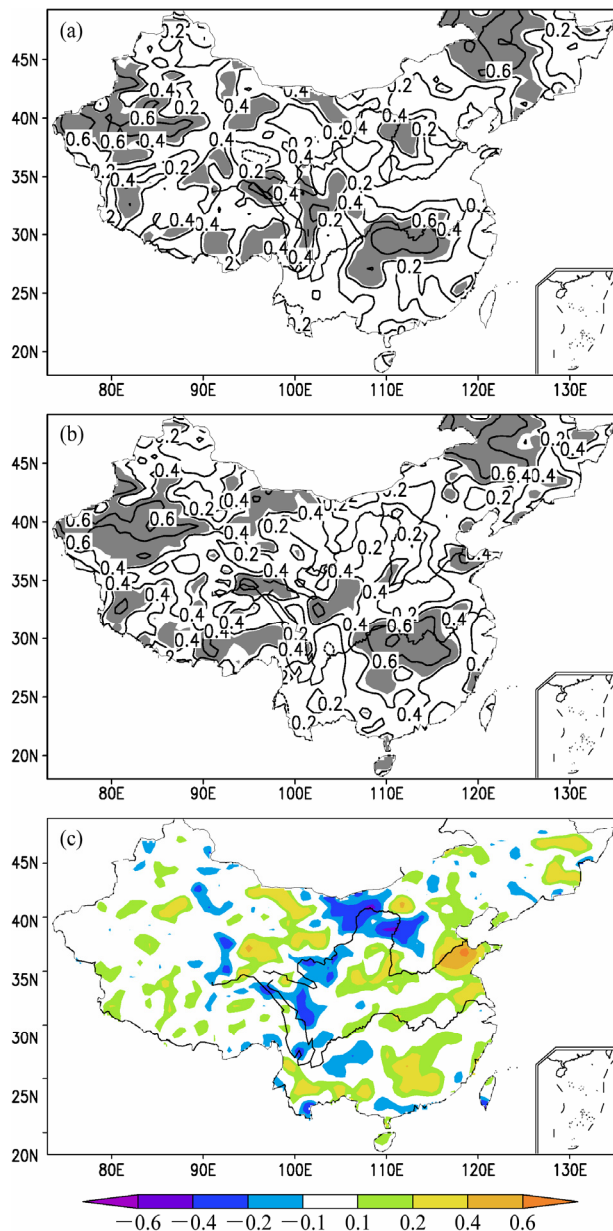


图4 中国区域 1983~2001 年夏季模拟与观测降水距平的时间相关:(a) 参照试验;(b) 耦合试验;(c) 耦合试验减去参照试验。(a)、(b) 中阴影区表示通过 95 % 的信度检验

Fig. 4 The time-dependent correlation of summer anomaly precipitation in China during 1983–2001 between the simulation and observation: (a) CTL; (b) CPL; (c) the difference between CPL and CTL. Shaded regions in (a, b) are above 95% confidence level

水距平场进行展开,以了解区域海气耦合模式模拟中国夏季降水主要分布特征能力。

考察 EOF 分解后的方差贡献率可以发现,观测、参照试验和耦合试验的夏季降水 EOF 第一模态 (EOF1) 方差贡献率分别为 23.1%、20.3%和 18.7%,耦合试验解释夏季降水 EOF1 的贡献率偏低。观测的中国夏季降水 EOF1 的空间分布如图 5a

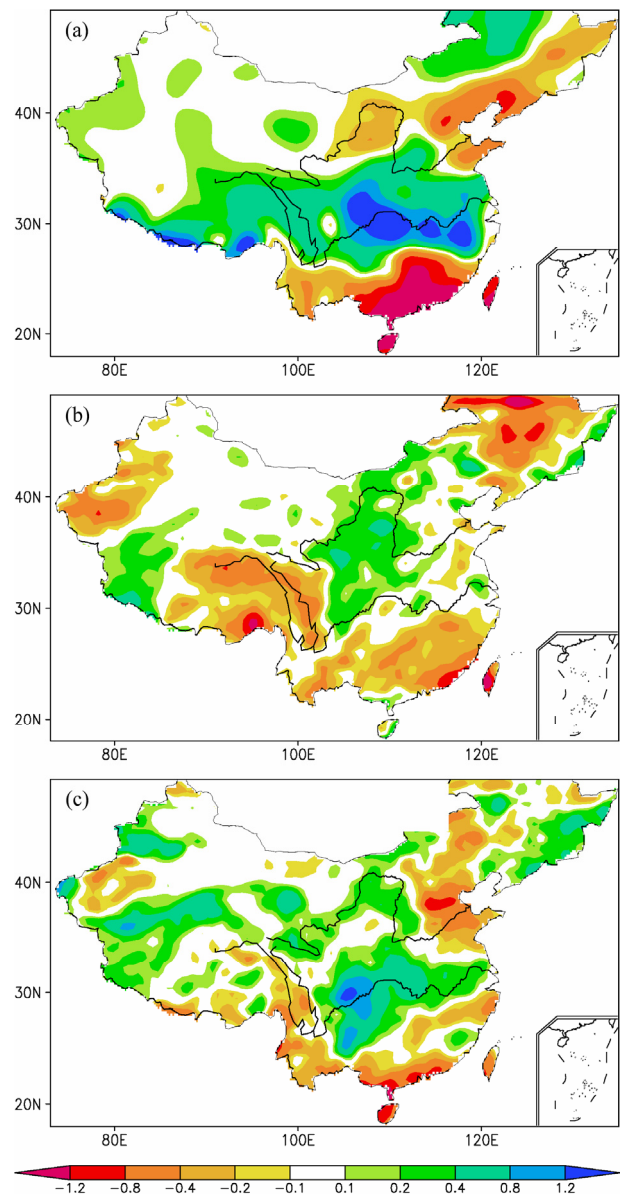


图5 中国区域 1983~2001 年夏季降水 EOF 第一模态:(a) 观测;(b) 参照试验;(c) 耦合试验

Fig. 5 The first EOF mode (EOF1) of summer precipitation in China during 1983–2001: (a) Observation; (b) CTL; (c) CPL

所示,最强的正距平位于长江中下游地区,而最大的负距平位于华南地区,说明雨带中心位于江淮流域,是中国夏季降水的 3 种典型分布之一(王绍武等, 1998)。对比模式模拟和观测可以发现,参照试验(图 5b)模拟的 EOF1 空间分布主要表现为长江以南和以北的反位相关系,和观测降水 EOF1 的空间分布特征存在明显的差别;而耦合试验(图 5c)却可以很好再现观测降水 EOF1 的空间分布特征,只是正负位相强度和观测还存在一定偏差。

与 EOF1 的空间分布相对应,图 6 也给出相应

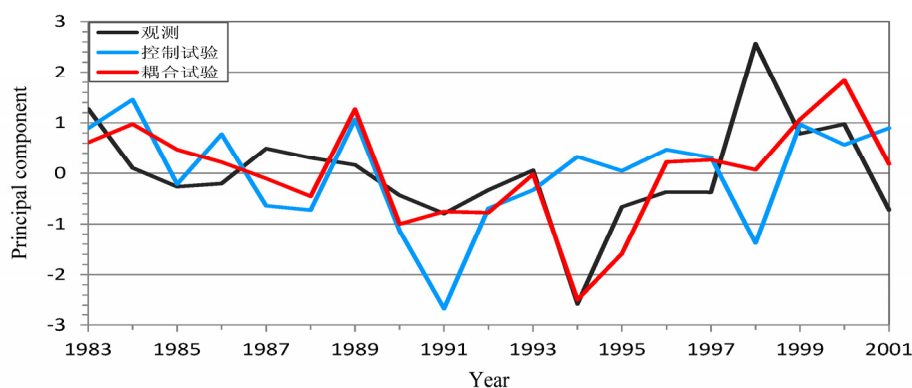


图6 中国夏季降水 EOF1 对应的标准化时间序列

Fig. 6 The normalized principal component (PC) of summer precipitation anomalies corresponding to EOF1 in China

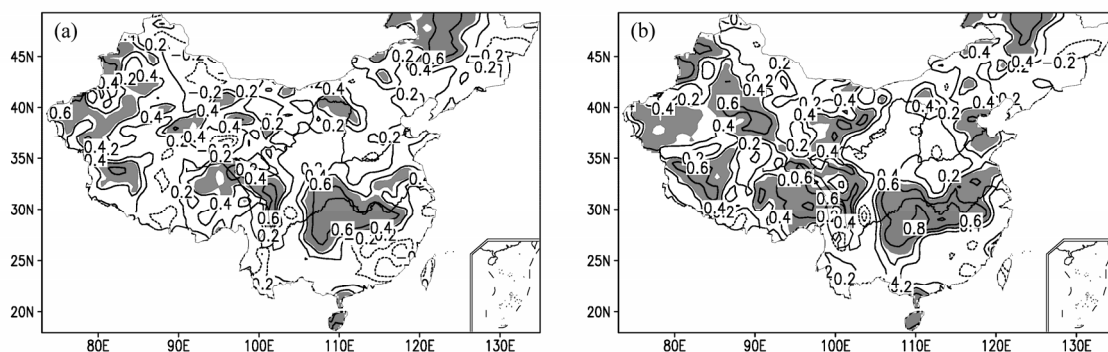


图7 中国区域 1983~2001 年模拟与观测夏季降水 EOF 前 6 个模态组合后的时间相关 (阴影区域为通过 95% 的信度检验): (a) 参照试验; (b) 耦合试验

Fig. 7 The correlation between the simulation and observation of the combination of the first six EOF modes in China during 1983–2001: (a) CTL; (b) CPL. Shaded regions are above 95% confidence level

标准化后的时间序列 PC1。观测 PC1 序列大于 2 个标准差的降水典型年份共有两年, 分别为 1994 年和 1998 年。结合观测降水 EOF1 的空间分布 (图 5a) 可知, 华南地区在 1994 年遭受了特大洪涝灾害, 而长江流域干旱少雨 (史学丽和丁一汇, 2000); 与此相反, 1998 年长江流域出现了百年一遇的全流域特大洪水 (赵思雄等, 1998)。对比模拟和观测的 PC1 序列, 耦合试验和参照试验模拟夏季降水的 PC1 序列各有 1 年变化超过 2 个标准差, 但只有耦合试验模拟结果中可以体现出观测的典型年份, 即 1994 年; 参照试验模拟的典型年份则与观测存在较明显偏差。时间相关性分析也可发现, 耦合试验模拟的 PC1 序列与观测的相关性较高, 为 0.63, 参照试验为 -0.02。上述结果表明, 无论是从 EOF1 空间分布还是其对应的时间序列, 耦合模式对 EOF1 都存在较明显改善。

除 EOF1 外, 观测夏季降水的 EOF2–EOF5 的方差贡献率均超过 5.0%, 累积方差贡献率为 68.9%, 参照试验和耦合试验则分别为 62.8% 和 60.9%, 说

明中国夏季大尺度降水场的变化主要集中在这 6 个模态中。尽管耦合试验模拟的 EOF2–EOF5 (图略) 的模态主次, 正、负位相位置、强度与观测存在一定的偏差, 但可以通过组合来反映夏季降水的主要特征。图 7 给出了组合后的模拟与观测相关系数, 可以发现: 耦合后, 除长江中下游、山东半岛和海南岛外, 耦合试验 (图 7b) 模拟的降水组合场在降水量大的青藏高原东南部和观测降水组合场的相关性也明显高于参照试验 (图 7a), 可以通过 95% 的信度检验。和组合前 (图 4b) 相比, 在这些显著相关区域, 耦合试验的降水组合场与观测的相关性均有一定程度的提高, 表明耦合试验对中国夏季降水的较大时间尺度气候分量的模拟存在更为明显的改善。

5 结论与讨论

耦合模式可以基本模拟出中国区域夏季降水的气候平均态空间分布特征, 模拟的多雨区主要位

于中国南部和东部,少雨区则主要位于西北地区;和观测的主要误差还是由于单独大气模式本身缺陷引起,但耦合后,对靠近海洋的中国沿海地区,模拟的降水量值和年际变化比单独大气模式存在一定程度的改善,和观测更为接近。

进一步对模拟降水进行 EOF 分析表明,耦合模式可以较好地模拟出观测夏季降水 EOF1 的空间分布特征,对于观测降水 EOF1 中的典型年份也有较高的模拟能力,能够体现 1994 年这一华南少雨典型年份,与观测降水 EOF1 的时间相关性优于参照试验;此外,降水前 6 个模态的组合分析表明,耦合模式对长江中下游、山东半岛、海南岛等区域夏季降水的较大时间尺度气候分量的模拟能力显著增强。

综上所述,在无通量订正的情况下,区域海气耦合模式也基本可以模拟出中国夏季降水的空间分布及时间变化特征,较单独的大气模式有一定的改进,具有一定的优势。耦合模式模拟降水的改善得益于通过增加海气间的反馈提高了模式对夏季西太平洋副热带高压模拟能力,从而增强了中低纬大气中水汽输送的模拟能力以及降水和 SST 的关系 (Li and Zhou, 2010)。在下一步的工作中,将利用模拟结果对其他季节以及海上区域降水等方面进行更加详尽的分析,从中更加全面的分析该耦合模式的性能。

参考文献 (References)

- Bleck R. 2002. An oceanic general circulation model framed in hybrid isopycnic-cartesian coordinates [J]. *Ocean Modelling*, 4: 55–88.
- Dickinson R E, Kennedy P J, Henderson-Sellers A, et al. 1986. Biosphere-atmosphere transfer scheme (BATS) for the NCAR community climate model [R]. NCAR Tech. Note, NCAR/TN-275+STR, 69.
- Emanuel K A. 1991. A scheme for representing cumulus convection in large-scale models [J]. *J. Atmos. Sci.*, 48: 2313–2335.
- 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]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 18: 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: 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: 185–192.
- 高学杰, 张冬峰, 陈仲新. 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: 397–404. Gao Xuejie, Zhang Dongfeng, Chen Zhongxin. 2007. Land use effects on climate in China as simulated by a regional climate model [J]. *Science in China (Ser. D)*, 50: 620–628.
- Giorgi F, Bates G T. 1989. The climatological skill of a regional model over complex terrain [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 117: 2325–2347.
- Grell G A. 1993. Prognostic evaluation of assumptions used by cumulus parameterizations [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 121: 764–787.
- Holtslag A A M, Bruijn E I F, Pan H L. 1990. A high resolution air mass transformation model for short-range weather forecasting [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 118: 1561–1575.
- 黄荣辉, 顾雷, 陈际龙, 等. 2008. 东亚季风系统的时空变化及其对我国气候异常影响的最近研究进展 [J]. *大气科学*, 32: 691–719. Huang Ronghui, Gu Lei, Chen Jilong, et al. 2008. Recent progresses in studies of the temporal-spatial variations of the East Asian monsoon system and their impacts on climate anomalies in China [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 32: 691–719.
- Kiehl J, Hack J, Bonan G, et al. 1996. Description of the NCAR community climate model (CCM3) [R]. NCAR Tech. Note, NCAR/TN-420+STR, 152.
- Li T, Zhou G Q. 2010. Preliminary results of a regional air-sea coupled model over East Asia [J]. *Chinese Science Bulletin*, 55: 2295–2305.
- 吕俊梅, 任菊章, 据建华. 2004. 东亚夏季风的年代际变化对中国降水的影响 [J]. *热带气象学报*, 20: 73–80. Lü Junmei, Ren Juzhang, Ju Jianhua. 2004. The interdecadal variability of East Asia monsoon and its effect on the rainfall over China [J]. *Journal of Tropical Meteorology (in Chinese)*, 20: 73–80.
- Pal J S, Small E E, Eltahir E A B. 2000. Simulation of regional-scale water and energy budgets: Representation of subgrid cloud and precipitation processes within RegCM [J]. *J. Geophys. Res.*, 105: 29579–29594.
- Pal J S, Giorgi F, Bi X Q, et al. 2007. The ICTP RegCM3 and RegCNET: Regional climate modeling for the developing world [J]. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 88: 1395–1409.
- Reynolds R W, Rayner N A, Smith T M, et al. 2002. An improved in situ and satellite SST analysis for climate [J]. *J. Climate*, 15: 1609–1625.
- Ren X J, Qian Y F. 2005. A coupled regional air-sea model, its performance and climate drift in simulation of the East Asia summer monsoon in 1998 [J]. *International Journal of Climatology*, 25: 679–692.
- 史学丽, 丁一汇. 2000. 1994 年中国华南大范围暴雨过程的形成与夏季风活动的研究 [J]. *气象学报*, 58: 666–678. Shi Xueli, Ding Yihui. 2000. A study on extensive heavy rain processes in South China and the summer monsoon activity in 1994 [J]. *Acta Meteorologica Sinica (in Chinese)*, 58: 666–678.
- Shi Y, Gao X J, Wang Y G, et al. 2009. Simulation and projection of monsoon rainfall and rain patterns over eastern China under global warming by RegCM3 [J]. *Atmospheric and Oceanic Science Letters*, 2: 308–313.
- 石英, 高学杰, Giorgi F, 等. 2010. 全球变暖背景下中国区域不同强度降水事件变化的高分辨率数值模拟 [J]. *气候变化研究进展*, 6: 164–169. Shi Ying, Gao Xuejie, Giorgi F, et al. 2010. High resolution simulation of changes in different-intensity precipitation events over China under global warming [J]. *Advances in Climate Change Research (in Chinese)*, 6: 164–169.
- Teague W J, Carron M J, Hogan P J. 1990. A comparison between the

- generalized digital environmental model and Levitus climatologies [J]. *J. Geophys. Res.*, 95: 7167–7183.
- Uppala S M, Kållberg P W, Simmons A J, et al. 2005. The ERA-40 re-analysis [J]. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 131: 2961–3012.
- 王绍武, 叶瑾琳, 龚道溢, 等. 1998. 中国东部夏季降水型的研究 [J]. *应用气象学报*, 9: 65–74. Wang Shaowu, Ye Jinlin, Gong Daoyi, et al. 1998. Study on the patterns of summer rainfall in eastern China [J]. *Quarterly Journal of Applied Meteorology (in Chinese)*, 9: 65–74.
- Xie P P, Yatagai A, Chen M Y, et al. 2007. A gauge-based analysis of daily precipitation over East Asia [J]. *J. Hydrol.*, 8: 607–626.
- 许吟隆, 黄晓莹, 张勇, 等. 2005. 中国 21 世纪气候变化情景的统计分析 [J]. *气候变化研究进展*, 1: 80–83. Xu Yinglong, Huang Xiaoying, Zhang Yong, et al. 2005. Statistical analyses of climate change scenarios over China in the 21st century [J]. *Advances in Climate Change Research (in Chinese)*, 1: 80–83.
- 姚素香, 张耀存. 2008. 区域海气耦合模式对中国夏季降水的模拟 [J]. *气象学报*, 66: 131–142. Yao Suxiang, Zhang Yaocun. 2008. Simulation of China summer precipitation with a regional air–sea coupled model [J]. *Acta Meteorologica Sinica (in Chinese)*, 66: 131–142.
- 杨红龙, 许吟隆, 张镭, 等. 2010. SRES A2 情景下中国区域 21 世纪末平均和极端气候变化的模拟 [J]. *气候变化研究进展*, 6: 157–163. Yang Honglong, Xu Yinglong, Zhang Lei, et al. 2010. Projected change in mean and extreme climate over China in the late 21st century from PRECIS under SRES A2 scenario [J]. *Advances in Climate Change Research (in Chinese)*, 6: 157–163.
- Zeng X B, Zhao M, Dickinson R E. 1998. Intercomparison of bulk aerodynamic algorithms for the computation of sea surface fluxes using TOGA COARE and Tao data [J]. *J. Climate*, 11: 2628–2644.
- 张冬峰, 高学杰, 白虎志, 等. 2005a. RegCM3 模式对青藏高原地区气候的模拟 [J]. *高原气象*, 24: 714–720. Zhang Dongfeng, Gao Xuejie, Bai Huzhi, et al. 2005a. Simulation of climate over Qinghai–Xizang Plateau utilizing RegCM3 [J]. *Plateau Meteorology (in Chinese)*, 24: 714–720.
- 张冬峰, 高学杰, 赵宗慈, 等. 2005b. RegCM3 区域气候模式对中国气候的模拟 [J]. *气候变化研究进展*, 1: 119–121. Zhang Dongfeng, Gao Xuejie, Zhao Zongci, et al. 2005b. Simulation of climate in China by RegCM3 model [J]. *Advances in Climate Change Research (in Chinese)*, 1: 119–121.
- 张莉. 2008. 全球海气耦合模式对东亚降水模拟的检验 [D]. 中国气象科学研究院博士学位论文, 226pp. Zhang Li. 2008. Evaluation of AOGCMs for precipitation in East Asia [D]. Ph. D. dissertation (in Chinese), Chinese Academy of Meteorology Sciences, 226pp.
- 张庆云, 陶诗言, 张顺利. 2003. 夏季长江流域暴雨洪涝灾害的天气气候条件 [J]. *大气科学*, 27: 1018–1030. Zhang Qingyun, Tao Shiyan, Zhang Shunli. 2003. The persistent heavy rainfall over the Yangtze River valley and its associations with the circulation over East Asia during summer [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 27: 1018–1030.
- 赵得明, 符宗斌, 延晓冬. 2009. 区域环境集成模拟系统 RIEMS2.0 对中国多年降水和气温模拟能力分析 [J]. *科学通报*, 54: 2379–2387. Zhao Deming, Fu Congbin, Yao 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 (in Chinese)*, 54: 3101–3111.
- 赵思雄, 孙建华, 陈红, 等. 1998. 1998 年 7 月长江流域特大洪水期间暴雨特征的分析研究 [J]. *气候与环境研究*, 3: 368–381. Zhao Sixiong, Sun Jianhua, Chen Hong, et al. 1998. Study of heavy rainfall in the Changjiang River during July 1998 [J]. *Climatic and Environmental Research (in Chinese)*, 3: 368–381.
- 周天军, 俞永强, 宇如聪, 等. 2004. 气候系统模式发展中的耦合器研制问题 [J]. *大气科学*, 28: 993–1008. Zhou Tianjun, Yu Yongqiang, Yu Rucong, et al. 2004. Coupled climate system model coupler review [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 28: 993–1008.
- Zhou T J, Wu B, Wang B. 2009. How well do atmospheric general circulation models capture the leading modes of the interannual variability of the Asian Australian monsoon? [J]. *J. Climate*, 22: 1159–1173.