

房永杰, 张耀存. 2011. 区域海气耦合过程对中国东部夏季降水模拟的影响 [J]. 大气科学, 35 (1): 16–28. Fang Yongjie, Zhang Yaocun. 2011. Impacts of regional air–sea coupling on the simulation of summer precipitation over eastern China in the RIEMS model [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 35 (1): 16–28.

区域海气耦合过程对中国东部 夏季降水模拟的影响

房永杰 张耀存

南京大学大气科学学院, 南京 210093

摘 要 本文以区域环境系统集成模式 (RIEMS) 和普林斯顿海洋模式 (POM) 为基础, 建立了一个区域海气耦合模式, 评估了其对 1985~2004 年中国东部夏季降水的模拟性能, 并通过与观测海温强迫下单独大气模式模拟结果的比较, 分析了海气耦合过程对降水模拟性能的影响。结果表明: 耦合模式基本能够模拟出中国东部地区夏季降水的气候态分布及中国主要雨带的季节性进退, 模拟的降水在空间分布和强度上较单独大气模式都更为合理, 对华北和华南地区降水的模拟改进尤为明显。耦合模式能够较好地模拟出 1985~2004 年中国东部地区夏季降水主要的时空变化特征, 模拟的华北、长江中下游以及华南地区夏季降水与观测的相关系数均高于单独大气模式。相比于单独大气模式, 耦合海洋模式之后海洋—大气反馈过程改善了模式对海洋—大气界面热通量的模拟, 使模拟的东亚地区海陆热力差异与 NCEP/NCAR 再分析资料结果更为一致, 由此提高了耦合模式对低层风场以及水汽输送的模拟能力, 从而改善了模式对中国东部地区降水的模拟。

关键词 区域海气耦合模式 降水 海气相互作用 海陆热力差异

文章编号 1006–9895 (2011) 01–0016–13

中图分类号 P461

文献标识码 A

Impacts of Regional Air–Sea Coupling on the Simulation of Summer Precipitation over Eastern China in the RIEMS Model

FANG Yongjie and ZHANG Yaocun

School of Atmospheric Sciences, Nanjing University, Nanjing 210093

Abstract A regional air–sea coupled model is developed, which consists of the Regional Integrated Environment Model System (RIEMS) and the revised Princeton Ocean Model (POM). Compared with the uncoupled model results and the observations, the role of air–sea interactions in the simulation of summer precipitation in eastern China from 1985 to 2004 is investigated. The results show that the regional air–sea coupled model has a good performance on simulating the mean summer precipitation and the seasonal evolution of the summer rainbelt, and the distribution and intensity of the rainband in the coupled model are more reasonable than those in uncoupled model RIEMS. The improvement of the rainfall simulation is remarkable in North China and South China. Moreover, the coupled model reproduces well the spatial and temporal distributions of summer rainfall in eastern China from 1985 to 2004. The correlation coefficients between the summer rainfalls derived from the coupled model and the observation over North China, the middle and lower reaches of the Yangtze River and South China are higher than those from uncoupled

model RIEMS and the observation. Compared with the run with RIEMS, the air - sea feedbacks in the coupled model improve the simulation of the sea surface heat flux, resulting in better agreement with the NCEP/NCAR data in the land - sea thermal contrast over eastern Asia. Therefore, the monsoon circulation and the water vapor transport are better simulated, which improves the rainfall simulation in eastern China.

Key words regional air - sea coupled model, precipitation, air - sea interaction, land - sea thermal contrast

1 引言

频繁的旱涝灾害给国家和社会带来巨大的损失, 因此, 区域气候的异常变化成为人们越来越关心的问题。虽然全球模式 (GCMs) 在模拟气候变化方面具有一定能力, 但由于分辨率低而难以捕获区域和局地的气候过程, 尤其对于东亚这个自然条件复杂、人类活动频繁, 同时又有着特殊季风气候的区域, 全球模式还存在很大的不足 (Kang et al., 2002; 符淙斌和苏炳凯, 2004), 因而区域气候模式 (RCMs) 成为区域气候模拟研究的主要方法之一。与 GCMs 相比, 高时空分辨率的 RCMs 不仅可以更好地描述物理过程及参数化方案, 而且可获取更精细的下垫面强迫信息, 从而改进区域与局地大气环流系统以及区域气候特征的模拟 (Giorgi and Bates, 1989; Walsh and McGregor, 1995; Leung et al., 2003; 高学杰等, 2006)。

近年来, 为了发展适合于东亚地区的区域气候模式, 我国学者开展了许多研究工作, 并取得了有意义的结果 (Liu et al., 1996; 成安宁等, 1998; 潘劲松等, 2002; 刘一鸣等, 2005; 冯锦明和符淙斌, 2007), 但仍然存在许多问题和不足, 特别是对降水的模拟普遍存在较大的偏差, 模拟的中国大部分地区降水偏多, 中国东部地区主要雨带偏北 (符淙斌等, 1998; 李巧萍和丁一汇, 2004; 张英娟等, 2005; 冯锦明和符淙斌, 2007)。此外, 以往利用区域气候模式所做的研究工作通常是用观测或再分析的海温作为海洋表面的边界条件, 这种方法只能考虑海洋对大气的影响而未包含大气对海洋的强迫和反馈。有研究表明, 用给定的海温驱动大气模式不能正确描述季风和 ENSO 的关系 (Krishna et al., 2005)。Wang et al. (2005) 曾指出, 东亚季风降水模拟出现偏差的一个重要原因是模式不能合理反映局地海温和降水的关系。Wu and Kirtman (2005) 也发现近海的海气相互作用对大气变率具有很大的影响, 不考虑局地的海气相互作用, 模拟的降水与

海温变率与观测差别较大。由此可见, 发展能够反映局地海气相互作用的区域海气耦合模式是非常必要的。

近年来, 国内外很多学者致力于发展区域海气耦合模式, 并将其应用到局地海气相互作用、降水以及极端气候的模拟等研究中。例如, Aldrian et al. (2005) 把欧洲区域气候模式 REMO 与全球海洋模式 MPI 进行了耦合, 研究了海气相互作用对印度尼西亚降水的的影响。Xie et al. (2007) 发展了一个区域海气耦合模式 ROAM 并将其应用到东太平洋地区, 结果表明, 此模式能较好地模拟出由海洋中尺度结构和地形而引起的海气反馈过程。Ratnam et al. (2008) 在区域气候模式 RegCM3 和区域海洋模式 ROMS 的基础上发展了一个区域海气耦合模式, 发现该模式能较好的模拟出印度季风的主要特征, 相比单独大气模式, 耦合模式模拟的大气季节内振荡也与观测更为接近。国内从 1995 年起就有关于区域海气耦合模式的研究, 最早是将一个由一层大气模式和一层海洋模式的简单区域海气耦合模式用于 1982~1983 年 El Niño 事件的研究 (王志仁等, 1995)。Ren and Qian (2005) 把 POM 与 $p-\sigma$ 混合坐标系原始方程模式进行了耦合, 发现区域海气耦合模式对 1998 年东亚夏季风有较好的模拟能力, 但模拟的海温出现了冷偏差。姚素香和张耀存 (2008) 把区域气候模式 RegCM3 和 POM 进行了耦合, 发现该耦合模式能较好的模拟出中国夏季降水的水平分布、雨带的季节变化以及中国主要降水区降水的年际变化。但以上的研究大多数仅限于个例研究, 模拟积分时间较短, 并且多是针对耦合模式的性能进行评估, 缺乏对降水模拟效果改进原因的分析以及海气耦合过程对降水模拟效果影响的认识。

本文以中国科学院 START (System for Analysis, Research, and Training) 全球变化东亚区域研究中心发展的区域环境集成系统模式 (RIMES) (Fu et al., 2000) 和普林斯顿大学海洋模式 (POM)

为基础,建立了一个区域海气耦合模式,并进行了20年夏季的连续积分。本文的目的在于回答两个问题:首先,模式对1985~2004年中国东部夏季降水的模拟能力如何?第二,海气相互作用过程如何影响夏季降水的模拟性能?前一个问题的回答有利于模式模拟偏差的改进,第二个问题的回答可以丰富我们对海气耦合过程的理解,为进一步改进和发展区海气耦合模式提供科学依据。

2 模式简介与试验设计

2.1 模式简介

本文所用的大气模式分量是中国科学院START全球变化东亚区域研究中心于1998年发展的区域环境集成系统模式(RIMES)。该模式以美国大气研究中心和美国宾夕法尼亚大学发展的中尺度模式(MM5)为动力框架,耦合一些研究气候所需的物理过程方案而成,这些过程包括生物圈—大气圈输送方案BATS(Dickinson et al., 1986)、Grell积云对流参数化方案(Grell, 1993)、Holtzlag行星边界条件(Holtzlag et al., 1990)、修改的CCM3辐射方案等。经过初步检验,该模式能够较好地模拟出东亚区域气候的主要特征(Xiong et al., 2003; 熊喆, 2004; Xiong et al., 2006; 赵得明等, 2009)。

区域海洋模式(POM)是一个由美国普林斯顿大学Blumberg and Mellor(1987)发展的三维原始方程海洋模式,Chu and Chang(1997)、钱永甫等(1998)对该模式进行了改进。改进后的区域海洋模式POM对西太平洋、孟加拉湾和南海等东亚近海海区海温、海流的平均状态和季节变化等具有较好的模拟性能(Zhang and Qian, 1999; 任雪娟和钱永甫, 2000),并且在区域海气相互作用研究中已经得到初步的应用(Ren and Qian, 2005; 姚素香和张耀存, 2008)。

耦合模式中,大气模式与海洋模式均采用Lambert投影,积分区域一致,中心位于(24°N, 121°E),覆盖了东亚大部分地区。大气模式和海洋模式的水平分辨率都为60 km,区域格点数东—西方向为115,南—北方向为98。大气模式垂直方向为非均匀18层,顶层气压为5 hPa,采用线性松弛侧边界方案,缓冲区的大小为10层。海洋模式垂直方向为 σ 坐标,非均匀16层,第一层海洋深度在

40 m以内。在海—气界面上采用通量耦合方案,大气模式传递给海洋模式近地层风速、降水、蒸发、感热通量以及辐射通量等,经过换算得到海洋模式需要的风应力、淡水通量、辐射通量、感热通量以及潜热通量,海洋在大气的动力和热力强迫下调整到一个新的状态,再将海表温度反馈给大气,循环往复,进行耦合。

2.2 耦合方案与试验设计

为获得真实的海洋状态,海洋模式的初始化十分重要(任雪娟和钱永甫, 2000)。本研究中POM的初始化分为两个阶段运行,第一个阶段从静止海洋开始积分,用Levitus(1984)1月份多年平均的温盐资料作初始场,用NCEP/NCAR气候态的风应力和热通量强迫积分一年,得到一个准稳定的气候态海洋;第二个阶段利用第一阶段模式运行后海洋的状态进行热启动,分别采用1985~2004年每年的NCEP/NCAR风应力和热通量驱动海洋,从当年1月1日积分到当年4月25日,将此刻的海况记录下来,作为区域海气耦合模式中的海洋初始场。海洋模式对侧边界采用如下处理方法:海温和盐度由Levitus(1984)分析得到的月平均温度、盐度插值到每一天作为海洋的侧边界条件;由于缺乏海洋环流观测资料,对海流采用辐射边界条件给出开放边界处的流入或流出的海流强迫(吕新刚和沙文钰, 2003)。

利用POM初始化阶段得到的1985~2004年每年的耦合模式海洋初始场,区域海气耦合模式从每年的4月25日开始积分,海洋和大气模式每6小时交换一次变量,积分到当年的8月31日,得到1985~2004年共20年夏季的模拟结果(以RIEMS-POM表示)。耦合模式中大气部分所需的侧边界场和初始场数据取自NCEP/NCAR(2.5°×2.5°)再分析资料II,侧边界资料每6小时更新一次。采用与海洋模式的初始化阶段相同的办法处理耦合模式中海洋部分的侧边界强迫。

为与耦合模式的性能进行对比,本文利用单独大气模式以及单独海洋模式同样对东亚地区以及邻近海区夏季气候进行20年(1985~2004年)的数值模拟,定义为控制试验,分别以CTR-RIEMS和CTR-POM表示。单独大气模式所需海温资料为英国Hadley中心提供的周平均GISST(Global sea-Ice and SST)数据。用于评估模式的降水观测资料

为我国 1985~2004 年 714 个地面观测站的逐日降水资料。此外, 本文还利用了 NCEP/NCAR 再分析的表层热通量、短波辐射以及不同等压面的温度和风场资料。

3 模拟结果分析

3.1 海温的模拟

鉴于海温的变化与大气环流和降水的季节和年际变率关系密切, 我们首先分析了模式对海温的模拟情况。图 1 给出 1985~2004 年 GISST 夏季平均海温分布以及模式模拟结果, 由图可见, 耦合模式以及单独海洋模式都能够较好地模拟夏季海温的空间分布特征, 包括中高纬低温区、中国南海高温区以及赤道西太平洋暖池。但与单独海洋模式和 GISST 资料相比, 耦合模式模拟的海温在中国南海东部偏高, 在部分西太平洋暖池偏低。此外, 单独海洋模式模拟的西太平洋暖池南部地区海温较 GISST 资料偏高, 耦合模式对此有所改善, 模拟海温高于 30℃ 的海区面积明显小于单独海洋模式。分析 GISST 与模式模拟的海温的空间相关(图略)发现, 从 1985 年到 2004 年, 耦合模式海温与 GISST 的相关为 0.8 左右, 而单独海洋模式可达 0.9 左

右。整体来看, 耦合模式模拟的海温较单独海洋模式以及 GISST 资料均有一定的偏差。由于耦合系统中海洋模式是由大气模式输出的风应力和热通量驱动的, 因此, 海温的模拟偏差可能与大气模式本身的误差有关。本文将在 3.3 节进一步讨论海温偏差与降水模拟的关系。

3.2 降水的模拟

3.2.1 夏季平均降水

图 2 给出模式模拟以及观测的 20 年平均夏季降水分布。在观测(图 2c)中, 降水大值区主要位于中国东部地区, 等雨量线大体呈西南—东北走向, 华南地区有一个强度达 800 mm 的降水带, 长江中下游地区有一个强度达 600 mm 的降水中心。耦合模式基本能再现中国东部地区夏季降水的主要分布型, 如长江中下游地区的强降水中心和华南地区的强降水带, 但模拟的中国大部分地区降水较观测偏多, 特别是长江中下游地区, 降水偏多达 200 mm 以上, 而模拟的华南降水略少于观测(图 2a)。与单独大气模式模拟的降水相比(图 2d), 耦合后长江以北地区降水减少, 特别是在华北地区, 降水减少 100 mm 以上, 而华南沿海地区降水则有所增加(图 2d), 雨带位置南移, 与观测更为接近。

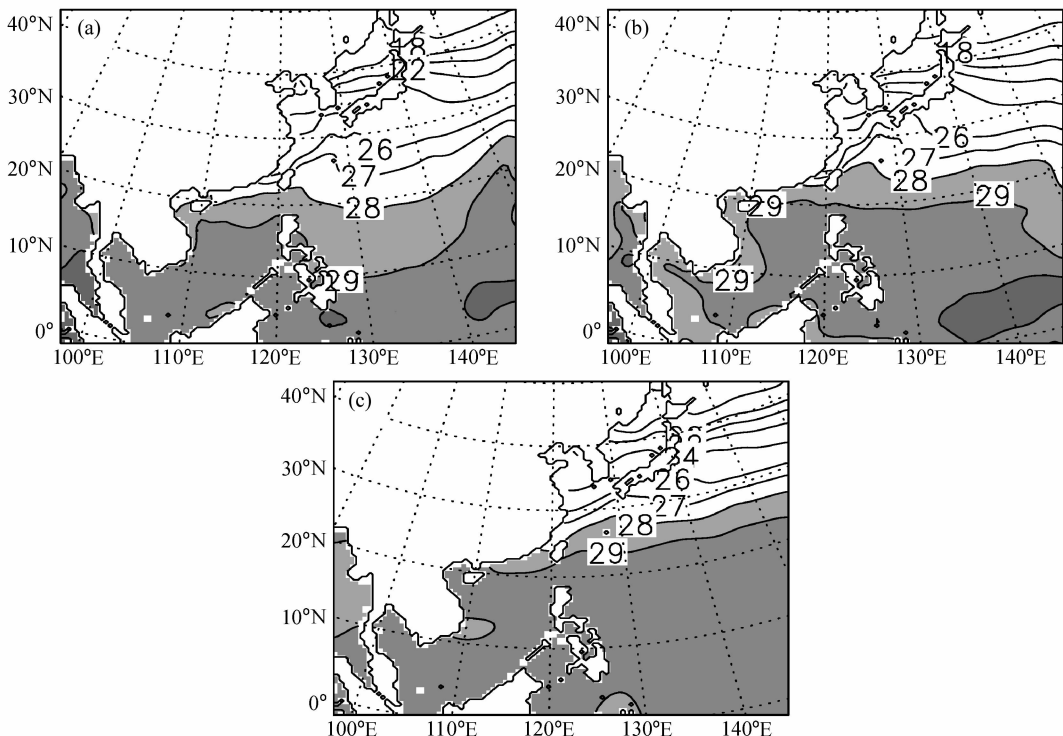


图 1 夏季(6~8月)平均海温分布(单位:℃): (a) 耦合模式; (b) 单独海洋模式; (c) GISST。阴影: 海温大于 28℃

Fig. 1 Mean SST in summer (Jun - Aug) from (a) RIEMS-POM and (b) CTR-POM simulations and (c) GISST. Shadings: SST>28℃

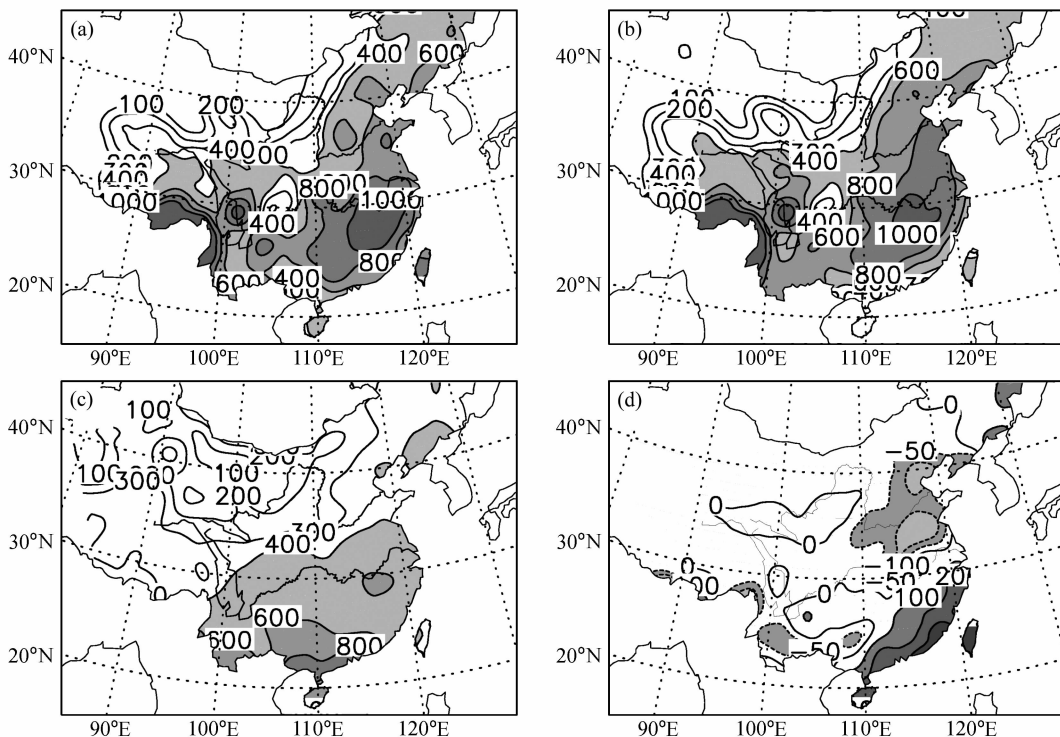


图2 中国区域 1985~2004 年夏季(6~8 月)平均降水(单位: mm): (a) 耦合模式; (b) 单独大气模式; (c) 观测; (d) 耦合模式与单独大气模式结果之差。(a、b、c) 阴影大于 400 mm; (d) 阴影大于 100 mm 或小于 -50 mm

Fig. 2 Summer (Jun - Aug) precipitation over China averaged over 1985 to 2004: (a) RIEMS-POM; (b) CTR-RIEMS; (c) observation; (d) differences between RIEMS-POM and CTR-RIEMS. (a, b, c) Shadings: >400 mm; (d) shadings: >100 mm or < -50 mm

模拟的中国东部地区夏季平均降水与观测降水的空间相关系数, 耦合模式为 0.59, 而单独大气模式为 0.47。可见, 耦合后模式模拟的降水在空间分布和强度上较单独大气模式都更为合理。

3.2.2 季风雨带的移动

季风雨带随时间的北进南退是中国东部夏季气候的主要特征之一, 也是降水区域分布的一个重要决定因素。这里主要对 100°E 以东地区, 包括我国华南、江淮、华北以及东北等区域的降水进行分析。图 3 分别给出了 5~8 月 100°E 以东地区模拟和观测的 5 天滑动平均日降水量的时间-纬度剖面图。由观测(图 3c)可知, 从 5 月上旬一直到 6 月下旬, 主要降雨带位于 21°N~24°N 之间的华南地区; 此后雨带突然迅速北移到 27°N~30°N, 即江淮地区, 梅雨季节由此开始; 7 月上旬, 雨带第二次向北跳, 到达 36°N 左右, 即华北地区; 大约在 8 月中旬, 雨带到达最北位置; 8 月下旬开始, 雨带迅速南撤。总体来说, 耦合模式(图 3a)和单独大气模式(图 3b)均能较好模拟出季风雨带的季节性移

动, 但与观测相比, 仍存在一定偏差。例如, 单独大气模式模拟的华南雨带中心位置偏北 2~3 个纬度, 且强度偏弱, 而耦合模式模拟的华南雨带中心位置位于 22°N~25°N, 强度强于单独大气模式, 与观测较为一致。此外, 虽然单独大气模式和耦合模式都能较好地模拟出江淮地区雨带的位置, 但中心强度都偏强, 达到 12 mm/d, 而观测结果为 10 mm/d。单独大气模式模拟的华北雨带中心位置偏北 1~2 个纬度, 强度偏强, 而耦合模式模拟的华北雨带中心位置与观测接近, 但强度仍稍偏强。

3.2.3 降水的时空变化特征

为了考察模式对中国东部地区夏季平均降水主要变率模态的模拟情况, 利用经验正交函数分解(EOF)对 1985~2004 年中国夏季降水距平场做展开。图 4 给出了模式模拟和观测的中国夏东部地区季降水 EOF 分析第 1 模态(即 EOF1)的空间分布和时间系数序列, 其中观测的该模态方差解释率为 27%, 耦合模式结果为 22%, 而单独大气模式结果为 18%。由图 4e 所示, 观测的第一模态大致呈纬

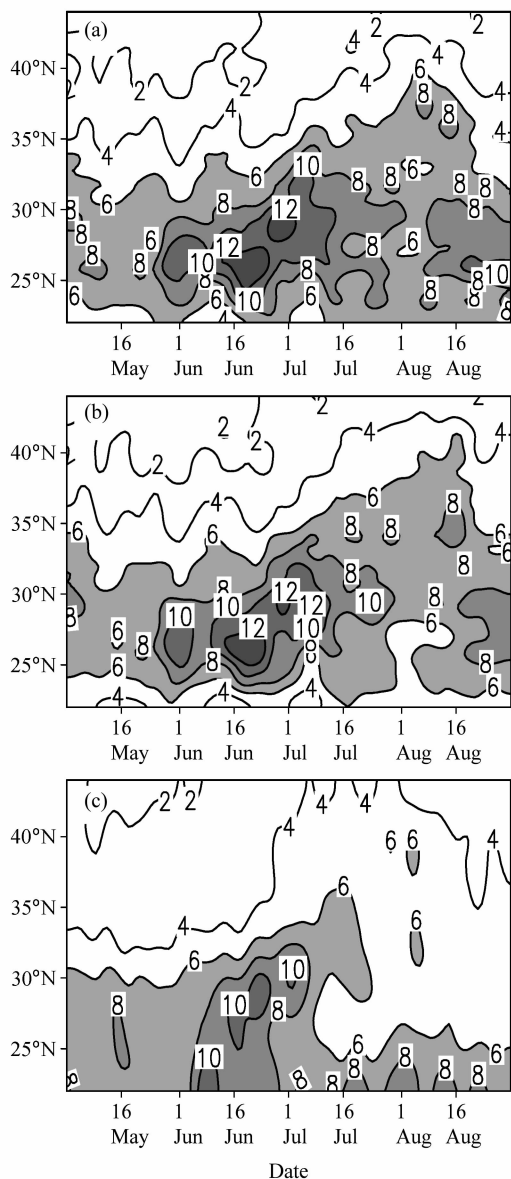


图3 中国东部地区汛期5日滑动平均日降水量的时间-纬度剖面图(单位: mm/d): (a) 耦合模式; (b) 单独大气模式; (c) 观测。阴影: 降水量大于6 mm/d

Fig. 3 Time - latitude cross sections of 5-day running mean rainfall over eastern China: (a) RIEMS-POM; (b) CTR-RIEMS; (c) observation. Shadings: >6 mm/d

向分布, 在经向上表现为以长江为界, 自南而北的“+ -”距平型分布, 表明长江以南地区的夏季降水异常与黄河、长江之间的地区降水异常存在着反位相的关系。而且相应 EOF1 时间序列的变化表明(图 4f), 这种降水分布异常具有年代际变化特征, 在 20 世纪 90 年代初发生了突然的变化, 长江以南地区的夏季降水明显增加, 而黄河、长江之间地区的夏季降水则显著减少。从图 4a 和 4c 可以看到,

耦合模式和单独大气模式模拟的降水异常空间型与观测较为吻合, 经向上也表现为由长江流域以南到长江流域以北地区呈“+ -”距平型分布, 但是模拟的正距平和负距平中心位置都较观测偏北 2~3 个纬度, 这可能与模式模拟的雨带偏北有关。此外, 单独大气模式模拟的带状距平场呈西南—东北走向, 耦合模式结果大致呈纬向分布, 与观测结果(图 4e) 较为一致。对应模拟的主分量(图 4b、d), 单独大气模式结果年际变化特征较为明显, 没有模拟出 20 世纪 90 年代以前长江以南地区夏季降水减少, 长江以北地区夏季降水增加的变化特征, 而耦合模式结果年代际变化特征较为明显, 且能较好地模拟出 90 年代初前后降水的异常变化特征, 与观测更为接近。从以上分析可知, 相比于单独大气模式, 耦合模式能更好再现夏季降水的年际变率特征。

3.2.4 不同区域降水的年际变化

图 5 给出了华北 ($34^{\circ}\text{N}\sim 42^{\circ}\text{N}$, $105^{\circ}\text{E}\sim 120^{\circ}\text{E}$)、长江中下游 ($27^{\circ}\text{N}\sim 34^{\circ}\text{N}$, $105^{\circ}\text{E}\sim 120^{\circ}\text{E}$) 以及华南 ($22^{\circ}\text{N}\sim 26^{\circ}\text{N}$, $105^{\circ}\text{E}\sim 120^{\circ}\text{E}$) 地区降水距平百分比的年际变化模拟情况。从图 5a 可以看到, 耦合模式和单独大气模式模拟的华北夏季降水距平符号和强度在多数年份比较合理, 能够模拟出 1980 年代华北少雨, 1990 年代中期多雨, 以及 1990 年代末和 2000 年以后少雨的情况。单独大气模式模拟的华北夏季降水年际变化偏小, 相比而言, 耦合模式结果与观测更为接近。但与观测相比, 耦合模式模拟的降水距平百分率在 1980 年代较偏大, 尤其是对于华北少雨年。耦合模式和单独大气模式模拟的长江中下游地区降水距平百分率(图 5b) 在量级上与观测较为接近, 观测结果中降水距平百分率绝对值大于等于 20% 的年份一共有 2 个年份, 耦合模式模拟的降水距平百分率大于等于 20% 且与观测符合的年份有 1 个, 单独大气模式结果则没有与之符合的年份。此外, 耦合模式和单独大气模式都能模拟出长江中下游地区 1990 年代中期多雨的情况, 但有些年份模拟的降水距平百分率与观测相反, 其中单独大气模式模拟的长江中下游地区夏季降水距平百分率有 12 年与观测相反, 而耦合模式则有 9 年。分析华南夏季降水年际变化(图 5c) 可见, 耦合模式和单独大气模式都能较好地模拟出华南 1980 年代少雨、1990 年代多雨的年际变化特征,

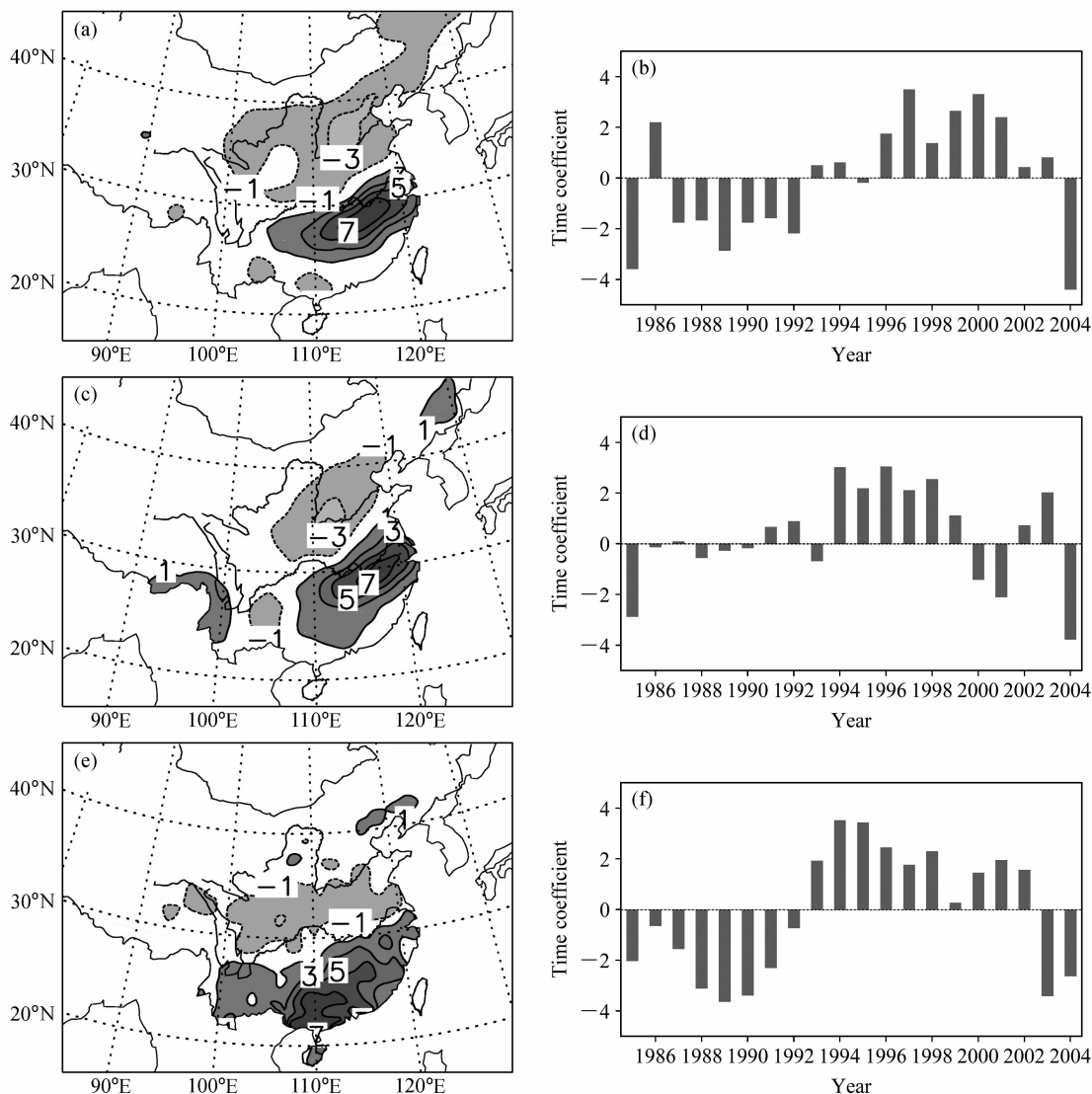


图4 1985~2004年中国夏季(6~8月)降水 EOF 分析第1主分量(EOF1)的(a、c、e)空间分布和(b、d、f)时间系数序列:(a、b)耦合模式;(c、d)单独大气模式;(e、f)观测

Fig. 4 (a, c, e) Spatial distributions and (b, d, f) time coefficients of the first EOF mode of summer (Jun – Aug) precipitation anomalies over China during 1985 – 2004; (a, b) RIEMS-POM; (c, d) CTR-RIEMS; (e, f) observation

与观测较为一致。单独大气模式模拟的华南夏季降水距平百分率有8年与观测相反,而耦合模式只有6年。此外,单独大气模式模拟的降水距平百分率年际变化较大,模拟的降水偏多年份大多与观测不符,而耦合模式较单独大气模式对此有一定的改进,尽管其模拟的降水距平百分率年际变化较观测偏小,且未能再现1990年代初华南降水偏多的特征。从模拟和观测降水距平百分率序列的相关系数来看,耦合模式模拟的华北、长江中下游以及华南地区夏季降水与观测的相关系数分别为0.61、0.18和0.35,而单独大气模式则分别为0.53、0.14和

0.22。进一步分析东北地区夏季降水的年际变化(图略)发现,耦合模式结果也较单独大气模式有所改善。

3.3 降水模拟改进的可能原因

从以上分析可知,由于包含区域海气相互作用过程,区域海气耦合模式对中国东部夏季降水具有较好的模拟性能,其模拟的降水在空间分布和强度上较单独大气模式都更为合理。海—气热通量交换是海气相互作用的重要环节,对大气环流和降水异常具有重要影响。本节我们将从海表面热通量和与之相联系的海温、辐射热通量、低层温度场以及环

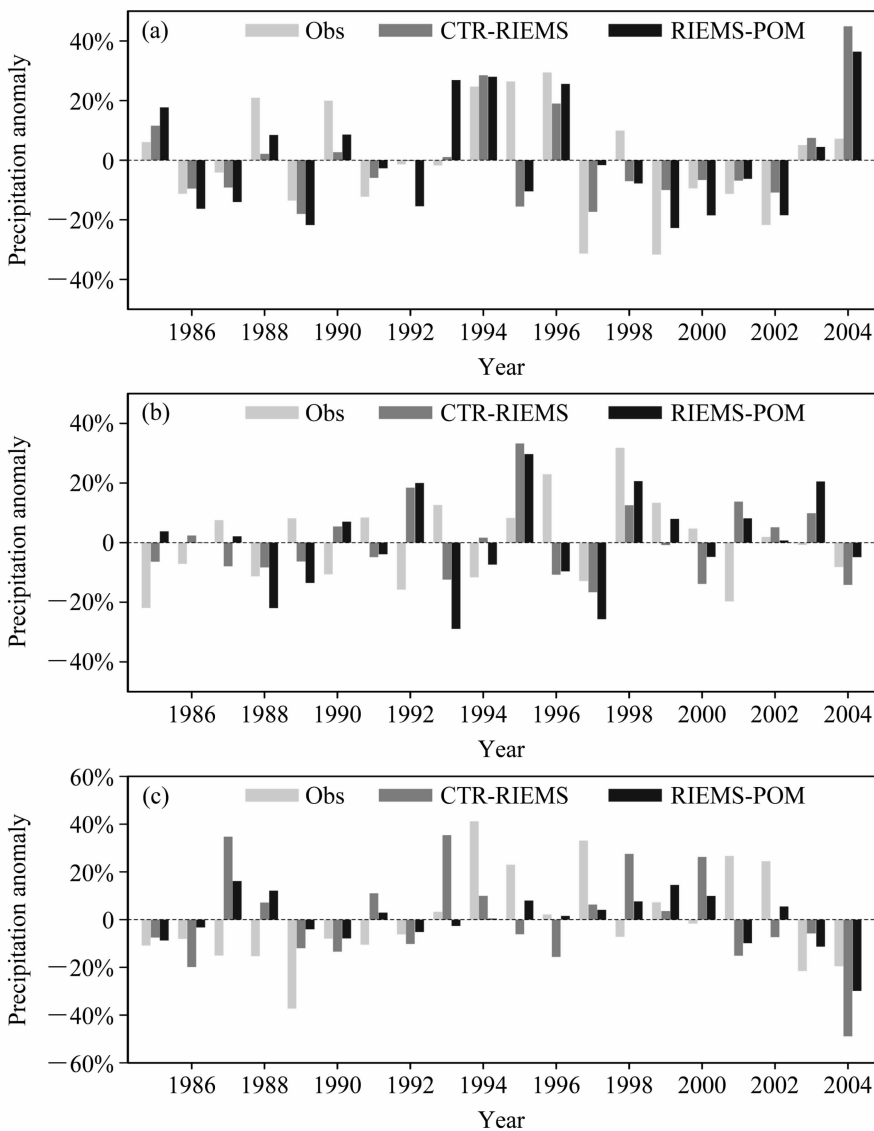


图 5 (a) 华北、(b) 长江中下游以及 (c) 华南夏季 (6~8 月) 降水距平百分率的年际变化
Fig. 5 Summer (Jun - Aug) precipitation anomalies over (a) North China, (b) middle and lower reaches of the Yangtze River, and (c) South China

流场等方面，对海气相互作用过程如何影响中国东部夏季降水的模拟性能给出一定机理解释。

图 6a、b 分别给出了耦合模式和单独大气模式模拟的表层热通量与 NCEP/NCAR 再分析资料的差值场。从图 6b 中可以看到，单独大气模式模拟的表层热通量与 NCEP/NCAR 再分析资料的偏差主要分布在海洋上，在 20°N 以北的渤海、日本海以及部分西太平洋上为负偏差，最强可达 40 W/m²，在 20°N 以南的西太平洋海区为正偏差，正值中心可达 60 W/m²。耦合模式模拟的表层热通量与 NCEP/NCAR 再分析资料的差值场 (图 6a) 与图 6b 有类似

的分布，但模拟的 20°N 以北洋面上的偏差较小，只在部分日本海海区有 20 W/m² 的负偏差。此外，耦合模式模拟的 20°N 以南洋面正偏差超过 30 W/m² 的区域面积也明显小于单独大气模式。由此可见，耦合模式模拟的海表热通量较单独大气模式有一定的改进。

海表热通量的变化与海温的变化密切相关。为了检查耦合模式对海表净热通量模拟改进的原因，我们在图 7 中给出耦合模式模拟的海温与单独海洋模式模拟的海温之差。由图 7 可见，耦合模式模拟的海温在 20°N 以北的渤海和日本海地区较单独海洋模式偏高，而在部分西太平洋地区偏低，这与耦

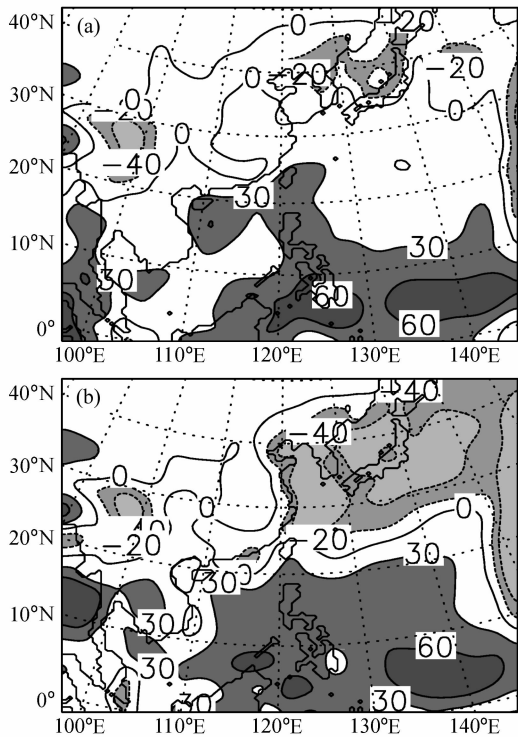


图 6 (a) 耦合模式和 (b) 单独大气模式模拟的夏季 (6~8 月) 表层热通量与 NCEP/NCAR 再分析资料的差值场 (单位: W/m^2)。正值: 向上; 深 (浅) 色阴影: 大于 $30 \text{ W}/\text{m}^2$ (小于 $-20 \text{ W}/\text{m}^2$)

Fig. 6 The differences of summer (Jun–Aug) surface heat fluxes (a) between RIEMS-POM simulation and NCEP/NCAR reanalysis data and (b) between CTR-RIEMS simulation and NCEP/NCAR reanalysis data (units: W/m^2). Positive: upward; dark (light) shadings: $>30 \text{ W}/\text{m}^2$ ($<-20 \text{ W}/\text{m}^2$)

合海洋模式之后海表热通量在 20°N 以北增多、在 20°N 以南减少相对应。那么, 耦合模式对海表热通量模拟的改善是由于大气模式对上述海温偏差的单向响应还是由于考虑了局地海气相互作用? 为了回答这个问题, 我们进一步分析了耦合模式和单独大气模式模拟的 20°N 以北洋面上的潜热通量、短波辐射通量以及降水 (表 1), 可以发现, 耦合模式模拟的这一海区短波辐射通量较单独大气模式偏弱, 而模拟的潜热通量和降水较单独大气模式均偏强。结合图 6b 中单独大气模式模拟的海表热通量与 NCEP/NCAR 再分析资料的偏差, 可知耦合后海表热通量模拟改善的可能原因是: 在 20°N 以北的洋面上, 单独大气模式模拟的向上海表净热通量较观测偏弱。耦合海洋模式后, 海洋向大气输送的净热通量偏少会使海温增高, 进而增强该区域的对

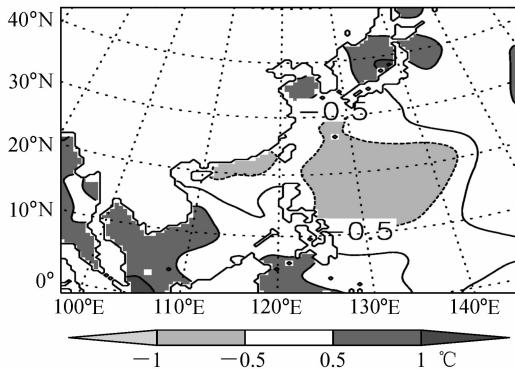


图 7 耦合模式与单独海洋模式模拟的夏季 (6~8 月) 海表面温度之差 (单位: $^\circ\text{C}$)

Fig. 7 The differences of simulated summer (Jun–Aug) SST between the RIEMS-POM and the CTR-POM

流活动和降水, 导致海洋表面向上的潜热通量增多、到达海面的净太阳短波辐射偏少, 最终使得海洋向大气输送的净热通量增加, 与 NCEP/NCAR 再分析资料更为接近。在 20°N 以南的洋面上, 相反的海气调整过程同样减弱了海表热通量的模拟误差。这与 Fu et al. (2005) 的结论一致, 对海表热通量模拟的改善来自于海温对大气模式误差的调整, 而非大气模式对海温的单向响应。

表 1 耦合模式和单独大气模式模拟的 20°N 以北洋面上的短波辐射、潜热以及降水

Table 1 The simulated shortwave radiation, latent heat flux, and precipitation in the ocean area north of 20°N from the RIEMS-POM and the CTR-RIEMS

	短波辐射通量/ $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$	潜热通量/ $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$	降水/ mm
CTR-RIEMS	282.1	59.7	347.9
RIEMS-POM	267.7	90.3	498.5

耦合模式对海表热通量模拟的改善不可避免地会影响大气加热率, 从而对耦合系统的温度场结构产生影响。图 8a 给出耦合模式与单独大气模式夏季 850 hPa 温度场之差, 由图可见, 耦合海洋模式后, 20°N 以北的中国东部海区和日本海地区对流层低层增暖, 最强增暖中心达 0.5°C 以上, 这与耦合后海表热通量在 20°N 以北海区增多一致。对流层低层温度场的变化必然会改变海陆热力对比, 进而对中国东部夏季降水的模拟产生影响。为了探讨海气耦合过程对海陆热力差异模拟的影响, 我们分别计算了模拟的和再分析资料的东亚夏季海陆热力差异指数 I_T 。我们选取东亚季风区 A ($27^\circ\text{N} \sim$

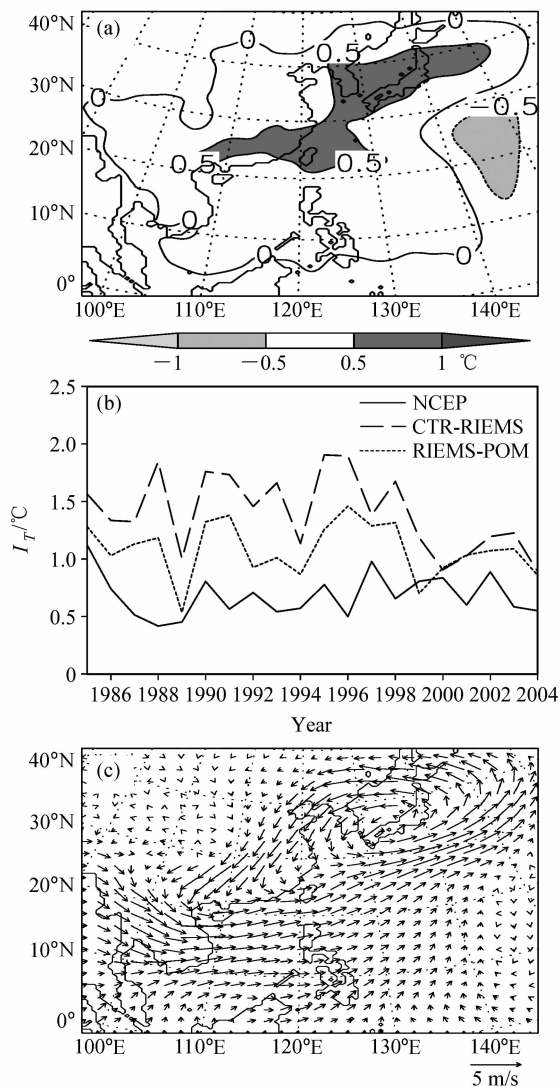


图 8 (a) 耦合模式与单独大气模式模拟的夏季 850 hPa 温度场差值场 (单位: °C); (b) 夏季海陆热力差异指数的年际变化 (单位: °C); (c) 耦合模式与单独大气模式模拟的夏季 850 hPa 风场差值场 (单位: m/s)

Fig. 8 (a) The differences of simulated summer 850-hPa air temperature between the RIEMS-POM and the CTR-RIEMS; (b) interannual variation of the index of land - sea thermal contrast in summer; (c) the differences of simulated summer 850-hPa wind vectors between the RIEMS-POM and the CTR-RIEMS

35°N, 105°E)、华南地区 B (27°N 以南、105°E 以东的大陆)、副热带西北太平洋 C (15°N~30°N, 120°E~140°E)、南海 D (5°N~18°N, 105°E~120°E) 等关键区, 根据下式计算海陆热力差异指数 (孙秀荣和陈隆勋, 2002):

$$I_T = \frac{4}{5} (T_A - T_C) + \frac{1}{5} (T_B - T_D),$$

其中, T_A 、 T_B 、 T_C 、 T_D 分别为以上所选 4 个关键区域 850~500 hPa 夏季温度的平均值。该指数综合考虑了纬向和经向的海陆热力差异, 能够较好地反映东亚夏季风的强弱变化和季风区夏季降水的异常状况 (孙秀荣和陈隆勋, 2002)。图 8b 给出了观测和模拟的 1985~2004 年 I_T 年际变化曲线, 从图中可以看到, 观测的 I_T 大多都在 0.5~1 °C 之间, 单独大气模式模拟的 I_T 较观测偏大, 个别年份可达 2 °C, 表明单独大气模式模拟的海陆热力差异偏强, 这与模拟的中国东部地区降水偏多、主要雨带位置偏北相对应。耦合模式模拟的 I_T 较单独大气模式更接近观测, 但仍略为偏大。此外, 尽管单独大气模式和耦合模式都能较好反映 I_T 指数 1990 年代增强、2000 年后减弱的年际变化特征, 但单独大气模式模拟的 I_T 年际变化较观测偏大, 且没有模拟出 1980 年代后期 I_T 显著减弱的变化特征, 而耦合模式的结果与观测更为一致。

图 8c 给出了耦合模式与单独大气模式模拟的夏季 850 hPa 风场差值图, 从图中可以看到, 在中国东部沿海地区有一个气旋性环流偏差, 其中心对应 850 hPa 的增暖中心 (图 8a)。中国东部地区位于这一气旋性偏差环流的左侧, 正好处于东北偏差气流的控制之下, 表明耦合模式模拟的中国东部地区西南季风气流较单独大气模式偏弱, 这与海陆热力差异模拟的结果相对应。与 850 hPa 风场偏差场类似, 对耦合模式与单独大气模式模拟的 850 hPa 水汽输送偏差场 (图略) 的分析显示, 耦合模式对中国东部地区西南气流模拟的改善减弱了向华北的水汽输送, 同时增强了向华南的水汽输送, 因此与单独大气模式结果相比, 耦合模式模拟的华北地区降水减少, 华南地区降水增多 (图 2d), 与观测更为接近。

4 结论与讨论

本文以区域环境系统集成模式 (RIEMS) 和普林斯顿海洋模式 (POM) 为基础, 建立了一个区域海气耦合模式, 评估了其对 1985~2004 年我国东部夏季降水的模拟性能, 并通过与观测海温强迫下单独大气模式和单独海洋模式试验结果的比较, 分析了海气耦合过程对降水模拟的影响。主要结论如下:

(1) 耦合模式能够较好地模拟出夏季海温的空间分布特征, 但与单独海洋模式以及 GISST 资料

相比,耦合模式模拟的海温在南海东部和 20°N 以北的渤海和日本海区域偏高,在部分西太平洋暖池偏低。

(2) 耦合模式能够合理再现 1985~2004 年中国东部地区夏季降水的气候态分布,模拟的降水在空间分布和强度上均明显优于单独大气模式结果,对华北和华南降水模拟的改进尤为明显。耦合模式能够真实刻画我国东部地区汛期雨带的移动,模拟雨带的中心强度和位置较单独大气模式都更为合理。同时,耦合模式能够合理的模拟出 1985~2004 年中国东部地区夏季降水的主要时空变化特征,模拟的华北、长江中下游以及华南地区夏季降水与观测的相关系数均高于单独大气模式结果。

(3) 分析表明,耦合海洋模式后海温对大气模式误差的调整改善了模式对海表热通量的模拟,使模拟的东亚地区海陆热力差异与 NCEP/NCAR 再分析资料结果更为一致,由此提高了耦合模式对低层风场以及水汽输送的模拟能力,从而改善了模式对中国东部地区夏季降水的模拟。

由本文的分析可知,区域海气耦合模式对我国东部地区夏季降水具有较好的模拟性能,较单独大气模式有一定的改进,这与 Wang et al. (2005) 的研究一致,表明区域海气相互作用过程对模式降水模拟性能有重要影响,发展适合东亚地区的区域海气耦合模式非常必要。但由于计算条件的约束,本文的研究主要集中于夏季降水的模拟。已有的研究表明,海气相互作用对东亚地区冬季季风降水具有重要影响(吴国雄等,2000;梁巧倩等,2006)。因此,有必要进一步运用区域海气耦合模式对东亚冬季风进行模拟研究。此外,尽管耦合模式模拟的中国东部地区夏季降水较耦合前有一定改进,但也存在与单独大气模式类似的模式偏差,这表明大气模式固有的偏差对耦合模式的模拟偏差有重要影响。因此,为了改善模式对降水的模拟效果,提高耦合系统的整体性能,改进 RIEMS 的模拟性能是重中之重,特别是对与降水模拟密切相关的云、辐射过程以及积云对流参数化方案的改进尤为重要。

参考文献 (References)

Aldrian E, Sein D, Jacob D, et al. 2005. Modeling Indonesian rain-fall with a coupled regional model [J]. *Climate Dyn.*, 25: 1-17.
Blumberg A F, Mellor G L. 1987. A description of a three-dimen-

sional coastal ocean model [R]//Heaps N S. Three Dimensional Coastal Ocean Models, 4, American Geophysical Union, Washington, D C, 1-16.
成安宁, 陈文, 黄荣辉. 1998. 积云对流参数化方案对气候数值模拟的影响 [J]. *大气科学*, 22 (6): 814-824. Cheng Anning, Chen Wen, Huang Ronghui. 1998. Influence of convective parameterization schemes on climate numerical simulation [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (Scientia Atmospherica Sinica)* (in Chinese), 22 (6): 814-824.
Chu P C, Chang C P. 1997. South China Sea warm pool in boreal spring [J]. *Adv. Atmos. Sci.*, 14: 195-206.
Dickinson R E, Henderson-Sellers A, Kennedy P J, et al. 1986. Biosphere-Atmosphere Transfer Scheme (BATS) for the NCAR community Climate Model [R]. Tech. Note, NCAR/TN-275+STR, National Center for Atmospheric Research, CO, 69pp.
冯锦明, 符淙斌. 2007. 不同区域气候模式对中国地区温度和降水的长期模拟比较 [J]. *大气科学*, 31 (5): 805-814. Feng Jin-ming, Fu Congbin. 2007. Inter-comparison of long-term simulations of temperature and precipitation over China by different regional climate models [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 31 (5): 805-814.
符淙斌, 苏炳凯. 2004. 区域环境系统集成模式的发展和应用研究 [M]. 北京: 气象出版社, 263pp. Fu Congbin, Su Bingkai. 2004. The Development and Application of Regional Integrated Enviromental Model System (RIEMS) (in Chinese) [M]. Beijing: China Meteorological Press, 263pp.
符淙斌, 魏和林, 陈明, 等. 1998. 区域气候模式对中国东部季风雨带演变的模拟 [J]. *大气科学*, 22 (4): 522-534. Fu Congbin, Wei Helin, Chen Ming, et al. 1998. Simulation of the evolution of summer monsoon rain belts over eastern China from regional climate model [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (Scientia Atmospherica Sinica)* (in Chinese), 22 (4): 522-534.
Fu C B, Wei H L, Qian Y. 2000. Documentation on Regional Integrated Environmental Model System (RIEMS, Version I) [R], TEACOM Science Report, No. 1, START Regional Committee for Temperate East Asia, Beijing, China, 36pp.
Fu X H, Wang B, Li T. 2005. Impacts of air-sea coupling on the simulation of mean Asian summer monsoon in the ECHAM4 model [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 130: 2889-2904.
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 horizontal resolution and topography on the numerical simulation of East Asian precipitation [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 30 (2): 185-192.
Giorgi F, Bates G T. 1989. The climatological skill of regional model over complex terrain [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 117 (11): 2325-2347.
Grell G A. 1993. Prognostic evaluation of assumptions used by cumulus parameterization [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 121: 764-787.

- Holtzlag A A M, de 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.
- Kang I S, Jin K, Wang B, et al. 2002. Intercomparison of the climatological variations of Asian summer monsoon precipitation simulated by 10 GCMs [J]. *Climate Dyn.*, 19: 383 – 395.
- Krishna K, Hoerling M, Rajagopalan B. 2005. Advancing dynamical prediction of Indian monsoon rainfall [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 32, L08704, doi: 10. 1029/2004GL021979.
- Leung L R, Mearns L O, Giorgi F, et al. 2003. Regional climate research [J]. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 84: 89 – 95.
- Levitus S. 1984. Annual cycle of temperature and heat storage in the world ocean [J]. *J. Phys. Oceanogr.*, 14: 727 – 746.
- 李巧萍, 丁一汇. 2004. 区域气候模式对东亚季风和降水多年的模拟与性能检验 [J]. *气象学报*, 62 (2): 140 – 153. Li Qiaoping, Ding Yihui. 2004. Multi-year simulation of the East Asian monsoon and precipitation in China using a regional climate model and evaluation [J]. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 62 (2): 140 – 153.
- 梁巧倩, 简茂球, 彭勇刚, 等. 2006. 东亚冬季风异常对西北太平洋海温的影响 [J]. *热带海洋学报*, 25 (6): 1 – 7. Liang Qiaoqian, Jian Maoqiu, Peng Yonggang, et al. 2006. Impacts of East Asian winter monsoon on sea surface temperature in northwestern Pacific [J]. *Journal of Tropical Oceanography* (in Chinese), 25 (6): 1 – 7.
- 刘一鸣, 丁一汇, 李清泉. 2005. 区域气候模式对中国夏季降水的 10 年回报试验及其评估分析 [J]. *应用气象学报*, 16 (增刊): 41 – 47. Liu Yiming, Ding Yihui, Li Qingquan. 2005. 10-year hindcasts and assessment analysis of summer rainfall over China from regional climate model [J]. *Quarterly Journal of Applied Meteorology* (in Chinese), 16 (Suppl.): 41 – 47.
- Liu Y Q, Avissar R, Giorgi F. 1996. Simulation with the regional climate model RegCM2 of extremely anomalous precipitation during the 1991 East Asian flood: An evaluation study [J]. *J. Geophys. Res.*, 101 (D21): 26199 – 26215.
- 吕新刚, 沙文钰. 2003. POM 模式边界条件的数值试验及其在环台湾岛海域风生流模拟中的应用 [J]. *海洋通报*, 22 (1): 17 – 23. Lü Xingang, Sha Wenyu. 2003. A numerical experimentation on boundary condition of POM and its application to wind-driven flow simulation in the sea area around Taiwan island of China [J]. *Marine Sci. Bull.* (in Chinese), 22 (1): 17 – 23.
- 潘劲松, 翟国庆, 高坤. 2002. 区域气候模拟中多种对流参数化方案的比较研究 [J]. *大气科学*, 26 (2): 206 – 220. Pan Jinsong, Zhai Guoqing, Gao Kun. 2002. Comparisons of there convection parameterization schemes of regional climate simulations [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 26 (2): 206 – 220.
- 钱永甫, 朱伯承, 王谦谦. 1998. σ 坐标系海洋模式中水平压力梯度的一种算法 [J]. *南京大学学报 (自然科学版)*, 134 (6): 691 – 700. Qian Yongfu, Zhu Bocheng, Wang Qianqian. 1998. A computational scheme of horizontal pressure gradient in ocean models with σ coordinate system [J]. *J. Nanjing University (Nat. Sci.)* (in Chinese), 134 (6): 691 – 700.
- Ratnam J V, Giorgi F, Kaginalkar A, et al. 2008. Simulation of the Indian monsoon using the RegCM3-ROMS regional coupled model [J]. *Climate Dyn.*, doi: 10. 1007/s00382-008-0433-3.
- 任雪娟, 钱永甫. 2000. 南海及邻近海区海况季节变化的模拟 [J]. *气象学报*, 58 (5): 545 – 555. Ren Xuejuan, Qian Yongfu. 2000. Numerical simulations of seasonal variations of oceanic elements in the SCS and its neighboring sea regions [J]. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 58 (5): 545 – 555.
- Ren X J, Qian Y F. 2005. A coupled regional air – sea model, its performance and climate drift in simulation of the East Asian summer monsoon in 1998 [J]. *Int. J. Climatol.*, 25: 679 – 692.
- 孙秀荣, 陈隆勋. 2002. 东亚海陆热力差指数及其与环流和降水的年际变化关系 [J]. *气象学报*, 60 (2): 164 – 172. Sun Xiurong, Chen Longxun. 2002. Index of the land – sea thermal difference and its relation to the interannual variation of summer circulation and rainfall over East Asia [J]. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 60 (2): 164 – 172.
- Walsh K, McGregor J L. 1995. January and July climate simulations over the Australian region using a limited-area model [J]. *J. Climate*, 8: 2387 – 2403.
- Wang B, Ding Q H, Fu X H. 2005. Fundamental challenge in simulation and prediction of summer monsoon rainfall [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 32, L15711, doi: 10. 1029/2005GL022734.
- 王志仁, 姜达庸, 包澄澜. 1995. 一个区域耦合海气模式及其试验 [J]. *海洋学报*, 17 (5): 50 – 58. Wang Zhiren, Jiang Dayong, Bao Chenglan. 1995. A regional air – sea coupled model and its experiments [J]. *Acta Oceanologica Sinica* (in Chinese), 17 (5): 50 – 58.
- 吴国雄, 尉艺, 刘辉. 2000. 东亚持续强冬季风影响赤道海表温度初始异常的数值试验研究 [J]. *气象学报*, 58 (6): 641 – 652. Wu Guoxiong, Wei Yi, Liu Hui. 2000. Impact of persistently strong Asian winter monsoon on equatorial sea surface temperature anomaly as simulated in climate model [J]. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 58 (6): 641 – 652.
- Wu R, Kirtman B P. 2005. Roles of Indian and Pacific Ocean air – sea coupling in tropical atmospheric variability [J]. *Climate Dyn.*, 25: 155 – 170.
- Xie S P, Miyama T, Wang Y, et al. 2007. A regional ocean – atmosphere model for eastern Pacific climate: Toward reducing tropical biases [J]. *J. Climate*, 20: 1504 – 1522.
- 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]. *Adv. Atmos. Sci.*, 20 (5): 815 – 824.
- 熊喆. 2004. 区域气候模式 RIEMS 对东亚气候的模拟 [J]. *气候与环境研究*, 9 (2): 251 – 260. Xiong Zhe. 2004. The multiyear surface climatology of RIEMS over East Asia [J]. *Climatic and Environmental Research* (in Chinese), 9 (2): 251 – 260.

- Xiong Z, Fu C B, Zhang Q. 2006. On the ability of the regional climate model RIEMS to simulate the present climate over Asia [J]. *Adv. Atmos. Sci.*, 23 (5): 784–791.
- 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 (2): 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 (2): 131–142.
- Zhang Y C, Qian Y F. 1999. Numerical simulation of the regional ocean circulation in the coastal areas of China [J]. *Adv. Atmos. Sci.*, 16 (3): 443–450.
- 张英娟, 高会旺, Lammel G. 2005. 区域气候模式 REMO 对东亚季风季节变化的模拟研究 [J]. *气候与环境研究*, 10 (1): 41–55.
- Zhang Yingjuan, Gao Huiwang, Lammel G. 2005. Simulation of monsoon seasonal variation of regional climate model REMO in East Asia [J]. *Climatic and Environmental Research* (in Chinese), 10 (1): 41–55.
- 赵得明, 符淙斌, 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, 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 Sci. Bull.* (in Chinese), 54: 2379–2387.