

房永杰, 张耀存. 2014. 区域海气耦合模式模拟的 2003 年东亚夏季风季节内振荡 [J]. 气候与环境研究, 19 (1): 78–88, doi: 10.3878/j.issn.1006-9585.2012.12125. Fang Yongjie, Zhang Yaocun. 2014. Simulation of intraseasonal oscillation of East Asian summer monsoon in 2003 by a regional air-sea coupled model [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 19 (1): 78–88.

区域海气耦合模式模拟的 2003 年东亚 夏季风季节内振荡

房永杰¹ 张耀存²

1 中国气象局国家气候中心, 北京 100081

2 南京大学大气科学学院, 南京 210093

摘要 评估了一个区域海气耦合模式（由区域环境系统集成模式 RIEMS 和普林斯顿海洋模式 POM 组成）对 2003 年东亚夏季风季节内振荡 (ISO) 的模拟性能。通过与观测海温驱动单独大气模式结果的比较，分析了海气耦合过程对东亚夏季大气 ISO 模拟性能的影响。结果表明：耦合模式能够模拟出 2003 年中国东部地区夏季降水的气候态分布，模拟的中国东部尤其是江淮地区大气 ISO 活动较单独大气模式更为显著。同时，耦合模式能够较好地再现大气 ISO 经向上北传的传播特征，模拟的江淮流域降水处于活跃和中断期时西北太平洋地区低频降水和环流异常在强度和空间分布上较单独大气模式都更为合理。相比于单独大气模式，耦合模式对大气 ISO 模拟的改善，一方面与其对气候态西北太平洋副热带高压和相关对流层底层风场模拟的改善有关，另一方面与其包含海气相互作用，因而对低频降水与海温和水汽辐合位相关系模拟的改善有关。

关键词 区域海气耦合模式 东亚夏季风 季节内振荡 海气相互作用

文章编号 1006-9585 (2014) 01-0078-11

中图分类号 P461.2

文献标识码 A

doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2012.12125

Simulation of Intraseasonal Oscillation of East Asian Summer Monsoon in 2003 by a Regional Air–Sea Coupled Model

FANG Yongjie¹ and ZHANG Yaocun²

1 National Climate Center, China Meteorological Administration, Beijing 100081

2 School of Atmospheric Science, Nanjing University, Nanjing 210093

Abstract The performance of a regional air–sea coupled model, comprising the Regional Integrated Environment Model System (RIEMS) and the Princeton Ocean Model (POM), in simulating the intraseasonal oscillation (ISO) of East Asian Summer Monsoon in 2003 was evaluated by comparison of the observations and results of an uncoupled model. The results showed that the regional air–sea coupled model reproduced well the spatial pattern of summer mean precipitation in 2003 and simulated a stronger ISO than the uncoupled RIEMS across eastern China, especially over the Yangtze–Huaihe Valley. Meanwhile, the coupled model showed high skill in simulating the meridional northward propagation of ISO over East Asia, and presenting the distribution and intensity of the intraseasonal precipitation and circulation anomalies over Northwest Pacific during the driest and wettest phases of the Yangtze–Huaihe Valley more realistically compared to the uncoupled RIEMS. Further analysis indicated that improvements in the simulation of ISO by the coupled model were due to better simulation of the western North Pacific Subtropical High and realistic phase

收稿日期 2012-07-18 收到, 2012-12-18 收到修定稿

资助项目 国家自然科学基金 41105069, 全球变化重大研究计划 2011CB952002, 公益性行业(气象)科研专项 GYHY200906015

作者简介 房永杰, 男, 1982 年出生, 博士, 高级工程师, 主要从事气候系统模式的发展和模拟研究。E-mail: fangyj@cma.gov.cn

relationship between the intraseasonal convection and the underlying sea surface temperature resulting from air-sea coupling.

Keywords Regional air-sea coupled model, East Asian summer monsoon, Intraseasonal oscillation, Air-sea coupling

1 引言

东亚地区季风气候显著,是全球海气相互作用最为复杂和活跃的区域之一。观测和数值试验表明,夏季东亚季风区临近海域的海气相互作用过程主要表现为大气对海洋的驱动作用,而非传统观念所认为的大气活动变化仅仅是对海温强迫的被动响应(Wang et al., 2005),因此为理解东亚季风的演变规律,必须发展海洋大气耦合的气候系统模式(Wang et al., 2004)。虽然全球海气耦合模式(CGCM)在模拟气候变化方面具有一定能力(Zhou and Li, 2002; Chen et al., 2010; Li et al., 2010, Li and Zhou, 2011),但由于分辨率低而难以捕获区域和局地的气候过程,因而对东亚气候及其变化的模拟依然存在许多问题(Rajendran et al., 2004; 张莉等, 2008)。近年来,发展区域海气耦合模式成为改善东亚气候模拟的重要途径之一。与CGCMs相比,高时空分辨率的区域海气耦合模式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和反馈信息,从而改进区域海洋与局地大气环流系统以及区域海气耦合关系的模拟(Xie et al., 2007; Ratnam et al., 2009; Vincenzo et al., 2010; 房永杰和张耀存, 2011; Zou and Zhou, 2011; 邹立维和周天军, 2012a)。

近年来国内外很多学者致力于发展区域海气耦合模式,并将其应用到区域气候回报试验、局地海气相互作用以及极端气候的模拟等研究中。例如,Xie et al.(2007)发展了一个区域海气耦合模式iROAM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.(2009)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。Ren and Qian(2005)把普林斯顿大学海洋模式(POM)与P- σ 5层模式进行了耦合,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。Zou and Zhou(2011)、邹立维和周天军(2012a)在RegCM3和LICOM的基础上建立了一个区域海气耦合模式并用其改进了对西北太平洋夏季风的模拟。Fang et al.(2010)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(RIEMS)(Fu et al., 2000)和POM为基础,建立了一个区域海气耦合模式。初步检验表明,该耦合模式能够较好地模拟出中国东部地区夏季降水的气候态、降水季节以及年际变化特征,较单独大气模式有很大改进,但与观测相比仍存在一定的偏差(Fang et al., 2010; 房永杰和张耀存, 2011)。所以,针对东亚区域的地形和气候特点,从多方面检验和评估耦合模式对东亚气候的模拟能力,分析模式存在的系统性偏差,是模式后续改进工作的基础。

大气季节内振荡(Intraseasonal Oscillation, ISO)是东亚季风变化的重要分量,对我国东部地区夏季大尺度降水过程有着重要影响。目前,对大气ISO的描述能力已成为衡量区域气候模式模拟能力的一个重要的客观度量(孙丹等, 2011; 赵崇博等, 2011)。2003年,我国江淮流域发生了严重的洪涝灾害,出现了自1991年以来的最大洪水,给我国社会、经济和人民生活造成了严重的影响和损失。很多气象学家对我国2003年的天气气候特征进行了分析总结,发现东亚夏季风ISO(主要是30~60 d振荡)的传播对江淮流域强降水有重要贡献(孙丹等, 2008; 夏芸等, 2008)。因此,本文进一步分析和评估区域海气耦合模式对2003年夏季东亚夏季风大气ISO的模拟能力,研究海气耦合过程对大气ISO效果模拟的影响,寻找模拟偏差出现的原因,为模式的发展改进提供依据。

2 模式、实验设计及资料介绍

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RIEMS(Fu et al., 2000)。

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, 植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一大气圈输送方案 BATS (Dickinson et al., 1986)、Grell 积云对流参数化方案 (Grell, 1993)、Holtslag 行星边界条件 (Holtslag 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 (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) 等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洲近海海区海温、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, Zou and Zhou, 2011; 邹立维和周天军, 2012a, 2012b)。

2.2 试验设计及资料介绍

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, 再将海温反馈给大气, 循环往复, 进行耦合。

利用区域海气耦合模式对 2003 年夏季进行积分, 具体耦合方案如下: 单独的海洋模式先从静止状态开始, 用多年气候平均态的 NCEP 风应力和 OAFlux (Objectively analyzed air-sea heat fluxes) 热通量 (Yu et al., 2008) 强迫积分一年, 得到一个稳定的气候态海洋, 再利用 2003 年的风应力和热通量驱动海洋, 从 1 月 1 日积分到 4 月 25 日, 这样得到的海况作为海气耦合模式中海洋初始场, 然后

耦合模式再从 2003 年的 4 月 25 日开始积分, 海洋和大气模式每 6 h 交换一次变量, 积分到 8 月 31 日 (模拟结果以 RIEMS_POM 表示)。为与耦合模式的性能进行对比, 本文利用单独大气模式同样对 2003 年东亚地区夏季气候进行了数值模拟, 定义为控制试验, 以 CTR_RIEMS 表示。

由于缺乏海洋环流观测资料, 单独海洋模式以及耦合模式中海洋部分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, 对海流采用辐射边界条件得到流出和流入边界的值 (Orlanski, 1976)。耦合模式和单独大气模式所需的侧边界场和初始场数据取自 NCEP/NCAR 2.5° (纬度) $\times 2.5^{\circ}$ (经度) 再分析资料 II, 侧边界资料每 6 h 更新一次。单独大气模式所需海温资料为英国 Hadley 中心提供的月平均全球海温海冰资料 (Global sea-ice and SST data, GISST) 数据。用于评估模式的降水观测资料为我国 2003 年 714 个地面观测站的逐日降水资料和全球降水资料 (Global Precipitation Climatology Project, GPCP)。

3 结果分析

3.1 气候态降水和海温

在分析中国东部地区夏季大气 ISO 之前, 首先考察模式对降水平均态的模拟情况。由观测 (图 1a) 可知, 2003 年夏季 (5~8 月) 中国东部地区主要有 2 个降水雨带, 其中一条位于江淮流域, 大体呈西南—东北走向, 在长江中游和淮河流域分别有一个雨量达 6 mm d^{-1} 和 8 mm d^{-1} 的降水中心; 另外一条降水雨带位于华南沿海至海南一带, 中心强度也可达 8 mm d^{-1} 。耦合模式 (图 1c) 和单独大气模式 (图 1b) 都能模拟出江淮地区的强降水雨带, 但降水偏强, 特别是江淮下游地区, 降水偏强达 4 mm d^{-1} 以上。此外, 耦合前后模式都未能再现华南沿海地区的降水雨带, 这可能与模式模拟的雨带偏北有关, 这也是当前区域模式普遍存在的问题。与单独大气模式相比, 耦合模式 (图 1c) 模拟的华南沿海地区和长江中游地区降水略有增加, 淮河以北的华北地区降水减少, 与观测更为接近, 但耦合后长江下游和东南沿海地区降水强度进一步增强, 与观测不符。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 0.51, 而单独

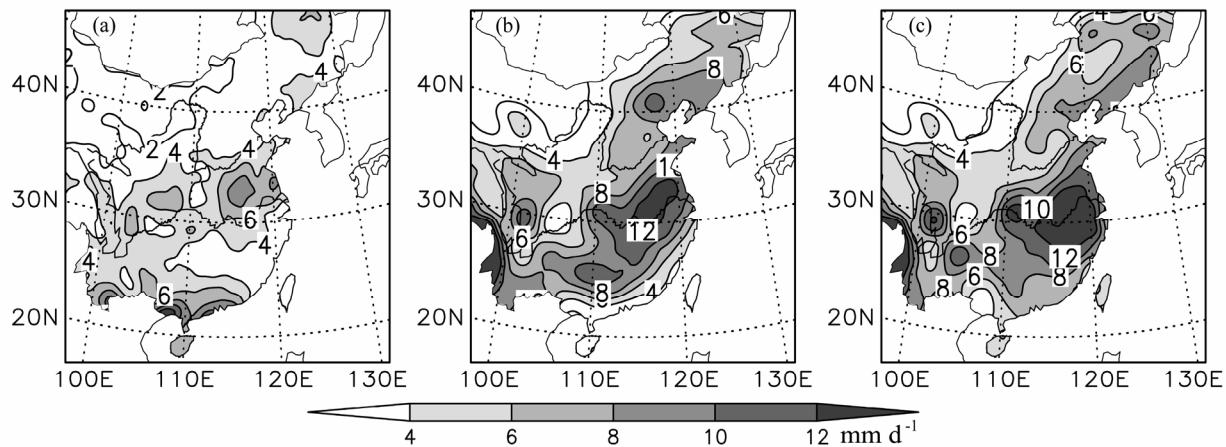


图 1 2003 年夏季平均降水: (a) 观测; (b) 单独大气模式; (c) 耦合模式

Fig. 1 Summer precipitation over eastern China in 2003: (a) Observation; (b) CTR_RIEMS; (c) RIEMS_POM

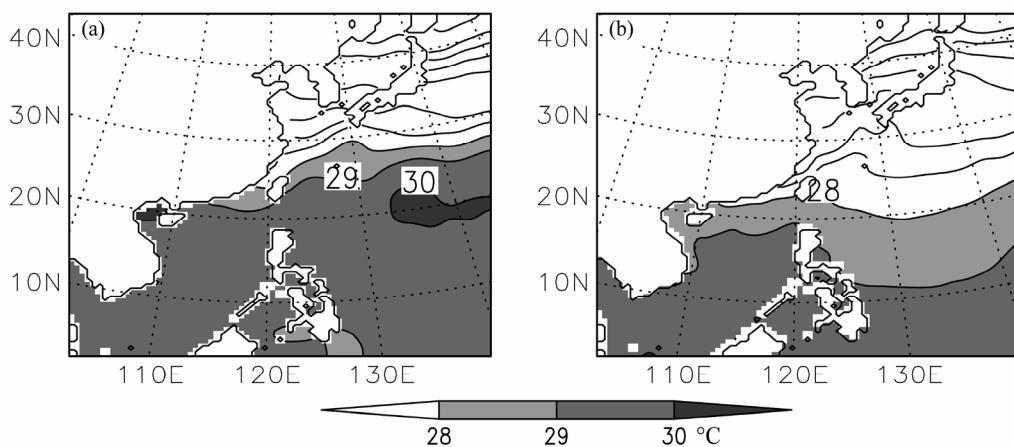


图 2 2003 年夏季平均海温分布: (a) GISST; (b) 耦合模式

Fig. 2 Mean sea surface temperature of in the summer of 2003: (a) Global sea-ice and SST data (GISST); (b) RIEMS_POM

大气模式为 0.42。可见, 耦合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。

由图 2 可见, 耦合模式(图 2b)能较好地模拟出 2003 年夏季(5~8 月)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, 模拟的东亚邻近海域海温与 GISST 的空间相关系数为 0.83。但与 GISST 资料相比, 耦合模式模拟的海温在南海北部和西北太平洋地区偏低, 特别是 10°N~20°N 之间的暖池地区, 冷偏差可达 2 °C 左右。这种冷偏差在其他针对东亚地区的区域海气耦合模拟中也存在(Zou and Zhou, 2011; 邹立维和周天军, 2012b)。房永杰和张耀存(2011)的研究发现, 海温的冷模拟偏差主要是由于耦合模式对大气模式系统性误差的调整和反馈作用引起的。

3.2 中国东部地区夏季降水的低频特征

已有的研究表明, 2003 年夏季中国东部地区大

气 ISO 的主周期为 30~60 d(孙丹等, 2008; 夏芸等, 2008)。因此, 为了获取降水的低频分量, 对 2003 年夏季(5~8 月)降水进行 30~60 d 带通滤波。用 30~60 d 低频降水方差占降水总方差的百分比来表征大气 ISO 强度。图 3 给出了观测和模拟的中国东部地区夏季大气 ISO 强度分布。从图 3a 发现, 对应降水量最大的江淮地区, 大气 ISO 强度也是最大的, 最大可达 16%。此外, 在华北和华南地区也分别有一个强度达 7%以上的大气 ISO 活跃中心。耦合模式(图 3c)和单独大气模式(图 3b)模拟的大气 ISO 活跃区主要集中在 110°E 以西的中国东部地区, 与观测一致。单独大气模式没有模拟出华北, 江淮以及华南地区的大气 ISO 活跃中心, 耦合模式能模拟出江淮地区的 ISO 活跃中心, 尽管强度仍弱于观测。

如上所述, 2003 年夏季降水及其 30~60 d 低

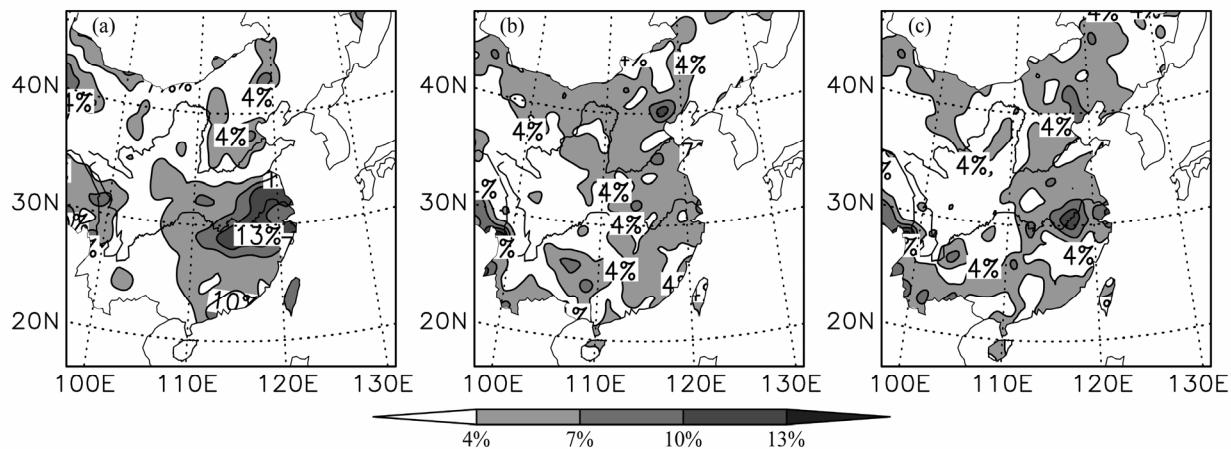


图3 2003年中国东部地区夏季大气ISO强度指数分布: (a) 观测; (b) 单独大气模式; (c) 耦合模式

Fig. 3 The spatial distributions of intraseasonal oscillation (ISO) intensity index over eastern China in the summer of 2003: (a) Observation; (b) CTR_RIEMS; (c) RIEMS_POM

频分量的活跃区主要集中在江淮流域 ($27^{\circ}\text{N} \sim 35^{\circ}\text{N}$, $110^{\circ}\text{E} \sim 120^{\circ}\text{E}$)。因此, 进一步计算模拟和观测的江淮流域区域平均的日降水距平(相对于2003年夏季平均)与30~60 d滤波后的振荡分量曲线(图4)。由观测可知(图4a), 降水活跃期和中断期交替出现, 最大降水过程集中出现在6月21日至7月11日, 降水强度最大, 持续时间长; 在5月上旬和8月中旬中也分别有两次弱的降水过程, 持续时间较短。低频降水分量与总降水距平有较好的对应关系, 两者的相关系数为0.546。耦合模式和单独大气模式都能模拟出6月21日至7月11日江淮地区强降水以及降水的低频变化过程, 但与观测相比, 仍存在一定的偏差。例如, 单独大气模式模拟的江淮地区6月中上旬(降水中断期)降水偏多, 而耦合模式降水强度与观测接近。单独大气模式模拟的低频降水振幅偏弱, 特别是6月21日至7月11日期间, 低频降水小于 2.5 mm d^{-1} , 而耦合模式和观测结果可达 4 mm d^{-1} 以上。模拟的低频降水分量与总降水距平的相关关系, 单独大气模式为0.348, 而耦合模式结果为0.427。

3.3 大气ISO的经向传播

低频降水雨带随时间的向北传播是东亚夏季风大气ISO的显著特征之一, 与我国东部地区夏季降水过程有着密切的关系。图5给出了2003年经过30~60 d带通滤波后的降水沿 $110^{\circ}\text{E} \sim 130^{\circ}\text{E}$ 的纬度一时间剖面图。从观测(图5a)中可以发现, 5~8月, 中国东部及邻近海域地区共有2次大气ISO的北传过程, 中国东部地区各地雨期都与这两次大气ISO北传过程有关。第一次北传过程从5月

下旬开始于 10°N 附近, 6月初传到 20°N 附近并开始增强, 形成低频降水中心, 使得其继续向北传播, 最终于7月中旬传到 35°N 附近。第二次大气ISO北传过程从7月中旬出现在 10°N 附近, 并迅速向北传播, 其中心于8月中旬移到我国华南地区。单独大气模式(图5b)和耦合模式(图5c)都能较好地模拟出上述大气ISO的北传特征, 但与观测相比, 仍存在一定偏差, 例如, 单独大气模式模拟的大气ISO强度偏弱, 没有模拟出6月初位于 20°N 附近的低频降水中心, 而耦合模式模拟的 20°N 附近的低频降水中心强度可达 3 mm d^{-1} , 与观测更为接近。单独大气模式没有模拟出7月中旬以后的大气ISO的第二次北传过程, 模拟低频降水表现为向南传播, 而耦合模式表现为向北传播, 与观测结果一致, 但其模拟的低频降水中心位置较观测偏北, 强度偏弱。

3.4 活跃期与中断期低频降水和环流对比

由以上的分析可知, 2003年夏季江淮地区降水的发生具有显著的阶段性特征, 表现为明显的季节内振荡。本节将着重分析模式对江淮流域大气ISO活跃期(6月21日至7月11日)和中断期(7月14日至8月5日)低频降水和环流特征的模拟情况。

当江淮流域处于降水活跃期时, 观测显示, 在对流层低层, 中国东部沿海地区受低频反气旋控制, 处于降水中断期, 该低频反气旋西北侧的低频西南风有利于水汽向江淮流域输送(图6a)。单独大气模式(图6c)和耦合模式(图6e)都能模拟出江淮地区降水活跃期时中国东部沿海地区的异常反气旋, 但强度偏弱, 位置偏西, 导致向江淮地区

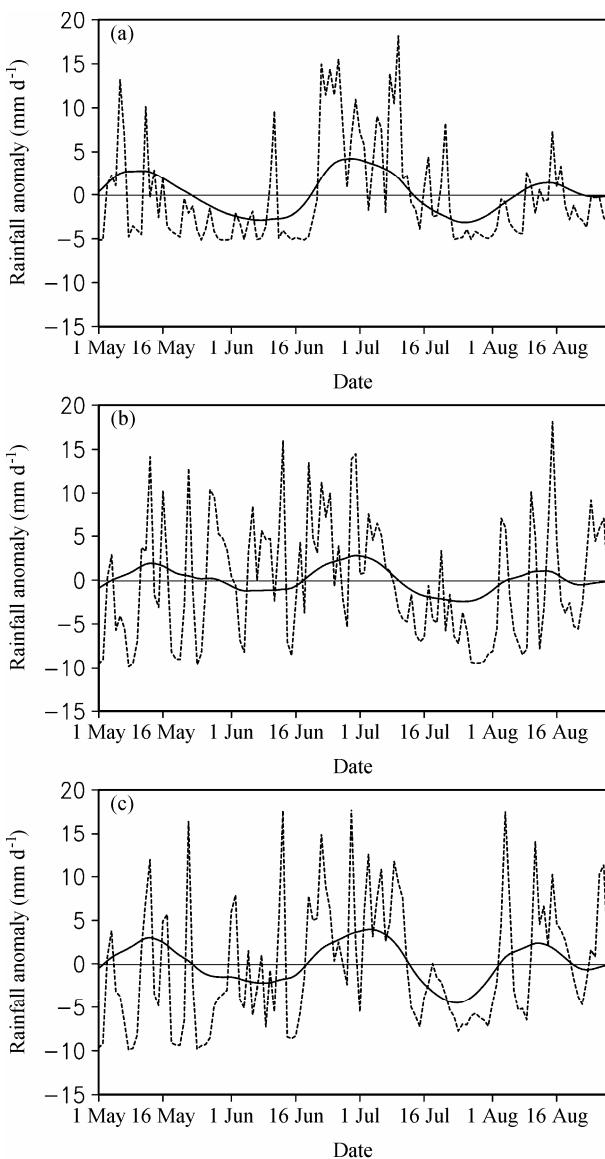


图 4 2003 年夏季江淮流域日降水距平(虚线)及其 30~60 d 低频分量(实线)的时间演变: (a) 观测; (b) 单独大气模式; (c) 耦合模式
Fig. 4 Time series of the daily rainfall anomalies (dashed line) and its 30–60-day component (solid line) over Yangtze-Huaihe Valley in the summer of 2003: (a) Observation; (b) CTR_RIEMS; (c) RIEMS_POM

的水汽输送主要来自模式的东边界, 与观测不符。此外, 单独大气模式没有模拟出日本以南西北太平洋海区低频降水的负异常带(图 6c), 而耦合模式(图 6e)对此有所改进, 模拟的降水负异常带可伸至部分西太平洋地区, 但位置仍较观测偏北。

与活跃期相反, 当江淮流域处于降水中断期时, 观测中西北太平洋地区和南海地区被低频气旋控制, 处于降水活跃期, 而江淮地区被低频东北风控制, 不利于降水的形成(图 6b)。耦合模式(图 6f)和单独大气模式(图 6d)都能较好地模拟出上

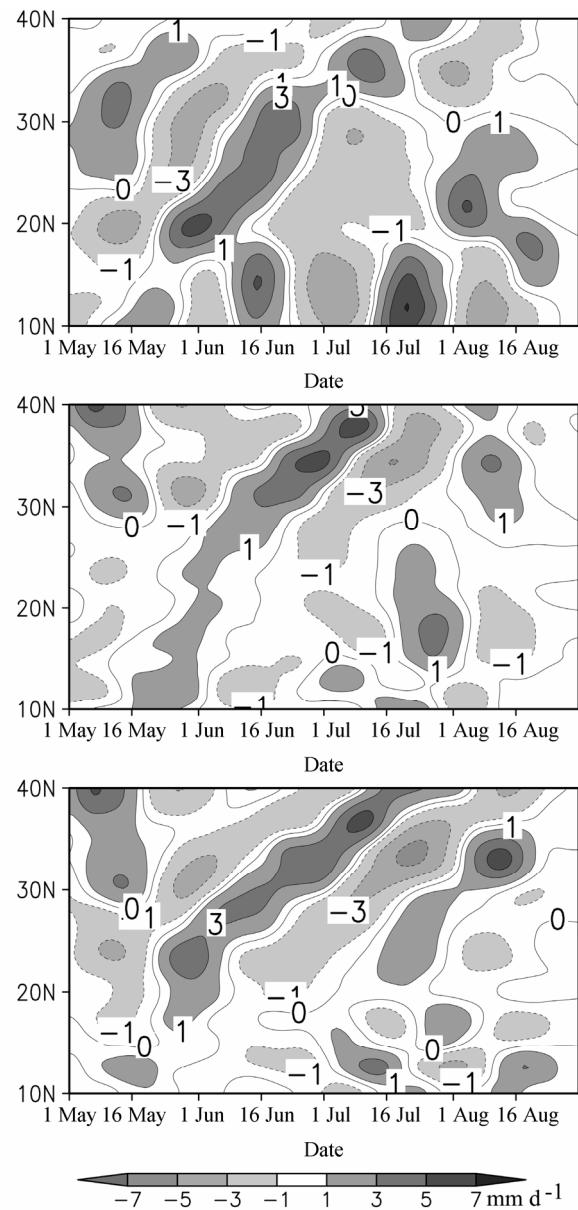


图 5 2003 年夏季 30~60 d 低频降水沿 110°E~130°E 的经向传播: (a) 观测; (b) CTR_RIEMS; (c) RIEMS_POM
Fig. 5 Meridional propagations of intraseasonal rainfall along 110°E–130°E in the summer of 2003: (a) Observation; (b) CTR_RIEMS; (c) RIEMS_POM

述低频降水和环流特征, 模拟的中国东部沿海地区也被异常气旋控制, 但模拟西北太平洋地区异常气旋位置偏西。此外, 单独大气模式没能模拟位于南海地区的异常气旋, 导致模拟的南海地区低频降水为负异常, 与观测不符(图 6d), 而耦合模式能模拟出南海地区的异常气旋和相应的低频降水中心, 但模拟的异常气旋中心位置较观测偏西(图 6f)。

3.5 海气相互作用对大气 ISO 模拟的影响

从以上分析可知, 耦合模式能够模拟出 2003

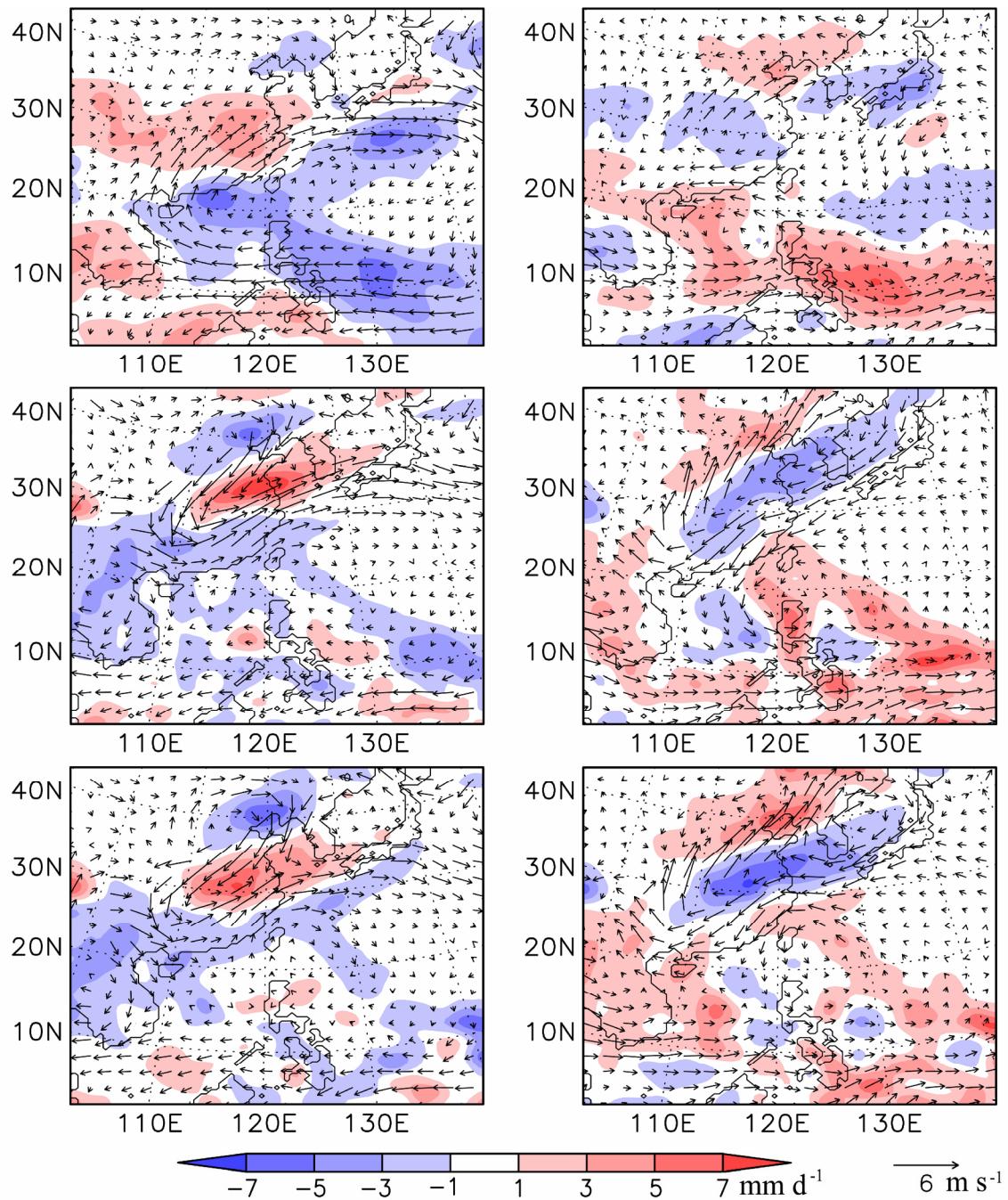


图 6 2003 年夏季江淮流域降水活跃期(左列)和中断期(右列)30~60 d 低频降水和 850 hPa 风场分布: (a、b) 观测; (c、d) CTR_RIEMS; (e、f) RIEMS_POM

Fig. 6 The intraseasonal precipitation and 850 hPa wind vector during the active period (left panel) and break period (right panel) of rainfall over the Yangtze-Huaihe Valley in the summer of 2003: (a, b) Observation; (c, d) CTR_RIEMS; (e, f) RIEMS_POM

年东亚夏季风的大气 ISO 信号,由于包含海气相互作用过程,其模拟的大气 ISO 强度,传播以及低频环流特征较单独大气模式均有不同程度的改善。那么海气相互作用是如何导致 ISO 模拟的改善?本节将重点讨论这个问题。

以往研究发现,模式对大气季节内振荡模拟能力的提高与其对气候态的模拟情况紧密相连

(Zheng et al., 2004, Fu et al., 2005)。分析发现,单独大气模式模拟的 850 hPa 位势高度较观测偏西、偏强,导致东亚邻近海域西南季风偏弱(图 7a)。相比单独大气模式,耦合模式模拟西北太平洋副热带高压强度减弱、位置偏东,导致中国东部邻近海域西南季风气流增强(图略),与观测更为接近。这一改善导致耦合模式中由赤道向东亚季风

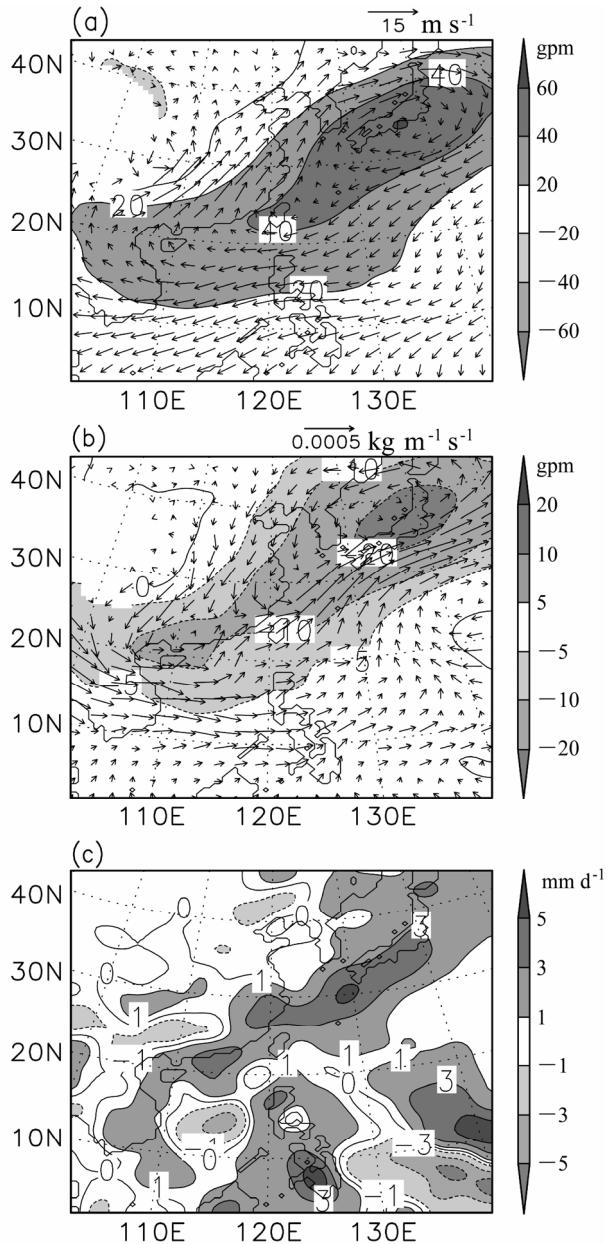


图 7 2003 年夏季 850 hPa (a) 单独大气模式与观测的位势高度 (阴影) 和风场 (箭头) 的差值场、(b) 耦合模式与单独大气模式模拟的位势高度 (阴影) 和水汽输送 (箭头) 的差值场、(c) 耦合模式与单独大气模式模拟的降水的差值场

Fig. 7 The differences of the summer mean 850-hPa (a) geopotential height (shaded) and the wind (vector) between the CTR_RIEMS and the observations, (b) geopotential height (shaded) and the water vapor transport (vector) between RIEMS_POM and CTR_RIEMS, and (c) the precipitation between RIEMS_POM and CTR_RIEMS in 2003

区的水汽输送增强 (图 7b), 造成中国东南沿海—江淮流域—日本一带降水增多 (图 7c), 同时也使水汽一对流反馈作用 (Jiang et al., 2004) 增强, 由此导致东夏季风大气 ISO 活动更为活跃。由此可见, 相比单独大气模式, 耦合模式对气候态环流和降水

模拟的改善对大气 ISO 模拟能力的提高具有重要影响。由于模式自身的系统性误差, 耦合模式模拟的海温不可避免会与观测海温产生偏差, 那么耦合模式对气候态的模拟改善是来源于海气相互作用, 还是由于大气模式对海温偏差的单向响应? 对此房永杰和张耀存 (2011) 的研究发现, 耦合前后气候态的模拟偏差主要来自于海温对大气模式误差的调整和反馈, 而非大气模式对海温偏差的单向响应。

大气 ISO 在经向上的向北传播与低频尺度海气相互作用关系密切, 而低频海温与大气 ISO, 特别是与低频降水的位相关系是影响海气相互作用过程的关键因子之一 (Jiang et al., 2004; Chou and Hsueh, 2010)。图 8 给出了观测、耦合模式和单独大气模式试验模拟的低频降水分别与东亚邻近海域 ($20^{\circ}\text{N} \sim 35^{\circ}\text{N}$, $125^{\circ}\text{E} \sim 140^{\circ}\text{E}$) 平均的 850 hPa 风速、海表潜热通量、海温、850 hPa 温度以及 1000 hPa 水汽辐合的超前滞后相关的分布。观测和耦合模式的模拟结果都显示, 负的风速和正的潜热通量超前于正的低频降水中心 5~15 d 左右 (图 8a 和 8b), 短波辐射反位相于低频降水中心 (图略), 正的海温、850 hPa 温度以及水汽辐合超前于正的低频降水中心 5~15 d 左右 (图 8c、8d、8e)。这表明在低频降水中心的前方 (北侧), 对流层低层风速减弱、蒸发减弱、短波辐射增强, 这导致海洋失去的热量减少, 海温升高, 使对流层低层结稳定性降低, 引起该地区风场辐合增强, 形成湿汇, 由此引起降水增加, 有利于低频降水不断向北传播发展。而在单独大气模式中, 虽然模拟的低频降水与 850 hPa 风速和表层潜热通量的位相关系与观测一致 (图 8a 和 8b), 但由于海温是给定的月平均海温, 缺少低频海温的反馈作用, 低频降水与 850 hPa 温度和水汽辐合的相关较弱 (图 8d 和 8e), 这表明在低频降水的前方温度偏低, 水汽辐合偏弱, 不利于大气 ISO 的向北传播和发展。

4 结论和讨论

本文评估了一个区域海气耦合模式 (由区域环境系统集成模式 RIEMS 和普林斯顿海洋模式 POM 组成) 对 2003 年东亚夏季风大气 ISO 的模拟性能, 并通过与观测海温强迫下单独大气模式试验结果的比较, 分析了海气耦合过程对大气 ISO 特征模拟

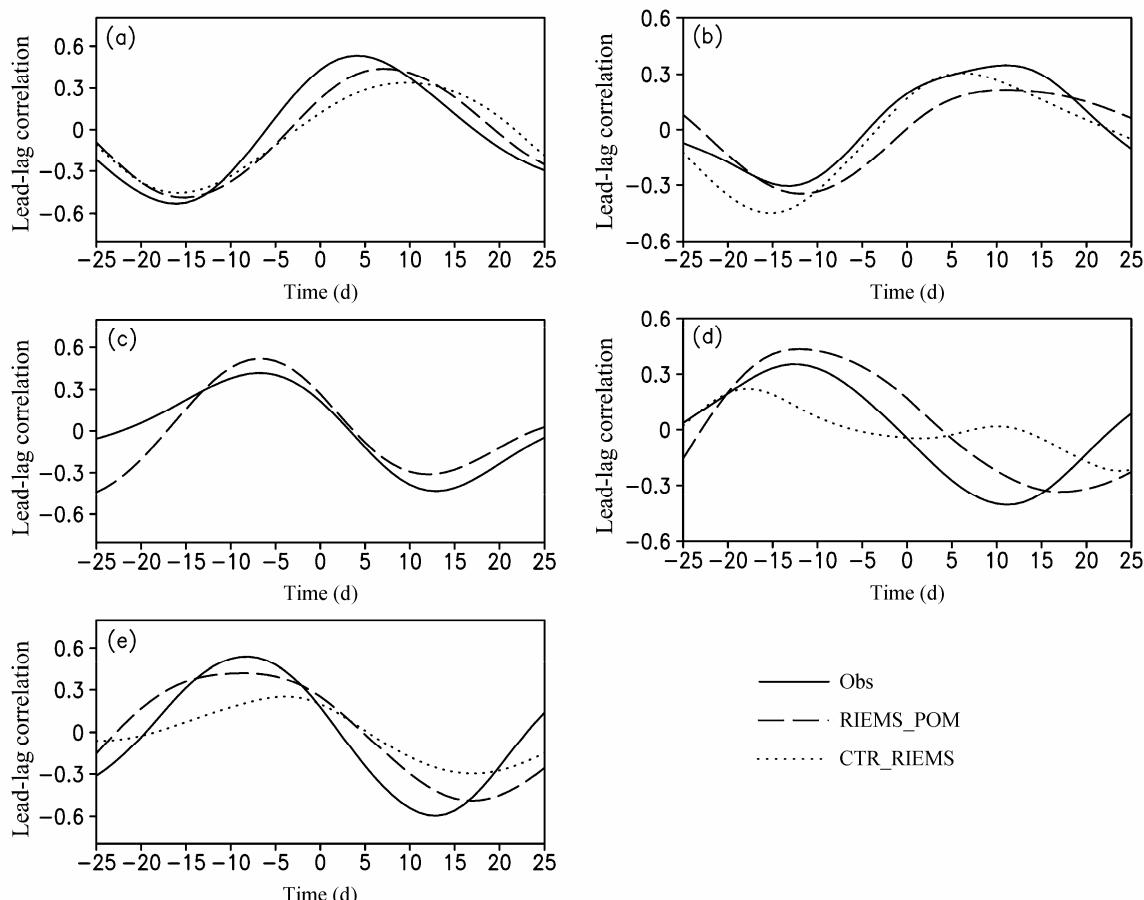


图 8 东亚邻近海域平均的 30~60 d 低频降水与 (a) 850 hPa 风速、(b) 潜热通量、(c) 海温、(d) 850 hPa 温度以及 (e) 1000 hPa 水汽辐合的滞后相关

Fig. 8 The lag correlations between 30–60-day intraseasonal rainfall averaged over part of East Asian coastal oceans and (a) 850-hPa wind speed, (b) surface latent heat flux, (c) sea surface temperature, (d) 850-hPa air temperature, and (e) 1000 hPa moisture convergence

的影响。主要结论如下：

(1) 耦合模式能够合理再现 2003 年中国东部地区夏季降水和中国邻近海域海温的气候态分布，模拟的中国东部地区，尤其是江淮流域的大气 ISO 活动较单独大气模式更为显著。同时，耦合模式能够较好地模拟出江淮流域的低频降水过程，模拟的江淮流域低频降水强度以及 30~60 d 低频降水与降水距平的相关系数均高于单独大气模式结果。

(2) 观测中 2003 年夏季中国东部地区共有 2 次低频降水的北传过程，分别发生在 5 月下旬和 7 月中旬，耦合模式能合理再现这一传播特征，模拟低频降水的北传信号较单独大气模式更为显著。耦合模式能较好地模拟江淮流域降水活跃期（中断期）时位于东亚邻近海域的异常反气旋（气旋），模拟的西北太平洋地区低频降水和环流异常在强度和空间分布上较单独大气模式都更为合理。

(3) 进一步研究发现，耦合模式对于大气 ISO

模拟能力的提高一方面与模式对气候态模拟的改善有关。相比单独大气模式，耦合模式模拟对副高模拟的改善增强了对流层低层西南季风气流和向东亚季风区的水汽输送，由此导致模拟东亚季风区大气 ISO 活动增强。另一方面，耦合模式中低频尺度海气相互作用使模拟的正的低频海温超前于正的低频降水中心，海温的反馈作用引起低频降水前方（北侧）层结稳定性下降，水汽辐合增强，有利于大气 ISO 的向北的传播和发展。

最后，需要指出的是，对于东亚夏季风大气 ISO 的模拟能力，区域海气耦合模式较单独大气模式更具优势，但耦合模式的不足之处也是较明显的，如模拟的中国东部地区降水偏多，大气 ISO 强度偏弱以及低频雨带位置偏北等。这些模拟偏差可能与大气模式对积云对流参数化、云—辐射过程以及侧边界的处理有关。此外，虽然本文的研究发现低频尺度海气相互作用对大气 ISO 的模拟的改善就有重要

影响, 但模式模拟的气候态海温与观测仍存在偏差, 这种季节尺度上的偏差及相关海气相互作用对低频尺度上降水与海温、环流以及水汽辐合等位相关系模拟的改善可能也有一定的影响。因此未来有必要设计试验分别从季节和季节内尺度两方面研究海气相互作用对大气 ISO 模拟的影响。

参考文献 (References)

- Blumberg A F, Mellor G L. 1987. A description of a three-dimensional coastal ocean model [C]. Three Dimensional Coastal Ocean Models, N S Heaps, Ed, American Geophysical Union, 1–16.
- Chen H M, Zhou T J, Richard B N, et al. 2010. Performance of the New NCAR CAM3.5 in East Asian summer monsoon simulations: Sensitivity to modifications of the convection scheme [J]. *J. Climate*, 23: 3657–3675.
- Chou C, Hsueh Y C. 2010. Mechanisms of northward-propagating intraseasonal oscillation—A comparison between the Indian Ocean and the Western North Pacific [J]. *J. Climate*, 23: 6624–6640.
- Chu P C, Chang C P. 1997. South China Sea warm pool in boreal spring [J]. *Advances in Atmospheric Science*, 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.
- 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.
- Fang Y J, Zhang Y C, Tang J P, et al. 2010. A regional air-sea coupled model and its application over East Asia in the summer of 2000 [J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 27(3): 583–593.
- Fu C B, Wei H L, Qian Y. 2000. Documentation on a regional integrated environment model system (RIEMS version1) [R]. TEACOM Science Report No. 11, START Regional Committee for Temperate East Asia, Beijing, China, 1–261.
- 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.
- Grell G A. 1993. Prognostic evaluation of assumptions used by cumulus parameterization [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 121: 764–787.
- Holtslag 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.
- Jiang X N, Li T, Wang B. 2004. Structures and mechanisms of the northward-propagating boreal summer intraseasonal oscillation [J]. *J. Climate*, 17: 1022–1039.
- Levitus S. 1984. Annual cycle of temperature and heat storage in the world ocean [J]. *Journal of Physical Oceanography*, 14: 727–746.
- Li B, Zhou T J. 2011. El Niño-Southern Oscillation-related Principal Interannual Variability Modes of Early and Late Summer Rainfall over East Asia in sea surface temperature-driven atmospheric general circulation model simulations [J]. *J. Geophys. Res.*, 116, D14118, doi:10.1029/2011JD015691.
- Li H, Dai A, Zhou T J, et al. 2010. Responses of East Asian summer monsoon to historical SST and atmospheric forcing during 1950–2000 [J]. *Climate Dyn.*, 34, 501–514, doi:10.1007/s00382-008-0482-7.
- Orlanski I. 1976. A simple boundary condition for unbounded hyperbolic flows [J]. *J. Comput. Phys.*, 21: 251–269.
- 钱永甫, 朱伯承, 王谦谦. 1998. α 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]. *Journal of Nanjing University (Natural Sciences) (in Chinese)*, 134 (6): 691–700.
- Rajendran K, Kitoh A, Yukimoto S. 2004. South and East Asian summer monsoon climate and variation in the MRI coupled model (MRI-CGCM2) [J]. *J. Climate*, 17: 763–782.
- Ratnam J V, Giorgi F, Kaginarkar A, et al. 2009. Simulation of the Indian monsoon using the RegCM3-ROMS regional coupled model [J]. *Climate Dyn.*, 33: 119–139.
- 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]. *International Journal of Climatology*, 25: 679–692.
- 孙丹, 瑞建华, 吕俊梅. 2008. 2003 年东亚季风季节内振荡对我国东部地区降水的影响 [J]. *热带气象学报*, 24 (6): 641–648. Sun Dan, Ju Jianhua, Lü Junmei. 2008. The influence of the intraseasonal oscillation of the East Asian monsoon on the precipitation in East China in 2003 [J]. *Journal of Tropical Meteorology (in Chinese)*, 24 (6): 641–648.
- 孙丹, 周天军, 刘景卫, 等. 2011. 变网格模式 LMDZ 对 1998 年夏季东亚季节内振荡的模拟 [J]. *大气科学*, 35 (5): 885–896. Sun Dan, Zhou Tianjun, Liu Jingwei, et al. 2011. Simulation of the East Asian intraseasonal oscillation in 1998 with the variable-resolution model LMDZ [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 35 (5): 885–896.
- Vincenzo A, Sandro C, Adriana C, et al. 2010. An atmosphere-ocean regional climate model for the Mediterranean area: Assessment of a present climate simulation [J]. *Climate Dyn.*, 35: 721–740.
- Wang B, Kang I S, Lee J Y. 2004. Ensemble simulations of Asian Australian monsoon variability by 11 AGCMs [J]. *J. Climate*, 17 (4): 803–818.
- Wang B, Ding Q H, Fu X H, et al. 2005. Fundamental challenge in simulation and prediction of summer monsoon rainfall [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 32 (15): 15711–15711.
- 夏芸, 管兆勇, 王黎娟. 2008. 2003 年江淮流域强降水过程与 30~70 d 低频振荡的联系 [J]. *南京气象学院学报*, 31 (1): 33–41. Xia Yun, Guan Zhao Yong, Wang Lijuan. 2008. Association of 30–70 d oscillations with the heavy rainfall over Changjiang-Huaihe River valley in summer 2003

- [J]. Journal of Nanjing Institute of Meteorology (in Chinese), 31 (1): 33–41.
- 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.
- 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]. *Advances Atmospheric Sciences*, 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.
- Yu L, Jin X, Weller R. 2008. Multidecade global flux datasets from the objectively analyzed air–sea fluxes (OAFlux) project: Latent and sensible heat fluxes, ocean evaporation, and related surface meteorological variables [R]. Tech. Rep. OA-2008-01, Woods Hole Oceanographic Institution, 64pp.
- 张莉, 丁一汇, 孙颖. 2008. 全球海气耦合模式对东亚季风降水模拟的检验 [J]. 大气科学, 32 (2): 261–276. Zhang Li, Ding Yihui, Sun Ying. 2008. Evaluation of precipitation simulation in East Asian monsoon areas by coupled ocean-atmosphere general circulation models [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 32 (2): 261–276.
- Zhang Y C, Qian Y F. 1999. Numerical simulation of the regional ocean circulation in the coastal areas of China [J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 16 (3): 443–450.
- 赵崇博, 周天军, 李博, 等. 2011. 夏季中国东部降水季节内振荡的区域模式模拟 [J]. 大气科学, 35 (6): 1033–1045. Zhao Chongbo, Zhou Tianjun, Li Bo, et al. 2011. Intraseasonal oscillation of summer rainfall over eastern China simulated with a regional climate model [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 35 (6): 1033–1045.
- 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 to simulate multi-year precipitation and air temperature in China [J]. *Chinese Science Bulletin*, 54: 3101–3111.
- Zheng Y, Waliser D E, Stern W F, et al. 2004. The role of coupled sea surface temperatures in the simulation of the tropical intraseasonal oscillation [J]. *J. Climate*, 17: 4109–4134.
- Zhou T J, Li Z X. 2002. Simulation of the east Asian summer monsoon using a variable resolution atmospheric GCM [J]. *Climate Dyn.*, 19: 167–180.
- Zou L W, Zhou T J. 2011. Sensitivity of a regional ocean–atmosphere coupled model to convection parameterization over Western North Pacific [J]. *J. Geophys. Res.*, 116, D18106, doi:10.1029/2011JD015844.
- 邹立维, 周天军. 2012a. 一个区域海气耦合模式的发展及其在西北太平洋季风区的性能检验: 不同大气分量的影响 [J]. 中国科学(地球科学), 42 (4): 614–628. Zou Liwei, Zhou Tianjun. 2012a. Development and evaluation of a regional ocean–atmosphere coupled model with focus on the western North Pacific summer monsoon simulation: Impacts of different atmospheric components [J]. *Science China Earth Sciences*, 55 (5): 802–815.
- 邹立维, 周天军. 2012b. 区域海气耦合模式研究进展 [J]. 地球科学进展, 27 (8): 857–865. Zou Liwei, Zhou Tianjun. 2012b. A review of development and application of regional ocean–atmosphere coupled model [J]. *Advances in Earth Science (in Chinese)*, 27 (8): 857–865.