

周天军, 邹立维, 韩振宇, 等. 2016. 区域海气耦合模式 FROALS 的发展及其应用 [J]. 大气科学, 40 (1): 86–101. Zhou Tianjun, Zou Liwei, Han Zhenyu, et al. 2016. Development and applications of a regional atmosphere–ocean coupled model (FROALS): A review [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 40 (1): 86–101, doi: 10.3878/j.issn.1006-9895.1508.15153.

区域海气耦合模式 FROALS 的发展及其应用

周天军¹ 邹立维¹ 韩振宇² 刘博^{1,3} 姚隽琛^{1,3}

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 国家气候中心, 北京 100081

³ 中国科学院大学, 北京 100049

摘 要 区域海气耦合模式是研究局地海气相互作用过程影响气候变率的重要平台, 也是对全球气候模式进行“动力降尺度”的重要工具。本文介绍了 LASG (State Key Laboratory of Numerical Modeling for Atmospheric Sciences and Geophysical Fluid Dynamics) /IAP (Institute of Atmospheric Physics) 发展的区域海气耦合模式 FROALS (Flexible Regional Ocean–Atmosphere–Land System model), 并总结了过去五年围绕该区域海气耦合模式开展的研究工作。FROALS 的特点之一是有两个完全不同的大气模式分量和海洋模式分量选项, 可以适应不同的模拟研究需求。针对区域海气耦合模式在西北太平洋地区的模拟偏差, 通过分步骤考察不同大气模式分量和不同海洋模式分量对模式模拟性能的影响, 指出大气模式是导致区域海气耦合偏差的主要分量。通过改进对流触发的相对湿度阈值标准, 有效地改善了此前区域海气耦合模式在亚洲季风区普遍出现的“模拟海温冷偏差”。改进的 FROALS 对西北太平洋地区的大气和海洋环境有较好的模拟能力, 合理地再现了西北太平洋地区表层洋流气候态和年际变率。较之非耦合模式, 考虑区域海气耦合过程后, 改进了东亚和南亚地区的降水和热带气旋潜势年际变率的模拟。最后, 针对东亚–西北太平洋地区, 利用 FROALS 对 IAP/LASG 全球气候模式模拟和预估的结果进行了动力降尺度, 得到了东亚区域 50 km 高分辨率区域气候变化信息。分析显示, FROALS 模拟得到的东亚区域气候较之全球气候模式和非耦合区域气候模式结果具有明显的“增值”, 显示出区域海气耦合模式在该区域良好的应用前景。

关键词 亚洲季风 区域海气耦合模式 模式偏差 季风的模拟和预估

文章编号 1006-9895(2016)01-0086-16

中图分类号 P467

文献标识码 A

doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1508.15153

Development and Application of a Regional Atmosphere–Ocean Coupled Model (FROALS): A Review

ZHOU Tianjun¹, ZOU Liwei¹, HAN Zhenyu², LIU Bo^{1,3}, and YAO Junchen^{1,3}

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, Beijing 100081

³ University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049

Abstract Regional ocean–atmosphere coupled models (ROAMs) are an important tool for understanding the impacts of regional air–sea interactions on monsoon variability, as well as for the dynamical downscaling of global climate models. A

收稿日期 2015-03-11; **网络预出版日期** 2015-08-27

作者简介 周天军, 男, 1969 年出生, 研究员, 主要从事气候模拟、海气相互作用、亚澳季风变率和东亚气候变化研究。E-mail: zhoutj@lasg.iap.ac.cn

资助项目 国家自然科学基金项目 41420104006、41205080, 海洋公益性行业科研专项 201105019-3

Founded by National Natural Science Foundation of China (Grants 41420104006, 41205080), Ocean Projects of Public Science and Technology Research (Grant 201105019-3)

review is presented on the development and application of a ROAM developed at the State Key Laboratory of Numerical Modeling for Atmospheric Sciences and Geophysical Fluid Dynamics (LASG), Institute of Atmospheric Physics (IAP), Chinese Academy of Sciences, named FROALS (Flexible Regional Ocean–Atmosphere–Land System model). The major advantage of FROALS is that it consists of two atmospheric model components and two oceanic model components. By using this flexible model system, the effects of different atmospheric model components and different oceanic model components on the ROAM simulations over the western North Pacific have been investigated. Results suggest that simulated biases in FROALS are mainly contributed by the atmospheric model component. The cold biases of simulated SST in FROALS are significantly reduced when the convection suppression criterion is applied. The advanced FROALS shows reasonable performance over the western North Pacific. The climatology and interannual variability of upper-level ocean currents over the western North Pacific are reproduced well. Compared with the uncoupled simulation, the regionally coupled simulation exhibits improvements in the interannual variability of rainfall and tropical cyclone genesis potential index over the WNP. Finally, FROALS has been used to dynamically downscale the present-day climate simulation and future climate projections of the IAP/LASG global climate system model. Preliminary analysis indicates that the regional climate over East Asia derived from FROALS is better than those derived from global climate models and the uncoupled regional model, indicating that FROALS has good application prospects over this region.

Keywords Asian monsoon, Regional ocean–atmosphere coupled model, Model bias, Simulation and projection of Monsoon

1 引言

区域气候模式是进行区域气候变率机理研究、进行高分辨率区域气候变化预测和预估的重要工具。自 20 世纪 80 年代末 Dickinson 和 Giorgi 等提出区域气候模拟的构想以来 (Dickinson et al., 1989; Giorgi, 1990), 区域气候模式得到了快速发展。区域气候模式的范畴, 已经从单纯的大气模式, 逐渐拓展到区域海洋—大气耦合模式、区域气候模式与气溶胶/化学模块、动态植被模块、水文模块等的耦合 (IPCC, 2013)。区域气候模拟研究领域的国际合作也空前活跃, 设立了诸多针对区域气候模式的合作计划, 例如, 针对东亚区域有 Fu et al. (2005) 发起的 RMIP (Regional Climate Model Intercomparison Project for Asia) 计划, 目前正在进行的是该计划的第三阶段 (Niu et al., 2015)。在全球范围, “联合区域降尺度计划” (COordinated Regional Downscaling Experiment, 简称 CORDEX) 是世界气候研究计划 WCRP 最新发起的针对“降尺度”预估的国际合作计划。在动力降尺度方面, 该计划旨在通过制定统一的模式评估和气候预估框架, 基于 CMIP5 全球模式的多模式、多情景预估结果, 利用区域气候模式, 获得全球不同地区的高分辨率区域气候变化信息 (Giorgi et al., 2009; Jones et al., 2011)。CORDEX 计划在 CMIP5 之后, 有望在 CMIP6 中继续实施。

亚洲季风区复杂的海陆分布使得亚洲季风的

模拟成为一个国际难题 (Yu et al., 2000; Zhou and Li, 2002; 符淙斌等, 2004; 高学杰等, 2006; Sperber et al., 2013)。近年来的研究表明, 季风模拟难题和该区域的复杂海气相互作用过程有关。采用海温驱动大气模式的动力前提, 是该区域的海气相互作用主要表现为海洋对大气的强迫。但是, 资料诊断和模拟研究表明, 在东亚—西北太平洋季风区, 夏季的海气相互作用主要表现为大气对海洋的强迫, 换言之, 主要表现为季风驱动海洋 (Wang et al., 2005; Wu et al., 2009)。因此, 考虑局地海气相互作用过程对亚洲季风尤其是夏季风降水和环流的模拟十分重要 (Zhou et al., 2009)。基于全球气候模式所开展的有、无海气耦合过程的模拟试验比较分析证明, 考虑海气相互作用过程后, 无论对于季风降水的气候态还是年际变率都有显著改进 (Song and Zhou, 2014a, 2014b), 印度夏季风降水的预报技巧亦有显著改进 (Krishna Kumar et al., 2005)。

基于上述全球模式的研发经验, 近年来, 学术界开始注重在针对亚洲区域的区域气候模拟中考虑海洋过程。邹立维和周天军 (2012a) 归纳总结了当今国内外主要的区域海气耦合模式, 其中针对亚洲区域的区域海气耦合模式有 10 个, 占了总数的 50% 以上。诸多研究表明, 较之未耦合模式, 区域海气耦合模式在亚洲季风降水和环流的模拟方面显示出一定的优势。例如, 考虑印度洋地区的局地海气耦合过程后, 改善了印度洋地区降水和海表热收支的模拟 (Ratnam et al., 2009); 针对东亚区域

的区域海气耦合模式研究表明,东亚近海局地海气相互作用过程的引入,改进了长江流域和华南降水的模拟(王倩怡和张耀存, 2008; Yao and Zhang, 2010; 房永杰和张耀存, 2011)、改善了东亚地区降水年际变率的模拟(Li and Zhou, 2010)以及西北太平洋地区夏季降水气候态和年际变率的模拟(Zou and Zhou, 2013)。区域海气耦合模式亦被用于研究东亚夏季降水的季节内变化过程(Fang et al., 2013)、中国南方的一次暴雪过程(Liao and Zhang, 2013)、东亚季风的水汽输送过程(Yao et al., 2013)、东亚局地海气相互作用过程(Huang et al., 2012)。因此,区域海气耦合模式在亚洲区域有着广阔的应用前景。

中国科学院大气物理研究所(IAP)大气科学和地球流体力学数值模拟国家重点实验室(LASG)长期致力于气候模式的发展,其全球气候系统模式参与了包括 CMIP5 在内的历次“国际耦合模式比较计划”(CMIP),是在过去 30 年持续参加了所有各次 CMIP 计划的、国际上仅有的约 10 个模式之一,模式结果被历次“政府间气候变化专门委员会”(IPCC)评估报告所引用(周天军等, 2014; Zhou et al., 2014)。不过受高性能计算资源的限制,当前用于长期气候模拟的全球模式的分辨率多在 200 km 左右,难以满足东亚复杂地形区的气候模拟需求。因此,为了适应东亚—西北太平洋气候加密模拟研究的需要,最近五年来, LASG 着手发展了一个区域海气耦合模式 FROALS (Flexible Regional Ocean–Atmosphere–Land System model),作为对 LASG 全球气候系统模式的模拟和预估结果进行动力降尺度模拟的工具。利用 FROALS 模式,针对亚洲季风区,围绕模式模拟偏差和改进、局地海气耦合过程对夏季风模拟的影响、未来气候变化的降尺度预估等,开展了系统的研究。本文的目的,是在概述该模式基本特点的基础上,总结基于该模式所开展的科学研究的主要结论,展望其未来发展,为区域海气耦合模式的未来发展和应用提供参考。

2 区域海气耦合模式 FROALS 简介

FROALS 是一个基于国际通用耦合器 OASIS3 (Valcke, 2006) 的灵活的区域海气耦合模式系统(图 1)。该区域海气耦合模式系统有两个大气模式分量和两个海洋模式分量可供选择。在大气模式分量中,一个为 IAP/LASG 发展的区域气候模式

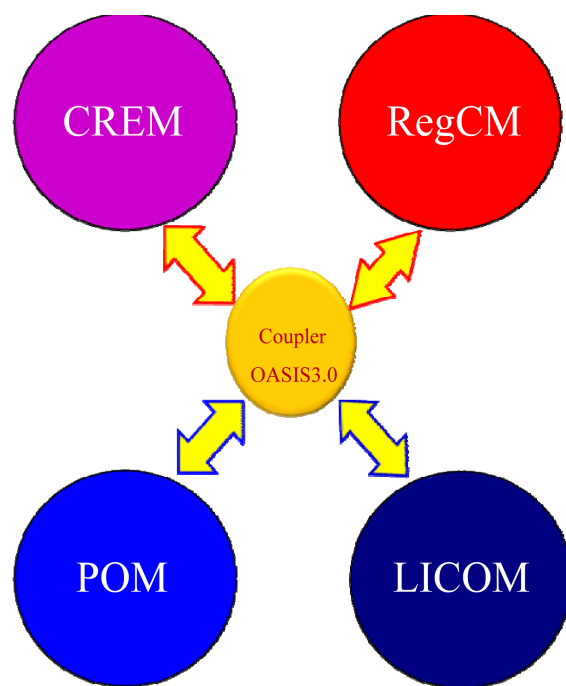


图 1 LASG 发展的区域海气耦合模式 FROALS (Flexible Regional Ocean–Atmosphere–Land System) 框架。模式基于耦合器 OASIS, 并由两个完全不同的大气模式分量和海洋模式分量组成。大气模式分量包括 LASG 发展的区域气候模式 CREM (Climate version of the Regional Eta Model) 和意大利 ICTP (International Centre for Theoretical Physics) 发展的 RegCM3。海洋模式分量包括普林斯顿大学发展的 POM2000 和 LASG 发展的全球海洋模式 LICOM2

Fig. 1 Configuration of FROALS, which is coupled through the Ocean–Atmosphere–Sea Ice–Soil (OASIS3.0) coupler. The atmospheric component has two options: the climate version of the Regional Eta Model (CREM) developed by LASG/IAP, and the Regional Climate Model version 3 (RegCM3) developed by the International Centre for Theoretical Physics (ICTP) in Italy. The oceanic component also has two options: the POM2000 oceanic model developed by Princeton University, and the LICOM2.0 Climate Ocean Model developed by LASG/IAP

CREM (Climate version of Regional Eta Model) (Shi et al., 2009), 另一个为意大利 ICTP (Abdus Salam International Centre for Theoretical Physics) 发展的区域气候模式 RegCM3 (Pal et al., 2007)。在海洋分量中,一个为美国普林斯顿大学发展的 POM2000 (Mellor, 2004), 另一个为 LASG/IAP 发展的全球海洋模式 LICOM2.0 (Liu et al., 2012)。多个大气分量模式和海洋分量模式的配置,将有利于针对特定问题选择合适的分量模式,同时也便于在同一框架下讨论不同大气分量模式和海洋分量模式对区域海气耦合模式性能的影响,分析模式模拟偏差的来源,减少模拟结果的不确定性。为了便于讨论,下文将 RegCM3 与 POM 耦合的版本,简称

“RegCM3-POM”, 其它耦合配置以此类推。

在 FROALS 耦合模式中, 大气模式分量提供海表风应力、潜热、感热、海表净短波辐射及海表净长波辐射给海洋模式, 而海洋模式则反馈预报的 SST 给区域大气模式。由于耦合过程中未考虑淡水通量, 因此, 模式的海表盐度向观测的 Levitus (1982) 气候态恢复。当大气模式分量和海洋模式分量采用不同的水平分辨率时, 在通量交换过程中, 采用 “mosaic” 面积加权插值方法 (Valcke, 2006) 以保证通量交换的守恒。

3 模式性能的优化

3.1 海温的冷偏差问题

在亚澳季风区, 与全球海气耦合模式类似, 区域海气耦合模式普遍存在 “模拟海温冷偏差” 问题 (Ren and Qian, 2005; Ratnam et al., 2009; Li and Zhou, 2010; Fang et al., 2010; 房永杰和张耀存, 2011)。前人关于冷偏差成因的讨论可归纳如下:

(1) 区域大气模式提供的海表热通量与海洋模式所需的热通量不一致 (Ren and Qian, 2005; Fang et al., 2010); (2) 海表入射太阳辐射的模拟偏差 (Li and Zhou, 2010); (3) 海温对大气模式偏差的调整, 使得海洋和区域大气模式之间达到更好的平衡 (Ratnam et al., 2009)。但是围绕着如何有效地减少区域海气耦合模式在该地区的模拟偏差、并进而改进区域海气耦合模式的性能, 则并不清楚。我们使用 FROALS 模式, 围绕着海温冷偏差问题, 进行了以下研究工作。

首先基于 1998 年暖季, 针对西北太平洋地区 ($0^{\circ}\sim 40^{\circ}\text{N}$, $105^{\circ}\text{E}\sim 160^{\circ}\text{E}$), 分步骤讨论了不同大气模式分量和不同海洋模式分量对区域海气耦合模式模拟性能的影响。采用相同的海洋模式 POM2000, 与不同大气模式耦合 (CREM 和 RegCM3) 后, 模拟 SST (Sea Surface Temperature) 的偏差截然相反 (邹立维和周天军, 2012b)。CREM 耦合海洋模式 POM2000 后模拟的中国南海和菲律宾岛以东海域海温偏暖, 最大可达 2.5°C ; RegCM3 耦合海洋模式后模拟的中国南海和日本岛以南大片海域海温偏冷, 最大偏冷亦可达 2.5°C 。而 RegCM3 耦合不同海洋模式分量 (POM2000 和 LICOM2) 的结果显示, RegCM3-POM 与 RegCM3-LICOM2 模拟的 SST 偏差及海表热通量场高度相似 (Zou and Zhou, 2014)。这一结果表明, 决定耦合

模式海温模拟偏差的过程, 主要来自大气模式, 而不同海洋模式对区域海气耦合模式性能的影响相对较弱。

诊断分析表明, 气候模式对海洋区域温湿垂直廓线的模拟偏差是导致耦合后海温出现偏差的重要原因。CREM (RegCM3) 模拟的低层大气偏暖偏湿 (干冷), 使得海表潜热偏少 (多), 低层大气层结较之观测更不稳定 (稳定), 导致低层云量偏少 (多), 到达海表的净短波辐射偏多 (少)。这相当于一个潜在的热源 (冷源)。一旦开始与海洋耦合, 这个热源 (冷源) 会使模拟的 SST 升温 (降温), 产生暖 (冷) 偏差 (邹立维和周天军, 2012b)。

温湿廓线的模拟偏差与对流降水参数化过程的描述不同有关。为减少 RegCM3 耦合海洋模式后的模拟海温冷偏差, 在 RegCM3 的 Grell 对流参数化方案中引入了基于相对湿度的对流抑制过程 (Zou and Zhou, 2011)。Grell 对流参数化方案中对流的触发仅依赖于模式大气的不稳定度, 而在观测中有些大尺度环境条件 (如西北太平洋夏季副热带高压控制下的干区) 并不利于对流过程的发生 (Markowski et al., 2006), 因此, Grell 方案会高估对流发生的频率。引入对流抑制过程后, 当云顶至云底平均的相对湿度大于某个阈值时, 方允许对流发生。

针对西北太平洋地区, 利用 RegCM3-POM 考察了区域海气耦合模式对不同的对流阈值的敏感性。图 2 给出参照试验和敏感性试验模拟的 1998 年 5~8 月平均 SST。由图可见, 当相对湿度阈值设为大于 0.65 (0.75) 后, 显著减少了参照试验在菲律宾岛以东 (南中国海) 的 SST 冷偏差 (图 2)。更强的对流抑制会更为有效地令模拟的海温偏暖, 缓解参照试验中模拟海温的冷偏差。考虑对流抑制后, 大气中云量减少, 使得更多的太阳辐射达到海面, 海表净短波辐射的增加是导致模拟海温改善的主要原因 (Zou and Zhou, 2011)。

如何获得最佳的对流抑制阈值? 我们以卫星观测资料为标准, 通过诊断模拟的对流云降水比例 (对流降水占总降水的比例) 来确定最佳对流阈值。图 3 给出 1998 年 5~8 月平均的区域平均模式模拟的和卫星 TRMM3A12 的对流云降水比例。敏感性试验表明, 对流抑制越强, 伴随对流云的降水贡献愈少。当相对湿度阈值设定为 0.70 时, 模式能较好地再现观测中的对流云降水比例。因此, 在

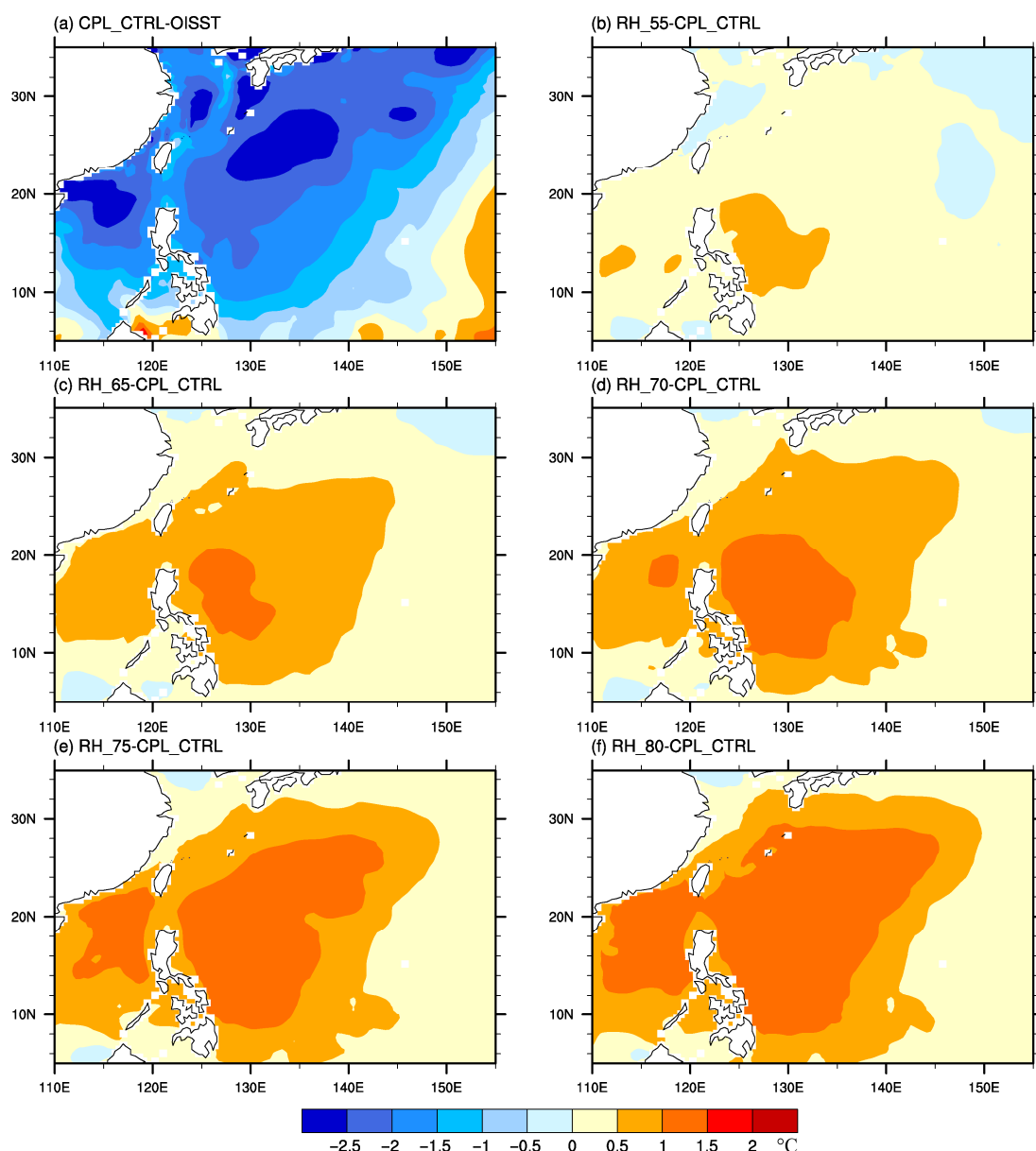


图 2 (a) 1998 年 5~8 月平均的参照试验与观测海表温度之差 (单位: $^{\circ}\text{C}$); (b-f) 考虑对流抑制过程后, 各敏感性试验与参照试验模拟海表温度之差 (单位: $^{\circ}\text{C}$) [基于 Zou and Zhou (2011) 重新绘制]。CPL_CTRL 代表参照试验, RH_55、RH_65、RH_70、RH_75、RH_80 代表不同相对湿度阈值敏感试验

Fig. 2 (a) Spatial distribution of SST difference (units: $^{\circ}\text{C}$) between FROALS using RegCM3 coupled with POM and the observation (Optimum Interpolation Sea Surface Temperature) averaged from May through August 1998. Five sets of sensitivity experiments with convection suppression criteria based on the averaged RH from the cloud base to top were designed. (b-f) SST difference (units: $^{\circ}\text{C}$) between sensitivity experiments with different threshold values (from 55% to 80%) and FROALS [modified based on Zou and Zhou (2011)]. CPL_CTRL represents control experiment; RH_55, RH_65, RH_70, RH_75, and RH_80 represent the sensitivity experiments with different threshold values

FROALS 的标准版本中, 我们将相对湿度的阈值设定为 0.70 (Zou and Zhou, 2011)。

综上所述, 区域海气耦合模式在亚洲季风区通常出现的模拟 SST “冷偏差”, 部分是由于区域大气模式中对流发生过频。基于卫星资料改进对流触发的相对湿度阈值后, 不仅减少了区域海气耦合模

式模拟的 SST 冷偏差, 同时改善了模式模拟的对流云降水比例。上述工作, 为改善区域海气耦合模式在亚洲季风区的模拟性能提供了一个有效途径。

3.2 对流参数化方案中关键参数的自动优化

以卫星观测资料为标准, 通过诊断模式中对流降水占总降水的比例来确定最佳对流阈值, 被证明

是一种有效的优化途径 (Zou and Zhou, 2011)。但是, 这种人工判断最优参数的方法工作量大、耗费的计算资源大, 结果又受主观性影响大。近年来, 国际在参数优化方面的主流方法是快速收敛到最优参数的采样方法。针对东亚夏季风的降水模拟难题, 我们利用快速模拟退火 (MVFS) 的采样技术, 针对 RegCM 的 MIT-Emanuel 对流参数化方案在 CORDEX 的性能进行了优化 (Zou et al., 2014)。选择的七个参数基于前人的敏感性试验, 可分为三类: 第一类在对流参数化过程中考虑大尺度环境场的影响, 第二类为对流参数化方案中控制对流质量通量和云水雨水转换百分比的参数, 第三类为层云方案中控制格点尺度云生成的湿度参数。以 1998 年夏季为例, 研究结果显示, 优化后的夏季平均降水较之参照试验 (默认设定) 有一定程度的改进 (改善幅度 20%)。优化试验极大缓解了参照试验中西北太平洋地区和孟加拉湾地区模拟降水偏多的误差, 并且改进了参照试验在 ITCZ (InnerTropical Convergence Zone) 地区降水模拟偏少的误差。进一步分析了分区降水对七个参数的敏感性, 总体而言, 对第一类参数最为敏感。优化的参数不仅适用于极端个例 (1998 年夏季), 而且适用于正常年份 (2005 年夏季), 同时也适用于 RegCM 新版本的模式 (RegCM4)。

3.3 采用谱逼近方法订正大气环流模拟偏差

区域气候模式的环流模拟容易出现较大偏差, 从而影响降水模拟效果; 区域越大, 模拟的环流偏差也越大。环流场的模拟改进问题是提升区域气候模式性能的瓶颈之一。区域气候模式的大尺度信息主要来自于侧边界, 如何合理给定侧边界强迫是改进环流模拟效果的关键。除了尽可能地减小模式区

域, 或选用更优的侧边界嵌套方案之外, 由于高空偏差主要出现在大尺度波动, 故国际上开始把谱逼近的方法运用到区域气候模式中, 即在模式高层将大尺度波动向强迫场恢复, 区域气候模式只负责中小尺度波动的模拟。我们尝试在 FROALS 模式的大气分量 RegCM3 的风场采用谱逼近方法, 并以 2003 年的江淮梅雨过程为例, 检验了谱逼近方法对模拟效果的改进能力 (曾先锋和周天军, 2012)。结果表明, 采用谱逼近方法后, 模拟技巧得到显著提高, 能明显改进模式对梅雨过程的模拟能力, 有效地减少了原来存在的模式模拟的梅雨期环流和梅雨锋偏北导致降水偏北的偏差问题。此外, 围绕谱逼近方法中权重函数及其强度系数的作用问题, 我们进行了敏感性数值试验, 发现谱逼近方法的改进效果主要决定于强度系数的选择。

不过, 我们的研究也发现, 谱逼近方法并非万能的, 它不能完全解决区域气候模拟面临的问题。谱逼近方法的优点在于, 它能够保证大气环流更接近强迫场, 也能较大幅度地改进模式对梅雨期降水位置和强度的模拟, 但是对于与模式物理过程联系更紧密的低层大气温度及高温高湿中心等模拟, 该方法的作用并不明显, 进一步的改进有赖于模式物理过程的完善。

4 FROALS 在西北太平洋地区的模拟性能评估

4.1 试验设计

为克服耦合系统区域海洋模式侧边界对长期积分的影响, 采用改进对流参数化方案的 RegCM3 和 LICOM2 耦合的模式构架。在西北太平洋地区, RegCM3 和 LICOM2 为完全耦合。在其它区域, 海

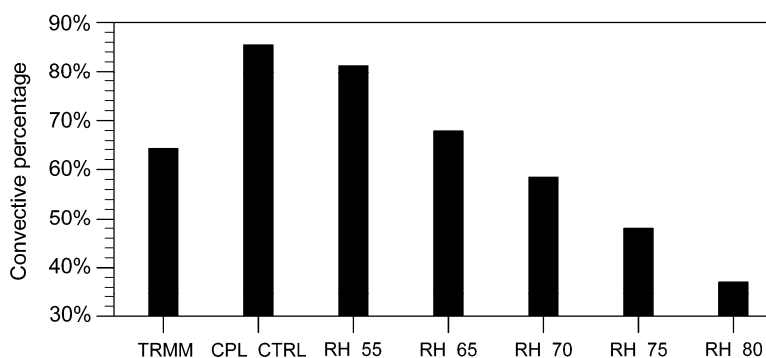


图3 区域平均的 1998 年 5~8 月平均对流降水比例 (对流降水占总降水的比例) [基于 Zou and Zhou (2011) 重新绘制]。其中 TRMM 为观测资料

Fig. 3 Regionally averaged convective percentages (defined as the percentage of total rainfall that is convective rainfall) of rainfall averaged from May to August 1998 [modified based on Zou and Zhou (2011)]. TRMM represents observations

洋模式读入日平均的 NCEP2 再分析资料海表风场和温度场,通过总体公式 (Large and Yeager, 2004) 计算得到海洋模式运行所需的海表风应力及热通量。RegCM3 运行所需的侧边界条件来自 6 小时的 NCEP2 (National Centers for Environmental Prediction 2) 再分析资料 (Kanamitsu et al., 2002)。大气模式的水平分辨率为 45 km, 海洋模式纬向分辨率为均匀的 1° , 经向分辨率由南北纬 10° 之间 0.5° 逐渐过渡到南北纬 20° 之外的 1° 。模式耦合模拟积分的时段为 1982~2007 年 (Zou and Zhou, 2013)。为比较耦合前后的区别, 单独区域大气模式 (RegCM3) 也积分相同时间长度 (1982~2007 年), 所用的下边界 SST 资料来源于周平均的 OISST2 (Optimum Interpolation Sea Surface Temperature V2) (Reynolds et al., 2002)。

4.2 降水年际变率

图 4 给出西北太平洋中心区 ($10^\circ\text{N}\sim 25^\circ\text{N}$, $120^\circ\text{E}\sim 150^\circ\text{E}$)、中国南海地区 ($5^\circ\text{N}\sim 20^\circ\text{N}$, $110^\circ\text{E}\sim 120^\circ\text{E}$) 降水距平百分比的年际变化序列。

未耦合试验对西北太平洋中心区降水年际变化模拟能力有限, 与观测的相关系数仅为 0.14。耦合模式则改善了该地区降水年际变率的模拟, 与观测的相关系数提高至 0.50, 超过了 95% 的信度检验水平。

在中国南海地区亦为如此。未耦合试验明显高估了降水变率振幅, 与观测的相关系数为 0.37。耦合后, 减小了模拟降水年际变率的振幅, 与观测更加接近, 和观测的相关系数提高至 0.55。由此可见, 海气耦合过程改善了西北太平洋地区降水年际变率的模拟。这是由于区域海气耦合模式减少了非耦合的大气模式对观测的海温虚假的、偏强的响应, 因此改善了对降水的模拟 (Zou and Zhou, 2013)。

4.3 热带气旋潜势

热带气旋潜势指数 (GPI) 可以合理刻画热带气旋生成的位置与范围, 被广泛应用于评估气候系统模式对热带气旋的模拟, 特别是全球气候模式的模拟性能 (Tian et al., 2013)。图 5 给出观测和模拟的 1982~2007 年 6~8 月平均 GPI 值 EOF

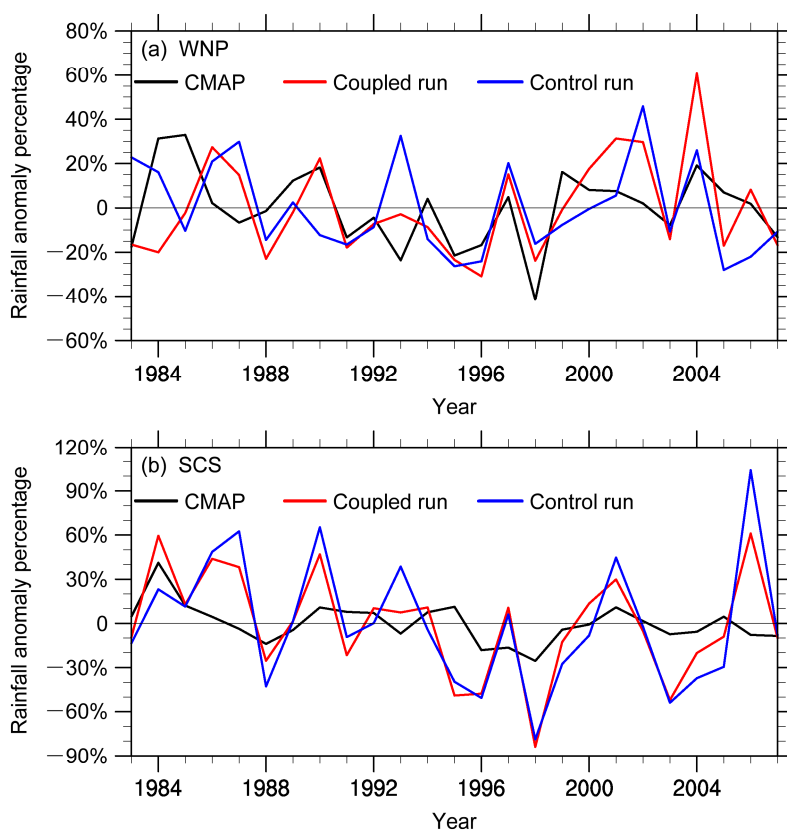


图 4 (a) 西北太平洋地区 ($10^\circ\text{N}\sim 25^\circ\text{N}$, $120^\circ\text{E}\sim 150^\circ\text{E}$)、(b) 中国南海地区 ($5^\circ\text{N}\sim 20^\circ\text{N}$, $110^\circ\text{E}\sim 120^\circ\text{E}$) 降水距平百分比的年际变化[基于 Zou and Zhou (2013 重新绘制)]

Fig. 4 Percentage variations of rainfall anomalies relative to rainfall climatology averaged over the (a) western North Pacific (WNP; $10^\circ\sim 25^\circ\text{N}$, $120^\circ\sim 150^\circ\text{E}$) and (b) South China Sea (SCS; $5^\circ\sim 20^\circ\text{N}$, $110^\circ\sim 120^\circ\text{E}$) [modified based on Zou and Zhou (2013)]

(Empirical Orthogonal Function) 主模态。观测中大致沿 20°N 成南北反位相分布的偶极子型 (图 5a), 在区域海气耦合模式和非耦合模式中都有再现, 但在非耦合模式中, 该偶极子型位置偏北、日本南部振幅偏强、南海季风槽地区振幅偏弱 (图 5b)。在区域海气耦合模式中, 除对中国南海区域强度模拟偏强外, 整体型态与观测更为接近, 特别是南海季风槽地区 (图 5c)。观测中, 该模态主要受到 ENSO 的调制。观测中 EOF 第一模态对应的时间序列与 Niño3.4 指数、南海夏季风指数的相关系数分别为 0.58、0.64 (图 5d), 表明 ENSO 通过影响季风槽而影响热带气旋的活动。区域海气耦合模式对该模态年际变率的模拟较之非耦合模式明显改善, 其与观测的相关系数为 0.76, 而非耦合试验仅为 0.53。分析表明, 这是因为区域海气耦合模式模拟的南海季风槽年际变率优于非耦合模式, 其模拟南海夏季风指数和 GPI 主模态时间序列与观测的南海夏季风指数的相关为 0.84 与 0.83, 而非耦合模式仅为 0.77 和 0.22 (姚隽琛等, 2015)。

4.4 西北太平洋海洋环流

西北太平洋地区有着较为复杂的海洋环流系统, 主要包括北赤道流 (North Equatorial Current, 简称 NEC) 及其南北分支——棉兰老流 (Mindanao Current, 简称 MC) 和黑潮 (Kuroshio Current, 简称 KC), 这两支强西边界流是热带、副热带环流的重要组成部分, 在海表热收支和跨纬度热输送中起着重要作用。图 6 给出观测和模拟的 1984~2007 年夏季 (6~8 月) 平均的表层洋流场和海表高度场。就气候态情形而言, 区域海气耦合模式能够再现这一地区的基本洋流型, 其中模拟的 NEC 与观测的范围和强度较为一致 (图 6b), KC 和 MC 的路径也能够较好地刻画。但是, 模式模拟的洋流亦存在一定的偏差, 包括模式模拟的 KC 较观测偏强, 而 ME (Mindanao Eddy) 强度较之观测偏弱; 此外, 北赤道逆流的位置也偏南, 而在吕宋海峡以东模式有气旋式的环流偏差。

为检验区域耦合模式对该海域表层洋流的年际变率的模拟能力, 我们对该区域海表流场和海表高度场应用联合 EOF 分析, 其主导模态显示, NEC 和 MC 呈现出一致的变化, 且该主导模态的时间序列与 Niño 3.4 指数有很好的相关 (相关系数可以达到 0.75)。区域海气耦合模式 FROALS 能够较好地再现这一受 ENSO 调控的年际变率信号, FROALS

模拟的主导模态的时间序列与 SODA 和 Niño 3.4 指数的相关可以达到 0.82 和 0.43。这表明 FROALS 模式对西北太平洋海洋环流具有较强的模拟能力。

5 FROALS 在南亚地区的应用

我们还检验了 FROALS 模式对南亚夏季风的模拟能力。为了考察局地海气相互作用过程对南亚夏季风模拟的影响, 对照非耦合试验 (称为 ATM) 设计了一组连续积分的海气耦合试验 (称为 CPL)。CPL 试验范围主要覆盖南亚大陆、青藏高原和部分印度洋。在这组试验中, 采用了 RegCM3 和 POM2000 耦合的模式架构。大气模式的初始和侧边界场基于 ERA-Interim 再分析资料 (Simmons et al., 2007; Uppala et al., 2008) 得到。大气模式的初始场是 1982 年 1 月 1 日 00:00 (协调世界时, 下同) 的大气温压风湿三维场, 侧边界强迫每 6 小时更新。POM2K 的水平分辨率是 0.5° , 垂直方向分为 30 层, 采用辐射侧边界方案 (Flather, 1976)。海洋模式的初始和侧边界场基于 SODA 2.1.4 再分析资料 (Carton and Giese, 2008) 得到。海洋模式的初始场是 1982 年 1 月的 SODA 资料海洋温度、盐度和流场, 侧边界强迫是气候平均的逐月温盐场、正压流和海面高度。海气耦合试验 CPL 从 1982 年 1 月开始, 经过 1 年的模式耦合调整, 连续积分到 2010 年 12 月, 耦合频率是 3 小时 (韩振宇, 2013)。

图 7 为观测和模拟的南亚地区夏季平均降水。GPCP 被用来评估整个区域的夏季平均降水量模拟, 高分辨率 TRMM 资料限于时间长度较短 (1998~2010 年), 仅作为高分辨率降水分布的参考。相比 ATM 试验, CPL 试验中夏季平均降水整体减弱 (图 7)。除了阿拉伯海洋面以及几处陡峭地形处的降水模拟更接近观测, 耦合之后模式降水偏弱的误差被放大、空间分布模拟技巧降低, 空间相关系数从 ATM 的 0.69 降低到 CPL 的 0.58。赤道附近 ITCZ 的模拟偏差最为明显, CPL 模拟结果中赤道 ITCZ 几乎消失, 平均降水量由耦合前的约 4 mm d^{-1} 降至 2 mm d^{-1} (观测数值约是 6 mm d^{-1})。分析发现, 区域大气模式本身存在可降水量系统偏低的误差, 耦合之后偏冷的 SST 使得海面可降水量、向陆地水汽输送进一步降低, 从而造成模拟降水偏弱、偏少 (韩振宇, 2013)。

利用常用的三个南亚夏季风指数评估 FROALS 对年际变率的模拟能力, 分别是降水指数

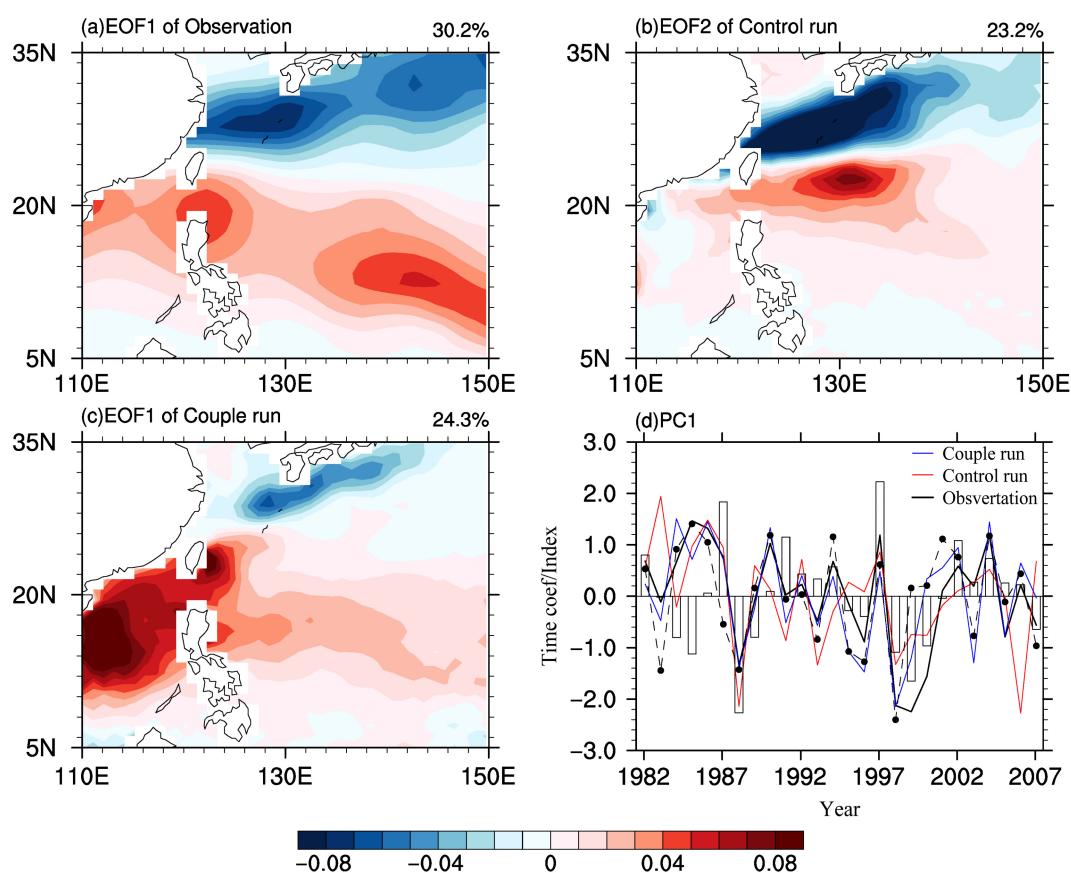


图5 GPI 1982~2007 年的 6~8 月的 EOF 分析 (右上角数字是其模态对应的解释方差): (a) 观测; (b) 参照试验; (c) 耦合试验。 (d) 观测 (黑色实线)、参照试验 (红色实线)、耦合试验 (蓝色实线) 对应的时间序列; 1982~2007 年 6~8 月观测的 Niño3.4 指数 (柱状图) 与南海夏季风指数 (黑色实心圆虚线) [基于姚隽琛等 (2015) 重新绘制]

Fig. 5 The leading mode of EOF for June–August mean GPI during 1982 to 2005 derived from the (a) observation and (c) coupled run. The corresponding mode for the (b) control run is the second mode. Time series for the observation (black solid line), control run (red solid line) and coupled run (blue solid line) are shown in (d), along with Niño3.4 index (bars) and South China Sea monsoon trough index (black dashed line with markers) [modified based on Yao et al. (2015)]

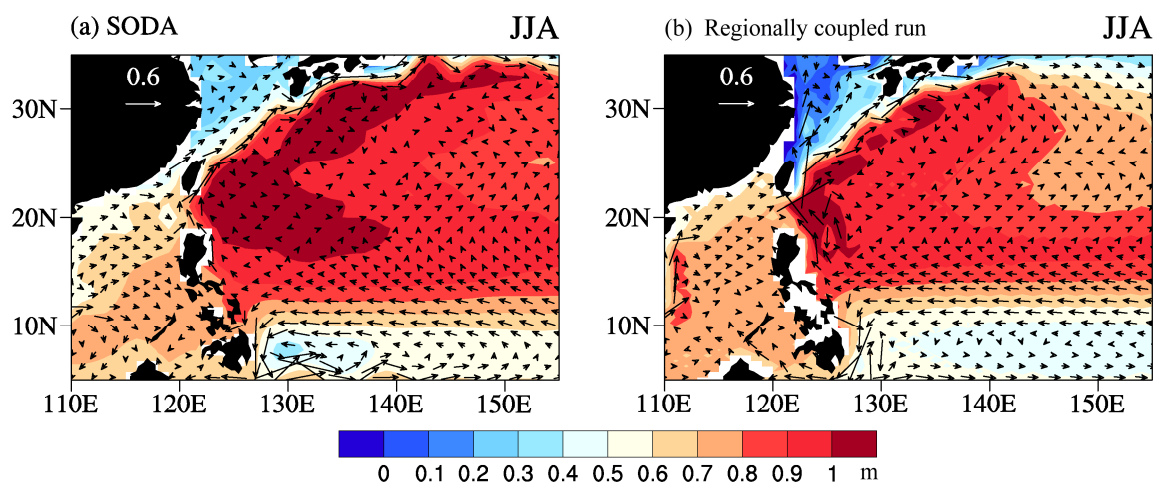


图6 基于 (a) SODA (Simple Ocean Data Assimilation) 资料、(b) FROALS 耦合试验得到的 1984~2007 年夏季 (6~8 月) 平均的海表流场 (箭头, 单位: m s^{-1}) 和海表高度场 (填色, 单位: m) [基于刘博等 (2015) 重新绘制]

Fig. 6 The climatology of JJA (June–July–August) surface currents (vectors; units: m s^{-1}) and sea surface height (shaded; units: m) during 1984–2007 derived from (a) SODA (Simple Ocean Data Assimilation) and (b) FROALS [modified based on Liu et al. (2015)]

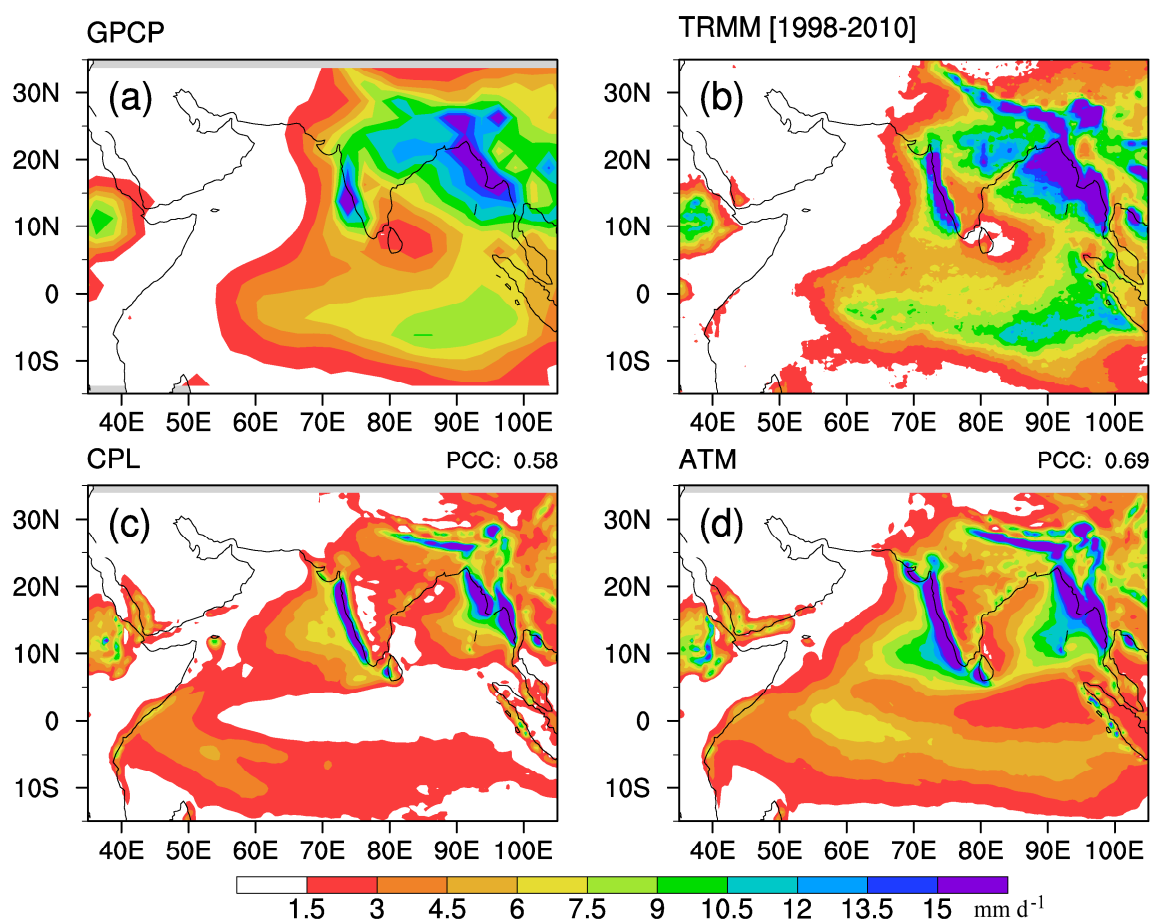


图 7 1983~2010 年多年平均夏季(6~8 月)降水的空间分布(单位: mm d^{-1})[基于韩振宇(2013)重新绘制]: (a)GPCP(Global Precipitation Climatology Project); (b) TRMM (1998~2010 年夏季平均); (c) CPL; (d) ATM

Fig. 7 Spatial distributions [modified based on Han (2013)] of JJA-averaged rainfall during 1983–2010 derived from (a) GPCP (Global Precipitation Climatology Project), (b) TRMM (1998–2010), (c) CPL and (d) ATM

(Goswami et al., 1999)、经向风切变指数 (IMS; Goswami et al., 1999) 和纬向风切变指数 (IZS; Webster and Yang, 1992)。ATM 对降水指数的模拟技巧很低, 与观测的相关系数在 0 附近, 耦合之后相关系数上升为 0.28。耦合之后 IMS 和 IZS 年际变率的模拟也更加接近观测 (表 1)。

表 1 模式模拟南亚夏季风指数年际变化与观测的相关系数

Table 1 Correlation coefficients of the simulated South Asian summer monsoon indices with the observations during 1983–2010

试验	降水指数	IMS	IZS
ATM	0.02	0.35	0.62
CPL	0.28	0.40	0.66

FROALS 在印度洋暖池区的大部分区域模拟

海温显著偏冷, 且模拟结果中净海表热通量的负偏差与偏冷海温相对应。其中净海表热通量的负偏差主要来自感热和潜热通量两项。对热通量相关的海表风速、气温、湿度等气象要素的模拟评估显示, 模式中近海表大气偏干冷是感热和潜热通量模拟负偏差的主要原因 (图 8) (Han et al., 2012)。利用数值试验分离不同海域 SST 模拟偏差对夏季风模拟的影响: 阿拉伯海 SST 冷偏差, 通过降低大气可降水量和海面蒸发减弱了向大陆的水汽输送, 导致耦合试验中南亚夏季降水模拟偏弱; 而赤道印度洋 SST 冷偏差主要减弱了赤道附近的经向环流圈, 导致耦合模式中赤道雨带模拟出现巨大偏差, 但是其影响只局限在 10°N 以南, 并没有通过经向环流调整对南亚季风环流产生影响 (韩振宇, 2013)。

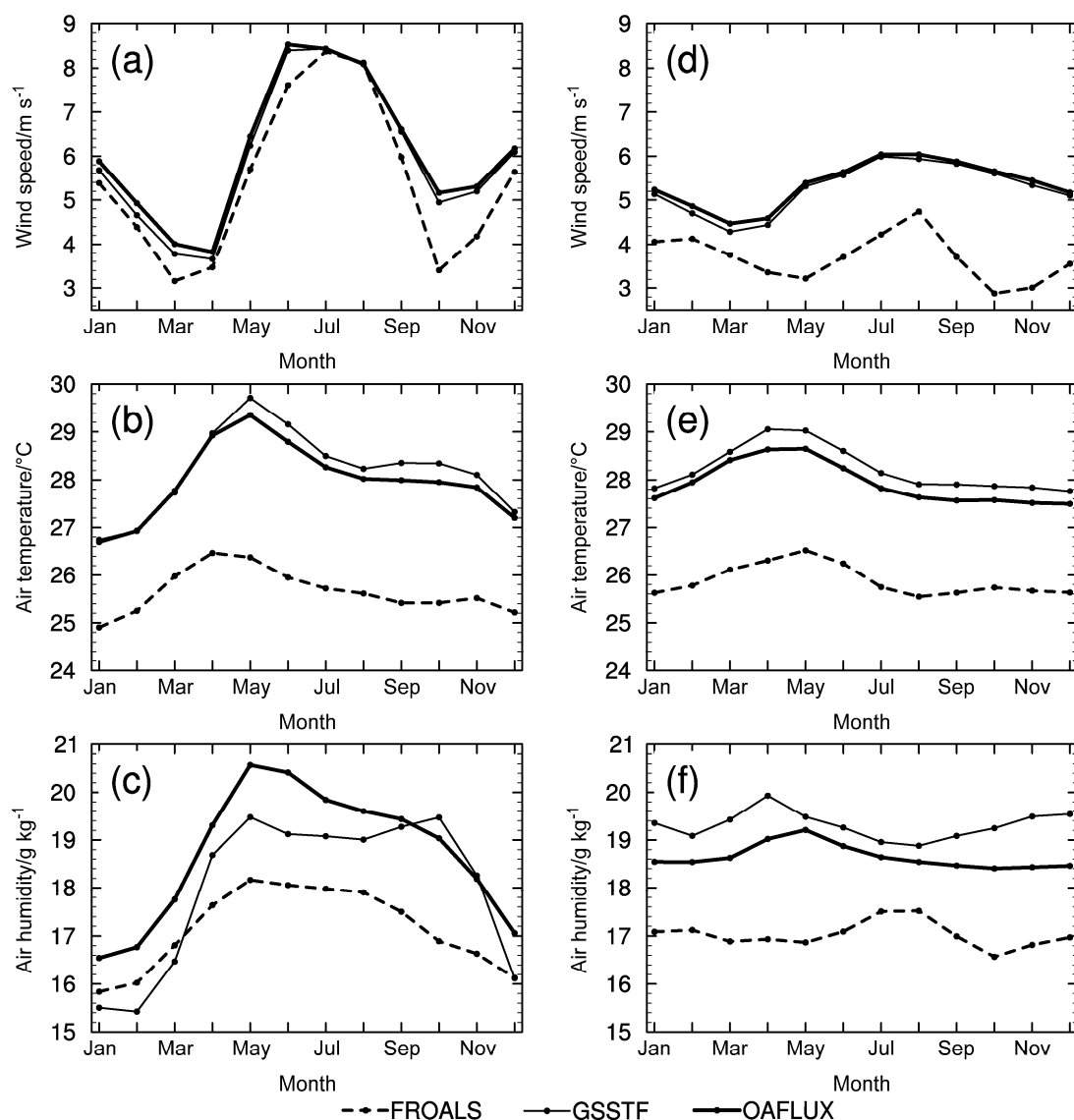


图 8 (a-c) 北印度洋 ($8^{\circ}\text{N}\sim 15^{\circ}\text{N}$, $65^{\circ}\text{E}\sim 97^{\circ}\text{E}$) 和 (d-f) 赤道印度洋 ($5^{\circ}\text{S}\sim 3^{\circ}\text{N}$, $60^{\circ}\text{E}\sim 95^{\circ}\text{E}$) 区域平均的 (a, d) 海表风速、(b, e) 气温和 (c, f) 湿度的季节演变[基于 Han et al. (2012) 重新绘制]。GSSTF 和 OAFLUX 是两套海表通量观测数据

Fig. 8 The seasonal cycle [modified based on Han et al. (2012)] of the (a, d) wind speed (units: m s^{-1}), (b, e) air temperature (units: $^{\circ}\text{C}$), and (c, f) air humidity (units: g kg^{-1}) averaged over (a-c) the northern Indian Ocean and (d-f) equatorial Indian Ocean

6 CORDEX-EA 气候预估试验

国内外学者利用区域气候模式对东亚区域气候变化进行了大量的降尺度模拟和预估研究(石英和高学杰, 2008; 高学杰等, 2010; Zou et al., 2010; Oh et al., 2014)。此前的关于东亚气候的降尺度预估研究, 多未考虑局地海气相互作用过程。此前的模式检验研究表明, 较之未耦合模式, 区域海气耦合模式对东亚—西北太平洋地区降水的模拟有一定优势。那么对东亚—西北太平洋地区未来气候变化

的降尺度预估, 区域海气耦合模式与单独区域模式的结果存在哪些异同点? 区域海气耦合过程对未来气候的降尺度预估有哪些影响?

为回答上述问题, 基于 CORDEX 国际计划的设计, 针对东亚—西北太平洋地区, 利用发展的区域海气耦合模式 RegCM3_LICOM2 和非耦合模式 RegCM3, 对 LASG/IAP 发展的全球气候系统模式 FGOALS-g2 模拟和 RCP4.5/8.5 情景预估的结果分别进行了动力降尺度试验。采用每三十年的片段积分方式, 进行了多组试验(表 2)。

表 2 利用 RegCM3 和 FROALS 对 FGOALS-g2 模拟和预估的结果进行的动力降尺度试验

Table 2 Dynamically downscaling experiments with RegCM3 and FROALS driven by the simulation and projection of FGOALS-g2

模式	FGOALS-g2	动力降尺度试验	
		RCP4.5	RCP8.5
RegCM3	1981~2005 年	2041~2070 年	2041~2070 年
		2011~2040 年	2011~2040 年
		2070~2099 年	2070~2099 年
FROALS	1981~2005 年	2041~2070 年	2041~2070 年
		2011~2040 年	2011~2040 年
		2070~2099 年	2070~2099 年

图 9 给出观测和模拟的 1981~2005 年夏季平均降水量。由于全球气候模式 FGOALS-g2 的空间分辨率较低，对东亚地区夏季降水的模拟存在较大偏差，表现为在青藏高原下游存在虚假降水中心。通过动力降尺度，该偏差在区域海气耦合模式和非耦合模式模拟中都得到明显缓解。考虑区域海气耦合过程后，模式对中国南方和长江流域降水的模拟较之非耦合模式都更为合理。这将增加区域海气耦合

模式降尺度预估的未来气候变化的可信度。

比较 FROALS 和非耦合模式 RegCM3 预估的东亚地区 RCP4.5 情景下 2046~2070 年夏季降水强度的变化，发现 FROALS 预估东亚绝大多数区域降水强度将增加，与非耦合模式相比，差别最大的区域位于中国西北地区东部至黄河中游，非耦合模式预估降水强度将减少。分析表明，这与耦合与非耦合模式预估的环流差异有关，深入的分析工作正在进行中，结果将另文讨论。

7 FROALS 在其他领域的应用

利用高分辨率区域气候模式对全球气候模式季度预测试验的结果进行动力降尺度，是获得局地尺度气候预测信息的重要途径 (Yoon et al. 2011)。利用区域海气耦合模式作为季度预测试验降尺度工具的研究还不多见。LASG/IAP 区域海气耦合模式 FROALS 被作为一种有效的工具，应用于国家海洋公益性行业科研专项项目“中国近海短期气候预测技术及其应用”，对国家海洋局第一海洋研究所 (FIO) 全球气候模式 FIO-ESM 的季度预测试验结

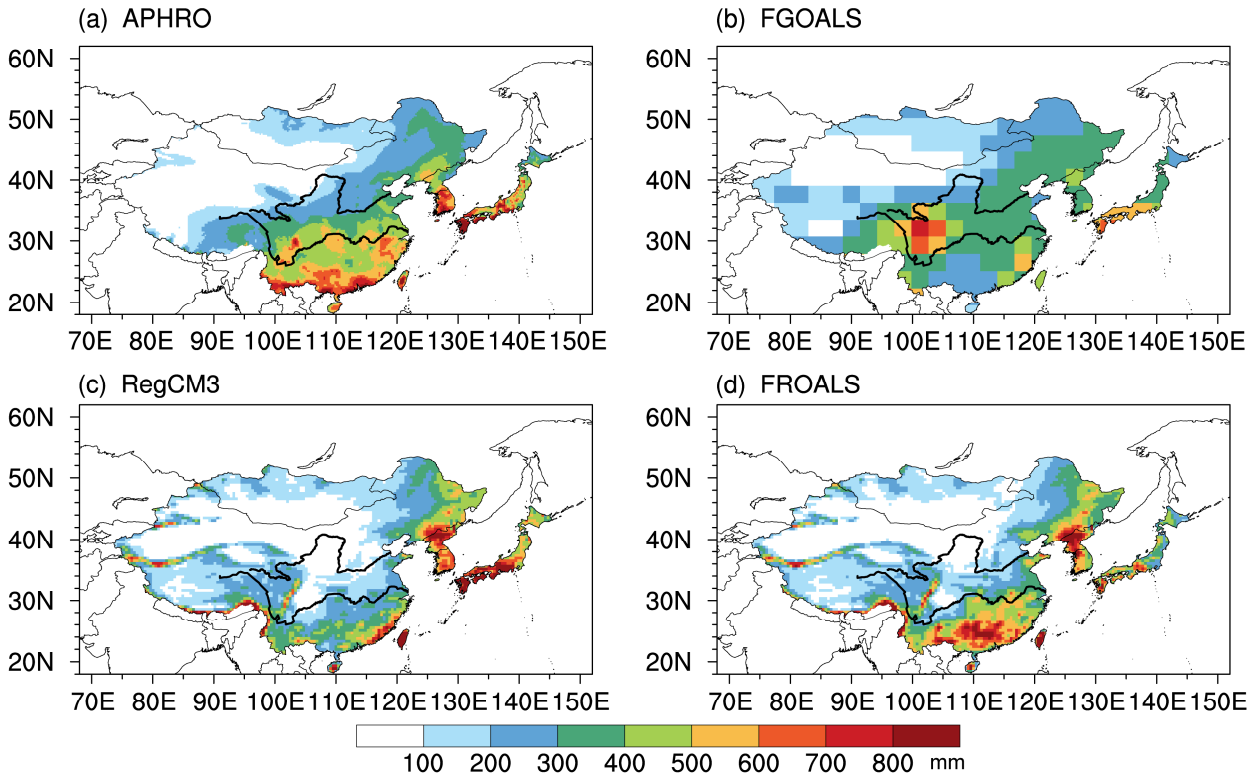


图 9 1981~2005 年东亚地区夏季降水量：(a) APHRO (Asian Precipitation–Highly–Resolved Observational Data); (b) FGOALS (Flexible Global Ocean–Atmosphere–Land system model); (c) RegCM; (d) FROALS

Fig. 9 Spatial distributions of JJA-averaged total precipitation during 1981–2005 derived from (a) APHRO (Asian Precipitation–Highly–Resolved Observational Data), (b) FGOALS (Flexible Global Ocean–Atmosphere–Land system model), (c) RegCM, and (d) FROALS

果进行动力降尺度。区域海气耦合模式动力降尺度得到的结果,被国家海洋环境预报中心用来驱动更高分辨率的海洋—海冰模式,从而得到中国近海高分辨率的海洋、海冰的预测信息。短期气候预测是未来 FROALS 的一个重要潜在应用领域。

此外,我们发展的基于 OASIS 的区域海气耦合技术,还被新加坡—美国麻省理工学院(MIT)联合研究中心(SMART)发展的区域耦合模式 RegCM3-FVCOM 采用,用于南亚边缘海区域海洋和大气环境的模拟研究。

8 结语

随着局地海气耦合过程对东亚季风模拟的重要性被逐步揭示,针对东亚地区的区域海气耦合模式研发及应用近年来发展很快。LASG 在发展全球气候模式的基础上,在过去 5 年发展了一个区域海气耦合模式 FROALS。该模式系统基于耦合器 OASIS 构建,并由两个完全不同的大气模式分量和海洋模式分量组成。利用该模式系统,关注亚洲季风区,围绕区域海气耦合模式模拟偏差及改进、局地海气耦合过程对亚洲夏季风模拟和预估的影响开展了一些工作,总结如下:

(1) 对于西北太平洋地区,在个例模拟试验中,不同海洋模式对区域海气耦合模式性能的影响相对较弱,决定区域海气耦合模式海温模拟偏差的过程,主要来自大气模式。非耦合区域气候模式对温湿垂直廓线模拟的偏差,通过影响海表潜热和净短波辐射的模拟,是导致耦合海温偏差的重要原因。区域海气耦合模式在亚洲季风区普遍存在的模拟海温冷偏差,部分是由于区域气候模式里对流发生频次偏多。引入基于相对湿度的对流抑制过程是改善区域海气耦合模式性能的一条有效途径。

(2) FROALS 对西北太平洋地区海洋和大气环境具有较好的模拟能力,对降水和热带气旋潜势年际变率的模拟技巧较之非耦合模式更高,同时,较好地再现了西北太平洋地区表层洋流气候态和年际变率的模拟。FROALS 对南亚夏季风亦有一定的模拟能力。和非耦合模式相比,FROALS 模拟的南亚夏季风年际变率与观测更为接近,但耦合后的海温冷偏差对南亚地区降水的模拟影响很大。

(3) 利用发展的区域海气耦合模式和非耦合模式,针对东亚—西北太平洋地区,对 FGOALS-g2 模拟和预估的结果进行了每 30 年的动力降尺度。

初步结果显示,在 FGOALS-g2 大尺度环流场驱动下,区域海气耦合模式模拟得到的东亚夏季降水较之非耦合区域气候模式和全球气候模式具有一定的优势,其较好地再现了观测中中国长江流域和南方地区的雨带。预估的 21 世纪中叶东亚气候,较之非耦合模式,在中国西北地区东部至黄河中游地区存在明显差异。

关于未来 FROALS 模式的发展问题:

首先,分辨率持续提高是必然的选择。IAP/LASG 研发该模式的初衷,是基于现有的成熟的区域大气模式和海洋模式,构建一个分辨率明显高于 IAP/LASG 全球气候系统模式 FGOALS 的区域耦合系统,以适应季风区的海气相互作用特点,用于对全球模式的气候模拟和预估结果进行动力降尺度,以满足大气、海洋和水文领域对模拟和预估产品的较高分辨率的需求。未来用于长期气候模拟的全球模式分辨率有望达到 50 km 左右,区域耦合模式的分辨率亦需要得到相应提高。

其次,拓展应用范畴是一个重要方向。IAP/LASG 研发 FROALS 模式的思路,是基于已有的成熟的大气模式和海洋模式,通过调试、优化、构建性能最优的耦合系统,从而满足应用需求。因此,突出应用是该工作的一个特点。当前 FROALS 模式主要用于气候模拟研究和气候预估的动力降尺度,利用该模式对短期气候预测产品进行动力降尺度,亦是未来的重要应用领域之一。国际上已经逐渐开始组织类似的比较计划。

第三,进一步丰富模式内涵。区域气候模式从其诞生之日起,其内涵就持续不断地被丰富,从最初单纯的大气模式,逐渐拓展到区域海洋—大气—陆面耦合模式、区域气候模式与气溶胶/化学模块、动态植被模块、水文模块等的耦合等。国际上已经有区域地球系统模式的提法。未来区域模式将是对全球地球系统模式进行动力降尺度的重要工具。

参考文献 (References)

- Carton J A, Giese B S. 2008. A reanalysis of ocean climate using Simple Ocean Data Assimilation (SODA) [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 136 (8): 2999–3017, doi:10.1175/2007MWR1978.1.
- Dickinson R E, Errico R M, Giorgi F, et al. 1989. A regional climate model for the western United States [J]. *Climatic Change*, 15: 383–422, doi:10.1007/BF00240465.
- 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, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2011.01.02.
- 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]. Adv. Atmos. Sci., 27: 583–593, doi:10.1007/s00376-009-8203-7.
- Fang Y J, Zhang Y C, Huang A N, et al. 2013. Seasonal and intraseasonal variations of East Asian summer monsoon precipitation simulated by a regional air–sea coupled model [J]. Adv. Atmos. Sci., 30 (2): 315–329, doi:10.1007/s00376-012-1241-6.
- Flather R A. 1976. A tidal model of the north–west European continental shelf [J]. Mem. Soc. R. Sci. Liege, 6 (10): 141–164, doi:10.1234/12345678.
- 符淙斌, 王淑瑜, 熊喆, 等. 2004. 亚洲区域气候模式比较计划的进展 [J]. 气候与环境研究, 9 (2): 225–239. Fu Congbin, Wang Shuyu, Xiong Zhe, et al. 2004. Progress report on regional climate model intercomparison project for Asia [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 9 (2): 225–239, doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2004.02.01.
- Fu C B, Wang S Y, Xiong Z, et al. 2005. Regional climate model intercomparison project for Asia [J]. Bull. Amer. Meteor. Soc., 86: 257–266, doi:10.1175/BAMS-86-2-257.
- 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. 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.
- 高学杰, 石英, Giorgi F. 2010. 中国区域气候变化的一个高分辨率数值模拟 [J]. 中国科学: 地球科学, 40 (7): 911–922. Gao Xuejie, Shi Ying, Giorgi F. 2011. A high resolution simulation of climate change over China [J]. Sci. China Earth Sci., 54 (3): 462–472, doi:10.1007/s11430-010-4035-7.
- Giorgi F. 1990. Simulation of regional climate using a limited area model nested in a general circulation model [J]. J. Climate, 3: 941–963, doi:10.1175/1520-0442(1990)003<0941:SORCUA>2.0.CO;2.
- Giorgi F, Jones C, Asrar G R. 2009. Addressing climate information needs at the regional level: The CORDEX framework [J]. WMO Bulletin, 58 (3): 175–183.
- Goswami B N, Krishnamurthy V, Annamalai H. 1999. A broad-scale circulation index for the interannual variability of the Indian summer monsoon [J]. Quart. J. Roy. Meteor. Soc., 125 (554): 611–633, doi:10.1002/qj.49712555412.
- 韩振宇. 2013. 区域海气耦合模式 LASG-FROALS 对南亚夏季气候的模拟和预估研究 [D]. 北京: 中国科学院研究生院博士论文. Han Zhenyu. 2013. Simulation and prediction for the South Asian summer monsoon based on the LASG-FROALS [D]. Ph. D. dissertation (in Chinese), Graduate University of Chinese Academy of Sciences.
- Han Z Y, Zhou T J, Zou L W. 2012. Indian Ocean SST biases in a Flexible Regional Ocean Atmosphere Land System (FROALS) model [J]. Atmos. Oceanic Sci. Lett., 5 (4): 273–279, doi:10.1080/16742834. 2012. 11447012.
- Huang Q, Yao S X, Zhang Y C. 2012. Analysis of local air–sea interaction in east Asia using a regional air–sea coupled model [J]. J. Climate, 25 (2): 767–776, doi:10.1175/2011JCLI3783.1.
- IPCC. 2013. Evaluation of climate models [M]//Stocker T F, Qin D, Plattner G-K, et al. Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA: Cambridge University Press, doi:10.1017/CBO9781107415324.
- Jones C, Giorgi F, Asrar G. 2011. The Coordinated Regional Downscaling Experiment: CORDEX, An international downscaling link to CMIP5 [J]. CLIVAR Exchanges, 16 (2): 34–40.
- Kanamitsu M, Ebisuzaki W, Woollen J, et al. 2002. NCEP–DOE AMIP-II reanalysis (R-2) [J]. Bull. Amer. Meteor. Soc., 83: 1631–1643, doi:10.1175/BAMS-83-11-1631.
- Krishna Kumar K, Hoerling M, Rajagopalan B. 2005. Advancing dynamical prediction of Indian monsoon rainfall [J]. Geophys. Res. Lett., 32: L08704, doi:10.1029/2004GL021979.
- Large W, Yeager S. 2004. Diurnal to decadal global forcing for ocean and sea-ice models: The data sets and flux climatologies [DB]. NCAR Tech. Note NCAR/TN-4601STR, 105pp, doi:10.5065/D6KK98Q6.
- Levitus S. 1982. Climatological atlas of the world ocean [R]. NOAA Prof. Paper 13, Rockville, Md.: U.S. Dept. of Commerce.
- Li T, Zhou G Q. 2010. Preliminary results of a regional air–sea coupled model over East Asia [J]. Chin. Sci. Bull., 55: 2295–2305, doi:10.1007/s11434-010-3071-1.
- Liao Z J, Zhang Y C. 2013. Simulation of a persistent snow storm over southern China with a regional atmosphere–ocean coupled model [J]. Adv. Atmos. Sci., 30 (2): 425–447, doi:10.1007/s00376-012-2098-4.
- 刘博, 周天军, 邹立维, 等. 2015. 区域海气耦合模式 FROALS 模拟的西北太平洋环流及其年际变率 [J]. 海洋学报, 37 (9): 17–28. Liu Bo, Zhou Tianjun, Zou Liwei, et al. Simulation of northwestern Pacific circulation and its variability in a regional ocean–atmosphere model-FROALS [J]. Acta Oceanologica Sinica (in Chinese), 2015, 37 (9): 17–28, doi:10.3969/j.issn.0253-4193.2015.09.003.
- Liu H L, Lin P F, Yu Y Q, et al. 2012. The baseline evaluation of LASG/IAP Climate system Ocean Model (LICOM) version 2 [J]. Acta Meteor. Sin., 26: 318–329, doi:10.1007/s13351-012-0305-y.
- Markowski P, Hannon C, Rasmussen E. 2006. Observations of convection initiation “failure” from the 12 June 2002 IHOP deployment [J]. Mon. Wea. Rev., 134: 375–405, doi:10.1175/MWR3059.1.
- Mellor G L. 2004. Users guide for a three-dimensional, primitive equation, numerical ocean model [R]. Princeton, NJ: Princeton University.
- Niu X R, Wang S Y, Tang J P, et al. 2015. Multi-model ensemble projection of precipitation in eastern China under A1B emission scenario. J. Geophys. Res. Atmos., doi: 10.1002/2015JD023853
- Oh S -G, Park J -H, Lee S -H, et al. 2014. Assessment of the RegCM4 over East Asia and future precipitation change adapted to the RCP scenarios [J]. J. Geophys. Res. Atmos., 119: 2913–2927, doi:10.1002/2013JD020693.
- 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: 1395–1409, doi:10.1175/BAMS-88-9-1395.
- 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. Climato.*, 25: 679–692, doi:10.1002/joc.1137.
- 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, doi:10.1175/1520-0442(2002)015<1609:AHSAS>2.0.CO;2.
- Shi H B, Yu R C, Li J, et al. 2009. Development of a Regional Climate Model (CREM) and evaluation on its simulation of summer climate over Eastern China [J]. *J. Meteor. Soc. Japan*, 87: 381–401, doi:10.2151/jmsj.87.381.
- 石英, 高学杰. 2008. 温室效应对我国东部地区气候影响的高分辨率数值试验 [J]. *大气科学*, 32 (5): 1006–1018. Shi Ying, Gao Xuejie. 2008. Influence of greenhouse effect on eastern China climate simulated by a high resolution regional climate model [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 32 (5): 1006–1018.
- Simmons A, Uppala S, Dee D P, and Kobayashi S. 2007. ERA-Interim: New ECMWF reanalysis products from 1989 onwards. ECMWF Newsletter, No. 110, ECMWF, Reading, United Kingdom, 25–35.
- Song F F, Zhou T J. 2014a. Interannual variability of East Asian summer monsoon simulated by CMIP3 and CMIP5 AGCMs: Skill dependence on Indian Ocean–western Pacific anticyclone teleconnection [J]. *J. Climate*, 27: 1679–1697, doi:10.1175/JCLI-D-13-00248.1.
- Song F F, Zhou T J. 2014b. The climatology and interannual variability of East Asian summer monsoon in CMIP5 coupled models: Does air–sea coupling improve the simulations? [J]. *J. Climate*, 27: 8761–8777, doi:10.1175/JCLI-D-14-00396.1.
- Sperber K R, Annamalai H, Kang I –S, et al. 2013. The Asian summer monsoon: an intercomparison of CMIP5 vs. CMIP3 simulations of the late 20th century [J]. *Climate Dyn.*, 41: 2711–2744, doi:10.1007/s00382-012-1607-6.
- Tian F X, Zhou T J, Zhang L X. 2013. Tropical cyclone genesis potential index over the western North Pacific simulated by LASG/IAP AGCM [J]. *Acta Meteor. Sinica*, 27 (1): 50–62, doi:10.1007/s13351-013-0106-y.
- 王倩怡, 张耀存. 2008. P- σ 区域海气耦合模式对中国东部地区降水的模拟 [J]. *南京大学学报 (自然科学)*, 44 (6): 608–620. Wang Qianyi, Zhang Yaocun. Simulation of precipitation in eastern China with P- σ regional coupled air–sea mode [J]. *Journal of Nanjing University (Natural Sciences) (in Chinese)*, 44 (6): 608–620.
- Wu B, Zhou T J, Li T. 2009. Contrast of rainfall–SST relationships in the western North Pacific between the ENSO developing and decaying summers [J]. *J. Climate*, 22: 4398–4405, doi:10.1175/2009JCLI2648.1.
- Ratnam J V, Giorgi F, Kaginalkar A, et al. 2009. Simulation of the Indian monsoon using the RegCM3–ROMS regional coupled model [J]. *Climate Dyn.*, 33: 119–139, doi:10.1007/s00382-008-0433-3.
- Uppala S, Dee D, Kobayashi S, et al. 2008. Towards a climate data assimilation system: Status update of ERA-Interim [J]. ECMWF newsletter, 115: 12–18.
- Valcke S. 2006. OASIS3 User Guide (prism_2-5) [R]. PRISM Support Initiative Report No.3, CERFACS, Toulouse, France, 1–64.
- 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: L15711, doi:10.1029/2005GL022734.
- Webster P J, Yang S. 1992. Monsoon and ENSO: Selectively interactive systems [J]. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 118 (507): 877–926, doi:10.1002/qj.49711850705.
- 姚隽琛, 周天军, 邹立维. 2015. 区域耦合模式 FROALS 模拟的西北太平洋热带气旋潜势分布与年际变率: 耦合与非耦合试验比较 [J]. *大气科学*, 39 (4): 802–814. Yao Junchen, Zhou Tianjun, Zou Liwei. 2015. Distribution and interannual variability of tropical cyclone genesis over the western North Pacific simulated by a regional coupled model FROALS: Comparison of coupled and uncoupled [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 39 (4): 802–814, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1411.14209.
- Yao S X, and Zhang Y C. 2010. Simulation of China summer precipitation using a regional air–sea coupled model [J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 24: 203–214.
- Yao S X, Huang Q, Zhang Y C, et al. 2013. The simulation of water vapor transport in East Asia using a regional air–sea coupled model [J]. *J. Geophys. Res.*, 118: 1582–1600, doi:10.1002/jgrd.50089.
- Yoon J –H, Leung L R, Correia Jr J. 2012. Comparison of dynamically and statistically downscaled seasonal climate forecasts for the cold season over the United States [J]. *J. Geophys. Res.*, 117: D21109, doi:10.1029/2012JD017650.
- Yu Rucong, Li Wei, Zhang Xuehong, et al. 2000. Climatic features related to eastern China summer rainfalls in the NCAR CCM3 [J]. *Adv. Atmos. Sci.*, 17: 503–518, doi:10.1007/s00376-000-0014-9.
- 曾先锋, 周天军. 2012. 谱逼近方法对区域气候模式性能的改进: 不同权重函数的影响 [J]. *气象学报*, 70 (5): 1084–1097. Zeng Xianfeng, Zhou Tianjun. 2012. Impact of the spectral nudging on the simulation of a regional climate model: Different weight function [J]. *Acta Meteorologica Sinica (in Chinese)*, 70 (50): 1084–1097, doi:10.11676/qxxb2012.091.
- Zhou T, Li Z. 2002. Simulation of the East Asian summer monsoon using a variable resolution atmospheric GCM [J]. *Climate Dyn.*, 19: 167–180, doi:10.1007/s00382-001-0214-8.
- 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, doi:10.1175/2008JCLI2245.1.
- 周天军, 邹立维, 吴波, 等. 2014. 我国地球气候系统模式研究进展: CMIP 计划实施 20 年回顾 [J]. *气象学报*, 72 (5): 892–907. Zhou Tianjun, Zou Liwei, Wu Bo, et al. 2014. Development of earth/climate system models in China: A review from the Coupled Model Intercomparison Project perspective [J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 28 (5): 762–779, doi:10.1007/s13351-014-4501-9.
- Zhou T J, Yu Y Q, et al. 2014. Flexible Global Ocean–Atmosphere–Land System Model: A Modeling Tool for the Climate Change Research Community [M]. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, doi:10.1007/978-3-642-41801-3.
- 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. 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. A review of development and application of regional ocean–atmosphere coupled model [J]. *Advances in Earth Science (in Chinese)*, 27 (8): 857–965.
- 邹立维, 周天军. 2012b. 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. 2012b. 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]. *Sci. China Earth Sci.*, 55: 802–815, doi:10.1007/s11430-011-4281-3.
- Zou L W, Zhou T J. 2013. Can a regional ocean–atmosphere coupled model improve the simulation of the interannual variability of the western North Pacific summer monsoon? [J] *J. Climate*, 26: 2353–2367, doi:10.1175/JCLI-D-11-00722.1.
- Zou L W, Zhou T J. 2014. Simulation of the western North Pacific summer monsoon by regional ocean–atmosphere coupled model: Impacts of oceanic components [J]. *Chin. Sci. Bull.*, 59 (7): 662–673, doi:10.1007/s11434-013-0104-6.
- Zou L W, Qian Y, Zhou T, et al. 2014. Parameter tuning and calibration of RegCM3 with MIT-Emanuel cumulus parameterization scheme over CORDEX East Asia Domain [J]. *J. Climate*, 27: 7687–7701, doi:10.1175/JCLI-D-14-00229.1.
- Zou L W, Zhou T J, Li L, et al. 2010. East China summer rainfall variability of 1958–2000: Dynamical downscaling with a variable-resolution AGCM [J]. *J. Climate*, 23: 6394–6408, doi:10.1175/2010JCLI3689.1.