

邹立维,周天军. 区域海气耦合模式研究进展[J]. 地球科学进展 2012, 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 2012, 27(8): 857-865.]

区域海气耦合模式研究进展*

邹立维,周天军

(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)

摘 要: 区域海气耦合模式是进行区域尺度气候模拟和预估的重要工具, 近年来得到快速发展。在阐述区域海气耦合过程重要性的基础上, 对当今国内外主要的区域海气耦合模式研究进展进行总结, 归纳区域海气耦合模式所关注的核心科学问题, 介绍区域海气耦合模式的技术特点。发展基于耦合器且无通量订正的耦合模式是区域海气耦合模式发展的主流方向。当前国际上区域海气耦合模式所关注的主要科学问题, 包括区域海气耦合模式对区域海洋过程的模拟、区域海气耦合模式对区域大气过程的模拟、亚洲—西北太平洋季风模拟及其耦合模拟海表面温度(SST)冷偏差问题、热带海气相互作用过程模拟, 以及区域海气耦合模式对未来气候变化的预估研究等。对上述 5 个方面科学问题的研究思路 and 主要科学结论进行总结, 重点关注针对亚洲—西北太平洋季风区的区域海气耦合模式研究, 对区域海气耦合过程改进亚洲—西北太平洋地区降水模拟的物理机制, 及在该区域模拟 SST 冷偏差的成因亦进行相关归纳和总结。最后提出当前区域海气耦合模式亟待解决的关键科学问题。

关 键 词: 区域气候模拟; 区域海气耦合模式; 模拟偏差

中图分类号: P732.6; P461

文献标志码: A

文章编号: 1001-8166(2012)08-0857-09

1 引 言

气候模式是理解气候变化和变率机理、预测和预估其未来变化的重要工具。近年来由于高性能计算机的发展, 全球气候模式的分辨率得到明显提高。但是由于高分辨率全球模式的巨大资源耗费, 在进行百年尺度气候归因和预估模拟时, 全球模式的分辨率依然在 $1^{\circ} \sim 2^{\circ}$ ^[1]。这种分辨率的全球耦合模式, 难以准确描述诸如复杂地形、陆表非均匀性、海岸带等局地强迫特征, 使得模拟结果在区域尺度上误差较大^[2~7], 难以适应气候变化研究和政府决策的需求。利用区域气候模式在所关心的时段和关心

的区域进行高分辨率的降尺度模拟, 则成为获取区域气候变化信息的重要途径。

区域气候模拟的思路是 Dickinson 等^[8]和 Giorgi^[9]在 20 世纪 80 年代末提出的。自那时起, 区域气候模式因其较高水平分辨率, 能够较好地再现复杂地形、下垫面植被特征及海陆对比, 已经成为开展区域气候研究的重要工具之一, 在区域气候研究中发挥着重要作用^[10~12]。国际上开展了许多区域气候模式的比较计划, 如针对欧洲气候变化不确定性的 PRUDENCE (Prediction of Regional scenarios and Uncertainties for Defining European Climate change risks and Effects)^[13] 和 ENSEMBLES^[14], 针对北美

* 收稿日期: 2012-03-04; 修回日期: 2012-06-27.

* 基金项目: 优秀国家重点实验室研究专项“气候系统模式 FGOALS 的发展及其敏感度对气候预估的影响研究”(编号: 41023002); 全球变化国家重大科学研究计划项目“高分辨率气候系统模式的研制与评估”(编号: 2010CB951904); 国家海洋公益性行业科研专项“中国近海短期气候预测技术及其应用”(编号: 201105019-3) 资助。

作者简介: 邹立维(1984-) 男, 福建清流人, 助理研究员, 主要从事区域海气耦合模式研发和区域气候模拟研究。

E-mail: zoulw@mail.iap.ac.cn

区域气候变化的 NARCCAP(North American Regional Climate Change Assessment Program) ^[15], 针对东亚季风模拟和预估的 RMIP(Regional climate Model Intercomparison Project) ^[16]。最近, 为推动第五次“国际耦合模式比较计划”(Coupled Model Intercomparison Project-Phase 5, CMIP5) 气候预估结果更好地服务于气候变化影响、适应和脆弱性评估以及政府决策, 世界气候研究计划(World Climate Research Program, WCRP) 成立了“区域气候降尺度”特别工作组(Task Force on Regional Climate Downscaling, TFRCD), 发起了国际区域气候降尺度试验(Coordinated Regional Downscaling Experiment, CORDEX) ^[17, 18]。CORDEX 计划制定了模式评估和气候预估框架, 旨在基于 CMIP5 全球模式的多模式、多情景预估结果, 利用区域气候模式, 通过降尺度方法获得全球不同地区的高分辨率区域气候变化信息。

近些年, 在区域大气模式中引入海洋模块, 成为区域气候模拟的重要方向之一。区域海气耦合模式的发展, 一方面是中尺度海气相互作用过程研究的需要。Chelton 等^[19]和 Xie^[20]基于高分辨率的卫星资料综合评述了中尺度海气耦合过程的观测事实, 但全球耦合模式由于其较粗的空间分辨率, 无法分辨中尺度的海温锋面、海洋中尺度波动及其与大气的相互作用过程, 高分辨率的区域海气耦合模式则成为研究该问题的一个重要选择。

另一方面, 区域海气耦合模式在亚洲—西北太平洋季风区的发展和应用的, 则是由于研究表明, 局地海气相互作用过程对亚洲—西北太平洋季风区降水和环流的模拟相当重要。这一点被基于观测事实和全球大气模式(AGCM) 模拟结果的分析比较所证实^[4, 5, 21]。在西北太平洋季风区, 夏季降水和海温异常呈显著负相关, 海温的变化主要是对大气变化的响应; 利用单独大气模式(AGCM) 进行夏季降水预测或模拟时, 由于没有考虑海气相互作用过程, 大气表现为被动地对海水表面温度(Sea Surface Temperature, SST) 变化的响应, 其模拟的降水和 SST 异常的关系呈现为显著正相关^[22]。因此, 开展亚洲—西北太平洋季风区气候模拟研究需要考虑海气相互作用过程。

在上述背景下, 区域海气耦合模式近年来得到快速发展, 国内外众多研究机构相继推出其区域海气耦合模式。区域海气耦合模拟研究关注的对象, 包括东亚—西北太平洋、波罗的海、印度季风区、“海洋大陆(Maritime continent)” 海域、热带东太平

洋地区及热带大西洋等。这些模拟研究丰富了我们对于区域大气过程、区域海洋过程及局地海气相互作用过程的理解, 显示区域海气耦合模式具有良好的应用前景。本文的目的是从区域气候模拟的角度, 总结当前主要的区域海气耦合模式技术特点, 评述其关注的科学问题。在此基础上, 提炼出区域海气耦合模拟亟待解决的问题, 并对区域海气耦合模式未来的发展态势进行展望。

2 当前国内外主要的区域海气耦合模式概述

目前国际上主要的区域海气耦合模式, 主要来自美国、德国、意大利、韩国、日本和印度等国家。我国发展区域海气耦合模式的研究机构, 包括南京大学、中国科学院大气物理研究所及中国科学院寒区旱区环境与工程研究所。表 1 按时间顺序, 列出当今国内外主要的区域海气耦合模式, 包括模式作者、分量模式及其水平分辨率、关注模拟区域和积分时间等。从中可见, 自 2000 年以来, 区域海气耦合模式得到快速发展, 其关注对象亦愈加丰富, 从前期的东亚—西北太平洋、波罗的海, 延伸到印度季风、海洋大陆海域及热带东太平洋地区。在积分的时间长度上, 早期多为短期片段(3 个月) 积分, 后期则多为连续积分或是多年片断积分。究其技术特点, 可归纳如下:

(1) 耦合模式的大气分量模式中, 6 个区域海气耦合模拟系统采用了意大利国际理论物理中心(International Centre for Theoretical Physics, ICTP) 发展的 RegCM 模式^[23, 32, 34, 36, 37, 41]。除了区域大气模式外, 亦有利用变网格大气模式作为大气分量模式^[33]。变网格模式和传统区域大气模式的区别在于, 变网格模式在加密区外加入强恢复项, 使模式大气向强迫场逼近, 而传统区域大气模式则设置缓冲区向强迫场逼近。上述区域耦合模式中, 大气分量模式的水平分辨率最小达到 16 km^[30], 最大为 1°^[24], 普遍在 30 ~ 60 km。

(2) 耦合模式的海洋分量模式则有多种类型, 既有不考虑海洋动力学过程的混合层海洋模式^[35, 38, 39], 亦有全球海洋模式及区域海洋模式。采用的全球海洋模式多具有变极点功能, 可通过对极点位置的改变, 提高模拟区域海域的分辨率^[28, 36]。采用的区域海洋模式, 可以根据海洋开边界处理方式的不同, 分为不考虑边界入流的区域海洋模式^[23, 24, 26, 32, 40]和考虑边界入流的区域海洋模

表 1 当今国内外主要的区域海气耦合模式(以时间为序)

Table 1 The developed regional ocean-atmosphere coupled models (in order of time sequence)

发展者	大气分量 (水平分辨率)	海洋分量 (水平分辨率)	关注区域	积分时间
吕世华等 ^[23]	RegCM2(40 km)	POM98(20 km)	南海	1995年5~7月
任雪娟等 ^[24]	P-sigma	POM98(1°)	东亚	1998年5~8月
Hagedorn等 ^[25]	REMO(18 km)	BSMO(5 km)	波罗的海	1995年8~10月
Doscher等 ^{[26]*}	RCA(44 km)	RCO(11 km)	波罗的海	1988—1992年
Schrum等 ^[27]	REMO(0.5°)	HAMSOM(11 km)	波罗的海	1988年
Aldrian等 ^{[28]*}	REMO(0.5°)	MPI-OM(40/20 km)	海洋大陆	1979—1993年
Sasaki等 ^[29]	MRI-RCM(20 km)	NPOGCM(18 km)	日本海域	1991—2000年
Seo等 ^{[30]*}	RSM(50/16/27 km)	ROMS(42/7/25 km)	热带东太平洋	1999—2004年
Xie等 ^[31]	iRAM(0.5°)	MOM2(0.5°)	热带东太平洋	1996—2003年
姚素香等 ^[32]	RegCM3(60 km)	POM2000(0.5°)	东亚	1963—2002年夏季
Somot等 ^{[33]*}	ARPEGE(50 km)	OPAMED(10 km)	地中海	1961—2099年
Ratnam等 ^{[34]*}	RegCM3(60 km)	ROMS(60 km)	印度洋	多年片断积分
Hagos等 ^[35]	MM5(90 km)	混合层海洋(90 km)	热带大西洋	1年
Artale等 ^{[36]*}	RegCM3(30 km)	MIT-gcm(14 km)	地中海	1958—2000年
李涛等 ^{[37]*}	RegCM3(60 km)	HYCOM(33 km)	东亚	1982—2001年
凌铁军 ^[38]	WRF(30 km)	混合层海洋(30 km)	北美	1993 2004片断积分
Kim等 ^[39]	WRF(48 km)	混合层海洋(48 km)	东亚	2000—2008年 JJA
房永杰等 ^[40]	RIEMS(60 km)	POM2000(60 km)	东亚	1984—2004年夏季
邹立维 ^{[41]*}	CREM/RegCM3(37/45 km)	POM/LICOM(0.5°)	西北太平洋	1998年个例/多年积分

注: * 为使用耦合器耦合的模式

式^[27, 29, 34, 37]。海洋模式的最小水平分辨率达到5^[25]和7 km^[30], 普遍在10~60 km。

(3) 区域海气耦合模式多采用“非通量订正”的耦合方式,但在部分区域针对有明显偏差的通量,亦采用了“通量订正”技术^[33, 37]。需要注意的是,“非通量订正”的耦合方式能够保证海气界面通量的守恒,“通量订正”后则破坏了该守恒性。在耦合技术方面,既有直接耦合的方式,如早期吕世华等^[23]、任雪娟等^[24]、Hagedorn等^[25],和近些年Xie等^[31]、姚素香等^[32]、Hagos等^[35]及房永杰等^[40]的工作,又有基于“耦合器”建立的区域海气耦合模式^[26, 28, 30, 33, 34, 37, 41],所选的耦合器多为发展较为成熟的法国OASIS耦合器。采用了耦合器后,用户只需了解耦合器的接口而不必深究其内核,就可以方便地把自己的子模式连接到耦合器上^[42],从而与其他部分一起构成一个完整的区域耦合模式。采用耦合器技术,便于区域耦合模式各子分量模式的发展和维持,代表了区域耦合模式的主流技术发展方向。

(4) 海气相互作用过程的处理上,所有模式都考虑了海气间热量和动量交换,一些模式在计算海表动量通量时,考虑了表层海流与大气表层风场的相对运动^[30],另有模式只传递大气模式计算的10 m风,海表动量通量的计算在海洋模式中进行^[26]。当耦合三维海洋环流模式时,对于海表盐度的处理,

仅有一些模式考虑了海气间淡水通量的耦合^[25~30, 32, 33, 40],一些模式则将海表盐度向观测资料恢复^[23, 24, 31, 34, 36, 37, 41]。

3 区域海气耦合模式关注的科学问题

3.1 区域海气耦合模式对区域海洋过程的模拟

将区域海气耦合模式与相应海洋模式的模拟结果进行比较,可以考察区域海气耦合对区域海洋过程模拟的影响。研究表明,区域海气耦合模式能够模拟出南海尺度较小的涡旋及冷暖中心,这明显优于使用气候月平均风应力和热通量强迫海洋模式的模拟结果。作者认为这与区域海气耦合模式能够得到具有日变化的风应力有关^[23]。比较区域耦合模式和相应单独海洋模式(利用再分析资料作为海表强迫)在东亚近海的模拟结果,发现耦合模式有明显的“冷漂移”现象;利用“通量订正”的方法,发现大气模式热通量的模拟偏差是导致耦合模式“冷漂移”的主要原因^[43]。

海气相互作用过程对海洋模拟效果的影响具有区域依赖性,如Doscher等^[26]发展的区域海气耦合模式,对波罗的海地区海温的模拟性能与单独海洋模式相当,但对其他海表变量的模拟则不如未耦合海洋模式。单独海洋模式在印度洋地区夏季模拟海温的冷偏差,在区域耦合模式中得到明显改善^[34]。

在海洋大陆海域,区域海气耦合模式由于提供了高分辨率的海表信息,因此减少了单独海洋模式存在的 SST 暖偏差问题^[28]。Schrum 等^[27]利用 REMO 和 HAMSOM,对波罗的海和北海区域开展了 1988 年的海—气—冰耦合模拟。考虑了完整的海—气—冰反馈过程后,耦合模式模拟的北海区域海温,较之单独海洋模式的模拟结果(再分析资料或单独大气模式输出强迫)有明显改进。

3.2 区域海气耦合模式对区域大气过程的模拟

比较区域海气耦合模式和单独大气模式的模拟结果,可以揭示区域海气耦合对区域大气过程模拟的影响。Artale 等^[36]将 RegCM3 与 MITgcm 耦合,对地中海及其邻近地区进行 1965—2000 年连续积分模拟。对该耦合系统模拟性能的评估分析表明,耦合系统对地中海陆地区域气候态降水和表面气温的模拟与单独大气模式结果无显著差别,但由于耦合系统能够提供高质量和高分辨率的 SST 及海气界面热通量,在未来气候变化的研究中将有很好的应用前景^[36]。

随着局地海气耦合过程对亚洲—西北太平洋季风区降水和环流模拟的重要性被观测证据和全球模式结果揭示,利用区域海气耦合模式研究该区域海气相互作用的工作愈来愈多。研究发现,区域海气耦合模式能够改善未耦合大气模式在海洋大陆海域和印度洋地区降水偏多的问题^[28,34],并且改善了印度洋地区环流和海表热收支的模拟^[34];区域海气耦合对改进长江流域和华南降水模拟、真实再现我国东部汛期雨带的移动亦有显著作用^[32,44],对东亚降水年际变率亦有明显改善^[37,40]。区域海气耦合过程亦改善了单独区域大气模式模拟的日本岛夏季表面气温暖偏差^[29]。

区域海气耦合模式是否能够改善西北太平洋地区降水的模拟,依赖于所用的大气分量模式^[45],不同区域大气模式耦合同一区域海洋模式后,降水和海温的响应截然相反^[45]。区域耦合模式对东亚夏季季风的模拟能力,也部分依赖于耦合时间步长的选择,当采用 3 ρ 和 9 h 耦合时间步长时,对 SST、降水及表面空气温度的模拟能力相当,而采用 1 小时和 24 h 耦合时间步长则模拟效果较差^[46]。采用过大或过小的耦合时间步长增加了海表潜热和感热的模拟偏差,使得耦合模式的模拟性能较差^[46]。

研究表明,在区域气候模式中加入区域海气耦合过程,能够改善亚洲—西北太平洋地区降水的模拟。其中的物理机制可归纳为如下几点:

(1) 区域海气耦合模式改善了低层风场以及水汽输送的模拟能力^[32,37]。

(2) 加入局地海气相互作用过程后,改善了模式模拟的海洋—大气界面热通量,改善了模拟的东亚地区海陆热力差异^[40]。

(3) 区域海气耦合模式能够合理再现东亚海域局地 SST 与降水、表面风场的同时和滞后关系,而未耦合模式由于缺少局地海气反馈,对此模拟性能较差^[47]。

(4) 区域海气耦合模式能够提供空间高分辨率的 SST 信息及减少与降水过程相关的随机误差的积累^[28]。

(5) 区域海气耦合模式减少了单独大气模式对观测海温虚假的、偏强的强迫,因此改善了对降水的模拟^①。

3.3 亚洲—西北太平洋地区模拟 SST 冷偏差问题

在亚洲—西北太平洋季风区,区域海气耦合模式模拟的 SST 普遍存在明显的“冷偏差”^[34,37,40,43,46,48],如区域海气耦合模式在赤道印度洋地区模拟的夏季 SST,较之观测偏冷 1~2 $^{\circ}\text{C}$ ^[34,48]。模拟的冬季 SST,较之观测亦偏冷 1 $^{\circ}\text{C}$ 左右^[48];不进行通量订正的区域海气耦合模式在靠近日本的南部海域、部分西太平洋暖池区模拟的夏季海温,较之观测偏冷亦达 2 $^{\circ}\text{C}$ ^[37,40,43,46]。前人对该模拟 SST 冷偏差的成因,做了大量的分析和讨论,目前有如下几种解释:

(1) 利用区域大气模式输出的海表热通量和动量通量分别替换对应的观测资料,强迫单独海洋模式,结果显示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,是导致东亚近海模拟 SST 冷偏差的原因之一,而动量通量的模拟偏差对模拟 SST 冷偏差的贡献不大^[43,46]。

(2) 利用通量订正的方法纠正海表入射太阳辐射的模拟偏差后,能够明显改善日本的南部海域模拟 SST 的冷偏差^[37],这表明模式模拟的海表入射太阳辐射偏差是导致模拟 SST 冷偏差的原因之一。

(3) 在观测海温强迫区域大气模式的试验中,海洋下垫面持续地提供水汽和能量,维持了过多的对流,海气耦合后印度洋地区模拟 SST 的冷偏差是海温对大气模式偏差的调整^[34]。

(4) 加入淡水通量耦合后,对夏季模拟海温冷

① Zou L W, Zhou T J. Can regional ocean-atmosphere coupled model improve the simulation of the interannual variability of western North Pacific summer monsoon? [J]. *Journal of Climate*, 2012, under second review.

偏差改善不明显,对冬季赤道印度洋模拟海温冷偏差则有一定改进^[48]。

(5) 观测海温强迫下,区域大气模式对对流层低层温湿垂直廓线模拟偏差,一定程度上可以“预示”区域海气耦合后的海温模拟偏差^[45]。偏干偏冷的对流层低层温湿垂直廓线,使得模拟的海表潜热(净短波辐射)偏多(少),这相当于一个潜在的冷源。一旦开始海气耦合,该冷源会使得模拟的 SST 出现冷偏差^[45]。区域海气耦合模式在亚洲—西北太平洋季风区通常出现的 SST 模拟“冷偏差”部分是由于大气模式中对流发生过频导致的;有效抑制对流发生后,模拟 SST 冷偏差得到明显缓解^[49]。对流抑制愈强, SST 模拟愈暖。抑制对流后减少了大气柱平均云量,增加了到达海表的短波辐射,使模拟海温增加^[49]。

3.4 热带海气相互作用过程的模拟

赤道太平洋和热带大西洋的区域海气耦合模拟研究,重点关注该地区独特的海气相互作用过程。研究显示,高分辨率的区域海气耦合模式模拟的热带东太平洋的热带不稳定波、加利福尼亚流系的海洋中尺度涡和海温锋面以及美洲中部海岸的“gap”风(气块经过山脉间隙后加速的现象),都与观测较为接近^[30];且耦合模式再现了风应力旋度、风应力散度及表面热通量与 SST 的相互作用过程,证实了有海洋中尺度过程参与的海气反馈在该区域的重要性^[30]。

全球海气耦合模式在热带东太平洋普遍的“double-ITCZ”模拟偏差,在区域海气耦合模式中并未出现^[31]。区域海气耦合模式成功再现了“ITCZ”的年循环特征,包括观测中晚春季节东太平洋的“double-ITCZ”现象^[31]。该现象的成功模拟,不能简单地归因为区域气候模式侧边界再分析资料的强迫,敏感性试验证实,云—辐射—SST 反馈、风—蒸发—SST 反馈,对于准确模拟东太平洋气候南北半球的不对称性有至关重要的作用^[31]。

Hagos 等^[35]利用区域海气耦合模式研究了西非季风与热带东大西洋的相互作用过程。春季,由于海表风速减小抑制了潜热释放,且热带大西洋 ITCZ 的北移,使得热带大西洋东北部 SST 增加,伴随季风西风流向西扩展, SST 增加使得从热带大西洋向季风区输送的水汽增多;夏末,伴随西风流增强,混合层低层冷水上翻加强冷却了 SST。

3.5 区域海气耦合模式对未来气候变化的降尺度预估研究

所谓未来气候变化的预估,即利用 IPCC《排放

情景特别报告》中的温室气体排放情景来驱动气候系统模式,预测未来百年气候的潜在变化。利用低分辨率全球模式的未来气候变化预估结果驱动高分辨率的区域气候模式(“降尺度”),是获得区域尺度高分辨率气候变化信息的重要手段。

在地中海及其邻近地区,区域海气耦合模式被用来进行气候变化情景下区域气候的降尺度预估研究。Somot 等^[33]比较了单独大气模式与区域海气耦合模式预估的 A2 情景下地中海和欧洲气候变化差异。研究发现,总体而言,区域海气耦合模式预估的气候变化与单独大气模式的预估结果在空间型上非常相似,但区域海气耦合模式预估的气候变化振幅,明显比单独大气模式预估的大;在所有季节,区域海气耦合模式预估的欧洲绝大多数地区增暖幅度更大,预估的欧洲北部(南部和东部)在冬季(夏季)要更湿(干)。

粗分辨率的全球气候模式无法合理再现诸如热带不稳定波的赤道海洋动力学过程,因此无法反映未来气候变化情景下,热带不稳定波及赤道海洋动力学过程的响应及其对气候的影响。Seo 等^[50]利用全球气候模式在 A1B 情景下的预估结果驱动一个区域海气耦合模式,研究了热带大西洋赤道海洋动力学过程和热带不稳定波的响应及其对气候的影响。结果表明在气候变化情景下,一方面,低层赤道南风的增强了次表层冷海水的上涌,这将抑制海表面温度的增暖;另一方面,海水上翻和纬向洋流的增强会增强赤道大西洋海洋动力学不稳定和热带不稳定波,随之增强的海洋涡动热通量有利于赤道大西洋增暖,这将抑制次表层冷海水上涌导致的变冷^[50]。

4 总结和展望

4.1 总结

区域海气耦合模式是进行区域尺度气候模拟和预估的重要工具,近年来得到快速发展。本文在阐述区域海气耦合重要性的基础上,对当今国内外主要的区域海气耦合模式研究进展进行了总结,归纳了区域海气耦合模式所关注的核心科学问题,介绍了区域耦合模式的技术特点。要点可概括如下:

(1) 区域海气耦合模拟研究关注的对象愈加丰富,从前期的东亚—西北太平洋、波罗的海,延伸到印度季风、海洋大陆海域、热带东太平洋及热带大西洋。

(2) 在大气分量模式和海洋分量模式的选择

上,各耦合模式彼此差异明显。所用海洋分量模式中,在是否考虑海洋动力学过程及海洋开边界处理方式上,亦多有不同。在耦合方式上,基于耦合器且无通量订正的耦合方式,成为发展高分辨区域海气耦合模式的主流方向。区域海气耦合模式的水平分辨率总体上要比全球耦合模式更为精细。

(3) 区域海气耦合模拟研究关注的科学问题,大多集中于以下几个方面:区域海气耦合模式对区域海洋过程的模拟、区域海气耦合模式对区域大气过程的模拟、亚洲—西北太平洋地区模拟 SST 冷偏差问题、热带海气相互作用过程的模拟及区域海气耦合模式对未来气候变化的降尺度预估研究等。其研究方式,大多比较区域海气耦合模拟与对应的单独区域大气/海洋模式模拟结果,或是基于区域海气耦合模拟结果讨论局地海气相互作用过程。

(4) 多数研究表明,在区域气候模式中加入区域海气耦合过程,能够改善亚洲—西北太平洋地区降水、主要环流系统及表面热收支的模拟。但一个较为普遍的模拟偏差是其模拟的 SST 常存在明显的“冷偏差”。关于该“冷偏差”的成因有多种解释。研究表明,与对流过程有关的海表短波辐射的偏差是导致冷偏差的原因之一。

4.2 展望

虽然区域海气耦合模式在近十年得到快速发展和推广应用,丰富了我们对局地海气相互作用过程的理解,但相对于全球海气耦合模式而言,区域海气耦合模式的发展和应用目前仍处于起步阶段,尚存在诸多亟待解决的问题,具体总结如下:

(1) 如何有效地改进区域海气耦合模式的模拟偏差。众多区域海气耦合模式在海气耦合的最直接表现—SST 模拟上均存在显著偏差,但对于如何有效地缓解乃至消除 SST 模拟偏差并无有效途径。从根本上解决该问题尚有难度,因为耦合模式的偏差可能来自大气和海洋分量模式自身,亦可能来自海气耦合过程,而造成耦合模式偏差的原因,又因模式而异。尽管前人对区域海气耦合模式在亚洲—西北太平洋夏季风区通常出现的 SST 模拟冷偏差问题,有过许多讨论和模式改进尝试,但离完全消除误差尚有差距。如何改进区域海气耦合模式的模拟性能有待深入研究。

(2) 当前利用区域海气耦合模式的模拟研究,仍多集中于对当代气候的模拟评估,对未来气候降尺度预估的研究则较少。在当前正在进行的 CORDEX 计划中,所参与的区域气候模式也大多没有考

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显著优势。“季风驱动海洋”的夏季海气相互作用特征,决定了区域海气耦合过程对该地区气候特征模拟的重要性。那么,在东亚—西北太平洋地区未来气候变化的降尺度预估中,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?造成这些差异的物理机制是什么?这都是当前亟待回答的问题。

(3) 解决区域气候模拟和预估的高分辨要求的途径,一是发展高分辨率全球气候系统模式,这需要大量的计算资源;二是发展“全球—区域”嵌套模拟系统,这是一个相对经济的方法。为了适应东亚—西北太平洋气候加密模拟研究的需要,在过去 5 年中, JAP/LASG 着手发展了一个区域海气耦合模式 FROALS (Flexible Regional Ocean-Atmosphere-Land System model),通过其与全球气候系统模式 FGOALS (Flexible Global Ocean-Atmosphere-Land System model) 的嵌套,形成了从全球到区域的加密模拟系统^[41]。未来针对全球模式与区域嵌套模拟结果的异同点,需要开展系统研究工作。“全球—区域”嵌套系统的彼此匹配问题,亦需要做专门讨论,如全球大气模式和区域大气模式的关键物理过程一致与否对模拟结果的影响等。更进一步的,区域模式高分辨率的信息如何正确反馈给全球模式,从而形成一个完整的“双向”(two way) 嵌套模拟系统,亦是未来需要深入研究的方向。

(4) 区域海气耦合模式未来的发展趋势,一方面是完善海气耦合方案。当前区域海气耦合方案多较为简单,如没有考虑海浪对海—气间动量、热量和水汽交换对影响,一些海气耦合模式没有考虑淡水通量的耦合等。另一方面,在区域海气耦合模式的基础上,耦合气候系统的其他模块,如气溶胶/化学模块、动态植被模块、水文模块等,从而形成一个区域地球系统模式,这是区域气候模式发展的重要方向,也是刚刚结束的第六届 ICTP “区域气候模式的理论和应用”国际研讨会的主题之一。

参考文献 (References):

- [1] Meehl G A, Bony S. Introduction to CMIP5 [J]. *Clivar Exchanges*, 2011, 16(2): 4-5.
- [2] Yu R C, Li W, Zhang X H, et al. Climatic features related to Eastern China summer rainfalls in the NCAR CCM3 [J]. *Advance in Atmospheric Science*, 2000, 17(4): 503-518.

- [3] Zhou T J, Yu R C. Twentieth century surface air temperature over China and the globe simulated by coupled climate models [J]. *Journal of Climate*, 2006, 19(22): 5 843-5 858.
- [4] Zhou T J, Wu B, Wang B. How well do atmospheric general circulation models capture the leading modes of the interannual variability of the Asian-Australian monsoon? [J]. *Journal of Climate*, 2009, 22(5): 1 159-1 173.
- [5] Zhou T J, Wu B, Scaife A A, et al. The CLIVAR C20C Project: Which components of the Asian-Australian Monsoon circulation variations are forced and reproducible? [J]. *Climate Dynamics*, 2009, 33(7/8): 1 051-1 068, doi: 10. 1007/s00382-008-0501-8.
- [6] Chen H M, Zhou T J, Neale R B, et al. Performance of the new NCAR CAM3.5 in East Asian summer monsoon simulations: Sensitivity to modifications of the convection scheme [J]. *Journal of Climate*, 2010, 23(13): 3 657-3 675.
- [7] Li H, Dai A, Zhou T, et al. Responses of East Asian summer monsoon to historical SST and atmospheric forcing during 1950-2000 [J]. *Climate Dynamics*, 2010, 34(4): 501-514, doi: 10. 1007/s00382-008-0482-7.
- [8] Dickinson R E, Errico R M, Giorgi F, et al. A regional climate model for the western United States [J]. *Climatic Change*, 1989, 15(3): 383-422.
- [9] Giorgi F. Simulation of regional climate using a limited area model nested in a general circulation model [J]. *Journal of Climate*, 1990, 3(9): 941-963.
- [10] Giorgi F, Mearns L O. Introduction to special section: Regional climate modeling revisited [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1999, 104(D6): 6 335-6 352.
- [11] Leung L R, Mearns L O, Giorgi F, et al. Regional climate research [J]. *Bulletin of American Meteorological Society*, 2003, 84: 89-95.
- [12] Wang Y, Leung L R, McGregor J L, et al. Regional climate modeling: Progress, challenges, and prospects [J]. *Journal of Meteorological Society of Japan*, 2004, 82(6): 1 599-1 628.
- [13] Christensen J H, Christensen O. A summary of the PRUDENCE model projections of changes in European climate by the end of this century [J]. *Climatic Changes*, 2007, 81(Suppl. 1): 7-30.
- [14] Van der Linden P, Mitchell J F B. ENSEMBLES: Climate change and its impacts: Summary of research and results from the ENSEMBLES Project [C] // Met Office Hadley Centre: Exeter. UK 2009.
- [15] Mearns L O, Gutowski W J, Jones R, et al. A regional climate change assessment program for North America [J]. *EOS*, 2009, 90(36): 311-312.
- [16] Fu C B, Wang S Y, Xiong Z, et al. Regional Climate Model Intercomparison Project for Asia (RMIP) [J]. *Bulletin of American Meteorological Society*, 2005, 86: 257-266.
- [17] Giorgi F, Jones C, Asrar G R. Addressing climate information needs at the regional level: The CORDEX framework [J]. *WMO Bulletin*, 2009, 58(3): 175-183.
- [18] Jones C, Giorgi F, Asrar G. The Coordinated Regional Downscaling Experiment: CORDEX an international downscaling link to CMIP5 [J]. *Clivar Exchanges*, 2011, 16(2): 34-40.
- [19] Chelton D B, Schlax M G, Freilich M H, et al. Satellite measurements reveal persistent small-scale features in ocean winds [J]. *Science*, 2004, 303(5 660): 978-983.
- [20] Xie S P. Satellite observations of cool ocean-atmosphere interaction [J]. *Bulletin of American Meteorological Society*, 2004, 85: 195-208.
- [21] Wu R, Kirtman B P. Roles of Indian and Pacific Ocean air-sea coupling in tropical atmospheric variability [J]. *Climate Dynamics*, 2005, 25(2/3): 155-170.
- [22] Wang B, Ding Q, Fu X, et al. Fundamental challenge in simulation and prediction of summer monsoon rainfall [J]. *Geophysical Research Letter*, 2005, 32: L15711, doi: 10. 1029/2005GL022734.
- [23] Lü Shihua, Chen Yuchun, Zhu Bocheng. A coupled ocean model and atmosphere model and simulation experiment in the South China Sea area [J]. *Plateau Meteorology*, 2000, 19(4): 415-426. [吕世华 陈玉春 朱伯承. 南海海域海-气耦合模式及其数值模拟试验 [J]. *高原气象*, 2000, 19(4): 415-426.]
- [24] Ren Xuejuan, Qian Yongfu. Numerical simulation of oceanic elements at East Asian coastal oceans from May to August in 1998 by using a coupled regional ocean-atmosphere model [J]. *Climatic and Environmental Research*, 2000, 5(4): 480-485. [任雪娟, 钱永甫. 区域海气耦合模式对 1998 年 5~8 月东亚近海海况的模拟研究 [J]. *气候与环境研究*, 2000, 5(4): 480-485.]
- [25] Hagedorn R, Lehmann A, Jacob D. A coupled high resolution atmosphere-ocean model for the BALTEX region [J]. *Meteorologische Zeitschrift*, 2000, 9(1): 7-20.
- [26] Doscher R, Willen U, Jones C, et al. The development of the regional coupled ocean-atmosphere model RCAO [J]. *Boreal Environmental Research*, 2002, 7: 183-192.
- [27] Schrum C, Hubner D, Jacob D, et al. A coupled atmosphere/ice/ocean model for the North Sea and Baltic Sea [J]. *Climate Dynamics*, 2003, 21(2): 131-141.
- [28] Aldrian E, Sein D, Jacob D, et al. Modelling Indonesian rainfall with a coupled regional model [J]. *Climate Dynamics*, 2005, 25(1): 1-17.
- [29] Sasaki H, Kurihara K, Takayabu I, et al. Preliminary results from the coupled atmosphere-ocean regional climate model at the Meteorological Research Institute [J]. *Journal of Meteorological Society of Japan*, 2006, 84(2): 389-403.
- [30] Seo H, Miller A J, Roads J O. The Scripps Coupled Ocean-Atmosphere Regional (SCOAR) model, with applications in the eastern Pacific sector [J]. *Journal of Climate*, 2007, 20(3): 381-402.
- [31] Xie S P, Miyama T, Wang Y, et al. A regional ocean-atmosphere model for eastern Pacific climate: Toward reducing tropical biases [J]. *Journal of Climate*, 2007, 20(8): 1 504-1 522.
- [32] Yao Suxiang, Zhang Yaocun. Regional coupled air-sea model simulation of China summer precipitation [J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 2008, 66(2): 131-142. [姚素香, 张耀存. 区域海气

- 耦合模式对中国夏季降水的模拟[J]. 气象学报, 2008, 66(2): 131-142.]
- [33] Somot S, Sevault F, Deque M, *et al.* 21st century climate change scenario for the Mediterranean using a coupled atmosphere-ocean regional climate model [J]. *Global and Planetary Change*, 2008, 63(2/3): 112-126.
- [34] Ratnam J V, Giorgi F, Kaginalkar A, *et al.* Simulation of the Indian monsoon using the RegCM3-ROMS regional coupled model [J]. *Climate Dynamics*, 2009, 33(1): 119-139.
- [35] Hagos S M, Cook K H. Development of a coupled regional model and its application to the study of interactions between the West African Monsoon and the Eastern Tropical Atlantic Ocean [J]. *Journal of Climate*, 2009, 22(10): 2591-2604.
- [36] Artale V, Calmanti S, Carillo A, *et al.* An atmosphere-ocean regional climate model for the Mediterranean area: Assessment of a present climate simulation [J]. *Climate Dynamics*, 2009, 35(5): 721-740.
- [37] Li Tao, Zhou Guangqing. Preliminary results of a regional air-sea coupled model over East Asia [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2010, 55(21): 808-819, doi: 10.1007/s11434-010-0071-0. [李涛, 周广庆. 一个东亚区域海气耦合模式初步结果[J]. 科学通报, 2010, 55(21): 808-819, doi: 10.007/s11434-010-0071-0.]
- [38] Ling Tiejun. Development of Regional Climate Model (CWRM) and Its Coupled Simulations with a Mix-layer Ocean Model [D]. Beijing: Graduate University of Chinese Academy of Sciences, 2010. [凌铁军. 区域气候模式 CWRM 的发展及其与海洋混合层模式的耦合模拟研究 [D]. 北京: 中国科学院研究生院博士, 2010.]
- [39] Kim E J, Hong S Y. Impact of air-sea interaction on East Asian summer monsoon climate in WRF [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2010, 115: D19118, doi: 10.1029/2009JD013253.
- [40] Fang Yongjie, Zhang Yaocun. Impacts of regional air-sea coupling on the simulation of precipitation over eastern China in the RIEMS model [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Science*, 2011, 35(1): 16-28. [房永杰, 张耀存. 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, 2011, 35(1): 16-28.]
- [41] Zou Liwei. Development and Evaluation of the Regional Ocean-atmosphere Coupled Model (LASG-ROAM) [D]. Beijing: Graduate University of Chinese Academy of Sciences, 2011. [邹立维. 区域海气耦合模式(LASG-ROAM)的建立和评估[D]. 北京: 中国科学院研究生院, 2011.]
- [42] Zhou Tianjun, Yu Yongqiang, Yu Rucong, *et al.* Coupled climate system model coupler review [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 2004, 28(6): 993-1008. [周天军, 俞永强, 宇如聪, 等. 气候系统模式发展中的耦合器研制问题[J]. 大气科学, 2004, 28(6): 993-1008.]
- [43] Ren X, Qian Y. 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*, 2005, 25(5): 679-692.
- [44] Wang Qianyi, Zhang Yaocun. Simulation of precipitation in eastern China with P-sigma coupled air-sea mode [J]. *Journal of Nanjing University (Natural Sciences)*, 2008, 44(6): 608-620. [王倩怡, 张耀存. P-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: 自然科学版, 2008, 44(6): 608-620.]
- [45] Zou Liwei, Zhou Tianjun. 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 in China (Series D)*, 2012, 55(5): 802-815. [邹立维, 周天军. 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: D 辑, 2012, 42(4): 614-628.]
- [46] Fang Y, Zhang Y, Tang J, *et al.* A regional air-sea coupled model and its application over East Asia in the summer of 2000 [J]. *Advance in Atmospheric Sciences*, 2010, 27(3): 583-593.
- [47] Huang Q, Yao S X, Zhang Y C. Analysis of local air-sea interaction in East Asia using air-sea coupled model [J]. *Journal of Climate*, 2012, 25(2): 767-776.
- [48] Seo H, Xie S P, Murtugudde R, *et al.* Seasonal effects of Indian Ocean freshwater forcing in a regional coupled model [J]. *Journal of Climate*, 2009, 22(24): 6577-6596.
- [49] Zou L W, Zhou T J. Sensitivity of a regional ocean-atmosphere coupled model to convection parameterization over western North Pacific [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2011, 116: D18106, doi: 10.1029/2011JD015844.
- [50] Seo H, Xie S P. Response and impact of equatorial ocean dynamics and tropical instability waves in the tropical Atlantic under global warming: A regional coupled downscaling study [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2011, 116: C03026, doi: 10.1029/2010JC006670.

A Review of Development and Application of Regional Ocean-Atmosphere Coupled Model

Zou Liwei , Zhou Tianjun

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

Abstract: Regional Ocean-Atmosphere Coupled models (ROAMs) have been widely developed and used as an important tool for regional climate simulation and climate change projection in recent years. The ROAMs have been applied to investigate the climate variability over the regions including Asian-western North Pacific monsoon region , Baltic Sea , Maritime continent , eastern tropical Pacific and tropical Atlantic. In this paper , after emphasizing the scientific importance of regional air-sea coupling , the authors reviewed the recent progresses in the development and application of ROAM. The coupler based ROAM without flux correction is the future developing trend of ROAM. The scientific foci with ROAM include the simulation of regional atmospheric (oceanic) processes , Asian-western North Pacific monsoon simulation and the cold biases of simulated Sea Surface Temperature (SST) , the simulation of tropical air-sea interaction processes , and dynamical downscaling of regional climate change projection. The associated main ideas and conclusions are summarized. The mechanisms that why the inclusion of local air-sea coupling improves the simulation of rainfall over Asian-western North Pacific monsoon domain and the causes of cold biases of simulated SST over this domain are highlighted. Finally , some scientific issues calling for future studies in regional air-sea coupling simulations are documented.

Key words: Regional climate modeling; Regional Ocean-Atmosphere Coupled Model; Model biases.

2012 年第 9 期要目

布容—松山极性倒转事件的海陆地质记录及其不同步性探讨 晋 锐 李 新 阎保平
 基于回归克里格的生态水文无线传感器网络布局优化 葛 咏 王江浩 王劲峰 晋 锐 胡茂桂
 GEV 干旱指数及其在气象干旱预测和监测中的应用和检验 王澄海 王芝兰 郭毅鹏
 海水热力学方程 TEOS-10 及其与海水状态方程 EOS-80 的比较 孙永明 史久新 阳海鹏