



评述

区域海气耦合模式研究进展

彭世球^{①*}, 刘段灵^{①②}, 孙照渤^②, 李毅能^①

① 中国科学院南海海洋研究所热带海洋环境国家重点实验室, 广州 510301;

② 南京信息工程大学大气科学学院, 南京 210008

* E-mail: speng@scsio.ac.cn

收稿日期: 2011-10-08; 接受日期: 2012-03-12

国家 973 重大科技攻关项目(编号: 2011CB403504)、中国科学院知识创新工程重要方向项目(编号: KZCX2-YW-Q11-02, KZCX2-EW-208)和国家自然科学基金面上项目(批准号: 41076009)资助

摘要 本文扼要回顾了海气耦合模式的发展历程, 然后介绍了国内外区域海气耦合模式的研究现状与最新进展, 并对发展区域海气耦合模式所涉及的一些核心技术和科学问题进行论述, 其中包括耦合技术、侧边界处理、海气与海浪(海冰)的耦合和资料同化等问题. 另外, 文中还讨论了区域海气耦合模式在数值模拟和动力降尺度中的应用. 文章最后指出当前区域海气耦合模式发展中有待解决的一些问题, 并就未来的发展方向提出了几点建议和想法.

关键词区域海气耦合模式
耦合器
侧边界条件
资料同化
动力降尺度

大气和海洋是地球系统中两个最为重要的成员, 大气和海洋之间的相互作用在整个地球圈层天气气候系统的生消和演变过程中起着主导作用. 由于大气和海洋运动具有不同的时间和空间特征尺度, 因此我们很难用一个统一的数学模式来描述所有这些运动. 另一方面, 单一的大气环流模式(AGCM)或海洋环流模式(OGCM)又无法完整的描述大气与海洋的相互作用过程. 因此, 非常有必要将现有的 AGCM 与 OGCM 耦合在一起, 组成一个各成员间可以即时相互交换信息的有机系统, 这就是发展海气耦合模式(CGCM)的缘由^[1]. 早在 20 世纪 60 年代末期, Manabe 和 Bryan^[2]率先对理想几何区域进行了海气耦合模式的设计和气候数值模拟; 随后, Manabe 等^[3,4]、Bryan 等^[5]、Washington 等^[6]等考虑真实的全球海陆分布, 进一步发展了全球海洋大气耦合模式. 自 80 年代中期至今, 气象工作者在海气相互作用领

域进行了大量创造性工作, 海气耦合环流模式也得到了蓬勃的发展, 同时在耦合技术上也取得很大进步, 已用“直接通量耦合”技术取代过去“通量调整”技术^[7]. 截至 2007 年, 提交至政府间气候变化委员会(IPCC)第四次评估报告(AR4)的参评耦合模式已达 25 个^[8], 其耦合方案全部采用直接通量耦合技术. 与此同时, 我国科学家从 20 世纪 80 年代开始发展大气环流模式和海洋环流模式^[9-13], 90 年代初开始发展海气耦合模式^[14-17]. 尤其是近年来受高性能计算机的快速发展影响, 我国耦合气候系统模式的发展也有了前所未有的快速进步. 尤其值得指出的是, 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)在该领域进行了艰苦卓越的工作并取得一系列成果: 90 年代初期, 发展了第一至第三代基于“通量订正”耦合技术的 CGCM^[14-17]; 21 世纪初建立了基于“直接通量耦合”技

术的第四代 CGCM, 亦即“灵活的耦合环流模式”(the Flexible General Circulation Model, FGCM)^[18], 随后在此基础上又发展成第五代 CGCM——“灵活的全球海洋-大气-陆面耦合系统模式”(FGOALS, the Flexible Global Ocean-Atmosphere-Land System model)^[19-21]; 此外, 在中国气象局的支持下, 国家气候中心也建成了另一个物理气候系统模式 BCC-CM1^[22].

大气或海洋数值模式的发展可以粗略地划分为 4 个阶段, 即单一模式阶段、海气耦合模式阶段、气候系统模式阶段与地球系统模式阶段. 单一模式阶段是指仅考虑单个气候子系统的数学模式(如 AGCM 和 OGCM 等)阶段, 用于描写对应的单个气候子系统的演变过程和性状; 海气耦合模式阶段是指考虑以地球流体(大气、海洋)为主体的耦合模式阶段, 其中固体地球部分只考虑了地球表层的陆面物理过程, 通过在数值模式中实现海-气(海-陆-气-冰)的自然耦合来了解海-气(海-陆-气-冰)相互作用的机理. 气候系统模式阶段是指在海气耦合模式的基础上, 考虑大气化学过程、生物地球化学过程(比如地球圈层的碳、氮等循环过程)和人文过程. 地球系统模式阶段则是在气候系统模式的基础上进一步考虑其固体地球的变化(如地球板块移动及其引发的地形变化、地震、火山爆发等)和地球气候系统的相互作用过程, 并把太阳活动变化等大自然的影响有机地考虑进来, 以帮助人们更全面、更客观地了解 and 掌握地球系统的变化规律及其影响因子.

就海气耦合模式本身的发展而言, 其经历了从全球到区域, 从简单到完善(复杂)的发展历程^[23]. 最初的海气耦合模式主要用于厄尔尼诺和南方涛动(ENSO)研究, 这类模式通过引入大量假设以简化复杂的海洋与大气物理过程, 突出了所研究问题的重点, 并对主要过程进行了高度参数化, 使模式大为简化, 比如 Zebiak 等^[24]研制的简单海气耦合距平模式(ZC 模式)及徐建霞等^[25]开发的一个三维简单的“现象学”海气耦合模式即属于这一类; 随着计算机运算速度的提高及耦合技术的不断完善, 耦合模式中的一个模式分量(海洋或大气模式)开始采用包含复杂物理过程的完善模式, 另一分量模式仍采用简单模式, 此类模式被称为“混合海气耦合模式”; 后来, 又出现了所谓“完善海气耦合模式”(fully coupled atmosphere-ocean models), 即耦合模式中的海洋和大气模式都采用包含复杂物理过程的完善模式. “完善海气

耦合模式”的共同特点是对物理和动力过程处理得较为复杂, 对大气和海洋刻画得都比较仔细, 因此能较好地反映海气相互作用的实质, 这毫无疑问是未来海气耦合模式的一个发展方向. 美国国家大气研究中心(NCAR)所发展的气候系统模式(CSM)^[26]、通用气候系统模式(CCSM)^[27], 以及日本地球模拟器中心发展的地球模拟器(Earth Simulator)^[28], 就属于这类模式.

全球海气耦合模式主要用于研究大尺度大气和海洋物理过程之间的相互作用, 以及它们的季节和年际年代际变化规律. 然而, 大气和海洋之间还存在一些发生在有限的空间尺度(如海盆尺度)和短时间尺度(一般小于 1 周)的海-气相互作用现象, 如热带气旋和中纬度海洋爆发性气旋、沿海大风与低空急流、沿海风暴潮与海雾、沿海锋生及上层海洋变异等, 其动、热力机制主要受中小尺度的海-气相互作用过程所控制. 因此, 这就要求发展合适的区域海气耦合模式来对其进行更细致全面的研究. 近年来, 为了研究较小尺度海气相互作用的过程, 尽管各国开始尝试提高全球海气耦合模式的模式分辨率, 但受目前计算机条件的限制, 模式分辨率不可能无限度提高, 而且在涉及海洋中尺度涡旋和其他中小尺度的海气相互作用的研究中, 相比全球海气耦合模式, 一个由相应大尺度环流驱动的高分辨率区域海气耦合模式的模拟效果更好^[29,30]. 另一方面, 在全球气候变化的背景下, 区域性气候的变化特征呈现出显著的非均一性和极端性, 因此利用区域海气耦合模式对区域性气候进行降尺度的数值模拟与预测也成为近些年来海洋大气科学的一个研究热点. 可以预见, 未来很长时间内区域海气耦合模式与全球海气耦合模式将同时并存, 且互为补充. 为此, 本文着重介绍国内外区域海气耦合模式的发展现状及最新研究进展, 为我国区域海气耦合模式的发展提供有益的借鉴和参考.

1 国内外区域海气耦合模式的发展状况

在近十几年来中, 各国研究机构基于不同的应用目的进行了一系列的发展区域海气耦合模式的尝试. 表 1 列出 20 世纪 90 年代以来世界各国研究机构先后发展的一些较著名的区域海气耦合模式及其相应的大气、海洋分量模式的水平分辨率. 下面分别就国外和国内的区域海气耦合模式的发展状况作简要的介绍.

表 1 国内外著名区域海气耦合模式

研发机构(耦合模式名称)	国家	大气模式	分辨率 (km)	海洋模式	分辨率 (km)	耦合器	开发人	年份
Naval Research Laboratory (COAMPS)	美国	COAMPS-AM	5~45	COAMPS-OM	5~45		Hodur 等 ^[31]	1997
NOAA/GFDL, Princeton University	美国	GFDL hurricane model	9~111	POM	9~111		Knutson 等 ^[32]	1998
Swedish Meteorological and Hydrological Institute	瑞典	HIRILM	20	BOBO-PROBE	20		Gustafsson 等 ^[33]	1998
Institut für Meereskunde/MPI	德国	REMO	18	BSMO	5		Hagedorn 等 ^[34]	2000
School of Marine Sciences, University of Maine	美国	ARPS	10~20	POM	10~15		Xue 等 ^[35]	2000
NOAA/Environmental Technology Laboratory	美国	MM5	15~45	CUPOM-WA M	20		Bao 等 ^[36]	2000
南京大学	中国	P-σRCM	111	POM	111		任雪娟等 ^[37]	2000
Rosby Centre, SMHI	瑞典	RCA	44	RCO	44	OASIS	Döscher 等 ^[38]	2002
Bedford Institute of Oceanography	加拿大	MC2	30~35	POM-WW3	18		Perrie 等 ^[39,40]	2003
University of Hamburg/MPI	德国	REMO	55	HAMSOM	55		Schrum 等 ^[41]	2003
BMRC /CSIRO (POAMA)	澳大利 亚	BAM	T47	ACOM2	55	OASIS	Alves 等 ^[42]	2003
武汉理工大学	中国	MM5V3	37.5	ECOM-si	10		亓春霞 ^[43]	2003
Max-Planck-Institut für Meteorologie	德国	REMO	55	MPI-OM	15~37	OASIS	Aldrian 等 ^[44]	2004
JAERI	日本	MM5	15~45	POM-WW3	22	MPI	Nagai 等 ^[45]	2005
LASG	中国	MM5V3	37.5	ECOM-si-W W3	10	DMCSS	黄立文等 ^[46]	2005
Marine Meteorology Division, Naval Research Laboratory	美国	COAMPS	4~36	NCOM	2		Pullen 等 ^[47]	2006
Meteorological Research Institute	日本	RCM20	20	NPOGCM	18~25		Sasaki 等 ^[48]	2006
Scripps Institution of Oceanography (SCOAR)	美国	RSM	16~50	ROMS	7~42	Flux-SST coupler	Seo 等 ^[29]	2007
南京大学	中国	RegCM3	60	POM	60		姚素春等 ^[49]	2008
LASG	中国	MM5V3	10~30	POM-WW3	18		关皓等 ^[50]	2009
Woods Hole Science Center (COAWST)	美国	WRF	2~6	ROMS-SWA N	1~5	MCT	Warner 等 ^[51]	2010
南京大学	中国	RIEMS	60	POM	60	Flux-SST coupler	Fang 等 ^[52]	2010
LASG	中国	RegCM3	60	HYCOM	33	OASIS3	李涛等 ^[53]	2010
解放军理工大学	中国	WRF	4	ROMS	32	MCT	孙一妹等 ^[54]	2010

1.1 国外区域海气耦合模式的发展状况

在 20 世纪 80 年代中期, 国外就开始有很多关于区域海气耦合模式的研究^[30]. 他们大部分是基于全球大气环流模式与热带区域性海洋环流模式建立的海气耦合模式, 主要用于研究热带海气相互作用现象, 如 ENSO 事件. 随着日益增长的对区域气候及天气进行精细化模拟和预报的需求, 各国科学家在发展区域海气耦合模式的研究方面进行了大量创造性工作. 美国海军于 1997 年发展了一个双向(two-way)耦合模式 COAMPS^[31], 经过多年的不断完善和测试, 于 2004 年 9 月推出 COAMPS3.1.1, 并初步在西太平洋和地中海区域取得良好模拟效果. 随后, 美国 NOAA 的地球流体动力试验室(GFDL)将可移动套网

格飓风模式 GFDL 与高分辨率的区域海洋模式 POM 耦合, 对全气候变化下大西洋热带气旋生成频率与强度进行了研究^[32]. Gustafsson 等^[33]基于一个高分辨率的大气模式 HIRILM 和一个低分辨率的海冰-海洋模式 BOBO-PROBE, 建立一个区域海气耦合模式, 用来对波罗的海地区进行准确的天气预测. Hagedorn 等^[34]将德国 Max-Planck 气象研究所(MPI)的区域大气模式 REMO 和海洋模式 BSMO(the Baltic Sea model)进行了耦合, 并应用到相同的波罗的海地区, 结果表明即使没有通量校正, 模式的海表温度(SST)分布也有所改善; 不过改善仅限于夏季, 主要原因是耦合模式的海洋-海冰模式部分还不够完善. Xue 等^[35]建立了一个二维的由中尺度大气模式 ARPS^[55]与海

洋模式 POM 耦合组成的耦合模式, 随后 Li 等^[56]将之发展成三维的耦合模式, 并用之成功模拟出西北大西洋上的一次冬季风暴中的海气相互作用过程. Döscher^[38]等则建立了区域耦合海洋-大气-海冰模式 RCAO(the Rossby Centre Atmosphere Ocean model), 在多年观测的基础上, 成功的模拟了欧洲北部地区的区域耦合气候情景. Schrum 等^[41]在德国 MPI 区域大气模式 REMO 和汉堡三维海洋模式 HAMSOM 的基础上, 成功的实现了完全的通量耦合, 并发现相互耦合后的海洋-大气模式运行稳定, 且模拟效果明显好于用给定的 SST 驱动的大气模式. Aldrian 等^[44]将区域大气模式 REMO 耦合到德国 MPI 的全球海洋模式 MPI-OM, 用来研究印尼的降雨过程中海气的耦合效应. Pullen 等^[47]将海军海岸海洋模式(NCOM)耦合到海气耦合中尺度预报系统(COAMPS), 建立了一个适合亚得里亚海地区的区域耦合系统. Sasaki 等^[48]将一个高分辨率区域大气模式 RCM20, 利用多重嵌套的方法耦合到一个范围覆盖整个北太平洋区域的海洋模式(NPOGCM), 并积分 10 年来评估该模式对日本气候的模拟能力. Seo 等^[29]将 ROMS 与大气区域谱模式 RSM 耦合, 建立 SCOAR 耦合模式, 并利用它分析了东太平洋海区中尺度涡流场中海气反馈的作用. 此外, 澳大利亚气象研究中心(BMRC)和 CSIRO 联合发展了大气海洋耦合预报模式(POAMA)^[42]. 美国国家海洋和大气的管理局(NOAA)下属的全国海洋服务部(NOS), GFDL、沿岸海洋项目办公室(COPO)、美国国家环境预报中心(NCEP)和普林斯顿大学等多家政府部门和科研机构共同研制了一个完全耦合的三维的高分辨区域海气耦合模式^[57].

1.2 国内区域海气耦合模式的发展状况

虽然我国在研究全球和大尺度海气耦合模式上做了较多工作^[14-22,58-63], 起步也比较早, 但关于区域海气耦合模式的研究却起步较晚, 直到 20 世纪 20 年代中期才开始. 王志仁等^[64]将一个由一层大气模式和一层海洋模式构成的简单区域海气耦合模式, 用于对 1982~1983 年 El Nino 事件的研究. 对于复杂的区域海气耦合模式则是从 20 世纪 90 年代末开始尝试. 吕世华等^[65]初步发展了一个适合南海地区的区域海气耦合模式, 发现该模式对海洋环流的模拟结果明显好于用气候月平均风应力和热通量强迫的区域海洋模式 POM 的模拟结果, 并且还可以模拟出南海地

区尺度较小的涡旋系统及冷暖中心. 与此同时, 任雪娟和钱永甫^[37,66,67]把 POM 与 P- σ RCM 5 层模式进行了初步耦合, 发现区域海气耦合模式对气候平均态的季节变化有较好的再现能力. 在此基础上, Lin 等^[68]进一步将 POM 和 P- σ RCM 9 层模式进行了耦合, 用来模拟南海海气相互作用对南海夏季风爆发和演变等过程的影响. 随后王志福等^[69]用该模式的 40 年(1963~2002)夏季降水模拟结果, 并采用百分位的方法定义极端降水事件, 分析了耦合模式模拟的夏季中国极端降水事件的特征. 姚素春等^[49]以区域气候模式 RegCM3 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, 并对 1963~2002 年中国夏季气候进行模拟, 重点分析该耦合模式对中国夏季降水的模拟性能以及降水模拟改进的可能原因. 谢坤等^[70]用该模式对华北夏季大气水汽输送的模拟结果与单独气候模式的模拟结果比较分析. 结果表明, 区域海气耦合模式 RegCM3-POM 的模拟性能相对于单独区域气候模式 RegCM3 而言, 对大气水汽输送特征的模拟有了较大的改进, 尤其是对流层中低层更接近实际观测. 此外, 中国科学院大气物理研究所将大气模式 AREM^[71]和海洋模式 ECOM-si 进行耦合, 发展了适合我国黄东海区域的海气耦合模式 LASG-MCM^[72]. AREM 是国内自行开发的一个静力模式, 相对于国际上一些更为先进的模式仍有一些不足, 因此元春霞^[43]在 LASG-MCM 的基础上, 将中尺度大气模式 MM5V3 取代 AREM, 发展了一个适合于我国近海及邻近海域的区域海气耦合模式系统. Fang 等^[52]将中国科学院东亚中心的 RIEMS 与 POM 完成耦合, 探讨了该耦合模式对 2000 年东亚夏季气候的模拟能力. 李涛和周广庆^[53]把大气模式 RegCM3 和海洋模式 HYCOM 进行了耦合, 发展了一个应用于东亚的区域海气耦合模式, 成功地模拟出东亚地区大气和海洋的气候平均态、季节变化以及年际变化的主要特征, 尤其是对东亚季风降水的模拟相对于未耦合模式, 有一定程度的改善, 但由于分量模式本身的缺陷导致耦合模式的模拟结果和观测还存在一定的差距. 孙一妹等^[54]将 WRF 和 ROMS 进行了耦合, 并采用 MCT 耦合器技术及消息传递的并行计算方式, 发展了新一代中尺度海气耦合模式 WRF_ROMS-1.2. 蒋小平等^[73,74]在中尺度大气模式 MM5 和普林斯顿海洋模式 POM 的基础上, 将 Linux 系统的管道通信技术运用到大气-海洋耦合模式的研究

究, 实现了中尺度大气模式与海洋模式的双向耦合.

2 区域海气耦合模式的关键技术问题

区域海气耦合模式的核心技术是实现高效的海气通量及相关参数在子模式之间的交互传递, 并保证整个耦合系统质量和能量的守恒. 另外, 侧边界的处理也是区域海气耦合模式的另一关键技术难题.

2.1 耦合技术

如何克服由于在耦合界面上各种通量的误差在耦合过程中不稳定增长而导致的气候漂移问题, 一直是海气耦合模式的关键技术之一. 为解决这一问题, Sausen 等^[75]提出了“通量订正”方案, 并经过后来一些研究工作的改进, 逐渐成为一个较通用的方法, 2000 年以前的耦合模式大多采用这一技术. 计算机等技术的发展, 使得“直接通量耦合”成为可能, 1998 年 NCAR/CSM^[26]率先实现了大气模式与海洋模式的直接耦合, 这是物理气候系统模式发展的一个进步, 因为这种方案能排除“人为调整”的主观影响, 更客观、更自然地描述圈层间的能量和物质交换. 本世纪以来, 海气耦合模式的研制多采用这种“直接通量耦合”方案, 尤其是目前提交至 IPCC-AR4 的参评耦合模式都采用这种方案.

在耦合技术的发展上, 归纳起来主要有以下 4 种: (1) 基于文件输入输出的模式耦合方法, 即一个模式将要传递的变量输出到文件, 作为另一个模式的输入文件. 但这种方法具有信息交换效率低的缺点, 只适用变化非常缓慢的物理过程. (2) 将一个模式作为另一个模式的子程序进行调用, 但这种方法可移植性较差. (3) 基于上面两种原因, 近年来, 有学者利用 Unix/Linux 系统中的管道通信技术实现了模式间的双向耦合, 由于大部分模式都是运行在 Unix/Linux 系统下, 这种耦合的方法具有较好的适用性和可移植性. (4) 20 世纪 90 年代初, 随着各子模式的模块化结构程度的提高, 模式发展者推出“耦合器”(Coupler)的概念, 此后耦合器技术迅速发展, 并成为当今耦合模式中普遍采用的耦合技术. 有关耦合器技术的详细介绍, 请参阅周天军等^[7]的文章, 以下仅对此做一简要介绍.

所谓耦合器, 其实就是一个高度集成和灵活的程序软件, 它可以将各子模式连接起来组成一个完

整的耦合模式系统, 控制整个耦合系统的积分过程并有效实现各子模式之间信息交换. 耦合器的研制首先要考虑的核心科学问题是要保证整个耦合系统总质量和总能量的守恒. 由于耦合模式中各子模式在计算界面通量(如动量、热通量和水通量等)时所用方案不同等因素, 当进行这些界面通量的交换时, 如果不进行相应处理, 可能会造成整个耦合系统质量或能量的不守恒, 这样耦合模式在积分过程中就会发生不稳定或气候“漂移”问题. 因此耦合器必须要对各子模式计算出来的各种通量值根据质量和能量守恒原则进行适当处理或再由耦合器本身根据状态变量重新计算, 然后再分配到各个子模式中, 以保证整个耦合系统质量和能量的守恒. 在技术上, 耦合器的研制首先要考虑它的通用性、灵活性和可扩展性, 比如可兼容由不同语言编程的子模式, 其接口可以灵活增加更多子模式的耦合等等. 目前世界上已经开发了很多各具特性和优点的耦合器(见表 2), 其中具有国际影响并被广泛使用的主要有美国 NCAR 的 CCSM 耦合器(或称 CPL 耦合器)、法国 CERFACS 的 OASIS 耦合器以及欧盟基于 OASIS 的 PRISM 耦合器. 它们的共同特点是在结构上都是高度模块化, 且适用于不同计算机平台, 具有在各子模式间进行快捷信息传递及不同数据间的转换等功能, 并对交换通量进行质量和能量守恒的处理, 他们最大的不同体现在两个方面, 其一是 CCSM 耦合器统一计算通量值并调整其守恒性, 而 OASIS 或 PRISM 耦合器对通量的计算则是分散在各子模式中, 然后将这些通量汇总起来并进行守恒性调整; 其二是 CCSM 不支持各子模式间数据的直接交换, 所有数据交换都必须通过耦合器来实现, 而 OASIS 或 PRISM 则允许具有相同空间分辨率的子模式间进行直接的数据交换.

随着耦合系统子模式数量的增多以及对通信效率要求的不断提高, 可以预见, 采用“非通量订正”、模块化的直接耦合技术即“耦合器”技术, 兼顾技术性和科学性, 以及高度灵活性和可扩展性, 应该是未来耦合技术的发展趋势.

2.2 侧边界的处理问题

区域海气耦合模式区别全球海气耦合模式的一个重要特点是, 前者存在侧边界条件, 即需要全球(或较大区域的)海气模式来产生其侧边界条件, 且模拟结果依赖于侧边界条件, 因此侧边界条件的处理

表 2 国内外著名耦合器

耦合器名称	国家	研发机构	年份
CPL/CCSM	美国	国家大气研究中心气候与全球动力部(NCAR/CGD)	1990
OASIS	法国	欧洲气候模拟和全球变化研究中心(CERFACS)	1991
COWPOKE	美国	橡树岭国家实验室(ORNL)	1991
PALM	法国	欧洲气候模拟和全球变化研究中心(CERFACS)	1996
GEMS	美国	美国国家航空航天局(NASA)	1997
DDB	美国	加州大学洛杉矶分校(UCLA)	1999
FMS	美国	普林斯顿大学地球物理流体动力学实验室(GFDL)	2001
PRISM	欧盟	欧洲气候模拟和全球变化研究中心(CERFACS)	2002
MCT	美国	阿尔贡国家实验室(ANL)	2005
DMCSS	中国	武汉理工大学	2006

是区域海气耦合模式的一个关键性技术问题。

侧边界是区域大气或海洋模式的主要误差来源之一,也是区域模式不可避免的一个难题. 对大气模式的研究表明,应用一个合适的嵌套方案与输入一个好的侧边界条件,比改造区域气候模式的任何物理过程都重要^[76,77]. 单就大气或海洋区域模式而言,侧边界给模拟或预报结果造成的误差主要由以下这些因素所致^[78]: (1) 提供边界值的全球模式或在分析资料的时空分辨率通常比区域模式的要低很多,因此插值到区域模式格点后就会引入相应误差; (2) 全球模式或再分析资料本身可能会存在较大误差,这些误差因而会通过边界传至区域模式内; (3) 区域模式计算区域内外不同尺度动力过程的相互作用及其反馈受到边界限制从而导致模式误差; (4) 侧边界的数学或工程处理方案可能会在计算区域产生虚假重力惯性模,进而对模式结果造成一定负影响; (5) 提供边界值的粗分辨率模式的物理过程参数化方案可能有别于区域模式的方案. 而对于区域耦合模式,引起侧边界误差的因素可能更复杂多样. 因此,侧边界所引起的误差不可能完全被消除,只能部分被消除或降低,比如增大计算区域面积以使关注区域远离边界,区域模式和提供边界的模式采用相似的数学算法和物理参数化方案,采用经过充分验证的、能有效消除或抑制虚假惯性重力波向内区域传播的边界处理方案,边界的设置尽量避开陡峭地形等会产生强动力强迫的地区,等等.

目前区域模式的边界处理技术方案基本上可分为“双向”(two-way)嵌套^[79~81]和“单向”(one-way)嵌套^[82~84]两种,前者考虑区域模式结果对提供边界值的模式的影响及其这种影响对区域模式的反馈作用,后者则不考虑这种影响和反馈作用. 为消除传出波

在边界的反射以及区域内外不同尺度之间作用的不协调性,这两种嵌套方案在侧边界上采用了各种有效的方法. 就大气模式分量而言,主要处理方法有以下两类^[85],一类是采用海绵边界方案^[86]或 Davies 松弛逼近方案^[87],即在侧边界邻域引进一定宽度的侧边界缓冲区或引进某种形式的附加修正项,从而部分地修正原动力学方程组的性质,以弱化模式变量在边界上的超定义属性;第二类是采用辐射方案^[88,89],区别对待流入流出边界条件,估计局地相速或特征相速,尽可能地逼近适定的边界条件. 就海洋模式分量而言^[90],侧边界处理方法主要有简单边界方案(如固壁边界方案)、辐射方案、松弛方案、Stevens 方案以及 Gill 方案. 现在广为使用的侧边界处理方法则是从出流和入流的不同来分别采取辐射和松弛的处理方法,称为混合开边界方法(mixed open boundary algorithm)^[91]或自适应方法(adaptive algorithm)^[92],但是,这有一个前提,那就是观测数据的存在. 对于广阔的海洋,现有的观测是相对稀少而缺乏的,因此,当没有观测数据可用的时候,特别是在长时间的积分问题中,忽略边界附近海洋系统的变化必然会影响到整个模式的模拟效果. 比如任雪娟等^[37],姚素香等^[49]只是简单地将温盐场向气候态进行张弛逼近,而忽略了边界附近黑潮的季节及年际变化,导致整个模式的模拟效果受到影响. 为考虑这种影响,有些区域海气耦合模式采用增大海洋部分模拟区域的方法,从而使海洋模式的范围远远大于大气模式. Aldrian 等^[44]就利用多重嵌套的方法将一个高分辨率区域大气模式 REMO 与马克思·普朗克全球海洋模式(MPI-OM)进行耦合,并积分 14 年来评估该模式对印度尼西亚降水的模拟能力. 类似的设置也出现在 Sasaki 等^[48]及李涛等^[53]的研究中.

尽管目前区域海气耦合模式的侧边界问题处理已经积累了很多经验,也取得了较好效果,但仍然存在很多问题,其中一个较显著问题就是目前区域海气耦合模式中各分量模式的侧边界条件大多来自对应的非耦合全球大气或海洋模式,这样就可能会因输入的大尺度大气边界值与海洋边界值不协调性而导致耦合模式的模拟预报误差增大或积分过程中不稳定性增强.因此,尽量采用全球海气耦合模式的预报结果(或基于全球海气耦合模式的再分析资料)来给定区域耦合模式中各分量模式的侧边界条件,并采用“双向”嵌套的方案,应该是消除或减少这一误差来源的有效办法.

3 海-气-浪(冰)耦合与资料同化

3.1 海-气耦合模式与海浪(或海冰)模式的耦合

随着科学技术的飞跃发展,以及人们对气候系统认识的深入,海-气相互作用的内涵也发生了变化.为了准确的反映出海气耦合模式中海-气相互作用的全过程,耦合模式中应该不仅仅包括大气和海洋相互作用,还应包括海冰、海浪、海洋环流甚至海洋生物化学等过程以及它们与大气、海洋的相互作用.因此,只有建立完善的大气-海洋-海浪-海冰耦合模式,才能更为准确地描述海-气相互作用过程,这也是未来海气耦合模式的发展趋势.尤其是从 20 世纪 80 年代开始,海浪对海-气相互作用的影响研究引起了学者们的密切关注^[93].海浪对海-气相互作用的影响研究主要是围绕海面粗糙度展开,海面粗糙度是研究海-气相互作用中一个非常重要的物理量^[94,95],它是表征海面空气动力学粗糙程度的物理量,描写了海面微尺度起伏的程度.研究表明,海面粗糙度主要与海浪特征(波龄、波高等)有关^[93,96-107].此外,海浪破碎及“白冠”效应产生的海洋飞沫在海气边界上对物质与能量交换所起的作用也不容忽视,因此从 90 年代中开始对海浪飞沫的研究逐渐被重视^[108-112].尤其是进入本世纪初,随着观测技术的发展,高风速下的海浪飞沫对海气相互作用的影响更是被引起高度关注^[39,40,113-119].

随着对海浪、海冰等如何影响海气相互作用过程的研究取得新的突破^[105-107],许多学者开始发展独立的海浪或海冰数值模型并将之引入到区域耦合模式

中,用于研究海洋的表面状态(海冰、海浪、表面波、表面粗糙度等)对大气环流的影响. Lynch 等^[120]发展了一个包括大气、海洋、海冰和陆面的北极区域气候模式系统,研究表明,海冰动力学对北极地区冬季的模拟结果有实质性的影响.与此同时,考虑海浪作用的耦合模式也得到了较大的发展.20 世纪 90 年代初, Hasselmann^[121]提出了建立“大气-海浪-海洋耦合模式”来进行天气预报、气候模拟和预测的构想.随后, Ly^[122]提出了解决海-气-浪相互作用的数值算法,为建立海-气-浪耦合数值模式打下基础.进入 21 世纪之后,许多学者在考虑浪作用的耦合模式研究领域进行了大量创造性工作. Powers 等^[123]发展了一个完全的大气-海洋-波浪耦合模式系统,并以伊利湖地区的锋面过境为例,对大气模式 MM5 的表面粗糙度参数化过程进行敏感性试验.发现在海洋表面粗糙度参数化过程中考虑波浪年龄,可显著改善的表面风应力和热通量计算. Bao 等^[36]将中尺度大气模式 MM5,与科罗拉多大学版本的区域海洋模式 CUPOM 及海浪模式 WAM 耦合,发展了一个大气-海洋-波浪耦合模式系统,用来评估墨西哥湾流中浪花、海洋表层混合作用及海洋暖心旋涡对墨西哥湾飓风的强度的影响. Doyle^[124]将区域耦合模式 COAMPS 与海浪模式 WAN 进行耦合,并引入新的粗糙度计算方案,用来分析高风速下的海浪对热带气旋强度及结构的影响,结果表明,相对于单一模式,耦合模式对气旋强度、降水以及有效波高的模拟结果更为接近观测结果. Perrie 等^[39,40]考虑波浪破碎对海-气相互作用的影响,并对其进行参数化,以此为基础建立了一个海浪-大气-海洋耦合模式,用来对西北大西洋风暴进行模拟研究,发现一个包括海浪的高分辨率区域海气耦合模式对研究波浪及波浪破碎、海洋飞沫、风浪引起的混合对模拟台风的强度和演化过程的影响,都是很有用的. Nagai 等^[45]发展了一个包括大气、陆面、水文、海浪、海洋环流的耦合模式系统,用来进行中尺度海域的海洋环境数值模拟. Chen 等^[125]建立了耦合边界层海气交换(CBLAST)-飓风模块,以及进一步改进和发展相应的参数化方案,并在此基础上发展下一代完全耦合的飓风预报模式. Warner 等^[51]将区域海洋模式 ROMS、大气模式 WRF、海浪模式 SWAN 及沉积运输模式 STM 通过 MCT 耦合器耦合在一起,形成耦合的海-气-浪-沉积输运模式(COAWST),并将之应用到近岸风暴的预报中.

近年来,国内也开始关注和研究海气相互作用中海浪的影响,并在海气耦合模式中加入对海浪的模拟及其对海气作用的反馈.黄立文等^[46]和文元桥等^[126,127]在中尺度海-气耦合模式LASG-MCM的基础上,加入海浪模式WAVEWATCH-III(WW3),发展了一个区域大气-海浪-海洋耦合模式系统.该耦合模式系统首次采用我国自主研发的耦合器“分布式多模式耦合系统”(DMCSS)为平台,对海-气-浪相互作用的过程进行了描述.Zhang等^[128,129]用该耦合系统对数个台风个例的数值试验表明,海-气-浪耦合模式的模拟结果明显优于独立海浪模式,能显著改善台风过程中台风、海洋和海浪的预报精度.关皓等^[50]基于中尺度大气模式MM5,区域海洋模式POM和第三代海浪模式WW3,建立综合考虑海气之间动力、热力相互作用的区域海-气-浪耦合模式系统,成功地模拟出南海台风的移动路径和强度,并且模拟出南海台风过程中海浪场的演变过程.

3.2 区域海气耦合模式中的资料同化问题

资料同化是提高数值模拟和预报技巧的一个重要手段,也是近年来国际上海洋与大气的数值模拟研究中的热点问题之一.随着卫星遥感技术等观测技术的发展,越来越多观测数据(包括各种现场观测数据及卫星遥感数据)可以获得,同时资料同化技术和计算机速度的不断发展,这些都使得资料同化在大气与海洋数值模拟和预报中的作用显得越来越重要.有别于过去简单的空间插值等方法,现代资料同化是指将观测资料与数值模式物理和动力过程以及模式变量的统计协方差相结合,寻求与模式物理和动力过程相一致的最优初始场、边界场或物理参数等,使模式模拟或预报结果与实况最接近.

目前大气或海洋资料同化中普遍使用的较先进的方法主要有三维/四维变分^[130~136]和集合卡门滤波^[137~144].这些方法都是基于非耦合的大气或海洋模式发展起来的,因此不一定完全适用于耦合模式.这是因为,一方面,由于流体性质的不同,描述大气与海洋运动的控制方程也有显著差异,而且相对独立,因此在同化方法中很难用一个统一的数学表达式或协方差矩阵去刻画大气和海洋各变量间的关联性;另一方面,大气与海洋运动的时空尺度不同,对模式初边场的敏感性也不同.这都导致很难在海气耦合模式中同时进行大气和海洋观测资料同化.因此目

前海气耦合模式的资料同化基本上都是采用分别在大气和海洋分量模式中同化大气和海洋观测资料的方法,在同化过程中大气(海洋)观测资料只影响大气(海洋)模式的变量,而对海洋(大气)模式的变量没有直接影响.这种大气和海洋单独同化的方式由于不考虑大气与海洋间的相互作用关系,无疑会导致同化后大气和海洋模式初始场或边界场之间的不协调问题.因此,研究并建立与耦合模式相对应的耦合同化方法和系统,应该是解决这种由分别同化所带来的不协调问题的有效途径.在这方面,已有学者做过一些初步尝试.Chen等^[145,146]和Ballabrera-Poy等^[147]曾针对一个简化的用于预测ENSO的海气耦合模式(ZC模式)^[24],利用逼近(nudging)法和降阶卡门滤波法建立该耦合模式的初始化过程,将风应力、海表高度以及海表温度同化进耦合模式中,对ENSO的预报水平明显提高.对于复杂(即包含完整动力和物理过程)的全球海气耦合模式的资料同化研究,美国NOAA/GFDL的科学家在这方面做了一些开创性的研究工作,并初步建立了基于集合卡门滤波方法的“耦合资料同化”系统^[148~150](图1).他们将集合卡门滤波同化方法应用到GFDL全球气候耦合模式(CM2.0)中,同时同化由模式产生的“完美”的海洋和大气资料(亦称“伪观测”),并考虑海气耦合的动力

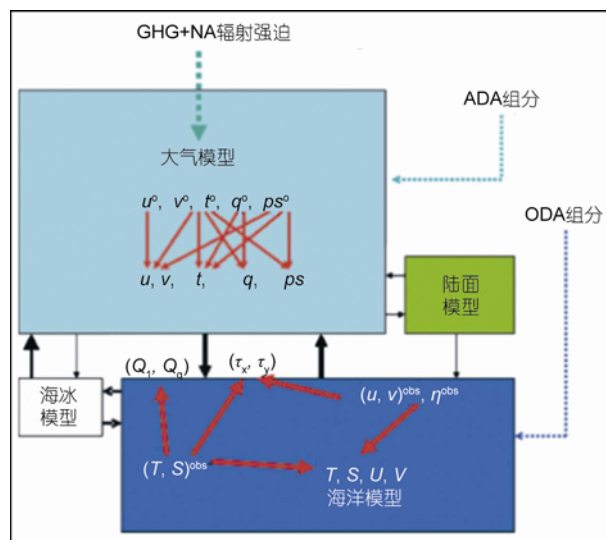


图1 GFDL“耦合资料同化”系统示意图

黑色箭头表示耦合模式分量之间的通量交换,红色箭头表示观测资料对模式变量的直接影响,绿色粗虚箭头表示在同化过程中耦合模式采用温室气体(GHG)、自然气溶胶(NA)及辐射强迫. ADA和ODA分别表示大气和海洋资料同化子系统. 引自Zhang等^[148]

约束对同化结果的直接和间接影响,即观测资料既能对海气界面交换通量(如海表风应力、热通量等)进行直接调整,同时又能通过海洋与大气之间的反馈作用去优化背景协方差矩阵从而间接调整耦合模式变量。“伪观测”同化试验结果表明,此“耦合资料同化”系统对减少耦合模式对 ENSO 等气候事件模拟误差十分有效(图 2)。然而,由于计算量庞大的原因,试验中仅用了 6~24 个集合数,因此其试验结果带有较大局限性。另外,对于复杂的区域海气耦合模式来说,其侧边界问题也使得资料同化问题更加复杂,一方面,侧边界可当作同化过程中除初始场外的另一控制变量来进行调整;另一方面,如果侧边界所引起的误差很大,那么可能会将区域内资料同化的效果抹掉,而且边界附近的资料同化会容易引起模式积分不稳定。因此区域海气耦合模式的资料同化问题无疑是今后需要气象和海洋科学家们深入研究和探讨的重要课题。

4 区域海气耦合模式的应用

4.1 在数值模拟和预报中的应用

自 20 世纪 90 年代中,很多学者开始尝试建立与飓风等极端天气事件相适应的区域海气耦合模式,用来预测这些极端天气事件或研究与之有关的海气

相互作用过程。Knutson 等^[32]及 Bender 等^[151~153]在这一领域做了开创性的工作,他们将 GFLD 可移动套网格飓风模式与高分辨率的区域海洋模式 POM 耦合,有效的提高了对飓风强度的模拟。Loggisci 等^[154]应用他们的耦合模型研究了在亚得里亚海地区的布拉风事件(bora event)的动力学和热力学效应。他们发现,准确模拟海面热通量需要考虑与此布拉风事件相关联的特定的海气相互作用规律以及改善海表温度的模拟。Pullen 等^[47]在同一地区建立了区域耦合系统,并重点关注高分辨率的表面海温对空气性质的耦合效应,特别是在一个布拉风活动期间的耦合效应。他们发现,布拉风事件后模拟的海表温度对大气有一定的稳定效应,从而减少大气边界层混合,产生更接近观测的近地表风速。Seo 等^[129]利用其发展的 SCOAR 耦合模式,分析并证实了东太平洋海区中尺度涡流场中海气反馈的作用。Warner 等^[51]将其发展的耦合的海-气-浪-沉积输运模式(COAWST)应用到近岸风暴的预报中,有效改善了近岸风暴的预报效果。

此外,区域耦合模式开始被用于研究流域尺度气候的模拟。Huang 等^[155]在一个全球耦合海洋-大气环流模式中应用局部耦合的策略,即海气耦合只允许在大西洋盆地地区。研究表明,这一局部区域耦合策略使得他们不用考虑由此产生的平均表面海温的

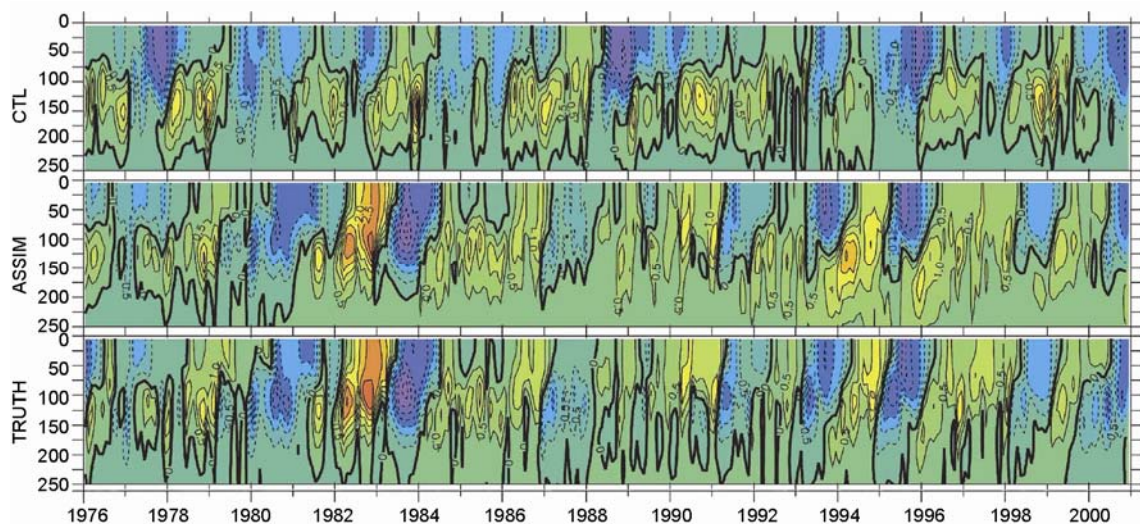


图 2 ENSO 模拟结果中 Nino-3.4 海温异常(0~250 m)的时间序列

(a) 控制实验(CTL); (b) 海洋资料同化试验(ASSIM); (c) “伪观测”(TRUTH). 等值线间隔为 0.5℃, 单位: ℃. 引自 Zhang 等^[145]

局地反馈效应. Xie 等^[156]构建了一个区域海洋-大气耦合模式(iROAM), 将一个区域大气模式(iRAM)耦合到一个太平洋流域尺度的海洋模式, 并且只有在盆地的东半部才允许交互耦合. iROAM 的一个主要优点是相对于大多数耦合大气环流模式, 它能为模式提供一个有效的高分辨率耦合. Aldrian 等^[44]和 Mikolajewicz 等^[157]利用耦合的区域大气模式 REMO 与全球海洋模式, 分别研究了印尼降雨过程中的海气相互作用及北极海洋和“北欧海洋”地区海冰覆盖面积的年际变化. Sasaki 等^[48]利用多重嵌套的方法将一个高分辨率区域大气模式 RCM20 与一个范围覆盖整个北太平洋区域的海洋模式(NPOGCM)进行耦合, 并积分 10 年来评估该模式对日本气候的模拟能力.

在我国, 所建立的区域海气耦合模式曾被应用于研究和模拟南海及黄东海区域的海洋环流、中小尺度涡旋系统(吕世华等^[65], 黄立文^[72]), 东亚地区大气和海洋状况的季节及年际变化(任雪娟等^[37,66,67], 李涛等^[53]), 以及东亚夏季风爆发与演变特征(Lin 等^[68])及东亚季风降水等(姚素春等^[49]). 此外, 区域海气耦合模式也曾被用来分析和研究我国华北夏季大气水汽输送(谢坤等^[70])以及极端降水事件的特征(王志福等^[69]).

4.2 在区域气候变化动力降尺度中的应用

利用区域海气耦合模式, 对全球海气耦合环流模式的输出结果进行动力降尺度(dynamical downscaling)处理, 以获取全球大尺度气候变化背景下区域气候的响应和变化特征, 是当前国际上的一个研究热点, 尤其是对气候变暖条件下某海盆(大西洋或太平洋)上热带气旋强度与发生频率的年际年代际变化特征的研究^[158,159]. 所谓动力降尺度方法, 是指将低分辨全球模式输出的大尺度信息作为输入量强迫较高分辨率的区域气候模式, 产生空间高分辨的气候模拟输出信息, 从而模拟当前并预估未来区域(或局地)尺度的气候变化情景. 例如, Knutson 等^[158]曾利用 GFDL 飓风模式与海洋模式 POM 的简单耦合模式, 对较低分辨率的全球海气耦合模式的输出结果进行动力降尺度试验, 研究在 CO₂ 增温的全球气候变化背景下热带气旋强度变化趋势. Emanuel^[159]利用一个简单海气耦合飓风强度预报模式对 NCEP/NCAR 再分析资料进行动力降尺度试验, 研究飓风强度对气候变化下环境位势强度(potential

intensity)、风切变、海洋混合层厚度的敏感性. Bender 等^[160]利用一个业务化高分辨率区域耦合模式(GFDL 台风模式)对 18 个全球耦合模式的输出结果进行动力降尺度试验, 研究 21 世纪海面温度升高对西大西洋飓风活动的影响, 试验结果表明到本世纪末, 强飓风的发生频率大约增加一倍, 而热带风暴的总个数却减少大约三分之一(图 3). Raisanen 等^[161]和 Meier^[162]利用完善区域海气耦合模式 RCAO, 对欧洲地区未来气候情景变化及极端气候事件进行了研究. 模拟结果表明, 未来欧洲北部降水呈增加趋势, 且增加趋势在冬季更加明显; 欧洲南部及中部地区夏季降水有减少的趋势. 另外, 欧洲北部的气候变暖在冬季或深秋最大, 南部及中部地区的增暖则在夏季最强. 在极端气候方面, 极端降水往往出现在平均降水减少的区域; 波罗的海地区极端海平面的增加趋势显著大于平均海平面的增加趋势.

5 未来区域耦合模式发展展望及亟待解决的问题

随着人们对于海气相互作用机制及其对天气和

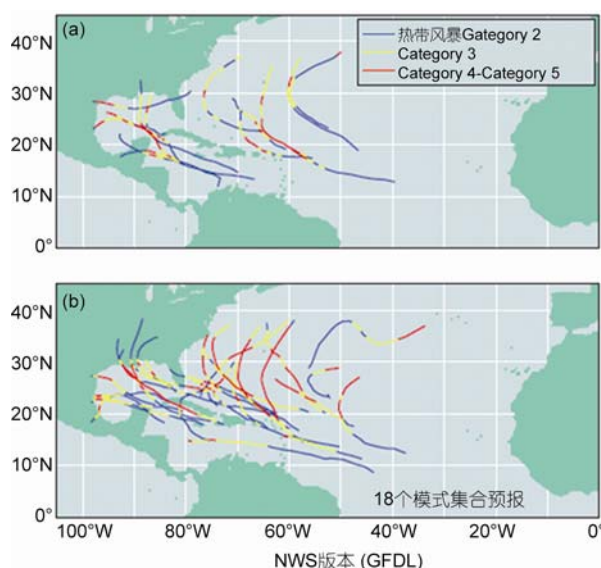


图 3 利用动力降尺度及集合预报方法预测 21 世纪末气候变暖假定条件下北大西洋强飓风(萨菲尔-辛普森飓风等级 4 或 5 级飓风)生成数量及其路径分布图

(a) 控制实验; (b) 21 世纪末暖气候条件下. 自 Bender 等^[160]修改

气候的影响的认识不断加深, 区域海气耦合模式也在不断完善和提高. 尤其是进入 21 世纪以来, 区域海气耦合模式有了很快的发展, 但是仍存在一些不足, 需要进一步完善. 例如, 在进行中尺度的模式耦合时, 要求参与耦合的大气和海洋模式分量必须能刻画出中尺度物理过程, 即具有较短的耦合积分时间长度(一般为几天), 更高的空间分辨率和更短的时间步长以便捕捉到耦合过程的细节. 另一方面, 同样是中小尺度过程, 在海洋和大气里的时间尺度却有较大差异, 比如海洋里的中尺度涡, 其时间尺度一般为几天到数个月, 而大气里热带气旋等天气过程则只有几天到一个星期的时间尺度. 大气和海洋间这种时空尺度谱上的不匹配性为人们提出了一些复杂而具有挑战性的问题. 虽然近年来国内外有关大气-海浪-海洋之间的相互作用及耦合模式的研究已经取得了较大进展, 而且实测结果与耦合模式模拟结果的对比也表明, 大气-海浪-海洋耦合模式能够更为真实地反映海洋环境的变化规律, 但海-气-浪相互作用研究仍然有待进一步深入, 其中关键问题之一即为海浪引起的海面粗糙度变化特征及其对大气下垫面的反馈作用, 以及由海浪破碎和“白冠”效应产生的海洋飞沫在海-气界面动量、热量和质量交换过程中所起的作用及其参数化方案.

展望未来区域海气耦合模式发展方向及亟待解决的问题, 笔者认为应在如下几个方面重点加以考虑和解决:

(1) 空间分辨率. 尽可能提高模式的空间分辨率, 使之达到或小于海洋里中小尺度涡旋及其他扰动的水平尺度量级 $O(100\text{ m})$.

(2) 耦合技术. 围绕着物理界面和技术界面这两个层面, 同时考虑耦合分量的可扩展性, 进一步研究更加快速高效的、“非通量订正”直接耦合技术, 以研

制具备良好兼容性和可扩展性、适合高速并行计算的新一代耦合器.

(3) 侧边界条件. 进一步研究更加有效的消除或抑制虚假惯性重力波向内区域传播的测边界处理技术, 尽可能地采用“双向”嵌套方案将区域海气耦合模式嵌套进全球海气耦合模式, 由全球海气耦合模式提供区域模式运行所需的侧边界条件, 进而可对该区域的气候变化进行更加精细准确的动力降尺度模拟及预测.

(4) 资料同化. 深入研究在区域耦合模式中同时同化海洋和大气观测资料中存在的问题, 如大气与海洋变量间的协调性问题, 背景协方差问题等等, 探讨适合区域耦合模式的资料同化新方法.

(5) 中小尺度海气相互作用机制. 进一步研究大气和海洋中的中小尺度过程在海气耦合中的作用机制, 比如低空急流、中尺度气旋、冷暖涡旋和 SST 锋面、海浪飞沫等在海气耦合中的作用.

(6) 参数化方案. 探索更合理的海洋和大气界面通量交换及内部混合过程的参数化方法, 尤其是在高风速条件下的动量和热量通量参数化、海浪(包括海浪破碎与飞沫)参数化、混合层动力过程参数化及辐射参数化等等.

(7) 多模式耦合系统. 一个完整的气候模式系统不应该仅仅包括大气和海洋相互作用, 还应该包括陆面、土壤湿度、积雪、海冰、海浪甚至生物化学和人类活动等过程以及它们与大气、海洋的相互作用, 这是当前国际上地球系统耦合模式发展的趋势. 而在包含所有这些过程的全球耦合系统下, 发展与之相对应的可进行嵌套的区域多模式耦合系统, 以进行对区域气候变化特征和极端气候事件的动力降尺度研究, 也将是未来地球科学有待探索和颇具挑战的前沿领域.

致谢 感谢审稿专家提出的宝贵意见.

参考文献

- 1 陈克明, 金向洋, 张学洪. 关于海气耦合模式气候漂移及敏感性的一点探讨. 海洋学报, 1997, 19: 38–51
- 2 Manabe S, Bryan K. Climate calculation with a combined ocean-atmosphere model. J Atmos Sci, 1969, 26: 768–789
- 3 Manabe S, Bryan K, Spelman M J. A global ocean-atmosphere climate model, Part I: The atmospheric circulation. J Phys Oceanogr, 1975, 5: 3–29
- 4 Manabe S, Bryan K, Spelman M J. A global ocean-atmosphere model with seasonal variation for future studies of climate sensitivity. Dynam Atmos Oceans, 1979, 3: 393–426

- 5 Bryan K, Manabe S, Pacanowski R C. A global ocean-atmosphere climate model, Part II: The oceanic circulation. *J Phys Oceanogr*, 1975, 5: 30–46
- 6 Washington W M, Semtner A J, Meehl G A, et al. General circulation experiment with a coupled atmosphere, ocean and sea ice model. *J Phys Oceanogr*, 1980, 10: 1887–1908
- 7 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. *大气科学*, 2004, 28: 993–1007
- 8 王斌, 周天军, 俞永强, 等. 地球系统模式发展展望. *气象学报*, 2008, 66: 857–869
- 9 Zeng Q C, Yuan C G, Zhang X H, et al. Documentation of IAP two-level atmospheric general circulation model. DOE/ER/60314-H1, TR044, 1989. 383
- 10 Zhang X H. Dynamic framework of IAP nine-level atmospheric general circulation model. *Adv Atmos Sci*, 1990, 7: 66–77
- 11 毕训强. IAP 九层大气环流模式及气候数值模拟. 博士学位论文. 北京: 中国科学院大气物理研究所, 1993
- 12 Liang X Z. Description of a nine-level grid poing general circulation model. *Adv Atmos Sci*, 1996, 13: 269–298
- 13 Zhang X H, Liang X Z. A numerical world ocean general circulation model. *Adv Atmos Sci*, 1989, 6: 43–61
- 14 Zhang X H, Bao N, Yu R C, et al. Coupling scheme experiments based on an atmospheric and an oceanic GCM. *Chin J Atmos Sci*, 1992, 16: 129–144
- 15 陈克明. IAP 全球海气耦合环流模式的改进及温室气候引起气候变化的数值模拟研究. 博士学位论文. 北京: 中国科学院大气物理研究所, 1994
- 16 Liu H, Jin X Z, Zhang X H, et al. A coupling experiment of an atmosphere and an ocean model with a monthly anomaly exchange scheme. *Adv Atmos Sci*, 1996, 13: 133–146
- 17 吴国雄, 张学洪, 刘辉, 等. LASG 全球海洋大气陆面系统模式(GOALS/LASG)及其模拟研究. *应用气象学报*, 1997, 8(增刊): 15–28
- 18 Yu Y Q, Yu R C, Zhang X H, et al. A flexible coupled ocean-atmosphere general circulation model. *Adv Atmos Sci*, 2002, 19: 169–190
- 19 周天军, 王在志, 宇如聪, 等. 基于 LASG/ IAP 大气环流谱模式的气候系统模式. *气象学报*, 2005, 63: 702–715
- 20 Yu Y Q, Zheng W P, Liu H L, et al. The LASG coupled climate system model FGCM-1.0. *Chin J Geophys*, 2007, 50: 1454–1455
- 21 Yu Y Q, Zheng W P, Wang B, et al. Versions g1.0 and g1.1 of the LASG/IAP Flexible Global Ocean-Atmosphere-Land System model. *Adv Atmos Sci*, 2011, 28: 99–117
- 22 丁一汇, 李清泉, 李维京, 等. 中国业务动力季节预报的进展. *气象学报*, 2004, 62: 598–612
- 23 闵锦忠, 孙照渤, 朱伟军. 海气耦合环流模式及耦合技术的研究. *南京气象学院学报*, 2000, 23: 449–458
- 24 Zebiak S E, Cane M A. A model El Nino-Southern oscillation. *Mon Weather Rev*, 1987, 115: 2262–2278
- 25 徐建霞, 孙照渤, 雷兆崇. 用海-气耦合模式作季风季节平均环流的数值试验. *南京气象学院学报*, 1992, 15: 332–341
- 26 Boville B A. The NCAR climate system model version 1. *BMRC Res Rep*, 1998, 69: 5–7
- 27 Collins W D, Bitz C M, Blackmon M L, et al. The Community Climate System Model Version 3 (CCSM3). *J Clim*, 2006, 19: 2122–2143
- 28 Matsuno T, Kawamiya M, Sudo K, et al. Development of an Integrated Earth System Model for prediction of environmental changes. In: *Annual Report of the Earth Simulator Center*. 2005
- 29 Seo H, Miller A J, Roads J O. The scripps coupled ocean-atmosphere regional (SCOAR) model with applications in the Eastern Pacific sector. *J Clim*, 2007, 20: 381–402
- 30 Neelin J D, Latif M, Allaart M A F, et al. Tropical air-sea interaction in general circulation models. *Clim Dyn*, 1992, 7: 73–104
- 31 Hodur R M. The Naval Research Laboratory's Coupled Ocean/Atmosphere Mesoscale Prediction System (COAMPS). *Mon Weather Rev*, 1997, 125: 1414–1430
- 32 Knutson T R, Tulyea R E, Kurihara Y. Simulated increase of hurricane intensities in CO₂-warmed climate. *Science*, 1998, 279: 1018–1020
- 33 Gustafsson N, Nyberg L, Omstedt A. Coupling of a high-resolution atmospheric model and an ocean model for the Baltic Sea. *Mon Weather Rev*, 1998, 126: 2822–2846
- 34 Hagedorn R, Lehmann A, Jacob D. A coupled high resolution atmosphere-ocean model for the BALTEX region. *Meteorol Z*, 2000, 9: 7–20
- 35 Xue H J, Pan Z Q, John M, et al. A 2D coupled atmosphere-ocean model study of air-sea interactions during a cold air outbreak over the Gulf stream. *Mon Weather Rev*, 2000, 128: 973–996
- 36 Bao J W, Wilczak J M, Choi J K, et al. Numerical simulations of air-sea interactions under high wind conditions using a coupled model: A study of hurricane development. *Mon Weather Rev*, 2000, 128: 2190–2210
- 37 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. *气候与环境研究*, 2000, 5: 482–485
- 38 Döscher R, Willén U, Jones C, et al. The development of the regional coupled ocean-atmosphere model RCAO. *Boreal Environ Res*, 2002, 7: 183–192
- 39 Perrie W, Ren X J, Zhang W Q, et al. Simulation of extratropical Hurricane Gustav using a coupled atmosphere-ocean-sea spray model. *Geophys Res Lett*, 2004, 31: L03110, doi: 10.1029/2003GL018571

- 40 Perrie W, Zhang W Q, Andreas E L, et al. Sea spray impacts on intensifying midlatitude cyclones. *J Atmos Sci*, 2005, 62: 1867–1883
- 41 Schrum C, Hübner U, Jacob D, et al. A coupled atmosphere-ice-ocean model for the North Sea and Baltic Sea. *Clim Dyn*, 2003, 21: 131–141
- 42 Alves O, Wang G, Zhong A, et al. POAMA: Bureau of Meteorology operational coupled model seasonal forecast system. *Proceedings of the ECMWF Workshop on the Role of the Upper Ocean in Medium and Extended Range Forecasting*, 2002
- 43 亓春霞. 中尺度海-气耦合模式 MM5V3/ECOM-si 对黄东海入海气旋的模拟研究. 博士学位论文. 湖北: 武汉理工大学交通信息工程及控制系, 2003
- 44 Aldrian E, Sein D V, Jacob D, et al. Modeling Indonesian rainfall with a coupled regional model. *Clim Dyn*, 2005, 25: 1–17
- 45 Nagai H, Kobayashi T, Tsuduki K, et al. coupled atmosphere, land-surface, hydrology, ocean-wave, and ocean-current models for mesoscale water and energy circulations. In: *The 11th Conference on Mesoscale Processes*, 2005
- 46 黄立文, 邓健, 文元桥, 等. 中国近海中尺度海-气-浪耦合模式系统及台风耦合试验. 见: 第六次全国动力气象会议论文集. 2005
- 47 Pullen J, Doyle J D, Signell R P. Two-way air-sea coupling: A study of the Adriatic. *Mon Weather Rev*, 2006, 134: 1465–1483
- 48 Sasaki H, Kurihara K, Takayabu I, et al. Preliminary results from the coupled atmosphere-ocean regional climate model at the Meteorological Research Institute. *J Meteorol Soc Jpn*, 2006, 84: 389–403
- 49 姚素香, 张耀存. 区域海气耦合模式对中国夏季降水的模拟. *气象学报*, 2008, 66: 131–142
- 50 关皓, 周林, 史尧, 等. 利用 jason_1 资料验证区域海气耦合模式模拟台风浪的有效性. *海洋预报*, 2009, 26: 84–93
- 51 Warner J C, Armstrong B, He R Y, et al. Development of a Coupled Ocean-Atmosphere-Wave-Sediment Transport (COAWST) modeling system. *Ocean Modelling*, 2010, 35: 230–244
- 52 Fang Y J, Zhang Y C, Tang J P, et al. A regional air-sea coupled model and its application over east asia in the summer of 2000. *Adv Atmos Sci*, 2010, 27: 583–593
- 53 李涛, 周广庆. 一个东亚区域海气耦合模式初步结果. *科学通报*, 2010, 55: 808–819
- 54 孙一妹, 费建芳, 程小平, 等. WRF_ROMS-1.2 中尺度海气耦合模式简介. *海洋预报*, 2010, 27: 82–88
- 55 Xue M, Droegeemeier K K, Wong V. The Advanced Regional Prediction System (ARPS)—A multi-scale nonhydrostatic atmospheric simulation and prediction model. PART I: Model dynamics and verification. *Meteorol Atmos Phys*, 2000, 75: 161–193
- 56 Li Y, Xue H, John M B. Air-sea interactions during the passage of a winter storm over the Gulf Stream: A three-dimensional coupled atmosphere-ocean model study. *J Geophys Res*, 2002, 107: 3200, doi: 10.1029/2001JC001161
- 57 Xie L, Leonard J, Pietrafesa. Coastal ocean-atmosphere coupling. *Amer Geophys Union*, 2001, 5: 101–123
- 58 严邦良, 黄荣辉, 张人禾. 一个可描写 ENSO 循环基本特点的简单热带海气耦合模式. *大气科学*, 2002, 26: 193–205
- 59 闵锦忠, 孙照渤, 曾刚, 等. 全球海气耦合模式系统(NIM/COAMS)一种新的再分析同步耦合方案. *南京气象学院学报*, 2005, 28: 601–608
- 60 秦正坤, 孙照渤, 林朝晖, 等. 一个海气耦合模式对东亚夏季季风气候预测潜力的评估. *气候与环境研究*, 2007, 12: 426–436
- 61 汪方, 丁一汇, 徐影. 辐射参数化方案对一个海气耦合模式云和辐射模拟的影响. *应用气象学报*, 2007, 18: 257–265
- 62 林万涛, 张博, 林一骅. 简单海气耦合模式大气运动方程的非线性对 ENSO 循环模拟的影响. *气候与环境研究*, 2008, 13: 253–259
- 63 张莉, 丁一汇. 全球海气耦合模式对我国极端强降水模拟检验. *应用气象学报*, 2008, 19: 760–769
- 64 王志仁, 姜达庸, 包澄澜. 一个区域耦合海气模式及其试验. *海洋学报*, 1995, 17: 50–58
- 65 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. *高原气象*, 2000, 19: 415–426
- 66 任雪娟. 南海季风区海气相互作用研究、区域海气耦合模式的研制及夏季风的模拟. 博士学位论文. 南京: 南京大学大气科学系, 2000
- 67 Ren X J, Qian Y F. A coupled regional air-sea model, its performance and climate drift in simulation of the East Asian summer monsoon in 1998. *Int J Climatol*, 2005, 25: 679–692
- 68 Lin H J, Qian Y F, Zhang Y C, et al. A regional coupled air-ocean wave model and the simulation of the South China sea summer monsoon in 1998. *Int J Climatol*, 2006, 6: 2041–2056
- 69 王志福, 钱永甫, 林惠娟. 区域海气耦合模式对我国极端降水模拟分析. *高原气象*, 2008, 27: 113–121
- 70 谢坤, 任雪娟, 张耀存, 等. 区域海气耦合模式对华北夏季大气水汽输送模拟结果的检验及其与单独气候模式的比较分析. *气象学报*, 2009, 67: 1002–1012
- 71 宇如聪, 薛纪善, 徐幼平. AREMS 中尺度暴雨数值预报模式系统. 北京: 气象出版社, 2004
- 72 黄立文. 中尺度耦合模式 LASG-MCM 在黄东海区域海-气相互作用研究中的应用. 见: 大气科学和地球流体力学数值模拟国家重点实验室(LASG)会议论文集, 2002
- 73 蒋小平, 刘春霞, 费志宾. 一个中尺度海-气耦合模式的研制. *广东气象*, 2009, 31: 1–3
- 74 蒋小平, 刘春霞, 齐义泉. 用一个海-气耦合模式对台风 Krovah 的模拟. *大气科学*, 2009, 33: 99–108

- 75 Sausen R, Barthel K, Hasselmann K. Coupled ocean-atmosphere models with flux correction. *Clim Dyn*, 1988, 2: 145–163
- 76 Anthes R A, Hsie E Y, Kuo Y H. Description of the PENN State/NCAR mesoscale model version 4 (MM4). NCAR Technical Note, 1987, NCAR/TN-282+STR, 66
- 77 Giorgi F, Marinucci M R. An investigation of the sensitivity of simulated precipitation to model resolution and its implications for climate studies. *Mon Weather Rev*, 1996, 124: 148–166
- 78 Warner T T, Peterson R A, Treadon R E. A tutorial on lateral boundary conditions as a basic and potentially serious limitation to regional numerical weather prediction. *Bull Am Meteorol Soc*, 1997, 78: 2599–2617
- 79 Harrison E, Elsberry R. A method for incorporating nested finite grids in the solution of systems of geophysical equations. *J Atmos Sci*, 1972, 29: 1235–1245
- 80 Phillips N A, Shukla J. On the strategy of combining coarse and fine grid meshes in numerical weather prediction. *J Appl Meteorol*, 1973, 12: 763–770
- 81 Staniforth A N, Mitchell H L. A variable-resolution finite-element technique for regional forecasting with the primitive equations. *Mon Weather Rev*, 1978, 106: 439–447
- 82 Hill G. Grid telescoping in numerical weather prediction. *J Appl Meteorol*, 1968, 7: 29–38
- 83 Wang H H, Halpern P. Experiments with a regional fine-mesh prediction model. *J Appl Meteorol*, 1970, 9: 543–553
- 84 Kesel P G, Winnighoff F J. The fleet numerical weather central operational primitive-equation model. *Mon Weather Rev*, 1972, 100: 360–373
- 85 王继光, 魏绍远, 章震越. 有限区域套网格数值预报模式的侧边界处理技术的研究与试验. *气象科学*, 1992, 12: 371–379
- 86 Perkey D J, Kreitzberg C W. A time-dependent lateral boundary scheme for limited-area primitive equation models. *Mon Weather Rev*, 1976, 104: 744–755
- 87 Davies H C. A lateral boundary condition for multi-level prediction models. *Q J R Meteorol Soc*, 1976, 102: 405–418
- 88 Orlanski I. A simple boundary condition for unbounded hyperbolic flow. *J Comput Phys*, 1976, 2: 251–269
- 89 陈月娟. 辐射边界条件在局地模式中的试验. *高原气象*, 1987, 2: 111–116
- 90 储敏, 徐永福. 区域海洋模式中的开边界问题. *海洋科学*, 2009, 33: 112–117
- 91 Treguier A M, Barnier B, Miranda A P, et al. An eddy-permitting model of the Atlantic circulation: Evaluating open boundary conditions. *J Geophys Res*, 2001, 106: 22115–22129
- 92 Marchesiello P, McWilliams J C, Shchepetkin A. Open boundary conditions for long-term integration of regional oceanic models. *Ocean Modelling*, 2001, 3: 1–20
- 93 Drennan W M, Taylor P K, Yelland M J. Parameterizing the sea surface roughness. *J Phys Oceanogr*, 2005, 35: 835–848
- 94 Hwang P A. Influence of wavelength on the parameterization of drag coefficient and surface roughness. *J Phys Oceanogr*, 2004, 60: 835–841
- 95 Hwang P A. Altimeter measurements of wind and wave modulation by the Kuroshio in the Yellow and East China seas. *J Phys Oceanogr*, 2005, 61: 987–993
- 96 Hsu S A. A dynamic roughness equation and its application to wind stress determination at the air-sea interface. *J Phys Oceanogr*, 1974, 4: 116–120
- 97 Donelan M A, Dobson F W, Smith S D, et al. On the dependence of sea surface roughness on wave development. *J Phys Oceanogr*, 1993, 23: 2143–2149
- 98 Donelan M A, Drennan W M, Magnusson A K. Nonstationary analysis of the directional properties of propagating waves. *J Phys Oceanogr*, 1996, 26: 1901–1914
- 99 Smith S D, Anderson R J, Oost W A, et al. Sea surface wind stress and drag coefficients: The HEXOS results. *Bound-Lay Meteorol*, 1992, 60: 109–142
- 100 Johnson H K, Højstrup J, Vested H J, et al. On the dependence of sea surface roughness on wind waves. *J Phys Oceanogr*, 1998, 28: 1702–1716
- 101 Johnson H K, Vested H J, Hersbach H, et al. The coupling between wind and waves in the WAM model. *J Atmo Ocean Tech*, 1999, 16: 1780–1790
- 102 Taylor P K, Yelland M J. The dependence of sea surface roughness on the height and steepness of the waves. *J Phys Oceanogr*, 2001, 31: 572–590
- 103 Oost W A, Komen G J, Jacobs C M J, et al. New evidence for a relation between wind stress and wave age from measurements during ASGAMAGE. *Bound-Lay Meteorol*, 2002, 103: 409–438
- 104 Fairall C W, Bradley E F, Hare J E, et al. Bulk parameterization of air-sea fluxes: Updates and verification for the COARE algorithm. *J*

- Clim, 2003, 16: 571–591
- 105 Drennan W M, Graber H C, Hauser D, et al. On the wave age dependence of wind stress over pure wind seas. *J Geophys Res*, 2003, 108: 8062, doi: 10.1029/2000JC000715
- 106 Lange B, Johnson H K, Larsen S, et al. On detection of a wave age dependency for the sea surface roughness. *J Phys Oceanogr*, 2004, 34: 1441–1458
- 107 潘玉萍, 沙文钰, 王巨华, 等. 发展新型的海面空气动力学粗糙度参数化方案. *自然科学进展*, 2007, 17: 1069–1077
- 108 Andreas E L. The temperature of evaporating sea spray droplets. *J Atmos Sci*, 1995, 52: 852–862
- 109 Andreas E L. A new sea spray generation function for wind speeds up to 32 m s^{-1} . *J Phys Oceanogr*, 1998, 28: 2175–2184
- 110 Keport J D. Comments on “The Temperature of Evaporating Sea Spray Droplets”. *J Atmos Sci*, 1996, 53: 1634–1641
- 111 Wu J. Concentrations of sea-spray droplets at various wind velocities: Separating productions through bubble bursting and wind tearing. *J Phys Oceanogr*, 2000, 30: 195–200
- 112 Meirink J F, Makin V K. The impact of sea spray evaporation in a numerical weather prediction model. *J Atmos Sci*, 2001, 58: 3626–3638
- 113 Wang Y Q, Keport J D, Holland G J. The effect of sea spray evaporation on tropical cyclone boundary layer structure and intensity. *Mon Weather Rev*, 2001, 129: 2481–2500
- 114 Andreas E L, Emanuel K A. Effects of sea spray on tropical cyclone intensity. *J Atmos Sci*, 2001, 58: 3741–3751
- 115 Zhang W Q, Perrie W, Li W B. Impacts of waves and sea spray on midlatitude storm structure and intensity. *Mon Weather Rev*, 2006, 134: 2418–2442
- 116 Zhang, W Q, Perrie W. The influence of air-sea roughness, sea spray, and storm translation speed on waves in North Atlantic storms. *J Phys Oceanogr*, 2008, 38: 817–839
- 117 Gall J S, Frank W M, Kwon Y. Effects of sea spray on tropical cyclones simulated under idealized conditions. *Mon Weather Rev*, 2008, 136: 1686–1705
- 118 Andreas E L, Persson P O G, Hare J E. A Bulk turbulent air-sea flux algorithm for high-wind, spray conditions. *J Phys Oceanogr*, 2008, 38: 1581–1596
- 119 Andreas E L. Spray-mediated enthalpy flux to the atmosphere and salt flux to the ocean in high winds. *J Phys Oceanogr*, 2010, 40: 608–619
- 120 Lynch A H, Chapman W L, Walsh J E, et al. Development of a regional climate model of the western Arctic. *J Clim*, 1995, 8: 1555–1570
- 121 Hasselmann K. Ocean circulation and climate change. *Tellus*, 1991, 43: 82–103
- 122 Ly L N. A numerical coupled model for studying air-sea-wave interaction. *Phys Fluids*, 1995, 7: 2396–2406
- 123 Powers J G, Stoelinga M T. A coupled air-sea mesoscale model: Experiments in atmospheric sensitivity to marine roughness. *Mon Weather Rev*, 2000, 128: 208–228
- 124 Doyle J D. Coupled atmosphere-ocean wave simulations under high wind conditions. *Mon Weather Rev*, 2002, 130: 3087–3099
- 125 Chen S S, Zhao W, Donelan M A, et al. The CBLAST-hurricane program and the next-generation fully coupled atmosphere-wave-ocean models for hurricane research and prediction. *Bull Am Meteorol Soc*, 2007, 88: 311–317
- 126 文元桥, 黄立文, 余胜生, 等. 基于移动代理技术的海-气-浪耦合模拟系统. *武汉理工大学学报*, 2006, 28: 125–127
- 127 Wen Y Q, Huang L W, Deng J, et al. Framework of distributed coupled atmosphere-ocean-wave modeling system. *Adv Atmos Sci*, 2006, 23: 442–448
- 128 Zhang J F, Huang L W, Wen Y Q, et al. Implementation of a distributed atmosphere-wave-ocean coupling model: Typhoon wave simulation in the China seas. In: *International Symposium on Distributed Computing and Applications for Business, Engineering and Sciences*. Hangzhou, October 12, 2006
- 129 Zhang J F, Huang L W, Wen Y Q, et al. A distributed coupled atmosphere-wave-ocean model for typhoon wave numerical simulation. *Int J Comput Math*, 2008, doi: 10.1080/00207160802047632
- 130 Le Dimet F X, Talagrand O. Variational algorithms for analysis and assimilation of meteorological observations: Theoretical aspects. *Tellus*, 1986, 38(A): 97–110
- 131 Derber J C. Variational four-dimensional analysis using quasi-geostrophic constraints. *Mon Weather Rev*, 1987, 115: 998–1008
- 132 Talagrand O, Courtier P. Variational assimilation of meteorological observations with the adjoint vorticity equation. Part I: Theory. *Q J R Meteorol Soc*, 1987, 113: 1311–1328
- 133 Courtier P, Thepaut J N, Hollingsworth A. A strategy for operational implementation of 4D-Var, using an incremental approach. *Q J R Meteorol Soc*, 1994, 120: 1367–1388
- 134 Peng S Q, Zou X L. Assimilation of ground-based GPS zenith total delay and rain gauge precipitation observations using 4D-Var and their impact on short-range QPF. *J Meteorol Soc Jpn*, 2004, 82: 491–506
- 135 Peng S Q, Xie L A. Effect of determining initial conditions by four-dimensional variational data assimilation on storm surge forecasting.

- Ocean Modelling, 2006, 14: 1–18
- 136 Huang X Y, Coauthors. Four-dimensional variational data assimilation for WRF: Formulation and preliminary results. *Mon Weather Rev*, 2009, 137: 299–314
- 137 Evensen G. Sequential data assimilation with a nonlinear quasi-geostrophic model using Monte Carlo methods to forecast error statistics. *J Geophys Res*, 1994, 99(C5): 10143–10162
- 138 Evensen G. The ensemble Kalman filter: Theoretical formulation and practical implementation. *Ocean Dyn*, 2003, 53: 343–367
- 139 Houtekamer P L, Mitchell H L. Data assimilation using an ensemble Kalman filter technique. *Mon Weather Rev*, 1998, 126: 796–811
- 140 Houtekamer P L, Mitchell H L. Ensemble Kalman filtering. *Q J R Meteorol Soc*, 2005, 131: 3269–3289
- 141 Anderson J L. An ensemble adjustment Kalman filter for data assimilation. *Mon Weather Rev*, 2001, 129: 2884–2903
- 142 Hamill T M. Ensemble-based atmospheric data assimilation. In: Palmer T N, Hagedorn R, eds. *Predictability of Weather and Climate*. Cambridge: Cambridge Press, 2006. 124–156
- 143 Meng Z Y, Zhang F Q. Tests of an ensemble Kalman filter for mesoscale and regional-scale data assimilation. Part III: Comparison with 3DVAR in a real-data case study. *Mon Weather Rev*, 2008, 136: 522–540
- 144 Torn R D. Performance of a mesoscale ensemble Kalman filter (EnKF) during the NOAA high-resolution hurricane test. *Mon Weather Rev*, 2010, 138: 4375–4392
- 145 Chen D, Zebiak S E, Busalacchi A J, et al. An improved procedure for El Nino forecasting: Implications for predictability. *Science*, 1995, 269: 1699–1702
- 146 Chen D, Cane M A, Zebiak S E, et al. The impact of sea level data assimilation on the Lamont model prediction of the 1997/98 El Nino. *Geophys Res Lett*, 1998, 25: 2837–2840
- 147 Ballabrera-Poy J, Busalacchi A J, Murtugudde R. Application of a reduced-order Kalman filter to initialize a coupled atmosphere-ocean model: Impact on the prediction of El Niño. *J Clim*, 2001, 14: 1720–1737
- 148 Zhang S, Harrison M J, Rosati A, et al. System design and evaluation of coupled ensemble data assimilation for global oceanic climate studies. *Mon Weather Rev*, 2007, 135: 3541–3564
- 149 Zhang S, Rosati A, Harrison M J. Detection of multidecadal oceanic variability by ocean data assimilation in the context of a “perfect” coupled model. *J Geophys Res*, 2009, 114: C12018, doi: 10.1029/2008JC005261
- 150 Zhang S, Rosati A. An inflated ensemble filter for ocean data assimilation with a biased coupled GCM. *Mon Weather Rev*, 2010, 138: 3905–3931
- 151 Bender M A, Ginis I, Kurihara Y. Numerical simulations of tropical cyclone-ocean interaction with a high-resolution coupled model. *J Geophys Res*, 1993, 98: 23245–23263
- 152 Bender M A, Ginis I. Real-case simulations of hurricane-ocean interaction using a high-resolution coupled model: Effects on hurricane intensity. *Mon Weather Rev*, 2000, 128: 917–946
- 153 Bender M A, Ginis I, Tuleya R E, et al. The operational GFDL coupled hurricane-ocean prediction system and a summary of its performance. *Mon Weather Rev*, 2007, 135: 3965–3989
- 154 Loggisci N, Qian M W, Rachev N, et al. Development of an atmosphere-ocean coupled model and its application over the Adriatic Sea during a severe weather event of bora wind. *J Geophys Res*, 2004, 109: D01102, doi: 10.1029/2003JD003956
- 155 Huang B, Schopf P S, Shukla J. Intrinsic ocean-atmosphere variability of the tropical Atlantic Ocean. *J Clim*, 2004, 17: 2058–2077
- 156 Xie S P, Miyama T, Wang Y, et al. A regional ocean-atmosphere model for Eastern Pacific climate: Toward reducing tropical biases. *J Clim*, 2007, 20: 1504–1522
- 157 Mikolajewicz U, Sein D V, Jacob D, et al. Simulating Arctic sea ice variability with a coupled regional atmosphere-ocean-sea ice model. *Meteorol Z*, 2005, 14: 793–800
- 158 Knutson T R, Tuleya R E. Impact of CO₂-induced warming on simulated hurricane intensity and precipitation: Sensitivity to the choice of climate model and convective parameterization. *J Clim*, 2004, 17: 3477–3495
- 159 Emanuel K. Climate and tropical cyclone activity: A new model downscaling approach. *J Clim*, 2006, 19: 4797–4802
- 160 Bender M A, Knutson T R, Tuleya R E, et al. Modeled impact of anthropogenic warming on the frequency of intense Atlantic hurricanes. *Science*, 2010, 327: 454–458
- 161 Raisanen J, Hansson U, Ullerstig A, et al. European climate in the late 21st century: Regional simulations with two driving global models and two forcing scenarios. *Clim Dyn*, 2004, 22: 13–31
- 162 Meier H E M. Baltic Sea climate in the late twenty-first century: A dynamical downscaling approach using two global models and two emission scenarios. *Clim Dyn*, 2006, 27: 39–68