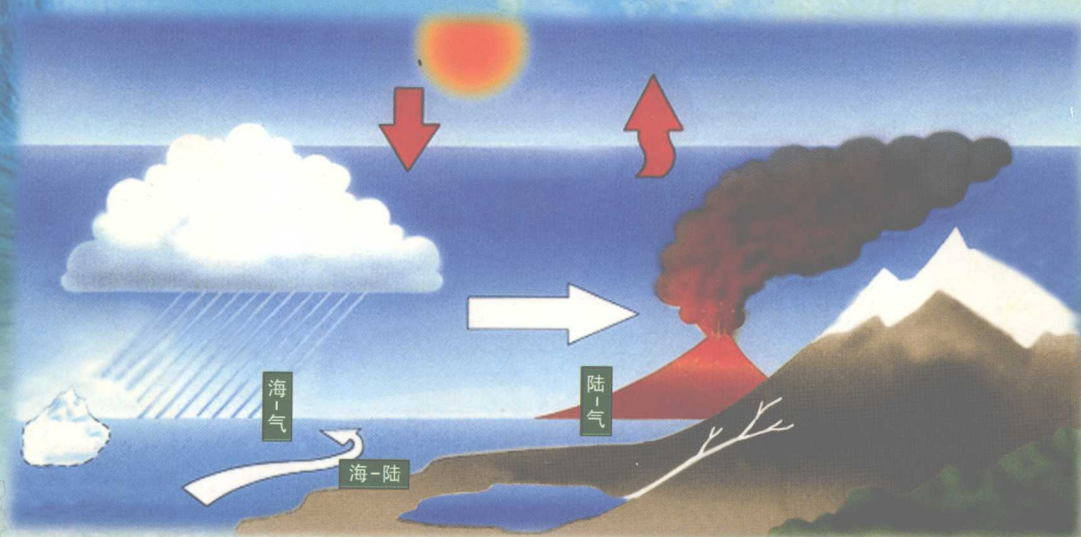


中国科学院知识创新工程重要方向项目(ZKCX2-SW-210)

亚洲季风区海-陆-气相互作用对我国气候变化的影响(第四卷)

大气环流模式SAMIL 及其耦合模式FGOALS-s

■ 周天军 宇如聪 王在志 吴统文 等著



气象出版社

中国科学院知识创新工程重要方向项目(ZK CX2-SW-210)
亚洲季风区海-陆-气相互作用对我国气候变化的影响(第四卷)

大气环流模式 SAMIL 及其 耦合模式 FGOALS-s

周天军 宇如聪 王在志 吴统文 等著

气象出版社

内 容 简 介

本书将中国科学院知识创新工程重要方向项目“亚洲季风区海-陆-气相互作用对我国气候变化的影响”为主资助发展的大气环流谱模式(SAMIL)、合作资助的海洋环流模式(LICOM)及其以美国大气研究中心(NCAR)气候系统模式(CCSM)的模块化耦合器为基础建立的耦合气候系统模式 FGOALS-s 做了较详细的介绍,内容包括模式框架、模式的物理过程参数化、模式结构、分量模式和耦合模式的模拟结果以及模式使用说明。

本书也是对中国科学院知识创新工程重要方向项目“亚洲季风区海-陆-气相互作用对我国气候变化的影响”第四课题“新一代气候系统模式的研制”研究成果的系统总结,撰稿者多是大气环流模式 SAMIL 及其对应的耦合气候系统模式的 FGOALS-s 设计者。本书可供气象、海洋、全球变化等学科的科研人员、SAMIL 及其对应耦合模式 FGOALS-s 的用户参考。

图书在版编目(CIP)数据

大气环流模式 SAMIL 及其耦合模式 FGOALS-s/宇如聪等著. —北京:气象出版社,2005.3

(亚洲季风区海-陆-气相互作用对我国气候变化的影响;4)

ISBN 7-5029-3930-X

I. 大... II. 宇... III. 大气环流模式—研究
IV. P421.3

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2005)第 017003 号

出版者:气象出版社	地 址:北京市海淀区中关村南大街 46 号
网 址: http://cmp.cma.gov.cn	邮 编:100081
E-mail:qxchs@263.net	电 话:总编室:010-68407112 发行部:010-62175925
责任编辑:俞卫平 李太宇	终 审:纪乃晋
封面设计:张建永	
责任校对:吴永生	
印刷者:北京市北中印刷厂	
发行者:气象出版社	
开 本:787×1092	印 张:18.50 字 数:480 千字
版 次:2005 年 3 月第一版	2005 年 3 月第一次印刷
书 号:ISBN 7-5029-3930-X/P·1401	
印 数:800 册	
全套(四卷)定价:180.00 元	

本书如存在文字不清,漏印以及缺页,倒页、脱页等,请与本社发行部联系调换

中国科学院知识创新工程重要方向项目(ZK CX2-SW-210)
亚洲季风区海-陆-气相互作用对我国气候变化的影响

项目成果汇编总编辑委员会

主编:吴国雄

编委:李建平 郭裕福 纪立人

黄荣辉 李崇银 俞永强

董文杰 刘屹岷 宇如聪

序

我国位于亚欧大陆东南隅,面向太平洋,毗邻印度洋,地跨寒、温、热三带,其海-陆-气相互作用过程远比其他地区复杂。印度洋和太平洋的环流背景及水汽输送各具特色。从戈壁沙漠到热带雨林,陆面状况变化万千。受隆起的青藏高原表面感热所驱动,高原上空大气在冬季的下沉及夏季的上升犹如一架巨大的气泵,调节着大气的南来北往和气候的冬夏交替,驱动季风变化,使全球天气气候格局异彩多姿,也使我国天气气候形态各异。邻近海域表层热容量及海温异常具有持续性,其热量和蒸发异常对我国东部地区气候异常有强烈的影响。陆面过程的异常,如高纬度地区冬春季积雪、土壤湿度、深层土壤温度的异常等,也具有较长的持续性,因而对后期的环流、天气和江河流量造成一定的影响。规律性的季风气候使我国东部降水充沛,与全球副热带的大范围干旱沙漠形成鲜明对照,从而孕育了人口众多的中华民族。一旦该区域乃至全球的海-陆-气相互作用过程出现严重异常,我国大范围的或持续性的气候和水文异常就不断出现,导致生命财产的重大损失。1998年发生在我国的洪涝灾害使经济损失上千亿元,死亡超过3000人;1999年长江流域再度严重洪涝,北方干旱高温,黄河断流超过260天;从1999年到2001年我国北方发生持续干旱……每年由于旱涝灾害所造成的经济损失约占国民生产总值的3%~6%,所以严重的旱涝灾害极大地抵消了经济增长率,阻碍着国民经济的持续发展。因此,揭示东亚季风区海-陆-气相互作用及其影响我国气候变化的规律是改善我国气候预测水平的需要,是保障我国战略目标的实施和国民经济的持续发展的需要,并将为国家决策部门制订我国自然经济格局长期战略规划提供重要的科学依据。

在《中国科学院知识创新工程重要方向项目》“亚洲季风区海-陆-气相互作用对我国气候变化的影响(ZKCX2-SW-210)”的资助下,来自中国科学院大气物理研究所、中国科学院寒区旱区环境与工程研究所、中国科学院青岛海洋研究所、中国科学院南海海洋研究所,以及中国气象局、黄河水利委员会、国家教育部有关院校等十余个单位50多位专家组成的研究队伍紧密围绕项目总体目标“研究印度洋-东亚-西太平洋(IEAP)区域海-陆-气相互作用的规律;认识该区域水分循环的空间分布和季节与年际变化特征;发展新一代、适合于IEAP的气候系统模式”,以海洋/极冰-大气-陆地/植被交界面上的能量、动量和物质交换过程为切入点,以亚洲季风区的海-陆-气相互作用为聚焦点,以青藏高原的抬升加热为特殊点,以资料分析、数值模拟和理论研究以及交叉科学相结合为手段,去揭示亚洲季风区海-陆-气相互作用及其对我国季度和年际气候变化的影响及其

物理机制。

项目执行3年来,在资料获取、海-陆-气相互作用的物理过程和气候系统模式研发等方面进展显著,取得了一批重要的创新性或原创性的成果,在国内外产生了相当影响。例如,参与国际CEOP计划,由本项目与973项目联合支持建立了吉林通榆人类活动、地-气交换及生态系统过程长期定位观测站,积累了重要的相关数据;发展出新一代高分辨率全球大洋环流模式和新一代较高分辨率的全球大气环流模式,模拟结果均有了明显的改善;完成我国自主研制的植被-大气相互作用模式与全球大气环流模式的耦合,在国际上这是最早真正实现了动态植被与全球大气的双向耦合;在关于气候格局形成的研究中发现夏季副热带主要大陆及其周边海洋的总加热均呈现“长波辐射冷却-感热加热-凝结加热-双加热”(LOSECOD)四叶型分布,并激发出对应的四叶大气环流型,决定了夏季东亚和全球的气候格局,这个结果被国际同行誉为高度原创性的工作。

为了及时总结和交流本项目取得的研究成果,进一步推动我国在海-陆-气相互作用领域的研究,使海-陆-气相互作用研究的成果能及时在实际业务中推广应用,项目专家组特依照不同课题组织项目全体参研成员撰写编辑了这套研究成果,撰写相关专著。全套书共分如下四卷:

第一卷:海-气相互作用对我国气候变化的影响

第二卷:陆-气相互作用对我国气候变化的影响

第三卷:海-陆热力差异对我国气候变化的影响

第四卷:大气环流模式SAMIL及其耦合模式FGOALS-s

在本套成果汇编的编排、修改、校对和印刷中,得到了项目办公室的吴津生、王暄等同志以及气象出版社李太宇等同志的大力帮助,特此致谢。虽然经过全体编写成员的共同努力,但由于种种原因,书中定有不少不当和欠妥之处,恳请读者和广大科研人员指正。

中国科学院知识创新工程重要方向项目(ZK CX2-SW-210)
亚洲季风区海-陆-气相互作用对我国气候变化的影响

项目首席科学家 吴国雄
2005年1月4日

目 录

序	
引言	(1)
参考文献	(4)
第一章 SAMIL 模式动力框架	(7)
1.1 控制方程组	(7)
1.2 模式参考大气	(11)
1.3 空间离散方法	(13)
1.4 时间积分方案	(19)
参考文献	(22)
第二章 SAMIL 模式物理过程	(24)
2.1 云参数化方案	(24)
2.2 积云对流参数化	(30)
2.3 边界层参数化	(40)
参考文献	(50)
第三章 SAMIL 模式模拟结果评估	(53)
3.1 全球及纬向平均特征	(53)
3.2 模式分辨率不同对模拟结果的影响	(56)
3.3 东亚季风的模拟	(74)
3.4 云的参数化对模式性能的影响	(83)
3.5 小结	(87)
参考文献	(89)
第四章 SAMIL 与 T63L30 海洋模式的耦合	(91)
4.1 耦合方法及方案设计	(91)
4.2 气候平均态和季节变化特征	(92)
4.3 年际变化特征	(101)
4.4 小结	(113)
参考文献	(113)
第五章 SAMIL 与 LICOM 海洋模式的耦合	(115)
5.1 耦合框架	(115)
5.2 LICOM 海洋模式	(126)
5.3 耦合结果评估	(138)
参考文献	(160)
第六章 中国东部区域云辐射过程分析和物理过程的发展	(164)

6.1 中国东部区域云辐射过程分析	(164)
6.2 K 分布辐射方案的发展和应用	(176)
6.3 行星边界层方案发展	(181)
6.4 地表非均匀性参数化及其气候敏感性试验	(185)
参考文献	(198)
附录 A SAMIL 使用说明	(203)
A.1 如何获取系统文件	(203)
A.2 运行文件的形成	(204)
A.3 模式运行	(213)
A.4 运行输入参数及数据	(213)
A.5 模式结果	(214)
A.6 异常情况处理	(218)
A.7 源程序编写及流程	(219)
A.8 宏参数和模式变量	(221)
A.9 常用软件	(229)
附录 B 耦合模式 FGOALS-s 使用说明	(231)
B.1 引言	(231)
B.2 模式结构	(232)
B.3 脚本的使用	(235)
B.4 系统的编译和运行	(245)
B.5 耦合器脚本	(247)
B.6 大气模式脚本	(253)
B.7 海洋模式脚本	(263)
B.8 海冰模式脚本	(269)
B.9 陆面模式脚本	(279)
参考文献	(287)

引 言

目前,国际国内都把对气候变化规律的掌握和气候预测研究作为重点研究领域,并投入了巨大的人力和经济资源。气候和环境变化是气候系统五大圈层(大气圈、水圈、岩石圈、冰雪圈、生物圈)相互作用的结果。要真正掌握气候系统的变化规律,必须立足于研究大气-海洋-陆地-海冰之间复杂的相互作用,可望胜任此项研究的工具就是耦合各圈层的气候系统模式。在现阶段,海-陆-气-冰耦合的数值气候系统模式正日益成为研究当前气候的特征和行为、了解其过去演变、预测其未来变异的不可替代的、最具潜力的工具。世界气候研究计划(WCRP)为推动气候模式的发展,在过去 10 年中相继组织和推出了“大气模式比较计划”(AMIP)、海洋模式比较计划、陆面过程模式比较计划和“耦合模式比较计划”(CMIP)等。以 AMIP 为例,参加这个计划的有全世界从事气候模拟研究的主要研究机构的 30 个左右的知名大气环流模式,大家用统一的强迫场资料驱动各自的模式,以统一的格式输出计划规定的各种变量,从而获得了迄今最为丰富和系统的模式“资料”库。通过对不同模式的比较,发现模式本身的一些不确定性,明确了改进模式的目标。中国科学院大气物理研究所 LASG 的大气模式和全球耦合模式也先后参加了 AMIP 和 CMIP(Gates, 1992; Gates 等, 1999; Meehl 等, 2000; Covey 等, 2001)。

我国地处亚洲季风区。亚洲季风系统已成为全球气候系统中的重要组成部分。这不仅因为它涉及复杂的海陆气相互作用过程,影响着世界上人口最为集中区域的经济和社会,还因为亚洲季风气候和全球气候相互关联,有很强的相互作用。只有加深对这些相互作用和规律的认识,才能建立和完善具有坚实的科学基础和稳定、良好效果的预测理论和方法。而要真正明确亚洲季风在全球气候系统中的地位,理解与亚洲季风有关的海气和陆气相互作用机理,必须充分利用全球耦合气候模式系统去再现其复杂的非线性作用过程。现有的研究表明,目前的气候系统模式对赤道地区海气相互作用的模拟和对东亚气候及其变化的模拟仍然有很多问题(Latif 等, 2001; Schneider, 2002; Davey 等, 2004)。赤道地区是海气相互作用最活跃的地区,而东亚区域则是全球海陆气相互作用最复杂的区域之一。有关赤道地区的海气相互作用研究已开展很多,但围绕东亚气候的海陆气相互作用研究还非常有限(Sperber 等, 2000; Yu 等, 2000)。

由于控制东亚季风气候变化的因子非常复杂,目前人们对东亚气候变化规律的理解还远未达到科学上令人信服的程度。东亚地区西倚世界屋脊,东临太平洋,地形多变,周边海陆分布复杂,特殊的地理条件造就了特别的气候特征和气候变化,比如特殊的中层云分布(Yu 等, 2004)、相对全球变暖在过去 50 年里长江流域的早春季节和夏季的冷趋势(Yu 和 Zhou, 2004)、倍受关注的“南涝北旱”(Yu 等, 2004)等,这些都决定了利用数值模式来模拟、研究和预测东亚、特别是我国的天气和气候将具有难以想象的困难,对模式本身提出了更高的要求。所以,针对东亚区域的地形和气候特点,发展对东亚区域气候有较好模拟能力的全球气候系统模式是我国科学家不可推卸的责任。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(Zeng 等,1989;Zhang 和 Liang,1989),1990 年代初开始发展海气耦合模式(Zhang 等,1992;Liu 等,1996;Zhang 等,1996;Wu 等,1996;陈克明等,1997;Liu 和 Wu,1998),1990 年代末推出了全球海洋-大气-陆面系统(GOALS)耦合模式并初步开展了模块化耦合气候模式的试验研究(Zhang 等,1997;吴国雄等,1997;Yu,1997;俞永强,张学洪,1998;Zhang 等,2000;Zhou 等,2000;周天军等,2000;Yu 等,2002;Wu 等,2003)。利用 GOALS 模式完成的增强温室效应对全球气候变化的影响的模拟已被政府间气候变化委员会(IPCC)2001 年的科学评估报告所引用,是该报告所引用的 22 个模式中唯一来自发展中国家的模式。但是,气候模式的改进和发展是一个长期的、渐进的、连续的过程,为了实现气候模式的可持续发展,发达国家已经或正在制定大型的联合研究计划,例如,日本的地球模拟器计划和 Frontier 研究计划,美国 NCAR 的共同气候系统模式研究计划和美国的加速气候预测主动权计划(ACPRI),以及欧洲共同体的网络地球系统模拟计划(ENES),包括一体化地球系统模拟计划(也叫棱镜计划——PRISM),和气候资料存储和共享计划(CLIMSTER)等。面对这种形势,我们在看到成绩的同时也必须正视存在的问题,采取正确的应对策略。

气候模式的改进和发展是一个长期的、渐进的、连续的过程。随着人类活动和政府决策对气候研究要求的不断提高,气候研究的领域越来越广,气候系统模式或地球系统模式的内容越来越丰富,也越来越复杂。发展气候系统模式需要多方面研究人员的长期稳定的合作。成果的不断积累和继承、队伍的相对稳定和发展是气候系统模式持续有效发展的保证。耦合气候系统模式的发展兼有科研和工程的双重特性。其工程性要求系统的管理和组织是模式发展最为重要的必不可少的环节,要有系统的计划和安排,成员间既有分工又有协作,要充分发挥每个科学家的积极性,但更要强调团队精神。传统的“单兵作战”已不适应当今气候系统模式的发展要求。只有形成一个运转良好的分工、协作体系,我们的模式发展才有出路。

程序的模块化、计算的并行化和输入输出的标准化是当今国际上气候系统模式发展的基本技术特点(周天军等,2004),大规模并行计算机代表着当今高性能计算机发展的国际主流方向,非并行化的模式系统难以适应这种国际潮流。系统的管理、工程式的组织、团队式的合作已是大势所趋。从当今国际上最具影响力的耦合系统模式的发展中,我们可以清楚地看到上述特点,例如美国国家大气研究中心、英国 Hadley 气候中心和德国马普气象研究所的耦合气候系统模式等(Boville, Gent, 1998)。所以,借鉴国内外大型数值模式系统的组织管理经验和运行大型数值模式系统的技术和方法,结合东亚的地理气候特点,是发展适合东亚区域的全球耦合气候系统模式的最有效途径。

随着地球不同圈层相互作用研究的深入,我国综合国力的不断增强,人民生活水平的不断提高,国家决策和人民生活都要求我们对气候的演变规律有全面的了解和认识,特别是东亚区域气候对全球气候变化的响应和影响。我国地球科学界的科学家及其相应的科技政策制订者,都已认识到建立可持续发展的具有我国自主知识产权的全球气候系统模式甚至地球系统模式的必要性和紧迫性。在中国科学院资环局和国家自然科学基金委员会地球科学部的委托和支持下,在全国众多科学家和有识之士的倡导和鼓励下,2001 年 11 月 15 日由中国科学院大气物理研究所 LASG 国家重点实验室主持在北京举办了“第一届气候系统模式发展研讨会”。参加会议的有中国科学院、国家自然科学基金委员会、国家科技部和中国

气象局的有关领导和国内众多知名科学家。与会代表就如何发展我国的气候系统模式展开了热烈讨论并达成共识,一致要求在中国科学院、国家自然科学基金委员会、国家科技部和中国气象局的共同支持下,发扬“两弹一星”精神,集中我国大气界、地学界以及相关学科的有关科学家组织攻关,共同发展体现中国区域特色的气候系统模式,大大推动了我国气候系统模式发展的进程。尤其是由中国科学院大气物理研究所科学家协助起草的国家自然科学基金委员会简报内参《中国应加速发展自己的气候系统模式》已得到当时的国务院副总理(现任总理)温家宝的重要批示。目前从国家领导人到广大的科研人员对加速发展自己的气候系统模式达到了前所未有的共识,是组织开展气候系统模式发展的最佳机遇。发展先进的气候系统模式,需要有长期稳定的经费和人力投入,我国综合国力的不断增强,使得我国在气候系统模式发展和气候变化研究方面赶超世界前沿提供了经济保障。

综合上述考虑,在中国科学院知识创新工程重要方向项目、中国科学院创新团队国际合作伙伴计划以及国家自然科学基金重点项目等的支持下,基于中国科学院大气物理研究所大气科学和地球流体力学国家重点实验室(LASG)全球海气耦合模式课题组已有的耦合气候系统模式,针对东亚区域的地理特点,正在建立一个适合我国气候特点的、具备可持续发展能力的、具有较高模块化、标准化和并行化的、能反映当代科学技术水平的新型全球耦合气候系统模式。

IAP LASG 谱大气环流模式的发展已经有 10 余年的历史。该模式以其对东亚气候的出色模拟能力,在气候学界得到了较为广泛的推广应用;以其为大气分量建立的耦合气候模式 GOALS,参加了国际耦合模式比较计划(CMIP),其关于未来气候变化的模拟结果,被 IPCC 第三次科学评估报告所引用。但是,由于谱大气环流模式课题组长期以来致力于模式的发展和完善,无暇顾及命名问题,因此,该模式以往只是依据其分辨率不同而简单地被称作“R15 L9”、“R42L9”和“R42L26”等。近年来,随着气候学研究范畴的拓展、计算机技术的飞跃,气候模式的发展,已经成为一个巨大的系统工程。为了加强组织协调、合理整合资源,确保 LASG 数值模式的稳步发展,LASG 于 2005 年颁布了《关于 LASG 数值模式统一命名的暂行规定》,正式将 LASG 谱大气环流模式命名为“SAMIL”(Spectral Atmospheric Model of IAP LASG),以 SAMIL 为大气分量建立的、基于耦合器框架的新一代气候系统模式,相应地被命名为“FGOALS-s”。为便于读者了解 LASG 谱大气环流模式发展的历史沿革,表 1 给出其在不同时期的称谓变化及相应的参考文献。

表 1 LASG 谱大气环流模式的发展历史

模式名称	模式分辨率	参考文献
R15L9-0	菱形 15 波、垂直 9 层	Wu 等,1996
R15L9-1	菱形 15 波、垂直 9 层	Liu 等,1997
R15L9-2	菱形 15 波、垂直 9 层	Liu 等,1998
R15L9-3	菱形 15 波、垂直 9 层	邵慧等,1998
R42L9	菱形 42 波、垂直 9 层	Wu 等,2003
R42L26	菱形 42 波、垂直 26 层	王在志等,2004
SAMIL	菱形 42 波、垂直 26 层或 9 层	本书

本书将对以中国科学院知识创新工程重要方向项目“亚洲季风区海-陆-气相互作用对我国气候变化的影响”为主资助发展的大气环流谱模式 SAMIL(王在志等,2004)、合作资助的海洋环流模式(LICOM)(Jin 等,1999;Liu 等,2004)及其以美国大气研究中心(NCAR)气候系统模式(CCSM)的模块化耦合器为基础建立的耦合气候系统模式 FGOALS-s 做较详细的介绍。内容包括模式框架、模式的物理过程参数化、模式结构、分量模式和耦合模式的模拟结果以及模式使用说明。

本书是参与中国科学院知识创新工程重要方向项目“亚洲季风区海-陆-气相互作用对我国气候变化的影响”第四课题“新一代气候系统模式的研制”项目研究的科学家根据其研究成果精炼出来的专著。为便于读者在今后的工作中与各专家联系,这里将本书各章节的作者列表如下:。

引 言 宇如聪 周天军

第一章 王在志

第二章 2.1 刘 琨 戴福出

2.2 宋晓良 包 庆

2.3 包 庆 宇如聪

第三章 吴统文 王在志

第四章 吴统文

第五章 5.1 周天军 宇如聪

5.2 李 薇 刘海龙 俞永强

5.3 周天军 包 庆

第六章 6.1 宇如聪

6.2 王 标 石广玉

6.3 郭振海

6.4 张耀存

附录 A 王在志 包 庆

附录 B 周天军 王在志 包 庆

参考文献

- 陈克明,张学洪,金向泽. 1997. 一个用于研究全球气候变化的海气耦合环流模式, I. 公式和模式性能, 海洋学报, 19, 21~32
- 邵慧,钱永甫,王谦谦. 1998. 太阳辐射日变化对 R15L9 气候模拟效果的影响. 高原气象, 17, 158~168
- 王在志,吴国雄,吴统文等. 2004. ALGCM(R42)气候系统大气模式参考手册. 中国科学院大气物理研究所 LASG 技术报告, No. 14. 73pp
- 吴国雄,张学洪,刘辉,俞永强,金向泽,郭裕福,孙菽芬,李伟平,王标,石广玉. 1997. 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, 8(增刊), 15~28
- 俞永强,张学洪. 1998. 一个修正的海气通量距平耦合方案. 科学通报, 43, 866~870
- 周天军,俞永强,宇如聪,刘海龙,李薇,张学洪. 2004. 气候系统模式发展中的耦合器研制问题, 大气科学, 28(6), 993~1007
- 周天军,张学洪,俞永强. 2000. 气候系统模式中海气水通量交换的耦合方法, 科学通报, 45(19), 2097~

2100

- Boville B A and Gent P R. 1998. The NCAR climate system model, Version One, *J. Climate*, 11, 1115 – 1130
- Covey C et al. 2001. Model Evaluation, In *Climate Change 2001, Contribution of WG1 to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, edited by J. T. Houghton et al., Cambridge University Press, Cambridge, 471 – 524
- Davey M K, Huddelston M, Sperber K R, Braconnot P, Bryan F, Chen D, Colman R A, Cooper C, Cubasch U, Delecluse P, DeWitt D, Fairhead L, Flato G, Gordon C, Hogan T, Ji M, Kimoto M, Kitoh A, Knutson T, Latif M, Le Treut H, Li T, Manabe S, Mechoso C, Meehl G A, Power S B, Rockner E, Terray L, Vintsileos A, Voss R, Wang B, Washighton M W, Yoshikawa T, Yu J Y, Yukimoto S and Zebiak S E. 2002. STOIC: A study of coupled model climatology and variability in tropical ocean regions, *Clim. Dyn.*, 18, 403 – 420
- Gates W L and Coauthors. 1999. An overview of the results of the Atmospheric Model Intercomparison Project (AMIP I), *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 80, 29 – 55
- Gates W L. 1992. AMIP: The Atmospheric Model Intercomparison Project, *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 73, 1962 – 1970
- Jin X Z, Zhang X H, Zhou T J. 1999. Fundamental Framework and Experiments of the Third Generation of IAP/LASG World Ocean General Circulation Model, *Adv. Atmos. Sci.*, 16, 197 – 215
- Latif M, Sperber K, Arblaster J, Braconnot P, Chen D, Colman A, Cubasch U, Cooper C, Delecluse P, Dewitt D, Fairhead L, Flato G, Hogan T, Ji M, Kimoto M, Kitoh A, Knutson T, Le Treut H, Li T, Manabe S, Marti O, Mechoso C, Meehl G, Power S, Roeckner E, Sirven J, Terray L, Vintsileos A, Voss R, Wang B, Washighton W, Yoshikawa T, Yu J and Zebiak S. 2001. ENSIP: The El Nino simulation intercomparison project, *Clim. Dyn.*, 18, 255 – 276
- Liu H and Wu G. 1997. Impacts of land surface on climate of July and onset of summer monsoon: A study with an AGCM plus SSiB, *Adv. Atmos. Sci.*, 14, 289 – 308
- Liu H L, Zhang X H, Li W, Yu Y Q and Yu R C. 2004. An Eddy-Permitting Oceanic General Circulation Model and Its Preliminary Evaluation, *Adv. Atmos. Sci.*, 21, 675 – 690
- Liu H, Jin X, Zhang X and Wu G. 1996. A coupling experiment of an atmosphere and an ocean model with a monthly anomaly exchange scheme, *Adv. Atmos. Sci.*, 13, 133 – 146
- Liu H, Zhang X and Wu G. 1998. Cloud feedback on SST variability in western equatorial Pacific in a CGCM, *Adv. Atmos. Sci.* 15(3), 410 – 423
- Meehl G A, Boer G J, Covey C, Latif M and Stouffer R J. 2000. The Coupled Model Intercomparison Project (CMIP), *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 81, 313 – 318
- Schneider E K. 2002. Understanding differences between the equatorial Pacific as simulated by two coupled GCMs, *J. Climate*, 15, 449 – 469
- Sperber K R and coauthors. 2000. Dynamical seasonal predictability of the Asian summer monsoon, PCMDI Report No. 56, Lawrence Livermore National Laboratory, P. O. Box 808, L-264, Livermore, CA 94550, 56pp
- Wu G X, Liu H, Zhao Y C and Li W P. 1996. A nine-layer atmospheric general circulation model and its performance, *Adv. Atmos. Sci.*, 13, 1 – 18
- Wu T W, Liu P, Wang Z Z, Liu Y M, Yu R C and Wu G X. 2003. The Performance of Atmospheric Component Model R42L9 Of GOALS/LASG. *Adv. Atmos. Sci.*, 20, 726 – 742
- Yu R C and Zhou T J. 2004. Impacts of Winter-NAO on March Cooling Trends over Subtropical Eurasia Conti-

- nent in the Recent Half Century, *Geophys. Res. Lett.*, 31, L12204, doi:10.1029/2004GL019814
- Yu R C, Wang B and Zhou T J. 2004. Climate effects of the deep continental stratus clouds generated by the Tibetan Plateau, *J. Climate*, 17, 2702 – 2713
- Yu R C, Li W, Zhang X H, Liu Y M, Yu Y Q, Liu H L and Zhou T J. 2000. Climatic Features related to Eastern China Summer Rainfalls in the NCAR CCM3, *Adv. Atmos. Sci.*, 17, 503 – 518
- Yu Y Q, Yu R C, Zhang X H and Liu H L. 2002. A flexible coupled ocean-atmosphere general circulation model, *Adv. Atmos. Sci.*, 19, 169 – 190
- Yu Y Q. 1997. Design of ocean-atmosphere-sea ice coupling scheme and simulation of interdecadal oscillation of climate, Ph.D. Thesis, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, 130pp
- Zeng Q C, Zhang X H, Liang X Z, Yuan C G and Chen S F. 1989. Documentation of IAP Two-Level Atmospheric General Circulation Model, DOE/ER/60314-H1, TR044, 383pp
- Zhang X H and Liang X Z. 1989. A numerical world ocean general circulation model, *Adv. Atmos. Sci.*, 6, 43 – 61
- Zhang X H, Bao N, Yu R C and Wang W Q. 1992. Coupling scheme experiments based on an atmospheric and an oceanic GCM, *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 16, 129 – 144
- Zhang X H, Chen K M, Jin X Z, Lin W Y and Yu Y Q. 1996. Simulation of thermohaline circulation with a twenty-layer oceanic general circulation model. *Theoretical and Applied Climatology*, 55, 65 – 87
- Zhang X H, Shi G Y, Liu H and Yu Y Q (Editors). 2000. IAP Global Ocean-Atmosphere-Land System Model, Science Press, Beijing, 251pp
- Zhang X, Yu Y, Jin X and Liu H. 1997. Atmosphere-Ocean-Sea Ice Coupling Models Based on Flux Anomaly, *Quarterly Journal of Applied Meteorology*, 8, Supplement, 175 – 182
- Zhou Tianjun, Zhang Xuehong, Yu Yongqiang, Yu Rucong, Wang Shaowu. 2000. Response of IAP/LASG GOALS model to the coupling of air-sea freshwater exchange, *Advances in Atmospheric Sciences*, 17(3), 473 – 486

第一章 SAMIL 模式动力框架

中国科学院大气物理研究所大气科学与地球流体力学数值模拟国家重点实验室发展的大气环流谱模式简称 SAMIL (Spectral Atmospheric Model of IAP LASG)。SAMIL 最初的模式版本是由 Bourke 等(1974)设计并经 Simmonds 等(1985)改进。林元弼(1987)将该模式从澳大利亚引进到中国,并做了些改进。1991 年吴国雄等将该模式引进到中国科学院大气物理研究所,并对模式做了大量的改进和发展。在动力框架方面,为减少截断误差和负地形影响,采用了参考大气扣除的方法(Liu 等,1994)。在物理过程方面,辐射过程采用了 k-分布与二流辐射传输相结合的方案(王标,1996),引入了 Slingo 诊断云方案(Liu 等,1998),考虑了太阳辐射的日变化(邵慧等,1998),并将简化的简单生物圈模式(SSiB)耦合到大气模式中(Liu 等,1997)。这些改进使模式模拟性能有了极大的提高。

该模式还与 20 层的海洋、热力学海冰模式耦合,发展成包括各气候子系统的海-陆-气耦合系统模式(GOALS/LASG)(吴国雄等,1997;Zhang 等,2000)。GOALS 参加了一系列的国际模式比较计划,表明具有较好的气候模拟能力(Kang 等,2002)。

GOALS 中大气模式 SAMIL 的分辨率是 R15L9,即水平为菱形 15 波截断,垂直分 9 层。该模式和国际上的气候模式比较,无论是水平分辨率还是垂直分辨率都比较低,对于季节变化及局地性的气候模拟显得不够。有关模式水平分辨率与气候模拟性能关系的研究表明(Boyle, 1992),当物理过程不变时,虽然水平分辨率的提高不一定导致模拟性能的改进,但 T42 与 T21 相比模式性能还是有本质性的提高;对主要由地形、边界强迫影响的局地性气候,高分辨率模式的性能还是有明显改进。

这里介绍的模式就是在原来 R15L9 分辨率基础上,增加模式的分辨率,并对一些物理过程做适当调整而形成的。分辨率的提高包括水平分辨率和垂直分辨率两个方面。

水平分辨率的调整,主要是对模式中水平分辨率有关的参量进行调整,如波谱截断参数、高斯网格参数等;并对相关的波谱计算做修改。同时对模式的结构做适当调整,使其满足程序的标准化和结构化。这样可以方便地实现模式分辨率及一些物理过程的更换。水平分辨率的改变,更重要的是形成配套的外强迫数据,包括海陆分布、地形高度、海温、海冰分布等。这里将提高后的水平分辨率取为菱形 42 波截断(R42),相当于经纬网格 2.8125° 经度 $\times 1.67^{\circ}$ 纬度,并形成了配套的外强迫数据。

为有效提高模式垂直分辨率,引进了垂直混合坐标框架。本章介绍的内容,主要是针对混合坐标框架下的处理,包括模式控制方程组、空间离散方法、时间积分方案等。最后还对模式中动力过程与物理过程的耦合做介绍。

1.1 控制方程组

在 R15 中垂直方向采用的是 σ 坐标。在 R42 中增加了混合 η 坐标的处理,这样就有两种

动力框架可供选择。混合坐标的优点在于它可以通过适当选择两组常数值,使得低层的 σ 坐标“平滑”地过渡到高层的等压坐标。从计算的角度看,它综合了 σ 坐标和等压坐标的优点,而在一定程度上避免了二者的缺点,因而是特别有效的。 σ 坐标系可以理解为 η 坐标系的一个特例。另外垂直分层的增加,采用混合坐标可以减少地形起伏对平流层模拟的影响。

与其他气候系统相比,本系统在动力框架上的特点之一是引入了模式参考大气。参考大气一般是气压的函数,为得到扣除参考大气的动力框架,这里从等压面的大气控制方程开始。

1.1.1 等压坐标控制方程

在等压面坐标 (λ, φ, p) 下,大气控制方程为:

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} = -\frac{1}{a \cos^2 \varphi} \left(\frac{\partial A}{\partial \lambda} + \cos \varphi \frac{\partial B}{\partial \varphi} \right) - 2\Omega \left(D \sin \varphi + \frac{V}{a} \right) + \mathbf{k} \cdot \nabla \times (\mathbf{F}_h + \mathbf{F}_v) \quad (1.1.1)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial D}{\partial t} = & \frac{1}{a \cos^2 \varphi} \left(\frac{\partial B}{\partial \lambda} - \cos \varphi \frac{\partial A}{\partial \varphi} \right) + 2\Omega \left(\zeta \sin \varphi - \frac{U}{a} \right) - \\ & \nabla^2 (E + \phi) + \nabla \cdot (\mathbf{F}_h + \mathbf{F}_v) \end{aligned} \quad (1.1.2)$$

$$\frac{\partial \phi}{\partial \ln p} = -RT_v \quad (1.1.3)$$

$$\frac{dT}{dt} = \frac{RT_v}{c_p^*} \frac{\omega}{p} + F_h^T + F_v^T \quad (1.1.4)$$

$$\frac{dq}{dt} = -\frac{1}{p_s} \int_{p_i}^{p_s} D dp \quad (1.1.5)$$

$$\frac{\partial M}{\partial t} = -\nabla \cdot (\mathbf{V} \cdot \mathbf{M}) + MD - \omega \frac{\partial M}{\partial p} + F_h^M + F_v^M \quad (1.1.6)$$

方程的预报变量为涡度(ζ),散度(D),温度(T),地面气压的对数($q = \ln p_s$)和比湿(M)。有关变量表示如下:

$$\mathbf{V} = (U, V) = (u, v) \cos \varphi \quad (1.1.7)$$

$$\zeta = \frac{1}{a \cos^2 \varphi} \left(\frac{\partial V}{\partial \lambda} - \cos \varphi \frac{\partial U}{\partial \varphi} \right)$$

$$D = \frac{1}{a \cos^2 \varphi} \left(\frac{\partial U}{\partial \lambda} + \cos \varphi \frac{\partial V}{\partial \varphi} \right)$$

其中 (u, v) 是纬向风和经向风矢量。其他量的表示为:

$$A = \zeta U + \omega \frac{\partial V}{\partial p} \quad (1.1.8)$$

$$B = \zeta V - \omega \frac{\partial U}{\partial p} \quad (1.1.9)$$

$$E = \frac{U^2 + V^2}{2 \cos^2 \varphi} \quad (1.10)$$

$$T_v = [1 + \epsilon_0 M] T \quad (1.1.11)$$

$$c_p^* = [1 + \epsilon_1 M] c_p \quad (1.1.12)$$

$$\epsilon_0 = \frac{R_v}{R} - 1, \quad \epsilon_1 = \frac{c_{pv}}{c_p} - 1$$

其他的参数为气象常用量。

引入参考大气 $(\bar{T}(p), \bar{\phi}(p))$, 满足静力方程:

$$\frac{\partial \bar{\phi}(p)}{\partial \ln p} = -R\bar{T}(p) \quad (1.1.13)$$

这样模式大气的温度和高度可分成参考大气和相对参考大气的偏差两部分:

$$T(\lambda, \varphi, p, t) = \bar{T}(p) + T'(\lambda, \varphi, p, t) \quad (1.1.14)$$

$$\phi(\lambda, \varphi, p, t) = \bar{\phi}(p) + \phi'(\lambda, \varphi, p, t) \quad (1.1.15)$$

将(1.1.13)、(1.1.14)、(1.1.15)式代入与温度、位势高度有关的散度、温度和静力平衡方程, 得到以温度偏差 T' 为预报变量的方程:

$$\begin{aligned} \frac{\partial D}{\partial t} = \frac{1}{a \cos^2 \varphi} \left(\frac{\partial B}{\partial \lambda} - \cos \varphi \frac{\partial A}{\partial \varphi} \right) + 2\Omega \left(\zeta \sin \varphi - \frac{U}{a} \right) - \\ \nabla^2(E + \phi') + \nabla \cdot (\mathbf{F}_h + \mathbf{F}_v) \end{aligned} \quad (1.1.2)'$$

$$\frac{\partial \phi'}{\partial \ln p} = -RT'_v \quad (1.1.3)'$$

$$\frac{dT'}{dt} = \frac{R}{c_p} \left[T' + \bar{T}_2 + \frac{T(\epsilon_0 - \epsilon_1)M}{1 + \epsilon_1 M} \right] \frac{\omega}{p} + F_h^T + F_v^T \quad (1.1.4)'$$

其中新增加的与参考大气有关的量:

$$T'_v = T_v - \bar{T} = T(1 + \epsilon_0 M) - \bar{T} \quad (1.1.16)$$

$$\bar{T}_2(p) = \bar{T}(p) - \frac{c_p}{R} p \frac{d\bar{T}(p)}{dp} \quad (1.1.17)$$

由方程(1.1.1), (1.1.2)', (1.1.3)', (1.1.4)', (1.1.5), (1.1.6) 构成了等压面坐标下扣除模式参考大气的方程组。从这组方程出发, 继续推导 σ 坐标及混合坐标下模式的动力方程。

1.1.2 σ -坐标控制方程

取 σ 坐标:

$$\sigma = \frac{p}{p_s} \quad (1.1.18)$$

对等压面坐标下的控制方程组进行坐标运算, 得到 σ -坐标的控制方程组:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \zeta}{\partial t} = -\frac{1}{a \cos^2 \varphi} \left(\frac{\partial A}{\partial \lambda} + \cos \varphi \frac{\partial B}{\partial \varphi} \right) - 2\Omega \left(D \sin \varphi + \frac{V}{a} \right) + \mathbf{k} \cdot \nabla \times (\mathbf{F}_h + \mathbf{F}_v) \end{aligned} \quad (1.1.19)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial D}{\partial t} = \frac{1}{a \cos^2 \varphi} \left(\frac{\partial B}{\partial \lambda} - \cos \varphi \frac{\partial A}{\partial \varphi} \right) + 2\Omega \left(\zeta \sin \varphi - \frac{U}{a} \right) - \\ \nabla^2(E + \phi') + \nabla \cdot (\mathbf{F}_h + \mathbf{F}_v) \end{aligned} \quad (1.1.20)$$

$$\frac{\partial \phi'}{\partial \ln \sigma} = -RT'_v \quad (1.1.21)$$

$$\frac{dT'}{dt} = \frac{R}{c_p} \left(T' + \bar{T}_2 + \frac{T(\epsilon_0 - \epsilon_1)M}{1 + \epsilon_1 M} \right) \frac{\omega}{p} + F_h^T + F_v^T \quad (1.1.22)$$