

中国科学院“二氧化碳导致的气候变化”联合研究进展(1984-1999)
美国能源部

Advances of the Joint Research Project on CO₂-Induced Climate Change
Department of Energy, USA and the Chinese Academy of Sciences, PRC(1984-1999)

温室效应与 气候变化研究

Greenhouse Effect and Climate Change

主 编(Editor-in-chief)

陶诗言(Tao Shiyan) M.R. 里奇斯 (Michael R. Riches)

陈泮勤(Chen Panqin) 王维强 (Wei-Chyung Wang)



海洋出版社

China Ocean Press

中国科学院“二氧化碳导致的气候变化”联合研究进展(1984~1999)
美国能源部

Advances of the Joint Research Project on CO₂-Induced Climate Change
Department of Energy, USA and the Chinese Academy of Sciences, PRC (1984~1999)

温室效应与气候变化研究

Greenhouse Effect and Climate Change

主 编

Editor-in-chief

陶诗言(Tao Shiyan) M.R.里奇斯(Michael R. Riches)

陈泮勤(Chen Panqin) 王维强(Wei-Chyung Wang)

海洋出版社

1999年·北京

China Ocean Press, Beijing 1999

内 容 简 介

本文集系 1984 年以来中国科学院与美国能源部国际合作研究项目“二氧化碳导致的气候变化”的研究成果汇总。内容包括 4 个方面:各种大气环流模式的分析与比较;区域气候数据的制备、验证和分析;区域气候与大尺度气候的关系及二氧化碳强迫下的气候变化分析;中国稻田甲烷的排放测量和分析。

本文集可帮助人们更好地理解地球系统的气候变化和全球变暖等当今科学研究热点及公众关注的焦点问题,可供从事大气、气候、环境、生态、地理等学科研究的大专院校师生、研究人员及政府有关部门决策者阅读参考。

图书在版编目(CIP)数据

温室效应与气候变化研究/陶诗言等主编.-北京:海洋出版社,1999.6

ISBN 7-5027-4768-0

I.温… II.陶… III.温室效应-关系-气候变化-研究
IV.P467

中国版本图书馆 CIP 数据核字(1999)第 20729 号

责任编辑 赵叔松

责任校对 张丽萍

责任印制 刘志恒

海洋出版社 出版发行

(100081 北京市海淀区大慧寺路 8 号)

北京海洋印刷厂印刷 新华书店发行所经销

1999 年 6 月第 1 版 1999 年 6 月北京第 1 次印刷

开本:787×1092 1/16 印张:11.25

字数:331 千字 印数:1~900 册

定价:30.00 元

海洋版图书印、装错误可随时退换

编者及致谢

本文集由中文篇和英文篇两个独立部分构成。编者为：

陶诗言	(中国科学院大气物理研究所)
陈泮勤	(中国科学院资源环境局)
Michael R. Riches	(美国能源部)
王维强	(美国纽约州立大学)
葛全胜	(中国科学院地理研究所)
张丕远	(中国科学院地理研究所)
安建基	(中国科学院国际合作局)

在文集编辑、出版过程中,编者得到了郑景云、孙惠南、张雪芹、黄玫、彭贵堂、赵名茶、刘秀萍的帮助。他们翻译和校对了所有美国作者的文章,并为文集的编辑出版工作作出了贡献。

编者谨此表示衷心的感谢!

Editors and Acknowledgment

This Book consists of two parts (*Chinese and English*), edited by:

Michael R. Riches	(<i>Department of Energy, USA</i>)
Wei-Chyung Wang	(<i>State University of New York at Albany</i>)
Tao Shiyao	(<i>Institute of Atmospheric Physics, CAS</i>)
Chen Panqin	(<i>CAS</i>)
Ge Quansheng	(<i>Institute of Geography, CAS</i>)
Zhang Piyuan	(<i>Institute of Geography, CAS</i>)
An Jianji	(<i>CAS</i>)

The Editors would like here to express their heartfelt thanks to **Zheng Jingyun, Sun Huinan, Zhang Xueqin, Huang Mei, Peng Guitang, Zhao Mingcha and Liu Xiuping**. They kindly help them to translate all the papers from English into Chinese, and to make contributions on compilation of the book.

目 次 (Contents)

中 文 篇

序	1
前言	3
 第一课题	
中国科学院大气物理研究所环流模式(GCM)研究的成就	张学洪等 5
21 世纪美国气候模式研究与预测	Warren M. Washington 14
美国石溪纽约州立大学气候模型研究总结	Robert D. Cess 等 17
气候模式诊断与交叉比较和大气模式交叉比较研究计划的进展 ...	Gerald L. Potter 等 21
 第二、三课题	
中国气候数据的准备、分析及对大尺度强迫和区域气候关系的研究	符淙斌等 25
中国科学院地理研究所参加的 CAS/DOE 合作研究	张丕远等 32
美国奥尔巴尼纽约州立大学的研究行动总结	王维强 36
GCM 模拟诊断研究与中国历史时期气候变化分析	Sultan Hameed 42
CDIAC 参加中美温室效应合作研究活动的回顾	Robert M. Cushman 等 47
美国国家气候数据中心参加 DOE/CAS 合作研究项目的总结	David R. Easterling 等 52
 第四课题	
中美合作(CAS-DOE)“二氧化碳导致的气候变化”项目	王明星等 56
稻田的甲烷释放	M. A. K. Khalil 等 62

英 文 篇

PREFACE	77
FORWARD	79

Task 1

United States Climate Modeling Research and Prediction in the 21st Century	
..... Warren M. Washington	83
A Summary of the Climate Modeling Activities at SUNY Stony Brook as Part of the United States- China Research Project on the Greenhouse Effect	Robert D. Cess <i>et al.</i>
	87
PCMDI and AMIP Related Activities in the United States-China Research on the Greenhouse Effect	Gerald L. Potter <i>et al.</i>
	92
Achievements in GCM Studies at IAP	Xuehong Zhang <i>et al.</i>
	96

Task 2,3

Research Activities at SUNY-Albany	Wei-Chyung Wang	108
Diagnostic Studies of GCM Simulations and Analyses of Climate Change in China During Historical Times	Sultan Hameed	116
Retrospective on CDIAC ' s Activities in United States - China Research on the Greenhouse Effect	Robert M. Cushman <i>et al.</i>	122
Activities of the National Climatic Data Center in U . S . Department of Energy Chinese Academy of Sciences Research into the Greenhouse Effect	David R. Easterling <i>et al.</i>	128
Summary Report on the Preparation and Analysis of Climate Data in China and Study on Relationship between Large Scale Forcing and Regional Climate	Congbin Fu <i>et al.</i>	134
Research Activities in Task 2 (Proxy Data) at IG/CAS	Piyuan Zhang <i>et al.</i>	143

Task 4

Methane Emissions From Rice Fields	M. A. K. Khalil <i>et al.</i>	148
CAS/DOE Joint Research on CO ₂ Induced Climate Change	Mingxing Wang <i>et al.</i>	166

序

面对世界各国关于温室气体引发的全球增暖纷争,科学家当责无旁贷地为决策者提供必需的基础知识。因此,各国科学家欢聚一堂,互相切磋,共同研究,以尽可能准确地为决策者提供科学知识具有极为重要的意义。

1983年春,中国科学院大气物理研究所李麦村教授对美国能源部的访问,成为中美全球气候变化合作研究的先导,推动了中美双方全球气候变化合作研究。遗憾的是李教授于1983年冬因病去世,未及见到合作研究的启动。

在1983年德国汉堡的WMO会议上,中华人民共和国中国科学院与美国能源部二氧化碳研究部的代表会晤并讨论了全球气候变化所必需的基础知识。此后,在北京和华盛顿又经数次磋商,于1987年8月19日双方正式签署了合作研究协议。该协议包括4个研究课题:

- **课题 1: 大气环流模式分析** 目的在于诊断气候模式模拟现在和未来的大尺度气候的能力。
- **课题 2: 区域气候数据的制备、验证和分析** 发展包括中国和美国的区域气候数据集,因为中、美两国都有百年以上的气象仪器观测记录。此外,中国的代用资料还可将气候资料上溯到过去2 000a。这一任务使两国科学家改进了代用资料的提取方法,提高了数据质量。
- **课题 3: 区域气候与大尺度气候的关系分析** 该课题的目标在于确定气候区和它的未来变化,并比较分析模式模拟区域天气格局的结果与有关实测数据。
- **课题 4: 甲烷测量** 其目的是评估 CH_4 对气候变化的贡献,并增进我们对 CH_4 源和汇的了解。中国拥有世界稻米产量的35%和大量的沼气池,是 CH_4 的一个重要源地。在此项工作中,中方提供了实验地和一流科学家。

本合作研究成果丰硕。本文集所包含的各种信息说明本合作研究是富有成效的,它提供了质量可靠的数据,可作为决策的基础知识。参加合作研究的成员分别在两国每年会晤一次。至今有50余位科学家和项目组成员参加了本研究,发表了150余篇文章。另有50余名学生也同时参与了这项工作。

叶笃正 Frederick A. Koomanoff

前 言

众所周知,大气中 CO_2 的不断增加可影响全球气候。这一十分重要的事件引起了国际科学界的极大关注。大气中 CO_2 含量的不断增多主要是化石燃料的大量使用所致。研究表明,1860 年全球化石燃料释放的 CO_2 约为 $40 \times 10^6 \text{t}$,到 19 世纪 80 年代,全球化石燃料释放的 CO_2 已超过 $5 \times 10^{12} \text{t}$ 。

在二氧化碳导致的气候变化研究中有两个极为重要的问题:其一是必须发展气候模式,预测在给定的全球 CO_2 强迫下的区域气候变化;其二是为模式验证提供必需的资料。

鉴于中国科学院具有全球气候变化预测研究的能力,而美国能源部则是研究 CO_2 及其温室效应可能导致气候变化的领导机构,中华人民共和国中国科学院(CAS)和美利坚合众国能源部(DOE)于 1985 年达成了关于“温室气体效应导致的气候变化”的双边合作研究协议,并于 1987 年 8 月 19 日正式签约实施大气痕量气体合作研究计划(属“化石能研究与发展合作议定书”附件三)。自此以来,我一直担任中方项目经理,M. R. Riches 先生担任美方项目经理。该合作的前半期设有项目总经理,中方为赵剑平女士,美方为 F. A. Koomanoff 先生,由他们二位主持整个合作研究项目。后半期由于种种原因,这一职位被撤消。此外,该项目还设有首席科学家,主要负责合作研究的学术指导。中方的首席科学家为叶笃正教授,随后由陶诗言教授接任,美方首席科学家始终由王维强教授担任。项目实施期间,中美双方先后有 50 余位科学家参与了这一合作研究。

该合作研究的目的是为中美双方科学家提供一个气候信息共享的机会,以便更好地理解地球的气候系统并可靠地预测区域气候。这一合作研究是互利的,中方可获得有关美国全国的气候资料和计算设备,美方也可以获得有关中国历史和器测时期的气候资料,这有利于增进我们对大气 CO_2 增加以及局地或区域气候变化的了解。中国科学院大气物理研究所拥有中国最好的大气模式,中国科学院地理研究所拥有中国长时间序列的、可以用来检测模式的历史气候数据,该合作研究为推动上述两所的大气环流模式的发展和历史气候数据库的建立发挥了积极作用。

大气痕量气体合作研究计划有 4 项任务:分析和比较各种 GCM 模型;代用和仪器记录的制备、验证和分析;大尺度气候与区域尺度气候之间的关系及 CO_2 强迫下的气候变化分析;中国稻田甲烷排放测量和分析。

在整个合作研究的实施过程中,双方分别在美国和中国召开了 10 次科学讨论会,就研究进展、存在问题和次年年度执行计划等充分交换了意见,从而保证

了合作研究项目的顺利执行。

到目前为止,双边合作研究取得了重要进展。本文集总结了 1985 年以来合作研究项目的执行情况与研究进展,尤其是近两年的进展。总的来讲,执行情况良好,合作是成功的,中美双方均从合作研究中得到收益,达到了预定目标。先后发表了 150 余篇反映这一合作研究成果的文章,一些重要成果(如中国稻田甲烷排放量等)已为国际气候变化协调委员会(IPCC)的科学评估报告所引用,在国际上产生了重要影响。

值此中美合作研究 10 年之际,我谨借此机会代表中国科学院资源环境科学与技术局,并以我个人的名义向在本合作研究中发挥了他人不可替代的桥梁作用的中国科学院原副院长叶笃正教授和孙鸿烈教授,大气物理研究所原所长曾庆存教授和已故李麦村教授,中国科学院资源环境局原副局长赵剑平女士及美国能源部 F. A. Koomanoff 先生致以衷心的感谢!同时向所有为此合作项目付出了幸劳、作出了重要贡献的全体中美科学家、管理工作表示诚挚的谢意!

陈 泮 勤

第一课题

中国科学院大气物理研究所环流模式(GCM)研究的成就

张学洪 郭裕福 袁重光 石广玉 吴国雄

(大气科学和地球流体力学数值模拟国家实验室,中国科学院大气物理研究所,北京 100029)

1 引言

自 1987 年中国科学院(CAS)和美国能源部(DOE)合作研究温室气体效应的协议签署以来,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实验室(LASG)一直参加第一课题“大气环流模式(GCM)分析”的合作研究。虽然 GCM 是模拟、了解和预测气候变化的主要工具,但其现状远非令人满意。认识到 GCM 分析研究对于 GCM 的可靠应用和改进的重要性,IAP 通过派遣访问学者到美国的研究机构工作(见附录 A)、参加 CAS-DOE 的科学家会议和参加模式比较计划,积极投入了这方面的合作研究。与此同时,IAP 也非常重视 GCM 的发展,尤其是在合作研究的前一阶段(见图 1)。IAP 两层大气环流模式(AGCM)、4 层大洋环流模式(OGCM)和 9 层 AGCM 的发展或出版部分得到了合作研究计划的支持,IAP 海气耦合模式(CGCM)和海洋-大气-陆面系统(GOALS)耦合模式的发展也从中美科学家的交流中受益。这些模式已被大量应用于中国的气候研究,并参加了“大气模式比较计划”(AMIP)和“耦合模式比较计划”,尤其是其中的“东亚气候(EAC)研究”计划。在第一课题的框架内所进行的研究工作共发表论文 50 篇(见图 2)。如图 2 所示,1995 年以后发表论文的数量明显增加,这意味着模式的发展对于模式的分析研究产生了积极的影响。1998 年 LASG/IAP 接待了美国 Lawrence Livermore 国家实验室的“气候模式诊断和比较计划”(PCMDI)的 Covey 博士和 Hnilo 博士的短期来访,双方就海气耦合模式进行了交流,Hnilo 博士并为 LASG 安装了 PCMDI 的气候资料分析软件。这对于 IAP GCM 参加 AMIP 和 CMIP 第 2 阶段的研究工作有很大帮助。

本文第 2 和第 3 节将简要回顾两层和 9 层 AGCM 的发展和研究工作;第 4 和第 5 节评述 IAP OGCM 和 CGCM 的发展和应用状况;第 6 节介绍辐射计算方案(Shi, 1981)及其在 GOALS 模式中的应用。最后一节简述 EAC 研究近期的主要发现及其在 GOALS 模式中的应用。

2 IAP 两层 AGCM 的发展和应用

IAP 参加第一课题的第一项研究工作是一个两层、 $4^{\circ} \times 5^{\circ}$ 分辨率的 AGCM(梁信忠, 1986; 曾庆存, 袁重光等, 1987; Zeng 等, 1989)。这是一个格点模式,采用“标准层结扣除”方法和有效能量守恒的有限差分格式(曾庆存, 1983; Zeng and Zhang, 1987)。模式的动力学框架经过了大量的检验(曾庆存, 袁重光等, 1985; Zhang 等, 1986; Zhang 等, 1987),并

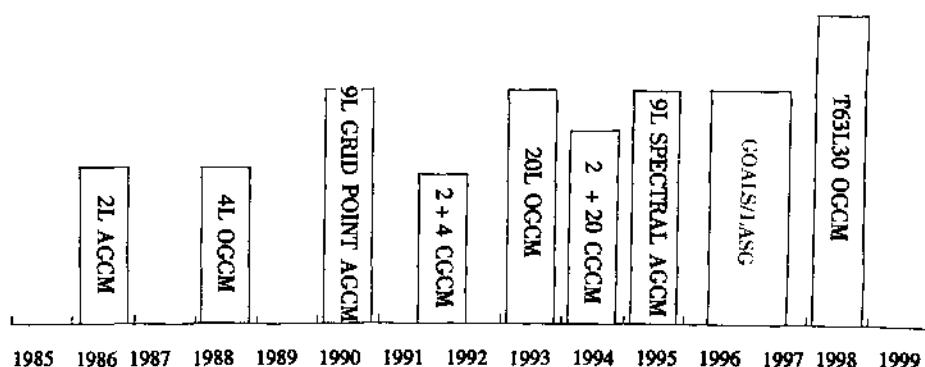


图1 IAP 环流模式(GCM)的发展

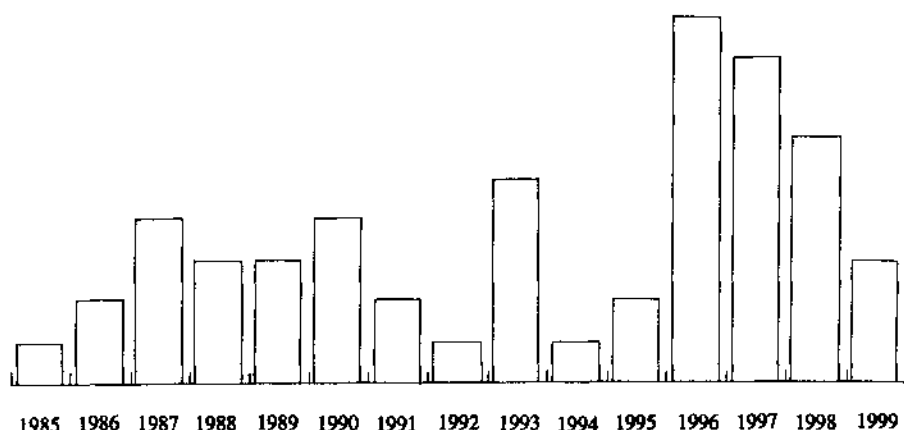


图2 IAP 在第一课题(GCM 的分析)研究中发表的论文

同其他模式进行了比较(Zhang等, 1989; Gutowski等, 1989)。梁信忠(1986)引进了OSU两层模式(Chan等, 1982)的大部分物理过程参数化方案并最终完成了模式的运行。模式的文本于1989年在DOE的资助下发表(Zeng等, 1989)。该模式是最早参加国际模式比较研究活动[如基于19个AGCM的云-气候反馈分析(Cess等, 1990)、大气模式比较计划(AMIP, Gates, 1992)等]的IAP GCM。为了对IPCC 1992年报告提供关于气候敏感性的估计, 将该模式曾被同一个平板混合层海洋模式耦合, 而予以了 CO_2 加倍试验(H.-J. Wang等, 1993; IPCC, 1992)。

该模式在气候的海温和海冰分布的强迫下积分了27a(王万秋, 1993)。模式和资料在中国的大气环流和气候研究, 以及培养青年研究人员方面得到了广泛应用。基于这27a的资料, 薛锋对于模式的气候模拟能力进行了详细的评估(薛锋, 1993)。林朝晖等用一套气候的地面反照率资料(Hummel and Reck, 1979)代替原来的地面反照率, 在模拟东亚夏季风方面取得了明显改进(Lin等, 1996; Lin等, 1997)。

3 IAP/SUNY9 层 AGCM

由于垂直分辨率太低,两层 AGCM 的应用受到很大限制。因此,有必要发展一个多层模式和相应的参数化方案。为此,1987 年由 IAP 的曾庆存教授和美国纽约州立大学石溪分校(SUNYS)的 R. D. Cess 教授共同启动了发展一个 9 层 AGCM 的研究工作,它是 CAS 和 DOE 合作研究 CO₂ 和气候问题计划的一个内容。此模式垂直方向有 9 层,模式大气顶取在 10hPa,水平分辨率与两层的 AGCM 一样。模式的动力学框架部分基本上是由张学洪在 1987 年访问 SUNYS 期间完成的(Zhang, 1990)。为了同模式的垂直分辨率相匹配,梁信忠在 1988 年在 SUNYS 访问期间重新设计和发展了模式的全部参数化过程,模式原始版本的详细文本可参见他发表在大气科学进展上的文章(Liang, 1996)。

9 层 AGCM 的一个修改版本是在 IAP 提出的(毕训强, 1993),毕训强在 1993 年访问美国纽约州立大学奥巴尼分校(SUNYA)期间对改版本的模拟结果进行了分析。该模式是参加 AMIP 第 2 阶段研究计划(AMIP 2)的 IAP GCM 之一。

4 IAP 大洋环流模拟进展

第一代 IAP 大洋环流模式(OGCM)是一个 4 层、 $4^{\circ} \times 5^{\circ}$ 分辨率的模式,它是由张学洪和梁信忠于 1987 年访问 SUNYS 期间完成的(Zhang and Liang, 1989)。按照曾庆存所设计的海气耦合模式的思路(Zeng, 1983),此海洋模式未采用“刚盖”近似,而是一个具有自由面的模式。该模式在 1991 年被进一步修改(Zhang 等, 1991),并在 1992 年实现了同两层 AGCM 的耦合(Zhang 等, 1992)。

1993~1995 年期间,发展和改进了第 2 代 IAP 大洋环流模式。这是一个 20 层、 $4^{\circ} \times 5^{\circ}$ 分辨率的模式,包括一个热力学海冰模式,简称为 ML20。该模式有 3 个版本,即 ML20-0(陈克明, 1994; Zhang 等, 1996)、ML20-1(俞永强, 1997)和 ML20-2(俞永强和周天军, 1998, 尚未发表)。ML20-0 和 ML20-1 的主要区别在于:前者用“迎风”格式计算温度和盐度平流(Maier-Reimer 等, 1993),而后者则用中心差分格式计算这些平流因而保留了通常的扩散项。由于垂直分辨率的提高,ML20-0 和 ML20-1 都能模拟出上层海洋环流的许多特征以及合理的热盐环流特征。在 ML20-2 中采用了“混合”的温盐边界条件(Bryan, 1986)取代原来的恢复性边界条件,这是实现包括水体交换在内的海气耦合的必要准备。

由于有了发展海洋模式的经验和知识,自 1996 年晚些时候以来,金向泽等已经推出了一个新一代的 IAP 大洋环流模式。同 ML20 相比,最重要的改进有两个方面。一是模式的空间分辨率显著提高,垂直方向有 30 层,其中 20 层在上面 1 000m 中(为的是更好地描写温跃层),水平分辨率相当于 63 个波的三角形谱截断(即 $1.875^{\circ} \times 1.875^{\circ}$),这种改进是以 LASC 计算机能力的大大提高为前提的。二是模式采用了沿等密度面扩散格式(Gent and McWilliams, 1990)以及其他比较成熟的参数化方案。

此新模式已经积分了 1 000a 余,同 ML20 相比它的模拟结果表现出令人鼓舞的改进,尤其是模拟的主温跃层变薄、深海变冷、与北大西洋深水(NADW)相关的翻转环流及向北的热输送增强等特征更加符合实际。存在的问题之一是模拟的南极绕极环流太弱。

为了检验模拟热带海洋动力学的能力,采用欧洲中心(ECMWF)再分析资料的风应力和热强迫将模式积分了 10a(1980~1989)(俞永强和 Antoine, 1998, 尚未发表)。针对 1982~

1983 年的 El Niño 事件分析了模拟结果并同美国气候环境预测中心(NCEP)的海洋资料(Ji 等, 1995; Behringer 等, 1998)进行了比较。结果发现,同时采用风应力和热强迫时模式能模拟出 Niño 3 区西半部的很强的 SST 异常。热收支分析表明模式模拟的 Niño 3 区的东半部 SST 异常偏弱的主要原因是模拟的经向温度平流偏弱。模式模拟的南赤道流、赤道潜流和北赤道逆流的误差对于赤道太平洋热收支可能有重要影响。

除上述全球海洋环流模式外, IAP 还推出了太平洋区域海洋环流模式(张荣华, 1989; Zeng 等, 1991)。该模式已同两层 AGCM 实现了耦合用来作中国夏季降水的跨季度预测(曾庆存等, 1990)。

5 大气物理研究所海气耦合模式

通过运用“预估-校正”月通量距平耦合方案(以下简称 MFA), 将 4 层海洋环流模式与两层大气环流模式成功地耦合起来(Zhang 等, 1992)。该耦合模式积分了 40a, 无明显的气候漂移。这 40a 的积分结果被用于年际气候变率研究(Zhang 等, 1992; Chen 等, 1993; 俞永强等, 1995)。结果表明, 该模式中有一种类似 ENSO 的现象, 它表现为西传的年际耦合模态, 这一结果和粗网格的 NCAR CGCM 的结果非常相似(Meehl, 1990)。

利用 MFA 方案, 还将 20 层海洋环流模式的原始版本(ML20-0)与两层大气环流模式相耦合, 以研究耦合系统的平均气候态(Guo 等, 1996)以及大气中 CO₂ 浓度增加所引起的气候变化(陈克明等, 1997; IPCC, 1995)。随后, 同样地利用 MFA 方案, 将 20 层海洋环流模式的修订版(ML20-1), 与一个多层的大气环流模式(即 9 层 15 波菱形截断大气环流谱模式-L9R15, Wu 等, 1996)进行了耦合(Liu 等, 1996)。尽管上述两个耦合模式对平均气候态的模拟尚可接受, 但它们均存在明显的气候漂移, 具体表现形式因模式而异。前者在 100a 的控制积分中, 全球平均 SST 变冷了 2 度; 后者在最初的 30a 积分中, 全球平均 SST 变暖了 1 度。

1993~1995 年, 在改进 MFA 耦合方案上进行了许多努力。在此基础上, 俞永强提出了一种“修正的月通量距平耦合方案”(MMFA)。该方案的要点是, 将耦合模式积分的最初几年的通量, 用于修正参考通量, 以保证长期平均通量距平近于零(俞永强, 1997; 俞永强等, 1998)。该耦合方案既适用于开阔洋面, 又适用于海冰覆盖的洋面。通过利用 MMFA 方案, 已经将 ML20-1(以及 ML20-2)成功地与 L9R15 大气环流模式耦合, 从而建立起一个全球海洋-大气-陆面系统模式, 即 GOALS/LASG(吴国雄等, 1997)。目前已经发展了 4 个版本的 GOALS 模式, 它们均被积分了 100~200a, 无明显的气候漂移。上述模式被用于年代际气候变率研究(俞永强等, 1997)、印度洋与太平洋的相互作用(孟文, 1997)、云反馈对 SST 变率的影响(Liu 等, 1998)、海表热通量与海气相互作用(张学洪等, 1998)以及风应力对 SST 变率的影响(Liu 等, 1999)。GOALS 模式的 2.0 版系参加耦合模式对比计划第一阶段(CMIP 1)的 19 个海气耦合模式之一。这 19 个模式的一些结果已由 CMIP 1 的子专题 DIVCOP(年际变率与耦合过程描述)给出(Pontaud 等, 1998, 私人通讯)。GOALS 模式的第 4 版(即将海洋模式改为 ML20-2, 并将海气淡水交换引入耦合过程)以及有、无 CO₂ 增加的 80a 积分结果, 将很快提供给 CMIP 第二阶段(CMIP 2)。

6 辐射方案的发展与应用

在过去的 10 年中, 从理论和实际应用的角度, 投入了相当大的精力来分析当前用于环

流模式的辐射方案,评估它们反映实际物理过程的能力。在此基础上,提出了现代气候模拟研究对辐射方案的一般要求及一种实用的环流模式辐射方案。这种新的方案可视为由石广玉(Shi, 1981)提出的反映大气气体吸收的 k -分布方案的扩展(或称为 ESPT),出于大气环流模拟的目的,它对一些波段进行了 EPST 重组。在计算气溶胶和云的辐射性质方面,也采用了同样复杂的参数化方案。利用上述方案来计算辐射传输,并处理太阳光和热力波段,包括多种散射和热辐射同时存在的情况。新的辐射程序被较好地加以模块化,以便于随后的改进和数据的更新。

将 GOALS/LASG 模式原来的辐射模块代以新的模块,模拟结果具有很大的改进,尤其是对与非绝热过程直接联系的大气热力结构和纬向平均风的模拟,较之原来的结果更加合理(王标,1996)。

另外,基于石广玉(Shi, 1981)所提出的重新设定吸收系数的想法,发展了一种计算大气气体的总波段吸收和 k -分布函数的方案,用来在 NCAR 联合气候模式中加入 CH_4 、 N_2O 、 CFCl_3 、 CF_2Cl_2 的热辐射效应(Wang and Shi, 1988; Wang 等, 1991)。

7 东亚气候的 GCM 研究

1994 年 4 月,中国内地气象学家代表团访问台湾。代表团成员陶诗言教授和吴国雄教授会见了来自 Albany 纽约州立大学的王维强教授以及台湾的大气科学家。各方基于共同愿望并达成共识,提出了“东亚气候的 GCM 研究”(EAC)的合作研究计划。一年之后,该计划成为大气模式比较计划第一阶段(AMIP I)的第 25 个子计划。EAC 至今已举办 4 次研讨会,分别于 1994 年在美国 Albany、1995 年在台湾大学、1997 年在南京气象学院和 1998 年在台北大学举行。现在 EAC 已经成为国际大气模式比较计划第二阶段(AMIP II)和国际耦合模式比较计划(CMIP)的一个子计划。

EAC 的基本目标是比较模式性能及模式模拟东亚气候系统的能力,例如东北亚阻塞高压、南亚高压、西太平洋副热带高压以及高空急流和低空急流等的模拟。另外,EAC 特别注重于用 GCM 作为研究手段来揭示区域气候变率与各种内部、外部影响因子相互关系的机理。过去几年的研究工作在这方面取得一些重要结果,现简述如下。

平均雨带和大气热力结构 研究发现暴雨经常发生在等熵面陡峭的区域,使得那里倾斜涡度易于发展(吴和刘,1994)。

副热带高压动力学 应用全形涡度方程进行了一系列数值实验,用以研究北半球副热带高压的形成及变化,得到一些新的发现。

ENSO 和季风 通过进行对照实验和敏感性实验,了解南亚季风和 ENSO 的关系。研究发现两者的异常变化有显著相关,像一对齿轮:在对流层下层或对流层上层,赤道印度洋上的纬向异常风的风向与赤道太平洋上的纬向异常风的风向相反。所以,ENSO 的一些早期信号可能在印度洋上发现。

对 1998 年长江流域特大洪涝进行了数值模拟和敏感性实验 实验分析表明,位于东赤道太平洋的 El Niño 和北印度洋的海温异常对异常环流的形成和中国南方暴雨的发生都是重要的。

除了进行 GCM 研究,EAC 还邀请相关领域的专家学者作学术报告。

致谢

笔者感谢曾庆存教授,因为 IAP GCM 的动力学和计算框架的基础是他奠定的,他还为推动 IAP GCM 的发展付出了巨大的努力。笔者还感谢以前的同事梁信忠、张明华、包宁、王万秋和张荣华,他们对于 IAP 大气和海洋环流模式的发展作出了重要贡献。感谢王暄为本文绘图。

参 考 文 献

- Behringer, D. W., M. Ji, and A. Leetmaa, 1998: An improved coupled model for ENSO prediction and implication for ocean initialization. Part I: The ocean data assimilation system, *Mon. Wea. Rev.*, **126**, 1013 ~ 1021.
- Bryan, F., 1986: High latitude salinity effects and interhemispheric thermohaline circulation, *Nature*, **305**, 301 ~ 304.
- Cess, R. D., G. L. Potter, J. P. Blanchet, G. J. Boer, A. D. Del Genio, M. Deque, V. Dymnikov, V. Galin, W. L. Gates, S. J. Chan, J. T. Kiehl, A. A. Lacis, H. Le Treut, Z.-X. Li, X.-Z. Liang, B. J. McAvaney, V. P. Meleshko, J. F. B. Mitchell, J.-J. Morcrette, D. A. Randall, L. Rikus, E. Roeckner, J. F. Royer, U. Schlese, D. A. Sheinin, A. Slingo, A. P. Sokolov, K. E. Taylor, W. M. Washington, R. T. Wetherald, I. Yagai, and M.-H. Zhang, 1990: Intercomparison and interpretation of climate feedback processes in 19 atmospheric general circulation models, *J. Geophys. Res.*, **95**, 16601 ~ 16615.
- Gates, W. L., 1992: AMIP: the Atmospheric Model Intercomparison Project, *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **73**, 1962 ~ 1970.
- Gent, P. R., and J. C. McWilliams, 1990: Isopycnal mixing in ocean circulation models, *J. Phys. Oceanogr.*, **20**, 150 ~ 155.
- Ghan, S. J., J. W. Lingaas, M. E. Schlesinger, R. U. Mobley, and W. L. Gates, 1982: A Documentation of OSU Two-Level Atmospheric General Circulation Model, Report No. 35, Climate Research Institute, Oregon State University, 395pp.
- Gutowski, W. J., M. J. Iacono, X.-Z. Liang, and W.-C. Wang, 1990: Simulating climate with two different numerical schemes. U. S. Department of Energy, DOE/ER-0459T, Washington, DC, 57pp.
- Hummel, J. R., and R. A. Reck, 1979: A global surface albedo model, *J. Appl. Meteor.*, **18**, 239 ~ 253.
- IPCC, 1992: Climate Change 1992: The Supplementary Report to the IPCC Scientific Assessment (T. J. Houghton, B. A. Callander and S. K. Veeney eds.), Cambridge University Press, Cambridge, U. K. 198 pp.
- IPCC, 1995: Climate Change 1995: The Science of Climate Change (T. J. Houghton, L. G. Meira Filho, B. A. Callander, N. Harris, A. Kattenberg and K. Maskell eds.), Cambridge University Press, Cambridge, U. K. 572 pp.
- Ji, M., A. Leetmaa and J. Derber, 1995: An Ocean Analysis System for Seasonal to Interannual Climate Studies, *Mon. Wea. Rev.*, **123**, 460 ~ 481.
- 梁新忠, 1986: IAP AGCM 的设计和气候数值模拟, 博士学位论文, 中国科学院大气物理研究所, 255 页。
- Majer-Reimer, E., U. Mikolajewicz, and K. Hasselmann, 1993: On the sensitivity of the global ocean circulation to changes in the surface heat flux forcing, *J. Phys. Oceanogr.*, **23**, 731 ~ 757.
- Meehl, G. A., 1990: Seasonal cycle forcing of El Niño-Southern Oscillation in a global coupled ocean atmosphere GCM, *J. Clim.*, **3**, 72 ~ 98.
- Shi, G.-Y., 1981: An accurate calculation and representation of the infrared transmission function of the atmospheric constituents, Ph. D. Thesis, Dept. of Science, Tohoku University of Japan, 191pp.
- 张荣华, 1989: 太平洋海盆海洋环流的数值模拟, 博士学位论文, 中国科学院大气物理研究所, 184 页。
- 曾庆存, 1979: 数值天气预报的数学物理基础, 北京: 科学出版社, 1979, 543 页。
- Zeng, Q.-C., 1983: Some numerical ocean-atmosphere coupling models, Papers presented at the First International Symposium Integrated Global Ocean Monitoring, Tallinn, USSR, Oct. 2 ~ 10.
- 曾庆存、袁重光、张学洪、包宁, 1985: 一个大气环流模式有限差分方案的检验, *气象学报*, **43**, 441 ~ 449.
- Zeng, Q.-C., X.-H. Zhang, and R.-H. Zhang, 1991: A design of an oceanic GCM without the rigid lid approximation and its application to the numerical simulation of the circulation of the Pacific Ocean, *J. Marine System*, **1**, 271 ~ 292.
- 曾庆存、袁重光、王万秋、张荣华, 1990: 跨季度气候距平数值预测实验, *大气科学*, **14**, 10 ~ 25.
- Zhang, X.-H., Q.-C. Zeng, and N. Bao, 1986: Nonlinear baroclinic Haurwitz waves, *Adv. Atmos. Sci.*, **3**, 330 ~ 340.

附录 A 发表的论文 (1987 ~ 1999)

- 袁重光、曾庆存, 1987: 地形对正压流影响的数值实验, 大气科学, **11**, 55 ~ 64.
- Zeng, Q.-C., C.-G. Yuan, X.-H. Zhang, X.-Z. Liang and N. Bao, 1987: A global gridpoint general circulation model, Collection of papers presented at the WMO/IUGG NWP Symposium, Tokyo, 4-8 August 1986, Special volume of J. Meteorol. Soc. Japan, 421 ~ 430.
- Zeng, Q.-C., and X.-H. Zhang, 1987: Available energy conserving schemes for primitive equations on spherical baroclinic atmosphere, Chinese J. Atmos. Sci., **11**(2), 121 ~ 142.
- Zhang, X.-H., N. Bao, C.-G. Yuan, and Q.-C. Zeng, 1987: Studies on the sensitivity of dynamical frame of a general circulation model to initial condition, Scientia Sinica (Series B), **30**, 739 ~ 750.
- Wang, W.-C. and G.-Y. Shi, 1988: total band absorptance and k-distribution function for atmospheric gases, JQSRT, **39**, 387 ~ 397.
- 曾庆存、张荣华、梁信忠, 1988: 季风的数值模拟及大气环流模式的季节突变, 大气科学(特刊), 22 ~ 42.
- 张学洪、曾庆存, 1988: 大洋环流数值模式的计算设计, 大气科学(特刊), 149 ~ 165.
- Zeng, Q.-C., X.-H. Zhang, X.-Z. Liang, C.-G. Yuan, and S.F., Chen, 1989: Documentation of IAP Two-Level Atmospheric General Circulation Model, DOE/ER/60314-H1, TR044, Feb. 1989, 383pp.
- Zhang, X.-H., and X.-Z. Liang, 1989: A numerical world ocean general circulation model, Adv. Atmos. Sci., **6**, 43 ~ 61.
- Zhang X.-H., and X. Z. Liang, 1989: Comparison and examination of the dynamic frameworks of IAP and OSU AGCM, Adv. Atmos. Sci., **6**, 265 ~ 274.
- Yuan, C.-G., 1990: The numerical simulation of summer monsoon and its precipitation, Chin. J. Atmos. Sci., **14**, 53 ~ 62.
- Zeng, Q.-C., C.-G. Yuan, X.-H. Zhang, X.-Z. Liang, N. Bao, W.-Q. Wang, and X.-C. Lu, 1990: IAP GCM and its application to climate studies, In Climate Change, Dynamics and Modeling, (Zeng, Q.-C. et al., eds.) China Meteorological Press, Beijing, 303 ~ 330.
- Zeng, Q.-C., X.-H. Zhang, C.-G. Yuan, R.-H. Zhang, N. Bao, and X.-Z. Liang, 1990: IAP oceanic general circulation models, In: Climate Change, Dynamics and Modeling (Zeng, Q.-C. et al., eds.) China Meteorological Press, Beijing, 331 ~ 372.
- Zhang, X.-H., 1990: Dynamical framework of IAP nine-level atmospheric general circulation model, Adv. Atmos. Sci., **7**, 67 ~ 77.
- Zhang, X.-H., N. Bao, and W.-Q. Wang, 1991: Numerical simulation of seasonal cycle of world oceanic general circulation, In: The Proceedings of The Sixth Japan and East China Sea Study Workshop (JECSS-VI), Fukuoka, Japan, April 22 ~ 27, 1991. (La mer, **30**, 1993, 73 ~ 82).
- Wang, W.-C., G.-Y. Shi, and J. T. Kiehl, 1991: Incorporation of the thermal radiative effect of CH_4 , N_2O , CFCl_3 , and $\text{C}_2\text{F}_2\text{Cl}_2$ into the NCAR community climate model, J. Geophys. Res., **96**, 9097 ~ 9103.
- Zhang, X.-H., N. Bao, R.-C. Yu, and W.-Q. Wang, 1992: Coupling scheme experiments based on an atmospheric and an oceanic GCM. Chin. J. Atmos. Sci., **16**(2), 129 ~ 144.
- 毕训强, 1993: IAP 九层大气环流模式及其气候模拟, 博士学位论文, 中国科学院大气物理所, 210 页.
- Chen, K.-M., X.-H. Zhang, and Q.-C. Zeng, 1993: Features of interannual variability in a coupled ocean-atmosphere general circulation model, In Climate Variability, Proceedings of International Workshop on Climate Variabilities (IWCV) (Ye Duzheng et al., eds.), China Meteorological Press, Beijing, pp. 255 ~ 272.
- Wang, H.-J., Q.-C. Zeng, and X.-H. Zhang, 1993: The numerical simulation of the climatic change caused by CO_2 doubling, Science in China (Ser. B), **36**(4), 451 ~ 462.
- 王万秋, 1993: 海表动量和热量通量的数值模拟, 大气科学, **17**(5), 555 ~ 562.