

国家重点基础研究发展规划项目

我国重大天气灾害形成机理与预测理论研究

研究专著系列丛书之七

丛书主编：倪允琪 周秀骥

顾问：陶诗言

CAMS 大气数值预报模式 系统研究

陈德辉 胡志晋 徐大海
赵春生 周秀骥 等著

气象出版社

国家重点基础研究发展规划项目 研究专著系列丛书之七
我国重大天气灾害形成机理与预测理论研究

丛书主编：倪允琪 周秀骥

顾问：陶诗言

CAMS 大气数值预报 模式系统研究

陈德辉 胡志晋 徐大海
赵春生 周秀骥 等著

气象出版社

图书在版编目(CIP)数据

CAMS 大气数值预报模式系统研究/陈德辉等著. —北京:
气象出版社, 2004. 11
(我国重大天气灾害形成机理与预测理论研究/倪允琪, 周秀骥主编)
ISBN 7-5029-3868-0
I. C… II. 陈… III. 暴雨-数值天气预报-研究 IV. P457. 6
中国版本图书馆 CIP 数据核字(2004)第 113939 号

出版者: 气象出版社
网 址: <http://cmp.cma.gov.cn>
E-mail: qxcbs@263.net

地 址: 北京市海淀区中关村南大街 46 号
邮 编: 100081
电 话: 总编室: 010-68407112
发行部: 010-62175925

责任编辑: 俞卫平
封面设计: 北京蓝色航线企业形象策划有限公司
责任校对: 吴庭芳
印刷者: 石油工业出版社印刷厂
装订者: 北京彩虹装订厂
发行者: 气象出版社

终 审: 周诗健
版式设计: 吴庭芳

开 本: 787×1092 1/16 印 张: 12.75 字 数: 310 千字 彩插: 4
版 次: 2004 年 11 月第一版 2004 年 11 月第一次印刷
书 号: ISBN 7-5029-3868-0/P·1367
印 数: 1~1000
定 价: 35.00 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

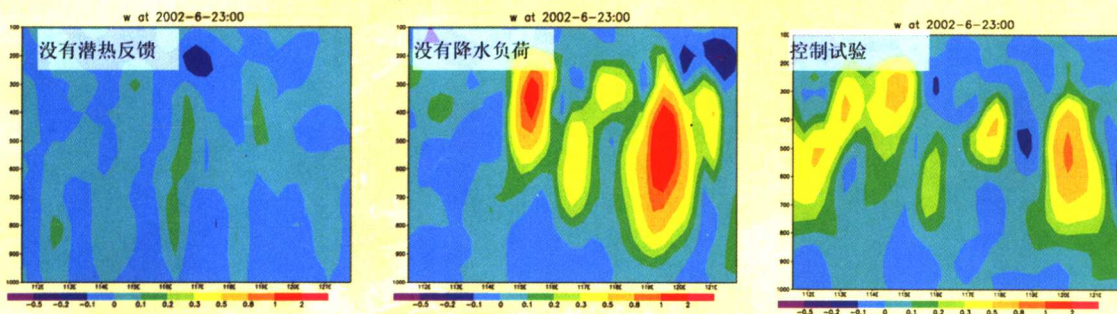


图 2.1 不考虑水负荷或潜热的垂直气流的数值模拟结果对比

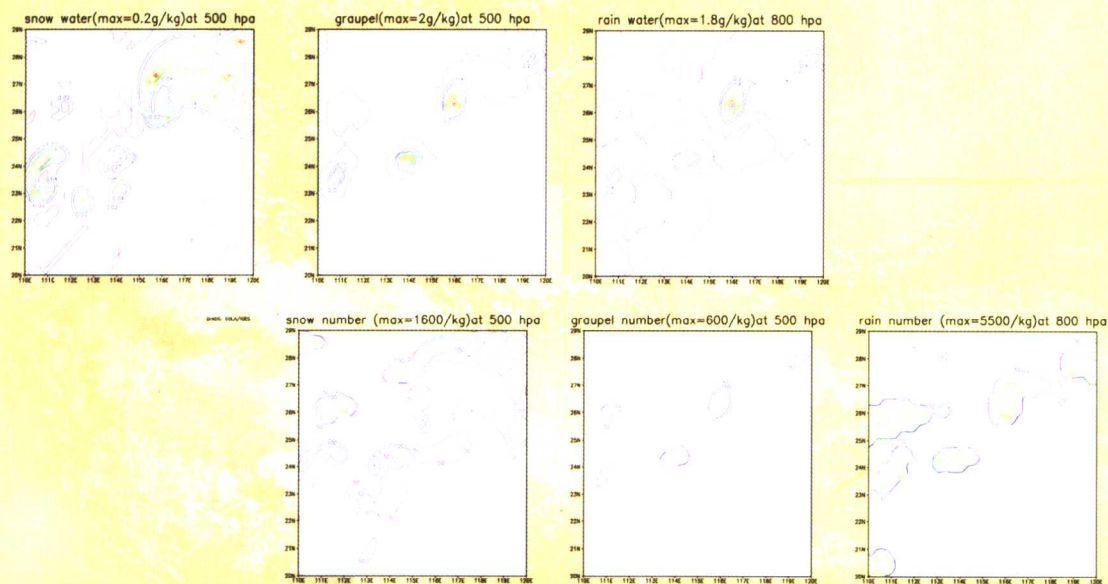


图 2.22 模拟第 24 小时的雪晶、霰和雨的数浓度和混合比含量水平分布

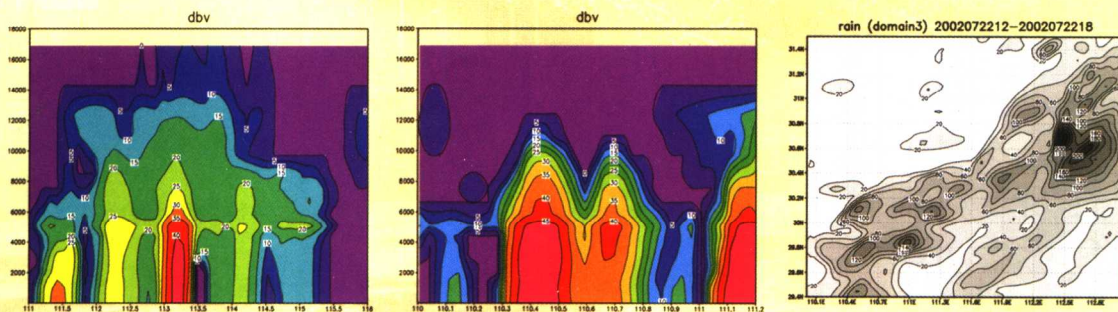


图 2.26 新方案 10 km 和 3.3 km 水平格距模拟回波 (dBz) 与 3.3 km 水平格距模拟的 6 h 降水分布 (单位: mm)

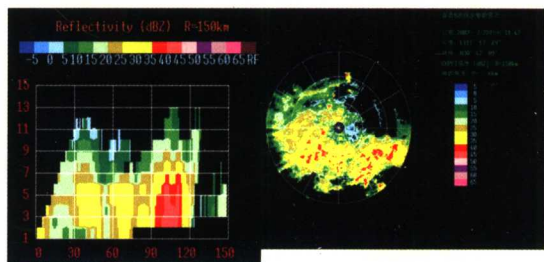


图 2.25 宜昌雷达观测 PPI 和 RHI 回波

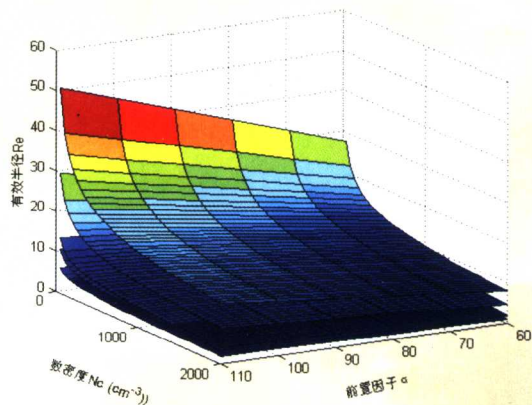


图 3.1 云滴有效半径随液态含水量和前置因子的变化图。(云的液态含水量由上至下分别是 $5 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$, $1 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$, $0.5 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$, $0.1 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$, $0.01 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$)

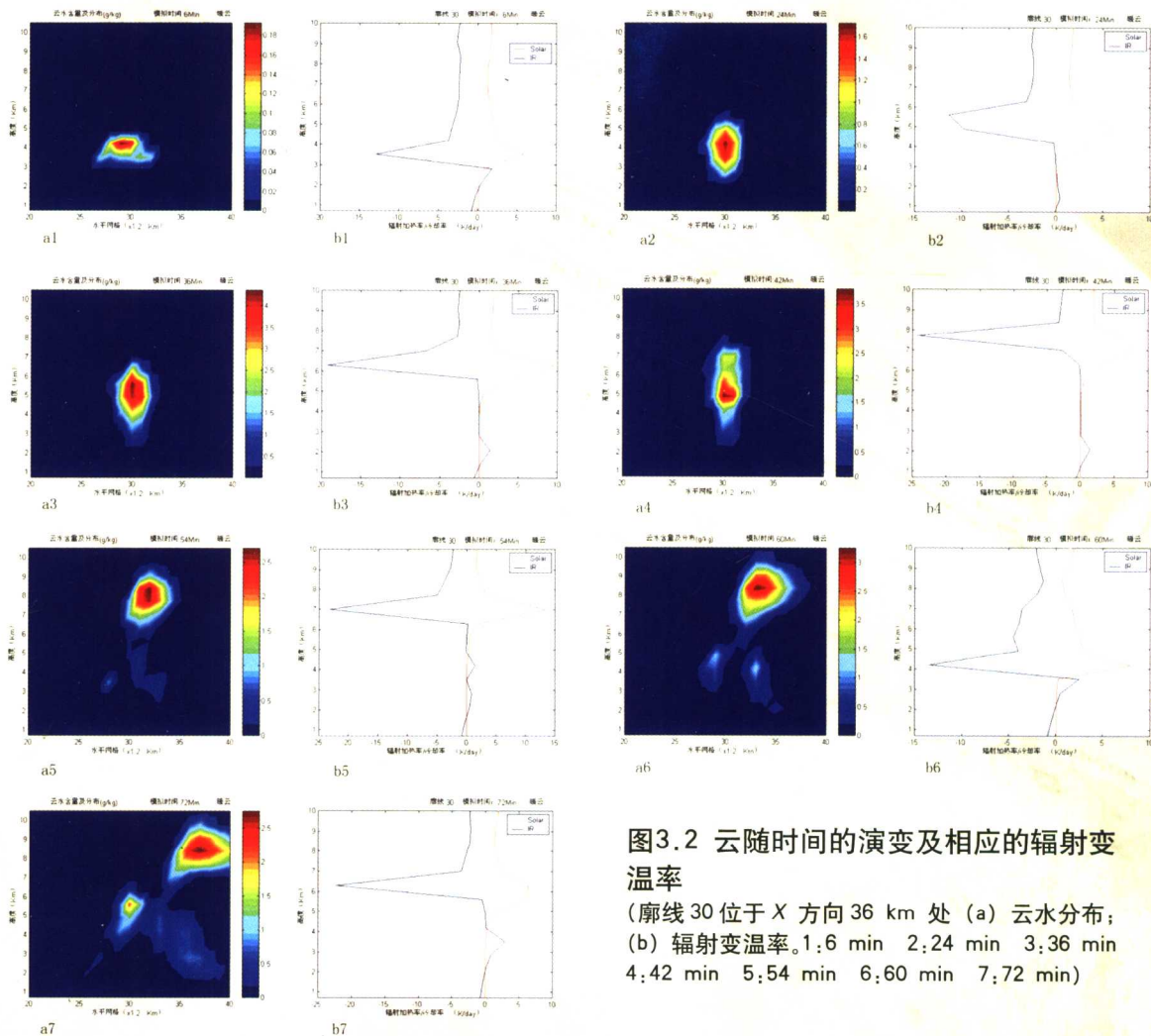


图 3.2 云随时间的演变及相应的辐射变温率

(廓线 30 位于 X 方向 36 km 处 (a) 云水分布; (b) 辐射变温率. 1:6 min 2:24 min 3:36 min 4:42 min 5:54 min 6:00 min 7:12 min)

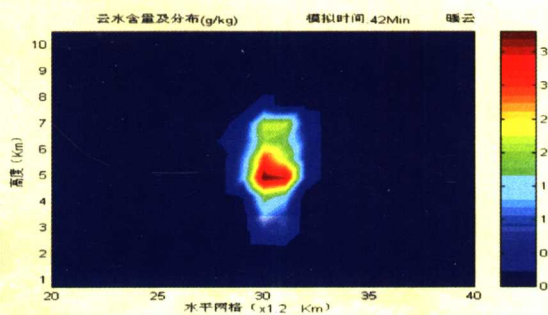


图 3.5 42 分钟的云水含量 (g/kg) 及分布

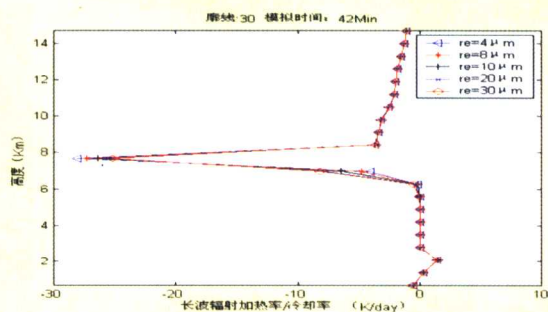


图 3.7 不同云滴有效半径的长波辐射变温率 (单位: K/d)

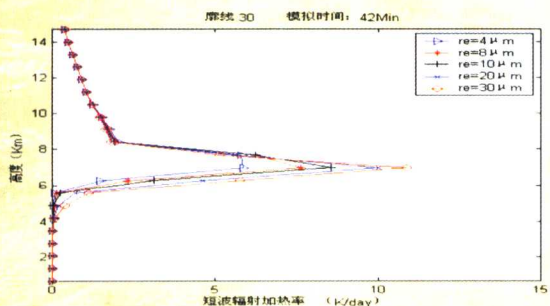


图 3.8 不同云滴有效半径的短波辐射变温率 (单位: K/d)

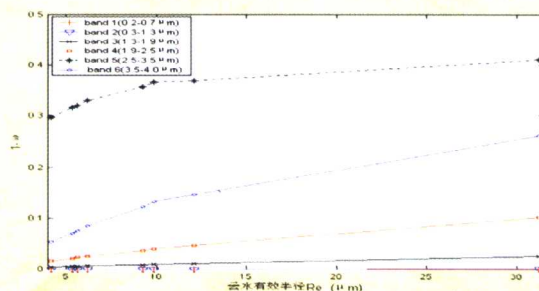


图 3.9 不同波段的短波辐射单散射反照率随有效半径的变化

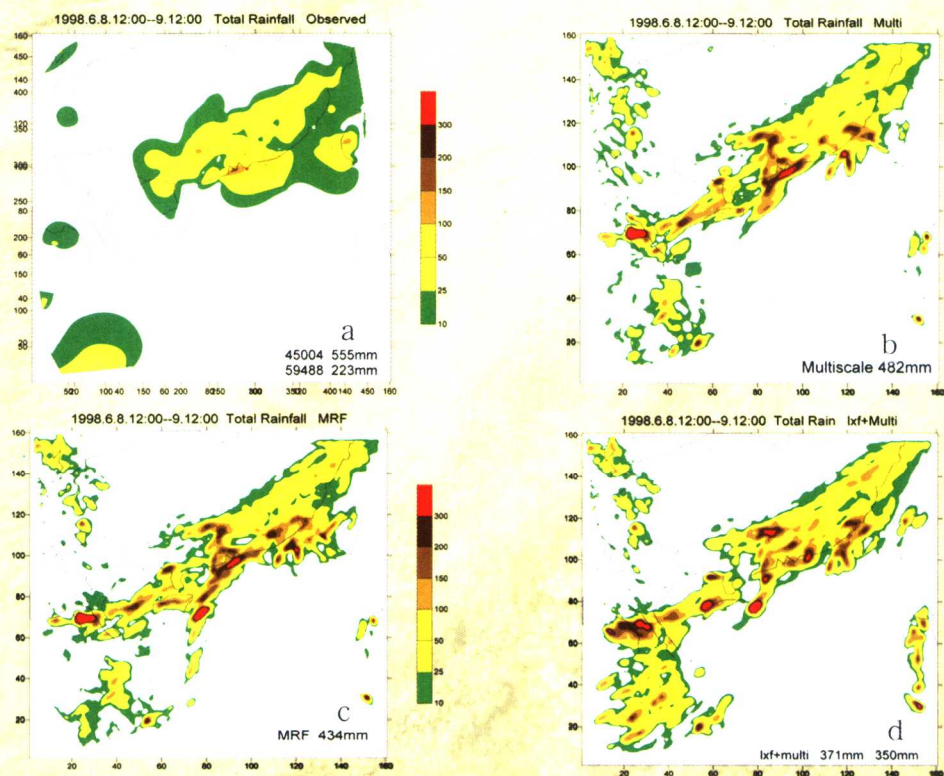
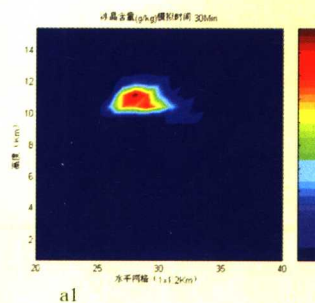
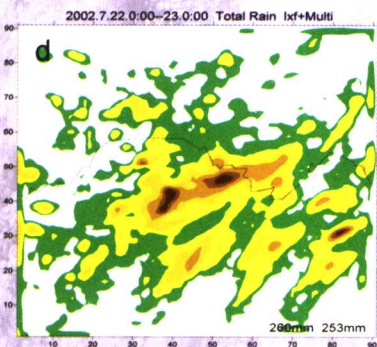
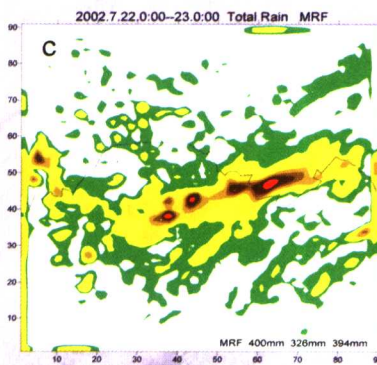
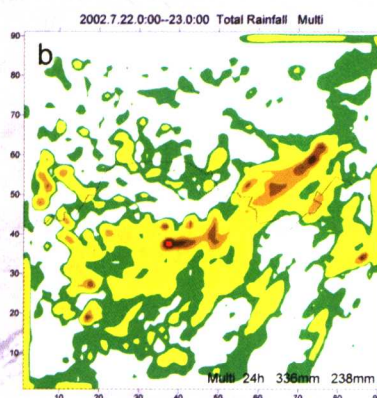
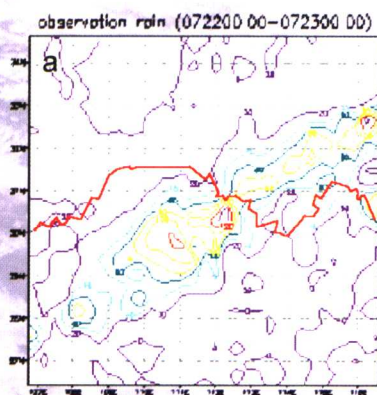
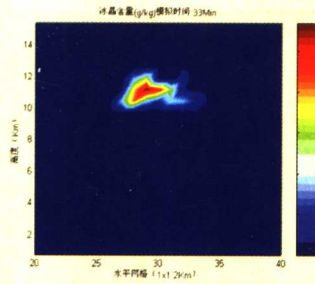


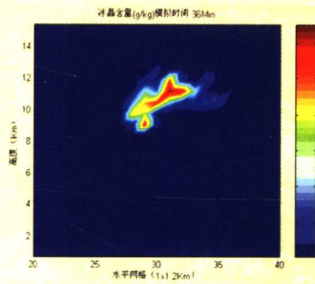
图 4.18 1998 年 6 月 8 日 12:00~9 日 12:00 总降水量
(a) 实况降水量; (b) 多尺度湍流边界层方案; (c) MRF 边界层方案;
(d) 多尺度湍流边界层方案 + 新云物理过程



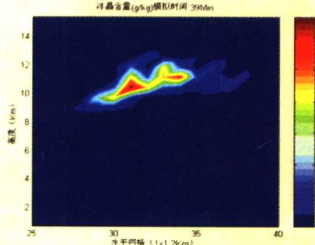
a1



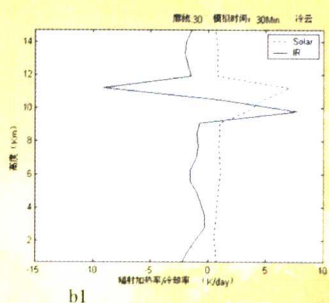
a2



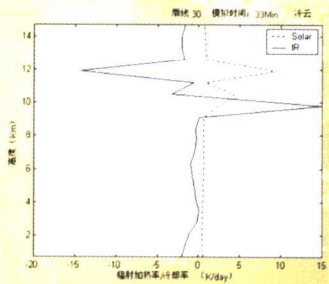
a3



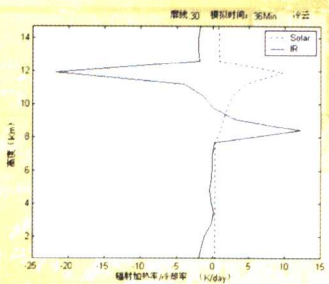
a4



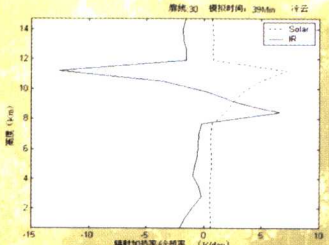
b1



b2



b3



b4

图3.14 不同时刻冰云的分布及辐射变温率
(a) 冰晶分布; (b) 辐射变温率。1:30 min 2:33 min
3:36 min 4:39 min

图4.20 2002年7月22日00:00至23日00:00 总
降水量
(a) 实况降水量; (b) 多尺度湍流边界层方案; (c) MRF 边界
层方案; (d) 多尺度湍流边界层方案+新云物理过程

研究专著系列丛书编写委员会

丛书主编：倪允琪 周秀骥

顾问：陶诗言

编委：伍荣生 陈联寿 许健民 赵思雄 陈受钧
张文建 薛纪善 刘黎平 程明虎 宇如聪

编写委员会助理：王德英 刘品 王迎 贾朋群

本书作者

陈德辉 胡志晋 徐大海 赵春生
周秀骥 楼小凤 刘奇俊 孙健
薛纪善 朱蓉 史月琴 丁守国
秦瑜

丛书主编助理：朱文妹

序

中国气象局承担的第一项“国家重点基础研究发展规划”项目(973项目)“我国重大天气灾害形成机理和预测理论研究”,在1998年立项后项目成员经过5年的努力,取得了丰硕的成果。为了将这些成果集中展现和为以后的研究及业务现代化提供重要素材,项目将主要成果集结成册,作为研究专著的系列出版物发表。应该说这是我国气象现代化建设中的一件重要的和具有历史意义的工作。在这套系列出版物中,结合项目的要求给出的许多成果,是由来自中国气象局各研究和业务机构,包括省级业务和研究机构的专家,与来自中国科学院、教育部所属单位的同行联合攻关获得的针对中国主要暴雨灾害区域长江流域梅雨锋暴雨的突破性研究和应用成果。这些成果与当前中国大气科学最新理论观点和中国气象观测、预报业务体系紧密结合,有相当一部分具有在未来气象现代化建设中“拿来就能用”的鲜明特征。这样的一批完整的基础研究类成果在以往是不多见的。这一使中国气象现代化获得巨大效益的项目,充分体现了国家科技部对此类研究项目的正确引导,体现了项目首席科学家和专家组对中国大气科学基础和应用研究方向的敏锐洞察力。我在这里对科学家们表示由衷的钦佩,对他们获得的成果表示衷心的祝贺。

在人类有意识地运用科学技术手段认识自然的不长的科学文明史中,基础科学研究有长远的根本性意义,它是一切科学技术创新的源泉。怎样将基础研究中的创新成果尽快转化为具有应用意义的技术创新,例如从大气科学乃至各种交叉学科的基础研究创新研究成果,到对各种尺度大气行为,乃至地球各圈层的作用及影响做出准确的预测,又是有强烈责任意识的中国科学家必须时时面对和思考的问题。大气科学以及再更为广泛意义上的地球环境科学,是在科学实践中推动基础研究的重要领地,我很高兴,通过这套专著,通过这个项目看到了一批大气科学领域里的科学家,在他们的前辈们努力的基础之上,正在扎扎实实地向着具有重要战略意义的领域奋勇前进。

本世纪头 20 年是我国社会、经济持续快速发展的重要历史时期,也是中国气象事业发展的重要战略机遇期,同时也面临着各种挑战。中国气象局提出的建设“四个一流”、完善“四个体系”、“实现从气象大国向气象强国的跨越,总体水平达到国际先进水平”的战略目标是鼓舞人心的,又是实事求是的。这一宏大目标催人奋进,需要调动各方面的积极性,通过艰苦努力才能得以实现。实现这些目标的重要途径之一,就是突出重大项目的带动作用。本项 973 项目的研究,其带动作用巨大,很有借鉴作用。因为项目充分体现了面向国家发展需求,进一步贴近社会经济发展和人民生活,进一步服务于解决国家可持续发展有关的重大问题的时代特征,对我们事业的发展有不可替代的推进作用。

新的历史阶段我们肩负着中国气象事业发展的历史重任,面临着难得的发展机遇和不容回避的严峻挑战。我相信参与项目的同志们会心怀更远的目标,在已有工作的基础上,更加勤奋工作,不辱我们的使命。

最后我希望这套研究专著系列丛书能对所有关注本专题的读者有重要的参考价值,对我国暴雨领域的研究水平的进一步提高、对我国暴雨的监测、预测水平的提高能起积极的推动作用。我衷心祝贺这套系列丛书的正式出版。

秦大河

中国气象局局长
中国科学院院士

国家 973“我国重大天气灾害形成机理与预测理论研究” 项目研究专著系列丛书

全卷前言

梅雨锋暴雨是我国长江中下游地区夏季汛期的主要气象灾害,由于它的持续性和突发性,往往会造成国民经济和人民生命财产的巨大损失。1998年夏季长江流域持续强暴雨引发长江流域八次洪峰,造成了国家3000多亿元人民币的经济损失和1000多的人员死亡。2003年汛期淮河流域再次遭受1991年以来最大的洪水,其原因仍然是多次梅雨锋暴雨过程引发的淮河洪水泛滥。造成这两次长江流域和淮河流域持续洪峰的主要原因是由于多发性、突发性的梅雨锋中尺度暴雨系统在1998年和2003年分别持续活跃在长江流域和淮河流域,因此,梅雨锋中尺度暴雨是我国汛期重要的天气灾害。但是,暴雨预报是十分困难的,它的难点是特大暴雨的“突发”、“多发”及其“转折”的关键时机难于捕捉,特大暴雨的落区、突发时间、强度突变及其成灾分布的估测都有很大的难度,其根本原因是:对大气环流的短时突变和强对流天气系统发生、发展的机理还不甚了解,其中包括大气内部的动力机制及其与外部环流相互作用的物理过程和热带、中纬度各种天气系统异常变化的机理,尤其是多尺度相互作用的研究还相当薄弱。以上分析清楚地表明提高对梅雨锋暴雨的监测与预测能力是目前国家迫切需要解决的重大科学技术问题,它直接影响到我国减灾防灾和国民经济与社会持续发展的综合能力的提高。为此,1999年在国家科技部的支持下,由中国气象局主持,中国气象科学研究院牵头,与中国科学院、高等学校所属十多个单位联合,组织了国内近80名暴雨研究领域中的精英,实施了我国有史以来最大的暴雨研究计划——国家重点基础研究发展规划项目“我国重大天气灾害形成机理与预测理论研究”。该项目总体来讲要实现三个科学目标:第一,初步了解梅雨锋中尺度暴雨系统及其大尺度环流异常背景的物理模型;第二,提出一套能探测中尺度系统的大气遥感理论和方法以及形成有应用前景的科研成果和遥感产品,从而提高中尺度暴雨的监测能力;第三,完成配有变分同化系统、有自主知识产权的中尺度暴雨数值预报模式系统,提高梅雨锋中尺度暴雨的预测能力。

在国家科技部的领导下,在中国气象局的大力支持下,项目全体研究人员紧紧围绕上述科学问题开展了近5年的研究工作,取得了一系列具有创新水平和应用前景的研究成果,其中包括本项目提出的梅雨锋暴雨的多尺度物理模型和取得重要进展的梅雨锋动力学研究,这些都进一步加深了对梅雨锋暴雨的多尺度结构和形成机理的认识。利用卫星遥感和多普勒雷达探测中尺度暴雨系统的理论和方法,其研究成果水平有的达到了国际先进水平,有的成果填补了国内的空白,从而为提高我国中尺度暴雨系统的探测能力提供了理论和方法基础。在提高梅雨锋暴雨预测能力上,本项目做了很大的努力,在三个方面取得了实质性的进展:第一,我们发展了具有自主知识产权的中尺度暴雨数值预报模式,并和由项目支持发展的三维变分同化系统集成成为中尺度暴雨预报模式系统,并已于2002年和2003年汛期投入试验性应用,在2003年淮河防汛中发挥了作用;第二,我们自己发展了两种目前国际上最为

先进的非静力、高分辨的新一代暴雨数值预报模式,其中一种完全建立在统一模式基础上,另一种建立在由项目科学家发展的守恒、保真计算格式所设计的动力学框架基础上,这两种新一代数值模式完全代表了中国新一代数值模式的水平;第三,我们发展了具有自己特点的云物理模式,用湍流穿越理论发展的边界层模式和二阶边界层模式以及陆面过程模式,这些物理过程数值模式都具有很强的描写云内或中尺度系统发展的物理过程的能力。同时,为了获取中尺度暴雨系统的观测资料,项目还成功地组织了 2001/2002 年的七省一市以及 2003 年的三省的暴雨野外试验,取得了宝贵的中尺度暴雨资料,规范化地建立了暴雨野外试验数据库。本项目上述近 5 年的重大研究成果都将全面地、完整地反映在本研究专著系列丛书之中。我们希望通过由本项目主要研究骨干编写的,由气象出版社出版的这套国家 973 项目研究专著系列丛书能正确、全面地反映出本项目研究成果的科学性、先进性和它的应用前景,能真正成为本项目重大成果反映的一个真实、科学而又重要的侧面。

反映本项目研究成果的研究专著系列丛书全套分为八个分卷和一个综合卷,八个分卷分别反映本项目在梅雨锋中尺度暴雨的结构和机理、致洪暴雨及成灾研究、梅雨锋动力学研究、卫星遥感反演中尺度暴雨的理论和方法、多普勒雷达反演中尺度暴雨的理论和方法、配有变分同化系统的中尺度暴雨数值模式系统的详细介绍、新一代中尺度暴雨数值模式和物理过程数值模式的研究、2001/2002 年长江中下游梅雨锋暴雨的野外试验等八个方面的内容,最后是综合卷,综述本项目的研究成果,它的创新性和应用前景。虽然全卷研究专著系列丛书反映了国家 973 有关暴雨研究项目的全部研究成果,内容丰富,基本上代表中国科学家在这个领域目前的总体研究水平和研究成果,但它并不是我国在这一领域的研究综述和评述,还有不少在这一领域中的研究成果并没有在本专著系列丛书中反映,因此,本书在全面反映我国在这个领域的研究和成果方面还存在一定的局限性。尽管如此,由于本项目集中了我国在暴雨研究领域中的主要精英,通过国家 973 项目展开了近 5 年的研究,其研究成果通过本研究专著系列丛书凝炼,因此,它仍不失为我国反映近年来暴雨研究成果的重要著作,它的出版既反映了中国气象学家近年来暴雨研究的重要成果,也为中国和其他国家研究暴雨的同行提供一套暴雨成因、监测和预测方面极有价值的参考专著。

虽然我们这套研究专著系列丛书仅用了 1 年多时间完成的,但它的确凝炼了本项目近 80 位研究人员近 5 年的辛勤劳动,我们作为该国家 973 项目的主要负责人、本系列丛书的总主编,向为本研究专著系列丛书的完成做出贡献的全体科学家和编辑人员致以万分的谢意,也向为本系列丛书做出重要贡献的陶诗言院士表示我们的敬意。最后,我们借此机会向始终全力支持我们研究工作的国家科技部和中国气象局的各级领导表示衷心感谢!

国家重点基础研究发展规划项目
《我国重大天气灾害形成机理和预测理论研究》
首席科学家 倪允琪 教授
专家组负责人 周秀骥 院士

摘 要

本书汇集了国家重点基础研究项目《我国重大天气灾害形成机理与预测理论研究》有关暴雨数值预报模式的研究成果。共分为五章,第一章介绍研制的非静力平衡、半隐式半拉格朗日的多尺度统一模式的动力学框架,以及框架稳定性和模拟精度的检验结果。第二章介绍显式的云降水模式,它包含的三种水相态的 11 个微物理参数的物理过程。第三章描述了与第二章云降水物理模式相适应的云辐射模式。第四章发展了两个新的边界层物理模式,一个是基于多尺度湍流参数化基础上的边界层模式,另一个是 2 阶矩闭合的边界层模式,以使模式整体更加逼近于对流条件下的边界层大气过程。最后一章介绍研制的动力框架与物理过程耦合后暴雨个例对比试验结果。该模式从动力框架到物理过程都是中国气象科学研究院在多年研究基础上独立研制的,初步形成了一个新的模式——称之为 CAMS 大气数值预报模式,以供进一步试验发展。

本书内容适用于大气科学、海洋科学、水文科学、环境科学和计算流体力学等专业的科技工作者和大专院校师生阅读,亦可供广大数值天气预报专业人员参考。

Study on CAMS Atmospheric Numerical Prediction Model System

*CHEN Dehui HU Zhijin XU Dahai
ZHAO Chunsheng ZHOU Xiuji et al.*

Abstract

The achievements about the rainstorm numerical forecast model of the National Key Project “Research on the formation mechanism and prediction theory of the severe synoptic disasters in China” are presented in this book. There are all five Chapters. The non-hydrostatic, semi-implicit semi-Lagrange and multi-scale unified dynamical frame of the numerical model is introduced in the first chapter. An explicit cloud precipitation model, which includes eleven micro-physical parameters about the three states of water, is introduced in the second chapter. And cloud radiation model that is adaptive to the cloud precipitation model is described in the third chapter. In the fourth chapter, two PBL models are introduced, one model is based on the multi-scale turbulence theory and the other is a second-order closure model, these two PBL models can be used to simulate the boundary layer process under the convective condition. In the last chapter, some rainstorm simulation results are presented after the dynamic core and the physical process are coupled. Based on the many years’ research, this coupled model, including the dynamic core and all physical processes, is designed independently by the scientists in CAMS, and it is named as CAMS Atmospheric Numerical, Prediction Model System——CANPS.

This book is suitable for the professionals and for the teacher/student whose research is about the atmospheric science, the oceanic science, the hydrological science, the environmental science and computational fluid mechanics, and this book can also be a reference to the numerical weather forecast professionals.

目 录

序

全卷前言

摘要

Abstract

引论 (1)

第一章 CAMS 大气数值预报模式动力框架 (5)

1.1 引言 (7)

1.2 基本方程组 (7)

1.3 模式方程线性化 (10)

1.4 时间离散方案 (13)

1.5 空间离散方案 (16)

1.6 模式变量离散化预报方程 (20)

1.7 边界条件的设置 (23)

1.8 CAMS 大气模式动力框架的理想场初步试验 (23)

参考文献 (31)

第二章 显示云降水模式 (35)

2.1 引言 (37)

2.2 CAMS 云分辨模式 (41)

2.3 CAMS 暴雨云分辨模式 (59)

2.4 CAMS 暴雨分辨模式的模拟试验 (67)

参考文献 (77)

第三章 云与辐射过程的相互作用 (79)

3.1 引言 (81)

3.2 云辐射参数化 (81)

3.3 云微物理模式与云辐射模式的耦合 (85)

3.4 积云过程对辐射传输的影响 (87)

3.5 云内辐射传输过程对对流降水过程的影响 (96)

参考文献 (103)

第四章 大气边界层参数化模式 (107)

4.1 引言 (107)

4.2 大气边界层的物理过程在气象过程中的作用 (108)

4.3 大气边界层参数化 (120)

4.4 大气边界层多尺度湍流参数化模式 (134)

4.5 大气边界层模式 2 阶矩湍流闭合模式 (145)

参考文献.....	(158)
第五章 暴雨个例的数值模拟试验	(163)
5.1 引言	(165)
5.2 三相简化云分辨模式方案个例试验	(165)
5.3 高阶矩边界层参数化方案个例试验	(170)
5.4 物理过程综合应用试验	(176)
5.5 总结	(189)
参考文献.....	(190)

Contents

Abstract

Chapter 1 Dynamic Core of the CAMS Atmospheric Numerical Prediction

Model	(5)
-------------	-------

1.1 Introduction	(7)
1.2 Basic Equation Sets	(7)
1.3 Linearization of Model Equation Sets	(10)
1.4 Temporal Discretization Scheme	(13)
1.5 Spatial Discretization Scheme	(16)
1.6 Discretized Formulations of the Model	(20)
1.7 Boundary Conditions	(23)
1.8 Idealized Tests of the Dynamic Core	(23)
References	(31)

Chapter 2 Explicit Cloud and Precipitation Scheme

2.1 Introduction	(35)
2.2 CAMS Cloud-Resolving Model	(41)
2.3 CAMS Heavy Rain Numerical Prediction Model	(59)
2.4 Simulation of the CAMS Model	(67)
References	(77)

Chapter 3 Interaction between Cloud and Radiation Process

3.1 Introduction	(79)
3.2 Parameterization Scheme of Cloud Radiation	(81)
3.3 Cloud Microphysics and of Cloud Radiation Coupled Model	(85)
3.4 Impact of the Cumulus Process on Radiation Transfer	(87)
3.5 Impact of the Radiation on Cumulus Precipitation	(96)
References	(103)

Chapter 4 Atmospheric Planetary Boundary Layer (PBL) Scheme

4.1 Introduction	(107)
4.2 Role of the PBL Physics in the Atmospheric Process	(108)
4.3 PBL Parameterization	(120)
4.4 PBL Scheme with Multi-Scale Turbulence Closure Approach	(134)
4.5 PBL Scheme with Second Order Turbulent Closure Approach	(145)
References	(158)