



国家重点基础研究发展规划项目
研究专著系列丛书之五
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

暴雨系统的多普勒雷达 反演理论和方法

程明虎 刘黎平
张沛源 崔哲虎 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五
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

暴雨系统的多普勒雷达 反演理论和方法

程明虎 刘黎平
张沛源 崔哲虎 等著

气象出版社

内 容 简 介

本专著系统地论述了多普勒雷达理论及其技术的发展,并介绍了利用单、多部多普勒雷达资料反演云内二维和三维风场结构的技术以及雷达回波强度反演降水的技术。同时本专著利用“973”外场试验的多普勒雷达资料和星载 TRMM 雷达资料针对我国梅雨锋的暴雨系统进行了较为深入的研究,揭示了一批新的事实。本专著反映了作者在雷达气象研究领域的最新研究成果。

本专著不仅可作为气象和水文以及其他相关学科科研、技术人员、大学本科和研究生的参考书,而且具有较高的科研参考价值。

图书在版编目(CIP)数据

暴雨系统的多普勒雷达反演理论和方法/程明虎等著.

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 7-5029-3869-9

I. 暴... II. 程... III. 多普勒雷达—应用—暴雨
—天气预报 IV. P457.6

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2004)第 114008 号

出版者:气象出版社 地 址:北京海淀区中关村南大街 46 号
网 址:<http://cmp.cma.gov.cn> 邮 编:100081
E-mail:qxcbs@263.net 电 话:总编室:010-68407112 发行部:010-62175925
责任编辑:俞卫平 终 审:周诗健
封面设计:北京蓝色航线企业形象策划有限公司 版式设计:吴庭芳
责任校对:石仁
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
开 本:787×1092 1/16 印 张:17.25 字 数:403 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 7-5029-3869-9/P·1368
印 数:1~1000
定 价:50.00 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

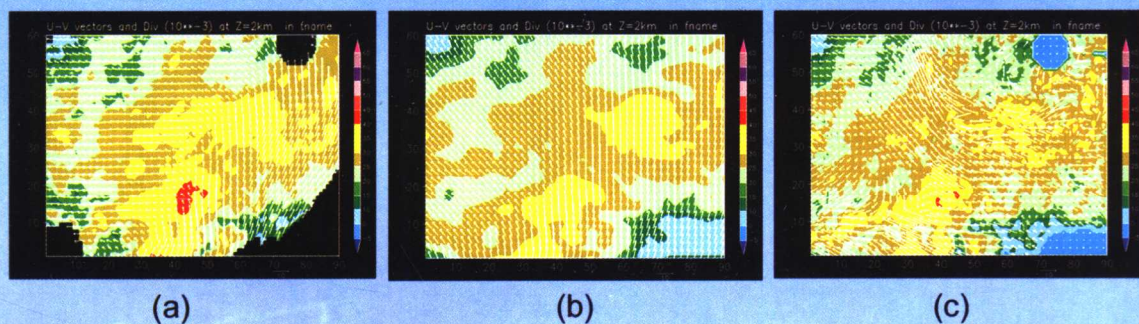


图 4.7 7月22日 11: 11 双多普勒雷达 (a)、SA (b)、VVP (c) 反演的风场
(高度 $H=2$ km)

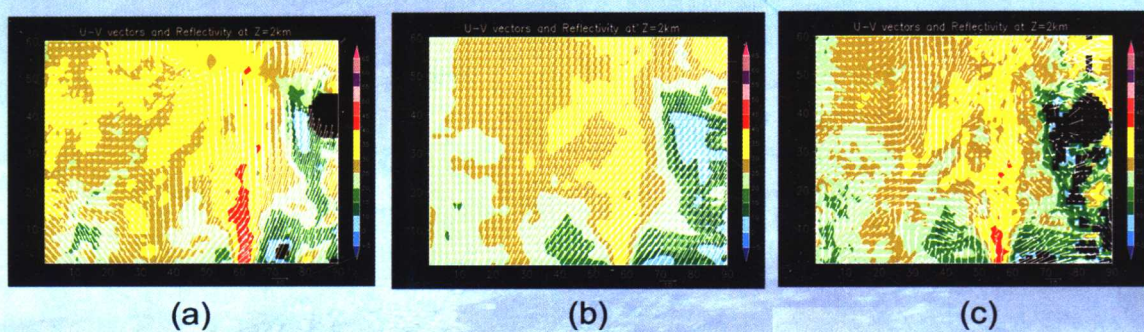


图 4.9 7月23日 03: 23 的风场对比

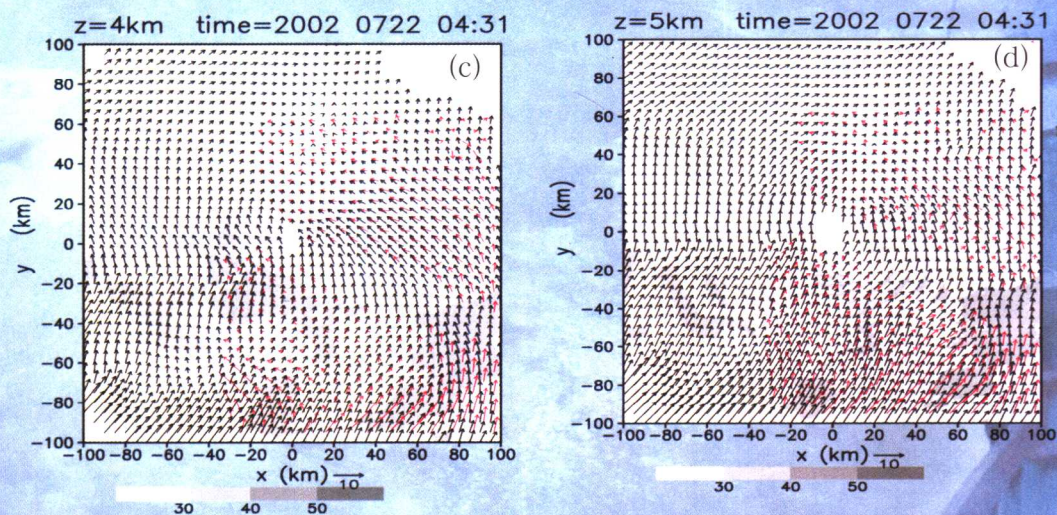
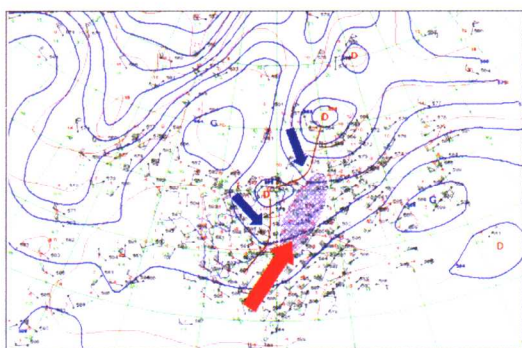
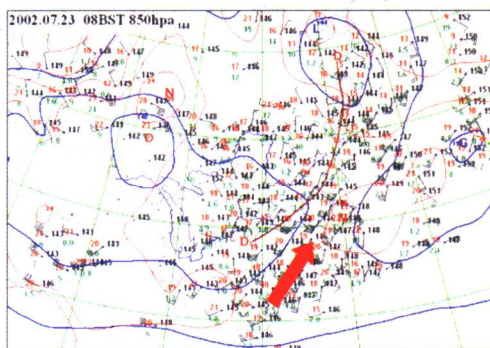


图 4.11 2002 年 7 月 22 日 12: 31 2~6 km 水平风矢量图, 雷达位于反演区域
的中心, 红色矢量风场表示双雷达的结果, 阴影是大于 30 dBz 的回波区域。
(c) $z=4$ km; (d) $z=5$ km

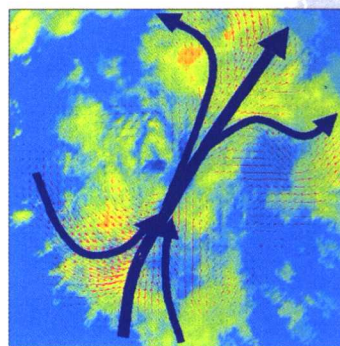
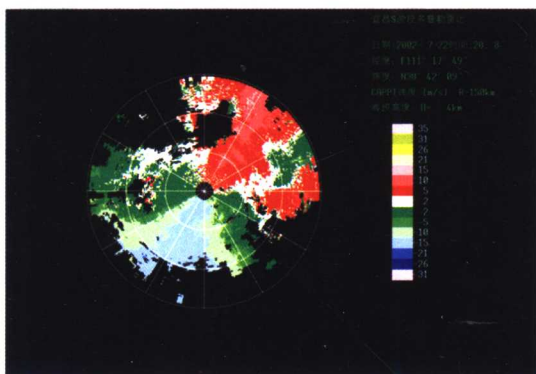


(a)



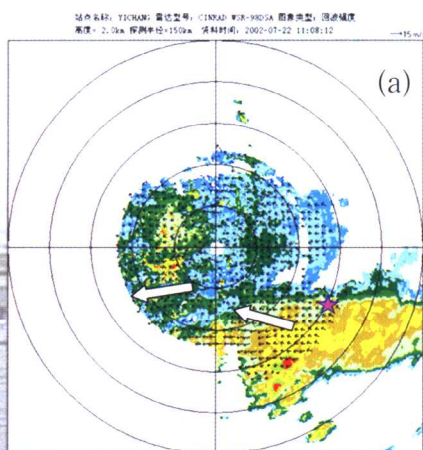
(b)

图 4.12 2002 年 7 月 23 日 08 时 500 hPa (a)及 850 hPa (b)测站风与位势高度分布

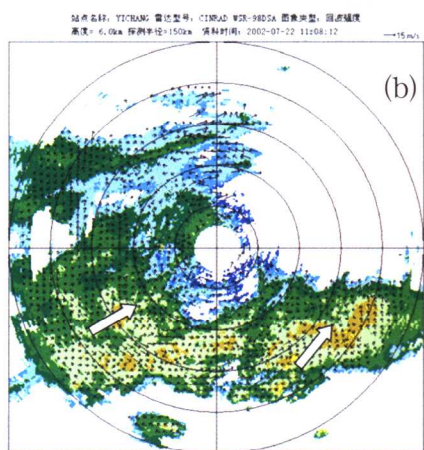


2002 年 7 月 22 日 20:08 4 km 高度水平流场

图 4.13 2002 年 7 月 22 日 08 时风场

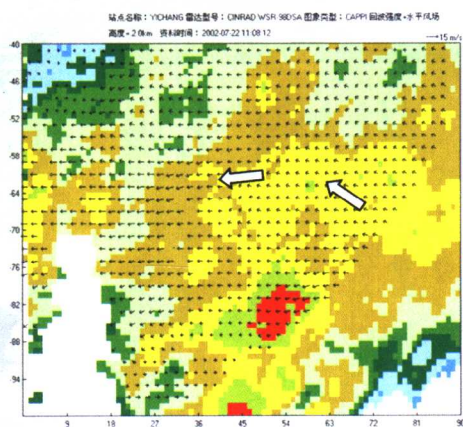


(a)

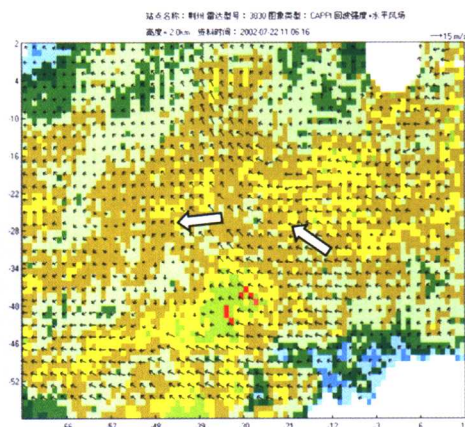


(b)

图 4.15 2002 年 7 月 22 日 11:08 宜昌雷达回波强度与经 VVP 反演后的水平速度在 $H=2$ km (a) 和 $H=6$ km (b) 高度的平面分布图



(a)



(b)

图 4.17 2002 年 7 月 22 日 11:08 分别用宜昌 (a) 雷达与荆州 (b) 雷达资料反演后的水平速度在 $H=2$ km 高度的平面分布图

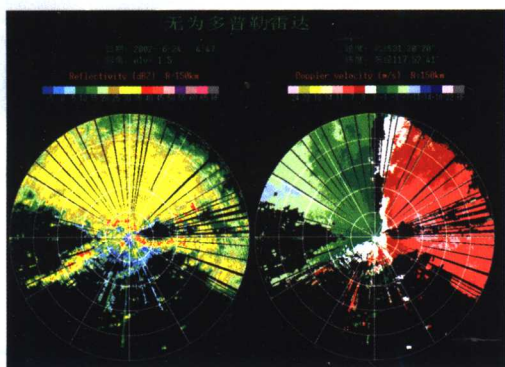


图 5.13 Doppler 雷达观测的原始资料

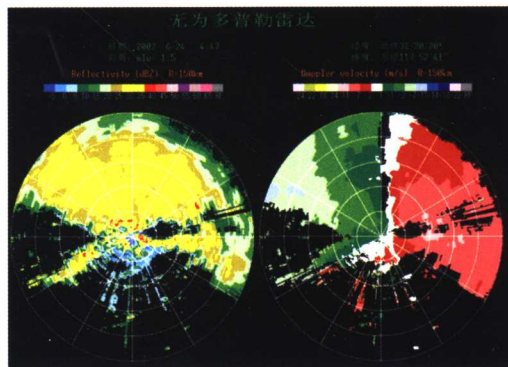


图 5.14 处理后的 Doppler 雷达资料

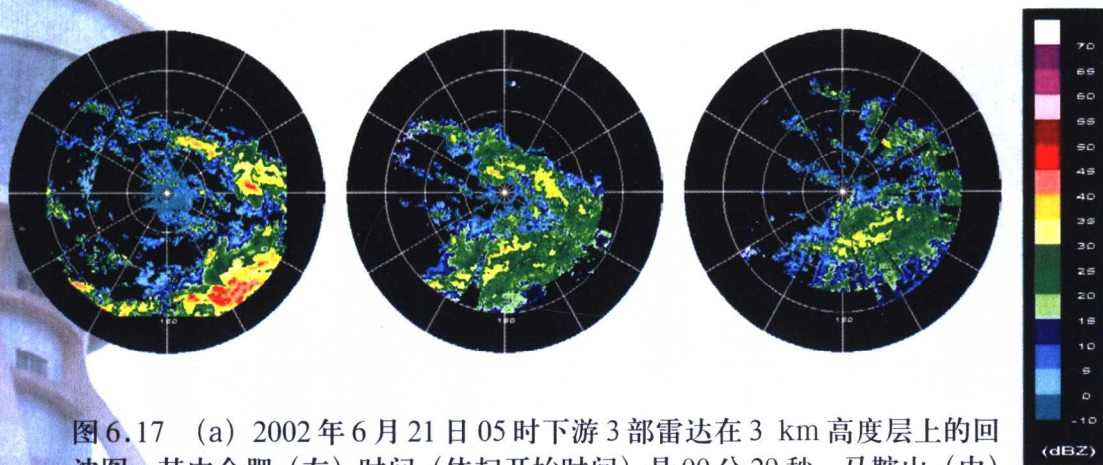
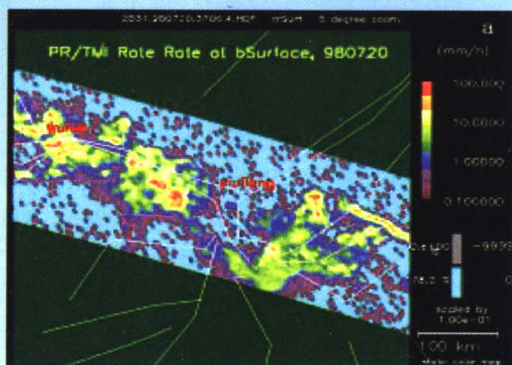


图 6.17 (a) 2002 年 6 月 21 日 05 时下游 3 部雷达在 3 km 高度层上的回波图，其中合肥 (左) 时间 (体扫开始时间) 是 00 分 29 秒，马鞍山 (中) 时间是 01 分 04 秒，无为 (右) 时间是 00 分 16 秒



(a) PR 和 TMI 联合反演的地面降水率
图 7.24 PR, VIRS, TMI 联合对武汉暴雨的观测 (1998 年 7 月 21 日 5 时 40 分)

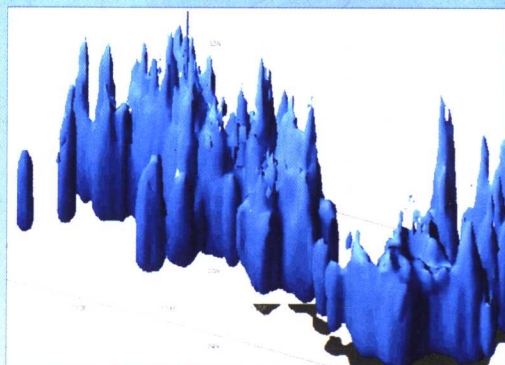
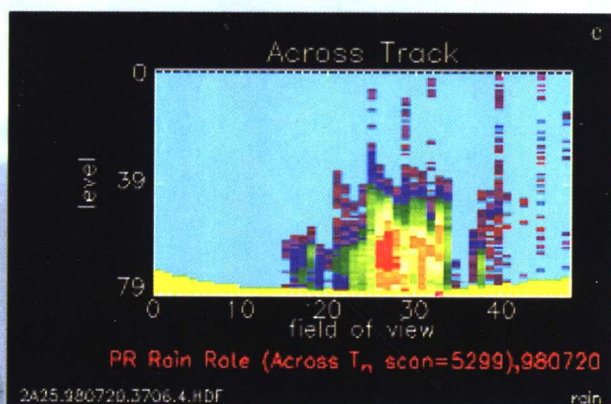
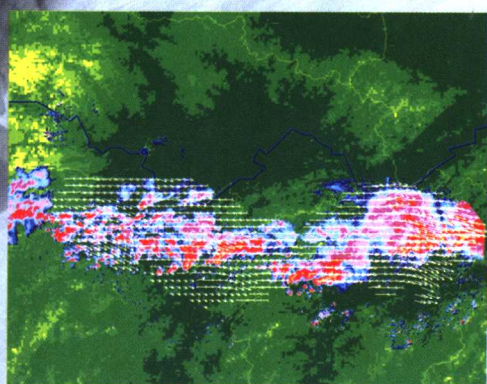


图 7.25 TRMM 卫星雷达资料反演的 1998 年 7 月 21 日 5:40 降水三维立体图其中降水阈值为 1.0 mm/h, 视角为 60°, 中心点位置为 30.3°N, 115.1°E

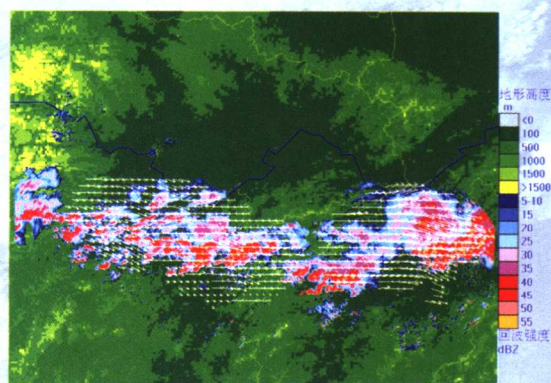


(c) 横跨轨道通过最强雨区的垂直剖面

图 7.26 PR 资料推导出的武汉暴雨 5 km 高度面水平及垂直方向降水分布



(a) 6 月 27 日 22:44 风场与回波强度



(b) 6 月 27 日 22:44 风场叠加 23:05 回波强度

图 8.11 3 km 高度风场反演拼图与回波强度拼图叠加图

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

程明虎 刘黎平 张沛源 崔哲虎 葛润生

周海光 阮征 万齐林 朱小燕 史锐

张亚萍 何会中 胡绍萍 周凤仙 倪允琪

丛书主编助理:崔哲虎

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视点和中国气象观测、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大的目标,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

本书前言

二次世界大战之后,雷达探测云雨技术逐步引入到气象部门,现已发展成为人们监测、预警及研究中小尺度灾害性天气系统的有力工具,它对于进一步提高人们对各种灾害性中小尺度天气系统的认识、监测和预警具有重大意义。统计结果表明洪涝灾害绝大多数是由于中小尺度暴雨造成的,因此如何提高对中小尺度强对流性暴雨的监测及预警能力,将对提高政府减灾和防灾的能力具有非常重要的意义。经过科研工作者几十年的不懈努力,多普勒雷达在对灾害性中小尺度天气系统的认识、监测和预警等方面有了长足进展。

本书是科技部“973”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”第四课题——“雷达遥感理论与方法研究”专题的一本研究专著。本专著系统地介绍了利用多普勒雷达资料反演云内二维和三维风场结构的技术以及利用雷达回波强度反演降水的技术,为进一步研究多普勒雷达资料在灾害性天气系统的监测和预警应用提供了坚定的理论基础和技术平台,为人们进一步提高风场及降水的反演精度提供了有利的技术支撑。同时本专著利用“973”外场试验的多普勒雷达资料,针对我国梅雨锋的暴雨系统进行了较为深入的研究,揭示了一批新的事实,首次发现了梅雨锋暴雨的多单体特征,利用双部多普勒雷达反演的风场,检验了单部多普勒雷达反演的风场。本专著涵盖了多普勒雷达理论及其技术的发展、实际应用及检验和降水反演理论及技术等研究领域。内容主要涉及长江流域梅雨锋暴雨降水反演及云内三维风场反演理论及方法研究。

本书共分九章,其主要内容如下:

第一二章对多普勒雷达的历史、现状及发展进行了简要综述,较为详细地阐述了多普勒雷达的原理。

第三章首先介绍了双多普勒雷达同步观测的方法,建立了双多普勒雷达观测资料进行回波强度、径向速度和方位定位的质量控制方法,分析了双多普勒雷达风场反演的误差,提出了利用概率分布法订正配对的双多普勒雷达回波强度的方法,并利用2001年“中国暴雨”外场试验期间获取的双多普勒雷达观测资料进行了试验。

第四章系统地介绍了几种利用单部多普勒雷达径向风资料反演二维和三维风场的技术,并利用2002年“973”外场试验的多普勒雷达观测资料进行了风场反演试验,与利用双部多普勒反演的风场进行对比的结果表明:两者反演的风场大体上是基本一致的,但是在局部上还有比较明显的差异。利用反演方法对2002年7月22~23日观测到的天气系统进行了个例分析,结果表明基本上反映了天气系统的总体特征,但是这仅仅是初步研究的结果,尚有待于进一步的研究。

第五章详细介绍了三种多普勒雷达风场反演技术、MUSCAT、共面技术和风场直接合成技术。数值试验表明,MUSCAT反演技术反演精度高,算法稳定,是一种很有推广价值的反演技术。使用MUSCAT技术对6月24日梅雨锋雨带上的一个 β 中尺度系统进行了双、三多普勒雷达三维风场对比分析,表明大气中低层辐合线是此次暴雨系统的一个重要特征;对2002年7月22~23日长江中游的积层混合性暴雨的中尺度三维动力结构进行了双多普勒雷达的两种反演算法的对比分析,表明中低层切变线是这次降水的重要特征,MUSCAT

反演算法反演精度高。

第六章简要介绍了雷达降水估测的基本原理,包括: $Z-R$ 关系法估算降水,雷达估测降水错误来源、双偏振雷达估测雨强的原理、雷达估测区域降水量和波束阻挡系数的计算。

第七章从理论方面对 TRMM(Tropical Rainfall Measuring Mission)卫星上的降水雷达(Precipitation Radar, PR)测量做了一些初步研究,分析研究了 H-B(Hitshfeld-Borden)衰减订正法和使用地表参照技术(Surface Reference Technique, SRT)方法修正后的 H-B 衰减订正法,并进一步把它们应用到 TRMM 卫星的 PR 资料降水反演中。

第八章全面阐述了新一代多普勒天气雷达站网资料基本数据的综合拼图技术,提出了雷达基本数据的质量控制、雷达站网的拼图技术、不同波段雷达资料的使用方案、风场反演结果矢量拼图以及处理结果的集成图像显示等方法,运用以上方法对 2001、2002 年“973”野外暴雨试验多普勒雷达站网资料进行了处理和初步的分析,得到了初步结果。

第九章简要分析了多普勒天气雷达资料同化、风场反演的国内外进展,并讨论了多普勒天气雷达径向风速在同化和风场反演方面的不确定问题,也讨论了雷达回波强度变化所包含的风场信息及其可用性。在此基础上,介绍一个新的雷达风场探测信息直接变分同化技术方案,该技术方案将雷达回波强度变化间接包含的风场信息转换成一个新的观测变量——雷达“视风速”,这在雷达径向风速探测的基础上进一步增加了变分同化系统可直接应用的风场信息,在较大程度上克服了由单一径向风速确定风矢量所带来的不确定性问题,并且,能够取得较好的风场同化反演效果。最后,进一步用实例分析了这个技术方案在暴雨数值预报中的应用。

第十章对全书进行了系统总结与讨论。

本书的撰写由程明虎负责。

各章撰写人员如下:

本书前言、中英文摘要、中英文目录 负责人:程明虎 参加人:崔哲虎、张沛源、周凤仙

第一章 负责人:葛润生 参加人:朱小燕

第二章 负责人:张沛源 参加人:胡绍萍

第三章 负责人:刘黎平

第四章 负责人:崔哲虎 参加人:程明虎

第五章 负责人:周海光 参加人:崔哲虎、张沛源

第六章 负责人:程明虎 参加人:史 锐、张亚萍

第七章 负责人:程明虎 参加人:何会中、崔哲虎、周凤仙

第八章 负责人:阮 征 参加人:葛润生

第九章 负责人:万齐林 参加人:倪允琪

第十章 负责人:张沛源 参加人:程明虎

摘 要

本书是国家重点基础研究发展规划(973)中的“我国重大天气灾害形成机理与预测理论研究”项目第四课题“雷达遥感理论与方法研究”中的有关天气雷达部分的研究成果总汇。其中包括单多普勒天气雷达、双多普勒天气雷达和三(部)多普勒天气雷达暴雨系统的三维风场结构反演方法研究以及多普勒天气雷达四维同化技术、星载天气雷达(TRMM/PR)资料处理技术研究和 TPMM/PR 资料在我国梅雨锋暴雨结构观测的运用研究,同时开展了区域雷达拼图试验。并利用以上各种研究成果分析了 2001~2003 年外场观测获取的新一代天气雷达观测资料。

单多普勒天气雷达风场反演技术的研究成果主要是建立了多种单多普勒天气雷达风场反演方法,其中有涡度散度法、VAP 法、VVP 法、简单共轭法、二步变分法及大气动力学方法。其中有两点特别需要提出的,第一点是基本上解决了 VVP 求解过程中出现的病态问题。解决的办法主要是改进算法。原方程有 11 个未知数,一般可列出 25 个以上方程。利用最小二乘法求解以上矛盾方程组,得到的方程组常常是病态的,给最后求解带来困难。通过研究和比较选用予优共轭梯度法求解,能较好地解决病态问题。第二点是建立了单部多普勒天气雷达三维风场二步变分反演方法。所谓二步变分反演方法是先利用变分方法反演风场,再利用薛纪善等人建立的三维变分同化系统同化,把反演数据插值到网格点上。

双/三部多普勒天气雷达风场反演技术的研究成果主要是建立了多种双多普勒天气雷达风场反演软件系统,其中有双多普勒天气雷达观测数据直接合成求解三维风场方法,共面扫描技术探测二维水平风场方法以及多部多普勒天气雷达合成和连续调整技术反演二维风场方法(MUSCAT)。MUSCAT 反演方法实际上是一种变分方法。这种方法首先是 Bousquet 和 Choug 1998 年提出的,并用了机载双波束多普勒天气雷达资料的风场反演。在他们工作的基础上,通过改进把这种方法用于地基双多普勒天气观测资料的三维风场反演。反演精度和反演的可靠性有所提高。特别需要强调的是对双/三部多普勒天气雷达风场反演的精度和可靠性进行了专门研究,提出了不少有益的见解。

雷达降水估算研究的重点是雷达估测区域降水量和雷达、雨量计联合估测降水分布。为了提高雷达估测区域降水的精度,专门开展了雷达波束阻挡系数计算方法和 C 波段雷达波束的降水衰减订正方法的研究。雷达、雨量计联合估测降水分布主要采用了平均校准法,卡尔曼滤波法、变分法和最优插值法,并对这些方法的优劣进行了评估。

TRMM/PR 是第一个星载天气雷达,我国开展对 TRMM/PR 资料处理方法研究以及 TRMM/PR 资料在我国梅雨锋结构观测和分析的应用是必要的。主要进行的研究工作有:(1)TRMM/PR 资料与地面雷达观测资料和雨量计观测资料进行对比分析。(2)由于 TRMM/PR 的波长为 2.17 cm,进行定量测量时必须进行衰减订正,因此专门进行了大气衰减订正和非均匀降水衰减订正研究。(3)用 TRMM/PR 揭示了我国梅雨锋的暴雨由 γ 中尺度和 β 中尺度系统组成。

为了保证雷达观测数据的可靠性,对获取的资料进行了质量控制处理,处理的主要内容有:退速度模糊处理,退距离模糊处理、非气象回波消除及地物遮挡区域的回波补偿。同时开

展了相邻雷达观测的强度资料进行了对比分析,这里特别需要强调的是采用两部雷达重叠观测区的回波强度值,各部雷达各自进行统计分析,然后比较统计分析结果,确定两部雷达探测数据的差异。该方法是一种创新。

为了对长江流域梅雨锋整体结构及其演变特征进行研究,充分利用新一代天气雷达网的探测功能,进行了长江流域多部新一代天气雷达观测数据的拼图工作。目前已开展的雷达拼图有雷达回波强度拼图和雷达风场反演结果的风场拼图。这二种拼图与地理信息叠加,使产品更直观。

为了把雷达资料用于数值预报,还进行了多普勒雷达资料同化研究和试验。并把中国气象科学研究院数值预报研究中心开发的三维变分同化系统用于雷达资料同化中。

Principle and Techniques of Heavy Rainfall Retrieval using Doppler Radar Data

CHENG Minghu LIU Liping ZHANG Peiyuan CUI Zhehu et al.

Abstract

This book is the collection of research results regarding the weather radar, which belongs to the sub-project No. 4 titled "Theory of Atmospheric Remote Sensing and Its Applications". The sub-project is part of key program "Mechanism and Predict Theory of Disastrous Weather over China" and is sponsored by national fundamental research and development project (973) from 1998 to 2003.

In this project, for the reliability of radar data, the data quality control is conducted. The difference of data, which were measured by two radars, was analyzed by statistical calculation of the reflectivity over the same region of two different radars. For visualization and efficient use of radar data, the radar observation mosaic technique and application were also discussed.

Several single Doppler radar retrieval wind techniques were developed in this project. They are vortex-divergence, VAP (velocity azimuth processing), VVP (Volume Velocity Processing), simple adjoint, variation by two procedure and dynamical techniques. For the dual Doppler radar wind retrieval technique, several software packages were established. One of them is the improved MUSCAT (a multiple-Doppler synthesis and continuity adjustment technique), which was presented by Bousquet and Chong (1988) for airborne radar. The estimation of precipitation is mainly concentrated on the regional rainfall estimation and the combination of rain gauge and radar data. At the same time, the beam blockage coefficients and the attenuation correction techniques for the C-band radar caused by precipitation were developed.

The PR (Precipitation Radar) techniques of the TRMM (Tropical Rainfall Measurement Mission) were also studied in this project. They are the method of H-B (Hitshfeld-Borden) attenuation correction and the modified H-B method with Surface Reference Technique (SRT). The Non-Uniform Beam Filling (NUBF) correction and their effect on PR rainfall retrieval were studied too. By using the TRMM PR data, the 3-D structure of The Meiyu front rainstorms is well understood.

In order to apply the radar data to the numerical prediction model, the research regarding the assimilation of Doppler radar data was carried out and tested in this project. The three-dimensional assimilation system developed by the Chinese Academy of Meteorological Sciences was applied to this study.