

气象雷达技术 论文集 (2005—2010)

Qixiang Leida Jishu Lunwenji
Meteorological Press Qixiang Leida Jishu Lunwenji

柴秀梅 主编

顾问 李 柏 高
张 越 高

气象雷达技术论文集

(2005—2010)

主 编 柴秀梅

副主编 吴 蕾 潘新民 杨金红

内容简介

本书主要从历年来雷达气象学委员会征集的论文中,挑选出一些具有业务使用或科学研究价值的文章,这些文章大多来自基层台站、高等院校、科研机构技术人员的手笔,涵盖了雷达新技术的应用、雷达气象学的研究进展、雷达保障技术经验交流等方面的内容,基本上反映了自1998年建站以来我国新一代天气雷达技术发展水平。

本书主要收集了雷达科学研究方面和雷达技术保障方面的文章,可供雷达台站机务保障人员进行维护维修学习用书,同时也可作为科研人员和从事天气预报人员的参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

气象雷达技术论文集(2005—2010)/柴秀梅主编. —北京:气象出版社,2011.2

ISBN 978-7-5029-5176-4

I. ①气… II. ①柴… III. ①气象雷达-文集
IV. ①TN959.4-53

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 026974 号

出版发行:气象出版社

地址:北京市海淀区中关村南大街46号

总编室:010-68407112

网址:<http://www.cmp.cma.gov.cn>

责任编辑:陈爱丽 汪勤模

封面设计:博雅思企划

印刷:北京中新伟业印刷有限公司

开本:787mm×1092mm 1/16

字数:707千字

版次:2011年12月第1版

印数:1—1000

定价:70.00元

邮政编码:100081

发行部:010-68409198

E-mail: qxcbs@cma.gov.cn

终审:章澄昌

责任技编:吴庭芳

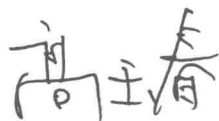
印张:28

印次:2011年12月第1次印刷

序

20 世纪 80 年代以来,多普勒天气雷达应用已成为国际上大气探测技术发展的新趋势。我国于 1998 年开始新一代天气雷达的建设工作,经过气象工作者艰苦努力,完成了全国拟建 216 部计划中的 160 多部新一代天气雷达的建设任务,形成了基本覆盖全国的新一代天气雷达监测网,不仅实现了雷达监测布网的科学、合理性和信息资源共享,而且对其探测资料进行了广泛深入研究和分析,进一步揭示了灾害性天气发生发展的机理,在预警监测中取得了明显的社会、经济效益。

2004 年 10 月,雷达气象学委员会正式成立,这标志着中国的雷达气象和气象雷达事业发展步入健康、有序、高速发展的轨道,标志着雷达新技术应用、发展及雷达系统建设将达到一个新的水平。从 2005 年起,雷达气象学委员会举办了 3 届学术年会,同时,还多次组织中国气象学会学术年会“大气探测”分会场。通过深入研讨交流,取得了丰硕的成果。本书收录的内容全部来自 2005—2010 年雷达学术年会征集的论文,基本上反映了我国雷达气象学领域研究现状和水平。内容包括新一代天气雷达维护和维修、数据质量控制、产品算法、资料反演、资料同化技术、组网拼图、以及雷达资料的处理方法等。雷达新技术有风廓线雷达、毫米波测云雷达、网络气象雷达应用等。本书中的论文思路清晰,结构合理,叙述流畅。希望本书的出版能适合我国雷达气象工作的发展需要,促进相关专业、行业之间的合作与交流,推进雷达气象学科更快发展。



2011 年 2 月

目 录

序

2010 年

- 毫米波测云雷达(HMBQ)在国内的应用研究 仲凌志 刘黎平 周秀骥等(1)
- 多普勒天气雷达资料在数值模式 ARPS 中的应用试验 张蕾 王振会 杨艳蓉(10)
- CINRAD/CD 方位伺服系统驱动电源故障分析及处理 李明元 张沪生 陈明林等(22)
- 华北平原雾 CINRAD/SA 超折射回波分析 赵瑞金 李江波(28)
- 新一代天气雷达发射机寄生频谱分析与处理方法研究 柴秀梅 李喆 潘新民等(40)
- 机载雷达探测及其资料处理仿真软件平台设计与实现 纪雷 王振会 滕煦等(46)
- 双基地双偏振多普勒雷达资料处理与风场反演 陈钟荣 吴彬 段树等(53)
- 基于 SimRAD 平台的云区雷达回波衰减订正模拟实验 赵凤环 王振会 纪雷等(61)
- 新一代天气雷达回波强度异常分析与处理方法 柴秀梅 潘新民 汤志亚等(69)
- 基于南京地区雷达资料的雷电识别指标初探 李芳 黄兴友 王振会等(77)
- 新一代天气雷达 3830 发射机功率下降原因分析 安克武 黄晓 贾木辛等(86)
- 新一代天气雷达钛泵电源调试和故障定位方法 柴秀梅 潘新民 高玉春等(92)
- CINRAD/CC 雷达伺服系统故障分析与处理方法 郑洪 柴秀梅 余加贵等(98)

2009 年

- 气象雷达组网和网络气象雷达的发展 李忱 张越 陈赢(105)
- CINRAD/SB 发射机系统故障定位方法与技巧的研究 柴秀梅 潘新民 汤志亚等(111)
- 双线偏振雷达的探测精度分析 曹俊武 方文贵 陈晓辉等(120)
- 使用风廓线雷达观测台风水平风场的垂直结构 曹小元(127)
- 利用三态极化开关实现双线偏振探测 方文贵 伍捍东 曹俊武等(136)
- 基于图像挖掘的冰雹回波研究 贾惠珍 路志英 张欢(143)
- 自动激光雨滴谱仪在雷达降水估测中的应用 晋立军(150)
- CINRAD/SB 雷达回波强度定标调校方法探讨 潘新民 柴秀梅 崔炳俭等(157)
- 相控阵天气雷达回波强度修正研究 李英华 王强 顾春平(166)
- 温州新一代天气雷达风廓线与探空风廓线的相关性研究 裴丽丝 杨诗芳(173)
- 新疆百里风区风廓线观测分析——以十三间房观测为例 王敏仲 何清 魏文寿等(184)
- 大气垂直速度的风廓线雷达探测 魏艳强(193)
- 风廓线雷达试验网数据处理及显示平台 吴蕾 高玉春 魏良秀等(201)
- 新型探测资料的二次开发及应用——以风廓线为例 杨波 魏东(214)
- CINRAD/SB 伺服无法上电两例复杂故障诊断分析方法 潘新民 柴秀梅 崔炳俭等(223)

2008 年

- 天气雷达零仰角及负仰角探测存在的问题及其解决办法 张沛源 胡绍萍(230)
- CINRAD/SB 雷达接收机技术特点及故障诊断方法 潘新民 柴秀梅 崔柄俭等(235)
- 从数据质量控制过程看新一代天气雷达业务应用中的问题 孟昭林(245)
- CINRAD/SA 和 SB 数字中频接收机工作原理及性能分析 ... 王志武 施吉生 周宽宏等(252)
- 雷达反射率因子垂直廓线和亮带自动识别研究 肖艳姣 刘黎平 李中华等(262)
- 面向业务数值预报新一代天气雷达 VAD 廓线的气压标定及同化应用 朱立娟 龚建东 陶士伟(275)
- 利用双偏振雷达 RHI 数据与温度廓线联合反演降水粒子相态 程周杰 朱亚平 刘宪勋等(282)
- CINRAD/SA 雷达发射机充电故障的分析及处理 胡东明 柴秀梅 程元慧等(289)
- 脉冲多普勒天气雷达数据质量控制之解速度模糊处理 梁华 胡文超(295)
- 不同时间尺度雷达定量测量降水的误差分析 王斌(300)
- T-TREC 方法反演我国登陆台风风场结构 王明筠 赵坤 吴丹(314)
- 基于 VAD 技术的迭代法在实测多普勒速度缺测区域的填补研究 徐芬 尹丽云 夏文梅等(323)
- 一次 CINRAD/SA 天线伺服系统疑难故障原因剖析 杨传凤 景东侠 袁希强等(333)
- 合肥雷达数据质量控制 袁松 蔡辉 边富昌等(338)
- 风廓线雷达资料在 2008 年春季透雨预报中的应用 张国华 高红霞(346)
- 新一代天气雷达测速定标精度检查方法 潘新民 柴秀梅 徐俊领等(353)
- 天气雷达天线座水平度检测方法改进研究 张维全 刘小东 李洋(364)
- 三维可视化技术在雷达三维组网中的运用 张志强 刘黎平 王红艳(369)

2006 年

- 高温超导滤波器在风廓线雷达中的应用 贾晓星 何豫生 黎红(379)
- 利用双线偏振多普勒雷达探测资料识别 0°C 层亮带的研究 ... 曹俊武 刘黎平 陈晓辉(390)
- 强降水过程的简化伴随模式新一代天气雷达资料风场反演 冯晋勤 石燕 魏鸣(397)
- CINRAD/SA 天线伺服系统轴角箱多次故障的分析及其改进 胡东明 刘强 程元慧等(402)
- 国产风廓线雷达对比试验初步分析 吴蕾 马舒庆 赵志强等(407)
- CINRAD/SA 天气雷达伺服系统特殊故障分析 周红根 周向军 祁欣等(415)

2005 年

- 新一代多普勒天气雷达监控信息平台设计 高玉春 熊毅 孙蓟旅等(422)
- CINRAD/SA 雷达超折射回波抑制技术分析与实施 刁秀广 朱君鉴 杨传凤等(429)
- 晴空回波多普勒速度图像特征与闪电演变的关系 杨国锋 汤达章 席世平等(437)

毫米波测云雷达(HMBQ)在国内的应用研究

仲凌志 刘黎平 周秀骥 葛润生

(中国气象科学研究院,灾害性天气国家重点实验室,北京 100081)

摘 要 观测云宏观信息及其辐射特性的工具一直都很缺乏。利用毫米波测云雷达连续观测大气中的云能够获得有重要意义的参数。2007 年中国气象科学研究院研发了一部应用于探测云、雾和沙尘暴垂直结构的机带式 8 mm 波长的毫米波雷达系统(HMBQ)。本文首先简单阐述了观测、研究云的重要性,介绍了毫米波雷达在观测云信息上的优势,然后重点介绍了该雷达目前的外场试验情况,以及在云属性反演和研究工作的进展,并对研究结果作了初步分析。

关键词 毫米波测云雷达 云参数 反演

1 引言

目前研究云的遥感手段主要有卫星、微波辐射计、机投探空仪以及云幕测量仪,虽然它们可以获得一定云信息,但是或者时间分辨率低,或者空间分辨率低,或者不能穿透厚云的表层探测其垂直、水平尺度以及内部结构,不能准确反映时刻变化的云参数信息。而毫米波测云雷达的工作波长主要在毫米波段,它是利用云粒子对电磁波的散射特性,通过对云的雷达回波分析云的宏微观特性。相对于厘米波雷达而言毫米波雷达对云粒子具有更灵敏的探测精度,它可以探测直径远小于雷达波长的粒子,能探测从直径为几微米的云粒子到弱降水粒子的范围,具有穿透云的能力而能描述云内部物理结构;并且可以连续监测云的垂直剖面变化,相对于红外辐射计和激光雷达,毫米波雷达可以穿过多层云,对于非降水云或者很弱的降水云衰减很小,探测结果不会失真;其次,多普勒雷达探测技术能提供粒子后向散射功率谱,该谱与粒子下落速度、质量可以表示成某一函数关系(Mitchell, 1996);另外,雷达探测得到的多普勒速度谱宽参量与有效照射体积内的粒子下落末速度以及大气扰动有很大关系,利用多普勒雷达的谱宽探测参量对研究云的动力过程有重要的意义。因此,利用毫米波测云雷达连续观测云在大气中辐射传输能够获得有重要意义的参数,这些参数包括宏观上的云厚、云高、云层数,微观上云粒子的大小、滴谱分布、冰与液态水的含量等(仲凌志等, 2009)以及可以研究云内粒子的动力过程。

本文在简单介绍我国 2007 年研发的一部 35 GHz 测云雷达系统及其外场试验情况后,介绍目前利用该 HMBQ 雷达进行外场观测、反演云属性及云内粒子运动研究的初步研究工作,主要包括:各种类型云毫米波雷达回波特征、衰减订正研究、云相态识别、云水云冰含量的经验反演和物理反演方法以及云到弱降水微物理过程的个例分析。

2 HMBQ 测云雷达简介

自 2006 年起,中国气象科学研究院研发了一部应用于探测云、雾和沙尘暴垂直结构的机
动式 8 mm 波长的毫米波雷达系统。系统由天馈、发射机、接收机与频综、信号处理、天线控
制、数据处理与显示控制以及载车及附属设备等七部分组成(刘黎平等,2009)。表 1 是
HMBQ 雷达的主要硬件参数:雷达的工作频率为 33.44 GHz,最大探测距离为 30 km,峰值功
率 600 W,脉冲宽度有 0.3 μ s、1.5 μ s、20 μ s、40 μ s 四种。该雷达主要探测参数为降水系统的
回波强度、径向速度、速度谱宽和退偏振因子。

表 1 Ka 波段多普勒/偏振毫米波测云雷达系统主要指标

天线		接收机	
天线直径	1.3 m	模式	发射水平偏振波,接收水平 和垂直偏振波
增益	50 dB	灵敏度	≤ -98.4 dBm
波束宽度	0.44°	噪声系数	≤ 5.6 dB
第一副瓣电平	< -30 dB	动态范围	70.0 dB
交叉隔离度	> 33 dB	信号处理系统	
发射机		距离库数	500
工作频率	Ka 波段(8 mm)	库长	30 m or 60 m
峰值功率	600 W	观测资料	Z_H 、 V_r 、 S_w 、 L_{dr}
脉冲宽度	0.3、1.5、20、40 μ s	处理方式	FFT、PPP
脉冲重复频率	2500、5000 Hz	FFT 点数	128、256、512
发射雷达波偏振状态	水平偏振	数字脉冲压缩性能	旁瓣 < 30 dB

3 外场试验介绍

在 973 项目“我国南方致洪暴雨监测与预测的理论和方法研究”、气象行业专项“热带西太
平洋观测试验与我国高影响天气可预报性研究”和中国气象科学研究院灾害天气国家重点实
验室的支持下,中国气象科学研究院开展了毫米波雷达在云微物理结构观测中的应用,一是检
验该毫米波雷达系统的探测能力和性能,二是积累我国不同地区各种类型云的资料。主要进
行的外场试验以及试验目的如表 2 所示。

表 2 2008—2010 年 HMBQ 测云雷达进行的外场试验

时间	地点	试验目的
2008 年 5—8 月	广东省东莞市	收集不同类型云到弱降水的过程,台风外围云系观测
2009 年 1—2 月	北京丰台区	降雪云的观测
2009 年 3 月	内蒙古海拉尔	降雪云的观测
2009 年 4 月	河北省张家口	配合人影办公室观测云到弱降水的过程
2009 年 5—8 月	广东省珠海市	联合激光雷达观测、收集云资料
2010 年 1—2 月	吉林白山	联合人工影响天气飞机观测云
2010 年 7 月	天津	配合国家卫星气象中心星载雷达项目进行机载雷达对比观测
2010 年 8 月	吉林白山	联合人工影响天气飞机观测云到降水的过程

4 研究应用介绍

本文将给出毫米波雷达观测不同类型云的回波强度图,并且对 2008 年 8 月观测的 0812 号台风(鹦鹉)外围云系进行衰减订正试验、云相态识别,选取其中的云砖卷云进行云内冰水含量的反演,得到了初步的结果。

4.1 不同类型云资料的收集

图 1 给出了测云雷达观测到的非降水性云层(图 1a、b)、层积云(图 1c)、台风外围云系(图 1d)、降雪云层(图 1e)、弱降水云层(图 1f)的雷达回波强度图。

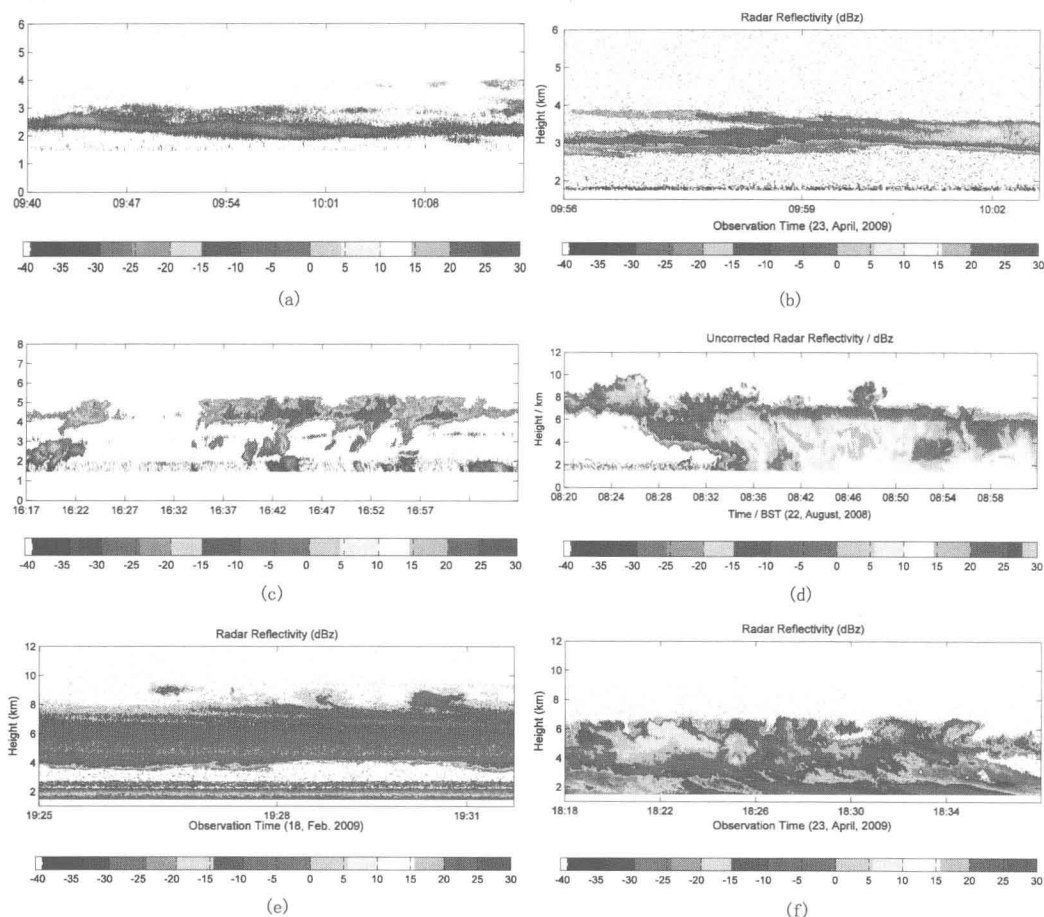


图 1 毫米波测云雷达观测得到的不同类型云反射率回波强度图(单位: dBZ)

4.2 衰减订正

所选个例是 2008 年 0812 号台风外围云系于东莞上空 08:20—09:00 的观测资料。观测期间地面有零星小雨发生。图 2a 衰减订正前的 HMBQ 雷达反射率强度图,图 2b 是衰减订正之后的 HMBQ 雷达反射率强度图,图 2c 是新一代 S 波段天气雷达观测的回波强度图,图 2d

是 HMBQ 雷达订正前后回波强度的差值图。由图 2a 可以看出,订正后,强度在 20 dBZ 的区域明显增多,这与 SA 雷达探测的结果(图 2c)比较吻合。

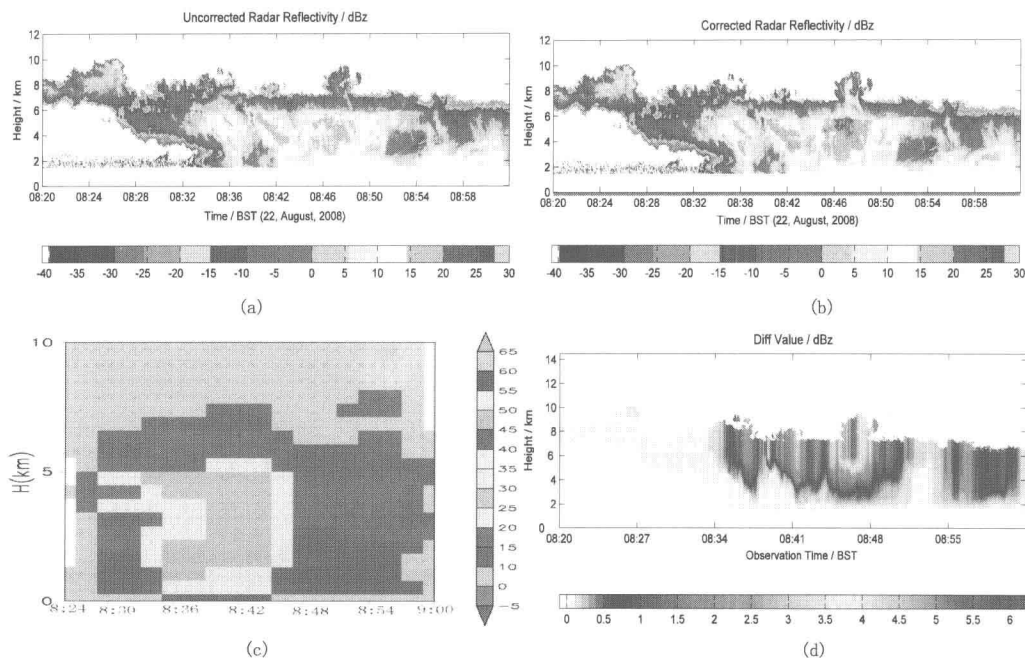


图 2 衰减订正前的 HMBQ 雷达反射率强度图(a)、衰减订正之后的 HMBQ 雷达反射率强度图(b)、新一代 S 波段雷达反射率强度图(c)、衰减订正前后雷达反射率强度差值图(d)(单位: dBZ)

4.3 云相态识别

同样是选择上述个例(图 2a 为需要研究个例的反射率强度)对应的资料进行粒子相态识别试验。这是台风外围南北取向近 300 km 长云带的北部,其强度在 $-25 \sim 23$ dBZ。从垂直结构看,该云带距离地面 6 km 高度上存在比较明显的零度层亮带,云的回波顶高约为 10 km,顶高最大强度达到 10 dBZ。该云为典型的积雨云,其内部嵌有正在发展的深对流系统。图 3 给出了本个例毫米波雷达观测得到的多普勒径向速度(图 3a)、退偏振因子(图 3b)、多普勒谱宽(图 3c)和粒子相态识别结果(图 3d)。识别方法主要是通过云内温度、雷达探测的回波强度和不同相态云的偏振特性将云分为水云、冰云和混合云(或者更细,如:小云滴、毛毛雨、雨、混合相、过冷水和冰云等),温度是云滴呈现不同相态的决定性因素之一,例如,温度小于 -40°C 时,云中只存在冰相粒子,温度大于 0°C 时,冰相粒子开始融化,所以云中多为液态粒子,而在 $-40 \sim 0^{\circ}\text{C}$ 之间,就可能有冰相和混合相以及过冷的液态水等相存在。线性退偏比 L_{dr} 与粒子的形状、形状的不规则性、热力学相态等有关。

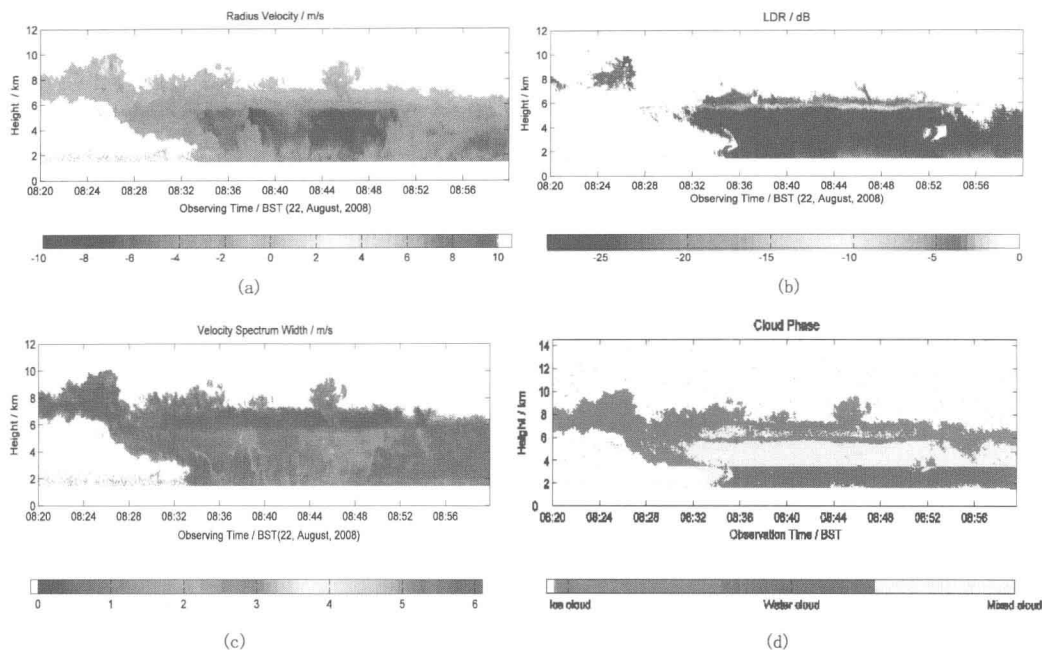


图3 HMBQ 雷达于东莞 2008 年 8 月 22 日 08:20—09:00 期间观测得到的多普勒径向速度图(a)、退偏振因子(b)、多普勒谱宽(c)、云粒子相态识别结果(d)

4.4 经验关系反演云中液态水含量

图 1a 是 2008 年 6 月 4 日上午 09:40—10:15 共 35 min 雷达观测的反射率因子强度图。云底高度在 1.8 km 左右,云层厚度约 900 m,云内粒子的平均回波强度在 -25 dBZ,最大值为 -19 dBZ,最小值为 -40 dBZ,云的顶部和底部发展均匀,符合层云的特征。在 10:00 左右,可以明显看到空中云层逐渐演变为三层,云体的平均反射率强度仍然较弱,为 -35 dBZ 左右,上层云体密度较稀。我们选择 Omar 海洋性层云的经典 $Z-L_{wc}$ 关系进行试验。由反演结果(图 4)可以看到,此次过程云内平均液态水含量在 0.1 g/m^3 ,最大值不超过 0.55 g/m^3 。

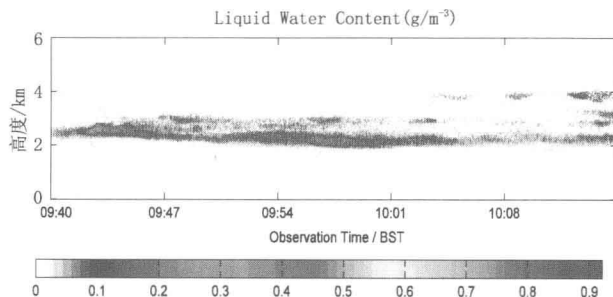


图4 2008 年 6 月 4 日上午 09:40—10:17 云内液态水含量

4.5 多普勒谱方法反演云砧卷云冰水含量

文中给出的反演结果是利用多普勒谱方法,参考已有的模式参数和统计参数建立雷达探

测得到的三个基本参量与多普勒谱密度函数之间的关系,然后通过最优估计法反演卷云微物理参数的方法,并且选择了 0812 号台风外围云系中的云砧卷云进行了反演:空气平均垂直速度、云中冰水含量以及粒子有效半径大小等微物理参数。得到了初步的研究结论:通过本方法和经验关系法分别反演的云水含量分布对比表明,本方法对本个例反演试验结果是基本合理的;云中云水含量的增大将导致相应的冰光程和光学厚度均增大,而这一现象是与粒子本身的大小有关,但是环境大气的垂直速度的变化情况与冰光程、光学厚度的变化情况,以及云层本身的厚度也有很大关系。

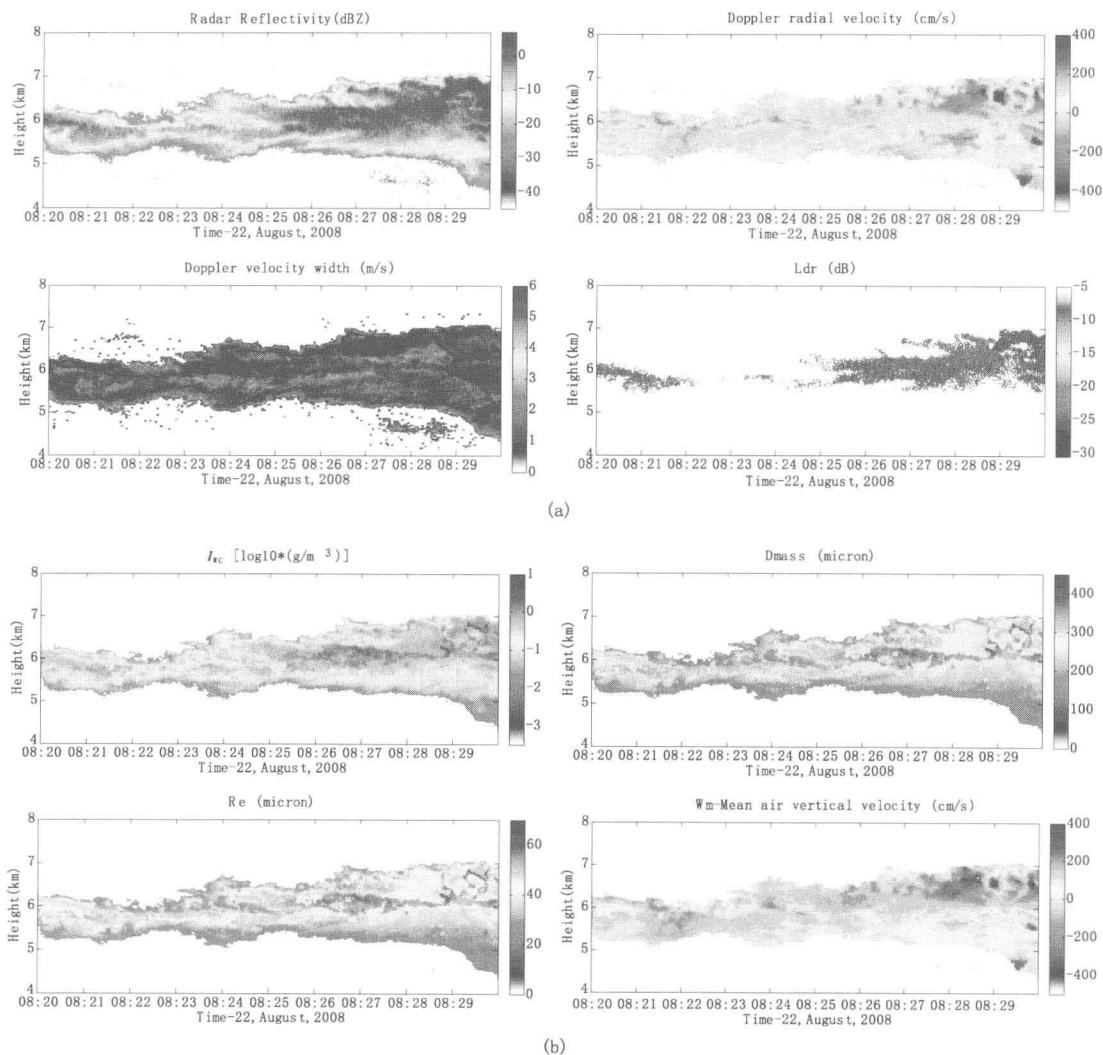


图5 (a)2008年8月22日08:20—08:30HMBQ雷达探测得到的基本参量图(反射率强度 dBZ、多普勒速度 cm/s、多普勒速度谱宽 m/s 和退偏振因子 dB), (b)利用谱方法反演得到的云微物理参数图(冰水含量 I_{wc} 、空气平均、质量直径大小 D_{mass} 、有效粒子半径 R_e 和垂直速度 W_m (设定向下为正方向))

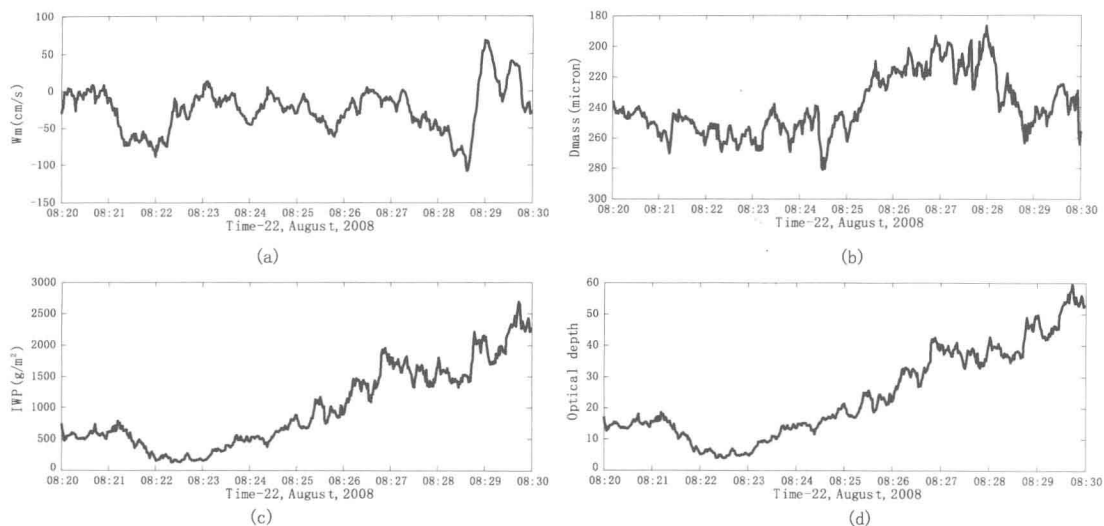


图6 2008年8月22日08:20—08:30共10 min内微物理参数随时间变化的平均廓线,(a)平均空气垂直速度 W_m 、(b)质量直径 D_{mass} 、(c)冰光程 I_{WP} 、(d)云粒子光学厚度 C_{0D}

4.6 云到降水微物理过程的研究

选择2008年0812号台风外围云系08:20—09:00期间的观测资料进行分析。

HMBQ雷达观测的反射率强度、多普勒速度、速度谱宽以及退偏振因子图见上文。为了分析这次个例的云微物理过程,选择08:38—08:48约10 min的资料进行平均垂直廓线的分析。

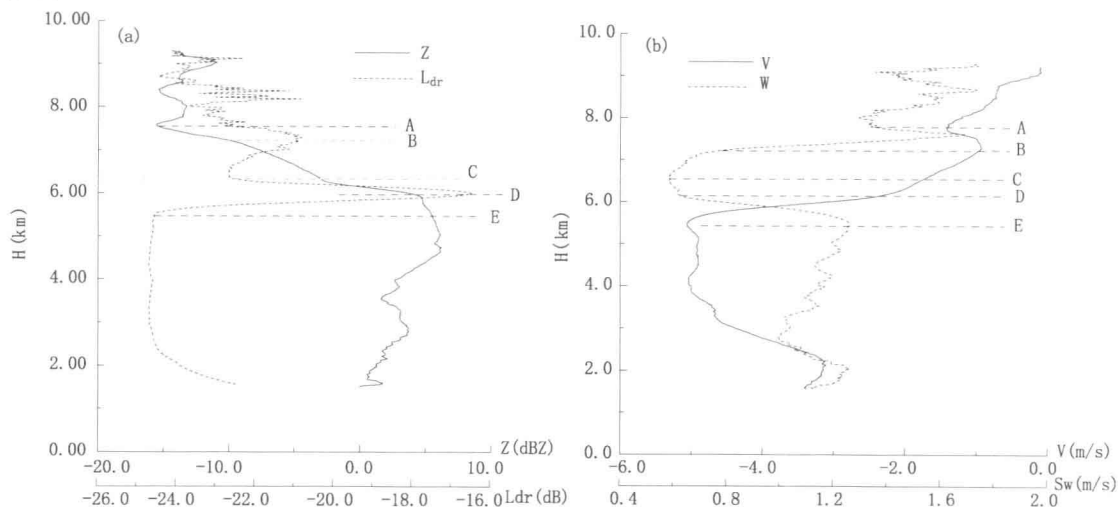


图7 2008年8月22日08:38—08:48期间的回波强度 Z (实线)和退偏振因子 L_{dr} (虚线)垂直廓线(a),及同一时间段多普勒速度 V (实线)和速度谱宽 W (虚线)垂直廓线(b)

从图7a推测该10 min内云和降水粒子变化可能分为如下几个阶段:

(1) A—B冰相粒子从7.5 km高度上开始融化,表面形成很薄的水膜或形成冰水混合相

态,但粒子的形状没有改变,因带有水薄膜的冰相粒子的后向散射能力比纯固态粒子要强得多,导致回波 L_{dr} 增大;

(2)B—C 冰相粒子进一步融化增长,形状开始变化,扁的雪花或者是各种形状的冰晶逐步向球形发展,对雷达波的后向散射继续增加,但由于粒子向球形变化,使得 L_{dr} 变小;

(3)C—D 融化的粒子可能开始进行碰并增长,形成各种形状的大偏离球形粒子,使得回波强度继续增加,而 L_{dr} 也急剧增加。

(4)D—E 大的液态和冰相混合粒子开始融化,全部形成球形粒子,使 L_{dr} 变小,但回波强度变化不大。到 E 点,冰相粒子融化完成,形成降雨。因随后的回波强度没有减小的现象,因此推测,这一过程没有形成很大的降水粒子,因为很大的降水粒子的破碎会使回波强度变小。

从图 7b 垂直速度和速度谱宽廓线资料可以看出:冰相粒子开始融化时,速度和谱宽有明显的反映,粒子的融化使下落速度和粒子间的相当运动有了变化;当粒子融化到一定程度形状开始向球形变化时,粒子的下落垂直速度开始变大;当开始碰并时,速度谱宽达到最小;当粒子进一步融化形成球形液态粒子时,谱宽急剧增大,而粒子的下落速度也增大。毫米波雷达探测到的云微物理结构变化和降水粒子下落速度的变化对应的较好。

5 小结与讨论

本文主要针对少量个例对毫米波雷达探测进行了初步探讨,在实际情况中,云到降水是非常复杂的过程;尤其是对于不同类型云,其云水含量、以及云到降水的演变等,要总结出合适的云水含量、相态识别最佳算法,以及完整的云和降水机制还需要大量的试验数据,对每种云之间的演变及云到降水过程进行长期的观测和深入分析,必要的时候,还需要配合飞机实测数据和微波辐射计等仪器进行更深入的定性和定量研究。另外,在今后的外场试验中将继续配合其他遥感手段(例如:联合激光雷达、微波辐射计、风廓线雷达等)对多种非降水云系和强对流、暴雨和台风过程的云生成和云降水转化过程进行综合观测,形成云综合探测数据集;分析和对比不同波段雷达探测云和弱降水的能力,研究多种遥感资料的质量控制 and 对比方法,形成利用多种遥感反演云和降水微物理参数和风场的方法和产品;综合反演云和降水微物理和动力中尺度结构的方法,研究不同云系的微物理结构特征、演变过程、动力和微物理过程的相互作用。通过这些研究,加深对云和降水过程的认识,为云的数值模拟和预报提供可靠的资料和信息。

致谢:感谢美国怀俄明大学大气科学系王志恩教授、邓敏老师对本研究工作的帮助;感谢所有参加毫米波探测云雷达外场试验的人员!

参考文献

- [1] Atlas, D., 1954: The estimation of cloud parameters by radar[J]. *Meteor.*, **11**, 309-317.
- [2] Austin, R. T., and G. L. Stephens, 2001: Retrieval of stratus cloud microphysical parameters using millimeter-wave radar and visible optical depth in preparation for CloudSat. 1. Algorithm for mulation [J]. *Geophys. Res.*, **106**, 28 233-28 242.
- [3] Frisch, A. S., C. W. Fairall, and J. B. Snider, 1995a: Measurement of stratus cloud and drizzle parameters in ASTEX with a Ka-band Doppler radar and a microwave radiometer[J]. *Atmos. Sci.*, **52**,

2788-2799.

- [4] Fox N I , Illingworth A J . The retrieval of stratocumulus cloud properties by ground-based cloud radar [J]. *Appl. Meteor.* 1997, **36**: 485-492.
- [5] Kropfli, B. W. Bartram, and S. Y. Matrosov, 1990: The upgraded WPL dual-polarization 8-mm-wave-length Doppler radar for microphysical and climate research[C]. *Preprints, Conf. on Cloud Physics*, San Francisco, CA, Amer. Meteor. Soc. , 341-345.
- [6] Matrosov, S. Y. , 2004: Attenuation-Based Estimates of Rainfall Rates Aloft with Vertically Pointing K_a -Band Radars[J]. *Atmos. Oceanic Technol.* , **22**,1, 43-54.
- [7] McFarlane S A , Evans K F , Ackerman A S. A Bayesian algorithm for the retrieval of liquid water cloud properties from microwave radiometer and millimeter radar data [J]. *Geophys. Res.* , 2002 , **107** ; doi : 10. 1029/ 2001JD001011.
- [8] NI Fox, AJ Illingworth : The Retrieval of Stratocumulus Cloud Properties by Ground-Based Cloud Radar[J]. 1997,*J. A. M.* , **36**,5, 485-492.
- [9] Pazmany A L , Mead Steve J B , Sekelsky M , *et al.* Multi-frequency radar estimation of cloud and precipitation properties using an artificial neural network [C] // *30th international conference on radar meteorology* , 2001:154-156.
- [10] Sassen K, Liao L. Estimation of cloud content by W-band radar [J]. *Appl. Meteor.* , 1996, **35**: 932-938.
- [11] Sauvageot, H. , and J. Omar, 1987: Radar reflectivity of cumulus clouds[J]. *Atmos. Oceanic Technol.* , **4**, 264-272.
- [12] 刘黎平,仲凌志,江源,等. 毫米波测云雷达系统及其外场试验结果初步分析[J]. *气象科技*, 2009, **37** (5): 567-571.
- [13] 仲凌志,刘黎平,葛润生. 毫米波测云雷达的特点及其研究现状与展望[J]. *地球科学进展*, 2009, **24**(4): 383-391.

多普勒天气雷达资料在 数值模式 ARPS 中的应用试验

张 蕾^{1,2} 王振会^{1,2} 杨艳蓉^{1,2,3}

(1 南京信息工程大学,气象灾害省部共建教育部重点实验室,南京 210044;

2 南京信息工程大学大气物理学院,南京 210044; 3 南京林业大学森林资源与环境学院,南京 210044)

摘 要 利用中尺度预报模式 ARPS 及其资料分析系统 ADAS 和三维变分同化系统 ARPS3DVAR,直接加入多普勒天气雷达基数据反射率因子和径向速度资料进行数值预报试验。试验包括:控制试验、反射率因子同化试验、径向速度同化试验,两种资料同时同化,多时次连续同化等试验。通过模拟 2009 年 7 月 7 日发生在江苏省附近一次暴雨过程,分析了多普勒天气雷达反射率因子和径向速度资料不同组合的加入对改进模式初始湿度场、风场及预报结果的影响。结果表明:同化雷达反射率因子和径向速度资料,分别对湿度场和风场有显著调整;同时同化两种资料比单独同化在 2 h 内更显优势;多时次连续同时同化两种资料的试验比起其他试验预报的风速更接近探空风速,预报的降水位置与雷达 3 h 累积降水产品较为对应,但降水量的预报仍有偏差。

关键词 反射率因子 径向速度 多时次 同化试验

1 引 言

数值天气预报中,初始场的好坏直接影响预报结果。传统的数值预报选用常规气象观测资料作为初始场,缺乏预报降水所必须的云的宏观和微观物理特征等信息,造成了预报起转延迟(spin-up)的问题^[1]。多普勒天气雷达不仅能提供常规观测资料无可比拟的大范围高时空分辨率的降水强度观测,而且能够提供径向速度和速度谱宽的高分辨率测量值^[2],目前国内外已有越来越多的气象工作者致力于研究如何把多普勒天气雷达径向速度和反射率因子资料应用于高分辨率的预报模式。

在多普勒雷达径向速度同化方面,Li 等^[3]使用 NOAA 的地球系统研究实验室(ESRL)研发的空间时间中尺度分析系统(STMAS)同化多普勒雷达径向速度,大大提高了观测分析正确性;闵锦忠^[4]等采用 WRF-3DVAR 系统,证明直接同化径向速度比反演水平风场同化更明显地增加了初始风场的中小尺度信息。Zhao 等^[5]使用 Xu 等^[6]的同化系统同化雷达径向速度数据,证明其对提高极端天气短时预报有很好的影响。在对多普勒雷达径向速度和反射率因子同时进行同化方面,主要研究其对强对流天气过程预报的改进,如在飓风研究中,Xiao 等^[7]和 Pu 等^[8]分别使用 WRF-3DVAR 系统同化机载多普勒雷达(ADR)资料,发现同化了

ADR 径向速度的飓风涡旋三维风场及同化反射率因子后在初始涡旋中产生的云水和雨水信息均有所增强,提高了飓风登陆强度变化的临近预警的准确性;Zhao 等^[9]利用 ARPS 3DVAR 及 ADAS 系统同化 2008 年飓风 Ike 登陆前 6 小时沿海雷达的反射率因子和径向速度,使得路径预报和强度预报都有很大提高。在暴雨等预报研究中,Sugimoto 等^[10]同化了 25 部 WSR-88D 雷达数据,发现同化雷达径向速度和反射率因子数据后对于短时降水预报有很好的效果;利用 ARPS 3DVAR 及 ADAS 系统,杨艳蓉等^[11]和协智飞等^[12]分别模拟一次暴雨过程也证明径向速度资料和反射率因子资料分别对初始风场和湿度场有显著调整;王瑾等^[13]则发现同化反射率资料在强对流风暴的模拟中起了关键作用;盛春岩等^[14]对一次暴雨过程进行了 5 种不同水平分辨率的数值模拟,其结果表明:使用雷达资料改进模式初始场,能明显改进模式 6 h 内降水强度和落区预报,比提高模式水平分辨率更为有效。David C 等^[15]用“加噪声”法通过 EnKF 技术同化多普勒雷达速度到云模式,模拟一次观测的超级单体,减少了虚假单体以及在数据同化中产生的负面影响。许小永等^[16]通过 EnKF 在云模式中同化多普勒雷达资料提高了同化分析效果。

本文利用 ARPS 模式及其资料分析系统 ADAS 和三维变分同化系统 ARPS 3DVAR,通过对 2009 年 7 月 7 日发生在江苏省附近的一次暴雨过程的模拟,分别在初始场及包括初始场在内的多个时刻加入多普勒天气雷达基数据反射率和径向速度资料进行数值试验,分析了多普勒天气雷达径向速度和反射率资料不同组合的加入对提高预报效果的作用。

2 多普勒天气雷达径向速度及反射率因子资料的同化

ARPS(The Advanced Regional Prediction System)模式是美国俄克拉何马大学风暴分析与预报中心(CAPS)开发的一个旨在研究对流和冷季风暴的三维非静力可压缩的风暴尺度数值预报模式,包括:数据处理模块,质量控制模块,预报模式,包括资料分析系统 ADAS(ARPS Data Analysis System)在内的单多普勒雷达参数反演同化系统 ARPSDAS (ARPS Data Assimilation System)——它含有 WRF 等模式没有的多普勒天气雷达资料图形坐标转换模块,以及后处理包 ARPSPLT 等部分。适用于区域尺度到微小尺度的基本大气现象的研究以及中尺度数值预报。ADAS 使用不需要进行大矩阵求解的 Bratseth 连续迭代方案^[17],结合背景场的观测信息,把观测值插入到 ARPS 网格点上。在处理雷达数据时要经过径向速度调整、微物理调整、复杂云分析,以及质量控制、增量分析更新。

2.1 径向速度同化

ADAS 结合 ARPS3DVAR 对径向速度进行调整,代价函数为^[18]:

$$J(X) = J_b + J_o + J_c$$

$$= \frac{1}{2}(X - X_b)^T B^{-1}(X - X_b) + \frac{1}{2}[H(x) - v_r^o]^T R^{-1}[H(X) - v_r^o] + J_c(X) \quad (1)$$

其中, J_b 代表分析变量 X 偏离背景场 X_b 的程度, B 为背景误差协方差矩阵, X 包括三维风速 (u, v, w) 、位温 θ 、气压 p 以及雨水混合比 q_r ; J_o 为观测项,代表模式分析的径向速度 v_r 与观测变量 v_r^o 的差异, R 为观测误差协方差, H 为观测算子。 J_b 和 J_o 是直接同化雷达径向速度目标函数的基本项。 J_c 为质量守恒约束项。计算径向速度的观测算子为: