

# 毫米波测云雷达(HMBQ)在国内的研究应用介绍

仲凌志<sup>1</sup> 刘黎平 葛润生 周秀骥

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动式8mm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

云不仅对辐射能量传输和平衡过程有重要影响，是研究气候的很重要的一个因素，而且其是水分循环系统中是一个主要环节，人工影响天气的主要对象，因此是气象业务与气象学科研究的中心问题之一。目前我们的中尺度数值模式利用模式计算得到的云分析场作为模式的初始场与其它初始场一起作为该模式的初始场，对模式进行“热启动”，从而实现用数值模式进行预报的计算。然而，用模式计算得到的云分析场的精度取决于模式中的云物理过程设计的科学与精细程度，就当前的水平而言，这与实际云内参数分布有明显差别，这会显著影响用数值模式所做的临近预报的精度。而云的实际观测资料一方面能够改善模式模拟初始场的参数，同时也可以帮助我们更好的了解云内的微物理特性；反过来，我们对云的了解越深入，越能够合理的利用模式结果研究降水天气以及预测气候变化。因此，云的观测和研究对气象研究具有重要的作用，是气象业务与气象学科研究的中心问题之一。

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

---

<sup>1</sup> 作者简介：仲凌志，女，1982- 博士 e-mail: [zlingzhi007@gmail.com](mailto:zlingzhi007@gmail.com)  
课题资助：武汉暴雨研究所开放性课题(编号：IHR2009)

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等(仲凌志等，2009)以及可以研究云内粒子的动力过程。

国外发达国家已经在毫米波观测、研究云方面积累了一定的研究成果。比较著名的观测试验有：90年代初英国中心实验室委员会(CCLRC)在Chilbolton联合天气雷达、激光雷达和微波辐射计等进行的云微物理学、天气学、中尺度动力学观测试验和雷达实验(CLARE'98)、云特征实验 I&II、CWVC(云、水汽和气候)试验，以及CLOUDMAP2试验等。2006年NASA地球系统科学探路者计划发射了一颗携带3毫米波长测云雷达的卫星Cloudsat用于从高空观测云的垂直廓线信息，它可以探测云中较小的水滴和冰晶粒子，特别是云粒子向降水转化的过程(仲凌志等，2010)。近年来，日本、加拿大也多次参与了一些国际观测计划，如SHEBA、FIRE等。这些外场试验在一定程度上改善了云资料的获取和科学问题的解决，同时发展了一些反演云属性的研究成果：其中Atlas(1954)和Sauvageot(1987)在单雷达反演方法中做出巨大的贡献；Kropfi(1990)利用一部地基35GHz雷达做过类似研究；Frisch(1995)观测了大西洋群岛上空的层云；Sassen和Liao(1996)、Fox和Illingworth(1997)也分别用单雷达总结了

经验关系。Neil(1997)利用 8 毫米地基云雷达探究了层云的云水含量和有效粒子半径大小,得出的参数关系与 Atlas 和 Sauvageot 的结果很吻合。Pazmany (2001)等使用多频雷达发展了反演液态水含量的人工神经网络算法。Vivekanandan (2001)等联合 S 波段和 Ka 波段的双波长雷达估算了液态水含量,引入了一个可直接反演的特征尺度有效粒子半径作为中间量。McFarlane (2002)等发展了一种基于 Bayes 条件概率理论的联合反演云液态水算法。Matrosov(2004)探讨了基于雷达反射率因子的估测海洋性层云含水量的方法,比较了取不同的降水云与非降水云强度界限时云内含水量的变化;Austin 和 Stephens(2004)结合数值模拟方法,发展了利用 CLOUDSAT 卫星上 94GHz 的云廓线雷达(CPR)数据反演云内液态水含量和有效云粒子半径大小的算法。

本文将在简单介绍我国于 2007 年研发的一部 35GHz 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 8mm 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 33.44GHz,最大探测距离为 30 公里,峰值功率 600 瓦,脉冲宽度有 0.3 $\mu$ s、1.5 $\mu$ s、20 $\mu$ s、40 $\mu$ 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。详细的雷达系统介绍请参考作者另外一篇文献<sup>2</sup>。

## 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

---

<sup>2</sup> 仲凌志,刘黎平,葛润生等. 2010. 毫米波测云雷达(HMBQ)的系统定标和探测能力研究. 气象学报,待发

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 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	1.3m	模式	发射水平偏振波，接收水平和垂直偏振波
增益	50dB	灵敏度	$\leq -98.4\text{dBm}$
波束宽度	$0.44^\circ$	噪声系数	$\leq 5.6\text{dB}$
第一副瓣电平	$< -30\text{dB}$	动态范围	70.0dB
交叉隔离度	$> 33\text{dB}$	信号处理系统	
发射机		距离库数	500
工作频率	Ka 波段(8mm)	库长	30m or 60 m
峰值功率	600W	观测资料	$Z_{\text{H}}, V_r, S_{\text{W}}, L_{\text{dr}}$
脉冲宽度	0.3、1.5、20、40 $\mu\text{s}$	处理方式	FFT、PPP
脉冲重复频率	2500, 5000Hz	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 $< 30\text{dB}$

表 2 2008 年-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

文章在这部分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，并且选取其中的云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

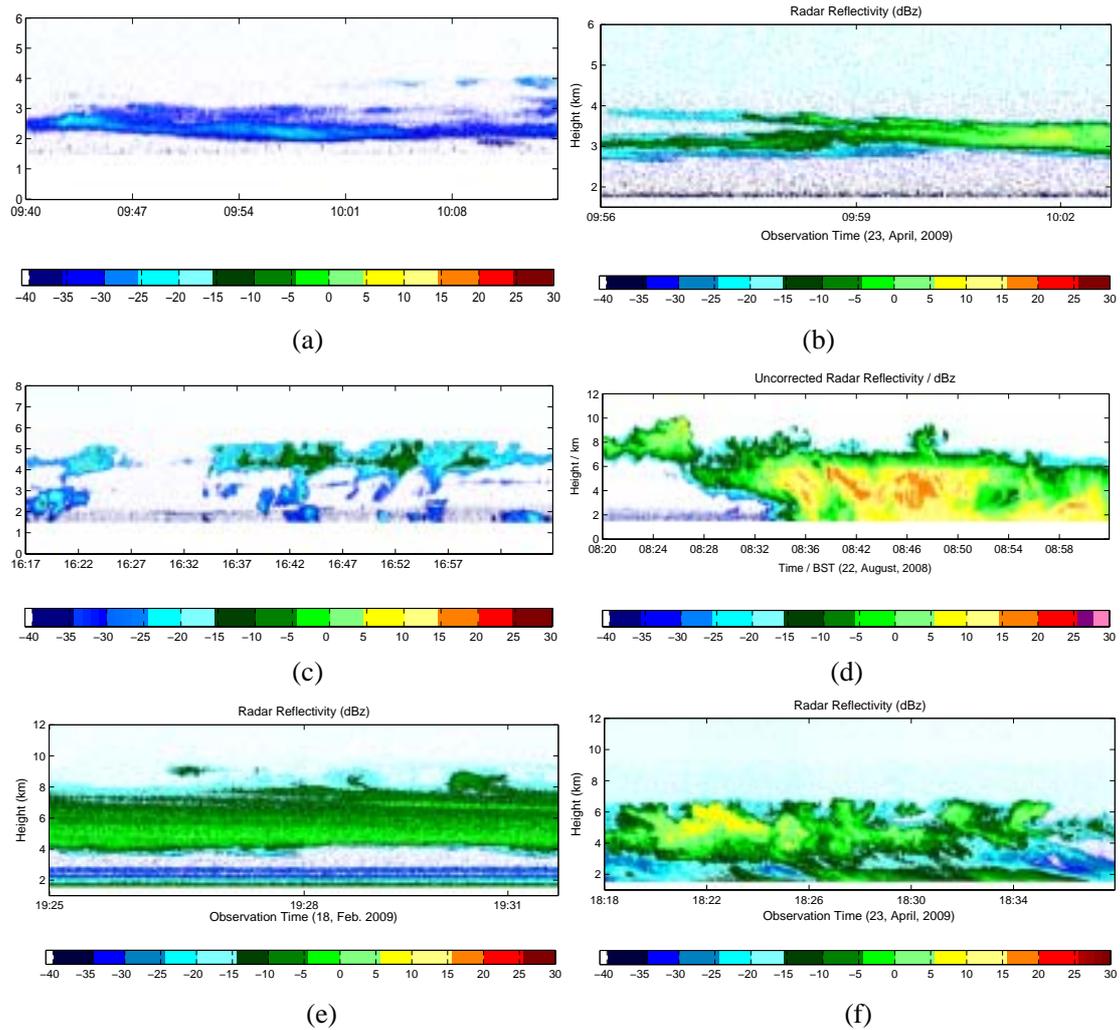


图 1 毫米波测云雷达观测得到的不同类型云的反射率回波强度图

图 1 给出了测云雷达观测得到的非降水性层云(a,b)、层积云(c)、台风外围云系(d)、降雪层云(e)、弱降水层云(f)的雷达回波强度图。

#### 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 2-(a) 衰减订正前的 HMBQ 雷达反射率强度图，图 2-(b)是衰减订正之后的 HMBQ 雷达反射率强度，图 2-(c)是新一代 S 波段天气雷达观测的回波强度，图 2-(d)是 HMBQ 雷达订正前后回波强度的差值图。由 2-(a)可以看出，订正后，强度在 20dBz 的区域明显增多，这与 SA 雷达探测的结果(图 2-c)比较吻合。

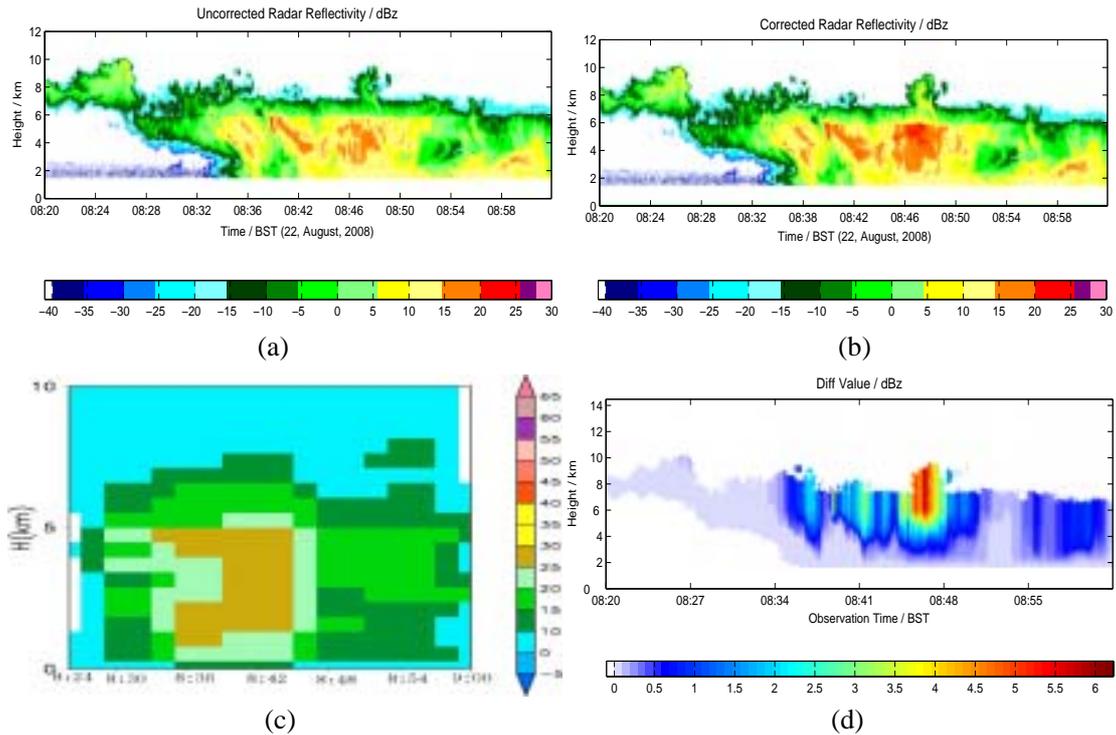


图 2 衰减订正前的 HMBQ 雷达反射率强度图(a)、衰减订正之后的 HMBQ 雷达反射率强度(b)、新一代 S 波段雷达反射率强度(c)、衰减订正前后雷达反射率强度差值图(d)

### 4.3 云相态识别

同样是选择上述个例(图 2-a 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 公里长云带的北部，其强度在-25 至 23dBz。从垂直结构看，该云带距离地面 6 公里高度上存在比较明显的零度层亮带，云的回波顶高约为 10 公里，顶高最大强度达到 10dBz。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 给出了本次个例毫米波雷达观测得到的多普勒径向速度(3-a)、退偏振因子(3-b)、多普勒谱宽(3-c)和粒子相态识别结果(3-d)。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 时，云中只存在冰相粒子，温度大于 0 时，冰相粒子开始融化，所以云中多为液态粒子，而在-40-0 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。

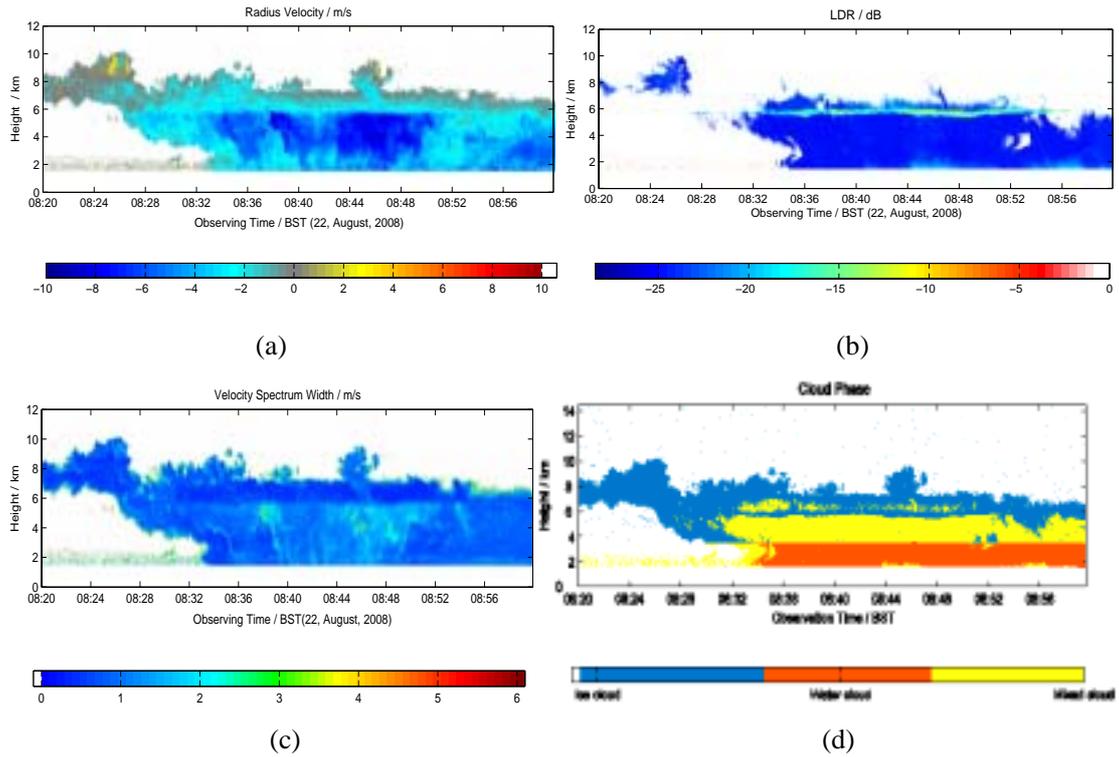


图3 HMBQ 雷达于东莞 2008 年 8 月 22 日 08:20-09:00 期间观测得到的多普勒径向速度图(a)、退偏振因子图(b)，多普勒谱宽(c)、云粒子相态识别结果(d)

### 4.3 经验关系反演云中液态水含量

图 1-(a)是 2008 年 6 月 4 日上午 09:40-10:15 共 35 分钟雷达观测的反射率因子强度图。云底高度在 1.8 公里左右，云层厚度约 900 米，云内粒子的平均回波强度在-25dBz，最大值为-19dBz,最小值为-40dBz,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-35dBz 左右，上层云体密度较稀。我们选择 Omar 海洋性层云的经典 Z-Lwc 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  $0.1\text{g/m}^3$ ，最大值不超过  $0.55\text{g/m}^3$ 。

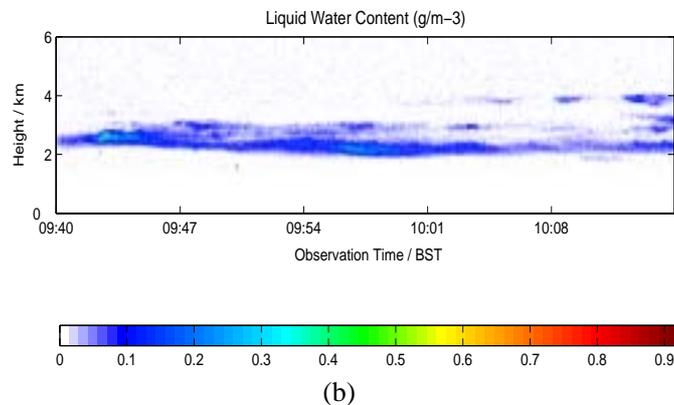


图 4 2008 年 6 月 4 日上午 09:40—10:17 云内液态水含量

### 4.4 多普勒谱方法反演云砧卷云冰水含量

雷达探测的参量：反射率强度、多普勒速度和速度谱宽均是由探测得到的多普勒谱密度函数而来；而探测得到的多普勒谱密度函数又是粒子本身运动的谱分布与空气运动卷积的结果。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还与云层本身的厚度有很大关系。

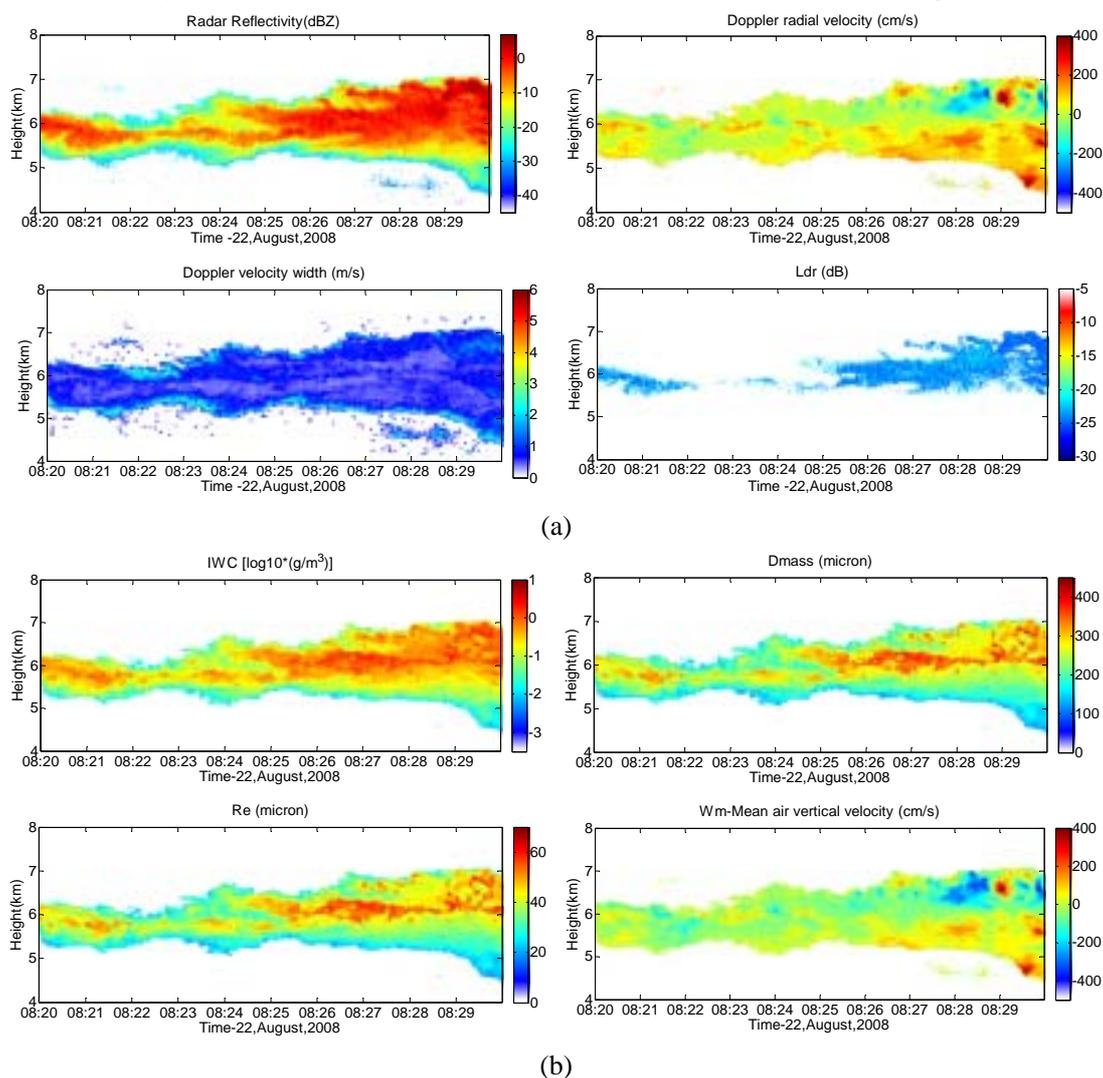


图 5 (a)2008 年 8 月 22 日 08:20-08:30HMBQ 雷达探测得到的基本参量图(反射率强度 dBZ、多普勒速度  $V_d$ 、多普勒速度谱宽  $\sigma_d$  和退偏振因子  $L_{dr}$ )，(b)利用谱方法反演得到的云微物理参数图(冰水含量 IWC、空气平均、质量直径大小 Dmass、有效粒子半径 Re 和垂直速度  $W_m$  (设定向下为正方向))

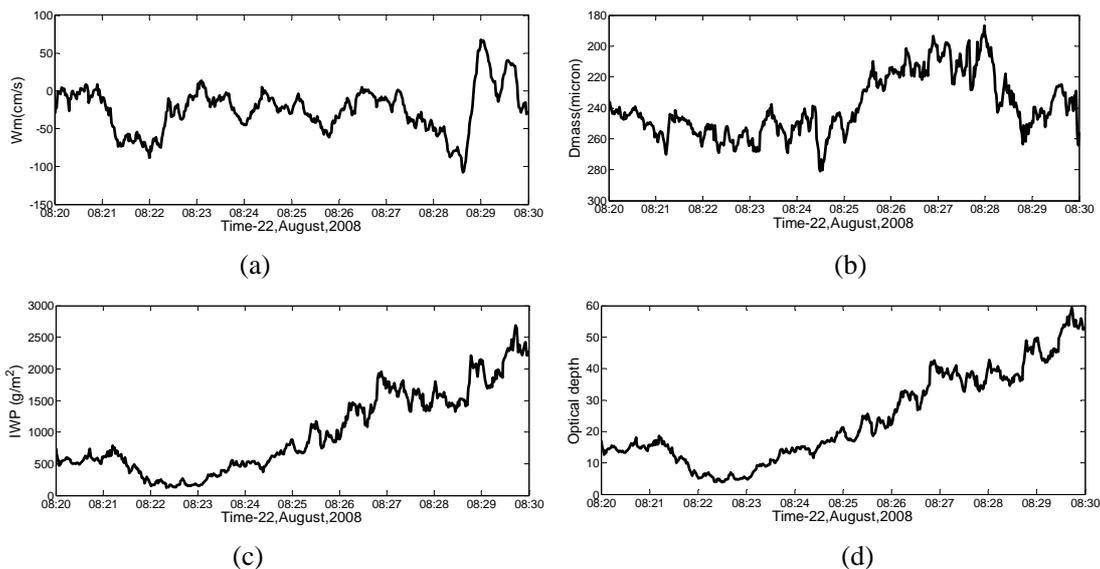


图 6 2008 年 8 月 22 日 08:20-08:30 共 10 分钟内微物理参数随时间变化的平均廓线 (a)平均空气垂直速度  $W_m$ 、(b)质量直径  $D_{mass}$ 、(c)冰光程  $IWP$ 、(d)云粒子光学厚度  $COD$

#### 4.5 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请见上文。为了分析这次个例的云微物理过程，选择 08:38-08:48 约 10 分钟的资料进行平均垂直廓线的分析。

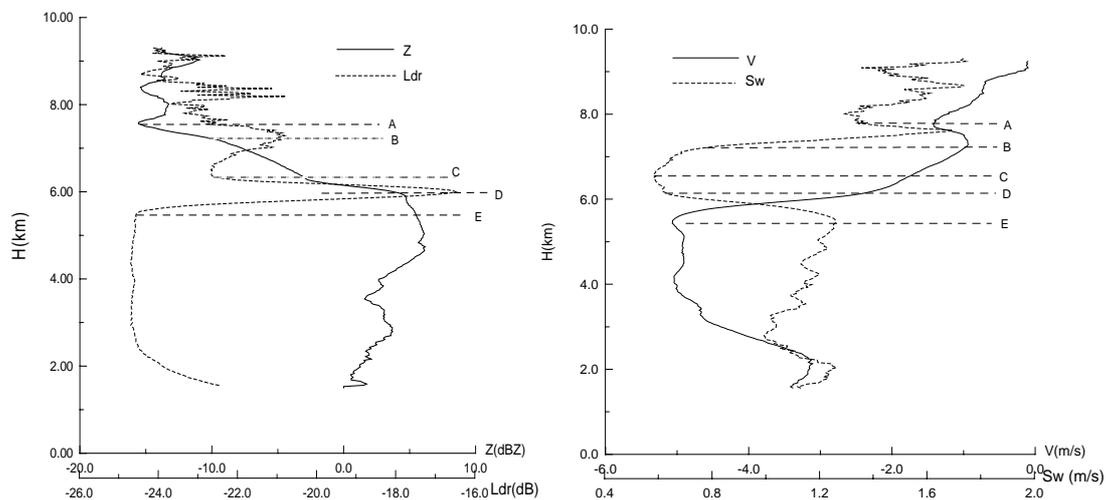


图 7 2008 年 8 月 22 日 08:38-08:48 期间的回波强度  $Z$  (实线) 和退偏振因子  $L_{dr}$  (虚线) 垂直廓线(a)和同一时间段多普勒速度  $V$  (实线) 和速度谱宽  $Sw$  (虚线) 垂直廓线(b)。

从图 7-(a)推测该 10 分钟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 7.5km 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的多，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的粒子，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 7-(b)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也了变化；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。关于毫米波雷达分析云内微物理过程的详细介绍请参考尾注文献<sup>3</sup>。

## 5 小结与讨论

本文简单阐述了观测、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，雷达于 2008-2010 年期间多次进行外场试验，为收集属于我国第一手的云观测资料、研究云微物理特性、云和降水的物理机制等工作奠定了重要的基础。随后选取 2008 年 8 月 22 日雷达于东莞观测得到的一次台风外围云系个例进行了衰减订正、云水含量反演和粒子相态势别等工作。最后分析了台风外围云系内约 10 分钟的云微物理过程和动力过程。

本文大部分研究主要针对个别个例进行了初步的探讨，在实际情况中，云

---

<sup>3</sup> 仲凌志, 刘黎平, 陈林等. 2010. 利用 8.6mm 多普勒偏振雷达探讨一次台风外围系统云到降水微物理和动力过程的个例研究. 大气科学. 待发表

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它遥感手段(比如：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和对比方法，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、邓敏老师对研究工作的帮助；感谢所有参加毫米波测云雷达外场试验的人员！

### References

- Atlas, D., 1954: The estimation of cloud parameters by radar. *J. Meteor.*, 11, 309–317.
- 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 formulation. *J. Geophys. Res.*, 106, 28 233–28 242.
- 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.
- Fox N I , Illingworth A J . The retrieval of stratocumulus cloud properties by ground2based cloud radar [J] . *J. Appl. Meteor.* 1997 , 36 : 485 - 492.
- Kropfli, B. W. Bartram, and S. Y. Matrosov, 1990: The upgraded WPL dual-polarization 8-mm-wavelength Doppler radar for microphysical and climate research. Preprints, *Conf. on Cloud Physics*, San Francisco, CA, Amer. Meteor. Soc., 341–345.
- 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.
- McFarlane S A , Evans K F , Ackerman A S. A Bayesian algorithm for the retrieval of liquid water cloud properties from mi2 crowave radiometer and millimeter radar data [J] . *J. Geophys. Res.* , 2002 , 107 : doi : 10. 1029/ 2001JD001011.
- NI Fox, AJ Illingworth : The Retrieval of Stratocumulus Cloud Properties by Ground-Based Cloud Radar. 1997,*J.A.M.* , 36,5, 485-492

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.

Sassen K, Liao L. Estimation of cloud content by W2band radar [J] . J . Appl . Meteor . , 1996 , 35 : 932 - 938

Sauvageot, H., and J. Omar, 1987: Radar reflectivity of cumulus clouds. J. Atmos. Oceanic Technol., 4, 264–272.

**附中文参考文献：**

刘黎平，仲凌志，江源等. 2009. 毫米波测云雷达系统及其外场试验结果初步分析. 气象科技, 37(5): 567-571.

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，(4): 383-391.