

星载毫米波测云雷达在研究冰雪天气形成的云物理机制方面的应用潜力^{* 1}

仲凌志^{1,2} 刘黎平¹ 陈林³ 王瑾⁴ 牟蓉⁵ 沃伟峰⁶
ZHONG Lingzhi^{1,2} LIU Liping¹ CHEN Lin³ WANG Jin⁴ MU Rong⁵ WO Weifeng⁶

1. 中国气象科学研究院灾害天气国家重点实验室,北京,100081

2. 南京信息工程大学大气物理学院,南京,210044

3. 国家卫星气象中心,北京,100081

4. 贵州省气象局,贵阳,550002

5. 重庆市气象台,重庆,401147

6. 国家气象中心,北京,100081

1. *State Key Laboratory of Severe Weather, Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081, China*

2. *Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing, 210044, China*

3. *National Satellite Meteorological Center, Beijing 100081, China*

4. *Guizhou Meteorological Office, Guiyang 550002, China*

5. *Chongqing Meteorological Administration, Chongqing 401147, China*

6. *National Meteorological Center, Beijing 100081, China*

2008-07-04 收稿,2008-10-27 改回.

Zhong Lingzhi, Liu Liping, Chen Lin, Wang Jin, Mu Rong, Wo Weifeng. 2010. A potential application of a millimeter-wavelength radar to studying the cloud physics mechanism for ice and snow weather. *Acta Meteorologica Sinica*, 68(5):705-716

Abstract Freezing rain/heavy snowfall processes occurred in the southern part of China from 10 January to 2 February 2008, which is featured with a broad spatial scale, long duration and strong intensity. The observational ability and attenuation characteristics of a millimeter-wavelength radar are introduced in this article. The cloud profile radar (CPR) data on CLOUDSAT were used to analyse the freezing rain/heavy snowfall processes to explore their cloud physics mechanism in Hunan Province and Guizhou Province. The results show that: (1) the millimeter-wavelength radar could observe the fine horizontal and vertical structures of cloud systems, and distinguish the melting process of cloud; (2) cloud phase transition within the freezing rain/heavy snowfall processes in Hunan during January is along the direction of “snow-rain-supercooled rain”, while in Guizhou during February is along “supercooled cloud-supercooled rain”. Both of the intensity and thickness of zero temperature melting layer as well as the surface temperature are key factors to the freezing rain to form; and (3) the millimeter-wavelength radar shows a great potential in helping us to study the ice and snow weather. Combining the cloud radar with the other remote sensing techniques will make significant contribution not only to weather mechanism investigations and cloud physics but also to climate change and weather modification.

Key words Millimeter-wavelength, Radar, CloudSat, Freezing rain, Mechanism, Zero temperature layer bright-band

摘要 从2008年1月10日起,受强冷空气和暖湿气流共同影响,中国南方大部分地区遭遇1954年以来罕见的冰冻天气,此次天气过程持续时间长、冰冻范围广、受灾程度重。文中简要介绍了毫米波雷达的探测特点及衰减特性;重点利用CloudSat卫星上搭载的3 mm波长云廓线毫米波雷达(CPR)的探测结果分析了1月28日、2月10日南方冰雪天气形成的云物理机制,

* 资助课题:国家自然科学基金项目“毫米波多普勒偏振雷达探测云能力和反演云参数方法的初步研究”。

作者简介:仲凌志,主要从事雷达气象学研究。E-mail:zlingzhi007@gmail.com

并且与 C 波段测雨雷达探测结果对比;结果表明:(1)毫米波雷达具有高空间分辨率,能够清楚地反映云的垂直和水平结构,且清晰地反映云中 0℃层融化带的垂直特征。(2)1月28日湖南冻雨、2月10日贵州冻雨分别是“冰雪-雨-过冷雨”和“过冷云-过冷雨”两种典型的云物理机制,云内 0℃层融化带的强度和厚度与近地面温度的高低是能否形成冻雨天气的关键因素。(3)毫米波雷达在冰冻天气研究中有很大的应用潜力;充分将毫米波雷达与天气测雨雷达以及其他遥感手段结合,可以取长补短、相得益彰。发展毫米波探测技术将对研究各种天气形成的微观物理机制、云物理的发展、气候变化的研究及人工影响天气等工作均有重要意义。

关键词 毫米波雷达, CloudSat 卫星, 零度层亮带, 冻雨, 云物理机制

中图法分类号 P412.25

1 引言

2008年1月中下旬,长江中下游到南岭出现长时间、大面积、高强度的降雪和冻雨等灾害天气,造成输电线路结冰和输电高压铁塔倒塌大范围断电事故,公路、铁路和民航严重受阻,城市生活基本设施(水、电、路)受到严重影响,民房和农田蔬菜大棚被积雪压垮。因此,对冰冻天气的形成机理、监测和预测显得迫在眉睫。在天气预报和云物理规律的研究中,必须了解和考虑云的有关参数,如云量、云类等。特别是云中含水量三维分布的定量测量,在云-辐射相互作用、人工影响天气以及空基微波遥感等问题的研究中均有重要意义。

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,虽然它们可以获得云信息,但是时空分辨率较低,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。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来了解云的各种特性,云的回波参数反映了云的宏观和微观结构。例如回波顶的高度、回波的体积、面积等反映了云的特征尺度,回波强度反映了云中粒子的大小和浓度,回波强度在时间和空间上的变化反映了云内微物理过程的结构和演变特征。毫米波雷达在气象探测上具有以下特性:(1)对小粒子(如云、雾和沙尘暴)具有较强的探测能力;(2)多普勒效应明显,具有较好的多普勒速度的分辨力,测速精度较高;(3)可以在小的天线孔径下得到窄波束,方向性好,有极高的空间分辨力。因此,毫米波雷达除能够连续观测云厚、云高、云量等宏观参数外,还可以获得云内微物理参量,例如:云粒子的大小、浓度、滴谱分布、冰与液态水的含量等。这些参数为云的气候效应研究、云物理、人工影响天气、数值模拟等研究提供重要的基础性数据。

国际上 20 世纪 50 年代开始发展毫米波雷达,美国、日本、德国和英国不同程度地相继发展了自己的毫米波探测系统。Pasqualucci(1984)和 Pazmany(1994)在气象毫米波的硬件及理论发展中作出了巨大的贡献。Haper(1966)、Hobbs 等(1985)、Clothiaux 等(1994)重点用毫米波雷达研究了云顶、云底高度,并且与卫星探测结果进行对比,认为在云层数较多、大气温度和湿度较高时,毫米波雷达会受到衰减影响在高处失真,得出的云顶高度比卫星探测高度低;Wang 等(2001)结合激光雷达研究了云相态识别方法;Mace 等(2003)发展了一套适合 CloudSat 星载毫米波雷达研究云类型算法。除了对云宏观特性的研究,在云微观物理特性方面也有一定研究成果,例如:Atlas(1954)、Sauvageot 等(1987)、Matrosov(2004)用地基毫米波雷达研究云内液水含量;White 等(1996)研究海洋性大气边界层的特征;Woods 等(2007)和 L'Ecuyer(2007)研究下雪天气里云粒子的微物理特性,探讨了雷达反射率与降雪强度的关系。中国 20 世纪 80 年代开始重点发展军用毫米波雷达,魏重(1985)利用毫米波雷达进行云的观测,将天气雷达和毫米波雷达观测云和降水结构的理论和观测比较,由于当时硬件技术的局限性,雷达探测能力受到较大影响,但是仍然可以看到毫米波雷达对于云内部结构的观测能力优于天气测雨雷达。

本文简要介绍了毫米波雷达的探测特点及衰减特性;重点介绍了 CloudSat 卫星上的云廓线雷达;并且利用它对中国南方 2008 年 1 月 28 日和 2 月 10 日 2 次冰雪天气进行分析,总结了湖南和贵州冻雨的云物理形成机制;同时选取贵阳 C 波段天气测雨雷达探测资料进行对比,进一步说明了毫米波雷达探测的优点及局限性,探讨了毫米波雷达在冰雪天气研究中的应用潜力。

2 CloudSat 星载毫米波雷达

2.1 星载云廓线雷达 CPR

CloudSat 是 1999 年 NASA 地球系统科学探路者(Earth System Science Pathfinder,ESSP)卫星计划中的一颗卫星。是第一个搭载了云廓线雷达(Cloud Profiling Radar,CPR)的卫星。它与另外 4 颗卫星 CALIPSO、Aqua、PARASOL、Aura 组成的卫星系列被形象地称之为 A-Train 星座(图 1a)。

星座中的每颗卫星都是太阳同步卫星,过赤道时间为当地太阳时 13 时 30 分前后。A-Train 系列

卫星编队运行的好处是使各卫星所探测的资料可以尽量保持同步。一般,不同形状、尺寸和组成的悬浮粒子不仅可通过反射或者吸收太阳光、冷却或者加热大气层对气候产生影响,而且能改变云的寿命和雨量的大小,甚至能使表面发生化学反应而影响大气的组成,因此了解垂直高度上悬浮粒子的分布和云层的信息非常重要。A-Train 星座中各个卫星均有特别的测量功能,并且互为补充,可近同时测量全球不同季节的悬浮粒子、云层、温度、相对湿度和辐射流等,以显示环境条件变动时大范围悬浮粒子和云特性的响应变化。

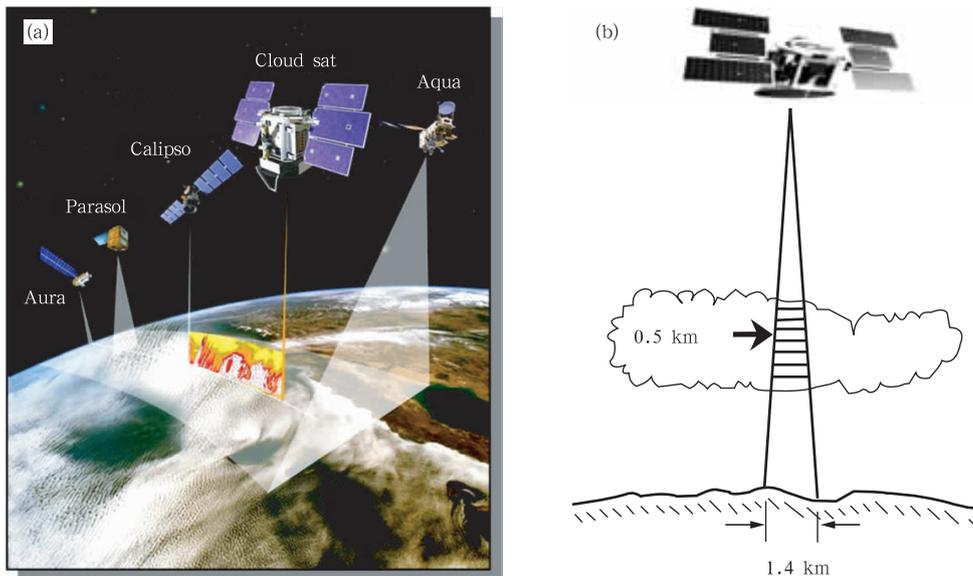


图 1 星载毫米波雷达工作示意图 A-Train 卫星系列(a)、CloudSat 及其云廓线雷达 CPR(b)^①

Fig.1 (a) A-Train satellites, and (b) CloudSat with its cloud profile radar-CPR

CloudSat 卫星距离地面 705 km,其上搭载的云廓线雷达(CPR)提供的资料可以使我们对云量、云的分布、云的结构以及云辐射特性方面的了解。该系统发射 94 GHz(3 mm)的毫米波使它可以使从太空“看见”云的内部,使我们可以研究云的内部水平和垂直结构。它可以探测云中较小的水滴和冰晶粒子,使我们可以观测到细小的云粒子向降水转化的过程。最关键的是,它可以观测到云内液态水和冰水的垂直廓线,这是现有的其他卫星系统无法做到的。CPR 的垂直分辨率为 500 m,垂直轨迹分辨率 1.4 km,沿轨迹分辨率 2.5 km(图 1b 和表 1)。

表 1 CloudSat 星载雷达 CPR 的系统参数

Table 1 System parameters for the CPR

CLOUDSAT-CPR	
工作频率	94 GHz
探测方式	垂直天顶向下
脉冲宽度	3.3 μ s
分辨率	水平:1.4 \times 2.5 km 垂直:500 m
灵敏度	-28 dBz
天线直径	1.85 m
动态范围	80 dB
重量	250 kg
发射功率	322 W

2.2 CPR 雷达衰减订正及产品简介

目前,Cloudsat 可以提供的标准产品有很多。

^① 引自 David Hudak, Overview of MSC CloudSat Validation. 2004, PPT

本文主要利用 CPR 现有产品中的云几何廓线、云分类、云内冰水含量以及云内降水性质进行云结构的分析。

2.2.1 衰减订正

与波长较长的测雨雷达相比,毫米波雷达受液态水的衰减很严重。衰减作用造成回波面积减小,在远距离处云或降水的雷达观测值比实际小。因此在利用毫米波雷达反射率因子 Z 反演各种产品、研究云内微物理特性之前,必须对雷达回波强度 Z 进行衰减订正。

毫米波雷达的衰减主要为大气吸收和云内液态水衰减两个部分。大气的吸收主要为氧气吸收与水汽吸收之和。氧气在大气中的含量随时间地点变化很小;与氧气相比,大气中所含水汽的百分比很小,但大气中水汽含量,随时间、地点和条件不同,有较大变化。水汽来自江河湖海及潮湿物体表面的水分蒸发,所以高度越高,空气中的水汽含量越少。水汽绝大部分集中在对流层下半部,随高度急剧递减,在 1.5—2 km 高度上,减少为地面的 1/10,再向上,含量更少。近地面,主要是水汽的吸收衰减,而大约 6 km 以上,由于水汽随高度的急剧递减,主要是氧气的吸收衰减作用。云水的衰减与其滴谱无关。液水云的衰减随温度的递减而增加,云水衰减量与云的平均温度密切相关,因此计算云水的衰减必须考虑温度的影响。

根据 Stepanenko 等(1987)吸收模式,得到氧气和水汽对于 3 和 8 mm 电磁波双程衰减公式:

(a) 水汽

$$A_{\text{H}_2\text{O}}(\text{dB}) = 0.077Q_t(P_0/1013)(293/T_0)^{1.5} \times [1 - \exp(-0.42h)] \quad (3 \text{ mm})$$

$$A_{\text{H}_2\text{O}}(\text{dB}) = 0.013Q_t(P_0/1013)(293/T_0)^{1.5} \times [1 - \exp(-0.42h)] \quad (8 \text{ mm})$$

(b) 氧气($h < 15 \text{ km}$)

$$A_{\text{O}_2} \approx (P_0/1013)^2(293/T_0)^2 \times [(7.02 \times 10^{-2}h) - (4.81 \times 10^{-3}h^2) + (1.22 \times 10^{-4}h^3)] \quad (3 \text{ mm})$$

$$A_{\text{O}_2} \approx (P_0/1013)^2(293/T_0)^2 \times [(5.36 \times 10^{-2}h) - (3.66 \times 10^{-3}h^2) + (9.95 \times 10^{-5}h^3)] \quad (8 \text{ mm})$$

(c) 云内液态水

$$A_{\text{LW}}(\text{dB}) \approx 7.56 \times Q_{\text{LWP}}(h)[1.0 + (293 - T) \times 0.012] \quad (3 \text{ mm})$$

$$A_{\text{LW}}(\text{dB}) \approx 1.27 \times Q_{\text{LWP}}(h)[1.0 + (293 - T) \times 0.03] \quad (8 \text{ mm})$$

其中, Q_t 水汽总量(kg/m^2), P_0 、 T_0 分别为近地面的大气压强(单位: hPa)和开尔文温度, h (km), Q_{LWP} 为理想高度上单程液水路径(kg/m^2), T 为开尔文温度。这些参数可以由探空资料、卫星 MODIS 资料以及微波辐射计得到。有了这些衰减系数,就可以对毫米波雷达测得的回波强度值进行订正。在对雷达回波进行衰减订正后,就可以用 Z 结合其他探测手段共同反演供研究用的产品。

2.2.2 产品反演方法

(1) 云几何廓线

首先,假设每一个有效照射体积的后向散射截面内水凝物粒子分布均匀。CPR 雷达垂直天底不断发射波长为 3 mm 的电磁波,接收探测目标的后向散射能量。由于 CPR 雷达的探测灵敏度是 -28 dBZ,因此当有云层的强度在该值以下或附近时,常常会丢失,但实际上这部分信息是存在且重要的。Clothiaux 等(1998)在给定脉冲重复频率为 4300 Hz、平均时间间隔为 0.16 s 的情况下,根据返回的功率谱是否服从高斯分布的关系确定丢失的云信息。然后,结合 MODIS 反演的云簇结果进行对比,最终确定云的水平分布(Ackerman, et al, 1998)。该产品的作用是,检验雷达探测得到的回波是气象回波或是噪音,对非噪音信号进行量化,将 CloudSat 与 MODIS 的探测结果进行对比,将云区识别范围最大化。有了雷达反射率因子 Z 后,根据其强度的大小,可以直观了解云垂直剖面图,很容易判断出云层内部结构随高度而变化的情况。在此基础上,进行各种产品的反演。

(2) 云水、云冰含量和云内有效粒子半径

首先利用冰和水对电磁波不同的退偏振特性,联合 CPR 雷达探测的云粒子反射率强度与 CALIPSO 卫星上搭载的激光雷达探测得到的云消光系数,将云相态分为冰云、水云和混合云。然后,假设水云或冰云的滴谱分布,根据云水含量(C_{LW})、云冰含量(C_{I})、有效粒子半径 r_e 、反射率分别与滴谱的关系,建立雷达反射率因子与云水、云冰含量、有效粒子半径的关系: $C_{\text{LW}}(\text{g}/\text{m}^3) = aZ^b(\text{mm}^6/\text{m}^3)$ 、 $C_{\text{I}}(\text{mg}/\text{m}^3) = cZ^d(\text{mm}^6/\text{m}^3)$ 、 $r_e(\mu\text{m}) = pZ^q(\text{mm}^6/\text{m}^3)$,其中 a 、 b 、 c 、 d 、 p 和 q 是与云滴谱特性有关的参数,结合其他卫星和模式得到的云参数,利

用统计、拟合得到。

(3) 云分类

不同类型的云有不同的云物理特性,对于大气运动、天气和气候变化有不同的影响。传统的分类方法多采用目测云底的高度将云分为低云、中云和高云。这种笼统的分类很粗略,远远不足以满足我们研究云特性的需求。因此很有必要将云按照宏观特性进一步分类。首先 CPR 雷达联合 MODIS 给出了云内最大反射率强度、最大反射率的平均高度、相应云内温度,结合地面降水实况,初步将云分为高云、中云、低云和降水云;然后用云层厚度、水平尺度、垂直尺度、云顶温度、云底温度等参数用模糊逻辑法(Penalozza, et al, 1996)将云分为:高层云、高积云、层云、层积云、积云、雨层云以及对流云。有了云类型,就很容易确定天气系统是否适合降水。

此外还有云光学厚度、通量和加热率等产品。本文主要从云几何廓线、云分类、云冰水含量和降水类型 4 个方面进行分析。

3 CloudSat 云雷达对南方冰冻天气的探测分析

3.1 灾情概况及 1—2 月天气背景形势

从 2008 年 1 月 10 日起,受强冷空气和暖湿气流共同影响,中国大部分地区遭遇 1954 年以来罕见的冰冻天气,该过程持续时间长、冰冻范围广、受灾程度重。其中 1 月 25—29 日是强度最大的一次,25 日华南开始出现强降水,广西东南部、广东和福建部分地区出现中到大雨,28—29 日积雪深度 20—50 m,与此同时,江西省出现大范围冻雨天气,湖南和贵州地区仍然维持冻雨天气。

从天气图(图略)可见:在 500 hPa 等压面上,1 月 20 日阻塞高压开始形成,并一直维持在贝加尔湖以西,阻挡了纬向环流的传递,使得中国南方大部分地区持续受槽前强盛的西南暖湿气流控制。在近地面层,西伯利亚附近有一强盛的冷高压中心一直维持,并不断地向中国中东部输送冷空气。并与高层阻塞高压一起形成了一个深厚的斜压系统,使得整个天气系统得以维持。上层的暖湿气流提供了充足的水汽,低层的强冷空气则导致了强降温,它们在中层交汇,形成一条明显的切变线。沿着这条切变线,造成了后期长时间严重的降温、降雪或者冻雨天气。

图 2 是 CloudSat 卫星分别在北京时间 2008 年 1 月 28 日 02 时 56 分、2008 年 1 月 28 日 13 时 55 分、2008 年 2 月 9 日 14 时 20 分和 2008 年 2 月 10 日 02 时 26 分左右在中国地区划过的轨迹,分别用直线 A、B、C、D 表示,圆环表示贵阳多普勒雷达在 2008 年 2 月 9 日 14 时 20 分左右扫过的区域,圆心为该雷达的位置。我们重点分析 A、B、C、D 4 个时间段 CPR 雷达的探测结果,探讨湖南、贵州冻雨天气的云物理机制;并且将 C 时段的结果与同一时间的贵阳 C 波段雷达探测结果进行对比,从而说明毫米波雷达的探测优势及局限性。

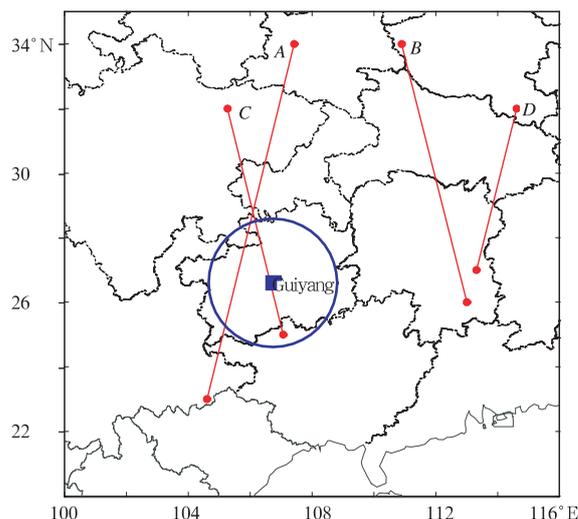


图 2 CloudSat 运行轨迹

(A、B、C、D 分别是该卫星在(北京时间)2008 年 1 月 28 日 02 时 56 分、2008 年 1 月 28 日 13 时 55 分、2008 年 2 月 9 日 14 时 20 分、2008 年 2 月 10 日 02 时 26 分左右经过的中国地区)

Fig. 2 CloudSat tracks

(Line A、B、C and D stand for the satellite tracks at the times of 02:56 BT 28 Jan 2008, 13:55 BT 28 Jan 2008, 14:20 BT 9 Feb 2008 and 02:26 BT 10 Feb 2008, respectively;

The circle covers the areas detected by the Doppler radar in Guiyang, Guizhou province)

3.2 CloudSat 对 0128 冻雨的探测分析

3.2.1 卫星、地面及探空资料

图 3 给出了北京时间 2008 年 1 月 28 日 03、14 时中国风云二号卫星(FY-2)得到的南方地区的卫星云顶高度图及当天 08 时长沙站探空图。可以看出,28 日从凌晨到下午湖南、贵州两省大部分区域云顶高度维持在 9 km 左右,最大超过 10 km,因此

判断云内上层是低温冷空气。地面观测资料(图略)^①显示:这些地区有大范围冻雨发生,且持续时间较长。长沙站的探空图(图 3c)显示在 850—770 hPa 附近大气出现逆温, $\theta_{se850} - \theta_{se500} = -47.2^{\circ}\text{C}$ 说

明该处存在位势不稳定的潜能,存在冰雪融化层,另一方面产生暖湿气流;另外 850 hPa 与 500 hPa 的位温差达到 -47.2 表明位势潜在不稳定,有天气系统发生的可能。

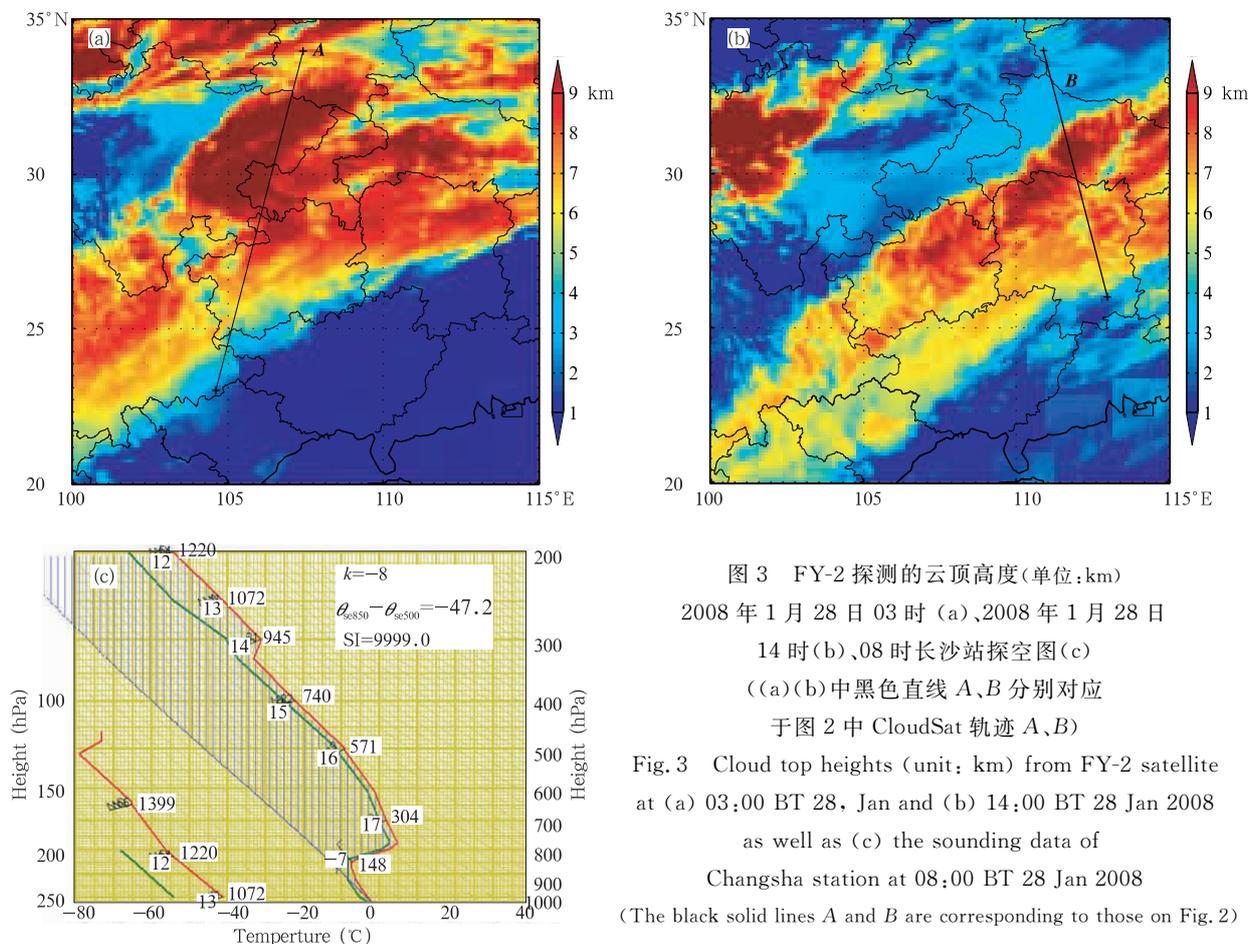


图 3 FY-2 探测的云顶高度(单位: km)

2008 年 1 月 28 日 03 时 (a)、2008 年 1 月 28 日 14 时 (b)、08 时长沙站探空图 (c)

((a)(b) 中黑色直线 A、B 分别对应于图 2 中 CloudSat 轨迹 A、B)

Fig. 3 Cloud top heights (unit: km) from FY-2 satellite at (a) 03:00 BT 28, Jan and (b) 14:00 BT 28 Jan 2008 as well as (c) the sounding data of Changsha station at 08:00 BT 28 Jan 2008 (The black solid lines A and B are corresponding to those on Fig. 2)

3.2.2 CPR 雷达观测分析

由北京时间 2008 年 1 月 28 日 02 时 56 分和 13 时 55 分左右 Cloudsat 云廓线雷达探测得到的云南、贵州、重庆和陕西境内部分地区云的雷达反射率因子、云内冰水含量以及云和降水类型(图 4)可以看到较清晰的云的水平和垂直结构:贵州和重庆大部分区域云顶高度一直维持在 7 km 以上,最大达到 10 km,云在水平方向也是连成一片,当天云的垂直和水平尺度均很大。

在 1 月 28 日 02 时 56 分左右卫星过境中国地区(图 4a, 对应于图 2 中直线 A)时,雷达正好扫过云南、贵州、重庆和陕西部分地区。该图对应的区域

跨越了从 23°—34°N 600 多千米范围,其中云体较密集的为 24°—30.5°N 和 32°—34°N 两个区域。云的平均高度在 7 km 以上,在 28°—30.5°N 重庆境内,云高达 10 km。从其反射率看:23°—24.5°N 距离地面 3.5 km 左右存在一条厚度约 0.800 km 的亮带层(图 4a₁)。该层内云的回波强度较周围一定范围内大很多,平均强度达到 16 dBz,与其上、下部 1 km 处的粒子反射率比值达到 18 以上,与前人研究的雷达探测零度层融化带的回波特征(张培昌等, 2001)比较得出,这是一条发展较弱的薄 0°C 层亮带,结合云冰水含量(图 4a₂),发现此处冰水含量为零,说明该层全部为液态水,而其上方 1 km 以内为

① 胡志晋,史月琴,周毓荃. 2008 冻雨雨淞的云物理机制. PPT

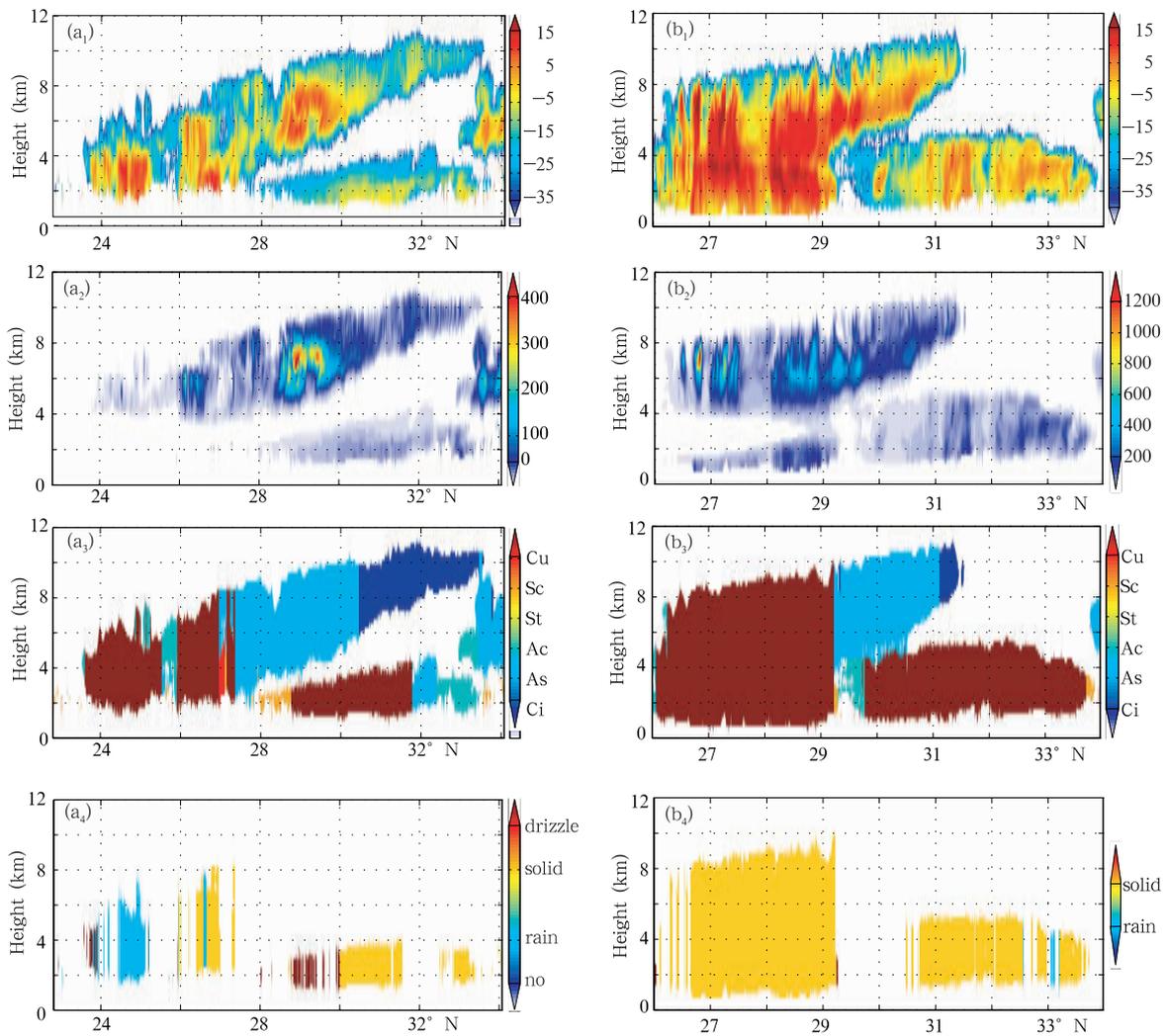


图4 2008年1月28日02时56分(a₁—a₄)、13时55分(b₁—b₄)左右 Cloudsat 云廓线雷达探测的(相应于图3中直线A、B区域上空)云的雷达反射率强度、云内冰水含量、降水性质以及云的类型
 Fig. 4 Radar reflectivity, cloud ice-water content, cloud genera and precipitation type from the CPR at 02:56 BT 28 Jan (a₁—a₄) and 13:55 BT 28 Jan (b₁—b₄) 2008 ((a₁—a₄) are corresponding to Line A in Fig. 3 and (b₁—b₄) to Line B in Fig. 3)

冰晶粒子,下方全部为液态水,因此判定 23°—24.5°N 云南省境内距离地面 3.5 km 左右存在 0°C 层融化带。0°C 层亮带是连续性降水的一个重要特征,很明显看出云中存在着明显的冰水转换区域:意味着在距离地面 2—4 km 处大气出现逆温,产生暖湿气流,其上降水粒子以冰晶为主,通过亮带后全部转化为水滴,存在位势不稳定的潜能。除之此外,28.5°—30°N 也是回波强度相对强的地区,此处大部分地区为重庆境内,此处平均反射率强度超过 15 dBz,最大冰水含量达 450 g/m³(图 4a₃)。分析降水

性质可知,29°N 以北只有小范围降雪,这是因为其上空融化层亮带较弱,而在 26°N 以南,虽然其上空存在强融化层亮带,由于地面温度高于 0 °C,因此也只是降雨天气。

1月28日13时55分左右卫星过境中国地区(图4b,对应于图2中直线B),此时雷达正好扫过湖南、湖北和河南部分地区,且正好扫过湖南发生冻雨的地区。由图4b₁可以看出:云的面积较上一时刻更大、云层更厚,垂直高度在10 km 以上,29°—31°N 云体形成“云毡状”,其内部包含好几个强度很

大的云团,这种形状与夏季强对流云很相似。该时刻,距离地面 2.5—3 km 处内仍然存在 0 °C 层亮带,且融化层的连续性更好、雷达回波特征更加明显。此外,在 26.5°—27°N、27.5°、28.2°—29.6°N 距离地面 7 km 的高空云团回波平均强度为 20 dBz,对应的云内冰水含量(图 4b₂)也相对较高,平均值近 800 mg/m³,最大值出现在湖南澧县、常德、津市等地区,达 1400 mg/m³。结合降水性质(图 4b₃)和云分类(图 4b₄)发现:此刻大部分地区都是雨层云系导致产生的冰雪天气,此时地面站资料显示大部分地区温度在 0 °C 以下。与前一时刻比较,说明强度和厚度适当的融化层以及地面温度对于冰冻天气的形成至关重要。

综合分析雷达探测的反射率强度、冰水含量等云和地面降水信息可以得出这次湖南贵州等大范围地区出现冻雨主要是因为:上层暖湿气团触发冰相过程产生冰雪,随后下落暖区融化形成雨,与下层冷气团再次发生作用,下落形成过冷雨($-10\text{ °C} < T$

$< 0\text{ °C}$),低于 0 °C 的雨滴在温度略低于 0 °C 的空气中能够保持过冷状态,其外观同一般雨滴相同,当它落到温度为 0 °C 以下的物体上时,立刻冻结成外表光滑而透明的冰层。

3.3 CloudSat 对 0210 冻雨的探测分析

3.3.1 卫星、地面及探空资料

从 2008 年 2 月 9 日 14 时、2008 年 2 月 10 日 02 时 30 分中国风云二号卫星(FY-2)得到的南方地区的卫星云顶高度图及 2 月 9 日 20 时长沙站探空(图 5)可以看出,这次冻雨形成的背景与上次个例有很大不同。贵州地区(24°—28°N, 106°—110°E),9 日其卫星云顶高度很低,均未超过 3 km,其他区域大部分云层也在 5 km 以下,10 日贵州地区的云顶高度仍然维持在 3 km 左右,相邻省区上空云系高度有所增加,但仍然在 7 km 以下。这造成云顶温度较高,不足以直接在顶部形成冰相粒子,为暖雨过程提供良好条件,地面观测资料(图略)的结果显示,9 日下午贵州地区为大范围小雨,10 日凌晨降水范

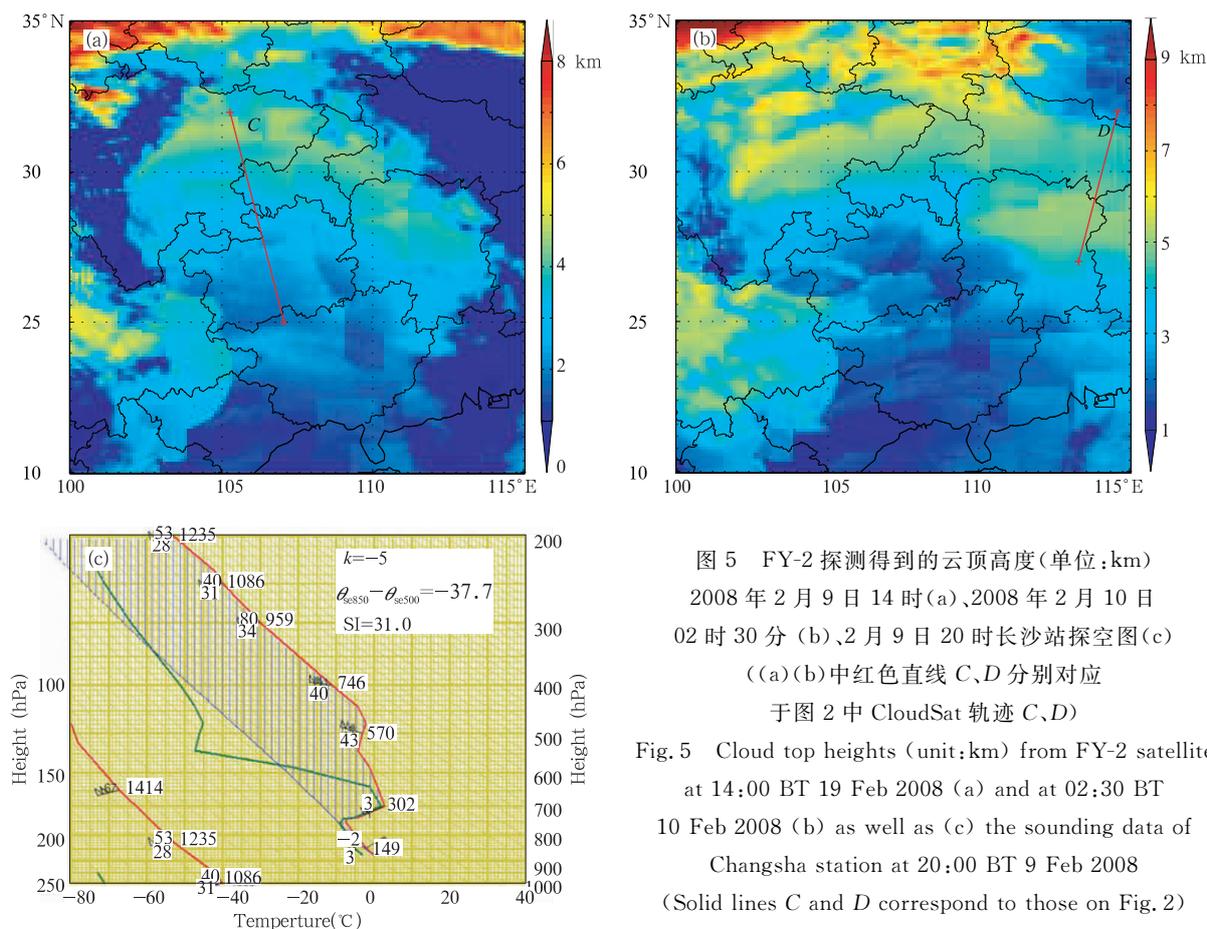


图 5 FY-2 探测得到的云顶高度(单位:km) 2008 年 2 月 9 日 14 时(a)、2008 年 2 月 10 日 02 时 30 分(b)、2 月 9 日 20 时长沙站探空图(c) ((a)(b)中红色直线 C、D 分别对应于图 2 中 CloudSat 轨迹 C、D)

Fig. 5 Cloud top heights (unit:km) from FY-2 satellite at 14:00 BT 19 Feb 2008 (a) and at 02:30 BT 10 Feb 2008 (b) as well as (c) the sounding data of Changsha station at 20:00 BT 9 Feb 2008 (Solid lines C and D correspond to those on Fig. 2)

围明显减小,但降水类型变为冻雨。贵阳站的探空图(图 5c)显示在 850—770 hPa 附近大气出现逆温, $\theta_{se850} - \theta_{se500} = -37.7$,说明该处存在位势不稳定的潜能,另一方面 K 指数为 -5 ,沙氏指数 $I_s = 31$ 均意味着大气的稳定,这与后文 CPR 雷达观测到的结果一致。

图 6 给出了 2008 年 2 月 9 日 14 时 20 分贵阳 C 波段多普勒雷达探测得到的 0.5° 和 1.5° 仰角雷达反射率强度 PPI 图以及距离地面 1.5 和 3 km 等高面反射率强度 CAPPI 图,其中紫色直线表示同一时刻 CloudSat 在贵州省境内划过的区域。由该 C 波

段雷达探测结果直观了解到贵州省上空云层的平均强度不超过 30 dBz,局部地区强度超过 40 dBz,北部地区没有探测到云区。对照图 7a,贵州省西北地区有层积云存在,整体强度很弱,在 $-10 \sim -20$ dBz,而实际地面观测资料显示有小雨发生。由此可以得出:普通的厘米波测雨雷达对于强度较弱的云探测能力大大下降,毫米波雷达可以弥补这个不足,能够监测到测雨雷达监测不到的弱云降水系统。另一方面, $24^\circ \sim 26^\circ N$,可以明显看到无论距离地面 1.5 km,还是 3 km 处,CPR 探测的反射率强度值均略低于 C 波段雷达探测值,由于 CPR 垂直天底向

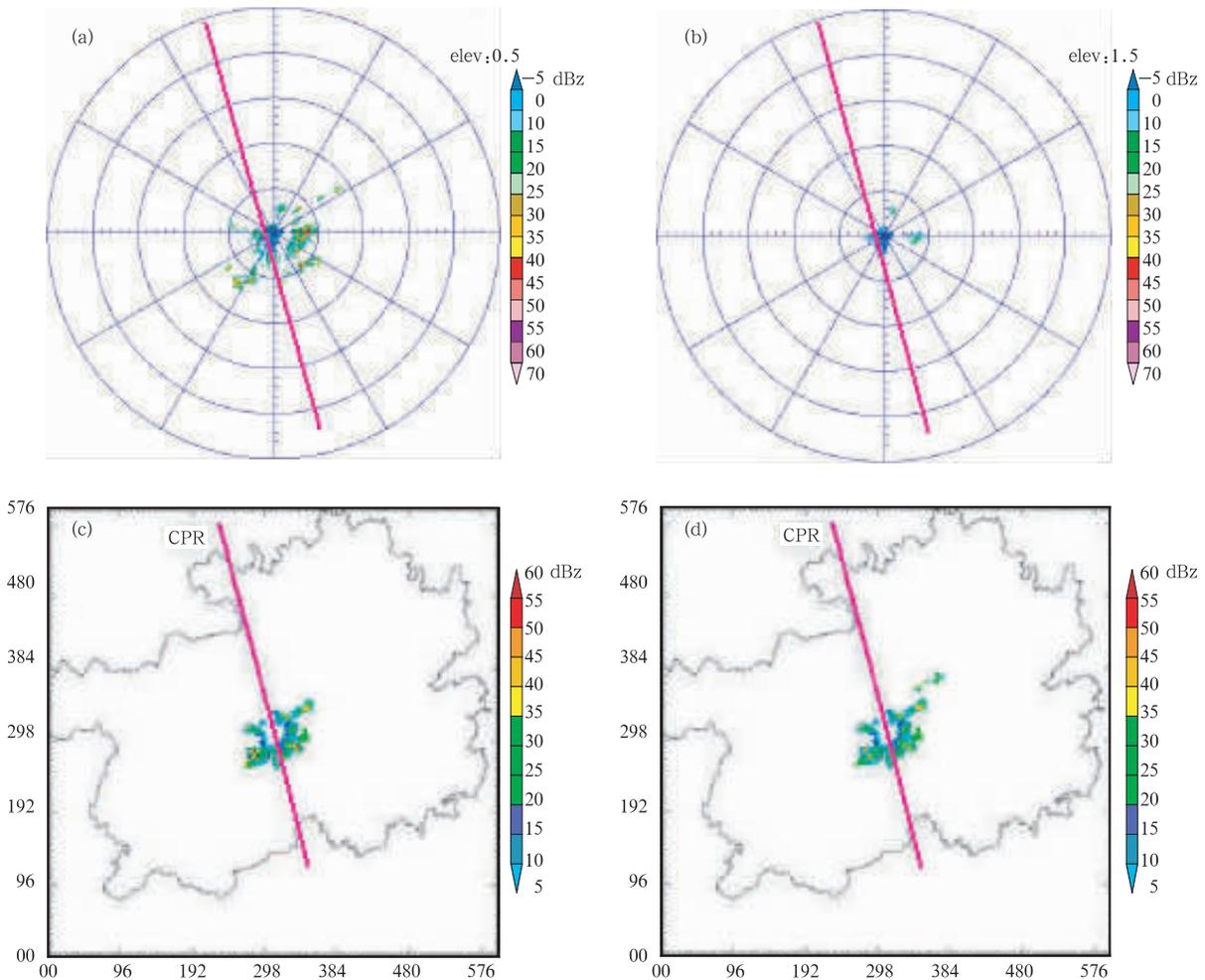


图 6 2008 年 2 月 9 日 14 时 20 分贵阳 C 波段多普勒雷达探测得到的 0.5° (a) 和 1.5° (b)

仰角雷达反射率强度 PPI 图、距离地面 1.5 km(c)、3 km(d) 等高面

反射率强度图(紫色直线对应该时刻 CloudSat 在贵州省境内划过的区域)

Fig. 6 Graphs for the PPI of radar reflectivity with 0.5° elevation (a) and 1.5° elevation (b) as well as CAPPI of radar reflectivity at the altitude of 1.5 km (c), and CAPPI of radar reflectivity at the altitude of 3 km (d) from Guiyang C-band Doppler radar at 14:20 BT 9 Feb 2008 (The purple line corresponds to CloudSat track to the same time)

下探测,因此离地面越近的地方,与C波段雷达探测的结果相差越大。这说明了毫米波雷达的衰减较厘米波雷达严重。

2月9日14时20分左右卫星过境中国地区(图7a,对应于图2中直线C)时,雷达正好扫过贵州、四川、湖南几省部分冰雪地区。该图对应的区域跨越了从25°—32°N约700 km范围,云的水平尺度较大,整体区域连成一片,但是云体垂直尺度不厚,且云顶高度较低。贵州上空云体最大高度只有4 km,云厚度3 km左右。云的回波反射率强度(图

7a₁)、云冰水含量(图7a₂)均很小;整个云层以内没有出现零度层融化带,平均反射率强度在0 dBz以下,最大冰水含量不超过35 mg/m³。此刻贵州中部以南区域上空为层积云系,中北部区域上空为雨层云系,此时云雷达降水类型显示近地面均为雨水天气,并无冰冻发生,这与实际地面资料很吻合。

2月10日02时26分左右卫星过境中国地区(对应于图2中直线D)时雷达正好扫过湖南、湖北、河南省部分冰雪地区。该图对应的区域跨越了从27°—32°N约500 km范围,探测的区域大部分与上

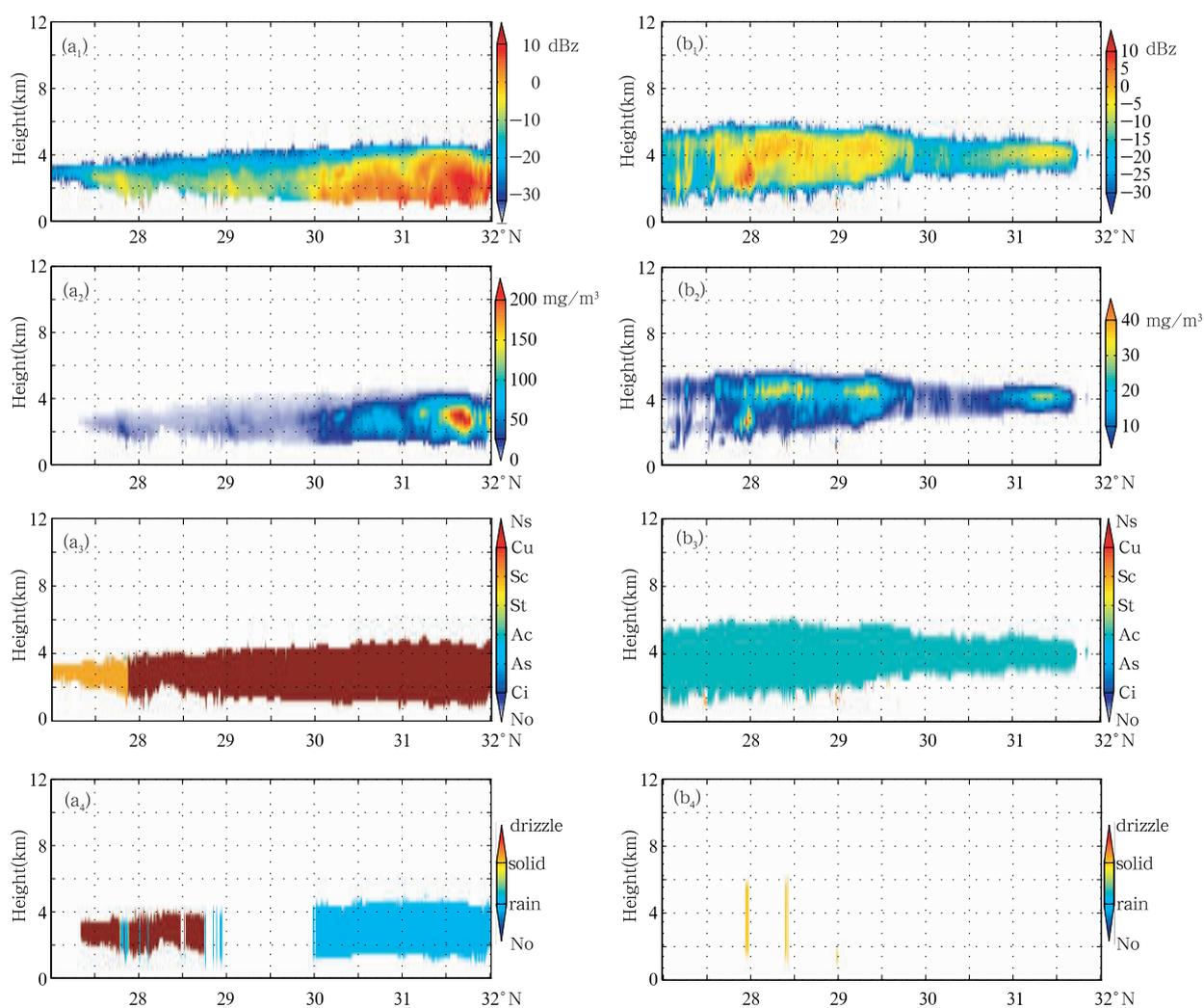


图7 2008年2月9日14时20分(a₁—a₄)2月10日02时26分左右(b₁—b₄)Cloudsat云廓线雷达探测的上空云的雷达反射率强度、云内冰水含量、降水性质以及云的类型

(a₁—a₄)相应于图2中直线C区域 Cloudsat云廓线雷达探测得到的相应于图2中直线D区域;

(b₁—b₄)相应于图2中直线D区域上空

Fig. 7 As in Fig. 4 but for 14:20 9 Feb 2008 (a₁—a₄) corresponding to Line C in Fig. 2 and for 02:26 BT 10 Feb 2008 (b₁—b₄) corresponding to Line D in Fig. 2

一时刻相同。与上一时刻不同的是:云顶高度较高大部分高纬度地区上空为厚度不超过 2 km、最大高度不超过 6 km 的冰云,对应的回波反射率强度和云内冰水含量也较小,最大值不超过 55 mg/m³。此时,湖南上空为大面积高积云系,部分地区已经由之前持续的雨水天气变为冻雨以及雨夹雪天气,此时地面资料(图略)显示冻雨地区平均温度在 0 °C 附近。

综合雷达探测的反射率强度、冰水含量等云和地面降水信息可以得出此次南方大范围出现雨水天气,而小范围出现冻雨主要是因为:云顶发展较低,云顶温度较高,不足以形成冰相粒子,在低层冷湿空气作用下,云内产生暖雨过程形成过冷云,过冷云滴通过凝华与碰并过程尺度长大,产生过冷雨滴,低于 0 °C 的雨滴在温度略低于 0 °C 的空气中能够保持过冷状态,其外观同一般雨滴相同,当它落到温度为 0 °C 以下的物体上时,立刻冻结成外表光滑而透明的冰层。这个过程属于“过冷云—过冷雨”的形成机制。

4 结论与讨论

自 2008 年 1 月 10 日起,受强冷空气和暖湿气流共同影响,中国大部分地区遭遇 1954 年以来罕见的雨雪冰冻天气。本文简要介绍了毫米波雷达的特点及现有工作平台;重点利用 CloudSat 卫星上搭载的 3 mm 波长的毫米波雷达(CPR)对 1 月 28 日、2 月 10 日的冰雪天气进行分析,并且结合个例选取贵州 C 波段天气雷达进行对比。结合测云雷达得到的回波强度、云内冰水含量、降水性质、云分类 4 个产品分析研究,得到以下结论:

(1) 毫米波雷达具有较高的时空分辨率,能够穿透云粒子获得清晰的云水平和垂直结构,探测云的内部特征。它除了可以提供云顶、云底高度、云层厚度、水平尺度等云的宏观物理参量外,还可以提供云内冰水含量等云的微观物理参量,为大气物理和大气探测的研究提供详细而重要的云信息。

(2) 0 °C 层亮带是连续性降水的一个重要特征,它反映了云中存在着明显的冰水转换区域,其上降水粒子以冰晶为主,通过亮带后全部转化为水滴,亮带的出现也表明了降水中气流稳定。毫米波雷达能够很好的反映 0 °C 层亮带的垂直结构特征,具体表现在其周围的回波强度均小于这一层,融化中心的雷达反射率与其上面约 500 m 处雷达反射率之比和与其下面雷达反射率比值,分别在 15—30 倍及

4—9 倍。因此,毫米波雷达可以用来研究云内零度层亮带的形成机制,这对探讨降水机制以及人工影响局部天气均有重要意义。

(3) 2008 年 1 月 28 日湖南冻雨和 2 月 10 日贵州冻雨的形成机制不同,前者属于“冰雪—雨—过冷雨”的过程:上层暖湿气团触发冰相过程产生冰雪,随后下落暖区融化形成雨,与下层冷气团再次发生作用,下落形成过冷雨。后者属于“冰雪—雨—过冷雨”的过程:云顶温度较高,不足以形成并向粒子,在低层冷湿空气作用下,产生暖雨过程,形成过冷云,云滴通过凝华与碰并过程变成过冷雨滴。过冷雨降落到温度较低的物体后就迅速结冰。这是冰冻雨气形成的两种典型云物理机制(表 2)。

表 2 冻雨形成的两种机制
Table 2 The two mechanisms for freezing rain

冻雨形成的云物理机制	
冰雪-雨-过冷雨	上层暖湿气团:(冰相过程) 冰雪(下落暖区融化) 雨
	下层冷气团:雨下落成过冷雨 (-10 °C < T < 0 °C)
过冷云-过冷雨	低层湿空气:过冷云(暖雨过程)- 过冷雨 云顶温度高,冰相不发展

(4) 相比于厘米波测雨雷达,毫米波雷达凸显出探测非降水及弱降水云的能力。然而它也有自身的不足和应用的局限性,比如,星载 CPR 雷达在获取云廓线资料时,靠单一的雷达是远远不够的,需要与其它多颗卫星、包括 MODIS 等仪器共同反演。此外,毫米波雷达还存在衰减严重的缺点,2008 年 1 月暴雪期间,地面雷达观测到最强回波超过 45 dBz,这些强回波表明有不少湿雪粘在一起形成湿雪块,此时 CPR 雷达衰减非常大,这种衰减作用是无法订正的。因此,在观测强对流天气系统时,最好能联合两者共同研究,毫米波雷达用以研究降水前以及弱降水时天气系统和云层特性,厘米波雷达用以研究强降水天气系统及云层特征,二者可以取长补短,相得益彰。

(5) 冰冻灾害天气不仅是中国,也是北美、欧洲冬季的主要严重灾害。毫米波雷达在冰冻天气研究中有很大的应用潜力。除了理论上的应用研究外,在实际生活中也可以提供很大的帮助,例如可以通过判断云内积冰情况预警飞机的安全状态。充分将毫米波雷达与卫星、探空、地面资料结合分析,可以帮助我们研究各种天气形成的微观物理机制,这对

云物理的发展、人工影响天气及气候变化的研究均有重要意义。

致谢:感谢 NASA 和科罗拉多州立大学 CloudSat 数据中心提供数据;感谢北京大学陶祖钰教授、中国气象科学研究院胡志晋研究员、王东海博士在中国冰冻灾害天气分析会议中的精彩报告;感谢中国气象科学研究院阮征研究员、怀俄明州立大学王志恩博士、德克萨斯州大学张盟、奥克拉哈玛州立大学程靖、南京大学明杰、中国气象科学研究院人工影响天气中心周毓荃提供文献及数据查询帮助;感谢中国气象科学研究院刘英、陕西省气象台王楠、重庆气象台张亚萍、河南省气象台孔海江提供的帮助。

参考文献

- 魏重,林海,忻妙新. 1985. 毫米波气象雷达的测云能力. 气象学报, 43(3):378-383
- 仲凌志,刘黎平,葛润生. 2009. 毫米波测云雷达的特点及其研究现状与展望. 地球科学进展, 24(4):383-391
- 张培昌,杜秉玉,戴铁丕. 2001. 雷达气象学. 北京:气象出版社,315-318
- Ackerman S A, Strabala K I, Menzel W P, et al. 1998. Discriminating clear sky from clouds with MODIS. J Geophys Res, 103: 32141-32157
- Atlas D. 1954. The estimation of cloud parameters by radar. J Meteor, 11: 309-317
- Clothiaux E E, Miller M A, Albrecht B A, et al. 1995. An evaluation of a 94-GHz radar for remote sensing of cloud properties. J Atmos Oceanic Technol, 12: 201-229
- Clothiaux, E E, Mace G G, Ackerman T P, et al. 1998. An automated algorithm for detection of hydrometeor returns in micro-pulse Lidar data. J Atmos Oceanic Tech, 15: 1035-1042
- Haper W G. 1966. Examples of cloud detection with 8.6-millimetre radar (Radar resolution capability for cloud detection. Meteor Mag, 95: 106-112
- Hobbs P V, Funk N T, Weiss R R, et al. 1985. Evaluation of a 35-GHz radar for cloud physics research. J Atmos Oceanic Tech, 2: 35-48
- Mace. 2003. Level 2 Combined Radar and Lidar Cloud Scenario Classification Product Process Description and Interface Control Document. CloudSat Project
- Matrosov S Y. 2004. Attenuation-based estimates of rainfall rates aloft with vertically pointing Ka-Band Radars. J Atmos Oceanic Tech, 22(1): 43-54
- Pasqualucci F. 1984. Drop size distribution measurements in convective storms with a vertically pointing Doppler radar. J Radio Sci, 19: 177-183
- Pazmany A, Clntosh M J, Hervig M. 1994. 95 GHz polarimetric radar measurements of Orographic Cap clouds. J Atmos Oceanic Tech, 11: 140-153
- Penaloza M A, Welch R M. 1996. Feature selection for classification of polar regions using a fuzzy expert system. J Remote Sens Environ, 58: 81-100
- Sauvageot H, Omar J. 1987. Radar reflectivity of cumulus clouds. J Atmos Oceanic Tech, 4: 264-272
- Stepanenko V D, Schukin G G, Bobylev L P, et al. 1987. Microwave radiometry in meteorology. Gidrometeoizdat, 284pp
- Wang Z, Sassen K. 2001. Cloud type and microphysical property retrieval using multiple remote sensors. J Appl Meteor, 40: 1665-1682
- White A B, Fairall C W, Frisch A S, et al. 1996. Recent radar measurements of turbulence and microphysical parameters in marine boundary layer clouds. J Atmos Res, 40: 177-221
- Woods C B, Waliser D, Li F. 2007. Evaluating CloudSat ice water retrievals using a cloud resolving model: Sensitivities to frozen particle properties and implications for model-data comparisons. J Aug, 253-278