

杨寅,赵春霞,宫宇,2018. 基于 CloudSat 卫星观测的贵州冻雨形成机制分析[J]. 气象,44(10):1325-1331.

# 基于 CloudSat 卫星观测的贵州冻雨 形成机制分析\*

杨 寅<sup>1</sup> 赵春霞<sup>2</sup> 宫 宇<sup>1</sup>

1 国家气象中心,北京 100081

2 贵州省毕节市气象局,毕节 551700

**提 要:** 利用 CloudSat 卫星观测资料,从云物理观测和温度垂直结构角度对贵州地区冻雨形成机制进行分析。结果表明,对冰相机制的冻雨,CloudSat 卫星的 CPR 雷达反射率、云冰含量和温度廓线产品能够描述冰相降水粒子在融化层中相变为液态水的“融冰”过程,雷达反射率回波 0℃ 层亮带是该过程的直接反映,云冰含量产品也能够反映融化层对冰相降水粒子的融化作用。对“过冷暖雨”机制的冻雨,CloudSat 卫星能够描述降水粒子在整层气温低于 0℃ 的环境中保持过冷水状态下落的过程。研究基于云物理观测证实贵州冻雨存在一种具有融化层的暖雨机制,其大气存在着具有融化层的逆温结构,降水粒子在融化层中为普通液态水,在温度略低于 0℃ 的环境中为过冷水,过冷水下落经过融化层时升温变为普通液态水,再继续下落进入次冻层冷却,最后与低于 0℃ 的地面物体碰并冻结形成冻雨。冻雨形成机制不能通过融化层区分。

**关键词:** 贵州,冻雨,形成机制分析,CloudSat 卫星观测资料

**中图分类号:** P412,P457

**文献标志码:** A

**DOI:** 10.7519/j.issn.1000-0526.2018.10.009

## Analysis on Mechanisms of Freezing Rain in Guizhou Province Using CloudSat Data

YANG Yin<sup>1</sup> ZHAO Chunxia<sup>2</sup> GONG Yu<sup>1</sup>

1 National Meteorological Centre, Beijing 100081

2 Bijie Meteorological Office of Guizhou Province, Bijie 551700

**Abstract:** The observation data of satellite CloudSat are used to analyze the mechanisms of freezing rain in Guizhou Province. The results show that, for the freezing rain under ice-phased mechanism, reflectivity of cloud profile radar, ice water content and temperature profile of CloudSat data could describe the process of ice-phased particles melting into liquid clearly. Bright bands of reflectivity at the 0℃ layer of cloud profile radar are the direct reflection of the melting process, and ice water content data could represent the melting process in melting layer as well. For the freezing rain under the super-cooled warm rain mechanism, CloudSat data could depict the falling process of precipitation particles kept in the super-cooled liquid in environment of temperature below 0℃ vertically. This research proves that the Guizhou freezing rain has warm rain mechanism with melting layer based on observation of cloud-physics. With the existence of temperature inversion in vertical temperature profile, precipitation particles exist in the liquid state in melting layer but remain super-cooled in environment of temperature below 0℃. The super-cooled liquid precipitation particles could be heated when falling into melting layer, getting frosted into super-cooled droplets in

\* 国家重点研发计划(2016YFC0402702)、安徽省自然科学基金青年项目(1708085QD89)、国家自然科学基金项目(51509043 和 41775111)及国家气象中心水文气象预报团队项目共同资助

2017 年 8 月 10 日收稿; 2018 年 8 月 14 日收修定稿

第一作者:杨寅,从事天气预报和卫星资料应用研究工作. Email:yy619441819@126.com

freezing layer below, colliding with surface objects and forming freezing rain with temperature below  $0^{\circ}\text{C}$  at last. Thus, melting layer could not be used to distinguish the formation mechanism of freezing rain.

**Key words:** Guizhou Province, freezing rain, analysis of mechanism, CloudSat data

## 引 言

冻雨是由过冷水滴组成的,与温度低于  $0^{\circ}\text{C}$  的物体碰撞后立即冻结的降水,是冬半年降水的一种特殊情况。陶诗言和卫捷(2008)指出我国冻雨最频繁的省份是贵州,占全国总次数的 84%。欧建军等(2011)统计了 2008—2010 年全国常规地面观测和探空资料,发现冻雨主要发生在长江以南,以贵州省发生最多。有研究分析贵州冻雨的时空分布,发现其主要集中于贵州西北部,空间分布特征和时间演变规律受地形、静止锋等多种因素影响(叶茵等, 2007;严小冬等,2009)。此外还有学者利用数值模式讨论了地形对冻雨分布的影响(曾明剑等,2009;徐辉和金荣花,2010)。

很早就有学者对冻雨形成机制开展研究,Bochieri(1980)分析一些冻雨天气的探空数据,发现整层大气都在  $0^{\circ}\text{C}$  以下,提出这种冻雨机制为“过冷暖雨”。Stewart(1985)研究美国东南部的冻雨和降雪时,发现暖层( $>0^{\circ}\text{C}$ )能将雪花完全融化,液滴落到低层冷层中冷却但未被再次冻结时,在低于  $0^{\circ}\text{C}$  的地表上将很有可能观测到冻雨,这种理论常被称为融化过程或“冰相融化机制”。Huffman and Norman(1988)总结了冻雨的两种机制,一种是冰相机制:大气温度垂直结构呈上下冷、中间暖,上层降落的固态冰晶或雪花在暖层内融化为液态,当液滴到达下层冷层时再冷却到  $0^{\circ}\text{C}$  以下,待下落碰到地物或地面后立即冻结;另一种为暖雨机制:大气整层气温小于  $0^{\circ}\text{C}$ ,雨滴以过冷却水的形式降落到地面发生冻结。后来的研究多沿用该结论,认为存在融化过程的冻雨为冰相机制;在一致略低温度环境( $<0^{\circ}\text{C}$ )下,雨滴以过冷水形式降落到地面冻结的冻雨为暖雨机制,并通常使用融化层来区分。

李登文等(2009)利用常规观测数据和 NCEP 再分析资料,根据温度垂直结构将贵州冻雨机制分为单层、二层和三层结构。单层结构的气温整层均小于  $0^{\circ}\text{C}$ (即“过冷暖雨”机制),三层结构为存在融化层( $>0^{\circ}\text{C}$ )的“冷—暖—冷”逆温结构(即冰相机制),二层结构的温度层结和冰相机制一致,降水粒

子以液态形式存在(在略低于  $0^{\circ}\text{C}$  的环境中为过冷水,在融化层中为普通液态水)并下落,最后与温度低于  $0^{\circ}\text{C}$  的地面物体碰并冻结形成冻雨。从降水粒子是否出现相变过程的角度看,贵州冻雨的单层和二层机制都属于暖雨机制,但两者的降水粒子状态存在差异:单层机制中,降水粒子在整层气温低于  $0^{\circ}\text{C}$  的环境中为过冷水;二层机制中,如果云层所处位置在融化层之上,同时环境温度高于  $-10^{\circ}\text{C}$ ,云中降水粒子状态为过冷水,当其下落经过融化层时可能升温变为普通液态水,不会一直保持过冷水状态,如果云层位于融化层中,云中降水粒子状态是普通液态水。

2008 年中国南方持续冰冻雨雪灾害发生后,国内关于冻雨的研究很多,但受观测手段限制,学者们多利用常规观测与再分析资料,从温度层结角度分析,强调逆温层中暖层的融化作用(马晓刚等,2010;宗志平等,2013;康丽莉等,2017;漆梁波,2012)。尤凤春等(2015)利用地面常规观测和探空资料分析冻雨探空温湿特征,发现北京地区存在云顶高度在暖层以下、不属于冰相机制的冻雨个例,这说明用融化层区分冻雨冰相和暖雨机制是不合理的。许多学者还尝试利用卫星和雷达等非常规观测,从云物理角度对冻雨机制进行研究,王东海等(2008)利用 CloudSat 雷达反射率和云冰含量数据分析了贵州北部一次冻雨个例中固态降水粒子在暖层中融化的冰相机制过程;仲凌志等(2010)利用星载毫米波雷达反射率、云冰含量、降水相态等数据对贵州等地一次固态降水粒子在暖层中融化的冰相机制冻雨过程进行了更全面的分析;陈英英等(2011)利用 CPR 云雷达反射率数据与温湿度廓线分析了湖南一次冻雨天气中的“融冰”过程;唐熠和廖慕科(2008)利用天气多普勒雷达资料分析了 2008 年桂林的冻害天气,指出反射率回波  $0^{\circ}\text{C}$  层亮带是由于  $0^{\circ}\text{C}$  层附近冰相降水粒子融化造成的。高守亭等(2014)利用 FY-2E 卫星红外黑体亮温观测数据分析了 2011 年 1 月初贵州一次暖雨机制的冻雨过程,并通过数值模拟证实冻雨区上空云中水物质是云水和雨水,没有冰晶和雪等其他固态水凝物。目前研究主要针对冰相机制,对暖雨机制关注较少。杜小玲等(2010)研究

指出贵州省存在明显融化层,温度场呈“冷—暖—冷”结构特征时对应强冻雨天气,无融化层但低层冷中心的冷平流很强时仍可出现较强冻雨。可见暖雨机制也能导致明显冻雨,其具有危险性和研究价值。

对“过冷暖雨”机制(单层模式)和存在融化层的暖雨机制(二层模式),其理论基础是冰核在温度高于 $-10^{\circ}\text{C}$ 的环境中很少活化,云顶温度高于 $-10^{\circ}\text{C}$ 的云大部分情况都是由过冷却水构成的(Hobbs and Rangno, 1985),这意味着即使存在融化层,如果融化层上方的云所处环境温度略低于 $0^{\circ}\text{C}$ ,云中降水粒子以过冷水形式存在,其下落经过融化层时升温变为普通液态水但不存在融化过程。欧建军等(2011)认为当有暖层而云顶温度大于 $-10^{\circ}\text{C}$ 时,冻雨也有可能是暖雨机制。刘朝茹等(2015)根据地面和探空常规观测资料分析,也认为暖雨机制在融化层存在的情况仍可能出现。黎惠金等(2011)利用中尺度模式模拟了 2008 年南方地区一次冻雨,发现其属于暖雨机制,但温度垂直结构存在着融化层。张昕等(2015)模拟了 2008 年初一次冻雨过程,发现高空固体降水粒子稀少,中低空存在大量液态粒子,同时 900~600 hPa 存在逆温层和融化层。陶玥等(2012)利用中尺度云分辨模式模拟了 2008 年一次贵州冻雨过程,发现冻雨是在“暖—冷”温度层结下的暖雨机制。以上研究从理论和常规观测资料分析,以及数值模拟的角度提出融化层存在情况下的冻雨也可能是暖雨机制,但对于大气存在融化层的情况下,降水粒子以液态形式存在,并不存在“融冰”过程的分析,模拟尚缺乏云物理实际观测的直接佐证。

CloudSat 是 NASA 地球系统科学探路者卫星计划的一颗卫星,其搭载的云廓线雷达(CPR)可以观测到云内液态水和冰水的垂直廓线。马占山等(2008)发现 CPR 雷达反射率和云冰含量可以真实地反映云垂直结构和水凝物分布规律;陈英英等(2011)发现 CloudSat 资料的温度廓线与探空数据吻合;目前已经有不少学者使用 CloudSat 资料研究云垂直结构(李积明等, 2009;汪会等, 2011;Luo et al, 2009)。

本研究尝试利用 CloudSat 的 CPR 雷达反射率、云冰含量和温度廓线产品,结合地面常规观测资料,从云物理观测和温度垂直结构的角度的分析贵州冻雨的形成机制。

## 1 资料与方法

利用 CloudSat 卫星观测资料研究贵州冻雨形成机制,研究选取了两种资料,第一种是国家基本站地面观测数据,包括天气现象和温度观测;第二种是 CloudSat 卫星探测数据,包括 level2 数据标准的云几何剖面产品 2B-GEOPROF,该产品包含 CPR 雷达观测的反射率回波数据;云冰含量产品 2B-ICE,包含由卫星观测反演得到的云内冰水含量;辅助产品 ECMWF-AUX,包含由欧洲中期天气预报中心提供的卫星轨迹沿途温度廓线数据。

2008 年 1 月上旬至 2 月上旬,我国南方地区出现了历史罕见的大范围持续性低温雨雪冰冻天气过程,其影响范围广、持续时间长、强度大、灾害重。过程期间,贵州、湖南等地出现严重冻雨,使铁路、公路、电力、通信网络相继中断,国省道主干线严重受阻,给人民日常生活带来了严重的影响和损失(刘志雄等, 2013)。研究以 2008 和 2009 年冬季贵州地区冻雨为对象,选取卫星探测与贵州冻雨观测重叠的数据开展分析。CloudSat 为极轨卫星,且其搭载的 CPR 雷达观测覆盖空间范围较小(垂直轨迹分辨率为 1.4 km,沿轨分辨率为 2.5 km),卫星轨迹和贵州地区明显冻雨天气重叠的样本不多,经过筛选,确定了通过三个代表性个例分析贵州冻雨的形成机制。

除冻雨外,冻雾(过冷雾)也会造成冰冻灾害。吴兑(2008)认为当近地层出现过冷雾时,如果下垫面物体温度小于 $0^{\circ}\text{C}$ ,就可以在物体上冻结。李杰等(2015)指出冻雾出现时一般不会伴随其他天气,如存在其他天气则主要以雪为主。本研究分析的三个个例,水平能见度都在 5 km 以上,天气现象均为冻雨,说明在研究个例中不存在冻雾,是单纯的冻雨天气。

## 2 贵州冻雨形成机制分析

### 2.1 2008 年 1 月 28 日冻雨机制分析

#### 2.1.1 地面观测和卫星轨迹

图 1 是 2008 年 1 月 28 日 02 时(北京时,下同)地面温度与天气现象观测和 CloudSat 卫星飞行轨迹。02:35 左右 CloudSat 卫星飞行经过贵州西部

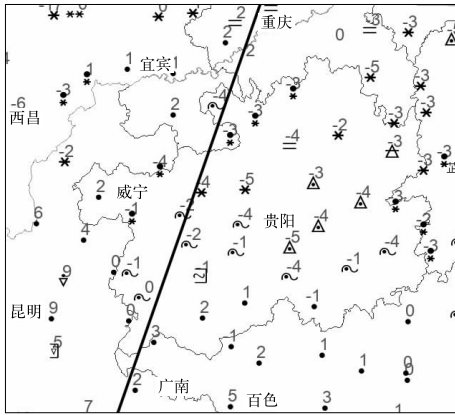


图 1 2008 年 1 月 28 日 02 时地面  
观测资料和 CloudSat 卫星轨迹

(直线: 卫星轨迹; 数字: 地面温度, 单位:  $^{\circ}\text{C}$ )

Fig. 1 The surface observation and track of  
CloudSat around 02:00 BT 28 January 2008

(line: satellite track; number: surface  
temperature, unit:  $^{\circ}\text{C}$ )

地区,沿卫星轨迹观察,轨迹南段( $23.5^{\circ}\sim 25.5^{\circ}\text{N}$ )的地面天气现象是小雨,中段( $25.5^{\circ}\sim 27.0^{\circ}\text{N}$ )为冻雨,北段( $27.0^{\circ}\sim 28.0^{\circ}\text{N}$ )降水以雪和雨夹雪为主,这种降水分布有利于分析雨、冻雨和雪等不同降水相态所对应的云物理结构。此外,分析地面温度观测资料,卫星轨迹中段冻雨区域的地表温度在  $0^{\circ}\text{C}$  以下,符合冻雨发生时要求地表物体温度低于  $0^{\circ}\text{C}$  的条件。

### 2.1.2 CloudSat 卫星观测资料分析

图 2 和图 3 是 CloudSat 卫星在贵州境内由南向北的 CPR 雷达反射率、云冰含量和温度廓线分布。在轨迹南段( $23.5^{\circ}\sim 25.5^{\circ}\text{N}$ ),雷达反射率在  $2\sim 6\text{ km}$  高度上均有值,云的垂直和水平尺度都很大。在  $24.5^{\circ}\sim 25.2^{\circ}\text{N}$  区域  $2\sim 4\text{ km}$  的高度上存在着一条反射率回波亮带,该层内的回波强度较周围一定范围大很多,最大值在  $15\text{ dBz}$  以上,其与上、下部的反射率回波比值也很大;ECMWF-AUX 产品温度廓线显示,卫星轨迹南段的大气温度在高度  $4\text{ km}$  以下都高于  $0^{\circ}\text{C}$ ,结合雷达反射率和温度垂直分布信息可以发现, $2\sim 4\text{ km}$  高度上的回波亮带层是一条发展较弱的  $0^{\circ}\text{C}$  层亮带,其形成的原因是冰晶和雪花等冰相降水粒子在  $0^{\circ}\text{C}$  层附近发生表面融化而反射率增大(张培昌等,2001;唐熠和廖慕科,2008)。

分析云冰分布情况,云冰在高度小于  $4\text{ km}$  的云层下部含量为  $0\text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$ ,在高度大于  $4\text{ km}$  的

云层上部分布较明显,最大值在  $200\text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$  以上,再考虑到雷达反射率回波在  $2\sim 6\text{ km}$  高度上均有值的情况,这说明雷达在高度低于  $4\text{ km}$  的云层下部探测到的降水粒子为液态(图 3)。结合反射率回波、云冰含量和温度廓线等信息可以发现,雷达反射率回波  $0^{\circ}\text{C}$  层亮带是冰相粒子下落进入融化层后,相态转变为液态粒子这一过程的直接反映。轨迹南段  $4\text{ km}$  高度以下大气温度均高于  $0^{\circ}\text{C}$  的垂直分布,使得由冰相降水粒子融化成的液态水在下落过程中继续升温,同时地表温度高于  $0^{\circ}\text{C}$ ,使得冻雨无法形成,降水最终以雨的形式出现。

在卫星轨迹中段( $25.5^{\circ}\sim 27^{\circ}\text{N}$ ),大气存在“冷—暖—冷”的逆温垂直结构,大气温度在高度  $4\text{ km}$  以上和近地面层低于  $0^{\circ}\text{C}$ ,在  $2\sim 4\text{ km}$  高度之间高于  $0^{\circ}\text{C}$ ,且最高温度超过  $3^{\circ}\text{C}$ ;CPR 雷达反射率回波在  $2\sim 7\text{ km}$  高度之间均有值,并在  $2\sim 3.5\text{ km}$  的高度存在大值区。结合雷达反射率和大气温度垂直结构分析可知,与轨迹南段类似,这也是一条  $0^{\circ}\text{C}$  层亮带。分析云冰分布情况,云冰含量在  $4\text{ km}$  高度以上、温度低于  $0^{\circ}\text{C}$  的环境中较明显,最大值超过  $600\text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$ ;在  $2\sim 4\text{ km}$  高度,温度大于  $0^{\circ}\text{C}$  的中间暖层(融化层)中基本为  $0\text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$ ;在近地面温度低于  $0^{\circ}\text{C}$  的冷层(次冻层)中含量也为  $0\text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$ ,这说明在融化层和次冻层中的降水粒子为液态。此外,云冰含量在轨迹中段( $25.9^{\circ}\text{N}$  和  $26.9^{\circ}\text{N}$ )附近的暖层中有值,其原因可能是冰相降水粒子较大,在暖层中需要下落更长距离才能完全融化。

本次冻雨个例是一次冰相机制过程,其形成机制如下:冰相降水粒子下落进入温度大于  $0^{\circ}\text{C}$  的融化层后相变为液态水,继续下落进入次冻层中冷却,最后与温度低于  $0^{\circ}\text{C}$  的地面物体碰并冻结形成冻雨。CloudSat 卫星的 CPR 雷达反射率、云冰含量、温度廓线产品从云物理实际观测和温度垂直结构角度揭示了冰相降水粒子下落经过融化层时相变转为液态水的过程,雷达反射率回波  $0^{\circ}\text{C}$  层亮带是“融冰”过程的直接反映,云冰含量产品也能够反映融化层对冰相降水粒子的融化作用。

需要指出的是,不是所有出现“冷—暖—冷”温度垂直结构配置的地区都会出现冻雨,地面降水类型与冷暖层的相对厚度有密切关系。卫星轨迹北段也存在三层逆温,但融化层厚度比中段薄、强度偏弱,次冻层比中段厚、强度偏强。融化层偏弱,可能造成冰相粒子不能完全融化;次冻层偏强,可能导致

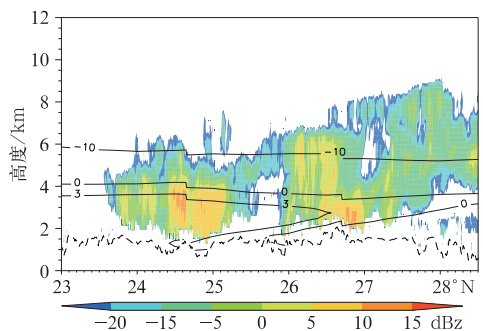


图 2 2008 年 1 月 28 日 02:35 左右 CloudSat 卫星在贵州地区的雷达反射率和温度廓线 (填色:雷达反射率;实线:温度,单位:℃;虚线:地形高度)

Fig. 2 Radar reflectivity and temperature profile of CloudSat around 02:35 BT 28 January 2008 (colored area: radar reflectivity, solid line: temperature, unit: °C, dashed line: terrain height)

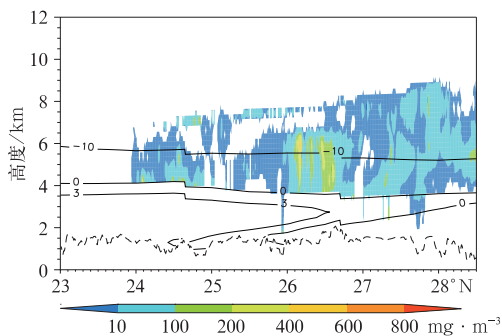


图 3 同图 2,但为云冰含量和温度廓线 (填色:云冰含量,其他说明同图 2)

Fig. 3 Same as Fig. 2, but for ice water content and temperature profile (colored area: ice water content, other illustrations are the same as Fig. 2)

被融化或者部分融化的冰相降水粒子重新冻结为固态,最终使得卫星轨迹北段的降水以雪和雨夹雪为主。

## 2.2 2008 年 1 月 14 日冻雨机制分析

### 2.2.1 冻雨地面观测和卫星轨迹

图 4 是 2008 年 1 月 14 日 02 时地面温度与天气现象观测和 CloudSat 卫星轨迹。02:39 左右,CloudSat 卫星飞行经过贵州东南部地区,沿卫星轨迹分析地面观测的天气现象,轨迹南段(25.5°N 以南)没有降水,天空状况为多云,中段(25.7°~26.7°N)出现冻雨,北段(27°N 以北)降水以雪为主。分析地面温度观测,卫星轨迹中段冻雨区域的地表

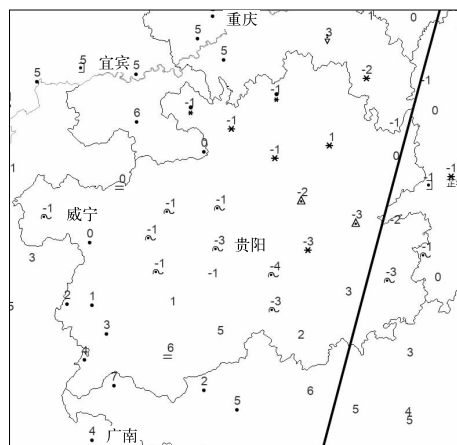


图 4 同图 1,但为 2008 年 1 月 14 日 02 时  
Fig. 4 Same as Fig. 1, but around 02:00 BT 14 January 2008

温度在 0℃ 以下,符合冻雨发生时要求地表物体温度低于 0℃ 的条件。

### 2.2.2 CloudSat 卫星观测资料分析

图 5 和图 6 是 CloudSat 卫星探测的 CPR 雷达反射率、云冰含量及温度廓线。在卫星轨迹中段出现冻雨的区域,CPR 雷达反射率回波较冰相机制弱,最大值在 10 dBz 以下,云顶回波高度平均约 2.2 km,最大值约 4.5 km(图 5);卫星轨迹中段的云冰含量均为 0 mg·m<sup>-3</sup>(图 6);温度垂直结构方面,轨迹中段存在具有融化层的“冷—暖—冷”逆温结构。雷达探测反射率有值而云冰含量为 0,说明雷达探测到的降水粒子不是冰相而是液态。结合温度层结分析液态降水粒子的状态,在 26°~26.7°N 范围,云层处于融化层内,云中降水粒子为普通液态水;在 25.7°~26°N 范围,云顶高度在融化层之上,环境温度略低于 0℃,云中降水粒子为过冷液态水,当降水粒子下落经过融化层时升温变为普通液态

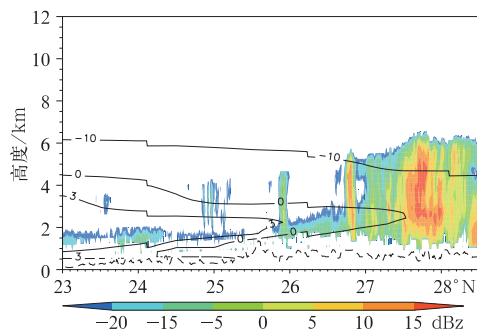


图 5 同图 2,但为 2008 年 1 月 14 日 02:39 左右  
Fig. 5 Same as Fig. 2, but around 02:39 BT 14 January 2008

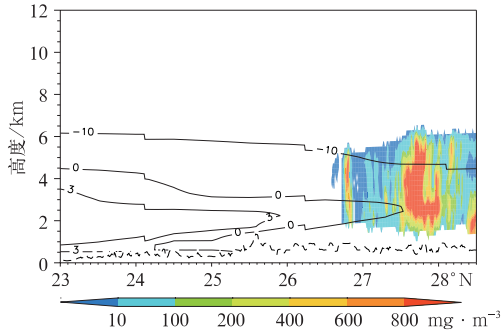


图 6 同图 3, 但为 2008 年 1 月 14 日 02:39 左右  
Fig. 6 Same as Fig. 3, but around  
02:39 BT 14 January 2008

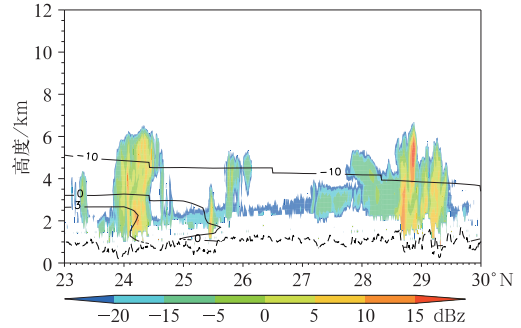


图 7 同图 2, 但为 2009 年 1 月 7 日 05:25 左右  
Fig. 7 Same as Fig. 2, but around  
05:25 BT 7 January 2009

水, 不会保持过冷水的状态。

综合雷达反射率、云冰含量和温度廓线可以用于分析本次冻雨天气的形成机制: 大气存在具有融化层的“冷—暖—冷”逆温结构, 降水粒子在融化层中为普通液态水, 在温度略低于  $0^{\circ}\text{C}$  的环境中为过冷水, 过冷水下落经过融化层时升温变为普通液态水, 之后再下落进入次冻层中被冷却, 最后与低于  $0^{\circ}\text{C}$  的地面物体碰并冻结形成冻雨。这种存在融化层的暖雨机制与整层气温均小于  $0^{\circ}\text{C}$ 、降水粒子保持过冷水状态的“过冷暖雨”机制不同, 也与存在降水粒子融化过程的冰相机制不同。针对本次冻雨天气, CloudSat 卫星资料从云物理实际观测角度证实了李登文等(2009)提出的冻雨“二层结构”概念模型和“暖—冷”层结下暖雨机制的数值模拟研究结论。

### 2.3 2009 年 1 月 7 日冻雨机制分析

2009 年 1 月 7 日 05:25 左右, CloudSat 卫星轨迹经过贵州中部地区, 沿卫星轨迹分析地面天气现象(图略), 轨迹中段( $25.5^{\circ}\sim 26.5^{\circ}\text{N}$ )出现冻雨。在轨迹中段, CPR 雷达反射率较冰相机制冻雨天气的回波强度弱, 最大值在 10 dBz 以下(图 7); 云冰含量整层均为  $0\text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$ ; 大气温度整层低于  $0^{\circ}\text{C}$ , 不存在融化层(图 8)。

综合雷达反射率、云冰含量和温度廓线等资料可以发现, 卫星轨迹中段不存在冰相降水粒子, CPR 雷达探测到的降水粒子是过冷液态水。本次冻雨是典型的“过冷暖雨”机制: 降水粒子在整层温度低于  $0^{\circ}\text{C}$  的大气中以过冷水形式存在并下落, 最后与温度低于  $0^{\circ}\text{C}$  地面物体碰并冻结形成冻雨。此外, 卫星轨迹中段出现冻雨的区域, 雷达反射率在环境温度略低于  $-10^{\circ}\text{C}$  的高度上有值, 但固态降水粒子含量为 0, 这说明在环境温度略低于  $-10^{\circ}\text{C}$  的条件下, 云中降水粒子仍能以过冷液态水的形式存在, 即环境

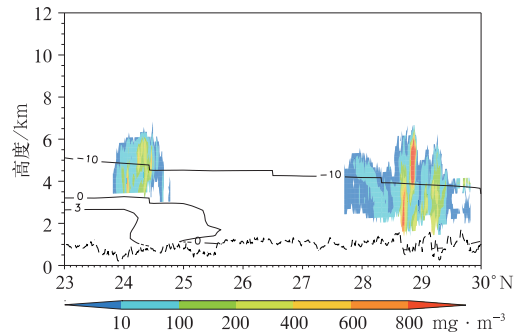


图 8 同图 3, 但为 2009 年 1 月 7 日 05:25 左右  
Fig. 8 Same as Fig. 3, but around  
05:25 BT 7 January 2009

温度略低于  $-10^{\circ}\text{C}$  的条件下冻雨仍有可能是暖雨机制引发的。

表 1 是不同冻雨形成机制的云物理结构和温度层结特征对比, 存在融化层的暖雨机制没有降水粒子相态变化过程, 这与整层气温均小于  $0^{\circ}\text{C}$ 、降水粒子保持过冷水状态的“过冷暖雨”机制不同, 也与存在降水粒子融化过程的冰相机制不同, 冻雨的冰相和暖雨机制不能通过融化层区分, 合理的区分指标应该是降水粒子有无相态变化过程。

表 1 不同冻雨机制的云物理结构和温度层结特征对比  
Table 1 Comparison of cloud physical structure and vertical temperature profile between different freezing rain mechanisms

特征	冻雨机制		
	冰相机制	暖雨机制 (过冷暖雨)	暖雨机制 (有融化层)
降水粒子的相态变化	有	无	无
融化层	有	无	有

## 3 结论与讨论

利用 CloudSat 卫星的 CPR 雷达反射率、云冰



含量和辅助温度产品,结合常规地面观测,从云物理观测和温度垂直结构角度分析了贵州冻雨的形成机制。结果表明,CloudSat 卫星观测资料可以揭示贵州冻雨的不同形成机制。

对冰相机制冻雨,CloudSat 卫星的 CPR 雷达反射率、云冰含量和温度廓线产品能够描述冰相降水粒子在温度大于  $0^{\circ}\text{C}$  的融化层中出现相态转变,融化为液态的“融冰”过程,雷达反射率回波  $0^{\circ}\text{C}$  层亮带是该过程的直接反映,云冰含量产品也能够反映融化层对冰相降水粒子的融化作用;对整层气温低于  $0^{\circ}\text{C}$  的“过冷暖雨”机制冻雨,CloudSat 卫星观测资料能够描述降水粒子在整层气温低于  $0^{\circ}\text{C}$  条件下保持过冷水状态下落的云物理特征。

研究从云物理观测角度证实了贵州冻雨存在一种具有融化层的暖雨机制:大气存在着具有融化层的“冷—暖—冷”逆温结构,降水粒子在融化层中为普通液态水,在温度略低于  $0^{\circ}\text{C}$  的环境中为过冷水;过冷水下落经过融化层时升温变为普通液态水,再进入次冻层冷却,最后与低于  $0^{\circ}\text{C}$  的地面物体碰并冻结形成冻雨。在这种存在融化层的暖雨机制中,降水粒子不会始终保持过冷水状态,这与整层气温均小于  $0^{\circ}\text{C}$ 、降水粒子为过冷却水状态的“过冷暖雨”不同,也与存在降水粒子融化过程的冰相机制不同。冻雨的冰相和暖雨机制不能通过融化层区分。

## 参考文献

陈英英,武文辉,唐仁茂,等,2011. 利用 Cloudsat 卫星资料分析冻雨天气的云结构[J]. 气象,37(6):707-713.

杜小玲,彭芳,武文辉,2010. 贵州冻雨频发地带分布特征及成因分析[J]. 气象,36(5):92-97.

高守亭,张昕,王瑾,等,2014. 贵州冻雨形成的环境场条件及其预报方法[J]. 大气科学,38(4):644-655.

康丽莉,邓芳萍,岳平,等,2017. 一种浙江省冻雨落区的推算方法[J]. 气象,43(6):756-761.

李登文,乔琪,魏涛,2009. 2008 年初我国南方冻雨雪天气环流及垂直结构分析[J]. 高原气象,28(5):1140-1148.

李积明,黄建平,衣育红,等,2009. 利用星载激光雷达资料研究东亚地区云垂直分布的统计特征[J]. 大气科学,33(4):698-707.

李杰,郭学良,周晓宁,等,2015. 2011~2013 年中国冻雨、冻毛毛雨和冻雾的特征分析[J]. 大气科学,39(5):1038-1048.

黎惠金,李江南,林文实,等,2011. 2008 年初南方冻雨云物理过程的模拟研究[J]. 高原气象,30(4):942-950.

刘朝茹,韩永翔,王瑾,等,2015. 我国冻雨统计及发生机制研究[J]. 灾害学,30(3):219-222,234.

刘志雄,蔡荣辉,邓见英,等,2013. 2008 年湖南冻雨成因研究[J]. 高原气象,32(2):456-467.

马晓刚,曲晓波,李月安,等,2010. 冻雨落区基本概念模型的研究与建立[J]. 气象,36(9):68-73.

马占山,刘奇俊,秦琰琰,等,2008. 云探测卫星 CloudSat[J]. 气象,34(8):104-111.

欧建军,周毓荃,杨棋,等,2011. 我国冻雨时空分布及温湿结构特征分析[J]. 高原气象,30(3):692-699.

漆梁波,2012. 我国冬季冻雨和冰粒天气的形成机制及预报着眼点[J]. 气象,38(7):769-778.

唐熠,廖慕科,2008. 2008 年桂林冰冻雨雪灾害天气多普勒雷达资料分析[J]. 气象研究与应用,29(2):26-29.

陶诗言,卫捷,2008. 2008 年 1 月我国南方严重冰雪灾害过程分析[J]. 气候与环境研究,13(4):337-350.

陶玥,史月琴,刘卫国,2012. 2008 年 1 月南方一次冰冻天气中冻雨区的层结和云物理特征[J]. 大气科学,36(3):507-522.

王东海,柳崇健,刘英,等,2008. 2008 年 1 月中国南方低温雨雪冰冻天气特征及其天气动力学成因的初步分析[J]. 气象学报,66(3):405-422.

汪会,罗亚丽,张人禾,2011. 用 CloudSat/CALIPSO 资料分析亚洲季风区和青藏高原地区云的季节变化特征[J]. 大气科学,35(6):1117-1131.

吴兑,2008. 关于冻雨、雨淞、雾淞之我见[J]. 广东气象,30(1):12-13,23.

徐辉,金荣花,2010. 地形对 2008 年初湖南雨雪冰冻天气的影响分析[J]. 高原气象,29(4):957-967.

严小冬,吴战平,古书鸿,2009. 贵州冻雨时空分布变化特征及其影响因素浅析[J]. 高原气象,28(3):694-701.

叶茵,杜小玲,严小冬,2007. 贵州冻雨时空分布及对应临近环流特征分析[J]. 贵州气象,31(6):11-13,25.

尤凤春,付桂琴,刘卓,等,2015. 北京地区冻雨时空分布及探空温湿特征分析[J]. 气象,41(12):1488-1493.

曾明剑,陆维松,梁信忠,等,2009. 地形对 2008 年初中国南方持续性冰冻灾害分布影响的数值模拟[J]. 高原气象,28(6):1376-1387.

张培昌,杜秉玉,戴铁丕,2001. 雷达气象学[M]. 北京:气象出版社:315-318.

张昕,高守亭,王瑾,2015. 2008 年 1 月贵州冻雨的数值模拟和层结结构分析[J]. 高原气象,34(2):368-377.

仲凌志,刘黎平,陈林,等,2010. 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[J]. 气象学报,68(5):705-716.

宗志平,马杰,张恒德,等,2013. 近几十年来冻雨时空分布特征分析[J]. 气象,39(7):813-820.

Bocchieri J R, 1980. The objective use of upper air soundings to specify precipitation type[J]. Mon Wea Rev,108(5):596-603.

Hobbs P V, Rangno A L, 1985. Ice particle concentrations in cloud [J]. J Atmos Sci,42(23):2523-2549.

Huffman G J, Norman G A, 1988. The supercooled warm rain process and the specification of freezing precipitation[J]. Mon Wea Rev,116(6):2172-2181.

Luo Yali, Zhang Renhe, Wang Hui, 2009. Comparing occurrences and vertical structures of hydrometeors between eastern China and the Indian monsoon region using CloudSat/CALIPSO data[J]. J Climate,22(4):1052-1064.

Stewart R E, 1985. Precipitation types in winter storms[J]. Pure Appl Geophys,123(4):597-609.