

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

# 利用 Cloudsat 卫星资料分析冻雨天气的云结构<sup>\* 1</sup>

陈英英<sup>1</sup> 武文辉<sup>2</sup> 唐仁茂<sup>1</sup> 周毓荃<sup>3</sup> 毛节泰<sup>4</sup> 赵姝慧<sup>5</sup>

1 湖北省人工影响天气办公室, 武汉 430074

2 贵州省气象台, 贵阳 550002

3 中国气象局人工影响天气中心, 北京 100081

4 北京大学物理学院大气与海洋科学系, 北京 100871

5 辽宁省人工影响天气办公室, 沈阳 110001

**提 要:** 利用 Cloudsat 卫星资料中的欧洲中心中期天气预报(ECMWF)温湿度廓线、雷达反射率因子等产品结合探空秒数据和地面观测资料从云物理的角度分析了 2008 年初发生在我国南方地区的一次典型冻雨天气的云结构特征。分析表明: 此次冻雨发生时温度廓线上存在明显的逆温层, 但有逆温层并不一定出现冻雨, 融化层与次冻结层的相对厚度决定着最终的地面降水类型, 沿 Cloudsat 轨迹 10 个纬距的范围内出现由雨向冻雨、冰粒、雪的过渡。结合湿度剖面发现, 逆温层水汽充沛。ECMWF 资料与轨迹上长沙站的探空秒数据对比发现, ECMWF 的温度产品要比湿度产品有更高的准确性。毫米波云剖面雷达 CPR 的反射率因子产品显示, 此次冻雨有明显的零度层亮带特征, 且亮带刚好出现在 0 °C 等温线上界以下, 直观地展示出基于经典“融冰过程”的冻雨形成机理。

**关键词:** Cloudsat, 冻雨, 逆温层, 零度层亮带

## Analysis on the Cloud Structure of Freezing Precipitation Using Cloudsat Satellite Data

CHEN Yingying<sup>1</sup> WU Wenhui<sup>2</sup> TANG Renmao<sup>1</sup> ZHOU Yuquan<sup>3</sup> MAO Jietai<sup>4</sup> ZHAO Shuhui<sup>5</sup>

1 Weather Modification Office of Hubei Province, Wuhan 430074

2 Guizhou Meteorological Observatory, Guiyang 550002

3 CMA Weather Modification Centre, Beijing 100081

4 Department of Atmospheric and Oceanic Sciences, School of Physics, Peking University, Beijing 100871

5 Weather Modification Office of Liaoning Province, Shenyang 110001

**Abstract:** One severe freezing precipitation occurred over southern China in the early 2008. Using the Cloudsat products (ECMWF and radar reflectivity), from the cloud physics perspective, the main characteristics of cloud structure are studied based on sounding data and surface observations. The results indicate that there exists an obvious inversion layer, but it is not the only reason for freezing precipitation. Within a 10° latitude band from the Cloudsat orbit, there is a transition region, in the form of rain, freezing rain, ice pellets and snow, which is partially a consequence of size-dependent differences in melting layer and low-level subfreezing region. Combining with the vertical distribution of humidity, it shows that there exists abundant water vapor in the inversion layer. Compared with the soundings of Changsha station which is located at the Cloudsat orbit, the temperature of European Centre for Medium-Range Weather Forecasting (ECMWF) is proved to be more correct than humidity. The radar reflectivity shows that there exists obvious signature of bright band during this freezing precipitation, which is just under the upper

\* 国家自然科学基金项目 40865003 和 2010 年湖北省气象局科技发展基金项目(2010Q02)共同资助

2010 年 4 月 16 日收稿; 2010 年 12 月 17 日收修定稿

第一作者: 陈英英, 从事大气物理和大气遥感方面研究. Email: brisk007@163.com

limit of 0 °C isotherm. The formation mechanism of “classical” melting process is demonstrated as the cause for freezing precipitation has been shown visually.

**Key words:** Cloudsat, freezing precipitation, inversion layer, bright band

## 引言

2008 年初,我国南方大部分地区发生了严重的冰冻雨雪灾害,其持续时间之长、覆盖地域之广、强度之大为历史罕见,给电力供应、交通运输及人民正常的生产生活带来严重的影响,对冻雨天气形成机理及预测预报的研究迫在眉睫。国外 20 世纪初即有学者注意到了冻雨天气<sup>[1-4]</sup>。20 世纪 70 年代 Spengler 等<sup>[5]</sup>发现冬季降水系统中存在降水形态的过渡带,Stewart 等、Zerr 等、Stewart 等<sup>[6-8]</sup>对过渡带不同降水形态的形成机理进行了分析。Bernstein 等、Cortinas 等、Bourgouin<sup>[9-11]</sup>研究了冻雨的预报方法。Szeto 等<sup>[12]</sup>、Stewart 等<sup>[8]</sup>、Riault 等<sup>[13]</sup>利用数值模拟方法,研究了逆温层温度、厚度、次冻结层厚度和地面温度等条件对最终降水类型的影响。Tremblay 等<sup>[14]</sup>模拟了几次发生在西欧和北美地区的冻雨过程,取得较好效果。Cortinas 等<sup>[15-16]</sup>则用统计方法分析总结了北美大湖地区冻雨形成的条件,指出强斜压天气系统上暖湿气流的平流和垂直运动,容易导致冻雨条件的形成。Forbes 等、Rauber 等、Regan 等<sup>[17-19]</sup>给出了冻雨个例的天气分析研究。Czys 等<sup>[20]</sup>提出了一个冻雨预报参数。上述研究都是基于经典的“融冰过程”冻雨形成机理,Huffman 等<sup>[21]</sup>首次提出了冻雨形成的“暖云过程”机制,该机制是在云内温度处于 $-10\sim 0$  °C 时,由过冷却云滴间的碰并过程形成冻雨,而无需暖层的融化和次冻结层的冻结作用,后来 Rauber 等<sup>[22]</sup>和 Bernstein 等<sup>[9]</sup>的工作进一步验证了这一点。

针对 2008 年初 50 年一遇的罕见冻雨天气,国内学者也进行了大量的研究,包括:灾害发生的气候背景及特征<sup>[23-25]</sup>、灾害的大尺度环流背景与天气过程<sup>[26-30]</sup>、冻雨天气的层结条件<sup>[31-35]</sup>等。

为深入了解形成冻雨的云结构特性,分析其与降雨、降雪时的区别,本文着眼于云微物理的角度,利用第一颗可以对云层结构进行全球测量的卫星 Cloudsat 的监测产品,配合探空秒数据及地面观测资料,针对 2008 年 1 月 28 日出现在我国南方的

“雨—冻雨—冰粒—雪”等不同降水类型过渡带的典型个例进行了研究,分析了这一区域温湿度廓线及云雷达反射率因子特征,精细而直观地展示了基于经典“融冰过程”的冻雨形成机理。

## 1 过程概述

由 2008 年 1—2 月 3 小时一次的全国地面观测站的资料显示(如图 1),2008 年 1 月 10 日至 2 月 10 日为我国冻雨的高发时段,该时段内一共找到 16 个时次的 Cloudsat 卫星轨道经过我国南方地区,其中经过冻雨区域的时次共有 5 次,选取 1 月 28 日 04:58 UTC 的个例作为典型进行深入分析,其轨道号为 9318。

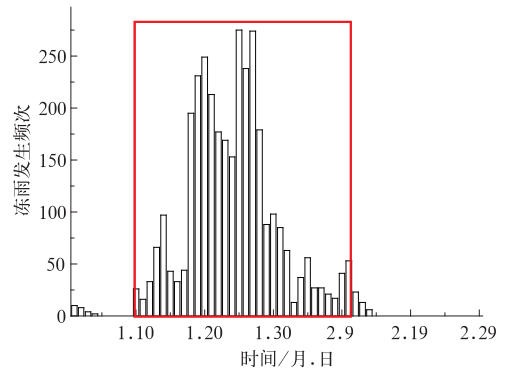


图 1 2008 年 1—2 月冻雨的频次分布

Fig. 1 The frequency distribution of freezing rain from January to February 2008

## 2 个例分析

### 2.1 Cloudsat 介绍

美国宇航局启动的“地球观测系统科学探路者 (ESSP)”计划中的 Cloudsat 卫星于 2006 年 4 月 28 日成功发射升空。它是第一颗可以对云层特征进行全球观测的卫星,其上搭载的云雷达 (cloud profiling radar) 由于采用毫米波段 (3 mm) 进行探测,能够弥补我们常规使用厘米波段多普勒雷达对云滴尺度的小粒子探测失效的缺陷,实现由上至下对薄云、浓厚云以及台风云系等不同特征云系的垂直剖面观

测。Cloudsat 卫星在深入了解云的内部结构以及发展规律、定量了解云对气候影响和反馈、帮助我们更好地预测天气和气候以及有效地影响局部天气等方面起着十分重要的作用。

Cloudsat 卫星位于 705 km 高度的太阳同步轨道上,卫星绕地球一周称为一个扫描轨道,扫描时间大约为 99 min,每天大约绕地球 14~15 个扫描轨道。每个像素点的星下点波束覆盖宽度的沿轨分辨率是 2.5 km,横轨分辨率是 1.4 km,从地面到高空可获得 125 个不同高度上的数据,即垂直探测高度大约为 30 km,垂直分辨率可达 240 m。

Cloudsat 卫星主要有两类数据产品:一类是标准数据产品,另一类是辅助数据产品。标准数据产品按照反演的等级分为两级(level1、level2),level1 产品是通过卫星上搭载的云雷达直接得到的数据产品,level2 产品是根据 level1 产品并结合其他卫星产品反演得到的。这里主要使用欧洲中心中尺度天气预报辅助产品 ECMWF-AUX 和 level2 标准数据产品云的几何剖面 2B-GEOPROF。

此次过程的 Cloudsat 扫描轨道总计 37082 个星下像素点(图略),选取其中的第 20960—21960 个像元,即第 19 段共计 1001 个像元作为分析对象,观测时间为北京时间 13:54—13:57,轨道号是 9318,扫描范围为 23.1°~32.7°N、111.25°~113.7°E,轨迹由南向北经过我国的广东、湖南、湖北三省。

### 2.2 地面降水类型

1月28日14:00,Cloudsat 轨迹的该段有多种降水类型,由南向北依次是雨(26°N 以南)、冻雨和冰粒(26°~29°N)、雪(29°N 以北),如图 2a 所示,10 个纬距的范围内同时存在如此多样的降水类型,此时分析云的垂直结构具有特殊的意义。

Glickman<sup>[36]</sup>曾指出,广义的凝冻天气(freezing precipitation)包括冻毛毛雨(freezing drizzle)、冻雨(freezing rain)、冰粒(ice pellets),由 Glickman 的定义则该时段的冻雨落区如图 2b 所示,主要集中在

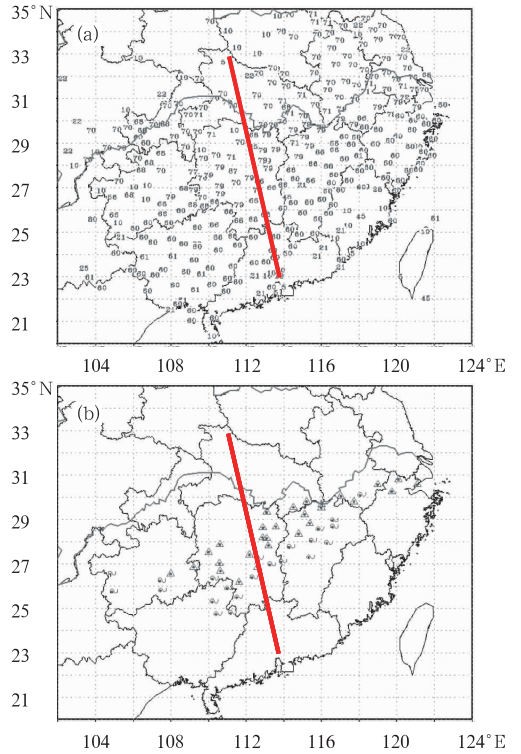


图 2 2008 年 1 月 28 日 14:00 地面降水类型分布(a)和冻雨的落区分布(b) 实线为 Cloudsat 轨迹

Fig. 2 Distribution of surface precipitation types (a) and geographic distribution of freezing precipitation (b) at 14:00 BT 28 January 2008 solid line stands for the Cloudsat orbit

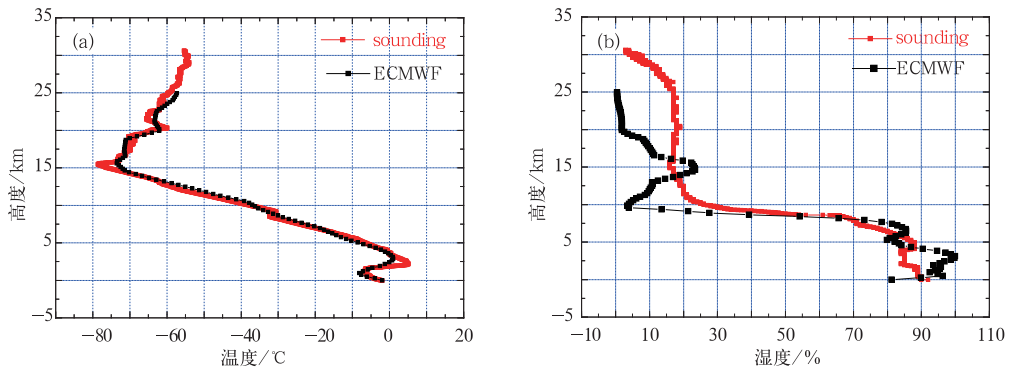


图 3 长沙站 08:00 探空秒数据和 ECMWF 温湿廓线的比较(a:温度,b:湿度)  
Fig. 3 The comparison of temperature and humidity profiles between radiosonde data of Changsha Station (08:00) and ECMWF data (a: temperature, b: humidity)

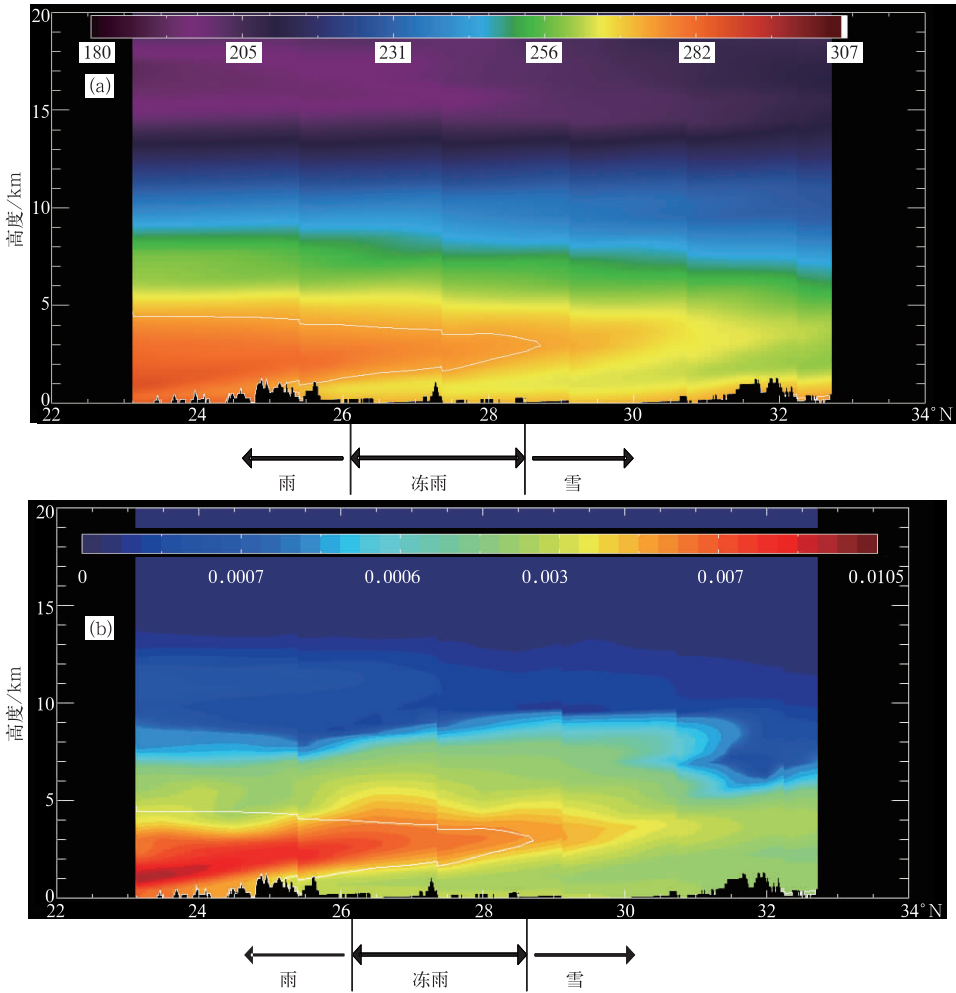


图 4 温度的垂直剖面(a, 单位:K, 白线为  $T=273.15$  K)和比湿的垂直剖面(b, 单位:  $\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}$ , 白线为  $T=273.15$  K)

Fig. 4 The vertical cross sections of temperature (a, unit: K) and specific humidity (b, unit:  $\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ). The white line stands for a temperature of 273.15 K

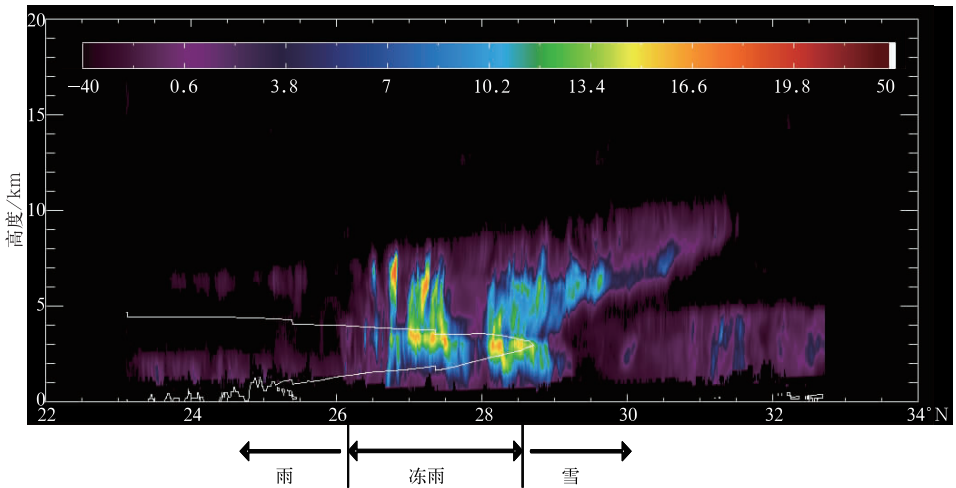


图 5 雷达反射率因子的垂直剖面(单位: dBz, 白线为  $T=273.15$  K)

Fig. 5 The vertical cross section of radar reflectivity (unit: dBz, white line stands for a temperature of 273.15 K)

在湖南中部、江西北部以及贵州、广西、安徽、福建的局地,呈带状分布,Cloudsat 卫星正好经过出现冰粒、轻度冻雨的湖南地区,冻雨带以北主要是出现降雪,以南主要是降雨。

### 2.3 Cloudsat 温湿度

首先利用 ECMWF 的温度和比湿产品分析温湿度的垂直剖面,为检验 ECMWF 温湿度产品的准确性,利用 Cloudsat 轨迹(第 21493 个像素点)附近长沙探空站(编号:57687,28.23°N、112.87°E)当日 08:00 的探空秒数据进行验证,14:00 长沙的地面降水类型为冰粒,属于广义冻雨的一种。

图 3 显示最临近时次(08 时)长沙站的温度和湿度层结,与 ECWFMF 有良好的对应。

由图 3a 温度廓线的对比可以看出,两条曲线十分吻合,探空和 ECMWF 都显示中低层有明显的逆温,温度廓线(0~25 km)与理论上的“对流层气温随高度增加而降低”有所不同,约在 2~3.5 km 处有一暖层,温度区间的两端有量值上的细微差异,初步分析,这是由于不同的垂直分辨率引起的,探空秒数据在 3 km 附近的垂直分辨率可达 10 m 以内,而 ECWFMF 的垂直分辨率为 Cloudsat 标准间隔,即 240 m。

由图 3b 湿度廓线的对比可以看出,长沙上空的云从地面一直延展到 8 km 左右,即湿度廓线大于 70% 的区域,中间无夹层,探空和 ECWFMF 都显示出这一特性。这也与下文即将讨论的云雷达的探测结果一致。

下面利用 ECMWF 资料分析整个轨迹剖面的温湿度结构,如图 4 所示,横轴为纬度,纵轴为高度。

由图 4a 可以看出,轨迹中的很大一部分地区低层存在逆温结构,尤其在 25°~28.7°N 之间的地区存在冷层—暖层—冷层的配置,符合经典“融冰过程”冻雨模型的温度层结要求,这里的冷暖以 0 °C 为界,如图 4 中的白线。与地面降水类型对比发现,并不是所有出现冷—暖—冷结构配置的地区都会出现冻雨,其冷暖层的相对厚度与地面降水类型有密切关系,具体为:无融化层——雪;融化层较厚、次冻结层较薄——冻雨;融化层较薄、次冻结层较厚——冰粒;无次冻结层——雨。

25°N 以南的地区,温度廓线上几乎无冻结层,

对应地面降水类型为“雨”;25°~28.7°N 的地区,由上至下存在冷—暖—冷的配置,即冻结层—融化层—一次冻结层,融化层由南向北逐渐变薄,其下的次冻结层由南向北逐渐增厚,该段轨迹对应地面降水类型为“广义冻雨”,其中纬度较低的地区多为轻度冻雨、纬度较高的地区多为冰粒;28.7°N 以北的地区,温度廓线上无融化层,对应地面降水类型为“雪”;图 4b 与图 4a 对比可以看出,暖区对应湿区,冷区对应干区,非常明显的展示出暖湿气流遇冷空气后爬升、冷空气楔入暖湿气团之下的情景。

### 2.4 Cloudsat 雷达反射率因子

雷达反射率因子产品能从另一个角度分析发生冻雨时云结构特征。上面已提到,在 25°~28.7°N 之间的区域有发生冻雨的温度廓线条件,但由图 5 可以看出,25°~26.5°N 范围内上层雷达回波很弱甚至无回波,说明该段无充足的云水,不进行分析。

真正形成广义冻雨的是在 26.5°~28.7°N 的范围内。该段反射率因子图中出现较为显著的亮带特征,如图 5,在 3 km 左右的高空出现了一条断断续续的高反射率带,且与图中白线( $T=273.15$  K)对比发现,亮带刚好出现在刚刚进入暖区的位置,亮带可证明冻雨“融冰过程”的存在。之前有研究表明<sup>[37]</sup>,亮带应出现在 0 °C 上界以下  $330 \pm 150$  英尺 ( $100.584 \pm 45.72$  m) 处。

由图 5 还可以看出,在暖层较厚的地区,如 27°N 附近,暖层比亮带在垂直方向上要厚,上层的固态粒子在暖层已完全融化为雨滴,在图像上表现为:暖层上部为亮带,下部则雷达反射率明显减小,这样,在落入较薄的冻结层之后,极易变为过冷水滴进而形成冻雨;而在暖层较薄的地区,如 28.227°N 附近,整个暖层都被亮带所占据,说明上层的固态粒子没有足够长的距离来完全融化,只是外表融化为一层水膜,这样在落入较厚的冻结层之后,易形成冰粒,这也与地面观测相符。

## 3 总结与讨论

本文利用 Cloudsat 卫星资料中的 ECMWF 温湿度、雷达反射率等产品结合探空秒数据和地面观测资料从云物理的角度分析了 2008 年初发生在我

国南方地区的一次典型冻雨天气的云结构特征,比较冻雨发生时云的垂直结构与降雪、降雨时的差异。

ECMWF 的温湿度廓线与探空秒数据的观测结果基本吻合,温度的垂直剖面揭示出,此次冻雨发生时温度廓线上存在明显的逆温层,结合湿度剖面发现,逆温层水汽充沛。融化层与次冻结层的相对厚度决定着最终的地面降水类型:无融化层时降雪;融化层较厚、次冻结层较薄时易出现冻雨;融化层较薄、次冻结层较厚时多出现冰粒;而无次冻结层时降雨。在 Cloudsat 卫星 10 个纬距的范围内显示出由雨向冻雨、冰晶、雪的转变。

雷达反射率因子能够观测出冻雨形成过程中出现的零度层亮带,且亮带刚好出现在 0 °C 等温线上界以下,证明冻雨是由上层的固态降水物下落到暖层时发生融化,再下落到近地面的次冻结层变成过冷水滴而形成,精细而直观地展示出基于经典“融冰过程”的冻雨形成机理。

Cloudsat 卫星作为一种新型的观测工具和手段,其有效载荷——3 mm 云剖面雷达在深入剖析云的垂直结构方面有着独特的视角,但其线形轨迹限制了 Cloudsat 资料的业务化应用,必须与常规观测资料相结合,在得到局部云团内部信息的基础上,进而了解大尺度范围不同云系的结构和演变特征,真正发挥其最大功效,提高对天气系统的精细分析水平。

## 参考文献

- [1] Root C J. Ice storm in Illinois[J]. *Mon Wea Rev*, 1912, 40(3): 373-384.
- [2] Okada T. Notes on the formation of glazed frost[J]. *Mon Wea Rev*, 1914, 42:284-286.
- [3] Leroy C. Meisinger the precipitation of sleet and the formation of glaze in the eastern United States, January 20 to 25, 1920, with remarks on forecasting[J]. *Mon Wea Rev*, 1920, 48(2):73-80.
- [4] Charles F. Brooks, The nature of sleet and how it is formed [J]. *Mon Wea Rev*, 1920, 48(2):69-72.
- [5] Spengler J D, Gokhale N R. Freezing of freely suspended, supercooled water drops in a large vertical wind tunnel[J]. *J Appl Meteor*, 1972, 11:1101-1107.
- [6] Stewart R E. Precipitation types in the transition region of winter storms[J]. *Bull Amer Meteor Soc*, 1992, 73(3):287-296.
- [7] Zerr R J. Freezing rain: An observational and theoretical study [J]. *J Appl Meteor*, 1997, 36:1647-1661.
- [8] Stewart R E, King P. Freezing precipitation in winter storms[J]. *Mon Wea Rev*, 1987, 115:1270-1279.
- [9] Bernstein B C. Regional and local influences on freezing drizzle, freezing rain, and ice pellet events[J]. *Wea Forecasting*, 2000, 15:485-507.
- [10] Cortinas Jr J V, Brill K F, Baldwin M E. Probabilistic forecasts of precipitation type [C]. Preprints, 16th Conf. on Probability and Statistics in the Atmospheric Sciences, 2002, Orlando, FL, AMS, 140-145.
- [11] Bourgouin P. A method to determine precipitation types[J]. *Wea Forecasting*, 2000, 15:583-592.
- [12] Szeto K K, Tremblay A, Guan H, et al. The mesoscale dynamics of freezing rain storms over eastern Canada[J]. *J Atmos Sci*, 1999, 56(10):1261-1281.
- [13] Riault J M, Stewart R E, A Milbrandt J, et al. On the simulation of winter precipitation types[J]. *J Geophys Res*, 2006, 111 (D18202), doi:10.1029/2005JD006665.
- [14] Tremblay A, Glazer A. An improved modeling scheme for freezing precipitation forecasts[J]. *Mon Wea Rev*, 2000, 128:1289-1308.
- [15] John Cortinas Jr. A climatology of freezing rain in the great lakes regions of north America [J]. *Mon Wea Rev*, 2000, 128:3574-3588.
- [16] Cortinas Jr J V, Bernstein B C, Robbins C C, et al. An analysis of freezing rain, freezing drizzle, and ice pellets across the United States and Canada: 1976-90 [J]. *Wea Forecasting*, 2004, 19: 377-390.
- [17] Forbes G S, Anthes R A, Thomson D W. Synoptic and mesoscale aspects of an Appalachian ice storm associated with cold-air damming[J]. *Mon Wea Rev*, 1987, 115:564-591.
- [18] Rauber R M, Ramamurthy M K Tokay A. Synoptic and mesoscale structure of a severe freezing rain event: The St. Valentine's Day ice storm [J]. *Wea Forecasting*, 1994, 9:183-208.
- [19] Regan M. Canadian ice storm 1998 [G]. *WMO Bull*, 1998, 47:250-256.
- [20] Czys R R, Scott R W, Tang K C, et al. A physical based, nondimensional parameter for discriminating between locations of freezing rain and ice pellets [J]. *Wea Forecasting*, 1996, 11:591-597.
- [21] George J. Huffman, Gene Alfred Norman. The supercooled warm rain process and the specification of freezing precipitation [J]. *Mon Wea Rev*, 1988, 116:2172-2182.
- [22] Robert M Rauber, Larry S Olthoff, Mohan K Ramamurthy. The relative importance of warm rain and melting processes in freezing precipitation events [J]. *J Appl Meteor*, 2000, 39: 1185-1195.
- [23] 丁一汇,王遵亲,宋亚芳,等. 中国南方 2008 年 1 月罕见低温

- 雨雪冰冻灾害发生的原因及其与气候变暖的关系[J]. 气象学报, 2008, 66(5): 808-825.
- [24] 高辉, 陈丽娟, 贾小龙, 等. 2008年1月我国大范围低温雨雪冰冻灾害分析Ⅱ. 成因分析[J]. 气象, 2008, 34(4): 101-106.
- [25] 赵珊珊, 高歌, 张强, 等. 中国冰冻天气的气候特征[J]. 气象, 2010, 36(3): 34-38.
- [26] 杨贵名, 孔期, 毛冬艳, 等. 2008年初“低温雨雪冰冻”灾害天气的持续性原因分析[J]. 气象学报, 2008, 66(5): 836-849.
- [27] 王亚非, 李琰, 李萍云, 等. 2008年初中国南方雪灾大尺度环流背景分析[J]. 气象学报, 2008, 66(5): 826-835.
- [28] 王东海, 柳崇健, 刘英, 等. 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, 2008, 66(3): 405-422.
- [29] 黄小玉, 黎祖贤, 李超, 等. 2008年湖南极端冰冻特大灾害天气成因分析[J]. 气象, 2008, 34(11): 47-53.
- [30] 杜小玲, 彭芳, 武文辉. 贵州冻雨频发地带分布特征及成因分析[J]. 气象, 2010, 36(5): 92-97.
- [31] 孙建华, 赵思雄. 2008年初南方雨雪冰冻灾害天气的大气层结和地面特征的数值模拟[J]. 气候与环境研究, 2008, 13(4): 510-519.
- [32] 孙建华, 赵思雄. 2008年初南方雨雪冰冻灾害天气静止锋与层结构分析[J]. 气候与环境研究, 2008, 13(4): 368-384.
- [33] 曾明剑, 陆维淞, 梁信忠, 等. 2008年初中国南方持续性冰冻雨雪灾害形成的温度场结构分析[J]. 气象学报, 2008, 66(6): 1043-1052.
- [34] 孙晶, 王鹏云, 李想, 等. 北方两次不同类型降雪过程的微物理模拟研究[J]. 气象学报, 2007, 65(1): 29-44.
- [35] 樊志超, 高继林. 湖南特大冰冻灾害的云物理特征与人工影响技术探讨[J]. 气象, 2009, 35(11): 84-92.
- [36] Glickman T S. Glossary of Meteorology[M]. 2d ed. Amer Meteor Soc, 2000, 855pp.
- [37] Hooper J E N. The bright band-a phenomenon associated with radar echoes from falling rain[J]. Quart J Roy Meteor Soc, 1950, 76: 125, 462-465.