

杨洁, 杨财源, 王兵, 等. 广东一次罕见冰粒伴雨雪过程和云结构分析[J]. 气象研究与应用, 2020, 41(3): 85–89.

Yang Jie, Yang Caiyuan, Wang Bing, et al. A rare ice particle accompanied by rain and snow in Guangdong and cloud structure analysis[J]. Journal of Meteorological Research and Application, 2020, 41(3): 85–89.

# 广东一次罕见冰粒伴雨雪过程和云结构分析

杨洁<sup>1</sup>, 杨财源<sup>2</sup>, 王兵<sup>3</sup>, 刘峰<sup>1</sup>

(1 中国民用航空中南空中交通管理局气象中心, 广州 510405; 2 广州飞机维修工程有限公司, 广州 510470;

3 广东省气候中心, 广州 510080)

**摘要:** 利用探空资料和 MODIS 卫星数据, 对 2016 年 1 月 23—24 日广东尤其是广州白云机场一次罕见的冰粒伴雨雪天气进行其垂直大气环境特征和云结构分析。结果表明, 广东省处于高湿区, 白云机场在暖气团控制向冷气团控制的转换过程中产生冰粒, 冰粒天气主要以融化机制为主。白云机场上空的云类型变化为雨层云—雨层云混合积雨云—抬高的雨层云, 广东省从北往南依次出现雨层云混合积雨云, 伴随着降雪冰粒天气。

**关键词:** MODIS 卫星数据; 冰粒伴雨雪天气; 融化机制; 云类型变化

**中图分类号:** P457

**文献标识码:** A

**doi:** 10.19849/j.cnki.CN45-1356/P.2020.3.15

**OSID:**



## 引言

冰粒是透明或半透明的丸状固态降水, 直径小于 5mm 且不易破碎<sup>[1]</sup>。冰粒主要是过冷却水滴或较大的融化雪片在下落过程中冻结而成, 当地面观测到冰粒时, 高空会有过冷却降水即冻雨<sup>[2]</sup>。冰粒在飞机起飞之后或起降期间会发生严重的积冰危害, 还会让地面的除冰液失效, 并且冰粒天气经常伴随着降雨或降雪天气, 成为航空和气象工作者关注的危险天气之一<sup>[3–9]</sup>。研究表明, 冰粒的产生机制有两种: 一种是融化机制。大气温度垂直结构自上而下分别为“冰晶层—暖层—冷层”, 上层冰晶层中的冰晶或者雪花下落到中间的暖层部分融化, 然后进入到低空的冷层后再次冻结成冰粒落到地面<sup>[10–12]</sup>; 另一种是暖雨机制。大气垂直结构无冰晶层, 水滴增长为毛毛雨滴, 然后在冷层中冻结为冰粒后落到地面<sup>[13]</sup>。我国一些研究者对冰粒天气进行过研究。其中, 汪洁<sup>[14]</sup>通过分析衢州冰粒的天气气候特征, 发现冰粒主要出现在冬半年 1—2 月, 出现时中低纬度地区环流平直, 西南气流强大, 是在暖气团向冷气团过渡时产生

的。漆梁坡<sup>[15]</sup>认为我国冰粒以融化机制为主, 同时冰粒天气的云顶高度普遍高于冻雨天气, 冰粒天气的暖层厚度和强度均小于冻雨天气。周中意等<sup>[16]</sup>分析了乳源气象站 1966—2010 年的冰粒观测资料, 采用气候倾向率线性回归法, 发现冰粒天气出现在强冷空气、寒潮等天气系统, 气温 5℃ 以下、风速  $\leq 3.0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  时最有利于形成冰粒。李杰等<sup>[17]</sup>选取 2001—2013 年中国民航机场例行和特殊观测资料以及 50 个探空站资料分析了冰粒的垂直环境特征, 发现冰粒降水集中在黄河下游、长江中下游地区, 发生前后湿度都比较大, 发生期间风速变化比较小, 一般温度逐渐降低、气压逐渐升高。

2016 年 1 月 23 日凌晨开始, 韶关市南雄、乐昌、新丰等地山区先后降下小雪或者雨夹雪, 乳源大桥镇和乐昌云岩、梅花一带的高海拔地区更是降下罕见的“棉花雪”。2016 年 1 月 23 日 20 时 30 分(全文均为北京时间), 广州天河区天河客运站、越秀区梅花村、荔湾区西门口、海珠区中山大学等地皆出现冰粒现象。2016 年 1 月 24 日 7 时广州白云机场出现冰粒伴雨天气, 12 时 30 分左右广州出现降雪。深

圳 24 日出现冰粒伴雪天气。以往的研究冰粒天气的文章通常只分析了大气垂直结构,并未研究过对应的云结构。本文将采用探空资料和 MODIS 卫星数据针对广东这次冰粒伴雨雪天气分析垂直大气环境特征和云微物理特征,以广州白云机场为例探索冰粒天气的形成机制,为提高冰粒雨雪天气预报水平,保障民航飞行安全提供参考。

## 1 数据来源

分析的环流背景资料和垂直速度数据来自世界时 2016 年 1 月 23 日 12 时和 24 日 00 时 NCEP GDAS/FNL 一天 4 次的再分析资料,网格分辨率为  $1^\circ \times 1^\circ$ 。探空资料来自 Wyoming 大学世界时 2016 年 1 月 23 日 12 时和 24 日 00 时的探空数据(网址: <http://weather.uwyo.edu/upperair/sound.html>)。卫星资料来自世界时 2016 年 1 月 23 日 06:10 时和 24 日 05:15 时的 MODIS 卫星资料的二级云产品数据(MYD06\_L2.A2016023.0610.061.2018059005718.hdf 和 MYD06\_L2.A2016024.0515.061.2018059011738.hdf),网格分辨率为  $0.0135^\circ \times 0.0155^\circ$ 。

## 2 天气形势

2016 年 1 月 23 日 20 时 500hPa 华南受平直的东西气流影响,700hPa 广东北部有弱的切变线,白云机场受较强的西南风气流影响,850hPa 华南受高压脊底部偏东气流影响,华南地面受冷高压控制。从 850hPa 至 500hPa 华南均处于相对湿度 90%~100% 的高湿区。从 700hPa 至 850hPa,粤北温度在  $0^\circ\text{C}$  附近及其以下。综合来看,700hPa 切变线、低层冷高压和温度有利粤北发生降雪天气,白云机场处

于高湿区,23 日一直下小雨。

24 日 08 时,500hPa 华南受西南气流控制,700hPa 横槽转竖影响华南,白云机场位于槽线附近,地面冷空气已南推至华南沿海,偏北气流加强。700hPa 高度层  $0^\circ\text{C}$  温度线移到白云机场附近,从温度分布看是冷空气入侵中低大气层,白云机场在暖气团控制向冷气团控制的转换过程中产生冰粒。

## 3 冰粒天气的探空特征

地面的降水状态取决于大气的垂直结构特征。由于白云机场的冰粒天气过程记录准确详实,本文以此为例,采用离白云机场最近的 59280 站点探空资料来替代分析白云机场的冰粒前后大气垂直结构特征变化。云中是否存在暖层是区分冰粒天气融化机制和暖雨机制的重要参考。根据漆梁坡<sup>[15]</sup>的研究, $-10^\circ\text{C}$  线高度是判断云中是否有冰晶的关键阈值,若云顶高度超过  $-10^\circ\text{C}$  线高度则主要以融化机制为主,反之为暖雨机制为主。而云顶高度可采用 Poore 等<sup>[18]</sup>的温度(T)和露点(Td)判别法: $T \geq 0^\circ\text{C}$ ,  $T - T_d \leq 2^\circ\text{C}$  为云内; $-20^\circ\text{C} \leq T < 0^\circ\text{C}$ ,  $T - T_d \leq 4^\circ\text{C}$  为云内; $T < -20^\circ\text{C}$ ,  $T - T_d \leq 6^\circ\text{C}$  为云内。当云顶温度  $> -10^\circ\text{C}$ ,云中水滴基本维持过冷水状态,因此将暖层定义为  $T > 0^\circ\text{C}$ 。图 1 为 2016 年 1 月 23 日 20 时、24 日 08 时 59280 站点的温度 T 和露点 Td 廓线图,可以发现图 1a 中冰粒发生前 766~650hPa 温度和露点温度均大于  $0^\circ\text{C}$ ,冰粒发生后(图 1b)的温度 T 和露点温度 Td 在同等高度都低于冰粒发生前(图 1a),冰粒发生前温度廓线为冷—暖—冷结构,冰粒发生后为冷—暖结构。表 1 显示冰粒前后云顶高度都高于  $-10^\circ\text{C}$  线高度,表明云中一直存在冰晶层,主要以融化机制为

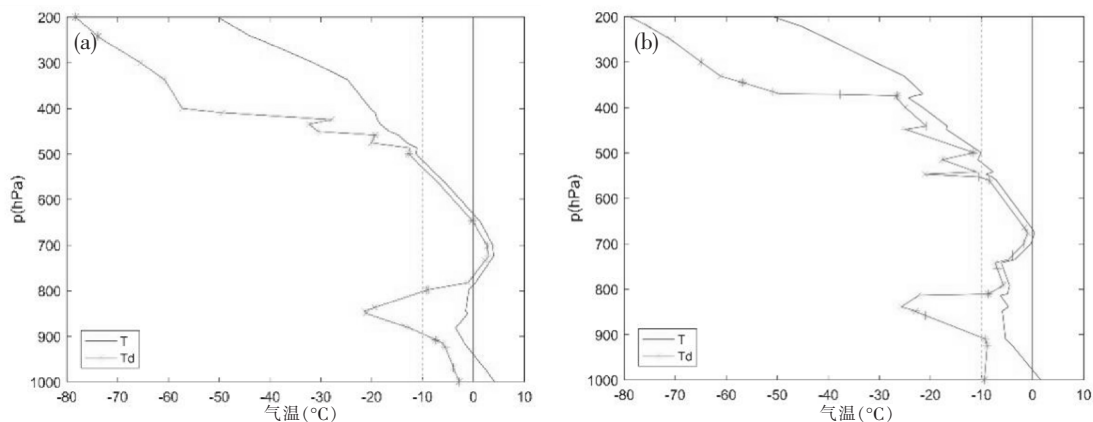


图 1 北京时间 2016 年 1 月 23 日 20 时(a)、24 日 08 时(b)59280 站点的温度 T 和露点温度 Td 廓线图  
蓝色直线为温度廓线,红色——\*线为露点廓线,竖实线为  $0^\circ\text{C}$  线,竖虚线为  $-10^\circ\text{C}$  线

表 1 2016 年 1 月 23 日 20 时、24 日 08 时 59280 站的温度和露点的特征量

时间	云顶高度/hPa	-10° C 线高度/hPa	暖层位置/hPa	暖层最高气温/° C
23 日 20 时	487	503	783~647	4.0
24 日 08 时	374	515	676	0.4

主。24 日 08 时冷空气南下,云顶高度变高了,暖层变薄。冰粒在下落时经过低空的暖层,由于暖层较弱,冰粒部分融化,仍以冰粒的形式降落到地面。24 日 7 点白云机场下冰粒时地面温度为 4℃,符合李杰等<sup>[17]</sup>指出的冰粒天气大多发生在地面温度-4℃~4℃的观点。

从 59280 站的风廓线图(图略)来看,23 日 12 时发生冰粒前,暖层(783~647hPa)的风向由 647hPa 的西南偏西风转到 783hPa 的偏北风,风速由 29.8m·s<sup>-1</sup>减小为 7.7m·s<sup>-1</sup>,而 24 日 08 时发生冰粒后,中低大气层受冷平流影响,暖层(676hPa)的风向

为西北偏西风,风速为 25.2m·s<sup>-1</sup>。垂直速度(图 2)是根据 FNL 资料所画(59280 站经纬度取 113°E,23°N),23 日 20 时 500hPa 以上大气层都是上升运动(垂直速度小于 0),500hPa 以下均为下沉运动(垂直速度大于 0);24 日 08 时高层(300hPa 以上)为下沉运动(垂直速度大于 0),300~550hPa 以上大气层都是上升运动(垂直速度小于 0),550hPa 以下基本为下沉运动(垂直速度大于 0),除了 700hPa 为轻微上升运动(垂直速度为-0.067Pa·s<sup>-1</sup>)。发生冰粒前后暖层均为下沉运动。

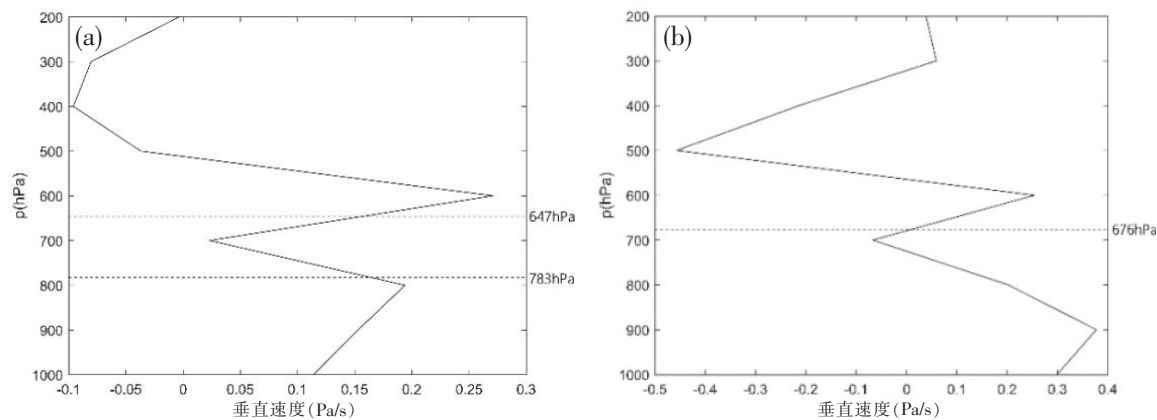


图 2 59280 站点垂直风速廓线图  
(a)2016 年 1 月 23 日 20 时;(b)24 日 08 时。虚线为暖层

结合图 1、表 1 和图 2 可看出,23 日 12 时暖层比 24 日 08 时的暖层深厚,冰晶下降到暖层,在 674hPa~700hPa 有个垂直下降速度减小的过程,同时暖层的最高温度为 4℃,有足够的时间和温度融化成雨滴降落到地面;随着冷空气入侵,暖层厚度变得薄弱,暖层的最高温度降低为 0.4℃,冰晶部分融化,成为小冰粒降落到地面。

4 冰粒雨雪天气的云微物理特征

采用 MODIS 资料分析 23 日和 24 日广东省的云微物理特征(云顶温度、云顶高度、云相态、有效粒子半径、云光学厚度、云水路径)。23 日凌晨开始,韶

关市南雄(114.31°E,25.12°N)、乐昌(113.35°E,25.13°N)、新丰(114.08°E,24.07°N)等地出现降雪,23 日 14 时 10 分的 MODIS 数据可以看到这几个地方的云顶温度为 250~260K,云顶高度为 6 000~8 000m,云相态为不确定,有效粒子半径为 15~20μm,云光学厚度为 20~40,云水路径为 550~600g·m<sup>-2</sup>。白云机场 23 日 14 时为小雨天气,云顶温度为 266K,云顶高度为 5 250m,云相态为水相态,有效粒子半径为 11μm,云光学厚度为 33,云水路径为 239g·m<sup>-2</sup>。表 2 为吴晓等<sup>[19]</sup>基于 MODIS 总结的各种类型云的微物理特征,比照表 2,可看到降雪的区域以积雨云为主,而白云机场以雨层云为主,降雪区域的云水路径

表 2 各种类型云的微物理特征

云类	云顶高度/m		云粒子有效半径/ $\mu\text{m}$		云光学厚度		云相态
	平均	范围	平均	范围	平均	范围	
层积云/层云	1.3	0~2.5	13.5	2~25	5.5	1~10	水
高层云/高积云	3.5	1.5~5.5	17	4~30	17	2~32	水/冰
积云	3.3	0.2~6.5	27.5	5~50	26.5	3~50	水/冰
积雨云	12	6~20	27.5	5~72	50	25~100	冰
雨层云	8	4~11	17	5~50	50	25~100	水/冰
卷云	9.5	6.5~15	65	10~120	3.5	0.01~8	冰

比白云机场高很多,表明积雨云前部对流活动发展旺盛,水汽充沛。

24 日 13 时 15 分的 MODIS 数据显示,白云机场的云顶温度为 252K,云顶高度为 7650m,云相态为不确定,有效粒子半径为 10 $\mu\text{m}$ ,云光学厚度为 15,云水路径为 95g $\cdot\text{m}^{-2}$ 。云水路径较小,比照表 2,可看到白云机场 13 时以雨层云为主,但是云高抬高了,水汽量减小,午后白云机场小雨停止,转为晴好天气。24 日 12 时 30 分左右广州天河出现降雪,大约持续了 1h,深圳 24 日也出现了冰粒伴雪。白云机场以南天河区和深圳区域的云顶温度为 250~260K,云顶高度为 6 000~10 000m,云相态为不确定,有效粒子半径为 10~20 $\mu\text{m}$ ,云光学厚度为 20~100,云水路径为 300~600g $\cdot\text{m}^{-2}$ ,以积云/积雨云为主。由此可以看到,小雨天气是受雨层云影响,冰粒降雪的天气基本是由积雨云团造成的。

综上所述,随着冷空气的南下,白云机场上空的云类型变化为雨层云—雨层云混合积雨云—抬高的雨层云,相应地白云机场的降水相态变化为小雨—冰粒—晴朗。广东省从北往南依次出现雨层云混合积雨云,伴随着降雪冰粒天气。

5 结论

采用探空资料和 MODIS 卫星数据针对 2016 年 1 月 23 日—24 日广东尤其是广州白云机场的冰粒伴雨雪天气分析垂直大气环境特征和云微物理特征,得到以下结论:

(1)此次罕见冰粒伴雨雪过程中,广东省处于大湿区,在切变线和冷高压影响下,冷空气入侵中低大气层,白云机场在暖气团控制向冷气团控制的转换过程中产生冰粒。

(2)通过 59280 站点探空资料分析白云机场冰粒

天气发生前后的温度、露点、风向、风速的廓线,发现冰粒天气主要以融化机制为主。23 日 12 时暖层比 24 日 08 时的暖层深厚,冰晶下降到暖层,在 674~700hPa 有个垂直下降速度减小的过程,同时暖层的最高温度为 4 $^{\circ}\text{C}$ ,有足够的时间和温度融化成雨滴降落到地面;随着冷空气入侵,暖层厚度变得薄弱,暖层的最高温度降低为 0.4 $^{\circ}\text{C}$ ,冰晶部分融化,成为小冰粒降落到地面。

(3)MODIS 资料显示,冰粒降雪天气区域以积雨云为主,云水路径大,水汽充沛。随着冷空气的南下,白云机场上空的云类型变化为雨层云—雨层云混合积雨云—抬高的雨层云,相应地白云机场的降水相态变化为小雨—冰粒—晴朗。广东省从北往南依次出现雨层云混合积雨云,伴随着降雪冰粒天气。

参考文献:

[1] 《大气科学辞典》编委会.大气科学辞典[M].北京:气象出版社,1994:156,774.

[2] Hanesiak J, Stewart R E. The Mesoscale and Microscale Structure of a Severe Ice Pellet Storm [J]. Mon Wea Rev, 1995, 123:3144-3162.

[3] Department of Transportation: Federal Aviation Administration. FAA notice N8000.309.USA[Z], 2005.

[4] 马宗晋.2008 年华南雪雨冰冻巨灾的反思[J].自然灾害学报,2009,18(2):1-3.

[5] 胡爱军.论气象灾害综合风险防范模式——2008 年中国南方低温雨雪冰冻灾害的反思[J].地球科学进展, 2010,29(2):159-165.

[6] 杜小玲,高守亭,彭芳.2011 年初贵州持续低温雨雪冰冻天气成因研究[J].大气科学,2014,38(1):61-72.

[7] Cortinas J R, Bernstein B C, Robbins C C, et al. An analysis of freezing rain, freezing drizzle, and ice pellets across the United States and Canada[J]. Wea Forecasting, 2004, 19:377-390.



- [8] 苗春生, 赵瑜, 王坚红. 080125 南方低温雨雪冰冻天气持续降水的数值模拟[J]. 大气科学学报, 2010, 33(1): 25–33.
- [9] 彭艳, 王钊, 刘安麟, 等. 2008 年 1 月中国南部低温雨雪冰冻天气特征及其与东亚大气环流异常探讨[J]. 大气科学学报, 2010, 33(5): 634–640.
- [10] Huffman G J, Norman G A. The super cooled warm rain process and the specification of freezing precipitation[J]. Mon Wea Rev, 1988, 116(11): 2172–2182.
- [11] Kajikawa M, Kikuchi K Y, Asuma Y, et al. Supercooled drizzle formed by condensation-coalescence in the mid-winter season of the Canadian Arctic[J]. Atmos Res, 2000, 52: 293–301.
- [12] Rauber R M, Olthoff L S, Ramamurthy M K. The relative importance of warm rain and melting processes in freezing precipitation events [J]. J Appl Meteor, 2000, 39: 1185–1195.
- [13] Bernstein B C. Regional and local influences on freezing drizzle, freezing rain, and ice pellet events[J]. Weather and Forecasting, 2000, 15: 485–508.
- [14] 汪洁. 衢州冰粒的天气气候特征分析[J]. 浙江农业科学, 2011(4): 927–929.
- [15] 漆梁波. 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, 2012, 38(7): 769–778.
- [16] 周中意, 陈海辉, 曾健兵, 张洁平. 乳源冰粒的天气气候特征[J]. 广东气象, 2012, 34(5): 27–28.
- [17] 李杰, 郭学良, 盛日峰, 李兴宇. 我国冰粒降水天气的观测特征统计分析[J]. 大气科学学报, 2016, 39(3): 349–360.
- [18] Poore K D, Wang J H, Rossow W B. Cloud layer thicknesses from a combination of surface and upper-air observation [J]. J Climate, 1995, 8(3): 550–568.
- [19] 吴晓, 游然, 王旻燕, 等. 基于 MODIS 云宏微观特性的卫星云分类方法[J]. 应用气象学报, 2016(2): 201–208.

## A rare ice particle accompanied by rain and snow in Guangdong and cloud structure analysis

Yang Jie<sup>1</sup>, Yang Caiyuan<sup>2</sup>, Wang Bing<sup>3</sup>, Liu Feng<sup>1</sup>

(1. Meteorological Center of Civil Aviation Central South Air Traffic Administration of China, Guangzhou 510405; 2. Guangzhou Aircraft Maintenance Engineering Co., Ltd., Guangzhou 510470; 3. Guangdong Climate Center, Guangzhou 510080)

**Abstract:** Using radiosonde data and MODIS satellite data, this paper analyzed the vertical atmospheric environment characteristics and cloud structure of a rare ice particle with rain and snow weather in Guangdong, especially Guangzhou Baiyun Airport from January 23 to 24, 2016. The results show that Guangdong Province is located in a humid area, the ice particles produced during the transition from warm air mass control to cold air mass control at Baiyun Airport. The main mechanism of ice particle weather is melting. The cloud types over Baiyun Airport changed into rain layer cloud, mixed cumulonimbus cloud and raised rain layer cloud. From north to south in Guangdong Province, there were mixed cumulonimbus clouds with snowfall and ice particles.

**Key words:** MODIS satellite data; ice particles accompanied by rain and snow; melting mechanism; cloud type changes