

柳贵钧, 王飞, 沈晗, 等. 2018. 北京首都国际机场冻雨过程的模拟及其产生的可能机制 [J]. 气候与环境研究, 23 (2): 235–240. Liu Guijun, Wang Fei, Shen Han, et al. 2018. Numerical simulation of a freezing-rain process in Beijing Capital International Airport and the mechanism for its formation [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 23 (2): 235–240, doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2018.17051.

# 北京首都国际机场冻雨过程的模拟及其产生的可能机制

柳贵钧 王飞 沈晗 冯向阳 张伟

中国民用航空华北地区空中交通管理局气象中心, 北京 100621

**摘要** 为了探讨北京首都国际机场冻雨过程产生的可能机制, 利用 NCEP 再分析资料、风云 2 号 E 星 (FY-2E) 的云顶亮温 (Black Body Temperature, TBB) 逐小时资料及风云 3 号 A 星 (FY-3A) 反演的云顶高度日平均资料做为检验依据, 使用美国非静力中尺度模式 (Weather Research and Forecasting, WRF) 对 2013 年 1 月 31 日发生在首都机场附近地区的一次冻雨过程进行模拟, 得出以下结论: 1) 模拟结果中的云顶温度与 FY-2E 的 TBB 逐小时资料对应较好; 此次冻雨过程, 整个降水云系云顶温度在 0~−6 °C 之间, 模拟结果水成物的垂直分布也得到了较好的印证; 通过 FY-3A 反演的云顶高度日平均资料的检验, 证明此次冻雨过程的云高基本维持在 3 km 左右, 而且云微物理固态项的含量少。2) 云顶温度、云顶高度实况与模式模拟表明此次过程是一次典型的暖雨机制冻雨, 这说明产生北方冻雨的可能机制并不单一, 冰相机制与暖雨机制可以同时存在。

**关键词** 冻雨 暖雨机制 WRF 模式 FY-2E 数据

**文章编号** 1006-9585 (2018) 02-0235-06

**中图分类号** P435

**文献标识码** A

doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2018.17051

## Numerical Simulation of a Freezing-Rain Process in Beijing Capital International Airport and the Mechanism for Its Formation

LIU Guijun, WANG Fei, SHEN Han, FENG Xiangyang, and ZHANG Wei

*Meteorological Center of Air Traffic Regulation of Civil Aviation in North China, Beijing 100621*

**Abstract** In order to investigate the possible mechanism of freezing rain process, the WRF model (Weather Research and Forecasting) was used to simulate a freezing-rain process occurred on 31 Jan 2013 in the area of the Beijing Capital International Airport. The NCEP reanalysis data, the Black Body Temperature (TBB) of FY-2E, the daily average cloud height data of FY-3A are used to verify the model simulation. Major conclusions are as follows: 1) The cloud top temperature of the simulation is consistent with TBB of FY-2E. During the freezing rain process, the cloud top temperature varied between 0–−6 °C, and the simulated vertical distribution of the hydrometeors agree well with observations. According to the cloud top height derived from FY-3A observations, it is found that the cloud top in the freezing-rain process basically remained at around 3 km, and the clouds contained less microphysical solid contents. 2) Observed cloud top temperature and height and the simulation results show that this is a typical warm freezing rain process. This result indicates that the mechanism for the formation of freezing rain in northern China may not be single.

**收稿日期** 2017-03-23; **网络预出版日期** 2017-06-22

**作者简介** 柳贵钧, 男, 1967 年出生, 本科, 工程师, 主要从事航空气象预报。E-mail: guijun\_liu@163.com

**通讯作者** 王飞, E-mail: wangf43@163.com

**资助项目** 民航华北空管局科技立项项目 201405

**Funded by** Science and Technology Project of Civil Aviation North China Air Traffic Administration (Grant 201405)

Ice-crystal processes and warm-rain processes may simultaneously exist during the formation of freezing rain.

**Keywords** Freezing-rain, warm-rain mechanism, WRF model, FY-2E data

## 1 引言

冻雨是重要气象灾害,会给人民生产生活的诸多方面产生影响(欧建军等,2011)。由于云中的过冷水滴下落与温度低于  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$  的物体碰撞就会立即冻结,因此,冻雨下落在飞行器表面,能严重影响飞行器的动力结构,增强飞机在飞行中的不稳定性,从而影响民航飞行安全。

冻雨过程及机制历来是国内外学者的研究热点,尤其在2008年我国长江流域至华南区域发生了大范围冻雨天气之后,国内学者从不同角度对冻雨发生、发展机制方面的研究成果大量出现。李崇银等(2008)、王东海等(2008)等从气候学的角度对此次冻雨的成因进行了分析;还有一些学者从2008年的此次过程的影响系统演变过程出发,针对具体的天气形势、冻雨过程中各个物理量的变化进行研究(王志云等,2008;赵培娟等,2008;张录青等,2008;李登文等,2009)。以上研究结果表明:2008年的冻雨过程符合 Huffman and Norman (1988) 提出的冰相冻雨机制,即在冻雨过程中,大气温度垂直结构自上而下为冷层—暖层—冷层。云中固态项从冷层(温度小于  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) 下到暖层(大于  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ ),固态项融化为液态,继续下落至冷层(温度小于  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ ),液态项保持过冷却状态,碰到地面或物体而冻结。Huffman and Norman (1988) 在研究中同时指出,冻雨还有一种机制为暖雨机制,即大气垂直结构没有大于  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$  的暖层,整层为小于  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$  的冷层,液态项直接以过冷却状态下落到地面冻结。欧建军等(2011)及其他学者基于 Huffman and Norman (1988) 等的研究成果,对2008~2010年我国冻雨的时空分布及温湿结构特征进行了分析,指出我国冻雨主要以暖雨机制为主,占总数的73%,冰相机制占27%;我国北方的冻雨机制比较单一,主要为冰相机制,南方为两种机制共存。

以往的研究由于受限于常规资料的分辨率,具

有明显的局地性,但是借助于数值模拟则可以探讨大范围冻雨过程的发生机制(江杨等,2016)。江杨等(2016)利用 WRF 模式对2010年安徽省一次冻雨过程进行数值模拟,对冻雨发生条件进行分析,确定冻雨与逆温层强度、冷空气气垫厚度和变温幅度有一定关系。张昕等(2015)利用 WRF 模式针对2008年贵州冻雨进行数值模拟,发现模拟结果可以较好地反映高低空环流形势场特征,揭示了大气层结结构特征及云物质特征。蔡英娜等(2015)利用观测资料较好地模拟出降水过程,得出冻雨的云物理过程和形成机制。传统研究认为北方的冻雨多为冰相机制冻雨(欧建军等,2011),但此次过程中的冻雨的机制却不符合冰相机制,因此本文利用 WRF 模式针对2013年1月31日清晨出现在北京地区的冻雨过程进行模拟,采用 FY-2E、FY-3A 卫星反演资料检验模式结果,并结合 Huffman and Norman (1988) 的理论,探讨此次冻雨的微物理过程及降水机制类型,确定北方冻雨机制,为民航华北气象中心对此类灾害天气预报提供参考。

## 2 资料和试验设计

### 2.1 资料选取

本文分析研究所用的资料包括时间分辨率为6h的全球分析资料(Final Operational Global Analysis, FNL);北京市自动观测站每5分钟的降水资料;FY-2E 云顶亮温逐小时资料、FY-3A 反演计算的云顶高度日平均资料。模式的大尺度环流背景场由 NCEP 再分析资料给出。

### 2.2 试验设计

数值模式版本选择美国非静力中尺度模式 WRF3.2 版本,试验设计见表1。积分时段为1月30日12:00(世界协调时,下同)至2月1日00:00。积分方式采用双向嵌套积分。

表1 模式试验设计

Table 1 Design of model experiment

模式中心点	模式区域	格点数(纬 向×经向)		积云对流参					
		格距/km	格距/km	数化方案	云微物理方案	边界层方案	陆面方案	长波辐射方案	短波辐射方案
(40.06°N, 15.24°E)	D01	100×100	36	KF方案	WSM6方案	MYJ方案	Noah方案	RRTM方案	Dudhia方案
	D02	163×160	12	KF方案	WSM6方案	MYJ方案	Noah方案	RRTM方案	Dudhia方案
	D03	214×208	4		WSM6方案	MYJ方案	Noah方案	RRTM方案	Dudhia方案

### 3 天气实况及模拟结果分析

#### 3.1 天气实况

2013 年 1 月 31 日清晨, 北京首都国际机场及北京市区大部出现冻雨天气, 持续至中午前后转为小雪, 首都机场自动观测系统测得的总降水量为 0.6 mm, 由于冻雨发生时间出现在北京交通高峰期, 市区多个路段出现了连环交通事故。

冻雨过程出现的前一天 (1 月 30 日), 850 hPa 高度 (图 1a) 偏南气流加强, 北京区域及华北南部 850 hPa 相对湿度达到了 80% 以上, 水汽条件较好, 而在 500 hPa 的高度场方面, 华北区域处于广阔槽区底部, 大气环流形势稳定。因此华北气象中心值班人员综合考虑后, 得出预报结论: 1 月 31 日清晨到傍晚, 首都机场将出现一次普通的降雪天气, 降水量级可达小到中雪。但是此次降水过程前期却是冻雨。尤其是首都机场在此时段为航班进出港高峰期, 因此对运行产生了较大的影响。

#### 3.2 云顶温度和云顶高度模拟分析

相当黑体温度 (Black-Body Temperature, TBB) 是气象卫星在大气窗区的红外探测通道获取的云顶和无云或少云区地球表面的向外辐射 (孟智勇等, 2002)。欧建军等 (2011) 统计的无暖层暖雨机制冻雨中, 云顶温度较高, 温度应高于  $-7^{\circ}\text{C}$ ; 而云顶温度值对冻雨的机制影响很大; 此外, 在云顶高度方面, 暖雨机制冻雨的云高普遍不高, 一般低于 3 km。胡志晋等 (2008) 在研究中有类似的结果: 暖雨机制冻雨出现的一个必要条件是云顶温度较高, 液态项不会冻结, 以过冷水形式存在; 云

层较厚但云顶高度不高也是暖雨机制冻雨形成的一个必要条件。因此, 有必要依据卫星云顶亮温资料、反演的云顶高度资料验证此次冻雨过程。

此次冻雨过程 1 月 31 日清晨开始, 持续到当天中午前后转为小雪, 因此选定的分析时段为 31 日 00:00 至 03:00, 图 2 选取 FY-2E 的云顶亮温逐小时实况资料。而利用 WRF 输出结果进行云顶温度计算, 得出模拟结果 (图略)。对比实况与模拟结果显示, 在冻雨时段, 整个华北地区从渤海湾至山西中部均有一条明显的云顶温度大值区, 在  $0\sim-6^{\circ}\text{C}$  之间, 确定了模拟结果的准确性。

从 WRF 的模拟结果可以发现, 在冻雨时段, 北京区域的云顶温度与实况较为接近, 略高于  $-6^{\circ}\text{C}$ ; 整个华北地区从渤海湾至山西中部有一条明显的云顶温度大值区, 在  $0\sim-6^{\circ}\text{C}$  之间, 与暖雨机制冻雨形成条件中云顶温度值接近; 而  $40^{\circ}\text{N}$  以北及山东半岛区域的云顶温度较低, 其中  $41^{\circ}\text{N}$  以北山区的云顶温度最低值达到了  $-40^{\circ}\text{C}$ , 从总体上看, 此次过程云顶温度的模拟是比较成功的, 在云顶温度的条件上符合暖雨机制冻雨。

而在云顶高度验证方面, 选取 FY-3A 反演计算的日平均云顶高度资料, 31 日 (图 3) 整个北京地区南部的云顶高度普遍在 3 km 左右, 北京北部的云顶高度较低, 低于 3 km, 云顶最高区域处于北京西南, 达到了 3.6 km, 结果与欧建军等 (2011) 的研究结果相一致。

从首都机场纬向垂直剖面的模拟结果 (图 4a-4d) 可以发现, 在冻雨阶段, 云中液态微物理项 (阴影) 存在的高度基本维持在 3 km 左右, 且大值区接地, 云水混合比与雨水混合比之和超过了

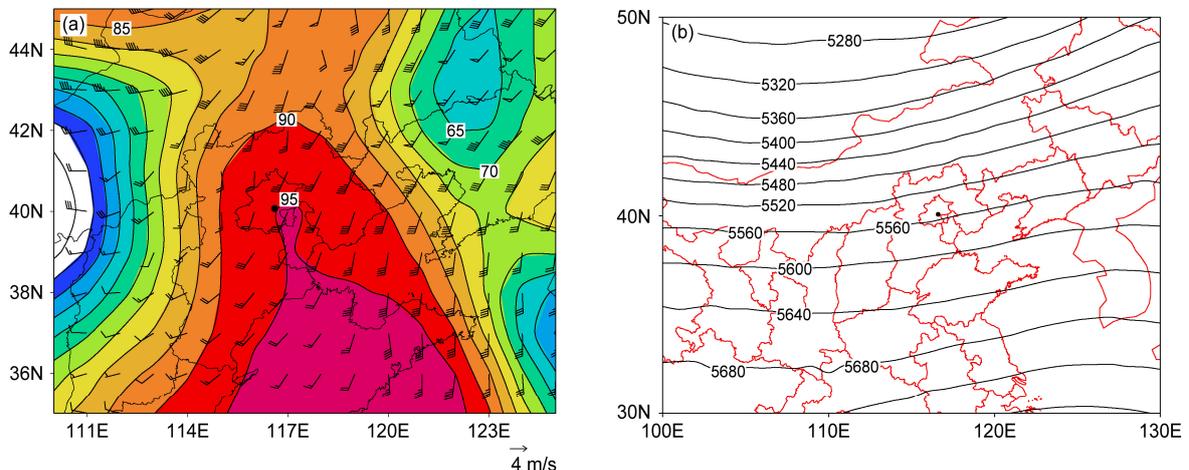


图 1 2013 年 1 月 30 日 (a) 850 hPa 相对湿度 (%) 与风场和 (b) 500 hPa 位势高度 (单位: gpm)

Fig. 1 (a) 850-hPa relative humidity (%) and winds and (b) 500-hPa geopotential height (gpm) on 30 Jan 2013

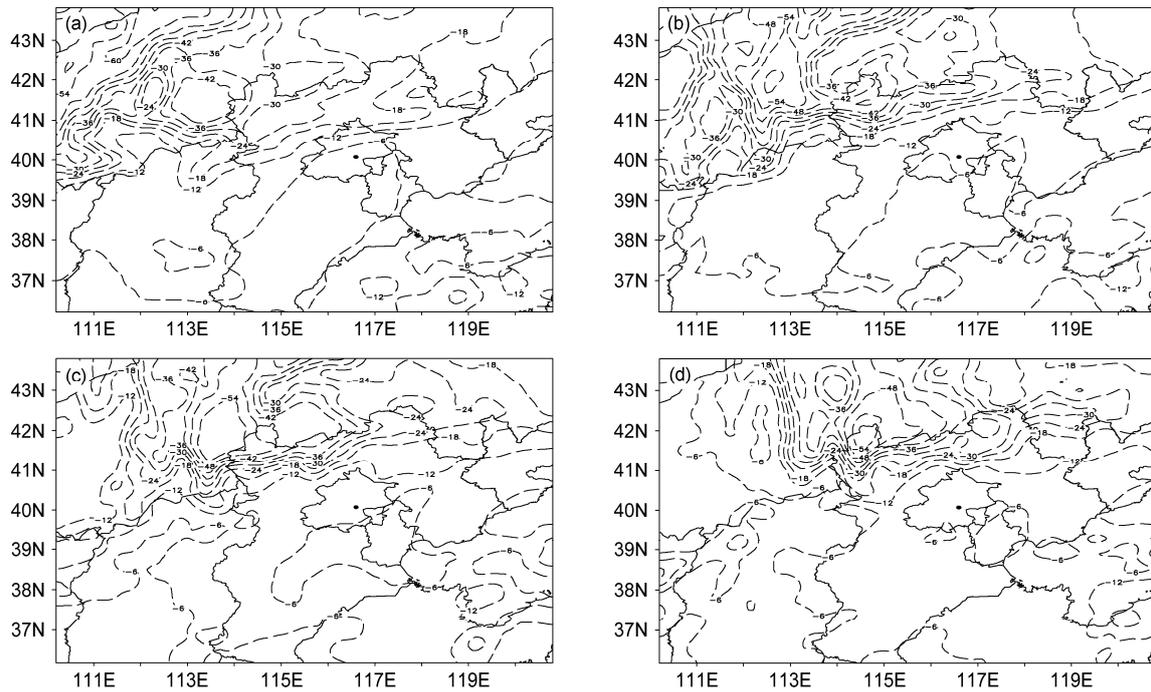


图2 FY-2E 卫星 2013 年 1 月 31 日云顶亮温 (TBB) 实况 (单位:  $^{\circ}\text{C}$ ): (a) 00:00; (b) 01:00; (c) 02:00; (d) 03:00

Fig. 2 Black Body Temperature (TBB,  $^{\circ}\text{C}$ ) from FY-2E satellite observations on 31 Jan 2013: (a) 0000 UTC; (b) 0100 UTC; (c) 0200 UTC; (d) 0300 UTC

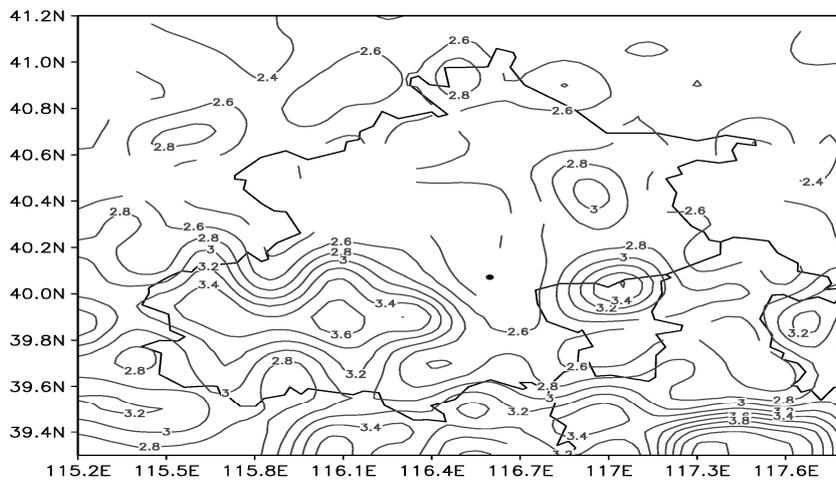


图3 2013 年 1 月 31 日 FY-3A 卫星日平均云顶高度 (单位: km)

Fig. 3 Daily mean cloud top height (km) from FY-3A satellite observations on 31 Jan 2013

0.07 g/kg, 在首都机场上空 ( $40.06^{\circ}\text{N}$ ) 微物理液态项含量也在 0.05~0.07 g/kg 之间; 纬向存在逆温层, 但是在北京区域并不存在大于  $0^{\circ}\text{C}$  的暖层, 云层内温度维持在  $0\sim-6^{\circ}\text{C}$  之间。从而可以证明, 云微物理液态项是以过冷水形式存在的。

通过以上分析我们确定此次冻雨形成条件: 1) 云层较厚, 水成物能通过云雨自动转换过程形成雨滴; 2) 云顶温度较高, 冰晶少, 雨滴不会冻结; 3) 大气低层和地面温度低于  $0^{\circ}\text{C}$ 。以上符合胡志晋等

(2008) 总结出较为完整的暖雨机制冻雨形成条件, 因此可以确定 2013 年 1 月 31 日清晨至上午出现的北京地区冻雨过程是发生一次明显的暖雨机制冻雨, 从而说明北方的冻雨机制并不单一, 两种机制同时存在。

#### 4 结论与讨论

利用 NCEP 再分析资料、FY-2E 的云顶亮温

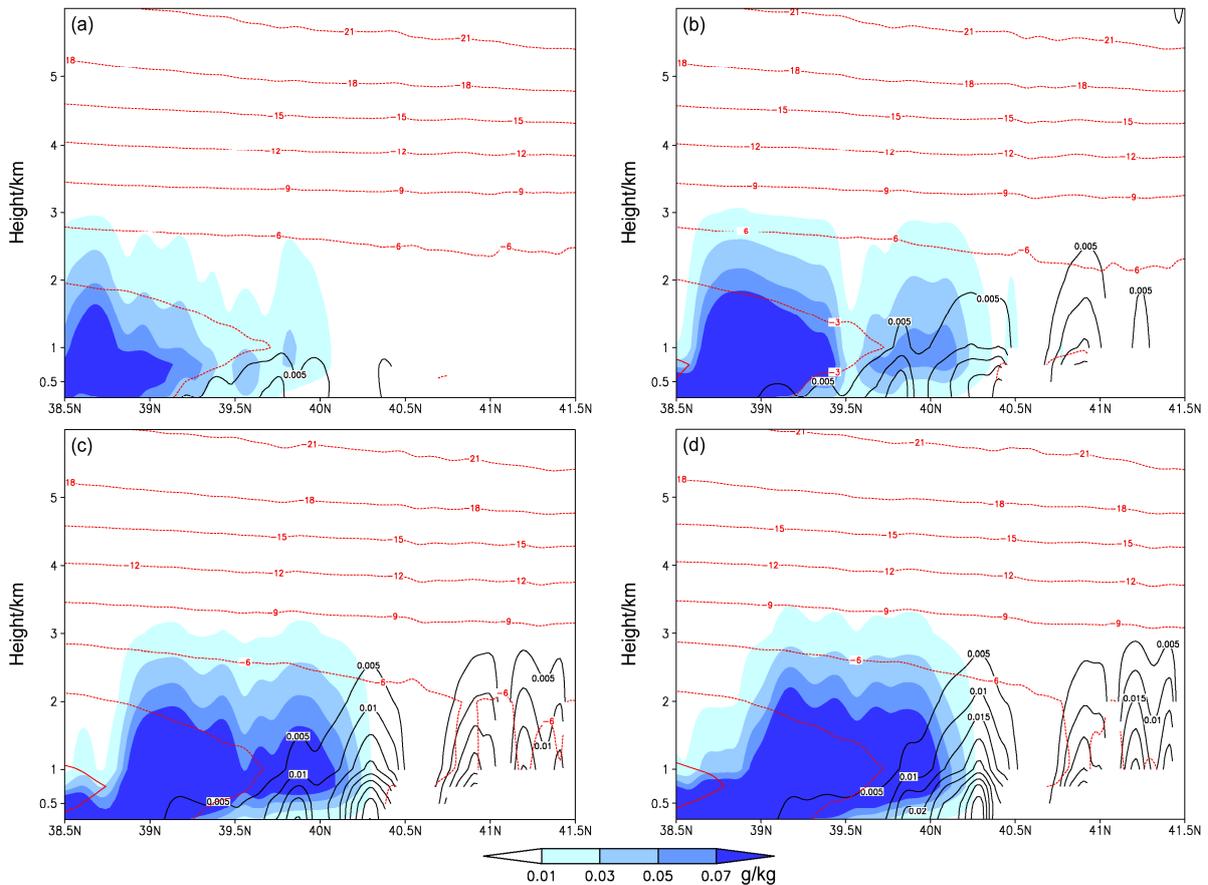


图4 数值模拟计算2013年1月31日(a) 00:00、(b) 01:00、(c) 02:00、(d) 03:00 液态水成物(阴影)与固态水成物(实线,单位: g/kg)混合比及温度(红线)垂直剖面

Fig. 4 Vertical cross sections of liquid hydrometeor (shading), solid particles (solid lines, units: g/kg) and temperature (red lines, units: °C) from numerical simulation at (a) 0000 UTC, (b) 0100 UTC, (c) 0200 UTC, and (d) 0300 UTC on 31 Jan 2013

TBB 逐小时资料及 FY-3A 反演的云顶高度日平均资料做为检验依据,使用 WRF 模式对 2013 年 1 月 31 日发生在首都机场及北京地区的一次冻雨过程进行模拟,得出以下结论:

(1) 500 hPa 高空大槽区的存在为此次过程提供了较为有利的高空环流形势,850 hPa 偏南气流较大为此次降水过程提供了良好的水汽条件。

(2) 模拟结果中的云顶温度与 FY-2E 的云顶亮温 TBB 逐小时资料对应较好,此次冻雨过程,整个降水云系云顶温度在  $0\sim-6\text{ }^{\circ}\text{C}$  之间,模拟结果水成物的垂直分布也得到了较好的印证,通过 FY-3A 反演的云顶高度日平均资料的检验,证明此次冻雨过程的云高基本维持在 3 km 左右,而且云微物理固态项的含量少。

(3) 云顶温度、云顶高度实况与模拟结果的显示,此次过程符合欧建军等(2011)、胡志晋等

(2008) 总结的暖雨机制冻雨形成的条件,是一次典型的暖雨机制冻雨。欧建军等(2011)认为北方( $30^{\circ}\text{N}$  以北的地区)发生冻雨的机制比较单一,主要是冰相机制冻雨。此次过程的出现证实了北方冻雨的机制是冰相机制与暖雨机制并存。

此次冻雨过程的研究,在一定程度上改变了我们对传统冻雨机制的认识。本研究旨在为民航华北气象中心在冬季灾害天气预报方面提供帮助,但目前的工作仍存在一些不足,如此次过程的天气动力学、热力学诊断分析尚未进行。在接下来的工作中将针对以上问题展开进一步地研究。

## 参考文献 (References)

蔡英娜, 远红杰, 贾石蕊, 等. 2015. 对一次冻雨天气的数值模拟分析 [J]. 环境科学与技术, 38 (6): 414-444. Cai yingna, Yuan Hongjie,

- Jia Shirui, et al. 2015. Simulation study of a freezing precipitation case [J]. *Environmental Science and Technology (in Chinese)*, 38 (6): 414–444.
- Huffman G J, Norman Jr G A. 1988. The supercooled warm rain process and the specification of freezing precipitation [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 116 (11): 2172–2182, doi:10.1175/1520-0493(1988)116<2172:TSWRPA>2.0.CO;2.
- 胡志晋, 史月琴, 周毓荃, 等. 2008. 2008 南方冻雨形成的云物理机制及其数值模拟 [C]// 第十五届全国云降水与人工影响天气科学会议论文集 432–434. Hu Zhijin, Shi Yueqin, Zhou Yuquan, et al. 2008. Cloud physical mechanism and numerical simulation of 2008 south of the freezing rain [C]// *Proceedings of the Fifteenth National Conference on Cloud Precipitation and Weather Modification in China (I) (in Chinese)*, 432–434.
- 江杨, 何志新, 周昆, 等. 2016. 安徽地区山地与平原冻雨天气成因及特征分析 [J]. *气象与环境学报*, 32 (2): 11–17. Jiang Yang, He Zhixin, Zhou Kun, et al. 2016. Analysis of forming reason of freezing rain weather and its characteristics in mountain and plain of Anhui Province [J]. *Journal of Meteorology and Environment (in Chinese)*, 32 (2): 11–17, doi:10.11927/j.issn.1673-503X.2016.02.002.
- 李崇银, 杨辉, 顾薇. 2008. 中国南方雨雪冰冻异常天气原因的分析 [J]. *气候与环境研究*, 13 (2): 113–122. Li Chongyin, Yang Hui, Gu Wei. 2008. Cause of severe weather with cold air, freezing rain and snow over South China in January 2008 [J]. *Climatic and Environmental Research (in Chinese)*, 13 (2): 113–122, doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2008.02.01.
- 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. Li Dengwen, Qiao Qi, Wei Tao. 2009. Analyses on the freezing rain and snow weather circulation and vertical structure of southern China in early 2008 [J]. *Plateau Meteorology (in Chinese)*, 28 (5): 1140–1148.
- 孟智勇, 徐祥德, 陈联寿. 2002. 卫星亮温资料四维同化方案及其对“7·20”武汉特大暴雨的模拟试验 [J]. *大气科学*, 26 (5): 663–676. Meng Zhiyong, Xu Xiangde, Chen Lianshou. 2002. TBB-nudging four-dimensional data assimilation method and simulations on heavy rain process in Wuhan on 20 July, 1998 [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 26 (5): 663–676, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2002.05.07.
- 欧建军, 周毓荃, 杨琪, 等. 2011. 我国冻雨时空分布及湿温结构特征分析 [J]. *高原气象*, 30 (3): 692–699. Ou Jianjun, Zhou Yuquan, Yang Qi, et al. 2011. Analyses on spatial-temporal distributions and temperature-moisture structure of freezing rain in China [J]. *Plateau Meteorology (in Chinese)*, 30 (3): 692–699.
- 王东海, 柳崇建, 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. Wang Donghai, Liu Chongjian, Liu Ying, et al. 2008. A preliminary analysis of features and causes of the snow storm event over the Southern China in January 2008 [J]. *Acta Meteorologica Sinica (in Chinese)*, 66 (3): 405–422, doi:10.11676/qxxb2008.038.
- 王志云, 鲁亚斌, 牛法宝. 2008. 云南东部冻雨的成因分析 [J]. *云南大学学报 (自然科学版)*, 30 (S2): 324–328. Wang Zhiyun, Lu Yabin, Niu Fabao. 2008. Analysis on the reason of ice rain which happened on east of Yunnan Province [J]. *Journal of Yunnan University (in Chinese)*, 30 (S2): 324–328.
- 张录青, 李丽, 饶纳伟. 2008. 2008 年初粤北罕见的低温雨雪冰冻天气过程分析 [J]. *广东气象*, 30 (2): 8–12. Zhang Luqing, Li Li, Rao Gangwei. 2008. Analysis of the cryogenic freezing rain and snow weather in northern Guangdong Province at the beginning of 2008 [J]. *Guangdong Meteorology (in Chinese)*, 30 (2): 8–12, doi:10.3969/j.issn.1007-6190.2008.02.003.
- 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. Zhang Xin, Gao Shouting, Wang Jin. 2015. Numerical simulation and stratification structure analysis of freezing rain event in Guizhou in January 2008 [J]. *Plateau Meteorology (in Chinese)*, 34 (2): 368–377, doi:10.7522/j.issn.1000-0534.2013.00189.
- 赵培娟, 邵宇翔, 李周, 等. 2008. 冻雨形成的天气条件分析 [J]. *气象与环境科学*, 31 (4): 36–39. Zhao Peijuan, Shao Yuxiang, Li Zhou, et al. 2008. Analysis of weather conditions of the freezing rain [J]. *Meteorological and Environmental Sciences (in Chinese)*, 31 (4): 36–39, doi:10.3969/j.issn.1673-7148.2008.04.009.