

# 乌鲁木齐机场一次高影响冻雨天气分析

黄海波

民航新疆空管局气象中心, 新疆 乌鲁木齐

收稿日期: 2022年9月22日; 录用日期: 2022年10月24日; 发布日期: 2022年10月31日

## 摘要

利用常规气象资料, 从环流形势和大气层结特征等方面对2015年3月31日发生在乌鲁木齐机场的一次高影响冻雨天气进行了分析。结果表明: 此次冻雨天气的形成机制为“过冷暖雨”机制, 即云滴通过碰并过程增长形成过冷水滴(雨滴), 其动力来自云内强烈的风切变。当过冷水滴(雨滴)接触到0°C以下的地面或者其他物体表面时, 迅速冻结形成冻雨。

## 关键词

高影响, 冻雨, 暖雨机制, 风切变

# Case Analysis of a High-Impact Freezing Rain Event Occurred at Urumqi Airport

Haibo Huang

Meteorological Center, Xinjiang ATMB, CAAC, Urumqi Xinjiang

Received: Sep. 22<sup>nd</sup>, 2022; accepted: Oct. 24<sup>th</sup>, 2022; published: Oct. 31<sup>st</sup>, 2022

## Abstract

Based on the routine observational data, synoptic and local conditions associated with a high-impact freezing rain event occurred at Urumqi airport on 31 March 2015 has been analyzed, including synoptic circulation and stratification characteristics. The results suggest that the formation of this freezing rain event can be attributed to a supercooled warm rain process, *i.e.* small cloud droplets grow up to big supercooled water droplets (raindrops) by collision and coalescence, due to the strong wind shear within the cloud. When supercooled water droplets (raindrops) fall on the ground or other surfaces below 0°C, they quickly freeze and form the freezing rain.

## Keywords

### High-Impact, Freezing Rain, A Supercooled Warm Rain Process, Wind Shear

Copyright © 2022 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

冻雨, 是初冬或冬末春初时节见到的一种天气现象。它是由过冷水滴组成的, 当雨滴从空中落下来时, 由于近地面的气温低于  $0^{\circ}\text{C}$ , 在碰到电线杆、树木、植被、地面、飞机以及各种仪器设备时, 迅速冻结形成透明或半透明的冰层, 是一种灾害性天气, 对航空业有严重的不利影响。我国冻雨天气主要分布在西南地区东部(主要是贵州省)、江南中西部和江淮西部, 新疆的西北部也有少量冻雨发生[1]。冻雨的形成一般有两种机制, 一种是“暖雨机制”, 一种是经典的融化机制, 即“冰晶层-暖层-冷层”模式[2] [3] [4], 欧建军等[5]发现我国北方地区的冻雨形成机制以经典的融化机制为主, 而南方地区则两种机制均存在, 其中高海拔地区以暖雨机制为主。目前对冻雨天气的研究多数从天气学和气候学角度研究其发生的天气尺度条件, 气候特征和大气层结特征等[6], 或者产生冻雨的影响因子, 如物理量配置以及冰晶粒子等形成的微物理过程等, 而与业务预报的联系, 则研究较少[7]。张茜, 孙少明等[8] [9]对乌鲁木齐机场近年来的冻雨和冻降水天气的特征和环流形势进行了分析, 指出乌鲁木齐机场的冻雨基本为“暖雨机制”的冻雨, 出现冻雨的天气形势可分为两类, 一类是新疆地区受高空槽或低涡前部西南气流控制, 随着高空槽或低涡东移, 在主力降水影响乌鲁木齐机场之前出现冻雨; 另一类是在新疆地区受偏西气流控制, 多短波活动的形势下出现冻雨。但是前文对于形成冻雨的过冷水滴的原因并未进行分析, 鉴于我们对乌鲁木齐机场冻雨形成的深层成因还不清楚, 本文以乌鲁木齐机场 2015 年 3 月 31 日发生的一次高影响的持续性冻雨天气为例, 通过对此次冻雨天气过程常规气象资料的深入分析, 进而得到一些预报关注点, 为提高这两类天气的业务预报能力提供有益的参考。

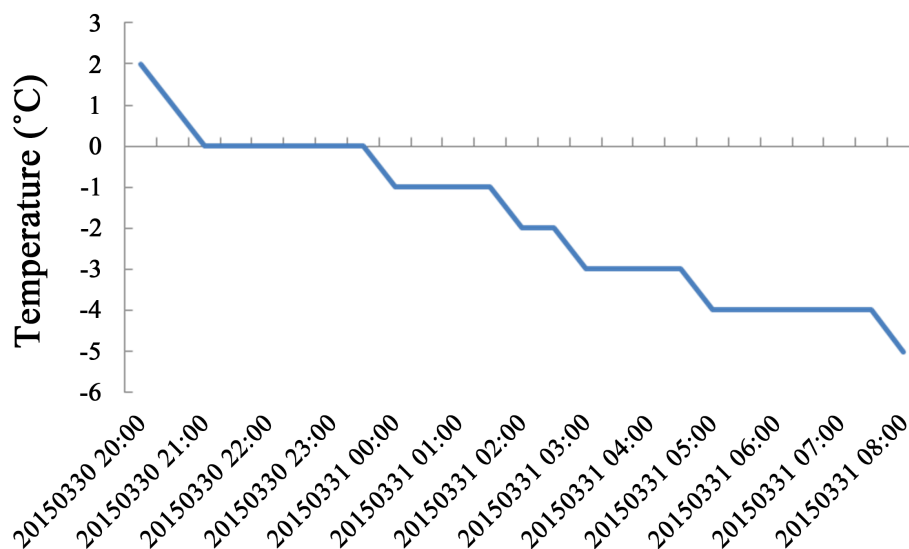
## 2. 天气实况及预报

乌鲁木齐机场( $87^{\circ}28'E$ ,  $43^{\circ}54'N$ )海拔高度约 648 米位于乌鲁木齐市( $87^{\circ}37'E$ ,  $43^{\circ}47'N$ )西北方向, 距市中心约 17 公里。乌鲁木齐市海拔高度约 919 米, 比机场高 270 米左右。虽然市区海拔高度比机场高, 但由于城市中心区的热岛效应, 冬季和初春季节温度一般都比机场高。

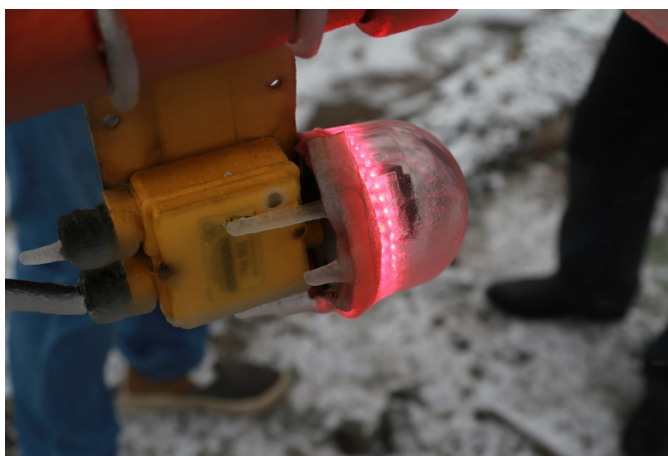
2015 年 3 月 30 日 20:30 (北京时间, 下同)出现小雨; 21:30 转为雨夹雪; 3 月 31 日 00:30 转为冻雨, 持续至 07:30 (日出时间为 07:53), 08:00 转为小雪天气, 这是近十年来持续时间最长的一次冻雨天气过程。冻雨期间, 乌鲁木齐机场的气温由  $-1^{\circ}\text{C}$  降至  $-4^{\circ}\text{C}$  (图 1)。

3 月 30 日 10:00, 气象中心预报室在当日接班后商定的未来 24 小时预报结论为: 30 日 22:00 开始小雨天气, 31 日 02:00 左右转为小雨夹雪, 06:00 左右开始转为小雪, 没有预料到会出现冻雨。值班预报员在 31 日 00:30~07:00 之间, 多次打电话向机场场务人员询问跑道道面及停车场飞机表面结冰情况, 对方回复跑道道面与飞机表面没有结冰。但是, 在机场地面和气象设备上均出现了明显由于冻雨造成的结冰现象。气象中心所属设备之一风传感器因结冰失灵(图 2), 导致观测人员无法向空中交通管制人员提供实时的风向风速数据, 严重影响飞行安全。在机场冻雨天气期间, 值班预报员也曾经向乌鲁木齐市气象台

值班人员询问市区天气现象，得知市区的天气现象是雨，不是冻雨。31日08:00开始，市区转为雨夹雪，机场则直接转为小雪天气。因此，这是一次局地性很强的冻雨天气。



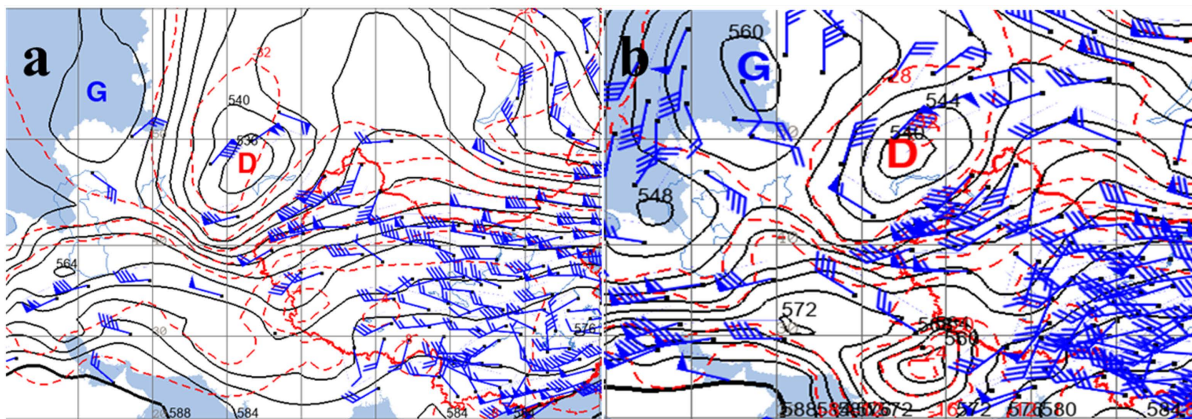
**Figure 1.** The temperatures at Urumqi airport during the freezing rain on March 31, 2015  
**图 1.** 2015 年 3 月 31 日冻雨期间乌鲁木齐机场气温



**Figure 2.** The wind sensor at Urumqi airport was unable to work due to the freezing rain on March 31, 2015  
**图 2.** 2015 年 3 月 31 日冻雨导致乌鲁木齐机场风传感器结冰失灵

### 3. 环流形势

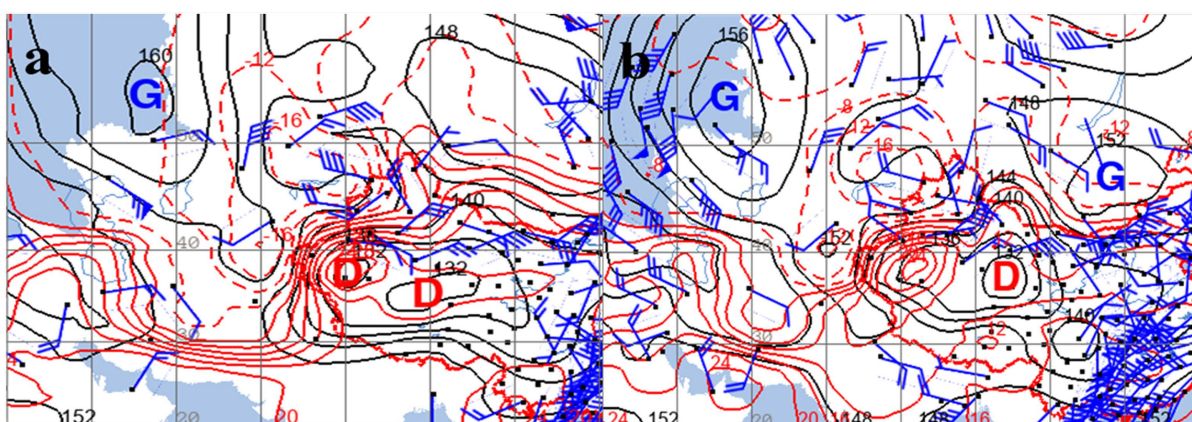
2015 年 3 月 28~29 日，500 hpa 上中亚低涡形成并不断发展东移，新疆地区为脊区控制。3 月 30 日 20:00 (图 3(a))，中亚低涡东移至巴尔喀什湖附近，低涡中心位于巴尔喀什湖西北部，强度为 $-32^{\circ}\text{C}$ 的冷中心落后于低涡中心，预示着低涡将进一步发展东移。受低涡分裂的短波影响，并开始出现降水。3 月 31 日 08:00 (图 3(b))，中亚低涡缓慢东移，低涡中心东移至巴尔喀什湖北部，强度为 $-32^{\circ}\text{C}$ 的冷中心与低涡中心基本重合，此后低涡稳定少动，但仍在不断分裂短波。受其影响，降水区范围不断东移并且扩大。乌鲁木齐 500 hpa 上的高空风变化比较明显，由 30 日 20:00 干冷的偏西风( $270^{\circ}$ ) 16 米/秒转为 31 日 08:00 暖湿的西南风( $240^{\circ}$ ) 15 米/秒，温度未变，均为 $-19^{\circ}\text{C}$ 。



**Figure 3.** 500 hPa geopotential height, temperature and wind. (a) At 20:00 BJT 30 March 2015; (b) At 08:00 BJT 31 March 2015 (black line: geopotential height, red line: temperature, blue barb: wind)

**图 3.** 500 hpa 位势高度, 温度及风。(a) 2015 年 3 月 30 日 20:00; (b) 2015 年 3 月 31 日 08:00 (黑色曲线为位势高度曲线, 红线为温度曲线, 蓝色为风羽)

3 月 30 日 20:00~31 日 08:00 中亚及新疆地区 700 hpa 上的环流形势与 500 hpa 基本一致。乌鲁木齐 700 hpa 上的风变化不大, 均为 4 米/秒的偏南风, 但是降温明显, 由 30 日 20:00 的 $-6^{\circ}\text{C}$ 降为 31 日 08:00 的 $-10^{\circ}\text{C}$  (图略)。850 hpa 上, 3 月 30 日 20:00~31 日 08:00 (图 4(a), 图 4(b)), 北疆大部、天山山区等等温线越来越密集, 表明有明显的强冷空气入侵。乌鲁木齐 850 hpa 上的风变化不大, 为 8~10 米/秒的偏南风, 但是降温比 700 hpa 更为明显, 由 30 日 20:00 的 $-3^{\circ}\text{C}$ 降为 31 日 08:00 的 $-10^{\circ}\text{C}$ 。



**Figure 4.** 850 hPa geopotential height, temperature and wind. (a) At 20:00 BJT 30 March 2015; (b) At 08:00 BJT 31 March 2015 (black line: geopotential height, red line: temperature, blue barb: wind)

**图 4.** 850 hpa 位势高度, 温度和风。(a) 2015 年 3 月 30 日 20:00; (b) 2015 年 3 月 31 日 08:00 (黑色曲线为位势高度曲线, 红线为温度曲线, 蓝色为风羽)

从环流形势的演变来看, 这是一次典型的中亚低涡引发的降水天气。由于对流层中低层(700~850 hpa)强冷空气的入侵, 空中温度不断下降, 降水相态由雨转雨夹雪转雪是可以预期的, 但是乌鲁木齐机场在雨转雨夹雪之后为什么没有转雪, 而是出现了冻雨? 由于降水相态与大气层结特征密切相关, 我们将利用乌鲁木齐的探空资料对此次冻雨的成因做进一步的分析。

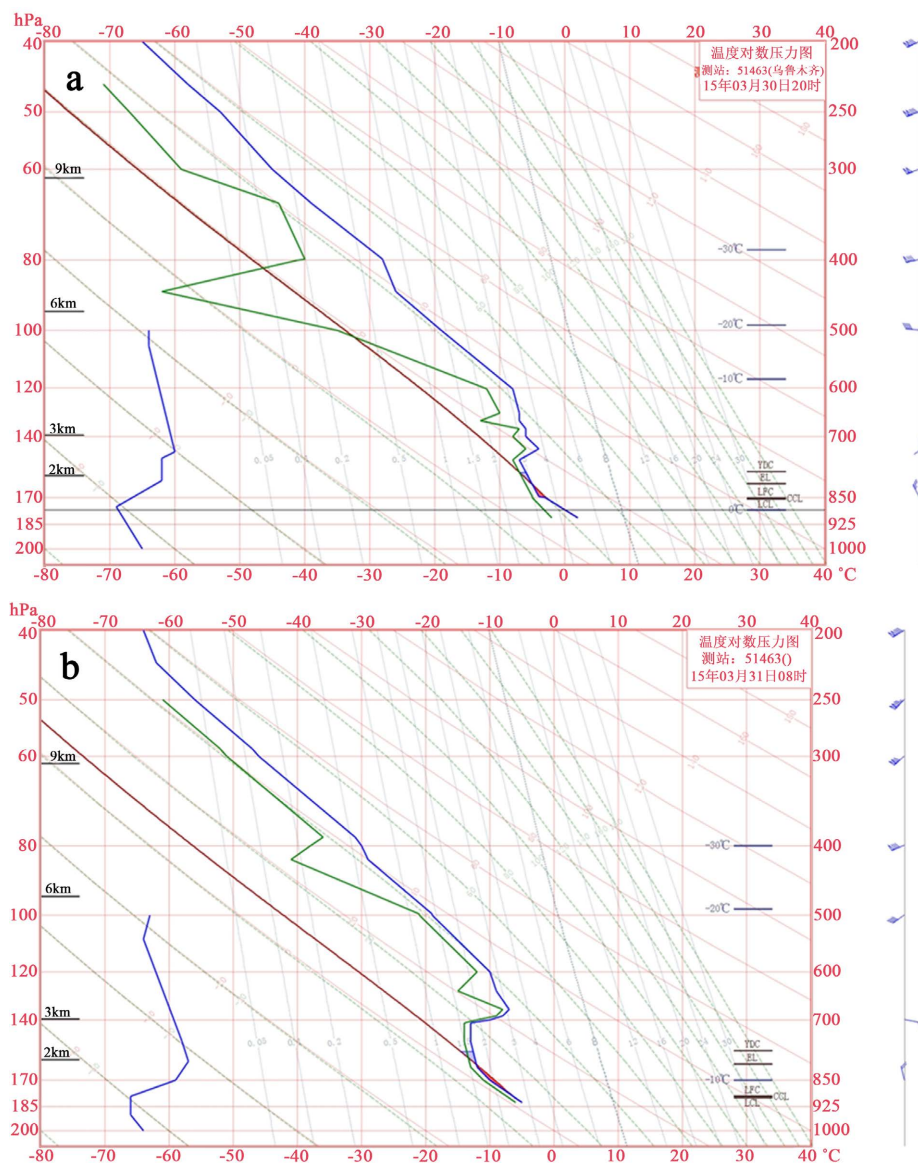
#### 4. 探空资料分析

逆温是冻雨天气发生最主要的大气层结条件之一[8], 从 2015 年 3 月 30 日 20:00 (图 5(a))和 31 日 08:00

(图 5(b))的探空资料来看, 乌鲁木齐上空的大气温度垂直结构类似西南地区冻雨的大气层结特征[10], 虽然都有逆温层存在, 但是没有温度  $> 0^{\circ}\text{C}$  的暖层。

冻雨的发生和云有着密不可分的关系, 此时中低层状云内是否有适宜的条件利于过冷水滴发展长大是冻雨形成的关键[11]。本文采用 Poore 等[12]的温度露点差判断方法确定云层厚度和云顶高度, 该方法简单实用[1] [11], 即: 当空中温度  $\geq 0^{\circ}\text{C}$  时, 温度露点差  $\leq 2^{\circ}\text{C}$  认为是云内; 当温度  $< 0^{\circ}\text{C}$  且  $\geq -20^{\circ}\text{C}$  时, 温度露点差  $\leq 4^{\circ}\text{C}$  认为是云内; 当温度  $< -20^{\circ}\text{C}$  时, 温度露点差  $\leq 6^{\circ}\text{C}$  认为是云内。

从探空图来看, 乌鲁木齐地区的温湿廓线满足以上云内标准的范围 3 月 30 日 20:00 大致为 600~850 hPa, 3 月 31 日 08:00 大致为 500~900 hPa, 均属于中低云。相比较而言, 3 月 30 日 20:00 的云层厚度较薄而且云顶高度较低, 3 月 31 日 08:00 的云层深厚而且云顶高度比较高。



**Figure 5.** Sounding plots at Urumqi station. (a) At 20:00 BJT 30 March 2015; (b) At 08:00 BJT 31 March 2015 (blue line: temperature, green line: dew-point temperature, red line: mixing ratio)

**图 5.** 乌鲁木齐市探空曲线。(a) 2015 年 3 月 30 日 20:00; (b) 2015 年 3 月 31 日 08:00 (蓝色曲线为温度曲线, 绿线为露点温度曲线, 红线为等比湿线)

根据前人的研究结果[4], 云顶温度  $> -10^{\circ}\text{C}$  时, 云中水滴基本维持过冷水滴的状态。从图 4 可以看到, 3 月 30 日 20:00 乌鲁木齐地区的云顶温度大约在  $-7^{\circ}\text{C} \sim -9^{\circ}\text{C}$  之间, 高于  $-10^{\circ}\text{C}$ , 所以这时的云内没有冰核或者冰核很少, 云内主要以过冷水滴为主。3 月 31 日 08:00 云顶温度大约在  $-18^{\circ}\text{C} \sim -20^{\circ}\text{C}$  之间, 云内以冰核为主, 主要集中在 500~600 hPa。

大气稳定层结状态下, 强风切变造成的扰动利于云内过冷水滴碰并增大[13][14]。从图 4 可以发现, 无论是 3 月 30 日 20:00 还是 3 月 31 日 08:00, 在逆温层以下, 都有强烈的风向风速切变, 这使得低云内部的小云滴或水滴可通过碰并增长, 形成大的过冷水滴(雨滴)。当大的过冷水滴接触到  $0^{\circ}\text{C}$  以下的地面或者其他物体表面时, 迅速冻结形成冻雨。乌鲁木齐市中心城区没有出现冻雨是因为 3 月 31 日 00:30~07:30 气温基本在  $0^{\circ}\text{C}$  以上, 而机场的气温在  $-1^{\circ}\text{C} \sim -4^{\circ}\text{C}$  之间。

## 5. 结论

1) 从环流形势的演变来看, 这是一次典型的中亚低涡引发的降水天气。预期的天气变化是随着气温的逐渐降低, 乌鲁木齐机场的降水相态是雨转雨夹雪转雪, 没有预料到会出现冻雨。

2) 此次乌鲁木齐机场的冻雨天气局地性很强, 它形成的机制为暖雨机制, 即云滴通过碰并过程增长形成过冷水滴(雨滴)。当过冷水滴(雨滴)接触到  $0^{\circ}\text{C}$  以下的地面或者其他物体表面时, 迅速冻结形成冻雨。

3) 虽然以前的研究指出云内过冷水滴是形成乌鲁木齐机场冻雨的原因, 但并未分析云内过冷水滴发展长大的原因, 而这是冻雨形成的关键。本文的分析表明: 云内过冷水滴碰并增长的动力来源于乌鲁木齐上空低云区内(700~850 hPa)强烈的风切变。

## 参考文献

- [1] 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.
- [2] Ohtake, T. (1963) Hemispheric Investigation of Warm Rain by Radiosonde Data. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, **2**, 594-607. [https://doi.org/10.1175/1520-0450\(1963\)002<0594:HIOWRB>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0450(1963)002<0594:HIOWRB>2.0.CO;2)
- [3] Bocchieri, J.R. (1980) The Objective Use of Upper Air Soundings to Specify Precipitation Type. *Monthly Weather Review*, **108**, 596-603. [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1980\)108<0596:TUOUUA>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1980)108<0596:TUOUUA>2.0.CO;2)
- [4] Huffman, G.J. and Norman, G.A. (1988) The Supercooled Warm Rain Process and the Specification of Freezing Precipitation. *Monthly Weather Review*, **116**, 2172-2182. [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1988\)116<2172:TSWRPA>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1988)116<2172:TSWRPA>2.0.CO;2)
- [5] 欧建军, 周毓荃, 杨棋, 等. 我国冻雨时空分布及温湿结构特征分析[J]. 高原气象, 2011, 30(3): 692-699.
- [6] 陶玥, 史月琴, 刘卫国. 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, 2012, 36(3): 507-522.
- [7] 宗志平, 马杰. 2008 年初冻雨强度变化以及与逆温层特征之间的关系[J]. 气象, 2011, 37(2): 156-160.
- [8] 张茜, 孙少明, 王楠楠, 杜安妮, 杨乐. 乌鲁木齐机场近 10 年冻雨天气过程特征分析[J]. 中国民用航空, 2020, 32(5): 67-70.
- [9] 孙少明, 张茜, 朱雯娜, 王楠楠. 地基微波辐射计资料在乌鲁木齐机场冻降水天气中的应用[J]. 气候变化研究快报, 2021, 10(6): 689-698.
- [10] 矫梅燕, 曲晓波. 2008 年初中国南方持续性低温雨雪冰冻灾害天气分析[M]. 北京: 气象出版社, 2008: 55-67.
- [11] 高守亭, 张昕, 王瑾, 等. 贵州冻雨形成的环境场条件及其预报方法[J]. 大气科学, 2014, 38(4): 645-655.
- [12] Poore, K.D., Wang, J.H. and Rossow, W.B. (1995) Cloud Layer Thicknesses from a Combination of Surface and Upper-Air Observations. *Journal of Climate*, **8**, 550-568. [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(1995\)008<0550:CLTFAC>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(1995)008<0550:CLTFAC>2.0.CO;2)
- [13] 李启泰, 卢成孝, 赵彩. 贵州冬季层状云的观测研究[J]. 气象, 1988, 14(5): 9-14.
- [14] Deng, D.F., Gao, S.T., Du, X.L., et al. (2012) A Diagnostic Study of Freezing Rain over Guizhou China in January 2011. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, **138**, 1233-1244. <https://doi.org/10.1002/qj.981>