

# 贵阳机场冻雨统计特征及一次典型案例分析

司林青

中国民用航空西南地区空中交通管理局贵州分局, 贵州 贵阳

收稿日期: 2022年6月3日; 录用日期: 2022年6月30日; 发布日期: 2022年7月7日

## 摘要

利用2008~2021年地面逐时观测数据和再分析资料等,对贵阳龙洞堡机场冬季冻雨进行统计分析,并针对发生在2018年12月底的冰冻雨雪过程,分析对比冻雨和降雪时段的环流形势、微物理特征及云内垂直热动力结构的差异,结果表明:1) 贵阳机场年冻雨日数多在5日以下,1月份最多,且多发于凌晨,午间最少;2) 所选冻雨过程是典型的“二层模式”,具有较浅的冷垫和较厚的暖层,冷空气由偏北路径入侵贵州,孟加拉湾和南海的水汽沿西南气流输送,过程中700 hPa西南气流的加强与减弱所造成逆温层温度是否大于0℃是降水相态转变的关键;3) 相比降雪,冻雨时段的动力强迫主要位于中低层,强度偏弱,云中以液相粒子为主;4) 此次冻雨主要由高空槽前暖湿气团沿锋面爬升所引起,水汽和风场辐合中心从850 hPa逐渐抬升至700 hPa,且较为浅薄,冻雨落区位于冷锋后部一定距离处。

## 关键词

降水相态, 冻雨, 统计特征, 二层模式, 诊断分析

# Statistical Characteristics of Freezing Rain and a Typical Case Analysis at Guiyang Airport

Linqing Si

Guizhou ATM Sub-Bureau of CAAC, Guiyang Guizhou

Received: Jun. 3<sup>rd</sup>, 2022; accepted: Jun. 30<sup>th</sup>, 2022; published: Jul. 7<sup>th</sup>, 2022

## Abstract

Using ground hourly observation data and reanalysis data from 2008 to 2021, the winter freezing rain at Longdongbao Airport in Guiyang was statistically analyzed. In view of the freezing rain and

snow process at the end of December 2018, the differences in circulation situation, microphysical characteristics and cloud vertical thermodynamic structure between freezing rain and snowfall periods were analyzed and compared. The results show that: 1) The number of annual freezing rain days in Guiyang Airport is mostly below 5 days, and the maximum is in January, and it occurs in the morning and the minimum is at noon; 2) The selected freezing rain process is a typical “two-layer model” with shallow cold cushion and thick warm layer. The cold air invades Guizhou from the northerly path, and the water vapor in the Bay of Bengal and the South China Sea is transported along the southwesterly. During the process, whether the temperature of the inversion layer caused by the strengthening and weakening of the southwest airflow at 700 hPa is greater than 0°C is the key to the transformation of precipitation phase. 3) Compared with snowfall, the dynamic forcing during the freezing rain period is mainly located in the middle and lower layers, and the intensity is weak, and the cloud is dominated by liquid particles; 4) The freezing rain was mainly caused by the warm and humid air mass climbing along the front of the upper trough. The convergence center of water vapor and wind field gradually increased from 850 hPa to 700 hPa, and it was relatively shallow and thin. The freezing rain falling area was located at a certain distance behind the cold front.

## Keywords

Precipitation Phase, Freezing Rain, Statistical Characteristics, Two-Tier Mode, Diagnostic Analysis

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

冬季降水相态主要包括雨、冻雨、冰粒、雨夹雪和雪等，它们单独或以混合形式出现均会导致雨雪冰冻事件，尤其以冻雨影响最为严重，中国约 84% 的冻雨都发生于贵州省[1]。如图 1，贵州处于纬度相对偏低的山区，平均海拔高度在 1000 m 左右，地势西高东低、北高南低，冬季南下冷空气和北上暖湿空气受地形阻挡作用在云贵高原东部地区汇合，形成长时间维持的云贵准静止锋及锋面中低层状云，且冷空气影响时气温在冻结温度附近，导致贵州各地常发生低温、高湿和连绵的冰冻雨雪天气。

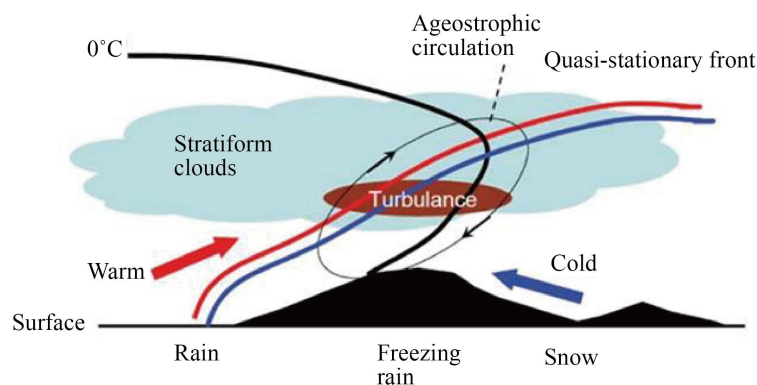


Figure 1. Conceptual model of winter precipitation weather in Guizhou

图 1. 贵州冬季降水天气概念模型图

鉴于冻雨带来的严重灾害性,近年来相关学者在冻雨变化规律和形成原因等方面进行了积极的探索。宗志平等[2]利用中国台站资料指出近几十年来冻雨强度呈现明显下降的趋势。杜小玲等[3]利用贵州省 84 站 1996~2009 年观测资料,采用统计分析和插值处理,揭示了贵州冻雨以 27°N 为中轴线的频发地带分布特征。严小冬等[4]采用 EOF、小波分析、GIS 反演等方法分析了贵州冻雨的空间分布特征及时间演变规律,指出贵州省冻雨存在较大年际变化,具有明显的 4a、12a 和 32a 周期振荡,一般海拔高处凝冻较为严重。王晓兰等[5]、吕胜辉等[6]、丁小剑等[7]将冻雨发生时的垂直结构分为 3 层,最底层是冷层或过冷却雨层,中间为暖层或融化层,最高层为冰晶层和云层。张峻等[8]提出了冻雨形成时逆温层特征,逆温强度指数随逆温底部高度的上升而增加,在 700 hPa 左右逆温强度最强。一般认为冻雨形成主要有过冷却雨和融化过程两种机制[9],但不同于这两种典型机制,贵州冻雨的形成成为具有融化层的过冷却雨机制,逆温层的强度与冻雨发生、发展的强度密切相关,贵州冻雨存在“单层结构”、“二层结构”和“三层结构”的结构特征[10][11][12][13]。

方荻等[14]从气候背景、天气形势、温湿度垂直结构特征等方面探讨了冻雨天气的物理成因,指出受地形阻挡冬季北上的暖湿气流和南下的冷气团在垂直方向上呈“干冷-暖湿-干冷”的结构特征,锋面逆温的长时间维持是贵州冻雨持续发生的必要条件。杜正静等[15]分析了 2011 年 1 月的滇黔准静止锋在演变过程中的温湿结构和大气环流特征,指出冻雨强度与低纬高原地区独有的地理位置、复杂地形条件以及云贵静止锋天气有密切关系。马晓刚等[16]建立了由大气逆温水平分布区、高空湿区、地面气温 0°C 线、逆温层极值点 0°C 线构成的冻雨落区的基本概念模型。张娇艳等[17]利用逐日雨淞观测资料等构建了贵州省冬季雨淞灾害预测模型。罗喜平等[18]针对冻雨天气从环流形势、垂直温湿结构等进行综合诊断分析,发现冻雨发生时低层锋区更强。

据统计,贵州冻雨年平均日数在 10 d 以上的范围,主要集中在 26.5~27.5°N 之间,贵阳龙洞堡机场位于 26.54°N,海拔高度 1139 m,地处云贵高原东麓,地形条件复杂,与其它地域冻雨的发生、发展、维持和消亡存在很大差异,且冻雨能在机翼和跑道上形成毛玻璃状或透明的坚硬冰层,造成航班大面积延误,甚至跑道关闭,为航班正常性带来巨大挑战。方刚[19]利用多元非线性回归方法,筛选出数值预报资料 and 统计预报资料中最优预报因子。罗浩等[20]指出贵阳机场 800~700 hPa 逆温层温度是否大于 0°C 是决定降水相态的关键条件之一,冻雨期间水汽的辐合中心集中在中低层。目前对贵阳机场冻雨生消规律和预报方法研究仍存在很大不足。因此,本文将利用机场地面观测资料、欧洲中期天气预报中心(ECMWF) ERA5 逐小时再分析数据等,统计贵阳机场冻雨生消规律,分析冻雨天气过程的形势和物理量演变特征。

## 2. 冻雨变化特征

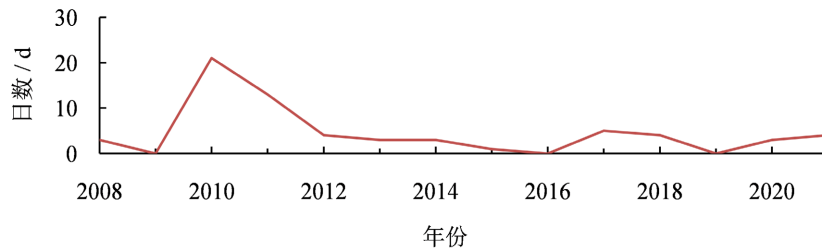
如图 2,对 2008 年 12 月至 2022 年 2 月龙洞堡机场逐时观测资料分析可得,近 14 年来除 2010 年异常偏高外,其余年份均在 5 次以下,且均发生在冬季,以 1 月份最多。冻雨最早出现在 12 月 14 日,发生在 2020 年,最晚出现在 2 月 27 日,发生在 2012 年。如图 3,从日变化特征曲线来看,冻雨凌晨 00:00~08:00 较多,均在 30 次以上,07:00 达到最多 37 次;白天 10:00~19:00 日数较少,均在 12 次以下,14:00 达到最低 4 次,其中包括 12 月 28~30 日,该过程造成机场关闭 10.5 小时、142 架次航班延误,98 架次取消,为近十年来影响最大冰冻雨雪天气过程,下文将分析冻雨发生的时间演变、环流特征、锋面特点、温湿层结等特征,讨论冻雨出现的原因和机制,为贵阳机场冻雨预报提供参考依据。

## 3. 典型冻雨案例分析

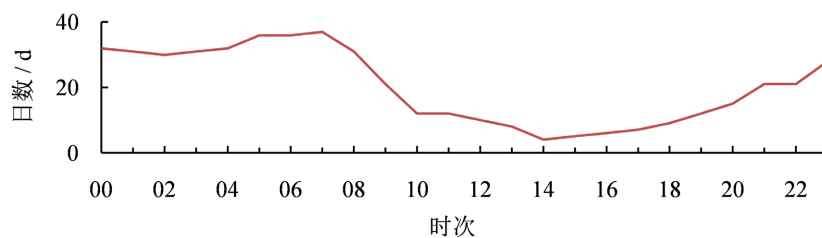
### 3.1. 天气过程概况

如图 4 和图 5,2018 年 12 月 27 日至次年 1 月 2 日贵阳机场出现长达 7 d 的低温雨雪天气,其中 29

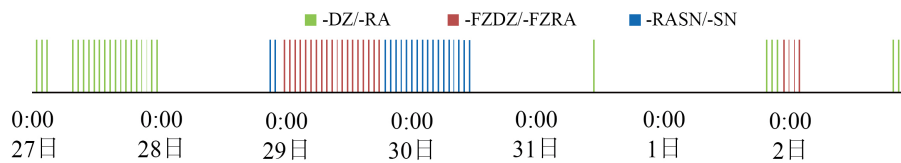
日 00:00~16:00 为冻雨, 29 日 17:00~30 日 11:00 为小雪, 最低气温 $-4.4^{\circ}\text{C}$ , 出现在 30 日 08:00。



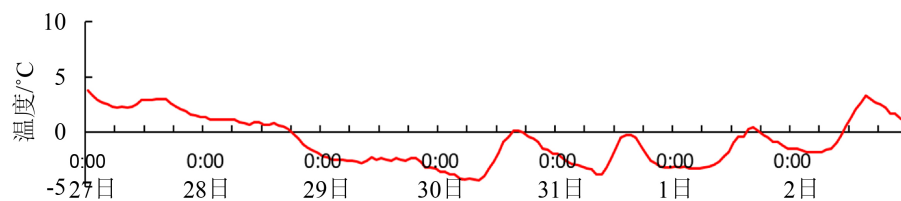
**Figure 2.** Comparison of interannual variations of freezing rain days  
**图 2.** 冻雨日数年际变化对比



**Figure 3.** Comparison of the number of times of freezing rain days  
**图 3.** 冻雨日数时次变化对比



**Figure 4.** The precipitation phase changes over time  
**图 4.** 降水相态随时间变化



**Figure 5.** 2 m temperature varies over time  
**图 5.** 2 m 气温随时间变化

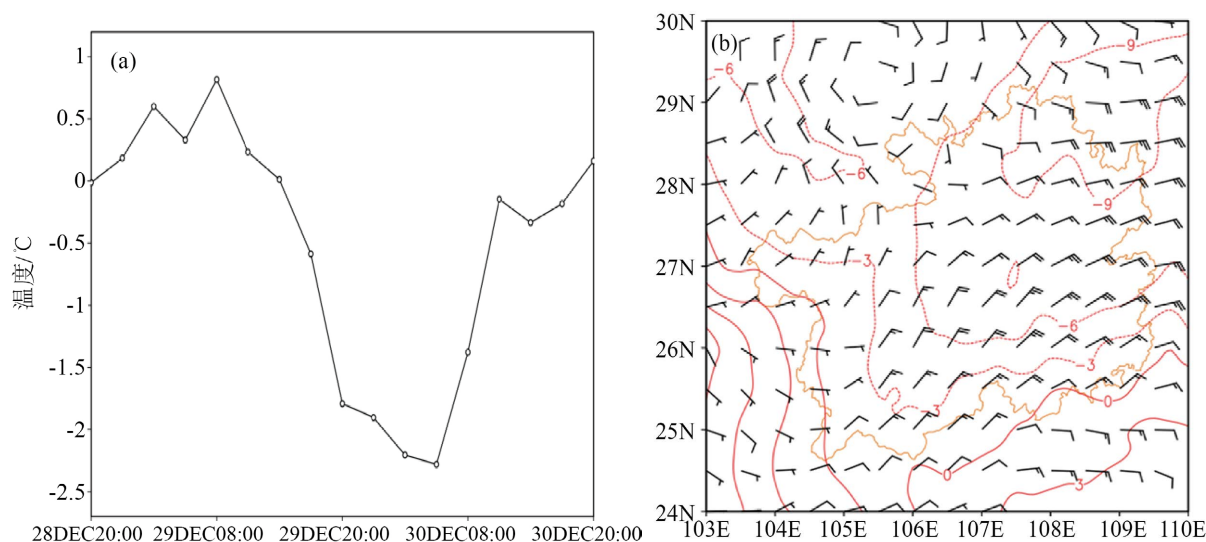
### 3.2. 环流形势特征分析

2018 年 12 月极涡较常年同期明显偏强, 500 hPa 环流形势来看, 下旬欧亚中高纬环流呈两槽一脊型, 乌拉尔山高压脊伴有明显的正距平, 有利于冷空气堆积和环流经向度加大, 东亚大槽位置偏东[21]。随着巴尔喀什湖附近高压脊发展加强向东北方向延伸, 贝加尔湖附近形成横槽, 而后横槽转竖, 中西伯利亚积聚的冷空气沿贝加尔湖以东分裂南下影响我国。旬末, 副高减弱东退, 西伸脊点移至  $120^{\circ}\text{E}$  附近, 配合南支槽东移, 有利于孟加拉湾和南海的水汽输送, 2018 年 12 月 25 日至 2019 年 1 月 2 日, 冷暖气团

交汇, 出现雨雪冰冻过程。

700 hPa 的 0°C 线从 25 日午后开始从西北方向影响贵州, 28 日 08:00 位于贵州南部 26°N 以南, 贵阳机场上空 -2°C (图 6(a)), 随后受 700 hPa 中心强度为 16 m/s 的西南急流影响, 0°C 线北抬, 于 28 日 23:00 移至贵阳机场以北, 贵阳机场降水相态转换为冻雨, 29 日 08:00 贵阳机场 700 hPa 气温达到最大值 1°C, 此时冷空气在四川盆地堆积, 并存在南北向的温度梯度大值区, 在四川盆地北部有切变线。29 日 17:00, 随着急流东移、切变线南压, 冷空气由偏北路径入侵贵州, 0°C 等温线南压至贵阳机场以南, 贵阳机场 700 hPa 气温降至 -0.5°C, 降水相态转换为雪, 30 日 05:00 贵阳机场 700 hPa 气温达到最低值 -2.3°C。

从 850 hPa 冻雨期间平均温度场及风场(图 6(b))来看, 贵州省境内盛行东北气流, 静止锋锋区位于滇东, -3°C 等温线控制贵州大部, 贵阳机场冻雨期间 850 hPa 平均气温 -7.56°C, 降雪期间平均气温 -7.36°C。地面图上, 昆明静止锋冻雨期间西进至滇黔交界处, 其南部与华南准静止锋相连, 等压线密集, 冷暖气团相互作用强, 贵州省大部区域在 0°C 以下, 降雪出现时准静止锋在冷空气补充下继续西进南压。



**Figure 6.** Guiyang Airport 700 hPa temperature changes over time (a) and 850 hPa average wind and temperature field during freezing rain period (b)

**图 6.** 贵阳机场 700 hPa 气温随时间变化(a)和 850 hPa 冻雨期间平均风场和温度场(b)

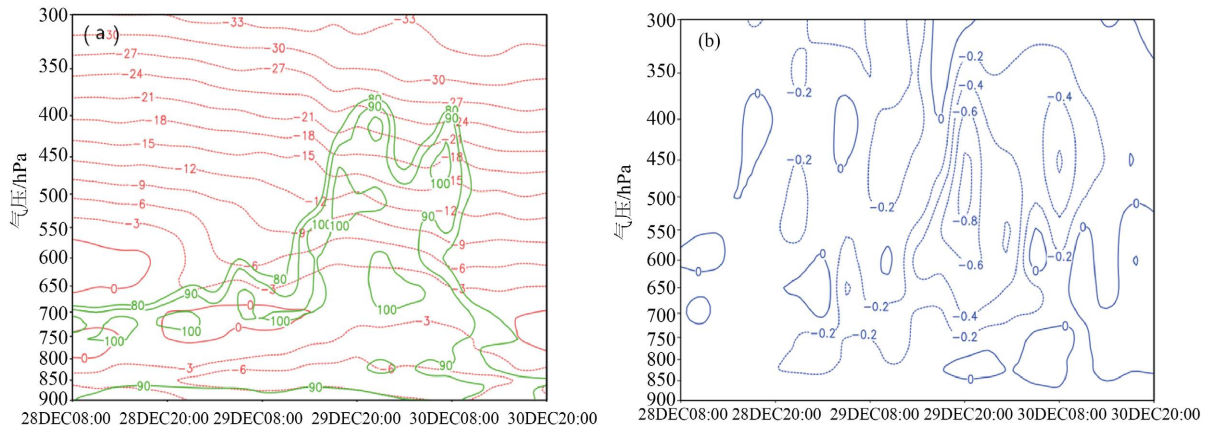
### 3.3. 热动力垂直结构及微物理特征

影响降水相态的因子主要包括云内降水粒子状态、云外融化和升华过程以及环境温度垂直廓线, 其中云内、云外的微物理过程又直接由大气温度和湿度等分布决定[22]。接下来利用 ERA5 再分析资料从大气垂直热动力结构及地面温、湿等出发, 对此次过程相态转换的原因进行分析。

从温度分布(图 7(a))来看, 冻雨时段较小雨时段温度总体显著偏低, 比降雪时段总体显著偏高, 贵阳机场冻雨期间 700 hPa 平均气温 0.4°C, 地面 -2.5°C, 降雪期间 700 hPa 平均气温 -1.6°C, 地面 -3.5°C。从相对湿度分布(图 7(a))特征来看, 冻雨时段 90% 以上区域范围基本位于 650 hPa 以下, 且在后期逐渐上升至 600 hPa 以下, 降雪时段 90% 以上区域范围则可达 400 hPa 附近, 两者湿度一直到近地层, 其相对湿度均大于 90%, 冻雨时段云顶发展高度较降雪时段低。冻雨时段温湿场配置是典型的冻雨“二层模式”结构, 逆温底部位于 875 hPa, 平均温度和温度露点差平均为 -3.5°C、1.1°C, 水汽在逆温底部是处于冷湿环境当中, 逆温顶部位于 750 hPa, 平均温度和温度露点差平均为 2.3°C、0.3°C, 有助于处于暖区逆



温层顶附近的降水以液态的形式存在,并使大气保持暖湿状态,冷垫高度为 800 hPa,冷垫之上的暖层厚度约 120 hPa,表明冻雨时段具有较浅的冷垫和较厚的暖层。降雪时段温湿场配置结构与冻雨相似,在 800~700 hPa 左右均有逆温层的存在,但暖层厚度约 50 hPa,逆温顶部平均温度为 1℃,表明降雪时段具有较厚的冷垫和较浅的暖层,而逆温层温度是否大于 0℃是决定此次过程降水相态为冻雨还是降雪的关键因素。



**Figure 7.** Thermodynamic (a) and vertical (b) characteristics at Guiyang Airport (Red contour is for temperature, unit: °C; green contour is for relative humidity, unit: %; blue contour is for vertical speed, unit: Pa/s)

**图 7.** 贵阳机场上空温湿特征(a)和垂直上升运动(b)时间高度剖面(红线为温度,单位:°C;绿线为相对湿度,单位:%;蓝线为垂直速度,单位:Pa/s)

从垂直运动分布(图 7(b))来看,冻雨时段最大上升运动为 $-0.4$  Pa/s,降雪时段则为 $-0.8$  Pa/s,降雪期间上升运动要强,从强上升运动中心所在高度来看冻雨时段较低,位于 700 hPa 附近,而降雪时段相对较高,位于 500 hPa 附近,表明冻雨时段的动力强迫主要位于中低层,强度偏弱,而降雪时段的动力强迫则主要位于高层,强度较强。随着近地面到高层整层均转为下沉运动,降水天气结束。

由图 8(a)可知,冻雨时段 800~550 hPa 以液相粒子为主,云层底部延伸至近地层,且底部以冰相粒子为主。29 日 14:00~19:00 为冰相和过冷水滴共存的状态,贵阳机场冻雨、冰粒、雪轮次出现。降雪时段 600~350 hPa 以冰相粒子为主,750~600 hPa 存在少量过冷水滴,750 hPa 以下粒子含量接近 0。由图 8(b)可知,冻雨时段雨水在 700 hPa 以下,主要集中在 750 hPa,降雪时段雪花在 500 hPa 以下,主要集中在 700 hPa,29 日 14:00~19:00 为雨雪共存状态。

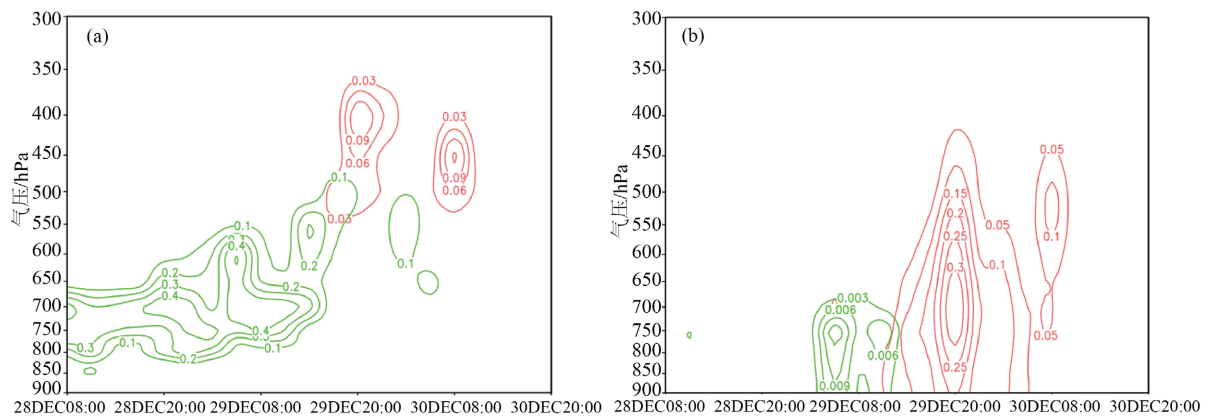
### 3.4. 热动力垂直结构和水汽条件不同的成因分析

前述分析表明,两个时段在垂直热动力条件及水汽方面均存在显著差异,是造成降水相态差异的直接原因,下文将从决定前述热动力特征的诊断物理量出发,对产生这种差异的天气学原因进行探讨。

利用散度场结合其风场垂直演变对其动力特征进行诊断分析,如图 9(a)所示,冻雨时段,800~500 hPa 基本为短波槽前西南气流控制,825 hPa 以下为东北气流,且东北气流层次逐渐加厚,从短波槽垂直结构可以看出 700~500 hPa 槽前西南风达到了急流强度使得强辐散主要位于这个层次。降雪时段 29 日 19:00 后 800~500 hPa 从上至下先后转为短波槽后偏西气流控制,东北气流扩展至 775 hPa。降水期间,辐合中心从 850 hPa 逐渐抬升至 700 hPa。

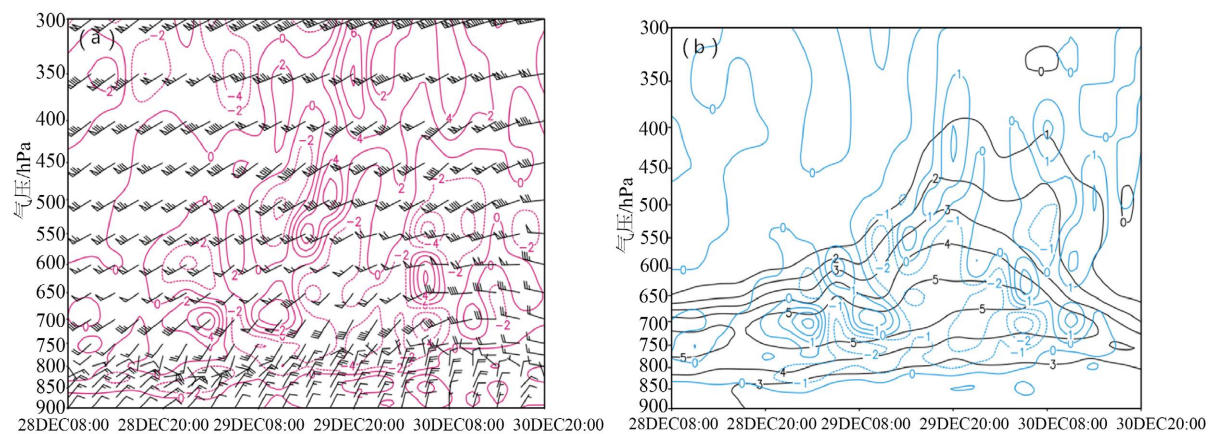
大气绝对水汽含量直接影响云中粒子发展,进而影响降水相态。孙继松等[23]指出中层西南暖湿气流

输送的水汽越充沛，其平均降雪量也相对较大。由图 9(b)可知，冻雨时段 600 hPa 以下比湿均在 2 g/kg 以上，最大超过 5 g/kg，最大水汽辐合中心位于 750 hPa 附近，为  $-2 \times 10^{-5} \text{ g}\cdot\text{hPa}^{-1}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 。降雪期间 500 hPa 以下比湿均在 2 g/kg 以上，最大水汽辐合中心位于 700 hPa 附近，为  $-2 \times 10^{-5} \text{ g}\cdot\text{hPa}^{-1}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 。降水期间，水汽辐合中心同风场辐合中心位置一致，从 850 hPa 逐渐抬升至 700 hPa，且较为浅薄，整个过程无明显水汽辐散。结合冻雨时段 700 hPa 水汽通量散度的水平分布(图 10(a))可知，其水汽输送主要来自南支槽前西南气流，贵阳机场南侧有呈东北 - 西南走向的湿舌。利用温度平流场结合假相当位温垂直剖面特征对冻雨时段垂直温度分布特征进行诊断分析，如图 10(b)所示，冻雨主要由高空槽前暖湿气团沿锋面爬升所引起，有明显的暖舌存在，最大暖平流中心位于 700 hPa 左右，强度在  $3 \times 10^{-4} \text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{s}^{-1}$  以上，冻雨落区位于冷锋后部一定距离处，低层除冷暖交汇处风力偏大外，其余地区风力较小。



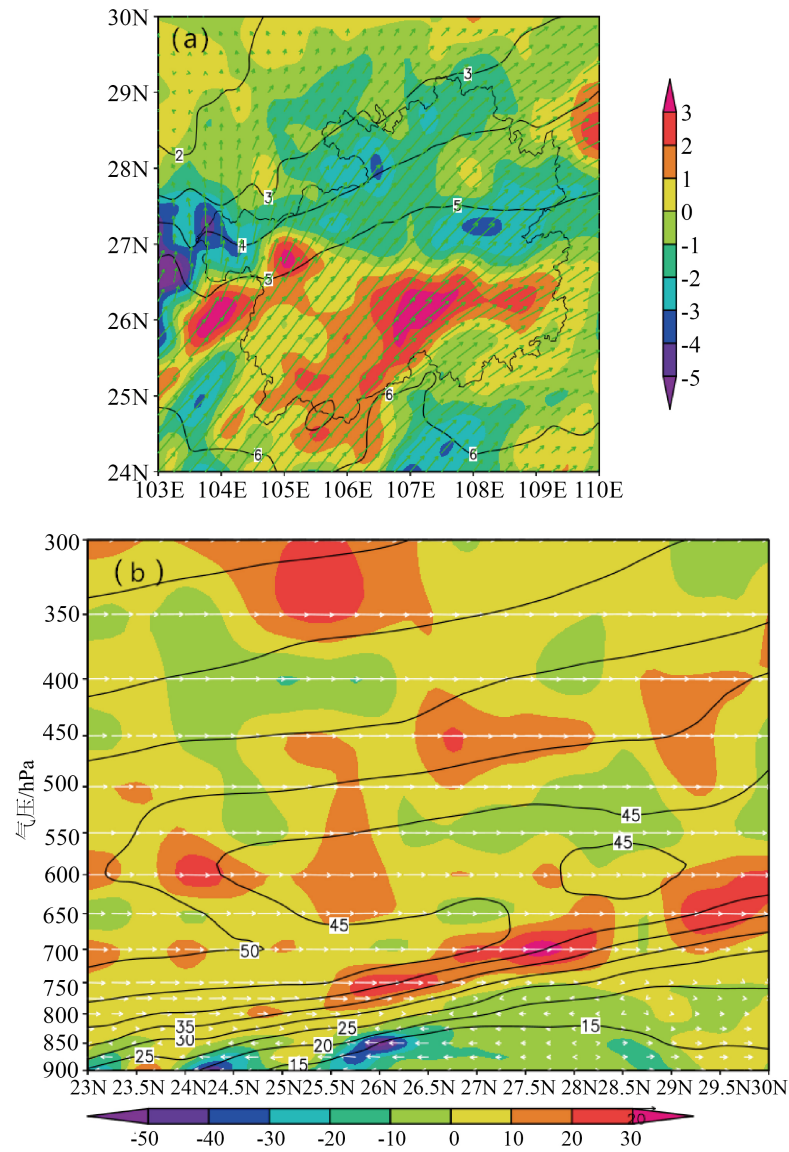
**Figure 8.** Vertical distribution of specific cloud ice water content and specific cloud liquid water content. (a) Green contour is for specific cloud liquid water content, unit: g/kg; red contour is for specific cloud ice water content, unit: g/kg) and Vertical distribution of specific rain water content and specific snow water content; (b) Green contour is for specific rain water content, unit: g/kg; red contour is for specific snow water content, unit: g/kg) at Guiyang Airport

**图 8.** 贵阳机场云中区域冰相粒子和液相粒子时间高度的分布。(a) 绿线为云中液态水粒子含量，单位：g/kg；红线为云中冰相水粒子含量，单位：g/kg)和空中雨和雪含量时间高度的分布；(b) 绿线为雨水含量，单位：g/kg；红线为雪水含量，单位：g/kg)



**Figure 9.** Vertical dynamic characteristics (a) and vertical water vapor characteristics (b) at Guiyang Airport (Wind barb is for horizontal wind, unit: m/s; red contour is for divergence, unit:  $10^{-5} \text{ s}^{-1}$ ; black contour is for specific humidity, unit: g/kg; blue contour is for water vapor flux dispersion, unit:  $10^{-5} \text{ g}\cdot\text{hPa}^{-1}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ )

**图 9.** 贵阳机场动力特征的时间高度剖面(a)和水汽特征的时间高度剖面(b) (黑色风羽表示水平风，单位：m/s；红线为散度，单位： $10^{-5} \text{ s}^{-1}$ ，黑线为比湿，单位：g/kg，蓝线为水汽通量散度，单位： $10^{-5} \text{ g}\cdot\text{hPa}^{-1}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ )



**Figure 10.** Distribution of moisture and its transporting condition at 700 hPa at 08:00 BT for the 29 December Case (a) (Vector is for horizontal wind, unit: m/s; colored is for moisture flux divergence, unit:  $10^{-5} \text{ g} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ; black contour is for specific humidity, unit: g/kg) and meridional section along 106.8°E (b) (Black contour is for potential pseudo-equivalent temperature, unit: °C; colored is for temperature advection, unit:  $10^{-5} \text{ °C/s}$ ; vector for meridional circulation)

**图 10.** 2018 年 12 月 29 日 08 时 700 hPa 水汽及其输送条件分布(a) (箭头为水平风场, 单位: m/s; 填色表示水汽通量散度, 单位:  $10^{-5} \text{ g} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ , 黑线为比湿, 单位: g/kg)和 106.8°E 经向剖面(b) (黑线为假相当位温场, 单位: °C; 填色为温度平流, 单位:  $10^{-5} \text{ °C/s}$ )

#### 4. 结论

文章利用 2008~2021 年地面逐时观测数据和 ECMWF ERA5 再分析资料等, 对贵阳龙洞堡机场冬季冻雨进行统计分析, 并针对发生在 2018 年 12 月底的一次典型案例, 从影响降水相态的关键因子出发, 分析对比了冻雨和降雪时段的环流形势、微物理特征及云内垂直热动力结构的差异, 主要结论如下:

1) 贵阳机场除个别年份外, 冻雨次数均在 5 次以下, 均发生在冬季, 以 1 月份最多, 且多发于凌晨, 午间最少, 近 14 年仅 4 次。



2) 2018年12月底冷空气过程属于横槽转竖型, 中西伯利亚积聚的冷空气沿贝加尔湖以东分裂南下影响我国, 冷空气由偏北路径入侵贵州, 同时副高减弱东退、南支槽东移, 孟加拉湾和南海的水汽沿西南气流向贵州输送, 冷暖气团交汇, 出现雨雪冰冻天气。

3) 此次过程850 hPa为冷空气控制, 700 hPa西南气流的加强与减弱是降水相态转变的关键, 冻雨和降雪时段具有相似的温度场配置结构, 不同在于冻雨具有较浅的冷垫和较厚的暖层, 逆温层温度是否大于0℃和湿层高度是决定此次过程降水相态为冻雨还是降雪的关键因素。

4) 冻雨时段的动力强迫主要位于中低层, 强度偏弱, 而降雪时段的动力强迫则主要位于高层, 强度较强, 随着近地面到高层整层均转为下沉运动, 降水天气结束。冻雨时段云中液相粒子为主, 降雪时段上层冰相粒子, 中层少量液相粒子, 液相粒子的存在对降雪密度的加大有显著作用。

5) 降水期间随着冷空气向南推进, 水汽辐合中心同风场辐合中心位置一致从850 hPa逐渐抬升至700 hPa, 且较为浅薄, 整个过程无明显水汽辐散, 此次冻雨主要由高空槽前暖湿气团沿锋面爬升所引起, 冻雨落区位于冷锋后部一定距离处, 低层除冷暖交汇处风力偏大外, 其余地区风力较小。

## 参考文献

- [1] 赵琳娜, 慕秀香, 马翠平, 等. 冬季稳定性降水相态预报研究进展[J]. 应用气象学报, 2021, 32(1): 12-24.
- [2] 宗志平, 马杰, 张恒德, 等. 近几十年来冻雨时空分布特征分析[J]. 气象, 2013, 39(7): 813-820.
- [3] 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.
- [4] 严小冬, 吴战平, 古书鸿. 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, 2009, 28(3): 694-701.
- [5] 王晓兰, 李象玉, 黎祖贤, 等. 2005年湖南省特大冰冻灾害天气分析[J]. 气象, 2006, 32(2): 87-91.
- [6] 吕胜辉, 王积国, 邱菊. 天津机场地区冻雨天气分析[J]. 气象科技, 2004, 32(6): 456-460.
- [7] 丁小剑, 杨军, 唐明晖, 等. 湖南2次典型的冰冻灾害天气特征及成因分析[J]. 干旱气象, 2010, 28(1): 76-80.
- [8] 张峻, 王海军. 我国南方冰冻天气过程低空逆温层特征[J]. 气象科技, 2013, 41(1): 103-107, 145.
- [9] 王传辉, 姚叶青, 苗开超, 等. 安徽省南部两次冻雨天气过程对比分析[J]. 气象, 2020, 46(2): 169-178.
- [10] 杨寅, 赵春霞, 宫宇. 基于CloudSat卫星观测的贵州冻雨形成机制分析[J]. 气象, 2018, 44(10): 1325-1331.
- [11] 杜小玲, 蓝伟. 两次滇黔准静止锋锋区结构的对比分析[J]. 高原气象, 2010, 29(5): 1183-1195.
- [12] 陶玥, 史月琴. 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.
- [13] 李登文, 乔琪, 魏涛. 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, 2009, 28(5): 1140-1148.
- [14] 方荻, 白慧, 李浪, 等. 贵州冬季冻雨研究综述[J]. 中低纬山地气象, 2020, 44(4): 19-26.
- [15] 杜正静, 丁治英, 张书余. 2001年1月滇黔准静止锋在演变过程中的结构及大气环流特征分析[J]. 热带气象学报, 2007, 23(3): 284-292.
- [16] 马晓刚, 曲晓波, 李月安, 等. 冻雨落区基本概念模型的研究与建立[J]. 气象, 2010, 36(9): 68-73.
- [17] 张娇艳, 王玥彤, 吴战平, 等. 贵州省冬季雨淞灾害预测模型的初构[J]. 中低纬山地气象, 2018, 42(3): 38-43.
- [18] 罗喜平, 王兴菊, 汪超. 2015年贵州首场降雪和冻雨天气对比分析[J]. 云南大学学报, 2017, 39(1): 71-77.
- [19] 方刚. 贵阳机场冻雨预报系统设计研究[D]: [硕士学位论文]. 成都: 电子科技大学, 2011.
- [20] 罗浩, 张亚男. 2018年12月贵阳机场一次冰冻雨雪天气成因分析[J]. 气候变化研究快报, 2022, 11(2): 180-188.
- [21] 徐冉, 张天航, 饶晓琴, 等. 2018年12月大气环流和天气分析[J]. 气象, 2019, 45(3): 437-443.
- [22] 陈双, 符娇兰. 华北地区雪密度不同的两次降雪过程对比分析[J]. 气象, 2021, 47(1): 36-48.
- [23] 孙继松, 梁丰, 陈敏, 等. 北京地区一次小雪天气过程造成路面交通严重受阻的成因分析[J]. 大气科学, 2003, 27(6): 1057-1066.