

2023年初贵阳机场一次雨雪天气过程诊断分析

蓝天, 罗浩

民航贵州空管分局, 贵州 贵阳

收稿日期: 2024年2月7日; 录用日期: 2024年3月5日; 发布日期: 2024年3月12日

摘要

文章利用中国地面气象台站2400站的常规观测资料、ERA5分辨率为 $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$ 的逐小时大气再分析资料、贵阳机场的自动气象观测数据、57816贵阳站的探空数据, 对2023年初贵阳机场的一次雨雪天气过程进行了诊断分析。分析表明: 2023年1月15~18日贵阳机场出现长达4 d的低温雨雪天气, 降水类型涉及雨夹雪、冻雨等, 降水相态复杂多变, 出现多次转换; 700 hPa西南气流和850 hPa及以下东北回流冷空气是贵阳机场本次雨雪过程的主要水汽来源通道; 冷空气南下后, 中低层冷平流发展强烈, 温度迅速降低, 700 hPa急流呈现弱-强-弱的变化趋势; 冰水、云水含量在整个雨雪天气过程中共存且云中水汽相态分布呈现明显的分层及阶段性变化; 上述条件的共同作用造成了2023年1月15~18日贵阳机场雨雪天气以及降水相态的多次转换。

关键词

贵阳机场, 冻雨, 雨雪相态转换

Diagnostic Analysis of a Rainy and Snowy Weather Process at Guiyang Airport in Early 2023

Tian Lan, Hao Luo

Guizhou Air Traffic Control Bureau of CAAC, Guiyang Guizhou

Received: Feb. 7th, 2024; accepted: Mar. 5th, 2024; published: Mar. 12th, 2024

Abstract

In this paper, using conventional observation data from 2400 Chinese surface meteorological stations, hourly atmospheric reanalysis data with ERA5 resolution of $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$, automatic meteorological

observation data from Guiyang Airport, and sounding data from 57816 Guiyang Station, a diagnostic analysis was conducted on a rainy and snowy weather process at Guiyang Airport in early 2023. The analysis showed that a 4-day long low-temperature rainy and snowy weather occurred at Guiyang Airport from January 15 to 18, 2023, with precipitation types including sleet and freezing rain; the precipitation phase is complex and variable, with multiple transitions occurring; the southwest airflow at 700 hPa and the northeast reflux cold air at 850 hPa and below are the main water vapor sources for the rain and snow process at Guiyang Airport; after the cold air flows southward, the cold advection in the middle and lower layers develops strongly, and the temperature rapidly decreases. The 700 hPa jet shows a weak-strong-weak trend; the content of ice water and cloud water coexists throughout the entire rainy and snowy weather process, and the distribution of water vapor phase in clouds shows obvious stratification and phased changes; the combined effect of the above conditions resulted in multiple transitions in the rainy and snowy weather and precipitation phase at Guiyang Airport from January 15 to 18, 2023.

Keywords

Guiyang Airport, Frozen Rain, Rain and Snow Phase Transition

Copyright © 2024 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

我国西南地区地势西北高东南低, 靠近地球上最大的高原——青藏高原, 具有典型的低纬度高原特征。云贵准静止锋是冬季影响我国西南地区的最主要天气之一, 与该地区的降雨、降雪、冻雨等天气具有密切的联系[1]。低温雨雪冰冻天气是我国低纬度高原地区冬季多发灾害性天气, 而贵州是我国出现冻雨最频繁的省份, 占总数的 84% [2] [3]。严小冬等指出, 贵州冬季冻雨时空分布受海拔、静止锋和不同冷空气厚度等因素影响, 主要表现为西部多、东部少、中部多、南北少[4], 位于贵州中部的贵阳龙洞堡机场也是南方地区为数不多的易受到冻雨影响的机场之一。雨雪天气能使跑道结冰, 影响飞机起降, 飞机起降穿过富含过冷水的云层时, 常常造成飞机积冰, 严重影响飞行安全。

现阶段对于雨雪凝冻灾害已有许多研究。雨雪天气是中高纬度和低纬度天气系统相互作用的结果, 高守亭等研究发现, 中高纬乌拉尔山阻高、低纬印缅槽、高层的副热带高空急流、锋区、低层的云贵准静止锋以及中低层的西南低空急流是造成贵州冻雨最直接主要的影响系统[5]。早在 1973 年, 冻雨的“三层模式”就已经被中央气象台提出。而曾莉萍等在后续的研究中发现, “冷-暖-冷”的温度垂直结构并不是冻雨发生的必要条件, 降雪和冻雨发生时的温度垂直分层可以同为“三层模式”[6]。温湿垂直结构是对降水相态的关键因素之一, 冻雨与融化层厚度、温度和相对湿度的增加有密切关系, 次冻结层厚度增加或温度降低有利于冰粒形成, 较高的云顶高度及云下温度 $< -5^{\circ}\text{C}$ 有利于过冷雨滴再冻结为冰粒或雨夹雪[7]。

目前, 对贵阳机场雨雪天气过程个例的分析还较少, 本文通过对贵阳机场一次雨雪过程的发生发展、影响的天气系统、各气象要素的变化情况、雨雪相态转换进行诊断分析, 以期为后续雨雪差异化研究积累预报经验。

2. 资料与方法

本文利用中国地面气象台站 2400 站的常规观测资料、ERA5 分辨率为 $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$ 的逐小时大气再

分析资料、贵阳机场的自动气象观测数据、57816 贵阳站的探空数据, 采取插值、逐步订正、统计分析的方法, 探讨了环流形势、垂直结构以及一些云中物理量特征。

3. 实况概要

2023 年 1 月 15 日开始至 1 月 18 日, 贵阳机场出现长达 4 d 的低温雨雪天气。从贵阳机场实况观测资料(表 1)来看, 降水类型涉及雨夹雪、冻雨等, 降水相态复杂多变, 出现多次转换, 可以将其分为 3 个阶段: 其中 15 日早晨、17 及 18 日夜晨(北京时, 下同)为混合型降水, 15 日白天为固态降水, 16 日夜间为过冷降水, 整个过程降水量较少, 仅 0.5 mm。从气温变化来看(图 1), 14 日夜间起受强冷空气影响气温骤降, 15 日 16 时跌破 0℃, 其后仅 16 日夜间短时高于 0℃, 24 小时最大降温 11℃, 最低温-2.9℃出现在 17 日早晨, 达到我国冷空气等级国家标准中的寒潮标准, 18 日以后温度回升, 雨雪过程结束。运行方面, 由于剧烈降温和雨雪影响, 贵阳机场对航班进行调时, 15 日出港航班 193 架次全部除冰, 16~18 日对部分出港航班除冰。

Table 1. Summary of observations and statistics of rain and snow weather processes at Guiyang Airport from January 15~18, 2023 (Beijing time, the same below)

表 1. 贵阳机场 2023 年 1 月 15~18 日雨雪天气过程观测统计一览表(北京时, 下同)

日期	雨雪天气演变	对机场运行的影响
1 月 15 日	雨夹雪: 04:45~08:50 霰: 09:15~09:50 米雪: 12:16~17:51	航班调时, 全部出港飞机除冰
1 月 16 日	冻雨: 20:56~21:51 有雨淞	部分飞机除冰
1 月 17 日	米雪: 04:50~05:50 冻雨: 04:57~07:47、23:33~00:00 有雨淞	部分飞机除冰
1 月 18 日	米雪: 01:06~01:36 冻雨: 00:00~02:48 有雨淞	部分飞机除冰

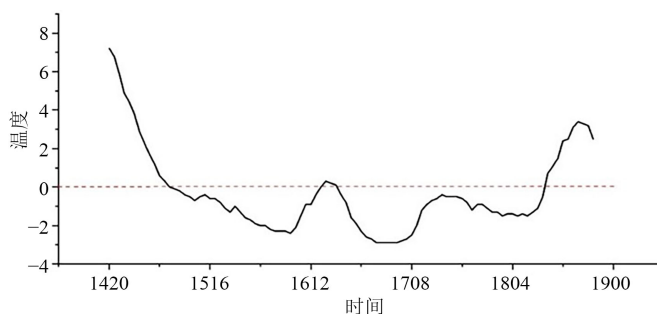


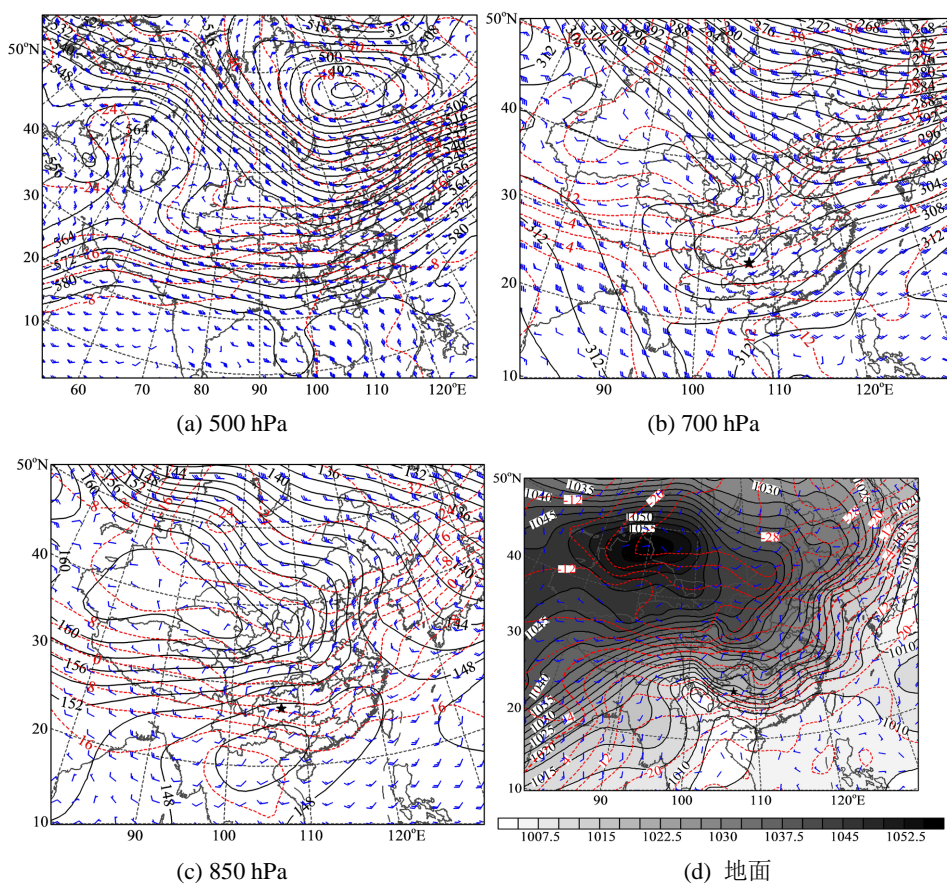
Figure 1. Schematic diagram of hourly temperature changes at Guiyang Airport from 20:00 on the 14th to 20:00 on the 18th (unit: °C)

图 1. 贵阳机场 14 日 20 时~18 日 20 时逐小时实况温度变化示意图(单位: °C)

4. 天气形势分析

2023 年 1 月 14 日 20 时, 欧亚中高纬度呈现一槽一脊(图 2(a)), 有明显的阻塞形势, 阻塞高压位于乌拉尔山附近向北隆起挤压西风带, 使得径向环流增强, 形成倒“Ω”环流形势。阻塞高压前部存在一条正在转竖的横槽, 并配合较强的温度槽, 槽后西北气流强盛。同时, 西西伯利亚有一冷涡中心, 深厚

的低压槽自低涡中心呈东北-西南方向伸出, 延伸至我国西北地区。二者相互配合引导冷空气大举南下。中低纬可见南支槽活动明显, 西南气流强盛, 建立了良好的水汽通道。中低层上, 从 700 hPa 来看(图 2(b)), 川渝北部有切变存在且缓慢南压, 贵州受西南低空急流影响, 16 日急流中心最大风速达 20 m/s, 较强的暖湿气流的输送有利于加大低空逆温梯度, 利于低空水汽辐合。影响贵州地区的急流先增强后减弱, 这可能是造成此次过程雨雪相态多次转换的主要原因之一; 温度变化上, 14 日夜间 0°C 等温线已到达贵州中部, 15 日夜间-4°C 线影响贵阳。从 850 hPa 来看(图 2(c)), 贵州位于冷高压底部前部, 盛行东北气流, 云贵之间有等温线密集带, 为准静止锋区, 冷空气以东北路径渗透入侵, 0°C 等温线抵达贵州北部并持续南进。地面冷高压主体位于我国新疆以北(图 2(d)), 中心强度达 1055 hPa, 从移动来看, 冷空气南下过程迅速, 在 48 h 内冷锋由河套平原推至长江以南, 等温线密集, 锋面特征明显, 冷空气受横断山脉阻挡在云贵之间形成了较强的准静止锋, 贵州处于准静止锋后, 东北冷空气输送维持稳定, 被低温雨雪天气控制。



注: (a)~(c)实线等值线: 位势高度, 单位: dagpm; 虚线等值线: 温度, 单位: °C; 风杆: 风矢量, 单位: $m \cdot s^{-1}$; 五角星: 贵阳机场; (d)等值线: 海平面气压, 单位: hPa; 虚线等值线: 温度, 单位: °C; 风杆: 风矢量, 单位: $m \cdot s^{-1}$; 五角星: 贵阳机场。

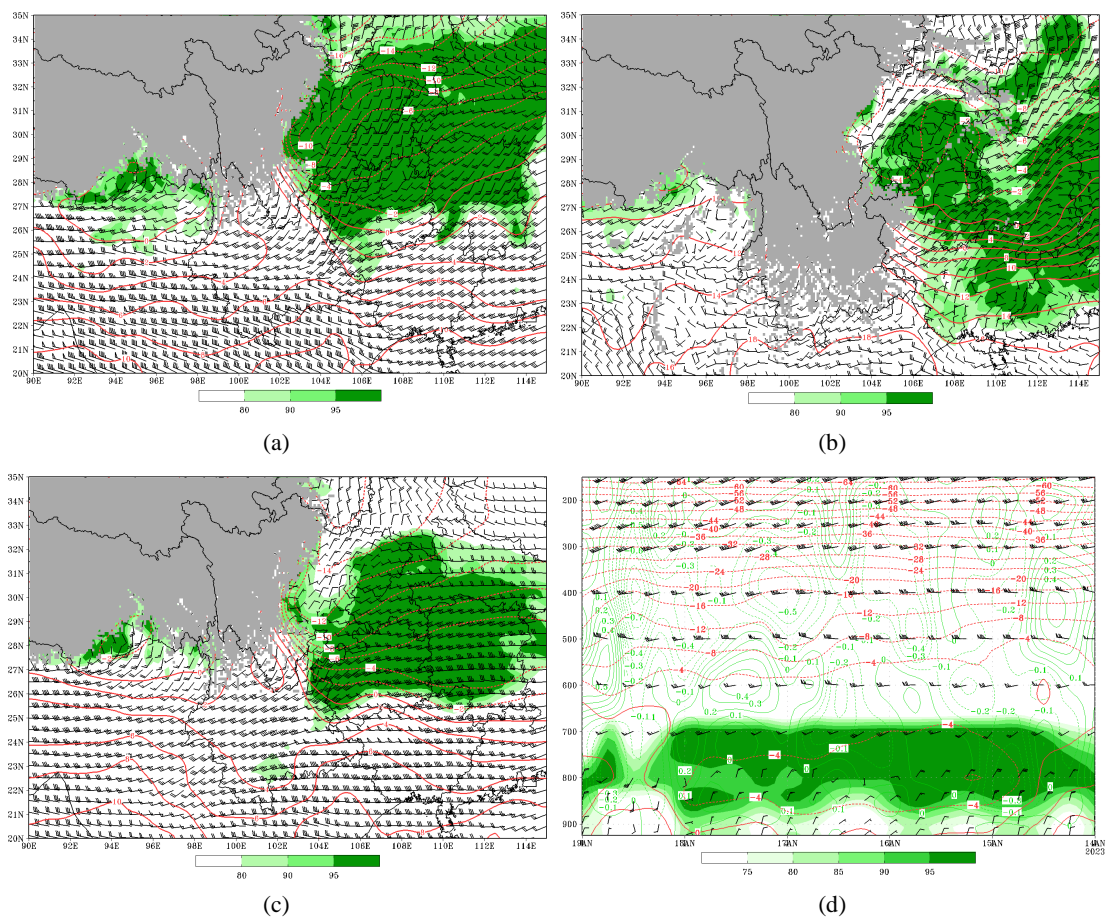
Figure 2. (a) Schematic diagram of the altitude, temperature, and wind fields at 20:00, 500 hPa on January 14, 2023; (b) Schematic diagram of the altitude, temperature, and wind fields at 20:00, 700 hPa on January 14, 2023; (c) Schematic diagram of the altitude, temperature, and wind fields at 20:00, 850 hPa on January 14, 2023; (d) Schematic diagram of the ground sea level pressure and wind field at 20:00 on January 14, 2023

图 2. (a) 2023 年 1 月 14 日 20 时 500 hPa 高度场、温度场和风场示意图; (b) 2023 年 1 月 14 日 20 时 700 hPa 高度场、温度场和风场示意图; (c) 2023 年 1 月 14 日 20 时 850 hPa 高度场、温度场和风场示意图; (d) 2023 年 1 月 14 日 20 时地面海平面气压场和风场示意图

5. 物理量诊断分析

5.1. 水汽分布

西南暖湿气流和由高纬南下变性的大陆冷气团在云贵高原由于地形阻滞而形成的云贵准静止锋是冬季最常影响贵州的天气系统。根据 14 日 20 时相对湿度及风温场发现, 700 hPa 西南气流和 850 hPa 东北回流冷空气及以下为贵阳机场本次雨雪过程的主要水汽来源通道(图 3(a)~(b)), 杨凤婷等在对比贵阳机场 3 次雨雪天气中指出, 深厚的湿层往往对应较强的雨雪过程[8], 而本次过程的水汽集中在低层(图 3(d)), 这也解释了为何过程降水量仅有 0.5 mm。15 日开始, 低层冷垫明显增厚, 700 hPa 下降到 -4°C , 随着温度降低, 贵阳机场的降水相态由雨夹雪转为雪。16 日夜間 700 hPa 西南气流加强为西南急流(图 3(c)), 暖湿水汽通道增强, 预示相对融化层的增强, 这是降水相态向冻雨发生转换的关键因素。17、18 日 700 hPa 急流虽然维持, 但冷空气进一步补充以后相对融化层被有所削弱, 混合降水成为降水的主要相态。



注: 绿色阴影: 相对湿度, 单位: %; 等值线: 温度, 单位: $^{\circ}\text{C}$; 风杆: 风矢量, 单位: $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。

Figure 3. (a) Schematic diagram of relative humidity and wind temperature fields at 20:00, 700 hPa on January 14, 2023; (b) Schematic diagram of relative humidity and wind temperature fields at 20:00, 850 hPa on January 14, 2023; (c) Schematic diagram of relative humidity and wind temperature field at 23:00, 700 hPa on January 16, 2023; (d) Schematic diagram of the vertical profile time series of relative humidity and wind temperature at Guiyang Airport from January 14th to 19th, 2023

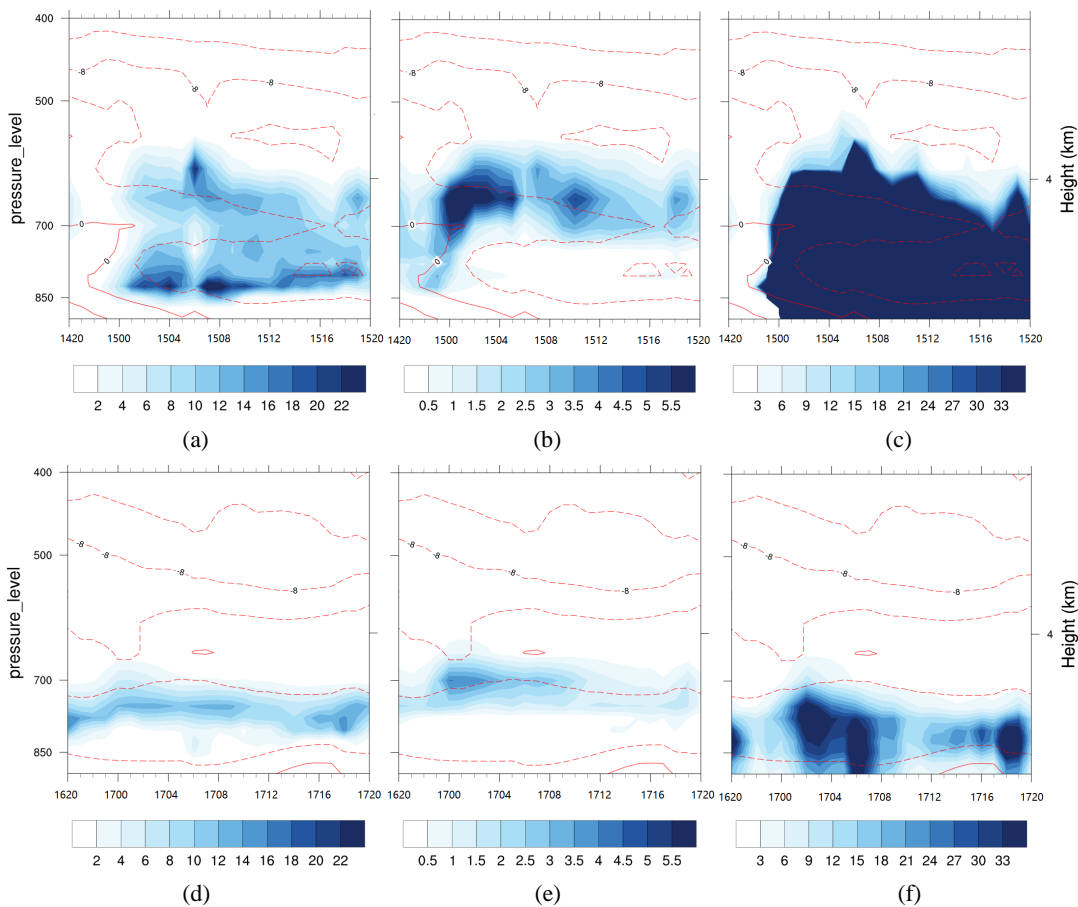
图 3. (a) 2023 年 1 月 14 日 20 时 700 hPa 相对湿度和风温场示意图; (b) 2023 年 1 月 14 日 20 时 850 hPa 相对湿度和风温场示意图; (c) 2023 年 1 月 16 日 23 时 700 hPa 相对湿度和风温场示意图; (d) 2023 年 1 月 14~19 日贵阳机场相对湿度和风温垂直剖面时序示意图

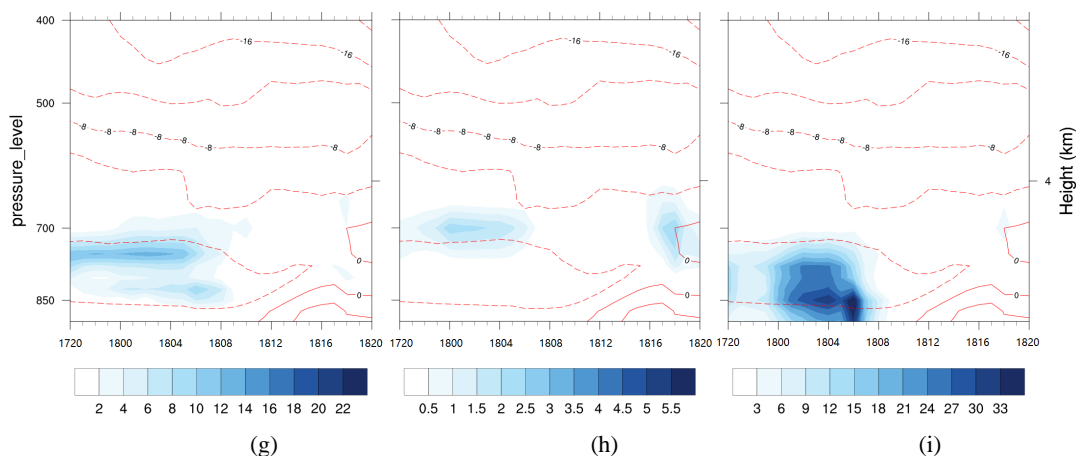
5.2. 云物理分析

冬季层状云降水中的混合层状云(水-冰混合云)降水是造成冻雨雪主要的降水云型。曾莉萍等研究发现, 冻雨与雪之间的相态转换与温度的垂直分布、云系高低及云顶温度的高低有密不可分的关系[6]。冻雨期间水汽的辐合中心集中在中低层, 而降雪期间高湿区向上发展的高度远高于冻雨[9]。由于静止锋坡度小, 层结又是下冷上暖, 因此, 气层相当稳定, 云内上升气流弱, 汇集于逆温层下的水汽(云)在空中碰撞合并的机会很少, 所以云中水汽分布呈现明显的分层现象。高的云水含量往往对应冻雨, 而降雪开始后云水含量会逐渐减弱消失, 整层出现云冰含量区并维持[10]。通过分析各时段云中冰、水相态分布可以对降水相态的转换有更进一步的认识。

15日凌晨冷空气加入后, 云中温度低于 0°C , 850 hPa 云中水汽相态开始由液态水转换为冰晶(图 4(a)), 同时大气中的雪水含量显著增加(图 4(c)), 云顶高度在 600 hPa 附近, 云中粒子呈现水滴高、冰晶低的分层明显, 700 hPa 是冰晶与液态水的分界线, 该层以上二者以混合物的形式共同存在。液态水含量在 15 日早晨达到大值, 随着冷空气的逐渐加入, 液态水滴向冰晶发生转换, 这与 15 日早晨——白天的雨夹雪转雪有很好的一致性。

16 日夜间至 17 日早晨, 云中液态水、冰晶以及大气雪水无论是含量还是高度分布都相较 15 日有明显所下降(图 4(d)~(f)), 二者混合集中于 700 hPa 附近, 水滴分布略高于冰晶。16 日 20 至 17 日 00 时, 受增强的西南急流融化层影响, 云中液态水含量增加, 雨滴在下落的过程中来不及冻结, 对应了零星冻雨的出现。后半夜随着冷空气的继续加入和 700 hPa 西南急流稍有减弱, 液态水开始向冰晶转换, 很好地解释了 17 日早晨冻雨夹雪的发生机理。





注: ((a)、(d)、(g))蓝色阴影: 比云冰含量, 单位: $\text{kg} \cdot 10^{-6} \cdot \text{kg}^{-1}$; 红色虚线: 温度, 单位: $^{\circ}\text{C}$; ((b)、(e)、(h))蓝色阴影: 比云中液态水含量, 单位: $\text{kg} \cdot 10^{-4} \cdot \text{kg}^{-1}$; 红色虚线: 温度, 单位: $^{\circ}\text{C}$; ((c)、(f)、(i))蓝色阴影: 比大气雪水含量, 单位: $\text{kg} \cdot 10^{-7} \cdot \text{kg}^{-1}$; 红色虚线: 温度, 单位: $^{\circ}\text{C}$ 。横坐标为时间, 单位为日、时(1720 代表 17 日 20 时)。

Figure 4. (a) Schematic diagram of the vertical distribution time series of ice water content and temperature in the clouds at Guiyang Airport on January 14, 2023, from 20:00 to 20:00 on January 15, 2023; (b) Schematic diagram of the vertical distribution time series of liquid water content and temperature in the clouds at Guiyang Airport on January 14, 2023, from 20:00 to 20:00 on January 15, 2023; (c) Schematic diagram of the vertical distribution time series of atmospheric snow water content and temperature at Guiyang Airport on January 14, 2023, from 20:00 to 20:00 on January 15, 2023; (d) Schematic diagram of the vertical distribution time series of ice water content and temperature in the clouds at Guiyang Airport on January 16, 2023, from 20:00 to 20:00 on January 17, 2023; (e) Schematic diagram of the vertical distribution time series of liquid water content and temperature in the clouds at Guiyang Airport on January 16, 2023, from 20:00 to 20:00 on January 17, 2023; (f) Schematic diagram of the vertical distribution time series of atmospheric snow water content and temperature at Guiyang Airport on January 16, 2023, from 20:00 to 20:00 on January 17, 2023; (g) Schematic diagram of the vertical distribution time series of ice water content and temperature in the clouds at Guiyang Airport on January 17, 2023, from 20:00 to 20:00 on January 18, 2023; (h) Schematic diagram of the vertical distribution time series of liquid water content and temperature in the clouds at Guiyang Airport on January 17, 2023, from 20:00 to 20:00 on January 18, 2023; (i) Schematic diagram of the vertical distribution time series of atmospheric snow water content and temperature at Guiyang Airport on January 17, 2023, from 20:00 to 20:00 on January 18, 2023

图4. (a) 2023年1月14日20时~15日20时贵阳机场比云中冰水含量及温度垂直分布时序示意图; (b) 2023年1月14日20时~15日20时贵阳机场比云中液态水含量及温度垂直分布时序示意图; (c) 2023年1月14日20时~15日20时贵阳机场比大气雪水含量及温度垂直分布时序示意图; (d) 2023年1月16日20时~17日20时贵阳机场比云中冰水含量及温度垂直分布时序示意图; (e) 2023年1月16日20时~17日20时贵阳机场比云中液态水含量及温度垂直分布时序示意图; (f) 2023年1月16日20时~17日20时贵阳机场比大气雪水含量及温度垂直分布时序示意图; (g) 2023年1月17日20时~18日20时贵阳机场比云中冰水含量及温度垂直分布时序示意图; (h) 2023年1月17日20时~18日20时贵阳机场比云中液态水含量及温度垂直分布时序示意图; (i) 2023年1月17日20时~18日20时贵阳机场比大气雪水含量及温度垂直分布时序示意图

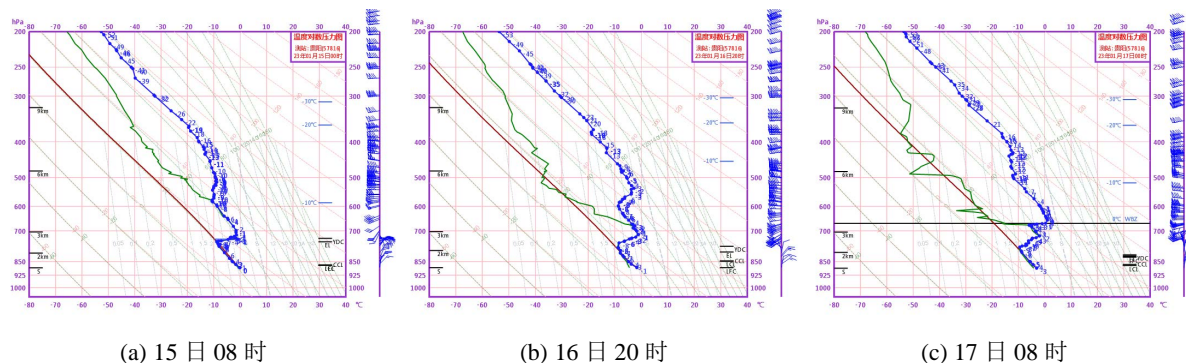
17日夜间至18日凌晨的水汽分布与17日早晨情况类似(图4(g)~(i)), 云中冰、水仍然混合存在, 而大气中雪水含量的增加与该时段的冻雨夹雪时段也基本一致。18日以后冷空气及水汽都趋于减弱, 温度回升, 降水过程结束。

5.3. 大气垂直结构分析

贵阳机场降雪、雨夹雪温度层结整层均为冷性结构, 冻雨存在逆温层, 呈“冷-暖-冷”分布[11]。根据1月15~18日过程期间贵阳实况探空资料来看, 温度层结具有冷性结构, 虽存在逆温, 但其没有超

过0℃, 只存在理论意义上的“相对融化层”, 为“非典型冻雨”结构。

对比分析三个降水阶段的垂直探空图(图5), 整个过程的湿层高度呈现逐渐降低的趋势, 15日白天的湿层高度达到600 hPa附近, 云顶温度至-10℃以下, 是15日白天产生降雪的关键温度条件。16日后随着湿层高度的逐渐降低, 水汽更集中在700 hPa以下, 而逆温底气温大多为-8℃左右, 这是过冷水与冰晶粒子共存的环境温度, 配合地面气温持续低于0℃, 降水相态可表现为冻雨/冻雨夹雪。



注: 蓝线: 层结曲线; 绿线: 露点曲线; 红线: 状态曲线。

Figure 5. Schematic diagram of the T-logP of Guiyang Station

图5. 贵阳站实况 T-logP 示意图

6. 结论

2023年1月15~18日, 贵阳机场出现持续4 d的低温雨雪天气。该过程持续时间较长、降水相态复杂。本文按照雨雪特点将其分为三个阶段, 对各阶段雨雪成因开展了诊断分析, 主要结论如下:

1) 1月14日起的强冷空气活动影响及锋区南进西推, 在云贵之间形成了较强的准静止锋, 处于准静止锋后是贵阳机场出现低温雨雪天气的重要原因。

2) 700 hPa西南气流和850 hPa及以下东北回流冷空气是贵阳机场本次雨雪过程的主要水汽来源通道。中高层水汽含量少, 湿层浅薄, 是使整个过程以弱降水为主, 降水量仅0.5 mm的原因。

3) 14日夜间起, 强冷空气南下影响贵阳机场, 冷平流发展强烈, 各层温度迅速降低, 是导致15日白天降水相态由雨夹雪转换为雪的重要原因。

4) 系统性冷空气侵入到对流层下层是导致15日降水从雨夹雪转变成降雪的主要机制。16日以后影响贵阳机场的700 hPa急流先增强后减弱, 配合850 hPa以下温度持续下降是产生雨雪相态多次转换的关键。

5) 700 hPa是云中冰晶与液态水的分界线, 云中水汽相态分布呈现明显的分层, 16日以后云中冰雪层变薄, 云冰、云水含量共存且有阶段性变化是导致降水相态多次转换的直接原因。

参考文献

- [1] 秦剑, 琚建华, 解明恩. 低纬高原天气气候[M]. 北京: 气象出版社, 1997: 107-112.
- [2] 朱乾根, 林锦瑞, 寿绍文, 等. 天气学原理与方法 [M]. 第4版. 北京: 气象出版社, 2007: 313-319.
- [3] 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.
- [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] 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.
- [6] 曾莉萍, 罗乃兴. 贵州两次凝冻天气云物理结构对比浅析[C]//第29届中国气象学会年会论文集. 2012: 1-13.

-
- [7] 陆正奇. 冬季降水相态的理论模型构建及地形的影响研究[D]: [博士学位论文]. 南京: 南京信息工程大学, 2023. <https://doi.org/10.27248/d.cnki.gnjqc.2022.000036>
- [8] 杨凤婷, 刘贵萍, 向曦子. 2022 年初贵阳机场三次雨雪天气过程对比分析[J]. 气候变化研究快报, 2022, 11(5): 693-702. <https://doi.org/10.12677/CCRL.2022.115073>
- [9] 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.
- [10] 刘开宇. 贵阳机场一次大雪冻雨混合性降水微物理过程的数值模拟[J]. 云南大学学报(自然科学版), 2013, 35(S2): 279-285.
- [11] 宋媛. 贵阳机场一次雨雪天气形成机制分析[J]. 自然科学, 2022, 10(5): 865-873. <https://doi.org/10.12677/OJNS.2022.105099>