暴雨灾害
Torrential Rain and Disasters
中国科技核心期刊
中国科技论文统计源期刊

贵州冬季一次多相态锋面降水过程的诊断分析

周明飞 罗敬 何东坡 周文钰 杜小玲

Diagnostic analysis of a multi-phase frontal precipitation process in winter in Guizhou

ZHOU Mingfei，LUO Jing，HE Dongpo，ZHOU Wenyu，DU Xiaoling

在线阅读 View online: https://doi.org/10.12406/byzh.2025-042

您可能感兴趣的其他文章 Articles you may be interested in

对流风暴大气不稳定机制研究的若干问题

Some issues in studies on the atmospheric instability of convective storms

暴雨灾害. 2024, 43(3): 266-275 https://doi.org/10.12406/byzh.2024-030

河南北中部一次雨雪冰冻过程的相态特征分析

Characteristics of the precipitation phase during a rainfall/snowfall and freezing event in northern and central Henan

暴雨灾害. 2024, 43(4): 431-439 https://doi.org/10.12406/byzh.2024-069

贵州锋面雾的基本特征及静止锋进退对其生消的影响分析

Analysis on basic characteristics of frontal fog in Guizhou and influence of stationary front on its generation and elimination

暴雨灾害. 2020, 39(5): 496-507 https://doi.org/10.3969/j.issn.1004-9045.2020.05.008

一次春季雨雪天气的降水相态演变特征分析

Analysis on the phase transformation of precipitation in a rain and snow event in spring

暴雨灾害. 2022, 41(3): 290-297 https://doi.org/10.3969/j.issn.1004-9045.2022.03.005

静止锋东退背景下云南文山“4.28”局地强风暴过程分析

Analysis of"4.28"sever local storm caused stationary front of Wenshan in Yunnan Province

暴雨灾害. 2022, 41(2): 151-157 https://doi.org/10.3969/j.issn.1004-9045.2022.02.005

华北初春一次高架雷暴天气的环境条件及触发机制分析

Analysis of environmental conditions and trigger mechanism of an elevated thunderstorm in early spring in North China

暴雨灾害. 2025, 44(3): 361-370 https://doi.org/10.12406/byzh.2024-084

关注微信公众号，获得更多资讯信息

周明飞,罗敬,何东坡,等.2026.贵州冬季一次多相态锋面降水过程的诊断分析[J].暴雨灾害,45(1):91−102. ZHOU Mingfei, LUO Jing, HE Dongpo, et al. 2026. Diagnostic analysis of a multi-phase frontal precipitation process in winter in Guizhou [J]. Torrential Rain and Disasters,45(1):91−102 (in Chinese). doi:10.12406/byzh.2025−042

贵州冬季一次多相态锋面降水过程的诊断分析

周明飞, 罗敬, 何东坡, 周文钰, 杜小玲

(贵州省气象台, 贵阳 550002)

摘　要: 2024 年 2 月 3 日贵州出现了一次冬季少见的冻雨、雪、冰雹和暴雨同时出现的复杂降水相态天气过程。利用气象常规观测、风云 4A 卫星云图、多普勒天气雷达以及 ERA5 大气再分析资料, 采用天气学分析和天气诊断方法对本次过程的降水演变、锋生作用和不稳定机制进行研究。 结果表明: (1) 本次天气过程为南支槽前西南气流发展、冷暖空气均持续加强、云贵静止锋锋生共同作用而形成的锋面降水天气。(2) 中尺度降水带横跨云贵静止锋, 降水带西段发展快速和剧烈, 降水回波具有积状云回波特征, 出现了冰雹和短时强降水等强对流天气; 降水带东段降水强度较弱, 降水回波具有层积混合回波特征, 回波顶伸展较高并有冰晶层发展, 出现了雨雪相态的转换。(3) 降水带西段贵州西南部地区处于静止锋前暖气团中, 午后快速增温增湿, 条件性静力不稳定发展, 导致垂直对流的生成发展。降水带东段贵州东北部处于静止锋后, 温度垂直分布呈现三层结构, 受冷空气增强影响, 大气整层温度下降, 融化层减弱, 冷层和冰晶层发展加强, 静止锋锋生出现条件对称不稳定, 沿锋面倾斜上升运动发展, 降水由雨转雪。

关键词: 降水相态; 云贵静止锋; 静力不稳定; 对称不稳定

中图法分类号: P458.3　　**文献标志码**: A　　**DOI:** 10.12406/byzh.2025−042

Diagnostic analysis of a multi-phase frontal precipitation process in winter in Guizhou

ZHOU Mingfei, LUO Jing, HE Dongpo, ZHOU Wenyu, DU Xiaoling

(*Guizhou Meteorological Observatory*, *Guiyang* 550002)

Abstract: On February 3, 2024, a rare complex phase precipitation process with freezing rain, snow, hail, and rainstorm in winter occurred in Guizhou. Based on the conventional meteorological observation data, FY-4A satellite cloud image, doppler weather radar data, and the fifth-generation atmospheric reanalysis data from the European Centre for Medium-Range Weather Forecasts, the precipitation evolution, the frontogenesis and instability mechanisms of this process were studied by weather analysis and diagnosis method. The results are as follows. (1) This weather process is a frontal precipitation weather formed by the development of southwest airflow in front of the south branch trough, the continuous strengthening of cold and warm air, and the interaction of Yunnan-Guizhou quasi-stationary frontogenesis. (2) The mesoscale precipitation belt crosses the Yunnan-Guizhou quasi-stationary front, with its western section developing rapidly and intensely. The precipitation echo has the characteristics of the cumulus cloud echo, resulting in strong convective weather of hail and short-term heavy precipitation. However, the eastern section of the precipitation belt shows weaker precipitation intensity, with characteristics of stratified mixed echo, higher echo top, and the development of ice crystal layer, resulting in the transition between rain and snow phases. (3) The southwestern Guizhou in the western part of the precipitation belt is in the warm air mass ahead of the quasi-stationary front. The rapid warming and humidification in the afternoon and the conditional static instability lead to the formation and development of vertical convection. The northeastern part of Guizhou in the eastern section of the precipitation belt is behind the quasi-stationary front, and the vertical distribution of temperature presents a three-layer structure. Affected by the enhancement of cold air, the temperature of the whole atmosphere decreases, the melting layer weakens, and the development of the cold layer and the ice crystal layer strengthens. The quasi-stationary front is generated with the conditional symmetric instability, leading to the upward movement along the

收稿日期: 2025−03−05; **定稿日期**: 2025−09−07

资助项目: 中国气象局复盘总结专项 (FPZJ2024-120); 贵州省气象局省市联合基金项目 (SS-KF[2024]18、SS[2023]03); 中国气象局创新发展专项 (CXFZ2025J014); 贵州省气象局创新团队项目 (TD[2024]01)

第一作者: 周明飞, 主要从事中短期天气预报技术方法研究, E-mail: 52792337@qq.com

通信作者: 罗敬, 主要从事中短期天气预报技术方法研究, Email: linra_l@yeah.net

© Editorial Office of *Torrential Rain and Disasters*. OA under CC BY−NC−ND 4.0

frontal zone and the transition from rain to snow.

Key words: precipitation phase; stationary front; static instability; symmetric instability

引　言

贵州冬半年通常受到云贵静止锋的影响, 以低温阴雨天气居多, 降水相态以雨为主, 但有时也会出现雪、冻雨、冰粒等其他相态, 或多种相态混合。混合降水相态的雨雪天气 (包括冻雨、冰粒和湿雪) 会给电力输送和交通安全带来较大影响 (Farzaneh et al., 2008; 李清华等, 2022), 也会给人民生命财产安全、社会经济运行带来较大危害 (宗志平等, 2013; 白慧等, 2025), 而冬季混合降水相态的预报一直是天气预报的难点 (赵琳娜等, 2008; 杨丽杰等, 2021; 云天雨等, 2024), 因此, 开展贵州地区冬季各种降水相态天气的发生发展机制、形成机理及预报方法的研究, 对降低冬季不同降水相态天气造成的电力、交通影响及社会经济损失具有重要意义。

各类降水天气过程的不稳定机制通常分为三种: 垂直方向上的静力不稳定、水平方向上的惯性不稳定以及倾斜方向上的对称不稳定。静力不稳定的形成、发展与温度、湿度的垂直分布廓线有关, 其形成和发展时会导致垂直对流的发展, 造成剧烈天气的出现, 如冰雹、雷暴大风和暴雨等。静力不稳定在强对流天气中的研究较多, 不同强度和高度的静力不稳定造成强对流天气产生的天气现象、类型和强度均有不同 (王秀明等, 2014; 陈云辉等, 2019; 周明飞等, 2022)。惯性不稳定描述的是流体在受到径向扰动后, 因旋转效应导致的稳定性问题, 常出现在急流或强水平风切变区域 (覃皓等, 2024)。而在大气垂直方向上对流稳定、水平方向上惯性稳定时, 在重力和惯性力的共同作用下, 空气作倾斜上升运动时会出现对称不稳定, 而湿对称不稳定可以导致大到暴雪以及显著降雨 (Reuter and Aktary, 1995; 任丽等, 2019; 俞小鼎等, 2024)。对称不稳定在锋面附近的雨雪天气和带状降水中的研究较多, 锋面的抬升作用与湿对称不稳定的发展存在一定的联系 (Snook, 1992; 阎琦等, 2017)。对称不稳定发展需要的中性层结和大的垂直风切变条件往往在锋区附近容易满足 (Byrd, 1989; Schultz and Schumacher, 1999)。不稳定机制的分析有助于找出降水的成因。

目前, 我国西南地区冬季降水的相态研究多只针对雨、雪、冻雨等天气现象或上述冬季常见相态的转换 (王一颉等, 2019; 杨旗等, 2024)、气候特征及其异常成因 (李忠燕等, 2022; 夏阳等, 2023)、天气环流形势 (甘文强等, 2018; 陈媛等, 2024)、云贵静止锋的温度和湿度垂直分布结构 (杜小玲等, 2024; 杨秀庄等, 2024) 等方面进行分析, 缺乏对降水的不稳定机制研究。贵州冬季降水与云贵静止锋有密切联系, 本文对贵州冬季一次多相态锋面降水过程的锋生作用和不稳定机制进行研究分析, 有助于更深入地了解贵州冬季不同相态降水的机理和成因。

2024 年 2 月 3 日, 贵州出现了一次冬季多相态混合的降水天气过程, 降水带东段由降雨转为降雪和冻雨, 西段出现了对流性的冰雹和强降雨, 同一降水带相态有明显差异在冬季降水中非常少见, 突破了以往冬季以层状云降水为主的认知。当日天气预报对降水相态的预报与实况有较大误差, 漏报了贵州西南部的冰雹天气, 东部的降雪量预报也偏小。此时正值春运高峰之际, 复杂相态降水天气给春运造成较大影响。为了提高贵州冬季多相态降水预报准确率, 本文利用常规观测资料、风云 4A 卫星云图和多普勒天气雷达资料分析了此次过程的降水实况和降水带的发展特征, 并结合 ERA5 再分析资料分析了云贵静止锋的锋生过程和不稳定机制, 以期为今后贵州冬季降水相态预报提供一定的参考意义。

1 资料与方法

1.1 资料说明

本文使用的资料主要有: (1) 2024 年 2 月 3 日 08 时—4 日 08 时 (北京时, 下同) 国家气象中心提供的国家气象观测站 (以下简称国家站) 和区域气象观测站 (以下简称区域站) 的地面气象要素观测资料, 包括逐小时降水、温度、露点温度等, 同时段的高空常规观测资料, 包括温度、位势高度、风向、风速等, 用以分析此次降水过程的环流背景、触发与维持机制及大气温湿垂直结构; (2) 国家卫星中心提供的 2024 年 2 月 3 日 08 时—4 日 08 时风云 4A 可见光和红外云图资料, 贵州省气象台提供的贵州省雷达拼图, 用以分析中尺度降水带的发展演变; (3) 贵州省气象局数据中心提供的 2024 年 2 月 3 日 08 时—4 日 08 时兴义和铜仁雷达逐 6 min 体扫资料, 用于分析东西两段降水回波的雷达特征; (4) 2024 年 2 月 3 日 08 时—4 日 08 时的欧洲中心第五代全球再分析资料 (ERA5), 时间分辨率 1 h, 空间分辨率 0.25 °×0.25 °, 用于分析降水发生时的锋生现象与不稳定机制。

1.2 研究方法

本文采用锋生函数 (Hoskins and Bretherton, 1972; Kato, 1989) 和湿位涡 (Hoskins, 1974) 研究分析此次

降水过程中的锋生作用和不稳定机制。

锋生函数是表征水平运动、垂直运动、非绝热变化及摩擦对锋生作用的物理量。假相当位温 (θ_{se}) 适用于湿绝热过程, 所以常取 θ_{se} 为锋生函数参数, 则锋生函数为

$$F = F_1 + F_2 + F_3 + F_4 \tag{1}$$

$$F_1 = \frac{1}{|\nabla\theta_{se}|}\left[\nabla\theta_{se}\cdot\nabla\left(\frac{\mathrm{d}\theta_{se}}{\mathrm{d}t}\right)\right] \tag{2}$$

$$F_2 = -\frac{1}{2}\frac{1}{|\nabla\theta_{se}|}(\nabla\theta_{se})^2 D_h \tag{3}$$

$$F_3 = -\frac{1}{2}\frac{1}{|\nabla\theta_{se}|}\left\{\left[\left(\frac{\partial\theta_{se}}{\partial x}\right)^2 - \left(\frac{\partial\theta_{se}}{\partial y}\right)^2\right]A_f + 2\frac{\partial\theta_{se}}{\partial x}\frac{\partial\theta_{se}}{\partial y}B_f\right\} \tag{4}$$

$$F_4 = -\frac{1}{|\nabla\theta_{se}|}\frac{\partial\theta_{se}}{\partial p}\left(\frac{\partial\theta_{se}}{\partial x}\frac{\partial\omega}{\partial x} + \frac{\partial\theta_{se}}{\partial y}\frac{\partial\omega}{\partial y}\right) \tag{5}$$

$$A_f = \frac{\partial u}{\partial x} - \frac{\partial v}{\partial y}, B_f = \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y}, D_h = \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \tag{6}$$

锋生函数 (F) 包括 4 项, F_1 为非绝热加热项, F_2 为水平辐散项, F_3 为水平变形项, F_4 为与垂直运动有关的倾斜项。其中, A_f 为伸长变形, B_f 为切变变形, D_h 为水平散度。非绝热加热项 F_1 难以准确分析, 倾斜项 F_4 量级太小, 故文中仅讨论 F_2 与 F_3 (任丽等, 2019; 阎琦等, 2017), 即空气水平运动对锋生的作用。F>0 表示有锋生作用, F<0 表示有锋消作用。

用湿位涡判定对称不稳定时, 首先需判定其为惯性稳定和对流稳定。惯性稳定的条件可由绝对涡度 (ζ)>0 判定, 即相对涡度与地转涡度之和 ($\zeta_p + f$)>0。对流稳定的条件可用 θ_{se} 随高度的变化 ($\partial\theta_{se}/\partial p$)<0 判定。上述条件均满足时, 再采用湿位涡判定条件性对称不稳定。在 P 坐标系下, 湿位涡表达式为

$$M_{PV} = -g(f\vec{k} + \nabla_p \times \vec{V})\cdot\nabla_p\theta_{se} = -g(\zeta_p + f)\frac{\partial\theta_{se}}{\partial P} + g\left(\frac{\partial v}{\partial p}\frac{\partial\theta_{se}}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial p}\frac{\partial\theta_{se}}{\partial y}\right) \tag{7}$$

式中 ζ_p 为相对涡度, f 为科氏参数。上式最右端第一项为正压湿位涡 (MPV1), 反映了对流稳定度的作用; 第二项为斜压湿位涡 (MPV2), MPV2<0 即表示条件对称不稳定 (李静楠等, 2016; 青逸雨等, 2023)。

2 天气实况与环流背景

2024 年 2 月 3 日 08 时—4 日 08 时, 贵州省大部地区出现了降水天气 (图 1a), 中南部出现中到大雨量级, 其中 4 县 (区、市) 域内的 9 个区域站出现暴雨, 最大为贵定县巩固镇 (区域站)70.9 mm; 西南部 18 个县 (区、市) 境内出现冰雹, 最大直径为长顺县长寨镇 (区域站) 10.0 mm (图 1b); 东北部 20 个县 (区、市) 境内出现降雪, 其中 9 个县出现纯雪, 4 个县出现积雪, 最大积雪深度为松桃县 (国家站) 5.0 cm (图 1b); 中东部两个县 (区、市) 出现冻雨 (图 1b); 中部一线 11 个县 (区、市) 出现电线积冰, 积冰最大直径出现在铜仁市万山区 (国家站) 34 mm (含导线直径 26.8 mm)。本次降水天气过程具有量级较大 (冬季)、降水相态复杂, 预报难度大等特征, 其中降雹主要出现在贵州西南部、降雪主要出现在东北部。

2024 年 2 月 3 日 08 时, 500 hPa (图 2a) 亚欧中高纬多短波槽活动, 河套地区西侧、青藏高原以及孟加拉湾地区均有高空槽东移, 一方面北部的高空槽有利于带动低层弱冷空气南下影响贵州, 另一方面南支槽东移至云南时, 贵州受南支槽前西南气流影响, 有利于暖湿空气的输送和槽前上升运动的发展。700 hPa (图 2b) 贵州受逐步增强的西南气流影响, 08 时至 20 时, 贵阳站的温度和露点温度分别从

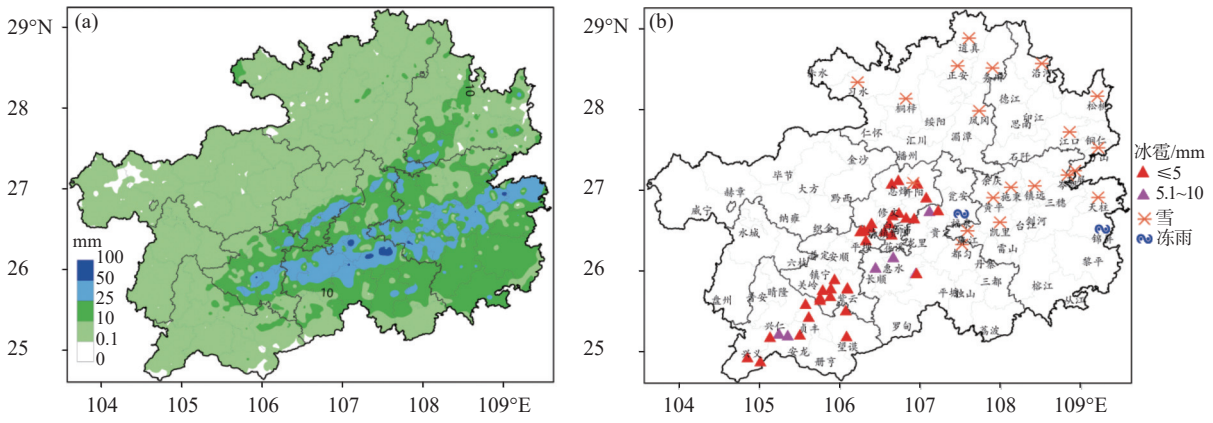


图 1 2024 年 2 月 3 日 08 时—4 日 08 时贵州省观测 24 h 降水量 (a) 及冰雹、降雪和冻雨站点 (b) 分布

Fig. 1 Distribution of the (a) accumulated precipitation, and (b) hail, snowfall and freezing rain site in Guizhou Province from 08:00 BT on February 3 to 08:00 BT on February 4, 2024

0.4 ℃、−3 ℃ 升至 3 ℃、2 ℃，有明显的暖湿平流输送。850 hPa (图 2c) 贵州受高压底部的东北气流影响，08 时至 20 时，贵阳站的温度和露点温度分别从 −0.6 ℃、−0.6 ℃ 降至−0.9 ℃、−2 ℃，有明显的干冷平流输送。地面上 (图 2d)，云贵静止锋位于贵州西南部，白天大气加热，锋面向东摆动，夜间冷却，锋面向西摆动，具有一定的日变化和锋生锋消的变化。上述形势分析显示，中低纬天气系统较活跃，有明显的南支槽、冷暖平流和静止锋的活动，在此天气背景下有利于贵州出现锋面降水。

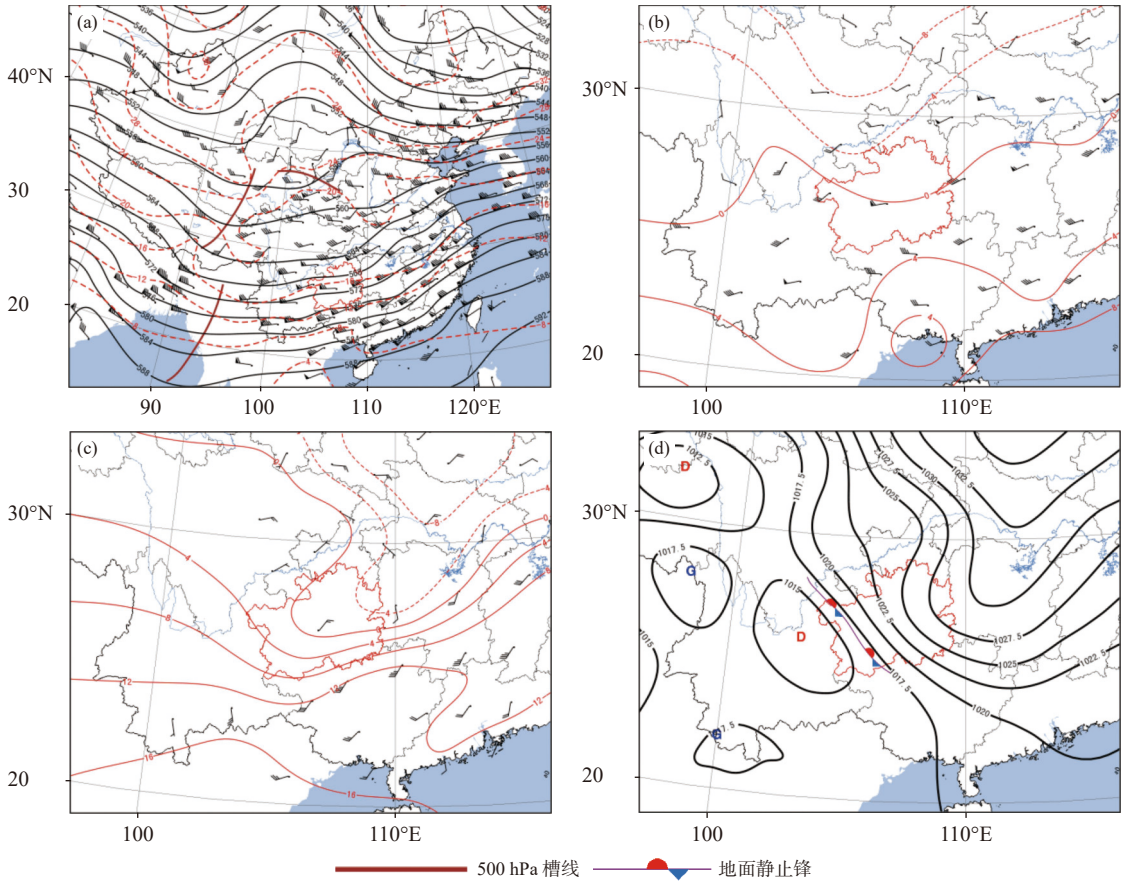


图 2 2024 年 2 月 3 日 08 时 500 hPa 位势高度 (黑色等值线，单位：dagpm)、气温(红色等值线，单位：℃)和风场(风向杆，单位：$m \cdot s^{-1}$) (a)，700 hPa (b)、850 hPa (c) 气温(红色等值线，单位：℃)和风场(风向杆，单位：$m \cdot s^{-1}$)及海平面气压场 (d，单位：hPa，D 和 G 分别表示低压和高压中心，地图中红线范围为贵州省，下同)

Fig. 2 Distribution of (a) geopotential height (black isoline, unit: dagpm), temperature (red isoline, unit: °C) and wind field (wind direction pole, unit: $m \cdot s^{-1}$) at 500 hPa, (b) 700 hPa, (c) 850 hPa temperature (red isoline, unit: °C) and wind field (wind barb, unit: $m \cdot s^{-1}$), (d) sea level pressure field (unit: hPa, D and G represent the low-pressure and high-pressure centers) at 08:00 BT on February 3, 2024 (The red line range in the map is Guizhou Province, the same below)

3 中尺度降水带的发展演变

综合风云 4A 卫星云图、贵州省雷达拼图 (图略) 以及站点每小时降水量数据分析中尺度降水带的发展演变情况。14 时卫星云图 (图 3a) 贵州上空有两层云系，低层除西南部外贵州中东部均为静止锋低云覆盖，低云边界对应近地面锋面位置，此外云南向贵州西部上空有中高云系的发展，云系沿 700—500 hPa 引导气流移动，贵州西部开始有分散的弱对流单体生成发展，降水监测显示西部有分散的弱降水，中尺度雨带尚未形成。15—16 时 (图 3b)，贵州西南部中小尺度云团发展，云顶逐步升高，云顶亮温最低约达−23 ℃，分散的对流单体逐步结合形成对流系统，对流系统中心强度超过 35 dBz，降水分布仍较分散，但强度有所加强。16—18 时 (图 3c)，云团向贵州东北部移动，同时贵州西南部有新的云团发展，因此形成一条西南—东北走向的中尺度云带，雷达图上也显示为一条西南—东北走向的回波带，回波带西南段有多个分散的强中心，中心强度达 50 dBz，降水强度进一步加强，出现小时降水量大于 20 mm 的短时强降水，降水分布主要集中在中尺度云带和回波带上，并有降雹出现。18 时—4 日 00 时 (图 3d—f)，中尺度云带发展达最强，云顶亮温最低约达−53 ℃，

回波带西段仍为具有多个强中心的带状, 中心强度最大达 55 dBz, 东段强度较弱, 面积较大, 成连续的片状, 在此期间, 降水带西段以较强降雨和冰雹为主, 降水带东段由降雨逐步转为降雪, 并有少数站点出现冻雨。4 日 00 时后 (图 3g—h), 中尺度降水带逐步向东南方向移动并逐步减弱。可见在中尺度降水带的发展过程中, 东西两段降水相态有明显的差异。

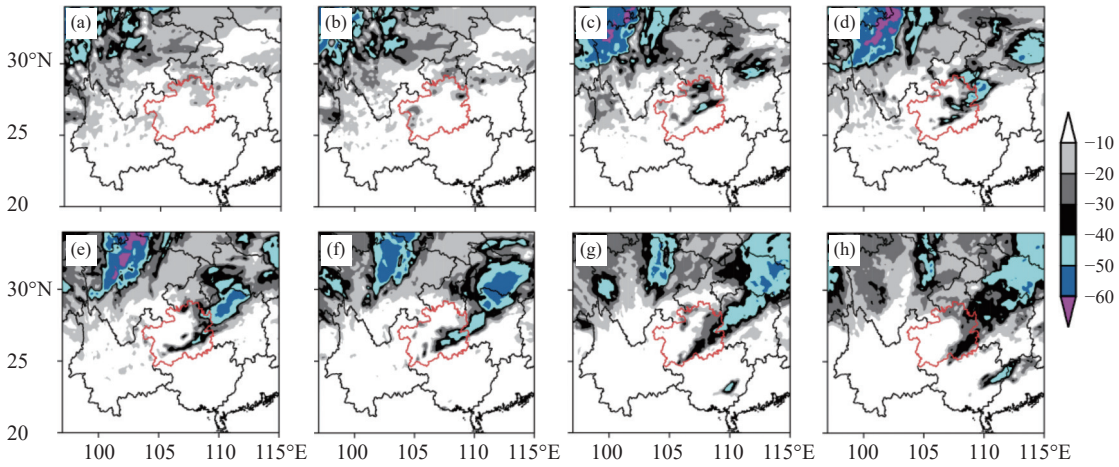


图 3 2024 年 2 月 3 日 14 时 (a)、16 时 (b)、18 时 (c)、20 时 (d)、22 时 (e) 与 4 日 00 时 (f)、02 时 (g)、04 时 (h) 风云 4A 卫星 TBB (填色, 单位: ℃) 分布

Fig. 3 TBB (shade, unit: ℃) distribution of FY-4A satellite at (a) 14:00 BT, (b) 16:00 BT, (c) 18:00 BT, (d) 20:00 BT, (e) 22:00 BT on February 3, (f) 00:00 BT, (g) 02:00 BT, (h) 04:00 BT on February 4, 2024

分别对西段降雹和东段降雪的环境温度以及回波剖面进行对比分析。

从环境温度来看, 贵州西南部近地层至低层温度较高, 900 hPa 以下温度高于 20 ℃, 随着高度的升高, 温度快速下降, 420 hPa 以上温度降至−20 ℃ 以下, 温度垂直递减率较大 (图 6a、b), 有利于强对流回波的生成与发展。西南部降雹对流系统具有一般强对流回波的特征, 回波以积状云回波为主, 回波面积较小为团状形态, 回波强度大。沿反射率因子大值区回波移动方向的反射率因子剖面图 (图 4a) 显示, 回波中心强度超过 55 dBz, 主要位于 3~7 km, 回波入流一侧低层有大的反射率因子梯度, 中低层出现弱回波区, 中高空有回波悬垂; 回波顶高达到 8.6 km, 超过−20 ℃。速度剖面图 (图 4b) 显示 7 km 以下中低层大气强烈辐合 (最大正速度 10~15 $m\cdot s^{-1}$, 负速度 −10~−15 $m\cdot s^{-1}$), 雷暴单体顶部强烈辐散 (最大正速度 10~15 $m\cdot s^{-1}$, 负速度−5~−10 $m\cdot s^{-1}$), 显示有强烈的上升运动。

贵州东北部环境温度明显低于西南部, 温度垂直分布呈现三层结构 (张昕等, 2015; 李登文等, 2009), 近地层至低层温度较低, 850 hPa 以下低于 0 ℃, 中低层有浅薄的暖层, 暖层以上温度随高度快速下降, 温度的垂直分布显示为明显的锋面特征 (图 7a、b), 有利于出现锋面降水回波。东北部降雪回波以成片的层状云回波为主, 中间含有积状云回波, 属于层积混合云降水, 回波面积较广, 以 20~40 dBz 回波为主, 最强中心达 45~50 dBz。反射率因子剖面图 (图 4c) 显示回波分布较均匀, 高度较低, 最强中心位于 3 km 左右 0 ℃ 附近, 回波顶高达到 7~9 km 左右。速度图上 (图 4d), 气流总体以西南气流为主, 在强回波附近大气中低层有弱的辐合 (最大正速度 1~5 $m\cdot s^{-1}$, 负速度−1~−5 $m\cdot s^{-1}$)。

东西两段回波处于差异非常大的环境温度中, 两段回波的差异也对应不同的降水性质, 西段为积状云降水回波, 强度大, 高度伸展高, 并配合有强烈的低层辐合高层辐散、显示上升运动强, 为典型的降雹回波; 东段为层积混合降水回波, 强度较弱, 强中心高度低, 回波顶伸展较高有冰晶层的发展, 辐合辐散弱, 环境温度低形成降雪回波。

4 锋生作用与不稳定特征分析

上述分析显示本次降水过程中伴随有冷暖平流以及云贵静止锋的活动, 且降水带跨越锋面, 由静止锋前向锋后发展, 东西两段降水回波性质差异较大, 分析云贵静止锋锋生过程以及降水带东西两段的不稳定特征有利于找出降水差异和预报误差的原因。

4.1 锋生作用分析

冬季锋面附近的降水尤其是中尺度降水带往往伴有锋生现象的出现 (张芳华等, 2014)。从 3 日 08 时

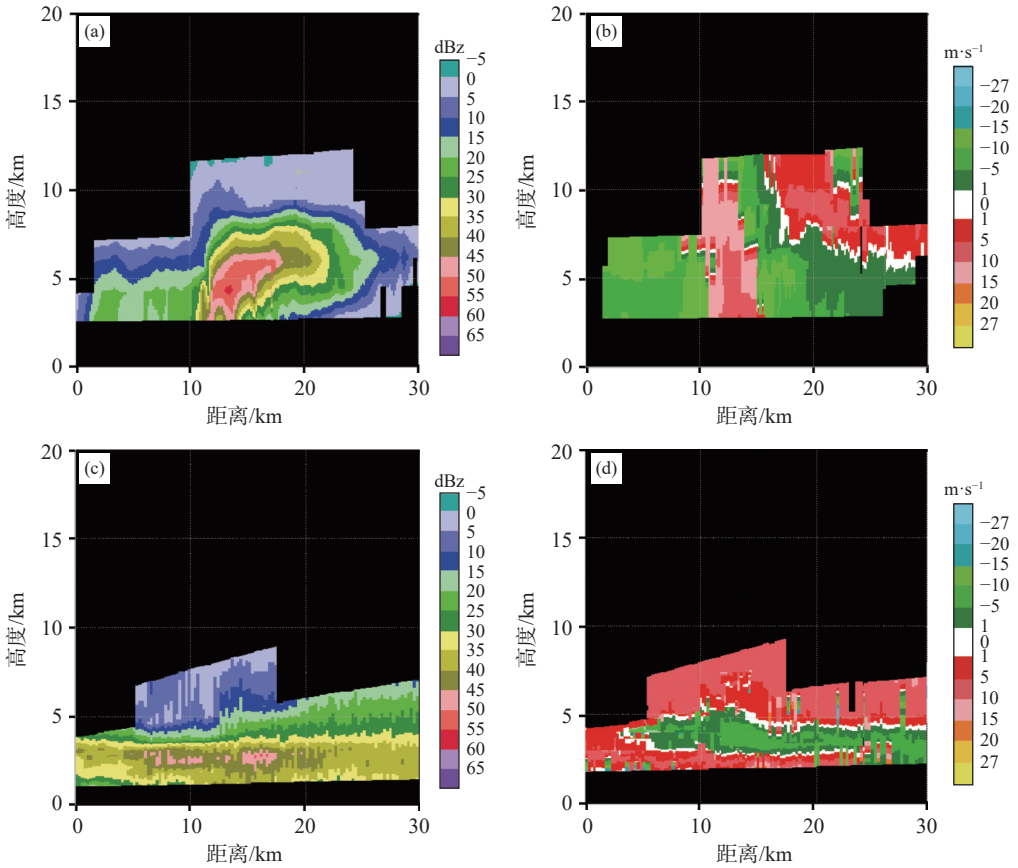


图 4 兴义雷达站 2024 年 2 月 3 日 22 时 40 分 (a, b)、铜仁雷达站 4 日 00 时 06 分反射率因子大值中心沿回波移动方向 (c, d) 反射率因子 (a, c) 、径向速度 (b, d) 剖面图

Fig. 4 Profile of (a, c) reflectivity factor and (b, d) radial velocity along echo movment direction in reflectivity factor large value area of (a, b) Xingyi radar station at 22:40 BT on February 3 and (c, d) Tongren radar station at 00:06 BT on February 4, 2024

至 20 时, 贵州西南部一直处于锋前, 无低云覆盖, 近地层至大气低层升温明显, 假相当位温 (θ_{se}) 增大; 而由湖北伸向贵州东北部的冷舌加强, 有新的冷空气补充, θ_{se} 减小; 使得在贵州西部、南部冷暖空气之间的 θ_{se} 梯度加大, 冷暖空气的交汇加强, 形成锋生现象 (图 5a、b)。850 hPa 锋生函数显示, 3 日中午在云贵静止锋附近贵州西部、南部开始有锋生现象出现, 锋生最强时段出现在 3 日午后 (图 5c), 最大达 40×10^{-9} K·m^{-1}·s^{-1} 以上, 其中散度项和变形项均有贡献 (图略), θ_{se} 梯度加强以及低层风场的辐合、形变造成锋生。从锋生函数的垂直空间剖面图 (图 5d) 看到, 锋生区主要位于大气低层 (900—700 hPa), 呈带状与锋区的高空走势相一致, 由低到高向东北方向冷空气一侧倾斜, 强中心高度位于 900—850 hPa。

4.2 不稳定特征分析

中尺度降水带在不同区域产生的降水相态出现较大的差异, 这往往是预报的难点, 容易关注某一种降水相态, 而忽视了其它的降水相态。如本次降水过程中关注了贵州东北部的雨雪转换, 却漏报了贵州西南部的强对流天气。垂直方向发展的不稳定机制对应强对流天气如冰雹、强降水等, 倾斜方向的不稳定机制对应锋面降水和降水的增幅作用, 如大到暴雪以及显著降雨 (俞小鼎等, 2024), 可见不同的不稳定机制对降水的强度和相态有密切关系。本次降水带东西两段分别处于静止锋前和锋后, 大气环境场和雷达回波特征差异均较大, 因此需分别对东西两段的不稳定机制进行分析。

4.2.1 降水带西段条件性静力不稳定

贵州西南部一直受静止锋前和高空槽前的西南暖湿气团影响, 午后近地层增温较快, 局地的热力不稳定触发了对流天气, 属于条件性静力不稳定。3 日 08 时, 贵州西南部地面气温为 6~13 ℃, 云量较少; 午后受太阳辐射影响, 地面气温快速升高至 14~26 ℃, 具有热力不稳定。以距离贵州西南部最近的广西百色探空站为例 (图 6a、b), 探空图显示午后至 20 时, 近地层至大气低层温度快速上升, 出现较大的对流有效位能 (CAPE) 达 917.5 J·kg^{-1}; 温湿曲线呈现出喇叭口型, 地面露点为 17 ℃, 具有较好的低层湿度条件, 700—400 hPa 平均温度露点差为 11.8 ℃, 最大达 42.9 ℃, 存在明显干层; 850 hPa 与 500 hPa 温差

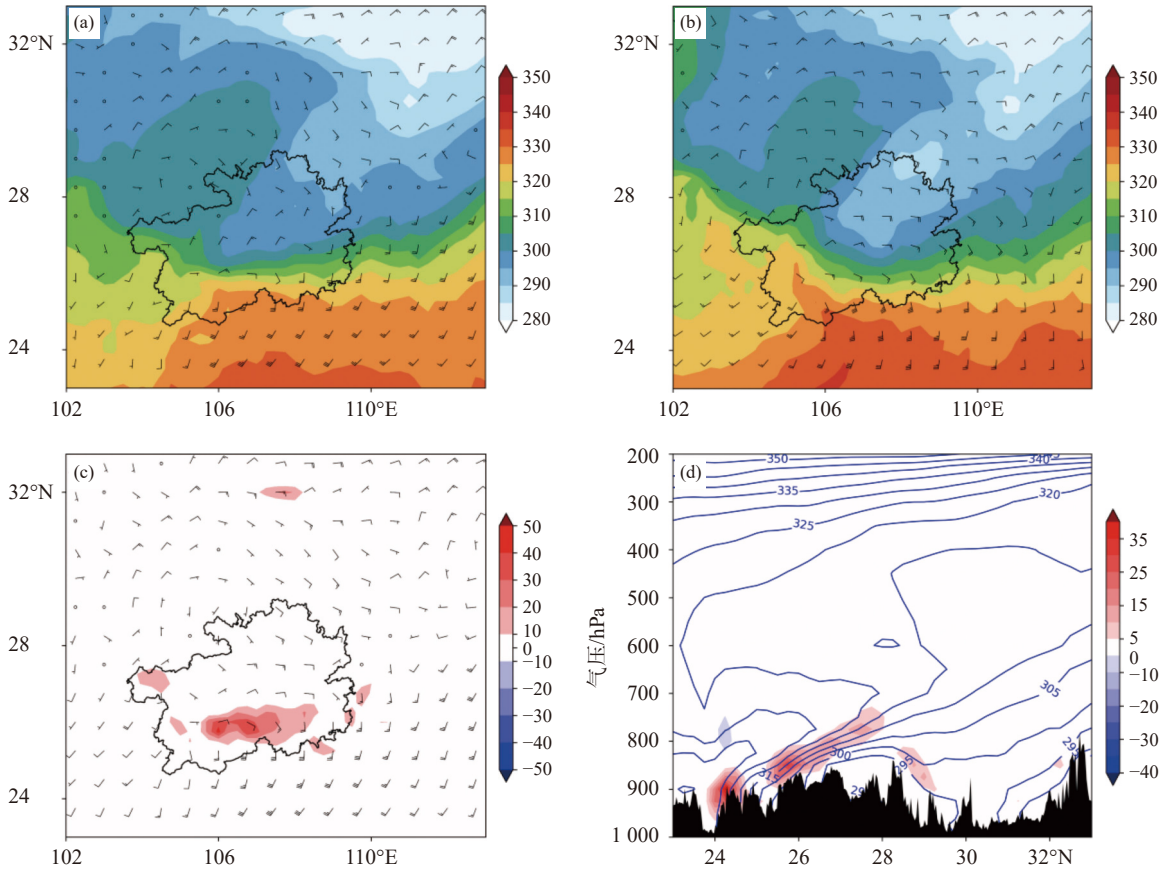


图 5 2024 年 2 月 3 日 08 时 (a), 20 时 (b) 850h Pa θ_{se} (色斑, 单位: K) 与风场 (风杆, 单位: m·s^{-1}); 14 时 850 hPa 风场 (风杆, 单位: m·s^{-1}) 与锋生函数 (色斑, 单位: 10^{-9} K·m^{-1}·s^{-1}) (c) 及锋生函数 (色斑, 单位: 10^{-9} K·m^{-1}·s^{-1}) 与 θ_{se} (等值线, 单位: K) 沿 107°E 经向剖面图 (d) (黑色阴影为地形遮蔽, 下同)

Fig. 5 Distribution of θ_{se} (shaded, unit: K) and wind field (wind bar, unit: m·s^{-1}) at 850 hPa at (a) 08:00 BT, (b) 20:00 BT, (c) the distribution of wind field (wind bar, unit: m·s^{-1}) and frontogenesis function (shaded, unit: 10^{-9} K·m^{-1}·s^{-1}) at 850 hPa and (d) the longitudinal profile of frontogenesis function (shaded, unit: 10^{-9} K·m^{-1}·s^{-1}) and θ_{se} (contour line, unit: K) along 107°E at 14:00 BT on February 3, 2024 (The black shadows represent terrain occlusion,the same below)

为 26.2 ℃, 表明其温度递减率较大; 0—3 km 垂直风切变为 19 m·s^{-1}, 0—6 km 垂直风切变为 30 m·s^{-1}, 垂直风切变较大; 0 ℃ 层高度为 3 559 m、−20 ℃ 层高度为 7 104.5 m, 0 ℃ 层和−20 ℃ 之间厚度为 3 545.5 m, 同时融化层 (湿球温度 0 ℃ 层) 高度为 2 052 m, 其高度明显低于干球温度 0 ℃ 层高度, 有利于冰雹生长和降雹。抬升凝结高度 (LCL) 为 884.8 hPa、自由对流高度 (LFC) 为 804.8 hPa。上述探空参数显示, 大气低层湿度条件较好, 中层存在明显干层, 具有较大温度递减率和 CAPE, 垂直风切变较强, LFC 较低, 静力不稳定较大, 有利于冰雹和雷暴大风天气出现 (俞小鼎等, 2024)。

图 6c、d 显示了贵州西南部沿 105°E 垂直速度与 θ_{se} 剖面 (贵州西南部为 24 °~26.5 °N), 由图可知, 3 日 08—17 时, 贵州西南部一直处于静止锋前的暖气团中, θ_{se} 较高, 海拔相对较高, 近地层至高层为一致的西南气流, 地面至 700 hPa 有明显的暖湿平流, 且午后加强, 地面至 500 hPa θ_{se} 随高度减小, 为条件静力不稳定。垂直速度显示 3 日 08 时, 大气低层已经有弱的上升运动发展, 午后垂直上升运动明显加强, 最强位于 700 hPa, 达-2.4 m·s^{-1}, 可见随着条件静力不稳定的加强, 上升运动也出现强烈发展。

4.2.2 降水带东段条件性对称不稳定

贵州东北部一直处于静止锋后冷气团控制, 以距离贵州东北部最近的湖南怀化站探空 (表 1 和图 7a、b) 分析, 3 日 08 时 (图 7a), 怀化站探空有明显的锋面逆温, 其中地面至 871.6 hPa 为东北气流, 气温随高度递减, 逆温层位于 871.6 — 812 hPa, 逆温层底温度为−5.6 ℃, 逆温层顶温度为 8.2 ℃, 温差达 13.8 ℃, 从逆温层底开始风向转为西南风, 且风速快速增大, 逆温层顶风速达 21 m·s^{-1}, 逆温层上垂直风切变达 24.6 m·s^{-1}。逆温层上气温再次随高度递减。因此, 温度随高度的变化呈现出三层模式, 地面至 834.2 hPa 温度低于 0 ℃, 为冷层, 厚度为 1 662 m; 中间 830.6—

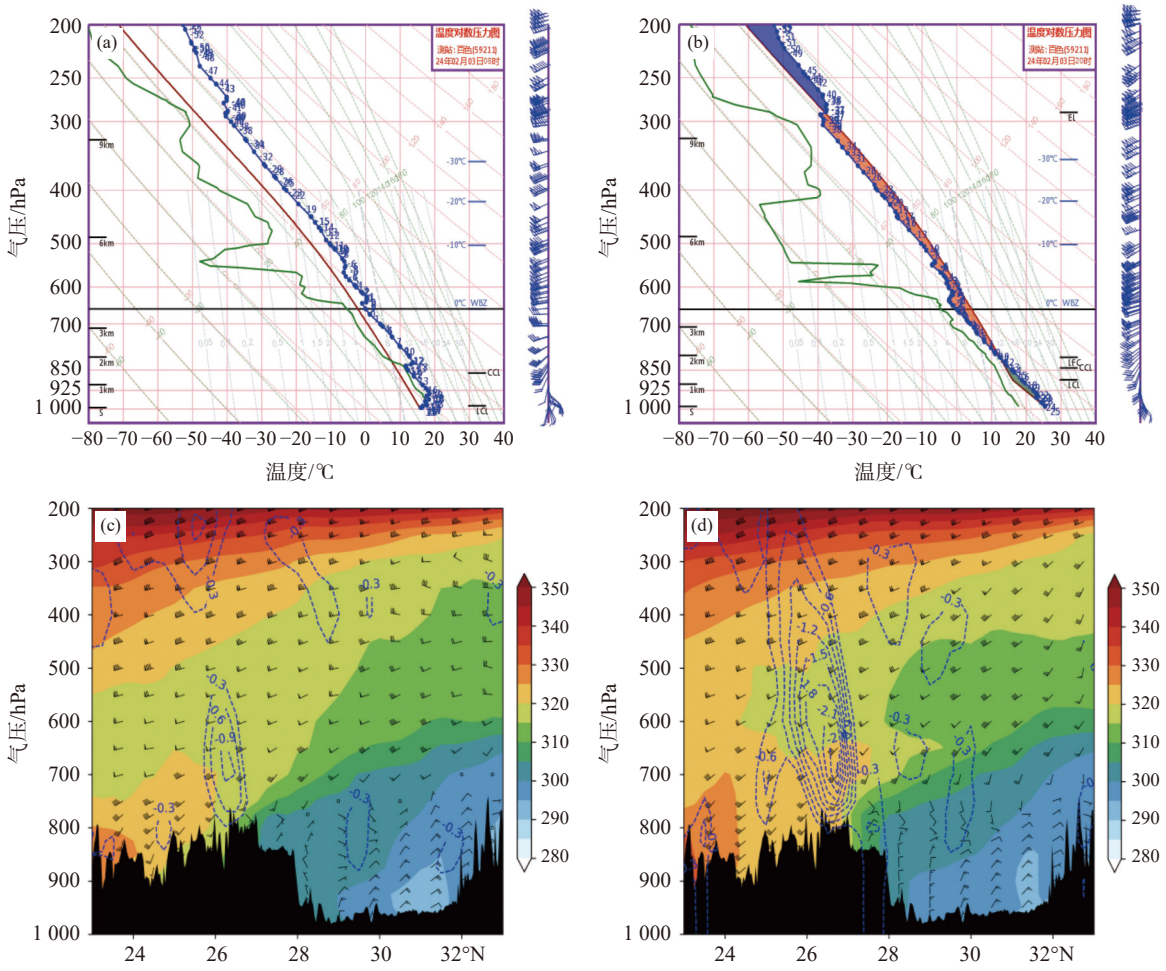


图 6 百色站 2024 年 2 月 3 日 08 时 (a)、20 时 (b) 探空图及 08 时 (c)、17 时 (d) 沿 105°E 垂直速度 (虚线, 单位: m·s^{-1})、θ_{se} (填色, 单位: K) 和风场 (风杆, 单位: m·s^{-1}) 经向剖面图

Fig. 6 Sounding at Baise Station at (a) 08:00 BT, (b) 20:00 BT, longitudinal profile of vertical velocity (dotted line, unit: m·s^{-1}), θ_{se} (shaded, unit: K) and wind field (wind bars, unit: m·s^{-1}) along 105°E at (c) 08:00 BT, (d) 17:00 BT on February 3, 2024

700 hPa 温度高于 0 ℃, 为融化层, 厚度为1 431 m, 融化层最高温度为 8.2 ℃; 700 hPa 以上温度再次低于 0 ℃, 温度露点差低于 4 ℃ 的湿层最高位于 594.7 hPa, 温度为−8.6 ℃, 不利于形成明显的冰晶或雪花, 故地面为降雨。4 日 08 时 (图 7b) 怀化站探空出现明显变化, 锋面逆温依然存在, 逆温层上的垂直风切变维持较大为 24.8 m·s^{-1}, 逆温层上的温差明显减小为 9.5 ℃。温度层结依然显示为三层模式, 但冷层加厚, 0 ℃ 高度升高为 819.4 hPa, 厚度为1 793 m; 融化层减弱, 高度为 819.4—717.4 hPa, 厚度为 1 064 m, 且融化层最高温度仅为 3.3 ℃, 较 3 日 08 时降低了 4.9 ℃; 717.4 hPa 以上温度低于 0 ℃, 为冰晶层, 冰晶层厚度较 3 日 08 时显著增厚, 温度露点差低于 4 ℃ 的湿层升高至 346.7 hPa, 温度为−34.6 ℃, 厚度为 5 466 m, 有利于大量的冰晶和雪花的形成。可见 4 日夜间中低空有冷空气侵入, 逆温层和融化层减弱, 故由降雨转为降雪。

从贵州东北部剖面图 (贵州东北部为 26 °—29 °N) (图 7c、d) 可见, 地面 25 °N 附近有非常强的 θ_{se} 密集区, 对应地面锋线所在位置, 锋区即 θ_{se} 密集区随高度向北倾斜。上升运动最开始从南部暖区开始发展, 午后 (图 7c) 静止锋锋生, 上升运动开始沿锋面倾斜发展, 南部暖区上升运动主要位于大气低层 900—600 hPa, 中心强度达−1.2 m·s^{-1}, 倾斜上升运动紧贴锋区位于锋区上方, 强度为−0.3~−0.6 m·s^{-1}。至夜间 (图 7d) 上升运动在锋后冷气团区有强烈发展, 从高度上看主要位于锋区上方, 最强中心位于 500 hPa, 中心强度为−0.9 m·s^{-1}。降雪区处于锋后冷气团, 并与锋面上的上升运动发展有密切关系, 随着午后至夜间倾斜上升运动逐步发展, 锋区上方出现较大范围的上升运动, 使得水滴冻结为冰晶或雪花, 降雪现象出现, 由此可见东段的降雪天气过程与锋面斜升运动即对称不稳定有关。

本次降水过程中, 贵州全省均处于绝对正涡度

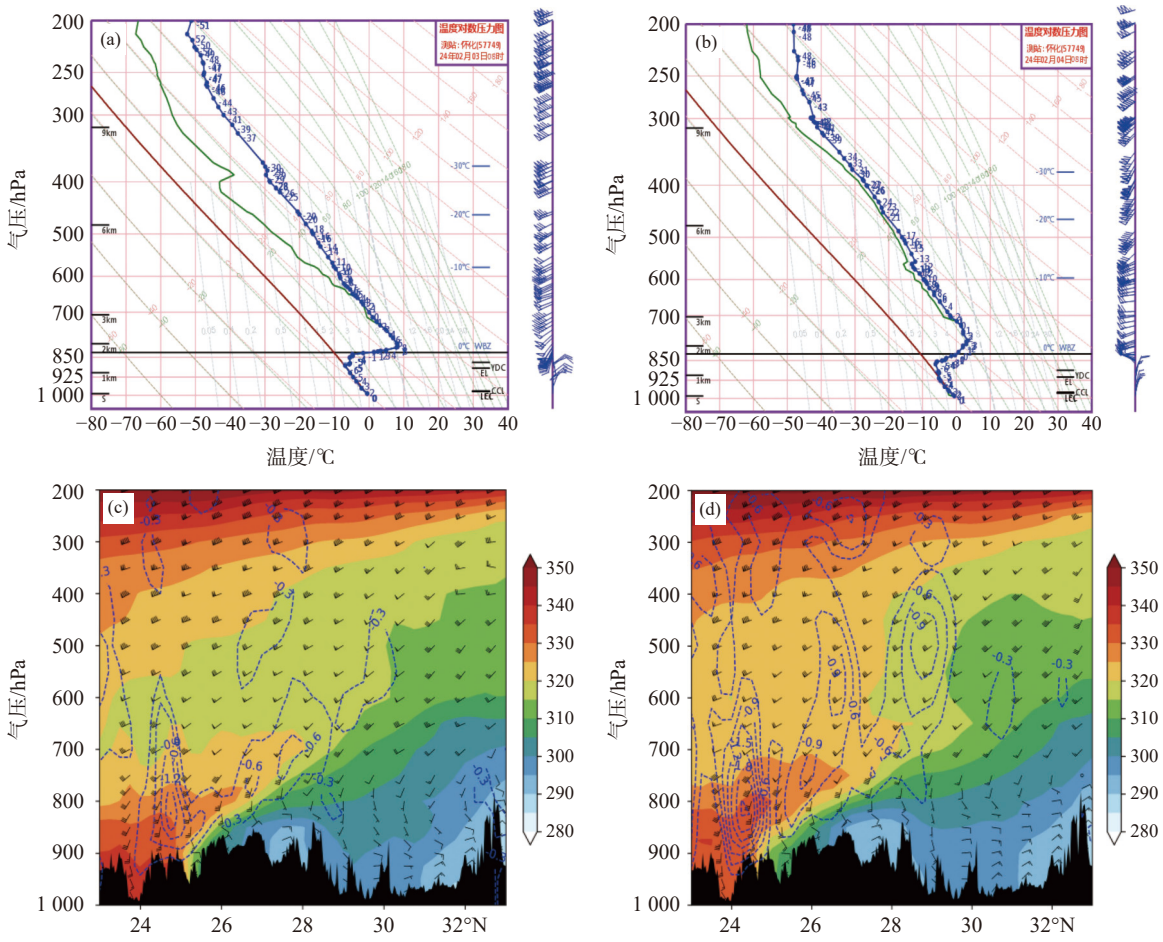


图 7 怀化站 2024 年 2 月 3 日 08 时 (a)、4 日 08 时 (b) 探空图及 3 日 14 时 (c)、20 时 (d) 沿 107°E 垂直速度 (虚线, 单位: $m\cdot s^{-1}$)、θ_{se} (填色, 单位: K) 和风场 (风杆, 单位: $m\cdot s^{-1}$) 经向剖面图

Fig. 7 Sounding at Huaihua Station at (a) 08:00 BT on February 3, (b) 08:00 BT on February 4, longitudinal profile of vertical velocity (dotted lines, unit: $m\cdot s^{-1}$), θ_{se} (shaded, unit: K) and wind field (wind bars, unit: $m\cdot s^{-1}$) along 107°E at (c) 14:00 BT on February 3, (d) 20:00 BT on February 3

表 1 湖南怀化站 2024 年 2 月 3 日和 4 日 08 时特征层结温度或厚度

Table 1 Characteristic stratification temperature or thickness of Huaihua station in Hunan at 08 : 00 BT on February 3 and 4, 2024

时间	850 hPa温度/℃	逆温层顶温度/℃	过冷层厚度/m	融化层厚度/m	冰晶层厚度/m
3日08时	−5.5	8.2	1 662	1 431	1 216
4日08时	−4.2	2.9	1 793	1 064	5 466

区 (图略), 满足惯性稳定条件; 同时, 受锋后冷气团控制$\partial\theta_{se}/\partial p<0$, 满足对流稳定条件。MPV2 在贵州的空间分布, 3 日上午, 贵州中东部开始出现 MPV2<0 即条件对称不稳定的区域, 3 日下午至夜间 MPV2 负值增加更大, 中心小于−4 PVU (图 8a), 说明条件对称不稳定 (CSI) 的进一步发展, 结合垂直速度分析也发现上升运动沿锋面的倾斜爬升在 3 日下午得到快速发展。经向垂直剖面 (图 8b) 显示, MPV2<0 主要分布在大气低层 900—700 hPa, 随高度向东北方向倾斜, 最强位于 800 hPa 左右。结合锋生函数和 MPV2 分析锋生与 CSI 的关系, 水平分布锋生最强区位于贵州西部、南部, MPV2 负值区位于贵州中部至东北部, 说明条件对称不稳定发生在静止锋冷空气一侧; 从垂直分布来看, 两者都位于大气低层 900—700 hPa, 都呈带状由低到高向东北方向 (冷空气一侧) 倾斜, 但强中心分布高度不同, 锋生中心区主要位于近地层至 850 hPa, CSI 中心区位于 850—700 hPa, 位于锋生中心区的中上方, 说明条件对称不稳定主要是在锋区上发展起来的。两者随时间的变化 (图略) 发现, 条件对称不稳定基本与锋生现象发生发展的时间一致, 最强时段也相同。即 θ_{se} 梯度的加大和风场的辐合、形变与垂直切变会造成锋生现象和条件对称不稳定的形成与发展。

2 月 3 日下午, 西南气流加强和太阳辐射的影响使得静止锋前对暖湿气流输送加强, 即 θ_{se} 增大; 而锋后冷空气补充, 即 θ_{se} 减小, 锋面上的 θ_{se} 梯度加大,

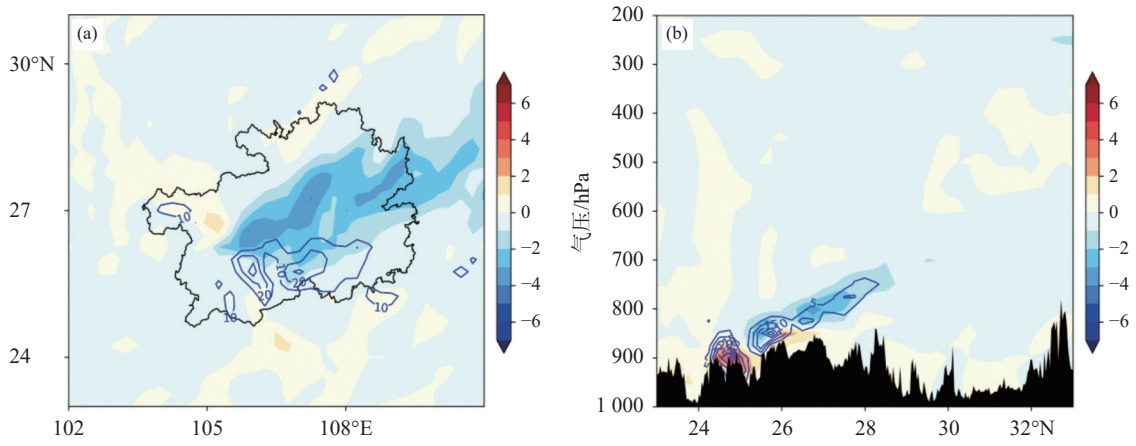


图 8 2024 年 2 月 3 日 17 时 800 hPa MPV2 (填色, 单位: PVU) 与 850 hPa 锋生函数 (等值线, 单位: 10^{-9} K·m^{-1}·s^{-1}) 分布 (a) 及 MPV2(填色, 单位: PVU) 与锋生函数 (等值线, 单位: 10^{-9} K·m^{-1}·s^{-1}) 沿 107°E 经向剖面图 (b)

Fig. 8 Distribution of (a) MPV2 (shaded, unit: PVU) and frontogenesis function (contours, unit:10^{-9} K · m^{-1} · s^{-1}) at 800 hPa, (b) longitudinal profile of MPV2 (shaded, unit: PVU) and frontogenesis function (contours, unit:10^{-9} K · m^{-1} · s^{-1}) along 107°E at 17:00 BT on February 3, 2024

再结合风场的辐合与切变, 形成锋生现象, 其中锋生区与 θ_{se} 梯度加大的区域较一致, 且主要集中在大气近地层至低层, 说明在本次过程中锋生现象的产生是以 θ_{se} 的变化为主导作用的。条件对称不稳定是在 θ_{se} 梯度加大, 同时锋面上垂直风切变加大的基础上产生的, 其水平和垂直方向的空间位置位于 θ_{se} 梯度密集区东北侧和偏上方, 说明条件对称稳定的发展除与 θ_{se} 的变化相关外, 风场的垂直切变也有重要作用。

降水带东西两段的上升运动和不稳定机制明显不同, 西段由条件静力不稳定导致的垂直对流, 其上升运动强度更大, 影响范围更集中; 东段由条件对称不稳定导致的倾斜对流, 上升运动较弱, 影响范围较大, 但两者有一定的联系, 倾斜对流是在垂直对流发展向东移的基础上沿锋面发展起来的。

5 结论和讨论

针对 2024 年 2 月 3 日贵州一次冬季少见的复杂相态锋面降水天气过程, 本文基于气象常规观测、风云 4A 卫星云图、多普勒天气雷达、欧洲中期天气预报中心第五代大气再分析数据以及中国气象局中期数值天气模式资料, 采用天气学分析和天气诊断方法对本次降水过程的降水带演变、锋生作用和不稳定机制进行研究, 得出以下几点初步结论:

(1) 本次降水过程中, 中低纬天气系统活跃, 冷暖空气均有补充加强, 低层出现了明显的冷暖平流交汇, 云贵静止锋锋生。

(2) 降水带横跨云贵静止锋, 西段发展快速和剧烈, 回波具有积状云回波特征, 产生了冰雹和短时强降水的强对流天气, 降水带东段天气更稳定, 降水强度较弱, 回波具有层积混合回波特征, 回波顶伸展较高有冰晶层的发展, 产生了雨雪相态的转换。

(3) 降水带西段贵州西南部地区 2 日午后大气近地层至低层快速增温增湿, 大气中层有明显的干层, 使得 θ_{se} 随高度快速减小, 局地热力不稳定触发了强对流天气, 其不稳定机制属于条件性静力不稳定。

(4) 降水带东段贵州东北部地区受冷空气补充影响, 2 日夜间大气整层气温降低, 气温垂直分布呈三层模式, 其中融化层明显减弱, 冷层和冰晶层快速发展, 静止锋锋区上冷暖空气交汇加强出现锋生现象, 沿锋面出现倾斜上升运动, 降水由雨转雪, 其不稳定机制属于条件对称不稳定。

本文对贵州一次冬季复杂降水相态锋面天气的降水演变、锋生作用和不稳定机制进行了分析, 但缺乏对更多类似过程的评估和研究, 后期将收集更多的多降水相态过程进行分析, 给冬季天气预报提供更多的参考依据。

参考文献 (References):

白慧,唐维尧,严小冬,等.2025.贵州罕见冬季强冰雹过程分析和数值模拟研究[J].高原山地气象研究,45(2):46−56. Bai H, Tang W Y, Yan X D, et al. 2025. Analysis and CMA-MESO numerical simulation of a rare winter heavy hailstorm in Guizhou [J]. Plateau and Mountain Meteorology Research,45(2):46−56 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1674−2184.2025.02.005

陈媛,周玉淑,杨帅,等.2024.西南地区一次典型冰冻雨雪复合极端灾害天气事件的环流特征及降水相态差异分析[J].大气科学,48(2):417-430. Chen Y, Zhou Y S, Yang S, et al. 2024. Analysis of circulation characteristics and precipitation phase difference during an extreme freezing rain and snow weather event in Southwest China[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences,48(2):417-430 (in Chinese). doi:10.3878/j.issn.1006−9895.2112.2122

陈云辉,许爱华,许彬,等.2019.江西一次极端雷暴大风过程的中尺度特征与成因分析[J].暴雨灾害,38(2):126−134. Chen Y H, Xu A H, Xu B, et al. 2019. Analysis on mesoscale characteristics and causes of an extreme thunderstorm gale event in Jiangxi [J]. Torrential Rain and Disasters,38(2):126−134 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1004−9045.2019.02.004

杜小玲,蓝伟,何东坡,等.2024. 2024 年 2 月初贵州东部及长江中下游低温雨雪冰冻天气基本特征及成因[J].暴雨灾害,43(4):395−406. Du X L, Lan W, He D P, et al. 2024. Characteristics and causes of low-temperature rainfall/snowfall and freezing weather event in eastern Guizhou and the middle and low reaches of the Yangtze River in early February 2024 [J]. Torrential Rain and Disasters,43(4):395−406 (in Chinese). doi:10.12406/byzh.2024−100

甘文强,蓝伟,杜小玲,等.2018. 2018 年 1 月底至 2 月初贵州低温雨雪天气成因初探[J].暴雨灾害,37(5):410−420. Gan W Q, Lan W, Du X L, et al. 2018. Tentative analysis on the cause of a low-temperature, freezing rain and snow event in Guizhou between the end of January and the beginning of February in 2018 [J]. Torrential Rain and Disasters,37(5):410−420 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1004−9045.2018.05.003

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 D W, Qiao Q, Wei T. 2009. Analyses on the freezing rain and snow weather circulation and vertical structure of Southern China in early 2008 [J]. Plateau Meteorology,28(5):1140−1148 (in Chinese)

李静楠,潘晓滨,臧增亮,等.2016.一次华北暴雨过程的湿位涡诊断分析[J].暴雨灾害,35(2):158−165. Li J N, Pan X B, Zang Z L, et al. 2016. Diagnostic analysis of moist potential vorticity for a rainstorm in North China [J]. Torrential Rain and Disasters,35(2):158−165 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1004−9045.2016.02.008

李忠燕, 任曼琳, 谭垭姮,等.2022.贵州省两次超强凝冻过程的天气成因对比分析[J].气象科技,50(5):686−693. Li Z Y, Ran M L, Tan Y H, et al. 2022. Comparative analysis of causes for two extreme freezing rains in Guizhou Province [J]. Meteorological Science and Technology,50(5):686−693 (in Chinese). doi:10.19517/j.1671−6345.20210466

李清华,孟洁,李劲松,等.2022.山西省不同重现期下电线覆冰厚度空间分布及区划[J].干旱气象,40(1):156−165. Li Q H, Meng J, Li J S, et al. 2022. Spatial distribution and division of wire icing thickness under different return periods in Shanxi Province [J]. Journal of Arid Meteorology,40(1):156−165 (in Chinese). doi:10.11755/j.issn.1006−7639(2022)−01−0156

覃皓, 范娇, 农孟松,等.2024.广西初春双对流强降水带过程诊断分析[J].气象,45(1):50−60. Qin H, Fan J, Nong M S, et al. 2024. Diagnostic analysis of a process of double convective heavy precipitation bands in Guangxi in early spring [J]. Meteorological Monthly,45(1):50−60 (in Chinese). doi:10.7519/j.issn.1000−0526.2024.030801

青逸雨,黄雨婧,孙芳,等.2023.东北移高原低涡引发我国西北两次强降水过程的对比分析[J].暴雨灾害,42(2):144−149. Qing Y Y, Huang Y J, Sun F, et al. 2023. Comparative analysis of two heavy precipitation events in Northwest China induced by northeastward Tibetan Plateau vortices [J]. Torrential Rain and Disasters,42(2):144−149 (in Chinese). doi:10.12406/byzh.2022−014

任丽,孙磊,张桂华,等.2019.一次东北暖锋锋生暴雨的中尺度特征分析及成因初探[J].暴雨灾害,38(4):311−319. Ren L, Sun L, Zhang G H, et al. 2019. Preliminary analysis of mesoscale feature and causes for rainstorm caused by the warm front frontogenesis in Northeast China [J]. Torrential Rain and Disasters,38(4):311−319 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1004−9045.2019.04.003

王秀明,俞小鼎,周小刚.2014.雷暴潜势预报中几个基本问题的讨论[J].气象,40(4):389−399. Wang X M, Yu X D, Zhou X G. 2014. Discussion on basical issue of thunderstorm potential forecasting [J]. Meteorological Monthly,40(4):389−399 (in Chinese). doi:10.7519/j.issn.1000−0526.2014.04.001

王一颉,赵桂香,马严枝.2019.降水相态转换机制及积雪深度预报技术研究[J].干旱气象,37(6):964−971. Wang Y J, Zhao G X, Ma Y Z. 2019. Precipitation phase transformation mechanism and prediction technology of snow depth [J]. Journal of Arid Meteorology,37(6):964−971 (in Chinese). doi:10.11755/j.issn.1006−7639(2019)−06−0964

夏阳,严小冬,刘芷含,等.2023.中国西南贵州地区冬季凝冻日数的气候特征及其异常成因[J].高原气象,42(1):173−185. Xia Y, Yan X D, Liu Z H, et al. 2023. Climatic characteristics of winter freezing days in Guizhou in Southwest China and their anomalous causes [J]. Plateau Meteorology,42(1):173−185 (in Chinese). doi:10.7522/j.issn.1000−0534.2022.00028

阎琦,孙欣,崔锦,等.2017. 1210 号台风所致的持续性暴雨成因分析[J].暴雨灾害,36(4):319−328. Yan Q, Sun X, Cui J, et al. 2017. Analysis of the extreme persistent hazard rainstorm under the influence of 1210 Typhoon [J]. Torrential Rain and Disasters,36(4):319−328 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1004−9045.2017.04.004

杨丽杰,张洪芬,程鹏,等.2021.基于物理量的陇东地区冬季降水相态预报方法研究[J].沙漠与绿洲气象,15(4):76−82. Yang L J, Zhang H F, Cheng P, et al. 2021. Research on predicition method of Winter precipitation phase in Longdong area based on physical quantity [J]. Desert and Qasis Meteorology,15(4):76−82 (in Chinese). doi:10.12057/j.issn.1002−0799.2021.04.010

杨旗,张海鹏,吴建蓉,等.2024.对冬季云贵—华南准静止锋上一次多相态降水过程的模拟研究[J].干旱气象,42(1):75−83. Yang Q, Zhang H P, Wu J R, et al. 2024. Simulation of a multi-phase precipitation process over Yungui-Huanan quasi-stationary front in winter [J]. Journal of Arid Meteorology,42(1):75−83 (in Chinese). doi:10.11755/j.issn.1006−7639(2024)−01−0075

杨秀庄,李刚,谢清霞,等.2024. 2020 年 1 月一次云贵准静止锋特征变化及对贵州降水的影响[J].高原山地气象研究,44(4):54−62. Yang X Z, Li G, Xie Q X, et al. 2024. Characteristic changes of a Yunnan-Guizhou quasi-stationary front in January 2020 and its impact on precipitation in Guizhou [J]. Plateau and Mountain Meteorology Research,44(4):54−62 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1674−2184.2024.04.006

俞小鼎,费海燕,王秀明.2024. 2024 年 2 月 17-23 日中国大范围强寒潮雨雪冰冻强对流过程涉及的若干问题[J].气象,50(9):1033−1042. Yu X D, Fei H Y, Wang X M. 2024. Some issues concerning the large area rainstorm, snowstorm, sleet, freezing rain and severe convection event over China from 17 to 23 February 2024 [J]. Meteorological Monthly,50(9):1033−1042 (in Chinese). doi:10.7519/j.issn.1000−0526.2024.080902

云天雨,孟莹莹,张桂华.2024.一次极端暴雨事件中罕见冻雨成因分析[J].沙漠与绿洲气象,18(4):91−99. Yun T Y, Meng Y Y, Zhang G H. 2024. Analysis of the causes of rare freezing rain in an extreme snow-

storm event [J]. Desert and Qasis Meteorology,18(4):91−99 (in Chinese). doi:10.12057/j.issn.1002−0799.2024.04.013

赵琳娜,马清云,杨贵名,等.2008. 2008 年初我国低温雨雪冰冻对重点行业的影响及致灾成因分析[J].气候与环境研究,13(4):556−566 Zhao L N, Ma Q Y, Yang G M, et al. 2008. Disasters and its impact of a severe snow storm and freezing rain over southern China in January 2008 [J]. Climatic and Environmental Research,13(4):556−566 (in Chinese). doi:10.3878/j.issn.1006−9585.2008.04.20

张芳华,陈涛,杨舒楠,等.2014.一次冬季暴雨过程中的锋生和条件对称不稳定分析[J].气象,40(9):1048−1057. Zhang F h, Chen T, Yang S N, et al. 2014. Diagnosis of the frontogenesis and CSI feature during a torrential rainfall event in winter [J]. Meteorological Monthly, 40(9):1048−1057 (in Chinese). doi:10.7519/j.issn.1000−0526.2014.09.002

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 X, Gao S T, Wang J. 2015. Numerical simulation and stratification structure analysis of freezing rain event in Guizhou in January 2008 [J]. Plateau Meteorology,34(2): 368−377 (in Chinese). doi:10.7522/j.issn.1000−0534.2013.00189

周明飞,杜小玲,罗敬,等.2022.贵州“5.15”极端风雹天气过程的环境场和雷达回波特征[J].暴雨灾害,41(2):158−166. Zhou M F, Du X L, Luo J, et al. 2022. Analysis of environmental field and radar echo characteristics for an extreme wind and hail event occurred in Guizhou on 15 May 2021 [J]. Torrential Rain and Disasters,41(2):158−166 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1004−9045.2022.02.006

宗志平,马杰,张恒德,等.2013.近几十年来冻雨时空分布特征分析[J].气象,39(7):813−820. Zong Z P, Ma J, Zhang H D, et al. 2013. Analysis on the spatial-temporal characteristics of freezing rain in recent decades [J]. Meteorological Monthly,39(7):813−820 (in Chinese). doi:10.7519/j.issn.1000−0526.2013.07.002

Byrd G P. 1989. A composite analysis of winter season overrunning precipitation bands over the southern plains of the United States [J]. Journal of the Atmospheric Sciences,46(8):1119−1132. doi:10.1175/1520−0469(1989)046<1119:ACAOWS>2.0.CO;2

Farzaneh M A, Volat C, Leblond A. 2008. Atmospheric Icing of Power Networks[M]. Berlin: Springer Science & Business Media.

Hoskins B J, Bretherton F P. 1972. Atmospheric frontgenesis mode: Mathematical formulation and solution [J]. Journal of the Atmospheric Sciences,29:11−37. doi:10.1175/1520−0469(1972)029<0011:AFMMFA>2.0.CO;2

Hoskins B J. 1974. The role of potential vorticity in symmetric stability and instability [J]. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society,100(245):480−482. doi:10.1002/qj.49710042520

Kato K. 1989. Seasonal transition of the lower-level circulation systems and the baiu front in China in 1979 and its relation to the Northern Summer monsoon [J]. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society,67(2):249−265. doi:10.2151/jmsj1965.67.2_249

Reuter G W, Aktary N. 1995. Convective and symmetricin stabilities and their effects on precipitation: Seasonal variations in central Alberta during 1990 and 1991 [J]. Monthly Weather Review,123(1):153−162. doi:10.1175/1520−0493(1995)123<0153:CASIAT>2.0.CO;2

Schultz D M, Schumacher P N. 1999. The use and misuse of conditional symmetric instability [J]. Monthly Weather Review,127(12):2709−2732. doi:10.1175/1520−0493(1999)127<2709:TUAMOC>2.0.CO;2

Snook J S. 1992. Current techniques for real-time evaluation of conditional symmetric instability [J]. Weather and Forecasting,7(3):430−439. doi:10.1175/1520−0434(1992)007<0430:CTFRTE>2.0.CO;2

(责任编辑 张 文)