

邵阳地区2024年三次低温雨雪冰冻过程分析

肖思晗, 黄俊翔, 谢忆南, 王晶晶, 向 钢

邵阳市气象局, 湖南 邵阳

收稿日期: 2025年7月28日; 录用日期: 2025年8月27日; 发布日期: 2025年9月4日

摘 要

利用常规观测资料和ERA5再分析资料, 分析了2024年1~2月影响邵阳地区的3次低温雨雪冰冻天气过程的特征及成因差异。结果表明: (1) 3次过程500 hPa均受“两槽一脊”环流和偏强西太平洋副高影响。过程I乌拉尔山以北阻塞形势有利于冷空气快速南下, 冷空气强度强, 降雪量大且短暂; 过程II和过程III冷空气分股东移南下, 强度偏弱, 降水相态复杂且历时长。(2) 3次过程中低层均伴有较强偏南风发展, 过程I冷暖气流在邵阳地区交汇最剧烈; 过程I和II中700 hPa邵阳上空存在较强水汽辐合, 与雨雪的量级和强度有较好对应。(3) 700 hPa、850 hPa 0℃线, 925 hPa -4℃线以及地面0℃线, 可作为雨转雪相态变化的参考值。当中低层存在显著暖性逆温, 地面 $\leq -1^\circ\text{C}$, 可作为雨转冻雨的参考值。双偏振雷达产品在本次过程中对降水相态的演变及判定有较好的指示作用。

关键词

低温雨雪, 温度层结, 降水相态

Analysis of Three Cryogenic Freezing Rain and Snow Weather Processes in Shaoyang Area in 2024

Sihan Xiao, Junxiang Huang, Yinan Xie, Jingjing Wang, Gang Xiang

Shaoyang Meteorological Bureau, Shaoyang Hunan

Received: Jul. 28th, 2025; accepted: Aug. 27th, 2025; published: Sep. 4th, 2025

Abstract

Based on conventional observation data and ERA5 reanalysis data, three cryogenic freezing rain and snow weather processes that affected the Shaoyang region from January to February 2024 were analysed. The results showed that: (1) three processes were influenced by the “two troughs and

文章引用: 肖思晗, 黄俊翔, 谢忆南, 王晶晶, 向钢. 邵阳地区 2024 年三次低温雨雪冰冻过程分析[J]. 气候变化研究快报, 2025, 14(5): 913-925. DOI: 10.12677/ccrl.2025.145091

one ridge" circulation and the stronger western Pacific subtropical high at 500 hPa. In Process I, the blocking situation in the northern Ural Mountains facilitated the rapid southward movement of cold air, resulting in intense cold air, heavy but brief snowfall. In Processes II and III, the cold air masses split and moved eastward and southward with weaker intensity, complex precipitation phases, and a longer duration. (2) During three events, there was a development of strong southerly winds in the middle and lower layers, the convergence of cold and warm air currents was most intense in Shaoyang area during Process I. Strong water vapor convergence was observed over Shaoyang at 700 hPa in Processes I and II, which correlated well with the magnitude and intensity of precipitation. (3) The 0°C isotherms at 700 hPa and 850 hPa, the -4°C isotherm at 925 hPa, and the ground-level 0°C isotherm can serve as reference points for the phase change from rain to snow. When there is a significant warm inversion in the middle and lower layers and the ground temperature is $\leq -1^{\circ}\text{C}$, these conditions can serve as a reference for the transition from rain to freezing rain. The dual-polarization radar product provided valuable indications for the evolution and determination of precipitation phase states during these events.

Keywords

Low-Temperature Rain and Snow, Temperature Stratification, Precipitation Phase State

Copyright © 2025 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

低温雨雪冰冻是湖南冬季主要的灾害天气，对农业、交通、电力以及人民生活有重要的影响。2008 年中国南方发生了大范围极端异常的低温冰冻天气之后，国内学者对此做了大量的研究工作，王遵娅等[1]对 2008 年极端冰灾事件的气候特征及其影响进行了综合分析；王东海等[2]从天气学背景和形成机理出发，分析了 2008 年低温雨雪冰冻灾害的致灾原因；还有不少学者[3]-[5]对 2008 年低温冰冻过程开展了本地化的研究和评估。近些年，有关南方低温雨雪冰冻天气过程的分析研究逐渐丰富，得到了不少有益的启示。漆梁波等[6]基于中国东部 5 个冬季的地面降水观测和高空资料，将不同降水相态进行温度及厚度的统计分析，得到一组冬季降水相态识别的参考判据；姚蓉[7]、胡钰玲[8]、王兴菊等[9]对不同低温雨雪过程进行对比分析，揭示了其影响机制和成因的差异性；刘红武等[10]对湖南一次罕见的低温雨雪天气过程分析中表明，地面强冷高压以及大的锋区温差是造成极端低温的重要原因。唐明晖等[11]以长沙站为例，分析了雨雪相态转变的雷达双偏振特征，指出不同相态降水时段相关系数(CC)、差分反射率(ZDR)、水平反射率因子(Zh)都有差异。

由于低温雨雪冰冻天气过程的复杂性、地域性以及仪器误差等因素，关于这方面的研究仍是现阶段关注的重点。邵阳地处湘中偏西南，地形以丘陵、山地为主，地形分布为低温冰冻天气提供了较佳的条件。本文利用气象观测资料和 ERA5 再分析资料，分析 2024 年 1 月至 2 月 3 次雨雪过程发生时的天气形势背景特征、温度层结变化、物理量分布及雷达回波特征等差异，为本地降水相态预报和预警服务提供一定的参考。

2. 天气实况

2024 年 1 月 21 日至 22 日(过程 I)，邵阳地区普降大到暴雪，洞口、新宁、邵阳县、隆回北部、新邵北部出现了暴雪。其中 21 日 20 时至 22 日 20 时全市平均降水量 15.6 mm，各地降水量在 9.9 mm~25.2

mm 之间, 各县市最大积雪深度为 3~12 cm; 22 日夜间至 23 日早晨, 全市降雪停止。过程期间, 各县市最低气温降至 $-2.5\sim-0.5^{\circ}\text{C}$, 高寒山区达 -10°C 以下, 低温持续至 23 日早晨。

2024 年 2 月 2 日至 7 日(过程 II), 出现了新一轮低温雨雪冰冻过程, 本轮过程邵阳地区降水相态类型复杂, 雨、冻雨、雨夹雪等多种相态共存。全市平均降水量 25.3 mm, 各地降水量分布在 28.1 mm~44 mm 之间, 期间大部分乡镇出现了冻雨, 山区出现了冰冻, 监测到最大电线积冰在 27 mm~31 mm。低温维持时间长, 各县市最低气温降至 $-1.7^{\circ}\text{C}\sim 0.3^{\circ}\text{C}$, 高寒山区最低气温在 -5°C 以下。

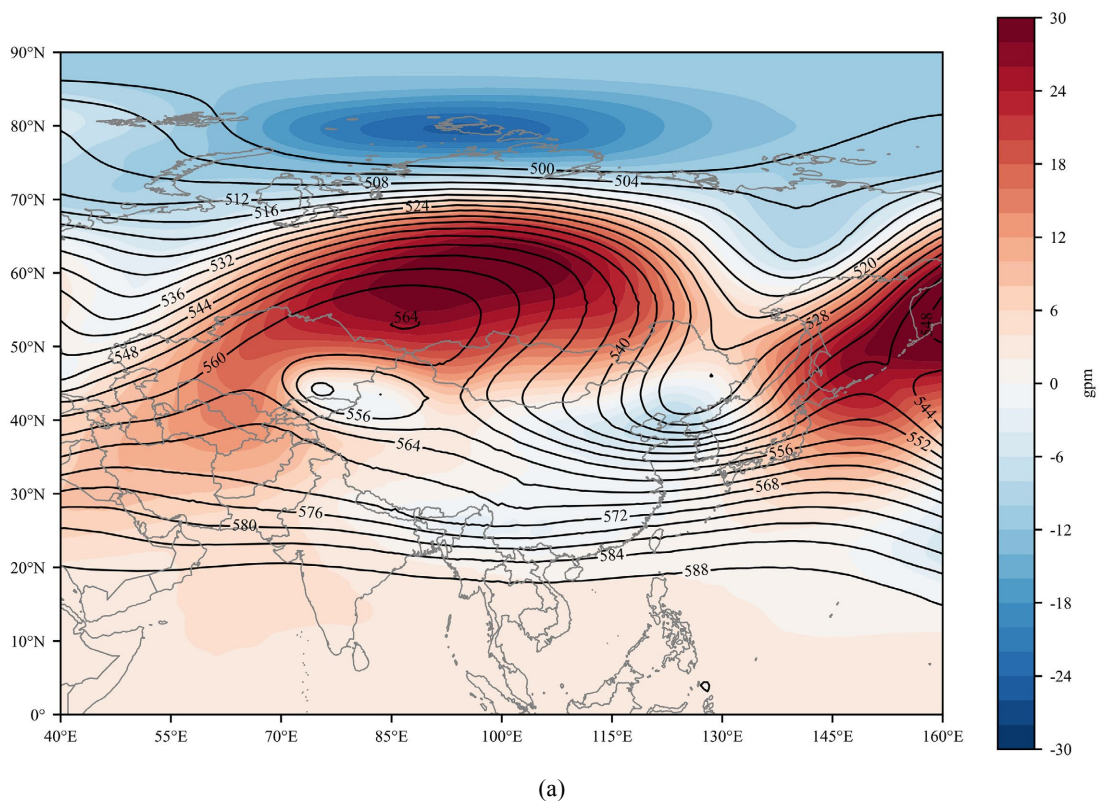
2024 年 2 月 21 日至 25 日(过程 III), 本轮过程降水相态以冻雨为主, 但整体降水偏弱, 全市平均降水量仅 2.2 mm。21 日 20 时至 25 日 20 时, 各县市最低气温低至 $-2.9^{\circ}\text{C}\sim-1.9^{\circ}\text{C}$, 高寒山区最低气温维持在 -7°C 以下。

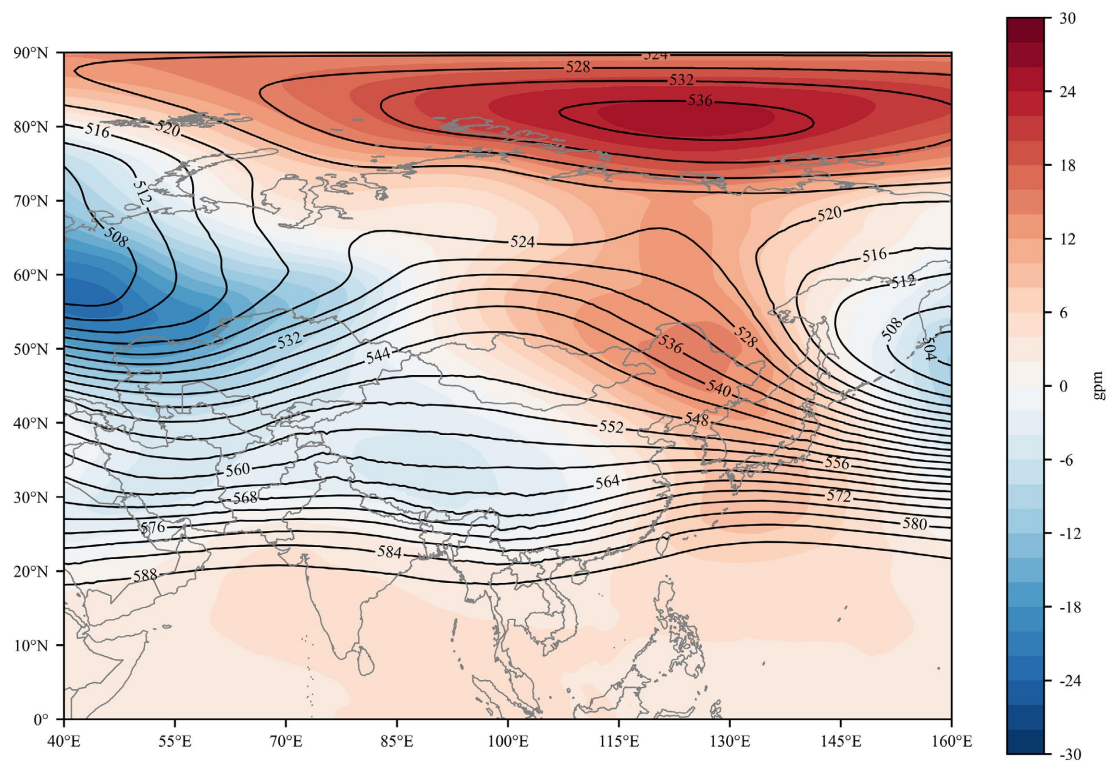
总体而言, 过程 I 影响时间最短且降雪量大, 相态以雪为主; 过程 II 持续时间长, 相态复杂多变; 过程 III 降水较弱, 主要以冻雨为主。

3. 天气形势分析

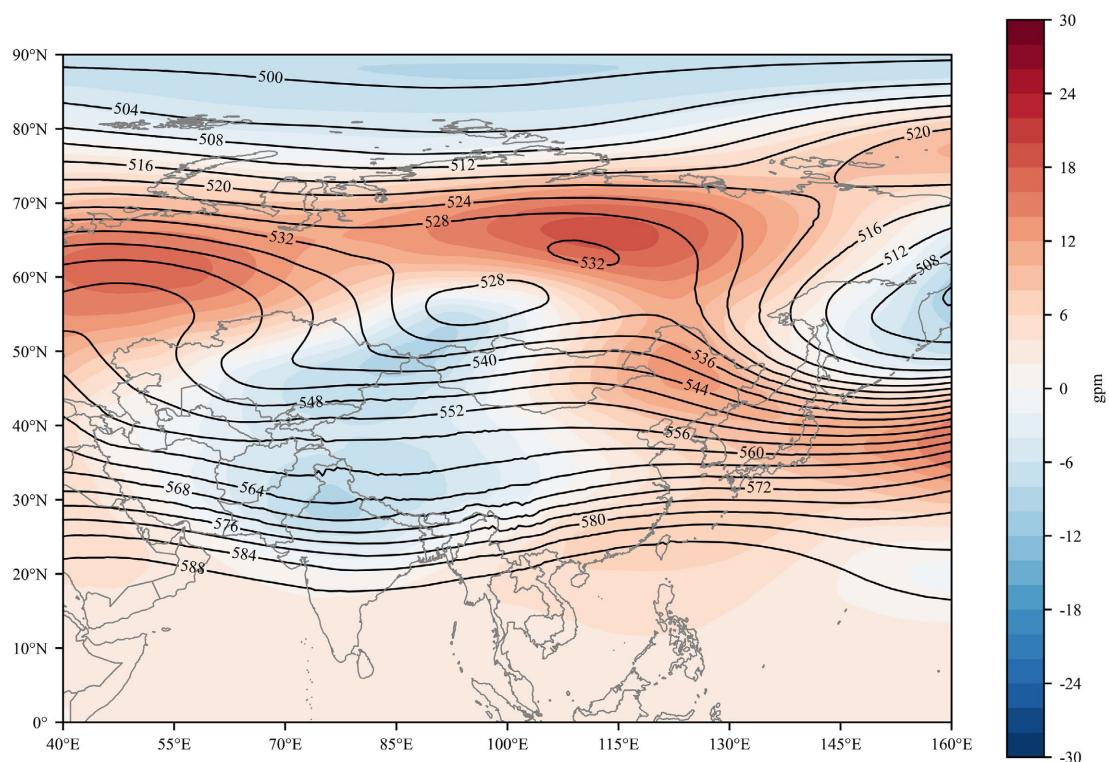
3.1. 500 hPa 形势场

过程 I 中(图 1(a)), 500 hPa 呈两槽一脊的环流形势, 乌拉尔山以北地区存在明显的高压脊, 新疆西北部有切断低压, 形成阻塞形势, 有利于冷空气在新疆北部一带堆积, 东亚大槽槽后的西北气流将积聚的冷空气向我国中东部输送与南支槽前的西南暖湿气流在长江中下游一带交汇。与近 30 年平均值相比, 乌拉尔山以北有显著的正距平中心, 较常年同期偏强 32 gpm。新疆西北部存在弱负距平中心, 同时我国中东部也表现为广阔的弱负距平区, 西太平洋副高较常年偏西偏强, 有利于冷暖空气在长江中下游至江南一带交汇, 造成此次较大范围雨雪天气。





(b)



(c)

Figure 1. 500 hPa average height field and anomaly field (shadow) of 3 processes: (a) Process I, (b) Process II, (c) Process III
图 1. 3 次过程 500 hPa 平均高度场及距平场(阴影): (a) 过程 I、(b) 过程 II、(c) 过程 III

从过程 II 500 hPa 高度和距平场上可见(图 1(b)), 中高纬也呈两槽一脊分布, 但槽脊经向度较大, 阻塞形势偏弱, 我国东北部为 12~15 gpm 的正距平中心, 较常年同期略偏强。中低纬南支槽较为宽广, 强度较常年略偏强, 110°E 以西的 20°N~40°N 区域内基本都为弱的负距平。西太平洋副高主体强盛, 在整个低纬地区均为正距平, 副高脊线到达 20°N 附近, 中纬地区的西南气流也较为旺盛。

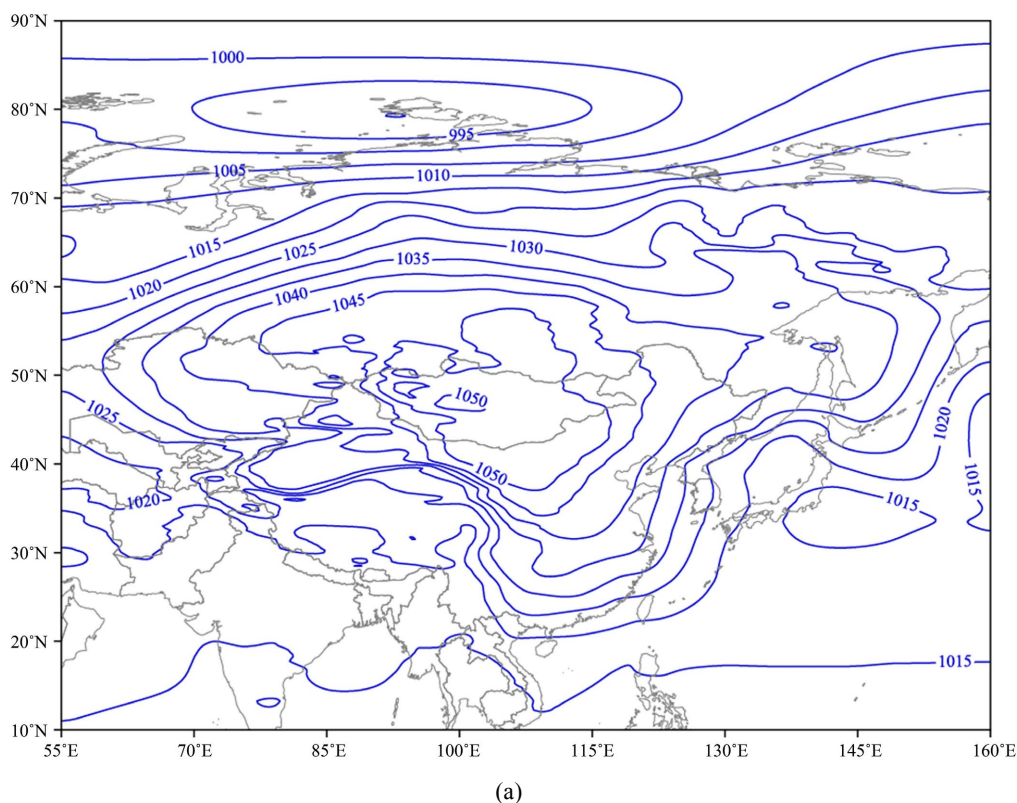
过程 III 中, 500 hPa 上贝加尔湖以北有高压脊发展, 阻塞形势明显, 但强度较过程 I 偏弱。中低纬分布与过程 II 分布类似, 南支槽和西太平洋副高均较常年略偏强, 更有利于槽前的暖湿气流与中高纬脊前偏北气流在长江中下游一带交汇。

综合来看, 前期欧亚环流均呈现出“两槽一脊”型, 乌拉山至贝加尔湖一带有高压脊发展, 带动冷空气持续南下; 副高均较常年同期偏强, 脊线稳定维持在 20°N 附近, 南支槽活跃且不断有小波东传。3 次不同点在于各过程中高纬阻塞形势强度和位置有所差异, 整体而言, 过程 I 阻塞形势最强, 过程 III 次之。此外, 冷空气南下的方式也存在差异, 过程 I 是横槽旋转南下, 影响时间短, 过程 II 和过程 III 是低层变形场作用, 冷空气分股南下, 影响时间长。

3.2. 海平面气压场

从过程 I 的海平面气压图来看, 冷高压中心位于蒙古一带, 强度为 1050 hPa, 冷空气沿西北路自蒙古到河套地区, 再南扩至长江中下游及江南地区。1040 hPa 等压线到达了湖南北部, 邵阳地区受 1035~1030 hPa 的等压线控制(见图 2(a))。

过程 II 中和 III 中, 冷高压中心位置较过程 I 相比偏东, 过程 II 更为明显, 其中心强度分别在 1035 hPa 和 1040 hPa 左右。冷空气沿东路南下, 经蒙古到我国东北和华北北部再折向西南, 经渤海、黄海后向南抵达长江中下游及江南地区。过程 II 中 1030 hPa 等压线达湘中及以北地区, 邵阳大部分地区主要受 1025 hPa 线控制。而过程 III 1030 hPa 线南压范围更广, 南伸到了 25°N 附近, 整个邵阳基本在 1030 hPa 线影响范围下。



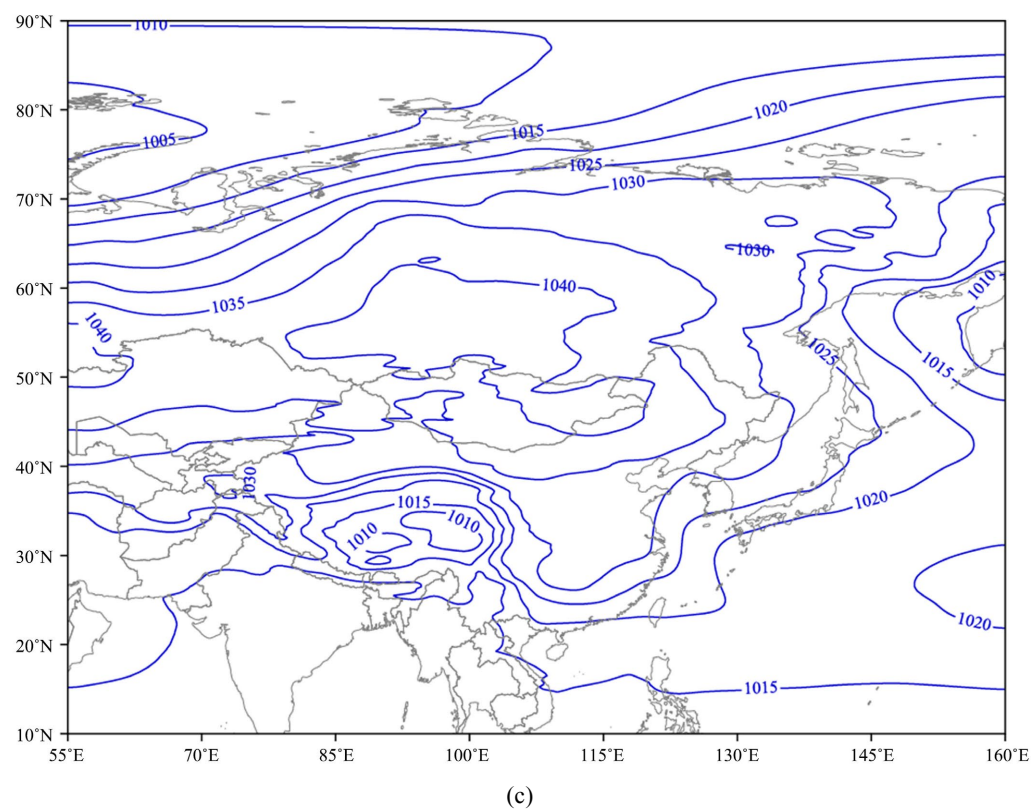
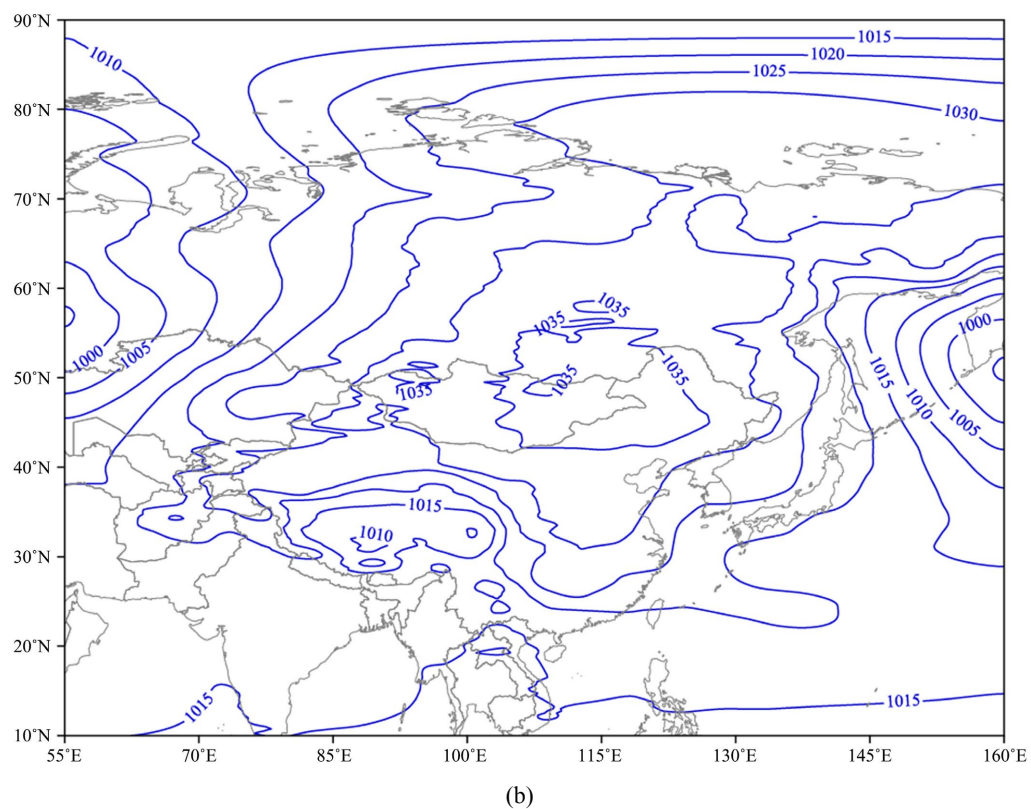


Figure 2. Mean sea level pressure field of 3 processes: (a) Process I, (b) Process II, (c) Process III

图 2. 3 次过程海平面平均气压场: (a) 过程 I、(b) 过程 II、(c) 过程 III

4. 物理量条件对比

4.1. 动力条件

从3次低温雨雪天气过程中850 hPa经向风沿111°E的时间剖面可知(图3), 过程I伴随有强冷空气影响, 1月21日夜间邵阳地区偏北风强度达到 $12\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 以上, 且随时间推移, 冷空气继续逐渐南压, 同时低层的西南气流也明显加强, 加强的偏南气流与南下的冷空气在邵阳地区交汇。过程II中, 前期冷空气活动不明显, 2月7日开始有冷空气南下影响邵阳, 但整体强度偏弱, 偏北风速 $6\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 左右。整个过程中偏南气流强盛, 中心值达 $12\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 以上。过程III和过程II类似, 冷空气影响弱, 中低纬维持较强的偏南风。

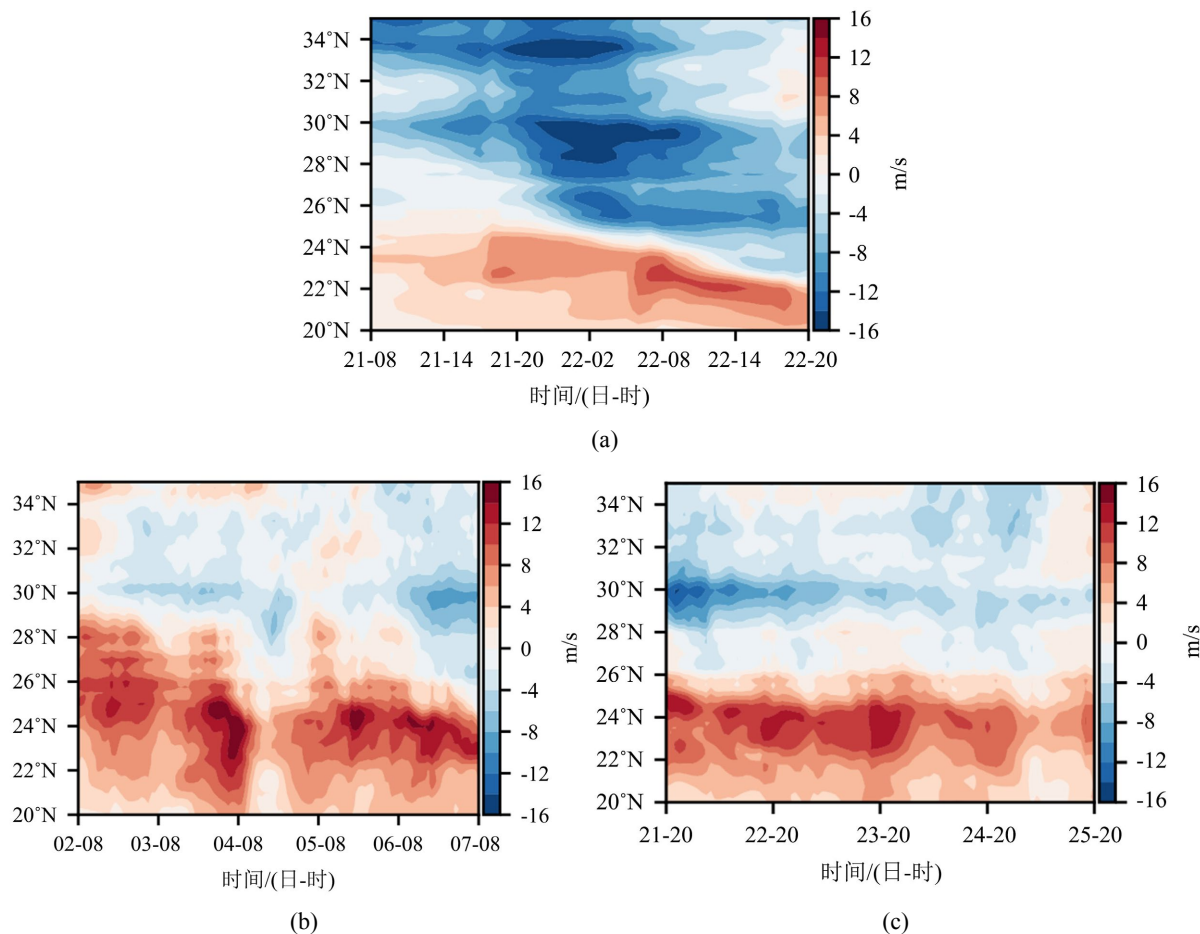


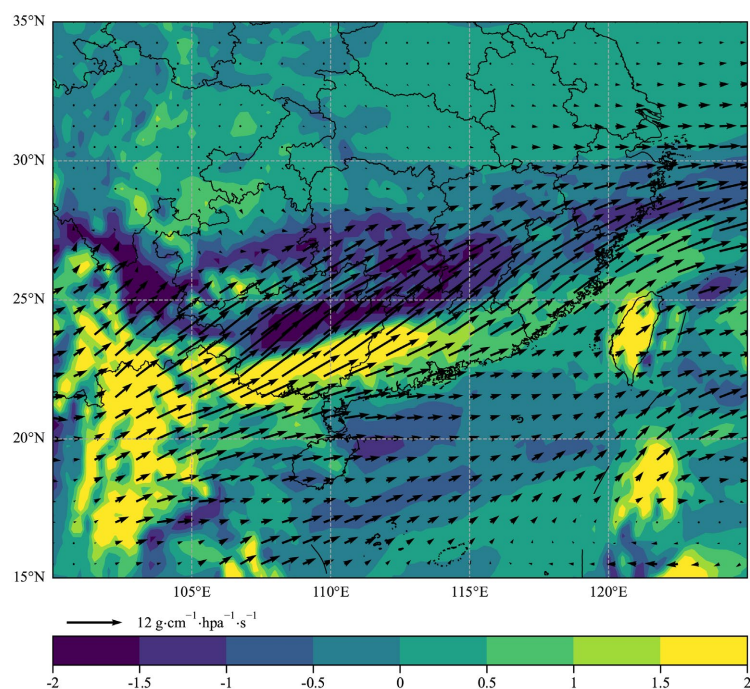
Figure 3. Time profile of 850 hPa meridional wind (unit: $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$) along 111°E during three processes: (a) Process I, (b) Process II, (c) Process III

图 3. 3次过程850 hPa 经向风(单位 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)沿 111°E 的时间剖面: (a) 过程 I、(b) 过程 II、(c) 过程 III

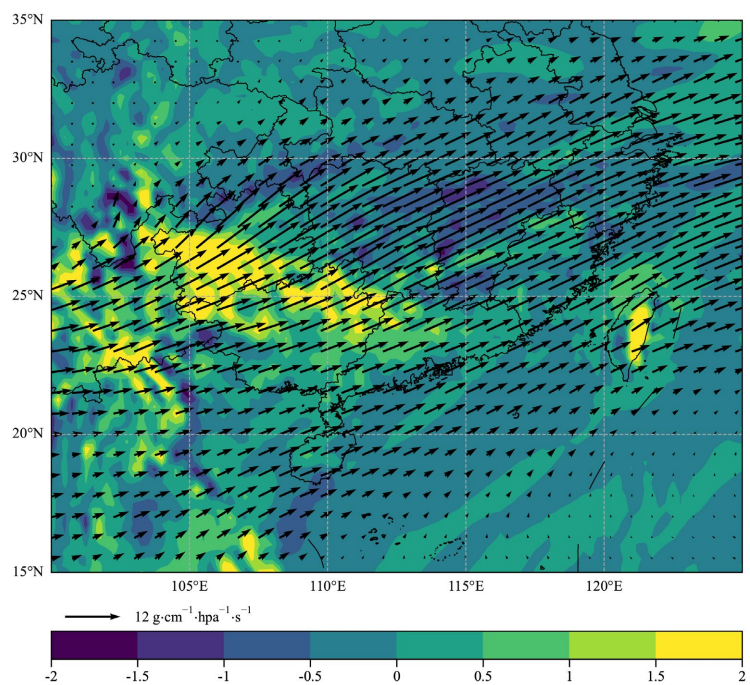
4.2. 水汽条件

为了更好地分析3次过程期间水汽输送和水汽条件的差异, 分别给出了过程期间平均700 hPa水汽通量和水汽通量散度分布(图4)。3次过程水汽输送均主要来自南海和孟加拉湾地区的水汽输送, 其路径与中低层暖湿气流的空间分布基本一致, 暖湿气流引导着中低层水汽的输送。从强度上看, 过程II和过程III中邵阳上空水汽通量超过 $14\text{ g}\cdot\text{cm}^{-1}\cdot\text{hPa}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$, 明显强于过程I, 这与后两次过程期间强盛的西南急流发展有关。结合水汽通量散度的分布, 过程I和过程II(图4(a)、图4(b)), 邵阳地区700 hPa存在较强

的水汽辐合, 大值中心在 $-1.5 \times 10^{-7} \text{ g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$, 而过程 III 呈现出较明显的水汽辐散, 这也与过程 I 和过程 II 雨雪较强, 而过程 III 较弱相对应, 可见 3 次过程中水汽辐合对雨雪的量级和强度有重要作用, 前两次过程期间中低纬有暖湿气流与南下的冷空气在湘中一带交汇, 并在邵阳上空有辐合, 为雨雪天气提供了良好的水汽条件。



(a)



(b)

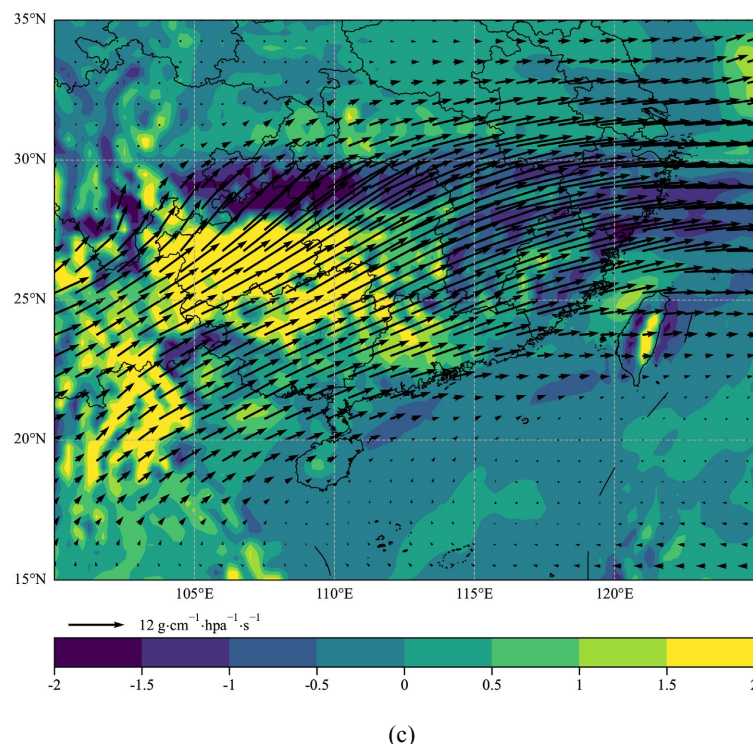


Figure 4. The water vapor flux and water vapor flux divergence at 700 hPa for three processes (unit: $10^{-7} \text{ g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$): (a) Process I, (b) Process II, (c) Process III

图 4. 3 次过程 700 hPa 水汽通量及水汽通量散度分布(单位 $10^{-7} \text{ g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$): (a) 过程 I、(b) 过程 II、(c) 过程 III

5. 温度层结和雨雪转化特征

5.1. 温度层结演变特征

从各层结温度演变来看, 3 次过程温度垂直结构差异显著(图略)。过程 I 中, 21 日夜间至 22 日随强冷空气持续南下影响, 700 hPa -4°C 线、850 hPa -8°C 线不断南压至湘中, 邵阳地区整层温度均低于 0°C 。过程 II: 700 hPa 0°C 线在湘中一带摆动, 大致呈先南压再北抬后又南压的趋势, 而 850 hPa、925 hPa 0°C 线呈持续性南移趋势, 最终抵达湘南。过程 III 中, 700 hPa 0°C 线稳定维持在湘北, 850 hPa 0°C 线逐渐压至湘中偏南一带, 850 hPa -4°C 线位于邵阳中部。整体来看, 三次过程地面温度大致在 $-2^{\circ}\text{C} \sim 2^{\circ}\text{C}$, 过程 III 和过程 II 层结分布类似, 邵阳中低层存在显著暖性逆温, 过程 III 逆温更深厚。

5.2. 雨雪转化特征线

过程 I 中, 1 月 21 日 20 时, 700 hPa 0°C 、925 hPa -4°C 线位于邵阳北部, 850 hPa 均位于 0°C 以下, 地面 2°C 附近, 北部出现雨夹雪。21 日 22 时开始, 强冷空气继续南扩, 邵阳全境 700 hPa 降至 -4°C 以下, 850 hPa 达 -8°C 以下, 925 hPa 低于 -4°C , 形成深厚冷垫, 地面气温降至 $-2^{\circ}\text{C} \sim 0^{\circ}\text{C}$, 降水相态由雨夹雪转为纯雪, 且维持时间较长。

过程 II 中, 2 月 3 日 08 时至 20 时, 邵阳地区 700 hPa 温度高于 0°C , 850 hPa 0°C 线位于西北部附近, 925 hPa -4°C 线压至南部。与此同时, 地面气温西北部 $-1^{\circ}\text{C} \sim -0.5^{\circ}\text{C}$, 东南部 $0.2^{\circ}\text{C} \sim 2^{\circ}\text{C}$, 西北部降水相态为冻雨或雨, 东南部主要为雨。6 日 20 时至 7 日 08 时, 700 hPa 0°C 线伸展至邵阳中部, 850 hPa 0°C 线也逐渐压过全市, 925 hPa 在 -4°C 以下, 地面气温维持 0°C 附近, 北部出现了雨夹雪或雪, 南部出现了雨夹雪或冻雨。

过程 III 中, 2 月 22 日 08 时, 700 hPa 全市为正温区, 850 hPa 0℃线主要分布在邵阳北部, 925 hPa -4℃线已压至南部地区, 地面气温均在 0℃附近, 此时主要以液态降水为主。22 日 20 时, 700 hPa 温度仍在 0℃以上, 850 hPa 0℃线、925 hPa -4℃线较白天有所南压, 地面温度降至-1℃~-2℃, 监测到降水相态由雨转为冻雨。25 日至 26 日, 850 hPa 至 925 hPa 暖性逆温层结维持, 地面温度升至 1℃~2℃, 全市以降雨为主。

综合来看, 过程 I 雨雪转化各层温度线特征明显, 700 hPa、850 hPa 温度低于 0℃, 925 hPa 低于-4℃, 地面接近 0℃时, 是此次雨转雪相态变化的指标值, 在过程 II 中, 7 日北部地区转纯雪时, 各温度层同样满足该指标值; 其次, 当 700 hPa 至 925 hPa 存在显著暖性逆温, 地面气温接近或低于-1℃时, 是雨转冻雨的指标值, 且地面温度越低, 越有利于冻雨的发生。

6. 雷达回波分析

因过程 III 降水较弱仅存分散弱回波, 故重点分析前两次过程的降水特征及相态转换等。从过程 I 1 月 21 日 22 时反射率因子图可见(图 5(a)), 回波整体表现为较细腻的丝缕状, 反射率因子值基本不超过 40 dBz, 差分相移率(KDP)值在-0.1~0.15° km⁻¹ 内, 表现出稳定性降水特征。ZDR 值在 0~2 dB 之间, 整体分布均匀, 但 3 km 高度附近出现了 ZDR 值大于 2.5 dB 的亮带, 说明此高度上粒子的尺度明显增大。同时次的 CC 分布也可见 3 km 左右有值小于 0.95 的亮带, 显示出降水粒子的形状不规则, 且存在雨雪混合相态的粒子。结合 HCL 产品, 3 km 高度主要为湿雪和大雨滴, 低层表现为雨和大雨滴。综合可以初步判断此时 3 km 处存在融化层, 从融化层产品(ML)分布(图 6(d))也验证了该结论。由于融化层内固态粒子表面部分融化形成水膜, 导致粒子水平轴长增大, ZDR 值升高; 而混合相态粒子的非球形特征及介电常数差异则引起 CC 下降[12]。22 日 0 时前后, ZDR、CC 亮带特征减弱, CC 值也增强至 0.97 以上, 结合 HCL 产品也可以得知全市大部地区已转为纯雪。

过程 II 中, 选取 2 月 4 日 4 时 56 分降水较强时段低仰角雷达回波分析(图 7), 回波整体比较松散, 不均匀, 局地反射率因子达 40 dBz 以上。以雷达为中心, 水平距离 60~90 km 附近有一圈 CC 低值区, 值基本介于 0.85~0.95 之间; 从 ZDR 分布可见范围内粒子尺度较大, 部分区域 ZDR 值超过 1 dB, 结合 HCL 产品推测此处为融化层, 该区域内可能同时存在冰晶、雨滴等相态或混合相态的混合物。60 km 以内地区处于融化层高度以下, 可判定降水粒子为液态粒子, 4 日 05 时全市地面温度基本在 0℃附近或低于 0℃, 北部和西南部观测到有冻雨。

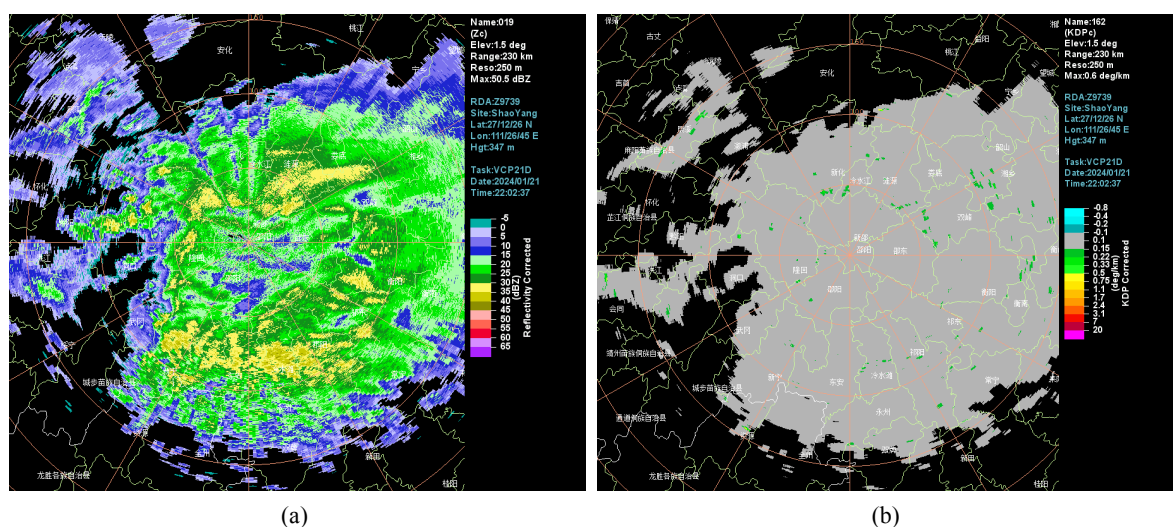


Figure 5. Radar products of Z (a) and KDP (b) at a 1.5° elevation angle on 22:02, January 21, 2024
图 5. 2024 年 1 月 21 日 22 时 02 分 1.5°仰角 Z (a)和 KDP (b)产品图

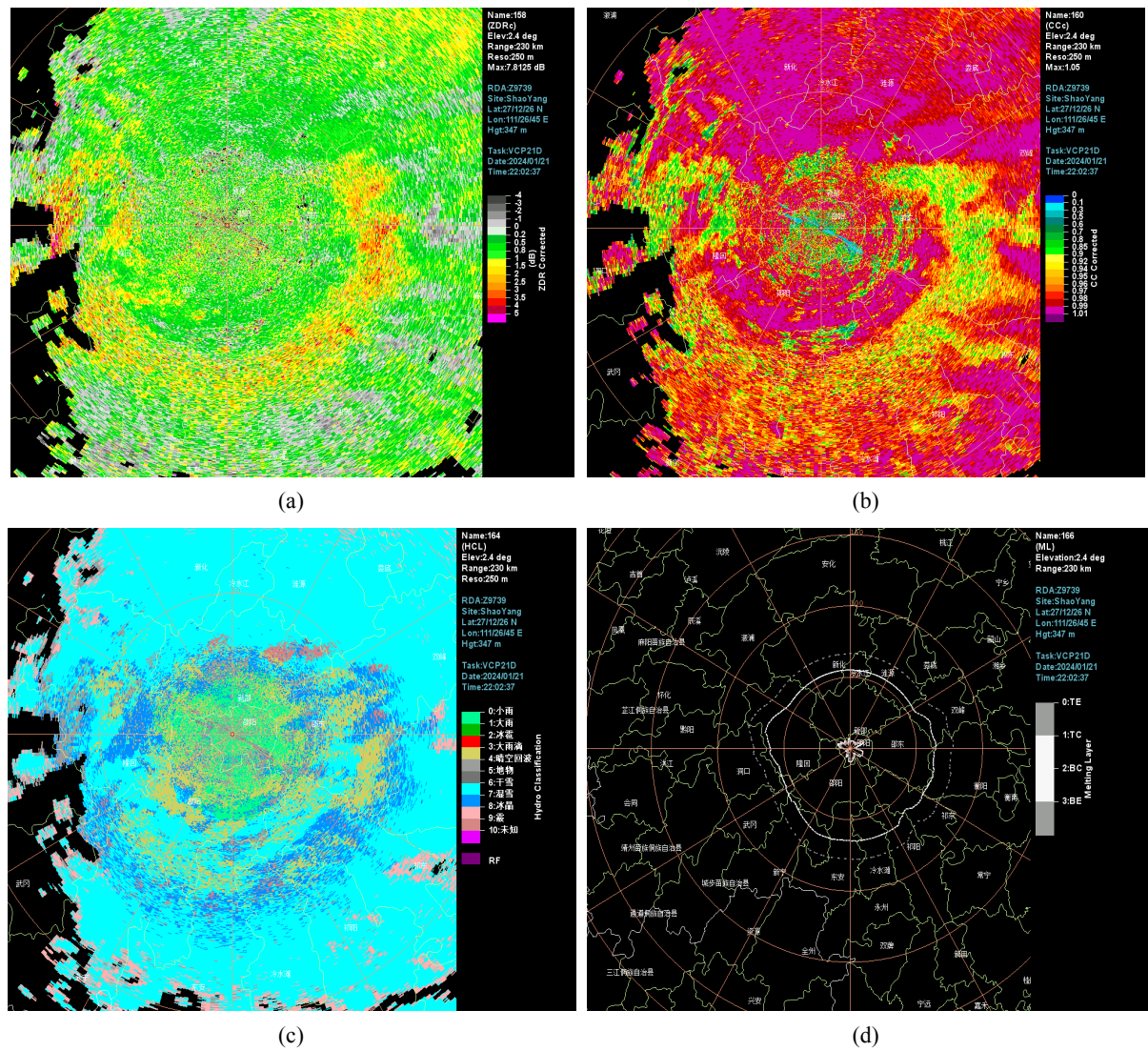
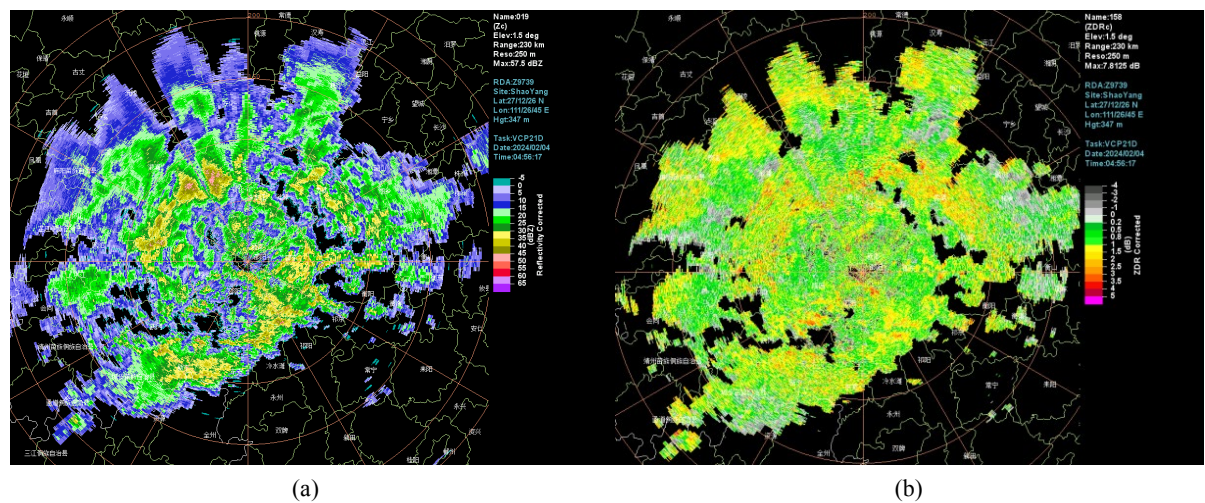


Figure 6. Radar products of ZDR (a), CC (b), HCL (c) and ML (d) at a 2.4° elevation angle on 22:02, January 21, 2024
图 6. 2024 年 1 月 21 日 22 时 02 分 2.4° 仰角 ZDR (a)、CC (b)、HCL (c) 和 ML (d) 产品图



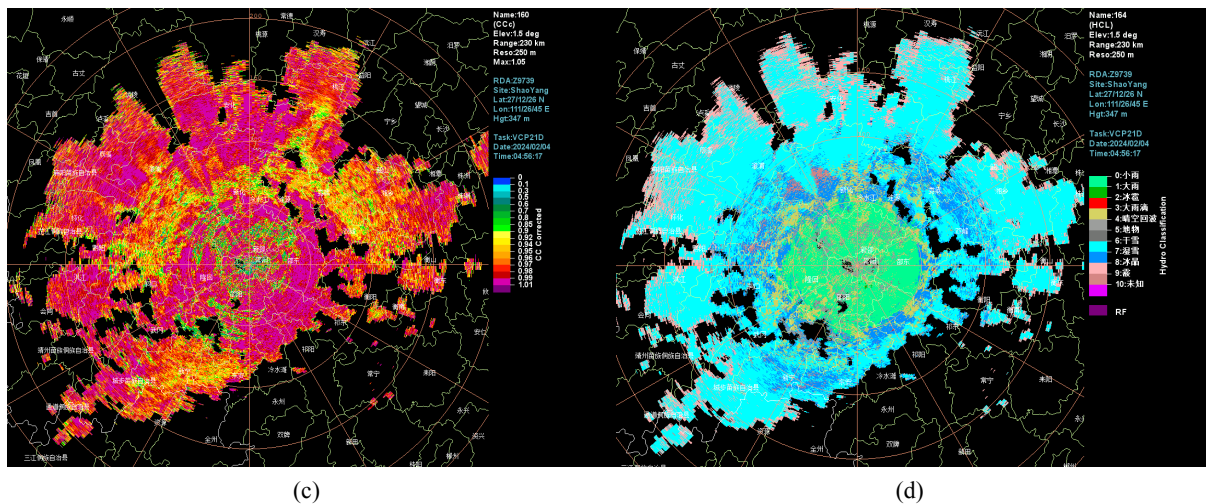


Figure 7. Radar products of Z (a), ZDR (b), CC (c) and HCL (d) at a 1.5° elevation angle on 4:56 am, February 4, 2024
图 7. 2024 年 2 月 4 日 4 时 56 分 1.5°仰角 Z (a)、ZDR (b)、CC (c)、HCL (d)产品图

通过双偏振雷达各产品的针对性分析，可以较准确地分辨融化层和粒子相态，进而提高雨雪相态转换的监测和预报能力。

7. 总结与讨论

1) 3 次过程中高纬均受“两槽一脊”环流和偏强西太平洋副高影响，但冷空气路径及强度显著不同。过程 I 乌拉尔山以北阻塞形势有利于冷空气快速南下，冷空气强度高，形成深厚冷垫，降雪量大且短暂；过程 II 和过程 III 冷空气分股东移南下，强度偏弱，降水相态复杂且持续时间长。

2) 动力抬升和水汽辐合是影响降水强度的关键因素。3 次过程中低层均伴有偏南风发展，过程 II 和 III 偏南气流更强盛，但过程 I 暖气流在邵阳地区交汇最剧烈。此外，过程 I 和 II 中邵阳地区 700 hPa 存在较强水汽辐合，这也与雨雪的量级和强度有较好的对应。

3) 从温度层结特征分布来看，过程 III 和过程 II 层结分布类似，中低层存在明显暖性逆温。从雨雪转化特征线分布可见，700 hPa、850 hPa 温度 $\leq 0^{\circ}\text{C}$ ，925 hPa $\leq -4^{\circ}\text{C}$ ，地面接近 0°C 时，易转为纯雪。当中低层存在显著逆温，地面气温 $\leq -1^{\circ}\text{C}$ 时，是雨转冻雨的指标值，且地面温度越低，越有利于冻雨的发生。

4) 结合双偏振参数(ZDR、CC、HCL 等)，可以较准确地分辨融化层和粒子相态，进而提升雨雪相态转换的监测和预报能力。但此技术还需结合多源数据优化本地化判据，本研究结论仅基于有限个例，需更多样本验证其普适性。

基金项目

湖南省气象局 2025 年创新发展专项(面上项目)CXFZ2025-MSXM82。

参考文献

- [1] 王遵娅, 张强, 陈峪, 等. 2008 年初我国低温雨雪冰冻灾害的气候特征[J]. 气候变化研究进展, 2008, 4(2): 63-67.
- [2] 王东海, 柳崇健, 刘英, 等. 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, 2008, 66(3): 405-422.
- [3] 高安宁, 陈见, 李艳兰, 等. 2008 年广西罕见凝冻灾害评估及思考[J]灾害学, 2008, 23(2): 83-86.
- [4] 张润琼, 刘艳雯, 姚刚, 等. 2008 年贵州罕见低温雨雪冰冻灾害成因及影响分析[J]. 热带地理, 2009, 29(4): 319-323.

-
- [5] 王海燕. 湖北省 1954/2008 年历史罕见持续低温冰雪过程对比分析[J]. 灾害学, 2011, 26(1): 80-86.
 - [6] 漆梁波, 张瑛. 中国东部地区冬季降水相态的识别判据研究[J]. 气象, 2012, 38(1): 96-102.
 - [7] 姚蓉, 唐佳, 唐明晖, 等. “14.02”湖南三次雨雪过程对比分析[J]. 气象, 2014, 40(12): 1500-1506.
 - [8] 胡钰玲, 赵中军, 康彩燕, 等. 中国南方 2008 年与 2016 年两次低温雨雪冰冻天气过程对比分析[J]. 冰川冻土, 2017, 39(6): 1180-1191.
 - [9] 王兴菊, 李启芬, 王芬, 等. 贵州省 2008 年与 2022 年年初低温雨雪冻雨天气过程对比分析[J]. 中低纬山地气象, 2023, 47(5): 8-16.
 - [10] 刘红武, 李振, 陈龙, 等. 湖南一次罕见低温雨雪冰冻天气过程分析[J]. 沙漠与绿洲气象, 2020, 14(2): 18-26.
 - [11] 唐明晖, 俞小鼎, 王青霞, 等. 2023. 湖南一次雨雪天气降水相变的环境条件与双偏振雷达特征分析[J]. 暴雨灾害, 42(3): 293-302.
 - [12] 姚晓娟, 魏鸣, 杜爱军, 等. 偏振雷达参量对融化层回波的探测敏感性分析[J]. 科学技术与工程, 2016, 16(21): 150-156.