段云霞,李得勤,卢娟,等,2026. 沈阳两次雨雪过程降水相态转换的多源观测特征分析[J]. 气象,52(11):1309-1321. Duan Y X, Li D Q, Lu J, et al, 2026. Characteristics of multi-source observations of precipitation phase transition during two rain-snow events in Shenyang[J]. Meteor Mon, 52(11):1309-1321(in Chinese).

沈阳两次雨雪过程降水相态转换的多源观测特征分析*

段云霞[1,2] 李得勤[2] 卢 娟[1] 李 娇[1] 王 月[1] 白 华[1] 刘 青[1] 李晓鸥[1]

1 沈阳市气象局,沈阳 110168

2 中国气象局沈阳大气环境研究所,沈阳 110000

提 要: 利用地面自动气象观测站、ERA5 再分析资料、风廓线雷达、微波辐射计、云雷达及 X 波段双偏振雷达等多源观测资料,分析了沈阳 2023 年 11 月 5—7 日(过程Ⅰ)和 2024 年 2 月 18—19 日(过程Ⅱ)两次强雨雪天气过程的相态转换演变特征,提炼了多源观测在雨雪转换中的指示性指标。结果表明,过程Ⅰ受深厚、移动缓慢的冷涡系统控制,动力与水汽条件更强(最大垂直速度>8 m·s^{-1},液态水含量可达 12 g·m^{-3}),累计雨雪量大,相态转换过程相对平缓,订正后的微波辐射计反演温度与业务相态转换指标吻合。过程Ⅱ则由移速较快的高空槽主导,冷空气渗透迅速,相态转换更为剧烈,且订正后的微波辐射计反演温度较探空偏低,导致依据传统阈值判别降水相态存在 1~2 h 的偏差。两次雨转雪过程中,微波辐射计反演的液态水含量均出现急剧下降,同时 0℃层高度持续降低。云雷达和风廓线雷达观测显示,两次过程在雨转雪阶段均伴随垂直上升运动的显著减弱(垂直速度降至 1~2 m·s^{-1})。X 波段双偏振雷达监测到雨转雪阶段,0℃层亮带及相关系数低值区(0.80~0.92)下降至地面,是相态转换最直观、可靠的临近预警指标。基于以上多源观测特征构建的"动力衰减诊断-热力层结追踪-双偏振雷达相态识别"的分析流程,以及由"看阈值"向"看趋势"的预报思维转变,可为冬季降水相态转换的临近预报提供更具操作性的技术路径。

关键词: 雨雪天气,双偏振雷达,0℃层亮带,云雷达,相态识别

中图分类号: P458,P426 **文献标志码:** A **DOI:** 10.7519/j.issn.1000-0526.2026.083101

Characteristics of Multi-Source Observations of Precipitation Phase Transition During Two Rain-Snow Events in Shenyang

DUAN Yunxia[1,2] LI Deqin[2] LU Juan[1] LI Jiao[1] WANG Yue[1] BAI Hua[1] LIU Qing[1] LI Xiaoou[1]

1 Shenyang Meteorological Bureau, Shenyang 110168

2 Shenyang Institute of Atmospheric Environment, CMA, Shenyang 110000

Abstract: Using multi-source observation data, including surface automatic weather stations, ERA5 reanalysis data, wind profiling radar, microwave radiometer, cloud radar and X-band dual-polarization radar, this paper analyzes the phase transition and evolution characteristics of two severe rain-snow weather events in Shenyang: Event Ⅰ (5－7 November 2023) and Event Ⅱ (18－19 February 2024). Moreover, indicative indicators of rain-snow transition are extracted from multi-source observations. The results show that Event Ⅰ was controlled by a deep, slowly moving cold vortex system, with stronger dynamic and

* 国家自然科学基金项目(42675185)、中国气象局 2025 年创新发展专项(CXFZ2025J026)、辽宁省科技计划联合计划(自然科学基金面上项目)(2025-MSLH-380)和 2025 年度环渤海区域海洋气象科技协同创新项目(核心技术攻关项目)(QYXM202503)共同资助

2026 年 6 月 5 日收稿; 2026 年 10 月 15 日收修定稿

第一作者:段云霞,主要从事短期天气预报和灾害性天气机理研究. E-mail:yxduan@163.com

通讯作者:李得勤,主要从事中尺度天气预报和数据同化研究. E-mail:Lewen05@hotmail.com

moisture conditions (maximum vertical velocity >8 m·s^{-1}, liquid water content up to 12 g·m^{-3}), more accumulated precipitation, and a relatively gradual phase transition process. The corrected microwave radiometer-retrieved temperature agrees well with operational phase transition indicators. Event Ⅱ was dominated by a fast-moving upper-level trough, with rapid cold air intrusion and a more drastic phase transition. The corrected microwave radiometer-retrieved temperature is lower than radiosonde observation, resulting in a 1−2 h deviation when traditional thresholds are used to discriminate the precipitation phase. For the two rain-snow events, the microwave radiometer-retrieved liquid water contents both decrease sharply, and the 0℃ layer heights keep descending. Cloud radar and wind profiling radar observations show that the two events were both accompanied by a significant weakening of vertical upward motion during the rain-to-snow stage, with vertical velocity reduced to 1−2 m·s^{-1}. The X-band dual-polarization radar detected that, during the rain-to-snow stage, the 0℃ layer bright band and the low correlation coefficient zone (0.80−0.92) descended to the surface, which is the most intuitive and reliable nowcasting indicator of the phase identification. The analytical workflow of dynamic attenuation diagnosis-thermal stratification tracking-dual-polarization radar phase recognition constructed based on the above multi-source observation characteristics, together with the shift in forecasting thinking from threshold-watching to trend-tracking, could serve as a more operationally feasible technical pathway for the nowcasting of winter precipitation phase transition.

Key words: rain-snow weather, dual-polarization radar, 0℃ layer bright band, cloud radar, phase identification

引 言

辽宁是我国暴雪多发区之一(董啸等,2010;孙欣等,2011;阎琦等,2012;2019),研究表明,在初冬和初春冷暖空气频繁交汇期间,寒潮天气常伴随明显的降水相态转换,对道路交通和市民生活影响显著。由于降水相态复杂多变,其准确预报一直是气象业务工作中面临的重要技术难题。

针对降水相态的判定,国内学者开展了一系列研究并取得重要成果。早期研究主要基于层结气温阈值,许爱华等(2006)、李江波等(2009)、张琳娜等(2013)及张俊兰和彭军(2017)通过个例和统计分析,给出了依据特定层结气温阈值的相态判定方法。漆梁波和张瑛(2012)、苗爱梅等(2014)、段云霞等(2016)和卢晔等(2023)进一步结合大气层结状态,利用1000～850 hPa和1000～700 hPa的位势厚度来区分雨、雪、冻雨及冰粒等不同降水相态,这些指标在业务预报中得到了广泛应用。

雨雪相态转换的关键控制因子是低层及地面温度的变化,且转换过程通常发生在地面临界温度阈值附近(徐辉和宗志平,2014;董伟等,2019;杜佳等,2019;陈双等,2019),但温度场的变化受多种复杂因素影响。赵琳娜等(2021)指出,降水相态转变取决于空中雪花形成的微物理机制和下落过程中的热力特征,秦庆昌等(2019)从微物理角度、万夫敬等(2025)从热力结构角度,均印证了这一观点。廖晓农等(2013)基于多源观测资料对北京一次降水相态转变过程的分析表明,相对于云底高度,0℃层高度的位置与降水相态存在显著相关性,在相态转换过程中需特别关注地面至抬升凝结高度之间的温度垂直分布、0℃层高度的动态变化、冰雪层厚度及其底界距地面的高度变化等关键参数。荆浩等(2022)则从雪花形成和融化角度出发,建立了基于云顶温度和0℃层高度的北京及周边地区降水相态判别指标。上述研究从温度垂直廓线和云微物理角度,为降水相态的精细化预报提供了重要的理论基础与技术支撑。

近年来,随着观测技术和设备的不断进步,多源观测数据为深入探究降水相态转变过程中的云微物理特征及温湿垂直结构演变提供了重要支撑(傅新姝等,2023;王婉等,2023;董自鹏等,2025;马伟强等,2026;张明等,2026)。王洪等(2023)利用微雨雷达、微波辐射计、云雷达和二维视频雨滴谱仪等多源观测数据,对三次典型降水过程开展了系统分析。结果表明,在层状云降水过程中,微雨雷达反演的粒

子相态垂直分布与微波辐射计获取的温度廓线具有高度一致性,0℃层和-10℃层分别与液相和冰相粒子的分布边界相对应,垂直上升速度的演变对降水相态判别亦具有重要指示意义。孙莎莎等(2023)基于多源观测对山东一次极端暴雪过程的分析表明,双偏振雷达的差分反射率因子和相关系数可有效区分冰相粒子与液态降水,结合微波辐射计的温度廓线,能够精确识别 0℃层亮带位置及其对应的融化、冻结过程,为 0～1 h 短时临近预报提供了可靠参考。姬雪帅等(2022)针对张家口地区一次雨雪天气的分析进一步证实,云雷达的高分辨率观测数据可精细刻画云体内 0℃层的高度变化,其反射率因子的大小能有效反映云系中液态水含量的分布特征。同时,微波辐射计获取的温湿廓线,不仅可准确表征整层大气的温湿层结状态,对降水相态和降水强度的演变亦具有重要指示作用。上述研究成果为提升降水相态预报准确率提供了新的技术途径。

本文利用各类多源观测资料,重点分析其在沈阳两次雨雪过程中相态转换临近预报中的应用潜力,以期为复杂降水相态的预报预警提供科学依据。

1　资　料

使用欧洲中期数值预报中心第五代全球大气再分析资料(ERA5)进行环流形势分析和物理量诊断,空间分辨率 0.25°×0.25°,时间分辨率 1 h。使用辽宁自动气象观测站降水量和气温资料分析雨雪天气发生时间、分布特点和降水相态转换。利用沈阳苏家屯站地基遥感垂直观测系统(包括微波辐射计、风廓线雷达、云雷达、GPS Met 和激光雷达)的多源观测,分析雨雪天气过程热力、动力特点以及多源资料在降水相态转换阶段的特征。其中,微波辐射计可全天候连续获取分钟级大气温湿廓线,弥补常规探空时间分辨率的不足。X 波段雷达与 Ka 波段云雷达凭借高灵敏度和空间分辨率,在云宏观结构及微物理参数反演中优势显著,特别是 X 波段双偏振雷达,其偏振参数能够有效表征水成物粒子的形状、大小及相态特征,并能直观反映融化层亮带特征及相态连续演变。

2　雨雪实况

选取地基遥感垂直观测系统建立以来两次相对较强降水相态转化过程作为研究对象,分别为 2023 年 11 月 5—7 日(过程Ⅰ)和 2024 年 2 月 18—19 日(过程Ⅱ)。

过程Ⅰ辽宁中部地区降水明显,沈阳出现大雨转暴雪到大暴雪天气(图 1a),降水从 11 月 5 日 14:00(北京时,下同)持续至 7 日 00:00。6 日 02:00 起,自西北向东南降水相态陆续由雨转雪(图 2a)。降水持续时间达 34 h,平均累计降雨量和降雪量分别为 34.1 mm 和 18.3 mm,最大小时降雨量和降雪量分别为 7 mm 和 2 mm,最大累计降雪量出现在法库,为 25.6 mm。本次过程降水持续时间长,累计降雨量、降雪量均较大。

过程Ⅱ沈阳为小雨转中雪天气过程(图 1b),降水持续时间较过程Ⅰ短,于 2 月 18 日 14:00 出现降雨,18 日 17:00 自北向南陆续转雪,19 日 10:00 降

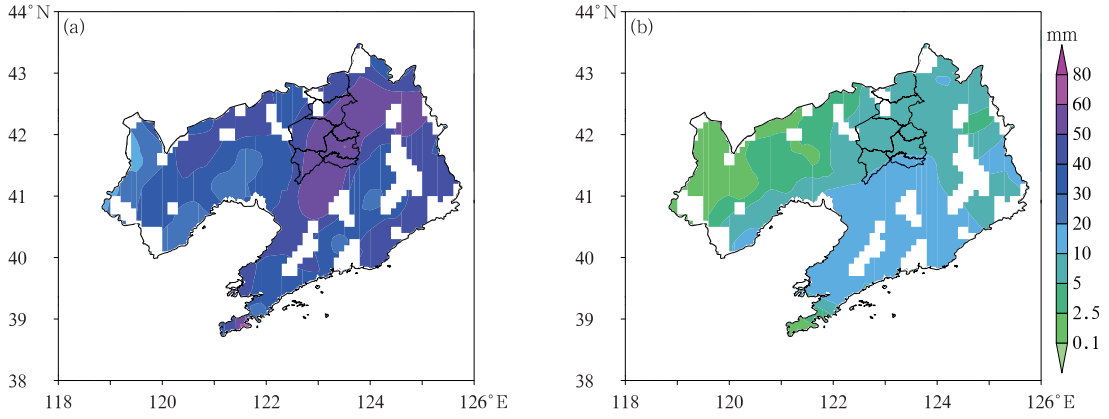


图 1　(a)2023 年 11 月 5 日 08:00 至 7 日 05:00 和(b)2024 年 2 月 18 日 08:00 至 19 日 20:00 辽宁累计降水量分布

Fig. 1　Distribution of accumulated precipitation in Liaoning Province from (a) 08:00 BT 5 to 05:00 BT 7 November 2023 and (b) 08:00 BT 18 to 20:00 BT 19 February 2024

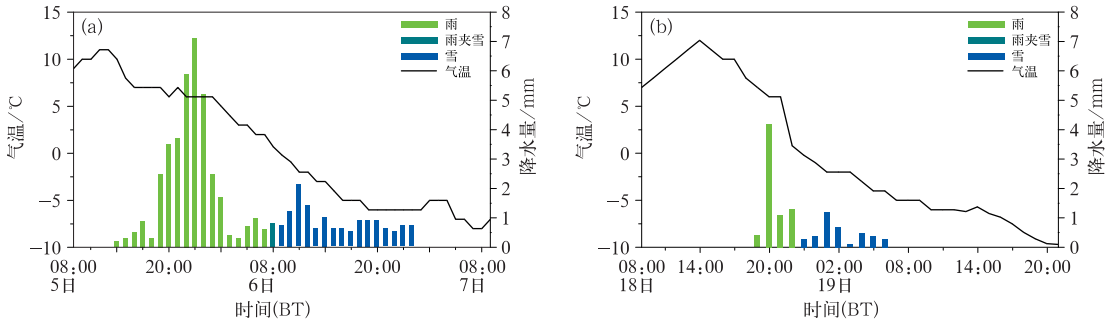


图 2 (a)2023 年 11 月 5 日 08:00 至 7 日 08:00 和(b)2024 年 2 月 18 日 08:00 至 19 日 20:00 苏家屯站小时降水量、降水相态和气温时间序列

Fig. 2 Time-series of hourly precipitation, precipitation phase, and temperature at Sujiatun Station from (a) 08:00 BT 5 to 08:00 BT 7 November 2023 and (b) 08:00 BT 18 to 20:00 BT 19 February 2024

水结束，小时降雨量和降雪量分别不足 5 mm 和 1 mm。但过程Ⅱ气温下降剧烈、迅速，24 h 平均气温下降 10℃以上，18 日 20:00—22:00 苏家屯地面气象观测站气温由 6.0℃快速下降至 0.8℃，23:00 降水相态也由雨直接转为雪(图 2b)。两次过程均有南来系统配合，且前期均偏暖，都经历了雨转雪的相态演变，雨雪给道路交通和市民出行均带来较大影响。特别是过程Ⅰ，前期降雨量大，转雪时段恰逢早高峰，转雪时间的准确预报至关重要。

3 天气形势和物理量特征

3.1 天气形势演变对比

2023 年 11 月 5—7 日，过程前期(5 日 08:00) 500 hPa 上冷涡系统位于内蒙古中部以北，我国中东部大部为一宽广低槽控制，辽宁受冷涡前部槽前偏南气流影响，对应 850 hPa 上冷涡前部和槽前均有低涡活动，地面上，内蒙古锡林郭勒盟至辽宁一带受低压带控制，而浙江至山东地区处于江淮气旋控制之下。5 日 08:00 后冷涡系统东移，并与高空槽合并增强，850 hPa 上两个低涡合并，20:00(图 3a) 辽宁仍位于 500 hPa 高空槽前、850 hPa 低涡顶部，此时江淮气旋东移北上，与北部的低压带合并，辽宁位于江淮气旋顶后部。6 日 08:00(图 3b，图 4a)，随着冷涡系统东移南压和江淮气旋东移北上，辽宁中西部 500 hPa 受冷涡系统前部影响，850 hPa 为低涡后部偏北气流控制，并且随着冷空气的逐步渗透，沈阳地区出现由雨转雪的相态变化。此次天气过程中，冷涡系统尺度大，其底部影响范围可达江南地区，且移动速度缓慢，受其持续影响，沈阳地区降水一直持续到 7 日 00:00 才结束。

2024 年 2 月 18—19 日(图 3c，3d)，辽宁位于 500 hPa 高空槽前。18 日08:00 河套以南至黑龙江一带 850 hPa 上存在明显的西南—东北向切变线，地面上辽宁受高、低压间的弱气压带控制，江浙至山东一带为江淮气旋，该气旋向东东北方向移动(图 4b)。14:00，辽宁西南部地区处于气旋顶部，14:00—20:00 冷高压南压，地面气旋顶部东移至辽宁东南部，850 hPa 上为自山东到辽宁西南部的低涡，沈阳南部地区受其顶部影响，北部地区受黑龙江至辽宁一带切变线影响，出现雨雪天气。19 日 08:00，850 hPa 上沈阳地区转为偏北风，降水过程随之结束。

两次过程虽均受江淮气旋东移北上影响，但其天气系统配置与演变特征存在显著差异。过程Ⅰ由移动缓慢的深厚冷涡所主导，较好的动力与充沛的水汽条件支撑了长时间降水，使过程累计雨雪量达大雨转暴雪至大暴雪量级。相比之下，过程Ⅱ受移速较快的宽广的高空槽影响，且地面气旋位置较过程Ⅰ偏南，水汽条件较弱。但冷空气渗透异常迅速，24 h 降温超过 10℃，导致快速的雨雪转换。

3.2 风廓线雷达风场演变

苏家屯站风场随高度的演变(图 5)清晰地给出了两次雨雪天气过程的动力结构特征。过程Ⅰ(图 5a)，2 km 以下东北风风速自 5 日 15:00 增强，最大风速达到 12 $m \cdot s^{-1}$，垂直上升运动随之增大，较降水增强(19:00)提早近 4 h。5 日 23:00 垂直速

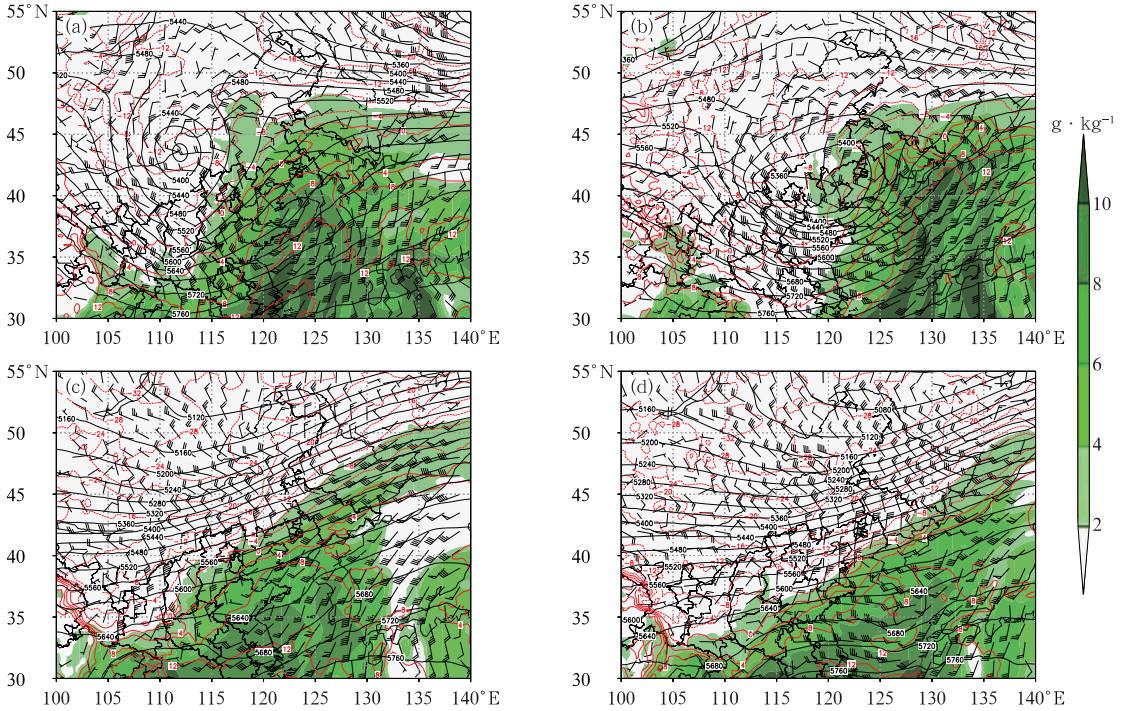
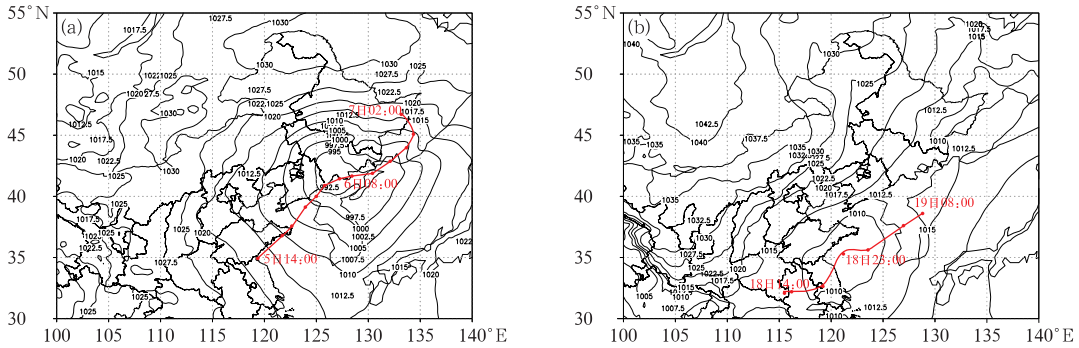


图 3　2023 年 11 月(a)5 日 20:00,(b)6 日 08:00 和 2024 年 2 月(c)18 日 20:00,(d)19 日 08:00 的 500 hPa 高度场(黑色等值线,单位:gpm),850 hPa 温度场(红色等值线,单位:℃)、风场(风羽)和比湿(填色)

Fig. 3　500 hPa geopotential height (black contour, unit: gpm), 850 hPa temperature (red contour, unit: ℃), wind (barb) and specific humidity (colored) at (a) 20:00 BT 5, (b) 08:00 BT 6 November 2023, and (c) 20:00 BT 18, (d) 08:00 BT 19 February 2024



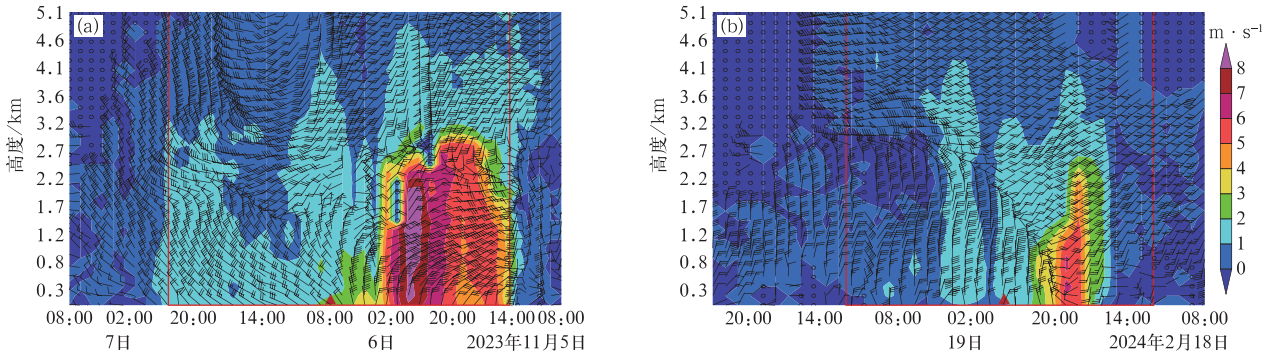
注:红色点线为气旋中心移动路径。

图 4　(a)2023 年 11 月 6 日 08:00,(b)2024 年 2 月 18 日 23:00 海平面气压场(黑色等值线,单位:hPa)

Fig. 4　Sea level pressure (black contour, unit: hPa) at (a) 08:00 BT 6 November 2023 and (b) 23:00 BT 18 February 2024

度>8 m·s^{-1},与最强降水时刻吻合。6 日 02:00 转为北风,05:00 转为西北风,反映了站点由气旋顶后部向气旋后部过渡,最终受气旋西南部西北气流控制的演变过程。07:00,低层转为西北风,垂直速度降至 2 m·s^{-1}以下,相态随之转雪。

过程Ⅱ(图 5b)中,5 km 高度以下维持西南风至 18 日 17:00,16:00 垂直速度快速增加,20:00 降水强度最大(图 2b)。17:30 近地层转为偏西风,19:00 起低层偏北风逐渐向高层扩展。至 23:00 偏北风抬升至约 2 km 高度,反映出站点附近环流由气旋前部向底部至后部调整。18 日 19:00 低层转为北风后,上升运动持续减弱,21:00 降至 2 m·s^{-1}



注：红框为站点主要降水时段，红色三角形为站点雨雪转换时间，下同。

图 5 (a)2023 年 11 月 5 日 08:00 至 7 日 08:00 和(b)2024 年 2 月 18 日 08:00 至 19 日 20:00 苏家屯站风廓线雷达水平风场(风羽)和垂直速度(填色)分布

Fig. 5 Distributions of horizontal wind (barb) and vertical velocity (colored) at Sujiatun Wind Profiling Radar from (a) 08:00 BT 5 to 08:00 BT 7 November 2023 and (b) 08:00 BT 18 to 20:00 BT 19 February 2024

以下，23:00 雨转雪。

两次过程相比，过程Ⅰ冷涡系统深厚，垂直上升运动更强，最大可达 8 m·s^{-1}，上升高度达 3 km，动力条件优于过程Ⅱ。两次过程转雪阶段，垂直速度均降至 2 m·s^{-1}以下，且转雪均发生在偏北风向上扩展至 1.8 km 及以上之后，可作为雨雪相态转换的临近预报关键参考指标。

3.3 冰相粒子和液相粒子及散度的时间变化

Pruppacher and Klett(1997)整理前人观测资料后发现，云内粒子相态具有明显的温度依赖性，当温度高于－4℃时，云中粒子主要以过冷水形式存在，当温度低于－10℃时，云内冰相粒子含量可达 70%以上。Hobbs and Rangno(1985)研究也有类似结论。此外，Bergeron 凝华增长过程在－15～－12℃ 效率最高，能够快速生成尺寸较大的冰晶。

由两次过程苏家屯站散度、温度以及云中粒子相态垂直分布的时间演变(图 6)可见，两次过程降雨阶段，云体伸展高度均超过－40℃层，上部基本以冰相粒子为主。过程Ⅰ降水初期(11 月 5 日 18:00 至 6 日 04:00)，辐合层深厚(可达 700 hPa)。6 日 06:00 前，700 hPa 至地面温度高于 0℃，维持深厚的暖层，高层的冰相粒子下落过程中融化为液态，地面为降雨。04:00—23:00，中层辐合减弱，上升运动减小，云体降低，－10℃层以下液相粒子含量减少，冰相粒子层下降。08:00，地面温度降至 0℃，900～500 hPa 的温度为－20～－3℃，冰相粒子下落过程中无足够时间融化，转为纯雪。

与过程Ⅰ相比，过程Ⅱ表现出相似的特征，但也存在一定差异。2 月 18 日 18:00 苏家屯站出现降水前，低层辐合增强但高度仅达 850 hPa 左右，0℃层位于 750 hPa 附近，600 hPa 以下以液相降水粒子为主，因此初始时段为降雨。降水开始后低层辐合减弱，至 18 日 22:00，0℃层从 800 hPa 以上快速降至近地面，冰相粒子层随之下降，18 日 23:00 降至 800 hPa 左右，850 hPa 至地面的温度为－4～－2℃，降水相态转为雪。

两次过程均经历了由液态降水向固态降雪的转变，粒子相态特性与温度层结变化相对应。共同特征为降水初始阶段低层辐合较强、暖层深厚，以液相粒子为主，但随着冷空气南下及低层辐合减弱和上升运动减小，0℃层高度和冰相粒子层高度迅速下降，致使冰相粒子融化时间不足，最终转雪。此外，－10℃ 层高度在过程Ⅰ中为冰相和液相粒子分界线，过程Ⅱ降雨阶段－10℃ 层以上基本为冰相粒子，但转雪后中层还有辐合，导致液相粒子下降缓慢，－10℃层以下仍有部分液相粒子存在。

4 多源观测资料特征对比

4.1 基于微波辐射计的温度及液态水特征

微波辐射计与探空数据的温度对比分析(图 7)显示，两次过程降水发生前，微波辐射计反演温度均存在系统性偏差。过程Ⅰ中，4 km 高度以下反演温度偏高，以上则偏低，偏差在 1℃以内。过程Ⅱ中，

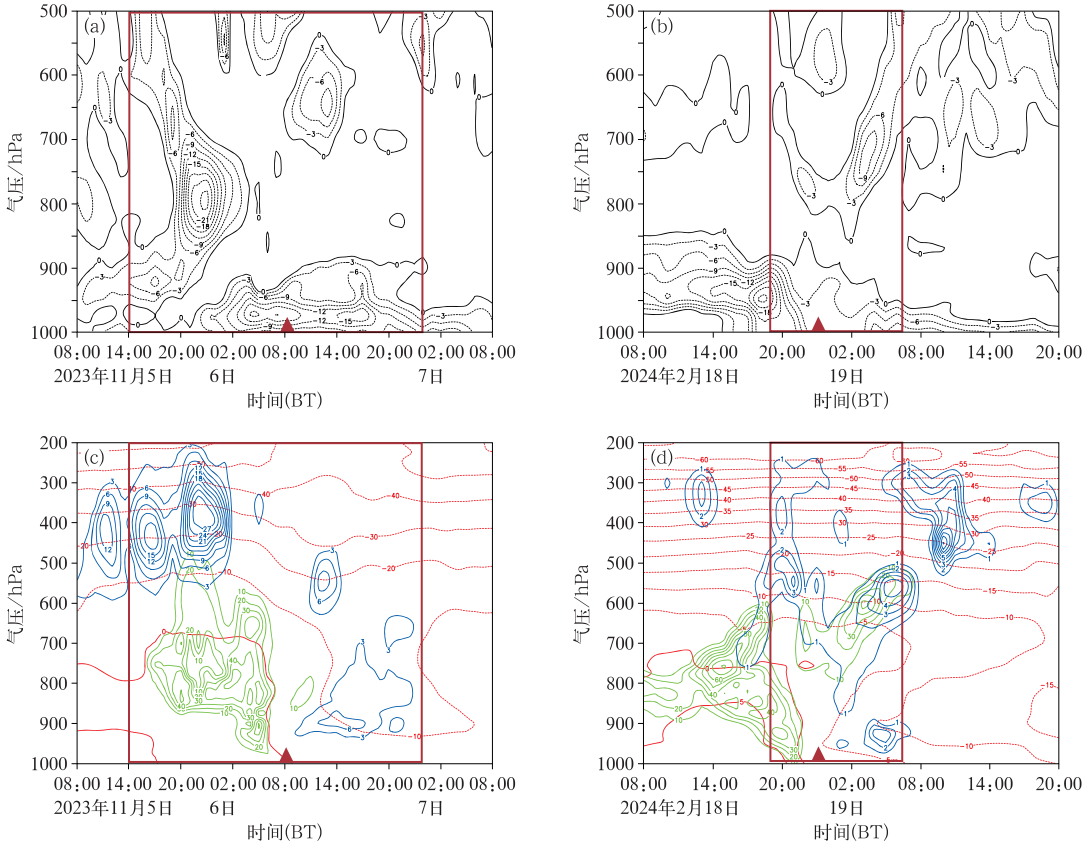


图 6　(a,c)2023 年 11 月 5 日 08:00 至 7 日 08:00 和(b,d)2024 年 2 月 18 日 08:00 至 19 日 20:00 ERA5 再分析资料的苏家屯站(a,b)散度(单位:10^{-6} s^{-1}),(c,d)温度(红线,单位:℃)、云中冰相粒子含量(蓝线,单位:10^{-2} g·kg^{-1})和云中液相粒子含量(绿线,单位:10^{-2} g·kg^{-1})垂直分布的时间演变

Fig. 6　Temporal evolutions of vertical profiles of (a, b) divergence (unit: 10^{-6} s^{-1}), and (c, d) temperature (red line, unit: ℃), cloud ice particle content (blue line, unit: 10^{-2} g·kg^{-1}) and cloud liquid particle content (green line, unit: 10^{-2} g·kg^{-1}) of the ERA5 reanalysis data at Sujiatun Station from (a, c) 08:00 BT 5 to 08:00 BT 7 November 2023 and (b, d) 08:00 BT 18 to 20:00 BT 19 February 2024

2.5 km 高度以下偏高,以上偏低,偏差最大达 5℃。

降水过程中温度偏差显著增大。过程Ⅰ中,11 月 5 日 20:00 整层偏差增至 4℃,临近转雪时刻(6 日 08:00),4 km 高度以下偏差缩小至 1℃左右,以上转为偏低。过程Ⅱ中,18 日 20:00(降雨阶段)3 km 高度以下偏高,偏差在 3℃以内,降雪后整层转为偏低。总体上,偏差随降水强度增大而增加,反映了微波辐射计在降水条件下的观测局限,降雨(雪)过程中,雨滴附着及天线表面积水易引发明显观测误差,且降水阶段整层几乎以正偏差为主。

图 8 显示,过程Ⅰ中,相态转换出现在 6 日 08:00 前后,此时微波辐射计反演的 1.5 km、1 km 高度及地面温度分别约为−4、−1 和 2℃。经向下订正 1～2℃后,与业务相态判定指标(850 hPa:−4℃,925 hPa:−2℃,地面:0℃)基本吻合。过程Ⅱ受冷空气快速渗透影响,18 日 21:00,5 km 以下反演大气温度已普遍降至 0℃以下,经向下 1～3℃订正后,21:00 起 3 km 以下温度在−3～−1℃。尽管此时 1.5 km 高度温度尚未达到业务判定标准的−4℃,但 3 km 高度以下温度均已降至−3～−1℃,据此可判断降雪即将发生,相态转换判定时间较实况(18 日23:00)提早约 2 h。以上分析表明,冷空气和缓时订正温度对短时临近相态判定指示良好,快速渗透时可能偏早,业务中需结合冷空气活动特征综合研判。

液态水含量廓线显示(图 8c,8d),过程Ⅰ中 2 km 以下液态水含量峰值达 12 g·m^{-3},过程Ⅱ降雨时段最大为 6 g·m^{-3}。液态水含量高值区与强降水时段对应,且转雪后均明显下降,但对预报的指示作用不大。

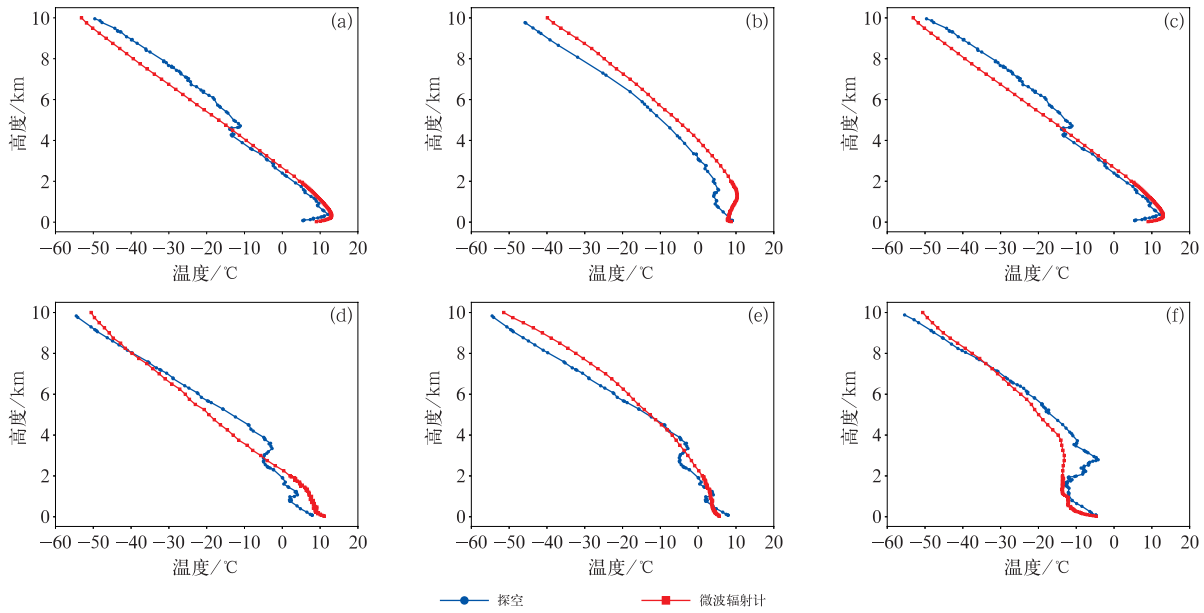


图 7 2023 年 11 月(a)5 日 08:00,(b)5 日 20:00,(c)6 日 08:00 和 2024 年 2 月(d)18 日 08:00,(e)18 日 20:00,(f)19 日 08:00 微波辐射计与探空的温度廓线对比

Fig. 7 Comparison of temperature profiles between microwave radiometer retrievals and radiosonde observations at (a) 08:00 BT 5, (b) 20:00 BT 5 and (c) 08:00 BT 6 November 2023, and (d) 08:00 BT 18, (e) 20:00 BT 18, and (f) 08:00 BT 19 February 2024

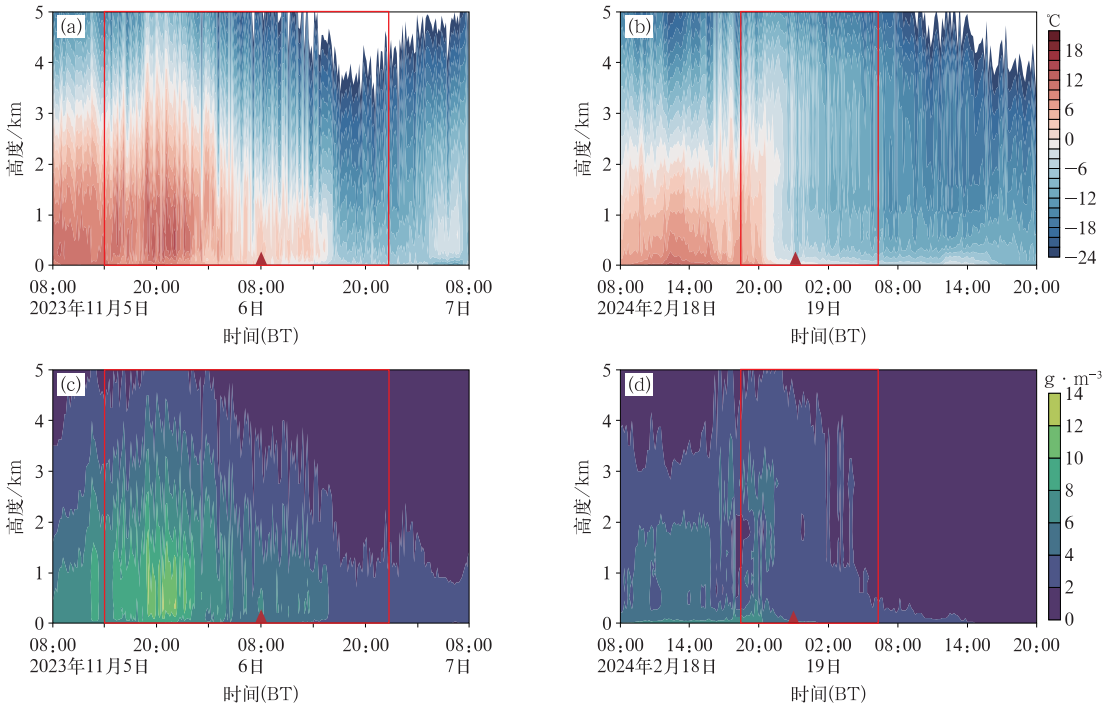


图 8 (a,c)2023 年 11 月 5 日 08:00 至 7 日 08:00 和(b,d)2024 年 2 月 18 日 08:00 至 19 日 20:00 苏家屯站微波辐射计反演的(a,b)温度和(c,d)液态水含量垂直分布的时间演变

Fig. 8 Temporal evolutions of vertical profiles of (a, b) temperature and (c, d) liquid water content retrieved by the microwave radiometer at Sujiatun Station from (a, c) 08:00 BT 5 to 08:00 BT 7 November 2023 and (b, d) 08:00 BT 18 to 20:00 BT 19 February 2024

4.2　基于云雷达的反射率因子和径向速度分布

云雷达资料能够连续反映测站上空云层与大气的演变过程。图 9 展示了苏家屯站云雷达反射率因子与径向速度的分布情况。过程Ⅰ中,苏家屯站于 11 月 5 日 14:00 出现降雨,降雨开始前 1 h 回波接地。18:00 至 6 日 00:00 为强降水时段,小时雨强达 3～7 mm·h^{-1},该时段云层发展旺盛,云顶高度升至 9 km,近地面反射率因子维持在 20 dBz 左右,2 km 高度以下垂直上升运动最大达到 7 m·s^{-1}。6 日 00:00 之后,最大反射率因子降至 15 dBz,雨强减弱,云顶高度降低,垂直上升运动也下降至约 2 m·s^{-1}。08:00 前后,上升运动进一步减弱至 1 m·s^{-1},降水相态转为雪,雨雪时段的垂直速度差异明显。相比之下,过程Ⅱ降水强度较弱,在雨雪转换期间云高变化不显著,反射率因子大值区垂直厚度较薄,最大值仅约 20 dBz,垂直上升运动约 5 m·s^{-1}。然而,与过程Ⅰ相似的是,当垂直速度减弱至 1 m·s^{-1}左右时,降水相态也转为雪。通过对比两次过程可知,雷达反射率因子的减小伴随降水强度减弱,转雪后的反射率因子与弱降水相当,因此反射率因子大小对雨雪转换时间的指示作用不显著。而垂直上升运动降至 1 m·s^{-1}则可作为判断雨雪相态转换时间的重要指标。同时,垂直速度的变化对降雨与降雪的强度也具有较好的指示意义。

4.3　X 波段双偏振雷达参数特征

X 波段双偏振雷达的相关系数是描述两个正交偏振波(通常为水平极化和垂直极化)回波信号之间相似程度的一个重要参数,能够有效反映降水粒子的均匀性和相态一致性。0℃层亮带是指雪花或冰晶降落到 0℃层附近,表面发生融化使雷达反射率因子增大的现象,因而常被用于雨雪相态转换判别中。

由图 10 可见,过程Ⅰ在 11 月 6 日 08:00 转雪前,自 5 日 20:00 起,在测站上游观测到明显的高反射率因子环形带,表明存在 0℃层亮带。同时,该降水区域的相关系数维持在 0.80～0.92,反映出区域内降水粒子呈混合相态。图 11 显示,5 日 21:00—22:00,距雷达 20～25 km、2～3 km 高度反射率因子增强,混相粒子增多,并向高层扩展,随着转雪时间临近,0℃层亮带和相关系数低值区高度呈现系统性下降趋势,并逐渐逼近苏家屯站,最终延伸至地面。类似地,过程Ⅱ在降水开始前 3 h,距雷达 8～10 km、0.8～1.0 km 高度处监测到融化层信号,当

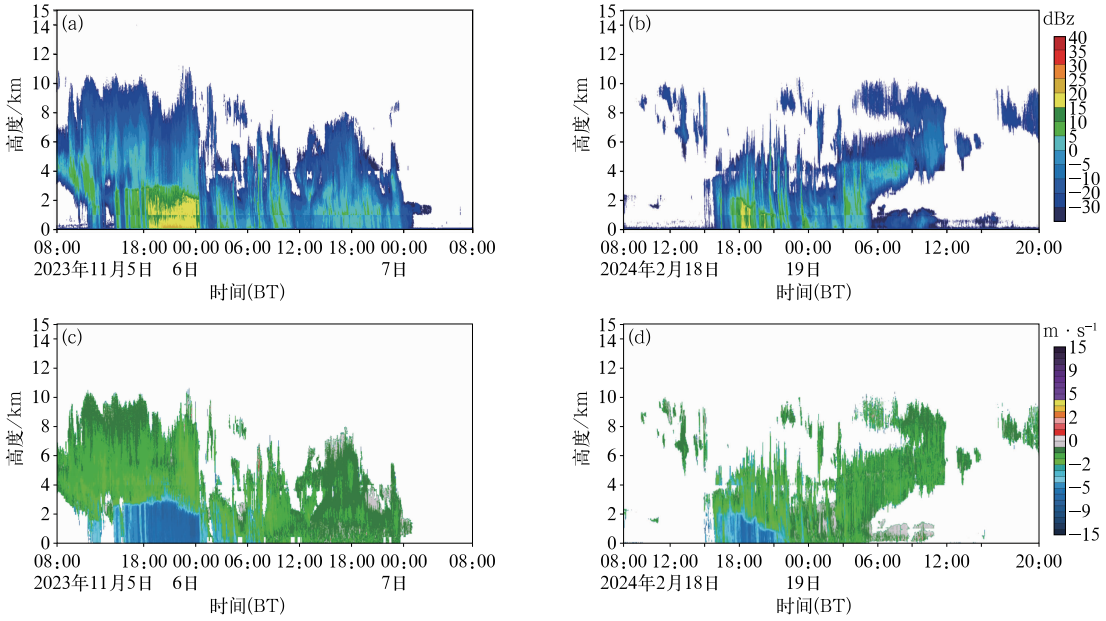


图 9　(a,c)2023 年 11 月 5 日 08:00 至 7 日 08:00 和(b,d)2024 年 2 月 18 日 08:00 至 19 日 20:00 苏家屯站云雷达(a,b)反射率因子和(c,d)径向速度垂直分布的时间演变

Fig. 9　Temporal evolutions of vertical profiles of (a, b) reflectivity factor and (c, d) radial velocity of cloud radar at Sujiatun Station from (a, c) 08:00 BT 5 to 08:00 BT 7 November 2023 and (b, d) 08:00 BT 18 to 20:00 BT 19 February 2024

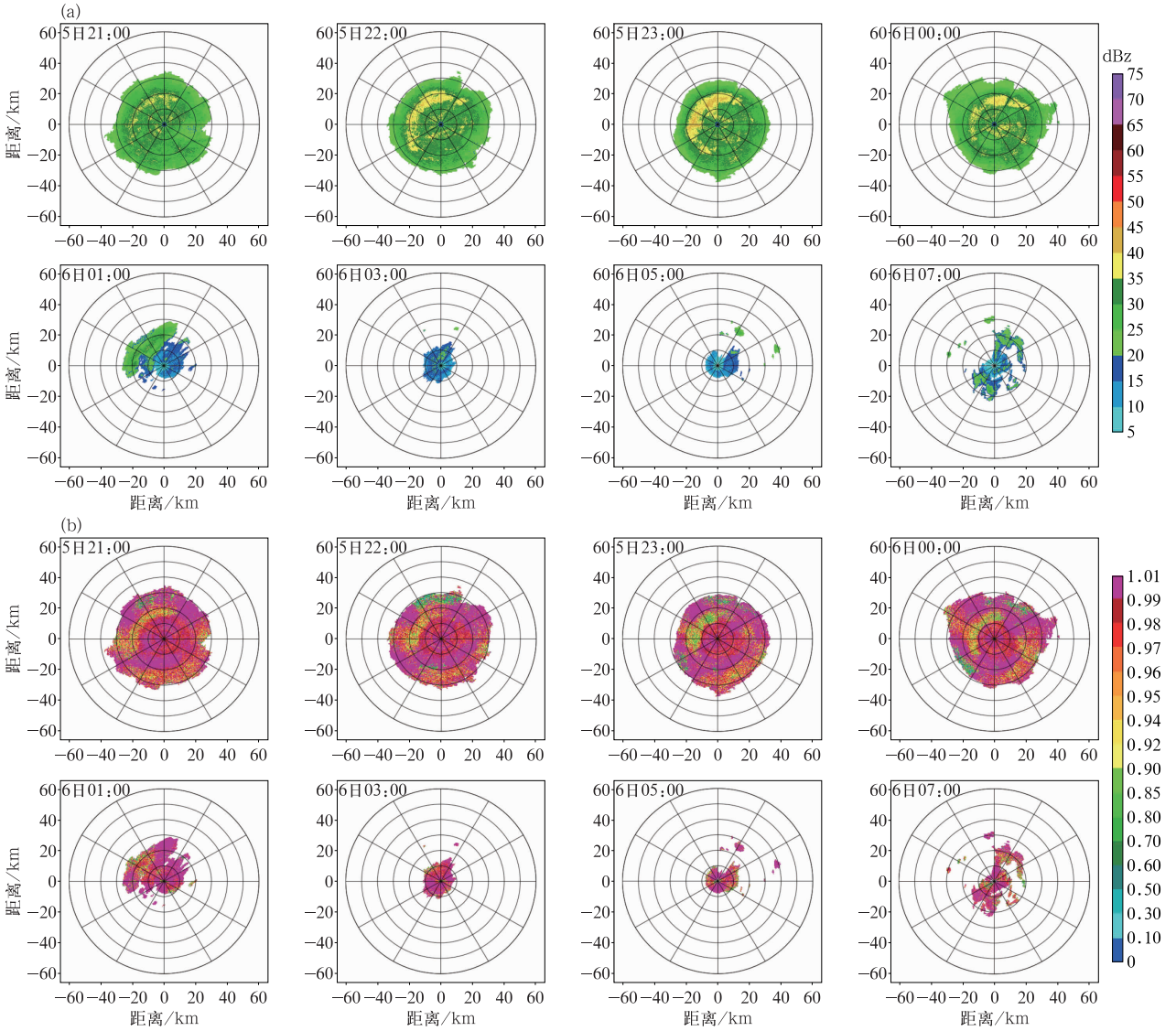


图 10 2023 年 11 月 5 日 21:00 至 6 日 07:00 苏家屯站 X 波段双偏振雷达 6.3°仰角的
(a)反射率因子和(b)相关系数

Fig. 10 (a) Reflectivity factor and (b) correlation coefficient at Sujiatun X-Band Dual-Polarization Radar at 6.3° elevation from 21:00 BT 5 to 07:00 BT 6 November 2023

测站开始转雪时，相关系数低值区同样降至地面(图略)。两次过程中，0℃层亮带的位置变化与微波辐射计观测到的低层温度廓线(图 8)具有良好的一致性。相关系数低值区高度的显著下降，可作为雨雪相态转换的重要预警指标，并用于相态临近预报。

4.4 降水相态判别流程

为更好地理解两次雨雪天气过程的物理机制，将天气系统按冷空气影响快慢，分为冷空气缓慢渗透型、迅速渗透型两类，并以提炼出的动力、热力及微物理参量为关键阈值指标，构建“动力衰减诊断-热力层结追踪-双偏振雷达相态识别”的分析流程(图 12)。具体操作时，先根据地面 6 h 降温幅度选定类型，随后按时间顺序检查多源资料阈值，满足条件即可判定转雪。

动力特征方面，以风廓线雷达探测的垂直速度和云雷达的径向速度为主要参考量。同样的阈值，冷空气缓慢渗透型的提前量较迅速渗透型更早一些。热力层结方面，缓慢渗透型微波辐射计反演温度订正后，特定层温度在相态转换前 2 h 均高于业务常用判别阈值 2℃左右，转雪时达到判别阈值。冷空气迅速渗透型，微波辐射计反演温度低于实况

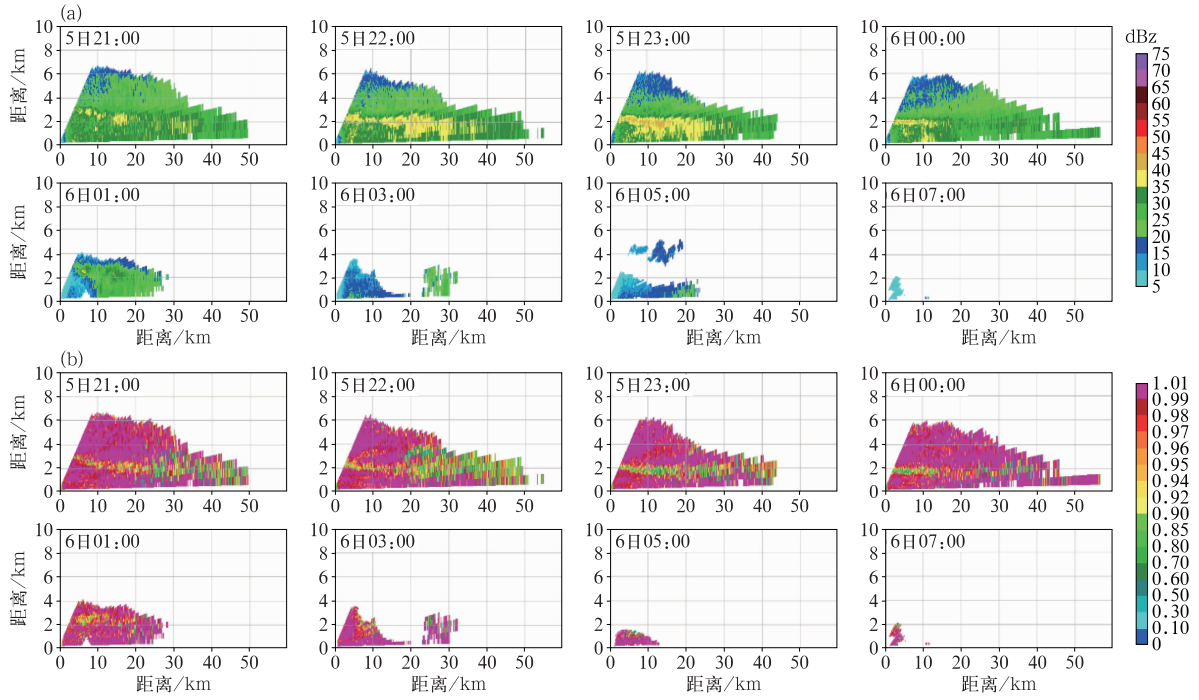


图 11　2023 年 11 月 5 日 21:00 至 6 日 07:00 苏家屯站 X 波段双偏振雷达 330°方位角的(a)反射率因子和(b)相关系数垂直剖面

Fig. 11　Vertical cross-sections of (a) reflectivity factor and (b) correlation coefficient from Sujiatun X-Band Dual-Polarization Radar at an azimuth of 330° from 21:00 BT 5 to 07:00 BT 6 November 2023

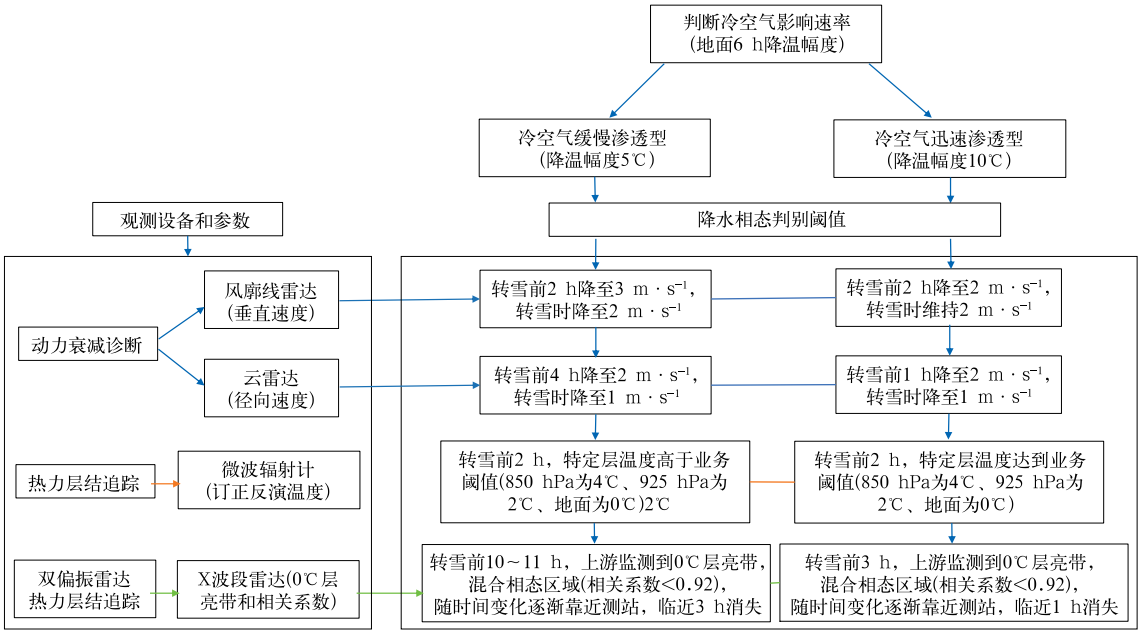


图 12　降水相态判别流程图

Fig. 12　Flowchart for precipitation phase discrimination

温度,订正后温度在转雪前 2 h 达到业务判别指标。X 波段双偏振雷达观测的微物理量显示,转雪前雷达上游可监测到明显的 0℃层亮带及相关系数<0.92 的粒子混合区域,并逐渐向测站移近、高度下降,临近转雪前,冰相粒子为主导,0℃层亮带和相关系数低值区消失。

5 结 论

本文利用多源观测资料，研究了沈阳2023年11月5—7日（过程Ⅰ）与2024年2月18—19日（过程Ⅱ）两次雨雪天气过程，着重分析降水相态转换前后多源观测资料的特征，并进一步形成降水相态判别流程，得出以下结论：

（1）两次过程均受东移北上的江淮气旋影响，水汽条件较好。其中，过程Ⅰ受冷涡系统控制，移动缓慢，降水持续长达34 h。过程Ⅱ受高空槽影响，系统移速较快，降水持续时间较短。过程Ⅰ的动力和水汽条件更好，累计降水量和降水强度均显著大于过程Ⅱ，过程Ⅱ气温下降更为迅速，降水相态转换也更剧烈。

（2）两次过程降雨阶段风廓线雷达测得垂直速度最大值均较云雷达径向速度大1 m·s^{-1}左右，这源于云雷达径向速度叠加了粒子下落末速度的影响。转雪后，二者垂直速度均明显下降，差异随雪花下落速度减小而缩小，垂直速度降至1～2 m·s^{-1}是二者在雨转雪阶段的共同特征，对相态转换具有较好的指示意义。相比之下，云雷达反射率因子和微波辐射计反演的液态水含量虽与降水强度对应良好，但对相态转换的指示并不明显。

（3）降雨阶段云体伸展高度较高，上部以冰相粒子为主，下部暖层较厚，有利于液态降水形成。随着冷空气渗透，云体高度降低，液相粒子减少，同时冰相层高度下降，固态粒子的融化时间缩短，显著提高了降雪概率。温度层结和粒子相态及其含量的垂直分布对降水相态转换具有重要指示意义。微波辐射计可连续监测大气的温湿廓线，但冷空气快速渗透时，订正后的反演温度较实况偏低，可能导致转雪的判定时间提前1～2 h。

（4）双偏振雷达相态识别方面，X波段雷达可清晰追踪融化层亮带和混合相态区的垂直下降过程。两次过程中，0℃层亮带与相关系数低值区（0.80～0.92）在转雪时刻均降至地面，其高度的显著下降是临近预报中直观、可靠的关键指标。

实际业务中，可基于传统温度阈值和模式产品预估降水相态转换的大致时间，在临近时段参照降水相态判别流程，对相态转换时间进行有效订正。

参考文献

陈双，谌芸，何立富，等，2019. 我国中东部平原地区临界气温条件下降水相态判别分析[J]. 气象，45(8)：1037-1051. Chen S，Chen Y，He L F，et al，2019. Discrimination analysis of snow and rain occurring under critical temperature conditions in central and eastern China[J]. Meteor Mon，45(8)：1037-1051(in Chinese).

董伟，杨光武，马梁臣，等，2019. 长春市冬季降水相态的温度判据研究[J]. 干旱气象，37(3)：363-369. Dong W，Yang G W，Ma L C，et al，2019. Discrimination of winter precipitation types based on temperature in Changchun City[J]. J Arid Meteor，37(3)：363-369(in Chinese).

董啸，周顺武，胡中明，等，2010. 近50年来东北地区暴雪时空分布特征[J]. 气象，36(12)：74-79. Dong X，Zhou S W，Hu Z M，et al，2010. Characteristics of spatial and temporal variation of heavy snowfall in Northeast China in recent 50 years[J]. Meteor Mon，36(12)：74-79(in Chinese).

董自鹏，李星敏，彭艳，等，2025. 探空气球漂移对微波辐射计与探空温度差异的影响[J]. 气象，51(5)：529-541. Dong Z P，Li X M，Peng Y，et al，2025. Impact of sounding balloon drift on temperature differences between microwave radiometer and radiosonde[J]. Meteor Mon，51(5)：529-541(in Chinese).

杜佳，杨成芳，戴翼，等，2019. 北京地区4月一次罕见暴雪的形成机制分析[J]. 气象，45(10)：1363-1374. Du J，Yang C F，Dai Y，et al，2019. Formation mechanism of an infrequent blizzard in Beijing in April[J]. Meteor Mon，45(10)：1363-1374(in Chinese).

段云霞，李得勤，田莉，等，2016. 沈阳市一次持续性重污染天气过程特征分析[J]. 干旱气象，34(5)：803-810. Duan Y X，Li D Q，Tian L，et al，2016. Characteristic analysis of a continuous and serious pollution weather process in Shenyang[J]. J Arid Meteor，34(5)：803-810(in Chinese).

傅新姝，彭杰，王晓峰，等，2023. 地基微波辐射计探测质量综合分析[J]. 气象，49(10)：1235-1245. Fu X S，Peng J，Wang X F，et al，2023. Comprehensive analysis on accuracy of ground-based microwave radiometer measurements[J]. Meteor Mon，49(10)：1235-1245(in Chinese).

姬雪帅，王丽婧，郭宏，等，2022. 基于多源观测资料对张家口一次雨雪天气降水相态特征的分析[J]. 干旱气象，40(3)：507-515. Ji X S，Wang L J，Guo H，et al，2022. Analysis of characteristics of precipitation phase during a rain-snow weather process in Zhangjiakou based on multi-source observation data[J]. J Arid Meteor，40(3)：507-515(in Chinese).

荆浩，于波，张琳娜，等，2022. 北京及周边地区冬季降水相态的判别指标研究[J]. 气象，48(6)：746-759. Jing H，Yu B，Zhang L N，et al，2022. Discrimination criteria of winter precipitation types in and around Beijing[J]. Meteor Mon，48(6)：746-759(in Chinese).

李江波，李根娥，裴雨杰，等，2009. 一次春季强寒潮的降水相态变化分析[J]. 气象，35(7)：87-94. Li J B，Li G E，Pei Y J，et al，2009. Analysis on the phase transformation of precipitation during a strong cold wave happened in spring[J]. Meteor Mon，35(7)：87-94(in Chinese).

廖晓农，张琳娜，何娜，等，2013. 2012年3月17日北京降水相态转变的机制讨论[J]. 气象，39(1)：28-38. Liao X N，Zhang L N，He N，et al，2013. Analysis on the mechanism of the 17 March 2012 precipitation type variety in Beijing[J]. Meteor Mon，39(1)：

28-38(in Chinese).

卢晔,孟妙志,乔丹杨,等,2023.宝鸡市冬半年降水相态精细化客观预报方法研究[J].干旱气象,41(5):820-827. Lu Y,Meng M Z,Qiao D Y,et al,2023. Fine objective forecast method of precipitation phases in the winter half-year in Baoji City[J]. J Arid Meteor,41(5):820-827(in Chinese).

马伟强,马龙腾飞,马耀明,等,2026.基于地基微波辐射计的大气温、湿度廓线观测研究进展[J].气象学报,84(2):185-199. Ma W Q,Ma L T F,Ma Y M,et al,2026. Progress on the observation of atmospheric temperature and humidity profiles by ground-based microwave radiometers[J]. Acta Meteor Sin,84(2):185-199(in Chinese).

苗爱梅,董文晓,贾利冬,等,2014.近 30 a 山西不同相态降水的统计特征及概念模型[J].干旱气象,32(1):23-31. Miao A M,Dong W X,Jia L D,et al,2014. The statistical characteristics and conceptual model of different phase precipitation in recent 30 a in Shanxi Province[J]. J Arid Meteor,32(1):23-31(in Chinese).

漆梁波,张瑛,2012.中国东部地区冬季降水相态的识别判据研究[J].气象,38(1):96-102. Qi L B,Zhang Y,2012. Research on winter precipitation types' discrimination criterion in eastern China[J]. Meteor Mon,38(1):96-102(in Chinese).

秦庆昌,张琳娜,于佳,等,2019.北京地区两次雨雪转换过程的相态模拟研究[J].高原气象,38(5):1027-1037. Qin Q C,Zhang L N,Yu J,et al,2019. Simulation study on phase state of two rain and snow processes in Beijing Area[J]. Plateau Meteor,38(5):1027-1037(in Chinese).

孙莎莎,孙艺,徐婷婷,等,2023.2021 年 11 月 7 日山东极端暴雪过程降水相态的多源观测特征分析[J].气象,49(7):830-842. Sun S S,Sun Y,Xu T T,et al,2023. Multi-source observational characteristics of precipitation phase during extreme snowstorm in Shandong on 7 November 2021[J]. Meteor Mon,49(7):830-842(in Chinese).

孙欣,蔡芗宁,陈传雷,等,2011."070304"东北特大暴雪的分析[J].气象,37(7):863-870. Sun X,Cai X N,Chen C L,et al,2011. Analysis of the 4 March 2007 heavy snowstorm in Northeast China[J]. Meteor Mon,37(7):863-870(in Chinese).

万夫敬,孙继松,李博,等,2025.山东半岛连续两天高架对流降水相态差异的形成机制分析[J].气象学报,83(1):1-19. Wan F J,Sun J S,Li B,et al,2025. What caused the shift of heavy snowfall to freezing rain during the two-day elevated convection in February 2024 over Shandong Peninsula of China? [J]. Acta Meteor Sin,83(1):1-19(in Chinese).

王洪,杨洁帆,龚佃利,等,2023.基于微雨雷达的降水参数反演和粒子相态识别[J].大气科学,47(3):739-755. Wang H,Yang J F,Gong D L,et al,2023. Inversion of precipitation parameters and precipitation type classification based on micro rain radar[J]. Chin J Atmos Sci,47(3):739-755(in Chinese).

王婉,聂皓浩,雷恒池,等,2023.基于 183 GHz 机载微波辐射计探测水汽和云中液态水反演算法研究[J].气象,49(5):542-550. Wang W,Nie H H,Lei H C,et al,2023. Retrieval method of precipitation water vapor and cloud liquid water path based on 183 GHz airborne microwave radiometer[J]. Meteor Mon,49(5):542-550(in Chinese).

许爱华,乔林,詹丰兴,等,2006.2005 年 3 月一次寒潮天气过程的诊断分析[J].气象,32(3):49-55. Xu A H,Qiao L,Zhan F X,et al,2006. Diagnosis of a cold wave weather event in March 2005[J]. Meteor Mon,32(3):49-55(in Chinese).

徐辉,宗志平,2014.一次降水相态转换过程中温度垂直结构特征分析[J].高原气象,33(5):1272-1280. Xu H,Zong Z P,2014. Analysis on characteristics of thermal vertical structure evolution during the transition of precipitation type in winter[J]. Plateau Meteor,33(5):1272-1280(in Chinese).

阎琦,崔锦,杨青,2019.2018 年辽宁两次雨转暴雪过程对比分析[J].干旱气象,37(6):944-953. Yan Q,Cui J,Yang Q,2019. Comparative analysis of two rain to snowstorm processes in Liaoning in 2018[J]. J Arid Meteor,37(6):944-953(in Chinese).

阎琦,蒋大凯,陈传雷,等,2012.1960—2009 年辽宁区域性暴雪气候特征[J].气象与环境学报,28(4):43-48. Yan Q,Jiang D K,Chen C L,et al,2012. Climatic characteristics of regional snowstorm from 1960 to 2009 in Liaoning Province[J]. J Meteor Environ,28(4):43-48(in Chinese).

张俊兰,彭军,2017.北疆春季降水相态转换判识和成因分析[J].高原气象,36(4):939-949. Zhang J L,Peng J,2017. A forecast analysis of precipitation phase transformation and rainfall intensity in spring over northern Xinjiang[J]. Plateau Meteor,36(4):939-949(in Chinese).

张琳娜,郭锐,曾剑,等,2013.北京地区冬季降水相态的识别判据研究[J].高原气象,32(6):1780-1786. Zhang L N,Guo R,Zeng J,et al,2013. Research on discrimination criterion of precipitation types in Beijing in winter[J]. Plateau Meteor,32(6):1780-1786(in Chinese).

张明,徐桂荣,杜裕,等,2026.基于地基遥感垂直观测的宜昌地区两次雨雪过程相态差异及识别模型构建[J].大气科学学报,49(3):529-540. Zhang M,Xu G R,Du Y,et al,2026. Phase differences and development of a precipitation phase identification model for two rain-snow weather events in the Yichang Area based on ground-based remote sensing vertical observations[J]. Trans Atmos Sci,49(3):529-540(in Chinese).

赵琳娜,慕秀香,马翠平,等,2021.冬季稳定性降水相态预报研究进展[J].应用气象学报,32(1):12-24. Zhao L N,Mu X X,Ma C P,et al,2021. A review on stable precipitation type forecast in winter[J]. Chin J Appl Meteor,32(1):12-24(in Chinese).

Hobbs P V,Rangno A L,1985. Ice particle concentrations in clouds[J]. J Atmos Sci,42(23):2523-2549.

Pruppacher H R,Klett J D,1997. Microphysics of Clouds and Precipitation[M]. 2nd ed. Dordrecht:Kluwer Academic Publishers.

(本文责编:张芳)