

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).

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*

孙莎莎^{1,2} 孙 艺³ 徐婷婷⁴ 王 洪^{1,5} 杨成芳^{1,2} 何鹏程⁶

1 山东省气象局气象防灾减灾重点实验室, 济南 250031

2 山东省气象台, 济南 250031

3 烟台市人民政府人工影响天气办公室, 山东烟台 264003

4 国家海洋局东海预报中心, 上海 200136

5 山东省人民政府人工影响天气办公室, 济南 250031

6 济南市气象台, 济南 250102

提 要: 利用自动气象站、双偏振雷达、毫米波云雷达、温度廓线仪和 ERA5 逐小时再分析资料等, 分析了 2021 年 11 月 7 日山东西部地区暴雪甚至特大暴雪过程中降水相态的多源观测资料特征。研究表明: 此次过程主要受西风槽、低涡切变线和冷锋共同影响, 系统斜压性强, 有低空急流配合, 降雪持续时间不长, 但小时雪强大, 山东的西部地区出现大范围暴雪局地特大暴雪的极端降雪。多源观测资料较好地捕捉到此次过程降水相态及变化信息。风廓线雷达的风和垂直速度, 双偏振雷达的相关系数和 0℃层亮带, 毫米波云雷达的反射率、垂直液态水含量、速度和谱宽, 温度廓线仪的边界层温度及二维视频雨滴谱仪的粒子二维图像和信息都可以作为降水相态判断的指标, 为 0~1 h 短时临近预报提供参考。此次过程地面降温非常迅速, 雨快速转雪, 雨雪混合持续时间短。地面降温是强的负温度平流、垂直运动和非绝热作用共同导致, 其中, 负温度平流作用最大, 非绝热次之, 垂直运动作用最小。负温度平流强, 且负温度平流强度随高度降低而增强, 导致地面呈现出快速降温的特征。

关键词: 极端暴雪, 多源资料, 快速降温, 降水相态

中图分类号: P416, P445

文献标志码: A

DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2023.030302

Multi-Source Observational Characteristics of Precipitation Phase During Extreme Snowstorm in Shandong on 7 November 2021

SUN Shasha^{1,2} SUN Yi³ XU Tingting⁴ WANG Hong^{1,5} YANG Chengfang^{1,2} HE Pengcheng⁶

1 Key Laboratory of Shandong Meteorological Disaster Prevention and Reduction, Shandong Meteorological Service, Jinan 250031

2 Shandong Meteorological Observatory, Jinan 250031

3 Yantai Weather Modification Office, Shandong, Yantai 264003

4 East China Sea Forecast Center of State Oceanic Administration, Shanghai 200136

5 Shandong Weather Modification Office, Jinan 250031

6 Jinan Meteorological Observatory, Jinan 250102

Abstract: Based on automatic weather station, dual-polarization radar, millimeter-wave cloud radar, temperature profiler and ERA5 hourly reanalysis data, the characteristics of the multi-source observation data

* 国家自然科学基金项目(41975055)、山东省自然科学基金项目(ZR2022QD089、ZR2022MD095)、山东省气象局重点课题(2021sdqxz10)、环渤海区域项目(QYXM202205)和山东省气象局预报员专项(SDYBY2021-05)共同资助

2022 年 5 月 18 日收稿; 2023 年 3 月 15 日收修定稿

第一作者: 孙莎莎, 主要从事短期灾害性天气预报研究. E-mail: sunss-08@163.com

of the precipitation phase variation during the extremely heavy snowstorm in the western area of Shandong on 7 November 2021 are analyzed. The results show that this process was commonly influenced by the westerly trough, low vortex shear line and cold front. The system had strong baroclinicity, with low-level jet. Though the snowfall duration was not long, the hourly intensity of snow precipitation was high, resulting in extremely heavy snowfall in the western part of Shandong. The multi-source observational data captured the precipitation phase and change information well in this process. Wind and vertical velocity from wind profiler radar, correlation coefficient and 0°C layer bright band of dual-polarization radar, reflectivity, vertical liquid water content, velocity and spectral width of millimeter-wave cloud radar, boundary layer temperature of temperature profiler and the two-dimensional images and information of particles from the 2D video raindrop spectrometer were used as indicators for judging the phase of the precipitation, so these information provided a reference for the 0–1 h short-term nowcasting. During this process, air temperature above the ground cooled very rapidly, the rain quickly turned to snow with the sleet only lasting for a short time. The cooling of air temperature above the ground was caused by the combination of strong negative temperature advection, vertical motion and non-adiabatic effect, of which, the effect of negative temperature advection was the largest, followed by precipitation diabatic effect, and the vertical motion effect in order. The strong negative temperature advection and the negative temperature advection intensity increasing with the decrease of height, led to the rapid cooling of air temperature above the ground.

Key words: extreme snowstorm, multi-source data, rapid cooling, precipitation phase

引 言

11月对山东来说属于秋冬过渡的季节,气温多起伏,出现降水时很容易发生复杂的雨雪相态转换。雨雪转换最主要影响因素是低层及地面温度。许多学者对降水相态进行过研究,有学者从气候特征统计角度出发,漆梁波和张瑛(2012)、杨成芳等(2013)基于统计分析得到冬季降水相态的综合识别判据;王一颖等(2019)对山西冬半年雨转雪过程进行归类与分析,探讨地面气温在降水相态转换中的作用,提取降水相态转换的前兆信息;陈双等(2019)使用统计判别分析建立了基于云顶温度、中层融化参数和低层湿球温度构建的决策树判别模型,能较好地解决临界气温下雨和雪的判别问题;荆浩等(2022)从预报角度着眼于成雪和融雪两方面,把云顶温度和 0°C 层高度作为相态判别的关键要素,为冬季降水相态的预报与订正提供了新的参考。也有学者从个例分析角度出发,廖晓农等(2013)分析了北京2012年3月17日夜间降水过程中降雨、雨夹雪和降雪3个阶段温度的垂直分布和温度差异的机制,发现冷空气活动是造成3个降水相态温度垂直分布不同的原

因,但在不同阶段影响的方式各异,导致降水相态转变的机制是复杂多样的。杨舒楠等(2017)对2012年11月3—4日华北地区雨雪天气过程的降水相态特征进行分析,发现雨雪相态的转变取决于整个对流层低层(950~850 hPa)的温度平流状况。胡宁等(2021)对2020年2月13—14日北京地区一次极端雨雪过程进行分析,发现此次降水过程相态转化主要取决于 0°C 层高度的变化。这些研究集中在气候统计标准判断和降温机理等方面。Stewart et al (2015)发现实际降水相态与复杂的云微物理过程有关,大气垂直结构的细微差别可以决定降水类型。近年来,随着观测技术的发展,监测资料种类的不断丰富,许多产品可以从时空上更精细地描述大气垂直结构,用于降水相态的判断分析的可行性明显提高。杨祖祥等(2019)对2018年1月初安徽特大暴雪进行双偏振雷达观测分析。杜佳等(2019)利用雨滴谱仪、多普勒天气雷达、微波辐射计、地面加密自动站、再分析资料及气候整编资料等多源观测资料,分析了2018年4月初北京地区罕见暴雪过程的极端性及形成机制。陶然亭(2020)利用二维视频雨滴谱仪和双偏振雷达对中国东部地区降雪微物理特征进行研究。刘梅等(2021)利用自动气象站、双偏振

雷达、微波辐射计和再分析资料等对江苏地区突发降雪进行特征和成因分析。多源资料在降雪分析中起到了重要作用。

2021 年 11 月 7 日山东的西部地区出现了大范围的暴雪、局地特大暴雪天气,过程降雪量大,小时雪强大,极端性显著。数值模式预报此次降水时效临近不断调整,与实况较为接近,预报出暴雪及以上量级降雪,体现出显著极端性。但预报员主观预报降雪量时,预报和实况相比明显偏小,导致积雪深度预报也偏小。出现预报偏差的主要原因为参考模式预报雨雪转换中转成纯雪的时间较实况偏晚,同时考虑到季节特点,预报员认为总降水量中的纯雪达不到大暴雪或特大暴雪量级,因此只预报了暴雪,此次极端降雪过程预报难度非常大。近年来极端天气事件频发、广发,加强极端天气的研究有重要的理论和现实意义。根据本次过程特点和业务需求,利用多源观测资料具有高时空分辨率、时效性强、对降水相态影响因子的判断有一定的提前量的特点,对此次极端天气相态转换进行特征分析,挖掘山东多源资料在雨雪相态转换中的信息,并对本次降雪过程前期温度快速下降导致雨转雪进行成因分析,以提高预报员对该类天气过程的认识,为今后准确预报这类事件提供科学支撑。

1 资料与方法

本文使用的实况资料有山东省自动气象站降水、气温和积雪深度等,多源观测资料有双偏振 SA 雷达、风廓线雷达、毫米波云雷达、温度廓线仪及二维视频雨滴谱仪等观测数据,过程诊断分析主要使用欧洲数值预报中心的 ERA5 逐小时再分析资料(空间分辨率: $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$)和地面观测资料。

地面观测资料(包括自动站降水和气温等)、双偏振 SA 雷达及风廓线雷达等资料属于业务常规资料,按照中国气象局统一行业标准进行观测。毫米波云雷达、温度廓线仪和二维视频雨滴谱仪等资料属于非常规业务资料。其中:

济南毫米波云雷达位于山东省气象局院内,Ka 波段,工作频率为 35 GHz,时间分辨率为 5 s,空间分辨率为 50 m,观测最高高度超过 10 000 m,通过

发射和接收脉冲观测回波强度、垂直速度、速度谱宽和垂直液态水含量等要素;

二维视频雨滴谱仪也位于山东省气象局院内,根据两个摄像头对高速运动物体进行线性扫描,记录降水的详细状态,获得降水粒子大小、运动速度及形状等;

温度廓线仪数据来自济南市环境监测中心 MTP5 探测结果,工作频率为 56 GHz,时间分辨率为 3 min,空间分辨率为 50 m,观测高度为 0~1000 m。

2 雨雪实况

2021 年 11 月 7 日,山东的中西部地区出现降雪天气,雨雪转换区域自西向东逐渐推进,7 日 02 时雨转雨夹雪最先出现在鲁西北的德州部分地区,03 时雨夹雪范围扩大至鲁西北的西部地区,同时德州局地出现纯雪,随着纯雪范围向东进一步扩大,23 时,除山东半岛外,大部分地区都出现纯雪。从 7 日全省的国家监测站降雪量分布可以看出(图 1a),鲁西北和鲁中地区降雪量在 10 mm 以上(达暴雪量级),局地超过 30 mm(达特大暴雪量级),最大降雪量出现在德州的平原站(41.6 mm),济南站降雪量为 32.5 mm。由于降雪量大,鲁西北和鲁中地区出现 5~20 cm 积雪(图 1b)。此次降雪全省有 4 个站的积雪深度达到或突破历史极值。

从出现特大暴雪的平原和济南其逐时降水量、2 m 气温和天气现象随时间变化分布发现:平原(图 1c)7 日 00 时开始降雨,03 时转雨夹雪,04 时转雪,14 时再转雨夹雪并降水结束;济南(图 1d)降雨从 7 日 03 时开始,08 时转雨夹雪,09 时转雪,16 时降雪结束;降雪期间,两站的最大小时雪强分别为 $6.7 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 和 $7.4 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$,且 $4 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 以上的小时雪强维持了约 5~6 h,小时雪强的强度和持续时间均体现了显著的极端性。同时,对应降水相态由雨转雨夹雪再转雪,两站的 2 m 气温呈现一直下降的特点,均从最高 10°C 以上大幅下降至 0°C 以下,约 4 h 完成 10°C 以上降温。由于降温迅速剧烈,持续几小时的降雨后,雨夹雪相态仅维持 1 h,之后迅速转为雪并持续。

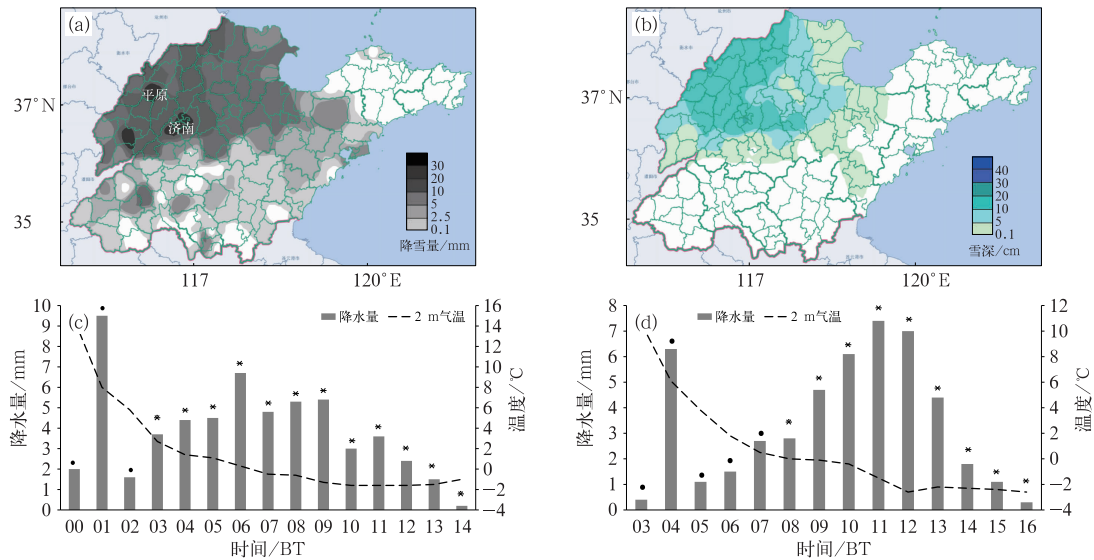


图 1 2021 年 11 月 7 日 (a)00—23 时山东省降雪量(阴影)、(b)积雪深度(填色)、(c)00—14 时平原和(d)03—16 时济南降水量、2 m 气温和降水相态(填图符号)逐时演变

Fig. 1 (a) The snowfall (shaded) and (b) snow depth (colored) in Shandong Province from 00:00 BT to 23:00 BT, and (c, d) the time evolution of precipitation, 2 m air temperature and precipitation phase (drawing symbol) in (c) Pingyuan from 00:00 BT to 14:00 BT and (d) Jinan from 03:00 BT to 16:00 BT 7 November 2021

3 环流背景

500 hPa, 11 月 6 日夜間(图 2a)至 7 日白天(图 2b), 山东的上游有西风槽东移发展并加强为冷涡, 该西风槽经向度大, 山东处于槽前的西南气流控制中。700 hPa, 6 日夜間(图 2a), 切变线位于山西附近, 山东受偏南风控制, 7 日白天(图 2b), 随着切变线东移南压至河北附近, 切变线南侧的偏南风不断发展加强, 山东受偏南暖湿气流控制。西南风风速在山东的中西部地区达到 $12 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 以上, 山东境内出现风速 $20 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 以上的低空急流核。850 hPa (图略), 6 日夜間, 该层切变线位于河北附近, 山东的西部地区处于切变线南侧, 7 日白天, 系统发展加强, 山东的中西部地区有低涡生成, 山东受低涡的暖式切变线和低空急流影响。地面上, 6 日 20 时(图略), 冷锋位于河北境内还未进入山东, 7 日 08 时(图 2c), 冷锋东移南下已进入山东的西部地区, 山东降水出现在冷锋锋后。从对流层中低层整体分布来看, 此次过程系统呈后倾结构, 锋区显著, 700 hPa 和 850 hPa 强盛偏南低空急流及地面冷锋共同影响山东的西部地区, 从而形成强降雪。

4 降水相态转变的多源观测特征

对于此类过程的降水相态变化, 济南有多种观测资料可以间接或直接显示(孙莎莎等, 2015; Wang et al, 2021), 此次由于济南出现特大暴雪, 观测资料的特征可能更为显著。因此, 相比 1 h 分辨率的地面观测天气现象, 本节对高时空分辨率多源资料的观测特征进行分析, 捕捉精细可预测的信号, 为降水相态转换判断和 0~1 h 短时临近降水预报提供参考。

4.1 风廓线雷达资料分析

降水相态变化主要由低层温度决定, 低层的冷暖空气变化都会对温度造成影响。风廓线雷达观测水平风向风速可以反映低层冷暖空气活动, 观测的垂直速度可以反映降水粒子下落速度来分辨降水粒子类型(孔照林等, 2016; 申高航等, 2021)。从济南章丘风廓线雷达风羽图(图 3a)可见, 7 日 03—16 时, 降水期间, 2 km 以上一直受西南风控制, 西南风先增大后减少, 其中 11 时, 西南风伸展至 8 km 高度且出现明显风速脉动, 风速达 $20 \sim 32 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 对应降雪最强时段; 1 km 以下风向变化显著, 03 时为

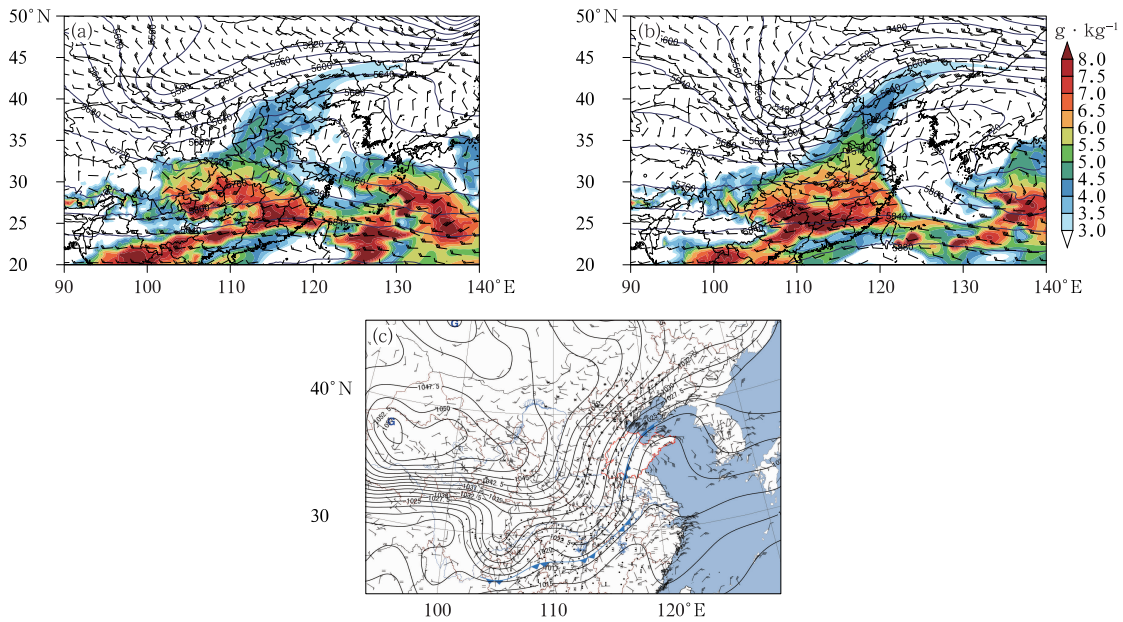


图 2 2021 年 11 月 (a) 6 日 20 时和 (b) 7 日 08 时 500 hPa 高度场 (等值线, 单位: gpm)、700 hPa 风场 (风羽) 和比湿 (填色), (c) 7 日 08 时地面气压场 (等值线, 单位: hPa)、风场 (风羽) 和天气现象 (填图符号)

Fig. 2 (a, b) The 500 hPa height (isoline, unit: gpm), 700 hPa wind (barb) and specific humidity (colored) at (a) 20:00 BT 6 and (b) 08:00 BT 7, (c) surface pressure (isobar, unit: hPa), wind (barb) and weather phenomenon (drawing symbol) at 08:00 BT 7 November 2021

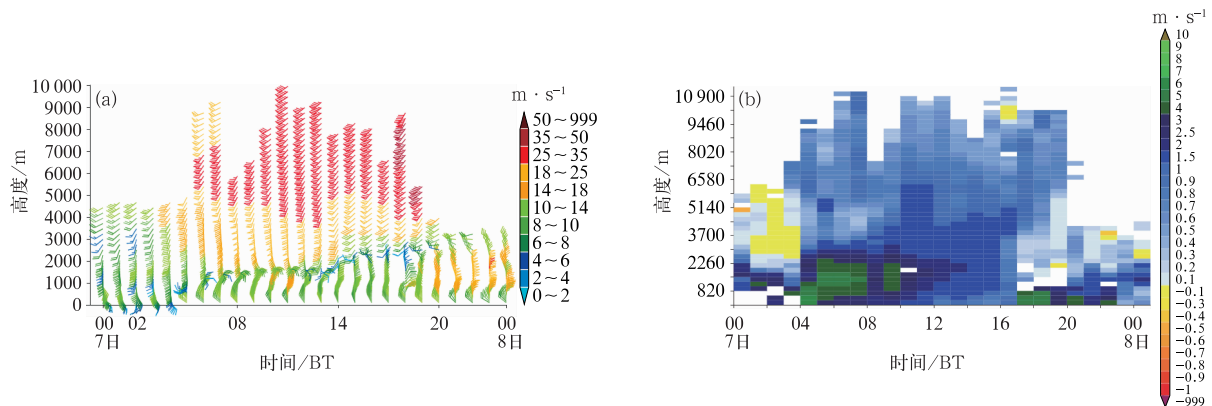


图 3 2021 年 11 月 7 日 00 时至 8 日 00 时章丘风廓线雷达的 (a) 风羽图和 (b) 垂直速度
Fig. 3 (a) Wind plume and (b) vertical velocity from Zhangqiu Wind Profile Radar from 00:00 BT 7 to 00:00 BT 8 November 2021

东南风或南风, 05 时冷空气已控制近地层转为北风, 16 时转为西北风控制, 此时冷空气达到最高高度 (约 2 km)。从垂直速度的分布 (图 3b) 看出, 对流层低层 2 km 以下的垂直速度随降水相态变化发生明显变化, 03—16 时降水开始到结束, 垂直速度基本为正值, 其中 04—07 时垂直速度值最高达 4~5 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$, 08 时垂直速度明显下降, 09—16 时垂直

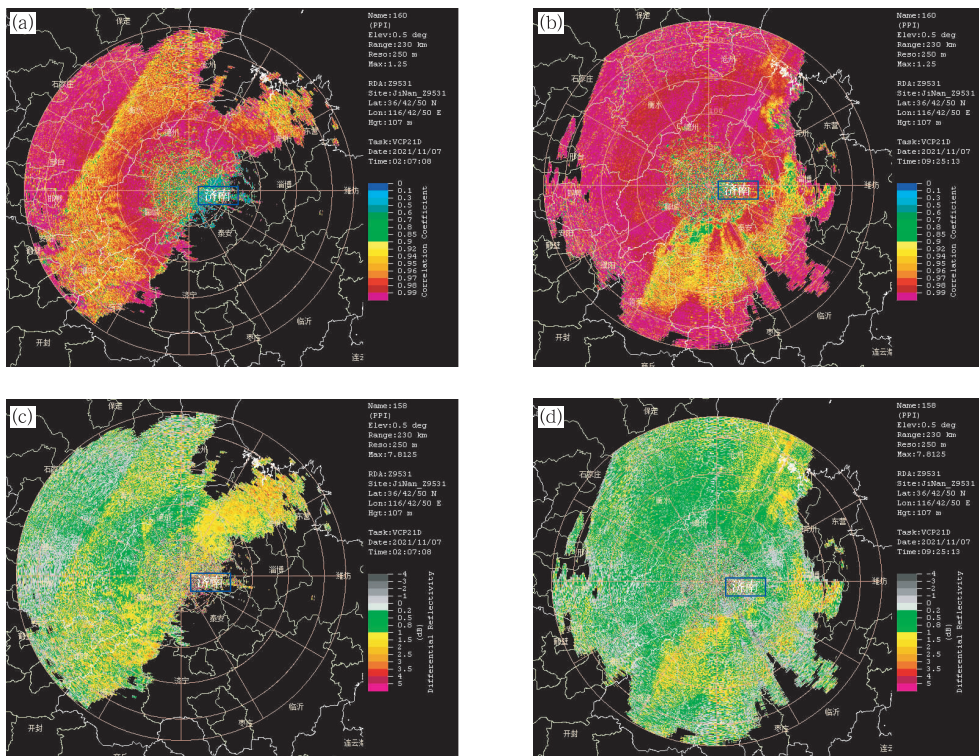
速度基本稳定在 1~2 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。雨转雨夹雪转雪三个阶段的对流层低层垂直速度呈由大到小的变化, 高垂直速度梯度发生在雨夹雪阶段。风廓线雷达观测的西南急流脉动预示强降水时段出现, 垂直速度由大变小提示降水相态由雨转雪, 为短时临近降水预报提供参考。

4.2 双偏振雷达资料分析

双偏振雷达观测范围大、时空分辨率高、时效性强,可以应用于雨雪相态的研究 (Giangrande et al, 2016)。双偏振产品中,相关系数反映粒子的均匀一致性,粒子一致性不同,水平偏振和垂直偏振的前后相邻的回波都会产生变化;差分反射率反映粒子水平和垂直尺寸的不同,回波强度有差异。从 7 日济南雷达 0.5°仰角相关系数分布看出,02:07(图 4a),山东与河北交界上空相关系数有显著差异,该差异由冷锋锋面造成,此时地面冷锋刚进入山东的西北地区,冷锋后降雪区域的相关系数为 0.98~1.01,雨夹雪区域的相关系数为 0.8~0.95,降雨区域的相关系数为 0.98~1.01,雨夹雪与雨和雪的相关系数有明显差异。09:25(图 4b),冷锋自西向东移动已经过济南,济南处于地面冷锋后转为降雪,降雪或降雨区域的相关系数维持在 0.98~1.01,雨夹雪区域的相关系数在 0.8~0.95。对比两个时次发现,锋面移

动的过程中,不同降水相态落区随其移动而演变。从 02:07(图 4c)和 09:25(图 4d)济南雷达 0.5°仰角差分反射率分布同样可以看出锋面自西向东移动的过程,但降水相态的特征并不清晰,难以区分雨夹雪和雨,需要配合反射率因子及相关系数等参数产品进行判断。对于此次雨转雪过程,双偏振产品中的相关系数的指示意义要好于差分反射率。

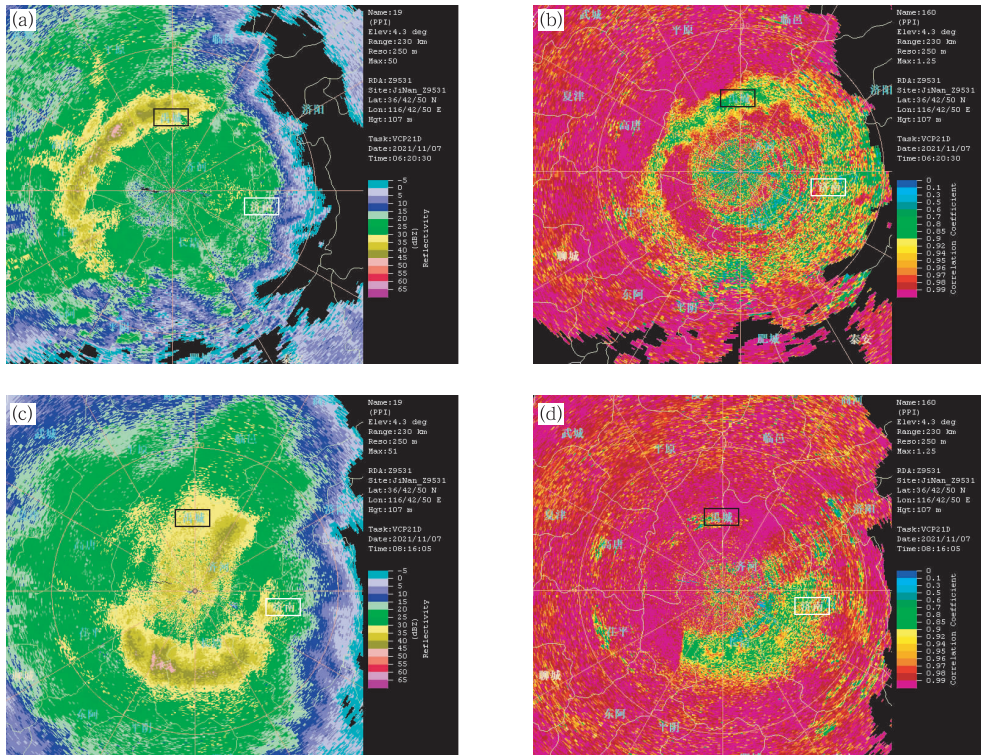
0°C层亮带是指雪花或冰晶降落到0°C层附近,表面发生融化使雷达反射率突然增大的现象,0°C层亮带经常出现在雨雪相态转换过程中。双偏振雷达产品中反射率因子和相关系数可以识别0°C层亮带(杨祖祥等,2019;庄薇等,2013;魏玮等,2019)。7日06:20,4.3°仰角基本反射率因子(图5a)显示,0°C层亮带位于第二、三象限呈近半圆状,反射率因子在30~50 dBz,第三象限0°C层亮带高度约为2.7~2.8 km,第二象限0°C层亮带高度约为2 km,低于第三象限;同仰角相关系数(图5b)显示有0°C层亮带,但形状和反射率因子识别的亮带有区别,主



注:蓝色方框为济南。

图 4 2021 年 11 月 7 日 (a,c)02:07,(b,d)09:25 济南双偏振雷达 0.5°仰角 (a,b)相关系数和(c,d)差分反射率(单位:dB)

Fig. 4 (a, b) Correlation coefficient and (c, d) differential reflectivity (unit: dB) at 0.5° elevation of Jinan Dual Polarization Radar at (a, c) 02:07 BT and (b, d) 09:25 BT 7 November 2021



注:白色方框为济南,黑色方框为禹城。

图 5 2021 年 11 月 7 日 (a,b)06:20,(c,d)08:16 济南双偏振雷达 4.3°仰角

(a,c)基本反射率因子(单位:dBz)和(b,d)相关系数

Fig. 5 (a, c) Reflectivity (unit: dBZ) and (b, d) correlation coefficient at 4.3° elevation of Jinan Dual Polarization Radar at (a, b) 06:20 BT and (c, d) 08:16 BT 7 November 2021

要表现为非对称的闭合环状低值区,数值在 0.95 以下,相比于其他象限,第二象限的带状低值区高度明显偏低,约为 2 km,其他象限高度约为 2.7~2.8 km。反射率因子和相关系数识别的 0°C 层亮带形状差异一方面由冷锋位置决定,另一方面由降水集中在地面冷锋后,锋前几乎无降水的分布特点决定。08:16,4.3°仰角基本反射率因子(图 5c)上的 0°C 层亮带位于第三、四象限,呈弧形,反射率因子依然在 30~50 dBz;同仰角相关系数(图 5d)显示的 0°C 层亮带形状与反射率因子上基本一致呈弧形,相关系数数值仍在 0.95 以下,位于第三、四象限。

对比降水相态和 0°C 层亮带,06—08 时,济南上游禹城降水由雨转雪,其上空的 0°C 层亮带高度由 2 km 下降至消失。由于 0°C 层亮带的高度变化趋势与地面温度变化趋势一致,地面冷锋经过的区域温度明显下降,对应 0°C 层亮带高度下降,预示降水相态由雨向雪转变。不同降水相态对应 0°C 层高度有一定变化,0°C 层亮带高度下降可以作为雨向雪转变过程中较好的指示。

4.3 毫米波云雷达资料分析

毫米波云雷达具有比风廓线雷达和多普勒雷达更高的时空分辨率,对于单点可以获得观测要素随时间及高度的变化。从济南毫米波云雷达观测(图 6a~6d)发现:7 日 03—07 时降雨期间反射率值高度分布呈现上低下高的特征,低层反射率为 -25~10 dBz,高层反射率为 10~30 dBz。08 时雨夹雪期间,反射率为 -10~10 dBz。09—16 时降雪期间,反射率值高度分布特征依然呈上低下高,但相比降雨,反射率值整体下降。对于垂直液态水含量,降雨期间垂直液态水含量值明显高于雨夹雪或降雪时段,基本在 $0.5 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$ 以上,降雪时段值基本在 $0.2 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$ 附近。对于垂直速度,降雨期间垂直速度数值最大为 $4 \sim 10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,雨夹雪次之,在 $2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 左右,降雪最小,约为 $0 \sim 2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。对比毫米波云雷达和风廓线雷达观测,垂直速度结果基本一致,无论数值量级还是变化趋势都很接近。对于谱宽,降雨期间谱宽最宽,约为 $2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$;雨夹雪次之,约为

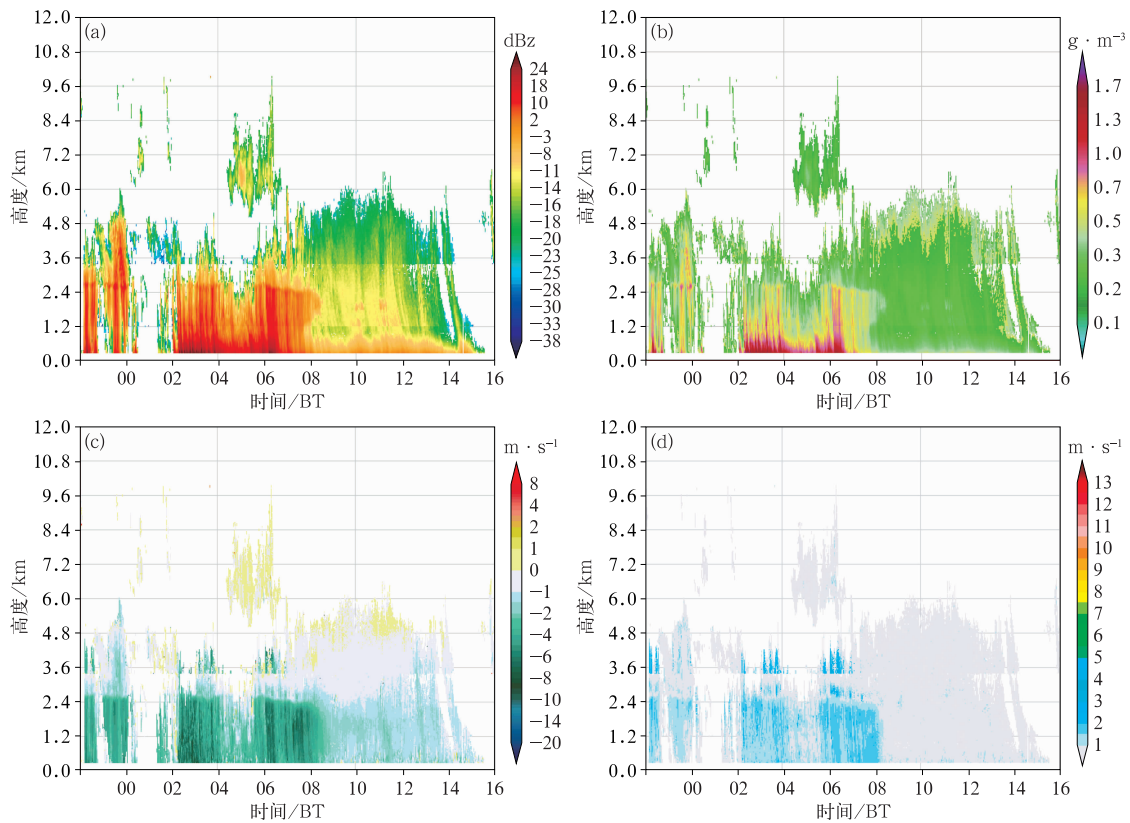


图6 2021年11月7日00—16时毫米波云雷达(a)反射率,

(b)垂直液态水含量,(c)速度和(d)谱宽

Fig. 6 (a) Reflectivity, (b) vertical liquid water content, (c) velocity and (d) spectral width of Ka-band millimeter-wave radar from 00:00 BT to 16:00 BT 7 November 2021

$1\sim 2\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$;降雪最小,约为 $0\sim 1\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。

总体来说,降雨具有高反射率、高垂直液态水含量、高的速度和大的谱宽,降雪具有低反射率、低垂直液态水含量、低的速度和小的谱宽,雨夹雪介于两者之间。降水相态判断中可以在参考风廓线雷达和双偏振雷达的基础上,同时参考毫米波云雷达的反射率、垂直液态水含量、速度和谱宽,区分出不同相态,从而在短时临近预报中做出适当调整。

4.4 温度廓线仪及二维视频雨滴谱资料分析

温度廓线仪可以获得多层温度,较为精细地刻画大气边界层温度垂直结构。7日济南温度廓线仪观测(图7)显示,02:30边界层整层温度开始明显下降,07:45降到 0°C 以下,降雨期间约5h温度下降幅度最大(为 14°C),降温速度为 $2.8^{\circ}\text{C}\cdot\text{h}^{-1}$ 。08时雨转为雨夹雪期间,边界层温度在 $-1\sim 0^{\circ}\text{C}$,09时转雪至12时,边界层温度小幅下降约 2°C ,至16时降雪结束,边界层温度低于 0°C 。分析发现,当边界层整层温度低于 0°C 时,降水相态以雨夹雪和雪为主,

但难以区分雨夹雪与雪这两种相态。短时临近降水相态判断时,可以使用温度廓线仪边界层整层温度 0°C 以下作为指标判断区分雨与雨夹雪或雪,区分雨夹雪与雪则需要结合时间分辨率更高的毫米波云雷达和二维视频雨滴谱仪等其他多源观测资料进行判断。

二维视频雨滴谱仪用于取得清晰的粒子二维图像,对降水相态分析有重要作用。从7日济南二维视频雨滴谱仪捕捉的此次过程降水粒子状态的信息(表1)可知:06时降雨、08时雨夹雪和10时降雪三种不同降水相态,粒子直径、下落速度和扁平率都有显著差异。粒子直径降雪期间最大,约为 2.22 mm ,雨次之,雨夹雪最小;粒子垂直下落速度降雨期间最大,约为 $3.93\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,明显高于雨夹雪和雪;粒子扁平率降雨期间最大,约为 1.04 ,雨夹雪次之,雪最小,说明降雨粒子形状近乎圆形,降雪粒子形状扁平,雨夹雪介于两者之间。从三个时次的粒子正面和侧面照片发现:不同降水相态,粒子边缘光滑程度有所不同,雨粒子(图8a,8b)边缘比较光滑,雨夹

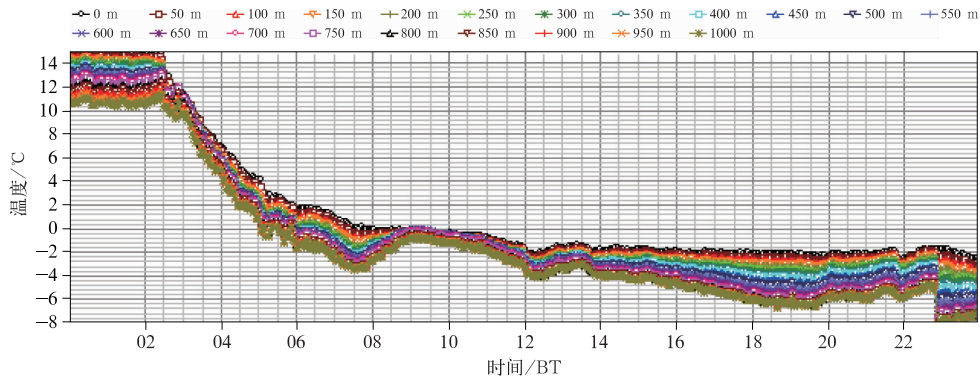


图 7 2021 年 11 月 7 日 00—23 时济南边界层温度垂直分布随时间变化

Fig. 7 Variation of the vertical distribution of temperature in the boundary layer of Jinan with time from 00:00 BT to 23:00 BT 7 November 2021

雪粒子(图 8c, 8d)边缘不那么光滑;雪粒子(图 8e, 8f)边缘有些粗糙。降水相态判断可以根据粒子图像信息区分雨、雨夹雪和雪,在短时临近预报和订正降水相态时提供有效参考。

表 1 2021 年 11 月 7 日 06 时雨、08 时雨夹雪和 10 时雪三种不同降水相态的粒子状态

Table 1 The particle states of three different precipitation phases: rainfall at 06:00 BT, sleet at 08:00 BT and snowfall at 10:00 BT 7 November 2021

| 相态 | 等效粒子直径/mm | 下落速度/(m·s ⁻¹) | 扁平率/(高度/宽度) |
|-----|-----------|---------------------------|-------------|
| 雨 | 1.17 | 3.93 | 1.04 |
| 雨夹雪 | 0.92 | 1.57 | 0.65 |
| 雪 | 2.22 | 1.85 | 0.45 |

5 快速降温的原因分析

通过前面实况分析得知,降温速度在降水相态变化方面有明显的影响作用,快速降温导致雨迅速转雪,雨雪混合持续时间短,转雪后小时雪强大,有利于大的降雪量发生。本节对此次过程快速降温的原因进行分析,以对降温迅速剧烈的雨雪过程降水相态预报提供参考。

由天气学原理中温度倾向方程(朱乾根等, 2007)可知局地温度变化由平流变化、垂直运动和非绝热变化组成:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = -V \cdot \nabla T - w(\gamma_d - \gamma) + \frac{1}{c_p} \frac{dQ}{dt} \quad (1)$$

式中: $-V \cdot \nabla T$ 表示温度平流项, $-w(\gamma_d - \gamma)$ 表示垂直运动项, $\frac{1}{c_p} \frac{dQ}{dt}$ 表示非绝热变化项。廖晓农等

(2013)、彭霞云等(2020)、刘梅等(2021)对不同个例的分析发现:不同天气形势下,各项影响因子对温度变化起到的作用大小不同。此过程主要受天气尺度系统影响,对于局地温度变化,首先考虑温度平流作用。对 11 月 6—7 日平原和济南做温度平流和风场随时间和高度变化的垂直剖面(图 9)发现,6 日 23 时至 7 日 05 时,925 hPa 至地面,平原(图 9a)由之前的弱南风转为较强的偏北风,偏北风风速最大达 $10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,负温度平流也位于这个气层中,负温度平流强度随高度降低而增强,地面负温度平流最强中心强度约为 $-1.8 \times 10^{-3} \text{ } ^\circ\text{C} \cdot \text{s}^{-1}$ 。7 日 02—07 时,925 hPa 至地面,济南(图 9b)的风场也由弱南风转为偏北风,偏北风风速最大为 $8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,负温度平流也随高度降低而增强,负温度平流在地面最强中心强度约为 $-9 \times 10^{-4} \text{ } ^\circ\text{C} \cdot \text{s}^{-1}$ 。平原近地层偏北风风速和负温度平流强度强于济南,同时相比于一般降温过程,两站的偏北风风速和负温度平流强度都偏强。此次过程平原和济南的地面呈现出快速降温的特征,除了与负温度平流偏强有关以外,还与负温度平流的垂直分布特征有关,最强负温度平流中心位于地面,导致地面温度持续快速下降,其中,平原地面降温速度快于济南是由于其负温度平流强于济南。

除温度平流外,此次过程垂直运动和非绝热作用也对局地温度变化有一定影响。选取平原(图 10a)和济南(图 10b)分别做逐小时垂直速度、相对湿度、温度和风的垂直剖面,可以看出:6 日 23 时至 7 日 00 时的平原和 7 日 02—03 时的济南 925~700 hPa 有强烈的上升运动,两站的降水即将开始,气块初始从

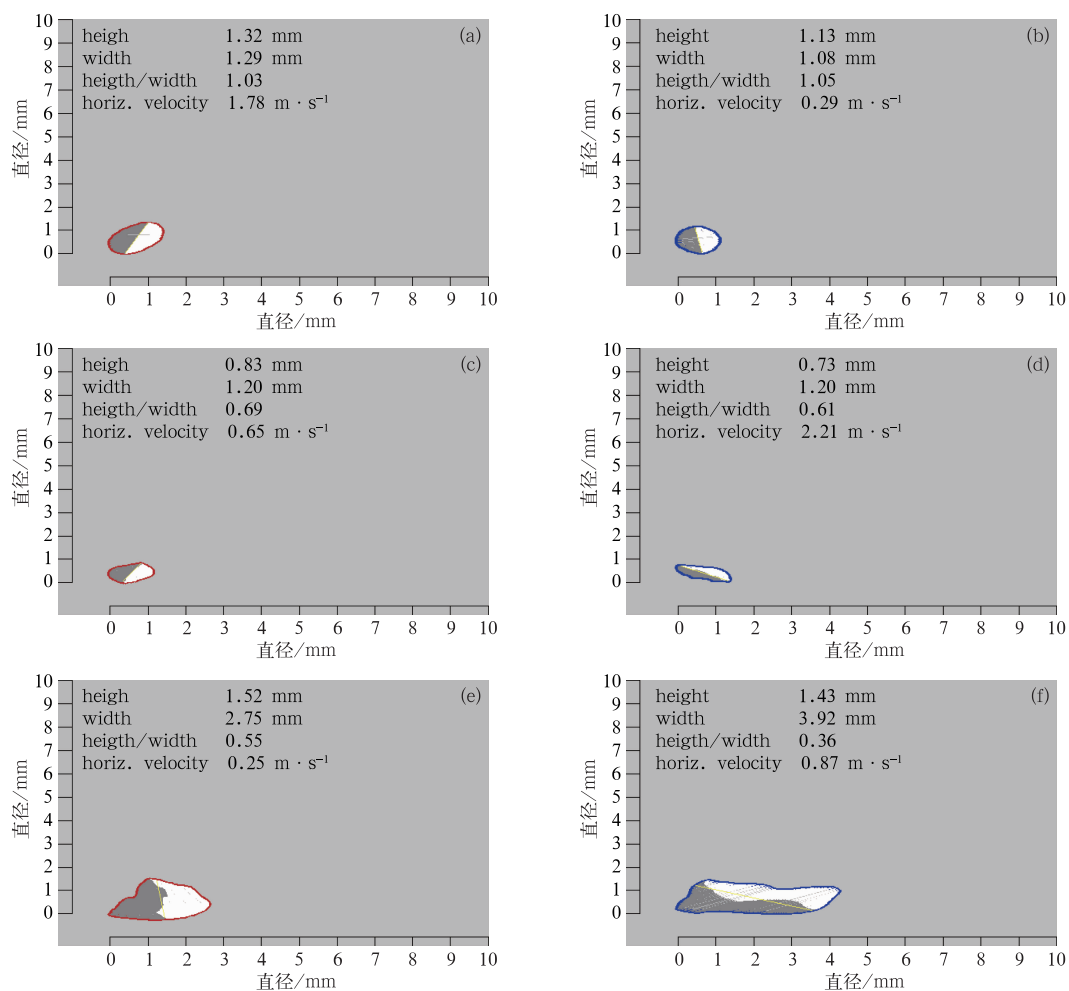


图 8 2021 年 11 月 7 日 (a,b)06 时雨,(c,d)08 时雨夹雪和 (e,f)10 时雪三种相态降水粒子的 (a,c,e) 正面 (红) 和 (b,d,f) 侧面 (蓝) 照片

Fig. 8 (a, c, e) The front (red) and (b, d, f) side (blue) views of three phase precipitation particles of (a, b) rainfall at 06:00 BT, (c, d) sleet at 08:00 BT and (e, f) snowfall at 10:00 BT 7 November 2021

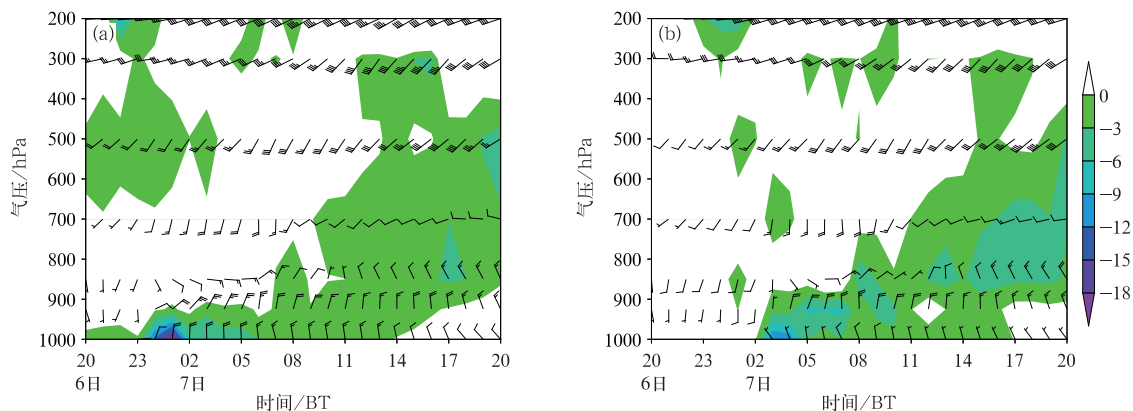


图 9 2021 年 11 月 6 日 20 时至 7 日 20 时 (a) 平原和 (b) 济南温度平流 (填色: $< 0 \times 10^{-4} \text{ } ^\circ\text{C} \cdot \text{s}^{-1}$) 和风 (风羽) 随时间和高度变化

Fig. 9 Variation of temperature advection (colored for temperature advection $< 0 \times 10^{-4} \text{ } ^\circ\text{C} \cdot \text{s}^{-1}$) and wind (barb) in (a) Pingyuan and (b) Jinan with time and height from 20:00 BT 6 to 20:00 BT 7 November 2021

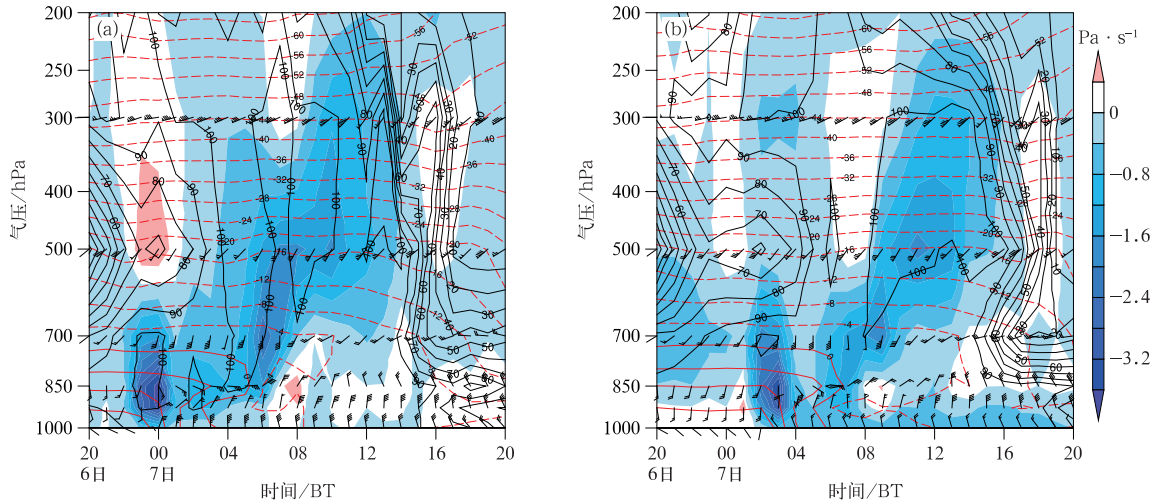


图 10 2021 年 11 月 6 日 20 时至 7 日 20 时 (a) 平原和 (b) 济南垂直速度 (填色)、相对湿度 (黑色等值线, 单位: %)、温度 (红色等值线, 单位: $^{\circ}\text{C}$) 和风 (风羽) 随时间和高度变化

Fig. 10 Variation of vertical velocity (colored), relative humidity (black isoline, unit: %), temperature (red isoline, unit: $^{\circ}\text{C}$) and wind (barb) in (a) Pingyuan and (b) Jinan with height and time from 20:00 BT 6 to 20:00 BT 7 November 2021

近地层被抬升时处于不饱和状态, 抬升至对流层中层附近达到饱和状态, 这期间上升运动对温度局地变化起一定的降温作用。7 日 00 时平原和 03 时济南降水开始后, 高空中降水物降落到地面, 地面观测的降水相态为雨, 说明高空降水物下降过程中发生融化, 吸收环境热量起到降温作用, 925 hPa 至地面温度梯度显著和地面温度快速下降, 降水开始 2~3 h 后 0°C 线高度明显降低。计算此过程垂直运动的影响: 平原和济南 p 坐标垂直运动中心强度为 $-3\sim-4 \text{ Pa}\cdot\text{s}^{-1}$, 换算为 z 坐标垂直速度约为 $3\times 10^{-2}\sim 4\times 10^{-2} \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, γ_d 为 $1\times 10^{-2} \text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{m}^{-1}$, γ 根据实况计算约为 $6\times 10^{-3} \text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{m}^{-1}$, $\gamma_d - \gamma$ 约为 $4\times 10^{-3} \text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{m}^{-1}$, 因此垂直运动对温度的影响为 $1.2\times 10^{-4}\sim 1.6\times 10^{-4} \text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{s}^{-1}$, 与温度平流相比小一个量级。

对于非绝热作用, 由于降温过程中, 平原和济南的对流层中低层相对湿度都在 90% 以上, 没有明显干区, 因此在这忽略降水蒸发对温度的影响, 主要考虑高空降水物下降融化对温度的影响。参考徐辉和宗志平 (2014)、刘梅等 (2021) 估算固态降水融化导致低层温度变化的方法:

$$\delta T = -193 \frac{D}{\delta p} \quad (2)$$

式中: D 是地面累计降水量 (单位: cm), δp 是融化

潜热影响的气压层厚度 (单位: hPa), δT 是引起的平均温度变化 (单位: $^{\circ}\text{C}$)。平原 6 月 23 时至 7 日 01 时降水量为 11.5 mm, 融化层位于 925~800 hPa, 利用式 (2) 计算得到高空降水物融化作用将该层平均温度下降 1.8°C ; 而该时段地面 2 m 气温下降了 7.9°C 。济南 7 日 02—04 时降水量为 6.7 mm, 融化层依然位于 925~800 hPa, 计算得到高空降水物融化作用将该层平均温度下降 1°C ; 而该时段地面 2 m 气温下降了 8.6°C 。可知, 高空降水物融化的作用在地面气温降温的贡献率约为 10%~20%。

上述分析表明, 此次过程地面迅速降温是强的负温度平流、垂直运动和非绝热作用共同导致, 其中, 负温度平流作用最大, 非绝热次之, 垂直运动作用最小。

此次快速降温主要由近地面的强负温度平流造成, 温度平流的强度由天气系统配置决定, 天气系统的结构和强度差异都会产生不同强度的温度平流。通过上文天气背景分析得知, 此次过程对流层高层为冷涡, 低层有切变线, 地面有冷锋配合, 系统垂直分布呈现后倾, 锋区强盛, 该结构促使冷空气从近地面自西向东侵入山东。地面冷锋南下之前, 山东受地面倒槽控制, 倒槽右侧来自黄海的东南风不断地吹向山东的西部地区。对于山东的西部地区, 其西侧为强的干冷的西北风, 东侧为暖湿的东南风, 风向

与等温线交角接近垂直,并且由于锋区强盛造成近地面等温线密集,因此形成了此次强的近地面负温度平流。

6 结论与讨论

本文利用自动气象站、双偏振雷达、毫米波云雷达、温度廓线仪和 ERA5 逐小时再分析资料等对 2021 年 11 月 7 日山东的西部地区暴雪甚至特大暴雪过程降水相态进行多源观测资料特征分析和温度快速下降成因诊断,结论如下:

(1)此次过程主要影响系统为西风槽、低涡切变线和冷锋,系统斜压性强,有低空急流配合,降雪持续时间不长,但小时雪强大,山东的西部地区出现大范围暴雪局地特大暴雪的极端降雪。

(2)风廓线雷达观测的西南急流脉动与最强降雪时段一致,垂直速度由大到小预示雨转雪的趋势,垂直速度高梯度区代表雨夹雪的混合降水相态。双偏振雷达的相关系数对降水相态的指示意义比差分反射率清晰,高的相关系数代表纯雨或纯雪,低的相关系数代表雨夹雪;双偏振雷达识别 0°C 层亮带高度下降指示雨向雪转变。

(3)对于毫米波云雷达,降雨具有高反射率、高垂直液态水含量、高的速度和大的谱宽,降雪具有低反射率、低垂直液态水含量、低的速度和小的谱宽,雨夹雪介于两者之间。在风廓线雷达和双偏振雷达使用基础上,毫米波云雷达可以更精细地显示降水相态。

(4)温度廓线仪精细地显示边界层温度迅速下降的过程,边界层温度在 0°C 以下的降水相态既有雨夹雪也有雪,区分雨夹雪与雪可以结合时间分辨率更高的毫米波云雷达和二维视频雨滴谱仪等其他多源观测资料进行判断。二维视频雨滴谱仪对于不同降水相态粒子有直观的观测效果。风廓线雷达、双偏振雷达、毫米波云雷达、温度廓线仪和二维视频雨滴谱仪可以为 $0\sim 1\text{ h}$ 的短时临近预报提供可靠的参考依据。

(5)此次过程地面降温是强的负温度平流、垂直运动和非绝热作用共同导致,其中,负温度平流作用最大,非绝热次之,垂直运动作用最小。负温度平流强,且负温度平流强度随高度降低而增强,导致地面呈现出快速降温的特征。

此次极端暴雪出现预报偏差主要体现在对转雪

时间判断偏晚和特大暴雪的漏报。有相态变化的降水,涉及复杂的云微物理过程,预报员很难预报出超过历史纪录的降雪强度。模式是预报过程参考的首要依据,多源观测资料是预报员订正模式误差的可能手段之一。本文对此次极端降雪个例中的降水相态多源资料特征进行分析,也对快速降温成因进行了初步诊断分析,可以为类似强冷空气的过程提供降温和相态判断思路,但在实际过程中降温机制和相态变化非常复杂,本个例研究结论的普适性仍有待于更多的天气个例分析来验证,为预报提供思路。另外,本文利用多源观测资料进行分析时从相态相关的物理量和相态直接观测两个角度出发,受目前观测条件所限,分钟级的相态直接观测产品难以广泛业务化,业务人员可以获得分钟级业务化相态相关物理量观测产品,综合使用这些物理量产品也可以基本满足短时临近降水相态和雨雪预报订正需求。

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).
- 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).
- 胡宁, 符娇兰, 孙军, 等, 2021. 北京一次冬季极端降水过程中相态转换预报的误差分析[J]. 气象学报, 79(2): 328-339. Hu N, Fu J L, Sun J, et al, 2021. Errors in the forecast of precipitation type transition in an extreme winter precipitation event in Beijing[J]. Acta Meteor Sin, 79(2): 328-339 (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).
- 孔照林, 赵放, 彭霞云, 等, 2016. 风廓线下落速度在浙江冬季降水相态识别中的应用[J]. 气象, 42(9): 1090-1095. Kong Z L, Zhao F, Peng X Y, et al, 2016. Application of wind profiler velocity data in identifying winter precipitation types in Zhejiang Province[J]. Meteor Mon, 42(9): 1090-1095 (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).
- 刘梅,俞剑蔚,蒋义芳,等,2021. 2020年3月28日沿江和苏南突发降雪多源监测特征及成因分析[J]. 气象, 47(10): 1169-1181. Liu M, Yu J W, Jiang Y F, et al, 2021. Multi-source monitoring characteristics and causes of abrupt snowfall in southern Jiangsu on 28 March 2020[J]. Meteor Mon, 47(10): 1169-1181(in Chinese).
- 彭霞云,刘汉华,李文娟,等,2020. 一次局地暴雪过程低层降温机制分析[J]. 气象, 46(8): 1015-1025. Peng X Y, Liu H H, Li W J, et al, 2020. Analysis of low-level temperature cooling mechanism of a local snowstorm process[J]. Meteor Mon, 46(8): 1015-1025(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).
- 申高航,高安春,李君,2021. 雨滴谱及双偏振雷达等资料在一次强降水过程中的应用[J]. 气象, 47(6): 737-745. Shen G H, Gao A C, Li J, 2021. Application of raindrop spectrum and dual polarization radar data to a heavy rain process[J]. Meteor Mon, 47(6): 737-745(in Chinese).
- 孙莎莎,杨成芳,尹承美,等,2015. 济南地区“12.13”降水过程相态二次转换成因分析[J]. 气象与环境学报, 31(4): 14-19. Sun S S, Yang C F, Yin C M, et al, 2015. Forming reason study of twice conversion of precipitation phase for “12.13” weather process in Ji'nan Region[J]. J Meteor Environ, 31(4): 14-19(in Chinese).
- 陶然亭,2020. 基于二维视频雨滴谱仪和双偏振雷达研究中国东部地区降雪微物理特征与降雪估计[D]. 南京: 南京大学. Tao R T, 2020. Snow microphysical characteristics and snowfall estimation in East China based on a 2D video disdrometer and dual polarization radar[D]. Nanjing: Nanjing University(in Chinese).
- 王一颀,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]. J Arid Meteor, 37(6): 964-971(in Chinese).
- 魏玮,刘黎平,吴翀,等,2019. 杭州“12·05”降雪天气过程的偏振雷达观测分析[J]. 气象, 45(9): 1248-1261. Wei W, Liu L P, Wu C, et al, 2019. Analysis of dual-polarization radar observation during the 5 December 2015 snowfall process in Hangzhou[J]. Meteor Mon, 45(9): 1248-1261(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).
- 杨成芳,姜鹏,张少林,等,2013. 山东冬半年降水相态的温度特征统计分析[J]. 气象, 39(3): 355-361. Yang C F, Jiang P, Zhang S L, et al, 2013. Analysis on temperature of precipitation types in cold seasons in Shandong[J]. Meteor Mon, 39(3): 355-361(in Chinese).
- 杨舒楠,徐珺,何立富,等,2017. 低层温度平流对华北雨雪天气过程的降水相态影响分析[J]. 气象, 43(6): 665-674. Yang S N, Xu J, He L F, et al, 2017. Impacts of low-level temperature advection on the precipitation type of heavy rain-snow process in North China[J]. Meteor Mon, 43(6): 665-674(in Chinese).
- 杨祖祥,谢亦峰,项阳,等,2019. 2018年1月初安徽特大暴雪的双偏振雷达观测分析[J]. 暴雨灾害, 38(1): 31-40. Yang Z X, Xie Y F, Xiang Y, et al, 2019. Analysis on dual polarization radar observations of a heavy snowstorm event in Anhui in the beginning of January 2018[J]. Torr Rain Dis, 38(1): 31-40(in Chinese).
- 朱乾根,林锦瑞,寿绍文,等,2007. 天气学原理与方法: 第4版[M]. 北京: 气象出版社: 28-29. Zhu Q G, Lin J R, Shou S W, et al, 2007. Principle and Method of Synoptic Meteorology[M]. 4th ed. Beijing: China Meteorological Press: 28-29(in Chinese).
- 庄薇,刘黎平,胡志群,2013. 青藏高原零度层亮带的识别订正方法及在雷达估测降水中的应用[J]. 气象, 39(8): 1004-1013. Zhuang W, Liu L P, Hu Z Q, 2013. Application of bright band identification and correction in radar-based QPE over Tibetan Plateau[J]. Meteor Mon, 39(8): 1004-1013(in Chinese).
- Giangrande S E, Toto T, Bansemmer A, et al, 2016. Insights into riming and aggregation processes as revealed by aircraft, radar, and disdrometer observations for a 27 April 2011 widespread precipitation event[J]. J Geophys Res: Atmos, 121(10): 5846-5863.
- Stewart R E, Thériault J M, Henson W, 2015. On the characteristics of and processes producing winter precipitation types near 0°C[J]. Bull Amer Meteor Soc, 96(4): 623-639.
- Wang H, Wang W Q, Wang J, et al, 2021. Rainfall microphysical properties of landfalling Typhoon Yagi (201814) based on the observations of micro rain radar and cloud radar in Shandong, China[J]. Adv Atmos Sci, 38(6): 994-1011.

(本文责编:戴洋)