郑丽娜,李恬,孙骞,等.2021年2月黄河中下游两次暴雪的相态转换特征及成因[J].海洋气象学报,2022,42(3):48-56. ZHENG Lina, LI Tian, SUN Qian, et al. Analysis on transition of precipitation type and causes of two snowstorms over the middle and lower reaches of the Yellow River in February 2021[J]. Journal of Marine Meteorology,2022,42(3):48-56. DOI:10.19513/j.cnki.issn2096-3599.2022.03.005.(in Chinese)

2021年2月黄河中下游两次暴雪的相态转换特征及成因

郑丽娜,李恬,孙骞,田雪珊 (济南市气象局,山东济南 250102)

摘要:利用常规高空资料、地面加密自动站、双偏振多普勒天气雷达、微波辐射计与 ERA5 再分析 数据等多源资料,分析了 2021 年 2 月下旬黄河中下游两次暴雪过程的相态演变及形成机理。结果 表明:两次过程的大尺度影响系统基本一致,只是影响系统的强度和位置不同导致两次过程存在 些许差异。两次过程均存在相态转换,过程 I 中存在相态逆转(由雨转雪再转雨),而过程 II 中只 存在雨转雪的转换。在太行山以西的山区,当地面 2 m 气温低于 0.5 ℃时,降水相态以雪为主,在 0.5~1 ℃之间时,多为雪或雨夹雪并存;在平原地区,当 2 m 气温为 1~2 ℃时,降水相态以雪为主,在 0.5~1 ℃之间时,则为雪与雨夹雪并存,低于 0 ℃时,降水相态为雪。在降雨阶段,双偏振雷 达产品相关系数(*CC*)值约在 0.98 以下,差分反射率(Z_{DR})在 0.6 dB 以上,差分传播相移率(K_{DP}) 值约在 0.2 (°)·km⁻¹以上;在降雪阶段,*CC* 值在 0.98~0.99 之间, Z_{DR} 值在 0.2~0.8 dB 之间, K_{DP} 值约在 0.2 (°)·km⁻¹以上;在降雪阶段,*CC* 值在 0.98~0.99 之间, Z_{DR} 值在 0.2~0.8 dB 之间, K_{DP} 值约在 0.2 (°)·km⁻¹以上;在降雪阶段,*CC* 值在 0.98~0.99 之间, Z_{DR} 值在 0.2~0.8 dB 之间, K_{DP} 值约在 0.2 (°)·km⁻¹以上;在降雪阶段,*CC* 值在 0.98~0.99 之间, Z_{DR} 值在 0.2~0.8 dB 之间, K_{DP} 值约在 0.2 (°)·km⁻¹以下;但在降水相态由雨转雨夹雪时, Z_{DR} 、*CC* 与 K_{DP} 值没有明显变化。 关键词:黄河中下游;暴雪过程;降水转换;形成机理 中图分类号: P458.3 文献标志码:A 文章编号: 2096-3599(2022)03-0048-09 DOI:10.19513/j.cnki.issn2096-3599.2022.03.005

Analysis on transition of precipitation type and causes of two snowstorms over the middle and lower reaches of the Yellow River in February 2021

ZHENG Lina, LI Tian, SUN Qian, TIAN Xueshan

(Jinan Meteorological Bureau, Jinan 250102, China)

Abstract The phase evolution and formation mechanism of two snowstorm processes in the middle and lower reaches of the Yellow River in late February 2021 are analyzed by using multi-source observation data including conventional high-altitude data, data of densified ground automatic stations, dual-polarization Doppler radar, and microwave radiometer as well as ERA5 reanalysis data. The results show that the large-scale synoptic systems of the two processes are basically the same, but the intensity and position of the systems are different, leading to some differences between the two processes. There are phase transitions in both processes, phase reversal (from rain to snow and then to rain again) occurs in Process I , while only the transition from rain to snow occurs in Process II. In mountainous areas west of Taihang Mountain, the precipitation phase is mainly snow when the temperature at 2 m is lower than 0.5 °C, and snow or sleet coexist in the range between 0.5 °C and 1 °C; while in plains, the precipitation phase is rain or sleet when the temperature at 2 m is between 1 °C and 2 °C, snow and sleet

收稿日期:2021-11-11;修订日期:2022-01-27

基金项目:国家自然科学基金面上项目(41975055);山东省预报员专项(SDYBY2018-05)

通信作者:郑丽娜,女,博士,正高级工程师,主要从事短期天气预报工作,dongyingzln@163.com。

coexist in the range between 0 °C and 1 °C, and the precipitation phase is snow when the temperature is lower than 0 °C. In the rainfall stage, the dual-polarization radar correlation coefficient (*CC*) is below 0.98, the differential reflectivity ($Z_{\rm DR}$) is above 0.6 dB, and the specific differential phase shift ($K_{\rm DP}$) is above 0.2 (°) · km⁻¹; while in the snowfall stage, *CC* is between 0.98 and 0.99, $Z_{\rm DR}$ is between 0.2 dB and 0.8 dB, and $K_{\rm DP}$ is below 0.2 (°) · km⁻¹; however, when the precipitation phase changes from rain to sleet, the values of $Z_{\rm DR}$, *CC*, and $K_{\rm DP}$ do not change significantly.

Key words the middle and lower reaches of the Yellow River; snowstorm; transition of precipitation type; formation mechanism

引言

暴雪是北方冬季重要的灾害性天气之一,而大 范围连续的降雪天气往往使交通瘫痪、电力和通信 中断,严重影响人们的正常生活,给社会经济造成 巨大损失。对于暴雪或持续性降雪过程的形成原 因,气象学者^[1-6]从大的环流背景、影响系统、机理 原因及预报着眼点等方面进行了研究,取得了很多 有益的研究成果。例如,针对华北暴雪,冷锋、华北 锢囚锋、温带气旋与地面倒槽等被认为是主要的地 面影响系统^[7-9],且不同影响系统产生的降雪强度 以及给当地带来的灾害程度也不同。针对东北暴 雪,影响系统更多的是气旋冷锋型和回流型^[10]。朱 蕾等^[11]总结了新疆两次极端暴雪天气过程,指出高 空槽、切变线与低空气流的相互配合是产生暴雪天 气的主要原因。罗布坚参等^[12]则分析了青藏高原 3次暴雪过程,指明南支槽是其主要的影响系统。 可见,不同的地域,造成暴雪的主要影响系统不同。 即使同一地域,同一类天气系统,比如高空槽,由于 其所处的位置、强度、经向度及所配合的槽前西南 气流不同,也会在天气事件中产生不同的作用。本 文分析 2021 年 2 月下旬在黄河中下游出现的两次 暴雪天气过程,其大尺度天气系统基本相似,但是 其产生的降水相态却存在差异。为什么会产生这 种现象,将是分析的重点。

2021年2月下旬,由于近地层气温回升,中纬 度地区降水相态的演变成为该时段预报中的难 点。对于降水相态的判别,许多研究人员^[13-15]从 低层温度因子入手给出不同的指标。THÉRIAULT et al.^[16]研究认为温度廓线 0.5℃的偏差就能引起 降水相态变化,而引起温度层结变化的原因非常 复杂,加强对温度层结变化机制的理解和认识对 做好降水相态预报非常重要。LACKMANN et al.^[17]研究了低层逆温层结中冻结和融化作用对降 水相态的影响。KAIN et al.^[18]应用简化的公式估 算雪花在融化过程中的非绝热冷却作用对相态转变的影响。翟亮等^[19]对北京 2016 年初雪过程进行温度平流分析,指出暖平流偏强导致零度层高度下降慢,从而导致降雪量实况比预报偏小。这些研究重点分析了近地层的温度变化或者温度平流作用,说明这两个因素是相态转换的关键,那么在 2021 年 2 月下旬这两次暴雪中这两个因素又是如何影响了相态的转换呢?因此,利用欧洲中期天气预报中心(European Centre for Medium-Range Weather Forecasts, ECMWF)ERA5 再分析资料、地面自动气象站逐小时观测和每日两次常规高空资料、双偏振多普勒天气雷达资料、济南站微波辐射计资料等对 2021 年 2 月下旬黄河中下游两次暴雪过程中的相态演变及形成机理进行分析。文中所用时间均为北京时。

1 资料介绍

选取黄河中下游地区(34°~40°N,107°~122°E) 442个国家级地面气象观测站逐时降水资料; Micaps 提供的降水时段高空、地面资料;欧洲中期 天气预报中心提供的第五代再分析数据,分辨率为 0.25°×0.25°, 垂直方向从1000 hPa 到10 hPa 共16 层,要素包括风场、温度等。文中还使用了济南站 的双偏振多普勒天气雷达及微波辐射计资料。济 南的 CINRAD/SA 雷达是 2019 年 5 月 29 日完成的 双偏振(CINRAD/SA-D)技术升级并通过现场测试, 作为国内比较早进行双偏振升级改造的业务组网 雷达之一,进行了双偏振技术升级数据的可靠性及 稳定性的评估检验。另外,济南安装的微波辐射计 是国产 QFW-6000 型,该仪器采用并行测量技术体 制,具有天顶观测和边界层扫描两种观测模式,V波 段(51~59 GHz)和 K 波段(22~31 GHz)各有 8 个 通道,温度和湿度数据的时间分辨率为5 min,从 地面至 10 km 内共有 53 层,2 km 以下分辨率为 100 m,2~10 km的分辨率为 250 m。该型号微波辐 射计对廓线的反演算法是依据 L 波段雷达探空点 的历史探空数据,且 L 波段探空数据的垂直分辨率 较高,所以结合 L 波段探空资料进行微波辐射计反 演数据的可用性分析是较好的选择^[20]。基于不同 天气现象对该仪器反演要素精度的检验,整体上其 反演的温度、水汽密度等的偏差较小,可以近似作 为实况使用^[21]。

2 过程概况

2.1 雨雪天气概况

2021年2月24—25日(简称"过程I"),黄河 中下游地区出现了一次明显的暴雪天气过程。从 图 1a 中可以看到,降水量大值区主要在山西南部、 河南北部与山东的中南部,最大降水出现在山东省 巨野县(菏泽东北方向 60 km 处),降水量为 50.4 mm,如此强的降水在这个季节实属罕见。以 山东为例,2月下旬历年平均降水量为3 mm 左右, 而这次过程山东省平均降水量为15 mm,降水明显 偏多。过程前期黄河下游地区气温大都在5℃上 下,降水相态是雨,过程后期随着气温下降转为雪。



结合积雪深度来看,黄河下游强降水区的积雪深度 大多在5 cm 以上,更有地区积雪深度达 10 cm 以 上。依据中国气象局预测减灾司下发的《中短期天 气预报质量检验办法(试行)》中规定,在北方雨夹 雪总量值达 10.0 mm 且雪深≥10 cm 计暴雪,可见 这次发生在黄河中下游地区的天气属于一次大雪 到暴雪过程。

时隔2d后,2021年2月28日—3月1日(简称"过程II"),黄河中下游地区又出现一次强降水 过程。这次主要降水区位于山东中部及河北南部, 最大降水出现在寿光市(潍坊西侧),为36.4 mm。 过程前期部分地区降水相态也以雨为主,后期转为 雪。由积雪深度来看,山西与陕西的北部出现了5~ 10 cm 的积雪,雪量也达到大雪到暴雪量级(图 1b)。

综上,这两次雨转暴雪过程均发生在2月下旬, 过程降水量均较常年明显偏多。相较而言,过程Ⅱ 的降水量较过程Ⅰ略小,其降雪区域较过程Ⅰ偏北 2~3纬距,降雪的范围、雪量较过程Ⅰ偏小,最大降 水中心较过程Ⅰ偏东。



图 1 2021 年 2 月 24 日 08 时—25 日 08 时(a) 与 2 月 28 日 08 时—3 月 1 日 08 时(b)降水量(绿色区域为积雪深度≥ 5 cm,褐色区域为积雪深度≥10 cm)

Fig.1 Precipitation from 08:00 BST 24 to 08:00 BST 25 February (a) and from 08:00 BST 28 February to 08:00 BST 1 March (b) 2021 (green area for snow depth equal to or higher than 5 cm, brown area for snow depth equal to or higher than 10 cm)

2.2 雨雪相态分布及转换特征

过程 I 与过程 II 均发生在黄河中下游地区,均 存在降水相态转换。图 2a 给出了过程 I 相态转换 区域示意图,可以看到:这次过程山东以西大部分 地区的降水相态是雨转雪,山西南部与河北南部是 雨夹雪或雪,山东大部与陕西中南部是雨转雪再转 雨,山东临沂以南是雨。选取降水相态转换频繁的 济南站来观察相态的具体演变(表1)。济南站在 24 日 23:00 气温是 3 ℃,降水相态是雨;25 日 00:00 气温为 1 ℃,降水相态是雨夹雪;01:00 气温为 0.6 ℃,降水相态是雪;06:00 气温回升到 0.8 ℃时, 降水相态又转为雨夹雪;07:00 气温升至 0.9 ℃,降 水相态转为雨。

过程Ⅱ也存在降水相态的转换,从图 2b 中可以 看到:陕西西部降水相态是雪或雨夹雪,黄河以北 的大部地区是雨转雪,黄河以南是雨。针对这次过 程仍以济南站为代表站观察其相态的转换(表1), 3月1日 01:00,济南站气温为 4 ℃时,降水相态是 雨,当气温降为 2 ℃时,降水相态是雨夹雪,气温降 至 1 ℃时,降水相态转为雪。

通过以上分析可知,两次过程存在着共同点: 均发生在2月下旬的黄河中下游地区;降水量均较 大,明显超过常年均值;均存在降水相态的转换,部 分地区达到大雪到暴雪量级。不同点表现为:过程



图 2 2021 年 2 月 24—25 日(a) 与 2 月 28 日—3 月 1 日(b) 黄河中下游的降水相态转换区域示意图(蓝色区域为雨转雪, 网格区域为雨转雪再转雨,黄色竖线区域为雪或雨夹雪,绿色区域为雨)

Fig.2 Areas of phase transition over the middle and lower reaches of the Yellow River from 24 to 25 February (a) and from 28 February to 1 March (b) 2021 (blue area for transition from rain to snow, grid area for transition from rain to snow and to rain again, yellow area in vertical lines for snow or sleet, green area for rain)

I的降水区位置较过程Ⅱ偏南2~3纬距,大到暴雪 的范围较后者广;过程I中的降水相态更复杂,存 在雨转雪又转雨的区域。由济南站的降水演变可 以看出:过程Ⅱ较过程I降水持续时间长;过程I 中,济南站气温在1℃时降水相态是雨,而在过程Ⅱ 中气温在1℃时降水相态是雪。

表 1 两次暴雪过程中 14:00—次日 11:00 的温度与降水相 态演变

Table 1 Evolution of temperature and precipitation phase from 14:00 BST to 11:00 BST the next day during two snowstorms

降水日	降水时间	温度/℃	降水相态
2月24日	14:00	6.0	/
	17:00	6.0	টাল
	20:00	5.0	/
	23:00	3.0	হা
2月25日	02:00	0.3	雪
	05:00	0.6	雪
	08:00	1.0	টা
	11:00	3.0	/
2月28日	14:00	9.0	 雨
	17:00	8.0	টা
	20:00	8.0	টা
	23:00	8.0	詞
3月1日	02:00	2.0	雨夹雪
	05:00	0.2	曹
	08:00	-1.0	雪
	11:00	-2.0	雪

注:"/"表示无降水。

3 雨雪相态分布的环流特征

2021年2月24日20时(图 3a), 欧亚大陆

500 hPa中纬度为纬向环流,有弱的短波槽沿偏西气 流东移,高空槽位于河套—四川一线,槽后为降温 区(24 h 最大变温为-2.0 ℃),存在风速达 20 m·s⁻¹ 的西北风与之配合,槽前有西南气流发展。700 hPa 自中南半岛有强劲的低空急流向北延伸至黄河下 游,最大急流中心强度达22 m·s⁻¹,在低空急流附近 有大片的 *t*−*t*_a≤2 ℃ 的高湿区。850 hPa 低涡中心 位于四川境内,自低涡向东北方向伸展的倒槽中有 切变线存在,可达山东西南部。此时,地面图(图 3c)上,倒槽向北伸展到河套南部,河套北部处于东 北低压底部,黄河中下游恰处于东南风与西北风交 汇的区域,黄河北岸以雪为主,以南以雨为主。夜 间,随着冷空气的扩散南下,黄河南岸的部分地区 降水相态逐渐转为雪或雨夹雪。25日08时,除山 东外,其余地区的降水基本结束,而山东大部地区 降水相态又由雪转为雨。2021年2月28日20时 (图 3b)的大尺度环流形势与 24 日 20 时相近, 500 hPa中纬度也为弱的短波槽,槽后的最大西北风 速为28 m·s⁻¹,也配合有降温区(24 h 最大变温为 -7.2 ℃);700 hPa 有向黄河下游伸展的低空急流 (急流中心强度达 30 m·s⁻¹)与高湿区:850 hPa 有 自四川向北伸展的切变线、倒槽。地面图(图 3d) 上,黄河中下游地区南部为倒槽,北部位于华北低 压底部。河北以西的黄河北岸为降雪区,黄河以南 及山东、河北的大部地区为雨区。夜间,随着冷锋 携带的冷空气快速南下影响河北、山东等地,降水 相态由雨转为雪。

综上,两次过程的大尺度环流背景基本一致, 高空的影响系统均为高空槽、切变线与低空急流。 地面图上,均受南方倒槽与北方低压的共同影响。 正是因为影响系统的基本一致,才使得两次过程在 产生的天气现象方面存在许多共性,表现为多于常



- 图 3 2021 年 2 月 24 日 20 时(a,c) 与 28 日 20 时(b,d) 天气系统配置图(a,b 中,黑线为 500 hPa 等高线,点线为 850 hPa 等高线,蓝色箭头表示 500 hPa 冷空气,绿色箭头表示 700 hPa 低空急流,棕色线为 500 hPa 槽线,双线表示 850 hPa 切变线,蓝色区域表示 500 hPa 降温区,绿色区域表示 700 hPa 高湿区;c,d 中,黑线为等压线,蓝色竖线区域表示 6 h 降雪区,绿色区域表示 6 h 降雨区)
- Fig.3 Configuration maps of synoptic systems at 20:00 BST 24 (a/c) and 20:00 BST 28 (b/d) February 2021 (in Fig.3a and Fig.3b, black line for contour line at 500 hPa, dotted line for contour line at 850 hPa, blue arrow for direction of cold air at 500 hPa, green arrow for jet stream at 700 hPa, brown line for trough line at 500 hPa, double line for shear line at 850 hPa, blue area for cooling area at 500 hPa, green area for high humidity at 700 hPa; in Fig.3c and Fig.3d, black line for isobar, blue area in vertical lines for 6-h snowfall area, green area for 6-h rainfall area)

年的降水量,大范围的降水区,存在着相态转换等。同时,由于影响系统强度、位置的差异,导致降水落区、降水强度的些许差异,主要表现在以下几个方面:①过程 I 中 850 hPa 控制华北地区的是一个高压坝,低空急流向北到达的位置较过程 II 偏南,因而过程 I 中的主要降水区较过程 II 偏南 2~3 个纬距。②过程 I 中 700 hPa 低空急流与 850 hPa 倒槽的位置均较过程 II 偏西,所以过程 I 中的降水中心偏西,而过程 II 中的偏东。③由冷空气的强度来看,过程 I 中 500 hPa 槽后冷空气势力较过程 II 中的偏弱,过程 I 中冷空气以扩散南下的形式影响黄

河中下游地区,而过程 II 中,冷空气配合着冷锋快 速南下,因而过程 II 中的相态转换不及过程 I 中的 复杂。这也提醒预报员在利用相似个例做预报时 需要关注天气系统的位置、强度等的差异,进而对 降水落区、强度进行调整。

4 雨雪相态分布及转换的要素特征

4.1 雨雪相态分布的温度特征

2月24日20时,黄河中下游出现降水,同一时 刻表现为雪、雨夹雪与雨三种相态并存,配合高精 度地形图(图4a)可以发现,在山区及靠近山区的地 区,降水相态是雪或雨夹雪,其余地区多以雨为主。 据统计,山区2m温度小于0℃时,降水相态是雪或 雨夹雪;河北南部与河南北部的平原地区2m温度 小于1℃时,降水相态是雪,2m温度大于2℃时, 降水相态是雨。当2m温度在1~2℃之间时,平原 地区降水相态为雨或雨夹雪,当2m温度在0~1℃ 之间时,会出现雪与雨夹雪并存。2月28日20时 降水开始时,如图4b所示的山区多为雪或雨夹雪, 其余地区则以雨为主。地面2m温度的演变特征是 山区2m温度小于1℃时,降水相态是雪或雨夹雪, 当 2 m温度小于 0.5 ℃时,降水相态多为雪。另外, 过程 I 中 1 000 hPa 温度为 0~2 ℃时会出现雨、雨 夹雪与雪并存,其温度越接近 0 ℃,降纯雪的概率越 大;925 hPa 的温度小于-3 ℃时,90%的测站降水相 态是雪,其温度在-2~0 ℃之间时,会出现雨、雨夹 雪与雪并存。过程 II 的前期(图 4b),山区以雪或雨 夹雪为主,因为山区海拔高度超过 925 hPa,当地没 有探空数据,故只能用地面 2 m 的温度来判断降水 相态。在平原地区,1 000 hPa 与 925 hPa 的温度在 相态转换中的特征基本与过程 I 一致。





图 5 给出了两次过程降水相态转换时刻的温度 平流。从图 5 中可以看到,过程 I 中,黄河中下游地 区近地层的冷平流主要位于 40°N 以北,与冷平流 配合的风场偏弱,济南以南的大部地区处于暖平流 之中,因而河北北部与山东西北部降水相态是雪, 而济南以南多为雨夹雪或雨为主。过程 II 中,黄河 中下游近地层的冷平流势力较过程 I 明显偏强,冷 平流 0 ℃线伸至 40°N 附近,与冷平流配合的北风 势力强盛,随着冷空气的南侵,黄河中下游地区的 降水相态转为雪。

4.2 雨雪相态转换的温度特征

过程 I 中,山东的大部地区在 2 月 25 日清晨出 现由雪转雨的相态逆转,从地面 2 m 温度的变化 中可以发现降水相态逆转的地区在 2 月 25 日清晨 大都升温 0.5~2.0 ℃,但 ECMWF 再分析数据 925 hPa上的温度几乎没有变化,表明地面 2 m 温度 的升高是此次过程相态逆转的关键,这与前人^[13,22] 的研究趋于一致。相态逆转多是由对流层低层存 在暖平流或温度日变化升温造成的^[13]。在过程 I 中降水相态逆转的时间在凌晨,不存在日变化升温 的原因,那是否是暖平流起的作用呢?研究发现, 2 月25 日 08 时 925 hPa 图(图略)上,随着西南倒槽 向东北方向伸展,黄海上空的暖脊明显向东北方向 拱,山东的大部地区处于暖脊后部,温度在-1~0℃ 之间。对应地面图(图略)上,长江下游的江淮气旋 向东北方向移动,其倒槽向北延伸,与之配合的暖 脊控制鲁中以南的大部分地区。此时,山东受倒槽 顶端偏东风影响,来自海面的暖湿气流使得山东大 部地区2m气温升高,因而贴地层的暖平流输送是 造成这次相态逆转的根本原因。

为进一步了解济南上空的要素演变,图6给出了 2021年2月24日20时与28日20时该站的t-lnp图。 从图6a中可以看到,过程I中800~250hPa,露点线 与温度线近于重合,800hPa至地面露点线与温度 线分离,表明对流层中高层空气近于饱和,对流层 低层环境场很干。此时,地面2m温度为4℃,降水 相态是雨。夜间,当降水粒子自高空降落至800hPa 以下干的环境时,下落的降水粒子会快速蒸发,促 使环境场温度降低,同时加上温度日变化的原因, 最终影响到降水相态。2021年2月28日20时从 地面到高空湿层深厚(图6b),降水粒子在近于饱和 的环境中下落,粒子表面蒸发很少,近地层温度的 升降主要取决于冷暖平流的强度。当近地层温度 接近或低于0℃时,降水相态就会发生转换。可见,

图 5 2021 年 2 月 25 日 02 时(a—c)与 3 月 1 日 02 时(d—f)925 hPa(a、d)、1 000 hPa(b、e)与地面(c、f)温度平流(色阶, 单位:10⁻⁴ ℃·s⁻¹)与风场(风矢,单位:m·s⁻¹)(三角形表示济南的位置)

Fig.5 Temperature advection (color scale, units: 10^{-4} °C ·s⁻¹) and wind field (wind vector, units: m·s⁻¹) at 925 hPa (a/d), 1 000 hPa (b/e), and surface (c/f) at 02:00 BST 25 February (a-c) and 02:00 BST 1 March (d-f) 2021 (triangle for location of Jinan)

图 6 2021 年 2 月 24 日 20 时(a) 与 28 日 20 时(b) 济南 *t*-lnp 图 Fig.6 The *t*-lnp diagram at Jinan at 20:00 BST 24 (a) and at 20:00 BST 28 (b) February 2021

近地层环境场的干湿状况也是影响近地层温度的 一个因素。

4.3 监测资料在雨雪转换过程中的变化特征

济南站在降水相态转换的过程中,除了近地 层温度符合上述指标外,是否还有其他因素决定 这两次降水相态的转换呢?借助济南微波辐射计 数据观察该站上空边界层内温度的变化情况(图 略)。过程 I中,24 日白天 800 m 至地面气温明显 高于0℃,降水相态是雨,夜间随着冷空气南下气 温快速下降,25日02时0℃层下降至800m高 度,02—05时0℃层基本维持在这个高度上。近 地面大气被0℃层分为两部分,其上是冷层 (t<0℃),其下是暖层(t>0℃),暖层中气温在 0~1℃间波动,致使该站降水相态由雨转雪后又 转雨。过程II中,28日夜间冷空气随着冷锋快速 南下,济南站上空气温陡降,3月1日05:00气温 降至0℃以下后一直维持负值,所以降水相态维持雪直至过程结束,说明0℃层的快速下降是相态转换的一个原因。

图7给出了两次过程中济南站部分雷达产品随时间的演变。可以看到,2月24日20:00—25日00:00,济南降水相态是雨时,反射率因子(Z)强度由20dBZ升至30dBZ,同时差分反射率(Z_{DR})由21:30的0.2dB升至0.8dB,相关系数(CC)的值由0.50升至0.98,差分传播相移率(K_{DP})总体也呈现出上升的趋势。00:00—01:00,降水相态是雨夹雪,K_{DP}没有变化,CC由0.98升至0.99,Z_{DR}与Z的值呈下降趋势。01:00之后,降水相态转为纯雪,CC的值维持在0.99,其余三个量的曲线均呈波动下降的走势。06:00前后,降水相态由雪转雨,表现最明显的是Z_{DR}的值快速上升,CC值开始下降。2月28

日 17:00—3 月 1 日 01:30,济南的降水相态是雨时, Z 值约为 35 dBZ, K_{DP} 值约为 0.2 (°)·km⁻¹, Z_{DR} 的值 由降雨开始时刻的 3.5 dB 下降至 0.8 dB, CC 的值 由 0.87 缓慢上升至 0.98。01:30—02:30,降水相态 有短时的雨夹雪, Z_{DR}值略有下降, CC 与 K_{DP} 值变化 不大。03:00 降水相态转为纯雪, Z 值约在 30 dBZ 以下, K_{DP} 值约为 0.15 (°)·km⁻¹, CC 的值维持在 0.99, Z_{DR} 的值在 0.2~0.8 dB 之间波动。通过以上 分析可知:在降雨阶段, CC 值约在 0.98 以下, Z_{DR} 在 0.6 dB以上, K_{DP} 值约在 0.2 (°)·km⁻¹以上;在降 雪阶段, CC 值在 0.98~0.99 之间, Z_{DR} 值为 0.2~ 0.8 dB, K_{DR}值约在 0.2 (°)·km⁻¹以下。但降水相态 由雨转雨夹雪时, Z_{DR}、CC 与 K_{DP} 值一般变化不大。 Z 值可以反映降水的强度, 对降水相态指示意义 不大。

图 7 2021 年 2 月 24 日 21 时—25 日 06 时(a) 与 2 月 28 日 17 时—3 月 1 日 06 时(b) 济南站 1.5° 仰角双偏振雷达 Z、 Z_{DR}, CC、K_{DP}的时间演变

Fig.7 Evolution of Z, Z_{DR}, CC, and K_{DP} of dual-polarization radar at 1.5° elevation in Jinan from 21:00 BST 24 to 06:00 BST 25 February (a) and from 17:00 BST 28 February to 06:00 BST 1 March (b) 2021

5 结论

利用常规资料、地面加密自动气象站、双偏振 多普勒天气雷达、微波辐射计、ERA5 再分析资料及 GPS/MET 等多源观测资料,从大尺度环流背景、物 理量演变及雷达回波特征入手,分析了两次暴雪过 程强降水产生的原因,并剖析了两次过程中雨雪相 态分布及转换的特征。主要结论如下:

(1)两次过程均发生在黄河中下游地区,均存 在降水相态的转换,其中过程 I 存在雨转雪又转雨 的区域,表明该过程降水相态更复杂。过程 I 中降 雪的强度、范围较过程 II 偏大,强降水中心位置较 过程 II 偏西、偏南。 (2)两次过程的天气尺度影响系统均是高空 槽、切变线、低空急流与地面倒槽,但由于这些系统 的强度、位置等不同,导致两次过程的降水落区与 强度略有差异。

(3)在降水相态转换的季节,近地层的温度变 化是判断相态转变的重要指标,尤其是地面2m气 温对相态的转换有一定的指示性。这两次过程中: 在山区,当2m气温小于0.5℃时,降水相态多为 雪,当气温小于1℃时,多为雪或雨夹雪并存;在平 原地区,当2m气温在1~2℃之间时,降水相态为 雨或雨夹雪,当气温为0~1℃时,会出现雪与雨夹 雪并存。

(4)由雷达回波来看,在降雨阶段,CC 值约在

0.98 以下,*Z*_{DR}在 0.6 dB 以上,*K*_{DP}值约在 0.2 (°)・ km⁻¹以上;在降雪阶段,*CC* 值在 0.98~0.99 之间, *Z*_{DR}值为 0.2~0.8 dB,*K*_{DP}值约在 0.2 (°)・km⁻¹以 下。但降水相态由雨转雨夹雪时,*Z*_{DR}、*CC* 与 *K*_{DP}值 变化不大。

参考文献:

- [1] 陈雪珍,慕建利,赵桂香,等.华北暴雪过程中的急流特 征分析[J].高原气象,2014,33(4):1069-1075.
- [2] 王喜,王琴,向阳,等.2018年1月江苏3次致灾暴雪成 因对比分析[J].海洋气象学报,2020,40(1):134-143.
- [3] 杨成芳,李泽椿.近十年中国海效应降雪研究进展[J]. 海洋气象学报,2018,38(4):1-10.
- [4] 刘畅,杨成芳,郑丽娜.江淮气旋影响下的山东降雪过 程相态特征[J].海洋气象学报,2019,39(3):74-83.
- [5] 杨成芳,刘畅,郭俊建,等.山东相态逆转降雪天气的特征与预报[J].海洋气象学报,2017,37(1):73-83.
- [6] 李燕,赛瀚,刘晓初,等.辽宁东南部一次强降雪天气的 成因分析[J].海洋气象学报,2021,41(3):84-93.
- [7] 熊秋芬,张玉婷,姜晓飞,等.锢囚气旋钩状云区暴雪过 程的水汽源地及输送分析[J].气象,2018,44(10): 1267-1274.
- [8] 彭霞云,刘汉华,李文娟,等.一次局地暴雪过程低层降 温机制分析[J].气象,2020,46(8):1015-1025.
- [9] 范俊红,易笑园.大范围持续暴雪过程中多种影响系统的对比分析[J].气象学报,2019,77(6):965-979.
- [10] 阎琦,崔锦,杨青.2018 年辽宁两次雨转暴雪过程对比 分析[J].干旱气象,2019,37(6):944-953.
- [11] 朱蕾,王清平,王勇,等.乌鲁木齐两次极端暴雪天气过 程对比分析[J].暴雨灾害,2020,39(3):225-233.

- [12] 罗布坚参,假拉,德庆,等.南支槽影响下西藏高原南部
 3次暴雪天气特征分析[J].气象,2019,45(6):
 862-870.
- [13] 杨成芳,姜鹏,张少林,等.山东冬半年降水相态的温度 特征统计分析[J].气象,2013,39(3):355-361.
- [14] 苗爱梅, 董文晓, 贾利冬, 等. 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, 2014, 32(1):23-31.
- [15] 宿秋兰,郑丽娜.2020 年初山东一次雨转暴雪天气过 程分析[J].陕西气象,2021(1):15-20.
- [16] THÉRIAULT J M, STEWART R E, HENSON W. On the dependence of winter precipitation types on temperature, precipitation rate, and associated features [J]. J Appl Meteor Climatol, 2010, 49(7):1429-1442.
- [17] LACKMANN G M, KEETER K, LEE L G, et al. Model representation of freezing and melting precipitation: implications for winter weather forecasting [J]. Wea Forecasting, 2002, 17(5):1016-1033.
- [18] KAIN J S, GOSS S M, BALDWIN M E. The melting effect as a factor in precipitation-type forecasting [J].
 Wea Forecasting, 2000, 15(6):700-714.
- [19] 翟亮,郭淳薇,马新成,等.北京 2016 年"11·20"初雪预 报偏差分析[J].气象,2018,44(1):151-158.
- [20] 张佃国, 王俊, 李晓印, 等. 济南及周边地区大气气溶胶 空间分布特征[J]. 高原气象, 2011, 30(5): 1346-1355.
- [21] 丁虹鑫,马舒庆,杨玲,等.云雷达和微波辐射计联合反 演大气湿度廓线的初步研究[J].气象,2018,44(12): 1604-1611.
- [22] 刘畅,杨成芳,宋嘉佳.一次江淮气旋复杂降水相态特 征及成因分析[J].气象科学,2016,36(3):411-417.