

王珊珊,钟敏,陈璇,等,2023.2022年湖北省两次雨雪过程对比及预报偏差分析[J].气象,49(7):819-829. Wang S S, Zhong M, Chen X, et al, 2023. Comparison and forecast deviation analysis of two snow and rain events in Hubei Province in 2022[J]. Meteor Mon, 49(7):819-829(in Chinese).

## 2022年湖北省两次雨雪过程对比及预报偏差分析<sup>\*</sup>

王珊珊 钟敏 陈璇 柳草 王艳杰 章翠红 韩芳蓉

武汉中心气象台,武汉 430074

**提 要:**利用高空、地面观测资料和欧洲中期天气预报中心(ECMWF)ERA5再分析资料,对2022年湖北省两次雨雪过程的环流形势和环境条件进行了对比分析,并探讨了两次过程对降水相态、降雪量及积雪深度预报的偏差及原因。结果表明2022年1月27—29日过程低槽偏西,急流相对弱且维持时间短,中低层气温高且以暖平流为主,云中冰相粒子含量低,降水相态以雨为主,降雪量主要偏差是由于降水相态预报偏差和ECMWF模式对低空急流预报偏强导致降雪量预报偏大以及对积雪融化机制预报不足使得积雪深度预报偏大。2022年2月6—7日过程低槽偏东,急流相对强且维持时间长,中低层气温更低,云中冰相粒子含量高,低层相对湿度低,主要以降雪为主,ECMWF模式对该过程雨雪量和降水相态的预报均和实况接近,但边界层气温预报偏高和积雪融化能力预报不足是造成积雪深度变化误差的主要原因。对模式降雪量和积雪深度的订正需关注云中冰相粒子的含量、近地层气温的订正以及积雪融化能力的分析。

**关键词:**降水相态,边界层降温,预报误差

中图分类号: P456, P458

文献标志码: A

DOI: 10.7519/j. issn. 1000-0526. 2023. 062001

### Comparison and Forecast Deviation Analysis of Two Snow and Rain Events in Hubei Province in 2022

WANG Shanshan ZHONG Min CHEN Xuan LIU Cao

WANG Yanjie ZHANG Cuihong HAN Fangrong

Wuhan Central Meteorological Observatory, Wuhan 430074

**Abstract:** Based on the upper-air, surface observation and ERA5 hourly reanalysis data, the circulation situation and environmental conditions of two snow and rain events in Hubei Province in 2022 are compared and analyzed, and the errors and causes of the two events in the prediction of precipitation type, snowfall and snow depth are discussed. The results show that the trough of the 27—29 January 2022 event was westward, the jet stream was relatively weak and the maintenance duration was short. The temperature in the middle and lower troposphere was high, dominated by warm advection. The ice crystal content was low, so the precipitation type was dominated by rainfall. The main errors of snowfall were due to the deviation of precipitation type forecast, the forecast of strong low-level jet stream by the model, which led to the total snowfall amount less than that of the forecast, and the insufficient forecast of snow melting mechanism led to snow depth lower than that of the forecast. In the 6—7 February 2022 event, the trough was easterly, the jet was relatively strong and maintained for a long time, the temperature in the middle and lower troposphere was lower, the ice crystal content was high, and the relative humidity in the lower layer was low, so the precipitation was mainly dominated by snowfall. The prediction of snowfall amount and

\* 湖北省气象局重点课题(2022Z01、2019Z01)共同资助

2022年6月6日收稿; 2023年6月19日收修定稿

第一作者:王珊珊,主要从事中短期天气和短时临近预报业务研究. E-mail:52862776@qq.com

precipitation type by the ECMWF model were close to obsevations, but the high boundary layer temperature prediction and insufficient snow melting ability prediction were the main reasons for the errors of snow depth change. Therefore, correction of model snowfall amount and snow depth should focus on ice crystal content, boundary layer temperature and snow melting capacity by model.

**Key words:** precipitation type, temperature drop in boundary layer, forecast error

## 引 言

2022 年 1 月底到 2 月初正值春运高峰期,湖北省先后出现了两次雨雪天气,分别为 1 月 27—29 日(以下简称“0127”过程)和 2 月 6—7 日(以下简称“0206”过程)。两次雨雪天气地面均受弱冷空气影响,但降雪量、积雪深度差别大,两次降雪对春运交通、城市运行、农业的影响是不同的。准确的预报可以为政府、部门和公众采取不同的防御措施提供支撑。

雨雪转换的时间节点和雨雪分界线是这两次过程降雪量和积雪深度预报的关键点和难点。杨舒楠等(2017)分析了 2012 年 11 月 3—4 日华北雨雪天气过程指出,雨雪相态的转变取决于对流层低层水平温度平流状况。廖晓农等(2013)分析了 2012 年 3 月 17 日北京一次雨雪过程,指出造成降水相态不同的关键在于云中的成雪机制以及雪花下落过程中发生的变化。有研究指出,地面气温对降水相态变化影响程度最大(董伟等,2019),当地面气温位于 0~2℃ 的临界气温时降水相态的分析尤为复杂。陈双等(2019)对 2001—2013 年临界气温下的降雪时空分布与降雨的垂直热力特征进行了研究,指出临界气温下,降水相态为雨或者雪对应的平均气温廓线最大差异位于 650 hPa 附近,平均湿度廓线差异则主要位于低层。徐辉和宗志平(2014)指出降水相态严重依赖于气温的垂直结构,其细微的改变将决定最终到达地面的降水类型,同时雨雪转换时发生的融化和蒸发等一系列的相变过程又导致环境气温的降低,二者是相互依赖,相互影响的。漆梁波和张瑛(2012)考虑温度和厚度因子提出了中国东部降水相态的识别判据。积雪深度预报是另一难点,有研究指出,雪水比是新增积雪深度预报的一个重要参数,但我国降雪过程的雪水比具有明显的区域和季节特征(符娇兰等,2022)。近年来,学者们对北方降雪过程的积雪深度和雪水比之间的关系开展了一些分析研究(崔锦等,2015;杨成芳和刘畅,2019;王一颤等,2019;杨成芳和朱晓清,2020;杨成芳和赵宇,

2021)。陈双和符娇兰(2021)分析了两次降雪过程的雪密度差异化的天气学原因,为积雪深度的预报提供了预报参考。但目前针对南方的相关分析还比较少。

目前模式的降水相态产品和积雪深度产品是业务预报的主要参考,其中降水相态产品主要由预报的云内水成物含量的垂直分布结合其预报的环境气温垂直廓线诊断得到(Hersbach et al, 2018),然而实际的降水相态与高空云中的冰晶或雪花粒子的含量、形态以及冰晶的增长等一系列复杂的物理过程有关。胡宁等(2021)对 2020 年华北一次极端降雪的误差分析指出模式预报的地面气温较观测低,从而过早预报转雪时间。张亚妮等(2022)通过对 2020 年 2 月 14 日华北降雪的雪水比分析,指出雪水比预报偏差是造成积雪深度出现偏差的一个主要原因。因此,不管是基于模式的预报产品还是基于特定层次的气温、厚度值的判断,对雨雪相态转换时间预报依然是当前的难点。

2022 年初的这两次雨雪过程在降雪量和积雪深度预报上都出现了一定的偏差。同样在弱冷空气影响下,“0127”过程模式预报的降雪量和积雪深度比实况明显偏大,且实况出现雨、雪、雨夹雪频繁转换;而“0206”过程模式预报的降雪量和积雪深度与实况接近,以纯雪为主。由于预报员对弱冷空气影响下的降水相态转换机制理解不够,受“0127”过程预报偏差的影响,对模式预报的降雪量和积雪深度向小调整,造成预报比实况明显偏小。因此有必要对这两次过程进行对比分析,揭示两次雨雪过程的差异,同时探讨预报偏差原因以及订正思路,为湖北省雨雪预报提供依据。

## 1 降雪天气实况与预报偏差

### 1.1 资料数据

本文使用资料包括欧洲中期天气预报中心 ERA5 再分析资料(分辨率为  $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ ),08 时和 20 时(北京时,下同)的高空观测数据,逐小时的

地面观测数据(国家级气象站);CMA-GFS、ECMWF细网格、NCEP等数值模式预报产品。

## 1.2 天气实况

第一次雨雪过程(“0127”过程)为2022年1月27日00时至29日20时。此次雨雪过程降水相态转换复杂,雨、雨夹雪、雪交替出现,主要的降雪时段为27日夜间至28日上午,湖北省自西向东逐渐转雪,28日12—20时湖北省大部又先后转为雨或雨夹雪,28日夜间至29日上午湖北省自南向北转为纯雪,29日中午以后湖北省大部再次转为雨或雨夹雪。鄂东南雨雪总量为30~40 mm,其他地区为5~20 mm,其中鄂西北、江汉平原南部和鄂东南纯雪量为5~12 mm。图1给出了此次过程的雨雪总量(图1a)和积雪深度(图1b),过程最大积雪深度为10 cm(神农架),鄂东北没有积雪,其他大部地区积雪深度为1~6 cm。

第二次雨雪过程(“0206”过程)为2022年2月6日08时至7日14时。此次雨雪过程特点为降雨时间短,转雪快,转雪后为持续降雪。主要的降雪时段为6日17时至7日12时,湖北省自西向东逐渐转大到暴雪,鄂东南还出现大暴雪。湖北东部和南部雨雪总量为15~31 mm,其中纯雪量为10~29 mm。鄂西北和江汉平原北部雨雪总量为5~15 mm,其中纯雪量为5~10 mm。图1给出了此次

过程的雨雪总量(图1c)和积雪深度(图1d),湖北省大部地区积雪深度为5~15 cm,鄂东南和鄂西南局部达到15~19 cm。

## 1.3 预报偏差与难点

两次雨雪过程都是处于春运高峰期。针对“0127”过程,武汉中心气象台于1月24日发布预报:“25—27日降雪区主要位于中西部,十堰、襄阳、神农架、宜昌、随州、荆门等地有大到暴雪、局部大暴雪,东部以雨为主;28—29日,降雪区将东扩并覆盖全省,江汉平原东部、鄂东北、鄂东南有大到暴雪、局部大暴雪,其他地区中到大雪。全省大部地区积雪深度为5~15 cm,局部可达20 cm以上”。实况显示,此次过程降雪量和积雪深度预报明显偏大,特别是湖北省东部的积雪深度实况与预报相比出现较大的偏差。

针对“0206”过程,武汉中心气象台于2月5日发布预报:“2月5日晚至7日白天,湖北省自西向东将有一次明显雨雪天气过程,湖北省西部有中到大雪,局部暴雪,积雪深度为3~8 cm,局部可达10 cm以上,6日晚至7日白天湖北省中东部和南部地区将转为中到大雪,局部暴雪,积雪深度可达2~5 cm”。实况显示,此次过程降雪量预报比实况偏小1个量级,东部积雪深度实况比预报明显偏小。

造成这两次过程预报偏差的主要原因是对降水

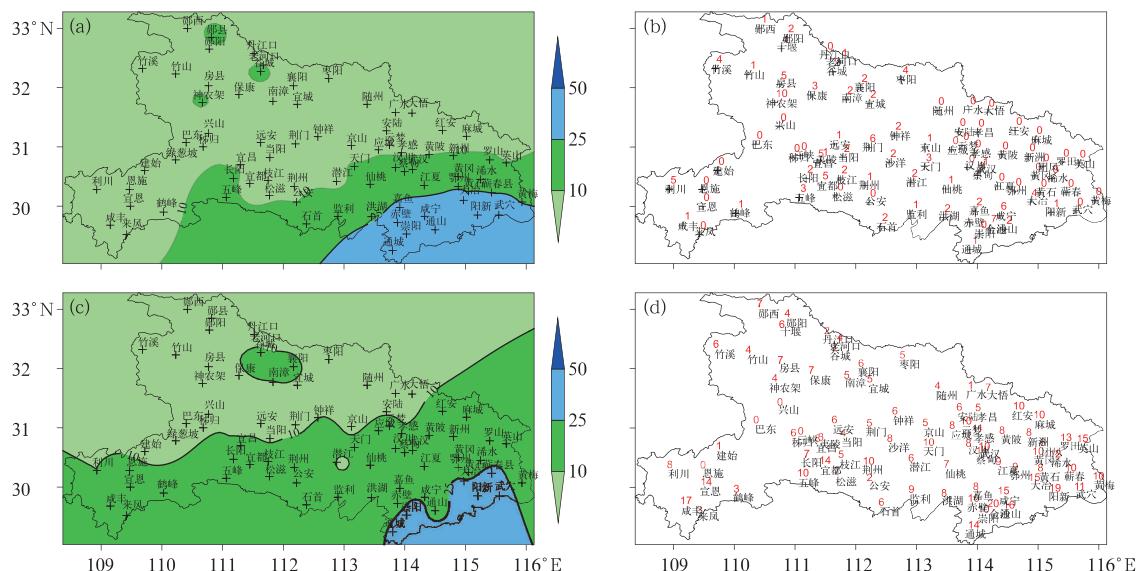


图1 2022年湖北(a,b)“0127”过程和(c,d)“0206”过程的(a,c)累计降水量  
(填色和等值线,单位:mm)和(b,d)最大积雪深度(单位:cm)

Fig. 1 Distribution of (a, c) accumulated precipitation (colored and contour, unit: mm) and (b, d) max snow depth (unit: cm) of (a, b) the 27—29 January event and (c, d) the 6—7 February event in 2022 in Hubei Province

相态转换时间、降雪量和近地层气温的预报出现偏差,从而进一步导致了积雪深度的预报偏差,下文主要从天气形势、热力和水汽条件对两次过程进行对比,并分析其预报偏差。

## 2 两次雨雪天气成因对比分析

### 2.1 环流形势

“0127”过程。500 hPa 南支槽加深,但主槽偏西,位于孟加拉湾东部,中纬度北支槽位于青藏高原东北部(图 2a),南北两支槽均移速较慢,28 日夜间至 29 日白天才快速东移影响湖北。27—28 日白天中上层动力抬升条件较差,垂直速度中心主要位于 600~500 hPa,达到  $-1.1 \text{ Pa} \cdot \text{s}^{-1}$ ,而 400 hPa 以上垂直速度仅为  $-0.2 \text{ Pa} \cdot \text{s}^{-1}$ ,不利于水汽抬升到冻

结高度,水汽的辐合主要在中低层(图 2c)。27 日后半夜到 28 日白天,700 hPa 西南急流加强并影响湖北,急流轴风速达  $22 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,27 日后半夜转雪后,武汉站西南风风速为  $8 \sim 16 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,并在持续 7 h 后转为偏西风,其中  $12 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  以上风速维持 5 h。850 hPa 上湖南中部至江西北部有东西向切变线维持,湖北位于切变线北侧偏东气流中。

“0206”过程。500 hPa 印缅附近南支槽较深,中纬度河套西部有北支槽,南北两支槽移动较快,6 日夜间靠近湖北并同位相叠加(图 2b),为 6—7 日降雪提供了较好的动力抬升条件,垂直速度中心达到  $-1.0 \text{ Pa} \cdot \text{s}^{-1}$ ,位于 400~300 hPa,有利于水汽抬升到足够高度形成冰晶(图 2d)。受南支槽东移影响,6 日夜间 700 hPa 西南急流加强,急流轴风速达  $26 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,6 日夜间转雪后,武汉站西南风风速为  $16 \sim 20 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,持续 8 h 后转为偏西风。6 日夜间

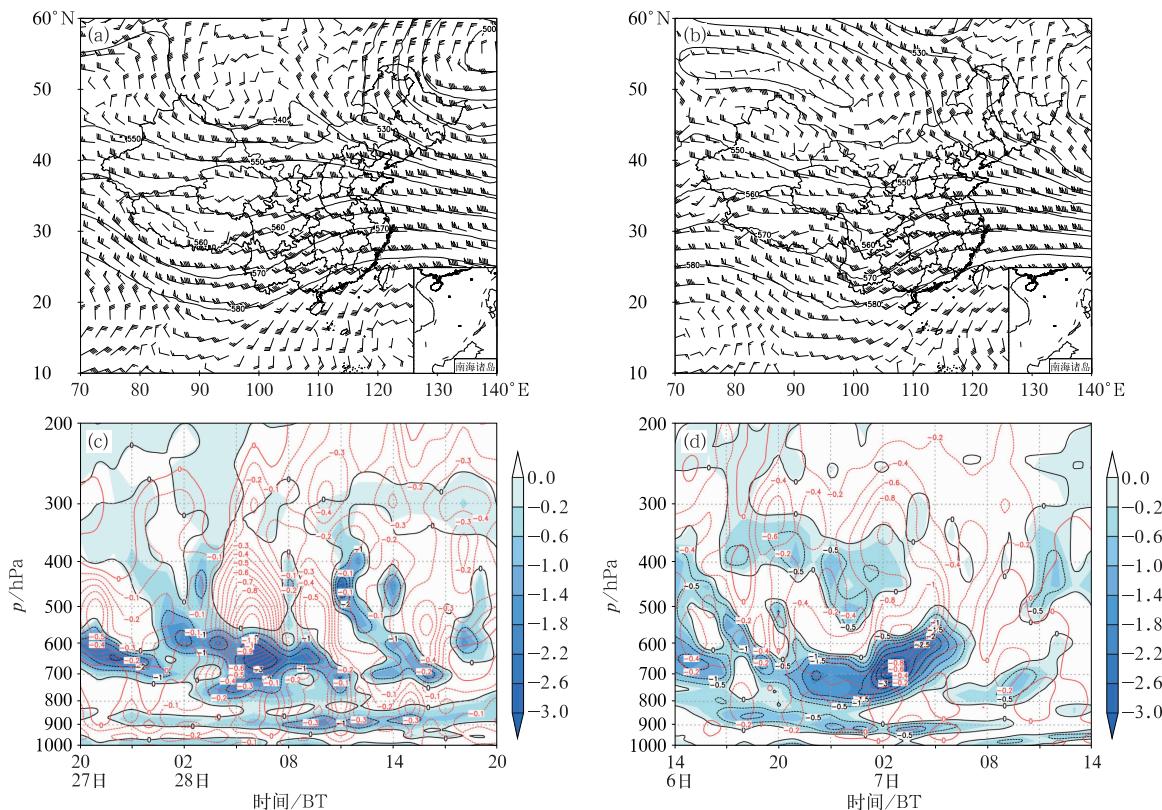


图 2 2022 年(a)1月 28 日 08 时,(b)2 月 6 日 20 时 500 hPa 位势高度(黑线,单位:dagpm)和风场(风羽),(c)1 月 27 日 20 时至 28 日 20 时,(d)2 月 6 日 14 时至 7 日 14 时武汉站的水汽通量散度(填色和黑线,单位: $10^{-7} \text{ g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ )和垂直速度(红线,单位: $\text{Pa} \cdot \text{s}^{-1}$ )时间-高度剖面

Fig. 2 (a, b) Geopotential height (black line, unit: dagpm) and wind (barb) at 500 hPa at (a) 08:00 BT 28 January and (b) 20:00 BT 6 February 2022, (c, d) time-height profile of moisture flux divergence (colored and black line, unit:  $10^{-7} \text{ g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ ) and vertical velocity (red line, unit:  $\text{Pa} \cdot \text{s}^{-1}$ ) at Wuhan Station (c) from 20:00 BT 27 to 20:00 BT 28 January, (d) from 14:00 BT 6 to 14:00 BT 7 February 2022

850 hPa 在湖北东部有低涡生成并加强,使得整层的上升运动明显加强并形成涡旋云系。

## 2.2 水汽和热力条件

Huffman and Norman(1988)研究表明,  $-10^{\circ}\text{C}$  是区分云中是否有冰晶的关键阈值。以武汉站为例,对比两次过程温湿条件的差异,图 3a 为武汉站 1 月 27 日 08 时至 28 日 17 时相对湿度和气温的垂直分布,可以看出相对湿度大于 80% 的层次主要在 500 hPa 以下,与实况探空(图 4c)一致,表明这次过程只有中低云,且气温大部分在  $-10^{\circ}\text{C}$  以上,主要以液态水为主,云中只有少数时次有冰晶。从云中冰相粒子和液态水粒子含量随时间的演变可以看出

(图 3c),“0127”过程中,仅在 28 日 05—11 时,云中冰相粒子含量略高,且位于 500~400 hPa,厚度小,维持时间短,而 700~600 hPa 云中液态水粒子含量较高,因此武汉的降水相态在雨、雨夹雪和雪之间反复转换,没有出现连续性的降雪。

而从武汉站 2 月 6 日 08 时至 7 日 14 时相对湿度和气温的垂直分布来看(图 3b),整层湿度深厚,云顶高,高云(相对湿度  $>80\%$ )伸展到 250 hPa,实况探空也显示(图 4d),湿层伸展到 9 km,气温在  $-20^{\circ}\text{C}$  以下。武汉 6 日 22 时转雪,对应的云中冰相粒子含量从 6 日 20 时以后开始升高(图 3d),至 7 日 08 时共维持了 10 h 以上,并且云中冰相粒子含量高的层次比“0127”过程厚,位于 600~350 hPa。由于整层气

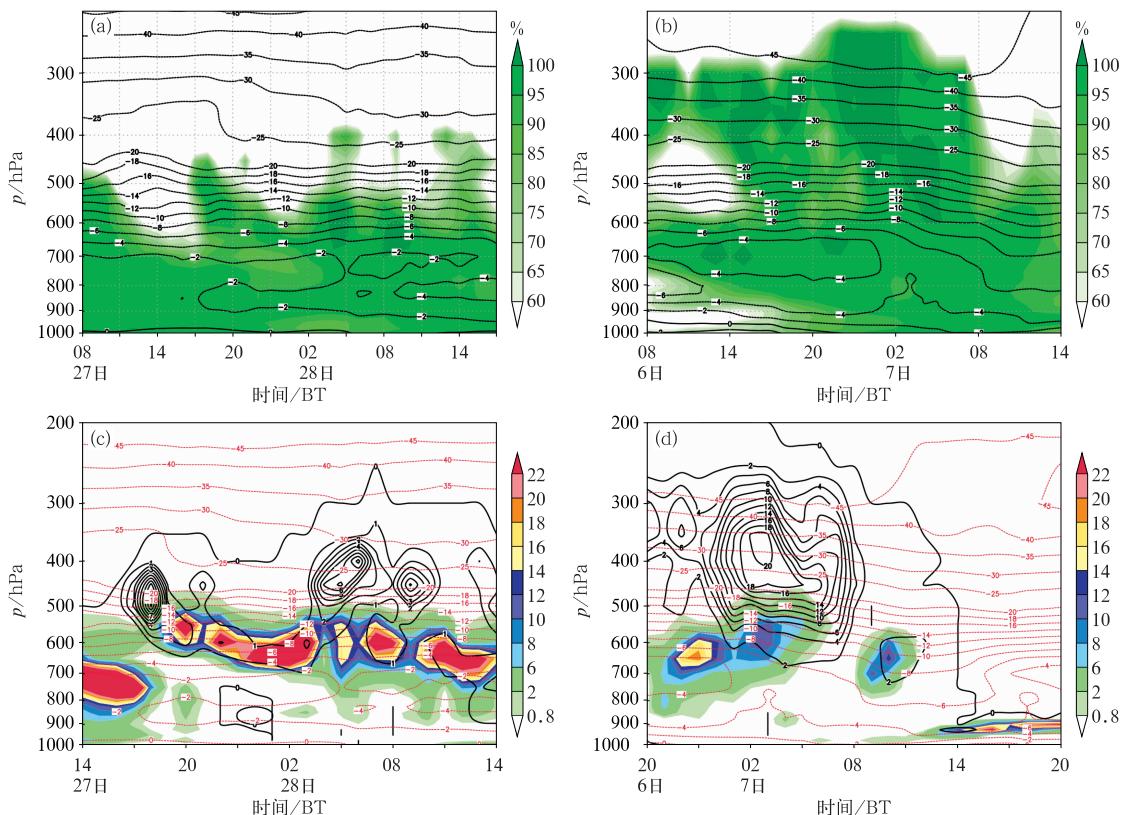


图 3 2022 年武汉站(a)1月 27 日 08 时至 28 日 17 时,(b)2月 6 日 08 时至 7 日 14 时气温(黑线,单位:  $^{\circ}\text{C}$ )和相对湿度(填色)的时间-高度剖面,(c)1月 27 日 14 时至 28 日 14 时,

(d)2月 6 日 20 时至 7 日 20 时云中冰相粒子含量(黑线,单位:  $10^{-5} \text{ kg} \cdot \text{kg}^{-1}$ )、

云中液态水粒子含量(填色,单位:  $10^{-5} \text{ kg} \cdot \text{kg}^{-1}$ )和温度(红线,单位:  $^{\circ}\text{C}$ )的时间-高度剖面

Fig. 3 Time-height profiles of (a, b) temperature (black line, unit:  $^{\circ}\text{C}$ ) and relative humidity

(colored) (a) from 08:00 BT 27 to 17:00 BT 28 January and (b) from 08:00 BT 6

to 14:00 BT 7 February, and (c, d) specific cloud ice water content (black line,

unit:  $10^{-5} \text{ kg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ), specific cloud liquid water content (colored, unit:  $10^{-5} \text{ kg} \cdot \text{kg}^{-1}$ )

and temperature (red line, unit:  $^{\circ}\text{C}$ ) (c) from 14:00 BT 27 to 14:00 BT 28 January,

and (d) from 20:00 BT 6 to 20:00 BT 7 February 2022 at Wuhan Station

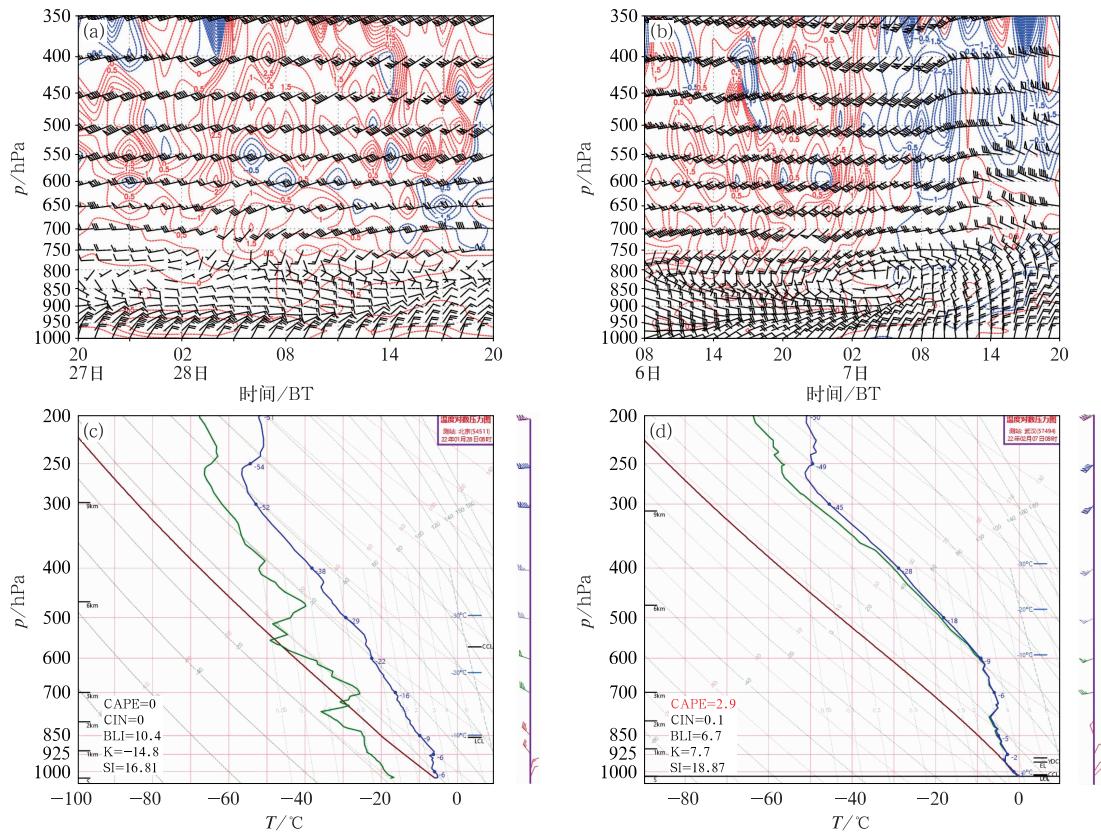


图 4 2022 年武汉站(a)1月 27 日 20 时至 28 日 20 时,(b)2 月 6 日 08 时至 7 日 20 时的温度平流(等值线,单位: $10^{-5} \text{ }^{\circ}\text{C} \cdot \text{s}^{-1}$ )和风场(风羽)  
时间-高度剖面,(c)1月 28 日 08 时,(d)2 月 7 日 08 时的  $T\text{-ln}p$  图

Fig. 4 (a, b) Time-height profiles of temperature advection (contour, unit:  $10^{-5} \text{ }^{\circ}\text{C} \cdot \text{s}^{-1}$ ) and wind (barb) (a) from 20:00 BT 27 to 20:00 BT 28 January and (b) from 08:00 BT 6 to 20:00 BT 7 February, (c, d)  $T\text{-ln}p$  diagrams at (c) 08:00 BT 28 January and (d) 08:00 BT 7 February 2022 at Wuhan Station

温在  $0^{\circ}\text{C}$  以下,冰晶在下落过程中基本不融化,因而在此期间出现连续性降雪,强降雪持续至 7 日 08 时后才减弱。

观测和理论研究(杨军等,2011;陈双等,2019)均表明,冰晶的融化通常发生在  $0\text{--}5^{\circ}\text{C}$  的气温范围内,同时相对湿度越高越容易融化,如果环境的相对湿度由 100% 变为 90%,雪花下落融化的距离会增加 100 m。因此当近地层存在大于  $0^{\circ}\text{C}$  的气温层,低层的相对湿度也影响冰晶下落时融化的程度,从而影响降水粒子落到地面时的相态。对比发现这两次过程低层湿度也存在明显的差别。“0127”过程降雪前湖北省一直维持阴雨天气,900 hPa 相对湿度始终大于 80%,且在近地层有大于  $0^{\circ}\text{C}$  薄层存在,冰晶下落过程中易融化;“0206”过程降雪前期无降水,降雪开始前低层相对湿度  $<60\%$ ,虽然近地层也有大于

$0^{\circ}\text{C}$  薄层存在,但由于降水粒子的蒸发吸热作用会引起周围环境气温的降低,所以需要更高的环境气温来完全融化固态降水粒子(Stewart, 1992; Stewart et al., 2015),冰晶完全融化的下落距离更长。

从上述分析可知,环境的气温和湿度会影响降水相态,反过来,水物质相变也会导致低层环境的降温(彭霞云等,2020)。以 925 hPa 为例,“0127”过程中 28 日 04—06 时武汉站 925 hPa 气温下降  $0.8^{\circ}\text{C}$ ;同样,在“0206”过程中,6 日 17—20 时武汉站 925 hPa 气温下降  $1.1^{\circ}\text{C}$ 。地面气温下降更为明显,1 月 28 日 04—06 时地面气温下降  $1.7^{\circ}\text{C}$ ,2 月 6 日 19—20 时下降  $2.7^{\circ}\text{C}$ 。此时武汉站 925 hPa 温度平流为暖平流(图 4a, 4b),且垂直运动为上升运动(图 2c, 2d)。根据温度倾向方程,温度的局地变化由水平温度平流、垂直运动引起的垂直方向热量输

送和非绝热加热共同组成,由于温度平流和垂直运动都无法解释低层的降温,主要的形成原因只能是非绝热加热作用。非绝热加热项包括太阳短波辐射、地面长波辐射、水汽相变潜热、地面与大气之间的热量和水汽通量等。两次过程在开始降雪时均有厚云层覆盖,且在夜间,因此可忽略太阳辐射的影响,主要考虑相变潜热的影响。根据上文分析,“0206”过程925 hPa以上层次的气温比“0127”过程低,降雪开始前,1000 hPa和地面气温比“0127”过程高,但是冰晶含量多,且降雪时段是夜间,因此受相变降温的影响,地面气温持续下降并维持在0℃附近,而“0127”过程,冰晶粒子少,且降雪时段为早晨到上午,地面气温还受到太阳辐射的影响出现波动,降水相态在雪、雨夹雪和雨之间转换。

综上所述,两次过程850 hPa切变辐合区南北相差200 km左右,“0206”过程高低空系统配置决定了整层的动力抬升强,更有利于水汽向高层伸展,高层冰晶含量高,而“0127”过程低层辐合较强,但是高层动力条件弱,因此水汽集中在500 hPa以下,云中以液态水为主。冰晶和气温的垂直分布是两次过程降水相态差异的主要原因,低层湿度和相变降温

机制也会影响环境的温度,进而影响预报员对降水相态的判断。

### 3 两次雨雪预报偏差分析

本节重点围绕三个方面的偏差进行分析:(1)降雪量预报偏差:“0127”过程湖北省纯雪量实况为中到大雪,较预报的大到暴雪、局部大暴雪明显偏小;“0206”过程湖北省纯雪量实况为大到暴雪、局部大暴雪,较预报的中到大雪明显偏大。(2)降水相态预报偏差:“0127”过程降水相态比预报更复杂,在雨、雪、雨夹雪反复转换;“0206”过程转雪时间比预报偏早3 h左右。(3)积雪深度预报偏差:“0127”过程实况积雪深度为1~6 cm,与预报的5~15 cm相比明显偏小;“0206”过程实况积雪深度为5~15 cm,其中鄂东为15~19 cm,与预报的2~5 cm相比明显偏大。

在两次过程中,ECMWF模式预报的各层温度、降水相态和积雪深度与CMA-GFS、NCEP模式相比,均与实况最为接近,因此下文主要把ECMWF模式的预报和实况做对比分析(图5,图6)。

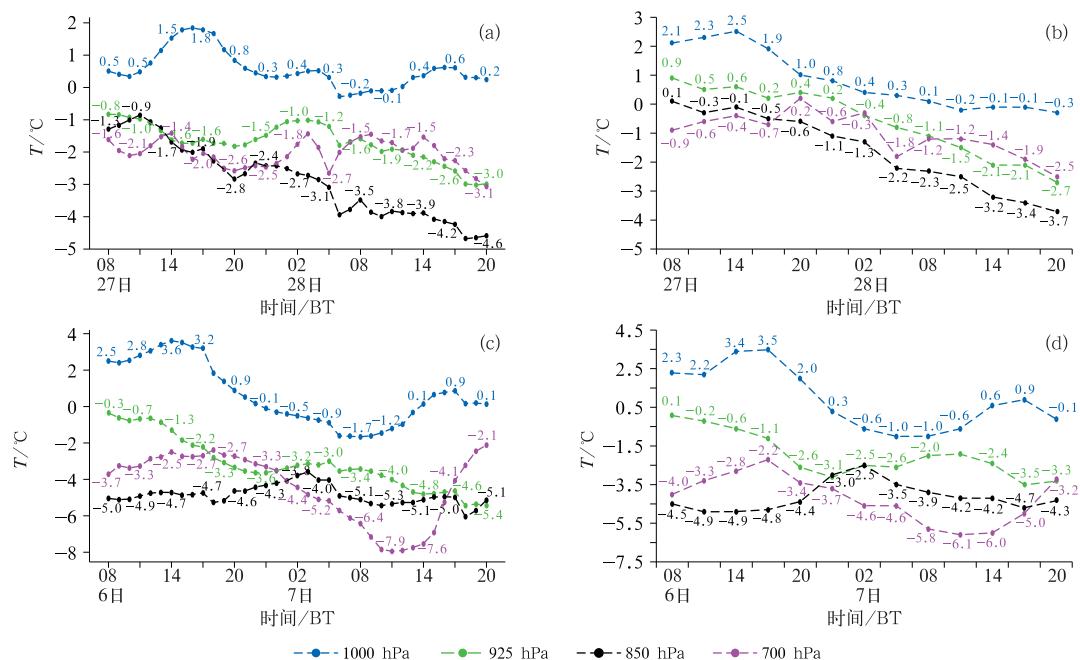
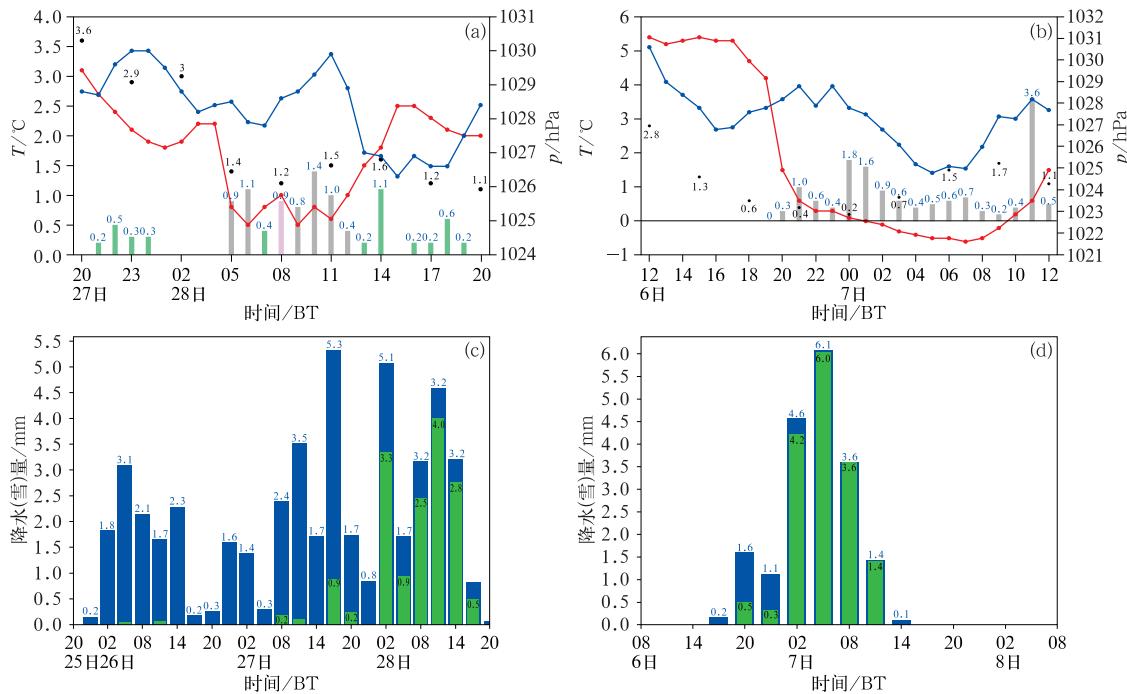


图5 2022年武汉站(a,b)“0127”过程和(c,d)“0206”过程的(a,c)ERA5数据和(b,d)ECMWF预报的各层气温变化

Fig. 5 Change curves of temperature based on (a, c) ERA5 data and (b, d) ECMWF forecasts of (a, b) the 27–29 January event and (c, d) the 6–7 February event in 2022 at Wuhan Station



注:图 a,b 中,绿色、粉色、灰色直方图分别代表相态为雨、雨夹雪、纯雪。

图 6 2022 年(a)武汉站 1 月 27 日 20 时至 28 日 20 时, (b)云梦站 2 月 6 日 12 时至 7 日 12 时的降水量(直方图, 单位: mm)、地面 2 m 气温(红线)、海平面气压(蓝线)观测和 ECMWF 模式地面 2 m 气温预报(黑点, 单位: °C), (c,d)ECMWF 模式预报的(c)武汉站 1 月 25 日 20 时至 28 日 20 时, (d)云梦站 2 月 6 日 08 时至 8 日 08 时总降水量(蓝色)和降雪量(绿色)

Fig. 6 (a, b) Change curves of precipitation (column, unit: mm), 2 m temperature (red line), sea level pressure (blue line) of observation and 2 m temperature of ECMWF forecast (black dot, unit: °C) (a) from 20:00 BT 27 to 20:00 BT 28 January at Wuhan Station, (b) from 12:00 BT 6 to 12:00 BT 7 February at Yunmeng Station, (c, d) total precipitation (blue) and snowfall (green) of ECMWF model forecasts (c) from 20:00 BT 25 to 20:00 BT 28 January at Wuhan Station, (d) from 08:00 BT 6 to 08:00 BT 8 February at Yunmeng Station in 2022

### 3.1 降雪量预报

“0127”过程,ECMWF 模式预报的纯雪量比实况偏大 1 倍左右,这主要由于对急流预报偏强造成的。武汉站 28 日 07—11 时是主要的纯雪阶段,此时 700 hPa 转为西南风,风速达  $12\sim14 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,这较模式预报的  $20 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  明显偏小。急流预报偏强,从而导致降水量预报较实况偏大。由实况可知,武汉站仅出现 7 mm 的降雪,而模式预报的雪量达到 14 mm,偏大约 1 倍,详见第 3.3 节。“0206”过程,武汉站 6 日 22 时至 7 日 11 时是主要的纯雪阶段,其中 6 日 21 时 700 hPa 西南风风速达  $20 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,ECMWF 预报的风速与实况一致,预报的降雪量为 16 mm,接近实况的 14 mm。

### 3.2 降水相态预报

雨转雪的时间节点往往是降雪量和积雪深度预报的关键点,特别是在临界气温条件下(陈双等,2019),雨、雪、雨夹雪都有可能出现,给预报员预报雨雪相态带来困难。降水相态的预报主要依赖于温度的指标,本文利用 ERA5 的各层逐 3 h 气温来检验模式的误差,首先对比再分析的气温和实况探空气温的偏差,来说明再分析数据的可用性。

“0127”过程。武汉站 1 月 28 日 08 时实况探空得到的 1000、925、850、700 hPa 的气温分别为  $-0.4$ 、 $-2.0$ 、 $-3.5$ 、 $-1.6$  °C,而再分析数据(图 5a)的上述相应层次、相应时刻的气温分别为  $-0.2$ 、 $-1.6$ 、 $-3.5$ 、 $-1.5$  °C,即再分析数据比实况探空气温偏高

0.0~0.4℃,可用其代替没有探空数据时刻的模式偏差分析。由再分析数据的武汉站1000 hPa气温演变可以看出(图5a),27日17时气温从1.8℃开始下降,到28日05时降至0℃,武汉开始转雪,主要是以纯雪为主,其中两个时刻有雨夹雪,28日12时以后,随着1000 hPa气温升到0℃以上,降水相态又由雪转雨。ECMWF模式预报的1000~850 hPa气温(图5b)偏高,最大偏高1.3℃,特别是1000 hPa气温直到28日11时才降到0℃以下,因此在28日05—11时纯雪阶段,ECMWF降水相态预报一直为雨夹雪或湿雪(图6c)。

“0206”过程。武汉站2月6日20时实况探空得到的1000、925、850、700 hPa的气温分别为0.9、-2.8、-6.3、-2.8℃,而再分析数据(图5c)的上述相应层次、相应时刻的气温则分别为0.9、-3.3、-4.6、-2.7℃。可见,再分析数据的1000~925 hPa气温与实况探空偏差在0.5℃以内,而模式预报(图5d)的1000 hPa气温比实况高1.1℃。由再分析数据的武汉站1000 hPa气温演变可以看出(图5c),6日14时气温从3.6℃开始下降,到20时降至0℃以下,武汉开始转雪,降雪持续到7日12时以后停止,此时1000 hPa气温升至0℃以上,ECMWF模式预报的1000 hPa气温在6日23时以后降至0℃以下,因此降水相态也是从该时刻转为纯雪(图6d),转雪时间比实况晚了3 h。

综上所述,两次过程虽然再分析数据与实况探空相比有偏差,但1000 hPa气温与实况近乎一致,可以较好地描述转雪的时间,而模式预报的1000~700 hPa气温基本都比实况高,特别是“0127”过程,1000 hPa实况气温在0℃以下,而预报在0℃以上,从而影响降水相态的预报。

由上分析可知,两次过程ECMWF模式对近地层的气温预报都偏高,对降温机制考虑不足(彭霞云等,2020)可能是两次过程降水相态预报偏差的主要原因。“0127”过程,武汉站在28日05时转雪,地面气温由2.2℃下降到0.8℃(图6a),07时和08时转为雨和雨夹雪,09—12时又转为纯雪,在这期间,地面的气温始终在1℃以下且呈波动状态,而在28日05—11时这段降雪期间,ECMWF预报的地面2 m气温始终高于1℃。13时又转为雨,随后地面2 m气温上升至2.5℃。“0206”过程以云梦站为例,6日20时转雪,地面2 m气温由4.2℃下降到1.5℃,1 h降幅达2.7℃,7日01时降至0℃以下,直至7日

08时以后,降雪减弱,地面气温才开始上升,至10时升至0℃以上。而在整个降雪时段ECMWF模式预报的地面2 m气温均不低于0℃。“0127”过程,武汉站雨转雪时,地面实况显示1 h降幅达1.4℃,而ECMWF预报的地面气温是没有下降的。“0206”过程,模式也未报出2.7℃的降幅。研究指出当地面气温大于0℃,但空中降雪强度足够大时,可逐渐吸收大量融化潜热,导致地面气温降至0℃(Lackmann et al,2002)。这两次过程由雨转雪时,底层均为暖平流,海平面气压上升0.1~0.3 hPa,但地面气温下降1.4~2.7℃,说明这是由于固态降水融化导致的地面气温的变化。对比大气中水凝物的实况和ECMWF模式预报(图略),可发现,模式预报与实况比较一致,因此在预报中需要充分考虑模式预报的云中冰相粒子的含量,从而对ECMWF模式的低层气温的预报做出订正。

### 3.3 积雪深度预报

积雪深度的预报偏差主要是由于降雪量和降水相态的预报偏差造成的。ECMWF模式预报降雪量占总降水量的80%以上且地面气温大于0℃时,模式相态预报为湿雪,20%~80%则为雨夹雪。从降水相态分析看,“0127”过程,模式预报的降雪量与总降水量占比在80%附近,预报的降雪量也转化成了积雪,而实况是以雨夹雪为主,因此,此次过程除了降雪量偏大导致积雪预报偏大外,降水相态的预报偏差也是造成积雪深度偏大的一个原因。除了以上两个原因,模式对积雪融化预报能力不足也是导致积雪预报出现较明显偏差的一个原因。以武汉站为例,28日05—11时受降雪影响,地表气温在1℃以下,12时很快升至1℃以上,ECMWF模式对地表气温的预报与实况接近,从积雪深度预报的变化(图7a)可以看出,虽然地表温度升至1℃以上,但是积雪深度并无变化。“0206”过程,ECMWF模式预报的降雪量和积雪深度与实况较为一致,但是,分析模式的地面气温预报与积雪深度的变化(图7b)可以发现,6日23时受降雪的影响,地表温度由1.6℃下降至0.1℃,随后一直稳定维持在0.1~0.4℃,至8日14时升至1℃以上。ECMWF模式预报7日11时地表温度就升至1℃以上,但积雪深度的减少并不明显,也反映了模式对积雪融化的预报能力不足,当降雪出现间歇时再次降雪,ECMWF模式的积雪深度容易预报偏大。因此,对模式积雪深度的

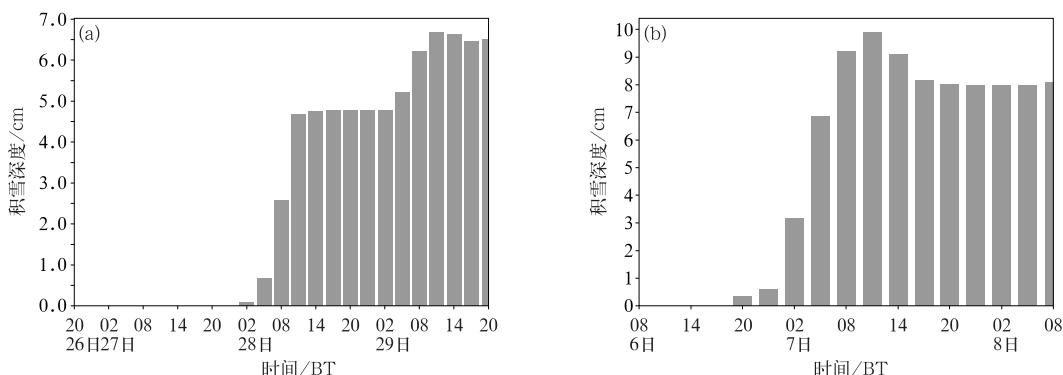


图 7 (a)“0127”过程,(b)“0206”过程 ECMWF 模式预报的武汉站积雪深度

Fig. 7 Predicted snow depth of Wuhan Station by ECMWF model for  
(a) the 27—29 January event and (b) the 6—7 February event in 2022

预报订正,需要结合地表气温的预报。

## 4 结论和讨论

本文通过对 2022 年初湖北两次雨雪过程的环流形势、水汽和热力对比,讨论和分析了造成两次过程降雪量、降水相态、积雪深度预报偏差的原因,结论如下。

(1)“0206”过程与“0127”过程相比,高低空天气系统配置好,急流发展强,垂直上升运动伸展高,动力抬升条件好,为云的垂直发展高度提供了更有利的天气背景。

(2)气温和云中冰相粒子的垂直分布是造成雨雪相态不同的主要原因之一。“0127”过程主要以中低云为主,导致云中以液态水为主,只有少数时次才有冰晶,所以降水相态主要以雨为主。“0206”过程降雪前 900 hPa 以下层次环境相对湿度小,降雪时云顶高,高云的气温低于  $-20^{\circ}\text{C}$ ,云中多为冰相粒子,大量冰晶在下落过程中基本不融化,因而以降雪为主。

(3)ECMWF 模式预报的各层温度、降水相态和积雪深度与 CMA-GFS、NCEP 模式相比,虽与实况最为接近,但也存在三个方面的偏差。一是模式对低空急流强弱和持续时间的预报偏差,导致降雪量的预报偏差;二是模式边界层降温机制考虑不足造成的边界层气温预报偏差,导致降水相态的预报偏差;三是降雪量、地表温度和积雪融化预报能力不足,是积雪深度预报偏差的主要原因。

这两次过程总体来看属于弱冷空气影响,特别是模式预报的地面气温均在  $0^{\circ}\text{C}$  附近,“0127”过程

预报偏差对“0206”过程预报服务也带来了一定的影响。通过以上分析,在实际业务中,除了关注模式本身预报调整外,还需综合考虑云物理条件、边界层降温机制、模式的预报能力等对预报进行订正。

## 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).

陈双,符娇兰,2021. 华北地区雪密度不同的两次降雪过程对比分析[J]. 气象,47(1):36-48. Chen S, Fu J L, 2021. Comparative analysis of two snow events with different snow density in North China[J]. Meteor Mon,47(1):36-48(in Chinese).

崔锦,周晓珊,阎琦,等,2015. 沈阳降雪含水比变化特征及其大气影响因子[J]. 冰川冻土,37(6):1508-1514. Cui J, Zhou X S, Yan Q, et al, 2015. Snow-to-liquid ratio variation and its atmospheric influence factors in Shenyang[J]. J Glaciol Geocryol, 37(6): 1508-1514(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研[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).

符娇兰,陈博宇,陈双,等,2022. 新增积雪深度客观预报技术研究及其应用[J]. 气象,48(10):1230-1241. Fu J L, Chen B Y, Chen S, et al, 2022. Fresh snowfall depth forecast technology and its application[J]. Meteor Mon,48(10):1230-1241(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).

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).

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).

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]. J Arid Meteor, 37(6):964-971(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,刘畅,2019.一次江淮气旋暴雪的积雪特征及气象影响因子分析[J]. 气象,45(2):191-202. Yang C F, Liu C, 2019. Study on snow cover and its meteorological influence factors of Jianghuai cyclone snowstorm[J]. Meteor Mon, 45(2):191-202 (in Chinese).

杨成芳,赵宇,2021.基于加密观测的一次极端雨雪过程积雪特征分析[J]. 高原气象,40(4):853-865. Yang C F, Zhao Y, 2021. Study on snow cover characteristic of extreme rain-snow event based on intensive observation data[J]. Plateau Meteor, 40(4):853-865(in Chinese).

杨成芳,朱晓清,2020.山东降雪含水比统计特征分析[J]. 海洋气象学报,40(1):47-56. Yang C F, Zhu X Q, 2020. Analysis on statistical characteristics of snow-to-liquid ratio in Shandong[J]. J Mar Meteor, 40(1):47-56(in Chinese).

杨军,陈宝君,银燕,等,2011. 云降水物理学[M]. 北京:气象出版社.

Yang J, Chen B J, Yin Y, et al, 2011. Physics of Clouds and Precipitation[M]. Beijing: China Meteorological Press(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).

张亚妮,符娇兰,胡宁,等,2022. 华北中部平原地区一次降雪过程雪水比变化特征及成因分析[J]. 气象,48(2):216-228. Zhang Y N, Fu J L, Hu N, et al, 2022. Analysis of snow-to-liquid ratio characteristics and its mechanism of a snowfall event in the plain of central North China[J]. Meteor Mon, 48(2):216-228(in Chinese)

Hersbach H, de Rosnay P, Bell B, et al, 2018. Operational global reanalysis: progress, future directions and synergies with NWP [R]. Berkshire: ECMWF.

Huffman G J, Norman G A Jr, 1988. The supercooled warm rain process and the specification of freezing precipitation[J]. Mon Wea Rev, 116(11):2172-2182.

Lackmann G M, Keeter K, Lee L G, et al, 2002. Model representation of freezing and melting precipitation: implications for winter weather forecasting[J]. Wea Forecasting, 17(5):1016-1033.

Stewart R E, 1992. Precipitation types in the transition region of winter storms[J]. Bull Amer Meteor Soc, 73(3):287-296.

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.

(本文责编:戴洋 王婷波)