荆浩,赵桂洁,于波,等,2024.北京一次罕见1月初雪过程的复杂降水相态成因分析[J]. 气象,50(8):905-916. Jing H,Zhao G J,Yu B,et al,2024. Analysis of complex precipitation types during a rare first snow process in January in Beijing[J]. Meteor Mon,50(8):905-916(in Chinese).

# 北京一次罕见1月初雪过程的复杂 降水相态成因分析\*

赵桂洁 于 波 荆 浩 翟 亮 郭 锐 王媛媛 杨艺亚 桑 李 何 娜 北京市气象台,北京100097

提要: 2023年1月12日的降雪为北京近42年来首次出现在1月上中旬的初雪,期间降水相态经历了复杂的变化。应用 多种常规观测资料和云雷达、微雨雷达等新型探测资料以及ERA5再分析资料,对此次过程进行分析,并重点探讨相态变化 成因。结果表明: 850 hPa以下偏南暖湿急流输送了丰富的水汽,但动力抬升较弱导致降水量不大,而近地层冷垫的缺失不利 于全市范围转雪和降雪的维持;0℃层高度的东西差异是北京西部为雪、东部为雨的主要原因,融化和蒸发过程引起的冷却效 应导致0℃层高度快速降至500m以下使得平原地区转雪,>0℃暖层增厚和融化层以上雪花尺度与密度的减小导致平原相 态由雪转为雨;针对复杂的降水相态转换,确定性模式无法准确刻画融雪过程,而短期时效内集合预报可弥补确定性模式的 短板;综合应用云雷达、微雨雷达和微波辐射计等探测资料,可提高对云中成雪和边界层融雪的判断准确性,有助于提升临近 时段降水相态的预报准确率。

关键词:初雪,降水相态,0℃层高度,云雷达,微雨雷达 中图分类号:P458,P457 **文献标志码**:A

DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2024.040101

# Analysis of Complex Precipitation Types During a Rare First Snow Process in January in Beijing

JING Hao ZHAO Guijie YU Bo ZHAI Liang GUO Rui WANG Yuanyuan LI Sang HE Na YANG Yiya Beijing Meteorological Observatory, Beijing 100097

Abstract: The snowfall in Beijing on 12 January 2023 was the snowfall first appearing in early and mid-January in last 42 years, and the precipitation types underwent complex changes during this process. In this paper, we utilize various conventional and non-conventional observations such as cloud radar and micro rain radar (MMR) data as well as ERA5 reanalysis data to analyze this event, with the focus on causes of complex phase distribution and variation. The findings indicate that the low-level warm and wet southerly jet stream provided abundant moisture for the precipitation. However, a lack of uplifting of warm and wet air by cold east winds and weak upper trough resulted in relatively low precipitation amount. Meanwhile, the northeast wind just above the surface did not play the role of cold cushion, so not conducive to the maintenance of snow and the snowfall in the whole city. The disparity at the height of the 0°C-layer between

\* 北京市自然科学基金项目(8192019)和国家重点研发计划(2018YFF0300104)共同资助
 2023年4月7日收稿; 2024年4月1日收修定稿
 第一作者:荆浩,主要从事灾害天气预报与研究. E-mail:Haoe.jing@gmail.com
 通讯作者:于波,主要从事预报技术和灾害天气机理研究. E-mail;Yubo\_0@126.com

western and eastern parts of Beijing, caused by low-level warm advection, explains the snowfall in the west and rain in the east. Additionally, the cooling effect caused by melting and evaporation processes is the main reason for the rapid decrease of 0°C-layer height to below 500 m, which caused rain to snow in plain areas. The thickened warm layer >0°C and the decreased snowflake size and density above the melting layer caused snow to turn into rain when reaching the ground. When it comes to forecasting precipitation types, deterministic models failed to accurately depict the snow-melting process, but the short-range ensemble forecast results can compensate for the errors in deterministic models. Integrating the data of cloud radar, micro rain radar and microwave radiometer can enhance our ability to monitor and analyze snow formation within clouds and melting in the boundary layer, and improve the accuracy of now casting of precipitation types.

Key words: first snow, precipitation types, 0°C-layer height, cloud radar, micro rain radar

# 引 言

降雪预报一直是北京地区的冬季预报业务难 点,而初雪的预报是重中之重,因其预报难度大、服 务敏感性高,受到各级部门和公众的广泛关注(孙继 松等,2003;王迎春等,2004;郭锐等,2012,何娜等, 2014),其中相态的准确预报决定了初雪预报、服务 的成败(杨成芳等,2013;翟亮等,2018)。

目前模式预报的地面降水相态主要基于云和微物理方案得到的云内水凝物垂直分布与垂直温度层结相结合诊断而得(Hersbach et al, 2016)。然而,实际降水中云微物理过程复杂,基于温度廓线模型或阈值描述的相态分布与实际云内的相态特征还存在一定偏差,且降水相态对温度廓线的变化十分敏感,即使看似很小的温度误差也会导致数值模式错报,所以雨雪过渡区附近的预测难度很大(Frick and Wernli, 2012; Stewart et al, 2015;赵琳娜等, 2021;胡宁等, 2021)。

因此,对降水相态预报技术的研究一直是业务 关注的热点之一。起初,国内业务中常利用低层的 特定层气温来判断降水相态(许爱华等,2006;李江 波等,2009;张琳娜等,2013;杨成芳等,2013;尤凤春 等,2013)。随着对相态认识的不断深入,研究人员 发现对整层垂直温湿结构的分析有助于提高降水相 态的预报准确率(漆梁波和张瑛,2012;廖晓农等, 2013;陈双等,2019;荆浩等,2022)。其中,0℃层高 度对相态影响显著。大量研究表明:雨向雪转换时 0℃层高度会明显下降(李江波等,2009;杨成芳等, 2013;翟亮等,2018;武威和胡燕平,2019;姬雪帅等, 2022);荆浩等(2022)通过对128 个冬季降水期间的 探空样本分析,发现当云顶温度低于-14℃时,0℃ 层高度在 500 m 以下时容易出现(湿)雪或雨夹雪, 超过 500 m 时云中的冰相粒子下落容易完全融化 成雨。此外,当冰相粒子下落到暖层,其蒸发、融化 吸热而引起环境温度下降时,会加速 0℃层高度下 降,进而影响到达地面的降水相态 (Kain et al, 2000;Olsen,2003;Zhang et al,2022),雪花的体积 和密度越大,低层需更多的热量将雪花融化,0℃层 高度应当越高 (Stewart et al, 2015)。

随着探测技术的发展,多种新型探测资料逐渐 在雨雪相态分析中得到应用。其中,毫米波云雷达 相较于厘米波段雷达,具有较高的灵敏度和时空分 辨率,既能探测到云的微小粒子结构和微物理特征, 又能用于弱降水、降雪系统的宏观结构探测和微物 理参数反演(陈羿辰等,2018;马新成等,2021);微雨 雷达可弥补一般圆锥扫描雷达在底层资料的不足, 能得到垂直方向上不同高度层的降水粒子随时间、 空间变化的分布及特征变化,对了解降水粒子系统 内部特征很有帮助(崔云扬等,2019;饶晨等,2020)。 此外,风廓线雷达、微波辐射计等非常规资料的综合 应用,有益于降水相态监测分析和短时临近预报(杨 成芳等,2015;赵字等,2018;卢晶晶等,2019;黄铥 等,2020)。

2023年1月12日北京地区发生了罕见的初雪 天气。业务中对该次过程的相态预报出现了偏差, 主要是预报判断出现降雪概率较低,而雪的致灾性 更强、影响更大,预报策略方面也未能进行有效弥 补,导致短期内初雪的漏报。尽管常用的相态预报 技术和指标可以在短期预报时效内为预报员提供参 考,但其也仅对于降水相态的简单转换有预报能力。 当面对一些"临界降水相态"时,即无法用某一种或 几种指标来确定精细化的降水相态变化时,预报业 务中仍面临着"无计可施"的状态。因此,有必要利 用各种常规和非常规气象观测资料深入分析此次初 雪过程和降水相态转化成因,以加深对冬季降水机 理的认识,为降雪天气的精细化预报提供更丰富的 参考。

## 1 资料与观测设备

本文所用观测资料包括国家级气象站、加密自动气象站、L波段探空、北京S波段组网雷达、FY-4A逐时红外数据等常规气象观测资料,北京观象台 地基云雷达、微雨雷达、微波辐射计、风廓线雷达等 非常规气象观测资料,逐小时、空间分辨率为 0.25°× 0.25°的 ERA5 再分析资料以及欧洲中期天气预报 中心(ECMWF)的确定性预报和集合预报产品。

北京观象台的地基云雷达为 Ka 波段(8 mm 波 长),工作频率为 33.44 GHz,能够在对流层12 km 内以每 8.8 s 垂直方向 30 m 间距实时连续探测,可 探测到反射率因子、速度、谱宽、退极化比等基本产 品,还包括液态水含量、冰水含量、云粒子相态识别 等二次产品。微雨雷达工作频率为 24.15 GHz、波 长为 1.25 cm,可探测到从地面竖直向上 3100 m 高 空,每 100 m 为 1 个探测距离库,时间分辨率为 1 min,可以测量多普勒功率谱、雷达反射率因子、多 普勒速度和反演雨滴谱、降雨率以及液态水含量等 的垂直廓线分布等。观象台的风廓线雷达探测高度 为12~16 km,反演的大气水平风场垂直廓线等产 品的时间分辨率为6 min,可直观地用于分析大气 环流、风的垂直切变以及冷暖平流等。微波辐射计 为12 通道(TP-WVP3000型),反演数据的时间分 辨率为1 min,探测0~10 km内的大气廓线共47 层,其中1 km以下为100 m分辨率,1 km以上为 250 m分辨率,包含温度、相对湿度、总水汽量等6 种要素,具有在时间上连续测量的优势。

# 2 天气实况与预报难点

#### 2.1 降水量和降水相态特点

2023年1月12日的雨雪天气为北京2022/ 2023年冬季的初雪(全市20个国家级气象站中16 个出现雪,根据业务规定达到北京初雪标准),亦是 北京2022年11月20日弱降雨后,时隔52天再次 出现的有量降水天气(全市平均降水量≥0.1 mm)。 北京大部分地区出现小雪,西部、北部局地中到大 雪,1月12日10时至13日00时(北京时,下同)全 市平均降水量为1.5 mm,最大降水量在密云琉璃 河,降水量为5.0 mm,下午至傍晚为降水主要时段 (图 1a)。



注:图 c~e中,星号:降雪,圆点:降雨,两者组合:雨夹雪。

- 图 1 2023 年 1 月(a)12 日 10 时至 13 日 00 时降水量,(b)北京地形高度(填色)和 12 日夜间国家级气象站 积雪深度(数字,单位:cm),(c~e)12 日 15—19 时国家级气象站降水相态分布
- Fig. 1 (a) Amount of precipitation from 10:00 BT 12 to 00:00 BT 13, (b) topography (colored) of Beijing and snow depth (number, unit: cm) at the national weather stations over the night of 12 January, (c-e) precipitation types at national weather stations from 15:00 BT to 19:00 BT 12 January 2023

本次过程的降水相态特点为:一是雨雪纬向过 渡带窄、相态空间分布复杂,二是出现了降水相态逆 转。如图 1c~1e 所示,降水期间北京西部、北部山 区以雪为主;平原的中部、西部(除东部的平谷、通州 外的其他大部分地区)经历了很短暂的零星小雨后, 12 日 14—15 时迎来降雪,15 时前降雪最为明显;而 傍晚时段经历了雪转雨的相态逆转换,其中 16—18 时为雪向雨过渡阶段,地面观测为雨夹雪,19 时前 后平原大部分地区已完全转为雨;平原东部的平谷 和通州在 15—22 时相态始终为雨。积雪深度方面, 西部、北部山区积雪深度为 2~3 cm,平原地区由于 降雪维持时间短、降雪量小且降雪时地表气温>0℃ (见 4.1 节),所以无明显积雪(图 1b)。

另外,此次初雪过程出现的时间明显偏晚(北京 常年初雪日平均日期为12月3日),且为近42年来 首次出现在1月上中旬的初雪(初雪日期分布见 图2),并伴随罕见的雪向雨的相态转换。

## 2.2 预报难点

本次过程在短期时段内预报具有很大的不确定 性。北京市气象台1月11日发布的相关天气报告 中指出"12日白天至前半夜,平原地区有小雨或雨 夹雪,降水量1mm左右、无积雪;山区有雨夹雪或 雪,降水量1~2mm,积雪深度1~2cm"。与实况 相比,降水量预报相对准确,但对平原出现的明显降 雪以及相态转换的预报存在较大偏差。本次过程雨 雪过渡带窄,雨雪相态变化复杂,且相态转换并非通 常的雨转雪而主要是雪向雨转换,数值模式对降水



注:红线:平均初雪日期,蓝框:1月初雪日。





相态和积雪深度预报存在明显偏差,这些都增加了 相态预报的难度。因此,该过程的主要预报难点在 于对降水相态的精细化预报。

## 3 环流背景和影响系统

12日14时,500 hPa 短波槽移近北京(图 3a), 北京位于 850 hPa 高度上反环流后部,受短波槽前 和低层反气旋式环流后部的共同影响,对流层中低 层盛行偏南风,15 时前后低层 1500 m 附近西南风 速达 12~14 m·s<sup>-1</sup>(图 3c)。强盛偏南风将暖湿空 气输送到北京,降水发生前北京整层可降水量达 12 mm 以上,700~500 hPa 比湿为 4 g·kg<sup>-1</sup>(图 略)。在北京隆冬季节,这样的水汽达到了北京地区 暴雪的比湿阈值(杜佳等,2019),为产生一次相对明 显的降水提供了充足的水汽条件。然而,虽然具备 较好的水汽条件,但此次过程降水量并不大,主要不 利因素是动力条件较差,特别是低层辐合抬升弱,明 显上升区高度较高(位于 700~400 hPa,与短波槽 相对应),并且中心值仅为-0.4 Pa·s<sup>-1</sup>。

降水期间北京平原地区低层存在明显的暖平 流,由于偏南风主体偏东,暖平流呈东强西弱分布 (图 3b),西部山区近地面为弱的冷平流。温度平流 的东西显著差异造成了北京地区低层纬向温度梯度 很大,这股暖平流直至降水结束后才消失(图略)。 虽然观象台风廓线可见 700 m 以下存在明显的东 北风(图 3c),但其与东北地区冷高压回流无关,而 是由气旋式环流顶部的暖性东南风遇地形偏折所导 致(见 4.2 节),因此没有起到边界层冷垫降温的作 用。所以,低层东北风冷垫的缺失,取而代之的是暖 湿气流,不利于全市大范围转雪和降雪的长时间维 持。

## 4 降水相态成因分析

此次过程北京地区降水云系总体较深厚。平原 地区的观象台云雷达反射率因子在12日15时之前 和20时前后存在明显的两层云(图4a)。反演的粒 子识别表明(图4b),空中冰相粒子比例很高,冰晶 层和雪花层较厚,3km以下以雪花层为主,之上为 冰晶层。西北部山区延庆站上空云系结构与平原地 区无本质差别,但云系更深厚,中高云分层不明显,冰 晶层处于4~9km,4km以下为深厚的雪花层。云



注:图 b 中黑色阴影为地形高度。

图 3 2023年1月12日(a)14时 500 hPa高度场(黑线,单位:dagpm)、850 hPa风场(风羽)和相对湿度(填色),(b)17时沿40°N的风场(风羽)、垂直速度(点线,单位:Pa・s<sup>-1</sup>)、温度(红线,单位:C)和温度平流(填色)垂直剖面,(c)12日13时至13日03时观象台风廓线雷达的风羽图
Fig. 3 (a) The 500 hPa geopotential height (black line, unit: dagpm), 850 hPa wind (barb) with relative humidity field (colored) at 14:00 BT 12, (b) latitudinal vertical profile along 40°N of wind (barb), vertical velocity (dotted line, unit: Pa・s<sup>-1</sup>), temperature

(red line, unit: °C) and temperature advection (colored) at 17:00 BT 12, (c) wind barbs observed by wind profiler radar from 13:00 BT 12 to 03:00 BT 13 Junaury 2023

雷达观测表明(图 4a,4b),北京上空的冰晶、雪花层 为降雪提供了必要条件,因此地面的降水相态主要 取决于下落的雪花是否融化。从宏观角度分析,暖 层的厚度变化以及冰相粒子尺度与密度是影响降水 相态的关键。

依据北京地区降水相态变化特点,本节中把观象台作为北京平原中西部代表站、平谷站作为平原 东部代表站、延庆站作为山区代表站,综合利用常规 观测资料和云雷达、微雨雷达等新型观测资料结果 进行相态时空变化成因的分析。

### 4.1 平原中西部相态成因

结合观象台的小时气象要素、相态变化和多源 观测结果分析(图 4),12 日 13 时之前低层反射率很 低、云层较薄,云底高度较高(约2km),观象台地面 相对湿度不足 50%,此时有少量的降水下落蒸发而 未接地。

微波辐射计结果显示(图 4d),13 时观象台 0℃ 层高度超过 1 km,观象台周边出现间歇的零星小 雨;14 时后云层迅速增厚,云顶高度仍约 8 km,但 云底显著变低并接近地面,地面湿度增加,0℃层高 度从 1 km 左右快速下降至 500 m 以下,此时地面 转为降雪天气(图 4e)。15 时地面相对湿度升至约 70%,气温下降至 2.6℃,云雷达观测显示(图 4a), 云中低层反射率明显增强,冰晶层和雪花层变厚 (图 4b);由微雨雷达结果(图 4c)可见,对比之前时 次,1 km 高度附近的粒子数浓度和有效粒子直径明 显增大,表明雪花密度和尺度增大,此时对应着雪花



注:图 e 中,星号:降雪,圆点:降雨,两者组合:雨夹雪。

图 4 2023 年 1 月 12 日 (a~c) 09—23 时观象台地基云雷达观测的(a)反射率因子、(b)反演粒子识别随时间的 垂直分布、(c)微雨雷达观测的 1000 m 附近的有效粒子直径与粒子数浓度,(d)13—22 时观象台和平谷站 微波辐射计反演的 0℃层高度,(e)14—22 时观象台小时降水量、2 m 气温、地表温度、相对湿度、相态和平谷站 2 m 气温,(f)20 时北京观象台探空曲线,(g)12—22 时基于 FY-4A 卫星反演的平原中部的云顶温度和云顶高度
Fig. 4 Vertical distributions of (a) reflectivity and (b) cloud particle tpyes observed by cloud radar with time, and (c) efficient diameter with number concentration of cloud particle near 1000 m height observed by micro rain radar from 09:00 BT to 23:00 BT, (d) graphs of 0℃-layer height over Beijing Meteorological Observatory and Pinggu Station retrieved by microwave radiometer from 13:00 BT to 22:00 BT, (e) hourly precipitation, 2 m temperature, surface temperature, relative humidity and precipitation types at Beijing Meteorological Observatory and 2 m temperature at Pinggu Station from 14:00 BT to 22:00 BT, (f) vertical temperature and dew point profiles at 20:00 BT with 0℃ line at Beijing Meteorological Observatory and (g) cloud-top temperature (CTT) and cloud-top height (CTH) calculated from FY-4A satellite data from 12:00 BT to 22:00 BT 12 January 2023 最明显时段。所以,0℃层快速降至 500 m 以下时, 较大尺度的雪花下落到适当厚度的暖层中不容易融 化,因此地面观测的相态为显著的(湿)雪。

至17时前后,降水相态由雪转为混合相态。此时0℃层高度仍接近500m,虽然暖层厚度并未显著 升高,但从云体结构看,云层变得松散,冰晶层和雪 花层厚度明显减小,粒子浓度和有效半径明显减小 (图4c),说明低层冰相粒子尺度与密度明显减小。 因此,较小雪花在下落至适当暖层后容易部分融化, 相态转为雨夹雪,粒子识别可见,此时混合相态的层 次变厚并接地(图4b)。

19 时之后降水相态以雨为主。其中,至 19 时 前后,低层雪花变得更少,加之受暖平流影响,0℃层 高度短暂升高至约 1 km,雪花下落到地面时全部融 化,因此地面出现降雨。至 20 时前后,云层再度变 厚,冰相粒子尺度与密度有所增加,地面气温再次下 降,但由于微波辐射计给出的 0℃层高度是从地面 向上首次低于 0℃处的高度(图 4d),综合分析观象 台 20 时探空和再分析资料发现 18 时之后增强的暖 平流导致低层出现逆温层,20 时探空显示逆温层处 >0℃暖层厚度约 700 m(图 4f),加上近地面接近 500 m 的暖层,>0℃的暖层总厚度约 1.2 km,而逆 温层下<0℃冷层最低气温仅为-0.6℃、厚度不足 100 m,不足以使液态粒子再次冻结。所以,虽然雪 花尺度与密度再次增加,但显著增厚的暖层导致下 落的冰相粒子全部融化,降水相态仍为雨。

综合分析 FY-4A 静止卫星反演的云顶高度与 温度(图 4g)和云雷达粒子识别结果(图 4b),18 时 后云顶高度持续降低,相应的云顶温度变高,22 时 前后云顶高度下降至 4 km 以下,云顶温度升至 一10℃以上,此时云内冰晶和雪花几乎消失,云中以 过冷水或混合相态为主,此时无论 0℃层高度是否 接地,都失去了降雪的必要条件,这与平原降水相态 为雨的观测结果相符。

### 4.2 山区和平原东部单一相态成因分析

北京西北部山区的延庆站,由于海拔较高 (487.5 m),降水期间整层气温始终低于 0℃(12 日 延庆站最高气温为一0.6℃),空中的大雪花落地未 融化,所以包括延庆在内的山区降水相态始终为雪, 深厚冰晶和雪花层也为山区产生明显的积雪提供了 有利条件。

平原东部的平谷站(海拔 31.1 m)降水相态始 终为雨。根据自动站监测显示,12日白天平原地区 最高气温分布差异不大,在3℃左右。值得注意的 是,16-23 时平谷站的 2 m 气温一直低于观象台 (图 4e),其中 12 日下午观象台最低气温为2.2℃, 而平谷站最低气温为 0.9℃。然而,由于受低层偏 东的暖湿气流影响(图 5a,5b),边界层附近气温呈 东高西低分布,温度纬向梯度很大,这与2m气温 分布相反。根据微波辐射计监测(图略),17时 1 km 高度处平谷站上空的气温为 2.0℃, 而观象台 上空的气温为一0.5℃。温度纬向分布的差异反映 在0℃层高度上更明显:14-22时平谷站上空的 0℃层高度从约 1.7 km 升至 3 km 左右(图 4d),显 著高于观象台上空的 0℃层高度(从略低于 500 m 升至1 km 左右)。所以降水期间,虽然平谷站2 m 气温低于观象台,但平谷上空的>0℃暖层更厚,且 显著高于北京地区 500 m 的融雪阈值,下落的雪花 经过较厚的暖层完全融化,导致其降水相态始终为 雨。

#### 4.3 融化和蒸发对降水相态的影响

为评估融化、蒸发对温度的定量影响,利用温度 倾向方程进行诊断分析。公式如下:

$\frac{\partial T}{\partial T}$	dT	- V .	$\nabla T$	
$\partial t$	dt	• •	$\vee h$ I	$\omega \overline{\partial t}$
$\bigcirc$	(2)		3	(4)

式中:T为温度,V为全风速,t为时间,p为气压,ω 为上升速度。其中,①项为温度的局地变化,②项为 温度的个别变化,③项为温度水平平流,④项为空气 的垂直运动引起的对流变化。根据上述公式各项的 意义,温度局地变化主要源自温度个别变化和平流 变化(水平平流和对流变化),而温度个别变化受到 绝热和非绝热过程的影响,其中非绝热过程包括相 态变化和长短波辐射两类,温度平流包括水平和垂 直平流。此过程期间云量较多,使得辐射变温很弱, 蒸发或凝结降温则成为影响温度个别变化的主要原 因;鉴于降温过程主要发生在12日16时之前,由于 低层空气块的垂直运动弱,绝热过程的作用不显著。 因此,综合分析来看,温度个别变化造成的局地温度 的降低,主要来自于非绝热过程的贡献。

计算各项的温度变率对观象台低层大气逐小



图 5 2023 年 1 月 12 日(a)14 时、(b)17 时 950 hPa 温度平流(填色)、温度(等值线,单位:℃)及风场(风羽), (c)12-22 时温度倾向方程各项对 950 hPa 逐小时变温的贡献

Fig. 5 Temperature advection field (colored) and temperature (isoline, unit: °C) at 950 hPa at
(a) 14:00 BT and (b) 17:00 BT, (c) contribution of each item in temperature tendency equation to 1 h temperature change at 950 hPa from 12:00 BT to 22:00 BT 12 January 2023

时变温的贡献,以 950 hPa(高度约 500 m)为例 (图 5c),可以看到在降水阶段,非绝热过程(即② 项,点线)降温作用明显,而温度平流(③项和④项, 虚线)的作用此时主要表现为增温作用。结合云雷 达结果分析,16时之前地面相对湿度不断增湿,下 落的雪花不断融化、蒸发填补低层湿度,此时暖平流 不强,冷却作用很强并占主导。这种蒸发、融化形成 的冷却效应导致在明显降雪前1~2h,观象台上空 0℃层高度从接近 1.5 km 快速下降至 500 m 以下, 进而加速了地面转雪,对降雪增强起到了正反馈作 用(Kain et al, 2000), 15 时负变温达到最强(与降雪 最明显时段对应)。16时后,降水减弱导致非绝热 过程减弱,暖平流增强并逐渐占主导作用,近地面开 始升温、暖层变厚,导致相态经历了由雪到雨夹雪再 到雨的转换。由此可见,整个过程中相态变化是温 度平流和非绝热过程共同作用的结果,其中融化与 蒸发冷却效应加强并占主导,导致低层降温、0℃层 快速下降,这是地面由零星小雨转雪的主要原因;雪 转雨夹雪再转雨是由暖平流增强和冷却效应减弱共 同作用导致。

# 5 相态预报偏差分析

ECMWF 高分辨率数值模式(以下简称 EC 模式)考虑了降水粒子下落过程中的相态转化过程,其降水相态预报产品在预报中广泛应用(ECMWF,2016;董全等,2020a),其集合预报降水相态预报产品也在预报业务应用中表现出较好的预报效果(董全等,2020b;胡宁等,2021),为预报员对相态预报提供了重要参考。但此次过程 EC 模式对相态的预报存在一定偏差。本节以 EC 模式为例进行预报偏差分析。

由图 6a 和 6d 结果分析,11 日 20 时起报的确 定性预报和集合预报对相态由雪转雨的变化趋势做 了较准确的预报,这与模式对大气显著湿度区和低 层温度的演变趋势把握较好有关。实况显示平原地 区纯雪时间仅维持 1~2 h,但 EC 模式预报结果显 示(图 6a),12 日 17 时之前皆为纯雪,17—20 时为 混合相态,20 时之后为雨,预报的降雪时间明显偏 长,加之降水量预报有偏差(对平原降水高估、对山





Fig. 6 (a) The 3 h total precipitation and snowfall, (b) snow depth (grid point value, unit: cm) at 08:00 BT 13 with 24 h accumulated precipitation (colored) and (c) 0°C-layer height forecasted by EC high-resolution model, and (d) the probability of various precipitation types of EC ensemble model initiated at 20:00 BT 11 January 2023

区降水低估),导致平原地区积雪深度预报明显偏大 (图 6b)。EC模式对 2 m 气温预报较实况偏低 1~ 2℃,这可能与模式预报的降水量偏大、导致低层非 绝热降温有关。0℃层高度预报,与实况先降后升的 趋势较符合(图 6c),值得注意的是,17 时和 20 时预 报的 0℃层高度已明显高于统计的北京地区融雪 500 m 阈值(施红蓉等,2014;荆浩等,2022),但 EC 模式对降水相态的预报仍为纯雪和混合,说明 EC 模式预报冰相粒子经过暖层融化的厚度阈值偏高, 这是导致降雪量预报比例偏大的原因之一。所以, 业务应用时应根据本地的统计结果进行适当订正。

集合预报结果从概率的角度一定程度上弥补了 确定性模式的上述误差。从 EC 集合预报模式的降 水类型概率分布(图 6d)分析,预报 14 时之前以湿 雪为主,17 时为混合相态,20 时以雨为主,相态经历 了湿雪到混合相态再到雨的明显转变,这与实况的 相态变化基本一致。相对于 EC 模式的确定性预 报,集合预报系统体现出一定优势,但对降水开始时 间的预报明显偏早。

实际业务中未能有效订正模式预报结果。虽然 对 12 日白天 2 m 气温预报较准确,如对于当天观象 台最高气温,主观预报为 3℃,EC 模式预报为 1.1℃,集合预报 90%成员预报为 1.5~3.0℃、集合 平均为 2.0℃,实况为 3.8℃,主观预报与实况最接 近;但降水相态对温度的变化非常敏感,由于此次过 程 925 hPa 以下垂直温度递减率很大,且在降水中 后期 925 hPa 附近出现了逆温,而业务中对边界层 附近气温的垂直分布的预报经验较少,且缺少精细 化的客观温度垂直廓线产品支撑,加之对高层雪花 层厚度和低层融化冷却影响的低估,导致对边界层 雪花的融化率判断失误,这是未能预报出相态由雨 或雨夹雪转雪再转雨的精细化变化的主要原因。所 以,业务中需充分利用多源垂直观测资料,对局地大 气层结变化进行监测和物理分析。

# 6 结论与讨论

2023 年 1 月 12 日北京发生了近 42 年来首次 出现在 1 月上中旬的初雪,且平原地区经历了罕见 的相态转换。本文应用多种观测资料重点对降水相 态特征和变化成因进行了分析。主要结论如下。

(1)低层偏南暖湿急流为降水提供了丰富的水 汽条件,虽然比湿达到了北京出现暴雪的比湿阈值, 但由于近地层东北风未起到冷垫抬升的作用,加之 高空槽较弱,导致动力辐合抬升不强、降雪量不大。 同时,近地层冷垫的缺失不利于全市大范围转雪和 降雪的维持。

(2)北京上空存在明显的冰晶、雪花层,为降雪 提供了必要条件。地面2m气温对降雪相态指示 意义不强,而>0℃暖层厚度是判断降水相态的关键 要素之一。由于暖湿气流影响偏东,使得北京地区 0℃层高度呈显著的西低东高分布,西部山区整层气 温<0℃,降水相态始终为雪,平原东部0℃层高度 始终显著高于雪花融化的500m暖层阈值,降水相 态始终为雨;平原中部和西部在短暂零星小雨后经 历了雪向雨的相态转换,降水初期融化、蒸发引起的 冷却效应导致0℃层快速下降至500m以下,是平 原转雪的主要原因,随后暖平流增强与融化冷却效 应减弱,使得0℃层升高,加之雪花的尺度与密度减 小,导致相态从雪向雨夹雪到雨转换。

(3)数值模式的确定性预报对融雪的微物理方 案描述尚不完备,而集合预报系统则体现出较大优势,能弥补确定性模式不足。业务预报中未准确判 断边界层内雪花融化程度是此次相态精细化预报失 误的直接原因,而综合利用云雷达、微雨雷达等新型 观测资料反演结果,开展对局地大气层结变化的综 合监测和分析,可提高对云中成雪和边界层融雪判 断的准确性,有助于提高降水相态的临近预报准确 率。

精准化预报降水相态变化的难度很大,如何更 好地利用模式的相态产品订正相态预报?一方面, 在确定性预报的微物理方案暂未改进情况下,基于 本地统计的降水相态判据进行模式结果后处理,可 一定程度上提高确定性预报的可靠性和准确率;基 于集合预报结果利用分区、分时的最优概率阈值法、 机器学习等方法,进行本地化处理转换为确定性预 报,可进一步提高相态预报能力。另一方面,降水相 态变化涉及复杂的云微物理过程,需加强云微物理 的观测与研究成果在实际业务中的应用,以及边界 层内精细化的气温客观产品研发与应用,能在短时 临近时段内为精细化的降水相态预报提供更好的支 撑。

**致谢:**感谢北京市人工影响天气中心陈羿辰博士提供 云雷达和微雨雷达数据。

## 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).
- 陈羿辰,金永利,丁德平,等,2018. 毫米波测云雷达在降雪观测中的 应用初步分析[J]. 大气科学,42(1):134-149. Chen Y C, Jin Y L, Ding D P, et al, 2018. Preliminary analysis on the application of millimeter wave cloud radar in snow observation[J]. Chin J Atmos Sci,42(1):134-149(in Chinese).
- 崔云扬,周毓荃,蔡淼,2019.利用微雨雷达研究一次冷锋云系降水的 垂直结构分布及演变特征[J].大气科学,43(3):618-633. Cui Y Y,Zhou Y Q,Cai M,2019. Vertical structure and evolution of precipitation associated with clouds along a cold front based on micro rain radar observations[J]. Chin J Atmos Sci,43(3):618-633(in Chinese).
- 董全,胡宁,宗志平,2020a. ECMWF 降水相态预报产品(PTYPE)应 用和检验[J]. 气象,46(9):1210-1221. Dong Q, Hu N, Zong Z P,2020a. Application and verification of the ECMWF precipitation type forecast product (PTYPE)[J]. Meteor Mon,46(9): 1210-1221(in Chinese).
- 董全,张峰,宗志平,2020b. 基于 ECMWF 集合预报产品的降水相态 客观预报方法[J]. 应用气象学报,31(5):527-542. Dong Q, Zhang F,Zong Z P,2020b. Objective precipitation type forecast based on ECMWF ensemble prediction product[J]. J Appl Meteor Sci,31(5):527-542(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).
- 郭锐,张琳娜,李靖,等,2012.2010 年冬季北京初雪预报难点分析 [J]. 气象,38(7):858-867.Guo R,Zhang L N,Li J,et al,2012. Analysis of forecast difficulties for the first snow of Beijing Area

in 2010 winter[J]. Meteor Mon, 38(7):858-867(in Chinese).

- 何娜,孙继松,王国荣,等,2014. 北京地区预报失误的两次降雪过程 分析[J]. 气象科技,42(3):488-495. He N,Sun J S,Wang G R, et al,2014. Analysis of unsuccessful forecasting for two snowfall processes in Beijing[J]. Meteor Sci Technol,42(3):488-495(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).
- 黄钰,郭学良,毕凯,等,2020.北京延庆山区降雪云物理特征的垂直 观测和数值模拟研究[J].大气科学,44(2):356-370. Huang Y, Guo X L, Bi K, et al, 2020. Vertical observation and numerical simulation of the clouds physical characteristics of snowproducing over Yanqing Mountain Area in Beijing[J]. Chin J Atmos Sci,44(2):356-370(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).
- 卢晶晶,涂小萍,郭宇光,等,2019. 一次强寒潮引发的浙北不同地区 雨雪气象条件差异[J]. 气象科学,39(1):129-136. Lu J J, Tu X P, Guo Y G, et al, 2019. Differences of rain and snow meteorological conditions in different areas of northern Zhejiang caused by a strong cold wave[J]. J Meteor Sci,39(1):129-136(in Chinese).
- 马新成,董晓波,毕凯,等,2021. 北京海坨山区低槽降雪云系演变特 征的观测研究[J]. 气象学报,79(3):428-442. Ma X C,Dong X B,Bi K, et al, 2021. The characteristics and evolution of low trough snowfall cloud system in the Haituo Mountain, Beijing [J]. Acta Meteor Sin,79(3):428-442(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).
- 饶晨,肖辉,姚振东,等,2020. 基于微雨雷达观测北京地区夏冬季降水个例特征分析[J]. 成都信息工程大学学报,35(4):392-399.
  Rao C,Xiao H, Yao Z D, et al,2020. Characteristic analysis of precipitation in summer and winter in northern China based on micro rain radar observation[J]. J Chengdu Univ Inform Technol,35(4):392-399(in Chinese).
- 施红蓉,李峰,吴蕾,等,2014. 风廓线雷达对降水相态变化的观测分析[J]. 气象,40(10):1259-1265. Shi H R,Li F,Wu L, et al, 2014. Analysis on observations of precipitation phase changes using wind profile radar data[J]. Meteor Mon,40(10):1259-1265(in Chinese).
- 孙继松,梁丰,陈敏,等,2003.北京地区一次小雪天气过程造成路面 交通严重受阻的成因分析[J].大气科学,27(6):1057-1066.Sun J S,Liang F,Chen M,et al,2003.An analysis on serious city traffic trouble caused by light snow[J].Chin J Atmos Sci,27 (6):1057-1066(in Chinese).
- 王迎春,钱婷婷,郑永光,2004.北京连续降雪过程分析[J].应用气象 学报,15(1):58-65.Wang Y C,Qian T T,Zheng Y G,2004.Primary analysis of the longest-lasting snowfall in Beijing[J].J Appl Meteor Sci,15(1):58-65(in Chinese).
- 武威,胡燕平,2019. 沙颍河流域一次基于高分辨资料的降水相态分 析[J]. 高原气象,38(5):983-992. Wu W, Hu Y P,2019. Analysis of a precipitation phase based on high-resolution data occurred in Shaying River Basin[J]. Plateau Meteor,38(5):983-992(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).
- 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).
- 杨成芳,周淑玲,刘畅,等,2015. 一次入海气旋局地暴雪的结构演变 及成因观测分析[J]. 气象学报,73(6):1039-1051. Yang C F, Zhou S L,Liu C, et al,2015. Case study of the cause and the dynamic structure for a small-scale snowstorm event associated with a cyclone[J]. Acta Meteor Sin,73(6):1039-1051(in Chinese).
- 尤凤春,郭丽霞,史印山,等,2013. 北京降水相态判别指标及检验 [J]. 气象与环境学报,29(5):49-54. You F C,Guo L X,Shi Y S,et al,2013. Discrimination index of precipitation phase state and its verification in Beijing[J]. J Meteor Environ,29(5):49-54 (in Chinese).

- 翟亮,郭淳薇,马新成,等,2018. 北京 2016 年"11 20"初雪预报偏差 分析[J]. 气象,44(1):151-158. Zhai L,Guo C W,Ma X C,et al, 2018. Forecast deviation analysis of the first snow in Beijing on 20 November 2016[J]. Meteor Mon,44(1):151-158(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).
- 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]. J Appl Meteor Sci, 32(1):12-24(in Chinese).
- 赵宇, 蓝欣, 杨成芳, 2018. 一次江淮气旋极端雨雪过程的云系特征和 成因分析[J]. 高原气象, 37(5):1325-1340. Zhao Y, Lan X, Yang C F, 2018. Analysis of the cloud characteristic and the mechanism of an extreme rainfall-snowfall event associated with cyclones over Changjiang-Huaihe River Basin[J]. Plateau Meteor, 37(5):1325-1340(in Chinese).

- ECMWF,2016. Part []: Physical Processed[M]//ECMWF. IFS Documentation Cy43R1. Reading: ECMWF:118-120.
- Frick C, Wernli H, 2012. A case study of high-impact wet snowfall in northwest Germany (25 - 27 November 2005): observations, dynamics, and forecast performance [J]. Wea Forecasting, 27 (5):1217-1234.
- Hersbach H, de Rosnay P, Bell B, et al, 2016. Operational global reanalysis: progress, future directions and synergies with NWP [R]. IFS Documentation CY43R1. ECMWF.
- Kain J S,Goss S M,Baldwin M E,2000. The melting effect as a factor in precipitation-type forecasting[J]. Wea Forecasting,15(6):700-714.
- Olsen A,2003. Snow or rain? —A matter of wet-bulb temperature [D]. Uppsala: Uppsala University.
- 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.
- Zhang W L, Cui X P, Duan B L, et al, 2022. A case study on the rapid rain-to-snow transition in late spring 2018 over northern China: effects of return flows and topography[J]. J Meteor Res, 36(1): 107-127.

(本文责编:戴洋)