

# 北京一次冬季极端降水过程中相态转换 预报的误差分析\*

胡宁 符娇兰 孙军 张峰 胡艺 张亚妮 李晓兰 陶亦为  
HU Ning FU Jiaolan SUN Jun ZHANG Feng HU Yi ZHANG Yani LI Xiaolan TAO Yiwei

1. 国家气象中心, 北京, 100081

2. 中国气象局-河海大学水文气象研究联合实验室, 北京, 100081

1. *National Meteorological Center, China Meteorological Administration, Beijing 100081, China*

2. *CMA-HHU Joint Laboratory for Hydro-Meteorological Studies, Beijing 100081, China*

2020-06-24 收稿, 2020-12-14 改回.

胡宁, 符娇兰, 孙军, 张峰, 胡艺, 张亚妮, 李晓兰, 陶亦为. 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. 气象学报, 79(2): 328-339

**Hu Ning, Fu Jiaolan, Sun Jun, Zhang Feng, Hu Yi, Zhang Yani, Li Xiaolan, Tao Yiwei. 2021. Errors in the forecast of precipitation type transition in an extreme winter precipitation event in Beijing. *Acta Meteorologica Sinica*, 79(2):328-339**

**Abstract** Based on both conventional and unconventional observations as well as reanalysis data, a case study of the mixed rain-snow storm that occurred in February 2020 over Beijing was conducted. This study aims to explore the mechanism for the formation of the extreme precipitation event and analyze errors in the forecast of precipitation type and their possible reasons. The result indicates that: (1) the slow moving of the extremely strong and deep low vortex resulted in the persistent precipitation event that lasted for up to 12 h. The anomalous southeasterly jet transported water vapor to the east of the mountainous area in western Beijing, which, combined with strong vertical shear, formed symmetric instability that was conducive to slantwise convective precipitation with high precipitating efficiency rarely occurring in winter night. The above two factors jointly contributed to this extreme rain-snow event; (2) in the early morning, the 0°C level height and surface temperature decreased slowly. The cold air mass from Northeast Hebei exerted earlier and stronger influence on eastern Beijing, resulting in lower 0°C level height and thus earlier rain-snow phase transition there; (3) the influence of cold air mass from Northeast Hebei predicted by the model was earlier and stronger than observations, causing a stable stratiform precipitation in the prediction while convection was significantly weaker than observations. The model predicted surface temperature was lower than observations, and the 0°C level height decreased more rapidly than observations. As a result, the predicted rain-snow transition occurred earlier with higher snowfall and snow depth. Verification of the model predicted temperature profile against unconventional observations provided helpful information for correcting model forecasting errors in precipitation type transition.

**Key words** Extreme precipitation, Precipitation type, Height of 0°C level, Model forecast errors

**摘要** 应用多种常规和非常规观测气象资料以及再分析资料对2020年2月13日夜后至14日白天北京地区一次极端雨雪过程的成因进行了分析,并重点探讨了模式降水相态预报的误差及其原因。结果表明:(1)本次降水过程中,低涡系统深厚,强度异常强,移速慢,影响时间长,导致北京地区部分站点降水持续12h左右。异常偏强的东南风急流向北京西部山前输送水汽,配合与急流相伴的较强低空风切变形成的对称不稳定,产生高降水率的斜升对流降水。较长的降水时间以及冬季夜间罕见的高

\* 资助课题:国家自然科学基金青年科学基金项目(41105030)、国家气象中心预报员专项(Y201906)、国家重点研发计划项目(2018YFF0300104)。

作者简介:胡宁,主要从事灾害性天气诊断与分析研究。E-mail: huning425@126.com

通信作者:符娇兰,主要从事灾害性天气诊断分析和预报技术研究。E-mail: bluelilyfly@163.com

降水率共同造成了此次极端日降水。(2)北京凌晨0℃层高度和地面气温下降缓慢,北京西部处于两股冷空气间的暖舌中,冷空气从东路入侵造成北京东部降温时间较西部早,且降温幅度较大,导致0℃层高度呈西高东低形势,故转雪时间东部早于西部。(3)模式预报的东路冷空气较观测偏强偏早,降水的对流性也显著弱于观测,导致其预报的凌晨地面气温较观测低,0℃层高度下降过快,从而过早预报转雪时间,高估了降雪量和积雪深度,利用非常规温度观测对模式温度廓线预报误差进行检验,可为订正模式相态转化时间预报偏差提供依据。

关键词 极端降水, 降水相态, 0℃层高度, 模式预报误差

中图法分类号 P458

## 1 引言

冬半年,强雨雪天气时有发生,对交通出行、设施农业等造成不利影响,甚至会造成气象灾害,属于高影响天气(翟盘茂等,2017)。冬季降水常伴随雨雪相态转化过程,准确的相态预报是降雪量和积雪深度预报的基础。目前模式预报的地面降水相态主要由其预报的云内水成物含量的垂直分布结合其预报的环境温度垂直廓线诊断得到(Hersbach, et al, 2016),主观相态预报也主要基于关键层次的温度阈值进行判断(张琳娜等,2013),然而实际的降水相态与复杂的云微物理过程有关,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较大的偏差,因此相态预报一直是冬季降水预报的难点(Stewart, et al, 2015),值得深入研究。

近年来,中外学者通过观测诊断、模式模拟等手段研究各种天气背景下的复杂降水相态转化问题。Ganetis等(2018)通过上百个个例统计了北美冬季强降雨过程中的雷达回波条状亮带特征,并探讨了与之相伴随的热、动力场的环境特征。Wang等(2013)分析了2012年11月3—4日华北一次兼有暴雨和暴雪的强降水过程的多尺度特征以及各种尺度的天气系统间的相互作用,指出条件对称不稳定对冬季极端降水形成的促进作用;杨晓亮等(2014)则分析了此次过程降水类型的空间分布特征,并详细探讨了几个代表站的降水类型变化特征与其温度层结演变的关系;同样是针对这次过程,徐辉等(2014)进一步指出,温度垂直结构的细微差别可以决定降水类型,同时还发现雨雪转换时,大气低层存在上下一致的均温层。杨舒楠等(2017)分析了此次过程降水类型空间分布变化与气旋发展的关系,指出雨雪相态的转变取决于整个对流层低层的温度平流状况。刘畅等(2016)分析了2014年12月16—17日江淮气旋雨雪过程中山东地区较

罕见的“东雪西雨现象”,强调了地形动力抬升和辐射降温对边界层温度的影响。王晓芳等(2019)采用湿球温度讨论了2016年1月下旬广东罕见大范围雨雪冰冻天气过程中降水类型的空间分布以及随时间演变特征,指出降水相态的变化与暖层强度和用湿球温度定义的冷冻层强度密切相关。

随着探测技术的发展,各种新的非常规气象资料开始应用到复杂雨雪转换过程的研究中。赵宇等(2018)分析了2016年2月的一次江淮气旋极端雨雪过程成因,强调东北风冷垫在雨雪相态转换中的作用,并指出加强风廓线雷达、激光雨滴谱仪等非常规资料的应用,有益于改进降水相态短时临近预报。Schoor等(2012)利用RUC模式产品计算的湿球温度判定降水相态,并结合双线偏振雷达观测的0℃层亮带确定融化层高度,进一步校准相态判定结果,取得较好效果。Van Den Broeke等(2016)以及Kumjian等(2015)利用双偏振雷达产品研究了北美造成强降雨甚至伴有闪电的冬季风暴。在中国,刘黎平等(1996)较早将双线偏振雷达应用于云内降水相态研究。魏玮等(2019)分析了2015年12月杭州一次降雪天气过程,在研究中利用双线偏振雷达识别0℃层亮带及降水相态。卢晶晶等(2019)研究了一次强寒潮引发的浙北地区的雨雪过程,指出风廓线雷达垂直径向速度的变化可以为降水相态和量级预报提供参考。

以上研究多侧重分析观测的降水相态空间分布和时间演变,鲜有对模式预报误差方面的分析。2020年2月13—16日一股强冷空气影响中国,受其影响,2月13日夜间至14日白天(2月14日00—17时,北京时,下同)北京出现了明显的雨雪过程。此次过程,降水量具有极端性,突破了2月日降水量极值;雨雪相态转换的时间演变和空间分布复杂,模式预报误差较明显,导致预报的相态转换时间较观测早,加大了降雪量和积雪深度预报难

度。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极端雨雪过程及降水相态转化成因,深入探讨模式相态预报偏差的原因。文中所用资料包括国家气象站、自动气象站、L波段探空等常规气象观测资料,北京X波段双偏振雷达组网、北京地区云雷达、微波辐射计、风廓线雷达等非常规观测资料,欧洲中期天气预报中心(European Centre for Medium-Range Weather Forecasts,以下简称EC)的确定性和集合预报产品,以及逐时空间分辨率为 $0.25^\circ$ 的ERA5(Hersbach, et al, 2016)和时间分辨率为6 h、空间分辨率为 $0.25^\circ$ 的CRA40(廖捷等, 2018)以及FNL(NCEP, 1999)等再分析资料,其中CRA40由中国自主开发的全球大气再分析系统生成。

## 2 降水及相态转换过程概况

2月14日00—17时,受高空冷涡和低层低涡切变线系统影响(图1),北京出现一次极端雨雪过程。全市20个国家气象观测站累计降水量基本都在10 mm以上,其中东部和南部等地超过20 mm,最大出现在大兴(34.2 mm),除西部山区的延庆、斋堂、霞云岭3站外,其余17个站日降水量均突破了建站以来2月日降水量极值(图2a)。从降水相态来看,14日02时,低层低涡位于河北南部,东路冷空气前沿位于河北北部至辽宁西部一带,北京低

空受低涡东北侧的东南暖湿气流控制(图1a),以降雨为主,6 h累计降水量达到中到大雨量级,这在2月十分罕见。14日08时,低涡切变线东移,引导东路冷空气从河北东北部进入北京地区(图1b),北京平原地区陆续开始转雪,其中北部密云、东部通州、朝阳等站点转雪时间在06—08时,西部的海淀、门头沟等站的转雪时间在08—11时,西南部山区部分站点为雨转雨夹雪,并未出现纯雪,昌平站始终为降雨,可见转雪时间表现出明显的地域差异,东部和北部转雪早、西部转雪晚(图2c—e)。相态转换早晚决定了过程降雪量和积雪深度,由图2b可见,转雪较晚的中西部降雪量为中到大雪,无积雪,转雪时间较早的东部为暴雪量级,积雪深度1—7 cm。

EC模式预报的过程降水量与观测基本一致,但其预报05时前后全市开始出现雨雪转换(图11),同时预报全市将有大到暴雪,其中北京西部、北部和东部有暴雪,积雪4—10 cm,较观测转雪时间明显偏早,导致其预报的降雪量和积雪深度偏大,尤其在城区和西部偏大更为明显。主流模式指导预报在转雪时间上的误差不利于预报员准确预报降雪量和积雪深度,进而影响预报服务效果。

可见,此次过程累计降水量大,具有较强的极端性,同时相态转化区域特征明显,且转雪时间存在明显的预报偏差,从而导致降雪量和积雪深度预

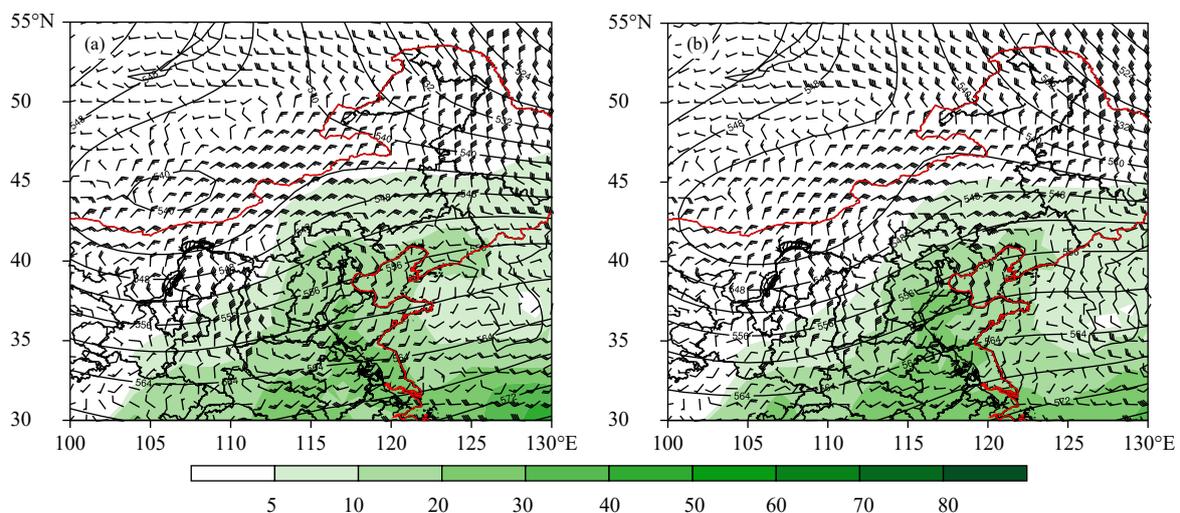


图1 2月14日02(a)和08(b)时500 hPa高度场(等值线, dagpm)、850 hPa风场以及整层可降水量(色阶, mm)

Fig. 1 500 hPa geopotential height (contours, dagpm), 850 hPa wind barbs, and precipitable water (shadings, mm) at 02:00 BT (a) and 08:00 BT (b) 14 Feb

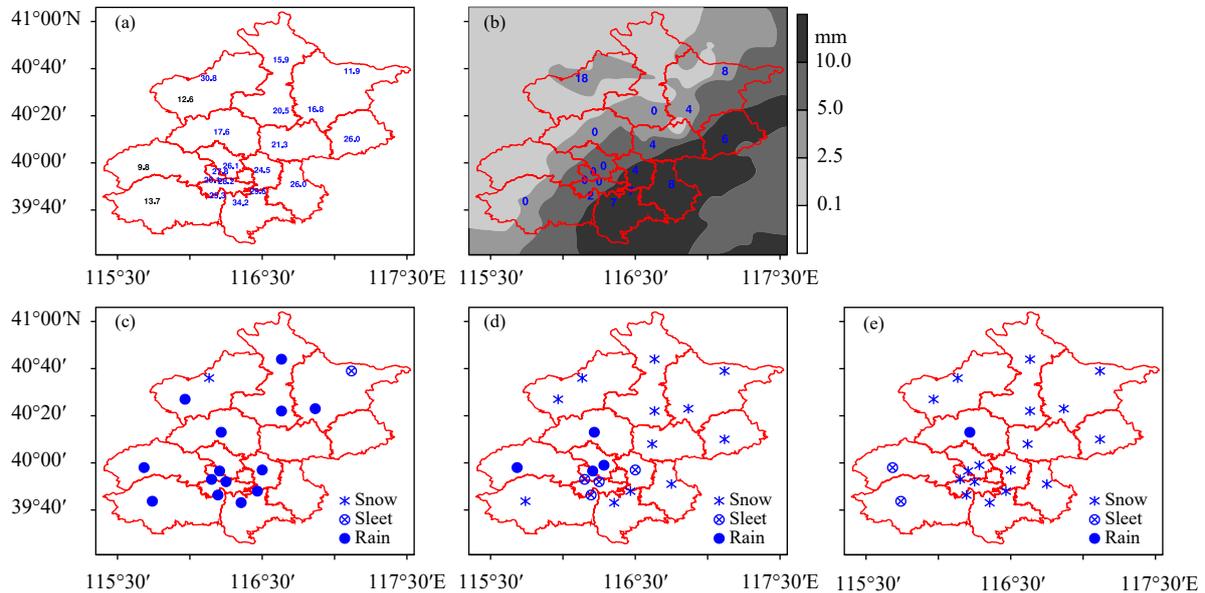


图 2 北京地区 (a) 过程累计降水量 (数值, mm, 累计时段: 14 日 00—17 时, 蓝色代表突破建站以来 2 月极值的站点), (b) 过程降雪量 (色阶, mm, 累计时段: 14 日 08—17 时) 和积雪深度 (数值, cm, 观测时刻: 14 日 20 时), 以及 14 日 05 (c)、08 (d)、11 (e) 时降水相态演变 (实心圆、带叉号的圆圈、星号分别表示降雨、雨夹雪以及降雪, 下同)

Fig. 2 (a) Total event precipitation in Beijing (values, mm, accumulated during 00:00—17:00 BT 14 Feb; blue color indicates stations with record breaking daily rainfall in February), (b) event snowfall depth (shadings, mm, accumulated during 08:00—17:00 BT 14 Feb) and snow depth (values, cm, observed at 20:00 BT 14 Feb), and precipitation type at 05:00 (c), 08:00 (d) and 11:00 (e) BT 14 Feb (The solid circle, and circles with cross and asterisk indicate rain, sleet and snow respectively; the same hereafter)

报存在一定偏差。为了提高对此次极端降水复杂相态转换过程的科学认识, 总结预报经验, 需要深入探讨以下 3 个问题: (1) 造成此次极端降水的主要原因是什么? (2) 北京地区转雪为何会出现东早西晚的特征? (3) 更为重要的是模式预报的转雪时间为何比观测明显早, 是否有订正的办法?

### 3 极端降水成因分析

从北京平原西部(海淀)和东部(观象台)两个代表站的小时降水量演变(图 3a、b)可见, 北京平原地区降水持续时间较长, 超过 12 h。此次过程, 高空低涡系统深厚, 且移动缓慢, 13 日 20 时至 15 日 08 时高空低涡基本维持在内蒙古中西部, 其中 13 日 08 时至 14 日 14 时前, 与之配合的 850 hPa 低涡切变线始终位于内蒙古中部至河北北部一带, 北京位于切变线东侧西南风或东南风气流内, 导致北京地区降水持续时间较长。此外, 14 日 02—08 时, 两站有连续多个时次的降水率在 4—6 mm/h, 并伴有 40 dBz 以上的雷达组合反射率, 表明凌晨时段存在对流性降水, 08 时后各站的降水率基本在

2 mm/h 以下, 雷达组合反射率在 35 dBz 以下, 以稳定性的层状云降水为主(仲凌志等, 2007)。另外, 由 14 日 04 时的雷达组合反射率(图 4d)可见, 北京西部山前为层积混合降水回波, 且有 3 条以上东北西南走向的 40 dBz 以上对流回波, 按照西北东南方向排列, 与东南暖湿气流方向一致, 与 Ganetis 等(2018)总结的北美冬季强降雨过程中与对称不稳定相伴出现的条带状回波的特征一致。从凌晨的云雷达观测资料(图略)也可以看出, 西部山前的海淀等地云顶高超过 6 km, 反演的垂直速度最高达 8 m/s。结合较强的降水率以及较大的雷达组合反射率, 可见北京凌晨降水具有明显的对流性。

北京 2 月出现对流性降水十分罕见。该日降水量能超过 2 月历史极值, 与凌晨降水的对流性密切相关。高层低涡动力强迫在北京地区大气低层诱导出强的偏东南风急流, 东南风风速达到 20 m/s(图 4a), 低层 925 hPa 偏东风分量超过气候平均值 3—4 倍标准偏差, 表明东南风异常偏强。暖湿东南气流携带水汽在北京山前堆积, 霞云岭微波辐射计观测的大气边界层比湿从中午前后开始明显增大,

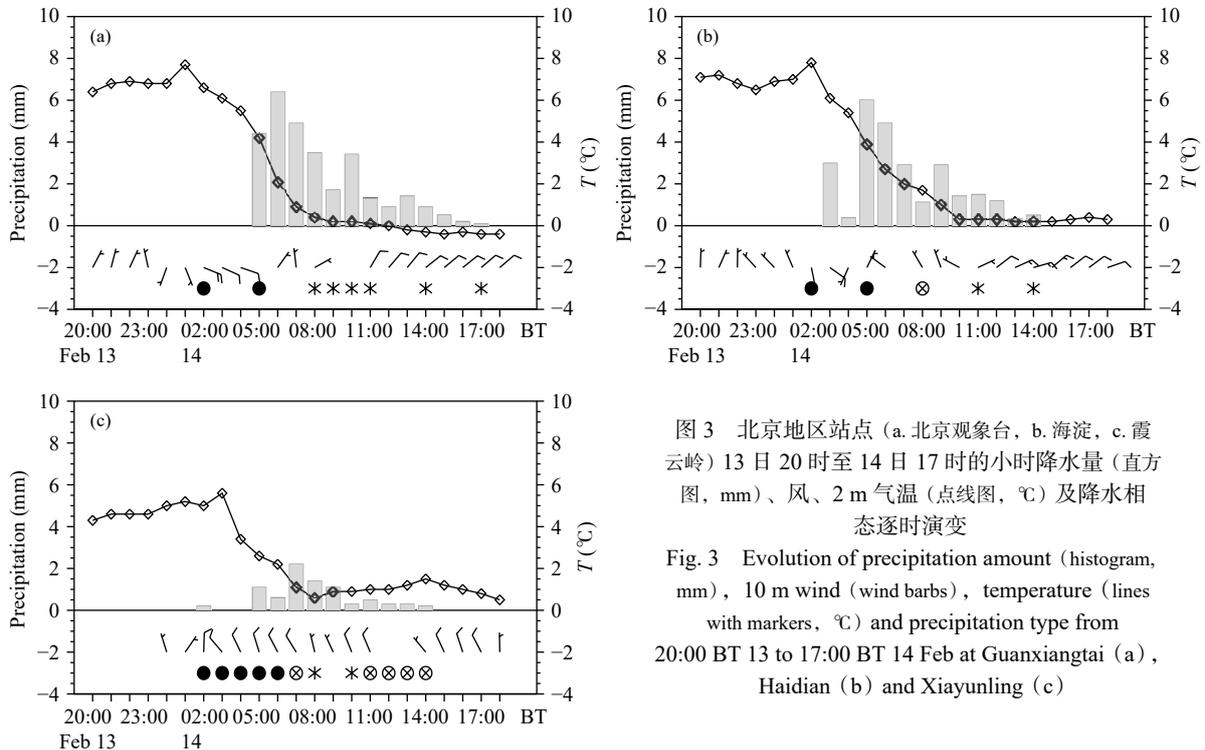


图3 北京地区站点 (a.北京观象台, b.海淀, c.霞云岭) 13日20时至14日17时的小时降水量(直方图, mm)、风、2 m气温(点线图, °C)及降水相态逐时演变

Fig. 3 Evolution of precipitation amount (histogram, mm), 10 m wind (wind barbs), temperature (lines with markers, °C) and precipitation type from 20:00 BT 13 to 17:00 BT 14 Feb at Guanxiangtai (a), Haidian (b) and Xiayunling (c)

13日20时超过6 g/kg(图略), 14日凌晨整层可降水量超过10 mm(图1)。由图4b可见, 03时, 强的暖湿气流输送使得北京山前形成假相当位温密集带, 并伴有明显的锋生(图4c), 同时850 hPa以下强的偏东南风和中层偏南风之间形成了强的风垂直切变, 导致其在850—700 hPa附近形成了湿位涡的负值区, 表明在中低空确有明显的锋生和对称不稳定的建立有利于东南风暖湿气流在北京山前低空加速斜升(Wang, et al, 2013), 造成冬季罕见的对流性降水, 进而造成较大的雨强, 结合系统移速较慢所导致的较长降水时间, 最终形成极端降水。

#### 4 降水相态转换区域性特征及成因分析

由海淀、观象台、霞云岭3站降水相态以及与之相伴的地面2 m气温、风速等的演变(图3)可见, 上述测站在02时的地面2 m气温都在6°C上下。北京东南部的观象台, 06时前后率先转东北风, 气温迅速下降, 07—08时接近0°C, 降水相态由雨转为雪。海淀站则迟至09时前后转为东北风, 且气温下降较慢, 08时气温仍在2°C左右。霞云岭虽然在山区, 但是08时后仍以雨和雨夹雪为主, 降水期间气温较高, 基本维持在1—2°C, 以弱西北风为主。

降水相态取决于整层温度结构, 尤其是冰晶层及0°C层高度的变化。降水发生时云内最低温度低于-30°C(图略), 有利于固态降水的形成, 因此此次降水过程相态转化主要取决于0°C层高度的变化。从L波段雷达探空(图5)可以看出, 13日20时到14日08时, 0°C层高度从1500—2000 m下降到550 m左右, 0°C层以下最高温度从6°C降至2°C。降水较强时段以及雨雪转换关键时刻没有探空资料, 因而尝试利用各种非常规资料获得两次探空之间的0°C层高度的演变情况。从霞云岭和怀柔的微波辐射计观测(图6)可见, 02时降水开始前, 0°C层高度仍然在2000 m左右, 东北部怀柔上空0°C层高度略低于西部霞云岭, 约1600 m左右。

04时前后, 北京西部地区降水较强, 此时微波辐射计已经不适用于观测大气温度廓线。从北京双线偏振雷达组网观测的偏振波协相关系数沿116.25°E(北京西部所在经度)的垂直剖面(图7)上可以看到一个相关系数小于0.94的亮带, 该亮带与0°C层融化有关(魏玮等, 2019), 亮带的上下边界大约相距1 km, 这可能和冰相粒子下落过程中融化造成的等温层有关(徐辉等, 2014)。亮带下边界以下对应纯雨相态, 在1 km左右高度(靠近雷达处为杂波, 可以忽略), 事实上, 此时北京西部地面2 m

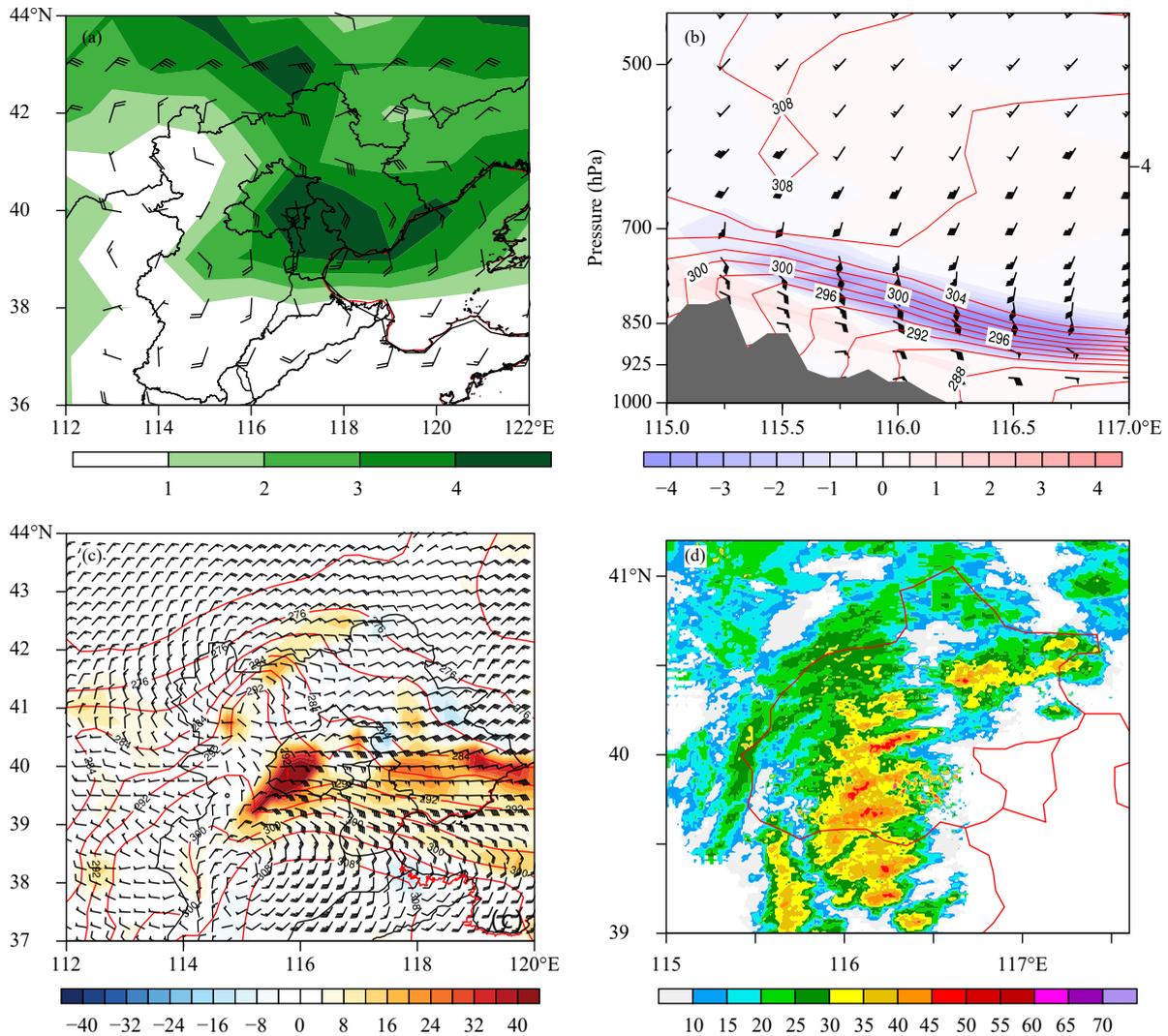


图4 (a) 14日02时925 hPa风场(风羽)及 $u$ 分量风速的归一化标准差(色阶), (b) 14日03时沿40°N的假相当位温(等值线, K)和MPV2(色阶, PVU)剖面, (c) 14日03时925 hPa锋生函数(色阶,  $K/(6\text{ h}\cdot 100\text{ km})$ )、假相当位温(等值线, K)和风场, (d) 14日04时雷达组合反射率因子(色阶, dBz)

Fig. 4 (a) 925 hPa wind bars and normalized standard deviation (shadings) at 02:00 BT 14 Feb, (b) pseudo equivalent potential temperature (contours, K) and MPV2 (shadings, PVU) profile along 40°N at 03:00 BT 14 Feb, (c) front genesis function (shadings,  $K/(6\text{ h}\cdot 100\text{ km})$ ) and pseudo equivalent potential temperature (contours, K) with 925 hPa wind bars at 03:00 BT 14 Feb, (d) composite reflectivity (shadings, dBz) at 04:00 BT 14 Feb

气温在6℃左右,按照湿绝热递减率估算,也可以得出此时北京西部上空0℃层高度在1 km左右。

综上所述,02时0℃层高度在1.5—2 km,04时在1 km左右,08时仍在550 m左右,说明观测0℃层下降较为缓慢,这也是北京直到08时前后才开始逐步转雪的重要原因之一。

为何在转雪时间上出现东早西晚的特征呢?从ERA5和CRA40再分析资料可以看出,08时北京西部处在1000 hPa东、西两股冷空气间的暖舌

中,冷空气从东路进入北京东部。CRA40暖舌相对ERA5更明显,这可能是因为CRA40同化了更多的观测资料,更能反映真实情况(图8a、b)。从08时北京上空温度剖面(图8c)上看,CRA40的0℃层在950 hPa附近,与探空确定的550 m左右的0℃层高度更接近,而ERA5的0℃层(图略)显著较探空偏低;另外,还可以注意到,CRA40温度剖面显示北京西部0℃层高度明显高于东部,且在北京西部山前有明显的暖平流,底层偏北风将北京

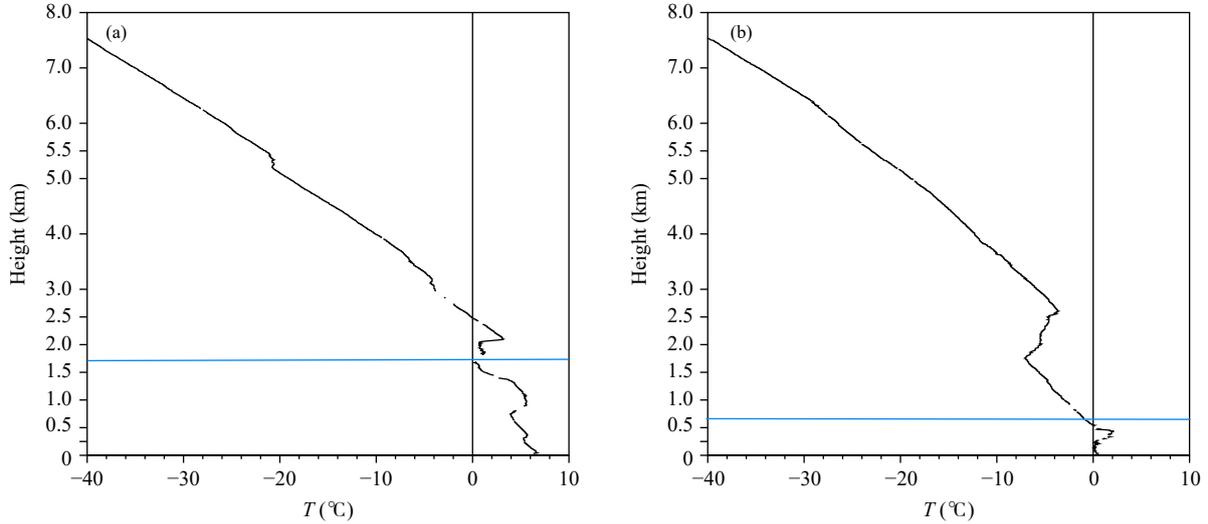


图5 北京观象台 L 波段雷达探空温度 (°C) 廓线 (a. 13 日 20 时, b. 14 日 08 时)

Fig. 5 Temperature (°C) profiles from L-band radar soundings at 20:00 BT 13 (a) and 08:00 BT (b) 14 Feb

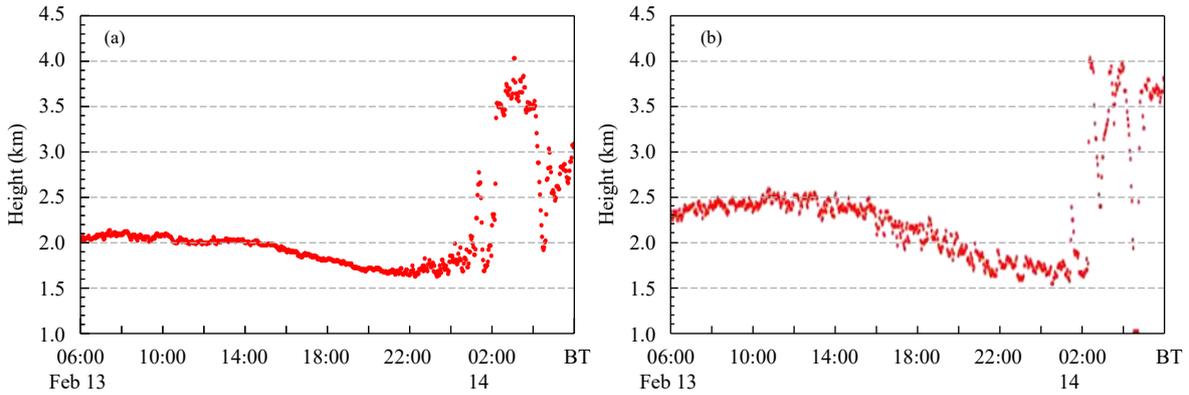


图6 霞云岭 (a) 和怀柔 (b) 微波辐射计反演的 0°C 层高度时间演变

Fig. 6 Evolution of 0°C level height derived from Microwave Radiometer at Xiayunling (a) and Huairou (b)

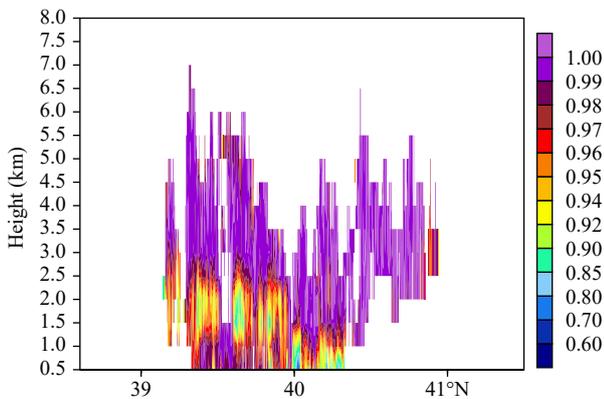


图7 14 日 04 时北京 X 波段双线偏振雷达组网观测的偏振波协相关系数沿 116.25°E 的垂直剖面

Fig. 7 Correlation coefficient observed by the X-band dual-polarization weather radar network along 116.25°E at 04:00 BT in Beijing

西部东北西南向延伸的暖舌中较为温暖的空气输送至平原地区,导致西部地区温度较东部偏高,0°C 层偏厚。

从自动气象站观测资料也可以看出,06—07 时,受偏东风影响,北京偏东地区逐小时负变温更明显。说明东路冷空气率先影响东部地区,而北京西部地区处于暖舌中,未受东路冷空气影响,直到 09 时后,随着冷空气向西南方向推进,西部才开始降温(图 9)。从风廓线雷达资料(图 10)可以清楚地看到,位于北京西部的海淀 07 时 30 分大气底层才转为东北风,且风速较弱,位于北京东部的观象台,06 时 30 分后就已转东北风,较海淀提早约 1 h。另外,海淀站在 06 时 30 分至 07 时受弱西北风控制,前已述及,北京西北部山区为暖舌控制,因

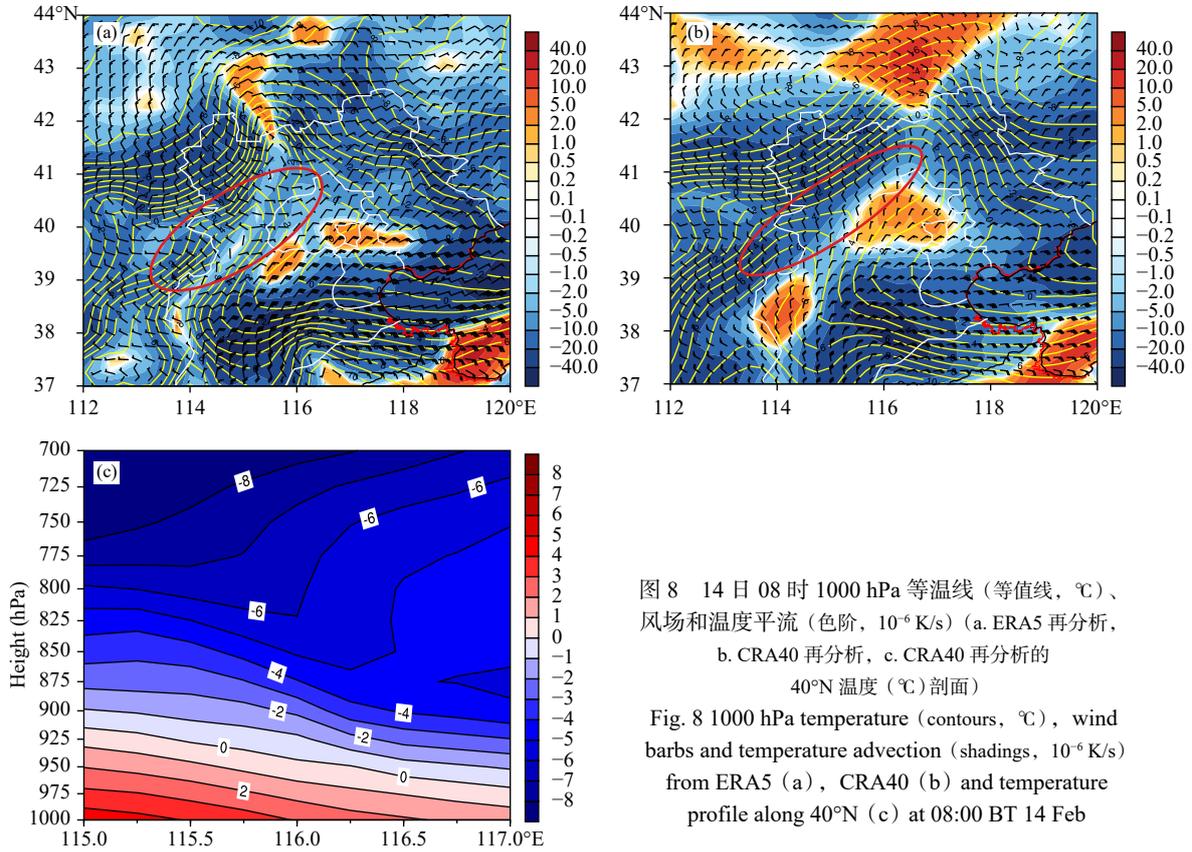


图 8 14 日 08 时 1000 hPa 等温线 (等值线, °C)、风场和温度平流 (色阶,  $10^{-6}$  K/s) (a. ERA5 再分析, b. CRA40 再分析, c. CRA40 再分析的 40°N 温度 (°C) 剖面  
Fig. 8 1000 hPa temperature (contours, °C), wind barbs and temperature advection (shadings,  $10^{-6}$  K/s) from ERA5 (a), CRA40 (b) and temperature profile along 40°N (c) at 08:00 BT 14 Feb

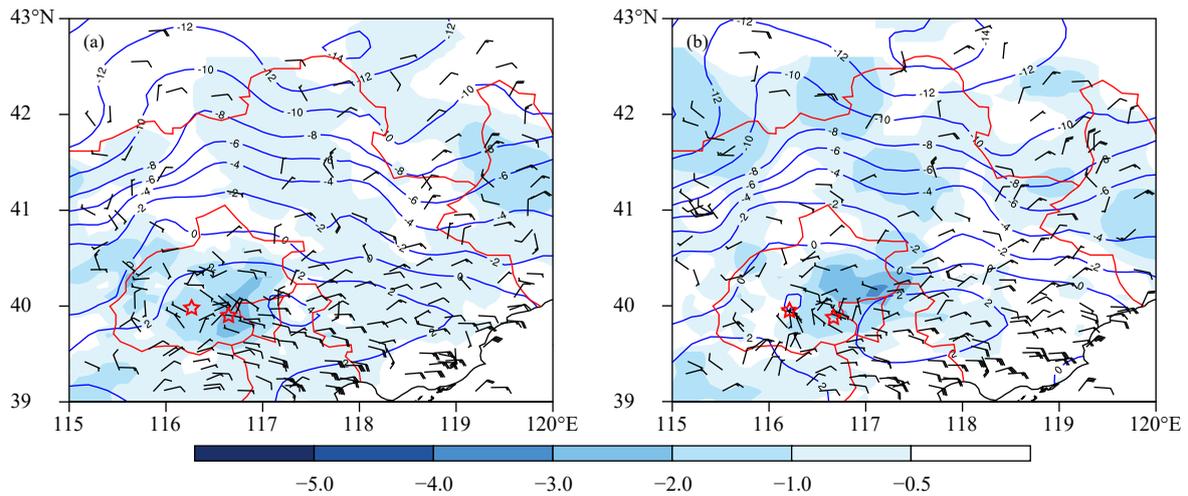


图 9 14 日 06 (a)、07 (b) 时国家站和区域自动站观测的地面气温 (等值线, °C), 1 h 变温 (色阶, K) 和地面风场  
Fig. 9 2 m temperature (contours, °C), hourly temperature change (shadings, K), 10 m wind barbs deduced from national level weather stations and regional auto weather stations at 06:00 BT (a) and 07:00 BT (b) 14 Feb

此, 不利于北京平原西部地区温度的下降。

综上所述, 北京西部的暖舌和暖平流, 有利于北京西部 0°C 层厚度和强度的维持, 导致北京西部转雪偏晚, 而东路冷空气使得东部降温早于西部, 首先转雪, 是形成 14 日 08 时前后北京“东雪西雨”

现象的重要原因。

### 5 模式降水相态预报偏差及原因分析

如图 11a, 05 时, 大部分 EC 集合成员预报北京的降水相态由雨转雪。EC 高分辨率确定性预报也

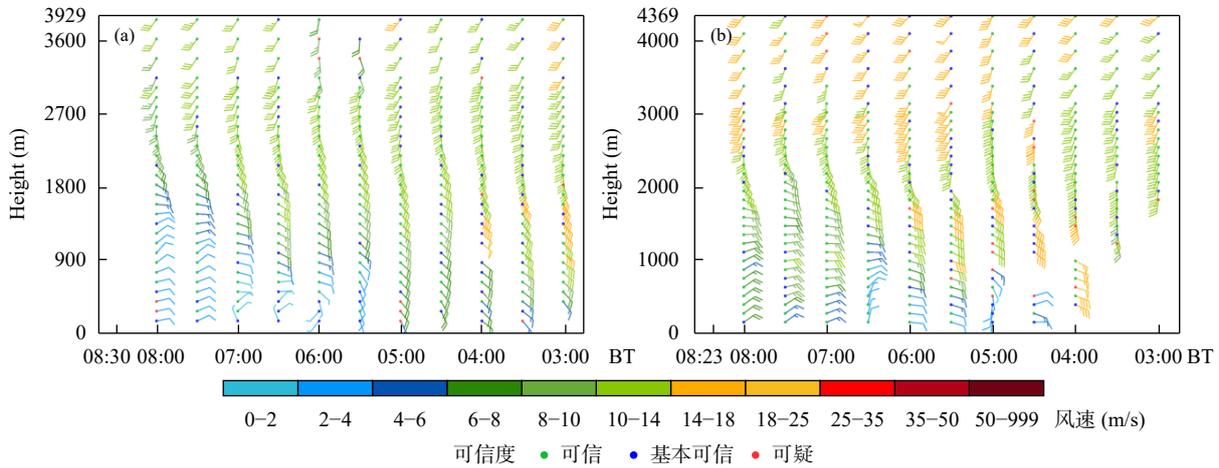


图 10 海淀 (a) 和北京观象台 (b) 风廓线雷达观测的风场时间高度剖面

Fig. 10 Time-height profiles of wind barbs deduced from wind profiler at Haidian (a) and Guanxiangtai (b)

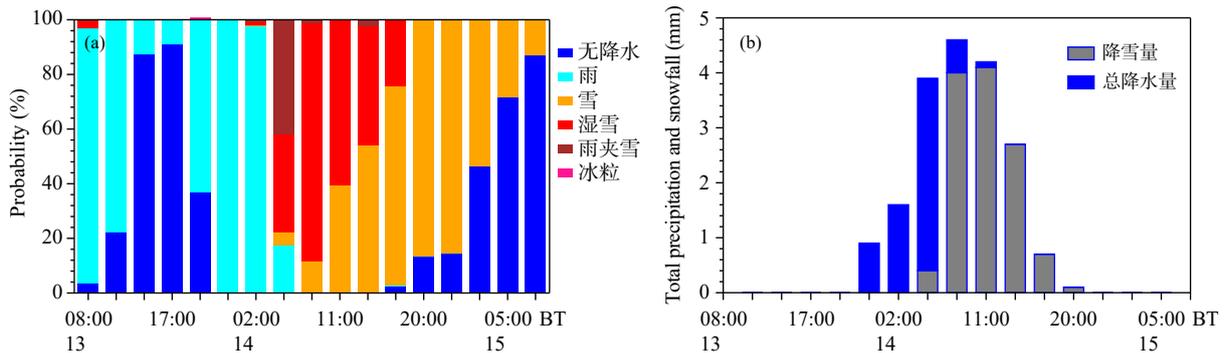


图 11 13 日 08 时起报的 (a) EC 集合预报降水类型概率 (%) 和 (b) EC 高分辨率确定性预报的 3 h 雨雪量 (mm)

Fig. 11 Probability (%) of various precipitation type of EC ensemble forecast (a), total precipitation and snowfall of EC high-resolution model forecast (b) initialized at 08:00 BT 13 Feb

在这一时刻预报转雪,且预报 08 时的 3 h 累计降水以降雪为主(图 11b),北京平原地区将出现 2—4 cm 的积雪。然而,观测北京各地转雪时间在 08 时前后,比模式预报偏晚至少 3 h,平原地区除东南部外大部地区无明显积雪。

结合观测,可以对照检验模式为什么预报转雪偏早。首先,如图 12 所示,02 时,观测上,北京中南部还是偏东南风,而模式预报已经是明显的东北风。可见,模式预报的东路冷空气入侵时间较观测明显偏早。在温度方面,也可以看出,05 时北京观象台温度 4℃,EC 确定性模式预报只有 1℃,明显低于观测,表明模式预报的冷空气较观测偏强(图 13)。另外,13 日 08 时起报的集合预报成员虽然大部分预报 05 时北京转雪,但仍有一些成员报出了 05 时北京观象台是降雨而非降雪。通过合成分析发现,

预报降雨成员预报的 05 时地面气温为 3℃,预报降雪成员预报的地面温度为 1℃(图 13)。可见,模式对冷空气移速和强弱的预报偏差导致了相态预报的误差。

同时,冷空气影响偏早导致模式中降水比观测提前触发,对比图 11b 和图 3a 可见,模式预报北京 13 日 23 时前已有明显的 3 h 累计降水,而观测北京 14 日凌晨才陆续开始出现降水。模式预报的降水率在 1 mm/h 左右,表现为稳定性的层状云降水,这与观测出现的对流性降水性质迥异。过早出现的小雨形成的冷水滴下曳蒸发冷却也可以导致近地面降温,进一步导致模式温度预报较观测偏低。

如前所述,在对称不稳定的背景下,北京凌晨对流发展旺盛,垂直速度达到 8 m/s,云高可达 6 km,对流降水的降水率达 6 mm/h,在大气低层会产生潜

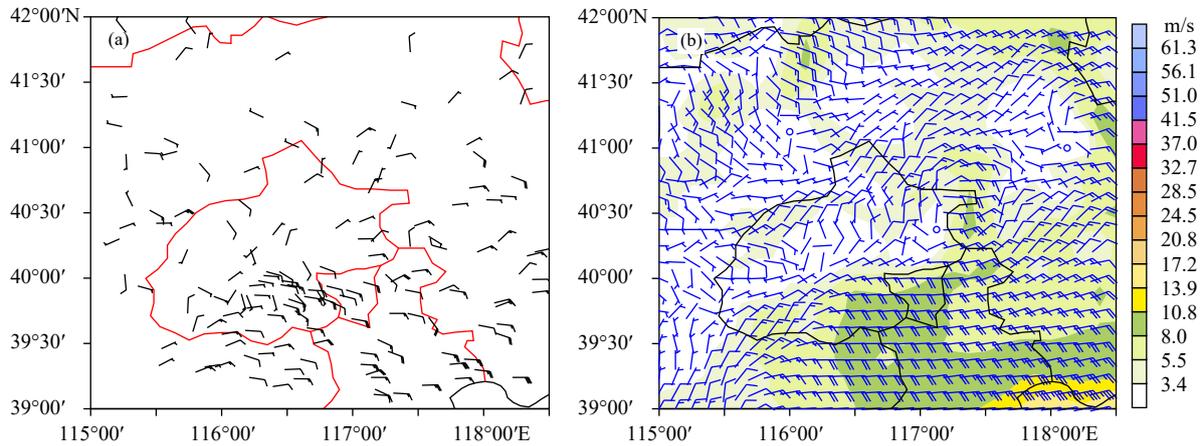


图 12 2月14日02时风场观测(a)和EC确定性模式13日20时起报的相应的风场(b,色阶,m/s)

Fig. 12 Observed (a) and EC model forecasted wind barbs (shadings, m/s) at 02:00 BT 14 initialized at 20:00 BT 13 Feb

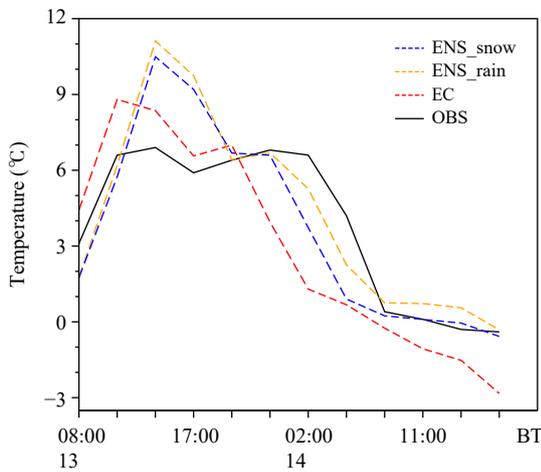


图 13 EC确定性模式、预报05时北京降雪的集成员合成以及预报降雨的集成员合成预报的温度和观测对比

Fig. 13 Comparison of temperature evolutions between observations, EC high-resolution forecast, and composite forecast of ensemble members predicting snow/rain at 05:00 BT

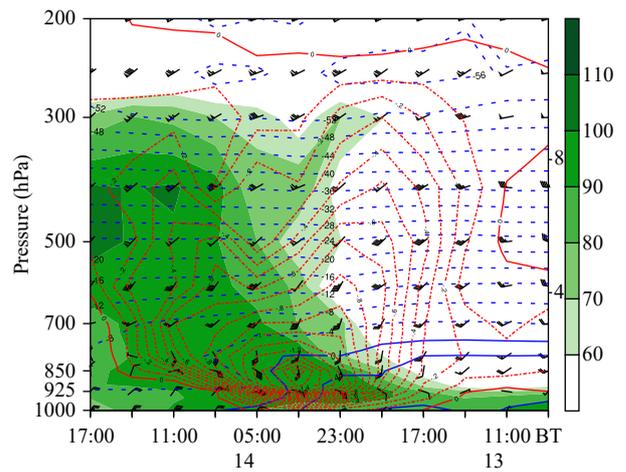


图 14 13日08时起报的EC确定性模式预报的温度(蓝色等值线,℃)、相对湿度(色阶,%)、垂直速度(红色断线,Pa/s)、风场

Fig. 14 Time-height profile of EC forecasted temperature (blue contours, °C), relative humidity (shadings, %), vertical velocity (red dashed contours, Pa/s), and wind barbs initialized at 08:00 BT 13 Feb

热加热。而模式预报的层云降水对应的低层垂直速度中心只有 0.1 m/s 的量级(图 14), 如果以相对湿度大值区估计云高也只有 3 km 左右, 降水率也显著低于观测, 基本以层状云降水为主, 相应大气低层的潜热加热率也偏低, 不利于 0℃ 层高度的维持, 这也可能是导致模式预报的 0℃ 层高度较观测显著偏小的原因之一。

进一步对比模式预报的 0℃ 层高度和观测(图 14 可见), 23 时前模式预报的 0℃ 线在 800 hPa 高度附近(约 2000 m), 与探空观测的 2 km 接近。

主要降水时段开始后, 其预报的 04 时前后 0℃ 层在 950 hPa 以下(约 600 m), 明显低于双线偏振雷达估计的 1 km 高度, 预报的 08 时 0℃ 层已经在 1000 hPa 以下, 显著低于观测的 500 m。这就提示预报人员, 在临近时效, 应该多利用高时空分辨率的地面观测以及非常规资料对模式预报性能进行评估。如在本次过程中, 在 14 日凌晨可以根据微波辐射计、双线偏振雷达等估测的 0℃ 层高度及时检验模式预报的 0℃ 层高度的预报偏差, 根据逐时观测的地面 2 m 气温实时评估模式地面 2 m 气温

预报误差, 基于模式温度预报偏差可将模式预报的转雪时间向后订正, 并相应调整降雪量和积雪深度预报。

另外, 对比 14 日 08 时探空和模式预报的相对湿度发现, 模式能够较好地反映 08 时前后实况中相对湿度高值区向高空 500 hPa 左右高度的迅速延展。相对湿度高值区增厚到了  $-15^{\circ}\text{C}$  等温线附近, 且最大垂直抬升速度也由对流层中低层升高至对流层高层。Cobb 等(2005)指出,  $-12^{\circ}\text{C}$ — $-18^{\circ}\text{C}$  高度是最有利于雪花产生的区域, 当云内最大垂直抬升速度位于区域内, 云内降雪效率将达到最大化。实况中, 北京平原站点整体在 08 时前后转雪, 与相对湿度高值区及最大抬升速度扩展到有利于雪花产生的区域有关。EC 模式虽然对  $0^{\circ}\text{C}$  层高度的演变预报误差较大, 但对于高相对湿度区的演变趋势把握较好, 以后应当在预报实践中加强关注。

## 6 总结与讨论

针对 2020 年 2 月 13 日夜间至 14 日白天北京出现的一次伴有复杂降水相态转换的极端降水过程, 利用多种常规和非常规气象观测资料分析了北京地区极端降水及雨雪转换的时空特征及其成因, 探讨了模式降水相态预报误差及成因, 结论如下:

(1) 本次降水过程, 高空有切断低压形成, 低空有明显的低涡切变线, 系统深厚, 移速慢, 影响时间长, 导致北京降水持续长达 12 h。14 日凌晨, 北京上空大气低层强盛的东南风急流向西部山前输送水汽, 并在低空形成强切变及对称不稳定区。东南风暖湿气流的斜升使得对流发展旺盛, 产生了冬季夜间罕见的高降水率的对流性降水。较长的降水时间以及凌晨时段的高降水率共同造就了此次极端日降水。

(2) 凌晨北京上空  $0^{\circ}\text{C}$  层高度下降缓慢, 地面温度一直维持在较高水平, 直到 08 时前后北京平原地区大部方才逐步转雪, 比模式预报的转雪时间偏晚至少 3 h。北京平原地区各地转雪时间差异明显, 呈现东早西晚的特征。冷空气从东路入侵造成北京东部降温时间较西部早, 且降温幅度较大。北京西部低空仍受暖舌控制, 受冷空气影响偏晚, 甚至伴有暖平流,  $0^{\circ}\text{C}$  层高度呈西高东低形势, 故转雪时间在 08 时以后, 较东部偏晚。

(3) 模式预报的东路冷空气较观测偏强、偏早, 降水触发也较观测偏早, 且以稳定的层状云降水为主。上述偏差共同导致其预报的凌晨地面气温较观测偏低  $3^{\circ}\text{C}$  左右,  $0^{\circ}\text{C}$  层高度下降过快, 从而过早预报转雪时间, 高估了降雪量和积雪深度。通过对比检验模式预报的温度与常规和非常规温度观测资料, 可以将模式相态转化预报偏差进行一定程度的订正。

文中通过多种观测资料和业务模式预报产品对北京地区相态转换成因及模式预报误差进行了分析, 结论是否具有普适性还有待更多个例的验证。降水相态预报涉及复杂的云微物理过程, 为了进一步探讨降水相态的物理过程, 应结合地面自动观测站、微波辐射计、双线偏振雷达、卫星等高时空分辨率观测资料进行机理研究。此外, 准确的温度预报是相态预报的基础, 然而, 业务模式对边界层内温度预报还存在一定偏差, 这也导致精准地预报降水相态及其转化难度非常大, 因此有必要加强基于观测资料的模式温度和降水相态等预报早期误差检验与订正, 这是订正模式相态预报偏差的可能手段之一。

## 参考文献

- 廖捷, 胡开喜, 江慧等. 2018. 全球大气再分析常规气象观测资料的预处理与同化应用. *气象科技进展*, 8(1): 133-142. Liao J, Hu K X, Jiang H, et al. 2018. Pre-process and data selection for assimilation of conventional observations in the CMA global atmospheric reanalysis. *Adv Meteor Sci Technol*, 8(1): 133-142 (in Chinese)
- 刘畅, 杨成芳, 宋嘉佳. 2016. 一次江淮气旋复杂降水相态特征及成因分析. *气象科学*, 36(3): 411-417. Liu C, Yang C F, Song J J. 2016. Analysis on complex phases features and causes of a Jianghuai-cyclone precipitation. *J Meteor Sci*, 36(3): 411-417 (in Chinese)
- 刘黎平, 钱永甫, 王致君. 1996. 用双线偏振雷达研究云内粒子相态及尺度的空间分布. *气象学报*, 54(5): 590-599. Liu L P, Qian Y F, Wang Z J. 1996. The study of spacial distribution of phase and size of hydrometeors in cloud by dual linear polarization radar. *Acta Meteor Sinica*, 54(5): 590-599 (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. *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 Meteor Sci*, 39(1): 129-136 (in Chinese)
- 王晓芳, 程正泉, 姜丽萍. 2019. 2016 年广东一次罕见寒潮雨雪冰冻天气过程分析. *气象科技*, 47(1): 106-115. Wang X F, Cheng Z Q, Jiang L P.

2019. Analysis of a rare cryogenic freezing rain and snow event in cold wave weather over Guangdong province in 2016. *Meteor Sci Technol*, 47(1): 106-115 (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. *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. *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. *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. *Plateau Meteor*, 33(5): 1272-1280 (in Chinese)
- 杨舒楠, 徐璐, 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. *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. *Meteor Mon*, 43(6): 665-674 (in Chinese)
- 杨晓亮, 王咏青, 杨敏等. 2014. 一次暴雨与特大暴雪并存的华北强降水过程分析. *气象*, 10(12): 1446-1454. Yang X L, Wang Y Q, Yang M, et al. 2014. Analysis on severe heavy precipitation event with rainstorm and large blizzard in North China. *Meteor Mon*, 10(12): 1446-1454 (in Chinese)
- 翟盘茂, 廖圳, 陈阳等. 2017. 气候变暖背景下降水持续性与相态变化的研究综述. *气象学报*, 75(4): 527-538. Zhai P M, Liao Z, Chen Y, et al. 2017. A review on changes in precipitation persistence and phase under the background of global warming. *Acta Meteor Sinica*, 75(4): 590-599 (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. *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. *Plateau Meteor*, 32(6): 1780-1786 (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. *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. *Plateau Meteor*, 37(5): 1325-1340 (in Chinese)
- 仲凌志, 刘黎平, 顾松山. 2007. 层状云和对流云的雷达识别及在估测雨量中的应用. *高原气象*, 26(3): 593-602. Zhong L Z, Liu L P, Gu S S. 2007. A algorithm identifying convective and stratiform in mixed precipitation and its application to estimating precipitation. *Plateau Meteor*, 26(3): 593-602 (in Chinese)
- Cobb Jr D K, Waldstreicher J S. 2005. A simple physically based snowfall algorithm//Preprints, 21st Conference on Weather Analysis and Forecasting/17th Conference on Numerical Weather Prediction. Washington, DC: Amer Meteor Soc
- Ganetis S A, Colle B A, Yuter S E, et al. 2018. Environmental conditions associated with observed snowband structures within northeast U.S. winter storms. *Mon Wea Rev*, 146(11): 3675-3690
- Hersbach H, de Rosnay P, Bell B, et al. 2016. Operational global reanalysis: Progress, future directions and synergies with NWP ( Report) IFS Documentation CY43R1. ECMWF, 2016
- Kumjian M R, Deierling W. 2015. Analysis of thundersnow storms over northern Colorado. *Wea Forecasting*, 30(6): 1469-1490
- National Centers for Environmental Prediction ( NCEP) /National Weather Service/NOAA/U.S. Department of Commerce ( 2000) updated daily. 1999. NCEP FNL Operational Model Global Tropospheric Analyses, continuing from July 1999, Research Data Archive at the National Center for Atmospheric Research, Computational and Information Systems Laboratory. <https://doi.org/https://doi.org/10.5065/D6M043C6>. (Accessed 17 Feb 2020)
- Schuur T J, Park H S, Ryzhkov A V, et al. 2012. Classification of precipitation types during transitional winter weather using the RUC model and polarimetric radar retrievals. *J Appl Meteor Climatol*, 51(4): 763-779
- Stewart R E, Thériault J M, Henson W. 2015. On the characteristics of and processes producing winter precipitation types near 0°C. *Bull Amer Meteor Soc*, 96(4): 623-639
- Van Den Broeke M S, Tobin D M, Kumjian M R. 2016. Polarimetric radar observations of precipitation type and rate from the 2-3 March 2014 winter storm in Oklahoma and Arkansas. *Wea Forecasting*, 31(4): 1179-1196
- Wang D H, Duan Y H, Liu Y, et al. 2013. A case study of the November 2012 mixed rain-snow storm over North China. *Acta Meteor Sinica*, 27(5): 601-625