

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).

## 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\*

刘梅<sup>1,2</sup> 俞剑蔚<sup>1,2</sup> 蒋义芳<sup>1,2</sup> 喜度<sup>1</sup> 李聪<sup>3</sup>

1 江苏省气象台,南京 210008

2 中国气象局交通气象重点开放实验室,南京 210009

3 南京市气象局,南京 210019

**提 要:** 利用自动气象站、双偏振雷达、微波辐射计和 NCEP 再分析资料,结合中尺度 WRF 模式模拟结果,分析了 2020 年 3 月 28 日江苏的沿江和苏南地区突发降雪前后多源监测资料相关特征及温度突降成因。研究表明:本次突发降雪的气温突降时间、区域变化与较强降水开始时间、移动方向一致。微波辐射计反演产品中 0℃ 层高度下降和液态水含量的增加可作为地面气温和降水相态转换的临近判据,地面气温的下降滞后于 1.5~3.0 km 高度气温的下降(约 2~3 h)。双偏振雷达反射率、相关系数和分类产品对雨雪转换和雪区扩展方向判断具有显著特征,0℃ 层亮带区域、形态变化与低层降温区域、移动方向一致,相关系数中不同相态粒子的非对称性特征和形态变化反映出融化层高度、厚度和移动方向变化,混合相态层不对称特征和分类产品湿雪监测信号早于降雪 1~2 h。诊断分析发现冰晶及雪花下沉过程的融化潜热作用和穿过干区的蒸发吸热对低层气温短时迅速下降具有一定正贡献。温度下降呈现自上而下、自西向东的时空变化特点,850~700 hPa 高度最先出现下降,近地面气温下降约滞后 2 h。研究表明,多源监测资料可为雨雪转换过程提供较好的决策支撑,尤其是在短时临近时效内。

**关键词:** 突发降雪,多源监测资料,变化特征,成因分析

**中图分类号:** P412,P458

**文献标志码:** A

**DOI:** 10.7519/j.issn.1000-0526.2021.10.001

## Multi-Source Monitoring Characteristics and Causes of Abrupt Snowfall in Southern Jiangsu on 28 March 2020

LIU Mei<sup>1,2</sup> YU Jianwei<sup>1,2</sup> JIANG Yifang<sup>1,2</sup> XI Du<sup>1</sup> LI Cong<sup>3</sup>

1 Jiangsu Meteorological Observatory, Nanjing 210008

2 Key Laboratory of Transportation Meteorology, CMA, Nanjing 210009

3 Nanjing Meteorological Bureau, Nanjing 210019

**Abstract:** The characteristics of multi-source monitoring data and the causes of sudden temperature decline before and after the abrupt snowfall in southern Jiangsu Province on 28 March 2020, are investigated with the data of automatic meteorological station, dual polarization radar, microwave radiometer, NCEP reanalysis data and simulation results of mesoscale model WRF. The research shows that the time and area changes of temperature drop are consistent with the beginning time and moving direction of heavy precipitation in this sudden snowfall. The 0℃ layer height decline and the increase of liquid water content inversed by microwave radiometer can be used as the approach criterion to judge the surface temperature and precipitation phase transition. The time of ground temperature decrease lags behind the temperature drop in the

\* 中国气象局预报员专项(CMAYBY2019-040)资助

2020年6月11日收稿; 2021年5月6日收修定稿

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

1—3 km height for about 2—3 hours. The radar reflectivity factor, the correlation coefficient and classified products of dual polarization radar products have obvious characteristics in the judgment of rain-snow conversion and snow expansion direction during this snowfall. The light zone and shape change of the 0°C layer are consistent with the cooling zone and movement direction of the lower layer. In the correlation coefficients, the asymmetrical characteristic regions and morphological changes of different phase particles reflect the changes in height, thickness and movement direction of the melting layer. Asymmetric characteristics of mixed phase layer and wet snow monitoring signals of classified products appear 1—2 hours earlier than snowfall. The diagnostic analysis shows that the latent heat of melting during the subsidence of ice crystals and snowflakes and the latent heat of evaporation through the dry area have a positive contribution to the short and rapid decrease of temperature in the lower layer. The temperature change presents the spatio-temporal evolution characteristics from above to below and from west to east. The earliest temperature decline occurs at the height of 850—700 hPa. The near-surface temperature decline is delayed by about 2 hours. Therefore, this result suggests that the multi-source monitoring data can provide better decision support for the rain-snow conversion process, especially in the short-time and nowcasting forecasts.

**Key words:** abrupt snowfall, multi-source monitoring data, change characteristic, cause analysis

## 引 言

降雪在华东地区每年都有发生,春季相对较少。春季雨雪转换的关键是低层及地面气温变化的判断,其经常出现在气温处于雨雪转换的临界点附近,而气温变化影响因子复杂,降水相态难以确定。2020年3月28日凌晨江苏的沿江和苏南地区在前期较暖的情况下受冷空气和多要素共同影响发生的降雪,虽然降雪强度较弱,没有明显积雪,但社会反响较大,当日媒体、微博均对本次弱降雪进行了广泛报道。而本次降雪相态转换快、持续时间短,前期模式预报表现较差。为何出现小范围气温突然下降?如何通过监测资料和机理分析发现可能出现相态转换的信息?因此,有必要针对本次过程开展降雪突发成因及多源监测资料等相关分析,为雨雪转换预报提供参考依据。

关于雨雪相态判断和降雪成因的研究可分为气候统计判定标准和降温机理两个方面。在雨雪判定标准方面,许爱华等(2006)、梁红等(2010)、李江波等(2009)均通过过程分析和统计给出了具有较好预报能力的地方降雪判断依据和指标。借鉴国外气层位势厚度表示大气冷暖方法(Heppner, 1992; Czys et al, 1996),漆梁波和张瑛(2012)、孙燕等(2013)经统计分析,建立了具有更加普适客观的相态判别方法,给出低层厚度阈值。研究显示低层温度层结是影响降水相态的关键。而引起温度层结变化的原因

非常复杂,国内很多学者从不同方面也开展积极探索,杜佳等(2019)、杨舒楠等(2017)均从冷空气叠加和温度平流方面讨论了对降水相态的影响。郭良辰等(2019)分析了北京城市化对降雪分布影响及低层大气温度层结影响。廖晓农等(2013)针对北京3月降雪过程提出了回流东风和槽后冷空气入侵对边界层气温下降都有一定影响。刘建勇等(2013)认为温度水平平流和非绝热加热项起主要作用。徐辉和宗志平(2014)发现相关层次的融化作用可以引起温度垂直结构变化和相态转换。彭霞云等(2020)通过对低层降温机制分析,发现在平流降温较弱的背景下,冰晶融化吸热作用也可导致中低层温度下降。在降温机制的分析中多侧重于温度平流的作用,也逐渐涉及非绝热加热项的探讨。国外在非绝热项对温度变化影响的认识更为深入,Lackmann et al(2002)指出低层冻结和融化作用对降水相态的影响,Thériault et al(2010)研究发现降水率对降水相态有重要影响。研究表明,任何可能导致低层温度变化的因素都可能影响到最终降水相态的改变。而在实际预报过程中,既有平流作用又有非绝热项引起的温度层结变化,模式对平流作用引起的温度变化预报效果较好,而非绝热项对温度影响的预报能力偏差较大,因此有必要对一些复杂降雪过程的温度层结变化的机制做进一步探讨总结。

近年来,随着监测资料的丰富,应用微波辐射计、双偏振雷达探测数据及反演产品进行降水相态的判断分析成为可能。吴杨等(2018)利用浙江双偏

振雷达资料分析,建立了基于水平反射率因子、差分反射率因子、差传播相移率、零滞后相关系数的降雪判据。魏玮等(2019)分析了双偏振雷达在降雪预报中的优势,发现  $0^{\circ}\text{C}$  层亮带识别降雪相态和降雪累计时间的可靠性。杨祖祥等(2019)分析了安徽特大暴雨过程中双偏振雷达产品特征,再次验证了利用相关系数、反射率因子、差分反射率产品判断融化层高度、降水粒子属性的可行性。微波辐射计资料主要应用于温湿垂直空间的高精度分析(廖晓农等,2013),但目前研究相对较少。两类资料具有观测范围大、时空分辨率高、时效性强,且能在夜间持续监测,对降雪影响因子的判断又具有一定的可靠性和提前量,对降水相态的短时临近预报监测具有重要作用,因此突发过程或前期预报不好的过程可依靠监测资料的分析进行临近预报的修订。这需要对降雪过程中双偏振雷达产品和微波辐射计产品开展细致分析,从不同时空角度发现具有预报意义的信息。

根据本次过程特点和需求,本文对 2020 年 3 月 28 日突发弱降雪过程进行了温度下降成因分析,试图发现该背景下促使相态转换的气温下降预报的关注点。同时结合多源监测资料从温度、水汽、形态各角度分析相态转换前后变化特征,发现温度变化和降水粒子属性的空间变化特点。从监测资料和降温成因两方面挖掘利于雨雪转换的信息,以期分析的结果对预报人员认知降水相态的变化过程及影响机制有所帮助,在此基础上提高雨雪相态的判断能力。

## 1 资料与方法

实况分析中应用了江苏省自动站降水、气温等分钟级观测资料;多源监测资料分析主要应用了双偏振雷达(反射率、相关系数和分类产品)、微波辐射计(温度和液态水含量)等监测数据;过程诊断分析采用了 NCEP 一日 4 次  $0.25^{\circ}\times 0.25^{\circ}$  再分析资料和中尺度模式 WRF 模拟资料相结合,其中再分析资料主要用来说明实况形势背景和非绝热项中比湿变化对温度的影响程度。因再分析资料时空分辨率较低,涉及到时空较细的分析采用了中尺度模拟资料。

所采用的中尺度 WRF 模式为  $15/3\text{ km}$  嵌套的系统,其中  $15\text{ km}$  分辨率系统的背景场采用 NCEP 水平分辨率为  $0.5^{\circ}\times 0.5^{\circ}$  的全球模式的分析场,主要同化了极轨和静止卫星资料和地面常规观测和探空观测资料,采用 GSI 同化系统,其边界基本包括

中国区域范围; $3\text{ km}$  分辨率的初始场和侧边界由  $15\text{ km}$  分辨率提供,其边界大致涵盖中国中东部区域, $3\text{ km}$  分辨率的同化资料主要是加密观测地面站、风廓线雷达、S 波段多普勒雷达,以及 GPS/PWV 等,采用 WRFDA 的同化模块。物理参数化方案主要包括:微物理过程采用 WSM6 方案;长波辐射采用 RRTM 方案;短波辐射采用 Dudhia 方案;近地面采用 Monin-Obukhov 方案;陆面过程采用 Noah 方案;边界层采用 YSU 方案;积云参数化方案仅用于外层  $15\text{ km}$  模式,采用 Kain-Fritsch 方案。

选取 2020 年 3 月 27 日 20 时 NCEP 再分析资料模拟初始场,模拟初始场和实况对比(图略),两者各层风场基本吻合,沿江和苏南地区  $700\text{ hPa}$  以上槽前西南暖湿气流增强和  $850\text{ hPa}$  以下东北风的冷垫背景两者一致,各层温度梯度和分布也基本反映出温度实况分布情况。同时模拟的降水落区、气温下降的时间、区域和实况也较吻合,能够较好地反映降水相态的转换时间,因此,在诊断分析中应用了相关模拟结果,探讨南京、无锡降水相态转换前后气温下降关键时段的温度平流、垂直运动、湿度、不同层次温度的逐时变化特征。

## 2 天气实况

2020 年 3 月 28 日 02—08 时降雪出现在江苏的沿江和苏南地区,雨雪转换区域自西北向东南方向逐渐推进。图 1 为本次雨转雪的具体时间和雪区分布,雨转雨夹雪最先出现在 28 日 00—01 时江淮之间西部局部站点(图 1a),02 时雨夹雪范围扩大至南京中北部、镇江北部和扬州南部,03 时南京北部和扬州一些区域出现纯雪,随着纯雪范围进一步扩大,04 时南京、镇江、扬州南部、泰州南部均出现纯雪,雪夹雪范围东至南通一带。05—07 时雪和雨夹雪范围继续向东南方向扩展,覆盖南京、镇江、常州、无锡一带(图 1b)。苏州在 08 时出现降水相态转换,此时,上游地区南京至常州已转为降雨,09 时以后降雪完全结束,沿江和苏南地区均转为降雨。02—08 时沿江和苏南地区雨雪量为  $10\sim 18\text{ mm}$ ,各站点维持雨夹雪和雪的时间一般在  $2\sim 5\text{ h}$ ,受地面温度较高和大部分时段降雨为主的影响,积雪并不明显,至 28 日 08 时部分站点出现积雪,南京、溧水、靖江积雪深度分别为  $2、1、2\text{ cm}$ 。另外,从不同站点的降水相态、温度等要素逐时变化发现,降雪站点经

历了雨—雨夹雪—雪—雨夹雪—雨的复杂相态变化,转换时间和相态变化存在一定的空间差异。图 2 为南京、金坛、苏州三站的逐时演变,南京站 02 时雨夹雪、04 时转雪、06 时再转雨夹雪、08 时转雨;金坛站相对较晚,05 时开始直接发生雨转雪的相态变化,06 时又转为雨夹雪,之后迅速转为降雨;苏州站 08 时出现雨转雨夹雪相态变化,持续 2 h 后又转为降雨。各站相态转换出现在气温快速下降阶段,各地维持较低气温的时间较短,相态转变是自西向东南方向依次发生,且固态降水持续时间也自西向东南方向逐渐减少。

降雪发生前伴随贝加尔湖东部高空槽南下,3 月 26 日午后到夜间江苏自北向南受到冷锋影响,27 日 08 时冷锋到达浙江中部(图略),但冷空气主体仍位于内蒙古一带,江苏处于地面冷高压底部。27 日

白天高空槽逐渐南压,冷空气继续渗透南下,江苏降水逐渐停止,受不断扩散冷空气影响,26—27 日江苏的淮河以南地区 24 h 降温幅度达 8~10℃,为 28 日凌晨沿江苏南地区出现雨转雪提供了低温基础。但在 27 日 20 时全省气温仍在 9~11℃,江苏地区出现降水相态变化时气温一般在 2℃以下。因此,受前期冷空气影响虽造成温度明显下降,但在 27 日 20 时还没有达到降雪的温度条件。27 日夜间至 28 日上午 850 hPa 高度层以下一直维持东北风,弱冷空气继续导致气温下降,为沿江和苏南地区降雪的形成提供一定的冷垫条件。该时段 700 hPa 高度以上伴随高空槽东移有明显的暖湿气流增强,27 日 20 时至 28 日 08 时 500 hPa 槽自 112°E 移至 120°E,700 hPa 上沿江和苏南地区也存在明显的西南气流增强,为降水发生提供了较好的水汽条件,是一次典

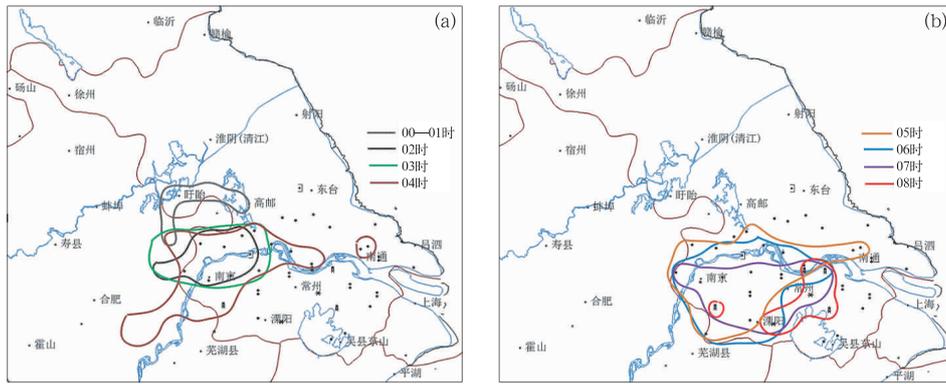


图 1 2020 年 3 月 28 日(a)00—04 时,(b)05—08 时降雪区域随时间变化  
Fig. 1 The change of snowfall area with time (a) from 00:00 BT to 04:00 BT, (b) from 05:00 BT to 08:00 BT 28 March 2020

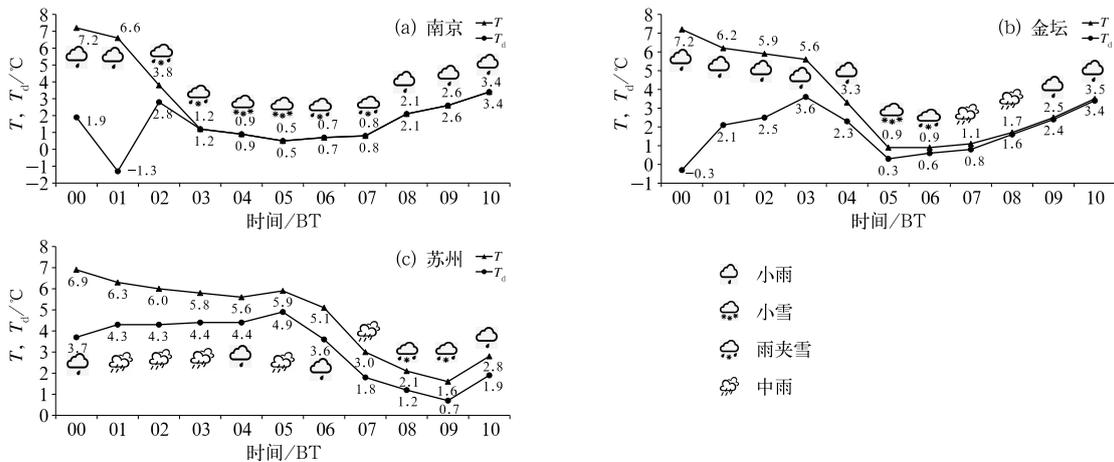


图 2 2020 年 3 月 28 日 00—10 时(a)南京、(b)金坛、(c)苏州的温度、露点温度、天气现象逐时演变  
Fig. 2 The hourly change of temperature, dew point temperature and weather phenomena at (a) Nanjing, (b) Jintan and (c) Suzhou stations from 00:00 BT to 10:00 BT 28 March 2020

型的暖湿气流在冷垫上爬升的降雪形势(图 3)。但 28 日 00 时之后江苏气温南北分布出现异常,沿江和苏南地区气温明显低于淮北地区,06 时沿江和苏南大部分站点气温在  $3^{\circ}\text{C}$  以下,江淮之间和淮北地区气温为  $4\sim 7^{\circ}\text{C}$ 。可见 28 日凌晨气温下降除了前期冷空气影响和日变化外,沿江和苏南地区降水过程对降温也具有一定影响,该区域低层气温为何会出现快速下降正是本文关注的重点,也是本次雨雪相态变化的关键致因。

### 3 多源监测资料在相态转换过程中的演变特征

随着多源监测资料的丰富,捕捉从小时到分钟级可预测信号成为可能,应用加密自动站、微波辐射计和双偏振雷达资料深入分析相态变换前后不同高度温湿、回波演变等相关特征,为降水相态转换的临近预报提供参考。

#### 3.1 相态转换前后温度、雨强变化特点

28 日 02—06 时江苏的沿江和苏南地区 2 m 气温出现明显下降(图略),从  $4\sim 6^{\circ}\text{C}$  下降到  $2^{\circ}\text{C}$  以下,很多站点逼近  $0^{\circ}\text{C}$ 。同时  $0^{\circ}\text{C}$  层高度自 27 日 20 时到 28 日 08 时也呈现明显变化(图 4),南京站从 3 269 m 下降到 436 m,而位于江苏北部的徐州站  $0^{\circ}\text{C}$  层高度却变化不大, $0^{\circ}\text{C}$  层高度大幅下降的区域主要位于沿江和苏南一带。气层厚度也发生明显调整,沿江和

苏南地区的  $H_{700-850} \leq 154 \text{ dagpm}$ ,说明在 27 日夜间到 28 日凌晨沿江和苏南一带整层气温出现明显的短时迅速下降,冻结层厚度明显增厚,造成了本区域短时降水相态的转变,导致 28 日凌晨突降春雪。

降雪的起始时间、降水量和 2 m 气温的分钟级变化显示(图 5),南京浦口站气温下降较早,28 日 00—02 时其迅速下降,1 个半小时内气温从  $7.5^{\circ}\text{C}$  下降到  $1.7^{\circ}\text{C}$ ,02 时前后出现雨转雪相态转变,相对较低气温维持约 5 h,07 时后逐渐开始上升,降水渐止。张家港站气温下降相对较晚,06—07 时 2 m 气温才降至  $2^{\circ}\text{C}$  以下,降温速度较缓慢,低温持续时间短。其降水开始时间也相对较早,但前期降水较弱时气温变化不明显,04—06 时降水开始逐渐增强,气温才逐渐下降。两站均出现降水开始先于气温下降,且随着雨强增大降温幅度明显增强,气温最低点出现在降水强度最大之后。可见,本次降雪出现之前气温下降受到降水和降水强度的直接影响,降水强度增强和气温迅速下降存在密切联系,这点和 Thériault et al(2010)的观点一致。

#### 3.2 微波辐射计监测特征分析

图 6 为南京江宁微波辐射计监测反演资料和对应的分钟级降水资料,江宁站 27 日 23:15 开始降水,03 时雨夹雪,04 时转为纯雪。图 6a 显示降水初期中层开始有弱的液态水聚集,23—24 时  $0^{\circ}\text{C}$  层高度出现明显下降,且在较短时间内下降到 1.5 km 左右,温度下降最早开始于低层 1.5~3 km,之后

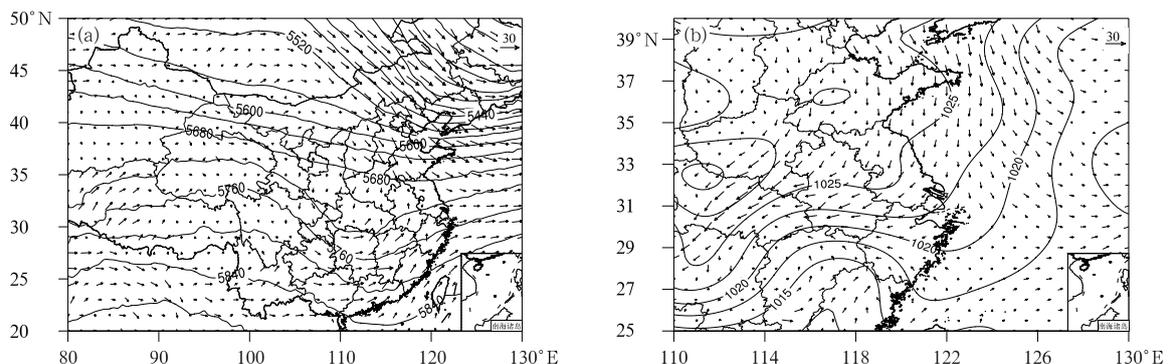


图 3 2020 年 3 月 27 日 20 时(a)500 hPa 高度场(单位:gpm)和 700 hPa 风场(风矢,单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ),  
(b)地面气压场(单位:hPa)和 850 hPa 风场(风矢,单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ )

Fig. 3 Circulation situation at 20:00 BT 27 March 2020

(a) 500 hPa altitude field (unit: gpm) and 700 hPa wind field (vector, unit:  $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ),  
(b) surface pressure field (unit: hPa) and 850 hPa wind field (vector, unit:  $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ )

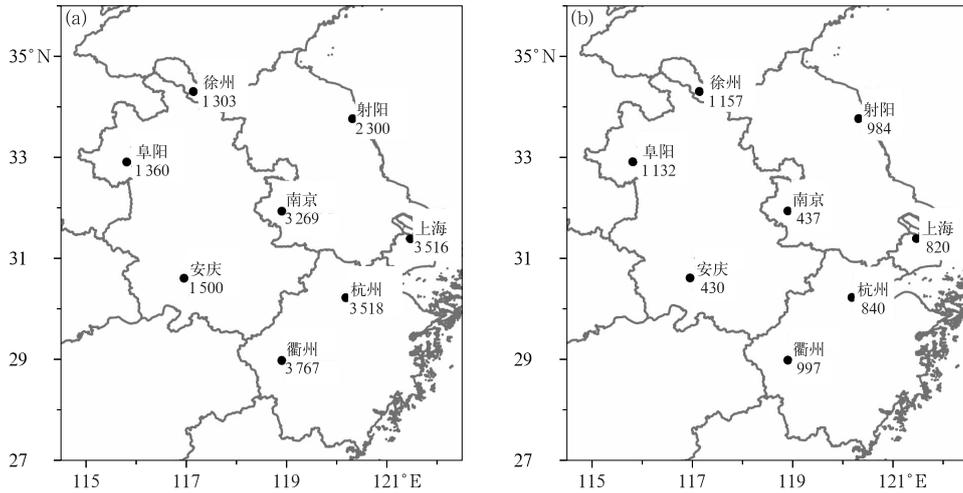


图 4 2020 年 3 月 (a) 27 日 20 时和 (b) 28 日 08 时  $0^{\circ}\text{C}$  层高度变化 (数字, 单位: m)

Fig. 4 Variation of the height of  $0^{\circ}\text{C}$  layer (number, unit, m) at (a) 20:00 BT 27 and (b) 08:00 BT 28 March 2020

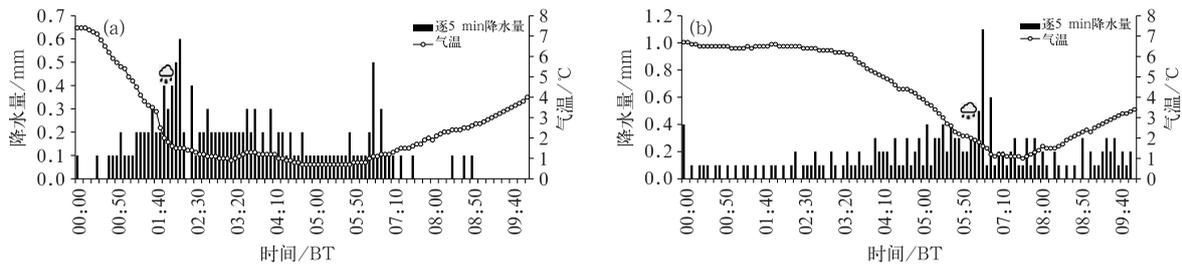


图 5 2020 年 3 月 28 日 00—10 时 (a) 浦口和 (b) 张家港站气温、降雪实况变化

Fig. 5 Changes of temperature and snowfall at (a) Pukou and (b) Zhangjiagang stations from 00:00 BT to 10:00 BT 28 March 2020

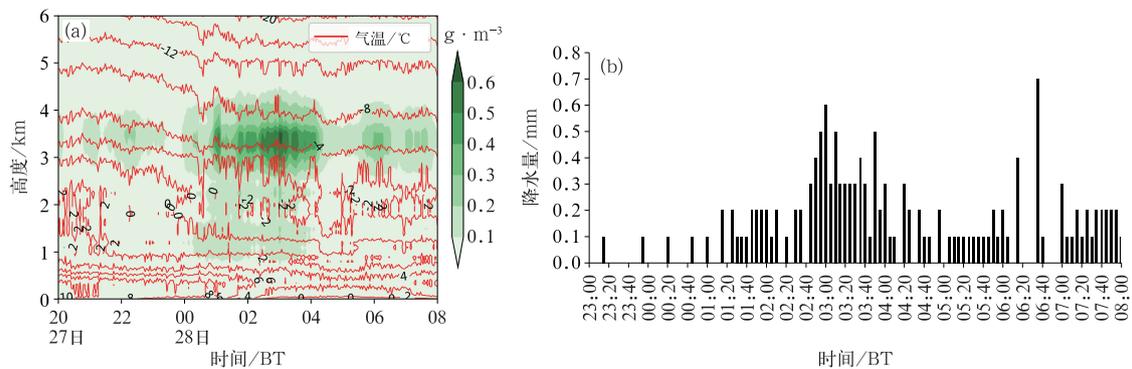


图 6 2020 年 3 月南京江宁站 (a) 27 日 20 时至 28 日 08 时微波辐射计反演温度 (红线) 和液态水 (填色) 分布, (b) 27 日 23 时至 28 日 08 时逐 5 min 降水分布

Fig. 6 Distributions of (a) microwave radiometer inversion temperature (red line) and liquid water (colored) from 20:00 BT 27 to 08:00 BT 28, (b) precipitation every 5 minutes at Jiangning Station of Nanjing from 23:00 BT 27 to 08:00 BT 28 March 2020

01—04 时在 3~4 km 高度液态水含量明显增大, 低层液态水较少, 该时段正对应降水增强时段 (图 6b)。期间温度出现两次明显下降, 分别是

03 时低层温度  $-2^{\circ}\text{C}$  线迅速下降, 出现雨夹雪, 04 时 3 km 以下整层气温陡然下降, 出现降雪。近地面气温下降出现在 02 时之后。显然, 降水发生、增强以

及空中水含量的增多与低层气温明显下降有一定的对应关系,降温首先出现在低层,然后随着降水增强,整层降温加强,地面降温和降水相态转变时间要滞后于低层气温下降 2~3 h。因此,在出现 0°C 层高度明显下降,同时中层较强的液态水积聚降落促使低层及近地面温度继续下降时,为降水相态转变提供了有利的温度条件。0°C 层高度明显降低和空中液态水含量增加可作为临近降水相态判断的指标。

### 3.3 双偏振雷达资料分析

雷达反射率因子图上 0°C 层亮环位置及强度的变化反映了融化层高度变化。图 7 为本次过程发生期间南京雷达反射率因子分布,从图中看出降水及相态转换期间 0°C 层高度变化的特点明显。27 日 21:34 距离雷达 50~75 km 处,反射率因子高出周围 10~15 dBz 的 0°C 层亮环逐渐形成,亮环宽度约 25 km,对应融化层高度为 2.5~3.5 km。亮环南北侧在结构上呈非对称性特征,北侧亮环强度大于南

侧,在形态上由环形逐渐演变为“D”字型,这是由安徽滁州附近生成的较强回波不断南压造成。随着较强回波的移近,南京以北地区低层气温明显下降,01 时前后南京北部上空 0°C 层高度明显下降,从 2.5 km 下降到 0.5 km 左右,01:30 南京六合、浦口地面温度分别下降到 2.1°C、3.6°C,而南京江宁气温为 5.3°C。02—03 时南京中北部和扬州中西部地面气温普遍下降到 0.6~1.5°C,上述地区普遍出现雨雪相态转变。南环在 28 日 00 时之前位置少动,之后,强度开始增强,亮环距雷达站也越来越近。02 时雷达南侧 65 km 范围内回波强度增强到 30~45 dBz,强回波自西北向东南方向移动,强中心距离雷达 25 km,对应融化层高度为 2 km,中心强度普遍为 40~50 dBz,0°C 层亮环内回波的显著增强、融化层内大量冰晶粒子自高空降落,导致融化层高度下降,地面气温下降区域随强回波移动而向东南方向推移,降雪范围进一步扩大。可见,强回波造成的降水增强时间和气温明显下降时段相吻合,大量降

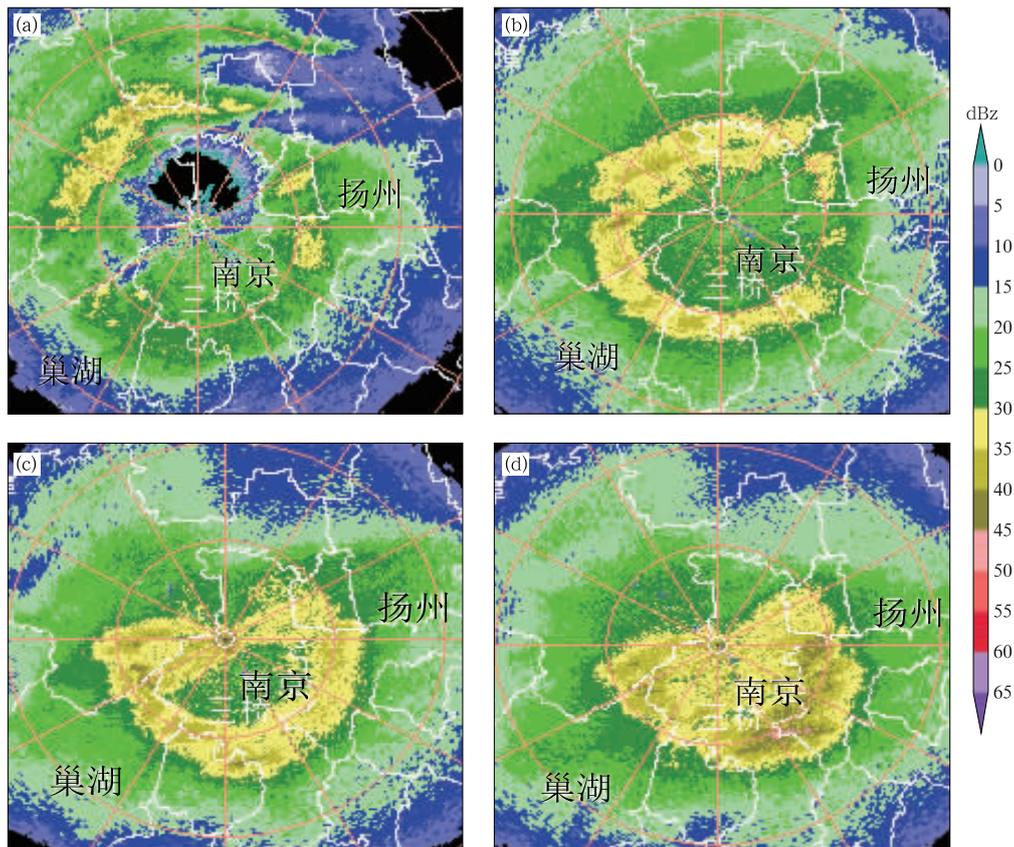


图 7 2020 年 3 月(a)27 日 21:34,(b)28 日 00:33,(c)28 日 01:34,  
(d)28 日 02:02 南京站双偏振雷达 2.4°仰角反射率因子分布

Fig. 7 Reflectivity distribution of dual polarization radar at Nanjing Station at elevation 2.4° at (a) 21:34 BT 27, (b) 00:33 BT 28, (c) 01:34 BT 28, (d) 02:02 BT 28 March 2020

水粒子流下降及拖曳作用导致地面气温和 0°C 层高度的下降(解释见诊断分析部分)。0°C 层亮带的形状变化和移动方向对地面气温下降、未来降温区域和可能发生相态变化区具有一定指导作用。

描述粒子形态的双偏振特征产品的相关系数和分类产品在降水相态变化方面也呈现一定的识别特征。图 8 为本次过程 2.4° 仰角的相关系数和不同区域剖面, 21:29(图 8a), 距离雷达 80~120 km 范围内相关系数较小, 其值为 0.85~0.95, 80 km 以内以及 120 km 以外的相关系数则相对较大, 数值在 0.96~1.0, 不同高度粒子相态分布不同, 2.6~4.0 km 高度区间内粒子形态非对称性较强。此时南京站探空 700 hPa、850 hPa 温度分别为 1°C 和 2°C, 4 km 高度附近气温为 0°C 左右, 冰晶、雪片等固态粒子下落进入 4 km 以下开始融化, 形态发生改变, 一般融化层厚度在 0.4~1 km, 但此时探测到的相关系数低值对应厚度有 1.4 km 左右, 这是由于 850~700 hPa 气温垂直变化较小, 完全融化成水滴需要较长时间, 从而造成融化层厚度较大。随着时间推移, 雷达站不同方位相关系数分布出现不同变化。28 日 00—02 时(图 8b, 8c), 相关系数低值区范围

(融化层)逐渐变为半圆形、弧形直至消失, 南京西北部最先消失, 然后逐渐向东南方向扩展, 南京周围 0°C 层高度下降最早出现在西北部地区, 然后随着较强降水回波向东南方向移动。02 时南京东南方向距离雷达 50 km 处相关系数迅速下降, 该区域融化层高度降低, 且融化层内粒子非对称性加强, 低层气温明显下降, 有利于雪的形成。

沿南京西北部 AB 线和东南部 CD 线做相关系数的垂直剖面, 从图中可清晰看出降水粒子空间物理结构(图 8d~8f)。23:59 南京西北部 30~60 km 范围内近地面已出现混合态降水粒子(图 8d 白色框区内), 30 km 内近地面无混合态降水粒子。01:56 南京西北部混合态降水粒子逐渐向南京城区靠近, 距离雷达 20 km 近地面处出现明显混合态降水粒子(图 8e 白色框区), 同时其上方 P 点处有较强相关系数低值区, 有较强的混合态粒子存在, 此时该区域降水最强、降温最快, 空中较强混合态粒子下落对地面温度下降起到很好反馈作用。而此时南京东南方向混合态降水粒子还没有接地, 且距离雷达中心越远, 出现不同相态混合层高度越高。相关系数可以很好地反映出雷达周围融化层高度、厚度变化, 同时

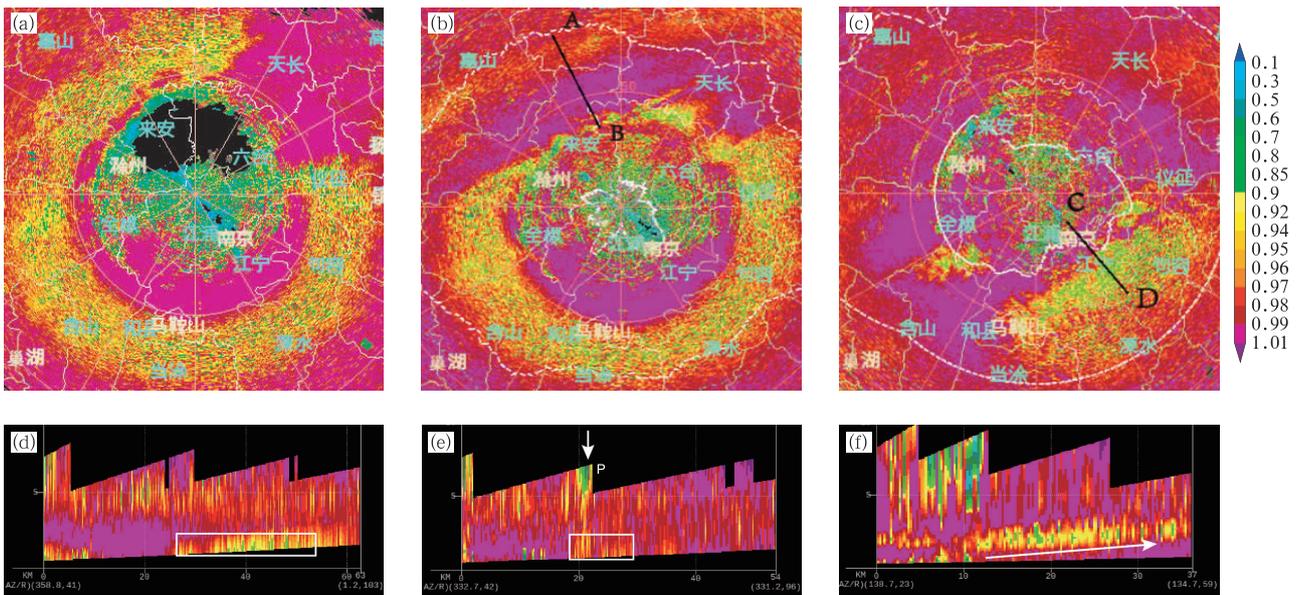


图 8 2020 年 3 月(a)27 日 21:29, (b)27 日 23:50, (c)28 日 01:56

南京站双偏振雷达 2.4° 仰角相关系数以及 (d)27 日 23:50 沿图 8b 中 AB 线, (e)28 日 01:56 沿图 8b 中 AB 线, (f)28 日 01:56 沿图 8c 中 CD 线的垂直剖面

Fig. 8 Distribution of (a, b, c) correlation coefficient and (d, e, f) vertical profile of dual polarization radar at Nanjing Station at elevation 2.4° in 27–28 March 2020

(a) 21:29 BT 27, (b) 23:50 BT 27, (c) 01:56 BT 28, (d) 23:50 BT 27 along line AB in Fig. 8b, (e) 01:56 BT 28 along line AB in Fig. 8b, (f) 01:56 BT 28 along line CD in Fig. 8c

能探测到不同相态混合层高度的空间变化。和各地实际出现雨雪转换时间(南京浦口 02:30、无锡、苏州 04—06 时)相比,空间相态混合层特征出现要先于地面降雪时间,对地面气温下降和相态变化具有较好的指示作用。双偏振分类产品也呈现类似的特征。

### 4 降水相态转化成因分析

基于雨雪转化前后温度及层结厚度关键因子变化,分析在降雪发生前期 26—27 日冷空气影响气温已经出现大幅下降背景下,27 日夜间哪些因子再次引起沿江和苏南地区突然降温,达到雨雪转换条件。

关于局地温度变化可利用式(1)(朱乾根等, 2007)开展研判:

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

式中:  $-V \cdot \nabla T$ ,  $w(\gamma_d - \gamma)$ ,  $\frac{1}{c_p} \frac{dQ}{dt}$  分别表示平流项、垂直运动项和非绝热因子项。文中通过对三项变化的分析,探讨本次温度突然下降的成因。

#### 4.1 温度平流

实况表明:28 日 00—02 时南京气温下降明显,

04—06 时苏州、无锡气温明显下降。图 9 是 WRF 模拟的沿 119°E 和南京-无锡剖面风场和温度平流结果。28 日 00 时(图 9a),南京北部上空 700 hPa 以上出现西南风速明显增大,925 hPa 以下 32°N 以北区域出现负温度平流;而至 02 时(图 9b)中高层西南风速减小,925 hPa 以下负温度平流减弱或消失,00—02 时南京北部上空近地面存在一定的负温度平流;04 时 925 hPa 以下负温度平流南移至 32°N 以南。沿降雪区域东西方向,南京-无锡剖面显示(图 9d~9f),00 时近地面弱负温度平流仅仅存在于南京附近上空,无锡近地面没有明显的温度平流。同时南京上空上下层垂直风切变较大,利于该区域对流发展加强,为此时南京北部地区降水增强提供动力条件。02 时 700 hPa 以上偏南风大风速区东移,较高层次正温度平流区也随大风速带的移动东推至镇江以东区域上空,此时沿江和苏南一带近地面无明显负温度平流。04 时近地面弱的负温度平流范围向东扩展,实况降温发生时间自西向东开始,而低层风向是东北风,负温度平流变化方向和低层风向相反。可见,低层温度平流变化和西风带系统中降水发展有一定关系。因此,在前期冷空气影响温度下降的基础上,沿江和苏南地区近地面 1 km 以下的弱负温度平流对地面气温下降有一定影响。

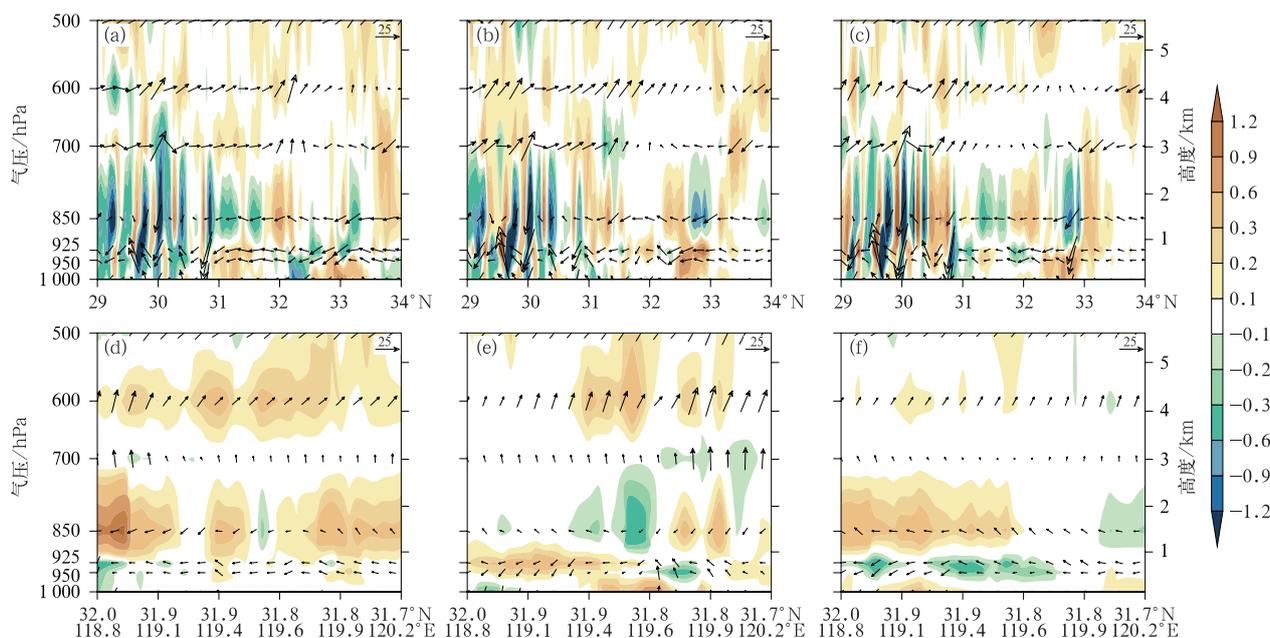


图 9 WRF 模拟的 2020 年 3 月 28 日(a,d)00 时,(b,e)02 时和(c,f)04 时温度平流(填色,单位:  $10^{-5} \text{ °C} \cdot \text{s}^{-1}$ )、风场(风矢,单位:  $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ )(a,b,c)沿 119°E 和(d,e,f)沿(32°N, 118.8°E)—(31.7°N, 120.2°E)的剖面

Fig. 9 Latitude-height cross-section of WRF simulated temperature advection (colored, unit:  $10^{-5} \text{ °C} \cdot \text{s}^{-1}$ ) and wind field (vector, unit:  $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ) along (a, b, c) 119°E and (d, e, f) 32°N, 118.8°E—31.7°N, 120.2°E at (a, d) 00:00 BT, (b, e) 02:00 BT, (c, f) 04:00 BT 28 March 2020

近地面负温度平流最先出现在南京北部近地面层,然后随着较强降水区域发展向东向南扩展。在雨雪转换温度是否下降的判断中,由降水造成的近地面局地弱的负温度平流也是不可忽视的关注点之一。

#### 4.2 垂直运动项和非绝热项

图 10 为南京和无锡两地风场、垂直速度、湿湿的逐小时演变。27 日 20 时至 28 日 02 时,南京附近 850 hPa 高度以上上升运动明显增强,在 2.5 km 以上出现较强的垂直上升运动,而气块最初被抬升时处于不饱和状态,  $\gamma_d > \gamma$ , 有较强上升运动,  $\omega > 0$ ,  $\omega(\gamma_d - \gamma) > 0$ , 气块在上升过程中,垂直运动项对局地温度变化具有一定的降温作用,当上升到一定高度达到饱和凝结,形成冰晶或雪花,温度较低冰晶就会降落,冰晶或雪花维持较低的温度下降,致使近地面环境温度下降。00—02 时近地面出现明显的下沉运动,而此时是南京降水最强时段,降温也最为明显。温度下降的空间分布首先是 27 日 21—22 时 850~700 hPa 层次 0°C 层高度迅速下降,地面气温下降发生在 28 日 00 时之后,即中高层强上升运动、近地面强下沉运动出现后。且在 00—01 时近地面气温下降剧烈。湿度场分布显示强降温出现之前到强降温初期南京上空低层是明显的干区,一旦有明显的降水发生经过干区时,将伴有较强的蒸发降温。另外,从无锡时间变化(图 10b)上也呈现出类似的

特点,不同的是其低层 850~700 hPa 层次降温出现时间晚,中高层垂直运动项导致的降温幅度缓慢、持续时间长,这主要和系统的移动、发展强度有关,地面强降温也是发生在强下沉运动时。可见,在降水发生前气块强上升运动、降水增强、冰晶下降融化和干层的蒸发对地面气温下降均具有一定的影响。本次温度下降过程可以说自上而下造成,较强的垂直上升运动导致中高层温度下降和降水发展,在此条件下发生较强下沉运动并穿过低层干区导致地面气温的迅速下降。在没有明显冷平流背景下,地面气温较中低层气温下降有一定的滞后。

垂直运动、非绝热项对近地面温度的影响程度可分别通过相应的经验公式和热力学第一定律的定量计算得以验证。Lumb(1961)指出雪花从融化层下落高度取决于降水强度、环境湿度和温度垂直变化率。Kain et al(2000)、徐辉和宗志平(2014)利用式(2)估算了降雪过程固态降水融化导致低层温度变化:

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

式中:  $D$  是地面累计降水(单位: cm);  $\delta p$  是融化潜热影响的气压层厚度(单位: hPa);  $\delta T$  是引起的平均温度变化(单位: °C)。南京站 27 日 20 时至 28 日 08 时总降水量为 12.9 mm, 28 日 00 时后逐渐开始出现降水,此时微波辐射计监测融化层厚度较大,00 时约为 174 hPa, 08 时 971 hPa 以下到地面温度大

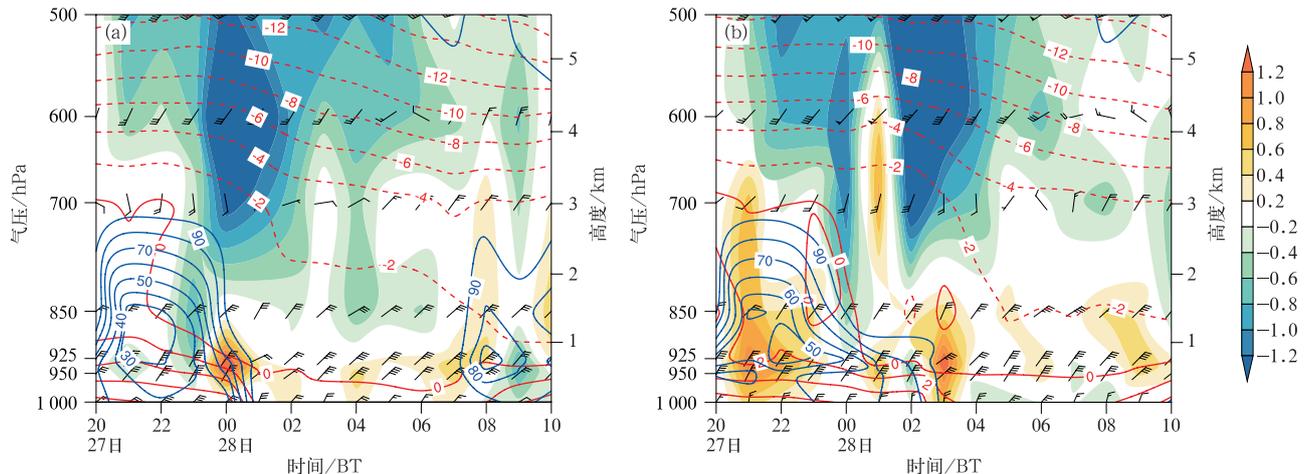


图 10 WRF 模拟的 2020 年 3 月 27—28 日(a)南京,(b)无锡气象要素的时间变化  
(填色:垂直速度,单位:  $\text{Pa} \cdot \text{s}^{-1}$ ; 蓝线:相对湿度,单位: %; 红线:温度,单位: °C; 风羽,单位:  $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ )

Fig. 10 Temporal variation of WRF simulated meteorological elements at (a) Nanjing,  
(b) Wuxi stations from 27 to 28 March 2020

(colored; vertical speed, unit:  $\text{Pa} \cdot \text{s}^{-1}$ ; blue line; relative humidity, unit: %; red line; temperature, unit: °C; wind barb, unit:  $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ )

于 0°C,融化潜热影响的气压层厚度约为 53 hPa,考虑 0°C 层快速下降,00—08 时融化潜热影响的气压厚度平均更接近于 28 日 08 时的厚度,按照 08 时与 00 时 8 : 2 分配比例,00—08 时平均融化潜热影响的气压层厚度约为 77 hPa。若下降过程中冰晶全部融化,则融化潜热致使气柱平均温度下降约 3.25°C。当然该过程中冰晶或雨雪下降过程并未完全融化,因降雪量较小,固态粒子中可能有 70% 被融化,这样可使气柱降温 2.4°C,对降温贡献也较大。02—08 时南京上空 850 hPa 以上上升运动减弱,但 2 km 以下的下沉运动一直维持,冰晶及雪花的下沉融化对不同层次气温及近地面气温下降具有一定作用,为降雪发生提供有利降温条件。

环境湿度对温度的影响可应用热力学第一定律进行定量探讨:

$$c_p dT - \alpha dp = \Delta Q \quad (3)$$

式中: $c_p dT$ 、 $\alpha dp$ 、 $\Delta Q$  分别表示内能变化、外界做功、热量变化。考虑南京站 27 日 20 时抬升凝结高度较高,云底以下温度均在 0°C 以上,仅考虑雨滴蒸发潜热作用,舍去第二项,式(3)可简化为下式:

$$c_p \cdot dT \approx L_v \cdot dq \quad (4)$$

式中: $dq$  为比湿变化, $L_v$  为蒸发潜热, $c_p$  为定压比热容,标准大气压下 0°C 的水蒸发潜热一般为 2500 J · g<sup>-1</sup>,  $c_p$  取 1004 kg<sup>-1</sup> · K<sup>-1</sup>。

27 日 20 时(图 11c)南京上空 1.5 km 以下有明显的负湿度平流,且均处于较强偏北风场控制下,119°E 经度剖面低层有明显干区,南京北部上空 1~2 km 处 20 时出现明显的干中心(图 11a)。比湿大值区位于 3 km,02 时比湿大值区下降(图 11b),20 时至次日 02 时低层比湿增加了 3 g · kg<sup>-1</sup>。降水初期 20 时至次日 02 时当冰晶下落穿过低层干区时,其表面较强蒸发或升华现象将吸收大量热量,致使环

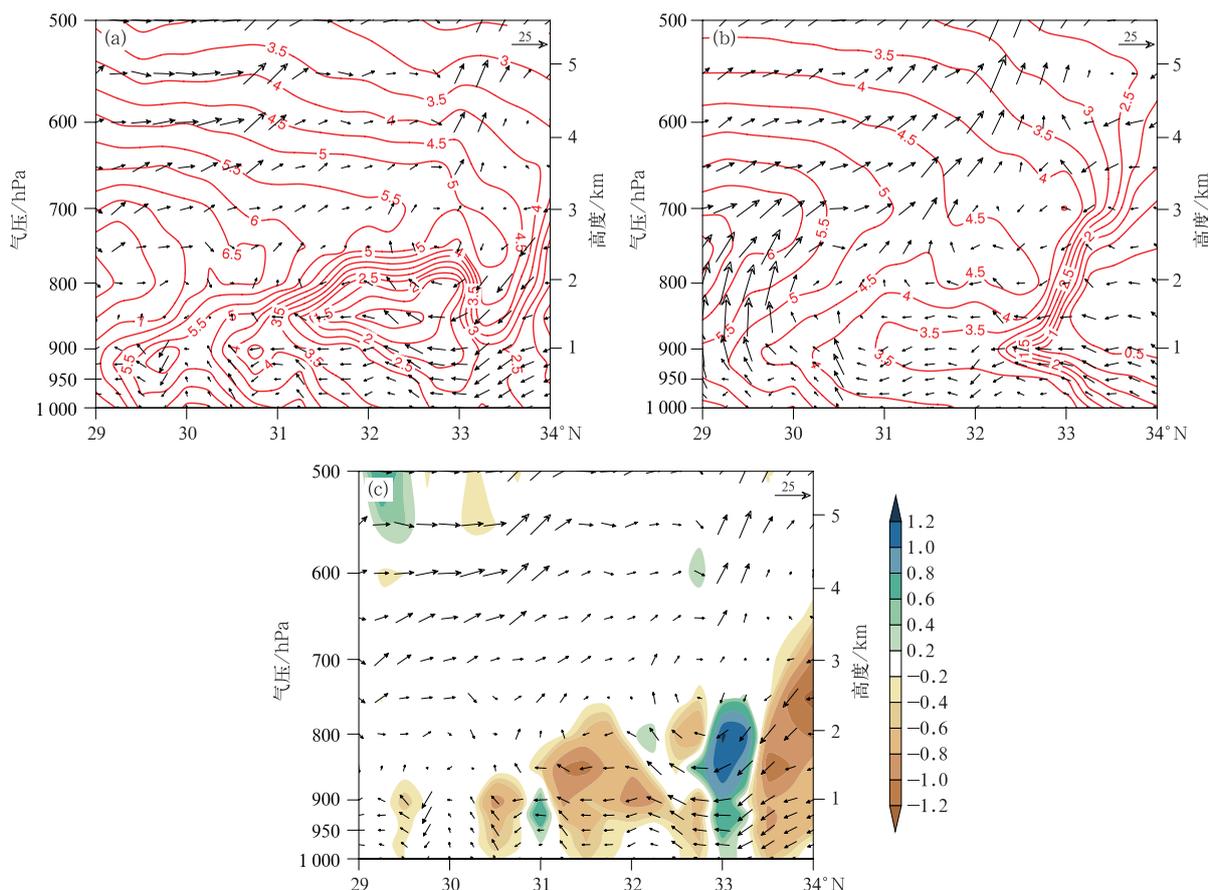


图 11 2020 年 3 月(a)27 日 20 时,(b)28 日 02 时 NCEP 再分析风场(风矢,单位:m · s<sup>-1</sup>)、比湿(等值线,单位:g · kg<sup>-1</sup>)和(c)27 日 20 时湿度平流(填色,单位:g · kg<sup>-1</sup> · m · s<sup>-1</sup>)和风场(风矢,单位:m · s<sup>-1</sup>)沿 119°E 剖面  
Fig. 11 The cross-section of (a, b) wind (vector, unit: m · s<sup>-1</sup>), specific humidity (contour, unit: g · kg<sup>-1</sup>) and (c) humidity advection (colored, unit: g · kg<sup>-1</sup> · m · s<sup>-1</sup>) and wind field (vector, unit: m · s<sup>-1</sup>) based on NCEP reanalysis data along 119°E at (a, c) 20:00 BT 27, (b) 02:00 BT 28 March 2020

境温度下降。根据式(4),当  $dq$  增加  $3 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$  时,即引起  $7.5^\circ\text{C}$  降温。当然,低层比湿的增加并不一定全部是由蒸发造成,但从湿度平流和风场发现该时段湿度的外来输送较小,而该时间段实际降温  $5^\circ\text{C}$  左右。可见,该时段低层干区内降水粒子的蒸发吸热对温度下降具有明显正贡献,相关推断是建立在对非绝热加热大量简化的基础上。

气温的局地变化影响因子较为复杂,特别是在有降水情况下,其变化更是受到降水强度、潜热释放等多要素影响。本次沿江及苏南地区降温是既有弱平流降温,又有垂直运动降温和非绝热因子降温共同作用造成的,干区的蒸发影响以及降水增强下降过程中的融化作用对临近突发降温起到关键作用,造成低层气温明显下降。27日20时到28日02时沿江和苏南一带  $0^\circ\text{C}$  层高度从  $3 \text{ km}$  左右下降到  $0.5 \text{ km}$  以下,整层温度除了近地面在  $0\sim 2^\circ\text{C}$  外,其他均在  $0^\circ\text{C}$  以下,达到雨转雪的相态转变条件。

## 5 结论与讨论

本文通过对2020年3月28日突发降雪的多源监测资料特征分析和诊断,从短时临近预报的角度发现了雨雪转换前后气象要素、雷达监测和微波辐射监测信息的变化特点,探讨了28日凌晨降雪的关键致因,为长江中下游降雪及雨雪转换预报提供的分析思路。所得结论如下:

(1)本次降雪过程持续时间短,范围较小。降雪虽然在前期较强冷空气影响背景下发生,但是发生前  $2\sim 5 \text{ h}$  整层气温出现短时迅速下降,冻结层厚度明显增厚。气温下降时间、区域变化和较强降水开始时间、移动方向具有较好的一致性,降雪出现之前气温下降和降雨强度增强有一定关系。

(2)双偏振雷达反射率、相关系数和分类产品在本次降雪过程中对雨雪转换和雪区扩展方向判断具有一定的指导作用。反射率产品的  $0^\circ\text{C}$  层亮带区域和形态变化与低层降温区域和移动方向一致,亮带高度的明显下降预示着雨雪转换的可能。相关系数产品中不同相态粒子的非对称性特征区域和形态变化反映出融化层高度、厚度和移动方向的变化,剖面图上能清晰监测出混合相态层高度的分布。这些特征的出现较实际降雪时间均具有一定的提前,混合层不对称特征和空中湿雪的出现约早于实况降雪  $1\sim 2 \text{ h}$ ,其移动方向预示着降雪可能出现区域。

(3)微波辐射计反演产品分析发现:有降水发生,地面气温下降滞后  $1\sim 3 \text{ km}$  温度下降约  $2\sim 3 \text{ h}$  时,  $0^\circ\text{C}$  层高度明显降低和空中液态水含量增加可作为地面气温和降水相态转换的临近信号。

(4)诊断分析发现,前期冷空气是本次气温下降的基础,近地面负温度平流对气温下降具有一定的作用;负温度平流最先出现在南京北部近地面层,然后随着较强降水区域发展向东向南扩展,负温度平流变化方向和较强降水移动发展方向一致。

(5)  $700 \text{ hPa}$  高度以上上升运动加强促使冰晶及雪花形成和整层温度下降。气温下降自上而下发生,  $850\sim 700 \text{ hPa}$  层次温度下降相对较早,近地面气温较低层和中层气温下降均有一定滞后。冰晶及雪花的下沉拖曳和穿过干区的蒸发作用增强了地面气温的快速下降,从而达到降雪阈值,造成沿江和苏南地区28日凌晨突发降雪。

因此,本次过程气温下降是在前期冷空气影响后,又在沿江和苏南一带出现温度的突然再次下降,主要受到降水影响,数值预报对降水和相态变化导致的垂直方向气温预报存在不足,预报难度较大。本研究结论可为低层冷垫中层西南气流形势下判断气温能否大幅下降提供思路,尤其在短时临近预报时效内。

## 参考文献

- 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).
- 郭良辰,付丹红,王咏薇,等,2019.北京城市化对一次降雪过程影响的数值模拟研究[J].气象学报,77(5):835-848. Guo L C, Fu D H, Wang Y W, et al, 2019. A numerical study of urbanization impacts on a snowfall event in Beijing Area[J]. Acta Meteor Sin, 77(5):835-848 (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).
- 梁红,马福全,李大为,等,2010.“2009.2”沈阳暴雪天气诊断与预报误差分析[J].气象与环境学报,26(4):22-27. Liang H, Ma F Q, Li D W, et al, 2010. Diagnostic analysis of heavy snow in February 2009 and its forecast error in Shenyang[J]. J Meteor Environ, 26(4):22-27 (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).
- 刘建勇, 顾思南, 徐迪峰, 2013. 南方两次降雪过程的降水相态模拟研究[J]. 高原气象, 32(1):179-190. Liu J Y, Gu S N, Xu D F, 2013. Simulation study on precipitation phase state in two snowfall processes of South China[J]. Plateau Meteor, 32(1):179-190(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).
- 孙燕, 严文莲, 尹东屏, 等, 2013. 江苏冬季降水相态气候分布特征及预报方法探讨[J]. 气象科学, 33(3):325-332. Sun Y, Yan W L, Yin D P, et al, 2013. Climatic characteristics and forecast of precipitation phase in winter of Jiangsu[J]. J Meteor Sci, 33(3):325-332(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).
- 吴杨, 赵放, 孔照林, 等, 2018. 浙江地区 2015 年冬季首场降雪的气象特征及双偏振雷达回波特征分析[J]. 南京信息工程大学学报(自然科学版), 10(4):493-499. Wu Y, Zhao F, Kong Z L, et al, 2018. Feature analysis of the first snowfall in Zhejiang in 2015 by dual-polarization radar[J]. J Nanjing Univ Inf Sci Technol (Nat Sci Ed), 10(4):493-499(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).
- 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[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 Disasters, 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, 308-309. 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, 308-309(in Chinese).
- Czys R R, Scott R W, Tang K C, et al, 1996. A physically based, non-dimensional parameter for discriminating between locations of freezing rain and ice pellets[J]. Wea Forecasting, 11(4):591-598.
- Heppner P O G, 1992. Snow versus rain; Looking beyond the “magic” numbers[J]. Wea Forecasting, 7(4):683-691.
- 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.
- 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.
- Lumb F E, 1961. The problem of forecasting the downward penetration of snow[J]. Meteor Mag, 90:310-319.
- Thériault J M, Stewart R E, Henson W, 2010. On the dependence of winter precipitation types on temperature, precipitation rate, and associated features[J]. J Appl Meteor Climatol, 49(7):1429-1442.