

周涛,李娜,王清川,等多普勒雷达资料在强降雪相态转变过程的研究应用[J].沙漠与绿洲气象,2021,15(6):68-74.

doi: 10.12057/j.issn.1002-0799.2021.06.010

开放科学(资源服务)标识码(OSID): 

多普勒雷达资料在强降雪相态转变过程的研究应用

周涛¹,李娜¹,王清川¹,杨帅¹,张玉婷²

(1.廊坊市气象局,河北 廊坊 065000;2.衡水市气象局,河北 衡水 053000)

摘要:利用常规气象资料、NCEP 1°×1°再分析资料和北京多普勒雷达资料,对河北廊坊地区2020年2月14日强降雪过程中相态转变特征进行分析,并引入HYSPLIT模式,对强降雪地区气块进行96 h后向追踪模拟。研究发现,零速度线闭合状态反映了低空急流与中高空急流(气流)发展、对峙、消亡等状态,对地面降水相态变化的临近预报有较好的指示意义;距离北京多普勒雷达40~80 km的廊坊各地面气象观测站,在零度层亮带高度迅速下降后30 min~1 h先后完成雨雪相态转变;利用HYSPLIT模式得到强降雪地区4个高度层的水汽源地、路径及贡献,700、850 hPa暖湿气流对降水的水汽贡献较大。

关键词:强降雪;相态转变;零度层亮带;HYSPLIT模式

中图分类号:P458.121

文献标识码:A

文章编号:1002-0799(2021)06-0068-07

对于华北地区,冬末春初对降水相态的把握是降水预报中的重要要素,也是精细化预报服务进一步提高所遇到的瓶颈问题之一。目前,国内很多学者运用多种方法对降水相态转变做过研究^[1-9],如湿球温度、微波辐射计等。河北省内对降水相态的研究成果也颇丰,段宇辉等^[6]发现700 hPa强冷平流的出现及其中心的迅速下降,对雨转暴雪天气过程的短时预报有明显指示意义。杨晓亮等^[7]得出,只有保证云中冰雪层有一定厚度,才能实现雨雪相态的转变。张南等^[8]通过温度的垂直结构辨别相态。李江波等^[9]在研究中得到河北地区雨雪相态发生转变时各层的温度阈值,也是目前廊坊本地预报雨雪相态转变的重要依据。李江波等^[8-10]均发现零度层亮带高度的迅速

下降,与降水相态的转变有密切关系。上述研究成果对本地降水相态转变预报有一定参考性,在实际应用过程中,受地理位置、环境因素及地形条件等影响,仍存在一定偏差,需要定量研究北京雷达出现零度层亮带高度迅速下降与廊坊各地面观测站发生雨雪相态转变时间对应的关系。且大多数研究成果侧重对转雪前的零度层亮带变化特征进行分析,在雨转雨夹雪前的相关特征研究较少,没有得到确切的结论。

2020年2月14日在河北廊坊地区的一次大范围强降雪天气过程中,过程前期多次出现雨转雨夹雪,雨夹雪转雪现象,降雪落区预报与实况较为接近,但由于未能准确预报雨雪转换时间,加之模式水汽条件预报出现较大偏差,导致部分站点降雪量预报偏小一到两个量级,使得精细化预报服务效果受到影响。在水汽条件分析预报方面,本地现有的实况资料和数值模式在水汽的监测和预报中均无法直观得到其来源、路径以及贡献,对强降雪预报准确率有一定影响,因此,需要探索研究不同的方法对本地水汽条件和雨雪相态转变特征进行分析。本文通过引

收稿日期:2020-07-26;修回日期:2020-11-23

基金项目:2020年中国气象局预报员专项(CMAYBY2020-012);廊坊市气象局项目(201923);廊坊市科技局项目(2020013157)

作者简介:周涛(1988—),女,工程师,目前主要从事短期及短临预报服务工作。E-mail:zhoutao_job@126.com

通信作者:王清川(1978—),男,高级工程师,目前主要从事短期天气预报及短临预警。E-mail:hb1fwqc@163.com

入 HYSPLIT 模式,对强降雪地区的气块进行追踪模拟,在现有资料的基础上增加水汽条件分析预报依据。熊秋芬等^[11-13]运用 HYSPLIT 模式有效地对暴雪区的水汽来源及路径进行追踪,效果显著。通过对雷达回波特征详细分析,使本地雨雪相态转变时间定量化,在完善现有预报指标的基础上,进一步提升本地大范围强降雪的精细化预报服务水平。

1 资料和方法

选取 2020 年 2 月 14 日河北廊坊的一次大范围强降雪过程,通过对北京多普勒雷达特征进行详细分析,探索零度层亮带高度迅速下降与廊坊本地雨雪相态转变时间对应的关系。同时采用美国 NOAA 空气资源实验室开发的 HYSPLIT 模式^[14-15],即拉格朗日混合单粒子轨道模式,对强降雪地区气块进行模拟追踪。数据来源于全球资料同化系统(GDAS) 6 h 一次的分析资料,水平分辨率 $1^{\circ} \times 1^{\circ}$,时间步长为 1 h,逐小时输出一次轨迹点的位置及相应位置上气块的物理属性(气压、相对湿度、比湿等)。相比常规方法,该方法可以更直观地得到降水区的水汽来源、路径及贡献。

2 天气概况及简要形势分析

2020 年 2 月 14 日 03:00—20:00,受 500 hPa 槽、中、低空急流、低空切变线、地面倒槽和地面冷锋(图 1)的共同影响,河北廊坊地区陆续出现雨转雨夹雪、雨夹雪转雨多次转变(表 1),再转大雪到暴雪天气,最大降水量为 29.1 mm(固安),最大降雪量为 12.8 mm(三河),除廊坊南部的文安是中雪,其余站为大雪到暴雪(图 2),积雪深度普遍在 3~7 cm,最大为 10 cm(三河),过程最大小时降水量出现在固安的 04:00—05:00,为 9.2 mm(雨)。根据观测站记录,14 日 05:30 前降水相态均为雨,05:32—06:05 固安、三河、香河和大厂先后首次出现雨转雨夹雪,其余各站首次出现雨转雨夹雪的时间均在 08:20 之后,转雪时间早晚大致呈现自西向东,从北到南分布。

3 基于 HYSPLIT 模式的水汽条件分析

在对本次过程模拟起点选取时,综合考虑廊坊各站的地理位置、降水量大值区及降水时间。选取 14 日 08:00 廊坊北部的大厂(116.98°E, 39.88°N),垂直方向上选取 800、1 500、3 000 和 5 500 m(分别代表 925、850、700、500 hPa)4 个高度作为模拟的

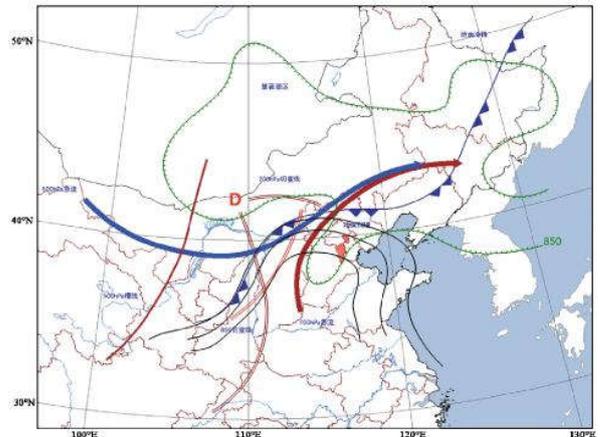


图 1 2020 年 2 月 13 日 20 时高低空系统 (红色实心区域为廊坊所在位置)

表 1 2020 年 2 月 14 日廊坊各站出现雨转雨夹雪起止时间

站 点	三河	大厂	香河	固安	市区	永清	霸州	文安	大城
开始时间	5:48	6:05	5:55	5:32	8:20	8:38	8:36	8:59	11:22
结束时间	9:52	9:34	9:54	9:07	9:12	9:56	9:42	11:35	12:41

注:表中“开始时间”为第一次出现雨转雨夹雪时间,“结束时间”指地面观测到雨转雪记录的前 1 min,在此时间段内多次出现雨转雨夹雪和雨夹雪转雨。

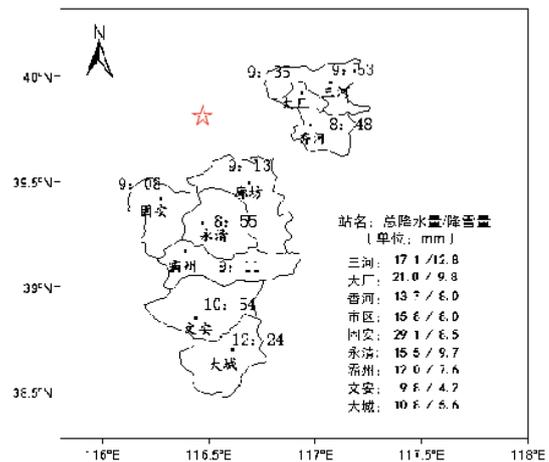


图 2 2020 年 2 月 14 日廊坊市各地面气象观测站雨雪转换时间及降雪量 (☆为雷达位置)

起始高度,进行 96 h 后向轨迹模拟(图 3),并对其水汽路径及贡献进行分析。

500 hPa 的水汽来自中亚地区,最终从新疆沿西北路径抵达大厂(图 3)。比湿前期维持在 2~3 g/kg,经过新疆后缓慢下降,在降水开始前(13 日 20 时)

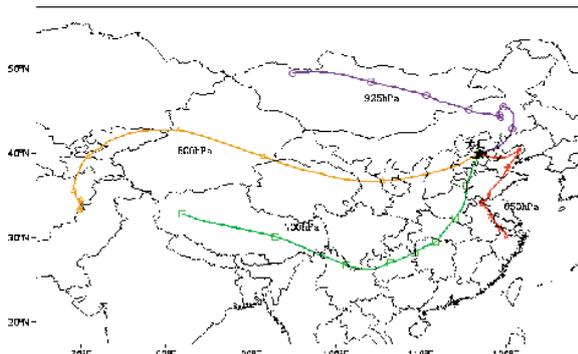


图3 2020年2月14日08时大厂(图中★) 4个高度层96 h气块后向轨迹

为 1.6 g/kg。700 hPa 的水汽来自青藏高原,在经过四川盆地后比湿迅速增大,到降水开始前一直维持在 6 g/kg 左右。850 hPa 的气块来自东海,初始携带较多水汽,在进入内陆地区后比湿有所下降,但经过长江流域水汽又得到补充,最后经过渤海到达大厂。925 hPa 的水汽来自蒙古西部,源地是干空气,到达大兴安岭南侧后折返,从河北东部进入大厂,比湿一直维持在 3 g/kg 以下(图 4)。因此,对大厂本地来说,此次过程中 700、850 hPa 分别带来偏南和偏东的暖湿气流,水汽贡献较大。

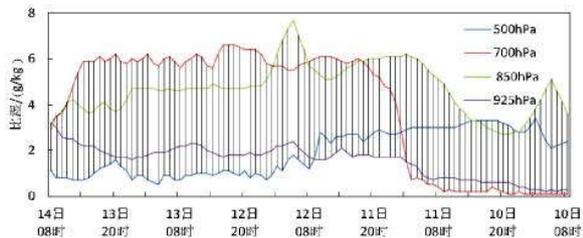


图4 2020年2月14日08时大厂4个高度层 96 h后向轨迹气块比湿

4 多普勒天气雷达特征分析

4.1 基本反射率因子

分析北京雷达 0.5°仰角反射率因子,14日 02:36,从北京上空东移的回波开始陆续扫过廊坊的三河、大厂、香河,回波呈块状,最强反射率因子达到 45 dBZ。03:18 廊坊中南部大部分地区上空开始出现回波,03:48 固安出现 40 dBZ 以上的强回波,强回波范围不断增大,持续时间近 1 h,回波结构密实,最强反射率因子>50 dBZ,与地面最大小时雨强相对应。之后回波东移,强度有所减弱,廊坊上空的回波反射率因子<35 dBZ,到 09:00,随着降雪的开始,回波强度进一步减弱,基本在 10~20 dBZ。总体

来看,在降雨时段回波呈块状,结构密实,反射率因子强度大;在雨转雨夹雪初期,反射率因子强度无明显变化,到雨和雨夹雪交替时段,反射率因子整体较降雨时段有所减弱;到降雪时段,回波呈片状,反射率因子强度明显减弱。

4.2 径向速度

从 3.4°仰角径向速度图上看到,13日 23:42 低层开始出现弱的风速辐合,偏东风超低空急流短暂建立后转为东南风超低空急流,高度位于 800 m 附近,超低空急流区最大径向速度超过 20 m/s,超低空急流持续近 5 h 后高度逐渐上升,转为低空急流。14日 02:30 出现“牛眼”结构,在 25 km 距离圈内正、负速度区面积相当的情况下,最大入流速度区面积明显大于最大流出速度区面积,低层风速辐合加强,“牛眼”结构持续近 1.5 h,高度在 0.6~1.4 km (图 5a),表明有较强的水汽输送,在此期间,零速度线在低层与径向线平行,为东南风,在距离雷达 12~25 km,高度在 0.8~1.6 km 呈“S”型,表示在该高度上有暖平流,对应廊坊地面降水相态为雨。在 04:18,零速度线形状开始转变,06:00 在雷达附近出现较大折角(图 5b),此时雷达站北侧贴地层转为偏北风,东侧为偏东风,结合地面形势及风廓线资料,分析得出锋面过境时间在 06:00 前后^[6],此后经过雷达的零速度线沿逆时针方向旋转,转为反“S”型(图 5c),表明此时低层出现冷平流,对应廊坊中北部开始出现雨夹雪。其中东南风低空急流从 05:00 一直持续到 08:30,整个过程中风速辐合共持续 9 h 左右。其中在 04:18—06:06,固安上空出现西南风低空急流,最大径向速度达到 20 m/s。10:30 零速度线再次转变,低层逐渐转为东北风,此时上述 7 站地面降水相态均已转为雪。长时间的速度辐合和低空急流、超低空急流的长时间维持,以及锋面过境造成的高低空冷暖平流配置均为本次强降雪提供了很好的条件。

从零速度线特征分析,14日 08:48 开始 0.5°仰角零速度线趋于闭合,到 09:48,2.4°及以下仰角出现零速度线闭合,低层东北急流逐渐减弱消失,低空急流上部的西南风向低层逐步渗透,此过程中,在雷达西南象限 5.5~7.0 km 高度上出现速度模糊(图 5d),西南风风速加大,强盛的西南急流使云层中的云雨粒子主要呈液态,地面表现为降雨或雨夹雪,随着西南急流强度有所减弱,低层东北风逐渐增强,结合风廓线资料,10:24 在 1 km 以下出现东北急流,低层东北急流一直持续到 15:36(图 6),在低层东北

风加强的过程中,零速度线在高仰角也逐渐出现闭合,由于低层冷空气侵入增强,云中云雨粒子相态逐步转为固态,地面开始呈现降雪,与廊坊中北部各站转雪时间(图2)相对应。到12:18零速度线在 $0.5^{\circ}\sim 6^{\circ}$ 仰角全部闭合,低层为东北急流,中高层为西南急

流。低仰角时闭合区域较大,随着仰角的增高闭合区域逐渐减小。闭合零速度线反映了近地面层和中高层之间由强势风和相反方向急流造成的风切变,闭合越完整,表明切变越强烈^[7]。整层零速度线闭合时间一直持续到12:48(图7),随后零速度线在低仰角

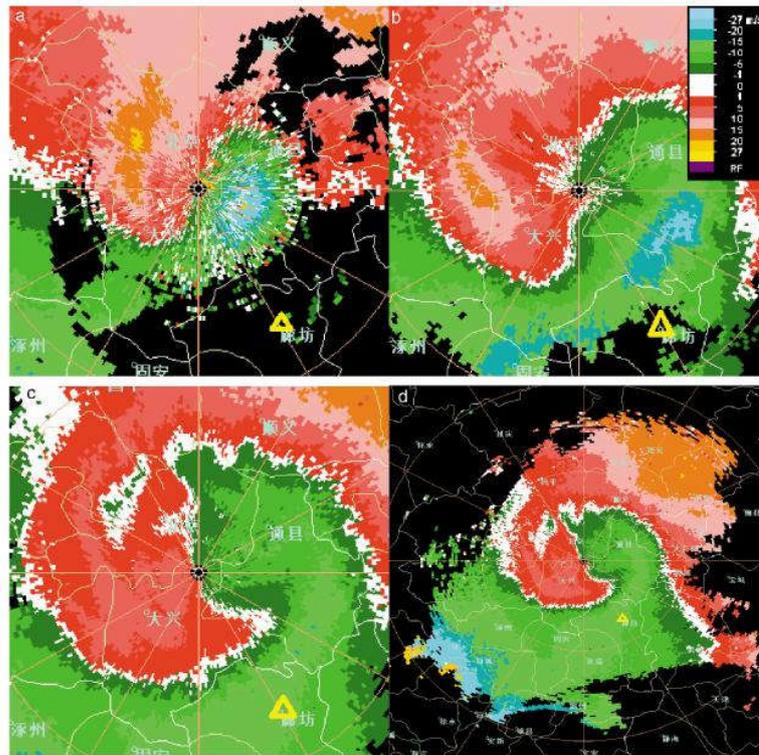


图5 2020年2月14日 3.4° 仰角02:30(a)、06:00(b)、08:36(c)和08:54(d)径向速度特征(黄色 Δ 为廊坊位置)

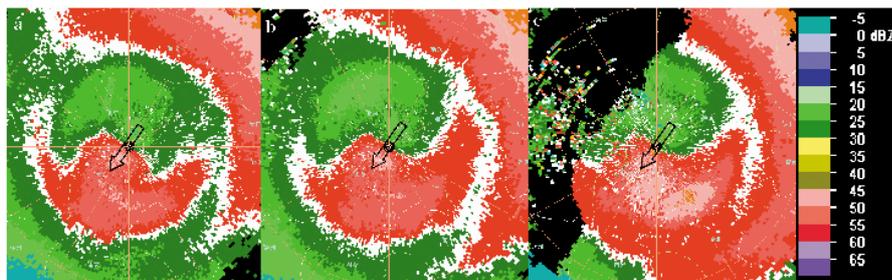


图6 2020年2月14日 3.4° 仰角12:30(a)、13:30(b)和14:42(c)径向速度特征(箭头所示位置为东北急流)

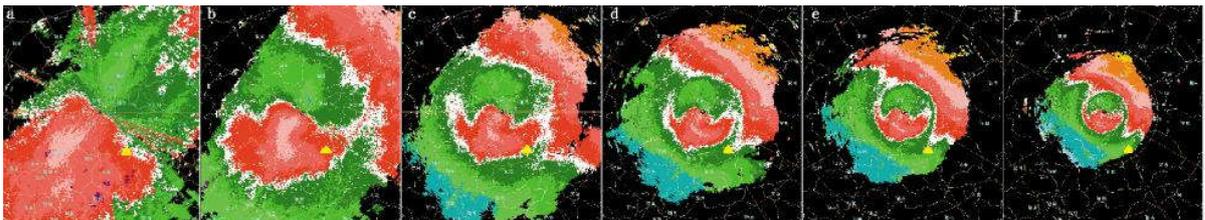


图7 2020年2月14日12:36零速度线闭合特征(a-f分别对应 $0.5^{\circ}\sim 6^{\circ}$ 仰角)

逐渐不再闭合,14:30之后在高仰角也逐渐不再闭合,14:48闭合零速度线彻底消失。在出现零速度线闭合时段内,降雪强度较大,地面小时雪强普遍在1~3 mm/h,且闭合越完整,降雪强度越大,而在零速度线闭合特征消失后,降雪强度明显减弱,小时雪强均在<0.5 mm/h。可见当低层为东北急流,高层为西南急流时,出现零速度线闭合特征,对强降雪有很好的指示意义,同时也验证了胡玲等^[10]对天津暴雪过程的多普勒雷达特征研究结果,若不满足这一前提条件,“零速度线闭合特征”对降雪的指示意义还需进一步讨论。

4.3 零度层亮带

“零度层亮带”是天气雷达判断层状云降水或层状一积云混合降水的一个重要特征。零度层亮带以上100~300 m处为0℃层高度,云雨粒子在0℃层上为固态,层下为液态,所以可以通过“零度层亮带”高度估计地面降水粒子的相态。14日04:42,在4.3°仰角反射率因子图上,距离雷达17~25 km出现不规则圆弧状亮带(图8),反射率因子在30~40 dBZ,2个体扫后,圆弧状亮带变宽,呈现出较为完整的“零度层亮带”,高度在1.6~2.3 km,其中沿雷

达径向方向经过固安的圆弧亮带高度在1.5~1.8 km,经过三河的圆弧亮带高度在1.5~2.0 km。05:00固安处的零度层亮带高度迅速下降到1.1~1.5 km,三河处的亮带合并变为片状不再清晰,随后零度层亮带变得模糊不易识别。05:12再次出现圆环状亮带,高度在1.5~1.8 km,2个体扫后局部回波增强,最强反射率因子超过45 dBZ,“零度层亮带”高度基本不变,一个体扫后亮带又变得模糊无法识别。05:30之前,廊坊全市均为降雨,05:32固安首次出现雨转雨夹雪,其他站点仍为降雨。05:36再一次出现可识别的“零度层亮带”,高度在1.9~2.4 km,较之前“零度层亮带”的高度有所上升,最强反射率因子仍超过45 dBZ,此时固安处于雨和雨夹雪交替出现阶段,其他站点仍为降雨,到05:48无法再识别“零度层亮带”,至此,间歇性出现的“零度层亮带”彻底消失,此时只有固安和三河两个站出现雨转雨夹雪,其他站点仍为降雨,在随后的20 min,香河和大厂也先后出现雨转雨夹雪。

不规则“零度层亮带”持续近1 h,期间亮带呈圆弧或圆环状间歇性出现,“零度层亮带”的强度变化不大,对于“零度层亮带”高度的变化,本次过程中

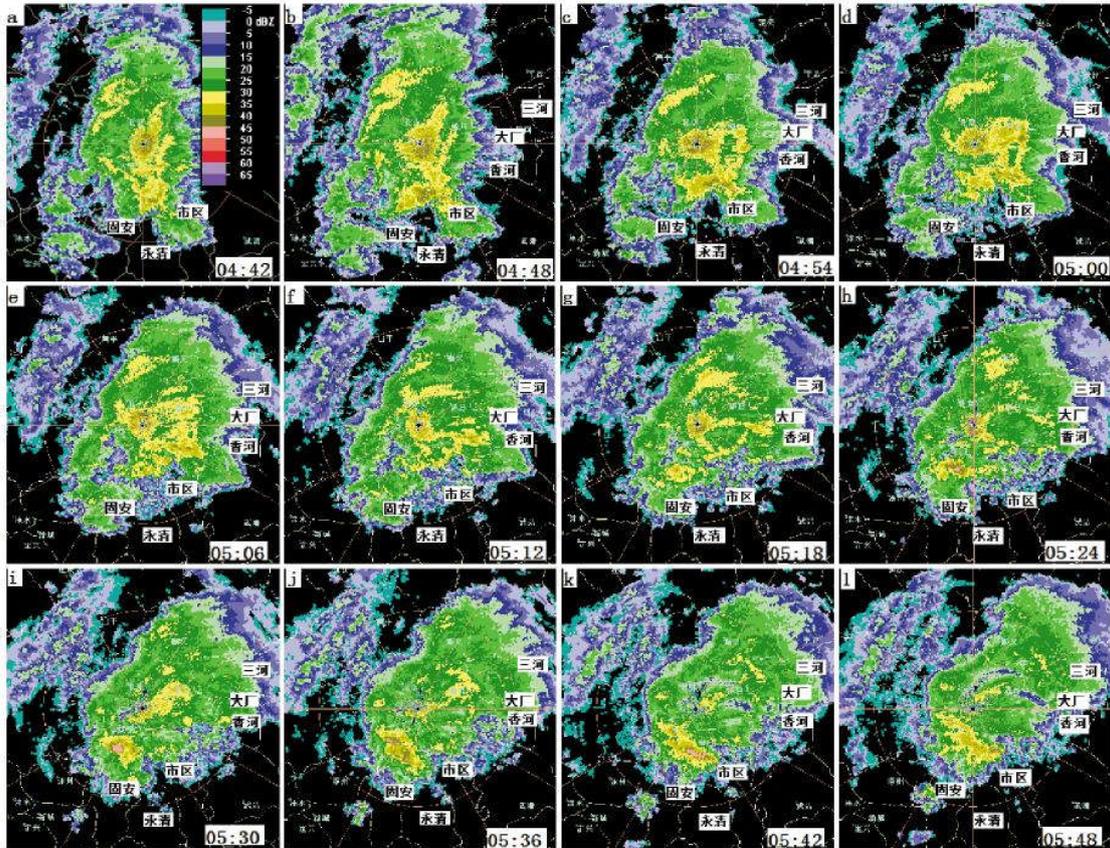


图8 2020年2月14日(4.3°仰角04:42—05:48(a-l))雷达反射率因子演变

只观察到一次下降和一次上升,且没有观察到持续下降过程,“零度层亮带”出现下降后半小时,固安出现雨转雨夹雪,而在“零度层亮带”高度出现上升时,固安处于雨和雨夹雪交替出现的状态,在此阶段内,其他站点均为降雨。

07:24 在 4.3°仰角上第二次观察到“零度层亮带”,较第一次更加不完整,呈半圆弧状,高度在 2.2~2.6 km,之后零度层亮带高度迅速下降,根据北京探空资料显示,14 日 08:00,0 °C 层高度在 180 m,08:30“零度层亮带”接地,在零度层亮带高度迅速下降半个小时左右后,距离雷达站较近(百公里以内)的 7 个站陆续由雨或雨夹雪转为雪。9 个站转雪先后顺序(图 2):香河(距离北京雷达 45 km,下同)、永清(54 km)、固安(43.8 km)、霸州(79 km)、市区(37.9 km)、大厂(44.8 km)、三河(54.9 km)、文安(105 km)、大城(124.4 km)。通过对比各站转雪时间,发现转雪时间大致呈现自西向东、从北到南分布。在距离雷达 40~80 km 的各站,均在零度层亮带高度迅速下降后 30 min~1 h 先后完成了雨雪相态转变。文安站和大城站距离北京雷达已超过 100 km,运用北京雷达分析误差较大,此法不再适用。值得注意的是,利用“零度层亮带”高度的变化来预报地面降水粒子相态,还需要考虑雷达特征(波长、灵敏度、探测距离等)、地表状态(植被、地形等)和日变化等因素。

5 结论

通过对河北廊坊地区 2020 年 2 月 14 日强降雪过程中相态转变特征进行分析,得出以下结论:

(1)应用 HYSPLIT 模式对强降雪地区进行气块后向追踪模拟,分别得到 500、700、850、925 hPa 高度层的水汽来源、路径及贡献,其中,700、850 hPa 暖湿气流对降水的水汽贡献较大。

(2)此次强降雪过程中,有反射率因子强度大、持续时间长、较强径向速度辐合以及中、低空急流、超低空急流长时间维持等雷达回波特征。

(3)零速度线闭合状态反应了低空急流与中空急流(气流)发展对峙消亡等状态,对地面降水相态变化的临近预报有较好指示意义。在雨转雨夹雪初期,反射率因子强度较降雨时无明显变化,到雨和雨夹雪交替出现阶段,反射率因子强度有所减弱,同时“零度层亮带”间歇性出现,可能预示着降水相态的不稳定;在雨转雨夹雪过程中,零速度线转为反“S”型。

(4)当“零度层亮带”高度迅速下降后 30 min~1 h,距离北京雷达 40~80 km 的廊坊 7 站先后发生雨雪相态转变,对本地雨雪相态预报中有一定指导意义。雨和雨夹雪发生多次相态转变,期间“零度层亮带”间歇性出现,持续时间较长,是否是导致第二次零度层亮带(转雪前)不明显的一个原因,有待探讨。

(5)第一次出现的“零度层亮带”,并未观察到持续的零度层亮带高度的下降过程,可能是由于空中冷暖空气的势力发生了翻转(不是冷空气持续增强)或出现了局部对流增强(破坏零度层亮带生成条件)。

(6)在固安处于雨和雨夹雪交替出现的时间段内,只观察到一次“零度层亮带”高度的上升,是否是由于在此期间,0 °C 层在某一区间反复波动,且上升和下降幅度较小,造成雨和雨夹雪的交替出现,而雷达图的时空分辨率较低,对局地短时精细现象不一定都能观察到。

参考文献:

- [1] 王晓芳,程正泉,姜丽萍.2016 年广东一次罕见寒潮雨雪冰冻天气过程分析[J].气象科技,2019,47(1):106-115.
- [2] 廖晓农,张琳娜,何娜,等.2012 年 3 月 17 日北京降水相态转变的机制讨论[J].气象,2013,39(1):28-38.
- [3] 张月华,王健,郑玉萍,等.风廓线雷达资料在乌鲁木齐一次大暴雪过程分析中的应用[J].沙漠与绿洲气象,2019,13(5):49-54.
- [4] 何彩芬,黄旋旋,卢晶晶.基于多普勒天气雷达产品的降雪及冻雨综合分析[J].应用气象学报,2009,20(6):767-771.
- [5] 武威,胡燕平.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,2019,38(5):983-992.
- [6] 段宇辉,王文,田志广,等.华北北部相似形势下的两次雨转暴雪过程对比[J].干旱气象,2013,31(4):784-789.
- [7] 杨晓亮,王咏青,杨敏等.一次暴雨与特大暴雨并存的华北强降水过程分析[J].气象,2014,10(12):1446-1454.
- [8] 张南,裴宇杰,刘亮,等.一次晚春降水相态变化特征及成因[J].干旱气象,2014,32(2):275-280.
- [9] 李江波,李根娥,裴雨杰,等.一次春季强寒潮的降水相态变化分析[J].气象,2009,35(7):87-94.
- [10] 王清川,寿邵文,许敏,等.河北省廊坊市初冬雨雪相变特征及预报指标初探[J].干旱气象,2012,30(2):276-282.
- [11] 熊秋芬,张玉婷,姜晓飞,等.锢囚气旋钩状云区暴雪过程的水汽源地及输送分析[J].气象,2018,44(10):1257-1264.
- [12] 刘崧,黄富祥,杨莲梅,等.北疆暴雪发生条件的卫星遥感

- 监测[J].高原气象,2018,37(4):994-1001.
- [13] 肖贻青,肖湘卉,娄盼星,等.陕西省两次暴雪过程的对比分析[J].沙漠与绿洲气象,2020,14(2):27-35.
- [14] DRUMOND A, NIETO R, GIMENO L. On the contribution of the tropical western hemisphere warm pool source of moisture to the Northern Hemisphere precipitation through a Lagrangian approach [J]. *J Geophys Res.* 2011, 116(21):1-4.
- [15] DRAXLER R R, HESS G D. An overview of the HYSPLIT_4 modeling system of trajectories, dispersion, and deposition [J]. *Aust Meteor Mag*, 1998, 47 (4): 295-308.
- [16] 俞小鼎,姚秀萍,熊廷南,等.多普勒天气雷达原理与业务应用[M].北京:气象出版社,2006:58-59.
- [17] 胡玲,刘锦,东高红,等.天津城区暴雪的环流形势与雷达特征分析[J].气象与环境科学,2020,43(1):34-42.

Research and Application of Doppler Radar in the Phase Transition Process of Heavy Snowfall

ZHOU Tao¹, LI Na¹, WANG Qingchuan¹, YANG Shuai¹, ZHANG Yuting²

(1. Langfang Meteorological Bureau, Langfang 065000, China;

2. Hengshui Meteorological Bureau, Hengshui 053000, China)

Abstract Conventional meteorological data, NCEP1°×1° reanalysis data and Beijing Doppler radar data were used to analyze the phase transition characteristics during the heavy snowfall on February 14th, 2020 in Langfang, Hebei Province, and the HYSPLIT mode was introduced to simulate the 96 h backward trajectories of gas blocks in areas with heavy snowfall. The study found that the closed state of the zero-velocity isoline reflects the development, confrontation, and extinction of the low-level jet and the mid-to-upper level jet (airflow), and has a good indication of the nowcasting of surface precipitation phase changes; The meteorological observation stations in Langfang within 40-80 km from Beijing Doppler Radar completed the phase transition of rain and snow within half an hour to one hour after the height of the 0 °C-layer bright band dropped rapidly. The HYSPLIT model was used to obtain the water vapor source, path and contribution of the four altitude layers in the strong snow area, and find that 700 hPa and 850 hPa contribute significantly to the water vapor in the precipitation area, and both are warm and humid air airflow.

Key words heavy snowfall; phase transition; 0 °C-layer bright band; HYSPLIT