春季强降水过程的多普勒天气雷达图像特征剖析

王丽荣[1] 汤达章[2] 张艳刚[3]

(1 石家庄市气象局 , 石家庄 050081 ; 2 南京信息工程大学 ,南京 210044 ; 3 河北省气象台 ,石家庄 050021)

摘要 对 2004 年 4 月 25 日出现在华北的一次大范围较强降雨过程进行了分析 ,介绍了多普勒天气雷达径向速度 PPI 图像和垂直风廓线(VWP) 产品的应用技术 ,根据这两种产品可以判断冷 、暖平流 ,以及各个高度层风的辐合 、辐散 ,综合这些特征进一步判断气流上升或下沉 ,从而可以推断降水的生消 。通过对此次降水个例的分析 ,探讨了春季强降雨过程的雷达图像特征 ,发现在降水发生 、发展和消亡的不同时段垂直风廓线产品和径向速度图像都有非常明显地体现 ,为今后预报春季大面积降水提供一定的参考和依据 。

关键词 强降水 多普勒天气雷达 垂直风廓线 径向速度

引言

目前 ,多普勒天气雷达布网正在全面展开 ,如何应用雷达资料监测各种天气成为迫切需要解决的问题 。与常规天气雷达相比 ,多普勒天气雷达可获取更多的与降水有关的信息 ,除了能得到回波强度外 ,还能得到平均径向速度和速度谱宽 。由径向速度数据 ,通过 VAD (Velocity Azimuth Display) 技术可以获取某高度平面上的平均风向风速 ,及风向风速随高度和时间变化的剖面图形垂直风廓线[1] 。根据径向速度 PPI 图像和垂直风廓线 (VWP : Vertical Wind Profice) 产品可以很清楚地看出各个高度层风的分布 ,而且 ,雷达每 6 min 进行一次体扫描 ,探测资料的连续性很强 ,使更详尽地分析和预报降水的发生 、发展和演变的过程成为可能 。

2004 年 4 月 25 日石家庄出现春季第一次强降雨过程 ,位于新乐的多普勒天气雷达从 10 :15(北京时 ,下同) 开始进行了跟踪探测 ,获取了较为完整的回波资料 。本文利用该站的雷达资料 ,对反射率因子图像 、径向速度图像 、垂直风廓线等产品进行了详细分析 ,初探了春季大面积降水过程发生 、发展 、维持和消亡的动力学机制 。通过本文的分析 ,努力为今后春季的大面积降水监测 、预报提供可靠依据 。

1 天气背景及实况

2004 年 4 月 25 日华北出现了入春以来最强的一次降雨 ,河北省降水量大都在中雨以上 ,降雨中心在石家庄 —保定 —廊坊一线 ,过程雨量石家庄最大为 32 .9 mm 。石家庄所管辖的 17 个气象站中 ,行唐站最小为 15 .7 mm , 雷达站所在的新乐气象站 27 .5 mm 。该次过程主要的降雨时段在 25 日下午到前半夜 ,由新乐站观测的逐小时雨量(图 1) 可以看出 ,雨强具有明显的间歇性 ,17 :00 ~ 18 :00 的 1 h 雨量减小到 0 .8 mm ,13 :00 ~ 17 :00 和 18 :00 ~ 22 :00 为相对较强的两个时段 。

此次降雨过程是由中纬度西南暖湿气流和东北冷空气西南压的共同作用造成的 。25 日 08 :00 内蒙古中部中低层有弱 、范围较小的非闭合的低值区 ,其带的槽从陕西北部延伸到甘肃东部地区 ,河北省受槽前的西南气流影响 ,湿区开始建立 。25 日中高层发展形成闭合的涡 ,涡带槽逐渐东移 ,略有南压 ,始终为暖气团控制 ,而低层东北部的冷空气逐渐向东南压 ,冷暖空气在我区上空交汇 ,造成较强降水 。26 日 08 :00 ,高空槽移出河北 ,高低层完全受冷气团控制 ,降雨基本结束 。

江苏省科技厅 BS2003054 项目资助
作者简介 :王丽荣 ,女 ,1973 年生 ,在读研究生 ,工程师 ,主要从事天气预报 , Email : wlr- wzy @hot mail .com
收稿日期 :2004 年 9 月 1 日 ;定稿日期 :2004 年 11 月 11 日

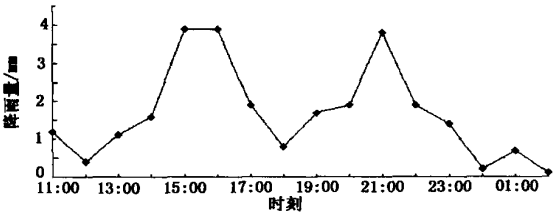

图 1　2004 年 4 月 25 ~ 26 日新乐气象站逐小时雨量

2　多普勒雷达图像特征

研究多普勒天气雷达的强度回波和径向速度回波图像,以及由基本数据计算出的垂直风廓线产品(VWP),不仅可以得到大面积降水过程的多普勒雷达的一些基本特征,而且通过跟踪整个降雨过程的平均风场结构可以大致判断降水的生消[1~2]。

2.1　基本反射率因子特征

这次降雨过程,在基本反射率因子 PPI 上具有连续性积层混合云降雨回波的主要特征:回波范围大,在 1.5°仰角上 230 km 半径观测范围内充满连续性降水回波,大部分回波强度小于等于 30 dBz;回波边缘支离破碎,回波中夹有强度 40 dBz 以上的团块,较强降雨时段,回波团块形成一条条短带。另外,在不同仰角、不同时段还表现出层状云连续性降水回波特征——零度层亮带,说明这次过程对流还是很弱的。

10:15 在 1.5°仰角的 PPI 图像上,雷达站西部、南部有分散的强度较弱的层状云回波,北部和东部 150 km 范围为连续、大面积、较强的积层混合云降雨回波,强度在 30 ~ 47 dBz 之间,此时该区域(保定中部)的降水较大,石家庄北部和东部有小量的降水。此后,北部和东北部的回波相继减弱,西南部的回波加强,强回波呈东西向分布,且不断有强回波块经雷达站自西向东移动,回波最强达到 50 dBz,这段时间石家庄的降水普遍较强。22:00 以后,西北部不再有回波涌入,雷达观测范围内回波面积逐渐向东南方向收缩,强度减弱,降水也明显减弱。

2.2　垂直风廓线产品变化特征

VWP 产品是在 VAD 技术的基础上,应用相继时间的体积扫描资料,得到水平区域的平均风向和平均风速随高度和时间变化的剖面图形。由 VWP 产品可以很直观地看出大气平均风场随高度和时间的变化,从而判断风垂直切变及冷暖平流,而风垂直切变及冷暖平流的变化往往和降水的强度密切相关,同时,配合整层风随时间的变化可以判断降水的生消。

2.2.1　切变层及冷暖平流

由 ω 方程[3]可知,暖平流产生上升运动,冷平流产生下沉运动。图 2 为逐时 VWP 图,10:40 ~ 12:33 在 1.2 km 的高度有一零速度层,为 NE 风与 S 风的垂直切变层。切变层以下,平流变化不是很明显;切变层以上,风随高度顺转,有暖平流,产生上升运动。12:33 ~ 19:35 零速度层消失,加强为 4 ~ 6 m/s 的 SE 风,1.2 km 以上风仍随高度明显顺转,风速随高度增加,且 SW 风层的厚度加大,表明此段时间存在很强的暖平流,产生的上升气流也非常强,这与实况降水的加强和维持是一致的。21:09 以后,3 km 以下仍存在暖平流,有上升运动;但中间层向 NW 风转变,上层仍为西南风,即中上层为冷平流的结构,转为下沉气流。从图中还可以看出,此时西北风层高度迅速降低,也就是说,下沉气流层的高度迅速向下侵入,上升气流层的高度越来越低,对应降水减弱。22:43,1.8 km 处又出现零速度层,为 SE 到 SW 的切变层,23:46 零速度层高度降低到 1.5 km,为 E—NW 的切变,1.5 km 以上为西北气流控制,降水趋于结束。

2.2.2　回波顶高

VWP 产品中,每一组数据代表某一时刻、某一圈层的平均风向和平均风速,如果该圈上资料的点少于 25 个,则在该高度上不显示平均风向风速符号,而是用“ND”字样显示。反过来,如果 VWP 图中显示“ND”,则可近似地说明该层的回波相当弱或没有回波,最低的“ND”层大致可以反映出回波顶的情况。10:40 ~ 11:54“ND”层在 6.7 km 以上,12:00 以后,“ND”层逐渐抬高,14:31 抬升到 9.1 km,一直维持到 26 日 00:17。之后,高度迅速下降,26 日 02:00,降低到 2.4 km。与图 1 进行比较,可以发现回波顶高与降水成正相关:降水较强时,回波顶伸展的高度也比较高;回波顶高度的降低,则预示着降水的减弱。

2.2.3　环境风

孟加拉湾是河北省中南部主要的水汽源地,西南气流的建立有利于水汽的输送,SW 风层越厚,水汽越充沛。从图 2 整体环境风场来看,14:30 以前,SW 风在 4.6 km 以下,之后的 9 h 内 1.2 ~ 9.1 km 均为 W—SW 风,21:30 以后 3.0 ~ 5.2 km 开始转

为 NW 风,且 NW 风高度层随时间迅速降低。与降水变化比较可见,随着 SW 风高度层的抬升,降水量加大,SW 风高度层维持,则较强降水时段维持;西北风向低层的侵入,说明暖湿气流逐渐被干冷空气取代,预示着降水的减弱,直至终止。

另外风速 20 m/s 以上高度层(简称 20 m/s 层) 14:25 在 7.3 km 以上,之后,20 m/s 层高度随时间降低,16:11 降到低到 5.8 km。16:11 ~ 20:13,20 m/s 层又有所抬升,20:13 抬升到 7.9 km,接下来的 3 个体扫时间内,20 m/s 层又迅速下降到 7.3 km,这个高度一直持续到23:30。比较 20 m/s 层与图 1 中雨量的变化,20 m/s 层高度随时间降低的过程,雨强加大;相反,20 m/s 层高度随时间抬升,雨强减弱。

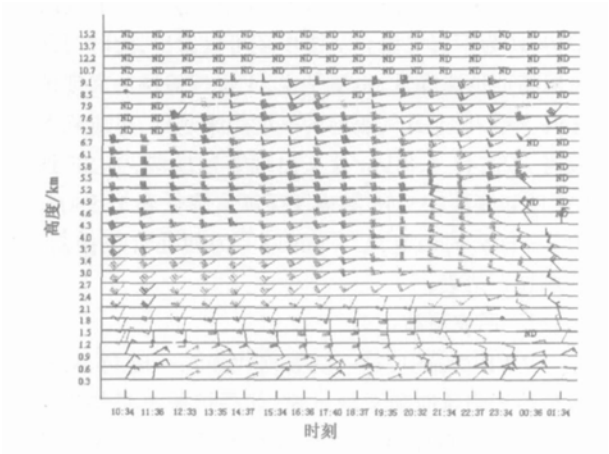

图 2 2004 年 4 月 25 日 10:34 至 26 日 01:34 逐时垂直风廓线(VWP)产品
(ND 相当于无回波或回波相当弱)

2.3 径向速度特征

由于雷达探测的是径向速度场,负径向速度代表了入流,而正径向速度代表的是出流,故径向速度 PPI 图上正、负速度区域面积的大小反映了大尺度辐合、辐散运动的情况。如图 3 左边一列所示,零速度线两侧弯向正速度区,则负速度区面积大于正速度区,为大尺度辐合运动(图 3a,b);零速度线两侧弯向负速度区,则正速度区面积大于负速度区,为大尺度辐散运动(图 3c,d)。同时,同一圈层上正、负速度最大值的差异反映了各个高度层风速的辐合辐散;而相对应距离圈层同等大小风速下正、负面积的不同反映了某个厚度层风向的辐合辐散。

实际大尺度运动往往是冷暖平流与大尺度辐合辐散运动的结合,夏文梅等将相应的多普勒速度特征分成图 3 所示的 4 种类型,可以看出,大尺度辐合辐散运动与冷暖平流叠加造成零速度线在显示中心一侧弯曲程度加大,而在另一侧弯曲程度减小甚至会变成某个直线,形成了零速度线过显示中心两侧弯曲程度不同[4]。

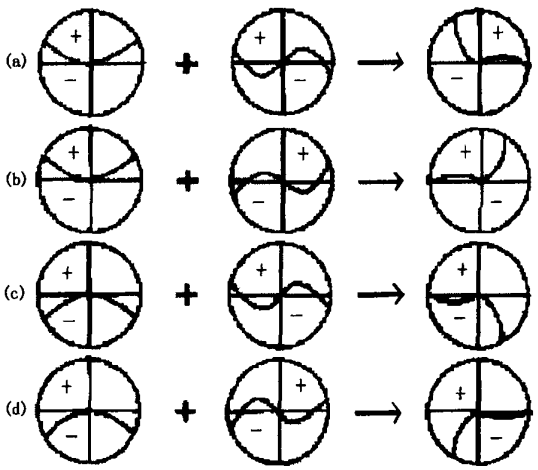

图 3 大尺度辐合辐散与冷暖平流叠加示意图[4]:
(a)大尺度辐合与暖平流;(b)大尺度辐合与冷平流;
(c)大尺度辐散与暖平流;(d)大尺度辐散与冷平流

在这次混合性降水过程中,其大尺度运动在多普勒速度图上表现出的特征恰恰是上述这些运动结合的集中反映。下面将降水过程分为降水初期、较强降水开始时段、较强降水维持、降水消亡 4 个阶段按上述方法进行详细分析,探讨该降水过程的径向速度 PPI 图像特征(图 4)。在 1.5°、2.4°、3.4°三个仰角中,2.4°仰角能够清晰地反映该降水过程的一些基本特征,故选取此仰角为代表加以分析,其它仰角的图像未在文中列出。

2.3.1 降水初期

降水刚刚开始时(图 4a):25 km 内零速度线随距离增加逆转,有冷平流;25 km 外零速度线随距离增加迅速顺转,有暖平流。风向在 25 km(1.2 km 高度)附近呈近乎 180°的转变,说明在此高 0 度有风切变存在。由 1.5°和 2.4°仰角图像还可以看出,25 km 以外弯向正区的顺转程度比弯向负区的顺转程度大,属暖平流与辐散的叠加。

由不同仰角正、负径向速度值和面积大小可知,30 km 以内的低层存在着较强的风向、风速辐合,30 ~ 70 km 范围内有比较弱的风速的辐合,70 km 以

外,由于降水较弱,负区有大面积的径向速度缺口,无法判断高层风速的辐合(散)。

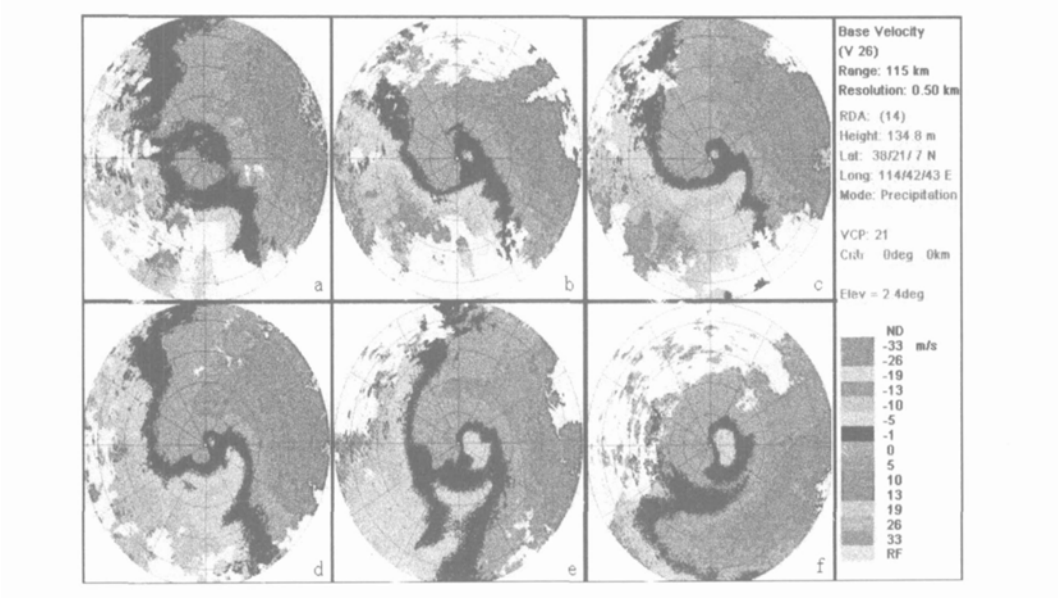

图 4　新乐雷达站 2004 年 4 月 25 日 2.4°仰角径向速度图:

(a) 10:15;(b) 13:54;(c) 16:05;(d) 17:20;(e) 20:32;(f) 22:43

2.3.2　较强降水开始时段

25 日 13:00 降水强度开始加大,相应的多普勒速度特征除了维持低层 NE 风、中上层 SW 风外,也有比较明显的变化:

图 4b 上,25 km 内的低层,零速度线不再随高度逆转,冷平流不再明显,切变层基本消失。同时,径向速度值在 5~10 m/s 范围内的负区面积仍远远大于正区面积,且负区内开始夹有 -10~-13 m/s 的速度,而正区没有相应量级的,低层风向、风速辐合明显加强。25 km 以外的中、上层,零速度线随高度弯向正区的顺转程度较降水前期明显加大,而弯向负区的顺转程度减弱,在 25~50 km 的范围内甚至呈直线状,说明暖平流叠加辐散的特性进一步加强。

2.3.3　较强降水维持时段

从图 4c 的整体来看,低层 NE 风强度迅速减弱、高度也有所降低,25 km 范围内有 S 风侵入,弯向正区的零等速线从距雷达 10 km 处开始顺转,直到扫描的边缘。而弯向负区的零等速度线也是从距雷达 10 km 处开始顺转,但只到 25 km,由测高公式暖平流的高度已经降低到 800 m 附近。

和前一时段相比,25 km 以内低层风的辐合有所减弱;25~50 km 有强的风向、风速辐合;50 km 以外有风向的辐散。13:00~16:00 一直为这种低层辐合、中高层辐散的配置,且不断有暖平流从高层向低层输入,有利于较强降水的维持。16:00 以后低层辐合进一步减弱(图 4d),对降水起到了一定的消弱作用。实况 16:00 以后的 2 h 内,雨强迅速下降。

19:00,25 km 以内的低层东风加强,风向、风速辐合也随之加强;25~75 km 的南风层,同样也存在着较强的风向辐合;75 km 以外有明显的风向和风速的辐散。再由 3.4°仰角零速度线的走向,从雷达到 80 km(5 km 高度)内,仍然有暖平流,但风向不再辐散;该层之上,有冷平流叠加辐散。综合分析,5 km 以下为较强的暖平流叠加较强的风速辐合,以上为冷平流叠加风向、风速的辐散,整个配置呈不稳定状态,有利于降水的加强与维持。

2.3.4　降水消亡时段

由于 22:00 以后西部的降水明显减弱,回波也开始出现不连续的情况,很难进行分析,故选取趋于减弱过程的 20:32 的径向速度图(图 4e)分析促使降水消亡的因素。此时,暖平流叠加辐合在低层仍然维持,中层不仅强度明显减弱,高度也迅速降低。相对应,辐散层的高度降低到 4.8 km 左右。之后的几个小时,中、低层的辐合减弱,而高层的辐散加强,辐散层的高度继续下降,至 22:43(图 4f),降低到 3.8 km,且上层风由西南风逐渐向西到西北风转

变。与图1进行比较,降水呈迅速下降的趋势。

26日01:30,低层东北风已不再明显,上层(3 km高度以上)完全为西北气流控制,降水趋于结束。

2.3.5 综合分析

综合上述分析,可以得出此次降水过程的一些动力学特性:降水初期低层为冷平流,中、高层为暖平流,但都存在风向、风速的辐合,促使产生上升气流,降水发展;较强降水刚刚开始时,低层冷平流减弱,高层暖平流进一步加强,风向、风速辐合特性更加突出;较强降水维持时段,暖平流继续向下侵入,低层冷平流逐渐被暖平流取代,且在5 km以上出现冷平流叠加辐散的情况,这样,低层辐合上升、高层辐散下沉,使得水汽供应得以维持,降水强度较大。随着冷平流叠加辐散层高度的降低,降水强度减弱,辐散层降低到3 km左右,降水基本结束。

3 结论

通过对这次降雨过程资料分析,总结出春季大面积降水的一些特点,得出如下结论:

(1) 这次降雨为积层混合云降水,在强度PPI上具有连续性降雨回波特征:回波范围大,分布比较均匀、连续,边缘支离破碎,中间夹有40 dBz或以上的较强回波块。

(2) 垂直风廓线产品(VWP)能够反映出冷暖平流、回波高度及20 m/s层的特征,由这些特征可以进一步判断垂直气流上升或下沉,从而推断降水的生消。

(3) 由多普勒径向速度的PPI图像中各个圈层正、负速度值的大小和同一风速值所对应的面积大小可以判断各个高度层风向、风速的辐合辐散;由零速度线的走向可以定性判断辐合辐散与冷暖平流,进而推断降水的生消。

(4) 多普勒径向速度图像所反应出的辐合、辐散,冷、暖平流以及各层风的情况与实际的天气图分析比较一致。但是,对于小范围的短时预报、预警,多普勒雷达更能显示出其在时空密度上的优越性。

参考文献

[1] 胡明宝,高太长,汤达章. 多普勒天气雷达资料分析与应用[M]. 北京:解放军出版社,2000.

[2] 张培昌,杜秉玉,戴铁丕. 雷达气象学[M]. 北京:气象出版社,2001.314-333.

[3] 朱乾根,林锦瑞,寿绍文,等.天气学原理和方法(修订本)[M]. 北京:气象出版社,1992.172-175.

[4] 夏文梅,张亚萍,汤达章. 暴雨多普勒天气雷达资料的分析[J]. 南京气象学院学报,2002,25(6):787-794.

Analysis of Characteristics of Doppler Weather Radar Images during a Precipitation Process in Spring

Wang Lirong[1] Tang Dazhang[2] Zhang Yangang[3]

(1 Shijiazhuang Municipal Meteorological Bureau, Shijiazhuang 050081; 2 Department of Atmospheric Sciences, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044; 3 Hebei Meteorological Office, Shijiazhuang 050021)

Abstract: A large-scale heavy rainfall process occurred in North China on 25 April 2004 is analyzed, and the methods of using Doppler weather radar radial velocity PPI and vertical velocity profile (VWP) are introduced. Based on the two radar products, the situation of cold and thermal advection, convergence and divergence at different altitudes can be identified comprehensively and then either ascending or descending air can be identified, so to deduce the occurrence of rainfall. Meanwhile, according to the analyses of this rainfall case, some Doppler weather radar image characteristics during heavy rainfall in spring are discussed. It is found out that there are obvious characteristics in the two radar products at the different stages of rainfall development (formation, development, and dissipation), which provides some reference for rainfall forecasting in spring.

Key words: heavy rainfall, Doppler weather radar, vertical wind profile, radial velocity