

王福侠,俞小鼎,王宗敏,等. 2014. 河北暴雨的多普勒天气雷达径向速度特征. 气象,40(2):206-215.

河北暴雨的多普勒天气雷达径向速度特征^{*}

王福侠¹ 俞小鼎² 王宗敏¹ 裴宇杰¹ 闫雪瑾¹

¹ 河北省气象台,石家庄 050021

² 中国气象局培训中心,北京 100081

提 要: 利用 2004—2011 年 29 次暴雨过程的多普勒天气雷达资料和常规天气资料,分类总结了河北中南部暴雨的主要雷达径向速度特征。发现形成河北中南部暴雨的主要雷达径向速度特征有 5 类:β 中尺度辐合线、β 中尺度辐合、γ 中尺度辐合、高空急流和深厚持久的低空急流。深厚持久的低空急流是大范围暴雨的主要速度特征之一。高空急流是大范围暴雨和区域暴雨共有的速度特征。β 中尺度辐合线、β 中尺度辐合、γ 中尺度辐合是大范围暴雨、区域暴雨和局地暴雨共有的速度特征和主要的中小尺度影响系统。列车效应是造成局地暴雨、大暴雨的关键原因。

关键词: 暴雨,多普勒天气雷达,径向速度特征,中尺度系统

中图分类号: P415

文献标志码: A

doi: 10.7519/j.issn.1000-0526.2014.02.008

Characteristics of Doppler Rader Velocity Field in Severe Rainstorms in Hebei

WANG Fuxia¹ YU Xiaoding² WANG Zongmin¹ PEI Yujie¹ YAN Xuejin¹

¹ Hebei Meteorological Observatory, Shijiazhuang 050021

² CMA Training Centre, Beijing 100081

Abstract: By using the Doppler radar data and the conventional observation of 29 torrential rain processes from 2004 to 2010 the velocity field characteristics in rainstorms in south-central Hebei Province are analyzed. It is found that the characteristics can be divided into five categories, including the meso-β scale convergence line, the meso-β scale convergence, the meso-γ scale convergence, the upper-level jet and the long-lasting and deep low-level jet. The last one is one of the main velocity field features of large-range severe rainstorms. The upper-level jet is the characteristic of both large-range heavy rainstorms and regional heavy rainstorms. The meso-β scale convergence line, the meso-β scale convergence and the meso-γ scale convergence are common features and main meso scale systems of all the three types of severe rainstorms. In addition, train effects is a key cause of local severe torrential rains.

Key words: rainstorm, Doppler weather radar, characteristics of radial velocity field, mesoscale system

引 言

众所周知,暴雨是由大尺度环境下的多个中小尺度系统造成的。多普勒天气雷达速度产品可以很好反映降水或降水云体的风场结构。造成暴雨的中

小尺度系统如中尺度辐合、中尺度切变线、中尺度辐合线、低空急流在多普勒天气雷达的径向速度产品中都可以捕捉到。根据多普勒天气雷达的径向速度产品,分析判断中小尺度系统的发展演变规律,对暴雨临近预警有一定的预报意义。

肖艳姣等(2005)在研究一次切变线暴雨中尺度

* 公益性行业(气象)科研专项(GYHY200906011,GYHY20070604)及国家科技支撑项目(2008BAC37B01)共同资助

2012 年 10 月 18 日收稿; 2013 年 9 月 29 日收修定稿

第一作者:王福侠,主要从事雷达气象和天气预报研究。Email:hbqxtwfx@sina.com

系统的多普勒雷达资料发现低层切变线上的扰动与地面降水加强有密切的关系,切变线上的 β 中尺度辐合线附近往往有 β 中尺度回波团形成,是造成暴雨的主要系统。而辐合线比回波团的形成至少提前了半个小时,具有一定的预报意义。伍志方等(2009)认为沿着辐合带两侧不断有新生单体,并沿着不同方向向辐合区汇聚加强,从而形成暴雨。有学者(方翀等,2012;柯文华等,2012;吴庆梅等,2012;俞小鼎,2012;祁丽燕等,2012;湛芸等,2012;孙军等,2012)还发现回波常沿辐合线触发移动和加强。

早在 1995 年张沛源等(1995)对逆风区做了详细的统计分析,发现暴雨降落在逆风区及其移动路径附近,逆风区与暴雨有很好的对应关系,而且有一定的提前量,是暴雨落区临近预报的有用判据。蔡晓云等(2001)对逆风区进行统计分析,认为近距离逆风区可成为暴雨短时预报的一个有参考价值的判据,最少提前 15~30 min,最长能提前 1~2 h。另外很多研究发现,逆风区是分析能否产生暴雨的一个重要指标(肖艳姣等,2005;伍志方等,2009;张沛源等,1995;夏文梅等,2002;黄小玉等,2006)。伍志方等(2009)还发现中尺度气旋性辐合也是暴雨的重要速度特征。

暴雨产生的条件之一是要有充分的水汽供应,而低空急流是为暴雨输送水汽的重要通道。在降水开始的情况下,可以通过多普勒天气雷达径向速度

图监视低空急流的变化,结合其他资料,可以判断降雨是否会继续。很多研究表明,低空急流与暴雨也有很好的对应关系(夏文梅等,2006;苗爱梅等,2010;周雨华等,2006;黄小玉等,2008;张家国等,2010)。夏文梅等(2006)发现低空急流位置一般相对稳定,暴雨落区也比较稳定,暴雨在低空急流轴的左侧 200 km 范围内。许多学者(张京英等,2005;吴海英等,2010;王啸华等,2012;廖晓农等,2011;徐八林等,2010)发现低空急流的下传和加强在暴雨过程中起着重要作用,可以引起雨强的大幅增加。

河北暴雨从影响范围可以分为三类:大范围暴雨(日降水量 50 mm 及以上站数 > 25 站)、区域暴雨(5 站 < 日降水量 50 mm 及以上站数 < 25 站,降水区域成片)和局地暴雨(日降水量 50 mm 及以上站数 < 5 站,或日降水量 50 mm 及以上站数 > 5 站且降水区域很分散)。三类暴雨的降水性质也有明显区别。大范围暴雨分成两种,一种以稳定性降水为主,夹杂一些弱的对流性降水,另一种稳定性降水和对流性降水都有的混合云降水;区域暴雨是较大范围稳定降水中对流性降水为主的降水过程;局地暴雨是单纯的对流性降水造成的。本文采用统计方法,按以上分类总结了河北中南部 29 次暴雨过程的主要径向速度特征和中小尺度影响系统(表 1 和表 2)。由于 γ 中尺度辐合在三类暴雨过程中普遍存在,不是大范围暴雨和区域暴雨中的主要影响系统,因此没有在大范围暴雨和区域性暴雨中列出。

表 1 暴雨过程中的主要中尺度系统或速度特征

Table 1 The velocity field characteristics and main mesoscale systems during rainstorms

中尺度类型	天气过程		
	大范围暴雨	区域暴雨	局地暴雨
β 中尺度辐合线	2005 年 7 月 23 日	2004 年 8 月 12 日	2005 年 8 月 3 日
	2009 年 5 月 9 日	2006 年 7 月 31 日	2005 年 8 月 7 日
	2010 年 8 月 19 日	2006 年 8 月 25 日	
	2011 年 7 月 24 日	2009 年 8 月 16 日	
		2009 年 8 月 21 日	
	2009 年 8 月 25 日		
	2010 年 7 月 31 日		
β 中尺度辐合	2005 年 7 月 22 日	2004 年 8 月 12 日	2005 年 8 月 2 日
	2005 年 7 月 23 日	2006 年 6 月 27 日	2005 年 8 月 16 日
	2007 年 6 月 30 日	2006 年 7 月 14 日	
		2009 年 8 月 16 日	
深厚低空急流	2005 年 8 月 16 日		
	2004 年 7 月 11 日		
高空急流	2005 年 8 月 16 日	2009 年 7 月 7 日	
	2008 年 7 月 14 日	2009 年 8 月 21 日	

表 2 γ 中尺度辐合生消时间和暴雨灾情时间对比Table 2 Contrast of the generating and vanishing time of meso- γ scale convergence and the rainstorm time

日期	γ 中尺度 辐合类型	生消时间	灾情报时间		可预报时效/min	
			短时暴雨	暴雨	短时暴雨	暴雨
2005 年 8 月 3 日	第 1 类	15:22—16:11	赞皇 16:12	—	50	—
	第 1 类	16:05—17:12	临城 17:19	—	26	—
2005 年 8 月 16 日	第 1 类	09:01—11:03	肃宁 09:24	—	23	—
	第 2 类	08:12—10:45	饶阳 08:55	—	43	—
2006 年 7 月 10 日	第 2 类	11:41—13:12	顺平 12:19	—	38	—
	第 2 类	12:18—13:30	任丘 12:59	—	41	—
	第 2 类	14:13—15:43	献县 14:44	—	31	—
	第 2 类	14:55—17:03	青县 15:46	—	51	—
	第 1 类	13:30—15:49	元氏 14:38	—	68	—
	第 1 类	12:05—13:00	平山 12:28	—	23	—
	第 2 类	13:00—13:18	—	—	19	54
	第 2 类	13:18—14:01	雄县 13:25	雄县 13:54	7	36
2005 年 8 月 2 日	第 1 类	17:47—18:41	—	—	31	45
	第 1 类	17:59—18:41	宁晋 18:18	宁晋 18:28	19	38
	第 1 类	18:17—18:54	赵县 18:36	赵县 18:58	19	41
2005 年 8 月 7 日	第 1 类	13:40—14:11	—	—	36	70
	第 1 类	13:58—14:17	正定 14:14	正定 14:50	16	52
	第 2 类	14:04—15:30	—	—	12	46
2009 年 8 月 4 日	第 2 类	08:18~09:00	—	—	31	58
	第 2 类	08:24~08:48	石家庄 08:49	石家庄 09:16	25	52
	第 2 类	09:06~09:54	—	—	—	10
2008 年 8 月 14 日	第 1 类	11:00—12:48	石家庄 11:33	石家庄 12:03	33	63
	第 1 类	11:54—12:36	—	—	—	9
2008 年 8 月 11 日	第 1 类	04:38—05:02	—	—	16	46
	第 1 类	04:56—05:27	牛头崖 04:54	牛头崖 05:24	—	28
	第 1 类	05:27—06:22	—	—	—	—
	第 1 类	06:16—06:28	—	—	—	—

1 β 中尺度辐合线

1.1 β 中尺度辐合线径向速度特征

中尺度辐合线是指在多普勒天气雷达径向速度图上的风速不连续线,靠近雷达的一侧为离开雷达的正速度区,远离雷达的一侧为向着雷达的负速度区。对应中尺度辐合线,在基本反射率产品上都有走向一致的强回波带(见图 1 和图 2)。中尺度辐合线的识别要注意几个问题。第一:雷达的速度产品都是径向的,并不是真实的全风速;第二:雷达每个仰角的速度产品都在一个圆锥面上,中尺度辐合线离开雷达的距离不同,中尺度辐合线所在的高度也不同;第三:当中尺度辐合线的走向和雷达径向夹角越小,辐合越弱。

β 中尺度辐合线是大范围暴雨、区域暴雨和局地暴雨共有的速度特征。在 29 次暴雨过程中,有

13 次(占 44%,其中大范围暴雨 4 次,区域暴雨 7 次、局地暴雨 2 次)观测到了 β 中尺度辐合线,是河北暴雨的主要中尺度影响系统。 β 中尺度辐合线多为东北—西南向,水平尺度为 20~200 km,在多个仰角(2 个以上)都可以探测到。

1.2 个例分析

2009 年 8 月 25—26 日,在石家庄中南部、衡水北部出现了区域性暴雨过程,有 12 站暴雨,2 站大暴雨。降水从 25 日 21 时开始,26 日 14 时结束,大的降水时段主要集中在夜间,雨强很大,有 6 站 1 h 降水量超过 50 mm,其中藁城 1 h 降水量达到 81.1 mm。

分析新乐雷达 0.5°仰角的基本径向速度和基本反射率产品发现,22:30 在石家庄东南部从无极到栾城生成一条东北—西南向的 β 中尺度辐合线,辐合线长度约 50 km。23:00 辐合线东移加强,在辐合线(图 1a 白色实线)的两侧出现 $+12 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 和 $-12 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的速度中心,与之对应的强回波位于辐

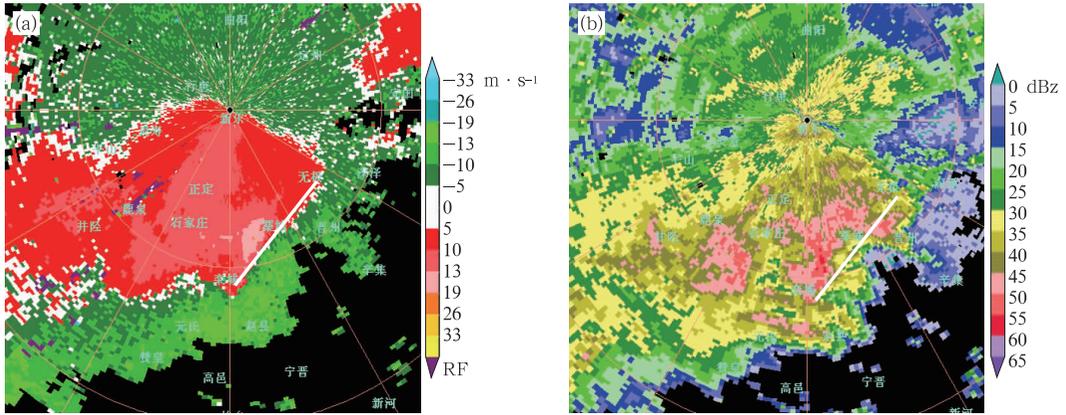


图 1 2009 年 8 月 25 日 23 时石家庄新乐雷达 0.5°仰角基本径向速度(a)和基本反射率(b)
 Fig. 1 The base velocity (a) and base reflectivity (b) at 0.5° elevation from
 Xinle radar at 23:00 BT 25 August 2009

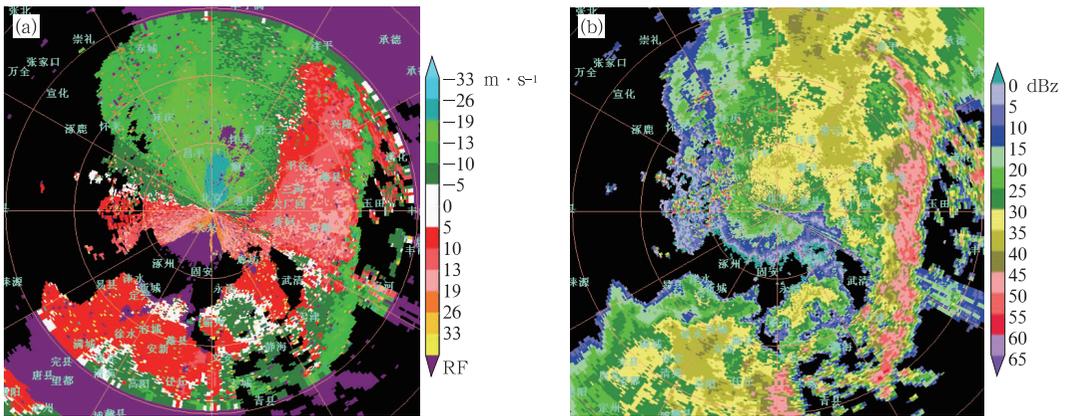


图 2 2011 年 7 月 24 日 23 时石家庄新乐雷达 1.5°仰角风暴相对径向速度(a)和基本反射率(b)
 (色标同图 1)
 Fig. 2 The storm relative velocity (a) and reflectivity (b) at 1.5° elevation from
 Xinle radar at 23:00 BT 24 July 2011

合线后侧(相对于回波运动方向而言)的正速度区内(图 1b),此时强回波开始影响藁城。从多个仰角的基本径向速度产品来看,从 0.5°~3.4°仰角(0.5~2.4 km)都可以观测到辐合线,4.3°及以上仰角观测不到,说明辐合线仅存在于较低层次。26 日 00:12 辐合线缓慢东移到晋州宁晋一带,强回波移到藁城以东的县市。从 25 日 23:00 至 26 日 00:00 藁城受回波带影响产生强降水,23 时到 26 日 00 时藁城 1 h 降水量达到 81.1 mm。石家庄本站暴雨出现最早,约在 23 时,石家庄其他几站暴雨出现在 26 日 00—01 时,衡水暴雨出现在 02 时以后,β 中尺度辐合线出现的时间比最早的暴雨灾情报早了 0.5 h,具有预报意义。

β 中尺度辐合线的水平尺度变化较大,大范围暴雨的 β 中尺度辐合线可达 200 km。2011 年 7 月 24 日 20 时到 25 日 08 时在华北中部出现大范围暴

雨过程,北京东北部、廊坊北部、天津、唐山、承德南部、秦皇岛出现 34 站暴雨,4 站大暴雨。分析北京雷达资料,20:00 从北京密云到廊坊固安有一条长约 150 km 的较强回波带,在速度图上有对应的中尺度辐合线。23:00,带状回波东移加强,中尺度辐合线合并长约 200 km,强回波位于辐合线后侧的正速度区(图 2)。25 日 07:00 回波带移出秦皇岛,造成了北京东北部、廊坊北部、天津、承德南部、唐山、秦皇岛的暴雨、大暴雨过程。从辐合线的生成时间和暴雨灾情的时间来看,廊坊暴雨出现在 21—23 时之间,唐山、秦皇岛暴雨出现在 25 日 00—04 时之间,可见中尺度辐合线有很大提前量,有一定的预报意义。

2 β 中尺度辐合径向速度特征

2006 年 6 月 27 日 08 时至 28 日 08 时在沧州南

部、衡水、邢台东部出现 12 站暴雨。这次区域性暴雨过程是多单体强风暴造成的。这次的多单体强风暴尺度比较大,45 dBz 以上回波尺度达 40 km(图 3b),与最强的回波对应速度图上很难分辨出有几对正负速度对,而更像是一个整体(图 3a 圆圈位置),其尺度也远远超过 20 km,达到了 β 中尺度。从图中可以看出这种 β 中尺度系统存在明显的辐合,正速度区在靠近雷达一侧,负速度区在远离雷达一侧(图 3a)。强回波中心在正负速度中心之间。与 γ 中尺度辐合速度特征近似,但有区别, γ 中尺度辐合只有一个正速度中心和一个负速度中心, β 中尺度系统有多个正速度中心和负速度中心。虽然不完全是放大一号的 γ 中尺度辐合,但辐合特性非常清楚。在这种系统控制下的多单体风暴尺度大,生命史长,回波强度大,影响范围也大,这种 β 中尺度系被统称为 β 中尺度辐合。在 29 次暴雨过程中有 9 次(表 1),占了 31%。9 次暴雨过程的 β 中尺度辐合水平尺度在 20~50 km 之间。 β 中尺度辐合是大范围暴雨和区域性暴雨的主要速度特征和中尺度影响系统。

β 中尺度辐合成熟期的速度特征(图 3),在低层($0.5^\circ \sim 1.5^\circ$ 仰角,高度 2~3 km)呈现明显的气旋性旋转,辐合也最强,中层($2.4^\circ \sim 4.3^\circ$ 仰角,高度 5.5~9 km)气旋性旋转减弱,主要呈现辐合特征,顶层(6.0° 仰角,高度 13 km)转为很强的辐散。

2006 年 6 月 27 日有 3 个典型的 β 中尺度辐合形成,造成衡水、邢台的暴雨。造成衡水、冀州、枣强、故城暴雨的 β 中尺度辐合 00:34 形成,衡水最先出现暴雨,灾情报时间是 00:58, β 中尺度辐合的形成时间比暴雨灾情早了 24 min。造成新河、南宫暴雨的 β 中尺度辐合 01:23 形成,南宫暴雨灾情报时间是 02:49, β 中尺度辐合的形成时间比暴雨灾情早了 86 min,因此具有预报意义。

3 γ 中尺度辐合

3.1 γ 中尺度辐合定义及分类

γ 中尺度系统的速度特征是在雷达探测有效范

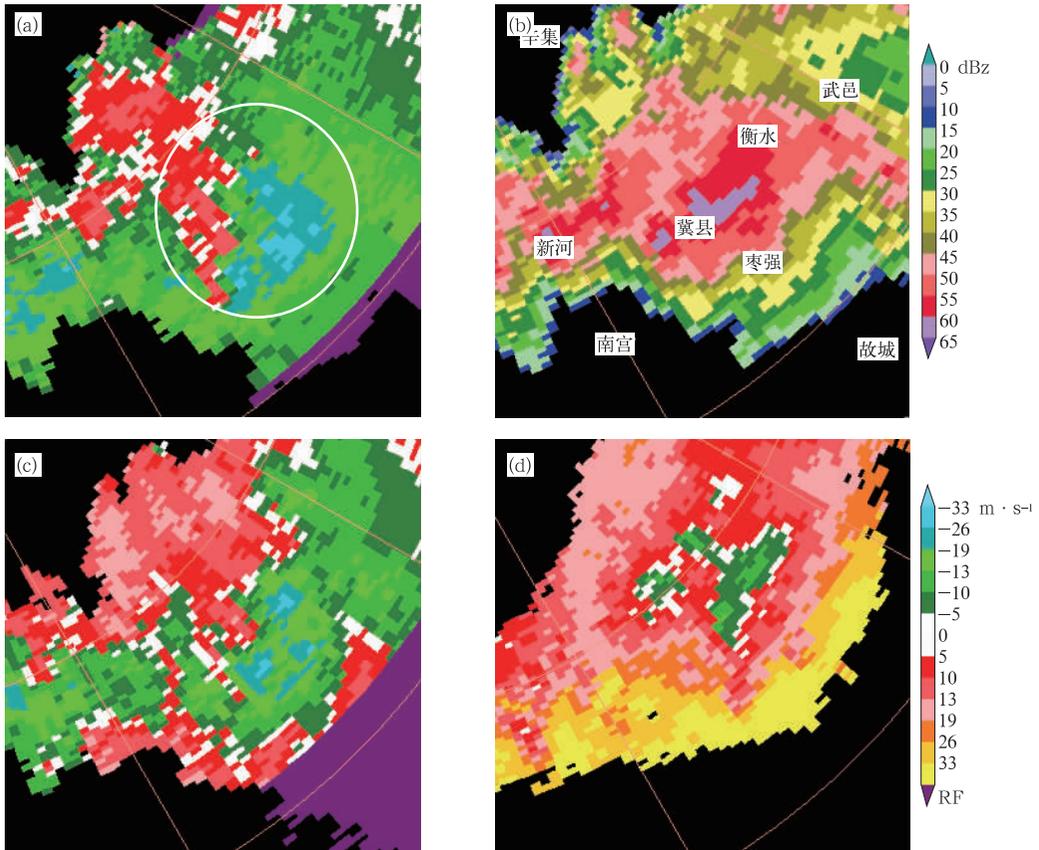


图 3 2006 年 6 月 28 日 00:59(a)1.5°、(c)2.4°、(d)6.0°仰角基本径向速度和(b)1.5°仰角基本基本反射率(距离圈间距 50 km)

Fig. 3 The base velocity at 1.5° (a), 2.4° (c), 6.0° (d) elevation and base reflectivity at 1.5° (b) elevation from Xinle radar at 00:59 BT 28 June 2006

围内的小区域(2~20 km,并近似认为这个小区域在同一高度上)内存在一对最大入流和出流速度中心,如果最大出流速度中心在靠近雷达一侧,而最大入流速度中心在远离雷达一侧,则这对最大入流和出流中心构成一个 γ 中尺度辐合,反之则为 γ 中尺度辐散。 γ 中尺度辐合包括三种情况:当最大入流

中心和最大出流中心在同一个雷达径向,则为纯辐合;当最大入流和最大出流中心不在同一个雷达径向,最大入流中心位于雷达径向的左侧(图 4a 黑色圆圈),则为气旋式辐合;反之,则为反气旋式辐合;以上三种情况统称为第 1 类 γ 中尺度辐合,对应基本反射率上有较强回波中心与之对应(图 4b)。

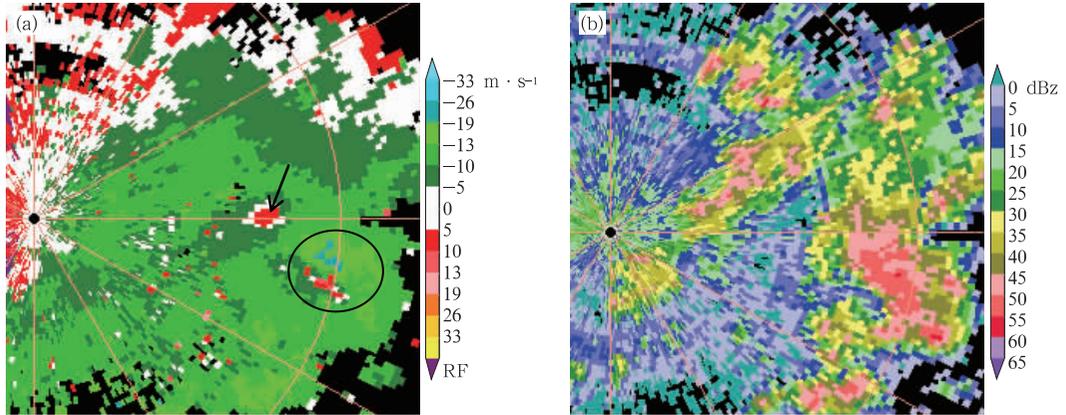


图 4 2008 年 8 月 11 日 05:08 秦皇岛 2.4° 仰角基本径向速度(a)和基本反射率(b)

Fig. 4 The base velocity (a) and base reflectivity (b) at 2.4° elevation from Xinle radar at 05:08 BT 11 August 2008

在多普勒天气雷达的速度图上,被正速度区包围的负速度区或者被负速度区包围的正速度区(正负速度区之间要有零线,风区不跨越测站原点)是另一种 γ 中尺度辐合(有的文献中称为逆风区,见图 4 黑色箭头所指)。与 3.1 节的 γ 中尺度辐合不同的是正负速度区没有最大入流中心和最大出流中心,被包围的正、负速度区的一侧(与雷达径向垂直)为辐合区,另一侧为辐散区。这类中尺度辐合的尺度大多比较小,多属于 γ 中尺度。在混合云暴雨和对流云暴雨中都非常多见。为了区别第 1 类 γ 中尺度辐合,称之为第 2 类 γ 中尺度辐合。由于被包围的正速度区或负速度区的形状不同,辐合的强弱也有所不同。如果正速度区或负速度区为雷达径向的射线状,几乎就没有辐合,只有切变。

从统计结果看 γ 中尺度辐合无论在大范围暴雨、区域暴雨还是局地暴雨中都非常多见,第 1 类 γ 中尺度辐合一般持续 30 min 到 2 h(表 2)。第 2 类 γ 中尺度辐合的持续时间长短不一,短的只有 10 min,长的超过了 2 h(表 2)。

3.2 γ 中尺度辐合与局地暴雨、大暴雨的关系

从统计的结果看,单独的第 1 类 γ 中尺度辐合

或第 2 类 γ 中尺度辐合产生的降水一般为短时暴雨(表 2)。从出现暴雨的几个个例的统计结果发现,都是 2 个或多个 γ 中尺度辐合先后经过同一地点形成列车效应造成局地暴雨(表 2)。由于 γ 中尺度辐合尺度小、持续时间短,这种列车效应一般只能形成局地的暴雨或者大暴雨。

从统计结果来看, γ 中尺度辐合的生成时间都早于短时暴雨或者暴雨灾情报时间,对短时暴雨和暴雨预报都有一定的提前量。表 2 的 10 站短时暴雨, γ 中尺度辐合出现的时间比短时暴雨灾情报的时间提前 16~68 min。表 2 的 7 站暴雨都是多个 γ 中尺度辐合造成的,而单独的 γ 中尺度辐合一般只形成短时暴雨,因此出现第一个 γ 中尺度辐合时很难判断能否出现暴雨,统计第二个 γ 中尺度辐合的出现时间,和暴雨灾情报时间对比,提前了 9~52 min。从 7 站暴雨(赵县除外)的第二个 γ 中尺度辐合出现时间和短时暴雨灾情报时间对比,4 站提前了 13~25 min。因此,如果某站出现了短时暴雨,并且较强回波还会继续影响,可以预报本站暴雨。

当多个 γ 中尺度辐合不断经过同一地点形成列车效应,列车效应在一个地点持续时间的长短是能否产生局地大暴雨的关键因素之一。2008 年 8 月

11日凌晨秦皇岛牛头崖镇出现局地大暴雨天气,从雷达产品来看,5个 γ 中尺度对流单体不断经过牛头崖,列车效应持续近2h,造成牛头崖镇大暴雨天气。

4 低空急流

4.1 低空急流的多普勒速度特征

当在雷达显示高度范围内,存在低空急流(风速 $>12\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$),则在此急流层以下,风速随高度增加而增加,而在此急流层以上,风速随高度增加而减小,

有时也存在随高度增加而增加的情况。低空急流的正、负速度区关于显示中心呈对称分布(见图5a)。

在实际观测中发现低空急流差别很大,有的很浅薄,仅在边界层存在,有的持续时间很短或者断续出现,而有的低空急流稳定少动,比较深厚持续时间也很长。稳定少动深厚持久的低空急流一般在常规天气资料上也有明显的低空急流存在。根据天气学原理的定义,低空急流是指与强降水相联系的位于 $600\sim 900\text{ hPa}$ 之间风速 $\geq 12\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的气流带。本文所指的低空急流是持续时间较长在 $1\sim 4\text{ km}$ 高度风速 $\geq 12\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的低空急流。低空急流一般出现在大范围稳定暴雨中。

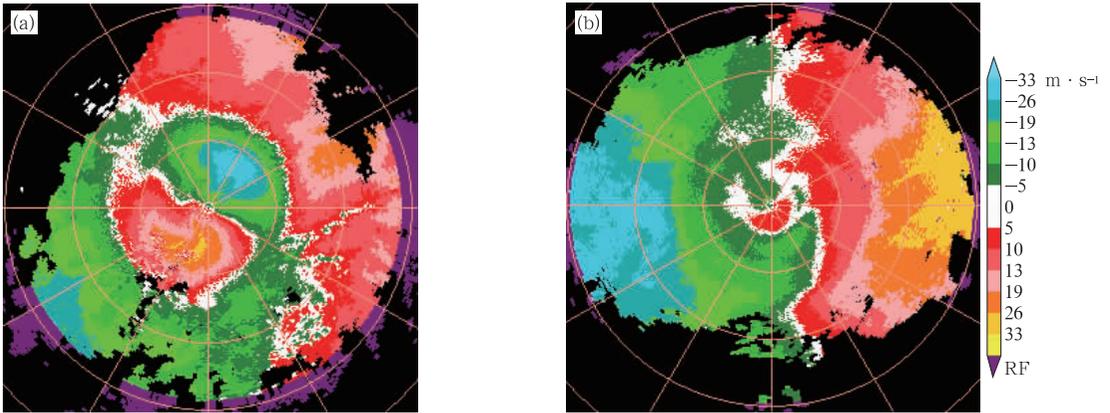


图5 石家庄新乐站(a)2005年8月16日20:01和(b)2009年8月21日18:30的 2.4° 仰角基本径向速度图
(2个距离圈距离为50 km)

Fig. 5 The base velocity at 20:01 BT 16 August 2005 (a) and at 18:30 BT 21 August 2009 (b)
(Both observed at 2.4° elevation angle by radar in Xinle)

4.2 低空急流和大范围稳定暴雨的关系

在9次大范围暴雨过程中,有2次观测到了深厚持久的低空急流。2005年8月15—17日河北省中南部地区出现64站暴雨,5站大暴雨。2004年7月11—13日,河北省中南部地区出现38站暴雨,14站大暴雨,2站特大暴雨。这两次过程暴雨以上量级站数均接近全省测站的一半,降水比较稳定,持续时间长。

这两次过程低空急流,都为东北风急流,正、负速度区呈对称分布(图5a)。急流轴稳定少动,低空急流持续时间在24h以上,急流最高达到 3 km (表3)。从两次过程来看,最早暴雨灾情都是在低空急流持续一段时间之后出现的,2004年7月11日最早暴雨灾情是在低空急流持续近1h之后出现的,

2005年8月16日最早暴雨灾情是在低空急流持续15h后出现的,因此最早暴雨灾情的时间和低空急流持续时间没有确定的关系。这两次过程暴雨雨带走向和急流轴走向一致。2004年7月11日暴雨雨带位于急流轴两侧各 20 km 范围内,2005年8月16日暴雨雨带位于急流轴左侧 125 km 范围内,暴雨落区与低空急流轴没有确定的对应关系,还要考虑其他影响系统。

为了进一步分析低空急流与降水强度的关系,应用多普勒天气雷达风廓线产品(VWP)对2005年8月16日低空急流的演变与自动站逐小时降水进行了对比分析。16日08时至17日08时,全省出现39站暴雨,4站大暴雨。在探测范围(150 km)内的有21站暴雨,主要位于石家庄、衡水、沧州、保定南部、廊坊南部、邢台北部。衡水、沧州的暴雨除了

低空急流的影响外还有 γ 中尺度辐合的影响,石家庄地区的暴雨只有低空急流的影响。石家庄的主要降水集中在 16 日白天,有 2 个强降水时段,06—10 和 15—20 时。从雷达风廓线产品(VWP)可以看出,低空急流从 16 日 00 时开始一直持续到 17 日 12 时,最低高度一直在 0.3 km,没有明显的向下脉动,低空急流的最大风速逐渐加大,高度向上伸展,厚度加大,强度逐渐加强。因此我们统计 16 日 06—22 时多普勒天气雷达风廓线每 6 min 的急流层厚度,并计算急流层的平均径向速度,与石家庄出现暴雨的 5 站的逐小时平均降水作对比分析

表 3 两次暴雨过程低空急流持续时间和暴雨灾情时间对照表

Table 3 Comparison between the duration of low-level jet and the rainstorm disaster in the two processes

	低空急流		低空急流最高高度/km	暴雨灾情时间
	起止时间	持续时间		
2004 年 7 月 11 日	11 日 10:55 至 12 日 10:52	23 h 53 min	3.0	11 日 11:41—14:15
2005 年 8 月 16 日	16 日 00:03 至 17 日 11:59	35 h 56 min	3.0	16 日 15:33—19:38

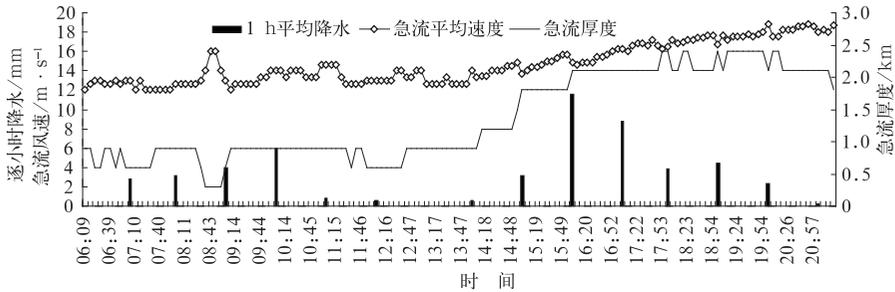


图 6 2005 年 8 月 16 日 06—22 时逐 6 min 低空急流风速、厚度和石家庄 5 站逐小时平均雨量

Fig. 6 Wind speed and depth of the low-level jet in every six minutes and the mean hourly precipitation observed by 5 stations of Shijiazhuang from 06:00 to 22:00 BT 16 August 2005

由此可见,较强的降水在低空急流持续数个小时后才开始,随着低空急流风速加强,降水明显增强,当低空急流的厚度迅速增加时,降水也迅速加强。但当低空急流达到最强时,强降水持续一段时间,已经明显减弱或停止。

以上结论是合理的,低空急流反映的是大尺度的水汽输送条件,而我们用来对比分析的暴雨仅仅是石家庄地区的,是非常小的局地范围,石家庄暴雨在低空急流持续一段时间后才出现,说明暴雨是在水汽积累的到一定程度才产生的,20 时低空急流达到最强时,石家庄降水已经停止,但沧州、衡水在 20 时以后又出现了 50 mm 以上的降水,所以局地降水

(图 6)。由图 6 可以看出,从 06—10 时急流厚度小幅波动,08—10 时急流径向速度逐渐加大,逐小时降水量逐渐加大。10—11 时,急流继续加强但逐小时降水量迅速减小。14—16 时,急流径向速度不断增大,同时急流厚度也从 1 km 迅速加大 2 km,急流明显加强,降水强度也迅速加大,逐小时降水量从 0.54 mm 急剧增加到 11.62 mm。17 时后,急流继续加强,20 时达到最强,21 时急流厚度略有减小,21 时后急流强度基本不变,直到 17 日 08 时后又开始减弱。但逐小时降水量 17 时后逐渐减小,20 时后降水明显减弱。

的停止与低空急流没有很好的对应关系。

5 高空急流

5.1 高空急流的多普勒速度特征

当在雷达显示高度范围内,存在高空急流(风速 $>20 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$),则在此急流层以下,风速随高度增加而增加,而在此急流层以上,风速随高度增加而减小,有时也存在随高度增加而增加的情况。高空急流在多普勒径向速度图上有两个正、负速度区关于显示中心对称分布(图 4b)。高空急流是大范围暴

雨和区域暴雨共有的主要速度特征之一。高空急流在9次大范围暴雨和11次区域暴雨中各有2次(见表1)。

5.2 高空急流与暴雨的关系

在4次有高空急流的暴雨过程中,两次出现了高空急流明显的向下脉动。2009年8月21日夜间石家庄出现区域性暴雨过程。降水从21日14时开始,到22日08时基本结束。暴雨集中在石家庄的中南部。从降水量最大两站(石家庄和元氏)的平均逐小时降水量来看,可以分成两个降水时段,21日14—21时、21日22时至22日08时。

在第一个降水时段,14时降水开始,然后逐渐增大,16—17时,降水迅速加大,从1.7 mm迅速增加到5.6 mm,较强降水一直持续到21时(图7)。分析雷达风廓线资料,从21日00时就已经存在深厚的高空急流(5.2~8.5 km)。16—17时高空急流从5.2 km明显向下脉动到4.3 km,与降水显著增

强对应,19:36,高空急流继续向下脉动到4 km,高空急流的底部达到最低,降水随着高空急流的向下脉动再度加强,20时的1 h降水量为6.2 mm,降水也达到最强。20:54,高空急流开始向上脉动,降水也明显减弱,22时1 h降水量仅为1.3 mm(图7)。

在第二个降水时段,22—23时降水逐渐加大,从23时到22日00时降水明显加大,1 h降水量从2.2 mm增加到4.6 mm,较强降水一直持续到05时,之后降水明显减弱。21时后,高空急流向上脉动,23:24,高空急流底部上升到了6.1 km,23:30开始向下脉动,24日00时,高空急流底部下降到5.2 km,与降水明显加大对应,之后高空急流呈波动式向下脉动,03时,高空急流底部又下降到了4.3 km,00—05时,强降水持续,04时达到最强,与高空急流向下脉动对应。之后,随着高空急流向上脉动减弱,降水也逐渐减小(图7)。

因此,高空急流的向下脉动与降水明显加强有很好的对应关系。

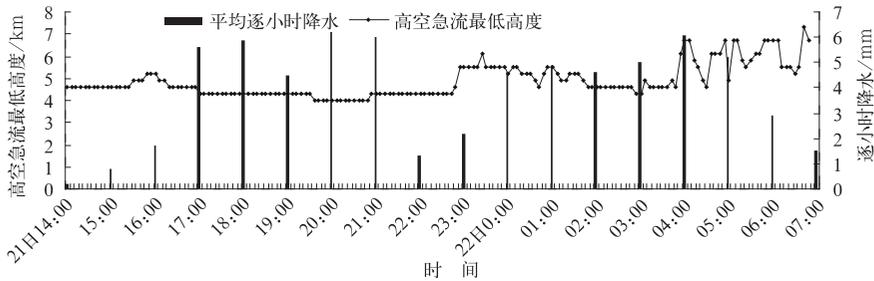


图7 2009年8月21日14时至22日07时高空急流最低高度和两站平均逐小时降水量

Fig. 7 The height of upper-level jet bottom and the mean hourly precipitation observed by two stations from 14:00 BT 21 to 07:00 BT 22 August 2009

6 结论

(1) β 中尺度辐合线是三类暴雨共有的主要速度特征和常见的中尺度影响系统,占总数44%。 β 中尺度辐合线出现的时间比暴雨灾情有一定的提前量,具有预报意义。

(2) β 中尺度辐合也是三类暴雨共有的速度特征和主要的中尺度影响系统,占总数3%。从两个 β 中尺度辐合的形成时间来看, β 中尺度辐合比暴雨灾情最少提前24 min,具有一定的预报意义。

(3) γ 中尺度辐合是三类暴雨最常见的速度特

征,是局地暴雨的主要中小尺度影响系统。一个 γ 中尺度辐合只能造成短时暴雨,多个 γ 中尺度辐合形成列车效应是造成局地暴雨的主要原因。列车效应的长时间持续是产生局地暴雨或大暴雨的关键。从统计结果看, γ 中尺度辐合出现的时间比短时暴雨灾情报的时间提前19~68 min。第二个 γ 中尺度辐合的出现时间,和暴雨灾情报时间对比,提前了9~52 min。具有一定的预报意义。

(4) 深厚持久的低空急流是大范围暴雨的主要速度特征之一。并不是每次大范围暴雨都能观测到深厚持久的低空急流,但是观测到深厚持久的低空急流出现大范围暴雨的可能性非常大。较强的降水

在低空急流持续数个小时后才开始,随着低空急流风速和厚度加强,降水明显增强。但局地降水停止和低空急流减弱没有很好的对应关系。

(5) 高空急流是大范围暴雨和区域性暴雨的主要速度特征之一。高空急流的向下脉动与降水明显加强有很好的对应关系。

参考文献

- 蔡晓云,焦热光,卞素芬,等. 2001. 多普勒速度图暴雨判据和短时报工具研究. 气象, 27(7): 13-15.
- 谌芸,孙军,徐君,等. 2012. 北京 721 特大暴雨极端性分析及思考(一)观测分析及思考. 气象, 38(10): 1255-1266.
- 方翀,毛东艳,张小雯,等. 2012. 2012 年 7 月 21 日北京地区特大暴雨中尺度对流条件和特征初步分析. 气象, 38(10): 1278-1287.
- 黄小玉,陈媛,顾松山,等. 2006. 湖南地区暴雨的分类及回波特征分析. 南京气象学院学报, 29(5): 641-643.
- 黄小玉,姚蓉,叶成志,等. 2008. 梅雨锋引发的“03. 7”特大暴雨雷达回波分析. 气象, 34(8): 45-50.
- 柯文华,俞小鼎,林伟旺,等. 2012. 一次由“列车效应”造成的致洪暴雨分析研究. 气象, 38(5): 552-560.
- 廖晓农,魏东,石增云,等. 2011. 连续少雨背景下北京暴雨的若干特征. 高原气象, 30(3): 749-759.
- 苗爱梅,武捷,赵海英,等. 2010. 低空急流与山西大暴雨的统计关系及流型配置. 高原气象, 29(4): 939-946.
- 祁丽燕,农孟松,王冀. 2012. 2009 年 7 月 2—4 日广西暴雨过程的中尺度特征. 气象, 38(4): 438-447.
- 孙军,谌芸,杨舒楠,等. 2012. 北京 721 特大暴雨极端性分析及思考(二)极端性降水成因初探及思考. 气象, 38(10): 1267-1277.
- 王啸华,吴海英,唐红昇,等. 2012. 2009 年 7 月 7 日南京短时暴雨的中尺度特征分析. 气象, 38(9): 1060-1069.
- 吴海英,曾明剑,尹东平,等. 2010. 一次苏皖特大暴雨过程中边界层急流结构演变特征和作用分析. 高原气象, 29(6): 1431-1440.
- 吴庆梅,杨波,王国荣,等. 2012. 北京地形和热岛效应对一次 β 中尺度暴雨的作用. 气象, 38(2): 174-181.
- 伍志方,曾沁,胡胜,等. 2009. 珠江三角洲大暴雨的多普勒特征及形成机制. 自然灾害学报, 18(5): 119-126.
- 夏文梅,王凌震,张亚萍,等. 2003. 低空急流的单多普勒速度特征. 南京气象学院学报, 26(4): 489-495.
- 夏文梅,张亚萍,汤达章,等. 2002. 暴雨多普勒天气雷达资料的分析. 南京气象学院学报, 25(6): 787-794.
- 肖艳姣,张家国,万蓉,等. 2005. 切变线暴雨中尺度系统的多普勒雷达资料分析. 气象, 31(2): 35-37.
- 徐八林,刘黎平,王改利,等. 2010. 低纬高原中- γ 尺度微单体暴雨个例的观测分析. 高原气象, 29(3): 778-785.
- 俞小鼎. 2012. 2012 年 7 月 21 日北京特大暴雨成因分析. 气象, 38(11): 1313-1329.
- 张家国,王珏,黄治勇,等. 2011. 几类区域性暴雨雷达回波模型. 气象, 37(3): 285-290.
- 张家国,岳阳,牛淑贞,等. 2010. 一次长历时特大暴雨多普勒雷达中尺度分析. 气象, 36(4): 21-26.
- 张京英,漆梁波,王庆华. 2005. 用雷达风廓线产品分析一次暴雨与高低空急流的关系. 气象, 31(2): 41-44.
- 张沛源,陈荣林. 1995. 多普勒速度图上的暴雨判据研究. 应用气象学报, 6(3): 373-377.
- 周雨华,黄小玉,黎祖贤,等. 2006. 副高边缘暴雨的多普勒雷达回波特征. 气象, 32(1): 12-16.