

中尺度涡旋的雷达探测和分析*

朱小燕 薛秋芳

(中国气象科学研究院,北京 100081)

摘 要

应用单部多普勒天气雷达观测资料对出现在京津冀地区的中尺度涡旋进行了分析,分析结果表明:发展较强的中小尺度天气系统往往与风场的旋转或辐合辐散有关,气旋性涡度场对积云对流活动有明显的组织和增强作用,是降雨增强的一种判据。

关键词:中尺度涡旋 径向风场 涡度

引 言

美国中部龙卷是造成该地区最严重损失的一种自然灾害,每年报告的龙卷多达 700~1100 个。为了能提前预报这种灾害性天气来临,美国气象局在多普勒天气雷达速度图上制定了龙卷识别判据^[1],即龙卷涡旋标志(Tornado Vortex Signature(TVS)),大大提高了龙卷临近预报准确率。京津冀地处太行山东麓和燕山南坡,盛夏暴雨天气有很强的局地性,尤以对流性暴雨居多^[2],这种暴雨范围小、强度大,突发性强,常规探测工具难以捕捉。在多普勒速度图上识别暴雨,除了“逆风区”概念外^[3],中尺度涡旋也应是识别暴雨天气的一个重要标志。

1 平面位置显示(PPI)图中估算散度和涡度的简易方法

多普勒天气雷达不但能提供降水的强度信息,还可以提供云体内部风场的分布和结构信息,但多普勒雷达系统是从返回信号的频率漂移,导出目标物相对于雷达运动的径向速度,即多普勒天气雷达探测到的是多普勒速度,是风速在雷达波束上的投影,与一般意义上风向的概念不同。

中尺度涡旋是与强雷暴上升气流相联系的旋转风场(涡流)。强烈发展的中尺度涡旋是产生龙卷的母环流。Donaldson 等人(1979)^[4]发现 5 年时间里观测到 37 次中尺度气旋,几乎全部(95%)都导致了地面灾害,有 23 次与龙卷有关,12 次与无龙卷的风灾和大冰雹有关。Zhang Pengfei 等人(1991)^[5]指出,中尺度涡旋在多普勒天气雷达速度图上的典型标志是一对距离近、符号相反且闭合的速度等值线。值得注意的是,这一对中心沿方位排成一线时说明旋转,沿距离排成一线时表明辐合(散)。

* 本文由中国气象科学研究院应用研究和成果转化基金项目提供资助。

2001-11-07 收到,2003-10-22 收到再改稿。

气象学中涡度是速度场 V 的旋度,在笛卡尔坐标中,散度和涡度可在二维流场中表示为

$$\text{散度} \quad \nabla \cdot V = \frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_y}{\partial y} \quad (1)$$

$$\text{涡度} \quad \nabla \times V = \frac{\partial v_x}{\partial y} - \frac{\partial v_y}{\partial x} \quad (2)$$

在雷达探测中,以方位角、高度和距离三要素表示一目标物的位置,为分析雷达探测的结果,用极坐标比笛卡尔坐标方便,因此在极坐标中,散度和涡度表达式为:

$$\text{散度} \quad \nabla \cdot V = \frac{1}{r} \frac{\partial (rv_r)}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial v_\theta}{\partial \theta} \quad (3)$$

$$\text{涡度} \quad \nabla \times V = \frac{1}{r} \frac{\partial (rv_\theta)}{\partial r} - \frac{1}{r} \frac{\partial v_r}{\partial \theta} \quad (4)$$

根据方程式(3)和(4),计算散度和涡度时需两个速度分量:径向速度 v_r 和角速度(切向速度) v_θ ,对单部多普勒天气雷达来说,方程(3)和(4)的右边4项只能得到两项: $\partial (rv_r)/\partial r$ 和 $(1/r) \cdot \partial v_r/\partial \theta$ 。

为了能从单部多普勒天气雷达计算涡旋的散度和涡度的量值,必须作某种假定, Brown R A, Wood V T(1983)^[6]假定中尺度气旋满足兰金涡旋条件。在轴对称的坐标系中,其核区内涡度和水平辐散定义如下:

$$\nabla \times V = \frac{2v_t}{R} \quad (5)$$

$$\nabla \cdot V = \frac{2v_r}{R} \quad (6)$$

R 为核区半径,核区外估算时 $\nabla \times V = 0$, $\nabla \cdot V = 0$

运用径向分布中涡旋出现的峰值来估算涡旋的平均峰值

$$\overline{V_d} = \frac{V(+)-V(-)}{2} \quad (7)$$

此处 $V(+)$ 为大的正(小的负)峰值,而 $V(-)$ 为大的负(小的正)峰值。将方程(7)代入式(5)和(6)加上适当的三角函数,则有:

$$\nabla \times V = \frac{2\overline{V_d} \sin \alpha}{R} \quad (8)$$

$$\nabla \cdot V = \frac{2\overline{V_d} \cos \alpha}{R} \quad (9)$$

此处 α 为正、负中心连线与雷达径向方向的夹角,假定正、负中心连线在雷达径向方向的左侧为正,右侧为负,则当 $\alpha = 0^\circ$ 时,辐合 ($\nabla \cdot V < 0$) 是峰值,当 $\alpha = 180^\circ$ 时, ($\nabla \cdot V > 0$), 辐散是最大值;当 $\alpha = 90^\circ$ 时,气旋性涡度 ($\nabla \times V > 0$) 是最大值,当 $\alpha = 270^\circ$ 时,反气旋性涡度达到峰值。

2 京津冀地区中尺度涡旋的特点

利用式(8)和(9),我们对1994年6月26日,1996年7月20日、23日发生在京津冀地区的三次中尺度涡旋的活动进行计算并对其中一次过程进行重点分析,这三次涡旋的

活动都造成局地暴雨或大雨。计算结果如表 1 所示,1994 年 6 月 26 日例子中涡度量值较大,辐合较小,说明该涡旋处于成熟期,涡旋旋转分量较大。1997 年 7 月 20 日有较密集的探测数据,涡旋发展前期 20 日凌晨 04:53(北京时,下同)以辐合为主,辐合和涡度的量值之比达 4:1;到 05:30 旋转分量迅速加大,此时辐合和涡度的量值之比恰恰相反,为 1:4,构成气旋式辐合流场和气流汇区;到减弱阶段,两者的量值都有明显的减小,尺度加大。1996 年 7 月 23 日的例子为涡旋衰减时涡度、散度分布情况,此时虽然还有一定的旋转分量,但已出现较大辐散分量,为气旋性流出风场。在雷达回波强度图(图略)上,原在涡旋位置上的强降水回波已很快减弱,回波强度从 50~55 dBz 降到 30~35 dBz,在不到半小时时间内减小了 20 dBz。

表 1 单部多普勒雷达推算的涡度和散度值

		尺度 (km)	V_d ($m \cdot s^{-1}$)	R (km)	$\alpha(^{\circ})$	$\nabla \times V$ (s^{-1})	$\nabla \cdot V$ (s^{-1})
1994-6-26	14:30:00	13.6	15.2	6.8	80	4.4×10^{-3}	-0.8×10^{-3}
1996-7-20	4:53:02	12.3	13	6.25	15	1.1×10^{-3}	-4.0×10^{-3}
	5:30:44	18	13	9	75	2.8×10^{-3}	-0.7×10^{-3}
	5:50:43	25	10.5	12.5	80	1.7×10^{-3}	-0.3×10^{-3}
1996-7-23	20:54:55	16	16.6	8	125	3.4×10^{-3}	2.4×10^{-3}

计算结果与美国的龙卷涡旋的涡度值进行对比,可差一个量级。美国多普勒雷达监测到的是强风暴系统,数量上为 10^{-2} ,在我们计算的例子中为 10^{-3} ,美国发生的中尺度涡旋是强涡旋系统,绝大多数都产生龙卷风暴。水平尺度美国的涡旋约为 2~15 km,我们的例子是 12.3~25 km,尤其在减弱时,其水平尺度明显增大。应用美国造成强对流天气的中尺度涡旋的参数来判别出现在我国的暴雨中的中尺度涡旋活动,往往在自动识别的软件系统中予以遗漏。

2.1 1996 年 7 月 20 日降水特点和雷达回波分析

对流云或雷暴是由低空中尺度切变线或辐合线触发生成的,尤其是当中尺度切变线上的辐合较强时或有中尺度气旋性涡旋生成时,对流的发展最快^[7]。1996 年 7 月 20 日的中尺度涡旋活动其生命史也就近 1 h,但它使降水区的雨势加强,这从降水量的分布和雷达回波演变图可说明。本次过程主要降水时段集中于 20 日 02:00~08:00。图 1(彩图)为 1996 年 6 月 20 日 02:00~08:00 6 h 雨量分布图。6 h 降水量大于 25 mm 的地区有:河北丰宁(31 mm)、兴隆(61 mm)、涿县(54 mm)、易县(32 mm)、廊坊(36 mm)和三河(77 mm),天津蓟县(39 mm)及北京地区的古北口(49 mm)和北京市区(37 mm),其中以河北省三河地区 6 h 雨量最大。

从雷达回波的连续演变分析可知,本次降水过程以混合云降水为主,出现暴雨的地区是局地对流云发展的地区。在 20 日 02:00 到 08:00 短时降水过程中出现对流单体的加强及中尺度辐合带的生成、发展过程。对流系统的发展高度达 13 km。04:53 多普勒速度图上(图 2 彩图),测站的东北东方向 50 km 范围内可见气流的辐合区,即一对距离近、符号相反且闭合的速度等值线几乎与雷达径向方向排成一线。到 05:30 这对速度等值线加强,并围绕中心连线向逆时针方向旋转,造成较强烈的上升运动;到 05:50 速度减小,尺度增大,从 12.5 km 增加到 25 km,旋转和辐合量都显著减小,涡旋显著减弱。其生命

史约 1 h。多普勒强度图上可见,中尺度涡旋附近是强回波区,回波强度达 50 ~ 55 dBz。主要暴雨区在中涡旋附近。由此可见,中尺度流场对对流的发展起很重要的作用。

2.2 VAD 风廓线分析

应用 1996 年 7 月 20 日 02:33 ~ 05:50 CAMS 的多普勒雷达资料进行 VAD 反演,得到垂直风随时间的演变图(图 3)。由图可见,在 1.25 km 以上到 5.75 km 均为一致的西南风,2.25 km 高度以上风速较大,700 hPa 到 500 hPa 之间存在一支风速达 16 m/s 的西南风急流。风切变、辐合和旋转都发生在 1.25 km 以下,近地面层 0.25 km 高度从 02:53 到 03:31 主要以偏东风为主,到 03:54 风向开始逆转,到 04:05 成偏西风,04:54 又顺转成东北风。由此看来尽管大范围的基本气流是西南风,但因近地面层风向的变化及低层的风切变,也能产生扰动,形成中尺度涡旋。但它是一浅薄的系统,伸展的高度较低,因而自动监测比较困难。从系统移动过程来看,该中气旋受 850 hPa 以上偏西气流的引导,向东北东方向移动。

2.3 中尺度涡旋形成的条件和物理原因

这次过程是受东蒙冷涡的影响。在 7 月 19 日 20:00 500 hPa 图上,冷涡中心约位于 50°N,118°E 的中国、蒙古和前苏联三国交界处附近,冷涡后部的冷空气沿 110°E 南下影响到河套东部地区,850 hPa 西南暖湿气流向北伸展到 40°N 以北,地面图上华北大部地区受倒槽控制。在冷暖空气的共同作用下,京津冀地区从 19 日傍晚开始到夜间普降大到暴雨。20 日凌晨中国气象科学研究院雷达测站的东北到东部降大到暴雨,东北—西南向的降雨回波带位于西南暖湿气流中。

本次过程中雷达监测到的中尺度涡旋是在暖区中生成的。它与美国观测到的干锋不同,因而高度较低,辐合也不是很强,但能使降水增幅。冷涡后部的冷空气补充南下,也对降水过程起到一定作用,因这种高低层热量平流的差异造成位势不稳定层结,低空风的辐合和垂直风切变启动对流发展,小尺度风场的旋转可促使暴雨增强,由此表明中尺度的辐合和旋转对积云降水的发展起到很好的促进作用。

3 小 结

(1) 本文用单部多普勒天气雷达观测值计算涡度和散度的方法,对一些中小尺度天气系统,在兰金涡旋的假设下,可以较快的估算其量值,这对判断系统的发生、发展和暴雨的增强有一定帮助。

(2) 在较大范围降水区中活动的中尺度涡旋与美国干锋条件下生成的龙卷涡旋有较大的差异,前者强度弱,尺度较大(10 ~ 25 km),是低层涡旋(高度 1 ~ 2 km),自动监测系统不易识别,但往往造成局地暴雨容易漏报,需充分利用径向风分布图进行识别和判断。

(3) 利用高密度观测的多普勒天气雷达,密切监视较大范围降水区域中中小尺度系统的活动,对局地暴雨的落区预报有很大帮助。

致谢: 本文完成过程中,葛润生、朱蓉同志给予了具体帮助,在此深表谢意。

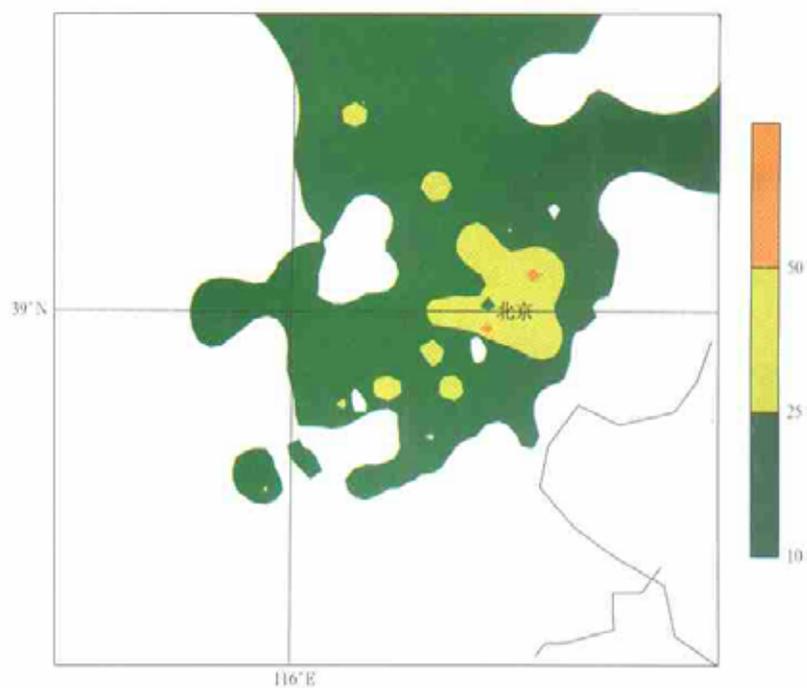


图1 1996年7月20日02:00-08:00 6h雨量图

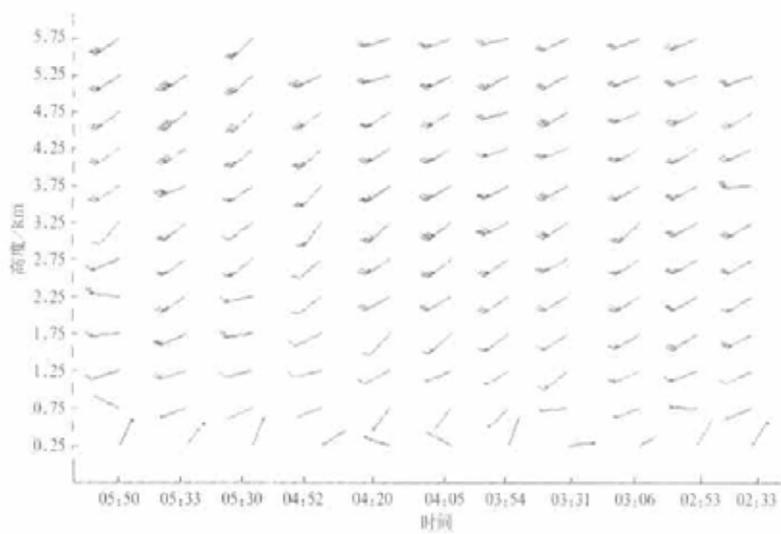


图3 1996年7月20日02:33~05:50 CAMS雷达VAD垂直风廓线

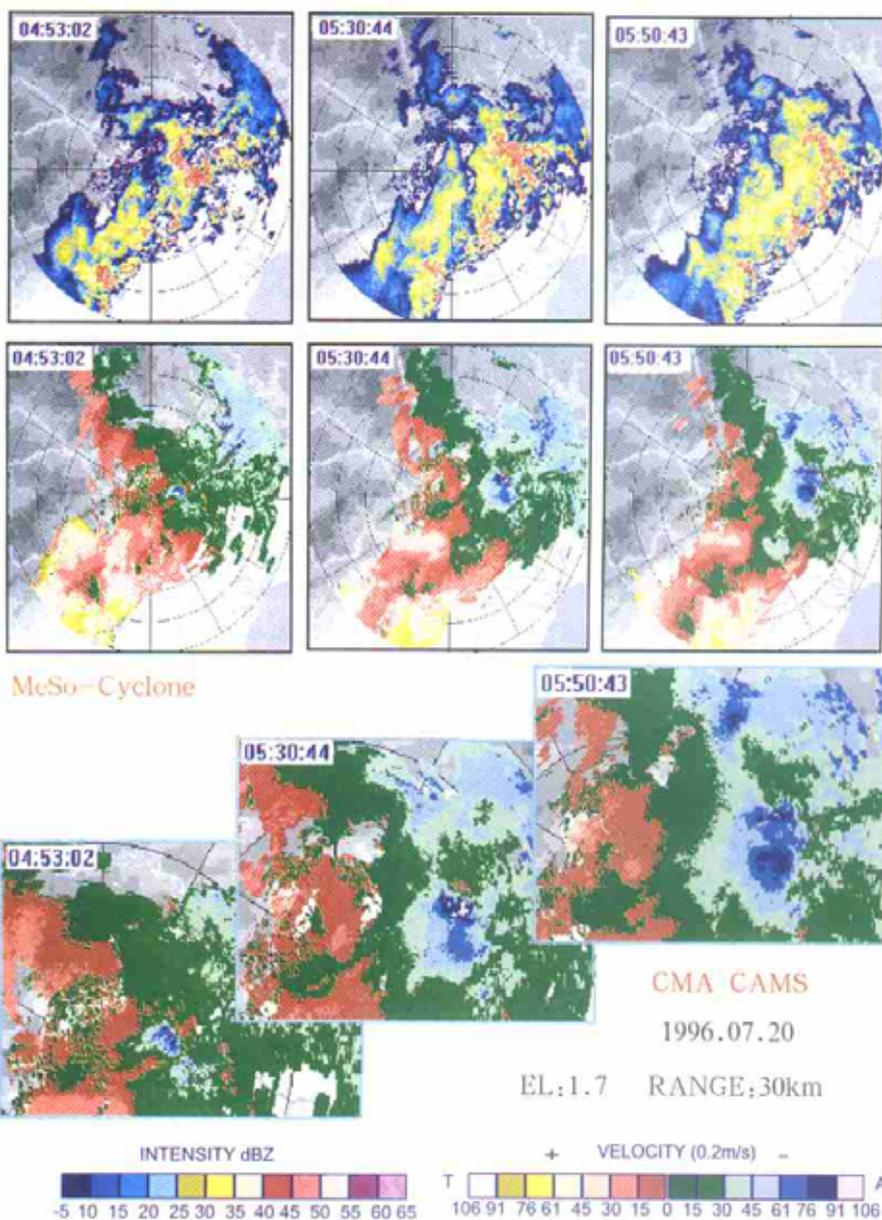


图2 1996年7月20日04:20~05:30雷达图像

参考文献

- 1 Donaldson R J Jr. Vortex signature recognition by a Doppler radar. *J. Appl. Meteor.*, 1970, **9**: 661 ~ 670.
- 2 王如云,程涛. 京津冀局地暴雨短时预报初探. 中尺度气象文集. 北京:气象出版社,1993. 184 ~ 188.
- 3 张沛源,陈荣林. 多普勒速度图上的暴雨判据研究. 应用气象学报,1995, **6**(3): 373 ~ 378.
- 4 Donaldson R J, Burgess D W. 下一代天气雷达. 许梓秀译. 气象科学研究院. 1985. 6 ~ 31.
- 5 Zhang Pengfei, Ge Runsheng, Liu Enqing. A technique to recognize and estimate severe storm by using single Doppler weather radar. *ACTA Meteorological Sinica*, 1991, **5**(3): 274 ~ 284.
- 6 Brown R A, Wood V T. Improved severe storm warnings using Doppler radar. *National Weather Digest*, 1983, **8**(3): 19 ~ 27.
- 7 陶诗言,等. 中小尺度天气系统与暴雨的关系. 中国之暴雨,北京:科学出版社,1980. 66 ~ 90.

RADAR OBSERVATION AND ANALYSIS OF MESO SCALE VORTEX

Zhu Xiaoyan Xue Qiufang

(*Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081*)

Abstract

Using single Doppler weather radar about the radial velocity information, a simple method for estimating the divergence and vorticity is presented. The vortexes are analyzed by this method in Beijing-Tianjin-Hebei area. The result indicates that the formation of the strong meso-scale weather system is related to turn or convergence and divergence of wind field. The vorticity of cyclone is a signature recognition of heavy rain and very useful for the cumulus convection.

Key words: Meso-scale vortex Velocity image Vorticity