

可能降雹多普勒雷达产品特征指标分析

王福侠¹ 张守保² 裴宇杰¹ 刘晓霞¹

(1 河北省气象台, 2 河北省生态环境监测实验室, 石家庄 050021)

摘要 利用位于河北新乐的 CINRAD-SA 多普勒天气雷达产品, 分析了河北中南部地区 2004 年的 8 次冰雹过程, 总结了一些冰雹天气的多普勒天气雷达回波特征指标。当回波强度大于等于 50 dBz, 回波顶高大于等于 10 km, 垂直累积液态含水量大于等于 35 kg/m³ 时容易降雹, 垂直累积液态含水量越大, 冰雹直径越大。回波发展初期 2~3 体扫内, 垂直累积液态含水量迅速增大, 一般每个体扫增加 10~30 kg/m³, 这是冰雹独特的特征。冰雹指数为实心正三角时, 大多有降雹。

关键词 冰雹 多普勒雷达 回波特征指标

引言

本次研究主要对回波强度(19、20 号产品 4 个仰角)、回波顶高(41 号产品)、速度回波(26、27 号产品 4 个仰角)、垂直累积液态含水量(57 号产品)、组合反射率(37 号产品)、冰雹指数(59 号产品)、中气旋(60 号产品)、风廓线(48 号产品)共 15 种产品的演变进行了分析。

1 天气形势与灾情简介

1.1 天气形势

河北省冰雹天气大多是由冷涡造成的, 冷涡直接影响、间接影响共占 90%, 西北气流、短波槽影响的共占 10%^[1]。2004 年河北中南部出 8 次冰雹过程: 5 月 17 日是槽后西北气流型, 6 月 20 日、6 月 26 日、7 月 9 日都是涡后冷空气影响, 6 月 23 日、6 月 24 日、7 月 4 日是冷涡直接影响, 7 月 23 日是副高外围影响。与往年统计结果基本相同。

1.2 灾情情况

2004 年 8 次强对流天气过程有 7 次出现在午后到傍晚, 只有 7 月 9 日过程发生在后半夜。8 次强对流天气过程中 5 次(6 月 23 日、6 月 24 日、6 月 26 日、7 月 9 日、7 月 23 日)过程同时出现了冰雹、大风、短时暴雨 3 种灾情, 其他 3 次(5 月 17 日、6 月

20 日、7 月 4 日)过程没有短时暴雨, 只有冰雹大风。

6 月 20 日 3 站降雹, 峰峰、磁县冰雹直径达 40 mm, 媒体报道有 80 mm 的罕见大冰雹, 是 2004 年最强的冰雹过程。6 月 24 日 6 站出现冰雹, 直径分别为 15、12、5、30、10、28 mm, 同时 5 站出现短时暴雨, 是 2004 年冰雹和短时暴雨出现最多的一次强对流天气。

6 月 26 日和 7 月 9 日都是局地对流天气过程。6 月 26 日有 4 站降雹, 冰雹直径为 5~12 mm。7 月 9 日 02:17 在石家庄出现了直径 18 mm 的冰雹, 同时出现了短时暴雨。在河北省降雹一般出现在午后到傍晚, 后半夜降雹的几率非常小(图 1)。

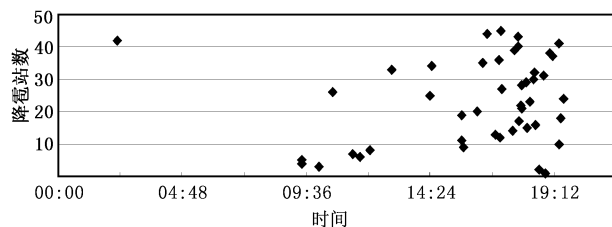


图 1 2004 年河北中南部地区 45 站降雹的日变化

7 月 4 日有 2 站降雹, 冰雹直径分别为 7、8 mm。是 2004 年夏季出现大风(43 站)台站最多的一次对流天气过程。

7 月 23 日是一次以短时暴雨和大风为主的天气过程, 只有高阳站观测到了直径 4 mm 的冰雹, 据

群众反映在石家庄东郊出现直径为 20 mm 的冰雹。5 月 17 日 2 站降雹,直径 7 mm。6 月 23 日有 3 站降雹,3 站冰雹直径为 5~8 mm。

2 可能降雹的多普勒天气雷达回波特征分析

在这 8 次冰雹天气过程中,从基本反射率图上看,主要回波共 13 块,本文主要分析了这 13 块回波的演变情况。

2.1 回波形状、回波尺度、回波移速

这 13 块回波中,大部分都是块状,只有 5 月 17 日和 7 月 23 日回波呈带状。统计回波尺度 35 dBz 以上回波的范围,成熟时期平均尺度一般在 25 km×35 km,6 月 24 日回波尺度最大 35 km×45 km。在发展初期,一般移动速度不大,发展较成熟时,移速加大,不同回波移动速度相差较大,一般在 30~60 km/h。

2.2 回波强度(基本反射率 1.5°仰角)、回波顶高

回波先在中空生成,然后同时向上、向下迅速发展。

回波强度一般在 50~65 dBz,最大达到了 70 dBz,回波顶高(指探测到 18 dBz 以上反射率因子时,以最高仰角为基础的回波顶高度)^[2]一般都在 10~14 km 之间,最高可达 19 km,详见表 1。当回波强度 $Z \geq 50$ dBz,回波顶高 $H \geq 10$ km 时,可能产生冰雹。根据石家庄 713 雷达总结的降雹指标,当回波强度 $Z > 50$ dBz,回波顶高为 10~15 km 时,容易产生降雹。两者相比,差别不大。

6 月 20 日最大冰雹直径 40 mm,回波顶高都在 15 km 以上,最高达 19 km,6 月 24 日最大冰雹直径 30 mm,回波顶高一直在 14~15 km,7 月 23 日最大冰雹直径 20 mm,回波顶高都在 15~17 km。其他几次冰雹直径都在 12 mm 以下,最高回波顶也都在 15 km 以下。由此可见,回波顶高超过 14 km 时,有可能产生大冰雹。

表 1 13 个单体回波的回波强度、回波顶高、垂直累积液态含水量的平均和最大值

日期	影响系统	回波强度/dBz(1.5°仰角)		回波顶高/km		垂直累积液态含水量/(kg·m ⁻²)	
		平均	最大	平均	最大	平均	最大
6 月 23 日	冷涡	60~65	65	11~12	14	40~65	70
6 月 24 日	冷涡	55~60	65	10~14	14	45~55	60
		60~70	70	12~15	15	60~70	70
7 月 4 日	冷涡	55~60	65	12~14	14	50~65	70
		60~65	65	12~14	14	55~65	65
6 月 20 日	涡后冷空气	55~60	60	12~14	15	55~65	70
		60~65	65	15~18	19	70	70
6 月 26 日	涡后冷空气	55~60	60	12~14	14	45~60	65
		55~60	60	11~14	14	45~60	65
		50~65	65	12~15	15	50~60	70
7 月 9 日	涡后冷空气	55~65	65	11~12	12	45~55	65
5 月 17 日	横槽	50~55	60	11~12	12	35~60	60
7 月 23 日	副高外围	55~60	60	15~17	17	55~70	70

2.3 垂直累积液态含水量

回波特征分析表明,冰雹天气的垂直累积液态含水量可以达到很高,降雹时一般在 45~65 kg/m² 之间,最大可达 70 kg/m²(表 1),且高值维持时间也很长,图 2 给出了 8 块回波的垂直累积液态含水量的演变情况。当垂直累积液态含水量大于等于 35

kg/m² 时就可能产生降雹。

在业务应用中,发现垂直累积液态含水量是冰雹预报中一个有价值的产品。分析 2004 年单纯雷雨、短时暴雨过程的回波特征发现,单纯雷雨的垂直累积液态含水量很低,一般在 1~25 kg/m²,也有少

数在 30 kg/m^2 , 极个别达到了 70 kg/m^2 (图略), 虽然测站没有冰雹记录, 但产品识别此回波为冰雹云。短时暴雨垂直累积液态含水量比单纯雷雨要大, 比冰雹要小, 一般在 $10\sim35\text{ kg/m}^2$, 少数在 40 kg/m^2 以上 (图略), 但维持时间只有 1、2 个体扫, 也有极个别达到了 70 kg/m^2 , 虽然测站没有冰雹记录, 但产品识别此回波为冰雹云。冰雹天气的垂直累积液态含水量明显比雷雨、短时暴雨的垂直累积液态含水量偏高, 且高值维持时间也很长。利用这一特征可以区别冰雹和短时暴雨。

在分析冰雹回波时, 还发现在冰雹发展初期的 2~4 个体扫垂直累积液态含水量呈跳跃性增长^[3], 相邻两个体扫增长 $15\sim35\text{ kg/m}^2$ (图 2), 而单纯雷雨回波发展中是逐渐增长。利用这一特征, 结合其他产品可以提前发布冰雹的临近预报。

为了研究冰雹大小及降雹范围与垂直累积液态含水量的高低是否存在正比关系, 对比了只有降雹没有短时暴雨的 1 次大冰雹过程 (6 月 20 日) 和 2 次小冰雹过程 (7 月 4 日和 5 月 17 日) 的垂直累积

液态含水量。6 月 20 日, 3 站降雹, 武安冰雹直径 8 mm, 而峰峰、磁县的冰雹直径高达 40 mm, 垂直累积液态含水量约 1 h 24 min (14 个体扫) 在 50 kg/m^2 以上, 稳定在 70 kg/m^2 长达 1 h (10 个体扫) (图 2)。7 月 4 日井陉、曲阳 2 站先后出现直径 7 mm 和 8 mm 冰雹, 垂直累积液态含水量维持在 $50\sim55\text{ kg/m}^2$ 约 90 min (15 个体扫), 中间有两个体扫升到了 60、70 kg/m^2 (图 2)。5 月 17 日垂直累积液态含水量比较低也不稳定, 一般在 50 kg/m^2 以下 (图 2), 仅完县 1 站降雹, 直径为 7 mm。可以看出垂直累积液态含水量值越大, 高垂直累积液态含水量维持时间越长, 冰雹直径越大, 降雹范围越大。

冰雹的大小和降雹范围与回波强度及回波顶高也有较好的对应关系。把 6 月 20 日和 6 月 24 日的大冰雹与 5 月 17 日的小冰雹做了对比。发现 6 月 20 日和 6 月 24 日大冰雹的回波强度明显大于 5 月 17 日和 7 月 4 日小冰雹的回波强度, 回波顶高也是大冰雹的明显高于小冰雹的 (图 3)。

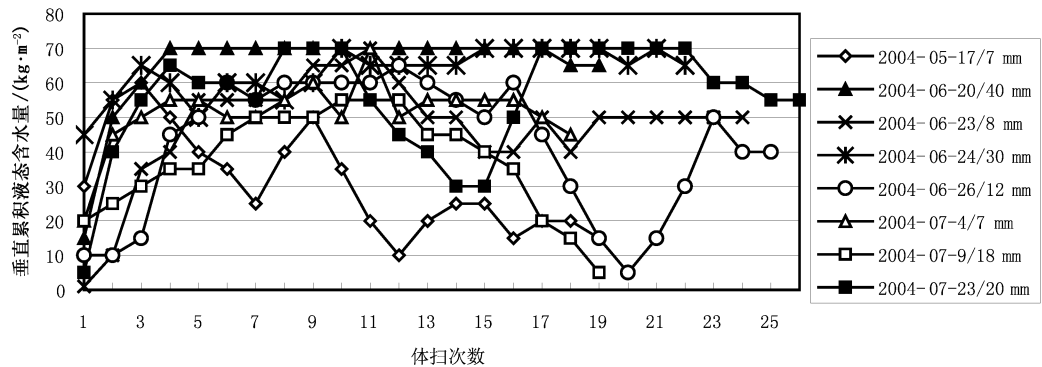


图 2 河北省 2004 年 8 站冰雹的垂直累积液态含水量演变曲线
(2004-05-17/7 mm 表示 2004 年 5 月 17 日测站最大冰雹直径 7 mm, 其余类同)

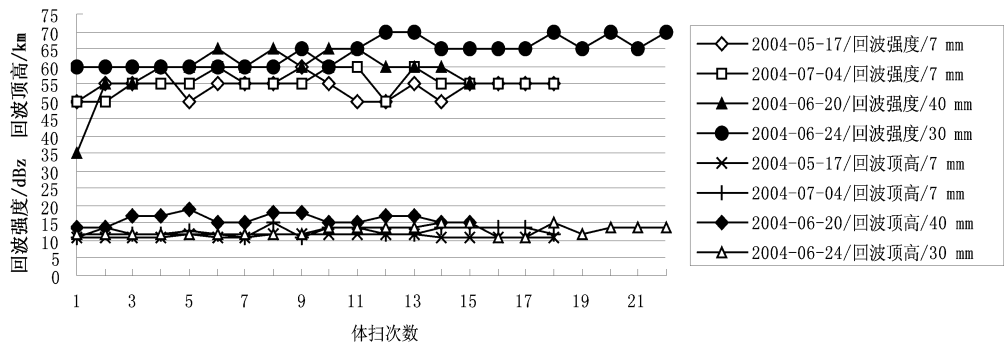


图 3 2004 年河北省 4 站冰雹的回波强度和回波顶高演变曲线

由此可见,垂直累积液态含水量越大、回波强度越强、回波顶越高,高值维持时间越长,冰雹直径越大,降雹范围越大。由于研究个例较少,以上结论还有待进一步验证。

2.4 三体散射

三体散射是由于雷达能量在强反射率因子能量区(回波很强)向前散射造成的异常回波^[2]。在6月24日17:26(图略)到17:44(4个体扫)观测到了三体散射,持续了18 min,18:10~18:16(2个体扫)又观测到了三体散射,持续了6 min。测站最大冰雹直径30 mm,媒体报道有80 mm。观测时出现三体散射现象对预报员来说非常容易识别,而观测到三体散射可以肯定有大冰雹^[4]。当回波强度高于65 dBz时,要注意观测三体散射回波。

2.5 冰雹指数

冰雹指数是一种警报产品,系统判断某地可能降雹用空心正三角形标出,系统认为某地肯定降雹用实心正三角标出。将2004年夏天8次冰雹过程的冰雹指数与实况对比,当实况有降雹时,冰雹指数多显示为实心,当冰雹指数为空心时,实况多没有降雹记录。这8次冰雹过程的冰雹指数经常是连续多个个体扫显示为实心,实况经常没有观测到降雹,空报较多。但也有实况观测到降雹而冰雹指数没有任何警报的情况。这8次冰雹过程中,在20站中3站漏报,漏报率为13%,漏报的3站冰雹相应的回波强度、回波顶高、垂直累积液态含水量都很高,漏报原因待查。我们认为,当冰雹指数连续几个个体扫为实心时,降雹的可能性还是很大的,值班时一定注意。综合考虑回波强度、顶高、垂直累积液态含水量、风速辐合、中气旋、散体散射等产品判断出现降雹的可能性,效果会更好。

2.6 径向速度(1.5°仰角)

13块回波对应的速度图上(图略),2块回波对应的速度图上速度很小,分辨不出正、负速度区。7块回波速度图上有很强的辐合,1块回波有辐合但不强,3块回波速度图上只有正速度或只有负速度,速度值很大,甚至出现速度模糊。对于中小尺度的正负速度对,一定要密切关注它的发展演变情况,中气旋形成之前首先观测到的是中小尺度的正负速度对,如果观测到中小尺度的正负速度对,可能将有剧烈灾害性天气发生。

2.7 中气旋

与冰雹指数类似,当系统认定某地有中气旋形成时,用圆圈标出。2004年6月20日和6月24日都发展成超级单体风暴,都观测到中气旋,这两次也是河北2004年最强的对流天气过程,出现了少见的大冰雹。中气旋是超级单体风暴的重要特征^[2],如果确定观测到了中气旋,一定要再发布强风暴警报。

2004年6月20日武安测站15:38出现直径8 mm冰雹,18 m/s大风,媒体报道武安冰雹最大直径60 mm,峰峰测站16:12出现直径40 mm的冰雹,随后磁县出现直径40 mm的冰雹,媒体报道有80 mm,瞬时风力达到11级。

超级单体风暴径向速度和中气旋两个产品可以清楚显示超级单体风暴的发展变化(图4,见图版)。6月20日15:21在1.5°仰角(约7.6 km高度处)风暴相对速度图上观测到气旋辐合(图4-1)。15:33风暴继续向上向下发展,风暴内部旋转向下发展到0.5°仰角(图略),1.5°仰角旋转速度加大(图4-2),气旋性辐合增强。15:40风暴内部旋转继续加强,1.5°仰角气旋尺度减小,旋转速度加大(图4-3),0.5°仰角最大正负速度加大,正负中心距迅速减小(图略),15:46系统第1次标出中气旋,1.5°仰角气旋性旋转最大出入流速度为15 m/s,正负速度中心沿径向对称排列,中心距10 km(图4-4),0.5°仰角最大出入流速度达21 m/s(图略)中心距1 km,都达到了中气旋标准。15:52和15:58两个个体扫系统仍标有中气旋(图4-5和4-6)。15:58风暴内部旋转减弱,0.5°仰角中气旋减弱为中尺度气旋性辐合,1.5°仰角中气旋(图4-6)仍存在,但旋转速度减小。16:04在1.5°仰角中气旋减弱为中尺度气旋性辐合(图4-7),以后气旋性辐合缓慢减弱(图4-8),16:55气旋性辐合超出探测范围。

由这次过程发现中尺度气旋性辐合能够较早观测到,在雹灾出现前近20 min就观测到了中尺度气旋性辐合,并且中尺度气旋性辐合迅速加强,很快达到中气旋标准,最激烈的天气现象发生在观测到中气旋后的26 min。因此跟踪中尺度气旋性辐合的演变对于预报这种强烈的灾害天气尤其重要,而中气旋的出现说明云体发展到了顶峰,是强烈灾害天气跟踪预报和服务的关键手段。

3 回波演变规律

回波先在中空生成,然后同时向上、向下迅速发展

展。在发展初期，一般移动速度不大，发展较成熟时，移速加大，不同回波移动速度相差较大。在这 13 块回波中有 6 块是在主体回波移向右侧新生，然后很快发展增强，同时主体回波移向左侧的回波减弱甚至消失。在主体回波移向右侧新生的回波一般都会发展增强，产生剧烈天气。预报员一定要注意观测主体回波移向右侧的新生回波。

4 结 论

(1)冰雹回波大部分都是块状，且边界清楚整齐。成熟时期回波平均尺度一般在 25 km×35 km (35 dBz 以上)。发展初期，一般移动速度不大，发展较成熟时，移速加大，不同回波移动速度相差较大，一般在 30～60 km/h。回波强度大于等于 50 dBz、回波顶高大于等于 10 km、垂直累积液态含水量大于等于 35 kg/m² 时，可能产生降雹。

(2)垂直累积液态含水量与冰雹有很好的对应关系，是冰雹预报中应用简单、直观、效果很好的产品。利用垂直累积液态含水量的大小和高垂直累积液态含水量的维持时间可以预测冰雹的大小和降雹范围，一般垂直累积液态含水量值越大，维持时间越

长，冰雹直径越大，降雹范围越大。在冰雹发展初期在相邻的两个体扫之间垂直累积液态含水量有明显的跃增，跃增值在 15～35 kg/m² 之间。而一般雷雨垂直累积液态含水量很小且变化不大。依据此特点结合其他方法可以提前发布冰雹的临近预报。

(3)冰雹指数产品具有一定的使用价值。冰雹指数为实心时，降雹的可能性很大，而观测到三体散射可以肯定有大冰雹。

(4)中气旋是超级单体的重要特征，如果确定观测到了中气旋，一定要再发布强风暴警报。

(5)在主体回波移向右侧新生的回波时一般都会发展增强，产生剧烈天气。

参考文献

[1] 河北省气象局. 河北省天气预报手册[M]. 北京:气象出版社, 1987:154-157.
[2] 中国气象局培训中心. 新一代天气雷达原理与应用讲义[G]. 北京:中国气象局培训中心, 2000:214,234,252.
[3] 李文娟,郑国光,朱君鉴,等. 一次中气旋冰雹天气过程的诊断分析[J]. 气象科技,2006,34(3):292-295.
[4] 叶爱芬,伍志方,程元慧,等. 一次春季强冰雹天气过程分析[J]. 气象科技,2006,34(5):584-586.

Characteristic Index Analysis of Doppler Radar
Products for Possible Hailfall

Wang Fuxia¹ Zhang Shoubao² Pei Yujie¹ Liu Xiaoxia¹

(1 Hebei Provincial Meteorological Office, 2 Hebei Provincial Ecosystem laboratory, Shijiazhuang 050021)

Abstract: The products of CINRAD-SA Doppler Radar located at Xinle, Hebei Province are used to analyze 8 hail processes in the mid-south part of Heibe Province. Some characteristic indexes of Doppler radar echoes for hail weather are summed up. Hailfall is likely to occur when the echo intensify is above 50 dBz, echo top is greater than 10 km, and vertically integral liquid water (VIL) is above 35 kg/m². The diameter of hail is bigger when VIL is larger. During the initial stage of echo development, about 2 to 3 volume scanning, the value of VIL increases rapidly. Generally, it is a feature of hailfall that echo intensity for each of volume scanning increases about 10 to 30 kg/m².

Key words: hail, Doppler radar, echo, characteristic index

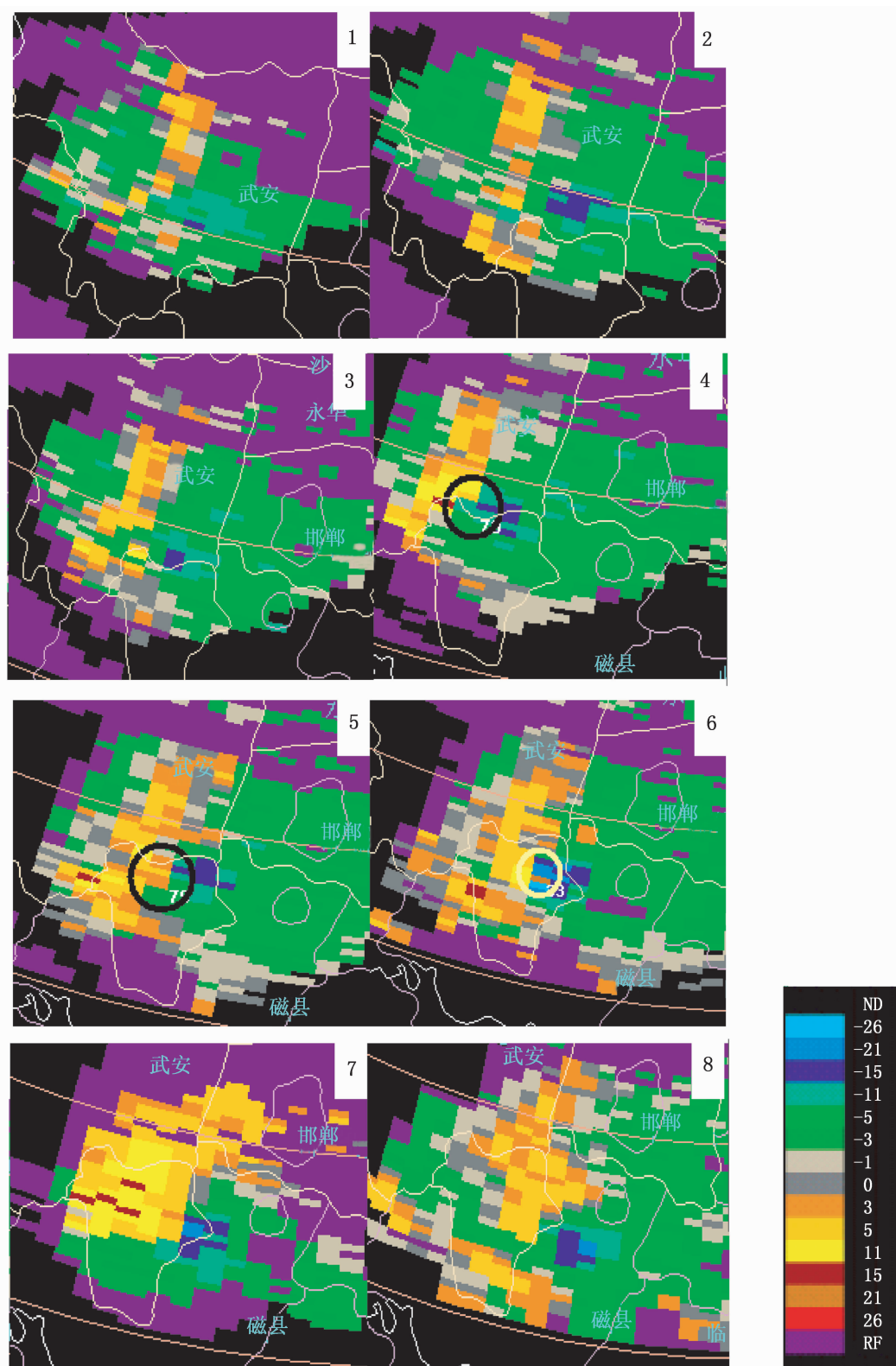


图4 2004年6月20日1.5°仰角风暴相对径向速度演变图

(图中1、2、3、4、5、6、7、8分别为15:21、15:33、15:40、15:46、15:52、15:58、16:04、16:11的风暴相对径向速度,单位:m/s)