

CINRAD/SA 中气旋产品与强对流天气^①

朱君鉴¹ 王 令² 黄秀韶¹ 刁秀广¹

(1. 山东省气象台, 济南, 250031; 2. 北京市气象台)

提 要

分析了济南新一代天气雷达 2002 年观测到的 14 次中气旋产品和滨州新一代天气雷达 2001 年 1 次风暴过程的中气旋产品。产生这些中气旋的风暴中有一次超级单体风暴和一次小型超级单体风暴, 中气旋在这两次风暴中都维持了较长的时间, 风暴产生了冰雹和雷雨大风天气。其余几次中气旋维持时间很短, 产生这些中气旋的风暴不一定产生冰雹等强天气, 预报时可在中气旋强度的基础上, 结合环境条件和雷达的其它产品分析判断。

关键词: 雷达产品 中气旋 中气旋强度

引 言

中气旋(M)是 CINRAD/SA 的一个重要产品, 该产品是为了探测强风暴中的旋转上升气流而设计的。中气旋往往与强天气联系, 根据美国 20 年 WSR-88D 雷达资料统计, 大部分中气旋伴有雷雨大风、冰雹等强天气, 5%~20% 的中气旋伴有龙卷^[1]。随着多普勒天气雷达的应用, 国内也广泛开展了中气旋的应用^[2,3]和探测技术^[4,5]方面的研究。滨州、济南新一代天气雷达 2001 年、2002 年探测到几次中气旋。不同风暴类型中出现的

中气旋, 中气旋的强度, 维持时间和造成的灾害等都有所不同, 认识这些不同特点, 及时准确的识别中气旋对由强对流产生的严重灾害性天气的监测和预警具有业务应用价值。

1 2002 年济南 CINRAD/SA 测得的中气旋产品

多普勒天气雷达能测出有效照射体内反射粒子的平均径向速度, 依据平均径向速度的空间分布可以识别出中气旋。由于雷达波束随距离的展宽效应, CINRAD/SA 只能在较近的距离内才能识别出中气旋。2002 年

^① 国家自然科学基金 40275001 和山东省气象局课题“山东多普勒天气雷达业务工作平台研究开发”共同资助。

济南 CINRAD/SA 雷达系统在原适配参数的条件下,仅在 3 天共 5 个风暴中 14 个时次观测到了中气旋产品(见表 1)。为了认识中气

旋产品的特性及其在强对流天气识别和预报中的应用。本文对这些中气旋产品作了详细的分析。

表 1 2002 年济南新一代天气雷达观测到的中气旋

日期	7.17		7.18		9.27								9.27		9.27
时间(北京时)	23:20	23:50	13:43	14:49	14:55	15:01	15:07	15:13	15:19	15:50	16:02	16:08	17:02	17:27	
ID 号	28	99	65	89	89	89	89	89	89	89	89	97	86	78	
BASE/km	3.0	1.6	3.4	3.5	4.6	3.4	3.4	3.5	3.5	3.7	3.8	3.9	4.2	0.9	
TOP/km	5.9	3.4	4.6	5.8	5.8	4.6	5.8	5.8	5.8	6.2	5.1	5.2	5.6	1.2	
厚度/km	2.9	1.8	1.2	2.3	1.2	1.2	2.4	2.3	2.3	2.5	2.3	2.3	1.4	0.3	
方位 RAN/度	176	163	134	236	233	232	229	227	224	211	206	204	240	313	
距雷达站距离/km	94	107	72	73	73	72	72	73	73	76	80	81	87	27	
直径/km	RAD 径向	5.0	4.5	2.8	4.3	4.0	4.3	5.8	4.5	3.0	5.3	3.5	4.5	3.0	3.0
	AZDIA 切向	6.1	9.2	4.4	4.4	3.9	4.2	4.0	4.4	4.7	4.8	4.6	4.9	4.1	3.4
最大冰雹直径/cm	4.5	无*	5.0					1.3					无*	无*	

为了增加研究的样本数,使分析结果更具代表性,用 CINRAD/SA 的产品生成软件(RPG)对滨州 2001 年体扫资料进行回放得到的中气旋产品,也一并进行了研究。中气旋的算法为 CINRAD/SA 的 RPG 7.0 版本中的中气旋算法。适配参数为系统原适配参数。冰雹、大风资料除气象台站的常规观测资料外,还采用了山东省民政厅的灾情资料。

表 1 列出了 2002 年济南新一代天气雷达观测到的中气旋产品。表中 ID 为 CINRAD/SA 系统赋予风暴的识别号,AZ 为中气旋位置的方位角,RAN 为中气旋离雷达的距离, TOP 为中气旋顶的高度, BASE 为中气旋底的高度, RAD 和 AZDIA 分别为中气旋的径向直径和切向直径。

与冰雹系数产品(HI)比较,济南雷达 2002 年观测到中气旋的次数要少得多。根据 WSR-88 的使用经验,中气旋往往与强天气相联系^[1,2]。但从表 1 可见,并不是所有的中气旋都与冰雹和雷雨大风等强天气相关,因此须要作深入的分析。

2 中气旋的流场特征

图 1(见封三)是三次风暴的风暴相对径向速度(SRM)产品。图右下角的色标为速度的标尺,负速度表示朝向雷达,正速度表示离开雷达。图 1a 是 2001 年 8 月 23 日 7:39 山东博山风暴的风暴相对径向速度(SRM)产品。中气旋位于雷达 197°、71km 处。中

气旋的低层气旋性辐合(1.5°),中低层(2.4°、3.4°)纯气旋性流场,中上层(4.3°)为气旋性辐散,高层(6.0°)为辐散性流场。

图 1b 是 2002 年 7 月 17 日 23:20 山东肥城风暴的风暴相对径向速度(SRM)产品。中气旋位于雷达 177°,92km 处。中气旋的中低层(1.5°、2.4°、3.4°)气旋性环流明显,中上层(4.3°)和高层(6.0°)表现为较强的辐散特征。

图 1c 是 2002 年 9 月 27 日 14:55 小型超级单体中的风暴相对径向速度(SRM)产品,小圆圈为叠加上的中气旋产品,中气旋位于雷达 240°、70km 处。2.4°、3.4°、6.0°产品上负速度区中的正速度区是速度模糊区,此处负速度大于 $26\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。从图中可以看出:在低层(1.5°、2.4°),最大负速度中心离雷达远,最大正速度中心离雷达近,为气旋性辐合,在中低层(3.4°),正负速度中心的连线与雷达径向基本垂直,为纯气旋性流场,中上层(4.3°)负速度区离雷达近,正速度区离雷达远,为气旋性辐散。由于风暴离雷达较近,6.0°仰角平面上气流辐散的特征可以看到,但正负速度的中心不在同一径向上。

3 中气旋的探测

在北半球中气旋具有螺旋上升气流的三维结构^[2],其水平流场可用 Rankine 模式近似^[3],根据其水平流场的这一特点,新一代天气雷达系统的中气旋算法软件在每个仰角平

面内,对平均径向速度进行扫描,找出直径在2~10km范围内满足下列条件的定为中气旋^[1,3]:

(1)在同一距离圈上,平均径向速度顺时针方向连续增大;

(2)在连续的距离圈上都具有上述(1)的特征;

(3)在此范围内找到最大入流速度 V_{in} 和最大出流速度 V_{out} ,定义最大入流速度和最大出流速度之间的距离为 R 。定义角动量和切变:

$$\text{角动量} = (|V_{in}| + |V_{out}|) \times R$$

$$\text{切变} = (|V_{in}| + |V_{out}|)/R$$

若角动量和切变的值通过雷达系统中气旋算法的阈值检验,则中气旋的二维特征被认定。

(4)若在同一位置两个或两个以上仰角平面内都具有中气旋的二维特征,并且通过对称性检验,则三维的中气旋被认定。雷达系统给出中气旋产品。

4 中尺度气旋强度的计算方法

1995年美国雷达技术支持处(OSF)在中气旋二维强度指数的基础上,发展了中气旋三维强度计算的方法^[1],称之为“I”柱状图表示法。该方法先计算出中气旋各仰角平面的二维旋转强度,再在垂直方向将二维旋转强度积分得到三维旋转强度。

图2是文献[1]中气旋二维强度查算图。如图中X处表示距离雷达30哩(55.5km),旋转速度30节($15.4\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$),查得中气旋二维旋转强度为2.8。图中二维强度的标尺线随距离的增大向下倾斜,是由于雷达波束随距离增大而展宽,造成同样强度的中气旋在远距离测得的旋转速度比近距离时小,该图适用直径约为3.5哩(6.4km)的中气旋,如果中气旋直径更小,则此标尺线要更倾斜。

旋转速度计算公式如下:

$$(|V_{in}| + |V_{out}|)/2$$

其中 V_{in} 为中气旋核的最大入流速度, V_{out} 为中气旋核的最大出流速度。

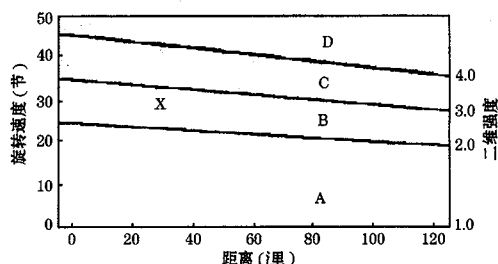


图2 中气旋二维强度查算图

区域A表示弱切变区,区域B表示弱中气旋区,区域C表示中等强度中气旋区,区域D表示强中气旋区。图中每个区域表示的二维强度值如右侧纵坐标1.0、2.0、3.0、4.0。

计算了中气旋的旋转速度,根据中气旋距离雷达的距离即可从图2查算出中气旋的二维旋转强度。将同一风暴各仰角测得的二维旋转强度值累加得到三维积分旋转强度(IRS)指数。并将其标注在“I”柱的上部。

目前 CINRAD/SA 系统尚没有中气旋强度的产品,本文从其速度产品上读出最大入流、出流速度等参数,计算了二维旋转强度和三维积分旋转强度(IRS)指数。图3为2002年9月27日14:55济南新一代天气雷达测得的中气旋的 IRS 指数的示意图。用一个“I”柱表示风暴顶至风暴底。将由图1查算得的二维旋转强度标注在雷达波束与风暴相交处。将二维旋转强度累加得到三维积分旋转强度(IRS)指数,并标注在“I”的上部。在3.4°和4.3°仰角平面上,从其速度产品上读出中气旋最大正、负平均径向速度,计算出旋转速度,按图2查得3.4°和4.3°仰角平面上的二维旋转强度值分别为3.1和2.7,则该

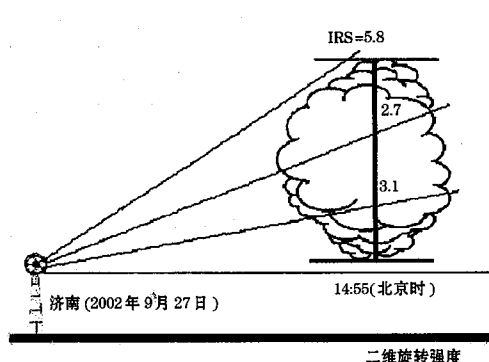


图3 “I”柱状示意图及二维旋转强度

时刻中气旋的三维积分旋转强度(IRS)指数为5.8。

5 中气旋三维强度计算结果与分析

应用上述“I”柱状图法对观测到的中气旋进行了计算,表2中列出了各次中气旋的计算结果,时次连续的中气旋取其中的最大值,表中还列出了中气旋的厚度、风暴的最大反射率和最大VIL值等产品。

产生中气旋的7次风暴中,2001年8月23日和2002年9月27日两次风暴中出现多时次连续的中气旋产品,分别为超级单体风暴和小型超级单体风暴,两次过程都出现了降雹;其余5次都是偶然一次不连续的中气旋产品,其中两次过程出现了降雹。

表2 风暴强盛时中气旋的IRS指数和主要特性

日期	时间	ID	最大 VIL /kg·m ⁻²	最大 反射率 /dBz	最大 厚度 /km	IRS 指数	最大冰 雹直径 /cm
2001.8.23	7:39	93	55	68	4.0	12.9	5
2002.7.17	15:20	28	73	71	2.9	7.3	4.5
	15:50	99	56	60	1.8	4.8	无
2002.7.18	13:43	65	66	68	1.2	4.0	5.0
2002.9.27	14:47	89	50	65	2.5	10.1	1.3
	17:02	86	45	60	1.4	4.0	无
	17:27	78	50	60	0.3	3.8	无

由表2可见 IRS ≥ 7.3 的3次中气旋对应的风暴都产生冰雹,IRS ≤ 4.8 的中气旋对应的4次风暴有1次产生冰雹,3次无冰雹。文献[1]介绍,为了判断龙卷的产生,没有一个简单的IRS值可以作为阈值,因此将IRS的阈值设为可调参数,经多个实例反复回放试验,用最大成功率(CSI)进行打分,试验结果IRS的阈值范围在5~7之间变化。对于IRS与冰雹的关系,因目前积累的样本尚少,还不能得出统计结果,但可以推测,IRS的值也会存在一个关键区,IRS大于这个阈值关键区的上限将是冰雹产生的充分条件。

由表2还可以看出中气旋最大厚度 $>2.5\text{km}$ 对应的风暴都产生冰雹,最大厚度 $<2.0\text{km}$ 的中气旋对应的4次风暴有1次产生冰雹,3次无冰雹。这说明即使探测到中气旋,如果中气旋厚度较薄,风暴不一定产生

冰雹。但另一方面,从表2还可以看到7月18日降雹直径5cm的风暴,IRS较小,但可以看到这次风暴中的最大反射率和最大VIL值都很高(66dBz、68kg·m⁻²),说明中气旋不强的风暴也能产生冰雹。并且,并不是所有冰雹云风暴中都能探测到中气旋,2002年济南雷达覆盖区内有15次风暴产生冰雹,只在3次风暴中探测到了中气旋。

图4、图5分别是2001年8月23日和2002年9月27日两次中气旋的三维旋转强度的计算结果。2001年8月23日发生在山东博山附近的风暴(图4)发生在潜在不稳定

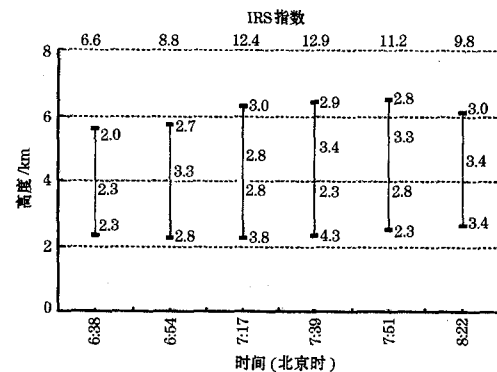


图4 2001年8月23日发生在山东博山附近的超级单体中探测到的中气旋各高度上的二维旋转速度的强度和IRS指数

“I”柱右侧的数字为相应高度上的二维旋转强度,图的上边标注的是对应时次中气旋的三维积分旋转强度(IRS指数)。

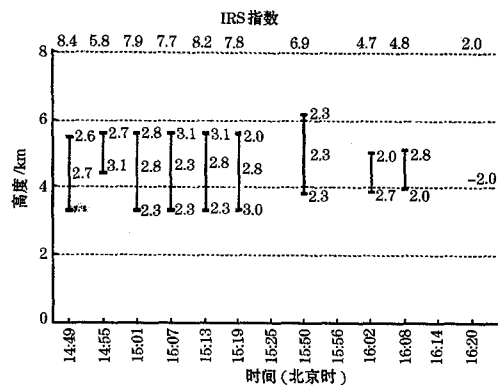


图5 2002年9月27日发生在山东东阿附近的小型超级单体中探测到的中气旋各高度上的二维旋转速度的强度和IRS指数

图中各符号和数字的意义同图4

能量很高 ($CAPE = 2017.4 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$) 的条件下, 风暴为超级单体风暴。中气旋自 6:38 生成, 至 8:22 之后消散, 维持时间 1 小时 44 分钟。中气旋生成后, 强度逐渐增大, 6:38 为 6.6, 7:39 达到最大值 12.9。冰雹发生在 IRS 达到最大值之后。

2002 年 9 月 27 日发生在山东东阿附近的为小型超级单体风暴 (图 5), 风暴发生在潜在不稳定能量不很高 ($CAPE = 351.3 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$) 的条件下, 雷达探测到了风暴的低层“V”字形入流缺口和有界弱回波区, 中气旋自 14:49 在风暴中生成后, 至 16:20 之后消散。在开始的半小时中, 中气旋环流的强度稳定在 8.0 左右, 15:19 之后强度时强时弱, 总趋势逐渐减弱, 有几个时次达不到中气旋的标准。地面降雹发生在中气旋环流强度 IRS 开始减弱时。

2002 年 7 月 17 日在山东肥城附近探测到的中气旋发生在带状回波与孤立单体合并过程中, 当天 20:00 的潜在不稳定能量较高 ($CAPE = 1113.7 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$), 尽管仅 23:20 一个时次达到了中气旋的标准, 但产生了强烈的灾害性天气。

对两张图进行比较可以看出: 超级单体

和小型超级单体中的中气旋都具有较高的 IRS 指数并能维持较长的时间, 而超级单体中的中气旋的强度更强。2002 年 7 月 17 日尽管仅 15:20 一个时次达到了中气旋的标准, 但中气旋强度大, 造成了严重的灾害。

6 小 结

主要结论: 新一代天气雷达的中气旋产品是判断风暴是否产生冰雹等强天气的有效工具。但并不是每一个出现中气旋产品的风暴都与冰雹等强天气对应, 探测到维持较长时间中气旋的超级单体必定产生冰雹, 其他情况下必须结合环境条件和反射率、垂直积分液态含水量等多种产品进行综合分析, 中气旋厚度和三维积分旋转强度大的风暴出现冰雹的概率也大。

参考文献

- 1 Robert R. Lee and Anderson White. Improvement of the WSR-88D Mesocyclone algorithm; Weather and Forecasting, 1998, 13:341—351.
- 2 刘式达, 辛国君. 大气中尺度气旋的三维螺旋结构理论. 气象学报, 2000, 58(2):151~158.
- 3 中国气象局培训中心. 新一代天气雷达讲义. 2000:215~216.

Hail Forecasting Related to Mesocyclone Product of CINRAD/SA

Zhu Junjian¹ Wang Ling² Huang Xiushao¹ Diao Xiuguang¹

(1. Shandong Meteorological Observatory, Jinan 250031;

2. Beijing Meteorological Observatory)

Abstract

14 times mesocyclone products of CINRAD/SA at Jinan in 2002 as well as several times of CINRAD/SC at Binzhou are analyzed. Two of the mesocyclones associated with a supercell storm and a minisupercell storm remained a long period, and accompanied with severe weather, such as hail, damage wind and so on. The others appeared in a short time, and were not always associated with severe weather depending on the strength of the mesocyclone as well as weather situation and the other products of radar.

Key Words: radar products mesocyclone strength of the mesocyclone

《CINRAD/SA 中气旋产品与强对流天气》附图

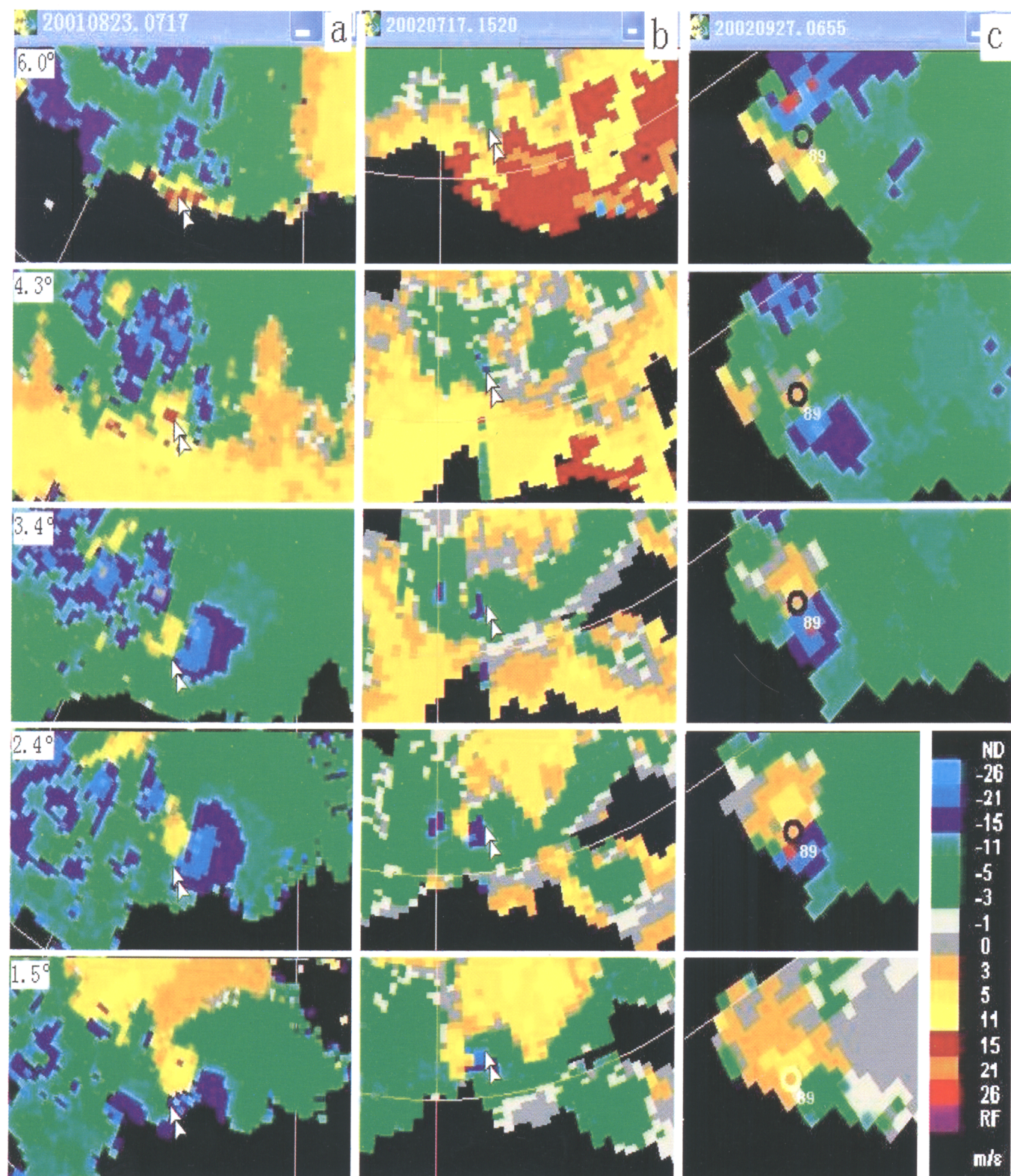


图1 风暴相对径向速度 (SRM) 产品

a. 2001年8月23日7:39 山东博山风暴 b. 2002年7月17日23:20 肥城风暴 c. 2002年9月27日14:55 东阿风暴

自下至上分别为仰角1.5°、2.4°、3.4°、4.3°、6.0°，双箭头指向中气旋核，小圆圈为叠加在SRM产品上的中气旋产品。负速度表示朝向雷达，正速度表示离开雷达。c 负速度区中的正速度是速度模糊区，此处负速度大于 $26 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。