

钟敏, 吴翠红, 王珊珊, 等. CINRAD/SA 雷达两种识别跟踪产品的评估分析[J]. 气象, 2012, 38(6): 722-727.

# CINRAD/SA 雷达两种识别跟踪产品的评估分析<sup>\*</sup>

钟 敏 吴翠红 王珊珊 周金莲 吴 涛 苟阿宁

武汉中心气象台, 武汉 430074

**提 要:** 以中国气象局气象探测中心提供的 2007—2008 年灾害性天气个例档案为基础, 对 CINRAD/SA 雷达风暴识别跟踪和中气旋产品做了定量评估, 同时就评估结果与美国同类产品做了对比。结果表明, 风暴识别与跟踪产品基本能满足临近预报的需要, 但存在漏识别和错误跟踪现象, 且 30 min 以后单体位置预报误差较大。中气旋产品评估结果与美国产品差异不大, 基本能自动识别风暴涡旋, 但存在漏报, 且虚警率较高。

**关键词:** CINRAD/SA 雷达, 风暴识别与跟踪, 中气旋, 评估

## The Performance Evaluation of the Two Identification and Tracking Products of CINRAD/SA Radar

ZHONG Min WU Cuihong WANG Shanshan ZHOU Jinlian WU Tao GOU Aning

Wuhan Central Meteorological Observatory, Wuhan 430074

**Abstract:** In order to get a relatively objective assessment for the storm cell identification and tracking (SCIT) and the mesocyclone detection algorithm (MDA) products' application in China, and then to provide reference of the products for future use, the performance evaluation of two kinds of products on the current business has been done based on the 2007—2008 disaster weather case archives offered by CMA Meteorological Observation Centre. The results of the evaluation are compared with the United States' and show that the SCIT products can meet the basic needs of nowcasting, but the leak detection and error tracking exist, and when the lead time exceeds 30 min, the location prediction error can be big. The performance evaluation of MDA products can be considered similar to the United States', and basically can automatically identify the storm vortex, but there are still some missings, and the false alarm rate is high.

**Key words:** CINRAD/SA radar, the storm cell identification and tracking (SCIT), mesocyclone, evaluation

## 引 言

从 20 世纪 90 年代末到现在十多年的时间里, 我国已建成多普勒天气雷达网, 对台风、暴雨和局地强对流天气的监测预警能力有了显著提高。在实际业务中, CINRAD/SA 雷达产品沿用了美国 WSR-88D 的算法。气象工作者对 CINRAD/SA 雷达产

品在强对流天气中的应用<sup>[1-11]</sup>做了大量的统计分析与总结, 积累了一定的经验。自 WSR-88D 投入业务运行以来, 美国对其产品均做了定量评估以改进其算法, 而类似的评估工作在我国几乎很少开展。

本文以中国气象局气象探测中心提供的 2007—2008 年灾害性天气个例档案为基础, 对风暴识别与跟踪和中气旋产品做一定量评估, 以期对以上产品在我国的应用情况得出一较为客观的评价, 为今后

\* 中国气象局气象关键技术集成与应用(CAMGJ2012M32)资助

2011 年 7 月 28 日收稿; 2012 年 2 月 27 日收修定稿

第一作者: 钟敏, 主要从事短时临近预报和研究工作. Email: zhongmin296@163.com

使用上述产品提供参考。

## 1 风暴识别与跟踪产品评估

风暴识别与跟踪算法是 CINRAD/SA 雷达中重要的一个算法,准确的风暴识别与跟踪是雷达及强天气警报业务的基本组成部分<sup>[12]</sup>,因而对此产品的评估十分必要。本文将从单体识别、单体跟踪和单体位置预报三个方面,按照不同风暴类型进行评估。

### 1.1 单体识别评估

首先由预报员参考如下规则<sup>[13]</sup>,识别出雷达观测范围内客观存在的单体:

- (1) 区域中最大反射率因子大于 30 dBz;
- (2) 在至少一个仰角上,反射率因子超过 30 dBz 的二维区域大于 5 km<sup>2</sup>;
- (3) 该区域三维质心与另一区域质心至少相隔 5 km;
- (4) 两区域间由一个局地极小的反射率因子相隔,该反射率因子至少要比区域内最大反射率因子值小 10 dBz。

将人工识别出的单体,针对如下三类风暴进行评估:

- (a) “孤立的非强单体”: 风暴基本上是孤立的并且没有强对流天气报告;
- (b) “孤立的强单体”: 风暴基本上是孤立的并且有一个以上强天气报告;
- (c) “MCS/line”: 单个的风暴单体构成一个团簇或呈线状排列。

其中,强对流天气报告是指:直径 $\geq 19$  mm 的冰雹,瞬时最大风速 $\geq 25$  m $\cdot$ s<sup>-1</sup> 的雷暴大风,任何级别的龙卷以及对流暴雨(1 h 降水量 $\geq 30$  mm)。

选用武汉、宜昌、重庆、广州、济南、青岛、烟台、阜阳共 8 部雷达 18 个天气过程作为评估样本(每个过程大约包含 1~2 个小时体扫数据),对每一体扫均按上述规则进行人工识别,总计识别出客观存在的单体 2354 个,其中孤立的强单体 407 个,孤立的非强单体 656 个,MCS/Line 1291 个。将算法识别的单体与人工识别的单体进行比较,对每种风暴类型按照最大回波强度等级分别统计单体识别产品的正确识别率 POD(probability of detection)和误识别率 FAR(false alarm rate),具体结果见表 1。

表 1 单体识别评估结果

风暴类型	POD/%		
	30~39 dBz	40~49 dBz	$\geq 50$ dBz
孤立的强单体	40	84.1	98.6
孤立的非强单体	65.7	82	97
MCS/Line	63.6	83.9	96.8
总体	60.2	82.9	97.2

从表 1 可知,在各类型风暴中,POD 均随最大回波强度增加而增大。算法未出现误识别,即把非气象雷达回波认为是风暴单体。但存在漏识别,主要在两种情况下发生,其一是,在一个巨大成熟的单体附近,算法无法识别衰亡或新生单体,属于这种情况的样本数为 47 个,占总样本数的 2%,存在于各类型风暴之中,以 MCS/Line 类型居多,有 39 个。其二是,单体只在一个仰角扫描中满足尺度和强度判据,而不满足该算法规定的须有两个仰角均满足尺度和强度判据。属于这类情况的样本数共 162 个,占总样本数的 6.9%,也存在于各类型风暴之中,且是孤立类单体未被算法识别的主要原因。

### 1.2 单体跟踪评估

正确的进行时间关联是用户跟踪风暴演化的基础。正确的时间关联是指在一次天气过程中一个单体被正确的识别和跟踪。单体跟踪的评估分为以下 3 个步骤:

- (1) 一个体扫接一个体扫跟踪所有被识别单体的生命周期;
- (2) 确定不正确的时间关联的个数并记下它们的特性;
- (3) 计算该算法被正确跟踪的单体占有所有被跟踪单体的百分比。

按照上述评估方法,选用了武汉、宜昌、重庆、青岛、烟台、阜阳计 6 部雷达 12 个天气过程,共跟踪了 1476 个时间关联,其中孤立的强单体 270 个,孤立的非强单体 358 个,MCS/Line 848 个,具体评估结果见表 2。

表 2 单体跟踪评估结果

风暴类型	时间关联数/个	正确跟踪的百分比/%
孤立的强单体	270	100
孤立的非强单体	358	93.3
MCS/Line	848	96.9

由表 2 可知,对于孤立的强单体而言,算法均做出了正确的跟踪,而孤立的非强单体和 MCS/Line 被正确跟踪的百分比分别为 93.3%和 96.9%,发生错误关联的原因往往是两个不同的、空间间隔很近的单体同步生长或消亡。

### 1.3 单体位置预报评估

选用了武汉、青岛、烟台、广州 4 部雷达的 9 个天气过程,对不同风暴类型的 411 个单体(生命史 2 个体扫以上)进行单体位置预报评估,其中孤立的强单体 121 个,孤立的非强单体 116 个,MCS/Line 174 个。具体评估方法为,将算法识别的单体质心位置与其相应的预报质心位置进行比较,计算在不同预报时效上(15、30、45 和 60 min)两者的距离差值。其中评估 15 和 45 min 的预报位置,实况位置采用 12 和 18 min,42 和 48 min 单体实际位置线性插值,具体评估见图 1。

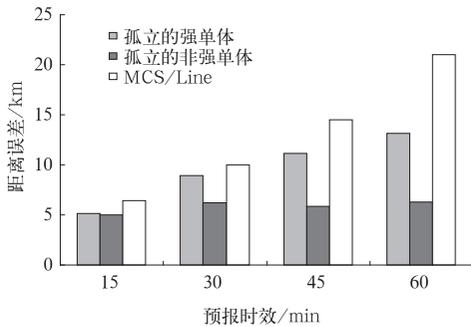


图 1 单体位置预报评估结果

Fig. 1 Evaluation results of average forecast error for 4 lead times

从图 1 可知,孤立的强单体和 MCS/Line 的位置预报误差随预报时效的增加而增大,而孤立的非强单体的位置预报误差随预报时效的增加差别不大,这可能和孤立的非强单体移动方向和速度比较稳定有一定的关系。在三类风暴中,MCS/Line 在 4 个预报时效中误差均是最大的,这可能与此类风暴移动的路径较为复杂有关。

综合以上 3 个方面的评估可以看出,风暴识别与跟踪产品基本能满足临近预报的需要,但要注意两类原因造成的风暴漏识别及少数的错误关联现象,风暴位置预报在 30 min 以后会产生较大的误差,MCS/Line 尤为突出。

## 2 中气旋产品评估

### 2.1 评估资料

中气旋与强天气的联系是间接的,并无一明确的天气与之对应。在评估时,参照美国的做法,将评估样本分为强风和龙卷两组,不考虑冰雹天气<sup>[14]</sup>。以中国气象局气象探测中心提供的 2007—2008 年灾害性天气个例档案为基础资料,共挑选出瞬时最大风速大于  $25 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  的 25 个大风报告及 27 个龙卷报告,根据中气旋产品 150 km 半径的有效探测范围,并结合实际雷达体扫资料情况,最终确定了 14 个大风天气报告和 14 个龙卷天气报告,总计对 20 个天气过程进行评估,用到广州、武汉、烟台、郑州、南昌、宜昌、盐城、南京、阜阳、南通、徐州、青岛共 12 部雷达资料,总计 1242 个体扫时次。

### 2.2 评估方法

#### 2.2.1 实况核实

在评估之前,首先需用雷达资料逐个验证上述天气报告的真实性。其次,研究表明:并不是所有的地面大风都与中气旋有关,因此在核查时,按照美国对评估个例的筛选原则<sup>[14]</sup>,对于报告中虽然提到龙卷或大风,但是在基本径向速度场上没能用肉眼识别出的涡旋,即沿着一定方位角上存在一对相反的径向速度并且沿方位角有切变,则舍弃该报告,这样做可以剔除掉由于纯锋面或者纯微下击暴流产生的地面大风报告,也能剔除掉一些非属实的龙卷报告。

#### 2.2.2 实况时间的确定

从天气报告与雷达资料核查情况来看,评估样本主要分为两种情况:一种是报告中大风或龙卷发生的时间、地点与雷达回波发生演变较一致;另一种为报告所提地点较准确,而时间较为笼统模糊或与雷达回波发展演变有所出入。

对于第二种情况,假定报告地点是正确的,而时间段有误差,仔细核对雷达基本反射率因子及径向速度场等基本产品后对该报告的时间段做出修订,这种对实况的修订方法参照美国方法<sup>[15]</sup>。

对于修订后的每一个报告,采用建立“时间窗”<sup>[14]</sup>的方法,即将报告开始时间向前推 20 min(3

~4 个体扫), 将报告结束时间向后延 1 个体扫。提前 20 min 是为了考虑到算法识别有一个提前时间, 而延后一个个体扫是考虑到报告的结束时间仍会存在一定的误差。对于一次过程中出现了多个报告, 则分别建立多个时间窗<sup>[14]</sup>。

2.2.3 评分细则

时间窗建立之后, 对每个过程按逐个体扫进行评估, 对于时间窗内的每个个体扫时次, 算法在报告地点附近识别出有中气旋则记做 1 次正确, 若在同一时次报告地点附近存在相邻的两个或多个中气旋, 则也记为 1 次正确(这种情况在评估中很少见)。对于时间窗内的每个个体扫时次, 若在报告地点附近算法没有识别出中气旋, 则记为漏报 1 次。如果在雷达 150 km 探测范围内, 算法识别出中气旋, 但在同一省份范围内没有任何强天气报告与之对应, 则记为空报 1 次, 沿海地区强回波入海后识别的中气旋不计做空报。对于空报的认定是在假定所获灾情报告是完整的前提下, 虽然这一假定不一定完全成立, 即可能在算法识别出中气旋的地点确有强天气, 而未被观测到。但为了评估, 不得不事先做这一假定, 此种假定亦是参照美国<sup>[14]</sup>。对于雷达 150 km 探测范围内同省区域内的其他单体, 算法未识别为中气旋且亦无相应强天气报告时, 则记为正确的不报 1 次, 强回波入海后不计。

按照上述评分规则, 将每一体扫时次的算法识

别结果与实况做对比, 统计击中、空、漏报情况, 最后给出总的击中率(POD)、虚警率(FAR)、临界成功指数[CSI(Critical Success Index)]以及 Heidke 技巧评分[HSS(Heidke Skill Score)], 具体计算方法和公式如下:

算法识别	实况	
	是	否
是	a	b
否	c	d

$$POD = a / (a + c)$$

$$FAR = b / (a + b)$$

$$CSI = a / (a + b + c)$$

$$HSS = 2(ad - bc) / [(a + c)(c + d) + (a + b)(b + d)]$$

2.3 评估结果与分析

按照上述评估方法, 经过对 14 个大风报告和 14 个龙卷报告实况核查之后, 剔除了 3 个大风报告和 6 个龙卷报告, 以上报告从径向速度场上看不到涡旋。剔除的 9 个报告中除 1 个为台风大尺度流场, 其余 8 个报告均与微下击暴流有关。核查情况表明, 有 29.6% 的中尺度大风报告与中气旋无关, 而是纯微下击暴流, 这一比例与邵玲玲等<sup>[1]</sup>和李云川等<sup>[2]</sup>的统计结果相近。

表 3 为大风组中气旋产品的具体评估结果。从表 3 可以看出, 大风组不同个例的评估结果存在较

表 3 大风组中气旋评估结果 (单位: %)

Table 3 Evaluation results of mesocyclone detection in gale winds (unit: %)

日期	雷达站	发生地	POD	FAR	CSI	HSS
20070424	广州	花都、四会、怀集	46.7	56.3	29.2	30.7
20070724	武汉	浠水	40	81.8	14.3	20.0
20070728(缺)	烟台	龙口、招远、莱州	20	0	20	23.1
20070806	郑州	临颖	0	0	0	0
20080408(缺)	南昌	安义	100	77.8	22.2	32.6
20080408	宜昌	当阳	70	30	53.8	65.5
20080707	盐城	滨海	0	0	0	0
总体			38.0	57.8	25.0	31.6
美国			39.0	65.5	22.4	32.8

大差别。在整个评估过程中, 正确识别中气旋 27 个, 漏识别 44 个, 错误识别 37 个。4 项评估指标与美国大体一致。虚警率较美国稍低 7.7%, 可能与评估细则中跨省和入海不计空报有关。这里再详细分析一下每个个例的评估结果, 首先, 有两个大风报告, 算法均没有识别出中气旋。其一是 2007 年 8 月

6 日临颖个例, 虽然在径向速度场上出现了涡旋特征, 但由于不满足中气旋识别规则<sup>[12]</sup>中“两个或更多个垂直相关的二维特征是对称的”, 算法仅在大风发生时段内识别出两个时次的三维相关切变, 而对应的实测资料显示, 该地出现了 32.4 m · s<sup>-1</sup> 的大风, 属该地极值; 其二是 2008 年 7 月 7 日滨海个

例,在径向速度场上也能看到涡旋特征,但由于只在 1 个仰角上存在,中气旋未被识别。2007 年 7 月 28 日龙口、招远、莱州个例和 2008 年 4 月 8 日安义个例,由于在实况发生时段内均缺了 2 个时次体扫资料,因此对评估结果,尤其是对 *POD* 值有一定影响。

在评估中,我们发现对于正确识别的中气旋和错误识别的中气旋,其切变强度值是存在差异的。正确识别的中气旋,其切变强度多在  $14 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$  以上,最大值出现在 2008 年 4 月 8 日安义个例,切变强度达  $30 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ 。而错误识别的中气旋,其切变强度多在  $10 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$  以下,但这也不是绝对

的情况,如 2007 年 7 月 28 日龙口报告,其切变强度就为  $8 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ ,但也产生了灾害性大风,且灾情并不轻。另外,还发现 2007 年 4 月 24 日广州雷达在距雷达站 146 km 附近产生了虚假的中气旋,从速度场看存在杂波,其反射率因子不强,只有 40 dBz,且回波分布比较均匀,只维持了 1 个体扫,这与文献[4]中提到的南京和合肥雷达出现的虚假中气旋的现象一致。因此,仅凭中气旋产品来判断是否会产生大风是不可靠的,在实际预报中,需要结合回波强度、形态、垂直结构、VIL、基本速度等综合判断。

表 4 是龙卷组的中气旋产品评估结果。从表 4

表 4 龙卷组中气旋评估结果 (单位:%)

Table 4 Evaluation results of mesocyclone detection in tornados (unit:%)

日期	雷达站	发生地	<i>POD</i>	<i>FAR</i>	<i>CSI</i>	<i>HSS</i>
20070703	南京	高邮	80	77.8	21.1	28.8
20070703(缺)	盐城	盐都	100	66.7	33.3	47.4
20080723	阜阳	颍上	20	75	12.5	18.8
20080814	南通	通州	50	75	20.0	16.1
20080704	盐城	响水	33.3	80	14.3	19.4
20080817	盐城	射阳、盐都	66.7	0	66.7	75
20080620	徐州	灵璧	20	0	20	27.3
总体			52.3	62.3	28.0	37.2
美国			52.7	72.6	22.0	33.3

可以看出,龙卷组不同个例的评估结果同样存在个体差异。整体情况是,正确识别中气旋 23 个,漏识别 21 个,错误识别 38 个。4 项评估指标也与美国大体一致。2007 年 7 月 3 日盐都个例由于实况时段内缺 2 个时次体扫,可能对结果造成一定影响,导致 *POD* 偏高。大风组和龙卷组的结果对比而言,龙卷组的 *POD* 要明显高于大风组,这应该与龙卷天气中,中气旋持续时间较大风更长有关。8 个龙卷报告中,算法均识别出有中气旋。对于中气旋切变强度的统计情况是,正确识别的中气旋中,除 2008 年 7 月 4 日响水个例为  $9 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ ,其余均在  $12 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$  以上,最大值达  $40 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ ,出现在 2007 年 7 月 3 日的高邮个例中。错误识别的中气旋其切变强度多数在  $8 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$  以下。此外,南京雷达也出现了与广州雷达同样的中气旋虚警现象,且次数比广州雷达多。

总体来说,对于龙卷和具有涡旋结构风暴引起的大风个例,该算法基本能进行自动识别中气旋,少数大风个例由于阈值原因而未被识别。因此在业务中使用中气旋产品时也要清楚,不是所有的带有涡

旋结构的大风天气,其涡旋结构都能被该算法识别,必须结合其他雷达特征量综合分析,判断是否有大风发生。中气旋虚警率较高现象突出,应从三个方面来认识,一是可能识别到出现中气旋的地点确实发生了强天气但由于观测所限,未被观测到;二是并不是所有算法识别出的中气旋都与强天气相关联<sup>[15]</sup>;三是评估中发现广州、南京雷达在 146 km 附近均出现了虚假的中气旋,速度场上有杂波,而对应的反射率因子不强且较为均匀,由于评估样本有限,对于这类情况的统计可能并不全面。因此,在实际业务应用中,还应利用多种探测资料进行综合分析判断,以提高强天气预警准确率。

### 3 结 语

(1) 风暴识别与跟踪产品基本能满足临近预报的需要,但要注意在风暴识别中,巨大成熟单体附近的小单体及只在单层仰角上满足阈值的单体易被算法漏识别,两个不同的、空间间隔很近的单体同步生长或消亡时易发生错误的关联,风暴位置预报在

30 min 以后会产生较大的误差, MCS/Line 尤为突出。

(2) 中气旋产品的评估结果与美国评估结果差异不大, 龙卷组的 *POD* 高于大风组。对于中尺度强风的判断, 不能仅依赖于中气旋产品, 29.6% 的中尺度强风报告与中气旋无关, 为纯微下击暴流。即使是带有涡旋的中气旋强风, 由于阈值原因也可能未被算法识别。中气旋产品具有较高的虚警率, 应结合其他雷达产品综合分析判断。

## 参考文献

- [1] 邵玲玲, 孙婷, 邬锐, 等. 多普勒天气雷达中气旋产品在强风预报中的应用[J]. 气象, 2005, 31(9): 34-38.
- [2] 李云川, 王福侠, 裴宇杰, 等. 用 CINRAD-SA 雷达产品识别冰雹、大风和强降水[J]. 气象, 2006, 32(10): 64-69.
- [3] 朱君鉴, 王令, 黄秀韶, 等. CINRAD/SA 中气旋产品与强对流天气[J]. 气象, 2005, 31(2): 38-42.
- [4] 方翀, 郑媛媛. 新一代天气雷达中气旋产品特征值统计和个案分析[J]. 气象, 2007, 33(11): 16-20.
- [5] 王彦, 唐熠, 赵金霞, 等. 天津地区雷暴大风天气雷达产品特征分析[J]. 气象, 2009, 35(5): 91-97.
- [6] 刘娟, 朱君鉴, 魏德斌, 等. 070703 天长超级单体龙卷的多普勒雷达典型特征[J]. 气象, 2009, 35(10): 32-40.
- [7] 冯晋勤, 汤达章, 俞小鼎, 等. 新一代天气雷达中气旋识别产品的统计分析[J]. 气象, 2010, 36(8): 47-52.
- [8] 李德俊, 唐仁茂, 熊守权, 等. 强冰雹和短时强降水天气雷达特征及临近预警[J]. 气象, 2011, 37(4): 474-480.
- [9] 刁秀广, 赵振东, 高慧君, 等. 三次下击暴流雷达回波特征分析[J]. 气象, 2011, 37(5): 522-531.
- [10] 李向红, 唐熠, 郑传新, 等. 一次多种强对流天气过程的雷达回波特征分析[J]. 气象, 2010, 36(8): 61-71.
- [11] 赵瑞金, 郝雪明, 杨向东, 等. 2009 年 7 月 20 日承德龙卷多普勒天气雷达特征[J]. 气象, 2010, 36(11): 68-76.
- [12] 俞小鼎, 姚秀萍, 熊廷南, 等. 多普勒天气雷达原理与业务应用[M]. 北京: 气象出版社, 2006.
- [13] Johnson J T, MacKeen P L, Witt A, et al. The storm cell identification and tracking algorithm: An enhanced WSR-88D algorithm[J]. Weather and Forecasting, 1998, 13(2): 263-276.
- [14] Stumpf G J, Witt A, Mitchell E D, et al. The national severe storms laboratory mesocyclone detection algorithm for the WSR-88D[J]. Weather and Forecasting, 1998, 13(2): 304-326.
- [15] Witt A, Eilts M D, Stumpf G J, et al. An enhanced hail detection algorithm for the WSR-88D[J]. Weather and Forecasting, 1998, 13(2): 286-303.