

牛淑贞,张一平,乔春贵,等,2018. 郑州 CINRAD 风暴追踪产品误差统计分析[J]. 气象,44(10):1318-1324.

郑州 CINRAD 风暴追踪产品误差统计分析*

牛淑贞^{1,2} 张一平^{1,2} 乔春贵¹ 史一丛¹ 袁小超¹

1 河南省农业气象保障与应用技术重点实验室,郑州 450003

2 河南省气象台,郑州 450003

提 要: 利用 2009—2016 年 5—9 月郑州新一代天气雷达资料,对 5615 个单体回波按不同预报时效、不同生命史和不同类型强对流的风暴追踪信息产品进行统计,较系统地分析了单体回波的距离误差和方向误差,探讨了实况与预报的偏差方向。结果表明:30 和 60 min 距离误差分别为 9.3 和 16.9 km,方向误差变化不大,随着预报时效的延长,距离误差增大;生命史 ≤ 1 h、1~2 h 和超过 2 h 的 30 min 预报平均距离误差分别为 9.8、8.8 和 7.7 km,方向误差分别为 25.2°、25.7°和 22.8°;生命史在 1~2 h 和超过 2 h 的 60 min 预报平均距离误差分别为 17.3 和 15.9 km,方向误差为 24.4°和 22.7°,随着单体生命史的延长,方向和距离误差呈减小趋势;西北气流型、西南气流型两种类型单体回波和整体误差一致,两种类型回波单体 30 和 60 min 方向和距离误差基本相当;不同类型、不同预报时效统计均为实况偏于预报路径右侧的次数多于偏左的次数,30 和 60 min 偏右比例分别为 57.5%和 55.6%。

关键词: CINRAD,风暴追踪,生命史,分类,统计

中图分类号: P412

文献标志码: A

DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2018.10.008

Error Statistical Analysis of Storm Tracking Production of CINRAD in Zhengzhou

NIU Shuzhen^{1,2} ZHANG Yiping^{1,2} QIAO Chungui¹ SHI Yicong¹ YUAN Xiaochao¹

1 Henan Key Laboratory of Agrometeorological Support and Applied Technique, Zhengzhou 450003

2 Henan Meteorological Observatory, Zhengzhou 450003

Abstract: Based on the new generation weather radar data of Zhengzhou from May to September during 2009—2016, this paper checked the storm tracking information products of 5615 cell echoes according to different forecast time, different life cycles and different types of severe convection, processes, and also systematically analyzed the distance errors and direction errors of storm tracking information products of cell echoes and discussed the direction deviation between real condition and forecast products. The results show that the distance errors of 30 and 60 min products are 9.3 and 16.9 km respectively, and the direction error is not so big. The error of distance increases with the extension of lead time of forecasts; The average distance error of the 30 min forecast products of cell echoes with life cycles less than 1 h, 1—2 h and more than 2 h are 9.8, 8.8 and 7.7 km, and the azimuth errors are 25.5°, 25.7° and 22.8° respectively. The average distance error of the 60 min forecast products with life cycles of 1—2 h and more than 2 h are 17.3 and 15.9 km, and the direction errors are 24.4° and 22.7°, respectively. With the extension of life cycles of the cells, the errors of direction and distance are decreasing, the errors of northwest airflow type and the southwest airflow type are entirely the same, and the direction and distance errors of the two types

* 中国气象局预报员专项(CMAYBY2016-043)、河南省科技攻关项目(162102310056)和河南省强对流预报创新团队共同资助

2017年2月11日收稿; 2018年7月13日收修定稿

第一作者:牛淑贞,主要从事天气预报和强对流天气研究. Email:niushuzhen@163.com

通信作者:张一平,主要从事天气预报和强对流天气研究. Email:zhangyiping618@163.com

of echoes are almost the same in 30 and 60 min. The errors of the southwest airflow type are slightly smaller than those of the northwest airflow type. The number of different types and forecast efficiency are that the observation data biased to the right of the forecast path are more than that of the left side, and the proportion of 30 and 60 min biased to right are 57.5% and 55.6%, respectively.

Key words: CINRAD, storm tracking, life cycle, classification, statistical analysis

引 言

自 20 世纪末和 21 世纪初新一代雷达在我国布网以来,其稳定的业务运行有效地改善了对雷暴和强对流天气的短时临近预报水平,在灾害性强对流天气的监测预警中发挥了重要作用(俞小鼎等,2006a;俞小鼎等,2012;陈明轩等,2004),利用其丰富的产品对雷暴大风等强对流天气的分析和研究大量涌现,并取得了丰硕的科研成果(俞小鼎等,2008;2006b;2006c;2015;郑媛媛等,2004;2015;牛淑贞等,2008;2012;张一平等,2012;2014;方翀和郑媛媛,2007;吴芳芳等,2012;冯晋勤等,2010)。风暴单体识别和跟踪(storm cell identification and tracking, SCIT)算法(俞小鼎等,2006a)是 WSR-88D 系列算法中的一个重要的算法,SCIT 算法的产品风暴路径信息(storm tracking information, STI)是短时临近预报员常用的产品之一(俞小鼎等,2012)。在风暴追踪前首先要识别对流风暴单体,然后再给出该对流单体现在、过去和未来 1 h 内间隔 15 min 的位置,准确的对流风暴识别和跟踪是雷达探测预警强对流天气的重要保障。风暴追踪产品的检验与评估,20 世纪 90 年代,Johnson et al(1998)对 898 个单体各种类型的对流风暴进行检验和评估,分析得出:其 15、30、45 和 60 min 的风暴单体路径预报平均误差分别为 5、10、15 和 23 km,随着预报时效的增大,平均预报误差也在逐步增大。在我国,杨引明(1999)、朱君鉴等(2004)、韩雷等(2007)、钟敏等(2012)基于雷达数据对风暴追踪、中气旋、冰雹探测等算法进行了检验和评价,但尚未对风暴追踪产品距离误差和移动方向误差进行系统检验和评估(吕晓娜等,2013)。随着技术的不断进步,TITAN、TREC 等单体和区域跟踪算法不断发展,胡胜等(2010)对临近预报系统(SWIFT)中 3891 个风暴产品进行检验。中原地区和河南夏半年强对流天气频繁发生,其尺度小、生命史短、生消演变迅速并致灾

严重,针对雷暴大风、冰雹等强风暴的识别和临近预警,目前主观判断和外推仍为主要手段。受其他产品多有滞后问题和河南强对流风暴演变迅速两方面因素的影响,目前实时业务中,河南省强对流天气特别是极端灾害性强对流天气的监测预警仍严重依赖于 CINRAD 系统 PUP 终端提供的多种产品,STI 是不可或缺的重要参考依据。为了更好地应用该产品,做好河南强对流天气的临近预报和预警,本文利用郑州新一代天气雷达投入业务运行以来积累的河南强对流天气过程资料,对雷达风暴追踪产品进行统计分析,检验不同生命史、不同预报时效内河南强对流风暴的移向、移速误差以及风暴追踪产品在河南省分类强对流天气短临预报预警中的应用,对该产品在河南省应用情况进行较为客观评价,给出量化评估结论,为今后该产品的更好应用提供可靠的参考依据,从而提高河南省强对流天气预报预警时效和准确率。

1 资料与检验统计方案

1.1 资料选取

本文选取的个例为 2009 年郑州 SA 新一代天气雷达运行以来 5—9 月河南雷暴大风、局地冰雹和短时强降水等强对流天气(2007 年郑州 CINRAD 开始业务运行,由于 2007—2008 年风暴追踪信息产品存在问题,故不参与计算),本论文选取 2009—2016 年共 59 次强对流天气个例中共 5615 个风暴单体作为本文研究对象。

1.2 检验统计方案

考虑我国新一代天气雷达 VCP21 模式 6 min 一次扫描,STI 产品 30、60 min 预报和实况位置能够很好匹配,因此选取 30、60 min 预报和实况对应进行统计。方案如下:

(1) 提取实况和预报位置参数:提取 58 号雷达

数据产品中的风暴数据,包括风暴出现的时间,风暴位置 (θ_0, K_0) ,其中 θ 为雷达产品方位, K 为距离,下同),风暴 15 min 预报的位置、风暴 30 min 预报的位置 (θ_1, K_1) 、风暴 45 min 预报位置、风暴 60 min 预报位置 (θ_2, K_2) 。

(2) 计算风暴生命史:首先判断单体风暴(id 为其序列号)是否为新生成的风暴,对于新生单体风暴,则读取该风暴 30/60 min 的实况位置 (θ_3, K_3) ,通过计算风暴的生成和结束时间,计算出风暴的生命史。

(3) 计算风暴的距离和方向误差:本文中的距离误差为单体实际位置与相应的预报位置之间的真实距离,方向误差为实况方向与预报方向误差的绝对值,偏差方向为实况方向相对于预报方向的偏差,若实况方向在预报的右边,则规定移动方向偏右,反之则为偏左。图 1 假设 A 点为风暴的起始位置, B 点为该风暴该时刻的 30/60 min 预报位置, C 点为 30/60 min 后的该风暴的实际位置(风暴的移动方向为从 A 到 C, 风暴的预报方向为从 A 到 B), 则风暴的预报距离误差为 BC(也即风暴实际距离误差), 预报的方向误差为 $\angle BAC$ (也即风暴移动方向偏差)。

(4) 风暴的方向和距离误差的统计。计算每个单体 id 的方向误差和距离误差(包括最大、最小和平均, 如一个单体预报的 30/60 min 误差有多个滚动值, 计算时取其平均值作为这个单体 30/60 min

的平均误差), 并按生命史计算一次过程中的所有 id 的方向和距离误差的最大、最小、平均值的平均值, 从而得到一次过程不同生命史的误差统计结果。

2 风暴追踪信息在河南强对流天气过程中的误差统计分析

根据上述检验方案, 对 59 次过程不同生命史 30/60 min 的距离误差(包括最大、最小和平均)和方向误差(最大、最小和平均)进行了统计, 图 2 是 2009—2016 年河南省强对流过程风暴追踪信息各种误差的综合显示。

2.1 不同预报时效单体风暴追踪的距离和方向误差统计分析

Johnson et al(1998)研究表明, 随着预报时效的增大, 平均预报误差也逐步增大。图 3 和图 4 分别是 30/60 min 不同预报时效的距离和方向误差评估结果, 结合表 1 和表 2(为方便比较, 图表内容进行了综合分类)可以看出, 30 min 预报距离误差最大值为 40.8 km, 最小为 0.3 km, 平均 9.3 km; 方向误差最大值为 81.3°, 最小为 0.2°, 平均 25.2°。60 min 预报距离误差最大值为 44.0 km, 最小为 0.4 km, 平均 16.9 km; 方向误差最大值为 75.8°, 最小为 0.6°, 平均 23.9°。不同预报时效平均结果比较, 随着预报时效的延长, 距离误差增大, 由 30 min 的 9.3 km 增加至 60 min 的 16.9 km; 而方向误差变化不大, 且随预报时效的延长略有减小, 由 30 min 的 25.2°减小至 60 min 的 23.9°。由以上分析可以看出, 结合预报时效的平均距离误差值和美国 Johnson et al(1998)统计结果基本一致。

2.2 不同生命史单体风暴追踪的误差统计分析

通常情况下, 较大尺度的风暴其生命史也更长, 同时, 风暴的移动特征与它的尺度大小也存在密切关系(俞小鼎等, 2012)。从图 3 和图 4 统计结果看, 生命史 ≤ 1 h 的最大距离误差为 15.9 km, 最小 5.7 km, 平均 9.8 km; 最大方向误差为 54.2°, 最小为 8.5°, 平均 25.2°。生命史在 1~2 h 的最大距离误差为 27.0 km, 最小 2.8 km, 平均 8.8 km; 最大方向误差为 63.4°, 最小为 3.9°, 平均 25.7°。生命史在 2 h 以上的最大、最小和平均距离误差分别为 40.1、0.3、7.7 km; 最大、最小和平均方向误差分

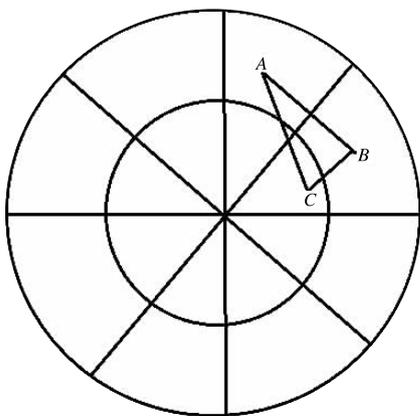


图 1 风暴追踪产品距离和方向误差计算示意图

Fig. 1 Calculation method of distance and direction error of storm tracking products

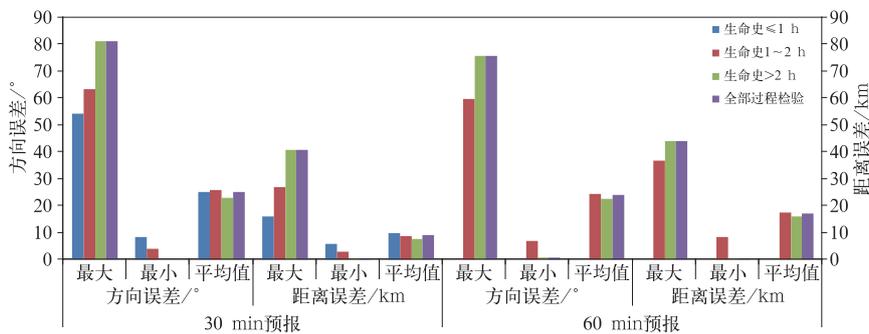


图 2 2009—2016 年河南省强对流过程风暴追踪信息误差综合显示
 Fig. 2 Comprehensive information of storm tracking information of severe convection processes in Henan during 2009—2016

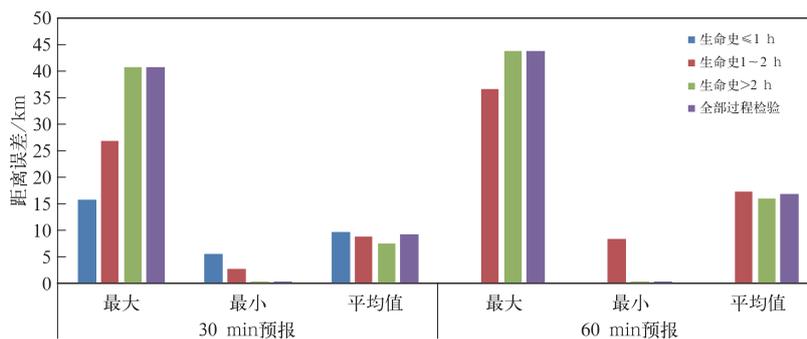


图 3 2009—2016 年河南省强对流过程不同时效不同生命史风暴追踪信息距离误差综合图
 Fig. 3 Distance errors of tracking information for different life-cycle storms of severe convection processes in Henan during 2009—2016

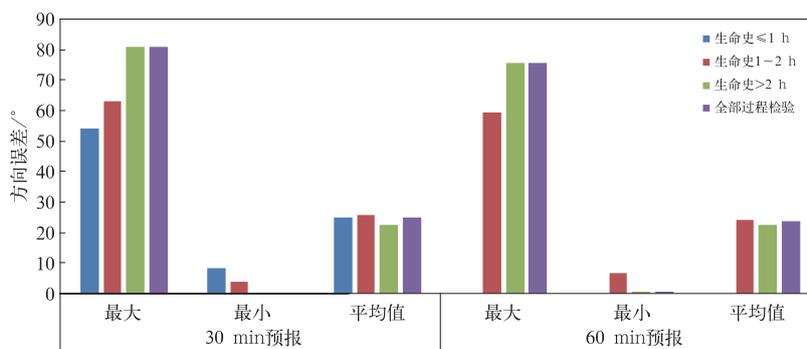


图 4 同图 3, 但为方向误差
 Fig. 4 Same as Fig. 3, but for direction errors

别为 81.2°、0.2°、22.9°。从表 1 中可以看出,随着单体生命史的延长,30 和 60 min 预报时效方向和距离误差基本呈减小趋势,平均而言,生命史 ≤ 1 h、1 ~ 2 h 和 > 2 h 的 30 min 预报平均距离误差从 9.8、8.8 km 逐渐减小到 7.7 km,方向误差分别为 25.2°、25.7°、22.8°;生命史在 1 ~ 2 h 和 > 2 h 的 60 min 预报平均距离误差由 17.3 km 减小到

15.9 km,方向误差由 24.4°减小到 22.7°。

2.3 不同天气形势单体风暴追踪的误差分析

为了分析风暴追踪信息与天气类型的关系,将 59 次强对流天气过程分为西北气流型(相对于的环境条件,回波单体多自西北向东南或自北向南方向移动)和西南气流型(相对暖湿的环境条件,回波单

体多自西南向东北或自南向北方向移动)两种类型,并分别统计了各型不同生命史和不同预报时效的平均距离和平均方向误差。

表 1 2009—2016 年河南省强对流过程不同生命史风暴追踪信息距离误差和方向误差
Table 1 The distance and direction errors of tracking information for different life-cycle storms of severe convection processes in Henan during 2009—2016

生命史	30 min 预报		60 min 预报	
	方向误差 /°	距离误差 /km	方向误差 /°	距离误差 /km
$t \leq 1$ h	25.2	9.8		
$1 \text{ h} < t \leq 2$ h	25.7	8.8	24.4	17.3
$t > 2$ h	22.8	7.7	22.7	15.9
平均	25.2	9.3	23.9	16.9

表 2 同表 1, 但为不同类型强对流过程
Table 2 Same as Table 1, but for different types of severe convection processes

分类	生命史	30 min 预报		60 min 预报	
		方向误差 /°	距离误差 /km	方向误差 /°	距离误差 /km
西北气流	$t \leq 1$ h	25.5	10.1		
	$1 \text{ h} < t \leq 2$ h	25.4	9.2	24.0	18.6
	$t > 2$ h	21.9	7.4	22.1	15.9
	平均值	25.1	9.5	23.5	17.8
西南气流	$t \leq 1$ h	25.1	9.7		
	$1 \text{ h} < t \leq 2$ h	25.8	8.7	24.4	17.0
	$t > 2$ h	23.1	7.7	22.8	16.1
	平均值	25.2	9.2	24.0	16.8

从表 2 不同类型强对流过程不同生命史风暴追踪信息距离、方向误差分析来看,西北气流型和西南气流型两种类型随着单体生命史的延长,方向和距离误差均呈减小趋势,随着预报时效延长,距离误差均增大,即无论是否分强对流过程类型总的变化趋势与上述一致。两种类型比较而言,30 和 60 min 方向和距离误差基本相当,西北、西南两种 30 min 距离误差分别为 9.5、9.2 km,方向误差分别为 25.1°、25.2°; 60 min 距离误差分别为 17.8、16.8 km,方向误差分别为 23.5°、24.0°。总体来看,西北气流型和西南气流两种类型回波单体 30、60 min 方向和距离误差基本相当。

2.4 单体风暴追踪偏离方向误差初步分析

前面分析的方向误差均为预报路径和实况路径角度差的绝对值,为了分析实况路径与预报路径的

偏离方向,按 1.2 中规定方案计算并统计了 2009—2016 年风暴偏右和偏左的次数。研究表明,小尺度风暴趋向于随平均风移动而较大尺度的风暴移动缓慢且有向平均风右侧移动的趋势(陈明轩等,2004)。朱君鉴等(2004)对一次冰雹风暴的 CINRAD/SA 产品分析,发现初生阶段和消散阶段风暴运动方向与承载层环境风方向接近,在风暴发展旺盛阶段,由于风暴的右移运动,风暴运动方向偏向承载层环境风方向的右方。由于 STI 是根据风暴的过去位置外推预报未来位置,因此初生阶段 STI 的预报位置偏向风暴实际运动位置的左侧,风暴发展成熟阶段 STI 的预报位置与风暴实际位置接近,消散阶段 STI 的预报位置偏向风暴实际运动的右侧。由统计结果(图 5)可以看出,无论是西北、西南气流型还是总体次数,对 30、60 min 不同预报时效来说,均为实况偏于预报路径右侧的次数多于偏左的次数。从图 6 偏右次数占同类总次数的百分比来看,30 min 预报时效实况偏右次数仅在 55.4% ~ 56.5%, 60 min 预报时效实况偏右比例较 30 min 略高,但

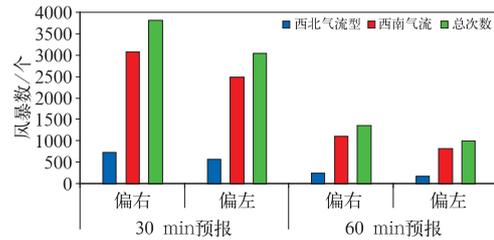


图 5 2009—2016 年河南省不同类型强对流过程 30 和 60 min 方向偏差个数
Fig. 5 Numbers of 30 and 60 min right or left avertence of different convection processes in Henan during 2009—2016

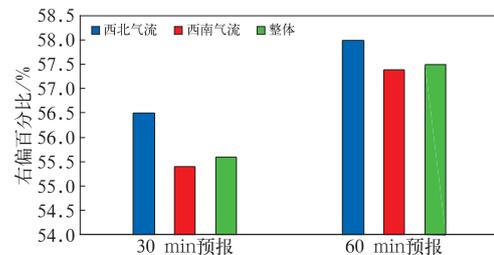


图 6 2009—2016 年河南省不同类型强对流过程 30 和 60 min 偏右百分比
Fig. 6 The 30 and 60 min right avertence percentages of different convection processes in Henan during 2009—2016

也仅在 57.4%~58.0%,整体不足 60%,较偏左次数无显著优势也即偏右次数略多于偏左次数(图略)。整体平均 30、60 min 偏右比例分别为 57.5% 和 55.6%。

3 结论与讨论

本文利用郑州新一代天气雷达投入业务运行以来积累的河南强对流天气过程资料,对雷达风暴追踪产品进行了统计分析,检验不同生命史、不同预报时效内河南强对流风暴的移向移速误差以及风暴追踪产品在河南省分类强对流天气短时临近预报预警中的应用,对该产品在河南省应用情况进行较为客观评价,给出如下评估结论:

(1) 从 30、60 min 不同预报时效平均结果比较来看,随着预报时效的延长,距离误差增大,30、60 min 距离误差分别为 9.3、16.9 km;而方向误差变化不大,且随预报时效的延长略有减小,由 30 min 的 25.2°减小至 60 min 的 23.9°。

(2) 生命史 ≤ 1 h、1~2 h 和 > 2 h 的 30 min 预报平均距离误差分别为 9.8、8.8、7.7 km,方向误差分别为 25.2°、25.7°、22.8°;生命史在 1~2 h 和 > 2 h 的 60 min 预报平均距离误差分别为 17.3、15.9 km,方向误差为 24.4°、22.7°,随着单体生命史的延长,方向和距离误差呈减小趋势。

(3) 不同类型强对流过程不同生命史风暴追踪信息距离、方向误差分析来看,西北气流型、西南气流型两种类型和整体误差一致,随着单体生命史的延长,方向和距离误差均呈减小趋势,随着预报时效延长,距离误差均增大。总体来看,两种类型 30、60 min 方向和距离误差基本相当。

(4) 无论西北、西南气流型、总体次数还是 30、60 min 不同预报时效,上述情况均为实况偏于预报路径右侧的次数多于偏左的次数。30 min 预报时效实况偏右次数比例在 55.4%~56.5%,60 min 预报时效实况偏右比例较 30 min 略高,在 57.4%~58.0%。整体平均 30、60 min 偏右比例分别为 57.5% 和 55.6%。以上统计结果可能与受地转偏向力的作用,北半球水平运动的物体向右偏转有关系。王福侠等(2014)指出,在北半球,气旋式旋转的右移超级单体风暴比反气旋式旋转的左移超级单体风暴出现的频率大得多。从本文分析的平均状况来看,实况偏于预报路径右侧的比例并没有比偏于左

侧的比例大很多,这在很大程度上与天气影响系统,特别是地面高温、高湿有利于风暴发展的中尺度高能区等有关。

(5) 尽管本文对 2009—2016 年河南省批量个例风暴追踪产品进行了统计分析,得出了定量的检验结论。但由于资料量较大,选取的各种类型的风暴个例没有通过雷达基本反射率因子进行人工核查,风暴单体为新一代天气雷达自动识别和生成的 STI 产品,在检验的个例中或多或少包含无效的风暴单体,从实际业务应用方面来看,本文对风暴追踪产品的误差统计和分析结论应该有一定的参考价值。河南处于南北气候过渡带,夏季局地性、突发性的剧烈灾害性强对流天气多发,单体回波生消演变迅速,目前实际业务中,由于新一代天气雷达具有高时空分辨率的特点,在强对流天气短时临近预报预警中仍然发挥着无可替代的优势作用,其常用产品除了基本反射率因子、平均径向速度、中气旋、龙卷涡旋特征、垂直积分液态水含量和回波顶高等产品外,风暴追踪信息产品对判断和估计未来 30、60 min 单体回波的位置有很好的参考作用,该产品与基本反射率因子产品叠加其应用效果更加明显。以上统计分析结果对基于新一代天气雷达的分类强对流天气临近预报具有较大参考价值,预报员可依据上述结论,主观或客观订正风暴追踪产品,以便预报更接近于风暴单体未来移动实况,从而提高河南省强对流天气预报的精细化水平和预警准确率。

致谢: 本文对俞小鼎教授指导深表谢意!

参考文献

- 陈明轩,俞小鼎,谭晓光,等,2004. 对流天气临近预报技术的发展与研究进展[J]. 应用气象学报,15(6):754-766.
- 方翀,郑媛媛,2007. 新一代天气雷达中气旋产品特征值统计和个例分析[J]. 气象,33(11):16-20.
- 冯晋勤,汤达章,俞小鼎,等,2010. 新一代天气雷达中气旋识别产品的统计分析[J]. 气象,36(8):47-52.
- 韩雷,王洪庆,谭晓光,等,2007. 基于雷达数据的风暴体识别、追踪及预警的研究进展[J]. 气象,33(1):3-10.
- 胡胜,罗兵,黄晓梅,等,2010. 临近预报系统(SWIFT)中风暴产品的设计及应用[J]. 气象,36(1):54-58.
- 吕晓娜,牛淑贞,袁春风,等,2013. SWAN 中定量降水估测和预报产品的检验与误差分析[J]. 暴雨灾害,32(2):142-150.
- 牛淑贞,鲍向东,乔春贵,等,2008. 强对流风暴新一代雷达产品特征分析[J]. 气象,34(7):92-100.
- 牛淑贞,张一平,席世平,等,2012. 基于加密探测资料解析 2009 年 6 月 3 日商丘强飑线形成机制[J]. 暴雨灾害,31(3):255-263.

- 王福侠,俞小鼎,闫雪瑾,2014.一次超级单体分裂过程的雷达回波特征分析[J].气象学报,72(1):152-167.
- 吴芳芳,俞小鼎,张志刚,等,2012.对流风暴内中气旋特征与强烈天气[J].气象,38(11):1330-1338.
- 杨引明,1999.WSR-88D多普勒天气雷达冰雹探测算法及评价[J].气象,25(5):39-43.
- 俞小鼎,姚秀萍,熊廷南,等,2006a.多普勒天气雷达原理与业务应用[M].北京:气象出版社.
- 俞小鼎,郑媛媛,张爱民,等,2006c.安徽一次强烈龙卷的多普勒天气雷达分析[J].高原气象,25(5):914-924.
- 俞小鼎,郑媛媛,廖玉芳,等,2008.一次伴随强烈龙卷的强降水超级单体风暴研究[J].大气科学,32(3):508-522.
- 俞小鼎,张爱民,郑媛媛,等,2006b.一次系列下击暴流事件的多普勒天气雷达分析[J].应用气象学报,17(4):385-393.
- 俞小鼎,周小刚,王秀明,2012.雷暴与强对流临近天气预报技术进展[J].气象学报,70(3):311-337.
- 张一平,俞小鼎,孙景兰,等,2014.一次槽后型大暴雨伴冰雹的形成机制和雷达观测分析[J].高原气象,33(4):1093-1104.
- 张一平,俞小鼎,吴葵,等,2012.区域暴雨过程中两次龙卷风事件分析[J].气象学报,70(5):961-973.
- 郑媛媛,俞小鼎,方翀,等,2004.2003年7月8日安徽系列龙卷的新一代天气雷达分析[J].气象,30(1):38-40,45.
- 郑媛媛,张备,王啸华,等,2015.台风龙卷的环境背景和雷达回波结构分析[J].气象,41(8):942-952.
- 钟敏,吴翠红,王珊珊,等,2012.CINRAD/SA雷达两种识别跟踪产品的评估分析[J].气象,38(6):722-727.
- 朱君鉴,刁秀广,黄秀韶,2004.一次冰雹风暴的CINRAD/SA产品分析[J].应用气象学报,15(5):579-589.
- Johnson J T, MacKeen P L, Witt A, et al, 1998. The storm cell identification and tracking algorithm: an enhanced WSR-88D algorithm[J]. Wea Forecasting, 13(2):263-276.