

# 基于雷达三维组网数据的对流性 地面大风自动识别<sup>\*1</sup>

李国翠<sup>1</sup> 刘黎平<sup>2</sup> 张秉祥<sup>1</sup> 于楠<sup>1</sup> 常山英<sup>1</sup>  
LI Guocui<sup>1</sup> LIU Liping<sup>2</sup> ZHANG Bingxiang<sup>1</sup> YU Nan<sup>1</sup> CHANG Shanying<sup>1</sup>

1. 河北省石家庄市气象局,石家庄,050081

2. 中国气象科学研究院灾害天气国家重点实验室,北京,100081

1. *Shijiazhuang Meteorological Bureau Hebei Province, Shijiazhuang 050081, China*

2. *State Key Lab of Severe Weather, Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081, China*

2013-04-07 收稿,2013-07-15 改回.

李国翠,刘黎平,张秉祥,于楠,常山英. 2013. 基于雷达三维组网数据的对流性地面大风自动识别. 气象学报, 71(6): 1160-1171

Li Guocui, Liu Liping, Zhang Bingxiang, Yu Nan, Chang Shanying. 2013. Automatic identification of ground thunderstorm gale based on the radar mosaic 3D data. *Acta Meteorologica Sinica*, 71(6): 1160-1171

**Abstract** Based on the radar mosaic 3D data and ground automatic wind data, the six main radar identification indices of ground thunderstorm gale are statistically analyzed; storm maximum reflectivity, storm maximum vertical integrated liquid water content (VIL), time change rate of vertical integrated liquid water, dropping height of the storm maximum reflectivity, storm body movement speed and VIL density. According to the correlation of the radar identification index with surface wind, membership functions and weighting coefficients of each identification index are given. Adopting the unequal weighting method, an identification method of thunderstorm gale based on the fuzzy-logical principle is established. It has been distinguished into three levels according to the probabilities in the paper: the probability of the occurrence of thunderstorm gale is low when the criterion used in the method is less than 0.3; the probability of gale is high when the criterion is between 0.3-0.5; the probability leads to being very high when the criterion rises to more than 0.5. Two typical cases in Hebei Province are analyzed and tested, one caused by a line thunderstorm which happened on 21 June 2012, and the other caused by an isolated single-cell storm which happened on 23 July 2009. The results show that the tracking effect of this method to identified storm is good, the identified wind range is consistent with the real one, and the hit rate, the false alarm rate and the critical success index reaches 81.8%, 25% and 64.3%, respectively. It also shows that the automatic identification established by the fuzzy-logic principle is feasible.

**Key words** Ground thunderstorm gale, Automatic identification, Doppler radar, Fuzzy-logical principle

**摘要** 应用雷达三维组网数据和地面加密自动站风场资料,统计分析了对流性地面大风的6个主要雷达识别指标:风暴最大反射率因子、风暴最大垂直积分液态水含量、垂直积分液态水含量随时间变率、风暴最大反射率因子下降高度、风暴体移动速度和垂直积分液态水含量密度等参数。根据雷达识别指标和地面大风的相关程度,给出了识别指标的隶属函数和权重系数;采用不等权重法,建立了具有模糊逻辑的对流性地面大风识别方法。并将对流性地面大风的出现概率分为3级:当识别风暴单体的判据小于0.3时,出现对流性地面大风的概率小;当判据在0.3—0.5时,产生对流性地面大风的概率较大;当判据大于0.5时,出现对流性地面大风的概率很大。通过对河北省2012年6月21日线状风暴和2009年7月23日孤立单体风暴引

\* 资助课题:河南省电力公司电力科学研究院项目“雷达局部灾害性天气临近预警技术在电网的推广应用”、公益性行业(气象)专项(GY-HY200906011、GYHY201006005)、中国气象局重点工程项目“新一代天气雷达建设业务软件系统开发项目”、河北省气象局科研项目(13ky04、13ky24)和河北省气象局暴雨和强对流创新团队项目。

作者简介:李国翠,主要从事雷达、GPS资料的天气应用。E-mail:liguocui@sina.com

发的灾害大风典型个例的识别效果检验,证明这种方法识别到的风暴单体跟踪效果良好,识别出的大风范围与实况风场基本吻合,命中率、虚警率和临界成功指数分别达 81.8%、25.0%和 64.3%,利用模糊逻辑原理建立对流性大风的识别算法是切实可行的。

**关键词** 对流性地面大风,自动识别,多普勒雷达,模糊逻辑原理

**中图法分类号** P412.25

## 1 引言

大风天气是中国主要的灾害性天气之一,对流性地面大风突发性强,强度大,破坏力强,防御时间短,常对工农业生产、交通运输和人民生活造成极大危害。中外学者在灾害性大风天气的预报、预警方面做了大量研究。在对流性地面大风相关的雷达参数方面,Johns等(1987)指出,弓形回波是产生地面非龙卷风害的典型回波结构;Darrah(1978)分析了强对流天气与回波顶的关系,认为冰雹比龙卷风的回波顶高,而雷暴大风回波顶高相对较低;俞小鼎等(2012)指出,雷暴大风的临近预报主要基于多普勒天气雷达回波特征,而中层径向辐合和弓形回波是指示雷暴大风出现的主要回波特征;东高红等(2007)统计了垂直积分液态水含量(VIL)在地面灾害性大风中的演变。结果表明,垂直积分液态水含量达到  $30 \text{ kg/m}^2$  是地面灾害性大风出现的阈值,不小于  $40 \text{ kg/m}^2$  可以作为地面灾害性大风的一个预报指标;刁秀广等(2009)分析风暴结构产品在大风预警中的应用时指出,地面出现大风前,部分强单体具有垂直积分液态水含量和单体强中心高度同步下降现象,同步下降现象的特征表现为强中心高度下降  $2 \text{ km}$  以上,垂直积分液态水含量至少减少  $10 \text{ kg/m}^2$ ,大风预测时间提前量  $0-9 \text{ min}$ ;王凤娇等(2006)探讨了低层辐合带与飚线雷雨大风的关系,结果表明,其尺度大小、最大出流速度及相对影响的方位可应用于雷雨大风临近预报;王珏等(2009)分析鄂东地区雷雨大风的多普勒雷达速度场资料时得出,速度图上灾害性大风有两个基本特征:一是存在于相对孤立风暴内的小尺度大风核,二是弓状回波后的大风区或尾部入流急流;周金莲等(2011)分析了对流性大风风暴的雷达回波特征,指出此类风暴具有较强的反射率因子核心、较高的垂直积分液态水含量中心及较快的移动速度、低层小尺度辐散风场、反射率因子核心高度的下降和中层径向辐合等。在对流性地面大风预警业务系统方面,周金莲等

(2011)应用短时临近预报、预警业务系统生成的 TITAN 产品,提出了 6 个候选识别参数,对武汉新一代天气雷达用模糊逻辑等权重法识别对流性大风;廖玉芳等(2006)对湖南常德多普勒天气雷达产品的强对流天气预报、预警方法进行研究,建立了基于雷达回波形状、强对流天气强度场特征、垂直积分液态水含量、强对流天气风场特征等因子的预报、预警数学模型。上述研究主要针对单部多普勒新一代天气雷达的二次产品,雷达数据的提取主要依靠预报员的主观定性识别。目前还没有形成利用雷达基数据自动识别地面灾害性大风的方法或系统,尤其是基于三维组网新一代天气雷达数据的自动识别。

本研究应用华北区域新一代多普勒天气雷达基数据和地面加密自动站风场资料,利用中国气象科学研究院灾害天气国家重点实验室开发的三维组网拼图软件,形成华北区域的雷达回波拼图资料。进而根据风暴单体识别和跟踪(The Storm Cell Identification and Tracking, SCIT)算法(杨吉等,2012),对雷达三维组网拼图数据的风暴单体自动识别和跟踪,对影响地面短时大风的雷达识别指标进行了统计分析。对雷暴大风和识别指标进行相关分析的同时,采用不等权重法建立了模糊逻辑隶属函数的综合预报方程,实现了对流性地面大风的实时自动识别。通过对河北省 2012 年 6 月 21 日线状风暴和 2009 年 7 月 23 日孤立单体风暴引发的典型灾害大风个例的识别检验,证明这种识别算法是切实可行的。这将为延长对流性地面大风短时临近预报预警提前量,尽可能减少大风灾害起到一定的积极作用。

## 2 对流性地面大风识别指标

对流性地面大风一般是由一个或多个对流风暴单体造成的,大面积层状云降水中很少出现地面大风。因此,要识别对流性地面大风,首先需要识别和跟踪对流风暴单体。利用三维格点风暴单体识别和跟踪算法,识别、跟踪和计算出风暴单体的各个参

数,确定逐个体扫中所有风暴单体所在位置、底部和顶部高度、基于单体的垂直积分液态水含量、强中心高度及强度等具体的风暴结构参数值。采用模糊逻辑原理(Kessinger, et al, 2003; 刘黎平等, 2007),从雷达回波拼图资料中提取出用于区分产生对流性地面大风和不产生地面大风两种不同雷达回波的物理量,建立对流性大风的实时自动识别算法。利用雷达逐个体扫资料统计上述各参数的分布概率特征,最终确定与对流性地面大风相关系数的大小。将概率分布密度较为集中的参数作为模糊逻辑法识别对流性大风天气的指标。

## 2.1 识别指标

### 2.1.1 风暴最大反射率因子

风暴最大反射率因子( $R_{Max}$ )是指一个体积扫描中风暴不同高度投影的反射率因子最大值,反映风暴内部下沉气流。下沉气流与散射粒子的大小有关,粒子越大产生的下沉气流越强。风暴最大反射率因子强度是产生对流性地面大风的重要因子。廖玉芳等(2006)统计分析了湖南常德新一代天气雷达观测到的强对流天气过程,认为当回波中心强度小于55 dBz时,出现大风的概率较小;当回波强度为55—60 dBz时,概率较大;当回波中心强度为60—65 dBz时,概率很大;回波中心强度高于65 dBz时,出现大风的概率最大。据文献统计和短时临近预报、预警经验发现,当风暴单体反射率因子高于40 dBz时,产生对流性地面大风的概率开始增大;而当风暴单体反射率因子高于60 dBz时,大多数风暴单体对应地面大风出现。

### 2.1.2 风暴最大垂直积分液态水含量

风暴最大垂直积分液态水含量( $q_{Max}$ )定义为雷达能够探测到的大气单位面积柱体内的可降水质量之和。假设反射率因子完全是液态水散射得到的,则由反射率因子数据转换成的等价最大垂直积分液态水含量的计算式为

$$q_{Max} = \sum_{i=1}^{N-1} 3.44 \times 10^{-6} \times \left( \frac{Z_i + Z_{i+1}}{2} \right) \Delta h_i \quad (1)$$

式中, $Z_i$ 为第*i*层高度上的雷达反射率因子, $\Delta h_i$ 为第*i*层和第*i*+1层的高度差, $N$ 为高度层数。最大垂直积分液态水含量是对风暴单体中计算得到的垂直积分液态水含量进行比较,挑选出最大值。计算过程中分辨率为1 km×1 km,去掉原业务产品中18 dBz的反射率因子阈值设定,这样计算得到的液

态水含量分辨率更高,利于大风的识别。

根据东高红等(2007)结论,垂直积分液态水含量达到30 kg/m<sup>2</sup>则为地面灾害大风出现的阈值,而垂直积分液态水含量不小于40 kg/m<sup>2</sup>可以作为地面灾害大风的预报指标;廖玉芳等(2006)分析湖南常德雷达资料得出,根据垂直积分液态水含量与大风的对应关系,按照概率从低到高分4个等级,分别对应0—40、40—45、45—50和50 kg/m<sup>2</sup>以上的标准。通过统计分析风暴单体识别和跟踪算法输出结果与地面大风个例的对应关系,发现当风暴最大垂直积分液态水含量超过30 kg/m<sup>2</sup>时,产生对流性地面大风的概率开始增大;而当风暴单体最大垂直积分液态水含量超过45 kg/m<sup>2</sup>时,出现地面大风的概率会更大。

### 2.1.3 垂直积分液态水含量随时间变率

垂直积分液态水含量随时间变率( $\Delta q$ )也是判断大风有无的重要参数之一。垂直积分液态水含量随时间变率是指当前体扫识别出的风暴单体的最大垂直积分液态水含量与前一体扫最大垂直积分液态水含量的差值。计算公式为

$$\Delta q = q_{Max_i} - q_{Max_{i-1}} \quad (2)$$

式中, $q_{Max_i}$ 和 $q_{Max_{i-1}}$ 分别代表当前和前一个体扫最大垂直积分液态水含量。

东高红等(2007)分析天津塘沽地面大风个例后总结出,垂直积分液态水含量达到最大后的快速减小意味着地面灾害大风的开始,垂直积分液态水含量快速减小后的突然跃增(回波对流发展强盛的表现)是灾害大风开始的标志;刁秀广等(2009)指出,强单体垂直积分液态水含量和中心高度同步下降是地面大风的前兆。强中心高度下降2 km以上,垂直积分液态水含量至少减少10 kg/m<sup>2</sup>,是大风提前0—9 min预报的指标。据统计分析,当最大垂直积分液态水含量 $\geq 40$  kg/m<sup>2</sup>,且两个体扫周期内垂直积分液态水含量随时间变率大于5 kg/m<sup>2</sup>时,出现地面大风的概率开始增大;当两个体扫周期内最大垂直积分液态水含量快速减小10 kg/m<sup>2</sup>以上时,出现对流性大风的可能性则会很大。

### 2.1.4 风暴最大反射率因子下降高度

风暴最大反射率因子下降高度( $H_{DCR}$ )是指同一风暴单体强中心当前体扫的反射率因子高度与前一体扫反射率因子高度的差值。朱君鉴等(2008)分析山东临沂罕见灾害性大风的雷达回波时总结出,

当风暴最大反射率因子所在高度快速下降但风暴最大反射率因子增大时,地面可能会出现灾害性大风。周金莲等(2011)分析武汉市地面大风个例后认为,风暴强中心高度下降越快,则下沉气流越强,产生大风的可能性也越大;东高红等(2007)认为,风暴及地前回波反射率因子核心的快速降低,预示地面灾害性大风的开始。本研究认为,风暴最大反射率因子下降高度需要和风暴中心强度综合判别,当风暴最大反射率因子高于 40 dBz 的阈值时,才有必要计算风暴最大反射率因子下降高度。如果两个体扫周期内最大反射率因子下降高度大于 5 km,产生对流性大风的可能性开始增大;而当两个体扫周期内最大反射率因子下降高度大于 7 km 时,认为产生地面大风的概率更大。

### 2.1.5 风暴体移动速度

风暴体移动速度可以通过计算相邻两个体扫风暴中心的位移得到

$$\begin{aligned} \Delta x &= \Delta \lambda \times R_0 \times \cos \varphi \\ \Delta y &= \Delta \varphi \times R_0 \\ v &= \frac{\sqrt{\Delta x^2 + \Delta y^2}}{t_i - t_{i-1}} \end{aligned} \quad (3)$$

式中, $v$  为风暴体移动速度 (km/h),  $\Delta \lambda$ 、 $\Delta \varphi$  分别为风暴经、纬度位移 ( $^\circ$ ),  $R_0$  为地球半径 (km),  $\varphi$  为风暴中心初始纬度,时刻  $t_i$  和  $t_{i-1}$  单位为 h。

雷暴在初生、发展阶段移动较慢,成熟和减弱阶段因地面冷外流的影响风暴移动加快,尤其是快速移动的飑线(周金莲等,2011);伍志方等(2004)认为,快速移动的回波对雷雨大风产生非常有利,98%雷雨大风的回波移速大于 60 km/h。本研究认为,当回波移速超过 40 km/h 时,出现对流性地面大风的概率开始增大;而当回波移速超过 60 km/h 时,出现灾害性大风的概率更大。

### 2.1.6 垂直积分液态水含量密度

Amburn 等(1997)定义垂直积分液态水含量与风暴顶高度之比为垂直积分液态水含量密度 ( $\rho_{VIL}$ )。其研究表明,垂直积分液态水含量密度可以很好地指示大冰雹。如果垂直积分液态水含量密度超过 4 g/m<sup>3</sup> 时,则风暴几乎肯定会产生直径超过 2 cm 的大冰雹。因为大的反射率因子值表明强上升气流的存在,而冰雹生长区更低则使得冰雹落地之前的融化过程缩短。本研究试图将垂直积分液态水含量密度作为短时大风预报的因子之一,并将垂直积分液

态水含量密度大于 3 g/m<sup>3</sup> 作为对流性大风预警的临界指标,而垂直积分液态水含量密度超过 4 g/m<sup>3</sup> 时大风出现的概率将更大。

需要说明的是,以上 6 个雷达识别指标是基于雷达三维组网数据计算得到的,单部雷达和多部雷达的拼图均适用。

## 2.2 隶属函数

根据已有的工作和上述识别参数的特征,总结出风暴最大反射率因子、风暴最大垂直积分液态水含量、垂直积分液态水含量随时间的变率、风暴最大反射率因子下降高度、风暴体移动速度、垂直积分液态水含量密度 6 个物理量的隶属函数,并对这些物理量进行模糊化处理,得到了所有物理量对于雷暴大风的 0—1 取值范围的隶属函数。

图 1 给出了对流性地面大风各识别指标的模糊逻辑隶属函数。某风暴单体的隶属函数值越大,对应出现对流性地面大风的可能性就会越大。

## 2.3 定量识别判据

对以上 6 个判据进行加权累加,计算对流性地面大风的条件概率

$$P = \sum_{j=1}^n \omega_j p_j \quad (4)$$

式中,  $\sum_{j=1}^n \omega_j = 1$ ,  $j$  为各个识别指标,  $n$  是输入变量的个数,  $p_j$  为第  $j$  个识别指标对大风识别的贡献,等于相应的隶属函数值,  $\omega_j$  为第  $j$  个识别指标的权重,  $P$  为发生对流性地面大风判据。

采用不等权重法,将风暴最大反射率因子和风暴最大垂直积分液态水含量的权重系数取为 0.3,随时间变率、风暴最大反射率因子下降高度、风暴体移动速度和垂直积分液态水含量密度的权重系数取为 0.1,加权累加最终得到对流性地面大风判据。当某回波单体的大风判据超过事先给定的阈值时,该单体就被识别出来。根据统计和实际预报经验,将对流性地面大风的出现概率分为 3 级:  $P < 0.3$ , 出现对流性地面大风的概率小;  $0.3 \leq P < 0.5$ , 出现大风的概率较大;  $P \geq 0.5$ , 出现大风的概率很大。需要说明的是,每个体扫时次被识别到的每个回波单体对应着一个识别结果。

## 3 资料选取和地面大风的定义

雷达资料采用的是北京、天津、石家庄、秦皇岛、

张北和承德6部新一代多普勒天气雷达拼图数据,水平分辨率为 $0.01^{\circ} \times 0.01^{\circ}$ ,时间分辨率为6 min;地面风资料采用的是加密自动站风向和风速资料,时间分辨率为5 min,要素包括2 min风向和风速、10 min风向和风速、最大风速和风向、瞬时风向和风速以及极大风风向和风速。从原则上讲,用极大风速作为标准判断大风的有无最为合适,但由于极大风速选取的是1 h内的极大值,时间分辨率无法满足要求,所以,只能采用瞬时风资料取代。

地面灾害性短时大风的发报标准是瞬时极大风速 $\geq 17$  m/s。一般来说,当瞬时风速不低于13.9 m/s(7级)时就很容易出现短时地面大风。2012年6月21日河北省大风灾害报(图2a)和加密自动站瞬时风速 $\geq 13.9$  m/s的站点(图2b)出现的位置和范围基本相同,也充分验证了这种说法。所以,选取的大风资料包括瞬时极大风速 $\geq 17$  m/s(大风灾害报)和瞬时风速 $\geq 13.9$  m/s的资料的综合。

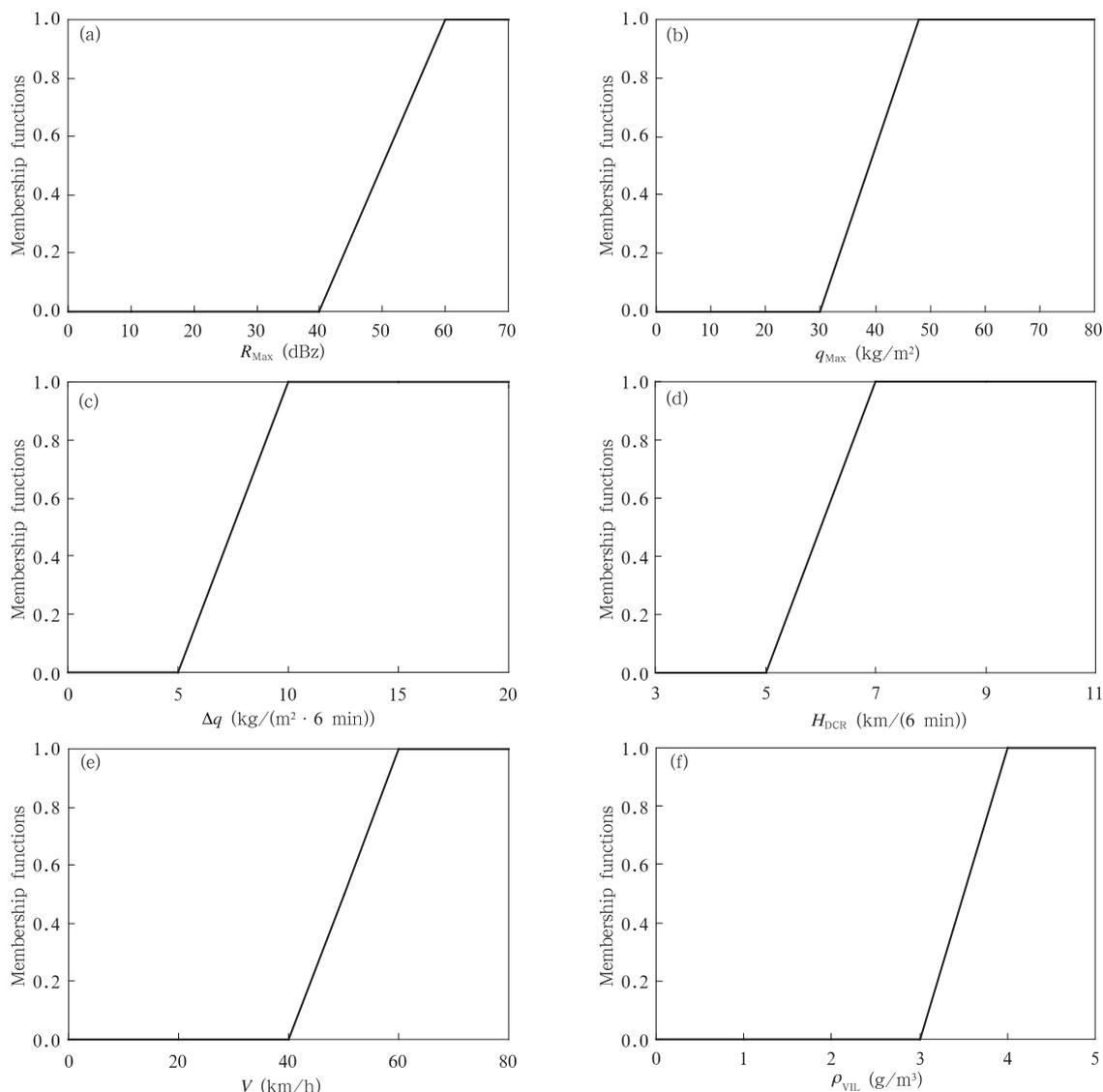


图1 对流性地面大风各个识别指标的隶属函数

(A.  $R_{\text{Max}}$ , b.  $q_{\text{Max}}$ , c.  $\Delta q$ , d.  $H_{\text{DCR}}$ , e.  $v$ , f.  $\rho_{\text{VIL}}$ )

Fig. 1 Membership functions of each identification index for ground thunderstorm gale

(A.  $R_{\text{Max}}$ , b.  $q_{\text{Max}}$ , c.  $\Delta q$ , d.  $H_{\text{DCR}}$ , e.  $v$ , f.  $\rho_{\text{VIL}}$ )

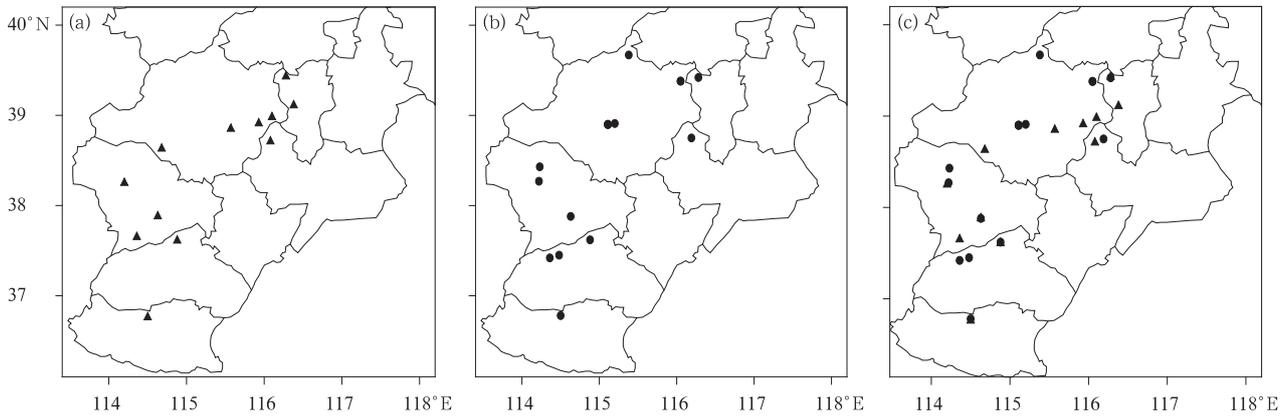


图2 2012年6月21日大风灾情分布

(a. 瞬时极大风速 $\geq 17$  m/s(灾害报), b. 瞬时风速 $\geq 13.9$  m/s, c. a + b)

Fig.2 Disaster distribution of thunderstorm gale on 21 June 2012

(a. instant maximum wind speed  $\geq 17$  m/s, b. instant wind speed  $\geq 13.9$  m/s, c. both a and b)

通过对比识别出的风暴单体和地面实况大风出现的位置和体扫时间,可以作为检验风暴单体识别地面大风准确与否的判据。根据灾害性天气评分原则(俞小鼎等,2006),采用命中率、虚警率和临界成功指数来计算识别的评分。如果二者对应,则认为识别正确;如果识别到的风暴单体没有对应大风出现,则认为虚警;如果大风出现的站点附近没有识别到风暴单体,则认为漏报。由于产生对流性地面大风的回波分为线状、带状和孤立单体等几类,本研究仅选取有代表性的线状风暴和孤立单体风暴两类分别进行检验。

#### 4 线状风暴识别检验

##### 4.1 灾害大风天气实况

2012年6月21日15—20时(北京时,下同),河北省出现一次雷暴、大风和冰雹等强对流天气过程。石家庄、邢台、邯郸、保定、沧州和廊坊等地的13个观测站出现了短时灾害性地面大风天气过程(图2c)。雄县瞬时极大风速达28 m/s(10级),安新风速21 m/s(9级),另外3个观测站还出现了冰雹。此次大风、冰雹等灾害性天气过程使大量农作物出现倒伏、树木被吹断,蔬菜大棚被吹毁,经济损失严重。

##### 4.2 对流性地面大风的识别检验

###### 4.2.1 总体识别检验

利用模糊逻辑建立的对流性地面大风自动识别算法,对6月21日15—20时京津冀雷达6 min 间

隔的拼图数据进行风暴跟踪和识别,定量计算逐个体扫识别到的所有风暴单体的识别判据。在51个时次的体扫中,累积识别出风暴单体767个。其中,识别判据 $P \geq 0.5$ ——即出现对流性地面大风概率很大的单体累计有23个,涉及到5个风暴单体; $0.3 \leq P < 0.5$ ——即出现对流性地面大风概率较大的有32个,涉及到17个风暴单体;其余712个出现对流

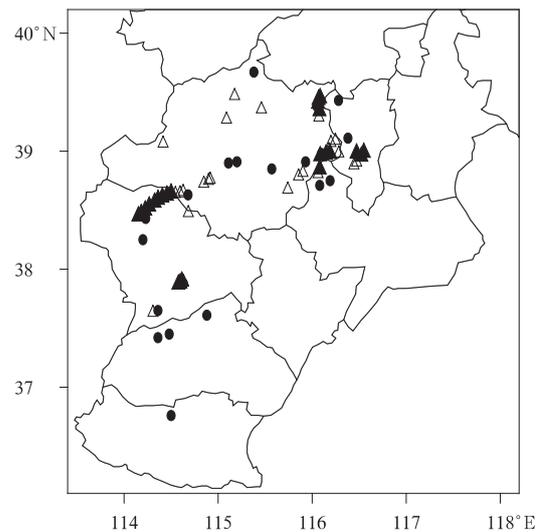


图3 识别出的可能出现大风的风暴单体与实况大风位置对比

(●为实况大风测站,△为 $0.3 \leq P < 0.5$  风暴单体,▲为 $P \geq 0.5$  风暴单体)

Fig.3 Comparison between real thunderstorm gale and identified thunderstorm cells

(●:real station of thunderstorm gale, △:  $0.3 \leq P < 0.5$  thunderstorm cells, ▲:  $P \geq 0.5$  thunderstorm cells)

性大风概率小。

图3为6月21日15—20时所有雷达拼图资料中被识别出的可能出现大风的风暴单体(包括 $0.3 \leq P < 0.5$ 出现大风概率较大的风暴单体和 $P \geq 0.5$ 出现概率很大的风暴单体)、实况地面灾害性大风(瞬时风速 $\geq 13.9$  m/s或瞬时极大风速 $\geq 17$  m/s)的位置对比。可以看出,根据阈值识别出的风暴单体出现的区域位于石家庄、保定和廊坊一带,实况灾害性大风出现的位置基本与之对应。从灾害性天气出现的范围上讲,识别效果还是基本满意的。

为进一步分析对流性地面大风的识别检验效

果,下面分别对大风识别的准确率进行统计,并对同时刻灾害大风和识别风暴对应情况作具体对比分析。

#### 4.2.2 统计分析

雷达体扫时间分辨率为6 min,地面加密风场时间分辨率为5 min。为分析同时刻雷达回波识别判据与灾害大风的对应关系,分析本次过程识别的误判和漏判,仅选取雷达和加密风场同时观测的时刻(即半小时时间间隔)加以对比统计。表1给出了6月21日15—20时大风的识别对比。

表1 识别出的可能出现大风的风暴单体和灾害大风测站

Table 1 The identified thunderstorm cells and the stations of real thunderstorm gale observed

识别风暴单体				实况风场		
时间	风暴编号	经度(°E), 纬度(°N)	大风判据	时间	风速(m/s)	站名(经度(°E), 纬度(°N))
15时00分	1601	114.152, 38.449	0.67	15时01分	17.2	平山(114.20, 38.25)
15时00分	1584	114.307, 37.647	0.35	15时03分	18.2	赞皇(114.36, 37.65)
				15时00分	12.8	曹川(114.36, 37.42)
15时30分	1601	114.361, 38.590	0.64	15时30分	11.2	五龙山庄(114.32, 36.95)
16时00分	1584	114.615, 37.896	0.54	16时00分	15.1	栾城(114.63, 37.88)
16时00分	1601	114.595, 38.659	0.45	16时00分	9.1	曲阳(114.68, 38.63)
				16时06分	17.0	曲阳(114.68, 38.63)
16时00分	1617	116.415, 41.103	0.39			
16时30分	1601	114.848, 38.741	0.31			
				17时00分	14.1	杨各庄(115.11, 38.90)
				17时32分	17.0	永年(114.50, 36.76)
19时00分	1760	116.062, 38.822	0.46	19时00分	14.9	东大坞闸所(116.19, 38.75)
19时00分	1705	115.901, 38.833	0.36	19时00分	8.4	任丘(116.10, 38.73)
				19时04分	21.0	安新(115.93, 38.91)
19时30分	1760	116.177, 39.025	0.45	19时30分	14.2	高官庄(116.05, 39.38)
20时00分	1782	116.523, 38.955	0.59			
20时00分	1759	116.068, 39.437	0.66	20时00分	14.5	固安(116.28, 39.42)
				20时00分	14.2	高官庄(116.05, 39.38)
				20时00分	10.0	涿州(116.03, 39.48)
				20时00分	10.2	高碑店(115.95, 39.32)
				20时05分	17.0	固安(116.28, 39.42)

6月21日15—20时,累计识别到可能出现大风的风暴单体(判据 $\geq 0.3$ )12个,其中,对应有大风出现的有9个,没有大风出现的有3个;实况风速 $\geq 13.9$  m/s的共有11个站,其中,9个站被识别有风暴单体相对应,2个站没有被识别出。这样,6月21日15—20时共有样本14个。在所有样本中,识别出风暴单体且对应有大风出现的有9个( $X$ ),识别出的风暴单体但没有观测到站点出现大风的3个( $Z$ ),实况观测到站点大风但风暴单体没有被识别的2个( $Y$ ),可得

$$\begin{cases} P_{OD} = \frac{X}{X+Y} = \frac{9}{9+2} = 81.8\% \\ R_{FA} = \frac{Z}{X+Z} = \frac{3}{9+3} = 25.0\% \\ I_{CS} = \frac{X}{X+Y+Z} = \frac{9}{9+2+3} = 64.3\% \end{cases} \quad (5)$$

式中, $P_{OD}$ 为命中率, $R_{FA}$ 为虚警率, $I_{CS}$ 为临界成功指数,分别为81.8%、25.0%、64.3%,说明识别效果尚可。

#### 4.2.3 同时刻效果检验

为检验同时刻对流性地面大风的识别效果,对

雷达拼图组合反射率因子、地面实况大风以及大风判据识别出的风暴单体进行了对比分析。图4为雷达组合反射率因子、实况地面大风以及大风判据的

三者叠加,图5为大风判据 $\geq 0.3$ 的风暴单体的位置和判据值(三角形和上标大风判据值)以及实况风速 $\geq 8$  m/s的站点(圆点和右侧标注风速

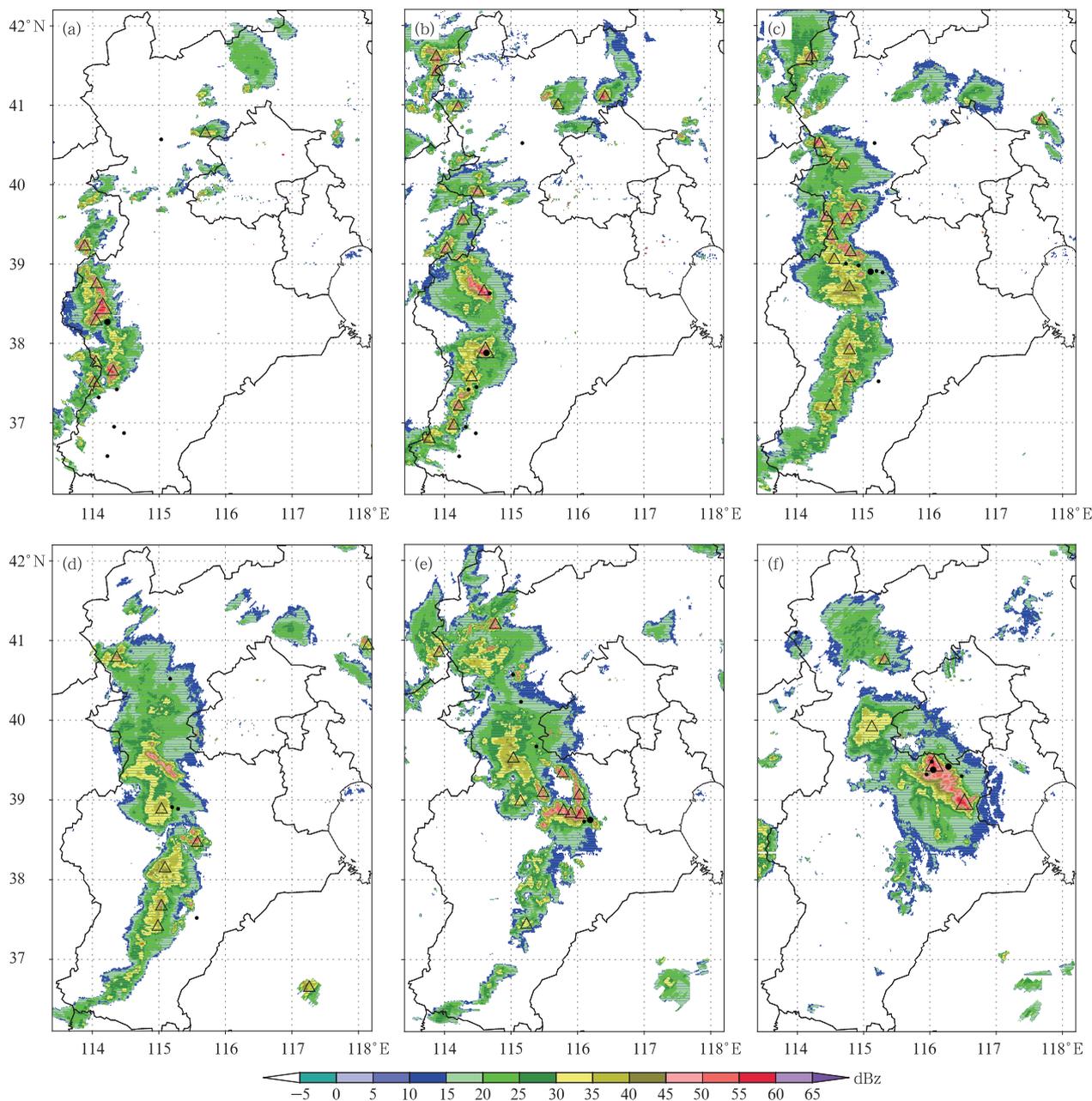


图4 2012年6月21日15—20时逐时(a—f)组合反射率因子(阴影)、大风判据和灾害大风测站  
 ( $\triangle$ :  $P < 0.3$  出现大风概率小的风暴单体,  $\triangle$ :  $0.3 \leq P < 0.5$  出现大风概率较大的风暴单体,  
 $\triangle$ :  $P \geq 0.5$  出现大风概率很大的风暴单体,  $\bullet$ : 5级以上大风测站,  $\bullet$ : 7级以上大风测站)

Fig. 4 Radar combination reflectivity factor (shaded), the stations of real thunderstorm gale observed and identified thunderstorm cells from 15:00 to 20:00 BT 21 June 2012 (a—f)

( $\triangle$ :  $P < 0.3$  low probability storm,  $\triangle$ :  $0.3 \leq P < 0.5$  high probability storm,  $\triangle$ :  $P \geq 0.5$  higher probability storm,  $\bullet$ : station with force-5 wind or larger,  $\bullet$ : station with force-7 wind or larger)

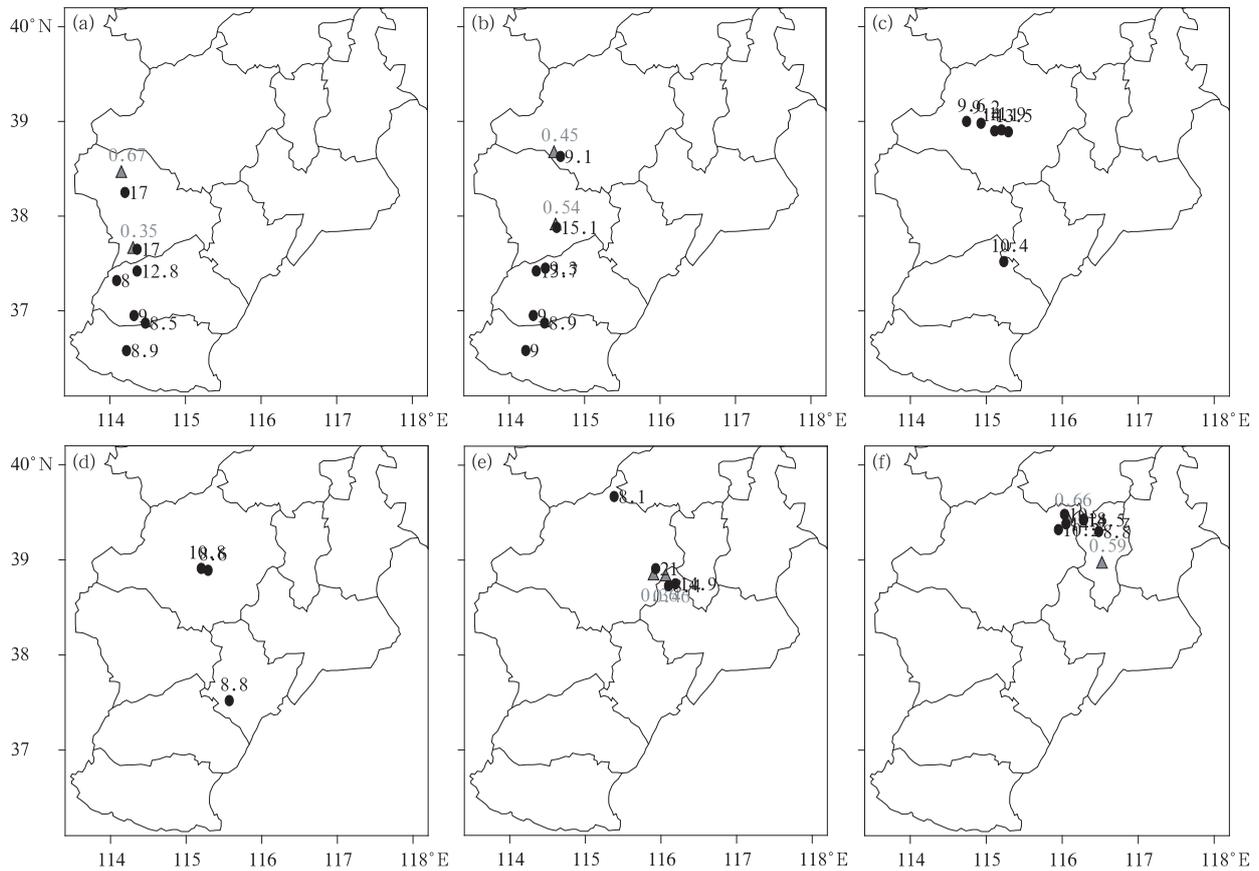


图5 2012年6月21日15—20时逐时(a—f)大风和风暴单体大风判据叠加

(▲:  $P \geq 0.3$  可能出现大风的风暴单体, ·: 5级以上大风测站, 数字是风速, 单位: m/s)

Fig. 5 Real thunderstorm gale observed and membership functions of identified thunderstorm from 15:00 BT to 20:00 BT 21 June 2012 (a—f)

(▲:  $P \geq 0.3$  high probability storm, ·: station with force-5 wind or larger, number is wind speed, unit: m/s)

值)的叠加。

6月21日15时根据风暴单体跟踪和识别算法,共识别出风暴单体10个。从大风判据分析得出,不可能产生大风的单体有8个,可能产生大风的单体有2个,其中,产生大风可能性很大的有1个。对应分析该时刻组合反射率因子、5级以上大风站点和风暴单体大风判据配置可以看出,位于(38.449°N, 114.152°E)的1601号风暴单体大风判据最大为0.67,与出现在石家庄平山的瞬时极大风速17.2 m/s的灾害性大风相邻;位于(37.647°N, 114.307°E)的1584号风暴单体大风判据为0.35,与出现在赞皇的18.2 m/s的灾害性大风以及出现在曹川的6级瞬时大风相对应。

16时共识别出风暴单体15个,从大风判据和

实况风速的对应关系可以看出,产生大风可能性很大的有1个,即位于(37.896°N, 114.615°E)的1584号单体;与此对应,栾城出现了瞬时风速为15.1 m/s的大风。产生大风可能性大的风暴单体有2个,即1617号(41.103°N, 116.415°E)和1601号(38.659°N, 114.595°E),前者无大风对应,后者在保定的曲阳对应9.1 m/s的瞬时风速,16时06分曲阳瞬时极大风速17 m/s,达到了灾害性短时大风标准。

17时识别出的风暴单体中,产生对流性地面大风的可能性都不大。但从地面加密风场实况看,在保定中部一带出现了短时大风,如位于(38.9°N, 115.11°E)的杨各庄出现了14.1 m/s的瞬时风,位于(38.89°N, 115.29°E)的段旺瞬时风速也达13.5

m/s, 辛庄子 ( $40.52^{\circ}\text{N}$ ,  $115.17^{\circ}\text{E}$ ) 和新河 ( $37.52^{\circ}\text{N}$ ,  $115.23^{\circ}\text{E}$ ) 风速分别为 10.2 和 10.4 m/s。这一区域的风暴单体虽然被识别出来,但对应的大风判据值均比较小,这应该和弓状回波的前沿容易产生地面短时大风有密切关系。

18 时识别出的风暴单体中,产生对流性地面大风的可能性也都不大。但从风场实况看,除位于 ( $38.91^{\circ}\text{N}$ ,  $115.20^{\circ}\text{E}$ ) 的雾山瞬时风速达 10.8 m/s 外,没有测站达到本研究定义的大风标准。

19 时识别出的风暴单体中,风暴单体大风判断产生大风可能性大的有 2 个。其中,1 个为位于 ( $38.822^{\circ}\text{N}$ ,  $116.062^{\circ}\text{E}$ ) 的 1760 号单体,对应大风判据为 0.46;另 1 个为位于 ( $38.833^{\circ}\text{N}$ ,  $115.901^{\circ}\text{E}$ ) 的 1705 号单体,对应大风判据为 0.36。从对应实况风场看,与 1760 号单体对应,东大坞闸所 ( $38.75^{\circ}\text{N}$ ,  $116.19^{\circ}\text{E}$ ) 出现了 14.9 m/s 的瞬时大风;与 1705 号单体对应,沧州任丘出现了 8.4 m/s 的阵风,安新 19 时 04 分出现了瞬时极大风速 21 m/s 的灾害性大风。

20 时识别出的风暴单体中,风暴单体大风判断产生大风可能性很大的有 2 个,分别为 1782 号单体 ( $38.955^{\circ}\text{N}$ ,  $116.523^{\circ}\text{E}$ ) 和 1759 号单体 ( $39.437^{\circ}\text{N}$ ,  $116.068^{\circ}\text{E}$ )。从实况风场看,在保定东北角和廊坊有 4 站出现了 5 级以上大风,其中,固安风速 14.5 m/s,高官庄风速 14.2 m/s,涿州和高碑店风速大于 10 m/s,固安 20 时 05 分出现了 18 m/s 灾害性大风。风暴大风判据与实况大风对应较好。1782 号风暴单体无大风相对应,但此单体为 19 时 40 分就开始跟踪的强单体风暴,也许与其位置附近观测站点稀疏或时间分辨率不高有一定关系。

值得说明的是,在邯郸永年出现的大风没有被识别出来。分析其原因主要在于,永年距离组网最近雷达(石家庄雷达站)距离太远(约 176.5 km)。由于雷达波束中心的高度随距离而增高的这一局限性,使得高度较低的对流单体不能被探测到,导致计算出的识别参数值明显减小,而使得这一带的地面大风没有被识别出来。此外,这一带的地面大风主要是与弓状回波或线状回波相对应的,与回波形状更容易产生大风有很大关系。这就需要在定量识别的同时,加上预报员的主观定性识别,然后才能得出综合预报结论。

## 5 孤立单体风暴个例检验

2009 年 7 月 23 日 23 时—24 日 01 时,京广铁路邢台段沿线和滏西地区出现了大风、冰雹、强降雨等强对流天气。任县自动站 24 日 00 时 01 分极大风速达 24.1 m/s,南和 00 时 01 分极大风速为 24.8 m/s。受恶劣天气影响,供电和通讯等基础设施损坏严重(付桂琴等,2012)。河北省南部电网 500 kV 辛彭线南和县境内 129—136 号 8 座铁塔倒塌,7 条 220 kV 线路跳闸,35 kV 变电站全停 18 座,线路故障 21 条次、损失负荷  $2.49 \times 10^4$  kW,倒杆 862 基,受损线路 308 km,断杆 1092 根,基站停电 334 个,任县与南和县 70% 停电,造成直接经济损失达 1 亿元。铁塔倒塌附近长 4—5 km 公路两侧,大树连根拔起或拦腰折断。

### 5.1 风暴单体跟踪

通过风暴单体识别和跟踪分析看出,产生此次对流性地面大风的风暴单体主要有 4 个。其中,风暴单体 1639 号势力最强且出现次数最多,该风暴单体被识别的时段为 23 日 22 时 30 分—24 日 01 时 24 分,影响范围为京广线沿线,与造成的风灾基本对应。因此,侧重对此风暴单体加以分析。

分析 1639 号风暴单体对应的大风判据、最大组合反射率因子、最大垂直积分液态水含量和回波顶高等演变趋势(图 6)可以看出,风暴单体对应的最大组合反射率因子、最大垂直积分液态水含量和回波顶高的演变趋势与雷达产品吻合,说明该方法识别正确;而且,实况大风出现与强风暴时段基本对应,也与雷达分析和预报员的短时临近预报经验一致。在该风暴单体被识别的时段内,对应的大风判据均超过 0.2。大风判据 0.3—0.5(即对流性地面大风概率较大)集中在 23 日 22 时 48 分—24 日 00 时 36 分,其中,大风判据超过 0.5(即对流性地面大风概率很大)的占 81.3%。

### 5.2 对比检验

图 7 为 1639 号风暴单体被识别的位置、被识别到大风判据  $P \geq 0.3$  的风暴单体和实况瞬时风速大于 13.9 m/s 或有灾情报告的大风测站。通过位置对比和统计分析得出,在 23 日 23 时—24 日 01 时的总共 18 个体积扫描中,根据定量识别判据被识别到出现大风概率很大的风暴位于邢台京广线沿线一带,出现在 23 日 23 时 00 分—24 日 00 时 24 分,与

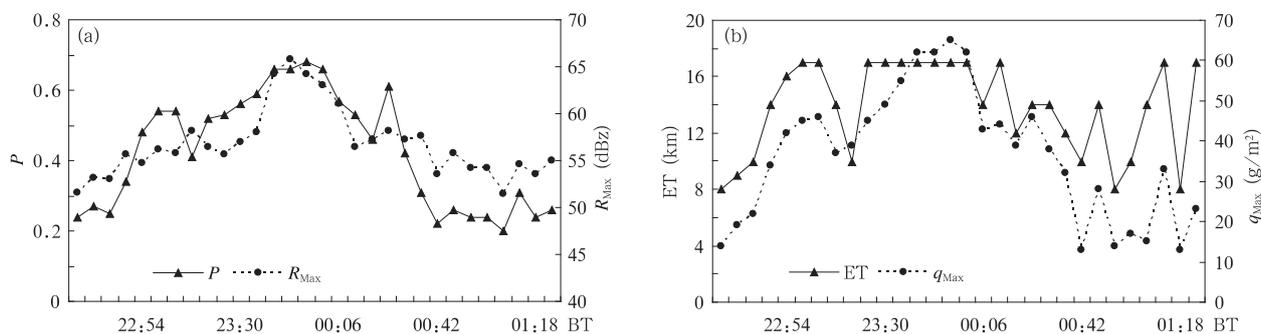
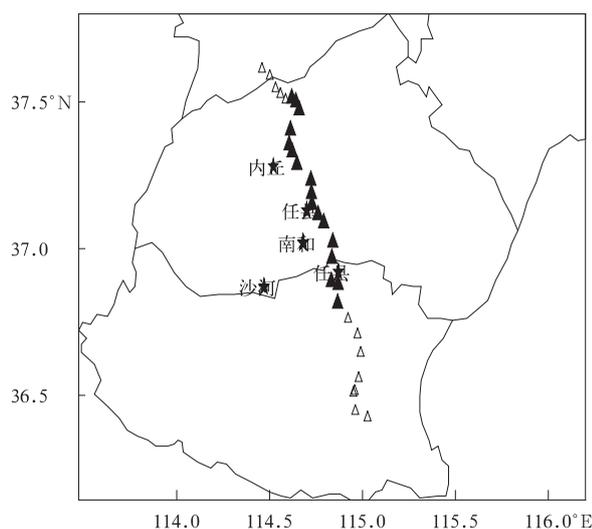
图6 1639号风暴单体的大风判据、 $R_{Max}$ (a)和 $q_{Max}$ 、回波顶高(b)演变Fig. 6 Temporal variations of the gale criterion and  $R_{Max}$  (a), and  $q_{Max}$  and ET (b) of Thunderstorm 1639图7 2009年7月23日23时—24日01时河北省中南部灾害大风和被识别到的风暴单体  
(★:实况大风测站, △:风暴单体位置,  
▲:  $P \geq 0.3$  风暴单体)

Fig. 7 Real thunderstorm gale observed and identified thunderstorm cells at 23:00 BT 23 to 01:00 BT 24 July 2009

(★: real station of thunderstorm gale observed,  
△: identified thunderstorm cells,  
▲:  $P \geq 0.3$  thunderstorm cells)

灾情报告的位置和时间刚好对应。从地面加密5 min 风场资料分析得出,被识别到的风暴单体附近均对应有5级以上灾害性大风出现;瞬时风速大于13.9 m/s或有灾情报告测站位于被识别风暴单体的西侧,即风暴移向的右前侧;而瞬时风速8.0—13.8 m/s测站则分布在风暴的两侧。

值得说明的是,邢台沙河于24日00时25分实况监测到17 m/s的大风灾害,看似出现漏报。经仔

细对比,1639号单体被识别的中心位于(36.887°N, 114.832°E)。当时该风暴已经发展为超级单体强风暴,具有弱回波区、回波悬垂和中气旋等典型回波特征。该风暴回波强度大、经向度大,影响范围也广。邢台的南和与沙河站出现的灾害性大风应该都是由该风暴触发,且两站位置均位于风暴移向的右前侧,与右移风暴的选择性加强有一定关系(俞小鼎等, 2006)。此外,需要说明的是:此次过程所用的地面风场主要是由县级以上国家基本站组成的,空间分布相对稀疏;加之灾情出现在夜间,可能部分大风没被观测到。总而言之,此次灾害性大风过程识别效果还是比较理想的。

## 6 结论和讨论

应用雷达三维组网资料和地面加密自动站风场数据,统计分析了影响对流性地面大风的雷达识别指标。根据雷达识别指标和地面大风的相关性,给出了识别指标的隶属函数和权重系数。采用不等权重法,建立了对流性地面大风的实时自动识别算法。并对河北省2012年6月21日线性风暴和2009年7月23日的孤立单体风暴引发的对流性地面大风典型个例进行了效果检验。主要有以下几点结论:

(1) 根据已有的研究成果,从风暴单体识别和跟踪算法中提取出反映地面大风的雷达参数:风暴最大反射率因子、风暴最大垂直积分液态水含量、垂直积分液态水含量随时间变率、风暴最大反射率因子下降高度、风暴体移动速度和垂直积分液态水含量密度等参数。采用不等权重法,建立隶属函数的综合定量预报方程。将对流性地面大风的出现概率分为三级:当识别风暴单体的判据小于0.3时,出现对流性地面大风的概率小;当判据为0.3—0.5时,

产生对流性地面大风的概率较大;当判据大于 0.5 时,出现对流性地面大风的概率很大。

(2) 2012 年 6 月 21 日河北省地面大风个例是一次线状风暴引发的大风天气过程。识别出的大风范围与实况风场基本吻合,命中率、虚警率和临界成功指数分别达 81.8%、25.0% 和 64.3%,同时刻识别到风暴单体位置与实况大风基本对应;2009 年 7 月 23 日夜间地面大风个例是一次孤立单体风暴引起的大风天气过程。识别到的风暴单体跟踪效果良好,符合大风判据阈值的风暴单体位置与灾害性大风出现位置基本对应。

对流性地面大风属于突发灾害性天气,变化较快,持续时间短。虽然本研究应用的已经是地面加密风场资料,但与大风的突发性、局地性相比,风的观测时空分辨率还是明显不足,部分站点的大风可能会出现缺测,对识别效果检验会产生一定影响。本研究建立的具有模糊逻辑的对流性地面大风识别方法主要基于雷达三维拼图数据和风暴单体识别、跟踪技术,具有覆盖面大,风暴单体跟踪识别等优点。以上两个个例的检验也证明利用模糊逻辑原理建立的对流性大风的识别算法是切实可行的。

本研究还只是初步性、阶段性工作,旨在说明利用雷达回波识别对流性地面大风算法是可行的,是值得进一步研究的。在雷达组网范围、雷达参数选择、加权系数调整、识别判据阈值等方面还有待于进一步调整。在识别检验时,仅选取两类典型产生雷暴大风的个例进行了效果检验,在业务应用前还有待于通过不同类型、不同区域更多个例的验证和完善。需要说明的是,径向速度场中与雷暴大风密切相关的中层径向辐合和大风速核等特征以及反射率因子中的弓形回波和阵风锋等回波形态,实现自动化识别的难度较大,这些都还有待于在后续的工作中进一步深入研究。

## 参考文献

刁秀广,张新华,朱君鉴. 2009. CINRAD/SA 雷达风暴趋势产品

- 在冰雹和大风预警中的应用. 气象科技, 37(2): 230-233
- 东高红, 吴涛. 2007. 垂直积分液态水含量在地面大风预报中的应用. 气象科技, 35(6): 877-881
- 付桂琴, 曹欣. 2012. 雷雨大风与河北电网灾害特征分析. 气象, 38(3): 353-357
- 廖玉芳, 潘志祥, 郭庆. 2006. 基于单多普勒天气雷达产品的强对流天气预报预警方法. 气象科学, 26(5): 564-571
- 刘黎平, 吴林林, 杨引明. 2007. 基于模糊逻辑的分步式超折射地物回波识别方法的建立和效果分析. 气象学报, 65(2): 252-260
- 王凤娇, 吴书君, 郑宝枝等. 2006. 多普勒雷达资料在雷雨大风临近预报中的应用. 山东气象, 26(4): 15-16, 23
- 王珏, 张家国, 王佑兵等. 2009. 鄂东地区雷雨大风多普勒天气雷达回波特征. 暴雨灾害, 28(2): 143-146
- 伍志方, 叶爱芬, 胡胜等. 2004. 中小尺度天气系统的多普勒统计特征. 热带气象学报, 20(4): 391-400
- 杨吉, 刘黎平, 李国平等. 2012. 基于雷达回波拼图资料的风暴单体和中尺度对流系统识别、跟踪及预报技术. 气象学报, 70(6): 1347-1355
- 俞小鼎, 姚秀萍, 熊廷南等. 2006. 多普勒天气雷达原理与业务应用. 北京: 气象出版社, 11-12
- 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. 气象学报, 70(3): 311-337
- 周金莲, 魏鸣, 吴涛等. 2011. 对流性大风天气的多普勒雷达资料识别方法研究//2011年第二十八届中国气象学会年会论文集. 北京: 中国气象学会
- 朱君鉴, 刁秀广, 曲军等. 2008. 4.28 临沂强对流灾害性大风多普勒天气雷达产品分析. 气象, 34(12): 21-26, 129
- Amburn S A, Wolf P L. 1997. VIL density as a hail indicator. Wea Forecast, 12(3): 473-478
- Darrah R P. 1978. On the relationship of severe weather to radar tops. Mon Wea Rev, 106(9): 1332-1339
- Johns R H, Hirt W D. 1987. Derechos: Widespread convectively induced windstorms. Wea Forecasting, 2(1): 32-49
- Kessinger C, Ellis S, Vanandel J, et al. 2003. The AP Clutter Mitigation scheme for the WSR-88D 2003//Preprints, 31st Conference on Radar Meteorology. Amer Meteor Soc, 526-529