

王莎,沙勇,宋金妹,等,2019.冀东地区冰雹云多普勒雷达参数特征分析[J].气象,45(5):713-722. Wang S, Sha Y, Song J M, et al, 2019. Characteristic analysis of hail cloud Doppler radar parameters in the eastern Hebei Province[J]. Meteor Mon, 45(5): 713-722(in Chinese).

## 冀东地区冰雹云多普勒雷达参数特征分析\*

王 莎<sup>1</sup> 沙 勇<sup>2</sup> 宋金妹<sup>1</sup> 裴宇杰<sup>3</sup> 吴林林<sup>4</sup>

1 秦皇岛市气象局,秦皇岛 066000

2 中国华云气象科技集团公司,北京 100081

3 河北省气象台,石家庄 050021

4 安徽省人工影响天气办公室,合肥 230031

**提 要:** 利用 2008—2015 年冀东地区发生的 36 个冰雹个例,通过秦皇岛多普勒天气雷达资料反演出冰雹发生时雷达的各种参数,提取各种参数与冰雹发生时的关系。研究表明冰雹发生时,基于风暴的最大基本反射率因子、风暴顶高、垂直累积液态水含量平均值分别为 62 dBz, 9.9 km, 51.6 kg · m<sup>-2</sup>, 0℃层以上平均风暴厚度为 5.8 km, 0℃层和 -20℃层之间厚度平均值为 3.1 km, 风暴最大基本反射率因子所在高度为 4.6 km, 风暴平均移动速度为 9 m · s<sup>-1</sup>。不同尺寸的冰雹雷达参数变化不大。在冰雹发生过程中,两个体扫间风暴的最大基本反射率因子平均最大跃变为 7 dBz, 风暴顶高平均最大跃变为 6.7 km, 垂直累积液态水含量平均最大跃变为 17 kg · m<sup>-2</sup>, 这种跃变的出现比冰雹发生时刻平均提前 39、30 和 25 min, 可以作为冰雹发生前的重要判断依据。此外还对 WSR-88D 冰雹算法进行了评估,结果表明,该算法的命中率较高,虚警率也较高,算法对冰雹的预报提前量平均为 43 min 左右,冰雹尺寸的预报结果偏大。

**关键词:** 冰雹, 雷达参数, 冰雹指数, 0℃层高度

**中图分类号:** P426, P412

**文献标志码:** A

**DOI:** 10.7519/j.issn.1000-0526.2019.05.013

## Characteristic Analysis of Hail Cloud Doppler Radar Parameters in the Eastern Hebei Province

WANG Sha<sup>1</sup> SHA Yong<sup>2</sup> SONG Jinmei<sup>1</sup> PEI Yujie<sup>3</sup> WU Linlin<sup>4</sup>

1 Qinhuangdao Meteorological Office of Shandong, Qinhuangdao 066000

2 Huayun Meteorological Science and Technology Corporation of China, Beijing 100081

3 Hebei Meteorological Observatory, Shijiazhuang 050021

4 Anhui Weather Modification Office, Hefei 230031

**Abstract:** Various parameters are inverted when hail occurred by using Qinhuangdao Doppler weather radar data, and the relationship between various parameters and occurrence of hailstorms is extracted with 36 hailstorm cases during 2008—2015 in the eastern Hebei Province. The study results show that the averages of maximum radar base reflectivity (MaxREF), top of the storm (TOP) and vertically integrated liquid (VIL) are 62 dBz, 9.9 km and 51.6 kg · m<sup>-2</sup> respectively when hails occur. The average storm thickness above 0℃ level layer is 5.8 km, the average thickness between 0℃ level layer and -20℃ level layer is 3.1 km, MaxREF height of the storm is 4.6 km, and the average storm moving speed is 9 m · s<sup>-1</sup>. The radar parameters corresponding to different sizes of hailstones do not change significantly. During the occurrence of hail, sudden-increase phenomenon for MaxREF between the two volume scan is 7 dBz on average,

\* 河北省气象局青年基金项目(18ky34)资助

2018年3月20日收稿; 2018年11月13日收修定稿

第一作者:王莎,从事大气探测方向研究. Email: wangshawenhua@163.com

sudden-increase phenomenon for TOP between the two volumn scans is 6.7 km on average and sudden-increase phenomenon for VIL between the two volumn scans is  $17 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$  on average. This transition occurred 39, 30 and 25 min earlier than the average time of hailstorm occurrence. Such sepcical phenonmenon could be an important criterion for hail warning. In addition, the WSR-88D hail algorithm HI is evaluated. The results show that probability of detection and false acceptance rate of the hail algorithm are relatively higher. The forecasting rate of hail by the algorithm is about 43 min on average, and the hail forecast results are larger.

**Key words:** hail, radar parameters, HI (hail index),  $0^\circ\text{C}$  level layer height

## 引 言

冰雹天气作为冀东地区的主要天气灾害之一,对国民经济和人民生命财产危害极大,降雹过程中一般伴随大风、局地暴雨和雷电,由于其尺度小、生命史短、局地性比较强,预报难度很大。多普勒雷达由于具有时空分辨率高的特点,对小尺度天气系统的发展演变能够提供精细化的监测手段。目前业务化的 WSR-88D 冰雹算法是 Witt et al(1998)提出的,该算法是基于风暴定位与追踪算法(storm cell indentification and tracking, SCIT)得到的增强的冰雹算法,主要是使用基本反射率因子、风暴中心高度与  $0^\circ\text{C}$  层和  $-20^\circ\text{C}$  层高度的关系来确定冰雹发生的概率和尺寸,并提供了冰雹概率、强冰雹概率和预期的最大冰雹尺寸三种产品。雷达 PPI 上出现指状回波、钩状回波、回波穹隆、弱回波区或有界弱回波区、三体散射长钉、持续的大的垂直积分液态水含量、中气旋、下湿上干或强风垂直切变特征等,都是冰雹天气的典型特征(俞小鼎等,2006;张腾飞等,2006;应冬梅等,2007;廖玉芳等,2007;徐芬等,2016;李聪等,2017;覃靖等,2017)。随着多普勒天气雷达网的布设,国内有很多学者利用雷达资料识别冰雹云取得了一系列进展,戴铁丕和张秀华(1989)、王改利和刘黎平(2005)、邵玲玲等(2005)、李云川等(2006)、肖艳姣等(2008)、黄晓龙和高丽(2016)、刘晓璐和周长春(2016)都对当地冰雹云的最大基本反射率因子(maximum radar base reflectivity, MaxREF)、回波顶高(echo top, ET)、垂直累积液态水含量(vertically integrated liquid, VIL)等雷达参数特征进行分析研究,提取出适用于本地的识别冰雹云的标准。冀东地区以平原为主,南邻渤海,一般冰雹天气集中在 5—9 月,正值夏秋作物生长和成熟阶段,作物遭遇冰雹将会受损,因此本文选取 2008—2015 年 5—9 月的多普勒雷达资料对冀东地区

冰雹云进行分析,提取对冰雹天气有指示意义的特征,对强对流天气预报、预警有重要意义。

## 1 资料选取和研究方法

### 1.1 冰雹个例

以秦皇岛新一代多普勒雷达站为中心,观测半径 20~150 km 范围内,各市县(区)观测站所观测到的地面灾情资料为基础,选取 2008—2015 年 5—9 月冰雹尺寸大于 5 mm 的样本,共收集到 36 例(表 1)。选取 20~150 km 范围是为了避免近距离的静锥区造成雷达观测盲区以及远距离雷达波束太高影响回波探测完整性。

### 1.2 雷达数据和产品

雷达数据采用秦皇岛市卢龙雷达观测到的雷达基数据。通过 METSTAR 公司提供的 RPG 和 PUP 程序进行回放,由 PUP 申请产品通过 RPG 中的算法计算给出具体产品和相关参数。通过对基数据进行回放,我们采用了以下几个产品用来进行冰雹特征的识别。

#### 1.2.1 SS 产品

SS(Storm Struct)产品包含 WSR-88D 利用 SCIT 算法得到的风暴结构特征信息,产品编号为 62(图略,可以查看 PUP 产品),主要包含如下参数:

STORM ID: 表示风暴的编号。WSR-88D 每识别出一个新的风暴,就对风暴进行标识,编号按照 A0-A9-B0-B9……Z0-Z9 的顺序,如果风暴编号用完,重新使用 A0 进行循环编号。

AZ/RAN: 表示风暴中心距离雷达的方位和距离,单位:  $\text{km}/^\circ$ 。

BASE: 表示一个三维风暴的最低位置,也就是风暴底。由于在距离较远的地方,有时探测到的风暴底要比实际风暴底要高,因此,它的属性里面经常

表 1 2008—2015 年 5—9 月收集冰雹样本相关信息  
Table 1 Collection of 36 hail samples of 0°C level layer height and -20°C level height  
from May to September 2008—2015

序号	降雹日期/ (年/月/日)	降雹时间/BT	降雹地点	冰雹大小 /mm	0°C层 高度/km	-20°C层 高度/km	探空 站点	0°C层与-20°C层 之间厚度/km
1	2008/9/7	06:25—06:30	青龙	12	4.2	7.2	北京	3
2	2009/6/14	13:15	抚宁	15	3.5	6.5	北京	3
3	2010/6/16	19:18	兴隆	7	4.4	7	乐亭	2.6
4	2010/6/17	12:05	宝坻	14	4.2	7.1	乐亭	2.9
5	2010/6/17	12:59	承德县	5	4.2	7.1	乐亭	2.9
6	2010/6/17	16:08	津南	25	3.9	7.2	乐亭	3.3
7	2010/6/17	15:08	丰润	8	3.9	7.2	乐亭	3.3
8	2010/6/17	18:20	黄烨	5	3.9	7.2	乐亭	3.3
9	2010/6/17	13:37	宽城	14	4.2	7.1	乐亭	2.9
10	2012/6/3	09:09	青龙	8	3.6	6.4	乐亭	2.8
11	2012/6/7	23:11	遵化	15	3.8	7	乐亭	3.2
12	2012/7/10	18:04	三河	9	4.7	8.2	乐亭	3.5
13	2012/7/10	15:39	兴隆	9	4.7	8.2	乐亭	3.5
14	2012/7/11	14:31	滦平	8	4.5	7.7	乐亭	3.2
15	2012/7/11	15:31	平泉	5	4.5	7.7	乐亭	3.2
16	2012/9/23	20:23	滦南	8	3.3	6.4	乐亭	3.1
17	2013/6/26	17:58	兴隆	8	4.1	7.1	乐亭	3
18	2014/6/6	13:43	蓟县	5	3.8	7.2	乐亭	3.4
19	2014/6/9	13:02	承德县	9	3.1	6.3	乐亭	3.2
20	2014/6/9	17:25	迁西	8	3.1	6.3	乐亭	3.2
21	2014/6/16	18:01	滦平	6	4	7.1	乐亭	3.1
22	2014/6/17	17:29	承德	7	3.9	7.2	乐亭	3.3
23	2014/7/13	17:03	迁西	7	4	7	乐亭	3
24	2014/7/14	16:46	平泉	8	4.1	7	乐亭	2.9
25	2014/7/16	13:19	丰南	15	4.3	7.5	乐亭	3.2
26	2014/8/16	16:45	迁安	5	4	7.3	乐亭	3.3
27	2014/8/21	16:21	隆化	7	4.3	7.4	乐亭	3.1
28	2014/8/21	17:04	青龙	22	4.3	7.4	乐亭	3.1
29	2015/5/17	17:18	承德县	11	3.7	6.6	乐亭	2.9
30	2015/5/17	21:53	蓟县	5	3.7	6.6	乐亭	2.9
31	2015/6/1	15:04	建昌	12	4	7.1	北京	3.1
32	2015/6/1	16:37	兴隆	5	4	7.1	北京	3.1
33	2015/6/10	16:21	唐海	10	3.4	6.4	北京	3
34	2015/7/27	18:07	承德	6	5.2	8.2	乐亭	3
35	2015/8/11	15:50	丰南	8	4.5	7.7	乐亭	3.2
36	2015/8/29	16:10	丰南	8	3.8	6.9	乐亭	3.1

出现“<”的标识,单位:km。

TOP:表示一个三维风暴的最高位置,也就是风暴顶。由于在距离较近的地方,有时探测到的风暴顶要比实际风暴顶要低,因此,它的属性里面经常出现“>”的标识,单位:km。

CELL BASED VIL:基于风暴的 VIL 值,与 PUP 提供的编号为 57 的 VIL 不同,它的累积是在不同层的二维单体中累积的,不同层的二维风暴中心位置可能不同,单位: $\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$ 。本文所用 VIL 均为基于风暴的 VIL。

MaxREF:表示三维风暴的最强基本反射率因子,单位:dBz。

MaxREF HEIGHT:表示三维风暴最强反射率所在的高度,单位:km。

需要注意的是,在 SS 产品默认的结构中,每个体扫最多输出 100 个风暴单元,按照 VIL 值从大到小的顺序排列,VIL 比较小的风暴将被忽略。

### 1.2.2 HI 产品

HI(hail index)是由 WSR-88D 算法提供的冰雹指数产品,产品编号为 59。冰雹指数产品主要是

基于 SCIT 算法识别出的风暴单体,计算 45 dBz 反射率因子所在的高度与 0℃层、-20℃层的高度差,推算出冰雹发生的概率,强冰雹(20 mm 以上)发生概率以及预期的最大冰雹尺寸。冰雹产品有两种表现方式,文字产品和图形产品(图略,可查看 PUP 产品)。文字产品主要包含如下参数:

STORM ID: 风暴 ID,含义同 SS 产品。

PROBABILITY OF SEVERE HAIL (POSH): 强冰雹概率,指直径 20 mm 以上冰雹的降雹概率,单位:%。

PROBABILITY OF HAIL (POH): 冰雹概率,指任意尺寸冰雹的降雹概率,单位:%。

MAX EXPECTED HAIL SIZE (MEHS): 预期的最大冰雹尺寸,表示所识别风暴单体的最大冰雹尺寸估计,单位:mm。需要说明的是,HI 产品里面给出的冰雹尺寸实际单位为英寸(in),实际使用时应该转换成 mm。

图形产品标识冰雹的位置、尺寸。其中小的三角形表示冰雹概率,大的三角形表示强冰雹概率。空心的、实心的分别表示冰雹概率大于 30%、大于 50%(阈值可调)。三角形中间的数字表示冰雹尺寸(单位 in),大于 1 in 的才会被显示出来。

### 1.2.3 STI 产品

STI(Storm Track Info)产品表示风暴的追踪信息。包括风暴的历史位置和未来趋势。产品编号为 58。与 HI 产品类似,它也有文字和图形两种产品(图略,可查看 PUP 产品)。文字产品的含义如下:

STORM ID: 风暴编号,同 SS 产品。

CURRENT AZRAN: 当前体扫的方位和距离,单位:°和 km。

POSITION MOVEMENT: 当前风暴运动的方位和速度,单位:°和  $m \cdot s^{-1}$ 。

FORECAST POSITIONS: 预报的位置,分为 15、30、45、60 min 四个时间段,单位:°和 km。

ERROR FCST/MEAN: 表示风暴追踪的预报误差和平均误差,单位:km。

图形产品表示冰雹的当前位置、历史轨迹以及预报位置。其中当前产品使用圆圈加叉号表示,旁边显示风暴的标志。历史轨迹用菱形小方块表示,未来轨迹用加号表示,各种轨迹以直线相连。

### 1.3 探空资料

研究表明用 RPG 中默认值 0℃层和 -20℃层高度计算的冰雹尺寸,大冰雹偏大 30%左右,小冰雹尺寸偏大 120%左右,而利用当天的 0℃层和 -20℃层的高度计算,能有效地减少冰雹尺寸的误差(王伏村等,2009),所以本文在反演时输入每天订正的 0℃层和 -20℃层的高度,用于进行冰雹尺寸估算。探空资料选取最靠近秦皇岛雷达的乐亭探空站的 L 波段雷达探空资料,在乐亭站资料缺失时候,采用北京探空站的资料。探空资料的时间选用最靠近雷达资料的时间,表 1 是所有个例对应的 0℃层及 -20℃层高度。

利用 2013—2017 年北京站和乐亭站的探空资料,对 5—9 月的 0℃层和 -20℃层的高度进行了统计分析(表 2)。可以看出,不同季节、不同站点,0℃层和 -20℃层的高度都各不相同,标准差在 0.4

表 2 2013—2017 年 5—9 月北京站和乐亭站 0℃层和 -20℃层的高度平均值及标准差  
Table 2 Average height and standard deviation of 0℃ level layer and -20℃ level layer at Beijing Station and Laoting Station from May to September 2013—2017

北京站(54511)				
月份	0℃层平均高度/km	0℃层高度标准差/km	-20℃层平均高度/km	-20℃层高度标准差/km
5	3.48	0.58	6.40	0.63
6	3.98	0.48	7.16	0.61
7	4.77	0.46	8.02	0.55
8	4.57	0.58	7.86	0.68
9	3.67	0.40	6.92	0.47
乐亭站(54539)				
月份	0℃层平均高度/km	0℃层高度标准差/km	-20℃层平均高度/km	-20℃层高度标准差/km
5	3.60	0.53	6.69	0.64
6	3.54	0.75	6.70	0.91
7	3.90	0.75	7.01	0.91
8	4.43	0.60	7.72	0.66
9	4.64	0.91	7.96	0.70

~1.0 km。因此,在进行雷达冰雹算法计算时应输入每天订正的高度以减少计算误差。

另外,本文还统计了冰雹发生概率与 0℃层之间的关系,总体来说,0℃层越低,冰雹发生概率越大。图 1 是 2014 年 7 月 0℃层高度,从图中可以看出,2014 年发生冰雹的日期(椭圆形区域)处于 0℃层较低的位置。

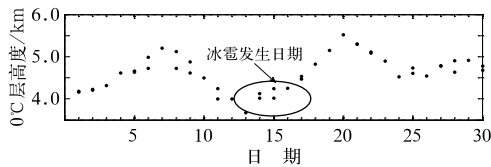


图 1 2014 年 7 月 0℃层高度  
Fig. 1 0℃ level layer height and hail occurrence date in July 2014

### 1.4 研究方法

考虑到冰雹发生的时间与雷达体扫时间可能不是一一对应,利用最靠近冰雹发生时间的雷达体扫时间作为冰雹发生对应的体扫,分析雷达参数特征。首先利用 STI 图形产品找出冰雹发生时,对应地点的风暴单体编号。然后,利用 SS 产品,记录这个编号从发生到消亡的 SS 结构信息以及 HI 产品信息,从而提取冰雹从发生到发展过程中的雷达参数变化信息,用来作为冰雹发生时雷达参数结构特征以及后续各种研究的基础。

以 2012 年 9 月 23 日 20:23 滦南降雹过程为例,利用 STI 图形产品以及观测到的冰雹发生的位置,找到了冰雹对应风暴单体编号为 B0,根据 STI、SS、HI 三种产品,记录整个 B0 风暴从定位到冰雹发生时候的雷达参数信息(表 3)。其中这里把 20:24

表 3 2012 年 9 月 23 日风暴单体 B0 的 SS 与 HI 信息

Table 3 SS and HI structural information of storm cell numbered B0 on 23 September 2012

AZ/RAN /(km/°)	TOP /km	VIL /kg · m <sup>-2</sup>	MaxREF /dBz	MaxREF HEIGHT /km	POSH /%	POH /%	MEHS /in	时间/BT
267/16	2.9	5	51	1.7				19:00:01
235/10	>3.6	14	57	0.5				19:06:01
225/12	>5.6	10	56	0.5				19:12:00
219/18	4.6	18	57	1.9				19:18:00
217/20	4.9	19	57	1.2				19:24:01
215/21	>7.2	18	55	1.6				19:30:00
212/23	5.9	18	57	1				19:36:01
211/26	4.7	18	55	2	0	10	<0.5	19:42:00
210/29	5.1	18	59	1.7	0	30	<0.5	19:48:01
210/32	5.6	22	57	2.6	0	30	<0.5	19:54:00
207/34	5.9	20	58	1.5	0	20	<0.5	19:00:01
211/40	7.1	32	58	2.5	30	70	0.5	19:06:01
208/43	7.8	35	62	1.2	60	80	1	19:12:01
207/45	8	35	64	3.6	70	80	1	20:18:00
<b>206/47</b>	<b>5.1</b>	<b>27</b>	<b>63</b>	<b>1.3</b>	<b>0</b>	<b>40</b>	<b>&lt;0.5</b>	<b>20:24:00</b>

认为是冰雹发生时候对应的体扫(表中以粗体表示)。

## 2 冰雹发生时雷达体扫对应风暴参数信息

首先我们利用冰雹发生时候的雷达体扫对应的风暴参数来进行统计分析,得出冰雹发生时各种雷达参数的分布特征情况(图 2)。为了分析不同大小

冰雹的特征,将冰雹按照大小归为两类,分别取得 25 例(冰雹尺寸 < 10 mm)和 11 例(冰雹尺寸 ≥ 10 mm)样本。

### 2.1 风暴最大基本反射率因子(MaxREF)特征

通过分析所有 36 个冰雹个例可以看出,冰雹发生时候对应风暴单体 MaxREF 参数的取值范围在 49~70 dBz,平均值为 62 dBz。冰雹发生最小的反射率与 WSR-88D 定义反射率阈值(53 dBz)不同

(Fulton et al, 1998), 当  $\text{MaxREF} > 49$  dBz 时, 也有可能发生冰雹。尺寸  $< 10$  mm 和  $\geq 10$  mm 的冰雹对应的  $\text{MaxREF}$  平均值分别为 62 和 63 dBz, 并无特别大的差别(图 2a)。

## 2.2 风暴顶高(TOP)特征

SS 产品中风暴顶高的特征(TOP 信息)和 PUP 提供的编号为 41 的 ET 产品不同。由于 SS 产品是基于 SCIT 算法导出的, 根据 SCIT 算法的描述, 其构成风暴最小的默认反射率因子阈值都为 30 dBz, 而 ET 产品指的是 18 dBz 以上的回波所能达到的最大高度。因此, ET 产品的顶高要大于 SS 中的 TOP 产品顶高(30 dBz 回波高度)。

通过分析得到, 冰雹发生时, 对应风暴单体的 TOP 参数的取值范围在 6.3~13.7 km, 平均值为 9.9 km, 大部分集中在 8~12 km。尺寸  $< 10$  mm 冰雹对应的风暴单体 TOP 平均值为 10 km,  $\geq 10$  mm 冰雹对应的风暴单体 TOP 平均值反而略小, 为 9.6 km(图 2b)。

由于冰雹增长都在  $0^\circ\text{C}$  层以上高度, 因此  $0^\circ\text{C}$  以上的高度反映冰雹增长真实高度,  $0^\circ\text{C}$  以上风暴高度越高, 该风暴出现冰雹的概率越大, 我们引入  $0^\circ\text{C}$  层风暴厚度(TOP0)。定义如下:

$$\text{TOP0} = \text{TOP} - H_0 \quad (1)$$

式中, TOP 为 SS 结构中风暴的高度,  $H_0$  为  $0^\circ\text{C}$  层高度。

根据式(1)统计得出, 36 例样本中  $0^\circ\text{C}$  层以上风暴厚度平均值为 5.8 km, 尺寸  $< 10$  mm 冰雹的  $0^\circ\text{C}$  层以上厚度平均值为 5.9 km, 而  $\geq 10$  mm 冰雹的  $0^\circ\text{C}$  层以上厚度为 5.7 km(图 2c)。

同理, 定义  $0^\circ\text{C}$  层与  $-20^\circ\text{C}$  层高度厚度差:

$$\text{TOP1} = H_{-20} - H_0 \quad (2)$$

式中,  $H_{-20}$  为  $-20^\circ\text{C}$  层高度,  $H_0$  为  $0^\circ\text{C}$  层高度。根据式(2), 统计得到, 36 例样本的厚度差平均值为 3.1 km。

## 2.3 垂直累积液态水含量(VIL)特征

VIL 是在假设所有反射率因子均由液态水滴引起的前提下, 基于风暴的二维分量(Johnson et al, 1998), 对其进行垂直累积, 得到风暴柱体内液态水的总估量, 反映了风暴单体的综合强度, 对于冰雹的潜势具有较好的指示作用。

通过分析得到, 冰雹发生时, 对应风暴单体的 VIL 参数的取值范围在  $9 \sim 72 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ , 平均值为  $51.6 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ , 大部分集中在  $20 \sim 60 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$  (图 2d), 尺寸  $< 10$  mm 和  $\geq 10$  mm 的冰雹对应风暴单体的 VIL 平均值分别为 50 和  $54 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ , 大冰雹的 VIL 平均值要大于小冰雹的平均值。

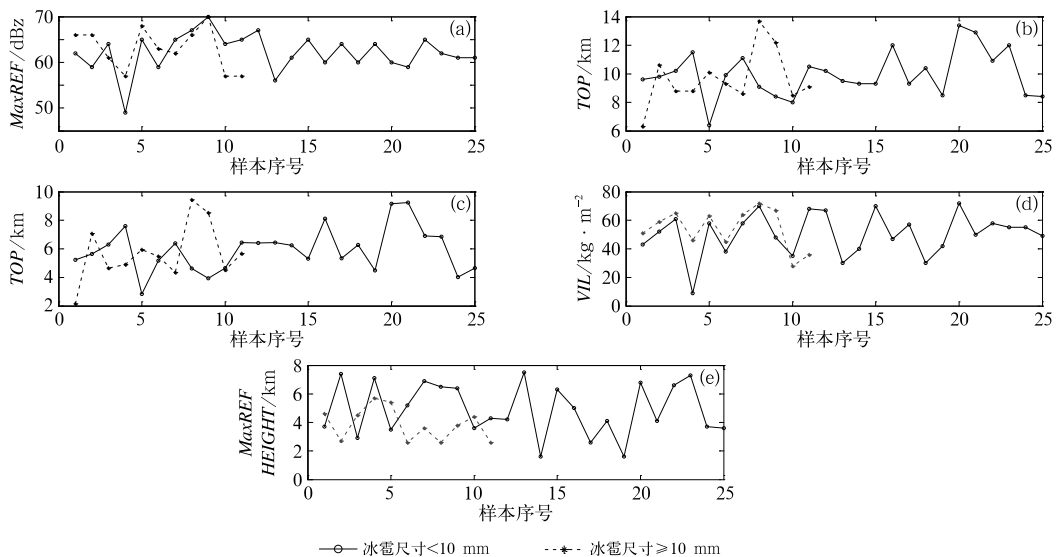


图 2 不同尺寸冰雹对应风暴雷达参数统计特征分布

(a) MaxREF, (b) TOP, (c) TOP0, (d) VIL, (e) MaxREF HEIGHT

Fig. 2 Statistical characteristics distribution of radar parameters of different dimensions of hail for storms

(a) MaxREF, (b) TOP, (c) TOP0, (d) VIL, (e) MaxREF HEIGHT

## 2.4 最大基本反射率因子所在高度 (MaxREF HEIGHT) 特征

最大基本反射率因子所在高度 (MaxREF HEIGHT) 反映冰雹发生时, 最大反射率因子所在的位置。通过分析得到, 冰雹发生时, 对应风暴单体的 MaxREF HEIGHT 在 1.6~7.5 km, 平均值为 4.6 km。尺寸 <10 mm 冰雹对应风暴单体的 MaxREF HEIGHT 为 4.9 km,  $\geq 10$  mm 冰雹对应风暴单体的 MaxREF HEIGHT 为 3.9 km(图 2e)。

## 2.5 冰雹发生时风暴移动速度特征

风暴移动速度可以从 SS 产品中直接提取, 统计分析 36 个冰雹过程发现(图 3), 冀东地区发生冰雹时, 风暴的移动速度范围较大, 为 2~21  $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ , 平均值为 9  $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

## 3 冰雹发生过程中各个雷达参数变化情况

当冰雹在生成的过程中, MaxREF、ET、VIL 都会出现不同程度的增长(樊鹏和肖辉, 2005; 汤兴芝和黄兴友, 2009; 段鹤等, 2014), 研究表明虽然 TOP 比 ET 低, 但是高度分布与 ET 分布基本一致(鲁德金等, 2015)。以表 3 这个个例为例可以看出, 在风暴发生发展过程中, MaxREF、TOP、VIL 均呈现明显递增趋势。从第一个体扫到冰雹发生的时刻前一体扫, MaxREF、TOP 和 VIL 最大递增值分别为 13 dBz(从 51 dBz 增加到 64 dBz)、5.1 km(从 2.9 km 增加到 8 km)和 30  $\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$  (5  $\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$  增加到 35  $\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$ )。并且, 在不同风暴发展过程中, MaxREF、TOP 和 VIL 增量各不相同, 下面逐一进行统计分析(图 4)。

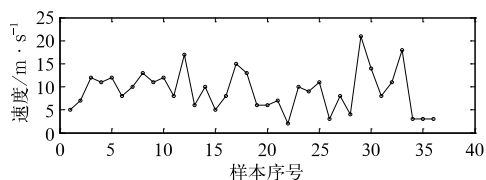


图 3 冰雹发生时风暴移动速度图

Fig. 3 Storm movement speed in case of hail

## 3.1 风暴最大基本反射率因子(MaxREF)变化

定义在冰雹发生前, 不同时间同一个 ID 的 MaxREF 最大最小值的变化为 MaxREF 增量, 出现最大值到发生冰雹的时间差为 MaxREF 递增提前时间。统计 36 个冰雹个例可以看出, 不同个例的 MaxREF 增量有所不同, 最大值达到 29 dBz, 平均值为 14 dBz(图 4a)。MaxREF 递增提前时间最多为 19 个体扫, 最小的当识别出风暴时冰雹已经发生, 平均经历的体扫时间为 7 个(42 min)(图 4b)。

当然, 同一个 ID 风暴在发展的不同阶段, MaxREF 递增的幅度也不相同。为了更好地提取 MaxREF 变化的特征, 定义在风暴发展过程中, 相邻两个体扫的 MaxREF 最大变化量为 MaxREF 跃变量。MaxREF 跃变发生的时间与冰雹发生的时间差, 定义为 MaxREF 跃变提前时间。统计可以看出, 36 个个例中, MaxREF 跃变最大值能达到 27 dBz, 平均值为 7 dBz(图 4a)。MaxREF 跃变提前时间最大为 23 个体扫, 平均跃变提前时间为 6.5 个体扫(39 min)(图 4b)。

## 3.2 风暴顶高(TOP)变化

和 3.1 节类似, 分别定义风暴顶高 TOP 增量、TOP 跃变量、TOP 递增提前时间、TOP 跃变提前时间。TOP 增量最大值为 9.2 km, 平均值为 3.2 km(图 4c), TOP 递增提前时间为 14 个体扫, 最小的当识别出风暴冰雹已发生, 平均经历的体扫时间为 2.9 个(17 min)(图 4d)。TOP 跃变最大值为 6.7 km, 平均值为 2.7 km(图 4c), TOP 跃变提前时间最大为 31 个体扫, 平均跃变提前时间为 5 个体扫(30 min)(图 4d)。

## 3.3 垂直累积液态水含量(VIL)变化

和 3.1 节类似, 分别定义 VIL 增量、VIL 跃变量、VIL 递增提前时间、VIL 跃变提前时间。VIL 增量最大值为 62  $\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$ , 最小值为 0(该个例在风暴生成的时候就已经发生了冰雹), 平均值为 36.7  $\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$ (图 4e), VIL 递增提前时间为 17 个体扫, 最小的当识别出风暴冰雹已发生, 平均经历的体扫时间为 6.1 个(37 min)(图 4f)。VIL 跃变最大值为 35  $\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$ , 平均为 17  $\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$ (图 4e), VIL 提前时间最大为 16 个体扫, 平均跃变提前时间为 4.2 个体扫(25 min)(图 4f)。

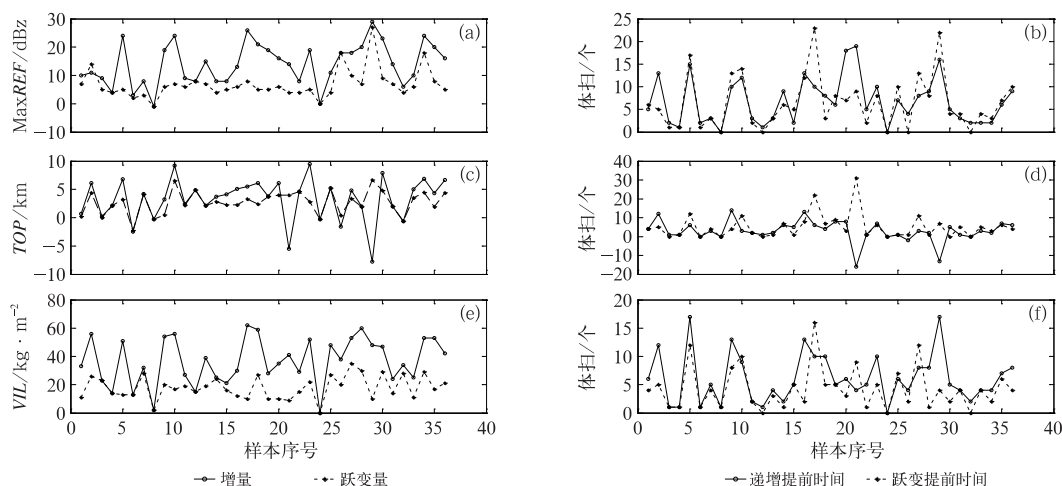


图 4 36 个冰雹个例雷达参数的(a,c,e)增量和跃变量,(b,d,f)递增和跃变提前时间变化曲线

(a,b) MaxREF, (c,d) TOP, (e,f) VIL

Fig. 4 Radar parameter variation curves of 36 increment and jump quantities (a, c, e) and advance times (b, d, f) of increment and jump quantities

(a, b) MaxREF, (c, d) TOP, (e, f) VIL

## 4 HI 产品进行冰雹预警

HI 产品是 WSR-88D 预报冰雹发生的重要产品。业务统计结果(吴林林,2006;王伏村等,2009)表明,HI 产品冰雹预警命中率(POD)较高,但是虚警率(FAR)也较高,综合评分指数(CSI)较低。

以 2010 年 6 月 17 日冰雹过程为例。此次过程的 HI 产品(图略),体扫数据一共识别出了 32 个风暴,其中,HI 预报其中 21 个风暴有发生冰雹的可能,从地面观测资料来看,该次体扫对应的地面降雹记录只有 6 个,与雷达上的风暴位置吻合。根据 CSI 评分公式计算,POD 为 100%,FAR 为 28.6%,CSI 为 28.6%。可以看出,命中率虽然比较高,但是虚警率也高,导致综合指数效果较差。

### 4.1 HI 产品预警提前量

在风暴发展过程中,HI 产品可能会提前给出冰雹概率,从而进行预警。下面评估 36 个冰雹个例在预警中的提前量。以发生冰雹时刻的体扫为  $t$ ,如果该冰雹发生时刻对应的风暴在前一个体扫就预警,定义提前量为一个体扫,提前时间为  $1 \times 6 \text{ min} = 6 \text{ min}$ 。如果前两个体扫就预警,那么提前量为两个体扫,提前量为  $2 \times 6 \text{ min} = 12 \text{ min}$ ,以此类推。

图 5 是 36 个样本个例提前时间分布的概率密度图,提前 10 个体扫的概率比较大。从图中可以看到大部分的冰雹提前预报时间在 1~10 个体扫之间,个别比较大的提前量可能是由于风暴经历了合并、分裂等过程。统计结果表明,平均提前预报时间能在 7.2 个体扫左右。因此,HI 产品对冰雹预报的提前量较高。

### 4.2 冰雹预报尺寸与实际冰雹尺寸关系

Witt et al(1998)基于 WSR-88D 算法对 HI 的另一个重要参数 MEHS 进行评估,认为评估结果较差。本文也对 36 个个例的 MEHS 和实际发生冰雹尺寸进行一个对比(图 6)。从图 6 中也可以看到 HI 产品估算的尺寸与实际非常不一致,总体偏高,与其他文献中结果一致(王伏村等,2008)。

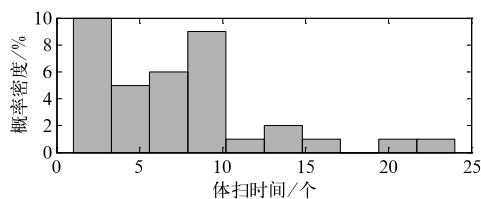


图 5 HI 产品冰雹提前预报时间概率密度分布

Fig. 5 Probability density distribution of hail forecasting in advance for HI products



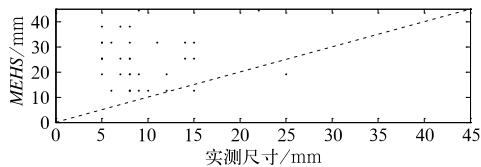


图 6 冰雹实际尺寸与 HI 产品的 MEHS 参数对比

Fig. 6 Comparison of the actual size of hail and MEHS of HI products

## 5 结论与展望

通过对冀东地区 36 个冰雹个例雷达参数的分析,得出冰雹发生时刻雷达参数及变化特征,为预报员在实时业务中进行冰雹预警提供了一些有用的指标和建议,结论如下:

(1) 利用基于 WSR-88D 算法得到的 SS、HI、STI 产品能从风暴的角度连续追踪冰雹发生前后各种雷达参数的变化,并且产品可以由 PUP 进行反演,在业务上具有可行性。

(2) 通过对 2013—2017 年  $0^{\circ}\text{C}$  层和  $-20^{\circ}\text{C}$  层的统计分析可以看出,不同季节、不同站点的  $0^{\circ}\text{C}$  层和  $-20^{\circ}\text{C}$  层的高度变化较大,为了更好地评估冰雹算法,建议每日实时输入订正的  $0^{\circ}\text{C}$  层和  $-20^{\circ}\text{C}$  层高度。

(3) 冰雹发生概率与  $0^{\circ}\text{C}$  层关系较密切,总体来说,  $0^{\circ}\text{C}$  层越低,冰雹发生概率越大。

(4) 冰雹发生时 MaxREF、TOP、VIL 平均值分别为  $62\text{ dBz}$ 、 $9.9\text{ km}$ 、 $51.6\text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$ ,  $0^{\circ}\text{C}$  层以上平均风暴厚度为  $5.8\text{ km}$ ,  $0^{\circ}\text{C}$  层和  $-20^{\circ}\text{C}$  层之间厚度平均值为  $3.1\text{ km}$ , 风暴最强反射率因子所在高度  $4.6\text{ km}$ , 风暴平均移动速度为  $9\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。不同尺寸的冰雹雷达参数变化不大。

(5) 风暴在发展过程中, MaxREF、TOP、VIL 均出现了不同程度的增长。冰雹发生前,同一个风暴 MaxREF 增量、TOP 增量和 VIL 增量平均值分别为  $14\text{ dBz}$ 、 $3.2\text{ km}$  和  $36.7\text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$ , 并且最大 MaxREF、最大回波顶高 TOP 和最大 VIL 出现时刻平均比冰雹发生时刻提前了 42、17 和 37 min。冰雹对应的风暴相邻两个体扫平均的 MaxREF、TOP、VIL 最大跃变量分别为  $7\text{ dBz}$ 、 $6.7\text{ km}$  和  $17\text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$ , 并且最大变化量出现的时间平均比冰雹发生时提前了 25、30 和 39 min, 可以作为冰雹预

警的重要指标。

(6) 对 WSR-88D 冰雹算法(HI)的评估结果表现为 POD 和 FAR 都较高,对冰雹尺寸的预报结果偏大,最早的预警比冰雹发生平均提前 43 min。

需要注意的是,冰雹算法的识别效果与冰雹实际发生的个例之间可能存在不对应性,由于缺少地面观测数据以及相应的志愿者观测数据,收集的冰雹个例仅仅局限于测站,具有极大的不确定性,造成冰雹算法评估的效果偏低。这些需要通过后续乡镇信息员以及气象爱好者的规范观测来提高样本数量。另外, SCIT 算法中,当风暴发生分裂或者合并时,会造成风暴的不连续或者持续时间过长(有的风暴 ID 维持了两个多小时),会影响对冰雹参数的评估。另外,由于高空站点的数据非常稀疏,用一个站点的  $0^{\circ}\text{C}$  层和  $-20^{\circ}\text{C}$  层数据代表所有冀东地区的高度,可能会出现与实际高度不一致情况,导致冰雹算法结果的误判。最后,本文提到的预警提前时间是雷达探测到相关特征的时间和站点观测到冰雹时间的时间差,而事实上,雹暴在经过站点之前通常已经降雹,因此实际预警提前时间要比预计时间短。

## 参考文献

- 戴铁丕,张秀华,1989. 综合概率判别冰雹云及效果检验[J]. 气象, 15(7):45-48. Dai T P, Zhang X H, 1989. Comprehensive probability method discriminate hail clouds and effect examination [J]. Meteor Mon, 15(7):45-48(in Chinese).
- 段鹤,严华生,马学文,等,2014. 滇南冰雹的预报预警方法研究[J]. 气象,40(2):174-185. Duan H, Yan H S, Ma X W, et al, 2014. Study of the method for hail forecasting and warning in southern Yunnan[J]. Meteor Mon, 40(2):174-185(in Chinese).
- 樊鹏,肖辉,2005. 雷达识别渭北地区冰雹云技术研究[J]. 气象, 31(7):16-19. Fan P, Xiao H, 2005. Study of hail cloud identification in the Weibei Area, Shaanxi Province by radar echoes[J]. Meteor Mon, 31(7):16-19(in Chinese).
- 黄晓龙,高丽,2016. 2014 年 3 月 19 日台州冰雹过程中尺度分析[J]. 气象,42(6):696-708. Huang X L, Gao L, 2016. Mesoanalysis of a hail process in Taizhou on 19 March 2014[J]. Meteor Mon, 42(6):696-708(in Chinese).
- 李聪,姜有山,姜迪,等,2017. 一次冰雹天气过程的多源资料观测分析[J]. 气象,43(9):1084-1094. Li C, Jiang Y S, Jiang D, et al, 2017. Observation and analysis of a hailstorm event based on multi-source data[J]. Meteor Mon, 43(9):1084-1094(in Chinese).
- 李云川,王伏霞,裴宇杰,等,2006. 用 CINRAD-SA 雷达产品识别冰雹、大风和强降水[J]. 气象,32(10):64-69. Li Y C, Wang F X, Pei Y J, et al, 2006. Products of CINRAD-SA Doppler radar applied to different typical weather[J]. Meteor Mon, 32(10):64-

- 69(in Chinese).
- 廖玉芳,俞小鼎,吴林林,等,2007.强雹暴的雷达三体散射统计与个例分析[J].高原气象,26(4):812-820. Liao Y F, Yu X D, Wu L L, et al, 2007. Statistic and case studies on radar three body scattering of severe hailstorm[J]. Plateau Meteor, 26(4): 812-820 (in Chinese).
- 刘晓璐,周长春,2016.川西南山地冰雹雷达预警指标[J].气象科技,44(2):252-258. Liu X L, Zhou C C, 2016. Indexes of hail warning using weather radar for southwestern mountain region of Sichuan[J]. Meteor Sci Technol, 44(2): 252-258(in Chinese).
- 鲁德金,陈钟荣,袁野,等,2015.安徽地区春夏季冰雹云雷达回波特征分析[J].气象,41(9):1104-1110. Lu D J, Chen Z R, Yuan Y, et al, 2015. Analysis on radar echo characteristics of hail clouds in spring and summer of Anhui Province[J]. Meteor Mon, 41(9):1104-1110(in Chinese).
- 覃靖,潘海,刘蕾,2017.柳州“4·09”致灾冰雹的超级单体风暴过程分析[J].气象,43(6):745-755. Qin J, Pan H, Liu L, 2017. Analysis of supercell storm leading to disastrous hail in Liuzhou on 9 April 2016[J]. Meteor Mon, 43(6):745-755(in Chinese).
- 邵玲玲,孙婷,邹锐,2005.多普勒天气雷达中气旋在强风预报中的应用[J].气象,31(9):34-48. Shao L L, Sun T, Wu R, 2005. Application of WAR-88D Radar mesocyclone products to prediction of mesoscale severe wind[J]. Meteor Mon, 31(9):34-48(in Chinese).
- 汤兴芝,黄兴友,2009.冰雹云的多普勒天气雷达识别参量及其预警作用[J].暴雨灾害,28(3):261-265. Tang X Z, Huang X Y, 2009. Doppler radar identification parameters and their effect on early warning of hail clouds[J]. Torr Rain Dis, 28(3): 261-265 (in Chinese).
- 王伏村,丁荣,李耀辉,等,2008.河西走廊中部冰雹天气的环流和多普勒雷达产品特征分析[J].高原气象,27(6):1344-1349. Wang F C, Ding R, Li Y H, et al, 2008. Characteristic analyses on 500 hPa Circulation and Doppler radar product of severe hail weather in Hexi Corridor of Gansu[J]. Plateau Meteor, 27(6): 1344-1349(in Chinese).
- 王改利,刘黎平,2005.多普勒雷达资料在暴雨临近预报中的应用[J].气象,31(10):12-15. Wang G L, Liu L P, 2005. Application of Doppler radar observation to rainfall nowcasting[J]. Meteor Mon, 31(10):12-15(in Chinese).
- 吴林林,2006.新一代天气雷达冰雹探测算法及在业务中的应用[J].气象,32(1):51-55. Wu L L, 2006. Description and application of CINRAD hail detection algorithm[J]. Meteor Mon, 32(1):51-55 (in Chinese).
- 肖艳姣,李中华,张端禹,等,2008.“07.7”鄂东南强对流天气的多普勒雷达资料分析[J].暴雨灾害,27(3):213-218. Xiao Y J, Li Z H, Zhang D Y, et al, 2008. Analysis of “07.7” severe convective events in southeastern Hubei Province with China New Generation Weather Radar Data[J]. Torr Rain Dis, 27(3): 213-218(in Chinese).
- 徐芬,郑媛媛,肖卉,等,2016.江苏沿江地区一次强冰雹天气的中尺度特征分析[J].气象,42(5):567-577. Xu F, Zheng Y Y, Xiao H, et al, 2016. Mesoscale characteristics of a severe hail event over the area along Yangtze River in Jiangsu[J]. Meteor Mon, 42(5):567-577(in Chinese).
- 应冬梅,许爱华,黄祖辉,2007.江西冰雹、大风与短时强降水的多普勒雷达产品的对比分析[J].气象,33(3):48-53. Ying D M, Xu A H, Huang Z H, 2007. A comparative analysis of Doppler radar products in hail, gale and short-time heavy rainfall in Jiangxi [J]. Meteor Mon, 33(3):48-53(in Chinese).
- 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[M].北京:气象出版社:149-154. Yu X D, Yao X P, Xiong T N, et al, 2006. Principle and Application of Doppler Weather Radar [M]. Beijing: China Meteorological Press:149-154(in Chinese).
- 张腾飞,段旭,鲁亚斌,等,2006.云南一次强对流冰雹过程的环流及雷达回波特征分析[J].高原气象,25(3):531-538. Zhang T F, Duan X, Lu Y B, et al, 2006. Circulation background for a severe convective hailstorm weather process in Yunnan and its Doppler radar echo features[J]. Plateau Meteor, 25(3): 531-538(in Chinese).
- Fulton A, Breidenbach J P, Seo D J, et al, 1998. The WSR-88D rainfall algorithm[J]. Wea Forecasting, 13:377-395.
- 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, 13:263-276.
- Witt A, Michael D E, Gregory J S, et al, 1998. An enhanced hail detection algorithm for the WSR-88D[J]. Wea Forecasting, 13: 286-303.