

文章编号:1004-9045(2008)03-0268-05

# CINRAD/SA 雷达产品在冰雹预警中的适用性分析

王建国, 汪应琼

(湖北省宜昌市气象局, 宜昌 443000)

**摘要:**使用 2003—2005 年 4—8 月发生在宜昌境内 17 次冰雹个例资料和相应的多普勒天气雷达(CINRAD/SA)产品资料,采用雷达产品特征分析和参量相关分析方法,对反射率产品、速度产品、回波顶高以及其他主要导出产品对冰雹预警的适用性进行了分析。结果表明:(1)反射率因子出现前侧 V 型槽口时,上升气流强烈,出现冰雹的可能性大。(2)降雹一般发生在正负风暴平均相对径向速度(SRM)对出现且其辐合最强时。(3)回波顶高达到 9 km 以上可作为冰雹发生的参考条件。(4)当垂直积分液态含水量(VIL)密度超过  $4 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$ ,出现直径超过 2 cm 大冰雹的可能性极大。(5)冰雹指数(HI)对冰雹预警有一定指示意义;中气旋(M)出现可发布雷雨、冰雹、大风等强天气警报;龙卷涡旋特征(TVS)出现,可考虑发布冰雹和大风的强天气警报,但需参照反射率和速度产品进行具体定位。

**关键词:**冰雹; CINRAD/SA; 雷达产品; 适用性

中图分类号:P458.3 文献标识码:A

## 1 引言

目前,我国在各地已陆续布设了 100 多部多普勒天气雷达,这些雷达在冰雹、雷雨大风以及局地暴雨等突发性灾害天气监测过程中发挥了重要作用。许多科技人员根据本地实际开展了多普勒天气雷达产品在强对流天气短时预警中的应用研究。如廖玉芳等<sup>[1]</sup>基于单多普勒天气雷达产品,开展了强对流天气预报预警方法的研究;俞小鼎等<sup>[2]</sup>利用新一代天气雷达开展强对流天气预警;葛润生等<sup>[3]</sup>对北京地区雹暴气流结构进行了研究;龙利民等<sup>[4]</sup>根据多普勒天气雷达的每 6 min 一次体扫监测信息,分析了副热带高压外围西北侧强对流天气雷达回波的演变趋势;尹中海等<sup>[5]</sup>使用多种多普勒天气雷达产品分析了强风暴单体的演变过程。

宜昌市位于长江中游起始沿线和鄂西山地与江汉平原的过渡地带,冰雹是该市山区县(市)的一种常见灾害性天气,尽管其发生发展及危害过程时间短,但来势猛、强度大,多伴有狂风、强降水等阵发性天气,常给当地农业、建筑、通讯、电力、交通等行业以及人民生命财产造成重大损失。如何充分发挥多普勒天气雷达(CINRAD/SA)系统在冰雹预警中的作用,是一个值得当地天气预报服务人员关注的问题。为此,使用 2003—2005 年发生在宜昌境内冰雹个例资料和相应的多普勒天气雷达产品资料,对 CINRAD/SA 雷达产品在冰雹预警中的适用性进行了分析,以便找到能

有效揭示冰雹特征的主要雷达产品和相关参数特征。

## 2 资料与方法

### 2.1 资料来源

(1)2003—2005 年 4—8 月在宜昌市境内共观测到 19 次冰雹过程,其中 4、5、6、7、8 月分别为 4、1、6、4、4 次,发生地点以该市所辖的兴山县、夷陵区最多,五峰、秭归、长阳三县次之,宜昌城区及东部平原地带出现冰雹极少,且降雹均发生在午后至前半夜,持续时间短,少则 1 min,多则不超过 1 h。这 19 次冰雹过程的发生时间、地点以及冰雹直径等资料均来自于宜昌所辖各县(市)气象局。

(2)收集与降雹过程对应的 VCP21 雷达体扫模式资料,共得到 17 次有效个例。由于冰雹常发生在对流云系或单体对流云块中,属于中小尺度天气系统,降雹时间一般较短,本文只研究了降雹时刻前 4 个体扫、降雹时段内体扫、降雹后 2 个体扫的产品,每次过程至少有 7 个以上的体扫资料。在雷达产品的选择上,申请了基本反射率( $1.5^\circ$ 、 $2.4^\circ$ 、 $3.4^\circ$ )、组合反射率(CR)、基本径向速度( $1.5^\circ$ 、 $2.4^\circ$ 、 $3.4^\circ$ )、回波顶高(ET)、垂直积分液态含水量(VIL)、风暴相对平均径向速度(SRM)、冰雹指数(HI)、中气旋(M)、龙卷涡旋特征(TVS)等产品。

### 2.2 研究方法

(1)给出几个定义。1)冰雹产品时刻,指对应于冰雹发生时或后延小于一个周期(约 6 min)的雷达产品生

收稿日期:2007-10-29;定稿日期:2008-05-20

基金项目:湖北省科技攻关项目“长江中游短时天气预警业务系统(MYNOS)”资助

作者简介:王建国,男,1972年生,工程师,主要从事气象信息网络、短时短期天气预报工作。E-mail:ycwjg72@yahoo.cn

成时间;2)雷达样本时间,指冰雹产品时刻前4个体扫和冰雹产品时刻后2个体扫时间;3)雷达样本区域,指与降雹地点对应的雷达产品像数(距离门)周围8 km或12 km半径范围内的区域。

(2)参量统计。1)选取与降雹事件对应的体扫资料,即利用体扫资料进行产品资料反演,统计每次降雹过程中雷达样本时间内雷达样本区域各产品的特征,将雷达样本区域内的最大值作为该参量的值;2)特征量计算,将每一单个样本时间窗内各参量的最大值(有最大值的项)作为该次样本过程中该参量的特征值,再将各次样本过程中各参量的特征值累加后除以样本数作为多样本平均特征值。

### 3 结果分析

#### 3.1 反射率产品的适用性分析

##### 3.1.1 回波形态

观测结果表明,所有发生冰雹的雷达回波均表现为明显的对流单体回波特征,具有密实强中心,且回波强度梯度非常大,没有一般降水回波比较清晰的强度递增过渡带,反射率值通常在很小范围内发生跃升。如2005年4月30日14:37发生在长阳县境内的一次直径达3 cm的冰雹过程,在不足2 km距离内,反射率值从20 dBz跃升到65 dBz(图略),其梯度大于 $20 \text{ dBz} \cdot \text{km}^{-1}$ 。进一步分析发现:有6例冰雹过程呈现弓状回波特征,其中5例冰雹持续时间不超过20 min,冰雹直径均不超过1 cm;有3例冰雹过程回波前部出现了V型槽口,其中2例冰雹直径达到3 cm。

大冰雹常常和超级单体风暴紧密相连,风暴中强烈的上升气流是产生大冰雹(直径在2 cm以上)的必要条件,而超级单体中所观测到的前侧V型槽口通常表明强的入流气流进入上升气流。这种强烈的上升气流非常有利于雹胚成长为大冰雹。从基本反射率因子(2.4)产品图上可见明显的V型槽口(图1中的圆圈处)。再如2004年7月6日17:45发生在秭归杨林的一次

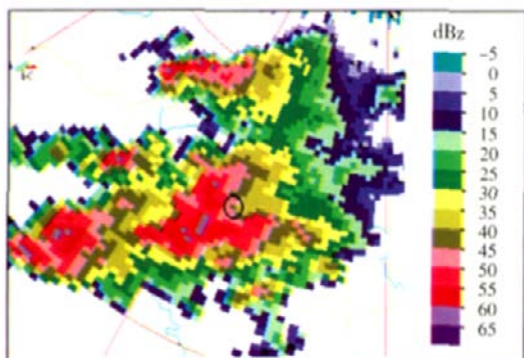


图1 2005年4月30日14:37长阳大冰雹过程的基本反射率因子(R19,2.4°)

冰雹过程,其最大冰雹直径达3 cm,也出现了明显的V型槽口。

##### 3.1.2 反射率特征量

反射率产品能反映回波的强度、移动和发展趋势。对10 cm波长的CINRAD/SA雷达而言,冰球的直径绝大部分都处在瑞利散射适用的范围内,而冰雹的直径一般大于水球的直径,因此一旦降水粒子中出现了冰雹,通常都对应着高反射率。由于组合反射率(CR)因子表示的是在一个体积扫描中将常定仰角方位扫描中发现的最大反射率因子投影到笛卡尔格点上的产品,因此在讨论反射率特征量时,集中分析组合反射率。

采用第2.2节中所述方法统计这17次过程的组合反射率因子特征量。结果表明,在降雹前后7个体扫中,组合反射率因子均在55 dBz以上,由此计算出17次降雹过程组合反射率的特征值。图2为这17次降雹过程中CR的反射率特征值(其中将>65 dBz的值记为65 dBz)。对这17次取其平均,得到CR的平均特征值为62.1 dBz。

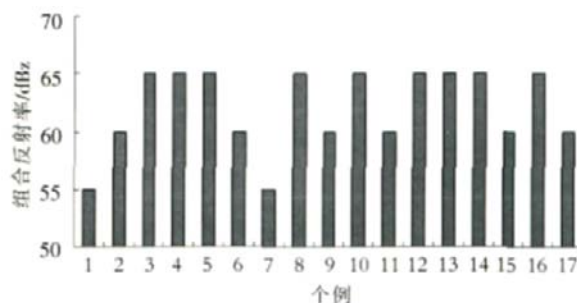


图2 2003—2005年宜昌市17次降雹过程中CR的平均反射率特征值

从图2中可见,仅有2次过程的反射率特征值为55 dBz,9次过程(过半数)的反射率特征值为65 dBz。反查反射率特征值为55 dBz的这两次过程,它们均出现在2003年6月,降雹地点分别在夷陵区的羊角山和秭归的梅家河,两地距宜昌雷达站都较远,均在70 km之外,且降雹地为山区,海拔较高,很可能出现了一定程度的地物遮挡。因此在实际应用中,一旦组合反射率因子达到55 dBz以上,就要考虑是否为雹云回波。

#### 3.2 速度产品(SRM、V)的适用性分析

CINRAD/SA中的基本速度(V)能反映地面相对风场、大气结构、风暴结构,可识别出风场气旋、反气旋、辐合辐散等。风暴平均相对径向速度(SRM)则能较为客观地描述风暴运动变化规律。基于此,分别对这两种产品在冰雹预警中的适用性作如下分析。

通过对2003—2005年宜昌市17次降雹个例的分析发现,其中15例SRM表现出相同的相对风场发展趋势,相对速度非常大,有13例正负最大速度极值

在  $12 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  以上, 8 例出现速度模糊, 此时风场既有表现为气旋性的, 也有表现为反气旋性的。降雹结束后, 有 5 例在低层(1.5°)表现为无规律的正负速度。这里, 以 2004 年 7 月 8 日五峰长乐坪降雹天气过程为例说明相对风场的发展趋势。首先, 14 时 09 分, 即降雹前 4 个体扫左右, 风场表现为一致的正速度区或一致的负速度区(图 3a); 14 时 21 分, 即降雹前 1~2 个体扫,

在风暴内出现正负速度并存区, 但辐合不是很强 (图 3b); 14 时 27 分, 仍表现为气旋性环流, 但辐合明显增强, 降雹开始(图 3c); 14 时 40 分, 降雹结束后, 正负速度并存区域开始减小, 表现为辐散(图 3d), 此时风场的走向并不一定与降雹前 4 个体扫一致。风场的这种表现表征了一个风暴单体从发展到成熟再到消亡的过程。

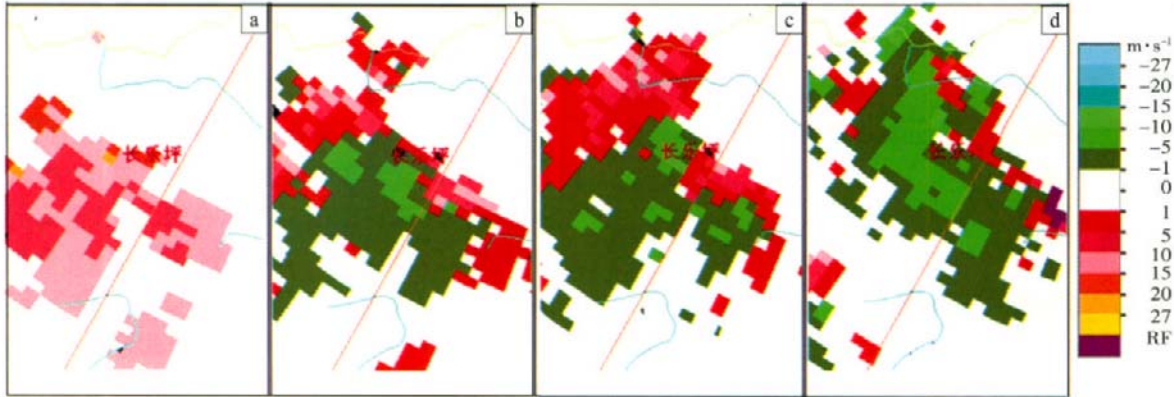


图 3 2004 年 7 月 8 日五峰长乐坪降雹前后 SRM(1.5°)演变过程  
(a)14 时 09 分 (b)14 时 21 分 (c)14 时 27 分 (d)14 时 40 分

另外, 对应反射率产品中所出现的前侧 V 形槽口, 在相对风暴速度图中低层出现了明显的入流现象。值得一提的是, 2005 年 4 月 24 日 19 时左右发生在夷陵区下堡坪乡秀水坪的降雹过程, 在降雹前 2 个体扫至降雹时, 风场由“V”形入流逐渐转为螺旋型入流, 其对应强度场呈现典型的钩状回波, 同时雷达探测到了中气旋(M)的存在。

分析 2003—2005 年宜昌市 17 次降雹个例的基本速度产品(V)发现, 在风场发展趋势上, 基本速度(V)主要表现为风速增大和辐合, 并无风场突变现象。这主要是由于大环境风场掩盖了小尺度风场信息所致, 也正是基本速度产品的缺陷之一。

### 3.3 回波顶高(ET)的适用性分析

由回波顶高(ET)能很快知道强对流回波发展的高度、位置。分析 2003—2005 年宜昌市 17 次降雹个例的回波顶高(ET)特征值发现, ET 均在 9 km 以上, 最大值达到 17 km, 其平均顶高为 12 km(图 4)。

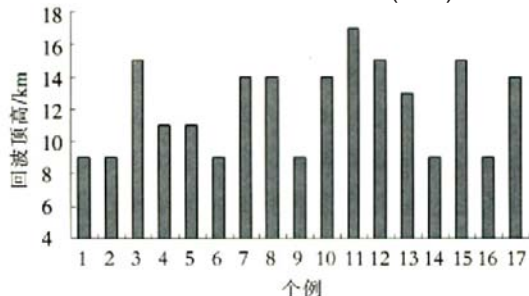


图 4 2003—2005 年宜昌市 17 次降雹个例回波顶高(ET)

图 4 中, 对应于个例 11 是 2005 年 4 月 30 日发

生在长阳境内的一次冰雹过程, 其最大冰雹直径为 3 cm, 回波顶高达 17 km。可见, 回波顶高达到 9 km 以上可作为降雹发生的一个基本条件。但从宜昌有雷达观测记录以来, 也发生过不少回波顶高达到 9 km 甚至更高却未降雹的情况。因此, 回波顶高大于 9 km 只能作为有利于宜昌地区降雹的一个参考条件。

### 3.4 垂直积分液态含水量(VIL)的适用性分析

有研究表明<sup>[2]</sup>, 垂直积分液态含水量 VIL 是判断对流风暴强度的一个十分有用的参量。为了分析垂直积分液态含水量(VIL)的适用性, 给出了 2003—2005 年宜昌市 17 次降雹个例的 VIL 特征量图(图 5)。

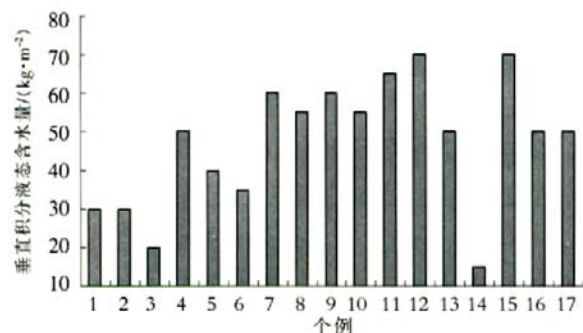


图 5 2003—2005 年宜昌市 17 次降雹个例的垂直积分液态含水量(VIL)

从图 5 中可见, 17 次冰雹中有两次降雹过程的 VIL 值  $< 20 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$ 。反查这两次过程, 它们分别出现在 6 月份稀归的梅家河和兴山的榛子, 降雹地点距宜昌雷达站均在 80 km 以上。考虑到这两处均为山区且海拔高度在 1 500 m 以上, 因此很有可能出现地形遮

挡。同时,两次过程生命史都很短(不足 10 min)且移动速度快。其他各次过程 VIL 值均大于  $30 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$ ,其中有 11 次过程的 VIL 值达到  $50 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$  以上。鉴于此,对于距离雷达站较远的对流回波,要综合反射率和回波顶高进行分析。即:回波顶高超过 9 km 就要考虑有强对流发生,若同时 50 km 内 VIL 值达到  $50 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$ ,则意味着发生冰雹的可能性非常大。

另外,通过对 17 次降雹个例中的 6 次 VIL 值  $55 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$  的降雹过程进行分析发现,这 6 次过程均同时出现雷暴、冰雹、大风等多种强对流天气。如 2004 年 7 月 6 日、2005 年 4 月 30 日发生在长阳的两次冰雹过程,其冰雹最大直径分别为 3.5 cm、3.0 cm, VIL 值分别为  $60 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$ 、 $70 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$ 。由于不同季节出现大冰雹所需的 VIL 阈值相差很大, Amburn 等<sup>[9]</sup>将 VIL 值与风暴顶高度之比定义为 VIL 密度,并发现如果 VIL 密度超过  $4 \text{ g}\cdot\text{m}^{-3}$ ,则风暴几乎肯定会产生直径超过 2 cm 的大冰雹。通过计算上述发生在长阳县境内的两次过程的 VIL 密度,其 VIL 密度值均大于  $4 \text{ g}\cdot\text{m}^{-3}$ 。

以上分析结果表明:垂直积分液态含水量(VIL)产品对冰雹识别具有一定的指示意义,它实际上反映的是反射率因子的垂直累积,代表了风暴的综合强度,因此 VIL 值随着反射率因子的增强而增强;但考虑到 VIL 值的季节变化,并不能单纯根据其量值大小预报是否降雹,只能定性使用;若要在实际短时预警服务中定量使用 VIL 值,可结合回波顶高(ET)综合使用。

### 3.5 冰雹指数(HI)、中气旋(M)、龙卷涡旋特征(TVS)的适用性分析

(1)冰雹指数(HI)。在冰雹指数(HI)产品中,冰雹概率(POH)表示任意大小的冰雹的降雹概率,显示间隔以 10%增加;强冰雹概率(POSH)表示直径为 2 cm 以上冰雹的降雹概率,显示间隔也以 10%增加。在图形显示中,用小的空的或实的绿色三角形来表示 POH,三角形显示的 POH 必须超过“最小显示阈值”。三角形是空心还是实心,取决于“填充阈值”。POSH 以较大的绿色三角形来代表,实心绿色三角形代表超过了“填充阈值”<sup>[7]</sup>。对于 2003—2005 年宜昌市 17 次降雹个例,最小显示阈值缺省 30%,填充阈值缺省 50%。统计结果表明,所有降雹个例均出现了 POSH ( ), 超过 75%的个例出现了 POSH ( ), 其命中率较高,该产品对冰雹具有很好的指示意义;但由于冰雹探测算法本身具有其不完善性,且冰雹增长与环境温度也存在较大关系,致使虚警率也偏高<sup>[8]</sup>。

(2)中气旋(M)和龙卷涡旋特征(TVS)。中气旋是与对流风暴的上升气流紧密相联的小尺度涡旋,常出现在超级单体风暴中<sup>[9-10]</sup>。实际预报业务中,若观测到中

气旋,90%以上的情况会出现强烈天气(灾害性大风、冰雹、暴雨),因此只要观测到中气旋就可发布强天气警报<sup>[7]</sup>。从 2003—2005 年宜昌市 17 次降雹个例来看,仅有 2 次个例出现中气旋(M)和龙卷涡旋特征(TVS),分别在 2004 年 7 月 8 日、2005 年 4 月 30 日,但出现的地点和时次有所不同;2004 年 7 月 8 日 16:30 分别在长阳和秭归周坪出现中气旋,实况是长阳出现冰雹和大风,秭归进行了 1 h 人工消雹作业;2005 年 4 月 30 日 14:37 长阳长乐坪出现中气旋,实况是当地出现直径 3 cm 的大冰雹。从其组合反射率(CR)与中气旋(M)的迭加图上可见(图 6a),当地有中气旋(图中黄圈所示位置)存在。这表明中气旋对冰雹等灾害性天气具有极好的指示意义。

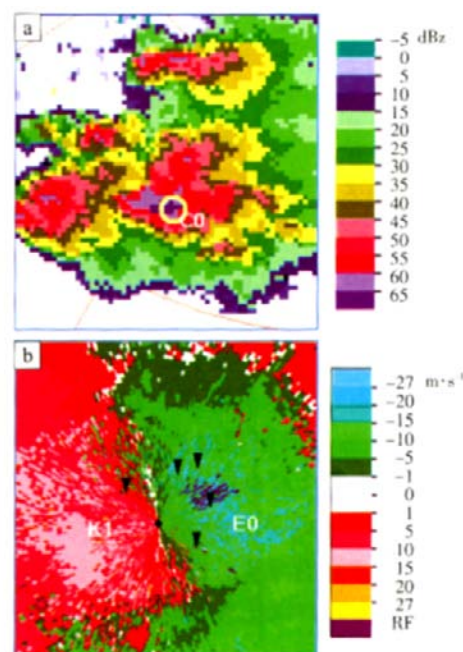


图 6 2005 年 4 月 30 日宜昌多普勒雷达组合反射率(CR)与中气旋(M)的迭加图(a),相对风暴速度(SRM)与龙卷涡旋特征(TVS)的迭加图(b)

由于雷达波束宽度随距离增加而展宽和随后发生在取样体积中求平均,以及雷达波束从 TVS 靠近地面部分的上面穿过,使得 100 km 以外的龙卷涡旋特征(TVS)难以分辨。在 2003—2005 年宜昌市 17 个降雹个例中,仅 2 个个例(时间为 2004 年 7 月 8 日、2005 年 4 月 30 日)中出现龙卷涡旋特征(TVS),前者,五峰、长阳、枝江出现冰雹,冰雹最大直径 1 cm,其中长阳、枝江均出现 8 级以上大风;后者,长阳、五峰出现冰雹,冰雹最大直径 3 cm,其中长阳有 3 个乡镇出现大风(因观测资料缺乏,风力不详)。经分析发现,龙卷涡旋特征(TVS)出现范围均在雷达站方圆 40 km 内,有时甚至出现挤堆现象。如 2005 年 4 月 30 日 20:21 至 21:16,在雷达站方圆 40 km 范围内连续出现多个 TVS。图 6b 为相对风暴速度(SRM)与龙卷涡旋特征(TVS)的迭加图,该地

出现龙卷涡旋特征(图中倒三角所示位置)。

但值得注意的是,龙卷涡旋特征(TVS)发生的方位并不在强对流发生地点,而是出现在离雷达站较远的地方。2004年7月8日最先出现TVS在16:06,随后其方位从西移至东,而冰雹和大风最早发生在长阳,出现在16:15,其后发生在枝江,与TVS移动方位一致;2005年4月30日最先出现TVS在14:19,最先发生冰雹和大风在14:30。从上述两个个例中可以看出,出现TVS时,冰雹和大风均出现,且至少可提前5~10 min以上。因此,尽管龙卷涡旋特征(TVS)表征的方位与出现冰雹和大风的方位离雷达站较远,但对冰雹和大风具有很强的指示意义,其一旦出现即可考虑发布强天气警报(包括冰雹和大风),而强天气发生的地点则需参照反射率和速度产品。

#### 4 结论

(1)对于反射率产品,雹云回波表现为强中心密实、强度梯度很大;当其出现弓形和V型槽口时,易发生冰雹,尤其出现前侧V型槽口时,表明有强的上升气流,出现直径1 cm以上较大冰雹的可能性相当大;发生冰雹时,组合反射率(CR)值一般要求大于55 dBz。

(2)对于速度产品,风暴平均相对径向速度(SRM)对冰雹预警有较好的指示意义。从SRM中的风场突变、风的辐合辐散可判断风暴的发展阶段,一般而言,冰雹发生在正负速度对出现且辐合最强时。结合反射率产品的回波强度特征来使用,其监测预警效果更好。比较而言,在研究风暴结构时,SRM比基本速度(V)更能表现雹云内部的风场发展趋势,可用性更好。

(3)回波顶高达到9 km以上可作为有利于冰雹发生的参考条件。

(4)垂直积分液态含水量(VIL)值越大,出现直径大于2 cm大冰雹的可能性越大。VIL密度超过 $4 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$ ,出现直径超过2 cm大冰雹的可能性极大。

(5)默认参数的冰雹指数(HI)对冰雹预警有一定指示意义,但虚警率偏高,需对阈值进行适当调整;出现中气旋(M)一般就可发布雷雨、冰雹、大风等强天气警报;龙卷涡旋特征(TVS)表征的方位与出现冰雹和大风的方位离雷达站较远,但对冰雹和大风具有很强的指示意义,一旦出现即可考虑发布强天气警报(包括冰雹和大风),在确定强天气发生地点时,需参照反射率和速度产品。

#### 参考文献:

- [1] 廖玉芳,潘志强,郭庆.基于单多普勒天气雷达产品的强对流天气预报预警方法[J].气象科学,2006,26(5):564-571.
- [2] 俞小鼎,王迎春,陈明轩,等.新一代天气雷达与强对流天气预警[J].高原气象,2005,24(3):456-464.
- [3] 葛润生,姜海燕,彭红.北京地区雹暴气流结构的研究[J].应用气象学报,1998,9(1):1-7.
- [4] 龙利民,陈亮,江航东,等.副热带高压外围西北侧一次强对流天气的雷达回波特征[J].暴雨灾害,2007,26(1):68-72.
- [5] 尹忠海,刘应军,黎祖贤,等.湘中“6.26”雷雨大风过程的多普勒雷达产品分析[J].暴雨灾害,2007,26(4):319-322.
- [6] Amburn S A, Wolf P L. VIL Density as a Hail Indicator [J]. Wea Forecasting, 1997, 12: 473-478.
- [7] 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,2007:91.
- [8] 杨引明.WSR-88D多普勒天气雷达冰雹探测算法及评价[J].气象,1999,25(5):40-43.
- [9] 应冬梅,许爱华,黄祖辉.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,2007,33(3):48-53.
- [10] 朱军鉴,王令,黄秀韶.CINRAD/SA中气旋产品与强对流天气[J].气象,2005,31(2):38-42.

## The Applicability Analysis of CINRAD/SA Radar Products on the Early-warning for Hail

WANG Jian-guo, WANG Ying-qiong

(Yichang Meteorological bureau of Hubei Province, Yichang 443000)

Abstract: Based on the 17 hail cases occurred in Yichang from April to August during 2003-2005, CINRAD/SA radar products' applicability on the early-warning was analyzed by means of the radar products features analysis and the parameter correlational analysis. The forth-flank notch in the reflectivity product indicated the strong updraft and the great probability of hail. Hails generally occurred when the average relative radial velocity couple of positive and negative storm (SRM) appeared and the convergence was the strongest. It's a reference qualification of hails occurring that the convection Echo Tops (ET) height is up to 9 km. Moreover, there is a great probability of big hail whose diameter might be over 2 cm when VIL density is  $4 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$  and more. The Hail Index (HI) has a certain extent indication for hails' early-warning. Once the Mesocyclone (M) appears, a severe weather (including thunder storm, gale, and hail) alarm signal can be promulgated. When a Tornado Vortex Signal (TVS) appears, the gale and hail alarm could be promulgated. The reflectivity and velocity products can help to position the severe weather.

Key words: Hail; CINRAD/SA; Radar products; Applicability