

湘西北山区夏季冰雹云多普勒雷达 定量判别指标

樊志超¹ 高继林² 王治平² 高志强³ 彭德元³

- (1. 湖南省张家界市气象局, 427000; 2. 湖南省人工影响天气办公室;
3. 湖南省张家界市烟草公司)

提 要: 利用湘西北张家界市 2005 年夏季的人工防雹增雨作业资料和地面降雹资料, 分析冰雹云的雷达产品特征, 发现使用小型车载雷达可以很好地弥补多普勒雷达常规业务产品中垂直剖面产品方面的不足, 并归纳总结出了湘西北山区夏季冰雹云的 1 个先兆特征综合定性指标和 4 个雷达定量判别指标。实践表明, 综合运用定性和定量指标可以快速准确提前识别冰雹云, 有利于早期作业, 是人工防雹作业获得成功的关键因素。

关键词: 冰雹云 多普勒 雷达判剧

On Hail Cloud Identification in Summer in the Mountainous Area of Northwestern Hunan with Doppler Radar Echoes

Fan Zhichao¹ Gao Jilin² Wang Zhiping²
Gao Zhiqiang³ Peng Deyuan³

- (1. Zhangjiajie Meteorological Office, Hunan Province, 427000;
2. Hunan Weather Modification Office; 3. Zhangjiajie Tobacco Company)

Abstract: Based on the data of weather modification and hailfall at Zhangjiajie in the north-west area of Hunan Province in the summer of 2005, the radar echo characteristics of hail cloud are analyzed, and the results show that a small mobile radar can have more RHI profiles to supply a deficiency far from Doppler radar in hail-preventing activity, One qualitative and four quantitative identification indexes for the hail cloud identification are found, and

with the indexes the hail cloud may be rapidly and accurately distinguished.

Key Words: hail cloud Doppler radar identification criterion

引 言

湘西北山区是我国南方多雹灾地区，受局地气候和地形地貌影响，易生成多单体雹云，其生命史短，往往在半小时至一小时内由积云发展成为冰雹云，几分钟后冰雹落地，防雹作业的时间性极强。利用雷达识别冰雹云和雷雨云，我国科学家早有研究，如陕西渭北地区用 711 雷达的 45dBz 强回波顶高及其温度识别冰雹云^[1]。但冰雹云的识别，对于不同地区和季节、不同类型的雹云、不同发展阶段、不同的探测手段和识别方式，都有差异，雷达回波指标因地方和季节不同而特征各异，研究基于新一代天气雷达的雹云识别指标具有重要实际意义。根据当地冰雹云的特征，利用联防责任区内的多普勒雷达产品，结合车载雷达的现场探测，归纳整理出了一套湘西北山区夏季冰雹云的定性指标和雷达定量判别指标，通过早期识别、早期开炮、联防联网作业，收到了良好的防雹效果。

1 一次典型多单体雹云防雹作业的雷达分析

2005 年 6 月 21 日 17 时，张家界市桑植县刘家坪等 10 个乡镇遭受大风冰雹袭击，冰雹最大直径 30mm，最大风力 10 级，持续时间约 2 个小时。6 月 22 日 15 时，大风冰雹再度袭击桑植县，经过官地坪镇时防雹站（图 1 中路，见彩页）对雹云进行了炮击，有效保护区内没有下冰雹，也未刮大风，但在防区外仍有沙塔坪等 5 个乡镇遭受到了大风冰雹袭击。据民政部门统计，连续

雹灾造成受灾面积 2266.8hm²，直接经济损失 850 万元，尤其烟叶等经济作物损失较重。

1.1 天气形势背景

在 6 月 22 日 14 时地面天气图上，997.5hPa 的低压中心位于我国内蒙中部，在贵州中部至湘西北有一条冷锋生成，08 时的 700hPa、850hPa 高空图上，与冷锋对应的是一条东北风与西南风的切变线，500hPa 高空图上，东北地区是一个深厚的冷涡，沿海深槽已经建立，5880gpm 线位于台湾以东洋面稳定少动，湘西北受槽后西北气流控制，冷平流明显。低层辐合系统与中高层冷空气的共同影响触发产生了这次局地强对流天气过程。

1.2 雷达回波特征分析

1.2.1 风暴移动路径、风暴反射率特征

从多普勒雷达组合反射率（CR）图上可以看出（如图 2，见彩页），6 月 22 日 15:07 在官地坪防雹站东北方向距离 18km 的湘、鄂交界处有两块强对流单体生成，中心强度达 60dBz。至 15:26 两块单体基本合并，45dBz 以上强回波面积约 150km²，实况为中心所处长潭坪、白石已出现冰雹大风。15:32 合并后的冰雹云在高空东北气流引导下加速向西南方向移动，在雹云移向左前方靠西南暖湿气流一侧开始形成“V”型槽口（入流区）。15:36 至 15:45，官地坪防雹站对进入防区雹云的前部上升气流区进行了炮击，采用前倾梯度组合共发射炮弹 120 发，5 分钟后，炮点周围开始下起了大颗的冷阵雨，但降雨量只有 4.1mm，只刮了 3~4 级偏北风。炮击后“V”型槽口开始模糊，

16:15 雹云回波强度明显减弱开始消散。

1.2.2 速度场特征分析

相对于风暴的平均径向速度图 (SRM) 可用来探测被风暴运动掩盖的切变区域, 如图 3 (见彩页), 从 15:26 仰角 0.5° (高度 2.7km)、 1.5° (高度 5km) SRM 图上可以看出, 存在一片正负速度径向对称, 表明该区域中低层垂直方向有明显的风向切变存在。15:32 仰角 1.5° 的 SRM 显示风切变相对 15:26 有进一步加强趋势。 2.4° (高度 7km) 仰角以上 SRM 表现为辐散特征。

1.2.3 车载雷达 PPI 和 RHI 产品特征分析

官地坪车载雷达 15:25 探测到西北方向有强对流云团向炮站移来, 15:35 距离 10km 的对流云团回波强度由 45dBz 急增至 60dBz, RHI 显示回波顶高达 10km, 50dBz 强回波主要位于云体中上部的 4~8km 高度, 如图 4 (见彩页), 冰雹云的特征十分明显。作业后 16:11 车载雷达回波显示雹云中心强度明显减弱至 50dBz。

2 湘西北山区夏季冰雹云的雷达定量判别指标

通过对防雹站 2005 年 6—8 月的 9 次防

雹作业, 同期全市各地的 24 次人工增雨作业, 以及民政等有关部门的 5 次冰雹灾害调查情况加以综合分析, 得出了湘西北山区夏季冰雹云的 4 个雷达定量判别指标。以下分析中的雷达图像资料以常德 CINRAD/SB、长沙 CINRAD/SA 多普勒天气雷达观测资料为主, 以防雹站 TWR01 型车载天气雷达观测资料为辅, 探空资料选用临近怀化市探空观测资料。

2.1 用多普勒雷达组合反射率因子 (CR) 55dBz 识别冰雹云

根据微波散射理论, 由于云中冰雹的尺寸较水滴来得大, 加上其他原因, 冰雹云的雷达回波强度总是大于同地区、同季节时出现的普通积雨云的回波强度^[2]。统计防雹增雨时雷达观测技术参数 (如表 1、表 2), 结果显示, 多普勒雷达组合反射率因子 55dBz 是湘西北山区夏季出现冰雹云的一个重要判据。这与当地冰雹云形成受地形影响较大, 对流和水汽条件相对较弱有关。实测的结果还表明, 两块 45dBz 以上对流单体合并后能得到迅速发展, 与合并前相比, 合并后的回波强度加强、高度升高, 面积扩大, 一旦合并立刻就会下冰雹。

表 1 2005 年人工增雨作业前后雷雨云多普勒雷达组合反射率强度

作业前多普勒雷达 CR 强度/dBz				作业 10 分钟后多普勒雷达 CR 强度/dBz			
CR≤50	50<CR≤55	平均	最大值/ $H_{\text{顶}}$	CR≤50	50<CR≤55	平均	最大值/ $H_{\text{顶}}$
21 次	3 次	41.9	55/9km/1 次	23 次	1 次	41.3	55/8km

2.2 用多普勒雷达 9km 回波顶高 ($H_{\text{顶}}$) 识别冰雹云

冰雹云中的上升气流强于普通雷暴, 所以冰雹云强回波的高度也高, 表 2、表 3 统计结果显示, 湘西北山区夏季冰雹云的回波顶高 $H_{\text{顶}}$ 均在 9km 以上, 平均为 12.5km,

最高达 17km, 9km 以下未出现冰雹云, 当地夏季 0°C 层高度值平均为 5435.2m, 冰雹云回波顶高 $H_{\text{顶}}$ 在 0°C 层以上的平均高度为 7.1km。阵雨云回波顶高 $H_{\text{顶}}$ 多在 9km 以下, 平均为 6.9km, 最高值达 11km/50dBz, 阵雨云的回波顶高 $H_{\text{顶}}$ 在 0°C 层以上的平均高度为 1.5km。统计结果还表明,

防雹作业相对增雨作业来说，作业 10 分钟后云体的 CR 和 $H_{\text{顶}}$ 值均有明显下降，平均下降 6dBz 和 1.6km，而阵雨云增雨作业前后的 CR 和 $H_{\text{顶}}$ 值差别不明显。

表 2 2005 年烤烟高炮防雹作业（观测）的多普勒雷达主要技术参数

日期	作业或观测时间	炮点名称	作业前 CR 强度值/dBz	作业前 $H_{\text{顶}}$ /km	08 时 (20 时) H_c /m	10 分钟 后 CR 强度/dBz	10 分钟 后 $H_{\text{顶}}$ /km	云型
06.22	15:36—15:45	官地坪	60	11	5163	50	9	冰雹云
06.25	19:45—19:55	官地坪	50	17	(5645)	50	15	冰雹云
06.28	22:01—22:11	官地坪	50	5	5800	40	5	雹云边
07.09	18:48—18:52	官地坪	60	15	(5538)	50	11	冰雹云
07.31	18:08—18:12	官地坪	50	11	(5444)	55	11	冰雹云
07.15	14:40—14:44	八大公山	55	14	5049	55	14	冰雹云
07.16	3:04—3:11	八大公山	55	14	5049	40	11	冰雹云
07.09	4:20—4:30	八大公山	50	9	5797	40	8	阵雨云
07.09	21:25—21:30	八大公山	45	8	(5538)	35	6	阵雨云
06.21	17:16 观测	五道水	60	11	5104	雹灾实况		冰雹云
06.21	17:28 观测	龙潭坪	55	11	5104	雹灾实况		冰雹云
06.22	16:27 观测	白石	60	11	5163	雹灾实况		冰雹云
06.22	17:05 观测	刘家坪	60	11	5163	雹灾实况		冰雹云
06.22	17:48 观测	凉水口	60	11	5163	雹灾实况		冰雹云

表 3 2005 年人工增雨作业前后雷雨云多普勒雷达回波顶高

作业前 $H_{\text{顶}}$ /km				作业 10 分钟后 $H_{\text{顶}}$ /km			
$H_{\text{顶}} \leq 8$	$8 < H_{\text{顶}} \leq 11$	平均	最大值/CR/次	$H_{\text{顶}} \leq 8$	$8 < H_{\text{顶}} \leq 11$	平均	最大值/CR/次
22 次	2 次	6.9	11/50dBz/1 次	21 次	3 次	6.8	11/50dBz

2.3 用多普勒雷达垂直累积液态水（VIL）
 $30\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$ 识别冰雹云

垂直累积液态水（VIL）是假定反射率因子强度来自于液态水滴，由于冰雹单体并非由液态水构成，会导致很强的 VIL，所以有助于识别冰雹单体。本地观测结果显示，层状云降水 VIL 值一般为 $5 \sim 10\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$ ，强降水 VIL 值一般 $\geq 15\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$ ，冰雹云 VIL 值一般为 $30 \sim 35\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$ ，最大可达 $50\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$ 。

2.4 用车载雷达的 PPI 产品 60dBz 和 RHI 产品 $H_{45\text{dBz}} \geq H_{0^\circ\text{C}}$ 层 + 3km 识别冰雹云

TWR01 型天气标识雷达是基于全数字

化、总线结构设计、能分布式网络化使用的计算机雷达，其工作频段为 X 波段，防雹站所使用的车载移动 II 型雷达天线直径为 1m，发射机功率为 6kW，探测区作用距离为 120km 范围，测量区为 100km，探测目标主要是厚云层、积雨云和冰雹云，能对云雨移来的分布中心及前沿进行探测，提供 PPI 和 RHI 显示产品。对于局地天气过程，尤其是冰雹云，车载雷达的近距离监测效果较佳，适应于多普勒天气雷达盲区，可用于对多普勒雷达日常业务化产品中剖面产品不足的补充。统计官地坪防雹站的 4 次冰雹云和 8 次雷雨云的车载雷达观测数据，如表 4，结果显示，冰雹云 PPI 回波强度平均为 60dBz、RHI 显示云高平均为 10.6km、云

顶在 0℃层以上的平均高度为 5.3km。雹云 45dBz 强回波主要位于 2~8.3km 垂直高度范围,平均在 0℃层高度值±3km 高度,居

于云体中上部。而阵雨云的 45dBz 强回波高度均在 0℃层高度值以下,平均位于 1~4km 垂直高度,居于云体中下部。

表 4 官地坪防雹站 TWR01 型车载雷达观测冰雹云(含雷雨云)的主要技术参数

日期	观测或作业时间	作业前 PPI 显示回波强度/dBz	作业前 RHI 显示云高/km	≥45dBz 强回波垂直范围/km	08 时(或 20 时) 探空 0℃层 高度值/m	云型
06.22	15:43	60	9	2~7.5	5163	冰雹云
06.22	16:11	60	11.5	2.5~10	5163	冰雹云
07.18	18:49	60	12	2~9	5496	冰雹云
07.31	18:12	60	10	1~7	5517	冰雹云
06.12	3:50	45	5	4	5256	阵密云
07.08	16:56	50	6	1~3.5	5790	阵密云
07.08	17:05	60	4	0.5~3.5	5790	阵密云
07.09	12:00	60	5	1~3.5	5797	阵密云
07.18	18:41	60	12	2~5.5	5496	阵密云
07.23	23:07	45	5.5	1~3	5281	阵密云
07.24	14:01	45	5.5	1~3	5233	阵密云
07.26	04:17	60	12	1~5.5	5511	阵密云

3 湘西北山区夏季冰雹云的先兆特征综合定性指标

总结湘西北山区夏季冰雹云的特点,得出了感冷热、辨风力、看云色、听雷声、识闪电、观物象,参谚语的先兆特征定性指标。冰雹云实际上是强对流云,一次强冰雹来临之前,总会有几天连续晴热高温天气。冰雹大风常结伴而来,有冰雹必有大风,出现大风则不一定有冰雹。“黑云黄边子,一定有雹子”,指冰雹云多有颜色发黄,并常常可以听到闷雷或象磨东西时的推磨声。山区冰雹云多为横枝状连续闪电,夜间冰雹云闪电多为红色,“横闪多雹,纵闪多雨”。在官地坪防雹时,当地百姓还提供农谚“东闪南门开、北闪连夜来”,提醒重点注意北线冰雹路径,与雹灾实况高度吻合。

4 总结与讨论

(1) 湘西北山区夏季受局地气候和地形地貌影响,易诱生地面冷锋和中低压,在低层辐合系统与中高层冷空气的共同影响下常形成多单体雹云,根据天气形势,利用冰雹云先兆特征综合定性指标,配合雷达定量判别指标,可以快速有效提早发现冰雹云,为早期开展防雹作业赢得宝贵时间。在山区使用小型车载雷达配合联防责任区内的多普勒雷达开展防雹作业指挥是切实可行办法。

(2) 张家界市于 2005 年在湖南率先开展防雹,2005、2006 年共设 7 个防雹站次,累计作业 69 次,其中防雹作业 22 次,各有效保护区内没有出现雹灾和旱灾,而在防区外靠近保护区就有多个乡镇出现了雹灾和严重旱灾,防雹试验获得成功。使用雷达定量指标指挥防雹作业取得良好识别效果,其中 CR 指标出现空报 1 次,冰雹识别准确率

95.5%； $H_{\text{顶}}$ 指标空漏报各 1 次，准确率 90.9%；VIL 指标漏报 3 次，准确率 86.4%；车载雷达的 PPI 指标暂未出现空漏报、RHI 指标 $H_{45\text{dBz}} \geq H_{0^\circ\text{C}}$ 层 + 3km 漏报 1 次，准确率为 95.5%。空报一般出现强降水，漏报一般为弱风雹，应通过防雹作业资料样本和雷达观测数据的积累，进一步完善

本地冰雹云的判别指标。

参考文献

- [1] 樊鹏, 肖辉. 雷达识别渭北地区冰雹云技术研究 [J]. 气象, 2005, 31 (7): 16-19.
- [2] 张培昌, 戴铁丕, 杜秉玉, 等. 雷达气象学 [M]. 北京: 气象出版社, 2005: 380.

樊志超等：湘西北山区夏季冰雹云多普勒雷达定量判别指标



图例： 冰雹路径 烤烟防雹试验点 车载雷达所在地

图1 张家界市2005年烤烟人工防雹试验布局图 (180km × 100km)

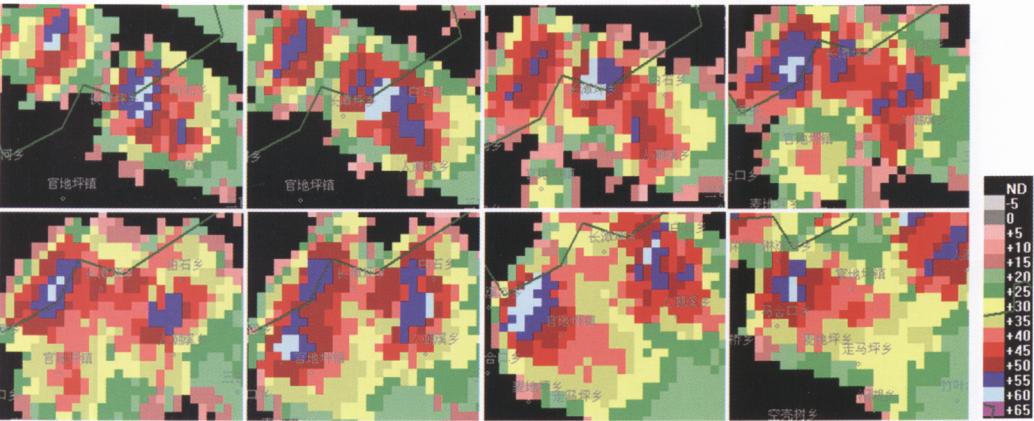


图2 2005年6月22日影响官地坪防雹站的多单体风暴15:07、15:13、15:26、15:32、15:38、15:44、16:02、16:15组合反射率(CR-37)图
注：读图顺序从左至右，雷达站位于东南方向约130km，下同。

樊志超等：湘西北山区夏季冰雹云多普勒雷达定量判别指标

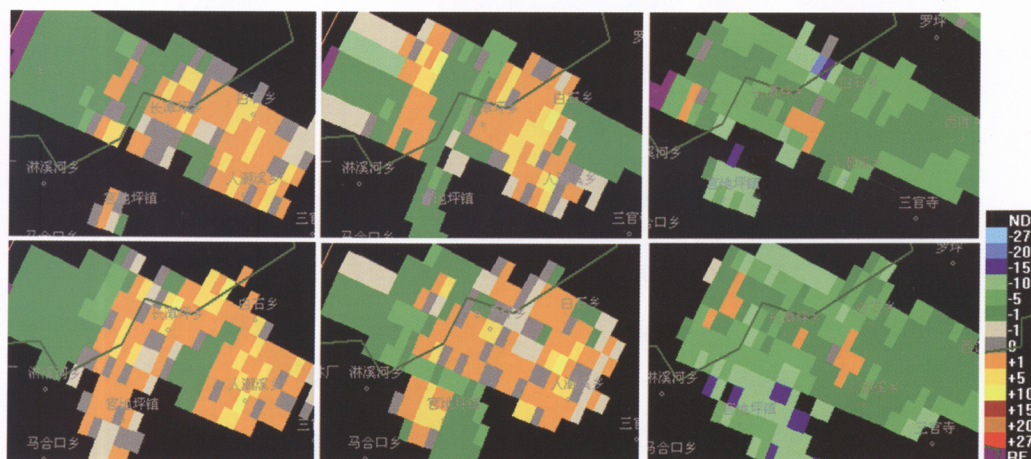


图3 2005年6月22日风暴相对径向速度(SRM-56)图
上图 15:26 仰角 0.5°、1.5°、2.4°, 下图 15:32 仰角 0.5°、1.5°、2.4°

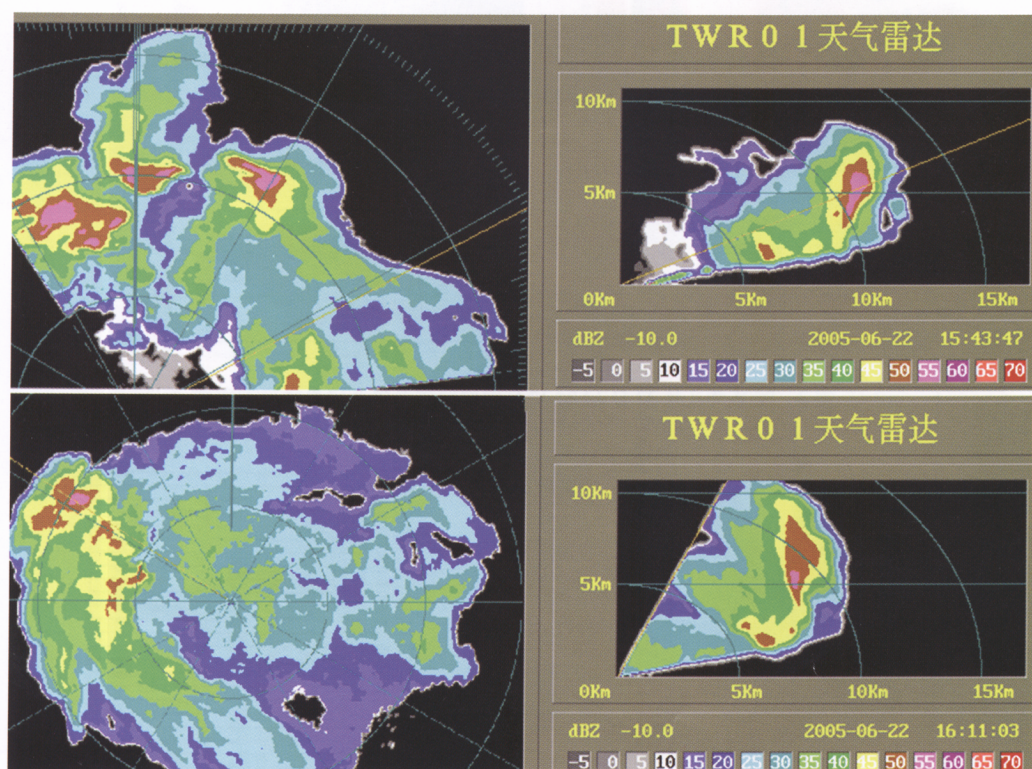


图4 防雹作业前后车载雷达的PPI和RHI产品显示