

覃靖, 潘海, 刘蕾, 等. 桂北地区强冰雹的雷达临近预警指标分析[J]. 灾害学, 2017, 32(2): 159–164. [QIN Jing, PAN Hai, LIU Lei, et al. Radar Early Warning Index Analysis of Severe Hail in North of Guangxi [J]. Journal of Catastrophology, 2017, 32(2): 159–164. doi: 10.3969/j.issn.1000-811X.2017.02.028.]

桂北地区强冰雹的雷达临近预警指标分析^{*}

覃靖, 潘海, 刘蕾, 李亚琴, 袁马强, 苏小玲

(广西壮族自治区柳州市气象局, 广西 柳州 545001)

摘要: 利用柳州多普勒雷达(SB)产品和冰雹灾情资料, 采用统计的方法, 对2008年至2016年5月柳州及相邻地区20块冰雹云进行分析, 归纳出强冰雹云的雷达回波特征: 低层反射率因子出现钩状回波、人字形回波或V型缺口, 中层出现有界弱回波区(BWER)或宽阔的弱回波区(WER), 高层强回波悬垂; 径向速度图上伴随中等强度以上中气旋。并得出桂北地区强冰雹的雷达临近预警指标: 出现三体散射特征, 0℃层高度在3.0~4.8 km; 风暴顶高 ≥ 10 km、最大反射率因子高度 ≥ 7 km; 50 dBZ强回波伸展高度 ≥ 9.5 km或强回波在负温区的厚度($H_{50dBZ} - H_{0^\circ C}$) ≥ 5 km, 在冰化区的厚度($H_{50dBZ} - H_{-20^\circ C}$) ≥ 1.5 km; $-10^\circ C$ 、 $-20^\circ C$ 和 $-30^\circ C$ 高度层的强回波面积分别达到35 km²、15 km²、5 km²或这三个高度层的强回波面积的平均值达到20 km²; 垂直累积液态水含量VIL ≥ 60 kg·m⁻²、VIL密度 ≥ 5.8 g·m⁻³。

关键词: 强冰雹; 雷达; 临近预警; 桂北地区

中图分类号: X43; P406 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-811X(2017)02-0159-06

doi: 10.3969/j.issn.1000-811X.2017.02.028

冰雹是桂北地区春季主要的气象灾害之一, 尤其是强冰雹风暴, 具有发展迅速、破坏力大、局地性强的特点, 对工农业生产和人民生命财产造成严重危害。由于冰雹风暴单体生成和移动路径具有明显的局地特征, 其强度变化受大气环境条件和地形影响很大, 因此冰雹预警是临近预报的难点。多普勒雷达是冰雹探测和预警的重要工具, 关于多普勒雷达在冰雹预警中的应用, 不少专家学者都做了细致的研究。朱敏华等^[1]分析了强雹暴三体散射的多普勒雷达反射率因子的形成机制; 廖玉芳等^[2]分析了6次大冰雹过程的旁瓣回波特征; 徐芬等^[3]分析了江苏沿江地区强冰雹天气的中尺度特征, 得出超级单体内部涡旋特征的出现有利于大冰雹的增长; 周小刚等^[4]用 $-20^\circ C$ 层上55 dBZ范围超过100 km²作为快速判断强降雹的补充阈值; 王丛梅等^[5]发现风暴相对螺旋度大值与强降雹的产生密切相关; 赵俊荣等^[6]用中气旋提前30 min预警短时冰雹; 郭艳^[7]研究了地面降雹与TBSS之间的对应关系; 吴剑坤等^[8]用VIL密度、风暴顶辐散和TBSS作为强冰雹的辅助特征指标; 农孟松等^[9]对一次发生在桂西北的大范围冰雹天气进行了分析, 发现风暴具有典型超级单体特征, 并伴有中等强度的中气旋。也有研

究得出适合当地的临近预警指标和方法^[10-17]。

我国地域广阔, 气候差异较大, 各地雹云的特点和雷达识别参量不尽相同。广西针对冰雹天气的研究多集中在环流形势和气候背景^[18-22]或是典型个案分析^[23-25], 在临近预警方面的研究却很少, 或是用单个雷达产品作为识别冰雹云的指标^[26-27], 专门针对桂北地区的冰雹临近预警指标几乎没有, 有必要找出适合该地区雹云的识别参量, 总结出好用的灾害性强冰雹的雷达临近预警指标, 以期提高强冰雹天气预报准确率, 为人工影响天气和防灾减灾提供参考和依据。

1 资料和方法

本文利用2008–2016年3–5月柳州及相邻地区各市县气象局上报的冰雹灾情资料和柳州多普勒雷达(SB)基数据反演得到的产品以及相应的常规探空资料, 对17次冰雹天气过程共20块冰雹云的回波形态、垂直结构、50 dBZ强回波伸展高度及其相对于0℃和 $-20^\circ C$ 层的高度、VIL和VIL密度等其他雷达参量进行统计分析, 试图找出它们与冰雹直径的关系, 提取可用于业务临近预警的

^{*} 收稿日期: 2016-08-06 修回日期: 2016-09-18

基金项目: 柳州市气象局自立项目(柳气科201602)

第一作者简介: 覃靖(1982-), 女, 壮族, 广西柳州人, 工程师, 主要从事短期、短临天气预报及研究。E-mail: 48911409@qq.com

强冰雹云识别指标。收集到的地面降雹时间多为估计时间,冰雹降落到地面也需要一定时间,所以进行雷达参量分析时,主要考察地面降雹时到冰雹发生前 1 h 内的参量变化特征。共收集到 10 个强冰雹样本(冰雹直径 ≥ 20 mm, 序号 1~10)和 10 个小冰雹样本(冰雹直径 < 20 mm, 序号 11~20), 相关信息见表 1, 个例较少主要是因为桂北冰雹多出现在夜间或人烟稀少的山区和野外, 一些大冰雹未被记录到灾情报告中。

表 1 20 个冰雹风暴单体信息

序号	日期	时间	地点	距离雷达/km	冰雹直径/mm
1	20160417	05 时	三江	180	40~50
2	20160412	06 时	柳江	50	40~50
3	20160409	21 时	融安	95	52
4	20160403	22 时	柳城	50	20
5	20150419	18 时	三江	135	95
6	20150419	19 时	融安	120	70~100
7	20130323	23 时	柳城	50	40~50
8	20120412	20 时	融水	80	20
9	20090412	19 时	柳江	35	20
10	20080320	02 时	柳江	40	40~50
11	20160507	21 时	融水	100	5
12	20160417	17 时	忻城	85	10
13	20160403	20 时	融安	95	7
14	20160320	22 时	融安	95	9
15	20130405	16 时	忻城	100	10~15
16	20130329	22 时	柳江	50	10
17	20130329	19 时	罗城	70	8
18	20120419	23 时	融安	120	5
19	20120303	17 时	象州	50	5
20	20120304	20 时	永福	90	9

2 强冰雹风暴单体的雷达回波形态和垂直结构

从表 2 可见, 发展成熟的冰雹云反射率因子平面位置显示器(PPI)特征: 多呈块状、带状、或片状, 强回波中心附近梯度较大, 回波呈倾斜状态, 出现旁瓣回波时最大反射率因子超过 60 dBZ; 强冰雹云回波常伴有特殊形态, 如人字形、低层钩状回波或 V 型缺口、三体散射(TBSS)特征。V 型缺口通常表明强烈的入流气流进入上升气流, 有利于雹胚成长为强冰雹。TBSS 是指由于雷达能量在强反射率因子区向前散射而形成的异常回波, 其强度通常小于等于 20 dBZ, 呈现类似细长的钉子状从强回波区沿径向伸展。10 个强冰雹样本中有一半观测到 TBSS 特征, 相应的反射率因子超过 64 dBZ, 其余风暴单体没有观测到 TBSS 特征主要是因为这些风暴单体不是孤立的, 周围被大片的降水回波掩盖, 而小冰雹样本中均没有观测到 TBSS 特征, 这与廖玉芳等^[28]的研究结果一致, 因此 TBSS 特征可以作为 S 波段雷达强冰雹的预警指标之一, 并且 TBSS 特征或旁瓣回波大都比地面降雹时间提前 18~60 min。

产生冰雹需要强烈的上升运动, 常表现为风暴底辐合和风暴顶辐散, 雹云在径向速度图上表现出较明显的对流扰动特征, 常常可以分析出中气旋。中气旋是与强对流风暴相联系的最重要的雷暴尺度速度场特征, 从表 2 的统计结果来看, 小冰雹样本中只有 2 例伴随中气旋, 而大冰雹样本中全都伴随中等强度以上的中气旋, 可见, 中气旋并不是产生冰雹的必要条件, 但是只有中气旋较强、对流维持时间较长才能产生大冰雹, 因此, 中等强度以上的中气旋可以作为强冰雹的参考条件之一。

表 2 回波形态和中气旋

序号	回波形态	TBSS/旁瓣 提前量/min	中气旋强度 /($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)
1	带状、V 型缺口、WER		24(强)
2	人字、V 型缺口、BWER、TBSS、旁瓣	42	18(中等)
3	钩状、BWER		24(强)
4	人字、V 型缺口、BWER、TBSS、旁瓣	18	22(强)
5	钩状、BWER		27(强)
6	钩状、BWER		26(强)
7	块状、BWER		21(中等)
8	块状、V 型缺口、BWER、TBSS	54	24(强)
9	块状、V 型缺口、BWER、TBSS、旁瓣	60	20(中等)
10	块状、V 型缺口、BWER、TBSS、旁瓣	48	22(强)
11	片状、WER		17(中等)
12	片状、WER		无
13	块状、WER		无
14	片状、WER		17(中等)
15	块状、WER		无
16	带状、WER		无
17	片状、WER		无
18	片状、WER		无
19	块状、WER		无
20	块状、WER、旁瓣	18	无

图 1 给出 10 个强冰雹风暴单体成熟时期雷达反射率因子沿低层入流方向的垂直剖面图。可以看到强冰雹云的反射率因子的垂直结构特征: 高悬的强回波和位于其下方的有界弱回波区(BWER)或宽阔的弱回波区(WER)、回波墙。WER 和 BWER 是强上升运动的一种表现, 尤其是 BWER, 由于超级单体风暴上升气流特别强, 在其上升运动区出现了相对弱的回波, 冰雹的循环上升区和降水区构成了中高层的悬垂回波, BWER 是包含云粒子但不包含降水粒子的一个强上升气流区, 降水物的尺寸筛选导致大冰雹落在与 BWER 相邻的反射率因子高梯度区。由于 BWER 或 WER 的尺度反映了风暴上升气流的强度和尺度, 影响冰雹灾害的程度, 因此统计了强冰雹云的 BWER 水平尺度为 1~4 km, 高度为 4~7 km, WER 的水平尺度为 10 km, 比云南雹灾的 WER 水平尺度大^[14], 这可

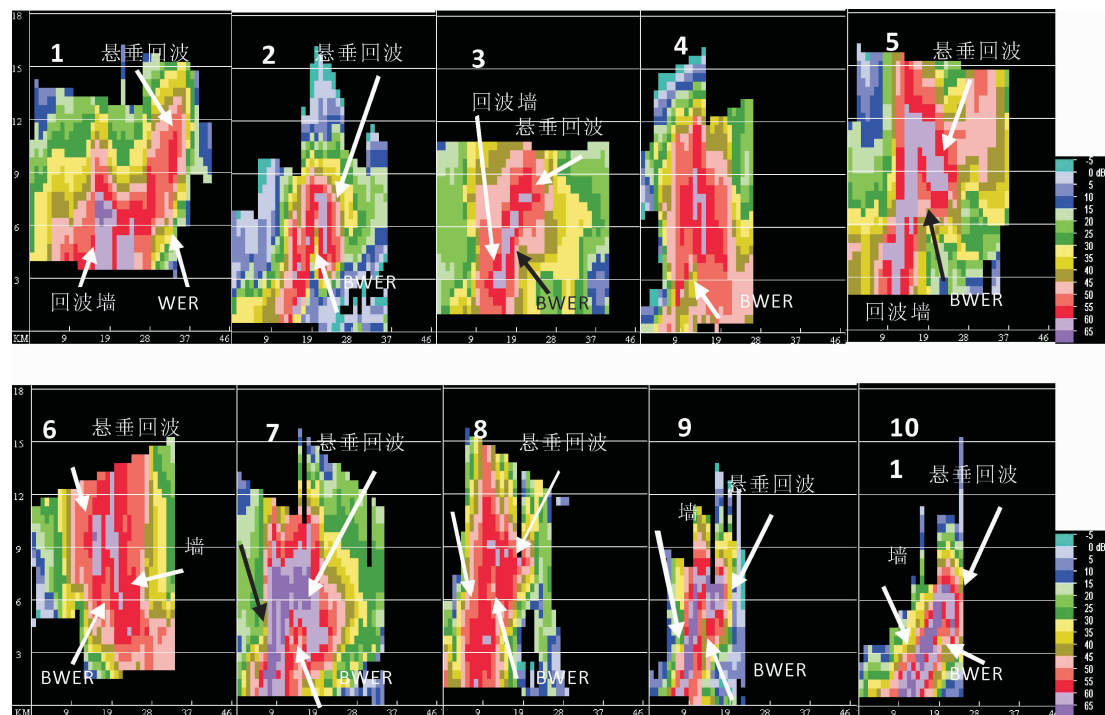


图1 强冰雹风暴单体反射率因子沿低层入流方向垂直剖面

能与环境垂直风切变有关。BWER 和宽阔的 WER 反映了强上升运动, 而大冰雹需要更强的上升运动, 表2的数据印证了这一点, 可见, BWER 和宽阔 WER 是强冰雹云最重要的特征之一。

因此, 如果风暴单体反射率因子出现低层钩状回波或人字形回波或 V 型缺口、中层 BWER 或宽阔的 WER、高悬的强回波特征, 伴随中等强度以上中气旋, 且 0°C 层高度适中的话, 应立即发布强冰雹预警。

3 雷达参量分析

3.1 风暴顶高、反射率因子特征

影响到达地面冰雹大小的一个重要因素是冰雹在通过冻结层高度到地面的融化效应, 所以要出现强冰雹, 需要 0°C 层高度适中。统计 17 次冰雹过程的 0°C 层高度为 $3.7 \sim 5.2 \text{ km}$, 其中出现强冰雹的 0°C 层高度为 $3.8 \sim 4.7 \text{ km}$, 比农孟松等^[9]统计得出广西降雹适宜高度略高, 0°C 层高度为 4.7 km 的那次强降雹过程正好发生在桂北山区, 考虑到地形高度对实际融冰厚度的影响, 把有利于出现强冰雹的 0°C 层高度调整为 $3.0 \sim 4.8 \text{ km}$ 。 -20°C 层高度是冰晶产生的高度, 云的相态呈胶性不稳定, 有利于云中水滴的增长, 该 17 次冰雹过程的 -20°C 层高度为 $6.8 \sim 8.5 \text{ km}$ 。回波顶高即 18 dBZ 以上回波所能达到的最大高度, 反映风暴发展的强烈程度, 统计 20 个冰雹云的回波顶高为 $10 \sim 21 \text{ km}$ 。负温区厚度(即回波顶高与 0°C 层高度差)反映在 0°C 层以上产生冰雹的对流风暴发展程度, 风暴在 0°C 层以上发展越旺盛, 形成冰雹的概

率越大。计算冰雹云成熟期负温区厚度, 小冰雹为 $7.1 \sim 12.8 \text{ km}$, 大冰雹为 $6.2 \sim 16.3 \text{ km}$, 计算大水滴冰化区厚度(即回波顶高与 -20°C 层高度差), 小冰雹为 $3.9 \sim 11.1 \text{ km}$, 大冰雹为 $3.0 \sim 11.3 \text{ km}$, 负温区厚度与大水滴冰化区厚度范围较大, 无法区分大、小冰雹甚至非冰雹云, 与国内其他研究^[10]差异较大。

根据微波散射理论, 冰雹尺度较大, 其回波强度特别强, 统计结果显示, 小冰雹对应的最大反射率因子为 $53 \sim 72 \text{ dBZ}$, 大冰雹为 $64 \sim 75 \text{ dBZ}$, 可见, 最大反射率因子和回波顶高并不能有效区分大、小冰雹, 只能作为冰雹的参考条件。在分析风暴趋势的过程中, 发现风暴顶高(风暴单体 30 dBZ 回波的最大高度)和最大反射率因子高度的变化有一定规律: 地面降雹前一段时间内, 最大反射率因子高度有明显跃增现象, 即在 $1 \sim 2$ 个体扫时间内突然升高 1 km 以上, 最多可达 9 km , 说明冰雹粒子正在迅速增长, 跃增以后达到最大值且维持一段时间, 之后最大反射率因子高度迅速降低, 对应地面降雹, 因此, 可以用最大反射率因子高度跃增预测地面降雹大致时间, 通常可提前 $6 \sim 24 \text{ min}$, 最多可达 42 min 。图 2 为风暴顶高、最大反射率因子高度与冰雹直径的关系实测数据散点图, 图 2 中显示出风暴顶高和最大反射率因子高度越高, 冰雹直径越大的趋势, 小冰雹的最大反射率因子高度均小于 8 km , 而大冰雹有 9 例超过 7 km , 仅有一例小于 7 km , 可能是由于该风暴距离雷达较近(约 40 km), 回波顶高数值偏小, 50 mm 以上直径冰雹的最大反射率因子高度均超过 10 km , 因此把风暴顶高 $\geq 10 \text{ km}$ 、最大反射率因子高

度 ≥ 7 km 作为强冰雹的识别指标之一, 按此标准, 20 个冰雹云样本中空报 3 例, 无漏报, 准确率可达 85%。

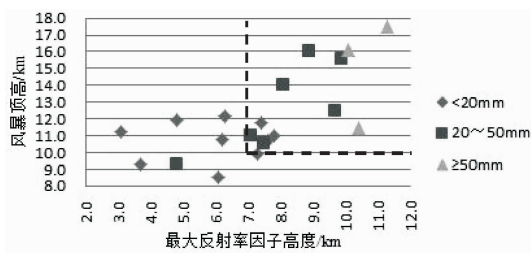


图2 风暴顶高、最大反射率因子高度与冰雹直径的关系实测数据散点图

3.2 50dBZ 强回波伸展高度及其在负温区和冰化区中的厚度特征

根据 Foote^[29] 提出的冰雹增长概念, 大多数雹块的增长发生在 $-10 \sim -25^\circ\text{C}$ 范围内, $-10 \sim -30^\circ\text{C}$ 层是冰雹的主要增长层, 在雹胚相同的前提下该层上升气流强则出现强冰雹的几率大。强冰雹云在反射率因子图上表现为高悬的强回波, 要求强回波向上扩展到较高的高度, Witt 等^[30] 提出相应的反射率因子越强, 相对高度越高, 产生强冰雹的可能性和严重程度越大。本文选择 50 dBZ 作为判断强回波高度的阈值, 图 3 给出 50 dBZ 强回波最大高度、 0°C 层高度与冰雹直径的关系实测数据散点图。总体上看, 50 dBZ 向上扩展的高度越高, 冰雹直径越大, 小冰雹对应的强回波伸展高度在 $6.5 \sim 10$ km 之间, 大冰雹对应的强回波伸展高度 ≥ 9.5 km, 因此可以用 50 dBZ 强回波伸展高度 ≥ 6.5 km 和 ≥ 9.5 km 来识别冰雹云和强冰雹, 准确率可达 90%。为减小地形高度差异的影响, 用强回波伸展高度与 0°C 层、 -20°C 层的高度差, 即强回波在负温区、冰化区中的厚度来表示, 见图 4。由图 4 可见, 强回波在负温区、冰化区中的厚度与冰雹直径有很好的对应关系, 说明强回波伸展高度越高, 冰雹粒子碰并增长区越厚, 越有利于大冰雹的产生, 可以用 $H_{50\text{dBZ}} - H_{0^\circ\text{C}} \geq 2.5$ km, $H_{50\text{dBZ}} - H_{-20^\circ\text{C}} \geq -0.5$ km 来识别冰雹云, 用 $H_{50\text{dBZ}} - H_{0^\circ\text{C}} \geq 5$ km, $H_{50\text{dBZ}} - H_{-20^\circ\text{C}} \geq 1.5$ km 来识别强冰雹, 按此标准, 20 个冰雹云样本中空报 2 例, 无漏报, 准确率可达 90%。

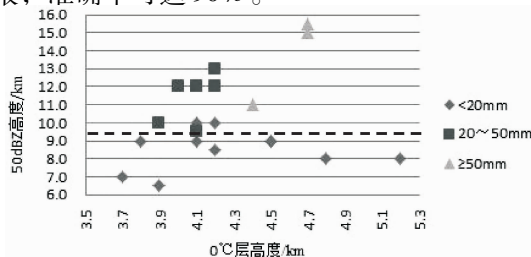


图3 50dBZ 强回波高度、 0°C 层高度与冰雹直径的关系实测数据散点图

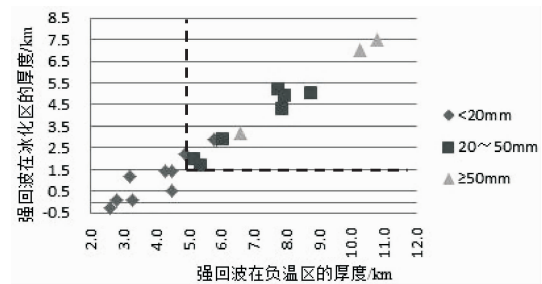


图4 50dBZ 强回波在负温区、冰化区中的厚度与冰雹直径的关系实测数据散点图

3.3 强回波面积特征

强冰雹云不仅在 PPI 的强回波常表现出较大回波面积, 且出现在较高上空, 强回波的大面积区有利于大冰雹的增长^[31]。根据冰雹形成的物理过程, 强雹粒子增长在接近 -20°C 层及以上更冷的区域, 利用多普勒雷达探测数据制作 -10°C 、 -20°C 和 -30°C 高度层回波强度分布产品, 计算 50 dBZ 强回波在这三个高度层的面积, 表 3 给出 20 个冰雹风暴单体对应的 -10°C 、 -20°C 和 -30°C 层高度及相应的 50 dBZ 强回波面积。小冰雹的 -10°C 、 -20°C 和 -30°C 层的强回波面积分别为 $6 \sim 40 \text{ km}^2$ 、 $0 \sim 30 \text{ km}^2$ 、 $0 \sim 14 \text{ km}^2$, 大冰雹为 $36 \sim 168 \text{ km}^2$ 、 $19 \sim 151 \text{ km}^2$ 、 $7 \sim 138 \text{ km}^2$, 计算每个冰雹风暴单体在这三个高度层的强回波面积的平均值, 大冰雹为 $22 \sim 152 \text{ km}^2$, 其中 $35 \sim 85 \text{ km}^2$ 占 80%, 小冰雹为 $2 \sim 28 \text{ km}^2$, 其中 $5 \sim 20 \text{ km}^2$ 占 70%, 只有 1 例为 28 km^2 , 其余均小于 20 km^2 , 说明大冰雹不仅要求强回波伸展高度要高(超过 -30°C 层高度), 而且强回波水平尺度要大, 可用 -10°C 、 -20°C 和 -30°C 层的强回波面积分别达到 35 km^2 、 15 km^2 、 5 km^2 或这三个高度层的强回波面积的平均值达到 20 km^2 来识别大冰雹, 按此标准, 20 个冰雹云样本中空报 1 例, 无漏报, 准确率可达 95%。同时, 强回波面积随高度的垂直递减率越小, 说明风暴垂直发展越旺盛, 非常有利于大冰雹的生长, 如个例 3、5、6, 三个高度层的强回波面积几乎一样大, 甚至高层比低层还大, 结果这三个雹暴单体均产生 50mm 以上的巨大冰雹。用 -10°C 、 -20°C 和 -30°C 层高度上强回波的面积大小作为阈值, 在实际业务临近预警中定量且易操作。

3.4 VIL 和 VIL 密度

垂直液态水含量 VIL 和 VIL 密度(VIL 与风暴顶的比值)是用来识别冰雹云使用得最频繁的参量之一。由图 5 可以看出, 小冰雹对应的 VIL 值和 VIL 密度最小为 $30 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ 和 $3.5 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$, 大冰雹最小为 $52 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ 和 $5.8 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$, VIL 值为 $52 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ 的个例出现在距离雷达 40km 附近的雹暴单体, 由于静锥区的影响, VIL 值偏低, 因此选择 VIL 值 $\geq 60 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ 、VIL 密度 $\geq 5.8 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$ 作为识别大冰雹的阈值, 按此标准, 20 个冰雹云样本中能识别出 9 例大冰雹, 漏报 1 例, 空报 2 例, 准确率 85%。虽然降雹直径与 VIL 值和 VIL 密度呈

一定的正相关关系,但并不是简单的线性增加关系,尤其是小冰雹对应的 VIL 值和 VIL 密度范围较大,因此该指标不能单独使用,应结合其他指标来进行冰雹预警。已有许多研究表明,地面降雹前一段时间 VIL 值有明显跃增,反映云中冰雹粒子不断碰并增长的过程,本文对 20 个冰雹云的 VIL 值演变进行分析,得出的结果与其他研究相似,即 VIL 值突然在 1~2 个体扫时间内跃增 $10\text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$ 以上,最大可达 $35\text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$,达到最大值后可能维持一段时间,然后迅速下降,对应地面降雹,用 VIL 值跃增预测地面降雹通常可提前 6~18 min,最多可达 48 min。该结果与上述用最大反射率因子高度跃增预测地面降雹非常相似,由于两者并不总是出现在同一时刻,因此两个指标结合起来用,可以增加预警的提前量。

表 3 冰雹风暴单体对应的 -10°C 、 -20°C 和 -30°C 层高度及相应的强回波面积

序号	$H_{-10^{\circ}\text{C}}/\text{km}$	$H_{-20^{\circ}\text{C}}/\text{km}$	$H_{-30^{\circ}\text{C}}/\text{km}$	-10°C 层强回波面积/ km^2	-20°C 层强回波面积/ km^2	-30°C 层强回波面积/ km^2
1	6.2	8.0	9.2	60	57	44
2	6.0	7.8	9.2	59	44	34
3	6.0	7.8	8.9	36	36	33
4	5.7	6.8	8.2	55	37	21
5	6.5	8.0	9.3	63	63	66
6	6.5	8.0	9.3	82	84	89
7	5.6	7.1	8.2	168	151	138
8	5.9	7.7	9.1	86	70	56
9	5.5	7.1	8.6	85	82	63
10	5.6	7.0	9.0	40	19	7
11	6.5	7.9	9.8	6	3	0
12	6.4	8.0	9.2	13	6	0
13	5.6	6.8	8.3	17	10	5
14	5.9	7.1	8.4	21	22	11
15	6.6	8.5	9.9	30	21	0
16	5.5	7.1	8.4	40	30	14
17	5.9	7.1	8.3	21	15	10
18	6.1	7.6	8.8	16	8	1
19	5.6	6.9	9.6	12	5	0
20	5.3	6.8	8.9	7	0	0

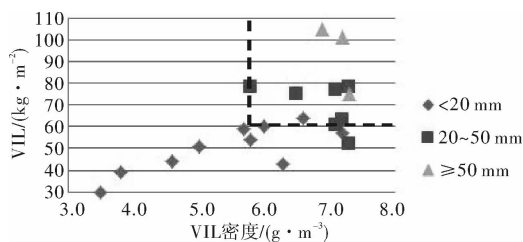


图 5 VIL、VIL 密度与冰雹直径的关系实测数据散点图

4 结论与讨论

利用柳州多普勒雷达(SB)资料,对 20 个不同降雹强度的冰雹云进行统计分析,得出桂北地区强冰雹云的主要雷达回波特征:①低层反射率因

子图上常出现钩状回波、人字形回波或 V 型缺口;②中层存在 BWER,水平尺度 1~4 km、高 4~7 km,或宽阔的 WER,水平尺度 10 km;③高层强回波悬垂,强回波呈倾斜结构;④径向速度图上伴有中等强度以上中气旋;⑤没有降水回波遮挡时,常出现 TBSS 或旁瓣回波特征;⑥最大反射率因子 64~75 dBZ,负温区厚度 6.2~16.3 km,冰化区厚度 3.0~11.3 km,最大风暴顶高 9.3~17.5 km,最大反射率因子高度 4.8~11.3 km,50 dBZ 强回波伸展高度 9.5~15.5 km,强回波在负温区中的厚度 5.2~10.8 km,在冰化区中的厚度 1.7~7.5 km, -10°C 、 -20°C 和 -30°C 高度层的强回波面积分别为 36~168 km^2 、19~151 km^2 、7~138 km^2 ,最大 VIL 和 VIL 密度分别为 52~105 $\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}$ 和 5.8~7.3 $\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 。

能够有效判断强冰雹发生的特征指标有:

(1)如果风暴单体反射率因子出现低层钩状回波或人字形回波或 V 型缺口、中层出现 BWER 或宽阔的 WER、高悬的强回波特征,伴随中等强度以上中气旋,且 0°C 层高度适中的话(一般为 3.0~4.8 km),应立即发布强冰雹预警。

(2)对于 S 波段雷达,出现 TBSS 特征,且 0°C 层高度适中,应立即发布强冰雹预警。TBSS 特征或旁瓣回波的出现可较地面降雹时间提前 18~60 min。

(3)风暴顶高 $\geq 10\text{ km}$ 、最大反射率因子高度 $\geq 7\text{ km}$ 作为强冰雹的识别指标之一,准确率可达 85%。用最大反射率因子高度跃增预测地面降雹大致时间,通常可提前 6~24 min,最多可达 42 min。

(4)用 50 dBZ 强回波伸展高度 $\geq 9.5\text{ km}$ 或强回波在负温区的厚度 $(H_{50\text{dBZ}} - H_{0^{\circ}\text{C}}) \geq 5\text{ km}$,在冰化区的厚度 $(H_{50\text{dBZ}} - H_{-20^{\circ}\text{C}}) \geq 1.5\text{ km}$ 来识别强冰雹,准确率可达 90%。

(5)用 -10°C 、 -20°C 和 -30°C 高度层的强回波面积分别达到 35 km^2 、15 km^2 、5 km^2 或这三个高度层的强回波面积的平均值达到 20 km^2 来识别大冰雹,准确率可达 95%。满足这一指标前提下,如果强回波面积随高度的垂直递减率很小甚至为负,那么很可能出现 50 mm 以上的巨大冰雹。

(6) VIL 值 $\geq 60\text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$ 、VIL 密度 $\geq 5.8\text{ g}\cdot\text{m}^{-3}$ 作为识别大冰雹的阈值,准确率 85%。该指标不能单独使用,应结合其他指标进行强冰雹预警。用 VIL 值跃增预测地面降雹通常可提前 6~18 min,最多可达 48 min,与指标(3)结合起来用,可以增加预警的提前量。

由于个例有限,上述指标不一定适用所有地形、地区和季节,今后可继续收集这方面的资料,进一步修正该指标。

参考文献:

- [1] 朱敏华,俞小鼎,夏峰,等. 强烈雹暴三体散射的多普勒天气雷达分析[J]. 应用气象学报, 2006, 17(2): 215~223.

- [2] 廖玉芳, 俞小鼎, 吴林林, 等. S 波段多普勒天气雷达旁瓣回波的特征分析[J]. 热带气象学报, 2008, 24(2): 183-188.
- [3] 徐芬, 郑媛媛, 肖卉, 等. 江苏沿江地区一次强冰雹天气的中尺度特征分析[J]. 气象, 2016, 42(5): 567-577.
- [4] 周小刚, 费海燕, 王秀明, 等. 多普勒雷达探测冰雹的算法发展与业务应用讨论[J]. 气象, 2015, 41(11): 1390-1397.
- [5] 王丛梅, 景华, 王福侠, 等. 一次强烈雹暴的多普勒天气雷达资料分析[J]. 气象科学, 2011, 31(5): 659-665.
- [6] 赵俊荣, 郭金强, 杨景辉, 等. 一次致灾冰雹的超级单体风暴雷达回波特征分析[J]. 高原气象, 2011, 30(6): 1681-1689.
- [7] 郭艳. 大冰雹指标 TBSS 在江西的应用研究[J]. 气象, 2010, 36(8): 40-46.
- [8] 吴剑坤, 俞小鼎. 强冰雹天气的多普勒天气雷达探测与预警技术综述[J]. 干旱气象, 2009, 27(3): 197-206.
- [9] 农孟松, 祁丽燕, 黄海洪, 等. 桂西北一次超级单体风暴过程的分析[J]. 气象, 2011, 37(12): 1519-1525.
- [10] 李德俊, 唐仁茂, 熊守权, 等. 强冰雹和短时强降水天气雷达特征及临近预警[J]. 气象, 2011, 37(4): 474-480.
- [11] 汤兴芝, 黄兴友. 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, 2009, 28(3): 261-265.
- [12] 李路长, 白慧, 杨胜忠, 等. 黔东南地区冰雹天气雷达临近预警指标研究[J]. 贵州气象, 2014, 38(1): 20-24.
- [13] 王秀玲, 郭丽霞, 高桂芹, 等. 唐山地区冰雹气候特征与雷达回波分析[J]. 气象, 2012, 38(3): 344-348.
- [14] 李湘, 张腾飞, 胡娟, 等. 云南冰雹灾害的多普勒雷达特征统计及预警指标[J]. 灾害学, 2015, 30(3): 088-093.
- [15] 段鹤, 严华生, 马学文, 等. 滇南冰雹的预报预警方法研究[J]. 气象, 2014, 40(2): 174-185.
- [16] 鲁德金, 陈钟荣, 袁野, 等. 安徽地区春夏季冰雹云雷达回波特征分析[J]. 气象, 2015, 41(9): 1104-1110.
- [17] 胡胜, 罗聪, 张羽, 等. 广东大冰雹风暴单体的多普勒天气雷达特征[J]. 应用气象学报, 2015, 26(1): 57-65.
- [18] 农孟松, 祁丽燕, 黄明策, 等. 基于环流分型的广西冰雹潜势预报研究[J]. 气象, 2008, 34(6): 46-52.
- [19] 邹光源, 陈博杰, 钟小英. 桂西北地区降雹的统计特征[J]. 广西气象, 2004, 25(3): 23-24.
- [20] 李向红, 唐武斌, 李垂军, 等. 广西强对流天气的天气形势分析与雷达临近预警[J]. 灾害学, 2009, 24(2): 46-50.
- [21] 姚胜芳, 黄治逢, 农孟松, 等. 广西冰雹的活动特点[J]. 热带地理, 2009, 28(2): 119-171.
- [22] 张凌云, 刘蕾, 陈剑兵, 等. 柳州强对流天气的气候特征及环流背景分析[J]. 中国农学通报, 2015, 31(23): 182-188.
- [23] 李向红, 唐熠, 郑传新, 等. 一次多种强对流天气过程的雷达回波特征分析[J]. 气象, 2010, 36(8): 61-71.
- [24] 黄莉, 詹莹玉, 白龙, 等. 2013 年广西春季混合型强对流天气分析[J]. 灾害学, 2014, 29(4): 38-42.
- [25] 张瑞波, 何飞, 莫蓁. 广西百色 2013-03-12-14 冰雹天气过程分析[J]. 热带地理, 2015, 34(6): 873-882.
- [26] 张正国, 汤达章, 邹光源, 等. VIL 产品在广西冰雹云识别和人工防雹中的应用[J]. 热带地理, 2012, 32(1): 50-53.
- [27] 张正国, 邹光源, 刘丽君, 等. 雷达回波顶高(ET)产品在广西冰雹云识别中的应用研究[J]. 气象研究与应用, 2014, 35(4): 89-92.
- [28] 廖玉芳, 俞小鼎, 吴林林, 等. 强雹暴的雷达三体散射统计和个例分析[J]. 高原气象, 2007, 26(4): 812-820.
- [29] Foote G B. A study of hail growth utilizing observed storm condition[J]. Clim Applmeteor, 1984: 84-101.
- [30] Witt A, Elits M D, Stumpf G J et al. An enhanced hail detection algorithm for the WSR-88D[J]. Wea Forecasting, 1998, 13: 286-303.
- [31] 张鸿发, 左洪超, 鄢秀书, 等. 平凉冰雹云回波特征分析[J]. 气象学报, 2002, 60(1): 110-115.

Radar Early Warning Index Analysis of Severe Hail in North of Guangxi

QIN Jing, PAN Hai, LIU Lei, LI Yaqin, YUAN Maqiang and SU Xiaoling
(Liuzhou Meteorological Bureau, Liuzhou 545001, China)

Abstract: Using Doppler weather radar data and hail disaster data, based on statistic method, the features of 20 hailstorms over Liuzhou and adjacent areas, Guangxi province from 2008 to 2016 are analyzed. The radar echo features of severe hailstorms are summed: the low level reflectivity shows a hook echo and herringbone echo and V-notch, as well as bounded weak echo area or wide weak echo area at the middle level and strong overhanging structure, at the same time, moderate or strong mesocyclones appear at the corresponding radial velocity. Some radar now-casting indicators of severe hail are found which are suitable for the north of Guangxi area: Three-body scattering occurs and the height of 0 °C layer at 3.0 ~ 4.8 km. Storm top height ≥ 10 km and maximum reflectivity height ≥ 7 km. 50 dBZ strong echo height ≥ 9.5 km or $H_{50\text{dBZ}} - H_{0^\circ\text{C}} \geq 5$ km, $H_{50\text{dBZ}} - H_{-20^\circ\text{C}} \geq 1.5$ km. The 50 dBZ rang reaches 35 km² on the -10 °C layer and 15 km² on the -20 °C layer and 5 km² on the -30 °C layer or the average rang of 50 dBZ on these three layers reaches 20 km². Vertically integrated liquid value ≥ 60 kg · m⁻² and density of VIL ≥ 5.8 g · m⁻³.

Key words: severe hail; radar; now-casting; North of Guangxi