

一次早春冰雹天气过程的双偏振相控阵雷达回波特征分析

刘 艳, 张 涛

成都市气象局, 四川 成都
Email: 6246573@qq.com

收稿日期: 2021年8月8日; 录用日期: 2021年9月11日; 发布日期: 2021年9月18日

摘 要

本文利用成都市X波段双偏振相控阵天气雷达资料,对2021年3月6日成都市一次局地冰雹天气过程进行了分析。结果表明,X波段双偏振相控阵天气雷达提供的高时空分辨率雷达产品能够更精细地展现冰雹天气的演变过程;小的 Z_{DR} 值和高的强度 Z 对应的是纯冰雹区,一旦冰雹开始融化, Z_{DR} 的值也会随着融化而变大;利用模糊逻辑算法识别粒子相态的水凝物分类产品能够直观地给出冰雹云的垂直结构图,从而分析出冰雹的降落状态。雷达回波演变过程和雷达水凝物分类产品资料分析结合实况证明对流单体合并的尾声阶段开始降雹,且对流单体的合并区域是冰雹的主要落区。此外,早春的此次冰雹天气过程回波顶高最大值在5 km左右,有别于夏季的冰雹天气,需引起重视;垂直液态水含量(VIL)的跃增是降雹开始前的一个重要指征。

关键词

冰雹, 双偏振相控阵雷达, 垂直液态水含量, 水凝物分类

Analysis of the Characteristics of X-Band Dual-Polarization and Phased-Array Weather Radar during a Hail Weather Process in Early Spring

Yan Liu, Tao Zhang

Chengdu Meteorological Service, Chengdu Sichuan
Email: 6246573@qq.com

Received: Aug. 8th, 2021; accepted: Sep. 11th, 2021; published: Sep. 18th, 2021

Abstract

Based on the data of X-band dual-polarization and phased-array weather radar in Chengdu, a local hail process on March 6, 2021 was analyzed. The results showed that the X-band dual-polarization and phased-array weather radar could show the evolution of the hail weather process more precisely. Low Z_{DR} associated with high Z is a certain indication of dry hail. Once hail starts melting, Z_{DR} increases as hail progressively melts. The hydrometeor classification product which uses the fuzzy logic algorithm to identify hydrometeor particles could give the vertical structure of hail clouds intuitively, and then we could get the falling state of hail. The evolution process of radar echo and the analysis of radar hydrometeor classification combining with the hail falling fact provided by the local weather modification workers proved that hail began to fall in the final stage of convective monomer merging, and the merging area of convection monomer was the main hail falling area. In addition, the maximum echo height of this hail process in early spring was about 5 km, which was different from the hail weather process in summer, so it needed more attention. The jump of vertical integrated liquid water content (VIL) was an important indication before the hailstorms began falling.

Keywords

Hail, Dual-Polarization and Phased-Array Weather Radar, Vertical Integrated Liquid Water Content, Hydrometeor Classification

Copyright © 2021 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

冰雹天气是成都的主要灾害性天气之一, 成都地区降雹最多的地方位于成都的龙泉山脉、彭州、郫县和蒲江等地[1] [2], 冰雹作为强对流风暴伴随的灾害性天气, 因具有时间短、局地性强的特征, 给人影部门的防灾减灾工作带来了极大的挑战。国内外科学家在应用雷达识别冰雹云方面做了大量的工作, 利用雷达对冰雹云的探测和识别研究主要是雷达的多参数化[3] [4] [5]。很多研究针对的是夏季的超级单体, Z_{mic} 通过冰雹雷达回波研究发现了大冰雹的三体散射特征[6]; 夏文梅等发现 V 型回波对冰雹有一定预警提前量[7]; 吴海英等通过长生命史冰雹的分析得出成熟阶段的超级单体风暴具有风暴顶辐散等特征[8]。这些研究加深了对降雹型超级单体结构的认识, 对于云物理结构方面的研究较少。随着探测装备的升级, 多普勒双线偏振雷达的使用, 使得冰雹云的识别变得更加准确[9] [10]。利用双偏振雷达开展冰雹的个例识别研究为我们提供了很好的经验参考[11] [12] [13]。

与常规多普勒天气雷达相比, 双偏振雷达能够(同时或交替)发射和接收水平和垂直方向上的偏振波。因此, 双偏振雷达不但能获得探测目标对这两种偏振电磁波后向散射信号的强度和相位信息(水平反射率因子 Z_H 、垂直反射率因子 Z_V 、径向平均速度 V 和谱宽 W), 而且能得到探测目标相对两种不同偏振电磁波后向散射信号的强度和相位的差异信息(差分反射率 Z_{DR} 、差分传播相移 Φ_{DP} 、差分传播相移率 K_{DP} 、相关系数等), 双偏振雷达参量对水凝物粒子的类型、形状、尺寸以及下落姿态都很敏感, 这些特点使其具有识别云中水凝物粒子相态和类型的能力[14]。

与 S 波段新一代多普勒天气雷达相比, X 波段双偏振相控阵天气雷达将天气探测的空间分辨率由 250

米提高到 30 米; 体扫时间由 6 分钟提高到 69 秒。RHI (距离高度显示)由多层间隔跳扫描提高到 12 层无间隔扫描。这种性能指标上的差异, 使得 X 波段双偏振相控阵天气雷达在探测小尺度、生消变化快的强对流天气系统(如突发短时强降水、冰雹等)上更加具有优势。

这次早春冰雹天气过程中降雹的雷达回波特征有别于夏季的冰雹型超级单体, 此次冰雹天气过程中没有伴随雷电现象, 雷达回波顶高没有达到平时降雹常识认为的 8 km 以上, 也没有出现夏季冰雹型超级单体所具有的三体散射、V 型缺口、勾状回波等特征, 通过判断回波的结构特征很难判断出冰雹云。

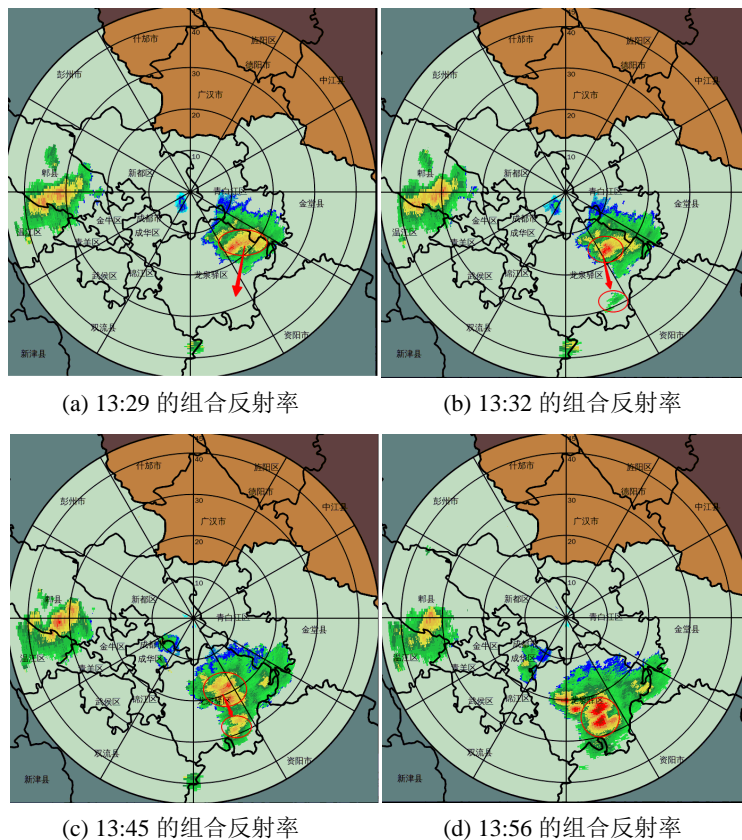
降雹地位于成都市龙泉区, 此地盛产水果, 早春降雹对枇杷和桃子等水果的影响特别大, 为了以后能及时开展防灾减灾, 分析此次降雹过程的特征是非常有必要的。接下来本文着重从冰雹云的物理结构方面分析此次早春冰雹天气过程的双偏振相控阵雷达回波特征。

2. 雷达回波演变

本文选用了成都市气象局布设在新都区的 X 波段双偏振相控阵天气雷达数据, 此雷达由珠海纳睿达公司生产, 是国内首个实现双偏振和相控阵技术结合的天气雷达。

此次冰雹天气过程中, X 波段双偏振相控阵天气雷达完成无间隔体扫时间为 69 秒, 每个方位上从底部到顶部的扫描时间约为 0.2 秒, 能够更细致地观察雷达回波的演变, 抓住雷达回波演变的关键时刻。从图 1 雷达回波演变过程中可以看到: 发生冰雹的对流云系经历了初生阶段、合并加强阶段、成熟降雹阶段和向西南方向移动这四个不同的发展阶段。

3 月 6 日 13:00 左右, 一团降水回波自雷达东面的金堂县、青白江区快速移向雷达南面的龙泉驿区, 从雷达组合反射率产品(见图 1)可以看到: 发生冰雹的对流云系经历了初生阶段(a、b)、合并加强阶段(c、d)、成熟降雹阶段(e)和向西南方向移动(f)这四个不同的发展阶段。



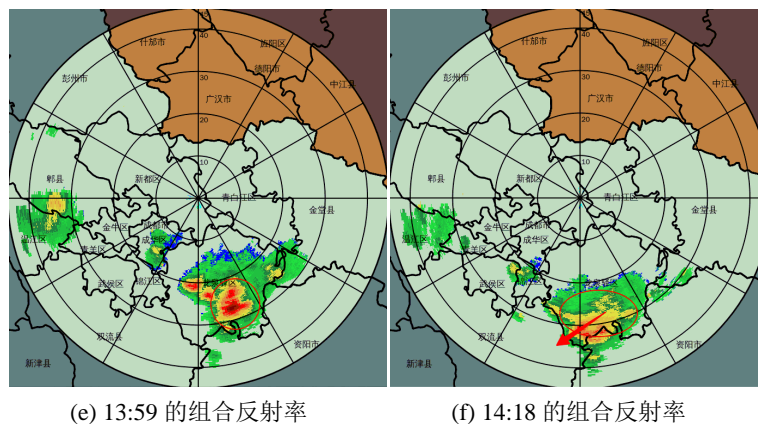


Figure 1. The evolution process of the radar composite reflectivity
图 1. 雷达回波演变过程

在初生阶段, 随着对流云团的移动, 云团不断向周围发展, 覆盖范围逐渐变大, 回波迅速增强。13:32 龙泉驿区山泉炮点开始生成降水回波, 此后这一新生回波发展非常迅速, 13:43~13:56, 仅仅 13 分钟, X 波段双偏振相控阵天气雷达就完成了 11 个体扫, 能够清晰地看到回波强度从 40 dBZ 左右迅速跳变到 60 dBZ 左右。在合并加强阶段, 回波强度继续增大, 两个强回波中心逐渐靠近, 在 13:59 合并为一个新的强回波单体, 此时回波强度最大值为 63.14 dBZ。

合并进行到最旺盛时刻, 据炮点作业人员反映, 山泉炮点 13:58 出现强降水并伴有豌豆大小的冰雹, 降雹持续时间约为 15 分钟。降雹过后, 回波减弱, 继续向西南方向移动。

3. 垂直液态水含量

垂直液态水含量(VIL)是辨别强风暴中是否含有冰雹降水的重要参数[15], 此次冰雹天气过程发生时, 据山泉炮点炮手反映, 13:58 开始降雹, 这一时刻前后的 VIL 值变化如图 2 所示。在降雹前 3 分钟内 VIL 出现了明显的跃增现象。VIL 在 13:55 的最大值为 9.14 kg/m^2 , 13:58 的最大值为 18.69 kg/m^2 , 3 分钟的时间 VIL 增加了 9.55 kg/m^2 , 出现降雹之后, VIL 值开始下降。

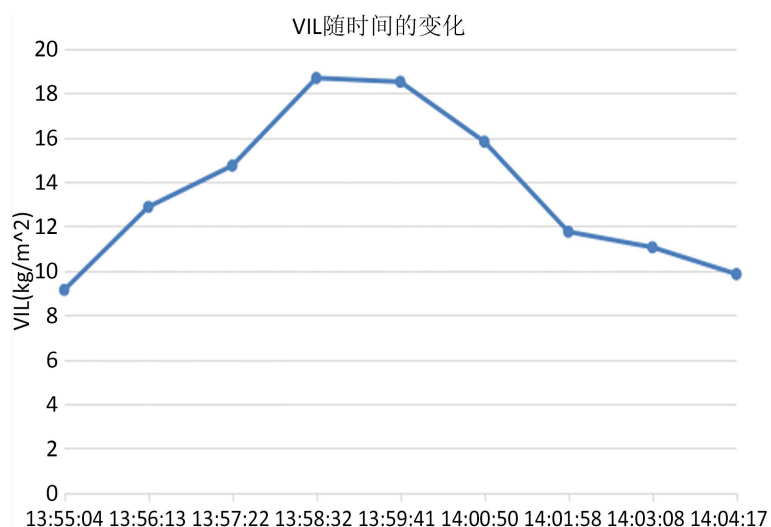


Figure 2. The changes of VIL over time before and after the onset of the hail drop
图 2. 降雹开始时刻前后 VIL 值随时间的变化情况

4. 双偏振参量差分反射率 Z_{DR} 特征分析

不同水凝物粒子对应的雷达偏振参量信息是各有其特征的。 Z_{DR} 是双偏振雷达识别冰雹的一个重要偏振参量。现就本次降雹时双偏振参量差分反射率 Z_{DR} 的值做以下分析:

差分反射率 Z_{DR} 是水平反射率 Z_H 和垂直反射率 Z_V 之比, 表示的是双偏振雷达水平和垂直偏振通道的强度差, Z_{DR} 的大小反映了降水粒子在水平和垂直方向下的尺度差异, 长短轴比越大, Z_{DR} 越大。小的 Z_{DR} 值和高的强度 Z 对应的是纯冰雹区, 本次降雹地于 13:58 开始降雹, 我们从这一时刻的 4.5° PPI 的 Z_{DR} 图(见图 3(a))中发现, Z_{DR} 的值比较小, 在 $-1\sim 0$ 之间, 而在 4.5° PPI 中对应位置的回波强度值比较大, 可以得出图中圈出来的区域为纯冰雹。一旦冰雹开始融化, Z_{DR} 的值也会随着融化而变大, 如图 3(b) (2.7° PPI 的 Z_{DR} 图), 图 3(c) (0.9° PPI 的 Z_{DR} 图)所示。就如 ALEXANDERV 的文章中提到的, 特别是针对冰雹尺寸比较小, 且已部分融化的冰雹, Z_{DR} 值会增加[16]。显然, 本文中所分析的冰雹过程就是这个情况, 这可能是此次虽观测到降雹, 但由于冰雹小且已开始融化, 所以并未致灾的原因。

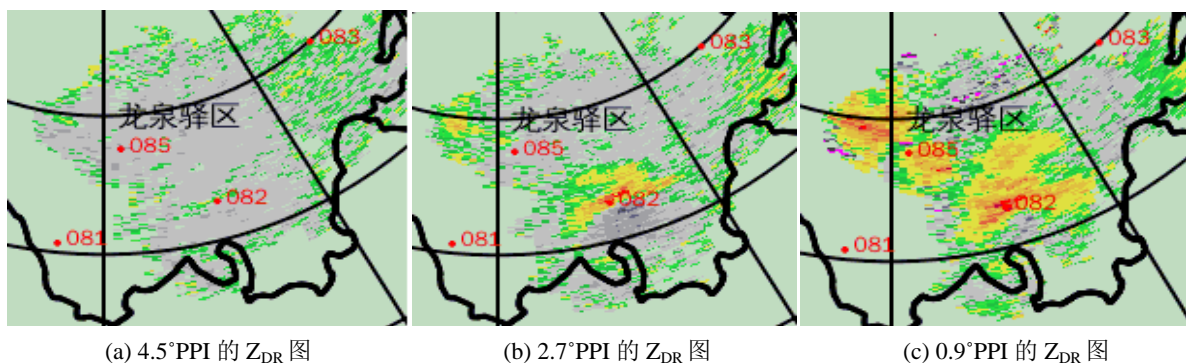


Figure 3. The Z_{DR} of the PPI at different elevations
图 3. 不同仰角对应的 PPI 的 Z_{DR}

5. 相态识别结果分析

由于云中水凝物粒子特性较为复杂, 不同水凝物粒子对应的雷达偏振参量信息并不是绝对排斥, 而

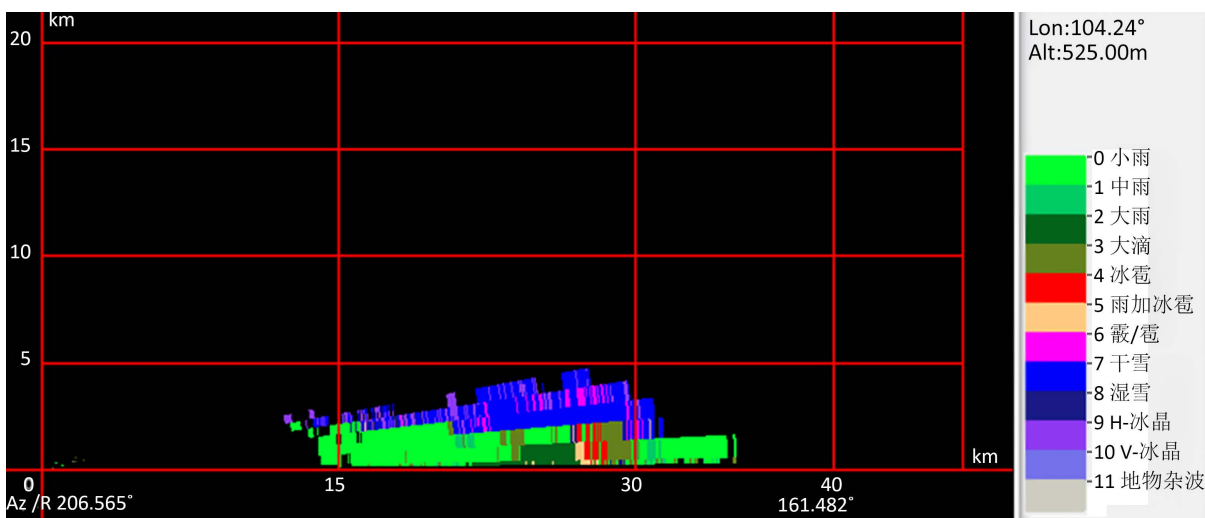


Figure 4. Vertical section of the hydrometeor classification from the radar center to the highest radar echo center at 13:58
图 4. 13:58 自雷达中心至强回波中心的水凝物产品剖面

是存在某种程度的重叠, 模糊逻辑用简单的逻辑规则对水凝物粒子进行分类。“水凝物分类”产品是通过将雷达观测变量(反射率、差分反射率、相关系数等 7 个参数)作为输入变量, 利用模糊逻辑算法输出 12 种粒子类型(分别是小雨、中雨、大雨、大滴、冰雹、雨加雹、霰/雹、干雪、湿雪、H-冰晶、V-冰晶和地物杂波), 最后将不同类型粒子的相态通过不同的色标在图上进行显示。图 4 为“水凝物分类”产品, 选取如图 1 中 e 图所示的两个回波单体合并后的最强回波中心, 自雷达中心至该处强回波中心方向给出了以距离-高度为坐标系的冰雹云垂直结构信息。从图 4 中可以看出, 小范围的冰雹(红色区域)和雨加雹(黄色区域)粒子有接地现象, 雷达的水凝物产品资料结合实况证明对流单体的合并区域是冰雹的主要落区, 跟炮点实况反映的降雹情况相符合。在冰雹或雨加雹粒子的周围是大雨或大滴区, 它们的上方的区域为干雪区或干雪与霰/雹的混合区。

从图 4 上可以看出, 此次冰雹过程中单体的回波顶高最大值在 5 km 左右, 分析原因, 可能跟当天零度层比较低有关, 此次冰雹过程与夏季常见的冰雹天气有差异, 成都夏季强对流天气的回波顶高通常在 8 km 以上, 并伴有雷暴。

6. 结语

根据本文分析, 可以得出以下几个结论:

1) 这次早春冰雹天气过程中降雹的雷达回波特征有别于夏季的冰雹型超级单体, 此次冰雹天气过程中没有伴随雷电现象, 雷达回波顶高没有达到平时降雹常识认为的 8 km 以上, 也没有出现夏季冰雹型超级单体所具有的三体散射、V 型缺口、勾状回波等特征, 通过判断回波的结构特征很难判断出冰雹云。

2) 早春的此次冰雹天气过程经历了初生阶段、合并加强阶段、成熟降雹阶段和向西南方向移动这四个不同的发展阶段。根据 X 波段双偏振相控阵雷达回波演变过程分析及其水凝物分类产品的相态识别结果分析, 再结合炮点的实际观测资料, 得出对流单体合并的尾声阶段开始降雹, 而且对流单体的合并区域是冰雹的主要落区。

3) 小的 Z_{DR} 值和高的强度 Z 对应的是纯冰雹区, 一旦冰雹开始融化, Z_{DR} 的值也会随着融化而变大。

4) 垂直液态水含量(VIL)是辨别强风暴中是否含有冰雹降水的重要参数, 在降雹开始前垂直液态水含量的跃增现象是降雹开始的一个重要指征。

5) 早春的这次冰雹天气过程, 当天气温不高, 零度层高度比较低, 降雹单体的回波顶高最大值在 5 km 左右, 所以早春时节也不能放松警惕, 时刻关注雷达回波变化, 及时采取人工影响天气措施, 以降低冰雹带来的危害。

基金项目

成都市气象局 2021 年度业务技术研究课题。

参考文献

- [1] 沈世贤. 成都平原强对流天气的发生和移动规律[J]. 四川气象, 1998, 18(3): 20-21.
- [2] 祁红彦, 刘立兵. 成都市冰雹的时空变化与地形特征分析[J]. 气象科技, 2015, 43(3): 503-505.
- [3] 李金辉, 樊鹏. 冰雹云提前识别及预警的研究[J]. 南京气象学院学报, 2007, 30(1): 114-119.
- [4] 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.
- [5] 张秉祥, 李国翠, 刘黎平, 等. 基于模糊逻辑的冰雹天气雷达识别算法[J]. 应用气象学报, 2014, 25(4): 415-426.
- [6] Zmic, D.S. (1987) Three-Body Scattering Produces Precipitation Signature of Special Diagnostic Value. *Radio Science*, 22, 76-86. <https://doi.org/10.1029/RS022i001p00076>
- [7] 夏文梅, 王晓君, 孙康远, 等. V 型缺口在 C 波段多普勒雷达中的应用研究[J]. 气象, 2016, 42(1): 67-73.

- [8] 吴海英, 陈海山, 刘梅, 等. 长生命史超级单体结构特征与形成维持机制[J]. 气象, 2017, 43(2): 141-150.
- [9] 王晓艺, 苏德斌. 基于 X 波段双线偏振雷达的冰雹云降水粒子识别研究[J]. 成都信息工程大学学报, 2018, 33(4): 383-390.
- [10] 曹俊武, 刘黎平. 双线偏振多普勒天气雷达识别冰雹区方法研究[J]. 气象, 2006, 32(6): 13-19.
- [11] 江慧远, 魏鸣, 张深涛, 等. 一次冬季冰雹的双偏振多普勒天气雷达回波分析[J]. 气象科学, 2019, 39(6): 755-762.
- [12] 李春娥, 武麦风, 胡伟, 等. 一次春季冰雹天气过程中 X 波段双偏振雷达的特征分析[J]. 安徽农业科学, 2020, 48(15): 230-233.
- [13] 毕力格, 苏立娟, 佟小林, 等. X 波段双偏振雷达在冰雹和强降水天气识别中的初步应用[J]. 内蒙古气象, 2017(4): 27-31.
- [14] 冯亮, 肖辉, 孙跃. X 波段双偏振雷达水凝物粒子相态识别应用研究[J]. 气候与环境研究, 2018, 23(3): 366-386.
- [15] 王勤. 成都春夏之交一次冰雹强对流天气过程分析[J]. 现代农业科技, 2019(24): 177-178, 184.
- [16] Ryzhkov, A.V., Kumjian, M.R. and Ganson, S.M. (2013) Polarimetric Radar Characteristics of Melting Hail. Part I: Theoretical Simulations Using Spectral Microphysical Modeling. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, **52**, 2849-2870. <https://doi.org/10.1175/JAMC-D-13-073.1>