

2024年关岭X波段双偏振雷达冰雹应用技术指标研究

方怡瑾¹, 花露², 王自流³, 刘思洋¹

¹安顺市气象局, 贵州 安顺

²镇宁县气象局, 贵州 安顺

³关岭县气象局, 贵州 安顺

收稿日期: 2025年5月20日; 录用日期: 2025年6月14日; 发布日期: 2025年6月24日

摘要

为了更加全面的认识和了解X波段双偏振多普勒雷达产品在安顺市本地人工防雹应用技术, 本文将结合笔者自身的工作经验, 通过对关岭X波段双偏振的偏振参数资料和偏振特征演变以及2024年安顺冰雹实际情况资料进行分析, 同时对安顺冬春季7个典型冰雹日20个风暴回波资料分析, 最终得出以下结论: 1) 当大冰雹出现时, 通常基本反射率因子较大约60 dBz以上, 而强风波中心的差分反射率因子较小甚至接近于0 dB或小于0 dB。当出现小冰雹或仅为降水时, 基本反射率因子约50 dBz, 而差分反射率因子1~3 dB。2) 差分反射率因子随着高度下降而增大, 当低层仰角差分反射率因子1~3 dB则出现小冰雹或纯降水, 当低仰角差分反射率因子仍有0 dB区域时可认为出现了大冰雹。3) 在相关系数上, 单一的液态水粒子0.97~1, 液态水夹卷小冰雹0.93~0.97, 大冰雹0.87~0.93, 0.85以下为强上升区, 即CC谷。4) 在偏振参数特征的分析上, Z_{DR}柱出现冰雹的Z_{DR}柱高度主要出现在5~7 km之间, 大于7 km基本可以认定为大冰雹; 而CC谷主要反映中低层的上升运动, 当大冰雹出现时在8 km以上也能看到CC谷特征。

关键词

冰雹, 双偏振雷达, 人工防雹, 判别指标

Research on the Application Technical Indicators of the 2024 Guanling X-Band Dual-Polarization Radar for Hail Detection

Yijin Fang¹, Lu Hua², Ziliu Wang³, Siyang Liu¹

¹Anshun Meteorological Bureau, Anshun Guizhou

²Zhenning Meteorological Bureau, Anshun Guizhou

³Guanling Meteorological Bureau, Anshun Guizhou

文章引用: 方怡瑾, 花露, 王自流, 刘思洋. 2024 年关岭 X 波段双偏振雷达冰雹应用技术指标研究[J]. 海洋科学前沿, 2025, 12(2): 159-165. DOI: 10.12677/ams.2025.122016

Abstract

In order to have a more comprehensive understanding and knowledge of the application technology of X-band dual-polarization Doppler radar products in local artificial hail suppression in Anshun City, this paper, based on the author's own working experience, analyzes the polarization parameter data and polarization feature evolution of the X-band dual-polarization radar in Guanling, as well as the actual hail situation data in Anshun in 2024. At the same time, it analyzes the storm echo data of 20 cases on 7 typical hail days in Anshun during winter and spring. The following conclusions are ultimately drawn: 1) When large hailstones occur, the basic reflectivity factor is usually large, about 60 dBz or above, while the differential reflectivity factor at the center of the strong wave is small or even close to 0 dB or less than 0 dB. When small hailstones or only precipitation occurs, the basic reflectivity factor is about 50 dBz, and the differential reflectivity factor is 1 to 3 dB. 2) The differential reflectivity factor increases with the decrease in height. When the differential reflectivity factor at the low elevation angle is 1 to 3 dB, small hailstones or pure precipitation occur. When there is still a 0 dB area at the low elevation angle, it can be considered that large hailstones have occurred. 3) In terms of the correlation coefficient, a single liquid water particle is 0.97 to 1, liquid water mixed with small hailstones is 0.93 to 0.97, large hailstones are 0.87 to 0.93, and below 0.85 is a strong updraft area, that is, the CC valley. 4) In the analysis of the characteristics of polarization parameters, the height of the Z_{DR} column where hailstones occur is mainly between 5 and 7 km, and above 7 km can basically be determined as large hailstones; while the CC valley mainly reflects the upward movement in the middle and lower layers, and when large hailstones occur, the CC valley feature can also be seen above 8 km.

Keywords

Hail, Dual-Polarization Radar, Artificial Hail Suppression, Discriminant Index

Copyright © 2025 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

冰雹是一种强对流天气，通常有较强的突发性和破坏性，经常引起严重的气象灾害，对人民的生命财产安全造成巨大的损失。安顺市的冰雹天气过程主要出现在春季和初夏，冬季发生较少。对于冰雹的监测来说，天气雷达是一项重要的工具。目前在业务上已经有很多地区开始使用双极化雷达，安顺市气象局于2022年在关岭选址建设了1部X波段双偏振多普勒天气雷达并投入使用。

双偏振雷达实际上是在单偏振雷达上增加一个偏振从而探测到更多的偏振参数，如差分反射率(Z_{DR})、差分相移率(KDP)和相关系数(CC) [1]-[4]。近年来有气象工作者开始关注双偏振雷达的应用，唐明晖等[5]指出CC下降、KDP出现“空洞”，说明降水以固态粒子为主，且处于增大时段；潘佳文等[6]指出 Z_{DR} 柱对风暴的合并与分裂过程具有预示性。在风暴合并(分裂)过程中伴有 Z_{DR} 柱合并(分裂)的现象；苟爱萍等[7]发现，使用偏振参量Kdp的降水估测关系能够改善雷达的降水估测效果；曹舒娅等[8]根据江苏“7·6”降雹过程探讨双向偏振产品参量在识别冰雹云的大小和位置上的作用；张志慧等[9]利用双偏振雷达对对流云发展、冰雹等天气个例进行分析。

2. 资料来源

统计 2024 年安顺市发生的 7 个冰雹日作为研究案例，分别为 1 月 1 日、1 月 19 日、3 月 31 日、4 月 18 日、4 月 25 日、5 月 3 日、5 月 4 日，共 119 个降雹点。将冰雹分为大冰雹和小冰雹，其中大冰雹是直径 $\geq 2\text{ cm}$ 的冰雹，小冰雹是小于 2 cm 的冰雹。大冰雹 10 个，小冰雹 109 个。该数据由安顺市人影中心提供。

通过对 2024 年关岭 X 波段双偏振的偏振参数资料(差分反射率 Z_{DR} 、差分相移率 KDP 和相关系数 CC)和偏振特征演变(Z_{DR} 柱、 CC 谷)以及 2024 年安顺市降雹实况资料进行分析，同时结合 2024 年安顺市冬春季 7 个冰雹日回波资料的对比分析结果，可以得出多普勒雷达人工防雹应用技术的相关指标，并将这些指标应用在未来的人工防雹和短临预报预警的相关工作中以便于对结论的可用性进行检验。

3. 偏振参数指标分析

3.1. 基本反射率因子(Z_h)

反射率因子是多普勒天气雷达的单偏振基本产品，一直作为雷达的标准产品输出。在短临预报预警和人工影响天气的工作上，使用者依靠该产品来确定回波的强度，确定风暴的结构和强弱以及强降雨带。反射率因子随时间的变化是一种用来确定降雹回波的移动以及未来趋势的极好工具。在应用双偏振参数之前，不可避免的使用基本反射率因子对某个风暴单体是否会发展为降雹做出初步判断，故而有必要研究该基本产品。

在降雹天气到来之前，可以看到回波有明显的冰雹结构特征，最大反射率因子最高可达 70 dBz ，大于 50 dBz 的强回波高度可伸展至 $5\sim 11\text{ km}$ ，其中小冰雹 50 dBz 伸展高度最高可达 8 km 以上，大冰雹 50 dBz 伸展高度最高 10 km 。大冰雹 60 dBz 的强反射率因子能到达 -10°C 层高度， 50 dBz 的强反射率因子伸展高度超过 -20°C 层高度，大于 60 dBz 的强反射率因子发展高度最高为 3 月 31 日镇宁沙子达到 8.7 km 。在统计结果中可看出，产生大冰雹的强回波多数可超过 -20°C 层高度，而所有冰雹强回波均超过 -10°C (表 1)。

Table 1. The strong reflectivity factor and extension height of large hail
表 1. 大冰雹强反射率因子与伸展高度

时间	降雹点	大冰雹直径 /mm	50 dBz 伸展 高度/km	60 dBz 伸展 高度/km	-10°C 层高度 /km	-20°C 层高度 /m
2024-01-01	西秀鸡场	20	7.6	-	5.5	6.7
2024-01-01	西秀杨武	30	8.6	6.6	5.5	6.7
2024-01-19	镇宁本寨	20	5.9	5.6	5.1	6.2
2024-01-19	镇宁沙子	20	5.6	-	5.1	6.2
2024-03-31	西秀双堡	50	10.3	5.9	6	7.6
2024-03-31	镇宁沙子	50	9.6	8.7	6	7.6
2024-03-31	镇宁马家坡	50	8.9	-	6	7.6
2024-03-31	镇宁嘎达	50	9.6	-	6	7.6
2024-04-25	西秀城区	40	8.4	-	5.9	7.5
2024-04-25	西秀宋旗	20	8.6	-	5.9	7.5

3.2. 差分反射率因子(Z_{DR})分析

Z_{DR} 是双偏振雷达新增的基础产品,反映了水凝物粒子的非球形程度。一般认为冰雹在下落过程不断翻转,可近似于各项同性的球形粒子, Z_{DR} 趋近于 0,尺寸较大的冰雹在下落过程中保持自由降落状态, Z_{DR} 值小于 0。而雨滴在下落过程中近似椭球形,雨滴越大形状越趋于扁平,对应的 Z_{DR} 越大。从 Z_{DR} 的值可区分不同高度层中的干湿冰雹,冰雹从高到低降落,小冰雹在下落过程中易融化,在高层 Z_{DR} 趋近于 0,随着降落过程中温度升高,冰雹外部融化成水膜形成湿冰雹, Z_{DR} 值增大明显由 0 值增大到正值。大冰雹不易溶化,在中底层仍能保持负值或 0 值。

通过对大小冰雹事件的统计,大冰雹和小冰雹在高空 Z_{DR} 值的表现差异明显,高层小冰雹 Z_{DR} 值有明显的大于 0 的区域,主要范围 0~3 dB,大冰雹 Z_{DR} 值以小于 0 值和更小区域的大于 0 值(强上升气流携带液态水上升)为主。随着冰雹的融化,在近地面层小冰雹很难看到小于 0 值区域,而大冰雹仍能在冰雹落区附近清晰 0 值区。

选取 3 月 31 日冰雹案例,在 22 时 23 分到 22 时 37 分西秀区双堡和宋旗同时出现了大冰雹和小冰雹(图 1(a)),在组合反射率上可看到大冰雹回波中心强度为 61 dBZ,而小冰雹回波中心约有 55 dBZ,可见反射率因子对冰雹大小有一定指示意义。在 4.3°仰角上(图 1(b))可观察到小冰雹区的 Z_{DR} 值处于 0~3 dB,说明粒子以液态水和湿冰雹为主;大冰雹区的 Z_{DR} 值处于-3~-1 dB,说明高层粒子主要以干冰雹为主。随着高度下降(图 1(c)),冰雹随之融化,小冰雹区的 Z_{DR} 值仍为 0~3 dB,大冰雹区的最小 Z_{DR} 值增至-1 dB,同时大于 1 dB 的面积增大,说明大冰雹尺寸随着高度下降尺寸变小,同时液态粒子增多。当到达近地面时(图 1(d)),小冰雹区的 Z_{DR} 值整体大于 0 dB,大冰雹区的 Z_{DR} 值仍存在小于 0 dB 的区域。随着高度降低差分反射率因子 Z_{DR} 值从负值向正值转变,表明冰雹在下落过程中融化为包裹着水膜的小冰雹并伴随着降水,近地面大冰雹仍有负值区,这与地面观测事实一致。

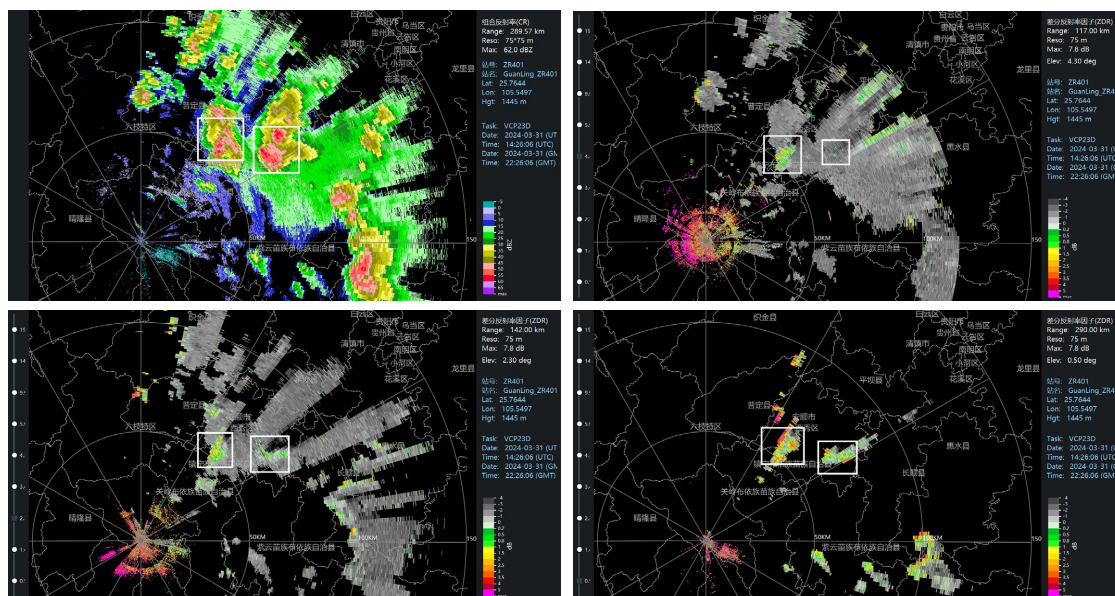


Figure 1. At 22:26 on March 31, 2024, combined reflectance (a), 4.3° elevation Z_{DR} (b), 2.3° elevation Z_{DR} (c), 0.5° elevation Z_{DR} (d)

图 1. 2024 年 3 月 31 日 22 时 26 分组合反射率(a)、4.3°仰角 Z_{DR} (b)、2.3°仰角 Z_{DR} (c)、0.5°仰角 Z_{DR} (d)

3.3. 相关系数(CC)分析

相关系数代表的是风暴中粒子的均一性,目前 S 波段双偏振雷达对相关系数的研究较多,提取的相

关指标认可度较高,如果回波中仅为单一的液态水粒子,那么 CC 通常会大于 0.95,小冰雹的 CC 在 0.9~0.95 区间,大冰雹则小于 0.9。而对于 X 波段雷达的研究相对较少,暂未形成成熟的指标。

在对关岭 X 波段雷达的使用总结出以下几点,一是低于 2.3° 仰角的 CC 值可用性不强,由于山区地形的复杂和近地面层上升气流夹卷树叶昆虫等杂物带入近地面层的降水粒子中,使低层的相关系数对风暴中的粒子没有指示性。二是 X 波段雷达和 S 波段雷达在不同相态粒子特征的区间值不同,经统计观察,在 X 波段雷达中单一的液态水粒子在 0.97~1 区间,液态水夹卷小冰雹在 0.93~0.97 区间,大冰雹在 0.87~0.93 区间,0.85 以下为强的上升区,一般冰雹落点附近都伴随着小于 0.85 的强上升区域。

4. 偏振参数特征分析

4.1. Z_{DR} 柱分析

在对流风暴的发生发展中,上升运动与之密不可分。在风暴的强度增强时,上升运动会明显增强,当风暴发展到最强盛阶段时,上升运动开始明显减弱,但是反射率因子明显增大。经研究发现 Z_{DR} 柱的演变可以反应上升气流的强弱变化, Z_{DR} 柱的深度与上升气流呈现正相关,且深度的变化要领先于最大上升气流。

在本研究的 7 个冰雹日中,选取了 20 个风暴,筛选出了 98 个 Z_{DR} 柱。在 20 个风暴中共有 6 个风暴出现了大冰雹。从 Z_{DR} 柱发生频次的直方图可知(图 2),产生冰雹时间的风暴中 Z_{DR} 柱伸展高度成正态分布,大冰雹同为正态分布。根据统计结果可知发生冰雹事件的 Z_{DR} 柱高度主要出现在 5~7 km 之间,小概率分布在 4 km、8 km 和 9 km 高度。当 Z_{DR} 柱发展到 8 km 高度以上时大概率出现大冰雹。而另一个值得注意的是,在 4 km 高度上也出现了大冰雹,通过个例发现, Z_{DR} 柱高度 4 km 的大冰雹出现在 1 月 19 日 14 时 36 分至 46 分,正是一天之中热低压发展最强的时间,同时该日环境 0°C 层和 -20°C 层高度相对较低,属于特殊个例。同时发现 Z_{DR} 柱的伸展在降雹之前有一次明显的跃升,伸展高度极值同样对于降雹有一个体扫的提前量,有待于进一步的研究。

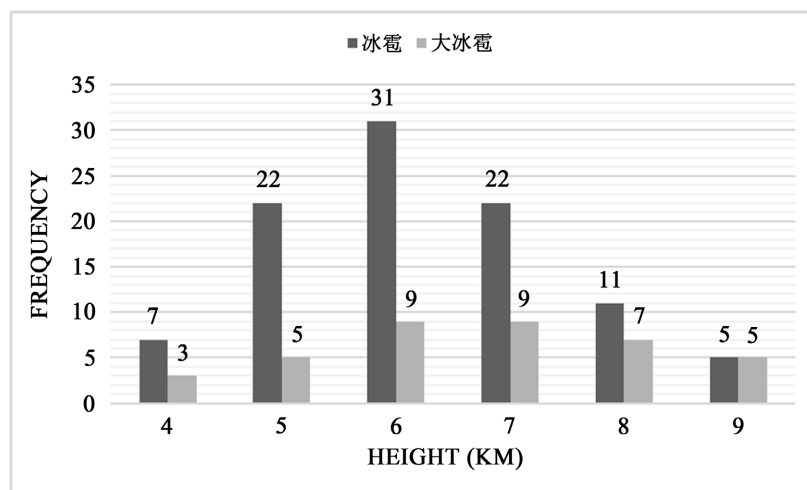


Figure 2. Histogram of Z_{DR} column height in cases of hail and large hail

图 2. 发生冰雹和大冰雹的 Z_{DR} 柱高度直方图

以 3 月 31 日 20 时 50 分开始镇宁县出现大冰雹为例,20 时 39 分 Z_{DR} 柱还未出现,20 时 42 分 Z_{DR} 柱明显出现,延伸至 5 km 高度,20 时 44 分 Z_{DR} 柱继续跃升至 7 km 高度,20 时 47 分 Z_{DR} 柱突破至 7 km 以上并且 Z_{DR} 柱中心强度增强至 5 dB,20 时 50 分 Z_{DR} 柱高度和中心强度维持,此时镇宁沙子出现冰雹,

20 时 53 分 Z_{DR} 柱高度明显降低且强度减弱。在本次冰雹过程中, 在冰雹前的 8 分钟可以明显看到 Z_{DR} 柱出现, 前 6 分钟可以明显看到 Z_{DR} 柱跃升, 当冰雹出现后, Z_{DR} 柱高度明显降低且强度减弱。符合统计结论。

4.2. CC 谷分析

CC 谷是能在对流风暴中观察到的现象, 表现为 CC 值较周围显著减小的区域($CC < 0.85$), CC 谷的形成主要与上升气流有关, 在低层较为容易见到, 当上升气流较强时 CC 谷可以伸展到中高层。在所有的冰雹事件中, 都有 CC 谷出现。

在所有的冰雹事件中, 都有 CC 谷出现。对雷达资料的实际使用中, CC 的可用数据在 2.3° 仰角以上, 当冰雹出现时可在 4~6 km 高度看到 CC 谷, 可在大冰雹的风暴中看到更高高度的 CC 谷, 一般不超过 8 km。有一个极端个例出现在 3 月 31 日, 由于上升气流很强烈, CC 谷在 11 km 处观察到。

5. 结论

针对 2024 年发生在安顺的 7 次强对流过程, 使用了关岭双偏振雷达的观测数据, 分析了冰雹的单、双偏振参数特征, 结果表明:

① 差分反射率因子加入可以更好的反映出该风暴是否能出现大冰雹。当大冰雹出现时, 通常基本反射率因子较大约 60 dBz 以上, 而差分反射率因子较小甚至接近于 0 dB 或小于 0 dB。当出现小冰雹或仅为降水时, 基本反射率因子相比于大冰雹较小, 约 50 dBz, 而差分反射率因子 1~3 dB。

② 差分反射率因子随着高度下降而增大, 那是因为随着高度的减小, 环境温度升高冰雹融化尺寸减小同时液态粒子增多, 但仍能分辨大小冰雹, 当低层仰角差分反射率因子 1~3 dB 则出现小冰雹或纯降水, 当低仰角差分反射率因子仍有 0 dB 区域时可认为出现了大冰雹。

③ 在相关系数的使用上, 量化关岭 X 波段雷达的指标, 单一的液态水粒子 0.97~1, 液态水夹卷小冰雹 0.93~0.97, 大冰雹 0.87~0.93, 0.85 以下为强上升区, 即 CC 谷。

④ 在偏振参数特征的分析上, Z_{DR} 柱和 CC 谷均能反应对流风暴的上升运动, Z_{DR} 柱主要反应高层的上升运动, 一般情况下出现冰雹的 Z_{DR} 柱高度主要出现在 5~7 km 之间, 大于 7 km 基本可以认定为大冰雹; 而 CC 谷主要反映中低层的上升运动, 当大冰雹出现时同样可在 8 km 以上的高层看到。

⑤ 存在一定的不足, 在基本反射率因子上仅考虑了强度和伸展高度, 未能考虑三体散射、旁瓣回波、有界弱回波区及穹隆等回波特征对冰雹出现的指示和提前量的研究, 有待进一步的研究; 在差分反射率因子的研究上, 同时存在大小冰雹个例选取较少, 需要在后续的工作继续提取相似个例, 对结论进行完善; 相关系数在统计上存在一定误差, 存在误差的原因是雷达回波和降雹点可能存在偏移。

参考文献

- [1] 王清川, 刘艳杰, 周涛, 等. 河北省廊坊“6·25”超级单体雷达回波特征分析[J]. 沙漠与绿洲气象, 2022, 16(3): 54-61.
- [2] 孙丝雨, 沈永海, 霍苗, 等. 双线偏振雷达在一次强降雹过程中的初步应用[J]. 暴雨灾害, 2013, 32(3): 249-255.
- [3] 孙伟, 曹舒娅, 沈建. 基于多源探测资料的“4·12”非典型冰雹特征分析[J]. 热带气象学报, 2021, 37(2): 218-232.
- [4] 潘佳文, 魏鸣, 郭丽君, 等. 闽南地区大冰雹超级单体演变的双偏振特征分析[J]. 气象, 2020, 46(12): 1608-1620.
- [5] 唐明晖, 陈龙, 陈鹤, 等. 基于双偏振雷达资料的洞庭湖区一次强对流过程的分阶段特征分析[J]. 暴雨灾害, 2023, 42(6): 692-703.
- [6] 潘佳文, 徐一鸣, 吴举秀, 等. 基于对流风暴结构的双偏振雷达 Z_{DR} 柱识别及应用研究[J]. 气象学报, 2023, 81(6): 943-957.

-
- [7] 荀爱萍, 赵玉春, 李菲, 等. X 波段双偏振相控阵雷达定量降水估测研究[J]. 暴雨灾害, 2023, 42(4): 437-445.
 - [8] 曹舒娅, 孙伟, 韦芬芬, 等. 双偏振雷达在江苏“7·6”降雹过程中的应用分析[J]. 大气科学学报, 2021, 44(4): 549-557.
 - [9] 张志慧, 张华龙, 韦凯华, 等. 广东两次相似强对流过程的对比分析[J]. 广东气象, 2018, 40(3): 14-18+23.