沙 漠 与 绿 洲 气 象
Desert and Oasis Meteorology
第16卷 第6期
2022年12月

郑皎,韩迁立,徐艳,等.一次人工防雹作业的双偏振雷达特征分析[J].沙漠与绿洲气象,2022,16(6):124-130.
doi:10.12057/j.issn.1002-0799.2022.06.016

开放科学(资源服务)标识码(OSID):

一次人工防雹作业的双偏振雷达特征分析

郑 皎[1],韩迁立[1],徐 艳[2],侯 伟[1]
(1.红河州气象局,云南 蒙自 661199;2.建水县气象局,云南 建水 654300)

摘 要:利用红河C波段双偏振雷达资料,分析了2020年3月17日红河州冰雹天气过程中双偏振雷达产品特征及在人工防雹中的应用。结果表明:本次冰雹天气过程主要影响天气系统是冷锋切变,蒙自探空站T-ln$P$图及V-3θ图上表现出明显的对流潜势特征。雷达常规产品表现出典型的冰雹结构特征。双偏振特征量中,差分反射率低值区对应反射率因子的高值区,且为大冰雹中心,对应的Z_{DR}在-0.39~0.10 dB,中高层出现了明显的Z_{DR}异常大值区,幅相相关系数较低,在0.87~0.93,K_{DP}在-0.10~-0.01 °/km,表明冰雹表面较干。防雹作业后对比分析,作业区各项雷达产品指标均下降且未出现冰雹,而非作业区冰雹特征依然明显且出现冰雹。

关键词:双偏振;冰雹;V-3θ;人工防雹
中图分类号:P412.25 **文献标识码**:A **文章编号**:1002-0799(2022)06-0124-07

天气雷达一直是人工防雹指挥作业的主要工具。常规多普勒天气雷达对冰雹的监测存在一定缺陷,它无法通过回波强度和径向速度特征来区别不同相态的降水粒子,而双线偏振雷达通过发射水平、垂直正交线极化波束,得到丰富的雷达偏振参量[1](如差分反射率、相关系数等),研究和利用这些偏振参量,对于提高雷达定量估测降水的准确度,以及了解降水粒子的相态、空间分布等均有更好的指示意义[2]。王致群等[3]探讨了偏振雷达在人工影响天气方面的应用问题,介绍了不同偏振雷达在识别云内水成物粒子相态、密度、观测云内水成物粒子微物理变化过程,以及被用于云的作业效果评估等方面的方法。陈羿辰等[4]利用双偏振雷达跟踪分析了在不同高度上防雹作业前后云体宏观结构特征各粒子相态等微物理变化过程。刘红亚等[5]结合天气个例,对冰雹天气过程的双偏振雷达特征进行了分析。

红河天气雷达是云南省第一部C波段双偏振雷达,怎样利用双偏振参量实现对冰雹生消的有效监测并建立判别指标,实现人工防雹高效科学指挥显得尤为重要。本文以一次人工防雹指挥作业为例,对作业前后双偏振参数特征进行分析,探讨红河州人工防雹判别作业指标。

1 资料及数据来源

雷达资料取自红河C波段双偏振新一代天气雷达,主要选取出现冰雹或防雹作业前后30 min的雷达资料来。雷达基本参数:天线馈源海拔高度2 491 m,雷达波长5.5 cm,采用水平、垂直双极化方式,强度监测≥400 km,双偏振测量≥150 km,采用VCP21观测模式,数据平均间隔为6 min。天气形势场资料来自MICAPS,冰雹资料取自云南省灾情直报系统,人影作业情况取自云南省人工影响天气作业信息管理系统。

2 天气形式分析

2.1 天气实况和天气背景

3月17日16:40,元阳县5个乡镇出现降雹,持

收稿日期:2021-10-11;**修回日期**:2022-09-26
基金项目:中国气象科学研究院灾害性天气国家重点实验室(2020LASW-B09);云南省气象局科研项目(YZ202220)
作者简介:郑皎(1973—),女,高级工程师,主要从事人工影响天气研究工作。E-mail:hhmzzj@126.com
通信作者:韩迁立(1984—),男,工程师,主要从事中短期天气预报工作。E-mail:hql_2666053@139.com

续时间 20 min,冰雹最大直径 4 cm。18:40 左右个旧、蔓耗、屏边、滴水层附近降雹,冰雹直径 2 cm。19:00 河口 4 个乡镇先后出现大风冰雹及短时强降水。

3 月 17 日 08 时,地面冷锋位于丽江华坪、昆明至文山一带,红河州东部地区受冷锋控制,700 hPa 四川南部到云南东部存在弱切变线。本次冰雹天气过程主要影响天气系统是冷锋切变。

2.2 对流潜势分析

冰雹发生地距蒙自约 50 km,蒙自站的探空曲线变化可基本反映这次强对流天气发生区上空的天气变化情况(图 1)。

2.2.1 T-ln$P$ 图

从 3 月 17 日 08 时蒙自站 T-ln$P$ 图(图 1a)可知,蒙自站"下湿上干"、有逆温,为典型的喇叭口型结构,且有明显的不稳定能量,有利于对流发展。热力对流参数中湿对流有效位能 $CAPE$=604.1 J/kg>400 J/kg,K 指数=38 ℃>30 ℃,沙氏指数 SI=-3.14 ℃<-1 ℃,总指数 TT=51 ℃>50 ℃,抬升指数 LI=-2.75 ℃>-3 ℃,除抬升指数外均满足强对流的参考指标[6]。综合指数强天气威胁指数 $SWEAT$=274.1,接近 300 的强对流参考指标,0 ℃ 层高度为 4 345 m,位于 600 hPa 附近,-20 ℃ 层高度为 7 520 m,位于 400 hPa 附近,有利于冰雹的产生。由图 1 可知,当天环境条件非常有利于出现强对流天气[6]。

2.2.2 V-3θ 图

V-3θ 图是运用图像结构来预测天气的方法,其中"滚流"引自水利学的概念,用于描述大气垂直涡旋变化情况,按风矢量及风速的不均匀性分为"顺滚流"和"逆滚流","顺滚流"可作为判别对流性天气出现与否的重要指标[7-8]。V-3θ 图作为对流潜势分析的有效方法得到了广泛应用[9-11]。

从 3 月 17 日 08 时蒙自站 V-3θ 图(图 1b)可知,冰雹发生前有较为清晰的结构特征[7-8],主要表现在:(1)强烈的非均匀结构。θ 曲线在 850~700、500~400、300~250 hPa 等多处明显折拐(左倾)甚至垂直于 T 轴,呈现"罗锅"态,中低层 θ_{se} 和 θ^* 线出现多处明显左倾,甚至与 T 轴成钝角,说明大气层结结构极不稳定。(2)水汽分布不均匀。θ_{se} 和 θ^* 线在地面处,700~600 hPa 靠得较近,而在 500 hPa 处 θ_{se} 和 θ^* 线则距离较大,呈现出"蜂腰"结构,表现为中层湿、低层和高层干,且有多个干湿层的状况,这是水汽条件较差且分布极度不均的一种表现,强对流天气主要表现为冰雹、大风。(3)存在"超低温"。θ 曲线在 300~270 hPa 出现明显的"超低温"层(θ 曲线与 P 坐标平行),导致对流层大气的温度或热结构的极度不均匀,从而引发对流出现。(4)有顺滚流。近地层为东南风,500 hPa 以上层为一致的西偏南风,且高层风速远大于低层,形成深厚的顺滚流,存在强的垂直风切变,高层强偏西风的抽吸作用有利于对流运动的发展。

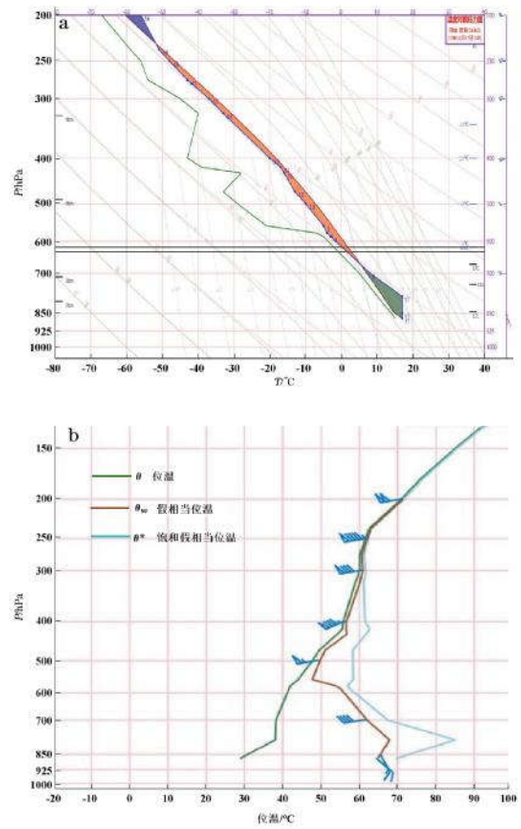

图 1 08 时蒙自站 T-ln$P$(a)和 V-3θ(b)

根据 V-3θ 图对冰雹的潜势分析,各项指标均满足,且存在更有利冰雹发生的辅助条件"蜂腰",可预报未来 12~24 h 内将出现冰雹大风天气。

3 雷达常规参量分析

3.1 水平反射率因子 Z_h

18:22 在蛮耗、水田交界处 2.4°水平反射率因子图上(图 2a),Z_h 超过 65 dBZ,顶高达 10.0 km,具有清晰的勾状回波结构。在其径向后侧出现明显的"TBSS"和"V 型缺口"特征,"雹钉"长度超过 32 km,有明显的"旁瓣回波"。在剖面图上(图 2c),出现入流一侧倾斜结构,有明显的悬垂回波和"BWER",出现"假尖顶",55 dBZ 以上的反射率因子一直扩展到 9 km,超过了 8.6 km 的-20 ℃等温线,具有典型的

冰雹回波特征。18:40 系统东移至滴水层一带,特征依然明显(图 2b),强度增至 68 dBZ。但弱回波区收窄,0 ℃层以上超过 55 dBZ 的区域变宽(图 2d)。垂直液态水含量从 33.9 kg/m^2, 跃增到 39.8 kg/m^2,具有产生大冰雹的极大潜势。研究表明[12-16],大冰雹常常形成并降落在钩状回波附近(或弱回波区附近)的强回波区中。在“TBSS”出现后的 10~30 min,往往会产生降雹和大风[17]。

3.2 径向速度特征分析

18:22 在 0.5°径向速度图上(图 3a),负速度在向正速度过渡过程中由-24.9 m/s 跳到 24.9 m/s,逐渐过渡到 8.9 m/s,出现速度模糊,退模糊计算后可知,真实的最大负速度值为-33.8 m/s。在其剖面图上(图 3c),3~10 km 为中低层辐合区,10~17 km 为高层辐散区,辐合区较辐散区宽,零速度线呈直立倾斜状, 中低层辐合上升高层辐散的抽吸作用有利于上升运动的发展和维持。18:40 在径向速度图(图 3b)和剖面图上(图 3d),低层辐合区宽度收窄,辐散区

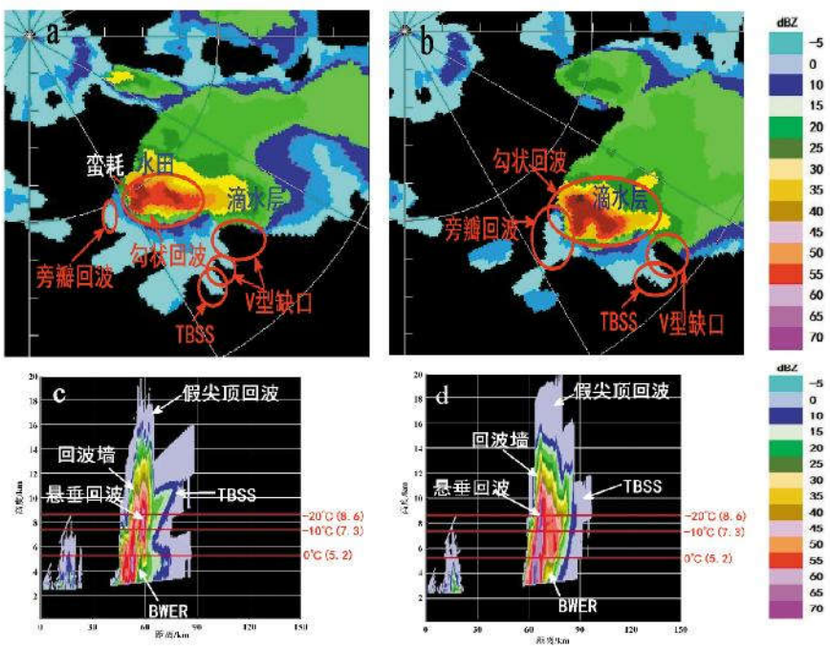

图 2 18:22 和 18:40 差分反射率和反射率因子剖面

(a 为 18:22 2.4°水平反射率因子;b 为 18:40 2.4°水平反射率因子;c 为 18:22 水平反射率因子剖面;d 为 18:40 水平反射率因子剖面)

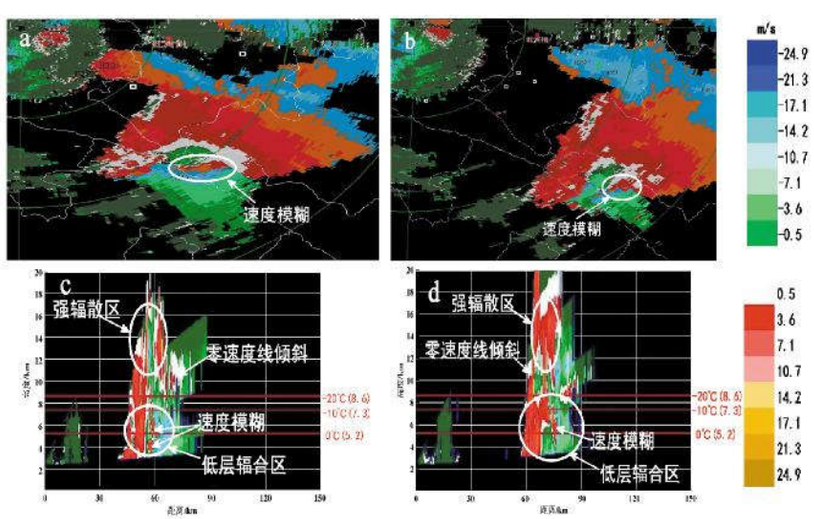

图 3 18:22 和 18:40 径向速度及其剖面图

(a 为 18:22 0.5°径向速度;b 为 18:40 0.5°径向速度;c 为 18:22 径向速度剖面图;d 为 18:40 径向速度剖面)

变宽,说明此时入流气流减弱,出流气流加强。

4 双偏振特征量分析

4.1 差分反射率因子 Z_{DR}

Z_{DR} 与粒子大小和形状的扁圆程度紧密相关,通常大冰雹呈椭圆形,在下落过程中会出现翻滚现象,近似于各向同性的“球形”,Z_{DR} 也接近 0 dB。在大冰雹周围存在大量较小的湿雹和大雨滴,其 Z_{DR} 相对较高。这就形成了以大冰雹为中心的 Z_{DR} 低值区,这一特性可用于区分和判别云内水成物粒子的相态[18-19]。

18:22 在蛮耗附近,0.5°差分反射率图(图 4a 圆圈所示位置),Z_h 超过 55 dBZ 区域对应存在 Z_{DR} 为-0.58~-0.03 dB 的情况,符合高 Z_h 低 Z_{DR} 的特征,在其径向后侧,Z_{DR} 出现了明显的负值区。1.5°差分反射率图(图 4c 圆圈所示位置)上形成了 Z_{DR} 环,其 Z_{DR} 在-0.39~0.10 dB,趋近于 0,说明该区域存在明显的冰雹粒子[20]。18:40 在 0.5°差分反射率图(图 4b)和剖面图(图 4e)中表现更明显,BWER 附近有 Z_{DR} 异常大值区,达 5 dB,强烈的上升气流将低层液滴和表面融化的冰雹带到高层,粒子含水量和扁平程度增大,降落到 0 ℃层以下后形成外包水膜的大冰雹或大雨滴,造成 Z_{DR} 值异常增大。另外,BWER 附近存在明显的 Z_{DR} 空洞(图 4d),这是由于未融化或初步融化的冰雹形成冰雹柱所致。经过 3 个体扫后,“TBSS”和“V 型缺口”特征显著,表明云层中一直含有冰雹粒子。

4.2 差分相位常数 K_{DP}

K_{DP} 是指水平极化脉冲与垂直极化脉冲传播常数差,K_{DP} 的大小能反映出液态含水量的多少,能反映出较大水滴聚集区,且不受强度标定和部分阻挡的影响,实际工作中常用来判别强降水和上升气流,

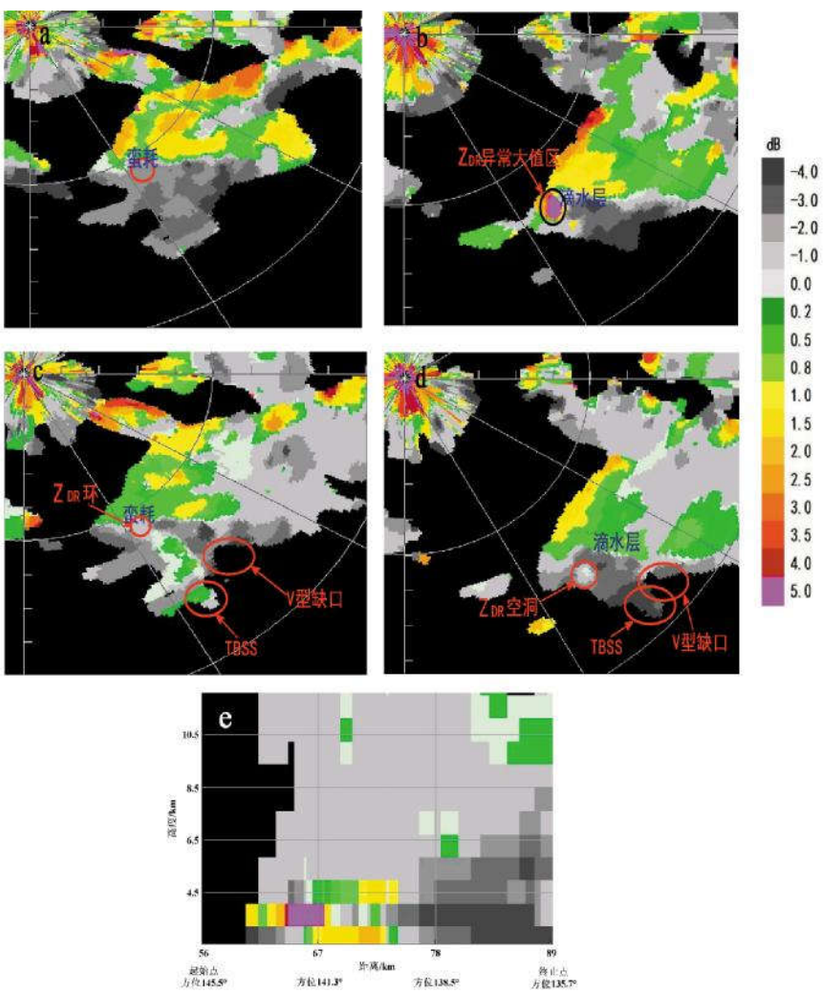

图 4 18:22 和 18:40 差分反射率和差分反射率剖面

(a 为 18:22 0.5°差分反射率;b 为 18:40 0.5°差分反射率;c 为 18:22 1.5°差分反射率;d 为 18:40 1.5°差分反射率;e 为 18:40 差分反射率剖面)

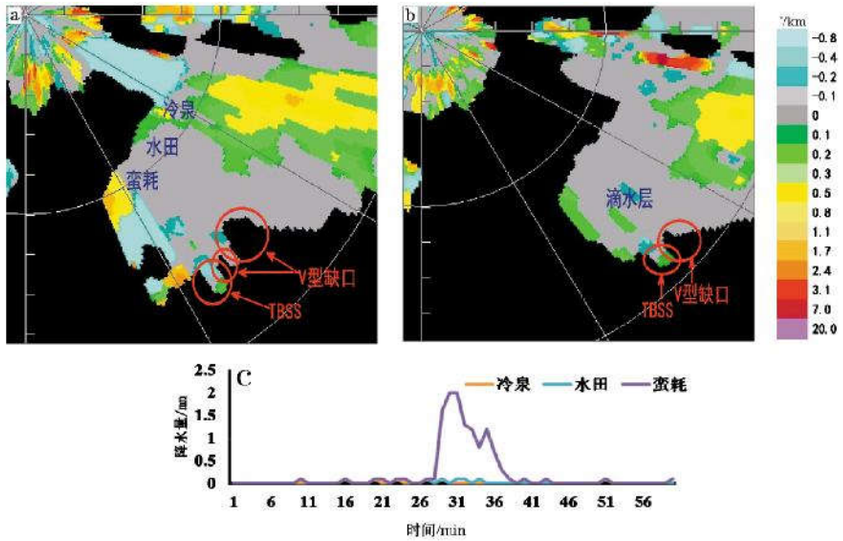

图 5 差分相位常数(a,b)和 18:00—19:00 附近自动站分钟降水量(c)

(a 为 18:22 2.4°,b 为 18:40 1.5°)

冰雹表面越湿则 K_{DP} 值越大[17-20]。它的局限性在于当 CC<0.8 时不进行计算,因此会出现 K_{DP} 空洞。

18:22 在 2.4°差分相位常数图上(图 5a),蒙自冷泉、水田、个旧和蛮耗附近的 K_{DP} 为-0.03~1.02°/km,表明这一地区云中含有较多的液态水,对比这一时段自动站降水情况(图 5c),降水也出现在这一时段,说明了 K_{DP} 对降水有指示意义,也反映出冰雹粒子还未完全形成。18:40"TBSS"和"V 型缺口"特征明显(图 5b),说明对流发展趋于成熟,滴水层附近 K_{DP} 为-0.10~-0.01°/km,说明云层中已存在表面较干的冰雹粒子,因此差分相移率较小。

4.3 幅相相关系数

相关系数 CC 主要用于描述水平和垂直偏振回波信号变化的幅相一致性,CC 的大小与粒子的轴化、倾斜角、形状不规则性以及相态有关。降水粒子均匀性和相关性较好,CC 值接近 1.0,混合水凝物因

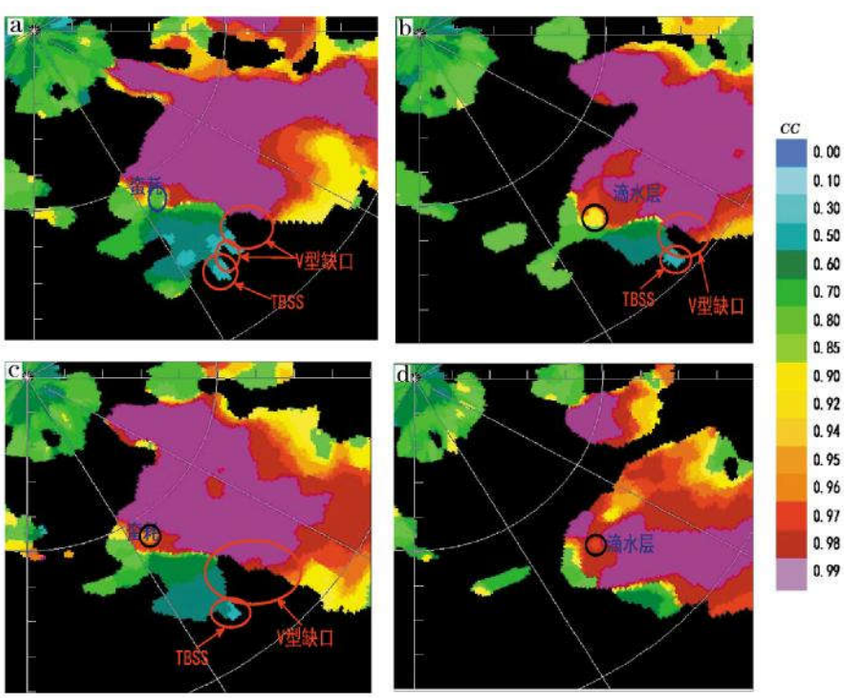

图 6 不同时列 2.4°、4.3°相关系数

(a 为 18:22;b 为18:40 2.4°;c为 18:22;d 为 18:40 4.3°)

粒子形态呈现多样性,相关性明显偏弱,小冰雹 *CC* 值为 0.9~0.95,大冰雹和冰水混合区 *CC* 值低于 0.9,但都在 0.85 以上[20-22]。

18:22 Z_h 超过 55 dBZ,*CC* 为 0.87~0.93(图 6a、6c 圆圈所示位置),说明存在上升气流带上去尚未冻结的大雨滴及一部分已冻结的雹粒,粒子均一性较差,相关系数较低。在这区域的径向后侧,受大冰雹衰减影响,Z_h 和 *CC* 值显著降低,呈现显著的"TBSS"和"V 型缺口"。18:40 对流加强,Z_h 集中为 55~60 dBZ,*CC* 为 0.93~0.98(图 6b、6d 圆圈所示位置),表明粒子的均一性较 18:22 好,冰雹粒子正在持续增长,粒子相态趋于一致,"融化层"也较 18:22 范围更广,更清晰。

5 防雹作业情况和作业效果分析

18:54 在播咪和卡口可作业区内,最大回波强度达 50 dBZ,顶高为 6.3 km,云体处在从雷雨云向冰雹云发展的跃增阶段,达到防雹作业条件,两作业点分别在 18:54 和 19:00 进行防雹作业 1 min,用弹量 16 枚,炮弹最大射高为 3 800±200 m,作业仰角为 55°~75°。防雹作业后,19:06 作业影响区内,回波强度明显减弱,云层中已不含冰水混合物或冰雹粒子,降水类型为小雨。非作业区冰雹特征依然显著,最大 Z_h 为 62 dBZ,回波顶高为 6.4 km,超过了 5.2 km 的 0 ℃层,50 dBZ 以上回波 Z_{DR} 为 -0.38~1.04 dB,K_{DP} 为 0.00~0.10°/km,*CC* 为 0.92~0.99,说明非作业区依然含有冰水混合物或小冰雹粒子。对比实况分析,作业影响区没有降雹,非作业区出现了 2~4 cm 的降雹,造成 9 个村委会 36 个村民小组的农业、民房不同程度受灾,防雹效果明显。

6 结论

通过对 2020 年 3 月 17 日红河州出现冰雹过程的双偏振特征和防雹作业前后回波变化情况分析,得到以下结论:

(1)本次冰雹天气过程是在冷锋切变影响下产生的。最近的蒙自探空站 T-ln$P$ 图上存在明显不稳定能量及"下湿上干"特征,且各项热力对流参数基本都超过强对流的特征值,非常有利于对流发展。V-3θ 图具有清晰的冰雹结构特征,存在"超低温"和"顺滚流"及更有利于冰雹发生的辅助条件"蜂腰"。

(2)雷达常规参量表现出清晰的冰雹结构特征。表现出高悬的强回波,反射率因子超过 65 dBZ,55 dBZ 垂直扩展到 -20 ℃等温线以上;出现显著的"BWER"、"TBSS"、"勾状回波"、"旁瓣回波"和"V 型缺口";*VIL* 出现异常跃增;径向速度图上有明显的辐合特征。

(3)双偏振特征量也表现出明显的冰雹特征。Z_h 超过 55 dBZ 的区域,呈现出高 Z_h 低 Z_{DR} 的特征,Z_{DR} 为 -0.58~0.03 dB,*CC* 值为 0.87~0.93,K_{DP} 为 -0.10~-0.01°/km,表明云层中一直有冰雹粒子。

(4)防雹作业效果明显。防区作业后回波强度显著降低,云层中已不含冰水混合物或冰雹粒子。但非作业区雷达常规和双偏振参量的冰雹特征依然显著,出现 2~4 cm 的降雹。

参考文献:

[1] 王致君.偏振气象雷达发展现状及其应用潜力[J].高原气象,2002,21(5):495-500.

[2] 苏冉,廖菲,周芯玉.双线偏振雷达在广州"3·19"降雹过程中的应用分析 [J]. 热带气象学报,2018,34 (2):209-216.

[3] 王致群,楚荣忠.偏振雷达在人工影响天气工作中的应用潜力[J].高原气象,2002,21(6):592-597.

[4] 陈羿辰,张龙斌,金永利,等.利用双线偏振雷达分析人工防雹作业效果[J].气象科技,2016,44(3):480-488.

[5] 刘红亚,杨引明,张晶,等.一次冰雹天气的 WSR-88D 双偏振雷达特征分析[J],气象与环境科学,2020,43(2):1-9.

[6] 姚学祥.天气预报技术与方法[M].北京:气象出版社,2015:116-161.

[7] 郝丽萍,张葵.欧阳首承.灾害学概论[M].北京:气象出版社,2018:41-108.

[8] 欧阳首承,陈刚毅,林益.信息数字化与预测[M].北京:气象出版社,2009:110-207.

[9] 毛列尼·阿依提看,玉素甫·木沙,郭品文.近 10 a 新疆短时强降水湿度层结及大气能量结构特征分析[J].沙漠与绿洲气象,2017,11(2):43-49.

[10] 王若升,董安祥,樊晓春,等.溃变理论在西北地区冰雹天气预报中的应用[J].干旱气象,2006,24(2):19-24.

[11] 林文,林长城,陈彬彬,等.闽西北地区冰雹天气大气垂直结构特征[J].自然灾害学报,2014,23(4):212-218.

[12] BROWNING K A,FOOTE G B.Airflow and hail growth in supercellstorms and some implications for hail suppression[J].Quart J Roy Meteor Soc,1976,102(433):499-533.

[13] STOUT G E,HUFF F A.Radar records Illinois tornado genesis[J].Bull Amee Meteoe Soc,1953,34(6):281-284.

[14] 李晓霞,李常德,马国涛,等.一次冰雹强对流天气过程的潜势条件和中尺度特征分析 [J]. 沙漠与绿洲气象,2020,14(4):69-77.

[15] 陈军,李小兰,黎荣,等.贵州铜仁两次大范围冰雹过程

的对比分析[J].沙漠与绿洲气象,2019,13(4):30-36.

[16] 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,2006:118-119,145.

[17] 杨淑华,赵桂香,苗爱梅,等.C波段多普勒天气雷达特征及临近预警[M].北京:气象出版社,2018:76-83.

[18] KUMJIAN M R,Ryzhkov A V.PolarimetWc signatures in supercell thunderestormss [J].Appl Meteor Climatol,2008,47 (7):1940-1961.

[19] 张培昌,魏鸣,黄兴友,等.双线偏振多变勒天气雷达探测原理与应用[M].北京:气象出版社,2018:174-175.

[20] 曹俊武,刘黎平.双线偏正多普勒雷达识别冰雹区方法研究[J].气象,2006,32(6):13-19.

[21] 崔梦雪,张晗昀,张伟,等.闽南一次超级单体风暴双偏正特征分析[J].海峡科学,2020,160(4):3-10.

[22] 冯晋勤,张深寿,吴陈锋,等.双偏振雷达产品在福建强对流天气中过程中的应用分析[J].气象,2018,44(12):1566-1574.

Characteristics of Dual-polarization Radar in an Artificial Anti-hail Operation

ZHENG Jiao[1],HAN Qianli[1],XU Yan[2],HOU Wei[1]

(1.Honghe Meteorological Bureau,Mengzi 661199,China;
2.Jianshui Meteorological Bureau,Jianshui 654300,China)

Abstract The characteristics of dual-polarization radar products and its application in artificial anti-hail operation of a hail event on March 17th 2020 are analyzed based on the C-band dual-polarization radar data of Honghe.The results show that the main weather system affecting the hail process is the cold front and shear line,the T-ln$P$ and V-3θ charts of Mengzi sounding station show the obvious convection potential characteristics.Radar conventional products show typical hail characteristics.Hail can be identified by the dual-polarization parameters,hail usually exist in the area with strong reflectivity,low value of Z_{DR} and CC,the typical value of Z_{DR} is usually between -0.39 and 0.10 dB and the value of CC is between 0.87 and 0.93,anomalously large value region of Z_{DR} appears at the upper level,while the value of K_{DP} is between -0.10 and -0.01 °/km.After the anti-hail operation,the comparative analysis showed that all radar product indexes in the operation area decreased without hail,while the hail characteristics in the non-operation area were still obvious with hail.

Key words dual-polarization;hail;V-3θ chart;artificial anti-hail