

文章编号: 2096-1618(2024)04-0442-10

威宁一次单体雹暴防雷作业的宏微观物理响应特征分析

鹿原¹, 周筠珺^{1,2,3}, 邹书平⁴, 杨哲⁴, 曾勇⁴

(1. 成都信息工程大学大气科学学院四川省高原大气与环境重点实验室, 四川 成都 610225; 2. 南京信息工程大学气象灾害预报预警与评估协同创新中心, 江苏 南京 210044; 3. 成都平原城市气象与环境四川省野外科学观测研究站, 四川 成都 610225; 4. 贵州省人工影响天气办公室, 贵州 贵阳 550001)

摘要:为研究单体雹暴作业后雹云宏、微观物理演变特征, 利用威宁雪山镇 X 波段雷达数据和水成物粒子识别方法, 并根据催化剂的扩散模式, 将雹云演变分区域和时段进行对比分析。结果表明, 作业前雹云冰雹形成区水平反射率为 45 ~ 55 dBZ, 差分反射率在 -0.5 ~ 3.5 dB, 差分传播相移率小于 0.5°/km, 相关系数在 0.60 ~ 0.92。冰雹形成区主要为雨雹混合物, 雹粒子周围围绕着高密度霰和过冷水。作业后, 雹云反射率的减小和强回波高度的降低主要发生在播撒时段, 回波顶高和风暴高度的降低主要发生在后续时段。作业区中雹粒子、过冷水明显减少, 聚合物和冰晶增多, 高密度霰变化不明显。单体雹云雹胚来源主要为高密度霰, 其防雷效应主要遵循的理论为“利益竞争”和“早期降雨”。

关键词:冰雹; 人工防雷; 效果检验; 双偏振雷达

中图分类号:P482

文献标志码:A

doi:10.16836/j.cnki.jcuit.2024.04.008

0 引言

雹暴是一种春夏季常见的突发性剧烈天气现象, 常伴随冰雹、大风和雷电等灾害性天气, 给农业生产、交通运输、建筑房屋和其他财产安全带来严重损害。

为避免或减轻冰雹灾害, 国内外不断开展人工防雷作业和实验研究, 根据冰雹生长机制提出了众多防雷假说^[1-7]。近年来随着雹云探测、预报手段的进一步发展, 雹云降水物理学取得较大进展, 防雷理论在此基础上仍需要不断的验证和完善。而科学、客观的人工防雷效果分析, 对验证和改进防雷理论提高防雷水平起着非常重要的作用^[8]。

新一代天气雷达作为现代中小尺度天气过程的重要探测手段, 大多数情况可以完整地观测到冰雹云的发展过程。所以现阶段对防雷效果的分析研究多选用冰雹云回波面积、强度、顶高和 VIL 值等与降水物理特征密切相关的雷达参数作为效果检验的特征参量, 并且均在不同程度上说明了人工防雷作业的有效性^[9-13]。但大多数研究仅一定程度地证明了防雷作业对雹云的宏观发展具有一定的抑制作用, 由于缺乏对云微物理参量和云内粒子的探测, 而无法进一步对人工冰核入云后雹云的宏、微观物理响应进行系统的分析。

双线偏振雷达的偏振参量对云内粒子形态变化较

敏感, 在揭示雹云防雷作业前后云内微物理、热动力的变化上起着重要的作用^[14-15]。近年来, 基于双偏振雷达的人工防雷物理效果检验结果表明, 防雷作业区相较于对照区有水平反射率 Z_H 减小, 差分反射率 Z_{DR} 和零相关系数 ρ_{HV} 增大等偏振参量的变化, 作业可有效抑制冰雹胚胎成长为冰雹的过程^[16]。作业后人工冰核与自然雹胚竞争过冷水产生更多冰晶, 造成 Z_{DR} 值增加及 ρ_{HV} 值的减小^[17]。作业区云层中雨雹混合物和冰雹粒子消失, 而非作业区仍出现高 Z_H 、低 Z_{DR} 的显著冰雹特征^[18]。高炮作业后 RHI 上雹云低层 Z_{DR} 值增大, 中低层 K_{DP} 值增大, 0 °C 层到近地面存在 ρ_{HV} 值为 0.94 ~ 0.96 的柱状区, 雹云核心处的过冷水中心消失, 雹云的宏微观变化特征支持“爆炸效应”假说^[19]。上述研究通过对作业后雹云内微物理过程的观测分析, 验证了播撒效应并分析了其背后涉及的防雷理论。但冰雹的生长过程复杂且易受环境影响, 催化播撒效果在各异的云内微物理环境和动力条件下会存在差异。此外, 人工防雷的效果还存在较大的地域差异, 任何在一个地区验证有效的作业方法都不能盲目地应用到其他地区^[20]。而是要根据具体的冰雹云特征、成雹机制和雹胚生长轨迹, 进行有效的防雷作业, 获得科学客观的检验结果, 进而探索适合当地的人工防雷理论和作业方式。

贵州省威宁县地处贵州西北部的云贵高原台地的斜坡过渡区, 是中国冰雹分布“一区两带”中的一带, 又是云贵准静止锋和西南涡的多发地, 春夏两季适宜的 0 °C 层离地高度十分有利于冰雹的形成。当地冰雹云具有生成发展迅速、降雹频次较高和防范难度较大等特点, 给种植马铃薯、荞麦和烟叶等农作物、经济作

收稿日期: 2023-04-24

基金项目:国家自然科学基金资助项目(41875169); 第二次青藏高原综合科学考察研究资助项目(2019QZKK0104); 贵州省科技计划资助项目黔科合支撑[2023]一般 193、[2022]206 号; 四川省科技计划资助项目(2022YFS0545); 云南省科技计划资助项目(202203AC100006)

通信作者:周筠珺. E-mail: Zhouyj@cuit.edu.cn

物为主的当地带来严重的经济损失^[21]。故本文利用 X 波段双偏振雷达数据,对贵州威宁一次典型单体雹暴防雷作业前后雹云宏观、微物理特征进行研究,为当地的人工防雷作业提供更多依据。

1 数据与方法

1.1 数据处理及粒子识别方法的构建

本文使用的数据有威宁县雪山站 (104.08 °E, 27.05 °N) X 波段双线偏振天气雷达 (YLD1-D) 资料,其径向数据包括水平反射率因子 (Z_H)、多普勒速度 (V)、谱宽 (W)、差分反射率 (Z_{DR})、差分传播相移 (Φ_{DP})、差分传播相移率 (K_{DP}) 和相关系数 (ρ_{HV})。雷达数据时间为体扫开始时间,代表时间段为 6 min 左右的探测资料。欧洲中期天气预报中心 EAR50. 25°×0. 25° 分辨率再分析数据,气象站探空数据、威宁县人工影响天气作业信息和地面降水记录。

在雷达数据质量控制上,首先对 Φ_{DP} 进行退折叠处理,退折叠后再使用综合小波去噪方案^[22] 进行滤波。然后用最小二乘拟合方法用质量控制后的 Φ_{DP} 计算 K_{DP} ,对 Z_H 和 Z_{DR} 采用自适应约束算法 (SC-WC)^[23-24] 进行衰减订正。对雹云内水成物粒子的识别,采用基于双偏振参量 Z_H 、 Z_{DR} 、 K_{DP} 、 ρ_{HV} 和环境温度参量 (T) 构建的 X 波段水成物粒子识别方法 (HID)^[25-26],该方法可识别的水成物粒子类别有毛毛雨 (DZ)、雨滴 (RN)、冰晶聚合物 (AG)、冰晶 (CR)、高密度霰 (HDG)、低密度霰 (LDG) 以及雨夹雹 (RH) 7 类。对于可产生冰雹的对流风暴,由于液滴的非瞬态冻结特性^[27],0 °C 层以上仍然存在液态雨滴。所以本方法将位于 0 °C 层以上的 RN 定义为过冷水 (SWA)。此外,为避免环境温度 T 对粒子相态的错误分类,对于融化层以上的局部混合相区中 RN 的识别主要基于 ρ_{HV} 。此举可以使融化层以上的 SWA 被正确识别,以验证雹云发展过程中云内是否存在 SWA 的蓄积区以及人工引入冰核后雹云内 SWA 的变化。

1.2 分析方法

对单体雹云防雷作业后云宏、微观响应特征的分析基于物理检验法,该方法通常通过对比作业后两个结构相似雹云 (作业雹云和未作业雹云) 的物理变化特征来证明作业的有效性^[16,18,28-29]。但不同雹云内部的微观物理特征本身就存在较大的差异,从而影响分析结果的可信度。因此本文对播撒效应的探究基于对同一个雹云作业前后的云宏、微观特征的分析。同时由于雹云本身会随着时间发生自然变化,所以将雹云可能由于播撒而发生的变化与雹暴的自然演变完全分开是不可行的^[30]。为尽可能地在雹云自然变化的基础上观察到播撒效应,在空间上,根据特定时间段催化剂的扩散模式在播撒雹云中划分出 3 个对比区域,分别为核心播撒区 (播撒发生的区域)、播撒区 (人工播撒剂扩散的区域) 和外围区域 (未受人工播撒剂影响或影响轻微的区域),分别定义为 C0、C1 和 C2。在时间上,将播撒时间、播撒后第一个体扫、第二个体扫和后续体扫时间分别定义为 $T0$ 、 $T1a$ 、 $T1b$ 和 $T2$ 。其中, $T1a$ 和 $T1b$ 均为核心催化时段,记作 $T1$ 。在此基础上通过雹云各区域和各时段之间雷达宏微观参量和水成物变化特征的对比分析,来为播撒效应寻求物理证据。

2 雹云作业前天气背景及回波特征

2.1 天气背景分析

2019 年 6 月 14 日 16 时 (北京时) 500 hPa (图 1a) 上中国西南部存在短波槽,内蒙古及陕西一带为高压脊,威宁县位于槽前脊后的偏西气流中。低层 700 hPa (图 1b) 上位于高原低涡南部的西南气流辐合区。从剖面图也可以看出,威宁东部为水汽的辐合中心 (图 2a),对应着正涡度上升运动区 (图 2b)。威宁探空资料显示,威宁上空 700 hPa 为湿层,中高层干冷,700 hPa 与 500 hPa 温差为 15.9 °C,0 ~ 6 km 存在风向的切变。上干冷下暖湿的不稳定层结和较强的风垂直切变,有利于对流天气的发生,本次雹暴为高空槽前暖气团内局地热雷雨雹暴。

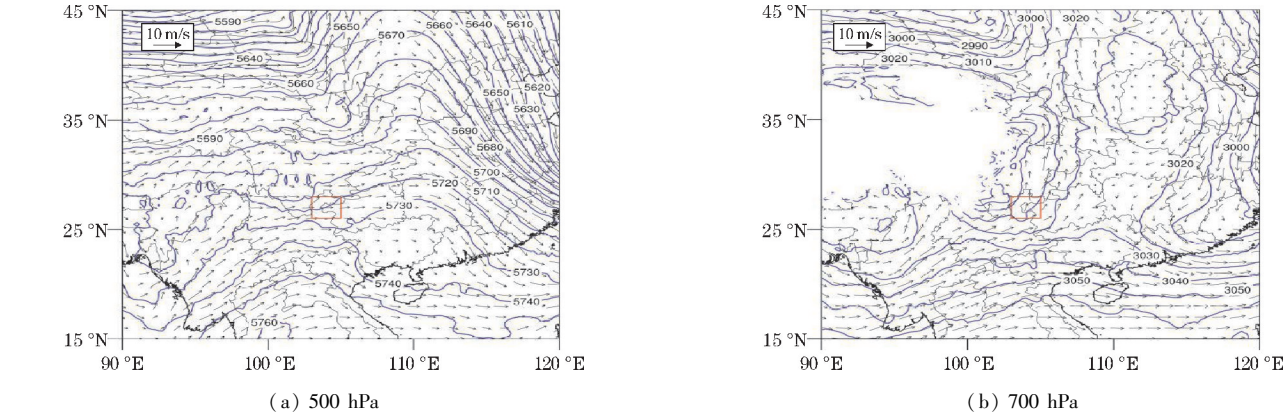


图 1 2019 年 6 月 14 日 16:00 等高线、风向图 (空白区海拔高度大于 3 km,威宁位于红框内)

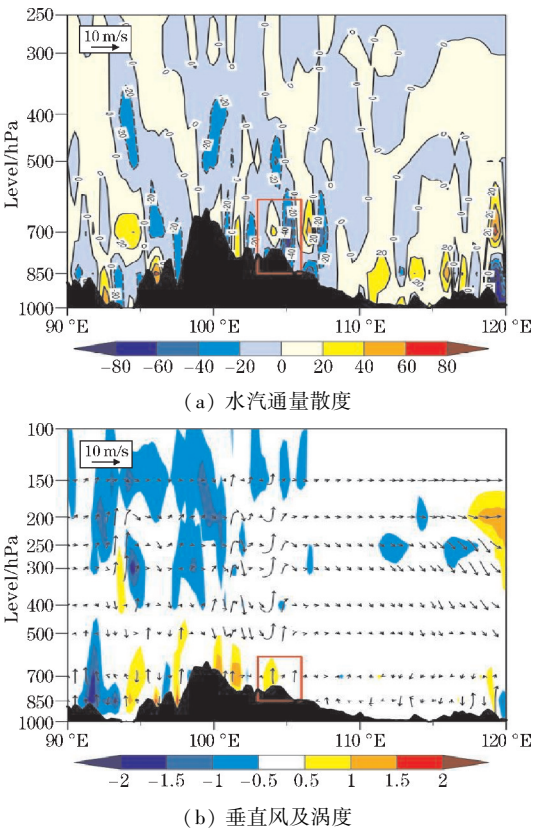


图2 2019年6月14日16:00水汽通量散度、垂直风及涡度剖面(剖面沿27°N,威宁位于红框内)

2.2 回波特征分析

个例为单体雹云,为便于描述,将作业单体记为CELL。CELL作业前距离YLD1-D雷达约23 km,为了解冰雹形成、生长区域的宏微观物理特征,分析时选用10°仰角的探测资料。探测资料显示,CELL的初始回波出现在-5℃层附近,随着雹云发展回波逐渐接地(图略)。雹云的初始回波出现的位置较低,从出现初始回波到雷达探测到强回波的过程较短,雹云发展迅速。17:08时,CELL回波呈团状,且存在一个明显的强回波中心,最强回波 $Z_H \geq 55$ dBZ。RHI上回波顶高延伸至-20℃层以上,强回波($Z_H \geq 45$ dBZ)尚未接地,位于-5℃层附近。雷达双偏振特征显示,雹云水平反射率高值区 $Z_H \geq 50$ dBZ,该区域对应的 Z_{DR} 值主要在-0.5~3.5 dB, $K_{DP} < 0.5$ °/km, ρ_{HV} 值在0.60~0.92。雹云冰雹生长区对应的 Z_{DR} 值较大, ρ_{HV} 值较小,生长区内过冷水含量较高,多为雨雹混合物,高密度霰粒子较多。

3 防雹作业设计

CELL回波偏振特征表明,其冰雹生长区内主要为过冷雨滴和霰粒子,这与黄海迅等^[31]的观测结果一致,即单体风暴中雹胚的主要来源为高密度霰。对于此类由过冷雨滴或霰粒子形成冰雹的雹云,向云中引

入竞争胚胎的防雹概念较为适用^[32]。由于现阶段无法有效地消除雹胚,霰和雹粒子尺寸的增长又主要发生在其生长阶段最后几分钟所在的过冷水累积区内,所以大部分防雹作业的实施以消除云内的过冷水为理论基础,以减少对雹粒子的过冷水供应^[32]。而对于生成发展较快的单体雹云,则可以在过冷水蓄积区内直接引入人工冰核^[6]。人工播剂在过冷水蓄积区可以刺激过冷雨滴的冻结,这些冰粒子在进一步生长后可作为人工雹胚,与自然胚胎“竞争”以消耗云内的过冷雨滴。处于发展阶段单体中的上升气流通常较弱,人工冰核有足够的时间在蓄积区影响冰雹胚胎的生长。

由于自然冰雹的形成周期约为15 min^[33],AgI催化剂入云5 min左右90%的核可以完成核化,人工冰核在10 min内可生长至与自然雹胚尺度相当的胚粒子^[34],所以在分析人工冰核对云内冰雹生长微物理过程的影响时选用人工冰核入云后约15 min内的雷达参量值。根据作业前单体雹云雷达回波特征,本次作业目标区对应的高度主要为3~5 km,作业方向、仰角和用弹量如表1所示,作业时火箭在云内的水平和垂直播撒轨迹示意图如图3所示。根据播撒轨迹和火箭播撒时催化剂在冰雹云中扩散规律的模拟结果^[35],CELL中C0、C1和C2这3个区域无重合部分,即C1和C2为空心方环形。C0、C1及C2水平方向的长和宽分别为1.5 km、3 km及6 km,垂直高度分别为2 km、3 km及4 km。在对CELL的分析中, T_0 、 T_{1a} 、 T_{1b} 和 T_2 分别为17:11-17:12、17:08-17:14、17:14-17:20和17:20-17:39。

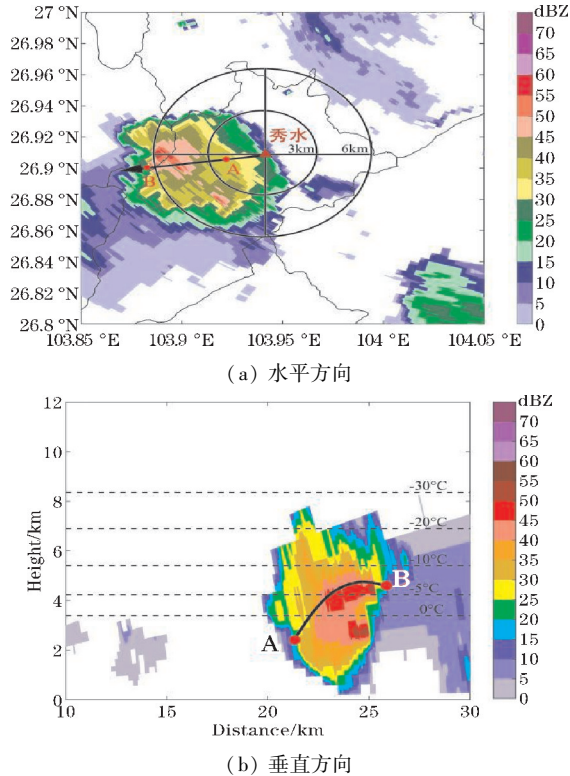


图3 CELL作业火箭水平和垂直方向轨迹示意图(黑色圈为火箭平均有效射界,黑色箭头为火箭发射方位,A、B点为催化剂播撒起止位置)

表1 CELL人工防雷作业信息

作业站点	作业时间	作业工具	作业仰角	作业方位	用弹量
秀水	17:11-17:12	WR-98 火箭	50°	259	2枚

4 雹云作业后宏微观物理响应特征

4.1 作业后回波宏观变化特征

作业前 CELL 回波顶高发展至 7.8 km, $Z_H \geq 45$ dBZ 的强回波中心位于 0℃ 层以上,雹云处于发展

的早期阶段,强回波尚未接地。秀水炮站于 17:11 时对其开展防雷作业,作业后雹云 $Z_H \geq 55$ dBZ 的强回波消失, $Z_H \geq 30$ dBZ 的回波面积增大,回波中心反射率减弱,回波逐渐分散(图 4)。作业一段时间后(17:27)CELL 的西北方出现新的初始回波,新单体于 17:39 发展成熟,17:52 后逐渐消亡,无降雹风险。

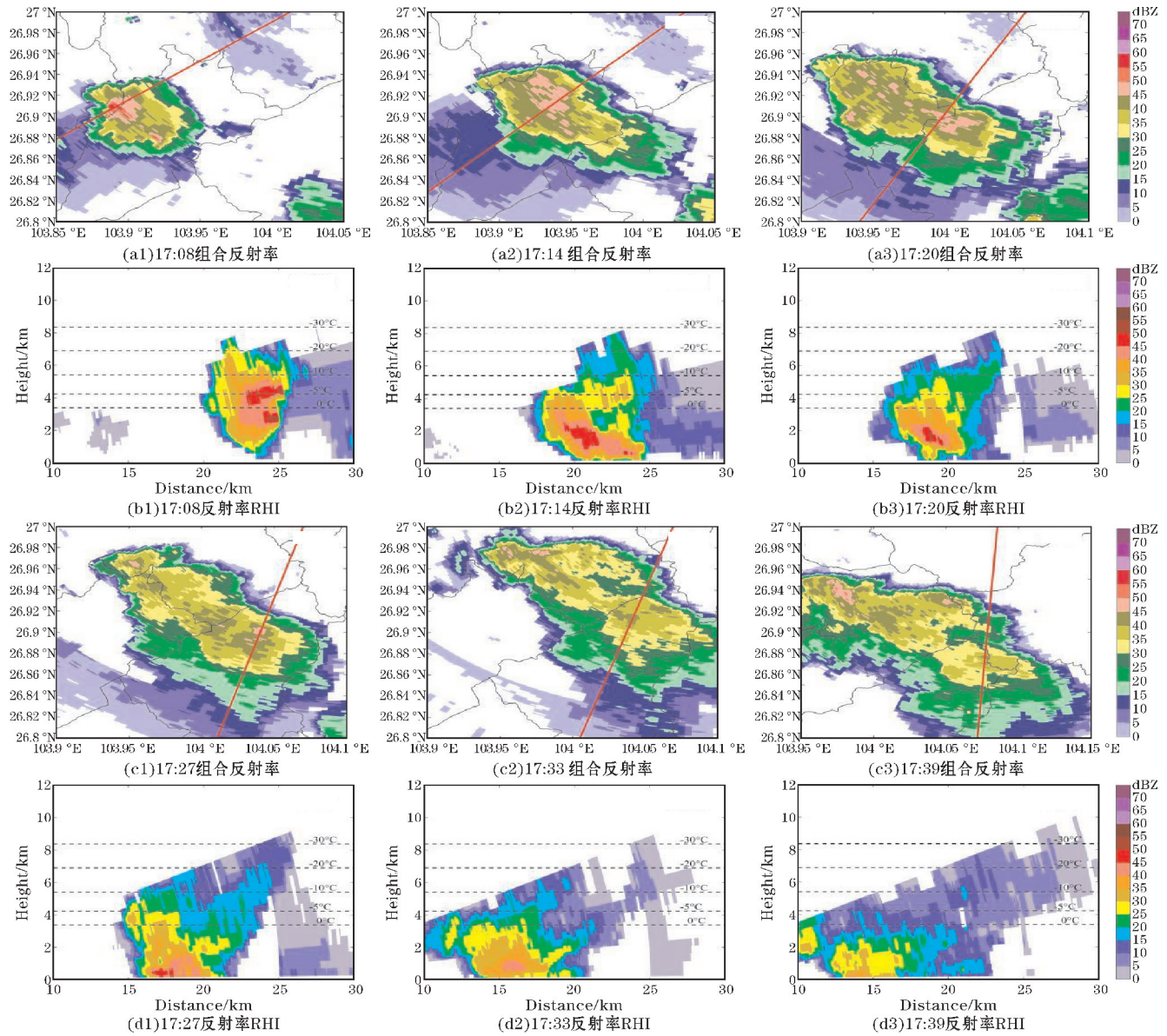


图4 CELL作业后组合反射率和 RHI 演变特征(红线为 RHI 方位)

如图 5 所示,在 $T1$ 时段,CELL $Z_H \geq 45$ dBZ 的回波高度(45ET)从 4.45 km 降低至 2.32 km,降低速率约为 $177 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ 。风暴高度($Z_H \geq 30$ dBZ, TOP)和回波顶高($Z_H \geq 18$ dBZ, ET)分别降低了 1.76 km 和 0.71 km,降低速率约为 $147 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ 和 $59 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$, TOP0 从 3.32 km 减小至 1.55 km。45ET 的降低速率在 $T1b$ 时段减小, TOP 在 $T1b$ 和 $T2$ 的早期阶段基本保持

不变。ET 在 $T1b$ 降低了约 1.04 km 后,在 $T2$ 早期阶段又有所升高。在 $T2$ 时段,45ET 的降低速率基本不变,约为 $121.8 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ 。ET 和 TOP 在 17:27 时后才开始明显降低,降低速率分别为 $174.4 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ 和 $158.1 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ 。上述结果表明,播撒后单体雹云不同反射率强度的回波在两个时段的降低速率明显不同。45ET 的快速降低发生在 $T1$ 时段,ET 和 TOP 的

降低主要在 $T2$ 时段,ET 和 TOP 在 $T1$ 和 $T2$ 的早期阶段有一段时间的高度维持。值得注意的是,单体雹云的 TOP 在 $T1a$ 时段有明显的降低,降低速率与 45ET 几乎一致,但在 $T1b$ 后降低速率减慢甚至略有升高。造成这种宏观变化差异的原因和播撒后单体雹云内的微物理变化,将通过对比播撒关键区偏振特征和粒子识别结果的分析来进一步探究。

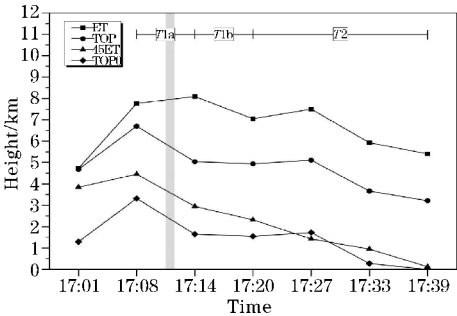


图 5 CELL 作业前后回波高度演变特征(阴影区域表示播撒时间)

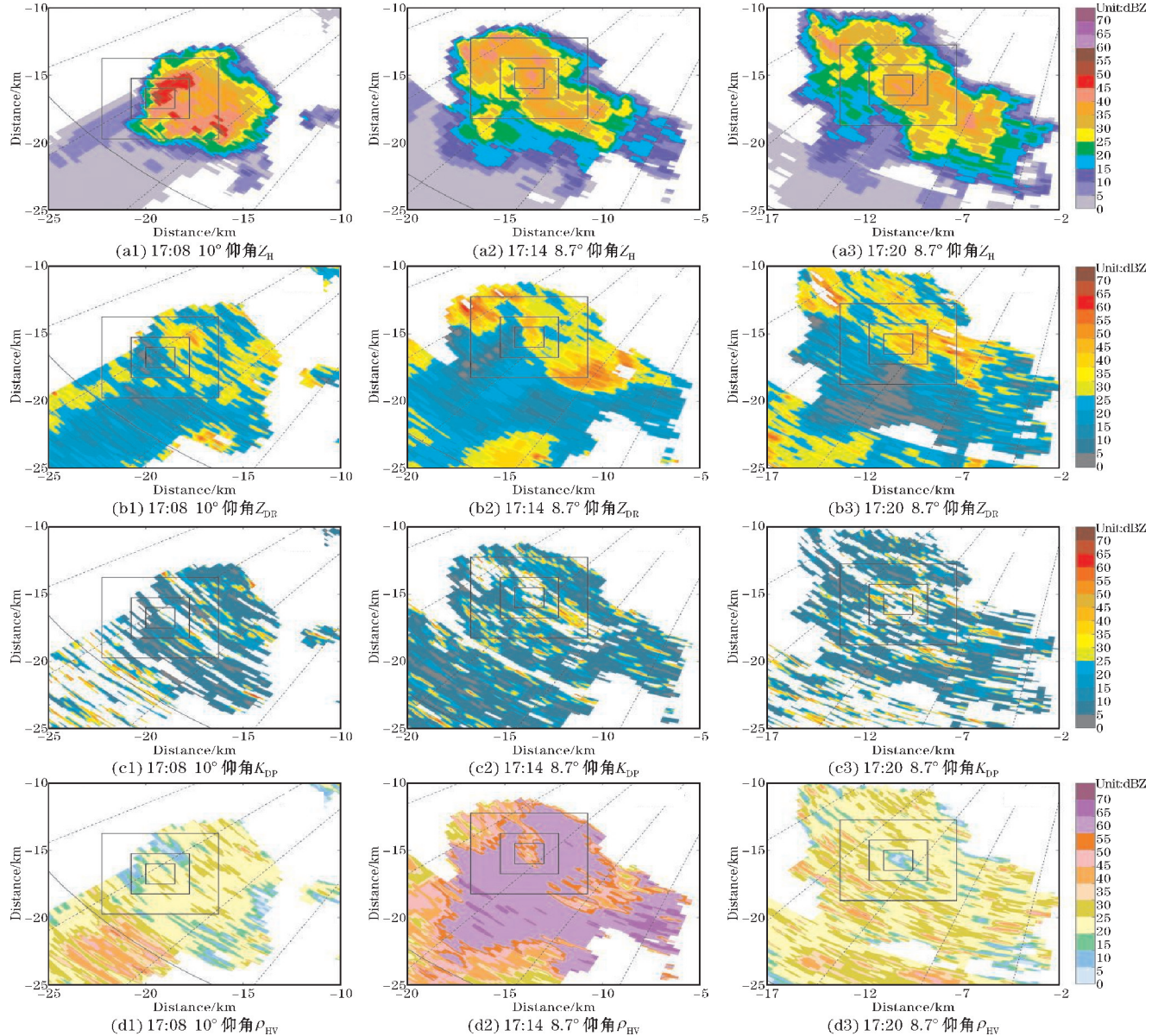


图 6 CELL $T1$ 时段各仰角水平偏振参数的演变特征(黑框表示 C0、C1 和 C2)

4.2 作业后回波偏振变化特征

为展示 CELL 播撒前后冰雹形成区偏振特征的变化,根据雹云与雷达之间距离的变化和雹云质心的降低分别选择 10° 、 8.7° 仰角的观测资料。在 $T1a$ 时段, 8.7° 仰角上 Z_H 最大值与上一时次相比明显减小, Z_H 大值区对应的 Z_{DR} 值和 K_{DP} 值增大, ρ_{HV} 值也增大至 $0.94 \sim 0.99$ (图 6)。如图 7 所示,在 $T1a$ 时段, C0 的 Z_H 平均值和最大值均大幅度减小, C1 和 C2 的 Z_H 最大值也显著减小,但其 Z_H 平均值有小幅度的增加。3 个区域的 Z_{DR} 平均值均增加,其中 C0 的增幅最大。 K_{DP} 和 ρ_{HV} 平均值也呈现增加趋势, C0 和 C1 的增幅更为相近。在 $T1a$ 时段, C0 中偏振参数的变化相较于其他两个区域更为明显。

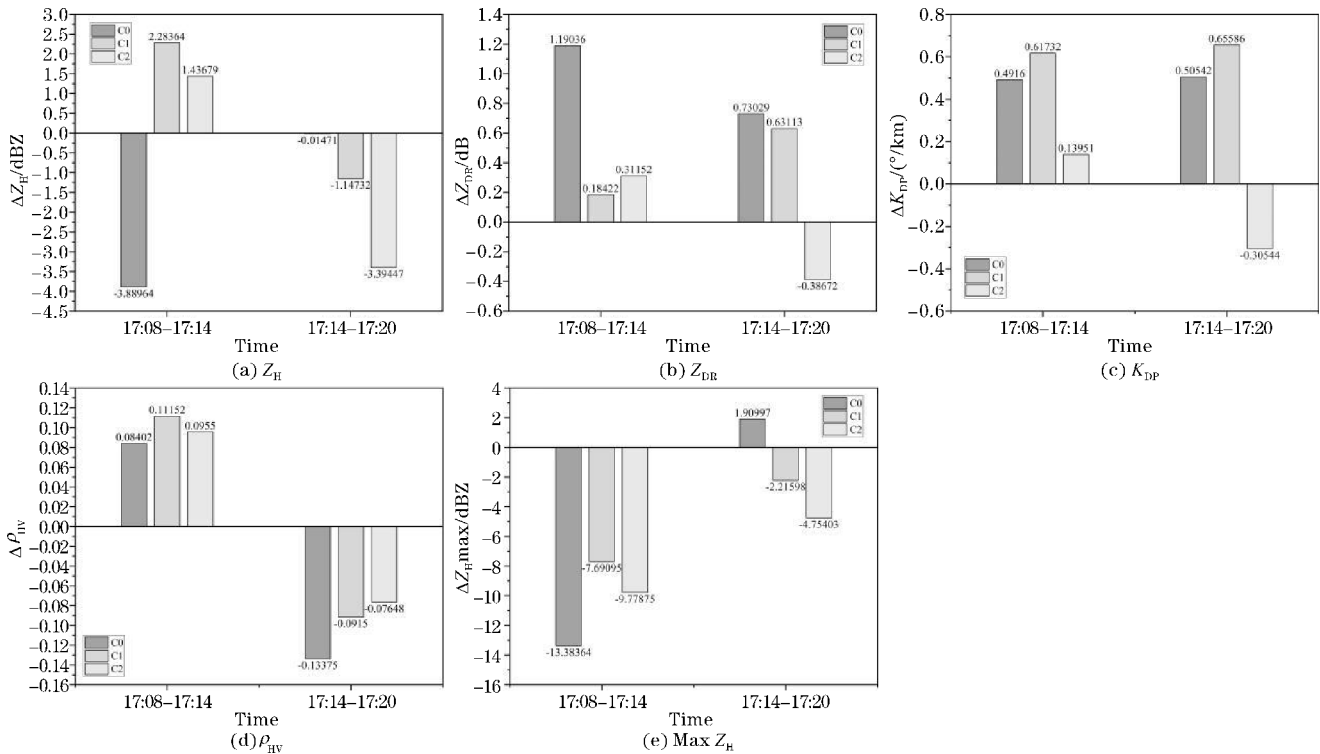


图 7 CELL C0、C1 和 C2 T1 时段偏振参量平均值演变特征

在 T1b 时段,由于電云朝向雷达移动,所以对该时段偏振特征的分析仍选用 8.7° 仰角的观测资料。 8.7° 仰角上 CELL 强回波面积进一步减小,回波更加分散。播撒区内 Z_{DR} 和 K_{DP} 值继续增大, ρ_{HV} 值减小。图 7 显示,3 个区域内的 Z_H 平均值均减小, Z_H 最大值在 C1 和 C2 中减小,在 C0 中略微增大。 Z_{DR} 和 K_{DP} 平均值在 C0 与 C1 中进一步增大,在 C2 中减小。3 个区域内 ρ_{HV} 平均值均开始减小,其中 C0 减幅最大。T1b 时段,C0 和 C1 偏振参量的变化趋势更为相似。3 个区域中 Z_H 最大值的减小在 T1a 时段比 T1b 时段更加显著。

单体電云 C0 中 Z_H 最大值、 Z_H 平均值的减小和 Z_{DR} 平均值的增加在 T1a 时段更为明显。火箭飞行和焰条燃烧对電云上升气流核心区的干扰较为明显,具有高反射率的大尺寸冰相粒子快速下落。原位置主要为小冰雹、过冷雨滴和霰,导致偏振特征表现为 Z_{DR} 、 K_{DP} 和 ρ_{HV} 平均值的增加。AgI 核化后刺激过冷云滴和雨滴发生冻结生成更多冰晶,部分冰晶增长形成聚合物和霰粒子。T1b 时段 Z_{DR} 和 K_{DP} 平均值的进一步增加, ρ_{HV} 平均值的减小。此时電云上部主要为冰晶、聚合物和小尺寸的霰粒子。

4.3 作业后云内水成物粒子变化特征

对整个播撒区和整块電云水成物粒子的统计分析

中,为展示播撒前后各类水成物主导距离库数量的变化,在電云对流中心选取尺寸与 C1 (包含 C0) 相同的区域作为 17:01 时和 17:27 时的统计区域。

作业开始时,電云偏振参量探测结果显示 (图 8b1、c1 和 d1),柱状的 Z_{DR} 大值区伸展至 $0^{\circ}C$ 层以上,電云中有明显的 Z_{DR} 柱^[36-38]。 Z_{DR} 柱附近存在 Z_{DR} 低值区。電云冰雹生长区对应着 Z_{DR} 低值区和部分 Z_{DR} 高值区,同时具有较高的 K_{DP} 值的和较低的 ρ_{HV} 值,说明此处的水成物为混合相态。HID 结果显示 (图 8a1),此处主要为 RH、HDG 和 SWA,SWA 对应着 Z_{DR} 柱,位于上升气流中部。AG 主要分布在上升气流边缘区,分布高度约为 3~6 km,LDG 位于電云上部。冰雹形成区中的 RH 和 HDG 对应着反射率 RHI 上 $Z_H \geq 45$ dBZ 的强回波。在 T1a 时段,電云 Z_{DR} 柱明显减弱,冰雹粒子在下落融化过程中外包水膜, $0^{\circ}C$ 层以下 K_{DP} 值增大,出现 K_{DP} 柱^[39], K_{DP} 柱中主要为大量中小雨滴和融化冰相粒子的混合物, ρ_{HV} 值较小 (图 8b2、c2 和 d2)。HID 结果也表明 (图 8a2),RH 从 5 km 下落至 $0^{\circ}C$ 层以下,播撒区中的 LDG、HDG 和 SWA 显著减少。在 T1b 时段, Z_{DR} 柱消失, $0^{\circ}C$ 层以下 K_{DP} 值减小, ρ_{HV} 低值区减小,電云 $0^{\circ}C$ 以下主要为雨。HID 结果上 RH 基本消失,LDG 和 SWA 进一步减少,AG 和 HDG 增多。

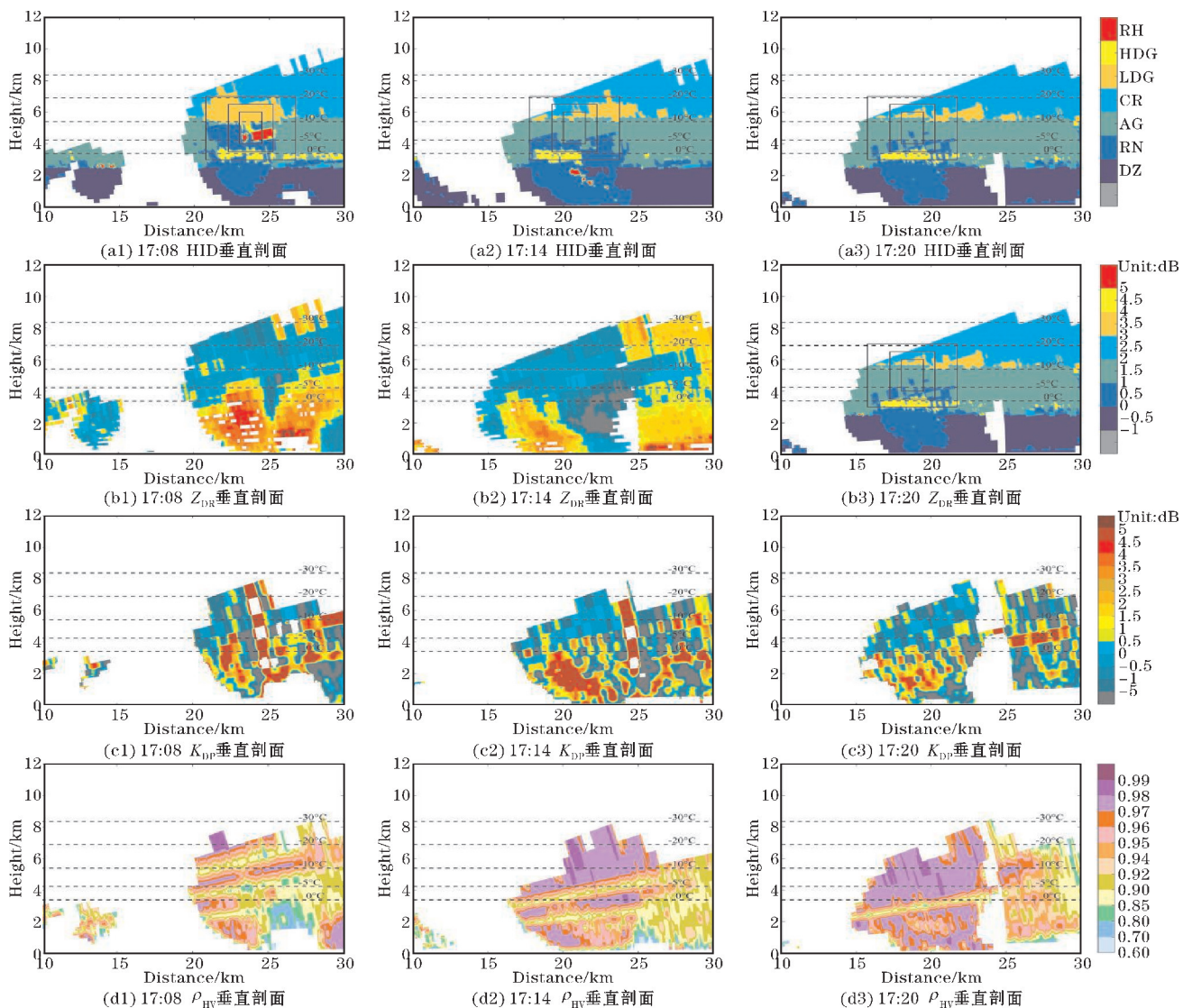


图 8 CELL T1 时段 HID 结果、 Z_{DR} 、 K_{DP} 及 ρ_{HV} 垂直剖面 (黑框表示 C0、C1 和 C2)

图 9 展示了在 T1 和 T2 早期时段 C0、C1 和 C2 中各水成物主导距离库数量的变化。如图 9(a) 所示,在 T1a 时段,C0 中的 RH、SWA、LDG 和 HDG 均快速减少,AG 和 CR 增多。在 T1b 时段,SWA 和 LDG 略微增多,AG 继续增多,CR 减少。在 T2 的早期阶段,SWA 和 LDG 继续增多,AG 开始减少,CR 基本保持不变。C0 中水成物粒子的数量在 T1a 时段变化较大。如图 9(b) 所示,在 T1a 时段,C1 中 RH、SWA、LDG 和 HDG 均减少,AG 和 CR 增多。RH、SWA、HDG 的减少幅度和 AG 的增多幅度小于 C0,LDG 和 CR 的变化幅度大于 C0。在

T1b 时段,SWA 和 LDG 进一步减少,AG 和 CR 的增多速率减慢。在 T2 的早期阶段,SWA 的减少速率减慢,LDG 开始增多,HDG 和 CR 减少,AG 继续增多。如图 9(c) 所示,在 T1a 时段,C2 中 SWA 数量变化与 C0 和 C1 相反,为增多。LDG 的减少幅度大于 C0 和 C1,AG 和 CR 的增多幅度小于 C0 和 C1。在 T1b 时段,SWA 和 LDG 大幅度减少,AG 大幅度增多。在 T2 的早期时段,SWA、LDG、HDG 和 CR 均减少,AG 继续增多。C0 和 C1 中水成物粒子数量的变化主要发生在 T1a 时段,C2 中的数量变化主要发生在 T1b 和 T2 的早期时段。

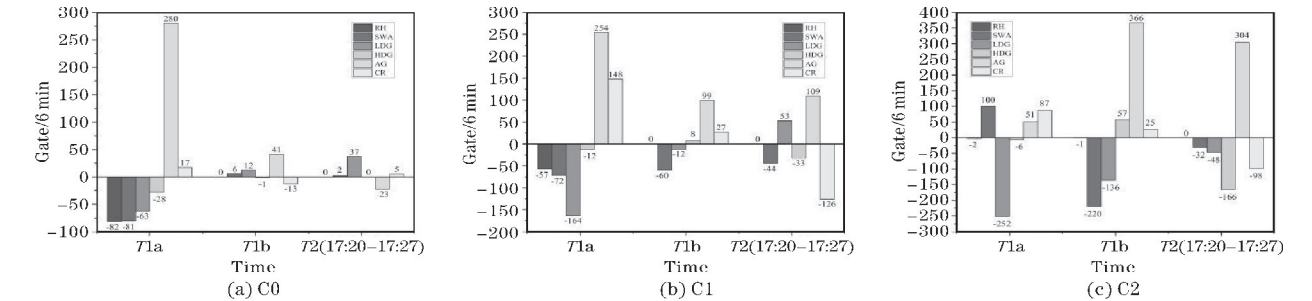


图 9 CELL T1 和 T2 早期时段各区域中水成物主导距离库数量的变化

上述结果表明,单体雹云 C0 和 C1 中水成物粒子响应变化较快,与冰雹形成相关的雹胚和过冷水的减少主要发生在 T1a 时段。在 T1b 和 T2 的早期时段,C1 和 C2 中水成物粒子的数量变化趋势比较一致。C0 和 C1 位于雹云上升气流核心区,作业一定程度上干扰了上升气流的发展,造成具有较大尺寸的 RH、HDG 和 LDG 快速下落,对应于 C0 中 Z_H 最大值和平均值在 T1a 时段的快速减小。由于单体雹云冰雹生长区内的 SWA 含量较高,人工冰核在该区域生长的十分迅速,生成了大量的 AG。在 T1b 时段,随着人工播剂的扩散,C1 中 SWA 进一步减少,AG 和 CR 增多,C2 中 SWA 开始减少,AG 快速增多。在 T2 的早期时段,随着人工冰核的耗尽,SWA 的消耗速率减慢,AG 继续增多,CR 开始被消耗。在播撒后期,随着云内粒子的进一步增长,大量降水粒子的沉降和蒸发冷却减弱上升气流,地面观测到降雨。降雨使云内的总含水量降低、潜热得到释放,雹云缺乏足够的过冷水和能量,最终消亡。HID 结果还表明,T1a 时段大尺寸冰相粒子的快速下落,导致宏观上 $Z_H \geq 30$ dBZ 和 45 dBZ 的回波高度快速降低。T1b 时段,由于冰晶消耗过冷水快速增长生成了大量聚合物,使 $Z_H \geq 30$ dBZ 的回波高度和回波顶高维持在较高高度。

图 10 是单体整块雹云和播撒区域(C0 和 C1)作业

前后各水成物主导距离库数量的变化对比。在 T1 时段,C0 和 C1 中 RH、SWA、LDG 和 HDG 主导距离库的数量分别减少 100%、41.7%、36.6% 和 1.7%,减少速率约为 $54 \text{ gate} \cdot \text{min}^{-1}$ 、 $89.2 \text{ gate} \cdot \text{min}^{-1}$ 、 $86.7 \text{ gate} \cdot \text{min}^{-1}$ 和 $0.3 \text{ gate} \cdot \text{min}^{-1}$ 。AG 和 CR 主导距离库的数量分别增加 392.7% 和 133.7%,增加速率约为 $283.8 \text{ gate} \cdot \text{min}^{-1}$ 和 $91.3 \text{ gate} \cdot \text{min}^{-1}$ 。整块雹云水成物粒子数量的变化趋势与播撒区大致相同,但在 T1a 时段播撒区内水成物粒子变化幅度明显大于整块雹云。尤其是 T1a 时段播撒区内 SWA 的减少速率和 AG 的增加速率都明显大于整块雹云。此外,与播撒区域中水成物粒子变化不同的是,在 T1 时段整块雹云中 CR 的数量呈现减少的趋势,而播撒区中 CR 的数量则是快速增多。整块雹云中 CR 的减少是由于其在雹云高层撞冻过冷水进一步生长为 AG 和 LDG。而播撒区中 CR 的增多说明人工播撒生成大量的 CR 超过了自然 CR 的消耗速率。由于云内过冷水含量较高,HDG 的数量在作业前后几乎保持不变,AG 和 LDG 不断依附增长为 HDG,在 T2 时段随着上升气流的减弱,HDG 融化下落才造成雹云内 HDG 数量的快速减少。播撒区与整块雹云中水成物数量变化速率和趋势的不同,也一定程度上说明引入人工冰核给单体雹云云内微物理过程造成了一定的影响,证明播撒的有效性。

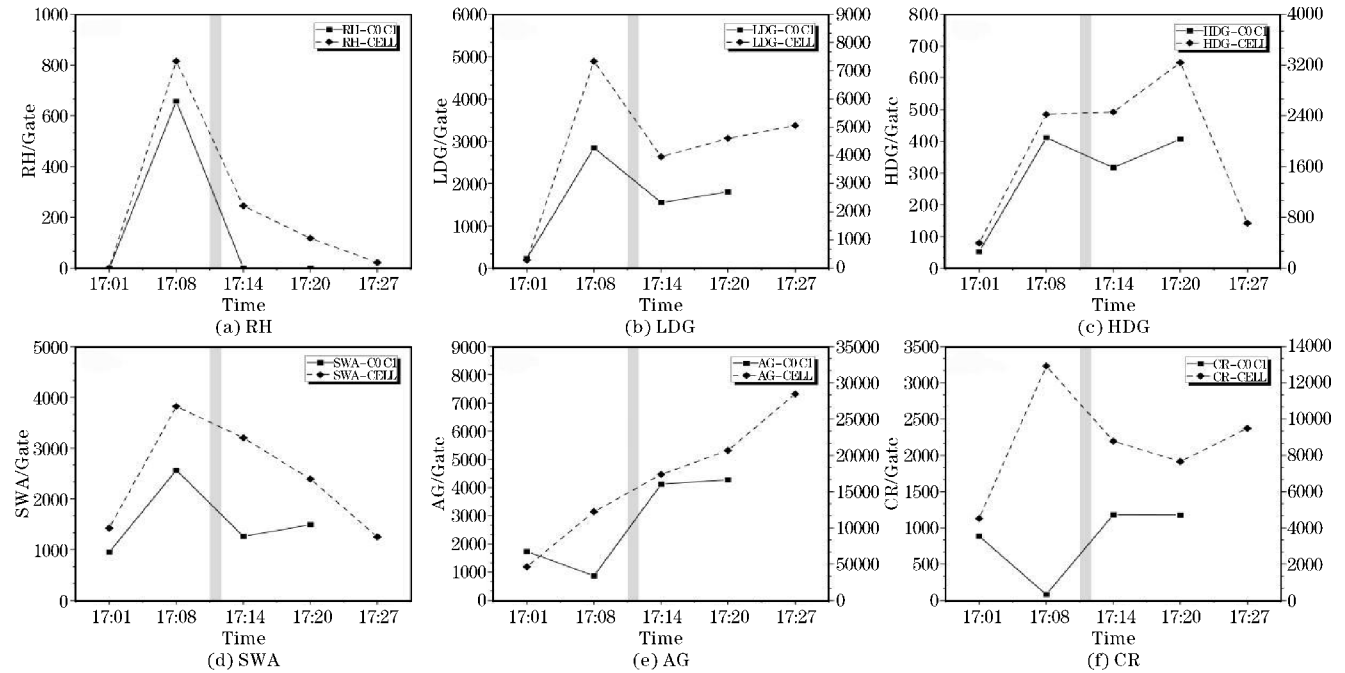


图 10 CELL 播撒前后各水成物主导距离库数量的变化(实线对应左轴,虚线对应右轴,阴影区域表示播撒时间)

5 结束语

利用 X 波段双偏振雷达探测数据和 HID 方法对 2019 年 6 月 14 日的一次单体雹暴作业后雹云的演变

过程进行分析。通过分析播撒前后雹云催化程度不同的各区域和各时段之间的宏观和微物理特征,得到以下结论:

(1)作业前雹云处于发展的早期阶段,单体回波顶高发展至 7.8 km 附近,强回波 ($Z_H \geq 45$ dBZ) 尚未接

地,位于 $-5\text{ }^{\circ}\text{C}\sim-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 层。冰雹形成区 $Z_{\text{H}}\geq 45\text{ dBZ}$, Z_{DR} 值主要在 $-0.5\sim 3.5\text{ dB}$, $K_{\text{DP}}<0.5\text{ }^{\circ}/\text{km}$, ρ_{HV} 值介于 $0.60\sim 0.92$ 。单体雹云冰雹形成区 Z_{DR} 值较大,区域内过冷雨滴含量较高,主要为雨雹混合区,单体雹云的冰雹生长机制符合“累积带”理论。

(2)作业后,单体雹云宏观上强反射率的减小和强回波高度(45ET)的降低主要发生在播撒时段(T_1),回波顶高(ET)和风暴高度(TOP)的降低主要发生在后续时段(T_2)。微观上,播撒区域(C0和C1)中冰雹粒子、过冷水明显减少,聚合物和冰晶增多。由于冰雹生长区内过冷水含量较高,播撒后人工雹胚(冰晶和冻滴)生长速率较快,与自然雹胚进行“利益竞争”生成更多的聚合物。对于云内含有大量过冷水,雹胚来源主要为高密度霰单体雹云来说,防雹作业的主要理论为“利益竞争”和“早期降雨”。

参考文献:

- [1] Heymsfield A J, Jameson A R, Frank H W. Hail growth mechanisms in a Colorado storm: Part II: Hail formation processes [J]. *Journal of Atmospheric Sciences*, 1980, 37(8): 1779–1807.
- [2] WMO Meeting of experts to review the present status of hail suppression [G]. WMO/TD-NO, 1995: 746.
- [3] 黄美元, 徐华英, 周玲. 中国人工防雹四十年 [J]. *气候与环境研究*, 2000, 5(3): 318–328.
- [4] Fukuta N, Wakimizu K, Nishiyama K, et al. Large, unique radar echoes in a new, self-enhancing cloud seeding [J]. *Atmospheric Research*, 2000, 55(3): 271–273.
- [5] 许焕斌, 段英. 冰雹形成机制的研究并论人工雹胚与自然雹胚的“利益竞争”防雹假说 [J]. *大气科学*, 2001, 25(2): 277–288.
- [6] 姚展予, 屠琦, 安琳, 等. 冰雹形成过程及人工防雹研究综述 [J]. *气象学报*, 2022, 80(6): 835–863.
- [7] Makitov V S, Inyukhin V S, Kalov H M, et al. Radar research of hailstorm formation and development over the central part of Northern Caucasus (Russia). Organization and main results of the regional hail suppression projects [J]. *Natural Hazards*, 2017, 88: 253–272.
- [8] Schickedanz P T, Changnon Jr S A. The design and evaluation of hail suppression experiments. *Monthly Weather Review*, 1970, 98(3): 242–251.
- [9] 李连银. 用雷达回波参量变化分析高炮人工防雹效果 [J]. *气象*, 1996, 22(9): 26–30.
- [10] 李培仁, 裴巨才, 孙鸿娉, 等. 一次强降雹天气过程的人工防雹作业 [J]. *气象*, 2002, 28(7): 29–32.
- [11] Gilbert D B, Boe B A, Krauss T W. Twenty seasons of airborne hail suppression in Alberta, Canada [J]. *Journal of Weather Modification*, 2016, 48: 68–92.
- [12] 宋明明. 鄂尔多斯市一次防雹过程物理效果检验 [J]. *现代农业科技*, 2019, 22: 145–146.
- [13] 刘昭武, 田世芹, 王凤娇, 等. 一次冰雹过程的对流单体识别与防雹效果分析 [J]. *气象与环境学报*, 2020, 36(3): 10–16.
- [14] Heinselman P L, Ryzhkov A V. Validation of polarimetric hail detection [J]. *Weather and forecasting*, 2006, 21(5): 839–850.
- [15] I Ventura J F, Honoré F, Tabary P. X-band polarimetric weather radar observations of a hailstorm [J]. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 2013, 30(9): 2143–2151.
- [16] 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): 479–488.
- [17] 曾勇, 文继芬, 李迪, 等. 基于双线偏振天气雷达的人工防雹作业效果分析 [J]. *科技创新与应用*, 2019, 30: 47–49.
- [18] 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.
- [19] 孙跃, 任刚, 孙鸿娉, 等. 一次高炮防雹的相控阵双偏振雷达观测特征 [J]. *应用气象学报*, 2023, 34(1): 65–77.
- [20] Browning K A, Atlas D. Some new approaches in hail suppression experiments [J]. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 1977, 16(4): 327–332.
- [21] 刘国强, 李勇, 李枚曼, 等. 贵州基层人工影响天气“威宁模式”探索与实践 [J]. *科技风*, 2020, 35: 131–132.
- [22] 赵川鸿, 周筠珺, 肖辉, 等. X波段双线偏振多普勒雷达共极化差分相移资料的滤波方法研究 [J]. *大气科学*, 2019, 43(2): 285–296.
- [23] Park S G, Bringi V N, Chandrasekar V, et al. Correction of radar reflectivity and differential reflectivity for rain attenuation at X band. Part I: Theoretical and empirical basis [J]. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 2005, 22(11): 1621–1632.
- [24] 毕永恒, 刘锦丽, 段树, 等. X波段双线偏振气象雷达反射率的衰减订正 [J]. *大气科学*, 2012, 36(3): 495–506.
- [25] Dolan B, Rutledge S A. A theory-based hydrometeor identification algorithm for X-band polarimetric radars [J]. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 2009, 26(10): 2071–2088.
- [26] Zhao C, Zhang Y, Zheng D, et al. An improved

- hydrometeor identification method for X-band dual-polarization radar and its application for one summer Hailstorm over Northern China [J]. Atmospheric research, 2020, 245: 105075.
- [27] Smith P L, Musil D J, Detwiler A G, et al. Observations of mixed-phase precipitation within a CaPE thunderstorm [J]. Journal of Applied Meteorology and Climatology, 1999, 38(2): 145–155.
- [28] Gilbert D B, Boe B A, Krauss T W. Twenty seasons of airborne hail suppression in Alberta, Canada [J]. Journal of Weather Modification, 2016, 48: 68–92.
- [29] Sioutas M. Hail characteristics and cloud seeding effect for hail suppression in Central Macedonia, Greece [C]. Perspectives on Atmospheric Sciences. Springer International Publishing, 2017: 271–277.
- [30] Rivera J A, Otero F, Naranjo Tamayo E, et al. Sixty years of hail suppression activities in Mendoza, Argentina: Uncertainties, gaps in knowledge and future perspectives [J]. Frontiers in Environmental Science, 2020, 8: 45.
- [31] 黄海迅, 周筠珺, 曾勇, 等. 基于 X 波段双线偏振雷达的贵州威宁雹胚演变特征研究 [J]. 大气科学, 2021, 45(3): 539–557.
- [32] Borland S W, Browning K A, Changnon S A, et al. Hail suppression concepts and seeding methods [J]. Hail: A Review of Hail Science and Hail Suppression, 1977, 6: 181–193.
- [33] 许焕斌, 段英, 吴志会. 防雹现状回顾和新防雹概念模型 [J]. 气象科技, 2000(4): 1–12.
- [34] 鄯大雄, 陈汝珍, 蒋耿旺, 等. 高效碘化银焰火剂及其成冰性能的研究 [J]. 气象学报, 1995(1): 82–90.
- [35] 周毓荃, 朱冰. 高炮、火箭和飞机催化扩散规律和作业设计的研究 [J]. 气象, 2014, 40(8): 965–980.
- [36] Kumjian M R, Ryzhkov A V. Polarimetric signatures in supercell thunderstorms [J]. Journal of applied meteorology and climatology, 2008, 47(7): 1940–1961.
- [37] Kumjian M R, Khain A P, Benmoshe N, et al. The anatomy and physics of Z_{DR} columns: Investigating a polarimetric radar signature with a spectral bin microphysical model [J]. Journal of Applied Meteorology and Climatology, 2014, 53(7): 1820–1843.
- [38] 潘佳文, 蒋璐璐, 魏鸣, 等. 一次强降水超级单体的双偏振雷达观测分析 [J]. 气象学报, 2020, 78(1): 86–100.
- [39] Loney M L, Zrnich D S, Straka J M, et al. Enhanced polarimetric radar signatures above the melting level in a supercell storm [J]. Journal of Applied Meteorology and Climatology, 2002, 41(12): 1179–1194.

Analysis of Macro and Micro Physical Response Characteristics of a Hail-suppression Operation Against an Unicellular Hailstorm in Weining

LU Yuan¹, ZHOU Yunjun^{1,2,3}, ZOU Shuping⁴, YANG Zhe⁴, ZENG Yong⁴

(1. Plateau Atmosphere and Environment Key Laboratory of Sichuan Province, College of Atmospheric Sciences, Chengdu University of Information Technology, Chengdu 610225, China; 2. Collaborative Innovation Center on Forecast and Evaluation of Meteorological Disasters (CIC-FEMD), Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China; 3. Chengdu Plain Urban Meteorology and Environment Observation and Research Station of Sichuan Province (PUMER), Chengdu University of Information Technology, Chengdu 610225, China; 4. The Weather Modification Office of Guizhou Province, Guiyang 550001, China)

Abstract: This study analyzed the macro and micro physical response characteristics of a unicellular hailstorm after seeding using X-band dual-polarization radar data and an X-pol hydrometeor identification (HID) algorithm. According to the diffusion of the seeding agents, a comparative analysis was conducted on the evolution of the seeded hailstorm in different regions and periods. The results are as follows: Before seeding, the polarization characteristics of the hail-forming region ($45 \text{ dBZ} \leq Z_H \leq 55 \text{ dBZ}$, $-0.5 \text{ dB} \leq Z_{DR} \leq 3.5 \text{ dB}$, $K_{DP} \leq 0.5 \text{ }^\circ/\text{km}$, $0.60 \leq \rho_{HV} \leq 0.92$) suggesting that this region was mainly composed of rain-hail mixture. The hailstones are surrounded by high-density graupel and abundant supercooled water. After seeding, the decrease in the reflectivity and the height of strong echo mainly occurred in the seeded period, while the decrease in the echo top and the height of the storm was mainly in the post-seeded period. In the seeded region, hailstones and supercooled water decreased significantly, aggregates and ice crystals increased, and high-density graupel did not change obviously. For hailstorms with a high content of supercooled droplets and the main hail embryo materials is high-density graupel, the key mechanisms of hail suppression are “beneficial competition” and “early rainout”.

Keywords: hail; hail suppression; effectiveness evaluation; dual-polarization radar