

五台山人工增雨微物理特征观测分析

周峰^{1, 2, 3} 胡姮²

1 山西省大气探测技术保障中心, 太原 030002

2 中国气象局气象探测中心, 北京 100081

3 中国气象局五台山云物理野外科学试验基地 太原 030002

提 要: 基于山西省五台山云物理试验基地 C 波段双偏振雷达数据和人工增雨作业数据, 采用模糊逻辑粒子相态识别算法, 对 2025 年 5 月 22 日一次混合降水过程中的地面火箭增雨作业进行全阶段微物理分析。结果表明: 播撒碘化银冰核 (AgI) 后, 通过异质核化形成冰晶核, 并通过贝吉龙过程及碰并过程促进冰相粒子的增长; 在增雨的主要影响阶段, 冰晶和湿雪粒子在数量变化中呈现反相关关系, 雪晶聚合物主要由冰晶碰并增长产生, 数量占比 38.9%, 成为主要冰相水成物; 高密度霰粒占比较低 (3.19%)。湿雪粒子主要源项为 0℃ 层上方的聚合物粒子, 生成区域位于 3.6~4.1 km 高度带, 且是零度层亮带的重要来源。基于 AgI 入云前后差异, 构建了三阶段云微物理演变概念模型: 过冷水累积区的 AgI 冰核介入—成冰与聚合增长—0℃ 层附近混合相过渡并形成雨滴粒子。

关键词: 人工增雨, 粒子相态识别, 云微物理, 双偏振, 五台山

Observation Analysis of the Microphysical Characteristics of Artificial Rain Enhancement in the Wutai Mountains

ZHOU Feng^{1, 2, 3} HU Heng²

1 Shanxi Atmospheric Sounding Technology Support Centre, Taiyuan 030002

2 CMA Meteorological Observation Centre, Beijing 100081

3 Cloud Physics Scientific Experiment Base in the Wutai Mountains, CMA, Taiyuan 030002

Abstract: Based on the C-band dual-polarization radar data from the Wutaishan Cloud Physics Experimental Base in Shanxi Province and the operational data of artificial rain enhancement, a fuzzy-logic hydrometeor classification algorithm is used in analyzing the full-stage microphysical characteristics of a ground-based rocket rain enhancement operation during a mixed precipitation event on 22 May 2025. The results show that after the seeding of silver iodide (AgI) ice nuclei, ice crystal nuclei formed through heterogeneous nucleation, and the growth of ice-phase particles was promoted through the Bergeron process and collision-coalescence process. During the main impact stage of cloud seeding, ice crystals and wet snow particles showed an inverse relationship in their number variations. Snow aggregate particles were mainly generated by the collisional growth of ice crystals, accounting for 38.9% of the total number and becoming the dominant ice-phase hydrometeors, while high-density graupel particles took up only 3.19%. Wet snow particles were mainly derived from aggregate particles above the 0℃ layer, and their generation zone was located in the altitude range of 3.6 km to 4.1 km. Moreover, they were also an important source of the bright band near the 0℃ layer. Finally, based on the difference before and after AgI entered the cloud, a three-stage conceptual model of cloud microphysical evolution is established,

山西省气象局科技项目 (SXKMSFW20256346)、西南区域人工影响天气能力建设项目—云贵高原人工防雹试验技术研究项目 (ZQC-24447)、安徽省自然科学基金资助项目 (2408055UQ001) 共同资助

第一作者: 周峰, 主要从事雷达气象探测、人工影响天气云微物理研究. Email: 864299959@qq.com

通讯作者: 胡姮, 主要从事雷达气象探测、地基导航卫星遥感水汽技术研究. Email: huheng83@163.com

including AgI ice nuclei seeded at the supercooled water accumulation zone (stage 1), ice formation and aggregation growth (stage 2), and mixed-phase transition near the 0°C layer with the formation of raindrop particles (stage 3).

Key words: rain enhancement, hydrometeor phase identification, cloud microphysics, dual-polarization radar, Wutai Mountains

引言

云微物理过程对降水的形成和演变至关重要。云内水汽的凝结、冰晶的生成与生长、粒子的碰并与沉降等过程决定了降水的类型、强度及其空间分布。精确分析降水成因、云结构演变及天气系统的动态变化已成为气象学领域的重要研究方向。近年来,随着气象雷达技术的进步,学界逐步揭示了云微物理过程对降水的影响机制(Zhao et al, 2019)。云微物理为人工影响天气提供了理论基础,二者密切相关(洪延超和雷恒池, 2012)。

在人工影响天气领域,影响云微物理过程至关重要。人工冰核(如碘化银)通过促进过冷水的冰晶化作用,加速降水形成。然而,人工影响天气的效果受多个因素影响,包括云的初始微物理状态、气象条件以及人工冰核的播撒位置与剂量等(Huang et al, 2008)。因此,精确监测云内微物理过程,尤其是过冷水层和冰晶层的变化,对优化人工影响天气作业至关重要。飞机观测研究也表明,催化作业前后云中过冷水区宏微观特征的变化可为人工增雨效果分析提供物理证据(董晓波等, 2025)。结合双偏振雷达的数据分析,许多研究探讨了如何通过观测云内水成物的变化,确定人工冰核投放的最佳时机和位置(Zheng et al, 2024; Wang et al, 2021)。

人工增雨作业作为实施频率较高且作业效益较好的人工影响天气手段之一(王飞等, 2025),其原理是通过地面火箭弹、高炮以及飞机播撒等方式将携带碘化银(AgI)的人工冰核投送至目标云区,在过冷水环境下促进冰晶生成,并通过淞附和碰并等过程增强冰相粒子的增长,进而促进降水形成。

著名的“炮响雨落”现象提出了爆炸影响云体内气流的设想。在山西昔阳的试验证明,利用高炮轰击云体后 1.5~2.0 min 便产生降雨,并发现云滴谱变宽且出现双峰结构(徐华英等, 1983a)。这一现象启发了后来的实验研究,认为爆炸可以影响中等强度对流云中的上升气流,并维持影响约 2~4 分钟(徐华英等, 1983b)。爆炸波扰动和减弱了云中上升气流,破坏降水粒子的下落末速与上升气流的平衡,造成“炮响雨落”“云体减弱、消散”“降雹减弱”等现象(黄美元等, 1979)。近年来相控阵雷达资料也进一步用于分析高炮作业对云体动力结构的影响,表明高时空分辨率雷达观测可为人工影响天气作业效应诊断提供重要依据(董亚宁等, 2023; 孙跃等, 2023)。

在人工增雨的研究中,云中的过冷水含量被认为是有效催化降水的关键条件,过冷积云的时空分布特征也直接关系到冷云催化作业潜力和作业区域选择(杨涛等, 2025)。研究表明,过冷水含量少的云也具备一定潜力,人工增雨的水分来源不仅包括水—冰的转化,还可

以通过汽—冰转化来实现（胡志晋等，1983）。胡志晋（2001）根据前续结果继续提出：人工冰晶通过贝吉龙过程使过冷云水转化为降水，此外，凝华潜热的释放可增温空气并加大局部升速，进而促进云降水发展。

天气雷达作为人工影响天气的重要探测工具，能够精细化捕捉层状云系及强对流云系的短临天气过程。然而，传统雷达的探测数据主要包括反射率因子、径向速度、速度谱宽等，无法有效探测云内粒子相态的演变。双偏振雷达（dual-polarization radar, DPR）作为一种先进的气象探测工具，能通过发射水平和垂直极化电磁波，提供更多偏振参数，如差分反射率因子（ 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} ）等。这些参数能够更精确地解析云微物理过程，揭示降水粒子的强度、形态及其空间分布，从而进一步区分不同水成物粒子的相态，如液态雨滴、湿雪、冰晶等(Thompson et al, 2014; Kumjian et al, 2022; 潘佳文等，2020)。通过对此类偏振参数的深入分析，能够识别降水粒子在不同高度层的分布，并进一步分析降水粒子的形成与演变过程，特别是在强对流天气中，双偏振雷达展现出极大的应用潜力。例如，Köcher et al (2022)总结了双偏振雷达在降水垂直结构中的应用，特别是在分析粒子“指纹特征”方面取得的进展。双偏振雷达不仅能揭示云微物理过程规律，还能分析人工影响天气作业后的微物理过程变化。Wen et al (2017)通过双偏振雷达和雨滴谱仪观测分析中国东部一次飑线过程的微物理结构，发现双偏振雷达能够有效识别云中不同粒子的相态和尺度分布，为人工影响天气作业提供重要的微物理参数。

研究表明，双偏振雷达的数据能够实时识别云内水成物粒子的变化特征，这对于分析人工影响天气作业的影响尤为重要。结合雷达数据与气象预报模式，研究人员可分析云中不同水成物粒子的演变及其对降水过程的影响，通过利用三维时变中尺度数值模式，模拟了碘化银粒子在入云后的云微物理变化过程，研究发现：在经过碘化银粒子的催化后，冰雪晶、霰雹等水成物粒子等出现了不等时间的提前量，同时降落到地面的冰液相粒子也有变化(Farley et al, 1994; 1997; 刘香娥等, 2021; Liu et al, 2025)。此外，Voormansik et al (2021)基于 C 波段双偏振雷达的数据，评估了其在降水量估算中的性能，显示了该技术在复杂天气条件下的精度和适应性。王致君和楚荣忠（2002）探讨了双偏振雷达在人工影响天气中的应用，介绍了双偏振雷达在识别云内水成物粒子、相态、密度以及微物理变化过程等方面的应用。陈羿辰等（2016）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。郑皎等（2022）利用 C 波段双偏振雷达分析了防雹作业前后云体宏观结构变化，发现作业区和非作业区的偏振量特征出现明显变化。

尽管已有研究对人工影响天气过程进行了分析，但多集中于作业的后期或某一特定阶段，从微物理层面系统刻画整个人影作业过程的研究仍然相对缺乏。基于此，本文采用双偏振雷达的偏振基数据，采用模糊逻辑粒子相态识别算法（hydrometeor identification, HID），对一次人工影响天气过程进行系统分析，重点关注增雨作业前后云体微物理过程的演变特征。此外，已有研究大多集中于平原及低海拔地区，缺乏对复杂山区地形和高海拔地区的分析。

为此，本文选取五台山云物理试验基地核心试验区——荷叶坪（海拔 2.754 km 的亚高山草甸）作为研究区域，并利用该地区的 C 波段双偏振雷达观测资料，以期为复杂地形条件下人工影响天气过程的微物理认识提供参考。本文的创新点主要包括：（1）系统刻画了整个人影作业全过程的云体微物理演变，而不仅局限于单一阶段；（2）利用双偏振雷达偏振基数据并结合HID算法，从水凝物粒子相态演变角度揭示人工影响天气过程中的微物理变化；（3）以复杂山区和高海拔环境为研究区域，拓展了人工影响天气微物理研究的应用场景。

1 数据来源及方法介绍

1.1 数据来源

本文所使用的双偏振雷达数据来自山西省五台山云物理试验基地，位于忻州市五寨县荷叶坪（图 1），采用 C 波段双偏振雷达（型号：CINRAD/CA-D），其中探测采集的双偏振雷达参量包括： Z_{DR} 、 φ_{DP} 、 K_{DP} 和 ρ_{HV} 等。该型双偏振雷达于 2020 年建成，并于 2024 年对其信号处理器进行了再次升级，更新后的雷达主要技术参数如下表 1 所示。探空资料来源于山西省观象台的 L 波段探空雷达。人工影响天气作业数据来自山西省人工影响天气中心的人影综合业务系统及相关县气象站的实况数据。

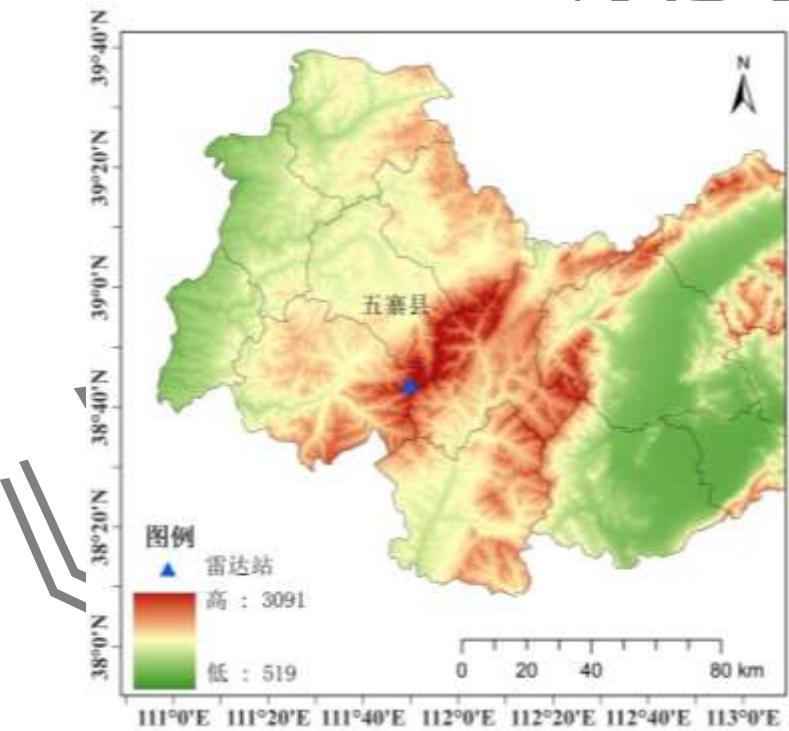


图 1 区域地形特征及雷达站位置

Fig. 1 Regional topographic features and the location of radar station

表 1 CINRAD/CA-D 雷达升级后主要系统参数

Table 1 Main system parameters of the upgraded CINRAD/CA-D radar

技术指标	参数	
天线增益/dB	水平:43.48	垂直:43.57

波束宽度/(°)	水平:0.979	垂直:0.949
天线直径/m	4.5	
天线馈源海拔高度/m	2797.76	
雷达波极化状态	水平	垂直
采样方式	PPI、RHI、VOL	
主要探测量	Z_H 、 Z_{DR} 、 ϕ_{DP} 、 K_{DP} 、 ρ_{HV} 、 V 、 W	
探测范围/km	0~460	
波长/cm	5.31	

1.2 研究方法流程

本文研究方法主要采用模糊逻辑粒子相态识别算法(HID),该方法最早是由 Zadeh(1968)提出。在 2009 年, Dolan et al 采用 T 矩阵函数驱动的模糊逻辑方法完成在 X 波段雷达粒子相态的识别,识别种类达到 7 种。由 Snyder et al (2010) 将模糊逻辑识别算法应用在 S 波段双偏振雷达中,并对雹暴粒子进行识别。Dolan et al (2013) 继续将该方法应用于 C 波段雷达的粒子相态识别过程,但使用了更符合自然约束的 β 函数作为隶属函数,并将相态识别种类扩展至 10 种。本文所使用的也是这种方法,由于该方法不依托偏振参量的某个具体阈值范围,能够较好地泛化多偏振参量在不同粒子相态下的阈值重叠问题,从而较好实现退模糊分类,方法实现一般包括三个步骤:即模糊化、集成聚合、退模糊。

1.2.1 雷达资料预处理与质量控制

在开展水凝物粒子相态识别之前,为保证雷达观测资料的可靠性,首先对原始雷达资料进行预处理与质量控制。主要包括:缺测值与异常值检查剔除、非气象回波区域的识别与剔除,从而保证参与后续分析的雷达回波为可信气象回波。在此基础上,选取可信气象回波区域内的反射率因子(Z_H)、 Z_{DR} 、 K_{DP} 、 ρ_{HV} 以及探空温度(T)等变量作为 HID 算法的输入参数。同时针对 C 波段雷达在降水条件下可能存在一定程度的信号衰减,对雷达回波资料进行了衰减订正评估。结果表明,在本研究个例中回波主体区域(≥ 20 dBZ)的平均订正量约为 0.2 dB,最大订正量小于 1 dB,说明衰减效应整体较弱,对回波结构及后续云微物理分析影响较小。

1.2.2 模糊化

模糊化是将输入的观测数据转换为各类别的隶属度,以表示其对每个类别的隶属程度,形成模糊基。本文在模糊化中选取的 β 隶属函数见式(1):

$$u(x) = \frac{1}{1 + \left[\left(\frac{x - m^2}{a} \right) \right]^b} \quad (1)$$

式中： $u(x)$ 为隶属函数表达式， x 为输入偏振参量及探空温度 T 参量， a 为宽度参数，值的大小反映该类粒子在对应变量上的有效取值范围， b 为陡度参数，值的大小决定隶属函数两侧下降的陡缓程度， m 为中心值，决定隶属函数峰值位置。表 2 为 10 类隶属函数参数表，包括：大雨滴、冰雹、高密度霰、低密度霰、垂直取向冰晶、湿雪、聚合物、冰晶、雨、毛毛雨。

表 2 隶属函数参数表
Table 2 Parameters of the membership functions

输入 参量	函数 参数	大雨滴	冰雹	高密度霰	低密度霰	垂直取向冰晶	湿雪	聚合物	冰晶	雨	毛毛雨
Z_H	a	8.5	14.3	1020	9.20	22	21.3	18.1	22	19	29
	b	10	10	6	8	20	10	10	20	10	10
	m	57.79	62.3	44.30	37	-3	24	-3.0	-3	39	1.75
Z_{DR}	a	1.90	0.56	1.20	0.90	0.90	0.90	1.1	2.7	2.20	0.46
	b	8	8	3	6	10	10	7	1	9	5
	m	4.40	0.14	1.60	0.90	-0.9	1.23	2.9	2.9	2.30	0.46
K_{DP}	a	3.30	3.5	1.90	0.08	0.75	0.43	0.30	0.08	5.5	0.03
	b	6	6	3	3	30	6	1	6	10	2
	m	3.40	0.60	1.90	0.10	-0.75	0.25	0.08	0.08	5.5	0.03
ρ_{HV}	a	0.03	0.10	0.04	0.025	0.022	0.2	0.07	0.025	0.025	0.018
	b	3	3	2	1	3	10	3	3	3	3
	m	0.99	0.97	1.00	1.00	0.97	0.74	0.93	0.98	1.00	1.00
T	a	51	100	20	50	50	3.5	26	50	51	41
	b	30	5	2	25	25	5	15	25	30	50
	m	48	0	-2.5	-50	-50	1	-25	-50	48	40

1.2.3 集成聚合

集成聚合过程采用 hybrid 聚合方法，首先对极化量（ Z_{DR} 、 K_{DP} 、 ρ_{HV} 等）的隶属度按权重进行加权平均，并将温度和反射率的隶属度作为物理因子，与加权结果进行乘法约束，得到最终的类别得分（Dolan et al, 2013），式（2）如下所示：

$$R_j = \left(\frac{\sum_{i \in p} \omega_i u_{i,j}(x_i)}{\sum_{i \in p} \omega_i} \right) \cdot u_{T,j}(T) \cdot u_{dBZ,j}(dBZ) \quad (2)$$

式中: $u_{i,j}(x_i)$ 为第 j 类特征 i 上的隶属度, ω_i 为特征权重, 本文权重系数设定为 $Z_H(1.5)$ 、 $Z_{DR}(0.8)$ 、 $K_{DP}(1.0)$ 、 $\rho_{HV}(0.8)$ 、 $T(0.4)$ 。

1.2.4 退模糊

采用最大隶属度原则 2 式中将集成聚合的输出结果 R_j 对比, 选取得分最高的类别即为最终的水凝物分类预测结果 Y , 如式 (3) 所示:

$$Y = \arg \max_j R_j \quad (3)$$

2 实况天气及观测结果分析

本次研究选取的天气个例为 2025 年 5 月 22 日发生的一次混合降水过程。该天气系统自西南向东北逐渐发展并进入五寨县境内。受该天气系统影响, 山西省忻州市气象台于当日发布雷暴大风蓝色预警, 表明预警区域未来 6 h 内部分地区将出现雷暴大风天气, 阵风风力可达 7 级以上, 并伴有较强雷电, 局地伴有短时强降水等强对流天气。在此条件下, 五寨县气象部门利用人影特种作业车在城区周边实施地面火箭增雨作业, 共发射 11 枚 WJ-8 型人影火箭。

结合雷达实况 PPI 回波的整体演变特征及水成物粒子识别剖面结果, 确定本次人工增雨作业分析所选取的方位角范围为 $25^\circ \sim 75^\circ$ 、仰角范围为 $60^\circ \sim 65^\circ$ 。以作业点为圆心(●), 如图 2a 所示, 在该方位范围内选取中轴方向作为空间分析基准, 用于示意 AgI 播撒过程在平面上的推进特征(●)。图 2b 给出了沿该中轴方向构建的时间-高度示意, 用以表征 AgI 播撒过程在目标云体垂直结构中的时空分布特征。结合当日探空资料所反映的温度层结结构, 可以看出, 播撒过程在不同作业阶段主要分布于 0°C 层附近, 从而为分析云体内水成物粒子演变过程提供空间参照。

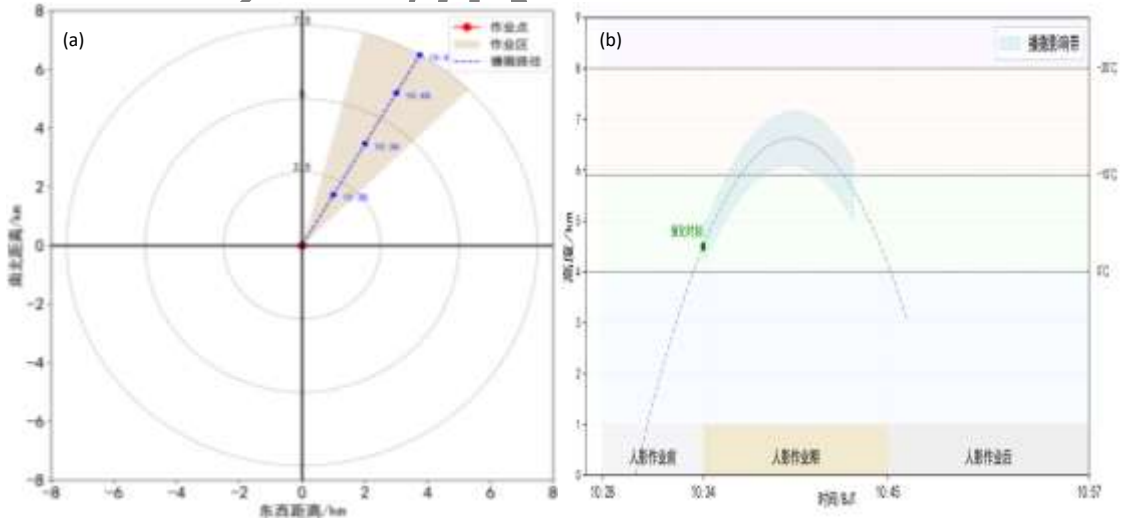
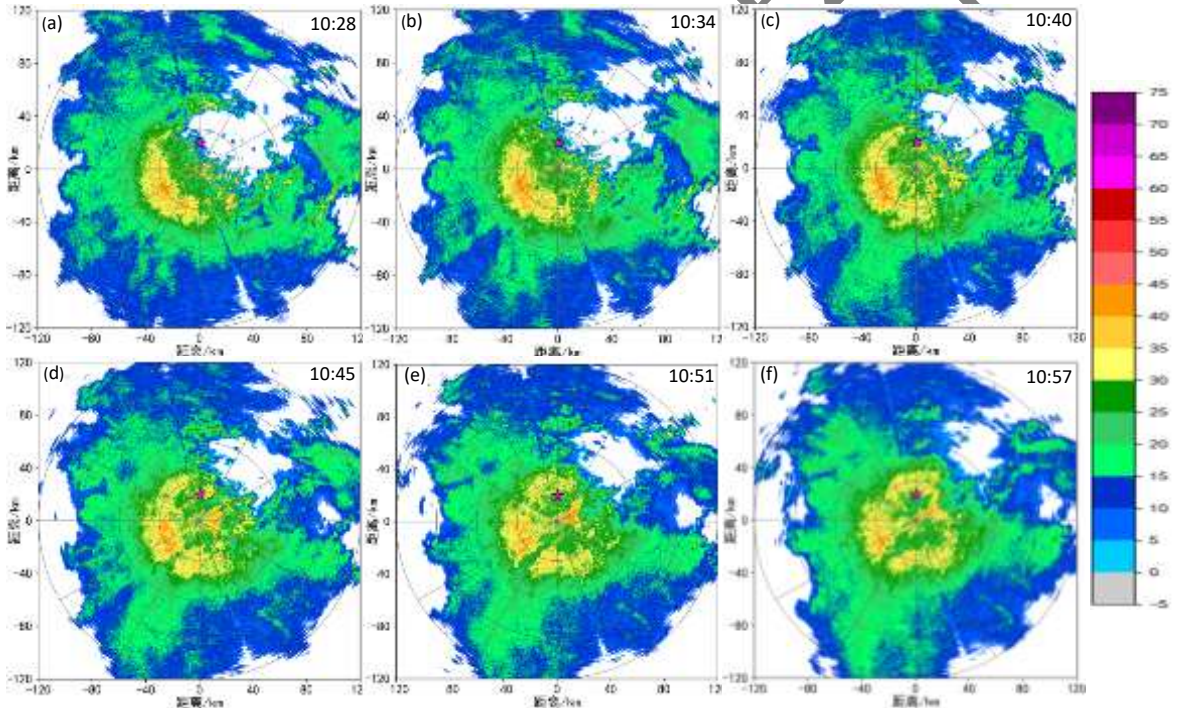


图 2 (a) 作业区及方位路径示意图, (b) 空间播撒分布特征
Fig. 2 (a) Schematic diagram of the operation area and azimuthal path and (b) spatial distribution of cloud seeding

2.1 作业期系统时空演变特征

根据实况特征及人工增雨云微物理演变过程,本文将此次人影作业过程划分为人影作业前、作业期和作业后三个阶段。其中,人影作业前(10:28-10:34,北京时,下同)主要表征催化前云体内各冰液相粒子的微物理特征;人影作业期(10:34-10:45)主要表征催化作用增强阶段云体内的微物理变化,是人工增雨影响分析的重点时段;人影作业后(10:51-0:57)主要表征催化影响减弱后云体的后续演变特征,此时云体发展逐渐趋于平稳。

人影作业前,如图 3a, 3b 所示, 10:28-10:34 时段,在距雷达站西南向约 25 km、方位角 180°~300°范围内存在反射率因子达到 35 dBZ 的回波。考虑到雷达站海拔高度为 2.782 km,本次分析选取 PPI 仰角为 1.5°的反射率产品。作业期,随着火箭弹入云并到达目标云区,在 10:40(图 3c)至 10:45(图 3d)时段,可以看到超过 35 dBZ 的强回波区域逐渐向东北方向扩展,回波主体发展至前所乡荷叶坪上空,并呈现进一步增强和扩展的趋势。作业后,如图 3e 所示,在距雷达站东北向约 20 km、方位角 45°~90°范围内出现较大范围的 35 dBZ 强回波区。至 10:57(图 3f),该区域内强回波逐渐减弱并呈现分散分布特征。



注:五角星为人影作业点,下同。

图 3 2025 年 5 月 22 日云体发展各时刻雷达反射率因子 PPI (0.5°)

Fig. 3 PPI reflectivity factor (0.5° elevation) at different times during cloud evolution on 22 May 2025

2.2 作业期 HID 时空反演特征

图 4 展示了人影作业三个阶段中云体相态的水平分布及其演变过程。对比图 3 可知,各类水成物粒子的相态变化与雷达回波的整体发展趋势具有较好的一致性。人影作业前(10:28-10:34),如图 4a 所示,在距雷达站西南向约 25 km、方位角 180°~300°范围内,云体内主要识别为液态水粒子,其外围区域则以湿雪、雪晶聚合物及少量冰晶粒子为主。随着

回波向东北方向发展,在图 4b 中可以看到,液态水粒子的分布范围呈现出相应的发展趋势。
作业期 (10:41–10:45), 如图 4c, 4d 所示, 在距雷达站径向 5~20 km、方位角 30°~90° 范围内, 液态水粒子数量明显增加, 并在该方位范围内识别出一定量的高密度霰粒子, 表明该阶段云内相态结构发生明显变化。作业后 (10:51–10:57), 如图 4e 和 4f 所示, 固态水成物粒子高密度霰及雪晶聚合物的识别数量均出现不同程度的减少, 云体内相态分布逐渐发生调整。

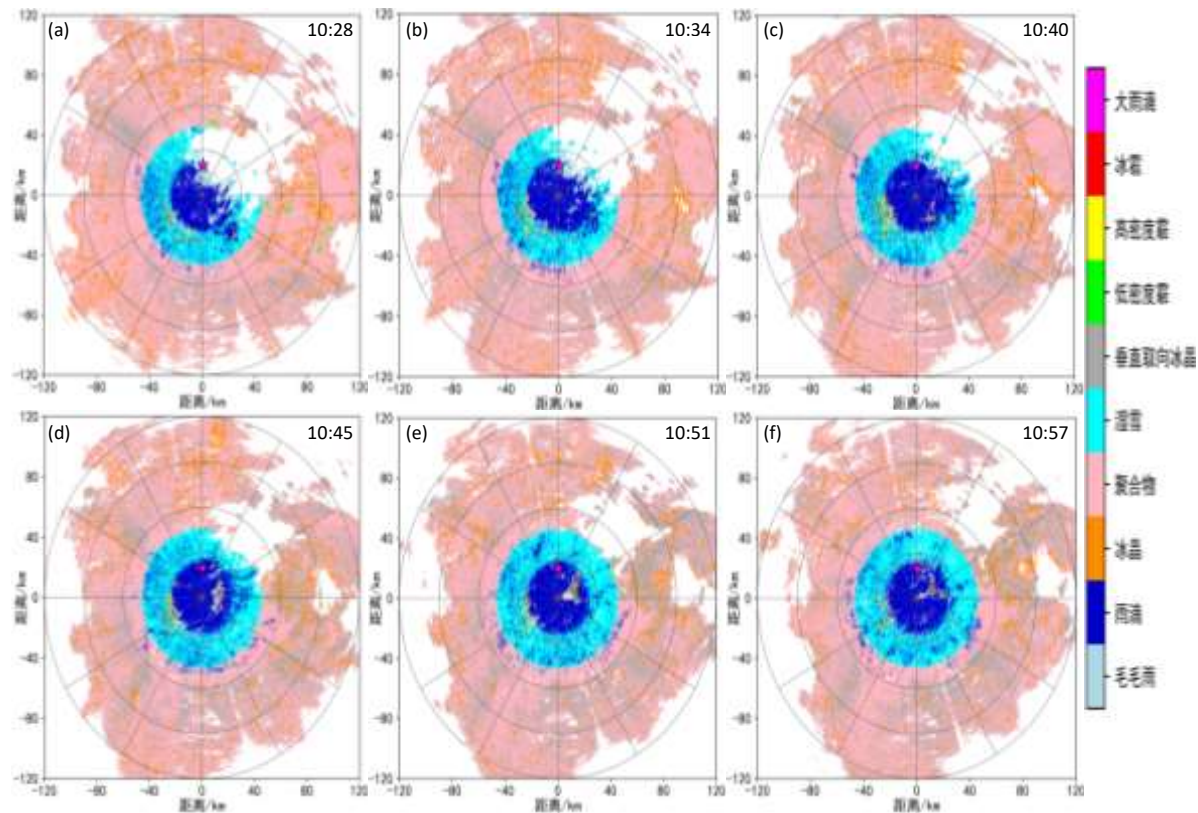


图 4 2025 年 5 月 22 日云体发展各时刻水成物粒子识别结果 PPI (0.5°)

Fig. 4 PPI hydrometeor classification (0.5° elevation) at different times during cloud evolution on 22 May 2025

3 HID 粒子反演结果微物理特征分析

3.1 作业期云微物理垂直分布特征

人影作业前 (10:28–10:34)。在 10:28, 如图 5a 所示, 回波主体位于距雷达中心约 13 km 范围内 (图中所示垂直高度均为海拔高度, 剖面沿径向 60° 方位角), 回波顶高度发展至约 11 km。对应时次的粒子识别结果来看 (图 5b): 云体低层水成物以雨滴粒子和毛毛雨为主。

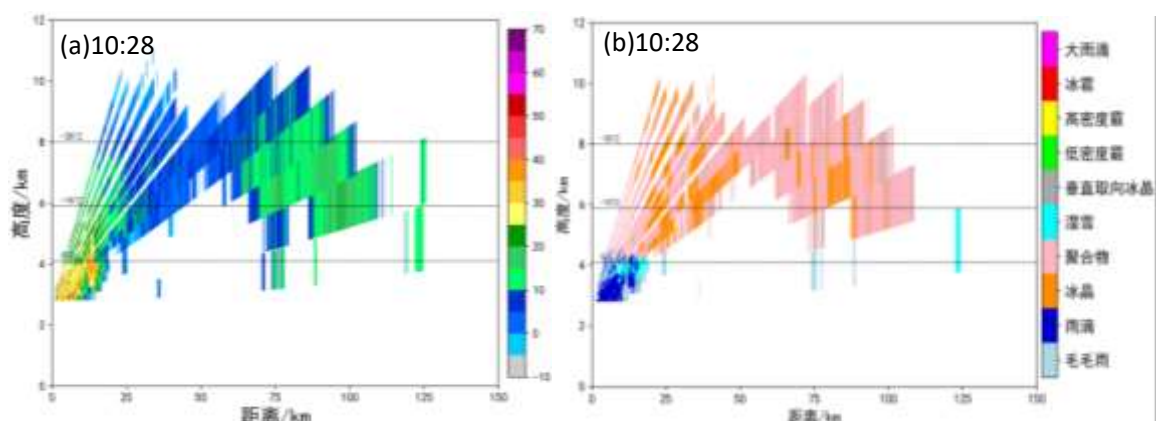


图 5 2025 年 5 月 22 日人工增雨作业前

(a) 雷达反射率因子, (b) 水成物粒子识别结果 RHI 沿径向 60° 方位角的垂直剖面

Fig. 5 Vertical profiles of RHI (a) reflectivity factor and (b) hydrometeor classification along 60° azimuth before the artificial rain enhancement operation on 22 May 2025

人影作业期 (10:34–10:45)。该时段也是催化剂影响云中微物理作用的主要时段。在 10:34, 云体低层发展至距雷达中心约 31 km 的位置 (图 6a), 在靠近 0 °C 层下方垂直高度约 3.2 km 处识别出部分高密度霰粒子 (图 6b)。其中, 10:40–10:45 时段, 结合图 6d 可见, 云中过冷水层逐渐形成于 0 °C 层上方约 4.1~4.3 km 的高度范围内。在 10:40 时刻, 高密度霰粒数量进一步增加 (图 6d), 至 10:45 (图 6e), 回波沿径向方向发展并延伸至距雷达中心约 37 km 的位置, 该方向亦为回波主体的实际发展和移动主方向, 同时低层回波强度增强至 30~35 dBZ。对比同一时刻的 HID 结果 (图 6f), 低层 3~4 km 垂直范围内的降水层同样延伸至 37 km 处。与此同时, 垂直高度位于 2.5~3.2 km 范围内的高密度粒子较上一时刻进一步增加, 其分布高度呈现下降特征。

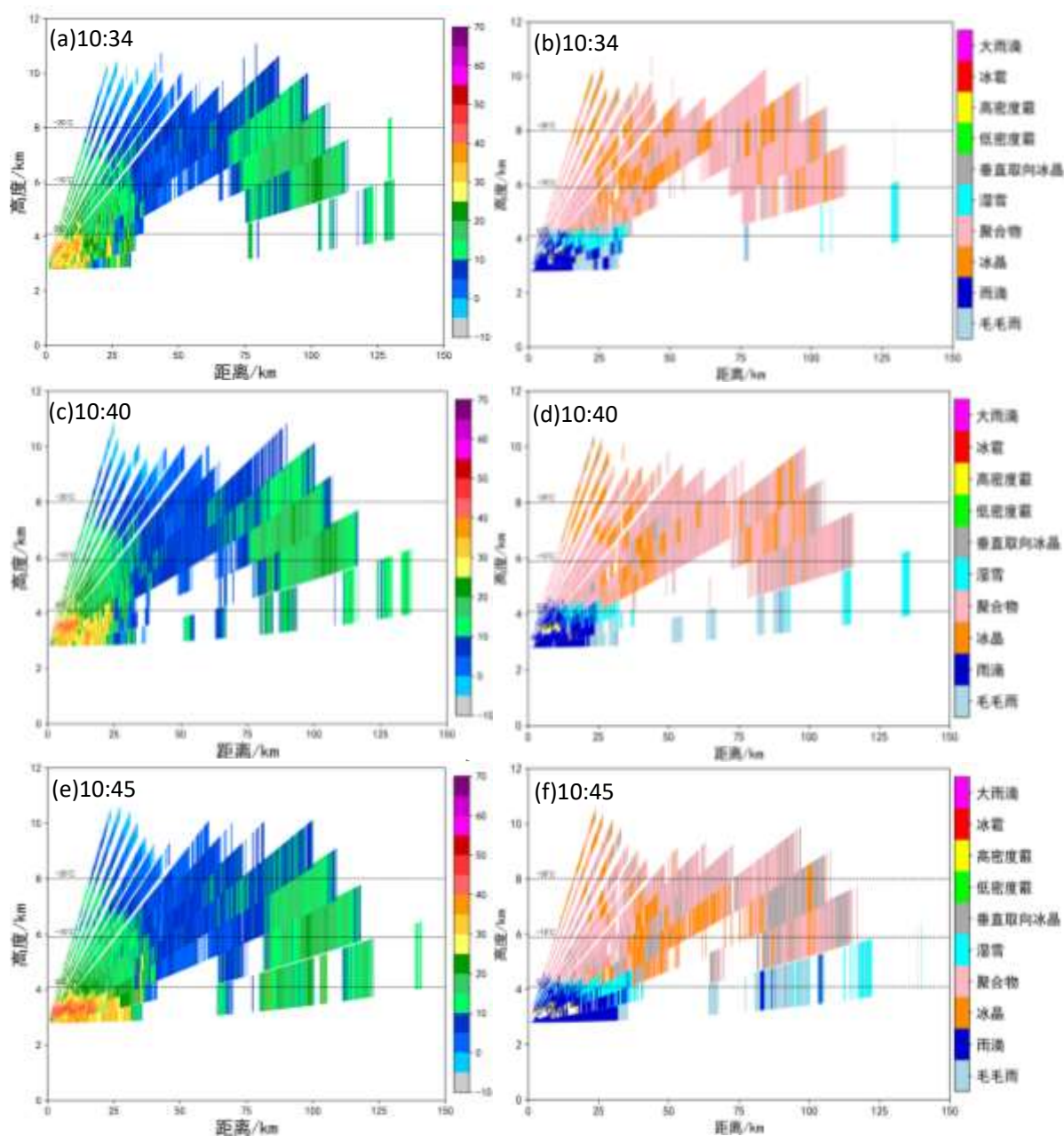


图 6 2025 年 5 月 22 日人工增雨作业期

(a) 雷达反射率因子, (b) 水成物粒子识别结果的 RHI 沿径向 60°方位角的垂直剖面

Fig. 5 Vertical profiles of RHI (a) reflectivity factor and (b) hydrometeor classification along 60° azimuth during the artificial rain enhancement operation on 22 May 2025

人影作业后(10:51–10:57)。该时期云体发展进入衰减阶段, 此时 AgI 人工冰核已基本完成与冰水混合层中过冷水的作用过程, 云内冰相粒子的生成与转化趋于稳定。在 10:51, 降水范围进一步扩大, 回波延伸至距雷达中心约 52 km 的范围(图 7a), 湿雪粒子仍保持增长趋势(图 7b), 表明随着冰相粒子的持续下落, 云内融化过程依然活跃, 混合相粒子间转化在零度层附近持续发生。如图 7d, 在 10:57 湿雪主要分布在 3.6~4.1km 的垂直高度范围内, 并呈现逐渐增多的趋势。湿雪粒子的主要源项为位于 0°C 层(约 4.1 km)以上的雪晶聚合物, 这些粒子在自身重力及气流浮力共同作用下下落至 0 °C 层附近, 因融化作用而形成的混合层, 湿

雪粒子是形成零度层亮带的重要源项之一,这与 Zhang et al (2008)和 Wang and Liu (2019)的研究结论相似。

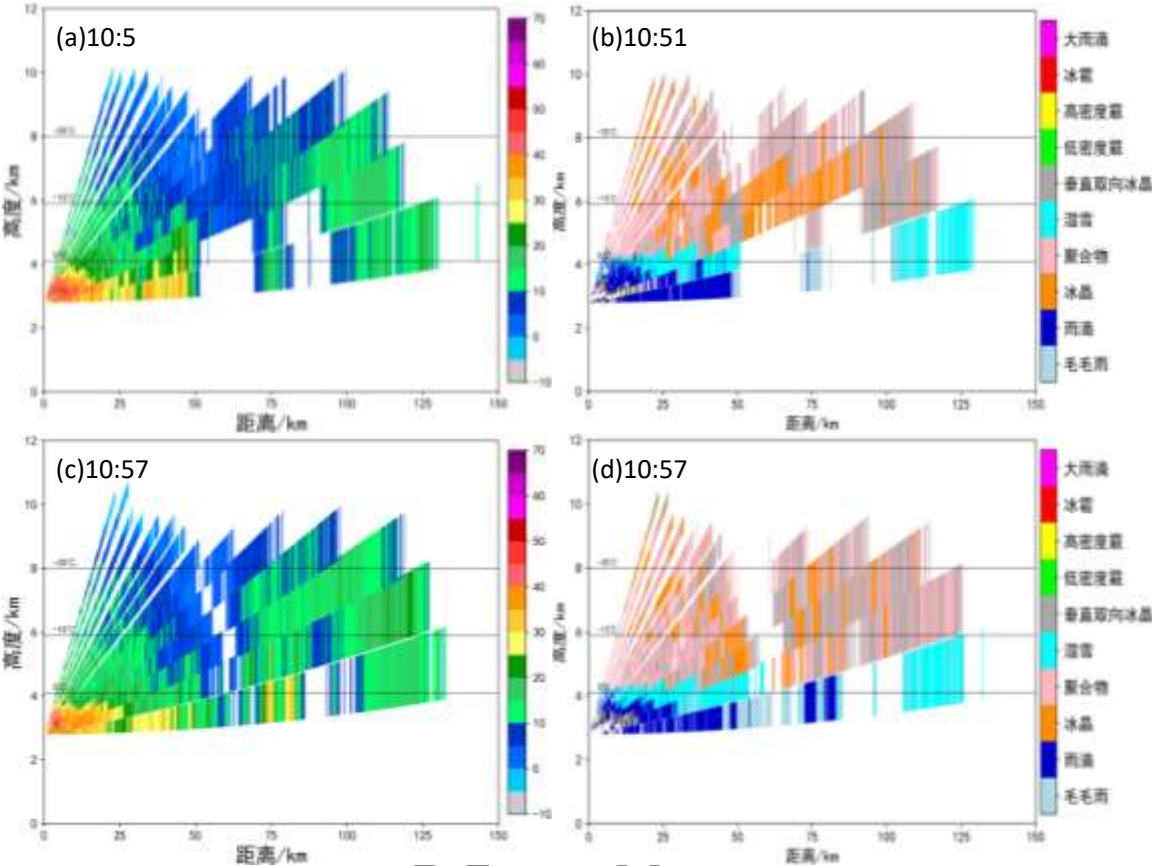


图 7 2025 年 5 月 22 日人工增雨作业后 (a) 雷达反射率因子, (b) 水成物粒子识别结果的 RHI 沿径向 60° 方位角的垂直剖面

Fig. 7 Vertical profiles of RHI (a) reflectivity factor and (b) hydrometeor classification along 60° azimuth after the artificial rain enhancement operation on 22 May 2025

3.2 作业期云微物理时序变化特征

如图 8 所示,人影作业前, 10:28 时刻单体内部降水粒子总体处于较低水平,雨滴粒子库数仅为 549,云中以过冷液态水为主,冰相水成物粒子数量有限,尚未形成有效降水过程。本文中所称的库指的是雷达数据中的采样单元,即雷达扫描中按距离和方位角划分的采样点(即雷达径向距离库),在 HID 算法中,每个采样点的分类结果被用来表示不同的水成物类型。随着人影作业开始,火箭弹进入目标云区后,作业期(10:34–10:45)内雨滴粒子数量迅速增加并维持在高值水平,总库数达到 867。然而,从粒子数量占比来看,雨滴粒子占比在 10:34 以后始终维持在 20%~30%的相对低值区,表明尽管液态降水粒子数量增加,但云内其他水成物粒子的增长更为显著。这一特征表明,作业期云内冰相微物理过程显著增强。以 AgI 为主的人工冰核进入云体后,通过异质核化形成冰晶核,并通过贝吉龙过程及碰并过程迅速增长形成冰相粒子,促进雪晶聚合物、高密度霰等冰相水成物的快速生成(10:34–10:40)。随着作业期内云体微物理过程的发展,雪晶聚合物、高密度霰等冰相粒

子在下落过程中发生碰并增长，当上升气流不足以承托其重量时，下落至 0℃层以下（约 4.2 km），并逐渐融化为液态降水到达地面。

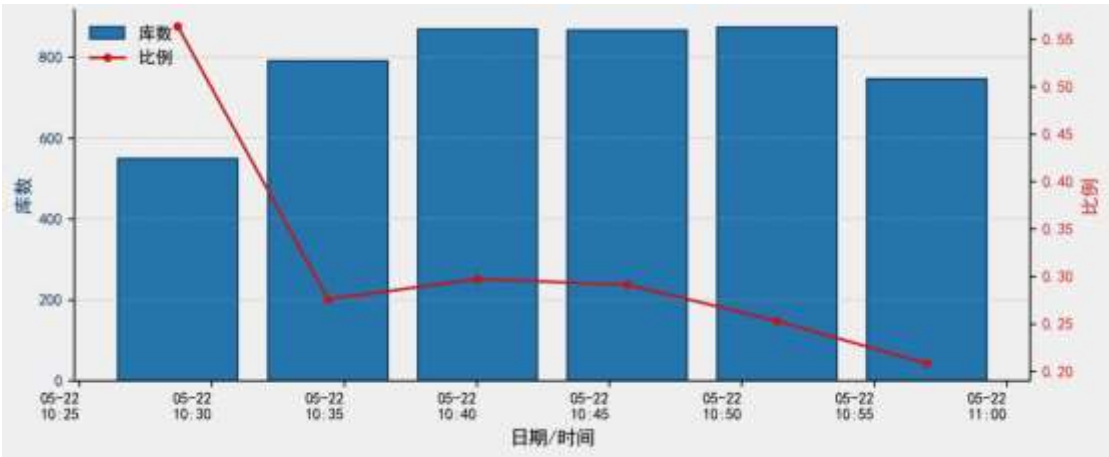


图 8 2025 年 5 月 22 日人工增雨作业前、作业期和作业后雨滴粒子数量及占比的时间变化
Fig. 8 Temporal variations in the number of raindrop particles and the proportion before, during, and after the artificial rain enhancement operation on 22 May 2025

图 9 展示了冰晶粒子在人工增雨催化整个影响阶段的变化特征。随着人影作业地开展，AgI 作为人工冰核被带入冷云区并触发异质成冰过程，冰晶粒子数量显著增加，其识别库数为 392，占比为 13.4%，云体水成物排序在冰晶及雨滴粒子之后的第 3 位，表明作业期初段冰晶生成过程被激发。随后，在 10:45，冰晶粒子库数下降至最低值为 298，占比降至 10%。在人影作业后，冰晶粒子在 10:51 后出现小幅回升，说明在 AgI 冰核持续播撒的情况下，云内异质核化过程持续发生，进一步影响冰相粒子之间的微物理过程。

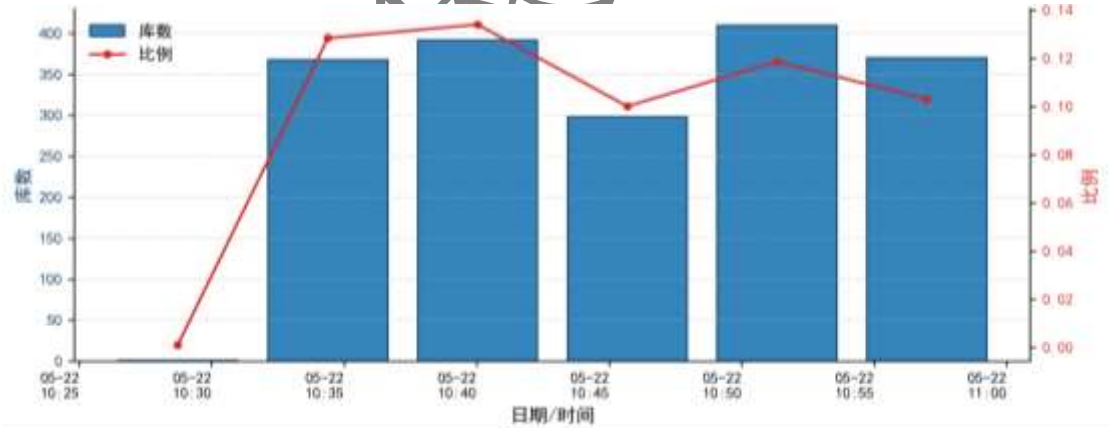


图 9 2025 年 5 月 22 日人工增雨作业前、作业期和作业后冰晶粒子数量及占比的时间变化
Fig. 9 Temporal variations in the number of ice crystal particles and the proportion before, during, and after the artificial rain enhancement operation on 22 May 2025

从图 10 可以看出，在 10:28 (人影作业前)，雪晶聚合物粒子库数为 243，其在云体水成物中的占比较低，仅为 27%。在 10:34 进入作业期，该粒子库数迅速增加至 1 117，数量占比升至 38.9%，成为云体内数量及增幅最为显著的水成物粒子。这一变化表明，在作业期内 AgI 人工冰核进入云体后，显著增强了冰晶生成过程，初生冰晶通过碰并周围水成物粒子，

快速形成大量雪晶聚合物粒子。至 10:57（作业后），该粒子库数一步增加并达到峰值(1230)，
 但其在云体水成物中的占比下降至 34.3%。这表明，随着增雨过程的持续，部分雪晶聚合物
 粒子进一步转化为更大尺度的冰相水成物并下落，云内水成物粒子逐步向降水粒子演变。

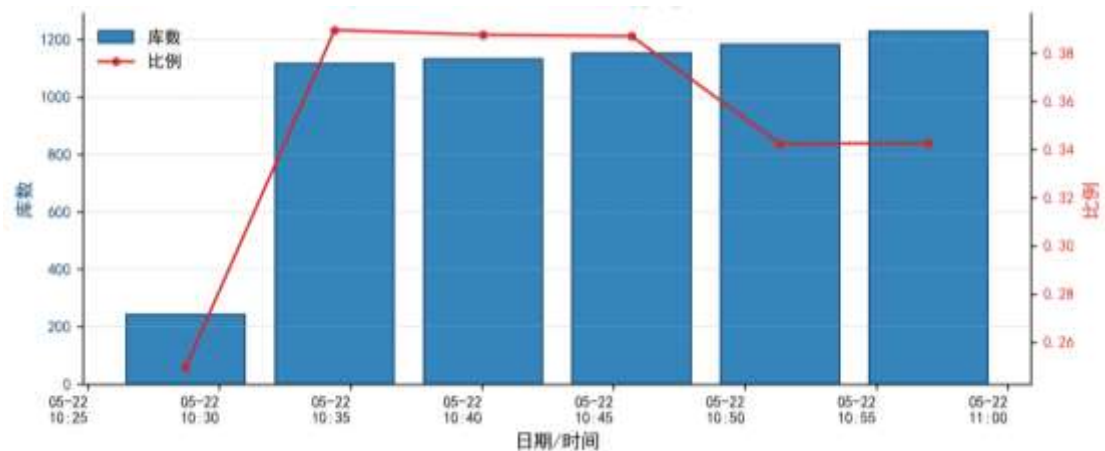


图 10 人 2025 年 5 月 22 日工增雨作业前、作业期和作业后聚合物粒子数量及占比的时间变化
 Fig. 10 Temporal variations in the number of aggregate particles and the proportion before, during, and after the artificial rain enhancement operation on 22 May 2025

从图 11 可以看出，在人工增雨的整个催化影响过程中，高密度霰粒子库数总体呈现阶
 梯式增长特征，最大值达 110。人影作业前（10:28–10:34），该类粒子在云体水成物中的数
 量占比呈现明显下降趋势，表明作业前其主要受自然下落及在 0℃ 层以下融化过程影响，
 尚未得到有效补充。进入增雨作业期(10:34–10:45)，高密度霰粒子占比增加，其峰值在 10:45
 达到 3.2%。这一变化表明，在 AgI 冰核大量入云后，冰晶粒子在过冷水充足条件下通过淞
 附作用持续增长，进而促进高密度霰粒的形成并参与降水过程。尽管该类粒子在作业期整体
 呈现增长趋势，但其在云体水成物中的占比始终较低，说明其在本次增雨过程中并非主导水
 成物，而更多体现为冰相过程增强的辅助性和指示性粒子。

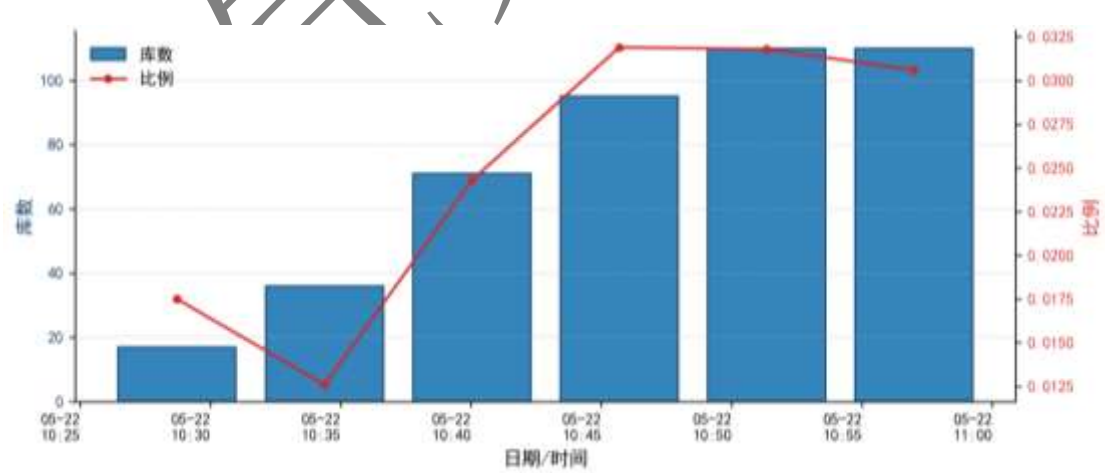


图 11 2025 年 5 月 22 日人工增雨作业前、作业期和作业后高密度霰粒子数量及占比的时间变化
 Fig. 11 Temporal variations in the number of high-density graupel particles and the proportion before, during, and after the artificial rain enhancement operation on 22 May 2025

图 12 展示了湿雪粒子在整个增雨过程中的阶段性变化特征。作业期内 10:34–10:40 时段, 异质成冰过程显著增强, 表现为冰晶粒子数量快速增加, 而湿雪粒子数量则呈现明显下降趋势, 其变化特征与冰晶粒子表现出明显的反相关关系, 且相较雪晶聚合物、高密度霰粒子的变化存在滞后性。这表明在该阶段云内冰相粒子仍主要集中于较高、较冷的高度层, 处于生长和转化期, 尚未大规模进入 0°C 层及其附近的混合相区域, 因而不利于湿雪粒子的形成。随着增雨催化作用的影响, 在作业期内 10:40–10:45 时段, 湿雪粒子库数开始持续增加, 并在 10:57 (作业后) 达到峰值为 458, 其在云体水成物中的占比亦升至最大值 12.8%。该变化表明, 随着雪晶聚合物、高密度粒子不断生长并下落至 0°C 层附近, 冰–水混合相转化过程逐渐增强, 湿雪粒子成为冰相向液相转化的重要过渡型水成物。

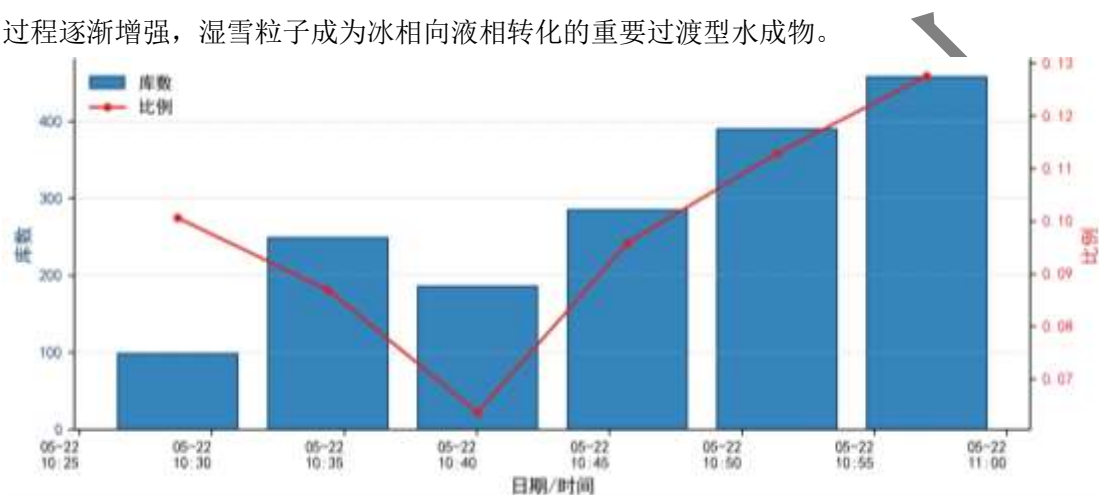


图 12 2025 年 5 月 22 日人工增雨作业前、作业期和作业后湿雪粒子数量及占比的时间变化

Fig. 12 Temporal variations in the number of wet snow particles and the proportion before, during, and after the artificial rain enhancement operation on 22 May 2025

4 人工增雨全阶段云微物理演变特征模型

基于本文前述对本次在五台山云物理基地开展人工增雨微物理演变过程的分析, 建立了以 AgI 入云前后差异为主轴的三阶段人工增雨微物理概念模型(见图 13)。

人影作业前。如图 13a 所示: 在 AgI 冰核入云前, 云体虽具备明显的相态分层结构, 0°C 层附近存在过冷水累积区, 但冰相水成物总体偏弱, 此时冰晶粒子与雪晶聚合物粒子的生成和转化过程并不活跃, 难以形成持续增长的沉降补给链条, 高密度霰粒子与湿雪粒子贡献有限, 降水以液态粒子(如雨滴和毛毛雨)为主, 但效率偏低。

人影作业期。如图 13b 所示: AgI 冰核入云后, 0°C 层以上过冷水累积区成为异质成冰的主要作用带, 冰晶粒子经碰并、聚合作用向雪晶聚合物增长转化, 使该粒子成为冰相水成物的重要组成部分; 同时在 0°C 层上下增长带内, 雪晶聚合物粒子进一步通过淞附作用向高密度霰粒子转化。尽管高密度霰在水成物粒子分布中占比不高, 其阶段性增强说明冰相增长过程的作用增强。

人影作业后。如图 13c 所示: 随着云体内过冷水逐步消耗, 雪晶聚合物、高密度霰等冰相水成物粒子持续下沉并进入 0°C 层附近, 融化与混合相转化过程更为活跃, 湿雪粒子主要

分布于 0°C 层附近并呈带状特征；随后经融化作用转化为 0°C 层以下的液态降水输出。

与已有研究对比, Friedrich et al (2021)在对三次地形云 AgI 播撒进行观测分析, 系统研究了冰核介入后云体内冰晶、雪晶粒子的时空演变过程, 结果表明 AgI 播撒后冰相过程呈现明显阶段性变化, 这与本文主增雨阶段冰相水成物的时序演化趋势基本一致。程鹏等(2022)利用大型无人机人工增雨试飞资料分析催化作业过程中的云内粒子演变, 发现人工催化引起了云体粒子演变特征的明显变化也与本文观测结果相符。不同之处在于, 本研究覆盖高海拔复杂地形条件, 且粒子谱分类更细, 能够揭示 0°C 层附近融化输出的阶段性特征, 这是现有研究中未系统呈现的。总体而言, 本文选取过程的水成物粒子演变过程演化可概括为: “过冷水累积区 $\rightarrow$ (AgI 冰核入云介入) $\rightarrow$ 贝吉龙过程及碰并增长 $\rightarrow$ 成冰 (冰晶) $\rightarrow$ 聚合增长 (雪晶聚合物) $\rightarrow$ 霰粒发展 (高密度霰) $\rightarrow 0^{\circ}\text{C}$ 层附近混合相过渡带 (湿雪) $\rightarrow 0^{\circ}\text{C}$ 以下液态降水形成 (雨滴)”。其中 0°C 层附近的混合相过渡与融化转化主要集中在约 $3.6\sim 4.1\text{ km}$ 高度带, 反映了 AgI 冰核入云后冰相增长及其在 0°C 层附近融化转化为液态降水粒子的阶段性特征。

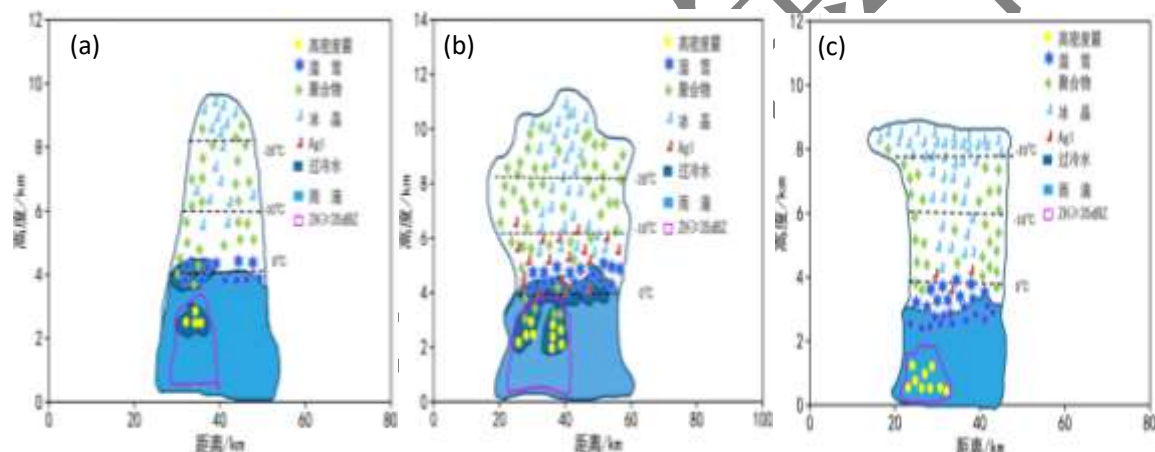


图 13 人工增雨作业前、作业期和作业后云微物理概念模型

Fig. 13 Conceptual model of cloud microphysics before, during, and after the artificial rain enhancement operation

5 结论与讨论

本文利用位于山西省五台山云物理基地双偏振 C 波段雷达的偏振参量(Z_H 、 Z_{DR} 、 K_{DP} 、 ρ_{HV} 等)以及探空温度参量 T , 利用模糊逻辑粒子相态识别算法(HID), 对 2025 年 5 月 22 日的一次混合型降水过程中所实施的人工影响天气增雨作业, 对云体内微物理过程的演变特征及规律做了全流程跟踪分析, 建立了基于 AgI 入云前后差异的三个阶段人工增雨微物理概念模型, 揭示了增雨过程中云内粒子冰相增长与相态转化的变化规律, 主要结论如下:

(1) 人影作业期是云内微物理过程的主要阶段。雨滴粒子数量在作业期增量明显, 以 AgI 为主的人工冰核进入云体后, 通过异质核化作用形成冰晶核, 并通过贝吉龙过程及碰并过程迅速增长形成冰相粒子。高密度霰粒由冰晶粒子淞附周围过冷水形成, 但高密度霰粒在云体内水成物中占比较低(3.2%), 表明其在增雨过程中主要起辅助作用。人影作业后, 固态水成物粒子 (高密度霰和雪晶聚合物) 数量逐渐减少, 表明冰相粒子的生成过程减弱。

（2）在作业期内，由于 AgI 冰核的播撒影响，显著增强了冰晶粒子的生成过程。冰晶和湿雪粒子的数量变化呈现明显的反相关性，冰晶粒子通过碰并作用转化为雪晶聚合物粒子，其数量占比在作业期达 38.9%，成为增雨过程中主要冰相水成物之一，进一步推动了冰相增长链条的形成。

（3）湿雪粒子的主要源项为 0℃层(4.1 km)以上的雪晶聚合物粒子为主，且湿雪粒子是形成零度层亮带的重要源项之一，生成区域在 3.6~4.1km 的高度带，反映了冰相粒子向液态转化的过程。

（4）三阶段云体内部水成物粒子微物理演变特征概括为：过冷水累积区 →（AgI 冰核入云介入）→ 贝吉龙过程及碰并增长→成冰（冰晶）→聚合增长（雪晶聚合物）→霰粒发展（高密度霰）→0℃层附近混合相过渡带（湿雪）→0℃以下液态降水输出（雨滴）。

本文针对 2025 年 5 月 22 日的人工增雨作业过程，基于 HID 识别结果以及地面作业路径和播撒过程的空间分布特征，综合分析了 AgI 冰核入云前后云体内水成物粒子的微物理变化过程，并建立了全阶段概念模型。未来需要通过更多不同地域的人工影响天气作业个例对算法参数进行适应性调优，并结合增雪、消雹等其他类型的作业过程进一步完善算法。并针对不同天气和地域特征优化算法阈值，给出更具普适性的微物理演变特征。

参考文献

- 陈羿辰, 张龙斌, 金永利, 等, 2016. 利用双线偏振雷达分析人工防雹作业效果[J]. 气象科技, 44(3): 479-488. Chen Y C, Zhang L B, Jin Y L, et al, 2016. A case study of effectiveness of artificial hail suppression based on dual polarization radar data[J]. Meteor Sci Technol, 44(3): 479-488 (in Chinese).
- 程鹏, 罗汉, 甘泽文, 等, 2022. 大型无人机一次人工增雨试飞及催化响应分析[J]. 气象, 48(8): 1053-1061. Cheng P, Luo H, Gan Z W, et al, 2022. A large UAV artificial precipitation enhancement experiment and physical response analysis of the cloud seeding processes[J]. Meteor Mon, 48(8): 1053-1061 (in Chinese).
- 董晓波, 麦裕, 李军霞, 2025. 近 20 年河北地区气溶胶及云降水微物理特征飞机观测研究进展[J]. 气象, 51(2): 143-152. Dong X B, Mai R, Li J X, 2025. Research progress of aircraft measurements on the aerosol, cloud and precipitation microphysical properties over Hebei Province in recent 20 years[J]. Meteor Mon, 51(2): 143-152 (in Chinese).
- 董亚宁, 刘福新, 孙鸿娉, 等, 2023. 一次高炮防雹动力效应的相控阵雷达观测分析[J]. 气象, 49(8): 995-1004. Dong Y N, Liu F X, Sun H P, et al, 2023. A study on dynamic effect of hail suppression by anti-hail gun with phased array radar[J]. Meteor Mon, 49(8): 995-1004 (in Chinese).
- 洪延超, 雷恒池, 2012. 云降水物理和人工影响天气研究进展和思考[J]. 气候与环境研究, 17(6): 951-967. Hong Y C, Lei H C, 2012. Research advance and thinking of the cloud precipitation physics and weather modification[J]. Climatic Environ Res, 17(6): 951-967 (in Chinese).
- 胡志晋, 2001. 层状云人工增雨机制、条件和方法的探讨[J]. 应用气象学报, 12(S1): 10-13. Hu Z J, 2001. Discussion on mechanisms, conditions and methods of precipitation enhancement in stratiform clouds[J]. Quart J Appl Meteor, 12(S1): 10-13 (in Chinese).
- 胡志晋, 秦瑜, 王玉彬, 1983. 层状冷云数值模式[J]. 气象学报, 41(2): 194-203. Hu Z J, Qin Y, Wang Y B, 1983. An numerical model of the cold stratified clouds[J]. Acta Meteor Sin, 41(2): 194-203 (in Chinese).
- 黄美元, 徐华英, 王昂生, 等, 1979. 爆炸影响对流云发展过程的原理研究[J]. 大气科学, 3(3): 280-288. Huang M Y, Xu H Y, Wang A S, et al, 1979. Studies of influence on development of convective clouds by explosion[J]. Chin J Atmos Sci, 3(3): 280-288 (in Chinese).
- 刘香娥, 何晖, 高茜, 等, 2021. 中尺度碘化银催化数值模式在人工影响天气业务中的应用试验[J]. 气象学报, 79(2): 359-368. Liu X E, He H, Gao Q, et al, 2021. Research on application of the mesoscale silver iodide seeding numerical model[J]. Acta Meteor Sin, 79(2): 359-368 (in Chinese).
- 潘佳文, 魏鸣, 郭丽君, 等, 2020. 闽南地区大冰雹超级单体演变的双偏振特征分析[J]. 气象, 46(12): 1608-1620. Pan J W, Wei M, Guo L J, et al, 2020. Dual-polarization radar characteristic analysis of the evolution of heavy hail supercell in Southern Fujian [J]. Meteor Mon, 46(12): 1608-1620 (in Chinese).
- 孙跃, 任刚, 孙鸿娉, 等, 2023. 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, 34(1): 65-77. Sun Y, Ren G, Sun H P, et al, 2023. Features of phased-array dual polarization radar observation during an anti-aircraft gun hail suppression operation[J]. J Appl Meteor Sci, 34(1): 65-77 (in Chinese).
- 王飞, 王思瀚, 乌日罕, 等, 2025. 人工影响天气作业效益评价研究综述[J]. 气象, 51(11): 1547-1558. Wang F, Wang S H, Wu R H, et al, 2025. Advances in studies on benefit evaluation of weather modification[J]. Meteor Mon, 51(11): 1547-1558 (in Chinese).
- 王致君, 楚荣忠, 2002. 偏振雷达在人工影响天气工作中的应用潜力[J]. 高原气象, 21(6): 591-598. Wang Z J, Chu R Z, 2002. Application potential of polarization radar in weather modification[J]. Plateau Meteor, 21(6): 591-598 (in Chinese).
- 徐华英, 何珍珍, 陈英仪, 1983a. 炮击和雷电对降水的影响[C]/冰雹和人工防雹研究. 北京: 科学出版社, 96-106. Xu H Y, He Z Z, Chen Y Y, 1983a. The influence of bombardment and lightning on precipitation[C]/The Study of Hail and Hail Suppression. Beijing: Science Press, 96-106 (in Chinese).
- 徐华英, 何珍珍, 陈章昭, 等, 1983b. 爆炸影响上升气流的模拟实验[C]/冰雹和人工防雹研究. 北京: 科学出版社, 84-95. Xu H Y, He Z Z, Chen Z Z, et al, 1983b. Simulation experiment for impact of explosion on the updraft[C]/The Study of Hail and Hail Suppression. Beijing: Science Press, 84-95 (in Chinese).

杨涛, 孙跃, 闫文辉, 等, 2025. 中国过冷积状云的时空分布特征[J]. 气象, 51(10): 1193-1202. Yang T, Sun Y, Yan W H, et al, 2025. Spatio-temporal distribution characteristics of supercooled cumuliform clouds in China[J]. Meteor Mon, 51(10): 1193-1202 (in Chinese).

郑皎, 韩迁立, 徐艳, 等, 2022. 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, 16(6): 124-130. Zheng J, Han Q L, Xu Y, et al, 2022. Characteristics of dual-polarization radar in an artificial anti-hail operation[J]. Desert Oasis Meteor, 16(6): 124-130 (in Chinese).

Dolan B, Rutledge S A, 2009. A theory-based hydrometeor identification algorithm for X-band polarimetric radars [J]. J Atmos Ocean Technol, 26(10): 2071-2088.

Dolan B, Rutledge S A, Lim S, et al, 2013. A robust C-band hydrometeor identification algorithm and application to a long-term polarimetric radar dataset[J]. J Appl Meteorol Clim, 52(9): 2162-2186.

Farley R D, Nguyen P, Orville H D, 1994. Numerical simulation of cloud seeding using a three-dimensional cloud model[J]. J Weather Modif, 26(1): 113-124.

Farley R D, Hjermstad D L, Orville H D, 1997. Numerical simulation of cloud seeding effects during a four-day storm period [J]. J Weather Modif, 29(1): 49-55.

Friedrich K, French J R, Tessendorf S A, 2021. Microphysical characteristics and evolution of seeded orographic clouds[J]. J Appl Meteor Clim, 60(7): 909-934.

Huang Y, Zhang M, Zhou X, et al, 2008. Aircraft measurements of cloud microphysical properties during cloud seeding operations over North China[J]. Atmos Res, 88(3-4): 262-272.

Köcher G, Zinner T, Knot C, et al, 2022. Evaluation of convective cloud microphysics in numerical weather prediction models with dual-wavelength polarimetric radar observations: methods and examples[J]. Atmos Meas Tech, 15(4): 1033-1054.

Kumjian M R, Prat O P, Reimel K J, et al, 2022. Dual-polarization radar fingerprints of precipitation physics: a review[J]. Remote Sens, 14(15): 3706.

Liu Z, Yin Y, Chen Q, et al, 2025. The response of cloud dynamic structure and microphysical processes to glaciogenic seeding: a numerical study[J]. Atmosphere, 16(12): 1381.

Snyder J C, Bluestein H B, Zhang G F, et al, 2010. Attenuation correction and hydrometeor classification of high-resolution, X-band, dual-polarized mobile radar measurements in severe convective storms[J]. J Atmos Ocean Technol, 27(12): 1979-2001.

Thompson E J, Rutledge S A, Dolan B, et al, 2014. A dual-polarization radar hydrometeor classification algorithm for winter precipitation[J]. J Atmos Ocean Technol, 31(7): 1457-1481.

Voormansik T, Cremonini B, Post P, et al, 2021. Evaluation of the dual-polarization weather radar quantitative precipitation estimation using long-term datasets[J]. Hydrol Earth Syst Sci, 25(3): 1245-1258.

Wang J, Yue Z G, Rosenfeld D, et al, 2021. The evolution of an AgI cloud-seeding track in central China as seen by a combination of radar, satellite, and disdrometer observations[J]. J Geophys Res Atmos, 126(11): e2020JD033914.

Wang S Z, Liu Z Q, 2019. A radar reflectivity operator with ice-phase hydrometeors for variational data assimilation (version 1.0) and its evaluation with real radar data[J]. Geosci Model Dev, 12(9): 4031-4051.

Wen J, Zhao K, Huang H, et al, 2017. Evolution of microphysical structure of a subtropical squall line observed by a polarimetric radar and a disdrometer during OPACC in Eastern China[J]. J Geophys Res Atmos, 122(15): 8033-8050.

Zadeh L A, 1968. Fuzzy algorithms[J]. Inform Con, 12(2): 94-102.

Zhang J, Langston C, Howard K, 2008. Brightband identification based on vertical profiles of reflectivity from the WSR-88D[J]. J Atmos Ocean Technol, 25(10): 1859-1872.

Zhao K, Huang H, Wang M J, et al, 2019. Recent progress in dual-polarization radar research and applications in China[J]. Adv Atmos Sci, 36(9): 961-974.

Zheng H P, Zhang Y, Chen Y C, et al, 2024. Microphysical and dynamic evolution of convection observed by polarimetric radar under the influence of cloud seeding[J]. Atmos Res, 297: 107110.