

基于多源观测数据的华北冬季冷云催化物 理响应分析

王晓青^{1, 2, 3} 董晓波^{1, 2, 3} 杨洁帆⁴ 王姝怡³ 侯劭禹³ 张晓瑞³ 闫非³

1 中国气象局雄安大气边界层重点开放实验室, 雄安新区 071800

2 河北省气象与生态环境重点实验室, 石家庄 050021

3 河北省人工影响天气中心, 石家庄 050021

4 中国科学院大气物理研究所云降水物理与强风暴实验室, 北京 100029

摘要 本文利用高性能增雨飞机、地面 S 波段双偏振雷达和卫星观测数据, 分析了 2022 年 1 月 20 日河北中南部地区一次过冷云微物理特征及飞机增雨作业后的物理响应。研究结果表明, 受西南暖湿气流和东风回流共同影响, 河北中南部地区形成大范围层状云, 云底高 1400 m, 云顶高 2100 m, 主要由过冷云滴组成, 受地形抬升作用影响, 从云底到云顶, 云滴谱宽逐渐增加。雷达显示, 2100 m 高度催化作业后, 受碘化银核化影响, 过冷云滴迅速形成冰晶、雪和少量霰粒子, 粒子尺度的增大致使雷达上出现与飞机催化轨迹形状相一致的回波带。FY-4A 卫星观测显示晶化作用在播云 17~19 min 后逐渐显现, 云迹可维持约 55 min。催化作业后过冷云滴形成冰晶粒子, 冰晶粒子逐渐长大并下落, 造成云顶下沉, 在云顶形成了一条云沟。与周围过冷云相比, 云沟内 0.65 μm 通道光谱反射率和 10.8 μm 黑体亮温增加, 而 3.72 μm 通道反射率降低。

关键词 过冷层状云, 物理响应, 卫星反演, 云迹

文章编号: 2023061C

doi: 10.3878/j.issn.1006-9895.2311.23061

Analysis of physical response to cold cloud seeding over North China in winter based on multi-source observation

Wang Xiaoqing^{1, 2, 3}, Dong Xiaobo^{1, 2, 3}, Yang Jiefan⁴, Wang Shuyi³, Hou Shaoyu³,
Zhang Xiaorui³, Yan Fei³

1. China Meteorological Administration Xiong'an Atmospheric Boundary Layer Key Laboratory,

收稿日期 2023-04-17; **网络预出版日期**

作者简介 王晓青, 女, 1992 年生, 硕士研究生, 主要从事云物理研究。E-mail: 1269780529@qq.com

通讯作者 董晓波, E-mail: xb.dong@qq.com

资助项目 河北省自然科学基金 D2023304001, 中国气象局创新发展专项 CXFZ2023J038, 河北省省级科技计划 20375402D

Funded by Hebei Natural Science Foundation (Grant D2023304001), China Meteorological Administration Innovation and Development Project(Grant CXFZ2023J038), S&T Program of Hebei (Grant 20375402D)

2. Key Laboratory of Meteorology and Ecological Environment of Hebei Province, Shijiazhuang

050021

3. Hebei Provincial Weather Modification Center, Shijiazhuang 050021

4. Laboratory of Cloud-Precipitation Physics and Severe Storms, Institute of Atmospheric Physics,
Chinese Academy of Sciences, Beijing 100081

Abstract The microphysical characteristics of a supercooled cloud and the physical response of cloud seeding were analyzed using high-performance rain enhancement aircraft, ground-based S-band dual polarization radar and satellite remote sensing observations in central and southern Hebei Province on January 20, 2022. The results showed that, under the influence of the combination of southwest warm and humid air flow and easterly reflux, a large range of stratiform clouds formed with a cloud base of 1400 m and a cloud top of 2100 m, which were mainly composed of supercooled cloud droplets in the central and southern Hebei Province. Radar observation showed that after cloud seeding at a height of 2100 m, the supercooled cloud droplets rapidly froze into ice crystals, snow and a few graupel particles affected by AgI nucleation. The increase of particle size resulted in an enhanced radar reflectivity echoes in cloud-seeding regions. FY-4A satellite observations showed clear icing cloud tracks occurred after 17~19 min of cloud seeding, which can sustain for about 55 min. After cloud seeding, the supercooled cloud droplets formed ice crystal particles, which gradually grew and fell, causing the cloud top to sink and forming a cloud groove in the cloud top. Compared with the regions without seeding, the reflectance at 0.65 μm and the blackbody brightness temperature at 10.8 μm increased, the reflectance at 3.72 μm decreased within the cloud tracks.

Keywords Supercooled layer clouds, Physical response, Satellite retrieval, Cloud track

1 引言

云覆盖约 60% 的地球表面, 对大气起着重要的动力和热力作用, 云形成的降水对人类的生命和日常活动具有重要作用和影响 (Rossow and Schiffer., 1999; 雷恒池等, 2008; 吕玉环等, 2021)。在全球气候变暖影响下, 极端降水和干旱发生频率增加, 极端降水可能引发洪水, 而干旱使得不断增长的人口对水的需求增加。近年来, 为了农业发展和应对水资源匮乏

乏问题,国内多个省份开展人工增雨(雪)业务,每年开展飞机人工增雨(雪)作业近千架次(段婧等,2017;郭学良等,2021)。随着高性能飞机和先进机载设备的引进,对于云结构观测和自然降水形成机理的认识有了很大的进步(蔡兆鑫等,2019;亓鹏等,2019;孙玉稳等,2019;封秋娟等,2021;杨洁帆等,2021;闫非等,2022;彭冲等,2023),但是人工增雨效果检验仍是一个复杂而困难的问题(French et al., 2018; 王婉和姚展予, 2012; 王以琳等, 2012)。

增雨效果检验一般有三种方法,即统计检验、数值模拟理论分析和物理检验。统计检验和数值模拟检验通常情况下需要以物理检验为前提才具有较高可信度(郭学良,2010;辛乐,2010;沙修竹等,2022)。随着雷达、机载探测仪器、卫星遥感等探测设备的运用,为物理检验提供了有利条件,然而由于物理检验技术难度大,这种方法仍处于探索和发展的阶段。2000年3月14日An-26增雨飞机在陕西关中与陕南西部地区实施碘化银播云后,美国国家海洋和大气管理局(NOAA)先进高分辨率辐射计卫星在云顶观测到一条形状与飞机催化航迹相似的清晰折线云迹,并证实该云迹是由飞机人工增雨播云作业引起的(Rosenfeld et al., 2005; 余兴等, 2005; Yu et al., 2005; 戴进等, 2006)。French et al. (2018)和 Tessendorf et al. (2019)利用地面x波段天气雷达、机载w波段云雷达和云物理探测等设备开展冬季地形云人工增雪观测试验,发现了三次从播撒人工冰核到核化、冰晶生长再降到地面的完整微物理过程链,证明了冬季地形云播种增加降水的有效性。针对这三次增雪试验, Friedrich et al. (2020)从自然降水回波中分离出了人工增雪催化产生的回波,使用等效雷达回波反射率因子和降雪量的关系(Ze-S)量化了冬季地形云人工增雪量的时空演变。Dong et al. (2020, 2021)利用高性能增雨飞机在河北省开展了两次过冷云人工增雨试验,播云后,飞机观测结果表明云中云滴数浓度和液态含水量显著降低,冰雪晶粒子数浓度显著增加;卫星遥感观测显示与周围云相比,催化作业后的云体云顶亮温增加,可见光反射率减小;地面天气雷达和雨滴谱均观测到有短时降水发生。Wang et al. (2021)和岳志国等(2021)对陕西省一次飞机增雨作业后雷达回波增强和地面降水增加的云物理演变过程进行了分析,通过建立增雨影响回波强度Z和地面雨强I的拟合关系,定量研究了人工增雨的时空演变。

尽管上述研究提供了人工影响天气的直观物理证据,但目前通过将卫星、地面遥感与飞机观测等多源数据相结合,综合分析碘化银催化作业后云的时空演变特征方面的研究仍较缺乏,本文针对2022年1月河北中南部地区一次东风回流天气过程利用飞机观测、雷达和卫星遥感反演数据,研究分析了飞机催化作业后形成云迹的时空演变及微物理特征,通过比较云迹和周围未被催化作业云的微物理特征差异,详细了解了催化作业的物理响应。

85 2 观测数据

86 飞机观测数据主要来自空中国王 350 增雨飞机上搭载的大气与云粒子探测仪器, 仪器参
 87 数见表 1。主要包括: 快速云滴谱探头 (Fast Cloud Droplet Probe, FCDP)、云粒子图像探
 88 头 (Cloud Imaging Probe, CIP); Nevzorov 公司生产的总含水量热线仪, 可以测量云内液
 89 态水含量 (Liquid Water Content, LWC) 和总水含量 (Total Water Content, TWC), 不确
 90 定度为 15%(King et al., 1978); 飞机综合气象要素测量系统 (Aircraft Integrated Meteorological
 91 Measurement System, AIMMS-20)。由于仪器潜在不确定性, 在分析粒子数浓度时, FCDP
 92 的第一通道和最后一个通道的数据被舍弃, 选取粒径范围为 2~50 μm 的数据 (Yang et al.,
 93 2019; Zhao et al., 2019)。CIP 探头受景深问题限制, 100 μm 以下的粒子数据真实性较低,
 94 在分析粒子数浓度和粒子谱时, 只选取粒子直径大于 100 μm 的数据 (Korolev et al., 2007)。

95 表 1 机载探测仪器参数

96 Table 1 Airborne instrumentations and their operational parameters

仪器名称	探测功能	测量范围	分辨率	生产商
快速云滴谱探头 FCDP	云滴粒子数浓度、尺度谱、 云中含水量计算等	21 通道, 2~50 μm	1-4 通道, 1.5 μm	SPEC
			5-10 通道, 2 μm	
			11-18 通道, 3 μm	
			19-20 通道, 4 μm	
云粒子图像探头 CIP	大云滴、冰雪晶粒子数浓 度、尺度谱、粒子图像等	62 通道, 25~1550 μm	25 μm	DMT
总含水量热线仪 Nevzorov	液水含量、总水含量	0.005~3 $\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$	—	Nevzorov
综合气象要素测量系统 AIMMS-20	空速、高度、攻角、侧滑角、	海拔: 0~13.7 km	海拔: 18.3 m	Aventech
	GPS 等飞机飞行参数和气	温度: -50~50 $^{\circ}\text{C}$	温度: 0.3 $^{\circ}\text{C}$	
	压、温度、相对湿度等大气	相对湿度: 0~100%	相对湿度: 0.1%	
	环境参数			

97 注: *表示所有大于 50 μm 的粒子均归入该通道

98 FY-4A 卫星上的可见光红外成像辐射仪 (Advanced Geosynchronous Radiation Imager,
 99 AGRI) 由可见光/近红外波段、中红外波段、水蒸气波段和长波红外波段共 14 个观测通道
 100 组成。可见光和近红外波段的空间分辨率是 0.5~1.0 km, 红外波段的空间分辨率是 2~4 km,

在中国区域扫描时间间隔约为 5 min。各通道的指标和主要功能如表 2 所示（高顶，2018）。AGRI 获取的卫星产品分为两级，L1 级产品主要为各通道的反射率或亮温信息。L2 级产品是利用各通道数据反演的云相态、云顶高度、云光学厚度等云参数产品和大气类定量遥感产品。本文选取的原始数据主要有中心波段分别为 0.65 μm 、3.72 μm 的可见光波段和 10.8 μm 红外波段黑体亮温（Black Body Temperature, TBB）。由于 FY-4A 卫星在长波红外波段的分辨率较低，故本文使用的卫星云相态微物理彩色图（Rosenfeld and Lensky, 1998）为葵花 8 号卫星的 RGB 合成结果，即红色 R 为 0.64 μm 通道可见光反射率，绿色 G 为 3.9 μm 通道可见光反射率，蓝色 B 为 11.2 μm 通道亮温温度。

表 2 FY-4A 成像仪指标和主要功能

Table 2 Indicators and main function of FY-4A Imager

通道	波段/ μm	空间分辨/km	灵敏度	主要应用
可见光/近红外	0.45~0.49	1	90@100%	气溶胶
	0.55~0.75	0.5	150@100%	云，雾
	0.75~0.9	1	200@100%	植被
	1.36~1.39	2	150@100%	卷云
短红外	1.58~1.64	2	200@100%	云，雪
中红外	2.1~2.35	2	200@100%	云，气溶胶
	3.5~4.0 (high)	2	0.7K@300K	地表特征
	3.5~4.0 (low)	4	0.2K@300K	地表特征
水汽	5.8~6.7	4	0.2K@300K	水汽
	6.9~7.3	4	0.25K@300K	水汽
	8.0~9.0	4	0.2K@300K	水汽，云
长红外	10.3~11.3	4	0.2K@300K	海表温度，云
	11.5~12.5	4	0.2K@300K	海表温度，云
	13.2~13.8	4	0.2K@300K	云

石家庄 S 波段双偏振雷达（CINRAD-SA）位于新乐市（114.71 $^{\circ}\text{E}$ ，38.35 $^{\circ}\text{N}$ ），径向分辨率为 250 m，波速宽度为 1°，时间分辨率为 6 min，采用 9 个仰角的体积扫描模式观测。主要有雷达反射率因子、平均多普勒速度、速度谱宽、偏振等参量和融化层高度、水凝物相

态分类等产品。本文主要使用石家庄雷达探测的体扫数据和水凝物相态分类产品。天气形势分析使用欧洲中期数值预报中心（European Centre for Medium-Range Weather Forecasts, ECMWF）ERA5 再分析资料。

由于机载探测数据存储主机在飞行中发生故障，导致 08:17（世界时，下同）之后的探测数据未能存储，所以本文在分析云微物理特征时使用的仅为飞机开展催化作业前的大气与云粒子探测数据，而催化作业前后的云微物理响应分析主要是基于 S 波段双偏振雷达和卫星资料。

3 观测试验概况

3.1 天气背景

2022 年 1 月 20 日 06: 00 观测区上空 500 hPa 为脊前西北气流控制，高空云量较少，中低层 850~700 hPa 存在西南显著流线，风速达 10 m s^{-1} ，为河北中南部地区持续输送暖湿气流，低层相对湿度达 70%及以上，受中层逆温层影响湿层较为浅薄（图 1a）；海平面气压场上华北地区呈东北高、西南低气压形势（图 1b），高压中心位于我国东北地区，观测区 900 hPa 及以下为 $1\sim3\text{ m s}^{-1}$ 的弱偏东风回流，形成较为浅薄的“冷垫”，有利于低层水汽凝结抬升，同时西部太行山对低层偏东气流产生阻挡、抬升等地形作用，使得河北中南部地区低层有云系形成发展。

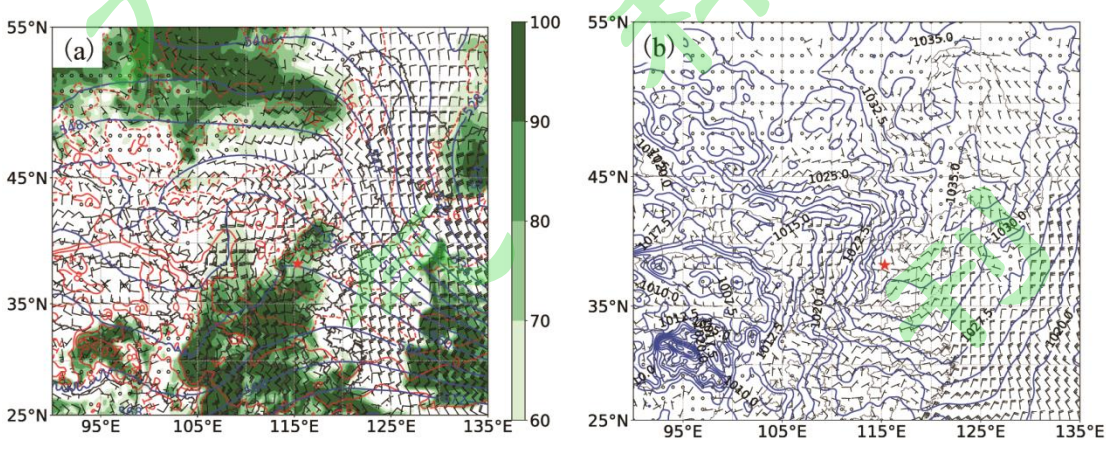


图 1 2022 年 1 月 20 日 06:00（世界时，下同）欧洲中心 ERA5 再分析资料天气形势：(a) 500 hPa 位势高度（蓝色等值线，单位：gpm）和 850 hPa 风场（风羽，单位： m s^{-1} ）、温度场（红色等值线，单位： $^{\circ}\text{C}$ ）和湿度场（填色，单位：%）；(b) 海平面气压场（蓝色等值线）和地面风场（风羽，单位： m s^{-1} ）。红色五角星为飞行观测区

Fig.1 Data reanalysed by European Centre for Medium-Range Weather Forecasts ERA-interim at 06:00 UTC

(Coordinated Universal Time) on January 20, 2022. (a) Geopotential height (blue contour line, units: gpm) at 500 hPa, and wind (barb, units: m s^{-1}), temperature (red contour line, units: $^{\circ}\text{C}$) and relative humidity field (shaded, units: %) at 850 hPa; (b) Sea surface pressure (blue contour line, units: hPa) and wind field (barb, units: m s^{-1}). The red five-pointed stars show the observation area

3.2 观测方案

1月20日06:45空中国王350增雨飞机从石家庄正定国际机场起飞，2100 m高度平飞至观测区（如图2所示），07:19~07:43从4800 m到600 m盘旋下降进行垂直探测。垂直探测后上升至2100 m，07:56~08:11在观测区内进行南北向催化作业（催化带1，紫色实线），风向 240° ，风速 7 m s^{-1} ，催化距离约72 km，共燃烧碘化银烟条18根，碘化银在环境温度接近 -17°C 的环境下以 0.338 g s^{-1} 的播撒速率燃烧；08:28~08:40保持2100 m高度在观测区上空以长约12 km，宽约4 km的椭圆形催化方式进行第二次作业（催化带2，红色实线），共燃烧16根碘化银烟条，播撒速率为 0.6 g s^{-1} ，飞机于09:19落地。

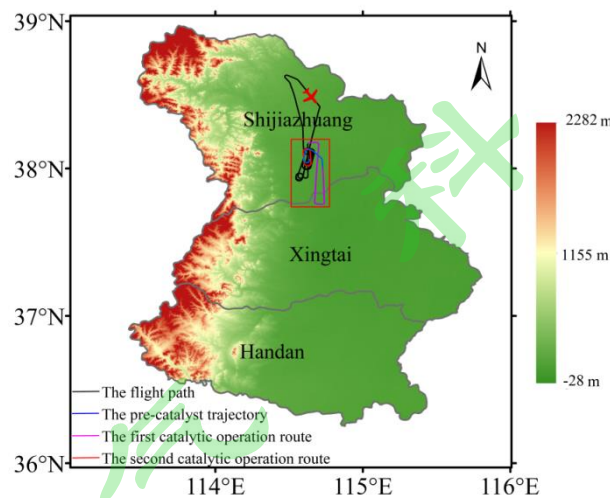


图2 地形图与飞行轨迹叠加：黑色实线表示飞行轨迹，蓝色实线表示07:50~07:56催化前轨迹，紫色实线表示第一次催化作业航线，红色实线表示第二次催化作业航线，红色飞机图标表示石家庄正定国际机场，红色框线表示观测区

Fig.2 The topography of field experiment region and the aircraft flight path on January 20, 2022. The solid black line represents the flight path. The solid blue line represents the pre-catalyst trajectory from 07:50~07:56. The purple solid line and the red solid line represent the first and second catalytic operation route, respectively. The red aircraft icon represents the Shijiazhuang Zhengding International Airport, and the red frame line represents the

4 结果分析

4.1 云微物理垂直结构特征

07:19~07:43 飞机在观测区从 4800 m 盘旋下降至 600 m 进行了云的垂直探测, 温度 -24.4~-7.3 °C, 同时也探测到 2100~2300 m 存在一明显的逆温层。定义当 FCDP 探头观测到的云粒子数浓度 $>10\text{ cm}^{-3}$ 时, 可判定云的出现, 由图 3a~c 可见, 1400~2100 m 存在低云, 温度范围为 -17.4~-14.3 °C, FCDP 观测的云粒子数浓度最大为 702 cm^{-3} , 均值为 235 cm^{-3} 。Nevzorov 探头观测的云内液态含水量的平均值为 0.06 g m^{-3} , 最大为 0.15 g m^{-3} , FCDP 和液态含水量均随高度降低整体呈减小趋势。逆温层底部 (2100 m) 过冷水含量达到峰值, 逆温层对乱流发展起阻滞作用, 乱流减弱造成含水量聚集, 形成过冷水峰值区。由图 3d 可以看出, 1400~2100 m 高度直径大于 $100\text{ }\mu\text{m}$ 的冰雪晶粒子, 平均粒子数浓度为 0.74 L^{-1} , 最大粒子数浓度为 2.3 L^{-1} , 可见该层主要由过冷云滴组成。

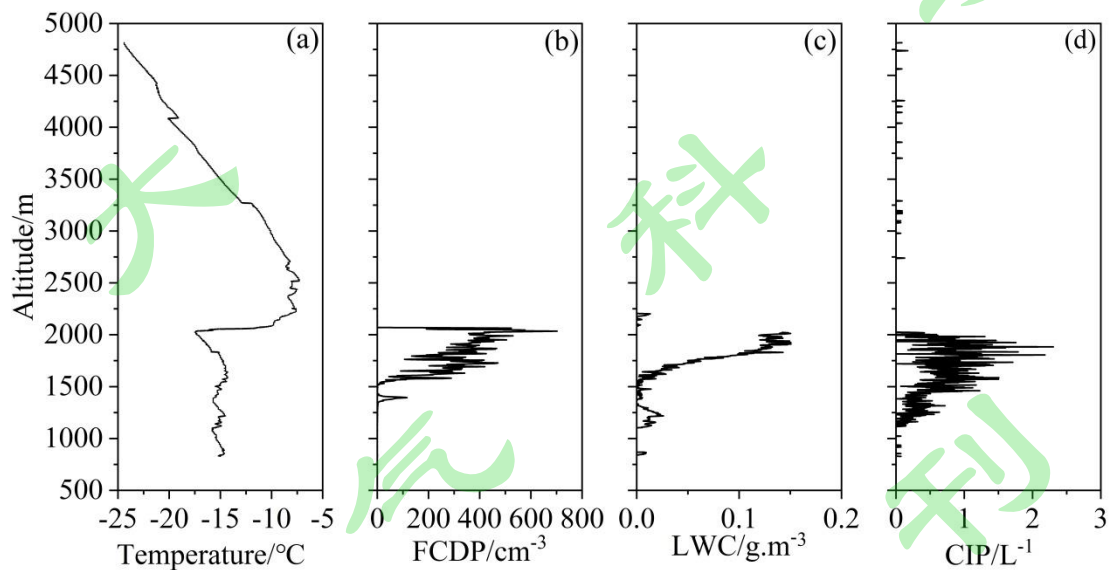


图 3 观测区栾城上空垂直探测阶段观测数据: (a) 温度; (b) FCDP; (c) LWC; (d) CIP

Fig. 3 Data collected along the vertical flight path over Luancheng in the observation area: (a) Temperature; (b) FCDP; (c) LWC; (d) CIP

从云底、云中、云顶的粒子谱图可见 (图 4), FCDP 观测的云滴粒子谱呈单峰分布, 峰值对应的云滴粒子直径为 $10\sim12\text{ }\mu\text{m}$, 云顶的谱峰粒子数浓度比云底高约 1 个量级, 云顶和云中的云滴谱宽大于云底, 云底云滴谱表现为初始活化形态, 大量小云滴开始形成, 尺度基本集中在 $10\text{ }\mu\text{m}$ 以下, 受地形抬升作用影响, 随着高度的升高云滴通过凝结过程快速增长,

逐渐有大于 $20\ \mu\text{m}$ 的大云滴生成。CIP 观测的冰雪晶粒子谱同样呈单峰分布,随着高度降低,冰雪晶粒子谱峰数浓度逐渐减小,云顶处冰雪晶粒子谱谱宽低于云中和云底,1800 m 高度粒子谱谱宽最大达到 $275\ \mu\text{m}$ 。

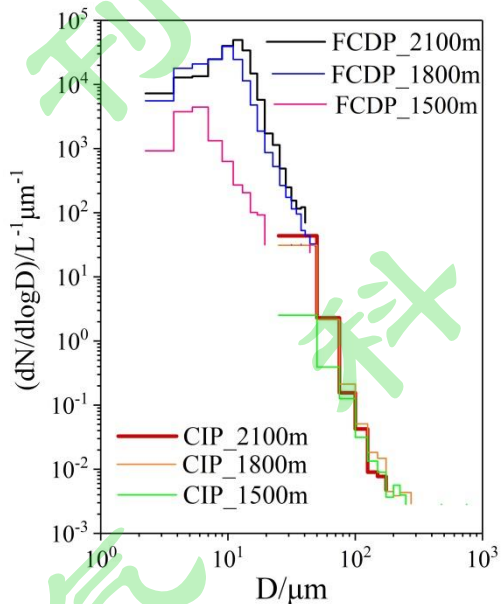


图 4 不同高度层 FCDP 和 CIP 观测的粒子谱: 黑色、蓝色和紫色分别为 FCDP 观测的 2100 m、1800 m 和 1500 m 粒子谱, 红色、橙色和绿色分别为 CIP 观测的 2100 m、1800 m 和 1500 m 粒子谱

Fig.4 FCDP and CIP particle spectra observed at different levels: The black, blue and purple represent the 2100 m, 1800 m and 1500m particle spectra observed by FCDP, respectively. The red, orange and green solid line represent the 2100 m, 1800 m and 1500 m particle spectra observed by CIP, respectively

由图 5 07:50~07:56 催化作业前飞机在 2100 m 高度水平飞行时观测的各物理量的水平变化可见, 2100 m 高度层温度平均约 -17°C (图 5a 红色实线), 云滴粒子数浓度最大为 $533\ \text{cm}^{-3}$, 均值为 $389\ \text{cm}^{-3}$ (图 5a 黑色实线); 冰雪晶粒子数浓度不超过 $3.3\ \text{L}^{-1}$, 平均粒子数浓度为 $0.9\ \text{L}^{-1}$ (图 5b); 云内液态含水量最大为 $0.11\ \text{g m}^{-3}$, 平均值约 $0.07\ \text{g m}^{-3}$ (图 5c)。从图 5d 可见, 云滴粒子谱呈现单峰结构, 谱宽大都不超过 $40\ \mu\text{m}$, 谱峰在 $15\ \mu\text{m}$ 以下; 从冰雪晶粒子谱 (图 5e) 可看出, 2100 m 高度冰晶粒子直径不超过 $200\ \mu\text{m}$, 这表明云顶处的冰粒子主要集中在 $100\sim 200\ \mu\text{m}$ 。由此可见, 观测区云顶处主要以液态云滴为主, 缺少尺度超过毫米量级的冰雪晶粒子。

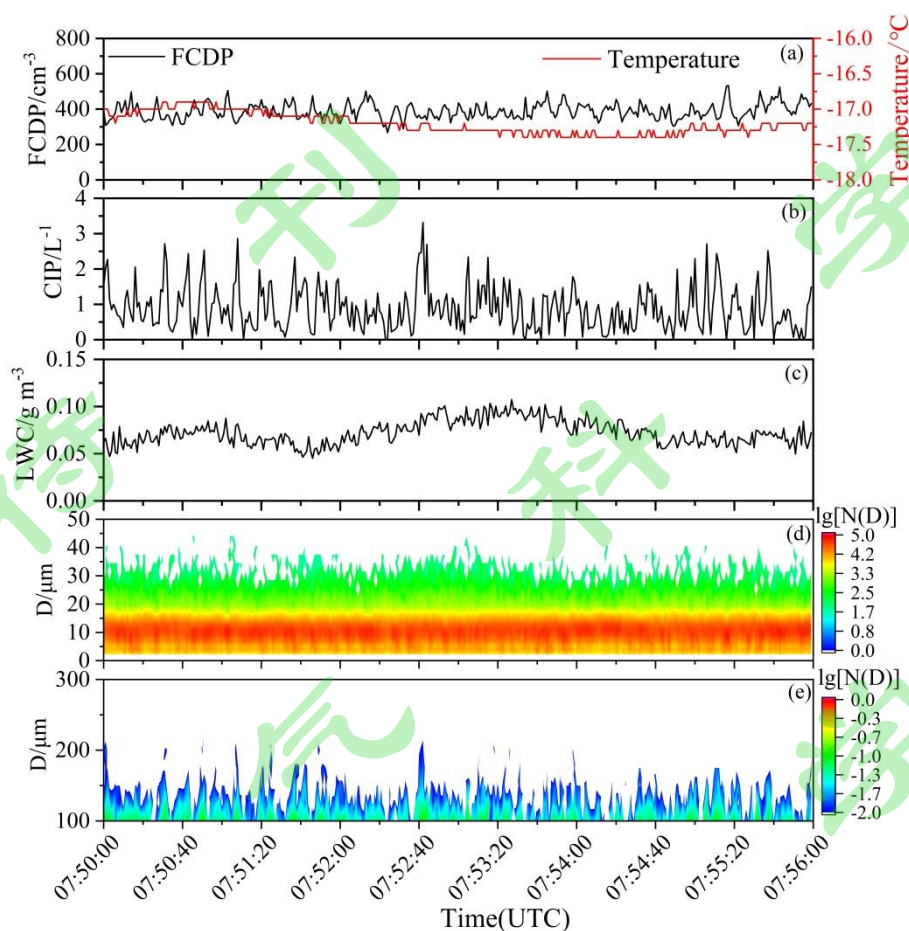


图 5 07:50~07:56 催化作业前飞机在 2100 m 高度水平飞行时观测的数据：（a）温度（红色实线）和 FCDP 观测的粒子数浓度（黑色实线）；（b）CIP 观测的粒子数浓度；（c）LWC；（d）FCDP 观测的粒子谱；（e）CIP 观测的粒子谱

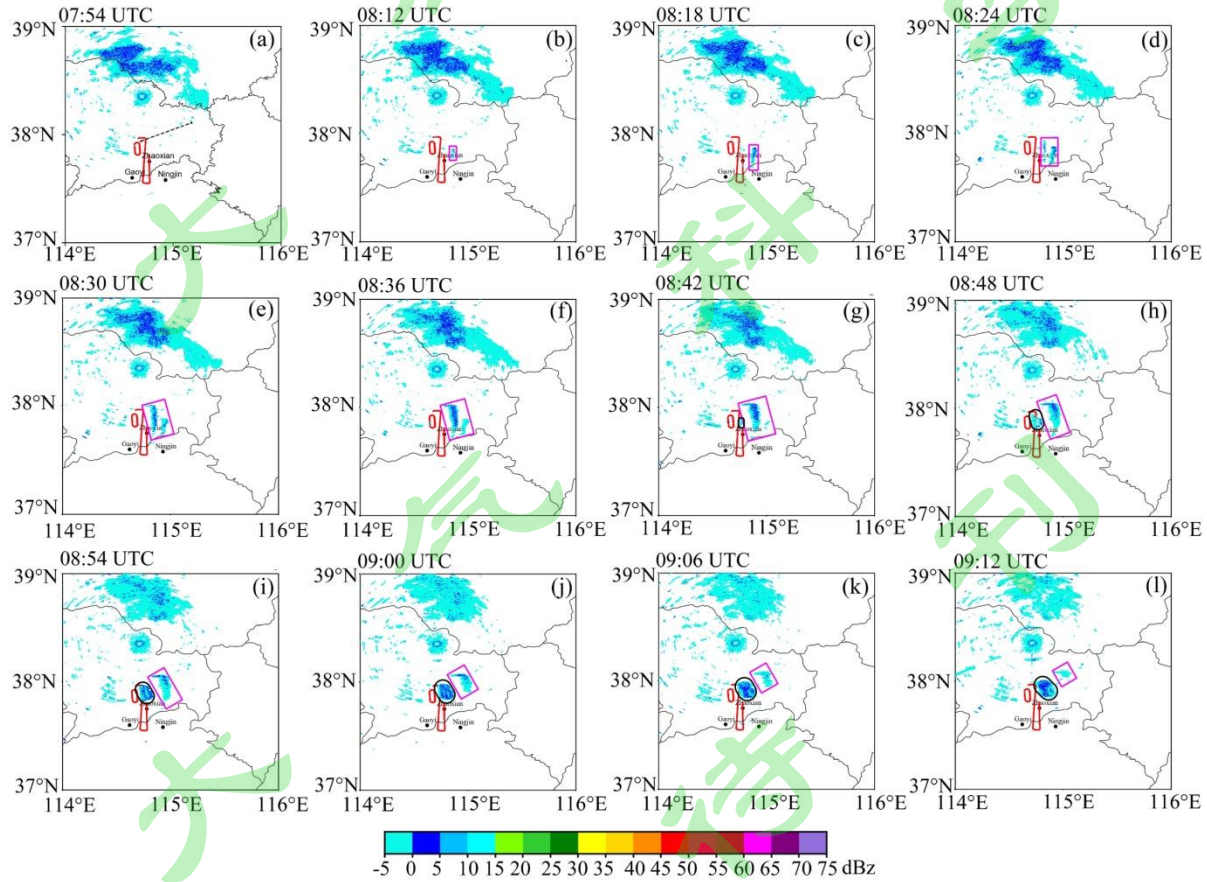
Fig.5 Data collected by the aircraft while flying horizontally at the height of 2100 m before catalytic operation at 07:50~07:56 UTC: (a) temperature (solid red line) and particle number concentration N measured by FCDP (solid black line); (b) particle number concentration N measured by CIP; (c) LWC; (d) FCDP instantaneous spectrum; (e) CIP instantaneous spectrum

4.2 雷达、卫星观测的云物理响应

4.2.1 雷达回波演变

图 6 为石家庄 S 波段双偏振雷达 1.5° 仰角回波分布随时间的变化。由图 5 可知，催化作业前，观测区内云顶处主要以 $15\ \mu\text{m}$ 以下的液态云滴为主，缺少尺度超过毫米量级的冰雪晶粒子，故石家庄 S 波段双偏振多普勒天气雷达的 PPI (1.5°) 回波图上并未显示有回波（图 6a）。飞机于 07:56~08:11 以“几”字形开始第一次催化作业，点燃碘化银烟条 18 根（催化轨迹见图 6 红色实线）。在第一次催化作业约 16 min 后（08:12），由于受碘化银催化作

246 业影响，过冷水滴形成较大的冰晶粒子并下落，雷达 1.5°仰角 PPI 图上开始出现与飞机催化
 247 轨迹相似的第一条雷达回波带（图 6b）。随着催化剂的扩散，催化作业形成的雷达回波显
 248 示更大更宽。催化作业 22 min 后（08:18）第一条催化作业形成的雷达回波带回波强度达到
 249 最强，催化作业形成的雷达回波长约 14.5 km，回波强度最大约 5 dBz（图 6c），此时作业
 250 高度高空风风向 240°，风速 7 m s^{-1} ，经计算，催化后粒子扩散影响区位置约位于第一次催
 251 化作业轨迹的 8 km 处，与雷达显示的催化产生的回波带位置一致。催化作业 40 min 后（08:36）
 252 催化作业形成的第二条雷达回波带回波强度达到最强，回波长约 33 km，回波强度最大约 10
 253 dBz（图 6f）。09:30 雷达回波消散，催化作业形成的雷达回波持续了 78 min。
 254 飞机于 08:28~08:40 以椭圆形开始第二次催化作业，共点燃碘化银烟条 16 根，催化作
 255 业 14 min 后（08:42）开始出现催化作业形成的雷达回波（图 6g），催化作业 32 min 后（09:00）
 256 雷达回波最强，长 16 km，宽 9 km，回波强度最大约 15 dBz（图 6j），在西南风盛行下，
 257 催化作业形成的雷达回波由西南往东北移动，09:54 雷达回波消散，催化作业形成的雷达回
 258 波持续约 72 min，移动约 25 km。



259 图 6 石家庄 S 波段双偏振雷达 1.5° 仰角回波分布随时间的变化：红色实线表示催化轨迹，粉色矩形框和
 260 黑色椭圆框内分别为催化带 1 和催化带 2 的雷达回波，图 6a 中的黑色虚线表示沿点(114.703°E, 37.939°N)

和点 (115.169 °E, 38.108 °N) 的剖面线

Fig.6 Time evolution of 1.5 °elevation echo distribution of S-band dual polarization radar (CINRAD-SA) in Shijiazhuang. The red solid line represents the operation route. The radar echoes of catalytic band 1 and catalytic band 2 are displayed in the pink rectangular box, and black elliptical box, respectively. The black dashed line in Figure 6a represents the cross-sectional line along points (114.703 °E, 37.939 °N) and (115.169 °E, 38.108 °N)

图 7 为沿点 (114.703 °E, 37.939 °N) 和点 (115.169 °E, 38.108 °N) 平行于风向方向的 08:54~09:12 雷达回波垂直剖面图, 可见自 08:54 至 09:00 雷达回波逐渐增强, 并向东移动, 最大值由 6.3 dBz 增加到 14.1 dBz (图 7a, 7b), 催化作业 38 min 后 (09:06, 图 7c) 随着粒子的增长和下降, 雷达回波在垂直方向上向低层发展。相比 09:00 (图 7b), 雷达回波约下降了 700 m, 据此可估计水凝物的下落速度约为 1.9 m s^{-1} , 因此水凝物有可能由聚合物和霰粒子组成 (Kajikawa, 1982; Locatelli and Hobbs, 1974; 武静雅等, 2021)。09:12 (图 7d) 雷达回波减弱并开始消散, 反射率最大值由 8.3 dBz 降低至 4.8 dBz (09:18, 图略)。

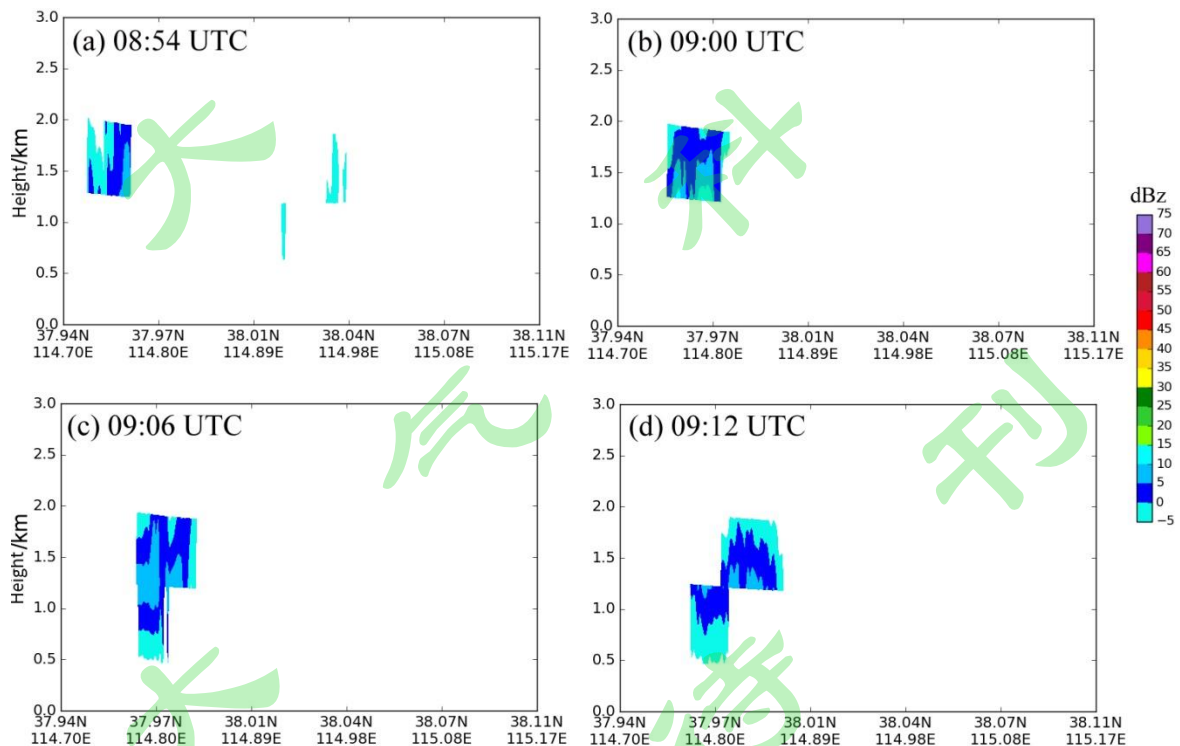


图 7 沿点 (114.703 °E, 37.939 °N) 和点 (115.169 °E, 38.108 °N) 平行于风向方向的 08:54~09:12 雷达回波垂直剖面图: (a) 08:54; (b) 09:00; (c) 09:06; (d) 09:12

Fig.7 The vertical cross section of radar reflectivity along the point (114.703 °E, 37.939 °N) and the point (115.169 °E, 38.108 °N), which is parallel to the wind direction at 08:54 ~ 09:12 UTC. (a) 08:54 UTC; (b) 09:00 UTC; (c) 09:06 UTC; (d) 09:12 UTC

图 8 进一步分析了 09:06 石家庄 S 波段双偏振多普勒雷达 1.5°仰角测定的云粒子相态，可以看出催化作业后主要云相态为冰、雪和少量霰粒子，说明在含有过冷液态水的区域进行播撒，受碘化银核化影响，过冷云滴迅速形成冰晶，经过凝华增长、淞附和碰撞-聚并等过程，冰晶进一步长大形成大的冰雪晶粒子下落。

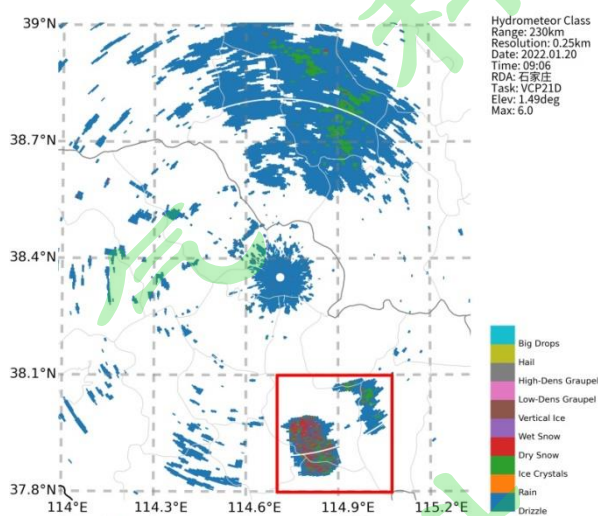


图 8 09:06 S 波段双偏振多普勒雷达 1.5°仰角识别的粒子相态：红色框线为催化影响区域

Fig.8 The partical shape identified with the 1.5°elevation of S-band dual-polarization Doppler weather rader at 09:06 UTC. The red frame line represents the catalytic impact area

4.2.2 卫星观测

0.65 μm 通道可见光波段观测的是来自地表和云反射的太阳辐射，云反射率反映了云光学厚度； 3.72 μm 通道中红外波段观测的是地表和云反射的太阳辐射以及发射的长波辐射，其反射太阳辐射的强度与云滴的大小有关； 10.8 μm 通道的远红外波段观测的是地表和云发射的长波辐射，可反映云顶亮温（刘贵华等，2012）。

图 9 为 07:50 和 08:30 云相态微物理反演图，按照 Rosenfeld and Lensky (1998) 提出的微物理方案，黄色为较厚的过冷水云，红色表示冰云，淡绿色表示较薄的过冷水云或小冰粒子组成的薄云。从葵花 8 号卫星多光谱彩色合成图上可见，催化作业前 07:50 (图 9a) 观测区云顶以过冷水为主，催化作业后 08:30 (图 9b) 催化航迹的东北部观测到催化产生的“云沟”，两条云迹线分别呈淡绿色和红色，说明催化作业后云顶形成了冰晶粒子 (Lensky and Rosenfeld, 2008, Rosenfeld et al., 2014)。

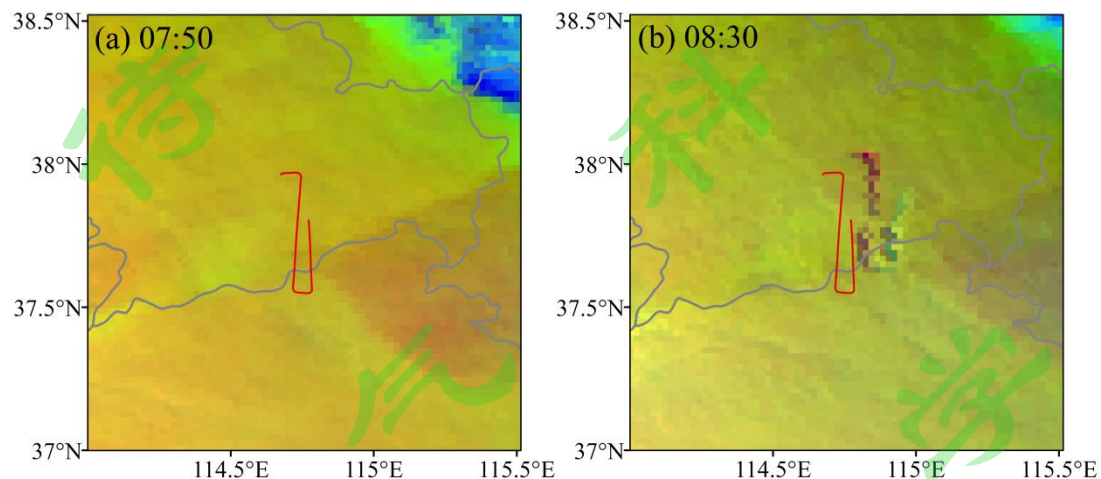


图 9 07:50 和 08:30 葵花 8 号卫星云相态微物理彩色图：(a) 07:50；(b) 08:30. RGB 合成时红色 R 为 0.64 μm 通道可见光反射率，绿色 G 为 3.9 μm 通道可见光反射率，蓝色 B 为 11.2 μm 通道亮温温度。红色实线表示 07:56~08:11 的催化轨迹

Fig.9 The RGB composite image of the seeding track from the cloud phase microphysical Himawari-8 satellite retrieval at 07:50 和 08:30 UTC. R, G and B are 0.64 μm (red) and 3.9 μm (green) reflectance and 11.2 μm brightness temperature (blue). The red and black solid lines represent the catalytic trajectories at 07:56~08:11 UTC respectively

图 10a、d 分别为 07:53 和 08:30 FY-4A 卫星 0.65 μm 的反射率。由图 10a 可见，飞机催化作业前 FY-4A 卫星 0.65 μm 反射率没有明显的变化，催化作业后可以看到两条清晰的云迹线，与播云线 (红色实线) 相似 (图 10d)；从 0.65 μm 反射率随时间的变化分布，可以看出催化作业 19 min 后 (08:15) FY-4A 卫星接收资料显示云顶形成了两条与播云线相似的云迹线，第一条云迹线约 09:00 消失，持续 45 min，第二条云迹线约 09:15 消失，持续约 1 h。第二次催化作业 17 min 后 (08:45)，卫星显示椭圆形云沟，约 09:50 该云沟消失，持续约 1 h 5 min。云迹线自西南向东北移动(图略)。图 10b、e 分别为催化作业前后 3.72 μm 的反

射率，催化作业前无明显变化，催化作业后云迹线的反射率值低于周围云的反射率值，呈现黑色，因为在该通道冰对太阳辐射的强烈吸收使得冰晶化云迹线明显。图 10c、f 分别为催化作业前后 10.8 μm 黑体亮温变化，相比图 10c，催化作业后云迹线处的黑体亮温升高（图 10f）。催化作业后，受碘化银核化影响，过冷水滴形成冰晶粒子，冰晶粒子逐渐长大并下落，导致在云顶形成了一条云沟，云顶高度降低，温度升高。

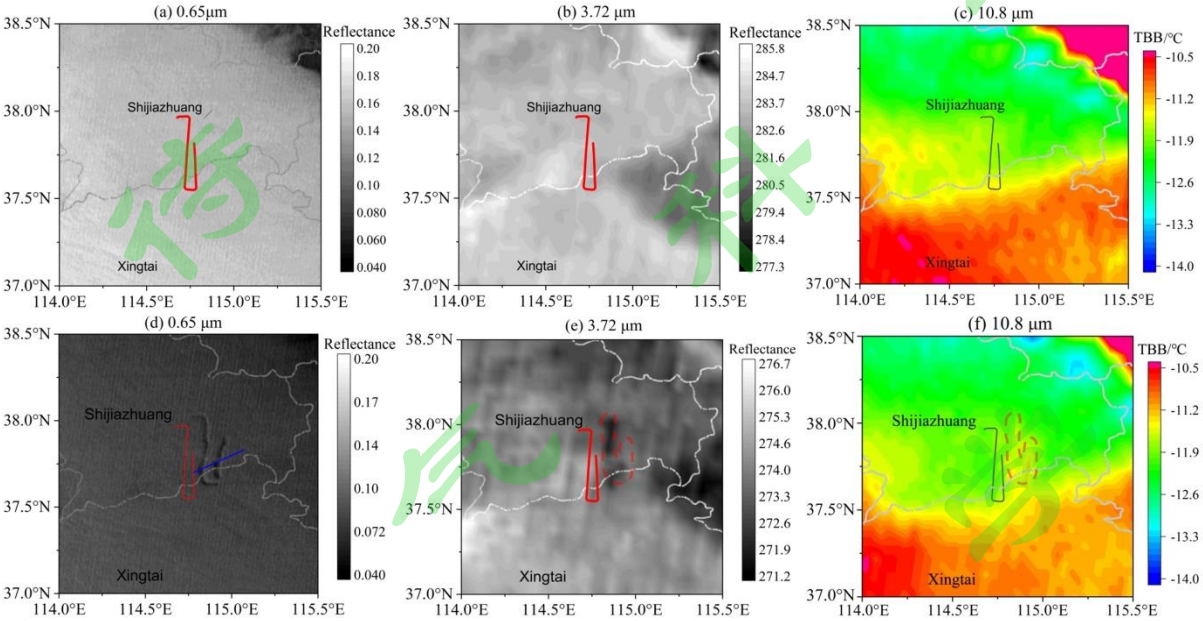


图 10 飞机催化作业前后 FY-4A 卫星观测：(a)~(c) 和 (d)~(f) 分别表示 07:53 和 08:30 的 0.65 μm 反射率、3.72 μm 反射率、10.8 μm 黑体亮温变化。红色和黑色实线表示 07:56~08:11 的催化轨迹，蓝色实线表示剖面线，红色虚线框内为云迹线的位置

Fig.10 Parameters observed by FY-4A satellite before and after aircraft catalytic operation. (a)~(d) and (e)~(h) represent 0.65 μm reflectance, 3.72 μm reflectance and 10.8 μm cloud top brightness temperature at 07:53 UTC and 08:30 UTC, respectively. The red and black solid lines represent the catalytic trajectories at 07:56~08:11 UTC respectively, and the blue solid line represents the profile line. The dotted red box shows the location of cloud trails formed by the catalytic operation

为了深入分析云沟内与周围未被催化作业云的微物理特征的差异，图 11 给出了图 10d 中剖面（蓝色实线）上 08:30 云沟周围和云沟内 0.65 μm 、3.72 μm 通道上的光谱反射率和 10.8 μm 亮温的分布情况。与邻近过冷云相比，云沟内（图 11 浅蓝色阴影）0.65 μm 通道的光谱反射率增加，而 3.72 μm 通道反射率降低，这是因为在 0.65 μm 通道冰粒子的反照率大于水的反照率，而在 3.72 μm 通道冰粒子对太阳光的吸收一般是水的 2 倍。掉落的冰晶在云

层中形成一个沟槽，导致云层顶部温度升高最大约 0.8 °C（图 11 红色实线），这是因为云催化后过冷水滴被消耗产生冰晶，该过程释放出额外的能量来加热云层。此外，冰晶的出现提高了碰撞聚并的效率，形成降水粒子下落。云水的减少使得来自地面的热辐射更多地穿过云传递，从而提高了卫星观测到的云的亮温。随着云沟内冰晶化时间的增加，云体变薄，使得在最早催化部位（图中 section1）云沟内的亮温大于较晚催化部位（图中 section2）云沟内的亮温。

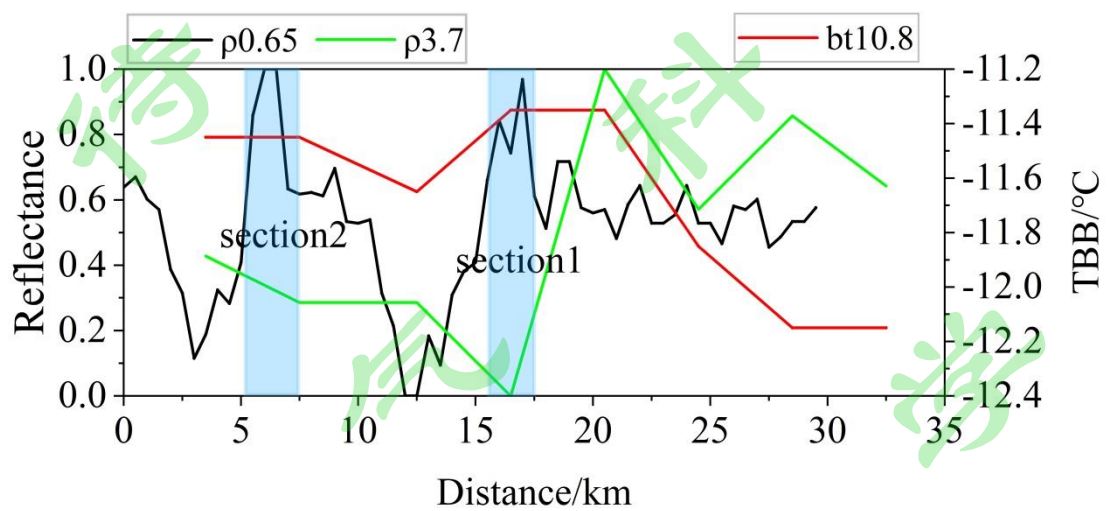


图 11 对应于图 10d 剖面的云迹特征：黑线和绿色实线分别表示标准化的 0.65 μm 和 3.72 μm 通道反射率，红色实线表示 10.8 μm 通道亮温，section1 表示第一次催化作业形成的云迹位置，section2 表示第二次催化作业形成的云迹位置，用浅蓝色阴影表示

Fig.11 Microphysical properties of the seeding track and its surrounding clouds for the cross section (marked with blue solid line in Figure 9a). The normalized 0.65 and 3.72 μm reflectances are shown as black and green lines, respectively. The 10.8 μm brightness temperatures is shown in red line, respectively. The section1 represents the location of cloud trails formed by the first catalytic operation, and the section2 represents the location of cloud trails formed by the second catalytic operation, which are represented by light blue shadows

5 结论与讨论

通过搭载云微物理探测系统的高性能增雨飞机采用垂直盘旋下降的探测方式，结合天气雷达、卫星等资料，重点分析了 2022 年 1 月 20 日华北一次过冷层状云的微物理特征及人工增雨播云作业后的物理响应，得出以下结论：

(1) 受西南暖湿气流和东风回流共同影响，观测区 1400~2100 m 有低云形成，飞机观

测结果显示该层主要由过冷云滴组成, 液态含水量最大可达 0.15 g m^{-3} 。云滴谱在云底表现为初始活化状态, 大量小云滴开始形成, 尺度基本集中在 $10 \mu\text{m}$ 以下, 受地形抬升作用影响, 随着高度的升高, 云滴通过凝结过程快速增长至 $20 \mu\text{m}$ 以上。冰雪晶粒子谱呈单峰分布, 谱宽为 $275 \mu\text{m}$ 。

(2) 在含有过冷液态水的区域进行播撒, 受碘化银核化影响, 过冷云滴迅速形成冰晶, 经过凝华增长、淞附和聚合碰并等过程, 冰晶进一步长大形成大的冰雪晶粒子下落。云顶催化作业后, 雷达回波增强, 云粒子平均需要约 15 min 才能增长到足够大以便被雷达识别, 持续时间约 75 min 。

(3) 播云后过冷云滴形成冰晶粒子, 冰晶粒子逐渐长大并下落, 造成云顶下沉, 云顶亮温升高, FY-4A 卫星观测显示 $17\sim 19 \text{ min}$ 后在云顶附近逐渐形成一条云沟, 持续约 55 min 。

本文利用高性能增雨飞机观测数据研究了地形抬升作用对华北云系微物理机制的影响, 基于地面 S 波段双偏振雷达和卫星观测资料对比分析了飞机在增雨作业前后云系的物理响应, 为人工催化后云微物理响应提供了直接证据, 对于人工影响天气作业效果评估有重要的参考价值。遗憾的是对于本次播云作业, 由于催化作业后飞机观测资料缺失, 无法与地面 S 波段双偏振雷达和卫星观测资料相互印证。Dong et al. (2021) 利用飞机开展过冷云人工增雨试验后, 地面雨滴谱观测到有 0.04 mm 的短时降水发生。本次播云作业地面未观测到降水, 原因可能是: (1) 冰雪晶粒子增长地不够大, 在云中湍流场的环境中没能最终降落到地面; (2) 地面降水观测站点的空间分辨率不高, 非观测站点处的地面零星降水没有被观测到。今后仍需继续探索, 设计充分科学的飞机人工增雨试验, 结合空基、地基、机载等多源云微物理观测设备综合分析华北云系微物理特征及人工催化后的物理效果, 提高中国人工增雨效果评估的科学水平。

致谢 本文试验所用数据来源于中国气象局邢台大气环境野外科学试验基地, 感谢几位审稿专家给予的指导!

参考文献 (References)

- 蔡兆鑫, 蔡淼, 李培仁, 等. 2019. 大陆性积云不同发展阶段宏观和微观物理特性的飞机观测研究[J]. 大气科学, 43(6): 1191-1203. Cai Zhaoxin, Cai Miao, Li Peiren, et al. 2019. Aircraft observation research on macro and microphysics characteristics of continental cumulus cloud at different development stages [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 43(6): 1191-1203.
- 戴进, 余兴, Rosenfeld D, 等. 2006. 一次过冷层状云催化云迹微物理特征的卫星遥感分析[J]. 气象学报, 64(5): 622-630. Dai Jin, Yu Xing, Rosenfeld D, et al. 2006. Analysis of satellite observed microphysical signatures of cloud seeding tracks in

394 supercooled layer clouds [J]. *Acta Meteorological Sinica* (in Chinese), 64(5): 622-630.

395 Dong X B, Zhao C F, Yang Y, et al. 2020. Distinct change of supercooled liquid cloud properties by aerosols from an
396 aircraft-based seeding experiment [J]. *Earth. Space. Sci.*, 7(8): e2020EA001196.

397 Dong X B, Zhao C F, Huang Z C, et al. 2021. Increase of precipitation by cloud seeding observed from a case study in November
398 2020 over Shijiazhuang, China [J]. *Atmos. Res.*, 262(5): 105766.

399 段婧, 楼小凤, 卢广献, 等. 2017. 国际人工影响天气技术新进展[J]. *气象*, 43(12): 1562-1571. Duan Jing, Lou Xiaofeng, Lu
400 Guangxian, et al. 2017. International recent progress in weather modification technologies [J]. *Meteorological Monthly* (in
401 Chinese), 43(12): 1562-1571.

402 封秋娟, 牛生杰, 侯团结, 等. 2021. 山西一次降雪云物理特征的飞机观测研究[J]. *大气科学*, 45(5): 1146-1160. Feng
403 Qiujuan, Niu Shengjie, Hou Tuanjie, et al. 2021. Aircraft-based observation of the physical characteristics of snowfall cloud in
404 Shanxi province [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 45(5): 1146-1160.

405 French J R, Friedrich K, Tessendorf S A, et al. 2018. Precipitation formation from orographic cloud seeding [J]. *Proc. Natl. Acad.*
406 *Sci. USA.*, 115(6): 1168-1173.

407 Friedrich K, Ikeda K, Tessendorf S A, et al. 2020. Quantifying snowfall from orographic cloud seeding [J]. *Proc. Natl. Acad. Sci.*
408 *USA.*, 117(10): 5190-5195.

409 高顶. 2018. 基于 FY-4A 卫星的云底高度反演与应用研究[D]. 国防科学技术大学硕士学位论文. Gao Ding. 2018. Research
410 on cloud base height retrieval and application based on FY-4A [D]. M. S. thesis (in Chinese), National University of Defense
411 Technology.

412 郭学良. 2010. 大气物理与人工影响天气 [M]. 北京: 气象出版社, 618-620. Guo Xueliang. 2010. *Atmospheric physics and*
413 *weather modification* (in Chinese) [M]. Beijing: China Meteorological Press, 618-620.

414 郭学良, 付丹红, 郭欣, 等. 2021. 我国云降水物理飞机观测研究进展[J]. *应用气象学报*, 32(6): 641-652. Guo Xueliang, Fu
415 Danfeng, Guo Xin, et al. 2021. Advances in aircraft measurements of clouds and precipitation in China [J]. *Journal of Applied*
416 *Meteorology* (in Chinese), 32(6): 641-652.

417 Kajikawa M. 1982. Observation of the falling motion of early snow flakes. Part I. Relationship between the free-fall pattern and
418 the number and shape of component snow crystals [J]. *J. Meteor. Soc. Japan.*, 60(2): 797-803.

419 King W D, Parkin D A, Handsworth R J. 1978. Hot-wire liquid water device having fully calculable response characteristics [J].
420 *J. Appl. Meteor.*, 17(12), 1809-1813.

421 Korolev A. 2007. Reconstruction of the sizes of spherical particles from their shadow images. Part I: Theoretical Considerations
422 [J]. *J. Atmos. Ocean. Tech.*, 24(3): 376-378.

423 雷恒池, 洪延超, 赵震, 等. 2008. 近年来云降水物理和人工影响天气研究进展[J]. *大气科学*, 32 (4):967-974. Lei Hengchi,

424 Hong Yanchao, Zhao Zhen, et al. 2008. Advances in cloud and precipitation physics and weather modification in recent years [J].
 425 Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 2008, 32(4):967-974.
 426 Lensky I M, Rosenfeld D. 2008. Clouds-aerosols-precipitation satellite analysis tool (CAPSAT) [J]. Atmos. Chem. Phys. Discuss.,
 427 8(22): 6739–6753.
 428 刘贵华, 余兴, 岳治国, 等. 2012. 卫星遥感人工增雨作业条件 II: 层状云[J]. 气候与环境研究, 17(6): 758-766. Liu Guihua,
 429 Yu Xing, Yue Zhiguo, et al. 2012. Seeding conditions of precipitation enhancement revealed by multiple spectral data of satellite.
 430 II: Super-cooled layer clouds [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 17(6): 758-766.
 431 Locatelli J D, Hobbs P V. 1974. Fall speeds and masses of solid precipitation particles [J]. J. Geophys. Res., 79(15): 2185–2197.
 432 吕玉环, 雷恒池, 魏蕾. 2021. 中国北方典型地区不同类型云微物理特征分析[J]. 气象科技, 49(3): 455-463. Lv Yuhuan, Lei
 433 Hengchi, Wei Lei. 2021. Analysis of vari-type cloud microphysical properties in typical areas of northern China [J].
 434 Meteorological Science and Technology (in Chinese), 49(3): 455-463.
 435 彭冲, 宋灿, 蔡淼. 2023. 河南一次罕见飞机积冰过程云系宏微观特性的综合观测研究[J]. 大气科
 436 学. doi: 10.3878/j.issn.1006-9895.2208.21044A. Peng Chong, Song Can, Cai Miao. 2023. Comprehensive study of the cloud
 437 macro- and micro- structure of a rare aircraft icing case in Henan [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese). doi:
 438 10.3878/j.issn.1006-9895.2208.21044A.
 439 元鹏, 郭学良, 卢广献, 等. 2019. 华北太行山东麓一次稳定性积层混合云飞机观测研究: 对流云/对流泡和融化层结构特
 440 征[J]. 大气科学, 43(6): 1365-1384. Qi Peng, Guo Xueliang, Lu Guangxian, et al. 2019. Aircraft measurements of a stable
 441 stratiform cloud with embedded convection in eastern Taihang mountain of North China: characteristics of embedded convection
 442 and melting layer structure [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 43(6): 1365-1384.
 443 Rosenfeld D, Lensky I M. 1998. Satellite-based insights into precipitation formation processes in continental and maritime
 444 convective clouds [J]. Bull. Amer. Meteor. Soc., 79(11), 2457–2476.
 445 Rosenfeld D, Yu X, Dai J. 2005. Satellite-retrieved microstructure of AgI seeding tracks in supercooled layer clouds [J]. J. Appl.
 446 Meteor., 44(6): 760-767.
 447 Rosenfeld D, Liu G, Yu X, et al. 2014. High-resolution (375 m) cloud microstructure as seen from the NPP/VIIRS satellite
 448 imager [J]. Atmos. Chem. Phys., 14(5), 2479–2496.
 449 Rossow W B, Schiffer R A. 1999. Advances in understanding clouds from ISCCP [J]. Bull. Amer. Meteor. Soc., 80(11):
 450 2261-2287.
 451 沙修竹, 褚荣浩, 黄毅梅. 2022. 人工增雨效果物理检验方法的建立及应用[J]. 大气科学, 46(4): 819-834. Sha Xiuzhu, Chu
 452 Ronghao, Huang Yimei. 2022. Establishment and application of a physical inspection method for the artificial precipitation
 453 enhancement effect [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 46(4): 819-834.

454 孙玉稳, 董晓波, 李宝东, 等. 2019. 太行山东麓一次低槽冷锋降水云系云物理结构和作业条件的飞机观测研究[J]. 高原
 455 气象, 38(5): 971-982. Sun Yuwen, Dong Xiaobo, Li Baodong, et al. 2019. The physical properties and seeding potential
 456 analysis of a low trough cold front cloud system at Mountain Taihang based on aircraft observations [J]. Plateau Meteorology,
 457 38(5): 971-982.

458 Tessendorf S A, French J R, Friedrich K, et al. 2019. A transformational approach to winter orographic weather modification
 459 research: The SNOWIE project [J]. Bull. Amer. Meteor. Soc., 100(1): 71-92.

460 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
 461 combination of radar, satellite, and disdrometer observations [J]. J. Geophys. Res.-Atmos., 126(11): e2020JD033914.

462 王婉, 姚展予. 2012. 非随机化人工增雨作业功效数值分析和效果评估[J]. 气候与环境研究, 17(6): 855-861. Wang Wan,
 463 Yao Zhanyu. 2012. Numerical analysis of statistical power in precipitation enhancement experiment in Beijing and estimation of
 464 operational cloud seeding effectiveness [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese). 17(6): 855-861.

465 王以琳, 李德生, 刘诗军. 2012. 飞机人工增雨分层历史回归效果检验方法探讨[J]. 气候与环境研究, 17(6): 862-870.

466 Wang Yilin, Li Desheng, Liu Shijun. 2012. Stratified sampling historical regression method for aircraft precipitation
 467 enhancement effect test [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 17 (6): 862-870.

468 武静雅, 毕永恒, 孙强, 等. 2021. 结合 Ka 和 X 波段双偏振雷达对北京一次锋面降雪过程雪带的观测分析[J]. 大气科学,
 469 45(5): 1-12. Wu Jingya, Bi Yongheng, Sun Qiang, et al. 2021. Observation and analysis of snowband structure in a process of
 470 cyclone frontal snowfall in Beijing with Ka-band and X-band polarized radars [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in
 471 Chinese), 45(5): 1-12.

472 辛乐. 2010. 人工增雨效果物理检验应用技术研究及个例分析[D]. 中国气象科学研究院硕士学位论文. Xin Le. 2010.
 473 Studies on the application technology of artificial precipitation effort evaluation and case studies [D]. M. S. thesis (in Chinese),
 474 Chinese Academy of Meteorological Sciences.

475 闫非, 杨洁帆, 董晓波, 等. 2022. 冬季中尺度降雪系统暖输送带云微物理垂直特征的飞机观测研究[J]. 大气科学, 47(5):
 476 1451-1465. Yan Fei, Yang Jiefan, Dong Xiaobo, et al. 2022. Cloud microphysical characteristics of warm conveyor belt within a
 477 winter mesoscale snowstorm [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 47(5): 1451-1465.

478 杨洁帆, 胡向峰, 雷恒池, 等. 2021. 太行山东麓层状云微物理特征的飞机观测研究[J]. 大气科学, 45(1): 1-19. Yang Jiefan,
 479 Hu Xiangfeng, Lei Hengchi, et al. 2021. Airborne observations of microphysical characteristics of stratiform cloud over eastern
 480 side of Taihang mountains [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 45(1): 1-19.

481 Yang Y, Zhao C F, Dong X B, et al. 2019. Toward understanding the process-level impacts of aerosols on microphysical
 482 properties of shallow cumulus cloud using aircraft observations [J]. Atmos. Res., 221, 27-33.

483 余兴, 戴进, 雷恒池, 等. 2005. NOAA 卫星云图反映播云物理效应[J]. 科学通报, 50(1): 77-83. Yu Xing, Dai Jin, Lei

- 484 Hengchi, et al. 2005. Physical effect of cloud seeding revealed by NOAA satellite imagery [J]. Chinese Science Bulletin (in
485 Chinese), 50(1): 45-52.
- 486 Yu X, Dai J, Rosenfeld D, et al. 2005. Comparison of model-predicted transport and diffusion of seeding material with NOAA
487 satellite-observed seeding track in supercooled layer clouds [J]. J. Appl. Meteor., 44(6): 749-759.
- 488 岳治国, 余兴, 刘贵华, 等. 2021. 一次飞机冷云增雨作业效果检验[J]. 气象学报, 79(5): 853-863. Yue Zhiguo, Yu Xing, Liu
489 Guihua, et al. 2021. Effect evaluation of an operational precipitation enhancement in cold clouds by aircraft [J]. Acta
490 Meteorologica Sinica (in Chinese), 79(5): 853-863.
- 491 Zhao C F, Zhao L, Dong X B. 2019. A case study of stratus cloud properties using in situ aircraft observations over Huanghua,
492 China [J]. Atmosphere., 10(1):19.