

华北地区一次积层混合云过程飞机播撒碘化银增雨的数值模拟研究

梁旭然¹ 银燕^{1,2} 陈倩¹ 邹泽庸¹ 李军霞³

1 南京信息工程大学/中国气象局气溶胶与云降水重点开放实验室, 南京 210044

2 中国气象局云雾物理环境重点开放实验室, 北京 100081

3 中国气象局人工影响天气中心, 北京 100081

摘要:

积层混合云由层状云和嵌入其中的对流云组成, 具有较强的催化潜力, 是人工增雨的主要目标云系。由于华北地区普遍存在的农业干旱和增加储水量等的需求, 针对该地区降水云系开展人工增雨研究显得尤为重要。本文采用耦合了 AgI 播撒参数化方案的 WRF 模式, 对 2021 年 6 月 16 日出现在山西北部的一次积层混合云降水过程进行了 AgI 播撒催化数值模拟试验, 并将模拟结果与卫星和机载云物理观测数据进行了对比。在云顶温度和液水含量吻合较好的基础上, 按照实际作业中的飞机播撒轨迹和播撒剂量模拟了此次催化降水过程。对模拟结果进行分析发现: 催化作业使得降水增强, 局部地区累计降水增量可达 15~20 mm, 区域平均增雨率为 9.6%; AgI 的核化过程以凝华核化为主, 其次是凝结冻结核化, 浸润冻结核化最弱。播撒 AgI 直接导致了云中冰晶浓度增多, 水汽消耗使得前期雪和霰的产生和增长过程受到抑制, 随着冰晶向雪转化和雪碰并云滴形成霰的过程增强, 雪、霰粒子的总量增多, 更多的雪、霰降落至零度层以下, 融化形成大雨滴, 从而增强了云雨碰并过程, 最终导致地面降水增加。对播撒影响微物理过程进行量化分析发现, 雪和霰融化过程较自然云增强了 27.26 % 和 20.53 %, 是播撒影响降水增加的主要微物理过程。这些结果揭示并量化了播撒影响降水机制和云微物理结构, 有助于深入认识人工催化混合云增雨过程的物理机制, 对北方地区人工影响冷云天气业务具有一定参考意义。

关键词: 数值模式; 飞机播撒; 碘化银; 人工增雨效果

文章编号: 2024127A 中图分类号: P481 文献标志码: A

DOI: 10.3878/j.issn.1006-9895.2000.19000

收稿日期 2025-4-28; 网络预出版日期

作者简介 梁旭然, 女, 2000 年生, 硕士研究生, 主要研究方向为云降水物理, E-mail: 1271879539@qq.com

资助项目 国家自然科学基金重点项目 42230604, 42275078

Funded by National Natural Science Foundation of China (Grant 42230604, 42275078)

Numerical simulation study of silver iodide sown by aircraft to increase rainfall during a cumulonimbus mixed cloud process in north China

LIANG Xuran¹, YIN Yan^{1, 2}, CHEN Qian¹, ZOU Zeyong¹, LI Junxia³

- 1 Nanjing University of Information Science and Technology/Key Laboratory for Aerosol–Cloud–Precipitation of China Meteorological Administration, Nanjing 210044
- 2 Key Laboratory of Cloud Physical Environment of China Meteorological Administration, Beijing 100081
- 3 CMA Weather Modification Centre, Beijing 100081

Abstract:

Stratiform clouds with embedded convection (referred to as “SEC” hereinafter), consisting of stratiform clouds and the convective clouds embedded within them, exhibit strong catalytic potential and are main targets for artificial rain enhancement. Due to the widespread agricultural drought in North China and the pressing need to increase water storage, conducting research on artificial rain enhancement for precipitation cloud systems in this region is particularly important. This study utilized the WRF model, coupled with an AgI seeding parameterization scheme, to perform numerical simulation experiments on AgI seeding during a precipitation event involving SEC that occurred in northern Shanxi on June 16, 2021. The simulation results were compared with satellite and airborne cloud physics observation data. With a good agreement in cloud top temperature and liquid water content, the catalytic precipitation process was simulated according to the actual seeding trajectory and dosage. Analysis of the simulation results indicates that the seeding operation significantly enhanced precipitation, with cumulative precipitation increases in local areas reaching 15~20 mm and a regional average rainfall enhancement rate of 9.6 %. The nucleation process of AgI was primarily dominated by deposition nucleation, followed by condensation freezing nucleation, with immersion freezing nucleation

being the weakest. Seeding AgI directly led to an increase in the concentration of ice crystals in the cloud, and the consumption of water vapor inhibited the production and growth of snow and graupel in the early stage. With the conversion of ice crystals to snow and the process of snow colliding with cloud droplets to form graupel, the total amount of snow and graupel particles increased. More snow and graupel fell below the zero-temperature level, melting into large raindrops, thus enhancing the cloud-rain collision process and ultimately leading to increased surface precipitation. Quantitative analysis of the microphysical processes affected by seeding shows that snow and graupel melting processes are enhanced by 27.26 % and 20.53 % compared to natural clouds, which are the main microphysical processes affected by seeding that affects the increase in precipitation. These results reveal and quantify the mechanism of seeding-influenced precipitation and cloud microphysical structure, which is helpful to understand the physical mechanism of artificial catalytic mixed cloud precipitation enhancement process, and providing valuable references for artificial influence on cold cloud weather operation in northern China.

Keywords : Numerical modeling ; Aircraft seeding ; Silver iodide ; Rainfall enhancement effect

1.引言

积层混合云由层状云和嵌入其中的对流云组成,生命期较长,是我国华北地区重要的降水系统,也是实施人工增雨的主要目标云系(何晖等, 2015)。进入 21 世纪,受全球气候变化的影响,极端天气事件发生增多,水资源贫乏问题在全球范围内日益严重,特别是在我国重要的政治经济文化中心华北地区,适当增加降水对缓解干旱和增加储水量具有重要意义。资料显示我国空中云水资源的可开发潜力可能可达每年亿吨,相当于 7 个三峡水库的总库容量(张明明, 2012)。在积层混合云中播撒碘化银(silver iodide, AgI)催化剂是目前人工有意识影响降水的有力方案之一。

目前针对积层混合云的研究主要通过雷达、卫星、飞机观测和数值模拟等方式,关注宏观和微观物理结构、形成和发展机制。观测发现,云系产生降水分布

不均匀,对流区内雷达回波比周围层状云区大 10~20 dBZ (Yang et al., 2017)。在积层混合云中,层状云可以促进对流云的发展,为对流云提供有利降水的环境。Evans et al. (2005) 发现层状云中嵌入对流单体使液态水浓度比周围的层云高,具有更高的上升速度,从而产生更多的冰晶。通过飞机观测,可以探测到积层混合云内冰晶的大小分布和生长过程以及对流发生对降水粒子的影响 (Hou et al., 2021, 康增妹等, 2019)。Rutledge 和 Hobbs (1983) 发现积层混合云中冰雪晶粒子在积云区以淞附增长为主,而在层云区主要通过凝华过程增长。降水时积层混合云内存在明显的“播撒-供给”机制,层状云中这一机制相对简单,对流云区中“播撒-供给”机制在云的上下层间双向进行云中粒子群增长更大,降水效率更高 (何晖等, 2015)。

人工冰核播撒作为一种重要的人工影响天气方法,备受国内外关注。人工冰核播撒主要是指向云中播撒一定剂量的人工冰核使其参与其中的云中微物理过程,使得零度层以上云中的过冷水含量显著减少,冰雪晶的含量增加,通过贝吉隆过程和淞附过程,促进冰相降水粒子的增长,增加的冰粒子下落到暖区融化成雨滴的数量增多,最终造成地面降雨量的显著增加 (Geerts and Rauber, 2022)。胡志晋 (2001) 则提出人工冰核可通过水-冰和汽-冰转化过程形成降水,催化后水汽凝华潜热的释放会使局部云区升温、气流升速增大,从而促进催化云降水的发展。

AgI 可以作为人工冰核引起大气中的水汽发生凝华或过冷水滴发生冻结而形成冰晶。Dennis (1980) 通过试验研究表明碘化银与自然冰核一样,一般有 4 种不同的核化方式:凝华核化、凝结冻结核化、接触冻结核化、浸润冻结。在一次混合相云云顶播撒 AgI 的飞机观测试验中, Yang et al. (2022) 发现云中过冷水被消耗,冰晶粒径增大,云滴粒径减小,云的微物理性质对人工播撒 AgI 表现出明显的响应。

随着数值模式中微物理参数化方案的不断完善,数值模拟已经成为人工影响天气研究的重要工具。Guo et al. (2006) 在三维对流云模式中开展云催化,播撒引起地表累计降水量的增加和重新分布,主要集中在中下游地区,播撒产生地表雪和霰。Xue et al. (2013a, 2013b) 将 DeMott et al. (1995) 和 Meyers et al. (1995)

的冰核浓度参数化应用于 WRF 中尺度数值模式 Thompson 方案中并进行 AgI 催化的数值模拟研究, 评估催化作业的效果。该参数化考虑了凝华、凝结、接触和浸润冻结四种冰核模式下 AgI 核化成冰晶。他们的结果显示, 飞机播撒的 AgI 主要以凝华核化方式为主, 增加迎风坡降水, 播撒降水效率与自然云降水效率成负相关, 与播撒率成正相关。何晖等人 (2012, 2013) 在三维中尺度模式中进行催化试验, 出现先减雨后增雨的结果, 催化开始后的减雨主要是由于 AgI 播撒后, 云水减少而雪花增多, 而空中增加的雪花尚未下落到暖区融化成雨滴。下一阶段的增雨则是空中增多的雪花下落到暖区, 雪花融化成雨滴过程增多。AgI 的播撒率对降水量有明显影响, 过量催化会使雪花平均质量减少, 下落速度锐减, 从而雪融化成雨水减少, 导致雨量减弱。也有很多学者通过模式模拟分析云微物理量的时空分布特征来判断积层混合云的增雨条件、预估并验证增减雨效果等 (朱士超等, 2015; 唐林等, 2020; 付远等, 2024)。然而目前大部分研究较多地从定性角度分析播撒对微物理量的影响, 很少有微物理过程源汇项变化的定量结果分析。

华北平原是中国重要的政治经济文化中心, 但是以往的降水增强播撒实验主要集中在对流云、层状云和地形云等单一云类型上, 而对积层混合云降水增强的播撒模拟实验尚不多见。因此本研究将 AgI 粒子的冰核过程参数化应用到 Thompson 微物理方案, 对 2021 年 6 月 16 日山西北部地区进行的一次积层混合云飞机播撒作业进行模拟, 并在在模拟结果与卫星结果和机载云物理观测结果吻合的基础上, 研究了播撒效果产生的影响。本研究配合设计了与实际作业中飞机播撒轨迹以及播撒剂量等近似一致的播撒设置, 分析了降水过程的宏微观结构和降水增强的微物理机制, 并对源汇项进行诊断分析, 有助于理解人工播撒作业对云内微物理过程的影响, 研究该地区积层混合云播撒的降水机制和云微物理结构对华北地区人工影响天气工作具有一定指导作用。

2. 研究个例介绍

2021 年 6 月 15 日至 16 日 (世界时, 下同), 受高空槽影响, 我国华北地区出现了锋前降水过程。图 1 (a)、(b) 分别为根据欧洲中期天气预报中心 ERA5 再分析资料绘制的 16 日 00 时 500hPa 和 850hPa 高空天气形势图。16 日 00 时, 500hPa 上欧亚中纬度地区为“两槽两脊”型, 其中东部低槽位于贝加尔湖到我

国甘肃中部附近，由于温度槽脊落后于高度槽脊，形成“后倾槽”，低槽发展东移。研究区域位于低槽前部，受到偏西气流影响，槽前盛行上升气流，易产生稳定性云系和降水。850hPa 上切变线位于内蒙古东部到山西一带，研究区域有暖平流输送，与对流层中层冷平流叠加，有利于大气层结不稳定性的增强。图 2(a)、(b) 分别为 16 日 00 时我国风云 4 号卫星可见光云图和日本葵花 8 号卫星的亮度温度图，可以看出，槽前为以层状云为主的中低云系覆盖，切变线附近有弱的积云发展，过冷水含量较为充沛，有较大的增雨潜力。

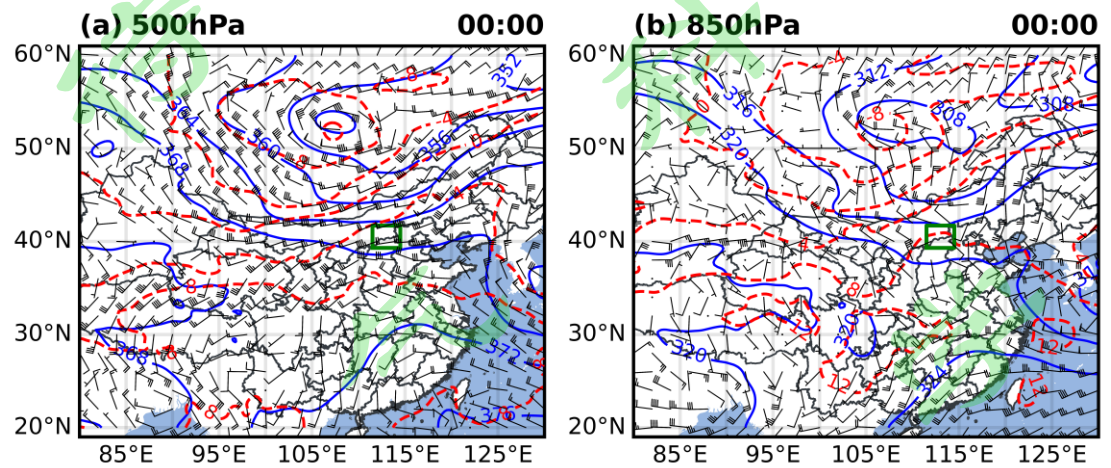


图 1 16 日 00 时 ERA5 再分析资料 500hPa (a)、850hPa (b) 天气形势图，蓝色等值线为高度场，红色虚线为温度场，黑色箭头为风场，绿色方框为研究区域

Fig. 1 500hPa (a) and 850hPa (b) weather situation based on the reanalysis data of ERA5 at 00:00 on the 16th, with blue contours for the height field, red dashed lines for the temperature field, black arrows for the wind field, and green boxes for the study area

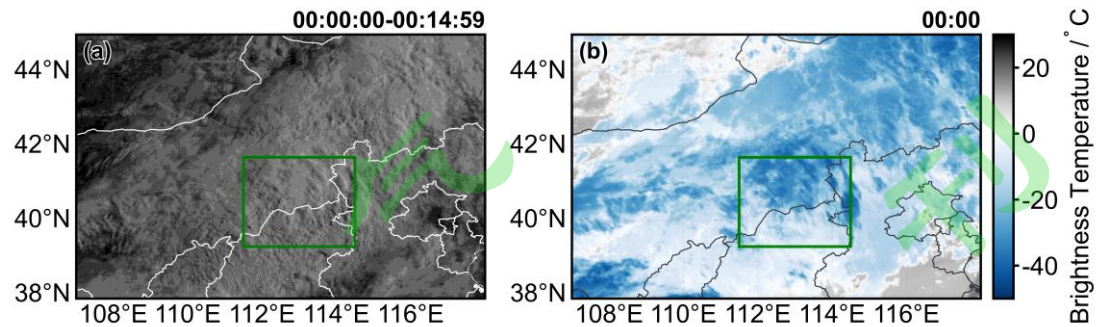


图 2 16 日 00 时风云 4A 卫星可见光云图 (a)、葵花 8 号卫星云顶亮度温度分布 (b)，绿色方框为研究区域

Fig. 2 FY-4A satellite at 00:00 on the 16th (a), brightness temperature map of Himawari-8 (b), green box is the study area

3.资料与方法

3.1 飞机作业和探测情况

2021 年 6 月 16 日，在山西北部进行了飞机人工增雨作业。研究区域内共派出运-12 B3829、空中国王 B10JQ 和运-12 B2823 三架飞机，采用焰条燃烧方式播撒 2 小时 40 分钟，共播撒 AgI 3360 g，如图 3 所示，飞机从 A（113.32,40.13）出发，先后途径 B（112.62,40.85）、C（112.53,40.78），最后到达 D（113.45,40.2），具体飞行计划如表 1 所示。其中空中国王飞机搭载的 DMT 公司生产的云粒子探头（Cloud Droplet Probe, CDP）（测量直径为 2-50 μm，共 30 个通道）对云粒子数浓度、粒径谱等进行了探测。云中液水含量（LWC）是通过 CDP 粒子谱计算得出的，计算公式如公式（1）所示：

$$W = \frac{\pi \rho_w}{6} \sum_{i=1}^m c_i d_i^3 \tag{1}$$

其中 c 为各通道的粒子数浓度， d 为各通道的平均半径， ρ_w 为水的密度。

表 1 飞机飞行播撒计划
Table 1 Aircraft flight seeding plan

机号	机型	催化剂	作业量/ AgI 含量	作业开 始时间	作业 时长	作业 高度	航路航线
			(g/根)				
运-12	B3829	焰条	24 根/36	08:00	60 分	5.1km	
空中国王	B10JQ	焰条	10 根/125	09:10	60 分	6km	A→B→C→D
运-12	B3823	焰条	10 根/125	10:20	40 分	5.1km	

3.2 数值模拟

3.2.1 模式设置

本研究选择中尺度数值天气预报模式 WRF（Weather Research and Forecasting）4.0 版本和 Thompson 方案作为 AgI 播撒的动力和微物理平台。Thompson 微物理方案在以往的研究中被广泛应用于降水的模拟(Feng et al., 2018, Guo et al., 2019, Guo et al., 2024)。Guo et al.（2019）比较了 3 种微物理参数方案对我国中东部地区夏季降水的模拟效果，发现 Thompson 方案在液水与冰水的模拟结果均优于其他方案。Thompson 和 Eidhammer 于 2014 年对该方案进行了改

进，并将气溶胶作为云凝结核（CCN，Cloud Condensation Nuclei）和冰核（IN，Ice Nuclei）考虑在内。Gao et al（2021）的结果说明改进后的 Thompson 方案能够更好地再现雨带的空间分布和时间演变。该方案考虑了 AgI 通过凝华、凝结冻结、接触冻结和浸润冻结四种核化成冰晶的过程（Meyers et al., 1995; Kim et al., 2015; Xue et al., 2013a）。Kim et al.（2015）和 Xue et al.（2013a）对云内播撒 AgI 参数化进行了详细描述。对于边界层方案，Tian et al.（2017）对中国北部降水事件进行统计模拟分析中对比了 YSU 方案和 MYJ 方案的模拟效果，认为 YSU 采用的“非局地 K 方法”在模拟降水空间分布方面优于 MYJ 方法，能够很好地模拟出高分辨率的对流天气。

结合上述研究及本研究个例的情况，本文试验设计了水平分辨率为 12 km、2.4 km、0.48 km 三层嵌套，最内层嵌套网格数为 625×625，主要覆盖山西北部，垂直方向分 50 层。采用分辨率为 1°×1°，时间分辨率为 6 小时的 NCEP 再分析资料作为模式初始场和侧边界条件。微物理方案选择考虑气溶胶活化的 Thompson 方案，边界层方案选用 YSU 方案，积云对流方案采用 Kain–Fritsch 方案。由于 2.4 km 分辨率足以再现 1 km 模拟产生的对流系统的大部分中尺度特征，且在水平网格间距为 1 km 的区域不需要使用积云参数化方案，因此本研究中第 2、3 层模拟区域不采用积云参数化方案。模拟时间为 2021 年 6 月 15 日 00 时至 17 日 00 时，共 48 个小时。通过关闭 AgI 播撒开关进行控制试验。具体设置如表 2 所示。

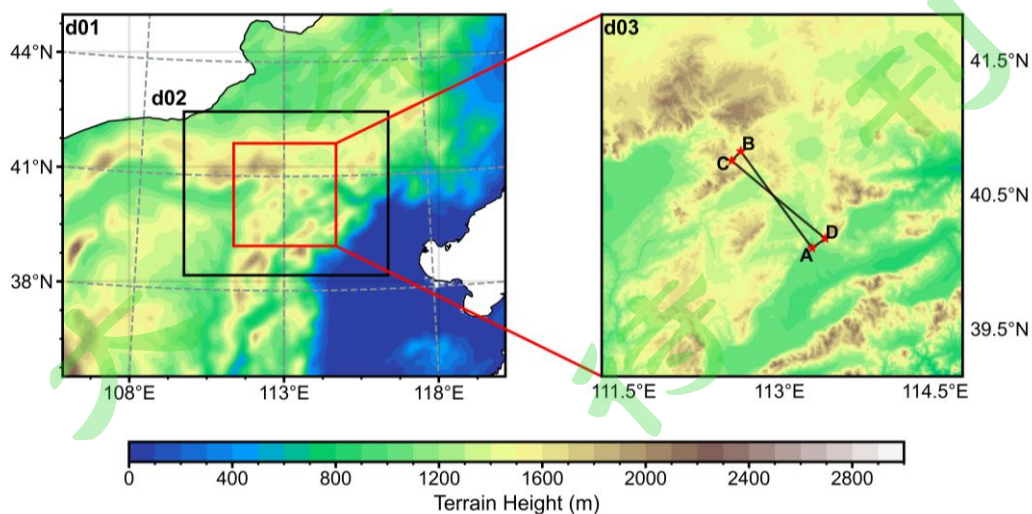


图 3 模拟嵌套区域地形图，右图 d03 中 A(113.32,40.13)、B(112.62,40.85)、C(112.53,40.78)、

D (113.45,40.2) 四点连线为飞机播撒轨迹

Fig.3 The topographic map of the simulated nested area, The four-point connection line of A (113.32,40.13), B (112.62,40.85), C (112.53,40.78) and D (113.45,40.2) in the right figure d03 is the aircraft seeding trajectory

表 2 模拟嵌套及物理方案设置

Table 2 The nesting of simulation and the setting of physical scheme

嵌套区域	水平分辨率	格点数	垂直 层数	微物理方案	边界层 方案	积云对流 方案
d01	12km	110 x 90	50	Thompson	YSU	Kain-Fritsc
d02	2.4km	250 x 200	50	Thompson	YSU	无
d03	0.48km	625 x 625	50	Thompson	YSU	无

在数值模拟中，参照增雨作业的实际情况，在模式设置与表 2 一致的前提下进行了催化试验，并将催化后的模拟结果与观测结果进行对比，分析催化效果。播撒设置与实际飞机播撒设置匹配，播撒时间选择在 2021 年 6 月 16 日 00:00~03:00，催化高度在模式第 17 层，对应高度在 5~6 km，播撒轨迹如图 3 所示，呈倒“8”字。参考实际播撒量（如表 1），模式中播撒时沿 421 个格点同时进行播撒。飞机播撒实际共燃烧 44 根焰条，焰条 AgI 总含量为 3364 g，AgI 释放速率为 1121 g/h，因此模式中设置碘化银粒子释放速率为 4.76×10^{15} 个/s，与实际播撒情况较为一致。播撒试验具体设置如表 3 所示。

表 3 播撒试验设置

Table 3 Seeding test settings

试验名称	播撒轨迹	播撒开始结束时间	播撒高度	AgI 速率	AgI 累计剂量
播撒试验	A→B→C→D	00 时-03 时	5-6 km	1121 g/h	3364 g

3.2.2 模拟结果验证

为了验证模式模拟结果的可靠性，使用 FY-2H 的云顶温度数据作为参考，对比分析模式模拟得到的云顶温度数据。将云顶温度数据每 3K 为一个单位进行分段，对每一个温度段云顶温度出现的频数进行统计，每个温度段频数除以总数据量，得到不同温度段云顶温度的频率分布，如图 4（a）所示。本次个例选取的云区从 6 月 15 日 15:30 左右开始发展，在 6 月 16 日 02:00 略有消散，随后再

次发展。选取播撒前 15 日 21 时云顶温度进行对比，观察图 4（a）中 FY-2H 数据（黑色实线），发现云顶温度主要分布在 235 K~270 K 之间，存在两个峰值，在 230K-255K 之间存在一组冷云，另有一组混合相云存在于 260 K~270 K 之间。对于 WRF 模式模拟结果，选取格点总含水量大于 1×10^{-5} kg/kg 的区域作为云区，可以发现，模拟所得云顶温度概率分布也出现了两部分明显的云分区，分别位于 243K-258K 和 258K-272K 范围附近。模式中云顶温度是通过含水量判断，而 FY-2H 是利用 AGRI 仪器的 2 个红外窗区和 1 个 CO₂ 吸收通道，通过最优估计的迭代计算，生成云顶温度实时产品，两种诊断方式的不同可能使得模拟与观测结果存在一些偏差，但云顶温度概率分布明显的峰值所在温度区间与走势仍有较好的对应，模拟结果基本反映了云体类型，控制实验能够反映出自然云的主要特征。

为进一步验证模拟对云内液水含量的模拟结果的可靠性，使用 CDP 粒子谱计算得到的 LWC 作为参考，对比模式中播撒路径周围 9 个格点的平均 LWC（图 4（b）），结果发现，CDP 粒子浓度受飞机入云出云影响，粒子浓度存在较大起伏，层状云云系在水平方向上含水量呈波动状态，从飞机入云到 2:30 之间，LWC 具有小幅度起伏且连续的观测结果，能够看到存在较为明显的云区，在 2:30 之后则存在另一个 LWC 较高的云区，最高可达 0.51 g/m^3 。而 WRF 中具有明显的两个 LWC 高值区，以 02:35 为界限，最大值能达到 0.47 g/m^3 。相较于观测数据，模式得到的 LWC 在数值上略有偏差，在 02:35 之前偏高，16 日关注时段内过冷水含量平均值为 0.218 g/m^3 ，9:00 前过冷水含量均高于平均值，具有较好的播撒潜力，模式 LWC 整体可以反映出两组云区的出现时间范围，趋势与量级均具有一致性，模拟结果基本反映了云内微物理变化趋势。

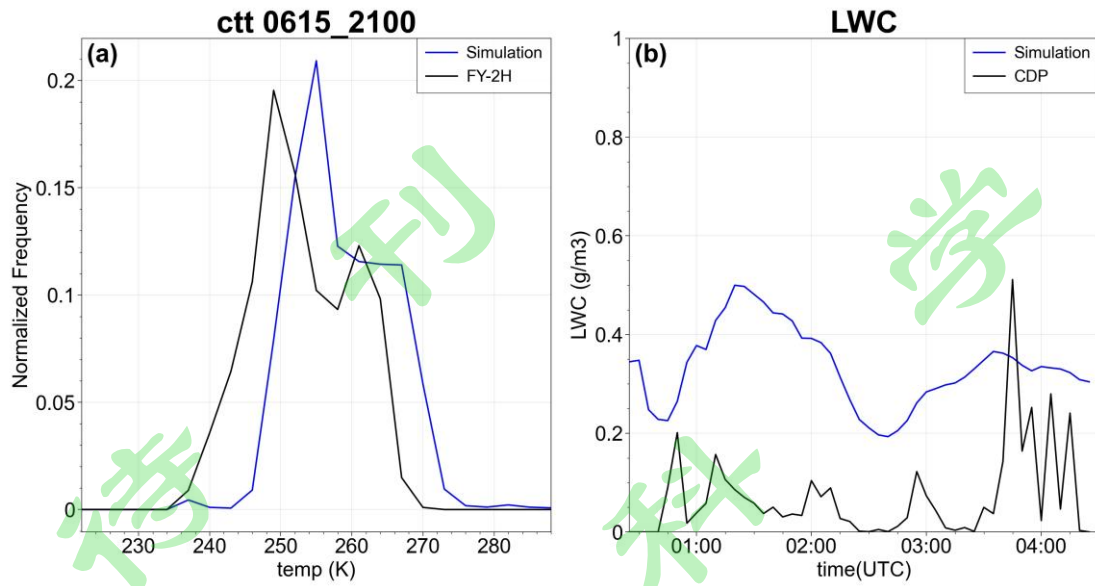


图 4 2021 年 6 月 15 日 21:00 的 WRF 模式模拟（蓝色实线）和 FY-2H（黑色实线）的归一化云顶温度频率分布（a），WRF 模式模拟（蓝色实线）和 CDP 粒子谱计算得到（黑色实线）的 LWC（b）

Fig.4 The normalized cloud top temperature frequency distribution (a) of WRF model simulation (blue solid line) and FY-2H (black solid line) at 21:00 on June 15,2021. The LWC (b) of WRF model simulation (blue solid line) and CDP particle spectrum calculation (black solid line).

研究区域内降水测站数据和模式数据在 6 月 16 日 15 小时内的累计降水量分别以散点和填色进行表示（图 5（a）），可知本次降水过程累计降水主要集中分布在 112.5°E 以东，观测数据的累计降水最高可达 27 mm ，在模式模拟结果中累计降水高值可达 52 mm ，这一差距可能是由于观测站分布较为稀疏，难以覆盖全区域，模式模拟的降水高值附近缺少降水测站，导致无法进行点对点的细致对应，但多数测站降水数据与周围范围模式降水数据数值相近，可知模式在降水低值区模拟效果较好。因为测站的分布分散且较为均匀，因此图 5（b）将研究区域内模式降水数据进行空间平均，与做站点平均的观测数据做时间序列进行对比，自然云降水降水强度有明显两个峰值，第一段降水强度最大为 2.8 mm/h ，7~12 时的第二段降水强度明显低于第一段降水，最大为 0.84 mm/h ，15 时后降水过程结束。模式数据降水强度时间序列同样有两段降水分布，峰值分别为 2.2 mm/h 和 0.81 mm/h ，与观测结果接近。第一阶段降水中模式结果降水稍弱，但在第二阶段降水强度偏强，降水过程同样在 15 时结束，整体趋势与自然云降水强度在时间上非常接近。可知模式模拟的降水过程与实际降水在时间与空间上均具有较好的一致性。

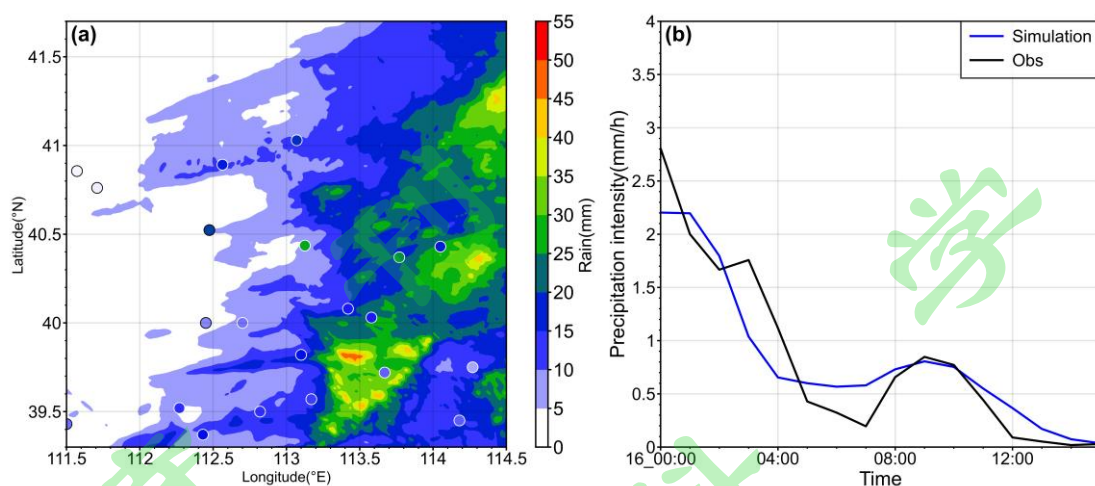


图 5 2021 年 6 月 16 日 0~15 小时的 WRF 模式模拟（填色）和降水测站（散点）的累计降水量空间分布（a），WRF 模式模拟空间平均（蓝色实线）和降水测站站点平均（黑色实线）降水强度时间序列（b）

Fig. 5 Spatial distribution of cumulative precipitation (a), spatially averaged WRF model simulation (filled colours) and precipitation gauging stations (scattered points), spatially averaged WRF model simulation (blue solid line) and precipitation intensity time series of precipitation gauging station site averages (black solid line), from 0-15 h on 16 June 2021 (b)

4 播撒效果分析

4.1 地面降水的演变

为关注 AgI 播撒对降水产生的重要影响，图 6 和图 7 分别展示了播撒试验和控制试验对应的区域平均的降水强度时间变化和累计降水的空间分布。播撒开始 1 小时后，AgI 的催化作用开始显现，降水强度略有增加，在 3:00 后，降水强度明显增加，在控制试验降水强度偏低时，播撒试验带来的降水增加更为显著，最大增加达 0.26 mm/h，降水增强过程持续到 10:00 左右，随后降水过程减弱，因此后面分析主要关注播撒开始 15 h 内的降水演变。本次过程催化作业之后呈现增雨趋势，这与前人先减雨后增雨的结果有一定差异（He et al., 2023, 刘卫国 et al., 2021a），这可能与降水产生的主要机制有关，后续将关注微物理过程来对这一结果进行分析。如图 7 所示，降水增加的区域主要在研究区域的东北侧，播撒轨迹周围降水明显增多，局部地区最高达到 15 mm~20 mm 的增加量，而降水减少区则位于朔州东部周边地区，区域平均增雨率为 9.6%。

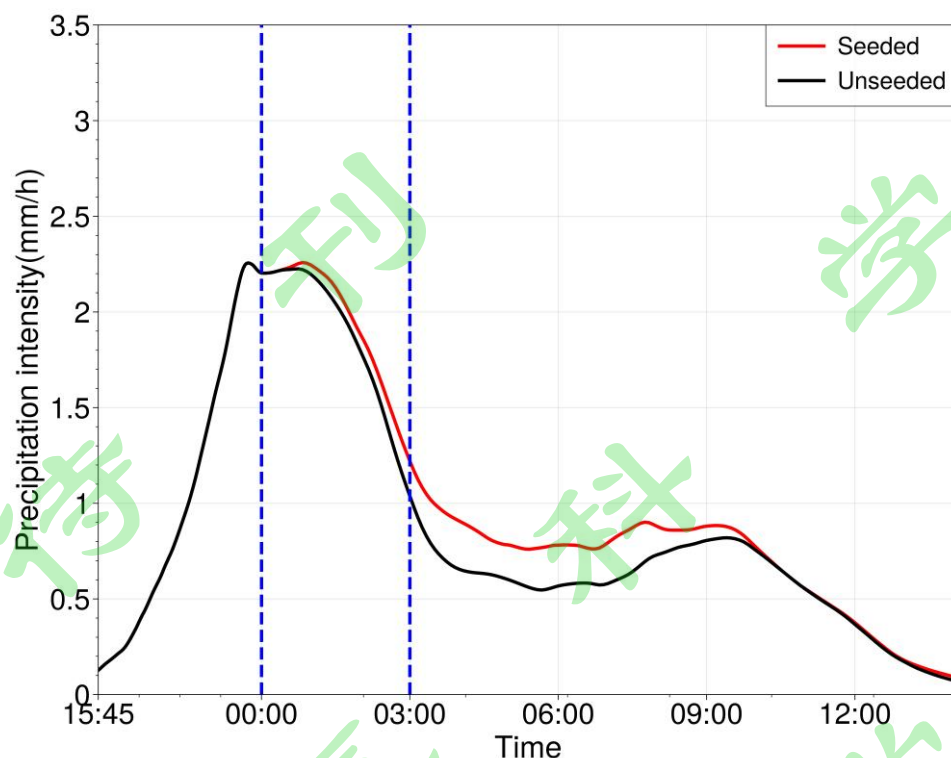


图 6 控制试验（黑线）和播撒试验（红线）区域平均降水强度（mm/h）随时间的变化，蓝色虚线为播撒时间区间

Fig. 6 The average precipitation intensity (mm / h) in the control test (black line) and the seeding test (red line) varies with time, and the blue dotted line is the seeding time interval.

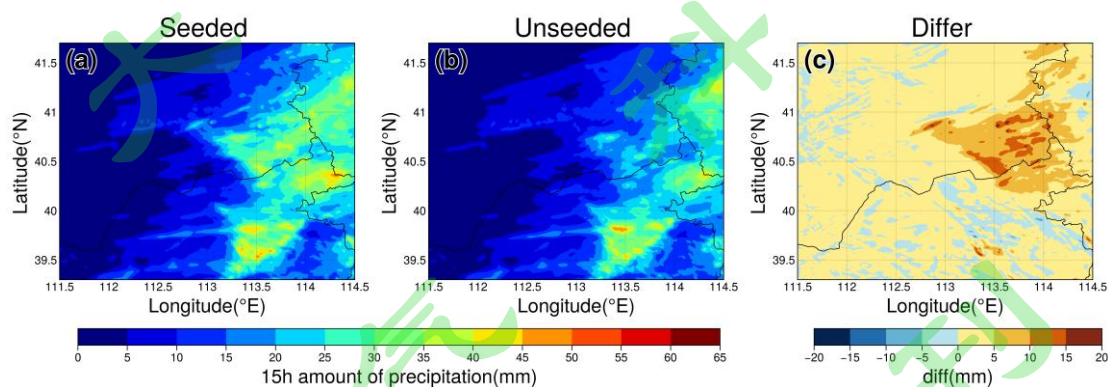


图 7 播撒试验 (a)、控制试验 (b) 和两者差值 (c) 15h 累计降水 (mm) 空间分布

Fig. 7 Spatial distribution of 15 h cumulative precipitation (mm) in sowing test (a), control test (b) and the difference between the two (c)

4.2 AgI 的水平与垂直扩散

图 8 为播撒试验后 1 h、3 h 和 5 h 播撒层 AgI 数浓度随风场变化的水平扩散图，沿其中红线绘制的对应时刻 AgI 数浓度随风场变化的垂直剖面图如图 9 所示。为去除模式边缘产生的计算误差，去除周围各 30 个格点作为研究区域，后续分析均做同样处理。AgI 在播撒初期主要沿下风方向扩散，受西南风作用主要影响

研究区域的东北方，水平尺度可扩散至 200 km 范围。同时一部分 AgI 随云中上升气流到达云的上部，最高能达到 10 km 高度，一部分随云内下沉气流向下传输，主要存在于 5~8 km，量级最高达到 10^{11} 个/kg。大部分过冷水分布在 5~7.5 km 高度，与 AgI 核化的范围一致，播撒 3 h 内进入过冷水存在区域的 AgI 粒子占总播撒数的 53.2 %。随着播撒进行，AgI 向东北偏东方向扩散，在开始播撒 5 小时后，AgI 主要存在于 6 km 以下，此时由于 AgI 粒子在平流和扩散过程中与云水和水汽相互作用消耗，并且伴随着平流移出研究区域，AgI 含量逐渐降低，浓度减少两个量级。



图 8 播撒后 1 h, 3 h, 5 h 时 AgI 水平扩散（等值线为 AgI 数浓度）随风场（m/s）的变化，填色为冰水路径，红线为图 9 剖面线

Fig.8 Variation of AgI horizontal diffusion (contours are AgI number concentrations) with wind field (m/s) at 1 h, 3 h and 5 h after seeding, filled colours are ice-water paths, red line is the profile line of Fig. 8

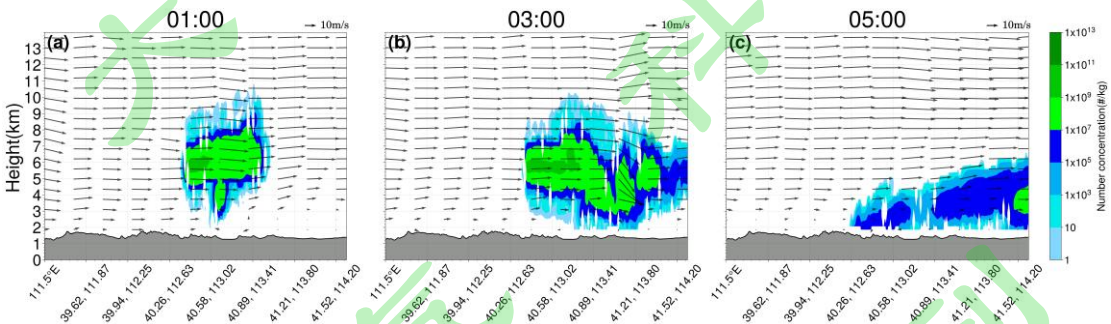


图 9 播撒后 1 h, 3 h, 5 h 时 AgI 的垂直截面（填色为 AgI 数浓度，个/kg）随风场（m/s）的变化（垂直方向的风速作了 5 倍的放大处理）

Fig.9 The vertical cross section of AgI (AgI number concentration, unit / kg) at 1 h, 3 h and 5 h after sowing with the change of wind field (m / s) (the wind speed in the vertical direction was enlarged by 5 times).

4.3 AgI 的核化过程

本研究中，AgI 粒子的成核过程包括凝华、凝结冻结、浸润冻结和接触冻结四种方式。接触冻结核化只与水汽过饱和度有关，浸润冻结核化仅受温度影响，凝华核化和凝结冻结核化受温度和过饱和度共同影响。图 10 为播撒试验中 AgI

总核化和四种核化方式在研究区域内的活化速率随时间和高度的演变。可以看出，在本次个例中，AgI 粒子的核化过程主要发生在播撒开始后 8 个小时内。随着播撒进行，云中水汽被大量消耗，AgI 的成核机制以凝华核化为主（图 10(c)），其次是凝结冻结核化（图 10(d)），量级与凝华核化相当。凝华核化和凝结冻结为此次降水过程最主要的两个核化过程，形成的冰晶占绝大多数，其核化速率在单个垂直格点的水平总和达到了 10^{10} /kg/s。本次播撒试验中浸润冻结核化（图 10(b)）最弱，比凝华核化要低两个数量级。四种核化过程都在 AgI 播撒后立即发生。凝华核化的发生高度最高，可达-40 °C，其他三种核化方式的最高发生高度类似，主要发生在-20~0 °C。Xue et al（2013a）对理想条件下的地形云进行高空催化模拟，发现凝华核化过程是 AgI 粒子的主要活化方式。

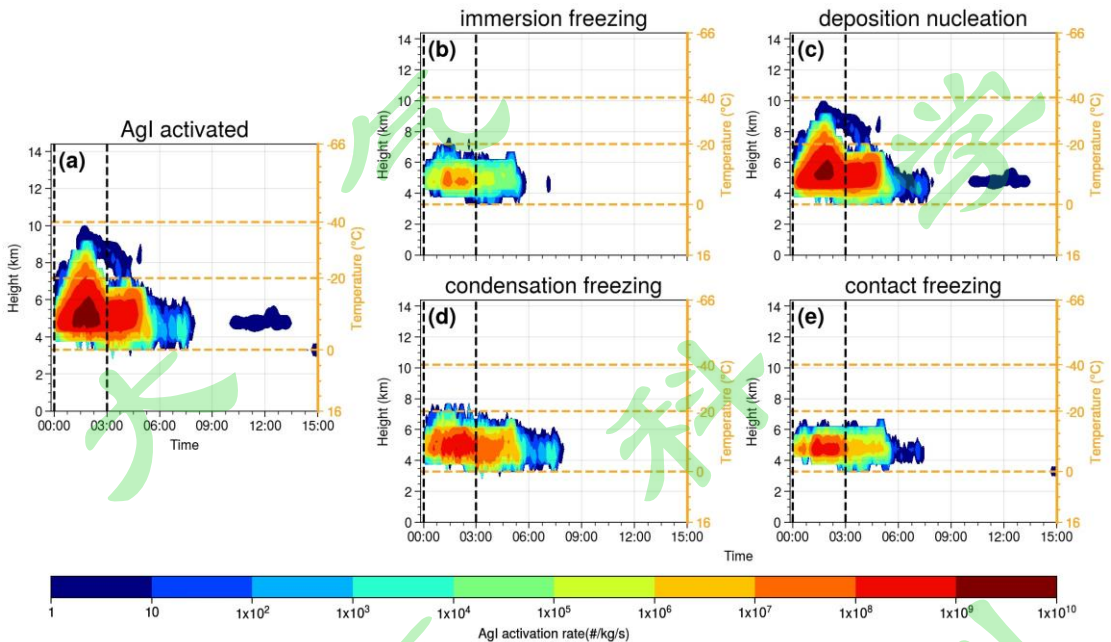


图 10 AgI 区域总和活化速率（#/kg/s）随时间和高度（距离地面的高度）的变化，图中黑色虚线为播撒开始和结束时间，橙色虚线分别代表-40 °C、20 °C 和 0 °C (a) 总活化 (b) 浸润冻结活化 (c) 凝华活化 (d) 凝结冻结活化 (e) 接触冻结活化

Fig.10 The total activation rate(#/kg/s) of AgI region varies with time and height (height from the ground). In the figure, the black dotted line is the start and end time of seeding, and the orange dotted line represents - 40 °C, 20 °C and 0 °C, respectively. (a) Total activation (b) Immersion freezing activation (c) Deposition activation (d) Condensation freezing activation (e) Contact freezing activation

4.4 播撒影响降水的微物理机制

对于此次模拟，我们主要考虑了 5 种水成物粒子，包括云水、雨水、冰晶、雪和霰。通过与控制试验几种水成物粒子的含量进行对比，发现在此次过程中云

水混合比含量最高，冰相粒子中含量最高的是雪，冰晶和霰的混合比要比雪低一个数量级。通过上述分析我们发现，AgI 粒子扩散后消耗水汽产生冰晶。在下面的研究中，将含水量大于 10^{-5} kg/kg 的格点视为有云格点，并将高度统一为离地高度。图 11 为研究区域云内播撒试验和控制试验中云水、雨水、冰晶、雪和霰的混合比以及改变量（播撒试验-控制试验，下文同）区域平均随时间和高度的变化。从控制试验的冰晶的混合比（图 11c2）随时间和高度的变化图中可以看出，8 km 云顶高度附近是冰晶主要分布的区域，随着 AgI 粒子的播撒，冰相粒子受播撒时段影响加大，在 00 至 03 时这一播撒时间段内产生大量冰晶，主要集中在 4 km~8 km 处，与 AgI 粒子核化发生的时间和高度均较为一致。

从雪和霰的混合比随时间和高度变化的改变量（图 11d3,e3）中可以看出，雪在播撒开始后出现增长趋势，在 03 时后明显增多，并持续到整个降水过程结束，在播撒开始的 3 小时内，6 km 以下雪的含量增加，6~8 km 内雪的含量有明显减少，播撒开始 3 小时后霰粒子在零度层高度以上有明显增加。明显看出，播撒后冰粒子高值位于 6 km 附近，在冰晶的下方 4 km 附近有霰粒子出现，云内存在冰、雪粒子从高层向下“播种”过程，并且中高层云水含量较高，大量云水的存在也为高层“播种”下来的冰、雪和霰粒子提供了优越的“供给”增长条件。从图 11（b1）中可以明显看出，降水出现于 4 km 以下，图 10（b3）能清晰地看出雨滴在播撒开始后随即有少量增多，在 03:00 时前后雨滴混合比增加量变大，是因为播撒产生的大量冰晶引起雪和霰的增加，结合“播撒-供给”机制，冰相粒子得以长大，而后冰相粒子下落到零度层以下，融化过程增强，大雨滴增多，下落速度加快，降落到地面形成降水。

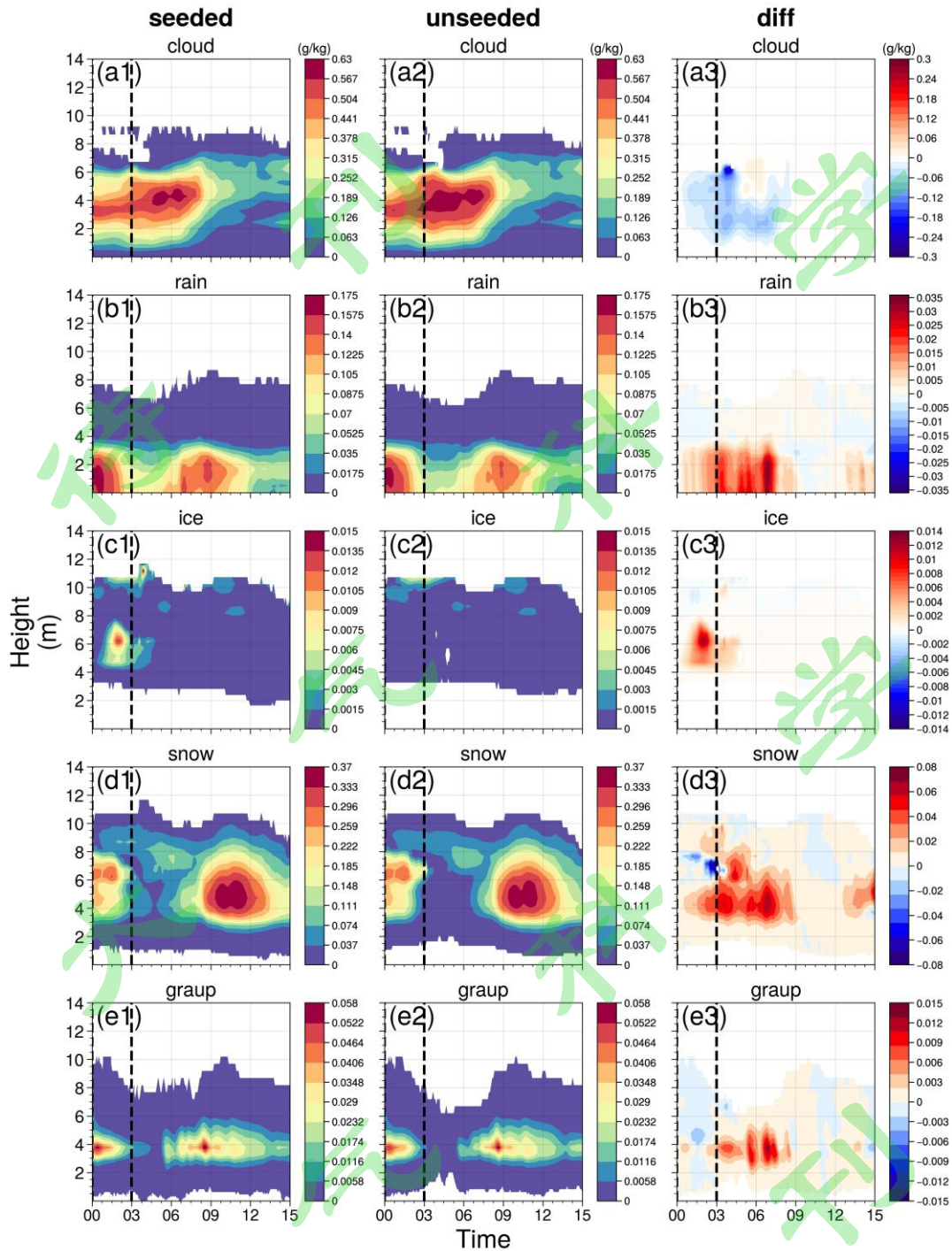


图 11 播撒试验 (a1~e1) 和控制试验 (a2~e2) 中云内云水、雨水、冰晶、雪和霰的混合比 (g/kg) 以及它们的改变量 (a3~e3) 区域平均随时间和高度 (距离地面高度) 的变化, 图中黑色虚线表示播撒开始和结束时间

Fig. 11 The mixing ratio (g / kg) of cloud water, rain water, ice crystal, snow and graupel and their variation (a3~e3) in the seeding experiment (a1~e1) and the control experiment (a2~e2) with time and height (height from the ground). The black dotted line indicates the beginning and end time of seeding.

前面提到在播撒期间, 雪和霰粒子受到了不同程度的抑制, 可能是使得降水

增加不显著的原因，因而探究这一时段影响雪、霰减少的主要的微物理量，由图 12 可以看出，雪在 6~8 km 处的减弱是主要是由于雪粒子升华(ssu)增强导致的，大量冰晶产生时消耗的大量水汽，使得雪粒子难以通过凝华增加，并且升华化过程增强，导致了雪在高层处减少。霰粒子的减少则与碰并过程相联系，其中主要与雪粒子碰并云滴形成霰(scw-g)和霰粒子碰并云滴(gcw)有关，这是由于雪在这一时段内的减少使得凇附过程减弱，进而引起霰含量的减少，使得霰粒子碰并云滴(gcw)过程也明显减弱。而 6km 以下雪的增加主要是来源于冰晶自转化形成雪，这与冰晶的增加相对应，但此时冰相过程还处于较弱的阶段，表明这一时段主要是冰晶的核化消耗过量水汽，使得雪和霰受到抑制，尺度减小尚且未能下落到融化层以下，因而降水增加较弱。

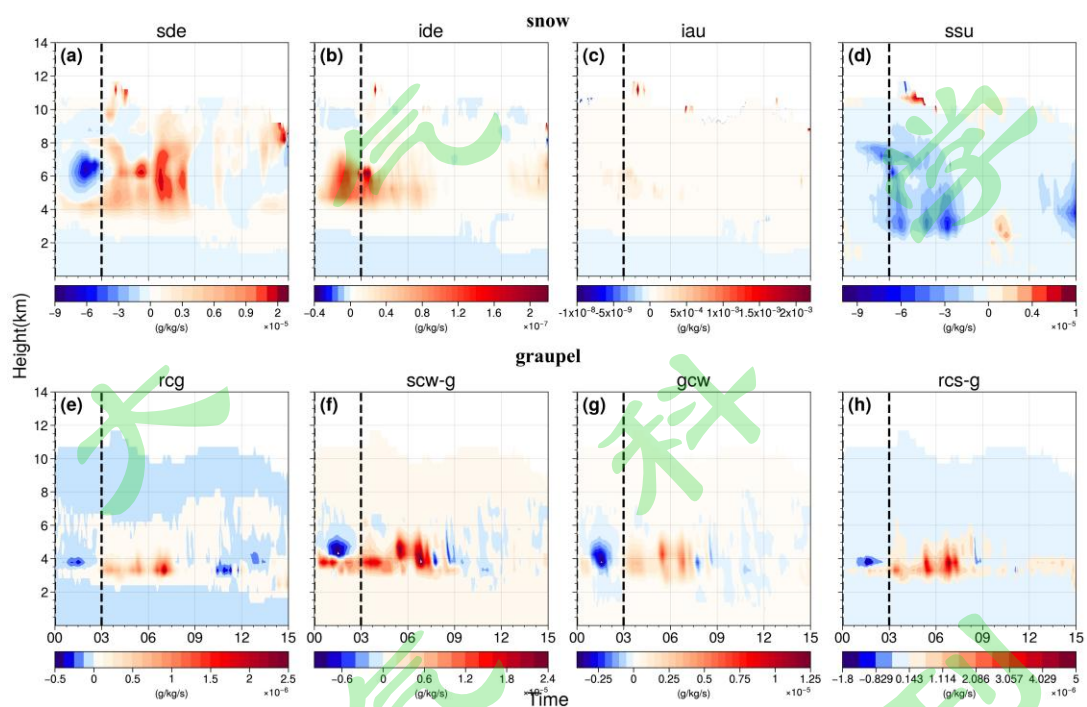


图 12 雪凝华、冰晶凝华形成雪、冰晶自转化生成雪、雪升华、雨滴收集霰、雪碰并云滴形成霰、霰收集云滴和雪碰并雨滴形成霰八种微物理过程的混合比速率的改变量(g/kg/s)(a~h)区域平均随时间和高度(距离地面高度)的变化，图中黑色虚线表示播撒开始和结束时间

Fig.12 The variation of the regional average mixing ratio rate (g / kg / s) (a~h) of the eight microphysical processes of sde, ide, iau, ssu, rcg, scw-g, gcw and rcs-g with time and height (height from the ground). The black dotted line in the figure represents the start and end time of seeding.

而从图 13 中与冰晶相关的源汇项(b1,b2)可以看出 AgI 凝华核化(agi-dep)

和凝结冻结核化 (agi-con) 消耗大量水汽产生很多小冰晶, 冰晶表面积增加, 自身凝华 (ide-i) 过程也增强, 消耗更多水汽, 使冰晶长大, 冰晶含量增加使得冰晶的自转化 (iau) 过程显著增强, 成为整个降水过程中冰晶主要的汇项, 冰晶增强的自转化过程首先导致雪的含量大幅增加。从高度上可以看出在 4~6 km 和 8~10 km 两个高度处自转化过程有较为明显的增强, 低层对应 AgI 的核化以及冰晶自身凝华增长导致冰晶含量增加, 过多的冰晶使得冰晶能够聚合形成雪, 高层处则是在温度更低的地方云滴被冻结形成冰晶, 且凝华核化的发生域温也在 -40°C , 使得高层处冰晶含量也相对较高, 因而雪粒子在高空处也通过冰晶自转化而形成。

而从雪和霰相关的源汇项 (c1~d2) 可知, 由于 AgI 核化消耗水汽产生大量小冰晶, 聚合转化为雪, 大量转化而来的雪使得雪融化成雨的过程 (sml) 加强, 并且由于大气中水汽含量降低, 雪的升华 (ssu) 更易发生, 但雪的源大于汇。随着雪越来越多, 雪淞附云滴一部分保留为雪 (scw-s), 一部分转化为霰 (scw-g), 并成为霰的主要来源。伴随着霰的增加, 霰融化形成雨的过程 (gml) 也增强, 当霰的含量增多时, 霰碰并云水形成霰 (gcw) 和霰碰并雨水转化成雨水 (rcg-r) 的过程同步加强。从高度廓线图中可以看到, 高层自转化形成的较小的雪粒子, 在 6 km 附近通过凝华过程 (sde) 长大, 能够以较快的速度下落到暖层, 雪和霰均在零度层高度 3 km 处大量存在, 因此雪粒子和霰粒子可以很快掉落到零度层以下, 进行融化过程形成雨滴降落到地面, 实现增雨。

对比雨滴各微物理量速率 (a1,a2) 可以看出, 播撒引起雨水含量增加的微物理量主要是雨滴碰并云滴 (rcw)、雪融化形成雨滴 (sml) 和霰融化形成雨滴 (gml)。融化引起降水增多与冰相粒子的变化过程一致, 融化使得零度层附近形成较大尺度的雨滴, 进而增强雨滴碰并云滴过程 (rcw), 使得雨滴尺度进一步增大, 促进降水发生, 雨滴的汇则是雨滴的蒸发 (rev), 这可能与大气中水汽的大量消耗有关。本文自然云降水中雪霰粒子的作用较弱, 虽然出现了抑制作用, 但持续时间较短, 在催化后一小时内较少的减雨发生又和云雨滴碰并和雪融化带来的增雨相抵消, 最终仍呈现出微弱增雨的状态。播撒引起降水增强的过程与刘卫国等人 (2021b) 在层状云中的播撒实验结论一致。

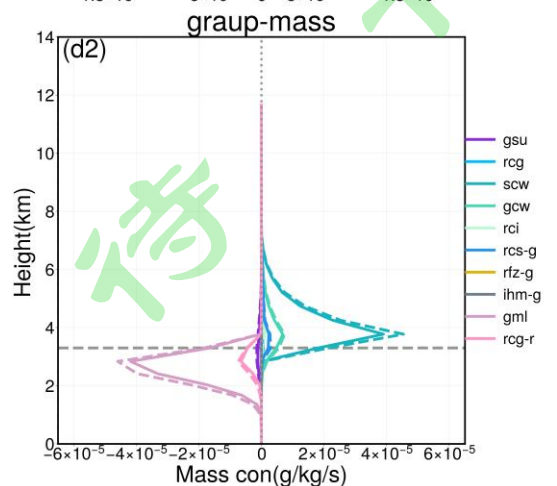
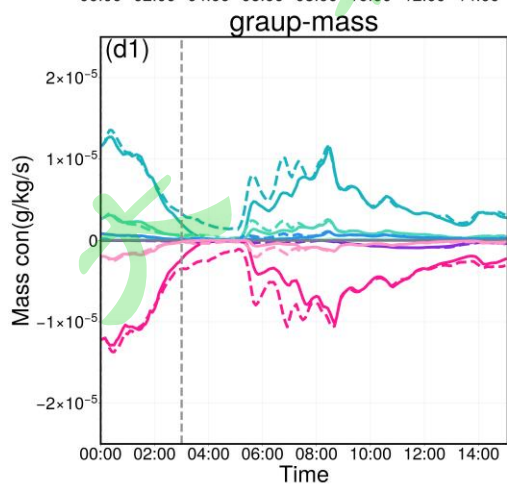
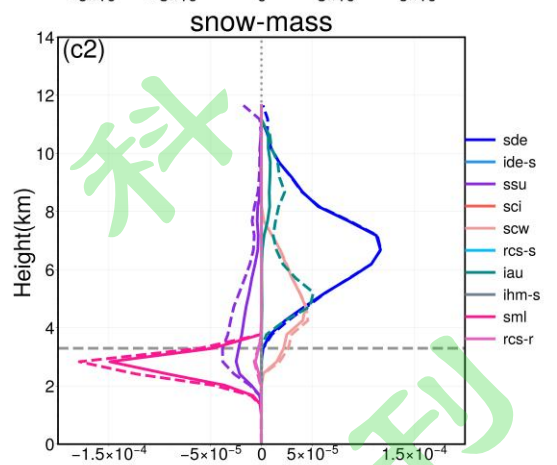
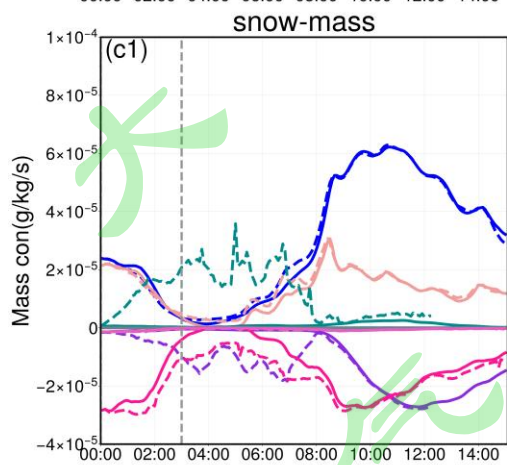
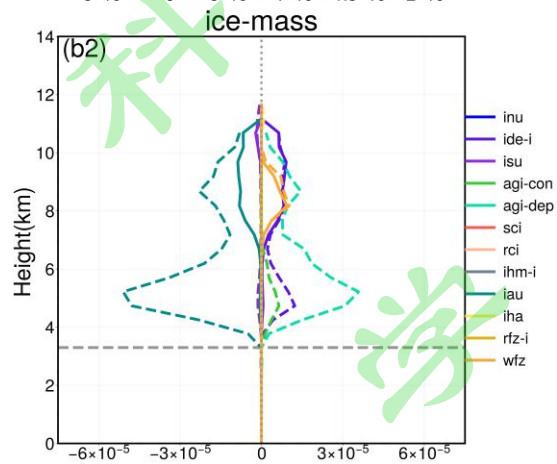
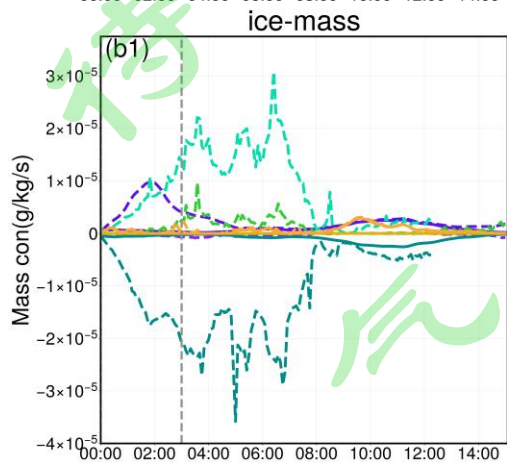
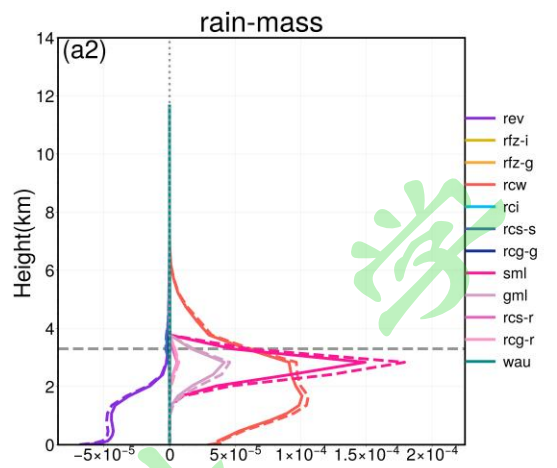
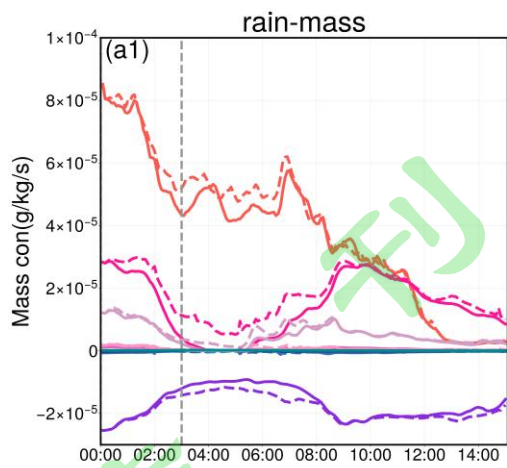


图 13 控制试验（实线）和播撒试验（虚线）中云内雨滴、冰晶、雪和霰的微物理过程速率（ g/kg/s ）区域平均随时间的变化（ $a1\sim d1$ ）和时间平均随高度（距离地面高度）的变化（ $a2\sim d2$ ）， $a1\sim d1$ 图中垂直虚线表示播撒开始和结束时间， $a2\sim d2$ 图中水平虚线表示零度层高度，垂直点线表示速率值为 0

Fig.13 The variation of the regional mean of the microphysical process rate (g/kg/s) of raindrops, ice crystals, snow and graupel in the cloud with time ($a1\sim d1$) and the variation of the time average with height (height from the ground) ($a2\sim d2$) in the control experiment (solid line) and the seeding experiment (dotted line). The vertical dotted line in the $a1\sim d1$ plot represents the start and end time of seeding, the horizontal dotted line in the $a2\sim d2$ plot represents the height of the zero layer, and the vertical dotted line represents the rate of 0.

4.5 水凝物粒子源项分析

为了理解 AgI 播撒引起的整个降水过程中导致水成物空间分布差异的微物理过程，进行如下水凝物粒子的源项分析。在整个降水过程期间对研究区域内微物理过程进行平均，然后分别除以对应水凝物粒子总源项，得到对应水凝物粒子的源项占比，用于确定每个微物理过程对水凝物粒子形成的相对重要性。

模式采用的 Thompson 微物理方案中，雨滴的源汇项包括雨滴与其他水凝物粒子的碰并、云雨自动转化，雨滴的蒸发、雨滴的冻结和雪霰的融化等。对比控制试验图 14（b）中各微物理过程转化率的占比发现，雨滴碰并云滴（rcw）过程是雨滴的主要源项，其次是雪的融化（sml）以及霰在暖层的融化（gml）。其余源项如云雨自动转化（wau），雪碰并雨滴（rsc-r），冰晶碰并雨滴（rci）和霰碰并雨滴（rcg-r）等过程量级更低，总共占雨滴源项的 2%。冰晶的主要源项为冰晶凝华增长（ide-i）和云滴冻结形成冰晶（wfz）。播撒试验图 14（a）中可以看到 AgI 播撒后，除云滴源项含量减少外其他五种水凝物粒子含量均有不同程度的增加，AgI 的核化（AgI nu）成为冰晶的主要来源，占据了冰晶四分之三的比重，且冰晶的生成速率相比于控制试验增加了一个量级，大量的冰晶产生使得冰雪自动转化（iau）的比重增加，是控制试验中所占比例的十倍，成为了雪的重要源项之一。霰粒子的主要来源是雪碰并云滴形成霰（rsc-g），虽然播撒实验中霰的 5 种源项并没有比例上明显的改变，但霰粒子净增加量的增多可以反映出播撒对霰的正影响。雪和霰含量的增多为融化过程提供了有力的支撑，对降水增加有利。对比发现，相较于自然云，雪的融化成雨滴（sml）以及霰的融化成雨滴

(gml) 分别增加了 27.26 %和 20.53 %，雨滴碰并云滴 (rcw) 在雨滴源项中占比最高但仅增加 5.81 % (计算思路为：(播撒试验中雨滴相关微物理量占比×播撒试验 rain-控制试验中雨滴相关微物理量占比×控制试验 rain) / (控制试验中雨滴相关微物理量占比×控制试验 rain)，数值来自图 14)。总之，此次降水的主要微物理机制是雨滴碰并云滴(rcw)、雪的融化(sml)以及霰在暖层的融化(gml)，而 AgI 播撒影响到了雨滴的源项比重分布，导致云中雪和霰含量增加，增强零度层附近雪、霰的融化，大雨滴增多引起云雨碰并过程增强，最终导致地面降水的增加。

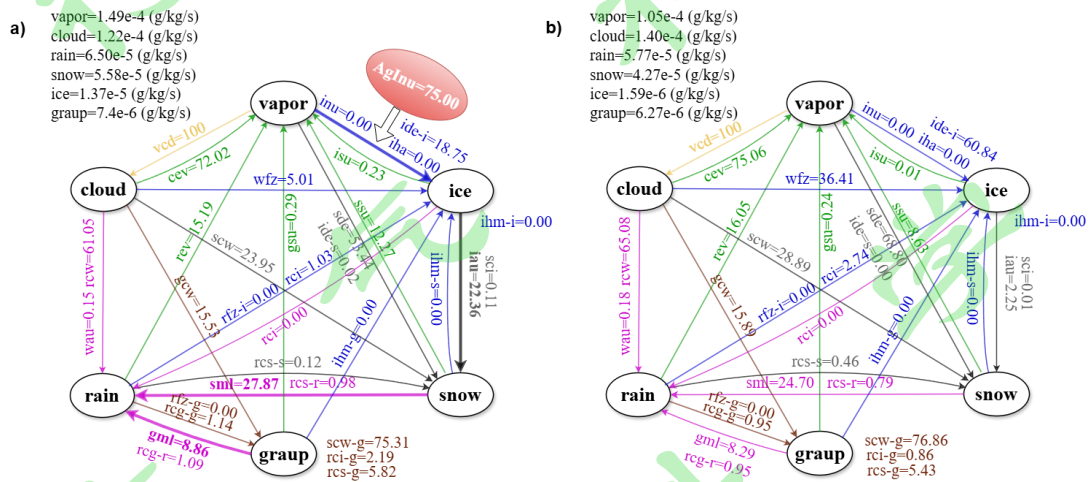


图 14 播撒试验 (a) 和控制试验 (b) 中云内水汽、云水、雨水、冰晶、雪和霰的微物理过程源项占水凝物源项之和的比值 (%), 分别对应图中绿色、黄色、紫色、蓝色、灰色和棕色, 加粗的线指示影响降水的主要过程

Fig. 14 The ratio (%) of the microphysical process source terms of water vapor, cloud water, rain water, ice crystal, snow and graupel to the sum of the hydrometeor source terms in the cloud in the seeding experiment (a) and the control experiment (b) corresponds to the green, yellow, purple, blue, gray and brown, respectively. The thickened line indicates the main processes affecting precipitation.

5.总结与讨论

采用 WRF 模式中耦合了 AgI 播撒参数化方案的 Thompson 微物理方案，对 2021 年 6 月 16 日山西北部积层混合云降水过程中的一次飞机催化作业进行了数值模拟。在模拟云顶温度和液水含量与卫星云顶温度和实际液水含量吻合较好的基础上，在积层混合云中开展催化模拟，以尽可能地接近实际催化作业的状况，达到合理展现实地作业效果的目的。通过对比催化云和自然云的模拟结果，本研

究的主要结论如下:

1.此次飞机催化作业取得了明显的增雨效果,在播撒区域及下游地表降水增多,降水增强主要在播撒后 9 个小时较为显著。本次作业局部地区累计降水增量可达 15~20 mm,区域平均增雨率为 9.6 %。

2.受作业云区动力条件和飞机作业航线影响,AgI 烟羽水平尺度上可扩展上百公里,垂直方向上主要集中在作业层(5.5 km)上下约 2 km 的厚度范围内。AgI 的核化过程主要发生在播撒后 8 个小时内。AgI 的核化过程以凝华核化为主,其次是凝结冻结核化,浸润冻结核化最弱。

3.催化后云内冰晶明显增加高于自然云,大量冰晶产生消耗云中水汽,导致催化前期雪和霰的产生和增长过程受到抑制,催化云中霰和高层处的雪低于自然云,之后随着冰晶向雪的自转化过程以及零度层附近雪霰粒子的淞附过程逐渐增强,催化云中的雪和霰的含量完全超过自然云。

4.降水的主要机制是雨滴碰并云滴和雪与霰的融化过程。播撒 AgI 直接导致了云中冰晶浓度增多,冰晶向雪转化和雪碰并云滴形成霰的过程增强,雪、霰粒子的总量增多,更多的雪、霰降落至零度层以下,融化形成大雨滴,从而增强了云雨碰并过程,最终导致地面降水增加。雪和霰融化过程较自然云增强了 27.26 % 和 20.53 %,是播撒影响降水增加的主要微物理过程。

本次催化作业带来的增雨效果与积层混合云本身的结构特征有一定联系,在层状云中嵌入的对流泡上升气流作用下有利于碘化银的扩散更好的活化,促进冰相粒子的形成与长大并最终实现增雨。通过对混合相云在人工增雨期间的飞机观测研究发现,催化后冰晶数浓度最大值与较大粒径的冰晶粒子几乎出现在云内相同区域,同时小云滴和液水含量有明显的降低趋势,这反映出云物理特性对碘化银的作用响应(Yang et al., 2022)。除此之外,可能会受到背景气溶胶浓度、天气环流场等大气动力过程的影响。

应当指出,本研究没有考虑此次试验设置是否为最优方案配置,需要进一步评估云内催化条件,可以通过改变播撒剂量、播撒高度、播撒区域等探究更适宜的播撒方案,在过冷水含量更加充沛的地方进行播撒,在节约催化剂的同时,实现更好的播撒增雨效果,为华北地区人工影响天气工作提供一定的参考。

参考文献

- DeMott P J. 1995. Quantitative descriptions of ice formation mechanisms of silver iodide-type aerosols [J]. *Atmospheric Research*, 38(1-4): 63-99. doi:10.1016/0169-8095(94)00088-u
- Dennis A S. Weather modification by cloud seeding. 1980 [M]. A Subsidiary of Harcourt Brace Jovanovich, 1-267.
- Evans A G, Hobbs P V, Stoelinga M T, et al. 2005. The IMPROVE-1 storm of 1–2 February 2001. Part II: cloud structures and the growth of precipitation [J]. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 62(10): 3456–3473. doi:10.1175/jas3547.1
- 付远, 杨洁帆, 刘汉华, et al. 2024. 基于集合预报的浙江省积层混合云人工增雨数值模拟研究 [J]. *大气科学*, 48(4): 1405–1419. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2211.22177
- FU Yuan, YANG Jiefan, LIU Hanhua, et al. 2024. Numerical Simulation of Convective–Stratiform Mixed Cloud Precipitation Enhancement in Zhejiang Province Based on Ensemble Forecasting [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 48(4): 1405–1419. doi: 10.3878/j.issn.1006-9895.2211.22177
- Feng Z, Leung L R, Houze R A, et al. 2018. Structure and evolution of mesoscale convective systems: sensitivity to cloud microphysics in convection - permitting simulations over the United States [J]. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, 10(7): 1470–1494. doi:10.1029/2018ms001305
- Gao W H, Xue L L, Liu L P, et al. 2021. A study of the fraction of warm rain in a pre-summer rainfall event over South China [J]. *Atmospheric Research*, 262: 105792 doi:10.1016/j.atmosres.2021.105792
- Geerts B, Rauber R M. 2022. Glaciogenic seeding of cold-season orographic clouds to enhance precipitation: status and prospects [J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 103(10): E2302–E2314. doi:10.1175/bams-d-21-0279.1
- Guo C W, Chen D, Chen M, et al. 2024. Aerosol impacts on summer precipitation forecast over the North China Plain by using Thompson aerosol-aware scheme in WRF: Statistical analysis and significant threat score improvements in polluted condition during June to August 2018 [J]. *Atmospheric Research*, 299: 107177. doi:10.1016/j.atmosres.2023.107177
- Guo X, Zheng G, Jin D. 2006. A numerical comparison study of cloud seeding by silver iodide and liquid carbon dioxide [J]. *Atmospheric Research*, 79(3-4): 183–226. doi:10.1016/j.atmosres.2005.04.005
- Guo Z Y, Fang J, Sun X G, et al. 2019. Sensitivity of summer precipitation simulation to microphysics parameterization over Eastern China: convection - permitting regional climate simulation [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 124(16): 9183–9204. doi:10.1029/2019jd030295
- 何晖, 金华, 李宏宇, 等. 2012. 2008 年奥运会开幕式日人工消减雨作业中尺度数值模拟的初步结果 [J]. *气候与环境研究*, 17(01): 46–58. doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2011.10043
- HE Hui, JIN Hua, LI Hongyu, et al. 2012. Preliminary study of the mesoscale numerical

- simulation of the rain mitigation operation during the opening ceremony of the 2008 Beijing Olympic Games [J]. Climatic and Environmental Research, 17(1): 46-58. doi: 10.3878/j.issn.1006-9585.2011.10043
- 何晖, 高茜, 李宏宇. 2013. 北京层状云人工增雨数值模拟试验和机理研究 [J]. 大气科学, 37(04): 905-922. doi: 10.3878/j.issn.1006-9895.2012.12097
- HE Hui, GAO Qian, LI Hongyu. 2013: Numerical simulation of stratiform precipitation enhancement in Beijing area and its mechanism [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 37(4): 905-922. doi: 10.3878/j.issn.1006-9895.2012.12097
- 何晖, 高茜, 刘香娥, 等. 2015. 积层混合云结构特征及降水机理的个例模拟研究 [J]. 大气科学, 39(02): 315-328. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1404.14102
- HE Hui, GAO Qian, LIU Xiang'e, et al. 2015: Numerical simulation of the structural characteristics and precipitation mechanism of stratiform clouds with embedded convections [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 39(2): 315-328. doi: 10.3878/j.issn.1006-9895.1404.14102
- He H, Liu X E, Xue L, et al. 2023. Mesoscale numerical simulation on the precipitation enhancement of stratiform clouds with embedded convection [J]. Atmospheric Research, 286. doi:10.1016/j.atmosres.2023.106672
- 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. doi:10.3969/j.issn.1001-7313.2001.z1.002
- HU Zhijin. 2001: Discuss on mechanisms, conditions and methods of precipitation enhancement in stratiform clouds [J]. *J Appl Meteor Sci*, 12(S1): 10-13. doi:10.3969/j.issn.1001-7313.2001.z1.002
- Hou T J, Lei H C, He Y J, et al. 2021. Aircraft measurements of the microphysical properties of stratiform clouds with embedded convection [J]. Advances in Atmospheric Sciences, 38(6): 966-982. doi:10.1007/s00376-021-0287-8
- 康增妹, 李忠亮, 刘伟, et al. 2019. 河北省一次降水云系云物理结构的飞机探测研究 [J]. 气象与环境学报, 35(04): 1-7. doi: 10.3969/j.issn.1673-503X.2019.04.001
- KANG Zeng-mei, LI Zhong-liang, LIU Wei, et al. Aircraft observations on physical properties of precipitation clouds in Hebei province [J]. Journal of Meteorology and Environment, 2019, 35(4): 01-07. doi: [10.3969/j.issn.1673-503X.2019.04.001](https://doi.org/10.3969/j.issn.1673-503X.2019.04.001)
- Kim C K, Yum S S, Park Y-S. 2015. A numerical study of winter orographic seeding experiments in Korea using the Weather Research and Forecasting model [J]. Meteorology and Atmospheric Physics, 128(1): 23-38. doi:10.1007/s00703-015-0402-4
- 刘卫国, 陶玥, 周毓荃. 2021a. 层状云催化宏微观物理响应的数值模拟研究 [J]. 大气科学, 45(01): 37-57. doi: 10.3878/j.issn.1006-9895.2005.19209
- LIU Weiguo, TAO Yue, ZHOU Yuquan. 2021. Numerical simulation of the macro and micro physical responses of stratiform cloud seeding [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 45(1): 37-57. doi: 10.3878/j.issn.1006-9895.2005.19209
- 刘卫国, 陶玥, 周毓荃, 等. 2021b. 基于飞机真实轨迹的一次层状云催化的增雨效果及其作用机制的模拟研究 [J]. 气象学报, 79(2): 340-358. doi:10.11676/qxxb2021.011
- Liu Weiguo, Tao Yue, Zhou Yuquan, et al. 2021. Simulation of stratiform cloud seeding, its rainfall enhancement effect and mechanism study based on a real trajectory of aircraft [J]. Acta Meteorologica Sinica, 79(2): 340-358. doi:10.11676/qxxb2021.011

- Meyers M P, Demott P J, Cotton W R. 1995. A comparison of seeded and nonseeded orographic cloud simulations with an explicit cloud model [J]. *Journal of Applied Meteorology*, 34(4): 834-846. doi:10.1175/1520-0450(1995)034<0834:Acosan>2.0.Co;2
- Rutledge S A, Hobbs P. 1983. The mesoscale and microscale structure and organization of clouds and precipitation in midlatitude cyclones. VIII: A model for the “Seeder-Feeder” process in warm-frontal rainbands [J]. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 40(5): 1185-1206. doi:10.1175/1520-0469(1983)040<1185:Tmamsa>2.0.Co;2
- Sun Z L, Long D, Hong Z K, et al. 2022. How China's fengyun satellite precipitation product compares with other mainstream satellite precipitation products [J]. *Journal of Hydrometeorology*, 23(5): 785-806. doi:10.1175/jhm-d-21-0179.1
- 唐林, 李琼, 黎祖贤, et al. 2020. 一次积层混合云云系微物理结构数值模拟与增雨条件分析 [J]. *干旱气象*, 38(01): 100-108. doi: 10.11755/j.issn.1006-7639(2020)-01-0100
- Lin, Li Qiong, Li Zuxian, CAI Miao, CAI Ronghui, GAO Qin. Numerical simulation of microphysical structure of a mixed convective stratiform cloud system and analysis of seeding conditions [J]. *Journal of Arid Meteorology*, 2020, 38(1): 100-108. doi: 10.11755/j.issn.1006-7639(2020)-01-0100
- Thompson G, Eidhammer T. 2014. A Study of Aerosol Impacts on Clouds and Precipitation Development in a Large Winter Cyclone [J]. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 71(10): 3636-3658. doi:10.1175/jas-d-13-0305.1
- Tian J Y, Liu J, Wang J H, et al. 2017. A spatio-temporal evaluation of the WRF physical parameterisations for numerical rainfall simulation in semi-humid and semi-arid catchments of Northern China [J]. *Atmospheric Research*, 191: 141-155. doi:10.1016/j.atmosres.2017.03.012
- Wang Z, Wang Z H, Cao X Z, et al. 2018. Comparison of cloud top heights derived from FY-2 meteorological satellites with heights derived from ground-based millimeter wavelength cloud radar [J]. *Atmospheric Research*, 199: 113-127. doi:10.1016/j.atmosres.2017.09.009
- Xue L L, Hashimoto A, Murakami M, et al. 2013a. Implementation of a silver iodide cloud-seeding parameterization in WRF. Part I: Model description and idealized 2D sensitivity tests [J]. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 52(6): 1433-1457. doi:10.1175/jamc-d-12-0148.1
- Xue L L, Tessendorf S A, Nelson E, et al. 2013b. Implementation of a silver iodide cloud-seeding parameterization in WRF. Part II: 3D simulations of actual seeding events and sensitivity tests [J]. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 52(6): 1458-1476. doi:10.1175/jamc-d-12-0149.1
- Yang J F, Lei H C, Hou T J. 2017. Observational evidence of high ice concentration in a shallow convective cloud embedded in stratiform cloud over North China [J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 34(4): 509-520. doi:10.1007/s00376-016-6079-x
- Yang Y, Zhao C F, Fu J, et al. 2022. Response of mixed-phase cloud microphysical properties to cloud-seeding near cloud top over Hebei, China [J]. *Frontiers in Environmental Science*, 10. doi:10.3389/fenvs.2022.865966
- 张明明. 2012. CCN 浓度影响层状云 AgI 催化效果的数值研究 [D]. 硕士, 南京信息工程大学.

Zhang Mingming. 2012. Modeling the impact of CCN concentrations on AgI seeding of mixed-phase stratiform clouds [D]. MS thesis(in Chinese), Nanjing University of Information Science and Technology.

朱士超, 郭学良. 2015. 华北一次积层混合云微物理和降水特征的数值模拟与飞机观测对比研究 [J]. 大气科学, 39(2): 370-385. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1405.14117 ZHU Shichao, GUO Xueliang. 2015: A case study comparing WRF-model-simulated cloud microphysics and precipitation with aircraft measurements in stratiform clouds with embedded convection in Northern China. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 39(2): 370-385. doi: 10.3878/j.issn.1006-9895.1405.14117