

稿件编号: 2019209B

doi: 10.3878/j.issn.1006-9895.2004.19209

层状云催化宏微观物理响应的数值模拟研究

刘卫国 陶玥 周毓荃

1. 中国气象科学研究院灾害天气国家重点实验室, 北京, 100081
2. 中国气象局云雾物理环境重点开放实验室, 北京, 100081

摘要: 层状云系是进行人工增雨开发利用空中云水资源的重要对象, 增雨作业需要有科学可行的技术指标来指导实际作业的科学实施, 而合理准确评估人工增雨作业的效果也是需要解决的重要课题, 通过数值模式合理地仿真模拟实际催化作业的过程, 进而研究增雨作业后云和降水的一系列宏微观特征的变化及其机理, 是建立和改进催化作业技术的必要途径, 也是评估实际人工增雨作业效果的有效手段。本文使用三维中尺度冷云催化模式对 2014 年 4 月 15 日河北省一次层状云降水的飞机催化作业过程进行了仿真模拟, 力图对实际作业过程进行合理再现, 通过对模拟结果的分析, 研究飞机播撒的 AgI 催化剂在空中的扩散传输特征, 分析催化对云和降水宏微观特性的影响, 并对此次飞机催化作业的增雨效果进行评估。研究结果表明, 播撒的 AgI 催化剂烟羽扩展的水平尺度可达数十公里以上, 垂直方向上大部分 AgI 粒子则主要集中在作业层上下约 1km 的厚度范围内, AgI 粒子的向上输送明显强于向下的输送; 催化后云中的冰晶和雪粒子明显增加, 导致催化模拟的前期霰的增长受到抑制, 之后随着霰碰并雪过程及零度层附近冰相粒子淞附过程的增强, 云中霰的总量逐渐增加; 催化作业后, 催化云的雷达回波强度有明显增强, 且随时间变化表现出不同的结构特征; 催化导致地面降水出现先减少后增加的时间变化特征, 催化后 3 小时, 作业影响区向作业区下游扩展 100km 以上, 总体呈现减雨-增雨的区域分布特征; 数值模拟评估表明, 整个评估区内的净增雨量达到 $3.6 \times 10^7 \text{kg}$, 平均增雨率为 1.1%, 暖层霰粒浓度和尺度的增加是降水增加的主要原因。由于作业目标云系的催化条件一般, 而播撒的 AgI 剂量偏大, 造成增雨作业效果偏低。

关键词: 中尺度冷云催化模式, 催化仿真模拟, 人工增雨, 物理响应, 效果评估

Numerical Simulation of Macro and Micro Physical Response of Stratiform Cloud Seeding

LIU Weiguo, TAO Yue, ZHOU Yuquan

1. State Key Laboratory of Severe Weather, Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081
2. Key Laboratory for Cloud Physics of China Meteorological Administration, Beijing 100081

Abstract: Stratiform cloud system is an important object for the exploitation and

收稿日期: 2019-9-5; 网络预出版日期:

作者简介: 刘卫国, 副研究员, 主要从事云降水物理和数值模拟研究, E-mail: liuwg@cma.gov.cn

资助课题: 国家重点研发计划(2016YFA0601701), 公益性行业(气象)科研专项(GYHY201206025), 国家自然科学基金项目(41075099)

utilization of cloud water resources. Precipitation enhancement requires scientific and feasible operational technical indicators to guide the implementation of actual operations, and reasonable and accurate assessment of operation effects is an important issue that needs to be solved. It is a necessary way to establish and improve the operation technology to simulate the actual seeding operation process reasonably by a numerical model, and then study changes and the mechanism of a series of macro and micro characteristics of cloud and precipitation after seeding operation. It is also an effective method to evaluate the effect of realistic precipitation enhancement operation. An aircraft seeding operation during the stratiform cloud precipitation in Hebei province on April 15, 2014 was simulated following real operation process by a 3D mesoscale cold cloud seeding model. The actual operation process was reasonably simulated by the numerical model. The diffusion and transmission characteristics of AgI particles seeded by aircraft in the atmosphere were studied, and seeding influence on the macro and micro characteristics of cloud and precipitation was analyzed, and precipitation enhancement effect of the aircraft seeding operation was evaluated. The results show that the horizontal scale of AgI plume can extend more than tens of kilometer, and most of AgI particles in the vertical direction are concentrated within the range of about 1km above and below the seeding layer. Upward transport of AgI particles is significantly stronger than the downward transport. The outstanding increase of ice crystals and snow particles in the cloud after seeding operation lead to the inhibition of graupel growth in the early simulation stage. However, the enhancement of graupel collection snow process and ice phase particles riming processes near zero layer gradually increase total mass of graupel after some time. After the aircraft seeding operation, the radar reflectivity has obvious enhancement and show different structural characteristics with time. The precipitation decreases first and then increase with time as a result of seeding. Three hours after seeding, the operation influence area extended more than 100km to the downstream of the operation area, and showing the distribution characteristics of rainfall-reducing area first and then rainfall-increasing area in general. The model evaluation indicates that the net rainfall increased by 3.6×10^7 kg in the entire evaluation area, with an average rainfall-increasing rate of 1.1%, and increase of graupel particles concentration and size in the warm layer is the main reason for rainfall increase. Due to the weak seeding operating conditions in the target cloud area, AgI seeding amount of this operation is relatively high, resulting in low effect of precipitation enhancement.

Key words; mesoscale cold cloud seeding model, emulational seeding simulation, rainfall enhancement, physical response, effect evaluation

1. 引言

中国有 42%的国土处于干旱半干旱区, 包括西北、华北中西部等地区 (刘玉芝等, 2018), 这些区域降水偏少, 水资源短缺问题严重, 而空中云水资源作为地球上淡水资源的重要组成部分, 科学有效地开发和调控这一资源, 是可能解决区域水资源严重短缺问题的重要方法 (李泽椿等, 2006)。通过人工增雨作业使

空中更多的水汽和云水转化为降水，是目前进行空中云水资源开发的重要途径，层状云系是进行人工增雨作业的主要目标之一，也是我国北方春秋季节主要的降水云系（洪延超和周非非，2006）。研究表明（蔡淼，2013）从水物质更新周期和降水效率角度看，与夏季对流云降水相比，层状云系降水效率低，具有更高的开发潜力，是开发利用空中云水资源的重要对象。层状云系中并不是所有区域都适合开展人工增雨作业，需要有科学可行的作业指标体系来指导作业的实施，通过对人工增雨作业后催化效果的分析 and 评估，是建立和改进作业指标体系的必要途径。

合理准确的评估人工增雨效果仍然是一个非常困难的课题，由于现实中无法获知受人影作业影响后的云系原本的自然发展状态，而且云系本身的发展变化也会受到多种自然因素的影响，因此将人为播云催化作业产生的变化与催化目标云系的自然变化分离开来是非常困难的，这也是物理检验和统计检验具有不确定性的主要原因。数值模式在这一方面则具有一定的优势，它可以在与自然云相同的气象条件下重复进行播撒作业的数值模拟以分析催化作用的影响链条，也可以通过模拟来重现实际发生的人工增雨作业过程以帮助评估作业的效果等（Xue et al., 2016; National Research Council, 2003），这也必然对数值模式本身提出了要求，即需要建立能够合理的模拟甚至再现真实催化过程的催化模式。

催化模拟研究中，在模拟的云区中指定的时空范围内，通过直接增加冰晶浓度或质量来代表催化过程是催化模拟研究常采用的一类方式（Koenig and Murray, 1983; 何观芳等，2001; 孙晶等，2010），这种方式适合于对催化效果的一些理论研究，但它忽略了对催化剂粒子到冰晶这一重要阶段的物理过程描述。Hsie et al. (1980) 和 Kopp et al. (1983) 则较早的在二维对流云模式的催化模拟中分别采用物理方程显式描述了 AgI 和干冰两种播云催化剂的核化，从而使催化模拟更为接近实际发生的物理过程，Orville et al. (1984) 采用前述二者的催化模拟方案在二维云模式中研究了层状云中播撒 AgI 和干冰的催化效果。此后，Hsie 的 AgI 催化模拟方案被多个模式所采用，如黄燕和徐华英 (1994)、Guo et al. (2006)、何晖等 (2012、2013) 分别在二维冰雹云模式、三维对流云模式以及三维中尺度模式中采用 Hsie 方案开展了云催化效果的研究。Meyers et al. (1995) 根据 Demott (1995) 在云室试验中对 AgI 核化的研究结果，建立了 AgI 催化剂核化的参数化方程并应用于 RAMS (Regional Atmospheric Modeling System) 模式中，对冬季地形云的催化效果进行了数值模拟评估，刘诗军等 (2005)、楼小凤等 (2014)、Xue et al. (2013a, 2013b)、刘卫国等 (2016) 则分别将 Demott 的试验结果应用于云模式和 WRF (Weather Research and Forecasting Model) 中尺度数值模式中进行 AgI 催化的数值模拟研究，评估催化作业的效果。此外，针对致冷剂（如液氮、干冰）等的催化模拟也有发展，Guo et al. (2006) 在三维对流云模式中对液态 CO₂ 的催化过程进行了详细模拟，Hashimoto and Murakami (2016) 在 JMANHM 模式 (Japan Meteorological Agency Non-Hydrostatic Model) 中采用了 Guo et al. (2006) 的液态 CO₂ 的催化方案，同时采用并改进了 Kopp et al. (1983) 的干冰催化方案，并利用该模式模拟研究了这两种催化剂在冷云催化作业中效果的异同。可见，对人工影作业中播云催化剂的物理过程引入参数化方程进行详细模拟已是催化模式的重要发展方向之一，这也使得用模式评估催化作业的效果在物理基础上更为合理。除此之外，随着数值模式本身的进步以及计算能力的快速发展，数值模式的云微物理方案对云和降水的物理过程描述更为细致完整，且数值模拟计算已经可以达到很高的模式分辨率，如 Xue et al. (2016)、Chu et al. (2017) 利用耦合了 AgI 催化方案的 WRF-LES (Large Eddy Simulation) 模式对地形云催化作业中 AgI 催化剂的影响进行了模拟研究，其模拟分辨率已达到百米级，从而使模式能够显式分辨催化剂粒子在大气中的一些湍流扩散过程。总之，无论是对催化的物理过程描述，还是模式模拟的精细度上，数值模式对真实催化过程的模拟能力都有了较大提高，这使开展人工增雨作业过程的精细模拟以及针对真实催化作业的效果进行更为合理的数值模拟评估成为可能。

本研究采用基于 WRF 发展的一个三维中尺度冷云催化模式，对 2014 年河北省一次层状云降水过程中的飞机催化作业进行了数值模拟，通过改进原催化模式，使其能够根据实际作业信息仿真模拟飞机的播撒作业方式，从而使模式模拟的催化作业过程更接近于实际状况。数值模拟研究首先将自然云的模拟结果与实际观测进行了对比，并根据对比结果开展了催化模拟，根据模拟结果对 AgI 催化剂在云中的扩散传输特征进行了分析，然后通过对对比催化云和自然云的发展演变，分析了催化作业造成的云和降水宏微观物理特征的变化即催化的物理响应，并探讨了变化的原因，最后对此次作业的增雨效果进行了评估。

2. 天气背景和飞机作业概况

2014年4月15日河北中南部地区出现一次层状云降水过程。此次过程，河北省受来自中国河套地区的弱高空槽缓慢东移影响，同时中低层沿河套地区至河北南部一线有暖式切变线存在，低层存在东北风回流将北方冷空气自辽宁地区引入河北中部（孙玉稳等，2017）。受此系统控制，河北中南部地区中高层主要为西南暖湿气流控制，低层为回流的冷空气，呈上暖下冷的稳定结构；水汽条件上，虽然有西南暖湿气流输送水汽，但水汽通量不大，总体水汽条件一般。实况云系观测表明，15日14时后河北大部地区已被云区覆盖，云系以层状云为主，地面观测到河北西部和南部地区的云系主要为中低云，云底高度0.6~2.5km，河北北部主要为高云。此次过程的降水主要位于河北中南部地区，降水量以小雨为主。

这次降水过程期间，在河北中南部地区开展了飞机增雨作业，并利用飞机搭载的机载PMS系统对目标云系进行了飞行探测。作业飞机于15日16:55从石家庄正定机场起飞，到赞皇后先盘旋上升后下降至4800m，然后做S型飞行并开展催化作业，整个作业过程总计燃烧19根AgI烟条（每根含AgI催化剂12.5g），其中在起飞段17:12~17:22之间（高度约3000~5000m，温度-0.5~-5.5℃）共燃烧两根烟条，在平飞段17:45~18:30之间（高度约4800m，温度约-6.0℃），作业剂量为17根烟条。作业后，飞机进行穿云探测并于20:05返回机场。孙玉稳等（2017）针对此次过程的飞机探测情况进行了详细分析，并从观测角度对催化作业的效果进行了对比分析，本文主要从数值模式角度研究催化作业引起的云和降水的宏微观物理变化及其物理机制，并评估催化作业的效果。

3. 模式及模拟设置介绍

本研究采用刘卫国等（2016）发展的三维中尺度冷云催化模式，该模式在WRF动力框架下耦合了冷云催化模块，模拟了AgI催化剂粒子播撒入云后的各种核化过程，包括凝华核化、凝结冻结核化、接触核化和浸没冻结核化四种微物理过程，同时考虑了AgI粒子核化与环境场的相互作用，模式可进行AgI类催化剂的催化模拟研究。为更合理地模拟实际飞机催化作业中飞行轨迹和真实作业情况，对上述催化模式进行了改进，建立了催化信息处理及作业轨迹仿真模块，使模式可以在催化模拟运行时能将实际飞行的作业信息数据（包括飞机轨迹，连续催化作业的时间、水平位置、高度以及当时的催化剂量）适时导入模式，从而实现了对实际飞机催化作业过程的数值仿真模拟。

数值模拟试验中，模式水平方向采用3km-1km的两层双向嵌套区域设置（图1），垂直方向65层，模式层顶取为100hPa，模式内外层区域的微物理方案均使用CAM5（Chinese Academy of Meteorological Sciences）方案（Lou et al. 2012; Gao et al., 2011），不使用对流参数化，模拟时段为15日08时至16日08时（北京时，下同）。模式采用的初始场和侧边界均由LAPS（Local Analysis and Prediction System）中尺度分析场提供，该分析场以0.5度的NCEP-GFS每3小时一次的全球预报场作为背景场，使用LAPS系统同化了华北区域内的9部多普勒天气雷达数据、地面观测数据和探空数据，同化后的分析场分辨率为3km，输出频率为每3小时一次（张雨芳等，2017；李红莉等，2009）。如无具体说明，本文的模拟结果分析均采用1km分辨率的d02区域的数据，催化模拟也在该区域内开展，具体的催化设置参见第5部分的介绍。

图1. 模式3km模式域（d01）和1km模式域（d02）的范围

Fig.1 3km domain (d01) and 1km domain (d02) of the simulation.

4. 自然云模拟结果与实况的对比

图2为模拟的15日20时不同等压面形势场与实况的对比，其中模拟区域取最外层d01区域的结果。可以看到，模拟的高度场等高线位置较实况略偏西，即模拟的天气系统移动稍落后与实况，但实况分析中

对于 500hPa 上河北北部的弱波动及南部平直的纬向环流形势、700 百帕河北南部的较强的偏南风等特征，在模拟的形势场中均有较好的体现，说明模式对天气系统形势能较好的模拟出来。对于云系宏观形态特征的模拟，模式结果也与实况有较好的对应，图 3 为 15 日 16 时模拟的 d01 区域云带与 FY2 卫星反演的云光学厚度的对比。图中模式的云带实际为垂直积分的总水量，它可以反映云中水凝物的分布状况，总水量大的区域一般表明云的发展状况较好。光学厚度也与云的发展及降水存在较高的相关性，光学厚度较大的区域往往指示云层较为密实、发生降水的概率较大（周毓荃等，2008，2011）。图 3 对比表明，模拟的云带在山西、河北中南部、天津等地区发展较好，与实况光学厚度大值区的分布基本一致，实况河北南部及山东西北部区域光学厚度大值区零散分布的特征在模拟的云系分布中也有较好体现，虽然云系中具体的云区位置有所偏差，但模拟对云系总体形态及其内部发展不均匀的特征都较好的表现了出来。

图 2. 2014 年 4 月 15 日 20 时 500hPa (a1, b1) 和 700hPa (a2, b2) 天气形势对比。a1、a2 为实况观测，b1、b2 为模拟结果
Fig.2 Comparison of 500hPa (a1, b1) and 700hPa (a2, b2) synoptic situation at 20:00 on April 15, 2014. a1 and a2 for observation, b1 and b2 for simulation.

图 3. 模拟的 15 日 16 时的云带 (a, mm) 与 FY2 卫星反演的云光学厚度 (b) 对比
Fig 3. Comparison between cloud band (a, mm) simulated by model and cloud optical thickness (b) retrieved from FY2 satellite at 16:00 on April 15.

实况雷达观测表明，15 日下午石家庄以北地区主要以均匀的层状云回波为主，回波强度在 30dBZ 以下，15:00 后有 30dBZ 以上的回波区自山西中东部逐渐东移发展，其强回波中心高度在 2km 左右，强度最高可达 35dBZ，同时在河北衡水南部及邢台东部地区也有强回波区发展并向西缓慢移动，最大回波强度高于 35dBZ，30dBZ 回波的顶高略高于 2km。18:06 左右东西两个强回波区在石家庄东南部及邢台中北部地区相遇合并，合并后雷达回波强度增强，最大可达 45dBZ 以上，30dBZ 以上的强回波区范围也明显增大，合并后的回波主体自西向东方向缓慢移动，19:18 后回波区强度开始逐渐减弱。

对比图 4 中的模拟雷达回波与实况回波，模拟的雷达回波表现出了 15 日下午东西两个方向雷达强回波区的各自移动特征以及合并的过程，且垂直剖面上（图略）模拟回波顶高总体与实况接近，只是回波中心强度较实况偏弱。从雷达回波的水平分布位置看，模拟的河北中南部的回波位置较实况偏南偏东，经度和纬度上各自相差 0.5 度和 0.3 度左右。回波的时间变化特征表明，模拟的回波出现与实况回波类似特征的时间要晚约 60min，因此在降水的比较上，将模式的降水时段统一延后 60min，用模式 22:00 的 4 小时累积降水与实况 21:00 的 4 小时累积降水进行对比（图 5）。从图 5a 中可以看到，实况降水量主要在 0.1-8mm 之间，降水中心主要位于石家庄南部、邢台北部到邢台中南部的南北走向的区域，最大降水量在 7-8mm 之间；模拟的降水大部分区域在 0.1-7mm 之间，降水中心的最大降水量主要在 6-7mm 之间，均与实况量级相当，仅在邢台东南部局部区域模拟的降水量较实况偏强。降水的分布上，模拟降水大于 2mm 的区域较实况偏大，降水中心区域的走向与实况的南北走向一致，但水平位置较实况偏东偏南。如果参考雷达回波位置对比的结果将实际雨量站的位置向东向南分别平移 0.5 经度和 0.3 纬度（图 5b），可以看到模拟的降水分布与平移后的“实况降水”更为相似，特别是降水中心的位置更为接近。雷达回波与降水的对比表明，模式模拟的回波发展和降水结果总体上反映了实况雷达回波和降水的主要特征，只是模拟结果与实况相比在时间和空间上有一定的偏差。

图 4. 模拟的 15 日不同时刻的雷达组合反射率 (dBZ) 与实况的对比。(a1) 17:30, (a2) 18:00, (a3) 18:42; (b1) 18:35, (b2) 19:00, (b3) 19:40.
Fig.4 Comparison of radar compositive reflectivity (dBZ) between observation (a1, a2 and a3) and simulation (b1, b2 and b3) at different moments on April 15. (a1) 17:30, (a2) 18:00, (a3) 18:42; (b1) 18:35, (b2) 19:00, (b3) 19:40.

图5. 模拟的22:00的4小时累积降水与实况21:00的4小时累积降水对比。(a)雨量站点为实际位置(b)雨量站点向东平移0.5°经度和向南平移0.3°纬度。图中填色圆圈表示雨量站点及其降水量,阴影为模拟降水。

Fig.5 Comparison between simulated 4-hour accumulative rainfall at 22:00 and measured 4-hour accumulative rainfall at 21:00. (a) actual rainfall stations, (b) rainfall stations which were shifted 0.5 longitude to east and 0.3 latitude to south. Colored circles represent stations and amount of rainfall, and shaded area represent simulated rainfall.

在飞行期间,飞机起飞后至赞皇进行垂直探测这一时段(17:12:00-17:36:25)播撒了两根烟条的催化剂,但由于飞机一直在爬升且时间较短,可认为这一段是对自然云的探测,其数据可作为未催化云区的探测结果与模式的自然云模拟结果进行对比。机载探测仪器中包括2D-C、2D-P和温度探头(孙玉稳等,2017),其中2D-C探头(量程17.75—1567.75 μm)主要观测的是云中几十微米以上的液相和冰相大云粒子的特征,2D-P探头(量程106.50—9406.50 μm)主要观测云内外液相和冰相降水粒子的特征。机载观测的宏观记录表明,上述探测时段,云中主要以冰相粒子为主,因此可将模拟的冰晶粒子浓度与2D-C探头的探测结果进行定性对比,而模拟的雪、霰和雨滴等降水粒子的浓度则可与2D-P探头的数据进行对比。根据前述分析,考虑模拟结果与实况在空间和时间上存在的差异,模式中将飞机轨迹向东向南分别平移0.5°经度和0.3°纬度,然后再提取轨迹上所有格点的数据,而时间上则较实况延后约一小时,选取18:15-18:40时段每5min一次的模式输出数据进行时间平均,以此代表探测区域的平均云垂直状况。

图6. 模拟的探测云区垂直结构与飞机探测结果的对比。(a)温度,(b)模拟的冰晶浓度与2D-C探测的大云粒子浓度,(c)模拟的降水粒子(雪+霰+雨)浓度与2D-P探测的降水粒子浓度。图中黑色实线为飞机探测结果,带圆圈的黑色实线为模拟结果,a中的黑色虚线为20:00的邢台探空站的温度数据。

Fig.6 Comparison between simulated vertical structure and aircraft observation in cloud. (a) temperature, (b) simulated ice crystals concentration and large cloud particles concentration measured by 2D-C, (c) simulated snow, graupel and raindrop total concentration and precipitation particles concentration measured by 2D-P. Solid lines denote probe's results of aircraft, and solid lines with circle represents simulated results. Dashed line in (a) shows temperature taken from sounding at 20:00 of Xingtai station.

图6为模式模拟的对应于飞机垂直探测段(参见图7)的飞机轨迹上各物理量数据与机载仪器探测结果的对比。由图6a中温度对比可看到,模拟的垂直温度变化趋势与实况飞机探测以及临近时刻的探空数据均有较好的一致性,数据显示零度层高度在2600~3000m之间(飞机探测有弱逆温层存在)。在3800~4000m高度,飞机和探空的温度曲线上均存在逆温的情况,模拟的温度变化没有体现这一特征,从模式的垂直分辨率看,在这一高度的垂直网格距为200m左右,大于实况逆温层的厚度,这可能是模式没有模拟出逆温层的原因。孙玉稳等(2017)对该个例的飞机探测资料的分析指出,探测云区垂直方向存在分层现象,主要云区分为上层4525~5903m、中层2900~4300m,2400m以下有低云存在。图6b、c为模拟的冰晶粒子和降水粒子浓度的垂直分布与探测结果的对比,可以看到4000m以上,与实况的上层云区大致对应的区域,模式模拟的云粒子(冰晶)和降水粒子(包括雪、霰和雨滴)浓度的垂直变化趋势与探测结果有较好的一致性,只是在量值上要高于实况探测数据,但差异大部在一个量级以内,总体上,模式对这一部分云区微物理结构的模拟较好。在4000m以下,模式模拟的各粒子浓度明显下降,远低于实况探测的粒子浓度,显然模式对下层云区的模拟结果较差,模拟的云底高度要高于探测结果,这可能对降水和催化增雨的模拟有不利影响。上述对比的结果表明,模式虽不能完全复现探测云区的垂直结构,但能较好的模拟出探测区域冷云区的温度、微物理等的垂直分布特征,而且这一区域恰好位于飞机催化作业的云区。

5. 催化模拟和效果分析

第 4 部分模拟结果与实况的对比表明, 数值模拟能合理再现实况云和降水变化的一些主要特征, 只是模拟结果在时间和水平位置上与实况有所差异。催化模拟需要选择与实际特征相似的模拟云区, 考虑到前述对比的结果, 模式中的催化作业需在水平位置和时间上进行相应调整以使作业的目标云区与实况特征接近, 即将飞机催化的轨迹整体向东向南分别平移 0.5 经度和 0.3 纬度, 同时将催化开始时间也统一延后约 1 小时。因此, 在模式中的催化作业是根据实际作业平移调整后的数据进行仿真模拟。模拟的催化开始时间分别选择在 18:15 和 18:48 (实际作业开始时间为 17:12 和 17:45,), 整个模拟中催化的总剂量与实际作业一致, 合 AgI 共计 237.5g。催化模拟运行于 18:00 启动, 至 22:00 模拟结束, 运行期间每隔 5min 输出一次计算结果, 以便与对应时刻的自然云模拟结果进行详细对比, 为表述方便, 下文将催化模拟称为催化试验 (ST), 自然云模拟称为控制试验 (CT)。

图 7. 催化作业前不同高度的云水混合比 ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 阴影区) 和冰晶浓度 (L^{-1} , 绿色等值线) 分布及飞机催化作业段的轨迹。(a) 4500m, (b) 4800m, 催化作业层, (c) 5300m, (d) 5700m。图中红色虚线段为第一次催化的作业段, 红色实线段为第二次催化的作业段, 黑色虚线段为飞机垂直探测区域。

Fig.7 Cloud water mixing ratio($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$, shaded areas) and ice crystal number concentration (L^{-1} , green contours) and aircraft trajectory on (a) 4500m, (b) 4800m, the seeding operation layer and (c) 5300m and (d) 5700m. Red dashed line denotes the first seeding operation stage, and red solid line denotes the second seeding operation stage, and black dashed line indicates vertical detection area by aircraft.

图 7 为模式中第二次催化作业前 (18:45) 不同高度上云水和冰晶的水平分布以及与飞机催化作业轨迹 (调整后) 的叠加。由图中可看到, 整个云区的过冷水区域范围较小且分布零散, 大部分过冷水水区的含水量值在 $0.1\text{g}/\text{kg}$ 以下, 飞机作业区中仅部分区域有过冷水, 作业层冰晶浓度大部在 $1\sim 50\text{L}^{-1}$ 之间, 但也有相当一部分区域的冰晶浓度达到 50L^{-1} 以上, 甚至有个别区域达到 150L^{-1} 以上。对于层状云的增雨而言, 丰沛的过冷水和较低冰晶浓度对催化是更有利的 (胡志晋, 2001), 从本个例云中过冷水和冰晶的特征看, 显然作业云区的过冷水并不丰沛, 且冰晶浓度也有些偏高, 这说明催化作业云系的冷云催化潜力是较弱的。云中过冷水一般随高度增加而减少, 第二次催化作业的高度为 4800m, 由图 7 可见, 4800m 高度上过冷水分布状况要好于更高层的云区, 与低层的 4500m 的过冷水状况差别不大, 但从温度上看, 4800m 的温度 ($-6^{\circ}\text{C}\sim -7^{\circ}\text{C}$) 比 4500m 低, 对催化作业更为有利, 因此作业高度选择 4800m 是适宜的。

a. AgI 的扩散传输

模式中的催化方式与实际作业一致, 分为两个阶段: 第一阶段 (模式中时间为 18:15~18:25) 模拟飞机爬升阶段的播撒, 高度从 2800m 的零度层附近到 4900m; 第二阶段 (模式中时间为 18:48~20:00 时) 作业层高度在 4800m, 采用 S 型飞行轨迹进行催化 (图 7), 第二阶段为实际作业的主要阶段, 本文主要对第二阶段的催化效果进行分析 (如无特别说明, 下文所指均为第二阶段的催化)。根据飞机观测的宏观记录, 第二阶段催化播撒的大部分时段, 飞机机身没有发现明显的积冰, 仅在作业结束前发现有轻微积冰, 同时播撒作业期间不时有平飞出云的情况, 这说明实际作业高度处的云层较为分散, 过冷水含量偏低, 模式模拟结果也反映了在催化层过冷云水含量较低且较为分散的状况 (图 8)。实况和模拟结果均表明, 催化层的主导风向为西风略偏南, 模式模拟的 AgI 催化剂在播撒后, 其形成的烟羽水平范围不断扩大并随主导气流向东略偏北方向移动 (图略)。图 8 为模拟的催化后 1 小时和 2 小时沿主导风向和垂直于主导风向通过 AgI 烟羽的垂直剖面。从图中可看到, 催化后 2 小时内, AgI 烟羽高浓度区在垂直方向上主要还是集中在作业层附近, 约 4500~5000m 之间 ($-6\sim -12^{\circ}\text{C}$), 部分区域的 AgI 烟羽随上升气流也可达到 -30°C 层以上较高的区域 (图 8b); 烟羽在水平方向的扩展明显强于垂直方向, 催化后 2 小时的烟羽水平尺度最大已达 50km 左右 (图 8d), 这与飞机播撒的轨迹和 AgI 粒子所在云区的动力条件是相关的。此外, 从剖面图中可看到, AgI 烟羽范围内有过冷水云水分布, 主要集中在 4000~5000m 和 6000m 以上, 过冷水分布较为分散, 模拟数据

显示云水混合比值基本低于 0.1g/kg, 说明本次作业云区的过冷水条件偏弱, 不过从过饱和比及上升气流区的分布看, AgI 烟羽与这些区域有较大范围的重合, 而大于 0.04 或更高的冰面过饱比 (Meyers et al., 1995; Xue et al., 2013a) 的水汽环境是有助于 AgI 粒子通过凝华核化过程形成冰晶的, 而水面欠饱和则利于过冷水蒸发, 从而增强了云中冰水转化的贝吉龙过程, 促进了冰晶粒子快速成长, 加上这些区域存在上升气流以及适宜的温度 (低于 -6°C), 也为 AgI 粒子核化和冰晶粒子成长提供了有利环境。

图 8. 催化作业开始后 1h (19:45) 和 2h (20:45), 沿播撒层 (a, b) 主导风向 (西南-东北) 和 (c, d) 垂直主导风向 (东南-西北) 的垂直剖面。其中填色区为 AgI 粒子数浓度 (L^{-1}), 蓝色等值线为 $0.001\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 的云水, 绿色等值线为 0.04 的冰面过饱和比, 黑色等值线是值为 -0.05 和 0 的水面过饱和比, 红色等值线为 $0.1\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的上升气流速度, 灰色等值线为温度 ($^{\circ}\text{C}$)。 Fig.8 Vertical sections along (a, b) prevailing wind direction (from southwest to northeast) and (c, d) perpendicular to prevailing wind direction (from southeast to northwest) of seeding layer at 1h (19:45) and 2h (20:45) after seeding operation starts, including number concentration of AgI (L^{-1} , shaded areas), cloud water with a mixing ratio of $0.001\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ (blue contours), ice supersaturation ratio with a value of 0.04 (green contours), water supersaturation ratio with values of -0.05 and 0 (black contours), updraft speed with a value of $0.1\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ (red contours) and temperature ($^{\circ}\text{C}$, gray contours).

图 9. 19:00-22:00 时的 AgI 数浓度的 CFAD 图 (a) 和 CFDAD 图 (b)。(a) 中填色区为催化试验的 AgI 分档频率 (%), (b) 中填色区为催化试验与示踪试验的 AgI 分档频率的差值 (催化-示踪, %)

Fig.9 CFAD (a) and CFDAD (b) of simulated AgI number concentration from 19:00 to 22:00. The shaded area and contours indicate binned frequency of AgI (a, %) and AgI binned frequency difference between seeding test and tracer test (b, %).

图 8 显示了典型时刻的 AgI 烟羽的瞬时分布状态, 使用频率等值线随高度分布图 (contoured frequency by altitude diagram, 以下简称 CFAD) 的形式则可从总体上展现了 AgI 扩散传输的时空特征 (图 9a)。将催化后 3 小时内 (19:00-22:00 时) 模式每隔 5min 输出的所有 AgI 三维数据按高度等间隔分为 58 层, 并将 AgI 浓度从 $10^0\sim 10^8\text{m}^{-3}$ 分为 81 档, 计算每一高度层中 AgI 各浓度分档中的格点数, 并将每一层每个分档的格点数除以该层总格点数得到频率值。图 9a 即为根据频率值所得到的 CFAD 图, 其中 x 轴为 AgI 数浓度的对数尺度坐标, y 轴为海拔高度, 填色区即为频率值, CFAD 图从总体上给出了研究对象的统计特征 (Yuter and Houze, 1995; Chu et al., 2014; Xue et al., 2016)。图 9a 可看出, 催化后的 3 小时内, 大部分 AgI (浓度范围 $3\times 10^4\sim 10^6\text{m}^{-3}$) 主要分布在 $4500\sim 5500\text{m}$ 的高度区间内 (见图中 0.5% 等值线区域), 这一高度区域应当是 AgI 催化作用起效的主要区域; 低浓度的 AgI 随气流向上最高可输送到接近 9000m , 向下最低可到达 3500m 的高度, 显然 AgI 的向上输送明显要强于向下的输送。

由于模式没有对核化为冰晶的那一部分 AgI 粒子分布进行预报, 为了解 AgI 消耗的情况, 进行了 AgI 的示踪模拟试验 (即在模拟中, 播撒的 AgI 粒子除了不参与任何核化过程外, 其他与催化试验完全相同), 并计算了催化试验与示踪试验中 AgI 频率值的差值 (催化试验减示踪试验), 形成 CFAD 差值图 (图 9b), 下文简称为 CFDAD 图 (contoured frequency difference by altitude diagram), 其结果可从一定程度上反映 AgI 粒子的消耗特征 (由于催化试验的 AgI 有核化过程, 因此两个个例模拟的环境背景场上会有一些差异, 但由于目标云系为层状云且并没有进行集中的大剂量催化, 因此实际催化造成环境背景场的变化对 AgI 分布特征的总体影响不大)。图 9b 中可看到, 催化试验的 AgI 在各高度层基本以减少为主 (负频率差), 在 4800m 的作业层附近 (约 $4700\sim 5300\text{m}$) 存在最大的 AgI 消耗峰值 (-0.15% 等值线区域), 峰值区域对应 AgI 浓度在 $5\times 10^5\sim 2\times 10^6\text{m}^{-3}$ 区间, 消耗峰值区域与图 9a 的大部分 AgI 的分布区域一致。 7000m 以上, 催化试验的 AgI 在各浓度档均为减少的状态, 其原因一方面本地 AgI 核化的消耗作用, 另一方面应当是低层 AgI 的大量消耗导致垂直输送减少的缘故。

b. 云微物理量的变化

本文的效果分析主要针对催化后 3 小时（19:00~22:00 时）的云和降水变化，根据模拟的 AgI 烟羽及地面降水变化的范围，将 37.0N~37.7N、114.8E~116.5E 的区域作为催化后 3 小时的评估区（图 14），如无特别说明，下文的所有分析均针对此评估区。

图 10. 19:00-22:00 时评估区内云中各微物理量的频率差（ST-CT，填色区，%）随高度的分布（CFDAD）。图中黑色实线为水凝物混合比的水平及时间的综合平均值差值（ST-CT）相对控制试验的变化（%），垂直黑色短划线对应相对变化的零值，绿色实线为控制试验水凝物混合比的水平和时间综合平均值（ $\text{kg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ），水平黑色点划线为评估区平均零度层高度。

Fig. 10 CFDADs (shaded areas) of simulated microphysical parameters in evaluation area from 19:00 to 22:00. Black solid lines denote changes in the difference of horizontal and temporal averages of every hydrometeor mixing ratio relative to the control test (%), and vertical black dash-lines correspond to the zero value of relative change. Green solid-lines indicate horizontal and time averages of hydrometeor mixing ratio in control test ($\text{kg}\cdot\text{kg}^{-1}$), and horizontal black dash-dot-lines denote mean zero-temperature level height of evaluation area.

图 10 显示了催化试验和控制试验中各微物理量频率值相减制作的 CFDAD 图（填色）、控制试验中各微物理量的水平和时间综合平均值（绿色实线，其值为将对应物理量在同一高度层上的整个时间段内的所有样本求平均所得）以及催化试验对比控制试验的平均相对变化（黑色实线）。与图 9 中 AgI 主要分布区和消耗峰值区的高度对应，图 10a 中 4500~5500 之间的大混合比值水汽的频率差为负，而图 10b 中云水的频率差几乎全部为负值，这说明催化云中这些范围的水汽和云水是减少的；平均相对变化也表明，水汽和云水处于纯消耗的状态，最大分别减少 0.1% 和 3.5%，绝对量均在 10^{-4} kg/kg 量级。水汽和云水这种消耗显然是催化引起的，这一高度层的温度均低于 AgI 催化剂的核化阈温（约 -5°C ，对应平均高度约 4500m），利于 AgI 的核化而造成水汽和云水的更多消耗，而新增的冰晶粒子的成长会进一步消耗云水和水汽。从图 10c 上可看到，4500m 以上冰晶混合比值较大的区域，频率差均为正值，峰值基本位于 4500~5500m 范围，平均变化的最大增幅达到 13.7%（5076m），可见催化使这些高度层的冰晶增加最为显著。结合图 7 中云条件分析和图 9a 的碘化银扩散特征，飞机播撒作业的位置是适宜的，较好的利用了 4500m~5500m 这一适宜碘化银核化的区域。比较图 10c~e，4500m 以上，雪的变化特征与冰晶类似，催化云中大混合比值的雪是增加的（图 10d），平均变化的最大增幅达到 3.6%（4458m）；而霰的变化特征与冰晶和雪的变化相反，催化云中大混合比值的霰是明显减少的，平均变化的最大降幅达到 4.9%（4664m）。从雪霰粒子成长的微物理过程考虑，雪霰粒子均会通过冰相粒子之间碰并聚合过程、淞附过程和凝华增长过程成长，其中后两种过程分别会消耗云中的过冷云水和水汽，但是在催化云中，并没有比自然云中有更好的条件使雪霰通过淞附和凝华过程成长为更大尺度的粒子，因为催化剂的核化已经使催化云中水汽和云水减少，而催化增加冰晶在成长过程中也会加大对水汽和云水的消耗，这进一步削弱雪霰粒子个体通过淞附和凝华过程成长的条件。因此，冰相粒子之间的碰并聚合过程的增强应当是催化云中雪粒子增加的主要原因，即催化导致冰晶的增加，从而冰晶粒子之间聚合成长（形成雪）、雪碰并搜集冰晶的过程增强的作用；冰晶、雪的增加也会促使霰通过碰并过程搜集冰晶/雪而增长的作用加强，但图 10e 表明霰的增长显然受到了抑制，这与催化云中过冷云水和水汽的更多消耗有关，其内在原因将在下文作详细分析。

图 10a、b 中可看到，在 4500m 向下到零度层附近，催化云中水汽的变化不大，而云水仍然有明显的消耗。由于 4500m 以下的温度已经高于 AgI 的成核阈温，因此云水的消耗最大可能是由于冰相粒子的贝吉龙增长过程和雪霰粒子淞附云水的过程，对比图 15a2、b2 中雪霰的淞附过程的变化可知，冰雪粒子的贝吉龙增长过程应当起到了更大作用。图 10e 中显示零度层附近的过冷区，催化云中混合比值 $6 \times 10^{-6} \sim 4 \times 10^{-4} \text{ kg/kg}$ 范围内的霰是增加的，其原因可能有两方面，一是部分霰粒子在零度层附近通过碰并云水或雨滴增长；二是零度层附近冰雪粒子通过淞附成长为霰的过程增强，因为在接近零度层的过冷层中，催化云中的冰晶和雪是明显增长的（图 10d 正频率差）。

零度层以下的暖层中，从图 10f 中的雨滴混合比平均相对变化可看到，催化云中的雨滴混合比值在零度层附近达到最大的相对增量 0.5%（绝对增量也达到最大 $1.0 \times 10^{-7} \text{ kg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ，2809m），这应当是雪霰粒子融化的综合作用结果，之后随高度降低直到地面附近，雨滴变化减小但基本维持在 0.2% 的增量（绝对量均在 10^{-8} kg/kg 量级；最大值相对变化 0.24%，位于 1572m）。霰在暖层的融化是雨滴的重要来源之一，图 10e 暖层上部霰的平均相对变化基本是增加的，最大相对增量达到 1.0%（2190m，绝对增量 $1.4 \times 10^{-7} \text{ kg/kg}$ 也为最大值），霰的增加对雨滴的增加是有利的。从图 10f 频率差分布看，催化云中不同尺度的雨滴的增减不一，按混合比值从小到大依此为增-减-增的分布，即较小的雨滴和大雨滴均有增加，二者对降水增加均有贡献，而图 10e 中暖层中霰的频率差分布特征与雨滴类似，这说明暖层中雨滴的变化与霰的变化有重要联系，霰在暖层的融化过程可能是影响雨滴变化的主要原因。

在图 10 的 CFAD 差值分布中，除具有明显指示意义的正变化和负变化区域外，还存在一些正负值随机变化的区域，如图 10e 中云水在 6000m 以上和暖层区域的一些 CFAD 差值变化，产生这种现象的原因一方面可能是由于微物理量的变化受云中多个微物理过程影响，但并没有总体占主导优势的微物理过程出现，使得微物理量的分布特征更多的受随机的局地条件变化的影响，另一方面是模式受催化剂引入的影响，导致云的发展在时间和空间上出现轻微变化造成的（Xue et al., 2016）。

c. 雷达回波的变化

沿 3 小时地面累积降水变化中心做垂直剖面（位置参见图 14），对比剖面上催化云和自然云的雷达回波可以看到，在催化开始后的 10 分钟左右，催化云中作业高度层上方的雷达回波就开始出现微弱的变化，25~30dBZ 的范围略有减小（图略）。随着时间的延长一直到 20:00 左右，剖面上的催化云雷达回波出现越来越大的变化，其主要特征是作业层上方回波增强，而作业层下方回波减弱，即这一段时间内，催化云的高层降水粒子发展增强，中下层降水粒子发展减弱，地面附近的回波减弱也预示地面降水也会有减弱。在图 11a、b 中灰色框对应区域均可看到上述特征，作业层上方一直到 7km 左右，雷达回波呈增强趋势，表现为较强回波区（如大于 25dBZ 的区域）范围增大，而作业层下方较强回波区范围减弱或消失，如图 11b 中的 2km 高度处，催化云大于 30dBZ 的强回波中心消失，其下方大于 25dBZ 的回波区也缩小。模式时间 20:00 后，评估区的催化云雷达回波从云的上层到地面附近总体表现为增强，如图 11c、d 所示灰色条带对应的区域中，催化云大于 20dBZ 强度的回波区范围基本是增加的，且在 4km 以上有新的大于 20~25dBZ 的回波中心出现，地面附近大于 25dBZ 的接地降水回波的宽度也明显增加。上述特征表明，作业开始后到约一个小时的时间内，受催化影响的目标云区中上部（约 4000m 以上）雷达回波增强，但云区下部降水回波减弱，说明目标云降水减弱；此后，由于云中降水粒子的成长下落，目标云区从上到下的雷达回波增强，且接地回波的强度和范围均有增大，说明催化一个多小时后目标云降水增强。

图 11. 不同时刻沿降水变化中心的雷达回波垂直剖面对比。图中阴影区和黑色等值线分别为自然云和催化云的雷达回波强度（dBZ），等值线值与阴影色标等级一致，灰色等值线为温度（℃），灰色条带的位置指示催化云中雷达回波主要变化区域对应的横坐标区间。(a) 19:20, (b) 19:45, (c) 20:40, (d) 21:15。

Fig. 11 Comparison of vertical sections of radar echoes (dBZ) along the center of precipitation change at different moments, including natural cloud (shaded area) and seeding cloud (black contours), and all contours value are consistent with shaded color bar. The gray contours represent temperature (℃). The position of gray shaded belts indicates the abscissa range corresponding to the main change region of radar echo in seeded cloud. (a) 19:20, (b) 19:45, (c) 20:40, (d) 21:15.

图 12. 与图 10 类似，雷达回波的 CFDAD 图

Fig. 12 As in Fig. 10, but for radar echo.

图 12 雷达回波的频率差和综合平均值相对变化表明，催化云的雷达回波强度比自然云有明显增强，这种变化趋势与孙玉稳等（2017）的观测分析结果一致。图中频率差的分布表明，冷云区回波增强最为显著，基本上在回波强度 5~30dBZ 的范围、高度在零度层到 5500m 范围的大部分区域均为增强；从零度层到地面，催化云在 15~35dBZ 的回波强度也是增强的，只是正频率差量值偏低。上述特征表明在催化影响下，催化云中的降水粒子及云下降水的发展总体是增强的。结合图 10 的分析可推断，催化云冷云区雷达回波的增强主要是雪粒子增加的原因，而在零度层附近和暖层的回波强度增强则主要是霰粒的淞附、融化过程以及由此导致的大雨滴增加的缘故。

d. 地面降水的变化及其物理机制

图 13 显示了地面降水特征和云中水凝物、微物理转化率等相关特征随时间的变化。图 13a 中地面降水强度在催化开始后的 30 多分钟时间内仅有微弱变化，到 19:20 后降水强度才开始呈现出越来越明显的持续减弱的趋势，到 20:10 达到最大相对变化量-1.0%。20:15 以后，催化云降水强度逐渐增强，并逐渐超过自然云的降水强度，到 21:20 达到降水率的最大相对变化量 2.0%，之后催化云降水强度增强幅度下降，但其相对变化量直到 22:00 时一直维持在 1%以上。图 13b 中的地面累积雨量在催化开始后出现明显变化的时间要略晚于降水强度的变化，二者的变化趋势类似但存在时间差，即降水强度首先发生改变，之后累积降水慢慢发生相似变化。图 10 的统计分析已经表明催化后暖层中雨滴的增加与霰的增加有密切联系，图 13b 中空中微物理总量差的时间演变也证明了这一点：图中催化云与自然云霰总量差的时间变化与云中雨滴总量差、地面累积降水具有相似的变化趋势，云中雨滴和霰的总量变化与地面降水变化存在的时间差，则是因为云中降水粒子需要经过下落过程到达地面的原因。图 13b 中催化云中的云水总量在 19:30~20:35 之间是增加的，其原因主要是由于催化导致这段时间的降水强度减弱，降水粒子在暖区对云水的冲刷作用减弱，导致催化云暖区出现云水量高于自然云的情况，虽然冷区中催化云的云水总量一直是减少的（图略），但冷暖区叠加的总效果表现为增加。

图 13. 评估区内区域平均降水强度、空中水凝物总量、降水总量、雨滴主要源汇项总转化率的差值 (ST-CT)、暖层中霰和雨滴总粒子数差值 (ST-CT) 随时间的变化。(a) 黑色实线和红色实线分别为催化云和自然云的区域平均降水强度，蓝色实线为催化云降水强度相对自然云的变化，黑色虚线指示相对变化为零的位置。(b) 各图线分别为降水 (Prep.)、水汽 (Qv)、云水 (Qc)、冰晶 (Qi)、雪 (Qs)、霰 (Qg) 和雨水 (Qr) 的总量变化。(c) 各图线分别为雨滴的源汇项总量转化率差值 (ST-CT)，其中实线为源项，虚线为汇项。(d) 催化云暖层中的霰和雨滴粒子数与自然云的差值 (ST-CT)。(b)、(c) 和 (d) 中点划线为零值对应位置。图中阴影区对应第二次催化的作业时间段。

Fig.13 The time series of regional average precipitation intensity, total amount of hydrometeor, total precipitation, difference (ST-CT) of total conversion rate in main source and sink of raindrop, and difference (ST-CT) of total number of graupel and raindrop particles in warm layer over the evaluation area. (a) Solid lines represent average precipitation intensity of seeded cloud (black) and natural cloud (red). Blue solid line denotes change of seeded cloud precipitation intensity correspond to natural cloud, and black dotted-line indicates the position where the relative change is zero. (b) The regional total amount variation of precipitation (Prep.), water vapor (Qv), cloud water (Qc), ice crystal (Qi), snow (Qs), graupel (Qg), and rain (Qr) in seeded cloud relative to nature cloud. (c) The microphysical processes conversion rate difference (ST-CT) of source (solid lines) and sink (dash lines) terms of raindrop, solid lines indicate source items. The dotted-dashed lines in (b) and (c) correspond to zero value (zero-line). The shaded area denotes the second seeding operation time period.

模式采用的 CAMS 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之间的碰并、云雨自动转化、雨滴的蒸发和雪霰的融化等。对比各微物理过程的转化率发现，霰在暖层的融化 (Mgr) 过程是雨滴最主要源项，其次为雨滴碰并云滴 (Ccr) 以及暖区中的霰碰并云滴 (Ccg) 和雨滴碰并雪 (Csr) 过程，但这

些过程的转化率量值比 Mgr 要低数倍至 1 个量级以上，其余源项如云雨自动转化 (Acr)、雪的融化 (Msr) 等过程的量值则更低，可见霰的融化是地面降水的主要来源。雨滴蒸发 (Svr) 和过冷区内冰晶、雪、霰碰并雨滴过程 (Cri、Crs、Crg) 是雨滴的主要汇项，其中 Crg 是最主要的汇项，比其他过程高数倍至 1 个量级以上，Cri、Crs 和 Crg 同时也是霰的重要源项。图 13c 中给出了催化试验和控制试验中整个评估区内雨滴主要源汇项转化率的差值 (ST-CT) 随时间的演变，可以看到，催化开始后约 25 分钟，图中 Crg、Svr 和 Mgr 过程开始出现明显的变化，而其他源汇项直到 90 分钟后的 20:20 才开始出现明显变化，这说明催化模拟初期，降水的变化主要受到 Crg、Svr 和 Mgr 过程的影响。图 13c 中，20:20 以前催化云中雨的三个源汇项均呈减弱的变化，Mgr 减弱必然影响地面降水的变化，暖层雨滴的减少也会造成 Svr 过程的减弱。由图 10e 可知，过冷雨滴主要存在于 4000m 以下的过冷层中，也就是说 Crg 过程主要发生在过冷层下部接近零度层的高度范围内，Crg 过程的减弱显然会造成这些高度层中的霰粒增长减弱，虽然过冷雨滴可能会增加，但过冷层雨滴的成长过程即雨滴碰并云滴 (Ccr) 的变化要弱得多，对降水的改变没有多大影响，而霰的增长减弱会导致能够落入暖层的霰粒减少 (图 13d)，从而减弱 Mgr 过程这一主要的降水机制，导致暖层雨滴减少 (图 13d)、降水减弱。大致在 20:20 以后，催化云中的 Mgr、Crg、Svr 过程以及其他源汇项均强于自然云，且 Mgr 和 Crg 过程的变化明显强于其他过程。Mgr 过程的增强必然会导致降水的增加，这是催化云降水逐渐超过自然云的主要原因，Ccr 和暖层 Ccg 过程的增强也对降水增加有利，而暖层雨滴的增加 (图 13d) 是 Svr 过程增强的重要原因，它对降水起到一定的抑制作用。虽然 Cri、Crs 和 Crg 过程是过冷层雨滴的汇项，但它们使零度层附近的霰粒增加，这明显有利于 Mgr 过程，因为霰粒的增加和增长能够为暖层提供更多或更大的霰粒 (图 13d)，这也印证了前文图 10 的分析，即冰雪霰粒子在零度层附近的淞附过程的增强使霰的总量增加。总之，此次降水的主要微物理机制是霰的融化过程，而 AgI 催化导致云中霰的总量发生变化，进而影响到了 Mgr 过程出现先减弱后增强的变化特征，最终导致地面降水特征发生类似的变化。

图 14. 模式时间 19:00-22:00 地面降水的累积变化 (阴影, ST-CT, mm) 和自然云的累积地面雨量 (等值线, mm)。图中绿色实线方框为本研究确定的评估区范围, 红色短划线方框为飞机第二次播撒作业的区域, 黑色短划线为图 8 中两个剖面 and 图 11、图 16 中剖面所对应的位置。

Fig. 14 Accumulative rainfall difference (ST-CT, shaded area, mm) and accumulative rainfall of nature cloud (contour, mm) from 9:00 to 22:00 in the model. Green solid-line box shows evaluation area determined in this case, and red dashed-line box denotes the region of second seeding operation. Two black dashed-lines correspond to positions of vertical sections positions in Fig. 8, Fig. 11 and Fig. 16.

增雨效果的定量评估是催化模式的重要功能，图 14 给出了 19:00~22:00 期间累积增雨量及自然云累积降水的水平分布，从图中降水变化分布可看到，从飞机作业区 (红色短划线方框区域) 一直向东，催化引起的降水变化区域向下游方向扩展约 1.5 个经距，其中在作业区及其东部约 0.2 个经距的区域范围内，地面降水变化主要表现为负效果，超出该范围的下游大部分区域则表现为正效果，仅少量区域呈现为负效果，且正负区域呈交替出现的分布特征。图中可看到，评估区内并不是所有地方的降水都有改变，因此从地面降水的角度而言，催化的影响区范围要小于评估区范围。表 1 给出了评估区内自然云降水及催化作业对地面降水影响的相关数据，其中催化影响区是指评估区内降水改变的区域，增雨区指地面降水增加的区域，局地增雨率指模式中每个格点上对应的降水变化百分率。由表 1 可以看到催化后 3 小时地面降水变化的净效果是增雨，不过增雨总量不大，平均增雨率仅为 1.1%。如果只计算增雨区，则平均增雨率可达到 3.0%。

表 1. 模式时间 19:00-22:00 的评估区内自然降水和催化作业效果统计

Table 1. Statistics of natural precipitation and seeding operation effect in evaluation area during model time

19:00-22:00					
评估区总雨量	催化影响区总雨量	总增雨量	催化影响区	增雨区	局地增雨率
(10 ⁶ kg)	(10 ⁶ kg)	(10 ⁶ kg)	平均增雨率 (%)	平均增雨率 (%)	(%)

图 15. 催化云中雪和霰在过冷区的主要源项、各源项总转化率与自然云的差值 (ST-CT)、雪霰粒子总数和平均质量与自然云差值 (ST-CT) 随时间的演变。a1 和 a2 为雪的各项, b1 和 b2 为霰的各项。

Fig.15 The time series of main source terms, conversion rate difference(ST-CT), and difference (ST-CT) of total number and average mass of snow and graupel particles in supercooled zone of seeded cloud. a1 and a2 for snow, b1 and b2 for graupel.

催化效果的数值模拟评估表明此次作业的增雨效果不大,从宏观表现上,催化开始后地面降水负增长的量级较大且时间偏长在很大程度上削弱了后期增雨的效果,而其内在原因则与云中雪霰粒子成长过程的变化有关。模拟结果表明,雪的主要源项为 Svs (雪的凝华增长)、Ccs (雪碰并云滴)、Ais (冰雪自动转化)、Cis (雪碰并冰晶) 等过程;霰的主要源项有 Crg、Csg (霰碰并雪)、Ccg (霰碰并云水)、Cri 和 Crs 等过程。由图 15b2 可以看到,催化后云中的霰粒平均质量始终是减少的,而且催化开始后相当长一段时间内霰粒子浓度也是减少的,霰粒子质量和浓度的同时减少,导致催化云中霰的总量被大大降低(图 13b),虽然在后期催化云中霰粒子浓度的正增长逐渐抵消了霰粒子平均质量减少的作用,使得云中霰的总量逐渐转为正增长,但由于正增长需要抵消前期较大的负增长量的影响,导致最终的增雨量偏低。霰的主要源项中,与雨滴相关的过程(Crg、Cri、Crs)主要位于过冷区的下层,其中 Crg 为霰的最主要源项,第二大源项 Csg 过程的转化率虽然低于 Crg,但它是在整个过冷区发生作用,其在催化试验前期的减少量甚至超过了 Crg 的减少量,这是整个过冷区霰粒总质量减少的主要原因。从图 13b 和图 15a2 可看到,与自然云相比,催化云中雪的质量和浓度都是增加的,这得益于催化造成的冰晶数量大量增加,使 Ais 和 Cis 过程增强的缘故,但值得注意的是,雪粒子本身的平均质量在催化试验前期是降低的,即这一时期催化云中雪粒子总体的平均尺度是减少的,其原因就是由于雪粒子浓度的增加造成供给雪粒子单体成长的云水和水汽量减少,导致 Ccs 和 Svs 过程减弱,而雪粒子平均质量的减少会造成通过 Csg 过程向霰粒转化的质量减少。催化对过冷水额外消耗同样导致了 Ccg 过程的减弱,虽然霰粒的 Ccg 过程减小的量不大(图 15b2),但由于淞附过冷水对霰粒下落末速的改变要比冰雪晶的改变大很多(盛裴轩等,2003),因此 Ccg 减弱可能更有效的降低了霰粒的下落末速,这使得霰粒与雪的下落末速速度差变小,导致 Csg 过程减弱,霰粒总量减少明显。此外,整个过冷层中霰粒增长的减弱,也会造成落入过冷层下部的霰粒数目及尺度的减小,从而减弱 Crg 过程,反之,Csg 的增强也会加强 Crg 过程。综上所述,催化作业使得云中冰雪晶数目大量增加,造成有限的过冷水和水汽被 AgI 和更多的冰雪粒子所消耗,直接或间接导致雪霰粒子尺度和数目减小,霰的主要增长源即 Csg、Crg 过程被大幅减弱,霰的总量减少且持续较长时间,导致降水在催化试验前期减弱明显,这是增雨效果不好的内在原因,而此后降水的增加更多是由于霰粒浓度增加的累积效应(图 13d 和图 15b2)。

图 16. 催化作业开始后 1h (19:45) 和 2h (20:45), 沿降水变化中心的垂直剖面(西南-东北)。图中黑色等值线为雨滴混合比的变化 ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$, ST-CT), 绿色等值线为碘化银数浓度 (L^{-1}), 蓝色等值线为催化云 $0.001\text{g}/\text{kg}$ 的云水混合比, 黑色粗实线对应作业区; 红色等值线分别为 (a1, b1) 霰粒数浓度变化 (L^{-1} , ST-CT), (a2, b2) 霰粒质量中值直径变化 (μm , ST-CT); 填色区分别对应 (a1, b1) 催化云霰粒混合比 ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$), (a2, b2) 催化云雨滴混合比 ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)。

Fig.16 Vertical sections along precipitation variation centre (from southwest to northeast) at 1h (19:45) and 2h (20:45) after seeding operation starts, including rain mixing ratio variation ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$, ST-CT, black contours), number concentration of AgI (L^{-1} , green contours), cloud water with a mixing ratio of $0.001 \text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ (blue contours) and seeding area position (bold black lines). (a1, b1): graupel number concentration variation ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$, ST-CT, red contours) and graupel mixing ratio of seeding cloud ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$, shades). (a2, b2): mass median diameter variation of graupel ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$, ST-CT, red contours) and rain mixing ratio of seeding cloud ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$, shades).

从目标云系的作业条件看,飞机观测和模拟结果(图 7)均证明催化作业云区的过冷水偏少且分布零散,

这说明作业云区的催化潜力较弱,根据前面的分析,影响降水变化的主要因素是霰的浓度和尺度的改变。图 16 给出了减雨阶段(19:45)和增雨阶段(20:45)沿降水变化中心(图 14)霰的特征量垂直分布和变化。图 16a1-a2 中可看到,在减雨阶段,云的冷暖层中的霰粒浓度和霰粒尺度几乎都是减小的,这是造成减雨的主要原因。由前文的分析可知,由于催化使冰晶和雪大量增加,冰雪粒子的增长额外消耗了云中有限的过冷水,使霰粒的增长受到抑制,图中可看到,催化云中过冷层中云水已经很少,且多集中在过冷层底部,这会使过冷层大部区域的冰相粒子成长速度变慢,如贝吉龙过程、淞附云水等快速增长过程减弱,而凝华增长速度较慢,这是这一阶段减雨持续时间较长的重要原因。图 16b1-b2 处于增雨阶段,此时可以看到在过冷层中上层区域,霰粒浓度和尺度增减的起伏变化较大,但总体上仍是以减小居多,但是在 0℃层附近霰粒的浓度和尺度是明显增加的,图中可看到 0℃层附近也存在一定含量的云水,由前文的分析可知,这一阶段 0℃层附近的过冷层中冰相粒子的淞附过程较强,这是霰粒浓度和尺度增加的主要原因,由图可知,霰粒在零度层附近的生长直接造成暖层上部霰粒浓度和尺度的增大,从而降水增加。综合上述数值模拟的分析,本个例的云降水主要机制是霰的融化过程,而催化模拟前期的减雨是由于冰雪晶的大量增加消耗了过多的水汽及过冷水资源,抑制了霰的生长过程进而造成减雨,考虑到云区过冷水分布零散,含水量偏低的状态,一方面,这种云条件下催化后的效果应该不会太强,即催化潜力不大,另一方面,飞机对云区进行充分播撒作业,其作业的催化剂剂量可能偏大了,适当减少播撒的 AgI 剂量,在作业云区形成更为适宜的冰晶浓度,从而减弱作业前期对霰粒增长的消极作用,是有可能获得更好的增雨效果,当然,定量的催化指标还需进行如敏感性模拟试验等研究。

6. 结论

本文将一套基于 WRF 动力框架发展的三维中尺度冷云催化模式进行了改进,实现了对飞机播撒作业过程的仿真模拟功能,使模式可以更真实地再现实际催化作业的状况。使用该催化模式对 2014 年 4 月 15 日河北省中南部地区层状云降水过程中的一次飞机催化作业进行了仿真模拟,分析了催化对云和降水的宏观影响。由于多种客观因素的影响,数值模拟结果并不能完全再现云和降水的真实情况,但模拟与实况观测的对比表明,在排除掉时间和空间上的差异后,可以看到模拟结果能合理的反映实况云和降水的一些重要的宏观物理特征,基于这一基础,选取模式中与实际作业目标云发展演变特征相似的云区开展催化仿真模拟,以尽可能的接近实际催化作业的状况,达到合理评估实际作业效果的目的。

通过对比分析催化云和自然云的模拟结果,主要的研究结论如下:

- 1) 受作业云区动力条件和飞机作业轨迹的影响,催化剂播撒后,AgI 烟羽的水平尺度可扩展到数十公里以上,而垂直方向上,大部分 AgI 粒子则始终集中在作业层(4.8km)上下约 1km 的厚度范围内,少部分 AgI 粒子可随垂直气流向下向上输送到 3.5-9km 的海拔高度范围,且 AgI 粒子向上的输送要明显强于向下的输送。
- 2) 催化后 10 分钟左右冷云区水凝物即开始出现变化,催化云的冰晶和雪粒子明显增加且始终高于自然云,冰晶和雪的增加使云中过冷水的消耗增大,导致催化前期霰的增长过程受到抑制,催化云中霰总量低于自然云,之后随着霰碰并雪的过程以及零度层附近冰晶和雪霰粒子的淞附过程逐渐增强,催化云中霰的总量逐渐超过自然云。
- 3) 与自然云相比,总体上催化云雷达回波强度有明显增强。时间变化特征上,催化首先导致作业层附近及其上部的雷达回波增强,作业层下部雷达回波减弱,随着云中降水粒子的发展,整个作业云区到地面附近的雷达回波有明显增强,表现为强回波区范围增大,并有新的强回波中心出现。
- 4) 降水的主要机制是霰的融化过程,催化造成降水增加的主要原因是暖层霰粒浓度及尺度增加造成霰的融化过程增强。催化云的平均降水强度和降水总量出现先减小后增加的时间变化特征,其主要原因是云中霰的总量受催化影响出现类似变化,进而影响到霰融化过程出现先减弱后增强所导致的。
- 5) 催化后 3 小时,作业影响区向作业区下游扩展 100km 以上(1.5 经距),作业区及其下游临近的约 20km(0.2 经距)区域内累积降水以减少为主,而作业区 20km 外的下游影响区则主要为增雨,整

个作业影响区的净增雨量为 3.6×10^7 kg, 平均增雨率 1.1%, 局地增雨率在-12.4%~13%之间。

- 6) 因为作业云系的过冷水偏少且较分散, 冷云催化条件整体偏弱, 而实际作业的 AgI 剂量偏大, 导致对降水有主要影响的霰的增长过程受到过多抑制, 是造成此次作业增雨效果不大的主要原因。建议针对此类作业条件一般的云系, 应实时关注机载探测的结果, 谨慎选择作业剂量, 不宜过大。另外, 采用催化模式通过事先模拟来评估催化的作业效果, 为实际作业提供指导, 也是一种可行的方式。

参考文献 (References)

- 蔡淼. 2013. 中国空中云水资源和降水效率的评估研究[D]. 南京信息工程大学. 79-104 Cai Miao. 2013. Cloud water resources and precipitation efficiency evaluation over China[D]. Nanjing University of Information Science & Technology. 79-104.
- Chu X., Xue L., Geerts B., et al. 2014. A case study of radar observations and WRF LES simulations of the impact of ground-based glaciogenic seeding on Orographic clouds and precipitation. Part I: Observations and model validations [J]. *J. Appl. Meteorol. Climatol.*, 53: 2264 - 2286.
- Chu X., Geerts B., Xue L L., et al. 2017. Large-eddy simulations of the impact of ground-based glaciogenic seeding on shallow orographic convection: A case study [J]. *J. Appl. Meteor. Climatol.*, 56(1): 69 - 84.
- DeMott, P. J. 1995. Quantitative descriptions of ice formation mechanisms of silver iodide-type aerosols [J]. *Atmos. Res.*, 38, 63 - 99.
- Gao W., Zhao F., Hu Z., et al. 2011. A two-moment bulk microphysics coupled with a mesoscale model WRF: Model description and first results [J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 28(5): 1184 - 1200.
- Guo X., Zheng G., Jin D. 2006. A numerical comparison study of cloud seeding by silver iodide and liquid carbon dioxide [J]. *Atmos. Res.*, 79: 183 - 226.
- Hashimoto A., and M. Murakami. 2016. Numerical simulations of glaciogenic cloud seeding with dry ice pellets and liquid carbon dioxide under simplified conditions [J]. *SOLA*, 12, 22-26, doi:10.2151/sola.2016-005.
- 何观芳, 胡志晋, 李淑日. 2001. 鄂西北对流云及其人工催化的三维数值模拟个例研究 [J]. *应用气象学报*, 12 (Suppl.): 96 - 106. He Guanfang, Hu Zhijin, Li Shuri. 2001. Numerical simulation of rain enhancement experiment in northwestern Hubei Province of China [J]. *Quart. J. Appl. Meteor.* (in Chinese), 12 (Suppl.): 96 - 106.
- 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(1): 46 - 58. 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]. *Climate Environ. Res.* (in Chinese), 17(1): 46 - 58.
- 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(4): 905 - 922. He Hui, Gao Qian, Li Hongyu, 2013. Numerical simulation of stratiform precipitation enhancement in Beijing area and its mechanism [J]. *Chinese J. Atmos. Sci.* (in Chinese), 37(4): 905 - 922, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2012.12097.
- 洪延超, 周非非. 2006. 层状云系人工增雨潜力评估研究 [J]. *大气科学*, 30(5):913-926. Hong Yanchao, Zhou Feifei. 2006. The study of evaluation of potential of artificial precipitation enhancement in stratiform cloud system[J]. *Chinese J. Atmos. Sci.* (in Chinese), 30(5):913-926.
- Hsie E-Y., Farley R. D., Orville H. D. 1980. Numerical simulation of ice-phase convective cloud seeding[J]. *J. Appl. Meteor.*, 19(8): 950-977.

- 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(增刊):10-13. Hu Zhijin. 2001. Discussion on mechanisms, conditions and methods of precipitation enhancement in stratiform clouds[J]. Quart. J. Appl. Meteor. (in Chinese), 12(Suppl.):10-13.
- 黄燕, 徐华英. 1994. 播撒碘化银粒子进行人工防雹的数值试验 [J]. 大气科学, 18(5): 612 - 622. Huang Yan, Xu Huaying. 1994. Numerical experiments on hail suppression by AgI seeding [J]. Chinese J. Atmos. Sci. (in Chinese), 18(5): 612 - 622.
- Koenig L. R., Murray F. W. 1979. Theoretical experiments on cumulus dynamics[J]. J. Atmos. Sci., 40(5):1241-1256.
- Kopp F. J., Orville H. D., Farley R. D., et al. 1983. Numerical simulation of dry ice cloud seeding experiments[J]. J. Climate Appl. Meteor., 22(9): 1542 - 1556.
- 李红莉, 崔春光, 王志斌, 等. 2009. 中尺度分析系统 LAPS 应用雷达资料的个例研究[J]. 高原气象, 28(6):1443-1452. Li Hongli, Cui Chunguang, Wang Zhibin, et al. 2009. A Study on Application of Dopplar Radar Data in LAPS [J]. Plateau Meteorology, 28(6):1443-1425.
- 李泽椿, 周毓荃, 李庆祥, 等. 2006. 人工增雨是缓和干旱半干旱地区水资源匮乏的一个补充途径 [J]. 沙漠与绿洲气象, (1):1-6. Li Zechun, Zhou Yuquan, Li Qingxiang, Wang Yuedong, et al. 2006. A additional way for alleviating water resources shortage in arid and semi-arid region: precipitation stimulation [J]. Desert and OasisMeteorology(in Chinese), (1): 1-6.
- 刘玉芝, 常妹婷, 华珊, 等. 2018. 东亚干旱半干旱区空中水资源研究进展 [J]. 气象学报, 76(3):485-492. Liu Yuzhi, Chang Shuting, Hua Shan, et al. 2018. A review of the research on atmospheric water resources over arid and semi-arid regions of East Asia [J]. Acta Meteor. Sinica (in Chinese), 76(3): 485-492.
- 刘诗军, 胡志晋, 游来光. 2005. 碘化银核化过程的数值模拟研究 [J]. 气象学报, 63(1):30-40. Liu Shijun, Hu Zhijin, You Laiguang, 2005. The numerical simulation of AgI nucleation in cloud [J]. Acta Meteor. Sinica (in Chinese), 63(1): 30 - 40.
- 刘卫国, 陶玥, 党娟, 等. 2016. 2014 年春季华北两次降水过程的人工增雨催化数值模拟研究 [J]. 大气科学, 40 (4): 669-688. Liu Weiguo, Tao Yue, Dang Juan, et al. 2016. Seeding modeling study of two precipitation processes over northern China in the spring of 2014 [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 40 (4): 669-688, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1508.15138.
- 楼小凤, 孙晶, 史月琴, 等. 2014. 减弱对流云降水的 AgI 催化原理的数值模拟研究 [J]. 气象学报, 72(4):782-293. Lou Xiaofeng, Sun Jing, Shi Yueqin, Zhang Xing. 2014. Numerical study of the AgI seeding principle for decreasing the convective cloud rainfall. Acta Meteorologica Sinica, 72(4):782-793.
- Lou X., Shi Y., Sun J., et al. 2012. Cloud-resolving model for weather modification in China [J]. Chinese Sci. Bull. 57: 1055 - 1061.
- 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]. J. Appl. Meteor., 34(4): 834 - 846.
- National Research Council. 2003. Critical Issues in Weather Modification Research[M], National Academies Press. 144.
- Orville H. D., Farley R. D., Hirsch J. H. 1984. Some surprising results from simulated seeding of stratiform-type clouds[J]. J. Climate Appl. Meteor., 23(12): 1585 - 1600.
- 盛裴轩, 毛节泰, 李建国, 等. 2003. 大气物理学[M]. 北京: 北京大学出版社, 334. Sheng Peixuan, Mao Jietai, Li Jianguo, et al. 2003. Atmospheric physics[M]. Beijing: Peking University Press, 334.
- 孙晶, 史月琴, 楼小凤, 等. 2010. 人工缓减梅雨锋暴雨的数值试验 [J]. 大气科学, 34 (2): 337 - 350. Sun Jing, Shi

- Yueqin, Lou Xiaofeng, et al. 2010. Numerical experiments on artificial seeding of decreasing the Meiyu heavy rainfall [J]. Chinese J. Atmos. Sci. (in Chinese), 34 (2):337 - 350.
- 孙玉稳, 银燕, 孙霞, 等. 2017. 冷云催化宏微观物理响应的探测与研究 [J]. 高原气象, 36(5):1290—1303. Sun Yuwen, Yin Yan, Sun Xia, et al. 2017. Observation and study of macro and micro response in cold cloud catalytic [J]. Plateau Meteorology, 36(5): 1290—1303.
- Xue 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]. J. Appl. Meteor. Climatol., 52: 1433 - 1457.
- Xue 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]. J. Appl. Meteor. Climatol., 52: 1458 - 1476.
- Xue L., Chu X., Rasmussen R., et al. 2016. A case study of radar observations and WRF LES simulations of the impact of ground-based glaciogenic seeding on orographic clouds and precipitation. Part II: AgI dispersion and seeding signals simulated by WRF[J]. J. Appl. Meteor. Climatol. 55(2): 445-464. doi:10.1175/JAMC-D-15-0115.1.
- Yuter S. E., Houze R. A. 1995. Three-dimensional kinematic and microphysical evolution of Florida cumulonimbus. Part II: Frequency distributions of vertical velocity, reflectivity, and differential reflectivity [J]. Mon. Weather Rev., 123: 1941-1963.
- 张雨芳, 刘卫国, 周毓荃. 2017. 一次对流云团过程结构特征的观测和模拟研究 [J]. 气象与环境科学, 40(4):9-18. Zhang Yufang, Liu Weiguo, Zhou Yuquan. 2017. Numerical Simulation and Observation Research on the Structure Characteristics of One Convective Cloud Cluster Process [J]. Meteorological and Environmental Sciences, 40(4): 9-18.
- 周毓荃, 陈英英, 李娟, 等. 2008. 用 FY-2C/D 卫星等综合观测资料反演云物理特性产品及检验 [J]. 气象, 34(12):27-35. Zhou Yuquan, Chen Yingying, Li Juan, et al. 2008. Retrieval and Preliminary Test of Cloud Physical Parameters from Combination of FY-2C/D Geostationary Satellite Data and Other Observation Data [J]. Meteor Mon, 34(12):27-35.
- 周毓荃, 蔡淼, 欧建军, 等. 2011. 云特征参数与降水相关性的研究 [J]. 大气科学学报, 34(6): 641-652. Zhou Yu-quan, Cai Miao, Ou Jian-jun, et al. 2011. Correlation between cloud characteristic parameters and precipitation [J]. Trans Atmos Sci, 34(6): 641-652.

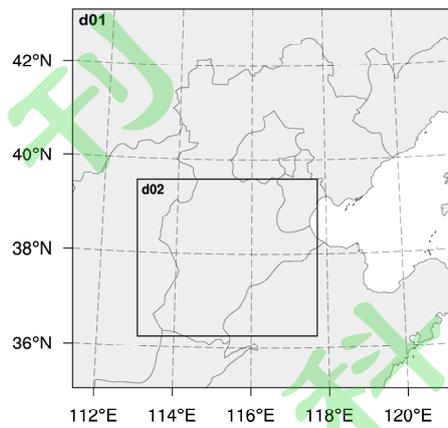


图 1. 模式 3km 模式域 (d01) 和 1km 模式域 (d02) 的范围

Fig.1 3km domain (d01) and 1km domain (d02) of the simulation.

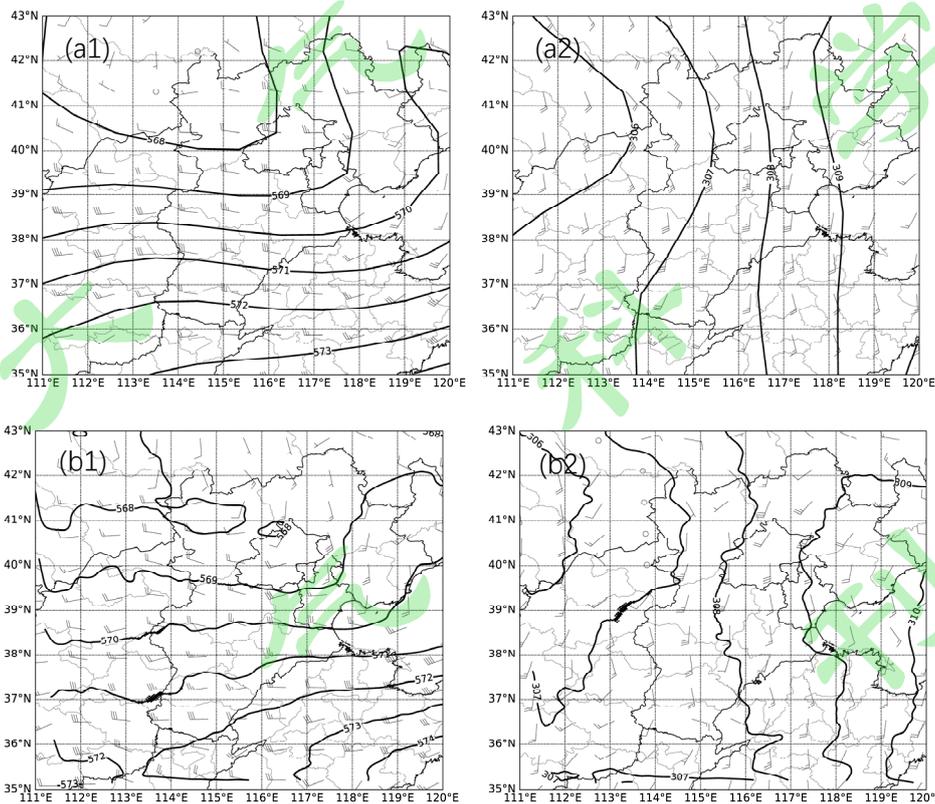


图 2. 2014 年 4 月 15 日 20 时 500hPa (a1, b1) 和 700hPa (a2, b2) 天气形势对比。a1、a2 为实况观测, b1、b2 为模拟结果

Fig.2 Comparison of 500hPa (a1, b1) and 700hPa (a2, b2) synoptic situation at 20:00 on April 15, 2014. a1 and a2 for observation, b1 and b2 for simulation.

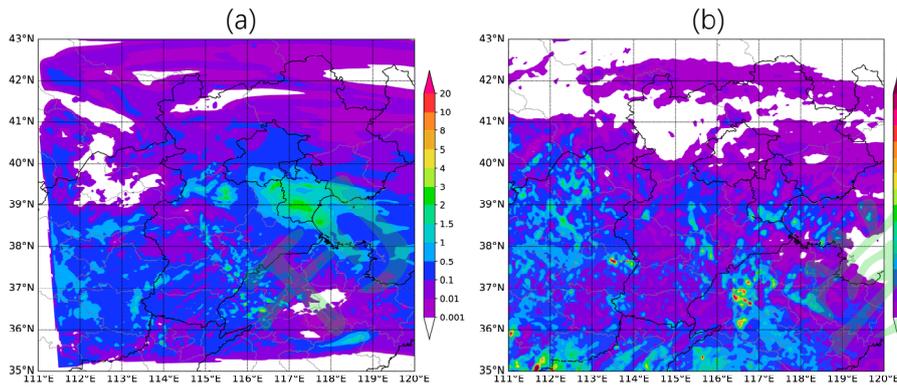


图 3. 模拟的 15 日 16 时的云带 (a, mm) 与 FY2 卫星反演的云光学厚度 (b) 对比

Fig 3. Comparison between cloud band (a, mm) simulated by model and cloud optical thickness (b) retrieved from FY2 satellite at 16:00 on April 15.

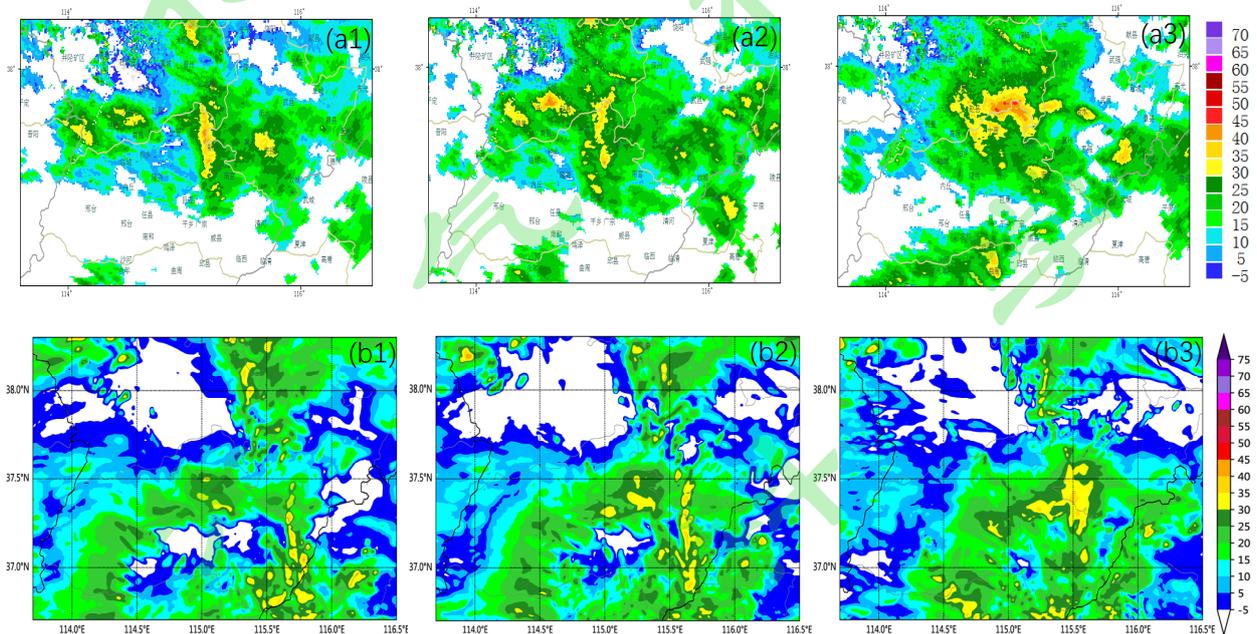


图 4. 模拟的 15 日不同时刻的雷达组合反射率 (dBZ) 与实况的对比。 (a1) 17:30, (a2) 18:00, (a3) 18:42; (b1) 18:35, (b2) 19:00, (b3) 19:40.

Fig.4 Comparison of radar composite reflectivity (dBZ) between observation (a1, a2 and a3) and simulation (b1, b2 and b3) at different moments on April 15. (a1) 17:30, (a2) 18:00, (a3) 18:42; (b1) 18:35, (b2) 19:00, (b3) 19:40.

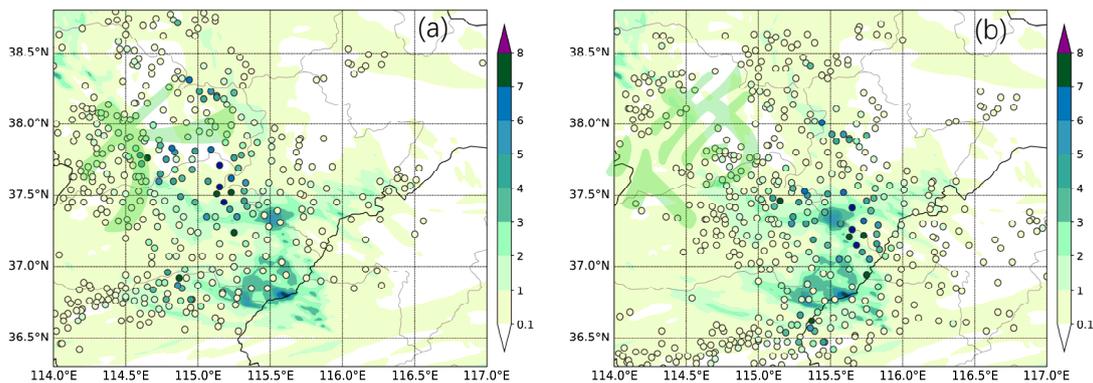


图5. 模拟的 22:00 的 4 小时累积降水与实况 21:00 的 4 小时累积降水对比。(a) 雨量站点为实际位置 (b) 雨量站点向东平移 0.5° 经度和向南平移 0.3° 纬度。图中填色圆圈表示雨量站点及其降水量, 阴影为模拟降水。

Fig.5 Comparison between simulated 4-hour accumulative rainfall at 22:00 and measured 4-hour accumulative rainfall at 21:00. (a) actual rainfall stations, (b) rainfall stations which were shifted 0.5 longitude to east and 0.3 latitude to south. Colored circles represent stations and amount of rainfall, and shaded area represent simulated rainfall.

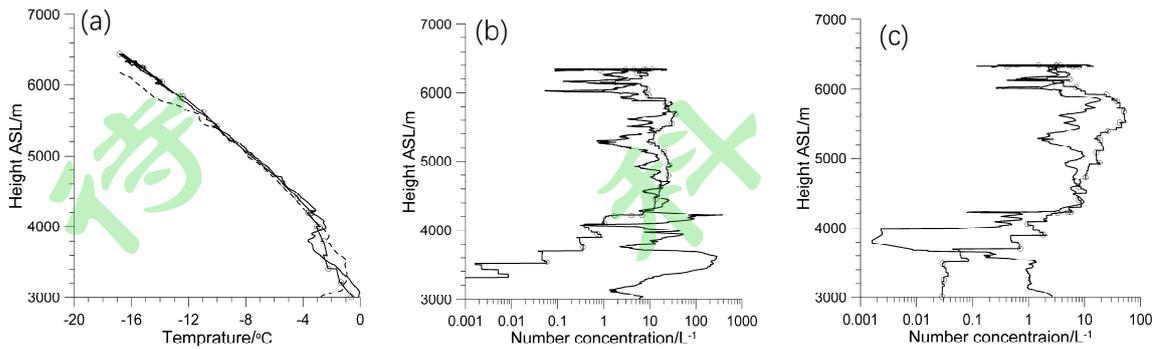


图6. 模拟的探测云区垂直结构与飞机探测结果的对比。(a) 温度, (b) 模拟的冰晶浓度与 2D-C 探测的大云粒子浓度, (c) 模拟的降水粒子(雪+霰+雨)浓度与 2D-P 探测的降水粒子浓度。图中黑色实线为飞机探测结果, 带圆圈的黑色实线为模拟结果, a 中的黑色虚线为 20:00 的邢台探空站的温度数据。

Fig.6 Comparison between simulated vertical structure and aircraft observation in cloud. (a) temperature, (b) simulated ice crystals concentration and large cloud particles concentration measured by 2D-C, (c) simulated snow, graupel and raindrop total concentration and precipitation particles concentration measured by 2D-P. Solid lines denote probe's results of aircraft, and solid lines with circle represents simulated results. Dashed line in (a) shows temperature taken from sounding at 20:00 of Xingtai station.

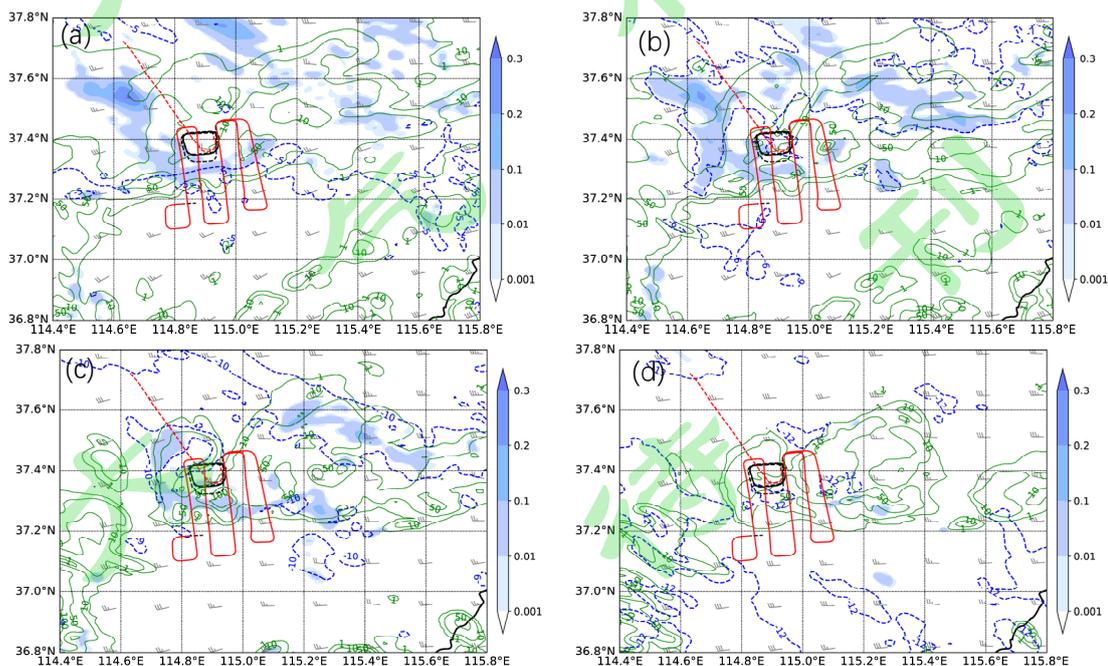


图7. 催化作业前不同高度的云水混合比 ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 阴影区) 和冰晶浓度 (L^{-1} , 绿色等值线) 分布及飞机催化

作业段的轨迹。(a) 4500m, (b) 4800m, 催化作业层, (c) 5300m, (d) 5700m。图中红色虚线段为第一次催化的作业段, 红色实线段为第二次催化的作业段, 黑色虚线段为飞机垂直探测区域。

Fig.7 Cloud water mixing ratio($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$, shaded areas) and ice crystal number concentration (L^{-1} , green contours) and aircraft trajectory on (a) 4500m, (b) 4800m, the seeding operation layer and (c) 5300m and (d) 5700m. Red dashed line denotes the first seeding operation stage, and red solid line denotes the second seeding operation stage, and black dashed line indicates vertical detection area by aircraft.

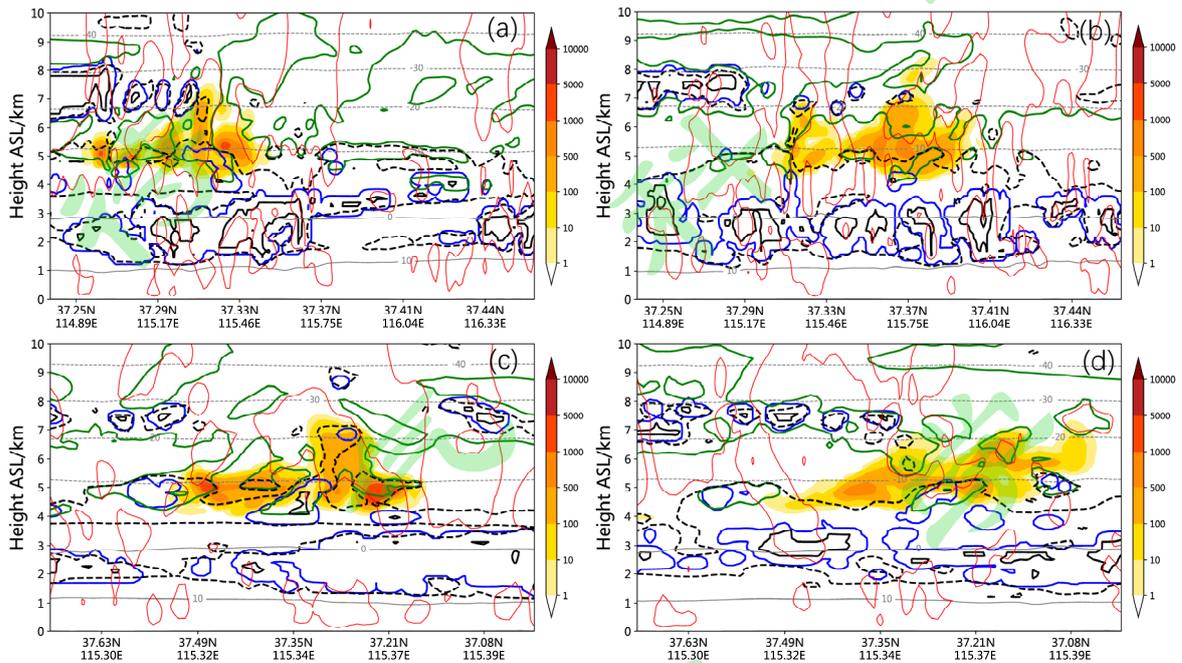


图 8. 催化作业开始后 1h (19:45) 和 2h (20:45), 沿播撒层(a, b)主导风向(西南-东北)和(c, d)垂直主导风向(东南-西北)的垂直剖面。其中填色区为 AgI 粒子数浓度(L^{-1}), 蓝色等值线为 $0.001\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 的云水, 绿色等值线为 0.04 的冰面过饱和度, 黑色等值线是值为 -0.05 和 0 的水面过饱和度, 红色等值线为 $0.1\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的上升气流速度, 灰色等值线为温度 ($^{\circ}\text{C}$)。

Fig.8 Vertical sections along (a, b) prevailing wind direction (from southwest to northeast) and (c, d) perpendicular to prevailing wind direction (from southeast to northwest) of seeding layer at 1h (19:45) and 2h (20:45) after seeding operation starts, including number concentration of AgI (L^{-1} , shaded areas), cloud water with a mixing ratio of $0.001\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ (blue contours), ice supersaturation ratio with a value of 0.04 (green contours), water supersaturation ratio with values of -0.05 and 0 (black contours), updraft speed with a value of $0.1\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ (red contours) and temperature ($^{\circ}\text{C}$, gray contours).

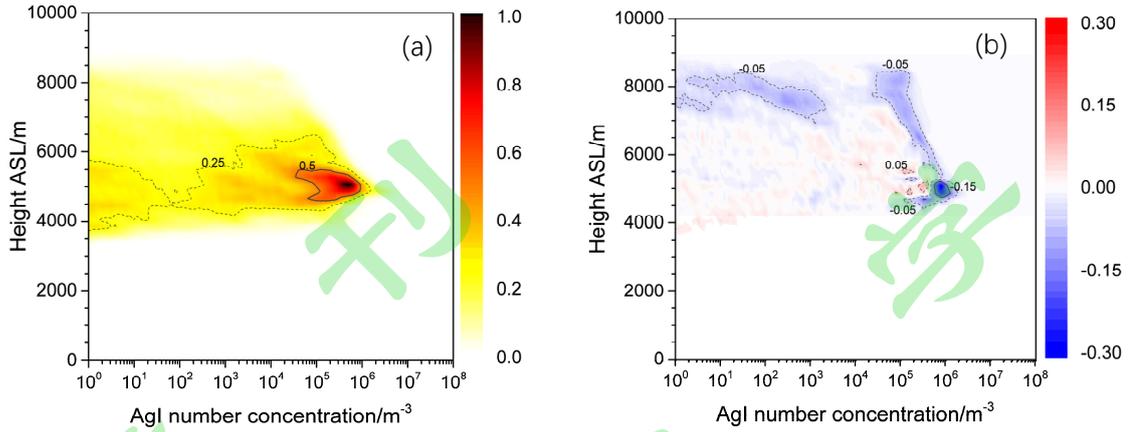


图 9. 19:00–22:00 时的 AgI 数浓度的 CFAD 图 (a) 和 CFDAD 图 (b)。 (a) 中填色区为催化试验的 AgI 分档频率 (%), (b) 中填色区为催化试验与示踪试验的 AgI 分档频率的差值 (催化-示踪, %)

Fig.9 CFAD (a) and CFDAD (b) of simulated AgI number concentration from 19:00 to 22:00. The shaded area and contours indicate binned frequency of AgI (a, %) and AgI binned frequency difference between seeding test and tracer test (b, %).

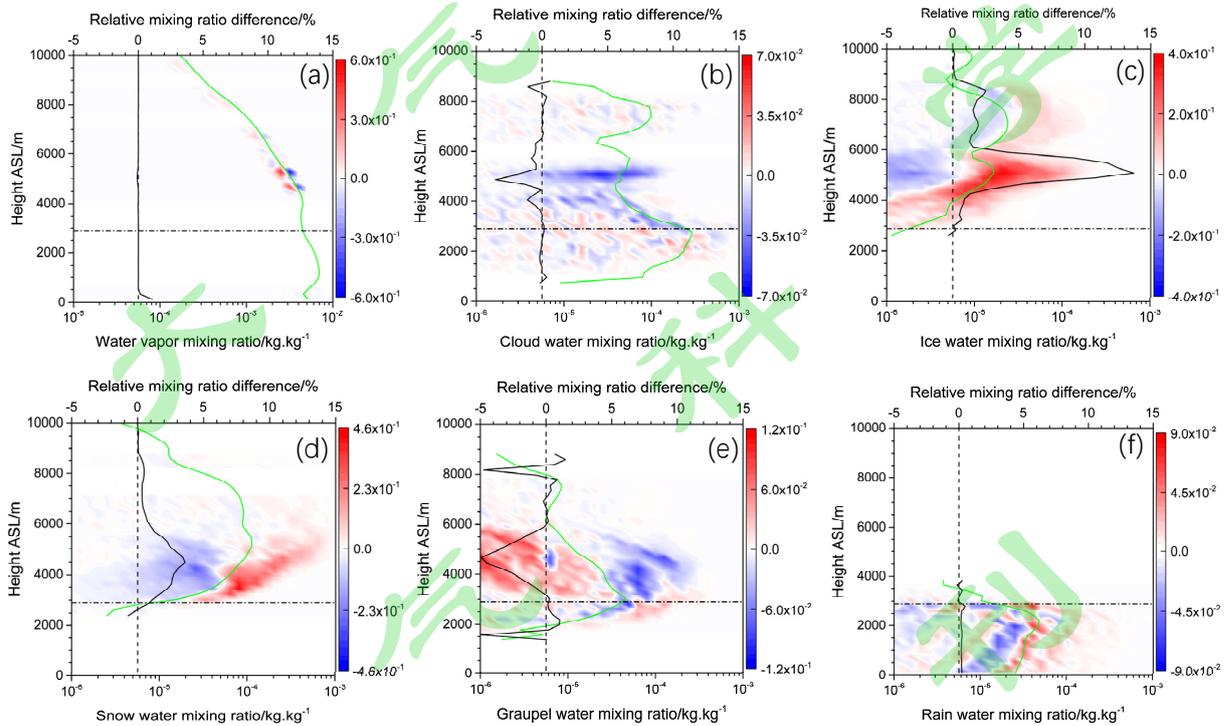


图 10. 19:00–22:00 时评估区内云中各微物理量的频率差 (ST-CT, 填色区, %) 随高度的分布 (CFDAD)。图中黑色实线为水凝物混合比的水平及时间的综合平均值差值 (ST-CT) 相对控制试验的变化 (%), 竖直黑色短划线对应相对变化的零值, 绿色实线为控制试验水凝物混合比的水平和时间综合平均值 ($\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}$), 水平黑色点划线为评估区平均零度层高度。

Fig.10 CFDADs (shaded areas) of simulated microphysical parameters in evaluation area from 19:00 to 22:00. Black solid lines denote changes in the difference of horizontal and temporal averages of every hydrometeor mixing ratio relative to the control test (%), and vertical black dash-lines correspond to the zero value of relative change. Green solid-lines indicate horizontal and time averages of hydrometeor mixing ratio in control test ($\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}$), and horizontal black dash-dot-lines

denote mean zero-temperature level height of evaluation area.

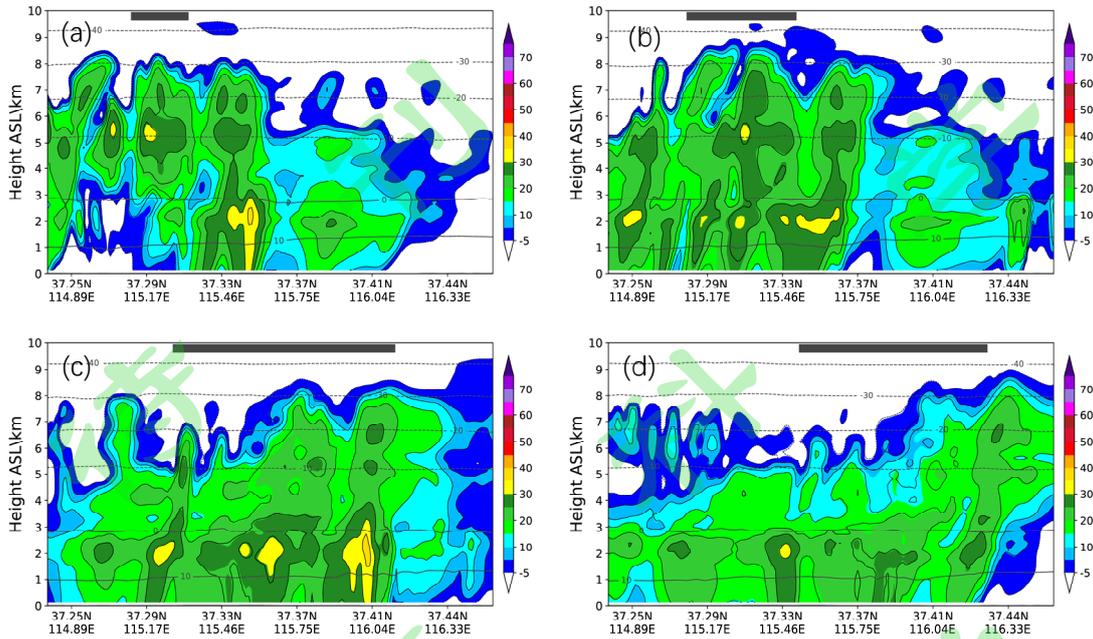


图 11. 不同时刻沿降水变化中心的雷达回波垂直剖面对比。图中阴影区和黑色等值线分别为自然云和催化云的雷达回波强度 (dBZ), 等值线值与阴影色标等级一致, 灰色等值线为温度 ($^{\circ}\text{C}$), 灰色条带的位置指示催化云中雷达回波主要变化区域对应的横坐标区间。(a) 19:20, (b) 19:45, (c) 20:40, (d) 21:15。

Fig.11 Comparison of vertical sections of radar echoes (dBZ) along the center of precipitation change at different moments, including natural cloud (shaded area) and seeding cloud (black contours), and all contours value are consistent with shaded color bar. The gray contours represent temperature ($^{\circ}\text{C}$). The position of gray shaded belts indicates the abscissa range corresponding to the main change region of radar echo in seeded cloud. (a) 19:20, (b) 19:45, (c) 20:40, (d) 21:15.

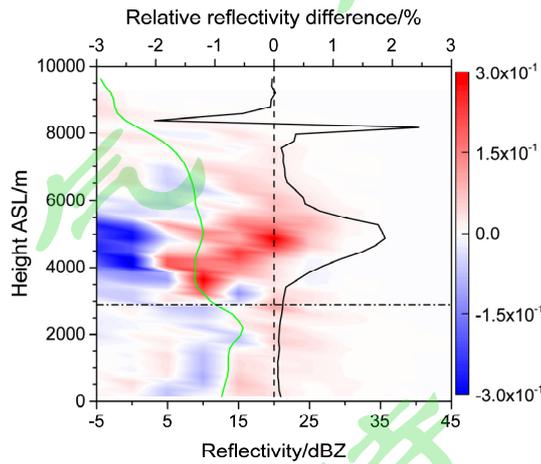


图 12. 与图 10 类似, 雷达回波的 CFDAD 图
Fig.12 As in Fig.10, but for radar echo.

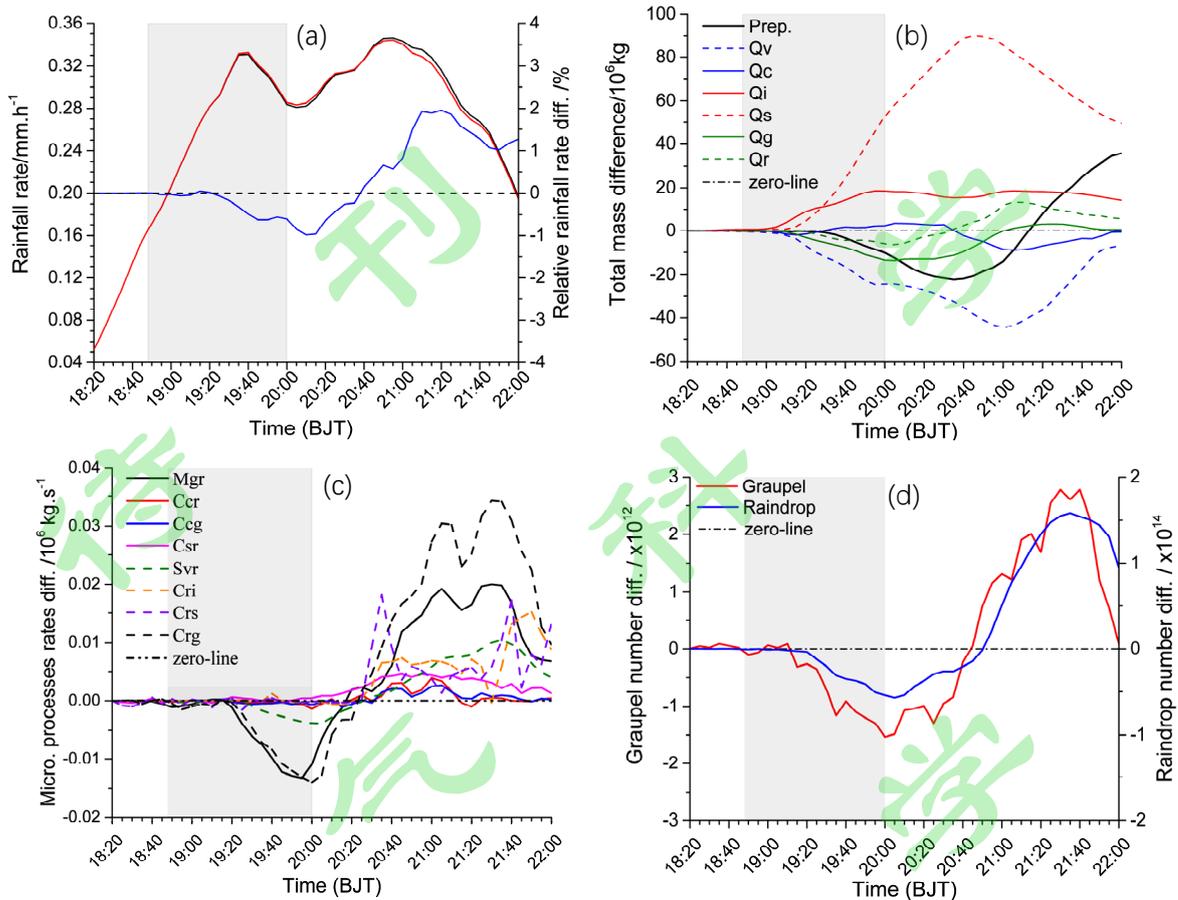


图 13. 评估区内区域平均降水强度、空中水凝物总量、降水总量、雨滴主要源汇项总转化率的差值 (ST-CT)、暖层中霰和雨滴总粒子数差值 (ST-CT) 随时间的变化。(a) 黑色实线和红色实线分别为催化云和自然云的区域平均降水强度, 蓝色实线为催化云降水强度相对自然云的变化, 黑色虚线指示相对变化为零的位置。(b) 各图线分别为降水 (Prep.)、水汽 (Q_v)、云水 (Q_c)、冰晶 (Q_i)、雪 (Q_s)、霰 (Q_g) 和雨水 (Q_r) 的总量变化。(c) 各图线分别为雨滴的源汇项总量转化率差值 (ST-CT), 其中实线为源项, 虚线为汇项。(d) 催化云暖层中的霰和雨滴粒子数与自然云的差值 (ST-CT)。(b)、(c) 和 (d) 中点划线为零值对应位置。图中阴影区对应第二次催化的作业时间段。

Fig.13 The time series of regional average precipitation intensity, total amount of hydrometeor, total precipitation, difference (ST-CT) of total conversion rate in main source and sink of raindrop, and difference (ST-CT) of total number of graupel and raindrop particles in warm layer over the evaluation area. (a) Solid lines represent average precipitation intensity of seeded cloud (black) and natural cloud (red). Blue solid line denotes change of seeded cloud precipitation intensity correspond to natural cloud, and black dotted-line indicates the position where the relative change is zero. (b) The regional total amount variation of precipitation (Prep.), water vapor (Q_v), cloud water (Q_c), ice crystal (Q_i), snow (Q_s), graupel (Q_g), and rain (Q_r) in seeded cloud relative to nature cloud. (c) The microphysical processes conversion rate difference (ST-CT) of source (solid lines) and sink (dash lines) terms of raindrop, solid lines indicate source items. The dotted-dashed lines in (b) and (c) correspond to zero value (zero-line). The shaded area denotes the second seeding operation time period.

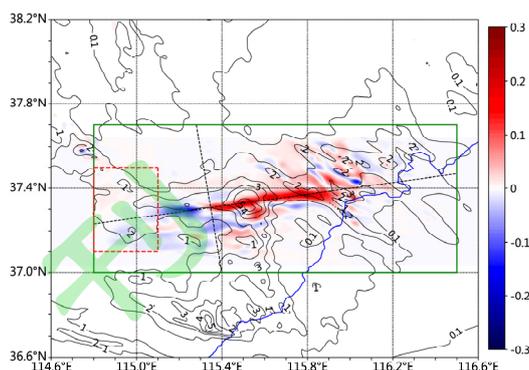


图 14. 模式时间 19:00–22:00 地面降水的累积变化 (阴影, ST-CT, mm) 和自然云的累积地面雨量 (等值线, mm)。图中绿色实线方框为本研究确定的评估区范围, 红色短划线条框为飞机第二次播撒作业的区域, 黑色短划线条为图 8 中两个剖面 and 图 11、图 16 中剖面所对应的位置。

Fig.14 Accumulative rainfall difference (ST-CT, shaded area, mm) and accumulative rainfall of nature cloud (contour, mm) from 9:00 to 22:00 in the model. Green solid-line box shows evaluation area determined in this case, and red dashed-line box denotes the region of second seeding operation. Two black dashed-lines correspond to positions of vertical sections positions in Fig.8, Fig.11 and Fig.16.

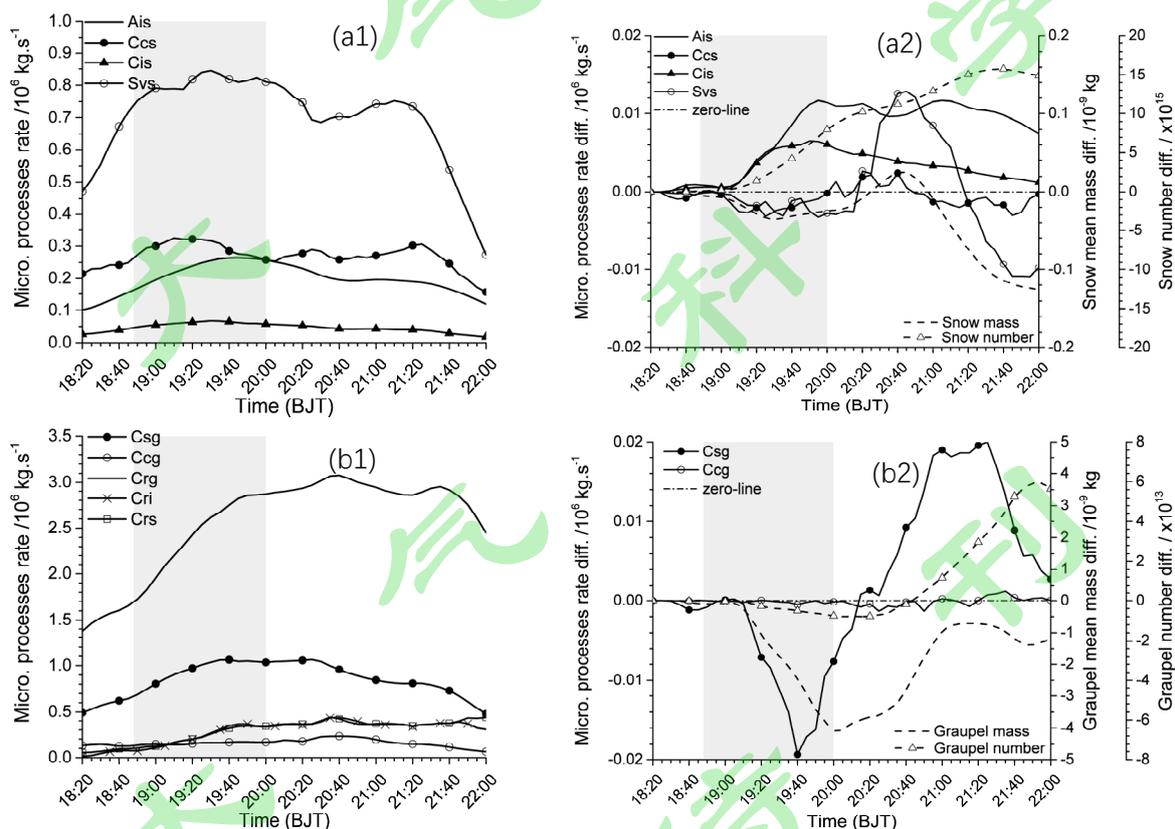


图 15. 催化云中雪和霰在过冷区的主要源项、各源项总转化率与自然云的差值 (ST-CT)、雪霰粒子总数和平均质量与自然云差值 (ST-CT) 随时间的演变。a1 和 a2 为雪的各项, b1 和 b2 为霰的各项。

Fig.15 The time series of main source terms, conversion rate difference (ST-CT), and difference (ST-CT) of total number and average mass of snow and graupel particles in supercooled zone of seeded cloud. a1 and a2 for snow, b1 and b2 for graupel.

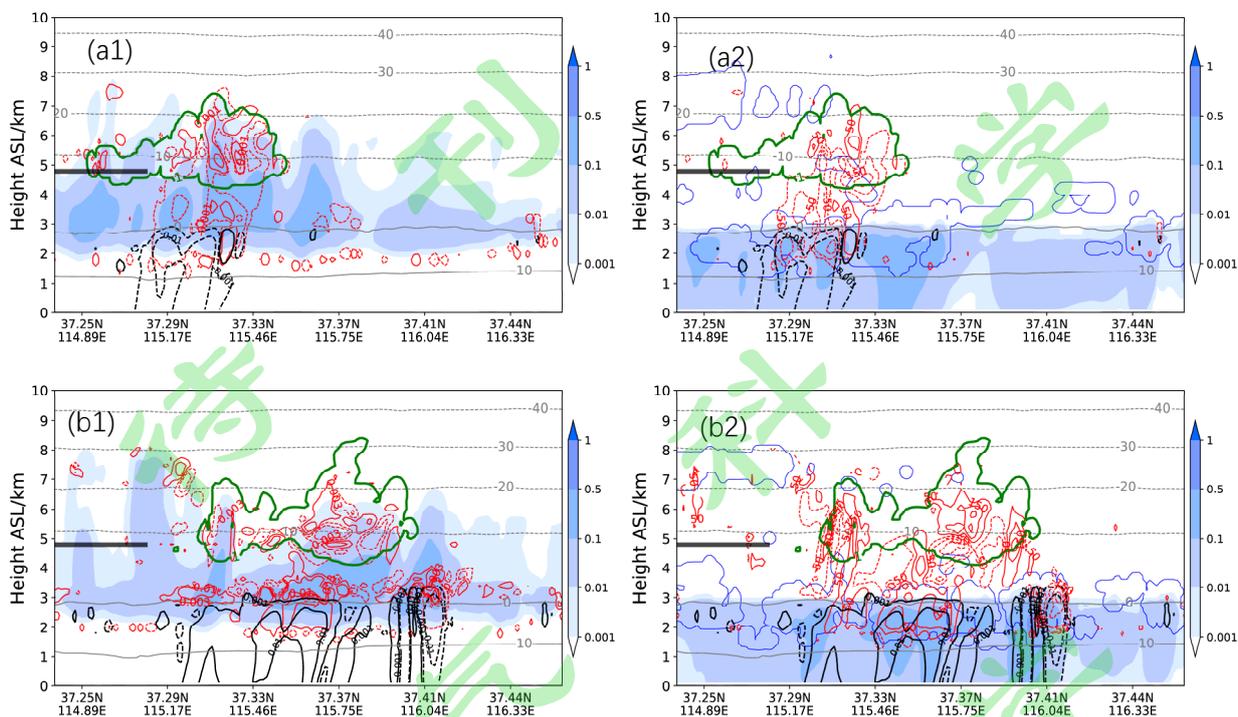


图 16. 催化作业开始后 1h (19:45) 和 2h (20:45), 沿降水变化中心的垂直剖面 (西南-东北)。图中黑色等值线为雨滴混合比的变化($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$, ST-CT), 绿色等值线为碘化银数浓度(L^{-1}), 蓝色等值线为催化云 $0.001\text{g}/\text{kg}$ 的云水混合比, 黑色粗实线对应作业区; 红色等值线分别为 (a1, b1) 霰粒数浓度变化 (L^{-1} , ST-CT), (a2, b2) 霰粒质量中值直径变化 (μm , ST-CT); 填色区分别对应 (a1, b1) 催化云霰粒混合比 ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$), (a2, b2) 催化云雨滴混合比 ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)。

Fig.16 Vertical sections along precipitation variation centre (from southwest to northeast) at 1h (19:45) and 2h (20:45) after seeding operation starts, including rain mixing ratio variation ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$, ST-CT, black contours), number concentration of AgI (L^{-1} , green contours), cloud water with a mixing ratio of $0.001 \text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ (blue contours) and seeding area position (bold black lines). (a1, b1): graupel number concentration variation ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$, ST-CT, red contours) and graupel mixing ratio of seeding cloud ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$, shades). (a2, b2): mass median diameter variation of graupel ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$, ST-CT, red contours) and rain mixing ratio of seeding cloud ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$, shades).