doi:10.11676/qxxb2021.011

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*

刘卫国　陶　玥　周毓荃　党　娟　谭　超　高　扬
LIU Weiguo　TAO Yue　ZHOU Yuquan　DANG Juan　TAN Chao　GAO Yang

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
1. *State Key Laboratory of Severe Weather*，*Chinese Academy of Meteorological Sciences*，*Beijing* 100081，*China*
2. *Key Laboratory for Cloud Physics of China Meteorological Administration*，*Beijing* 100081，*China*
2020-06-24 收稿，2020-11-09 改回.

刘卫国，陶玥，周毓荃，党娟，谭超，高扬. 2021. 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. 气象学报，79(2)：340-358

Liu Weiguo，Tao Yue，Zhou Yuquan，Dang Juan，Tan Chao，Gao Yang. 2021. Simulation of stratiform cloud seeding, its rainfall enhancement effect and mechanism study based on a real trajectory of aircraft. *Acta Meteorologica Sinica*，79(2):340-358

Abstract　The precipitation efficiency of stratiform clouds is usually low, and thus stratiform clouds have a high potential for the development and utilization of cloud water resources. They are important targets for artificial precipitation enhancement. With the increasing demands for ecological improvement, reservoir storage, drought resistance, and other social needs in southern China, it is increasingly necessary to study the technology and mechanism of cloud seeding in stratiform cloud precipitation system over this region. In this paper, a three-dimensional mesoscale cold cloud seeding model was used to simulate the stratiform cloud system rainfall process and silver iodide (AgI) seeding operation by aircraft for rainfall enhancement in Hubei province, China on 21 October 2018. The main macro and micro characteristics of clouds and rainfall were reasonably simulated. Both observational data and simulation results show favorable cloud condition for AgI seeding in the aircraft operation area. On this basis, the entire aircraft seeding process along the real flight trajectory and seeding information were simulated. The numerical simulation results show that condensation-freezing nucleation and deposition nucleation are the main nucleation modes of AgI during the seeding operation. The local activation ratio of ice nuclei ranged from 0.01% to 2% for more than 90% of AgI, and the average value of AgI activation ratio was between 0.07% and 0.27%. Rainfall was the result of joint effects of cold cloud precipitation mechanism and warm cloud precipitation mechanism, and seeding operation enhanced the effects of the two precipitation mechanisms and achieved obvious rainfall enhancement effect. Four hours after the start of the seeding operation, the accumulated rainfall in the entire evaluation area increased by 2.12×10^8 kg, which was equivalent to 8.1% of regional total rainfall; on local scale, the rainfall enhancement by seeding varied between −51.1% and 306.7%. Due to the dynamic disturbances caused by seeding in the supercooled cloud region, updrafts were weakened in some areas. As a result, the growth of precipitation particles was weakened and rainfall reduced in these areas. Seeding AgI in supercooled cloud region could lead to high concentration of the ice crystal particles, and the conversion processes from ice crystals to snow and from snow to graupels were enhanced. Following the increases in snow and graupel particles, more snow and graupel particles fell into the warm region of the clouds, and more large raindrops were generated in the upper layer of the

* 资助课题：国家重点研发计划项目（2016YFA0601701、2018YFC1507901）、公益性行业（气象）科研专项（GYHY201206025）、国家自然科学基金项目（41075099）。
作者简介：刘卫国，主要从事云降水物理和数值模拟研究。E-mail：liuwg@cma.gov.cn
通信作者：陶玥，主要从事云降水物理和数值模拟研究。E-mail：taoyue@cma.gov.cn

warm region, which enhanced the collision-coalescence process between raindrops and cloud droplets in the warm region, and eventually led to rainfall increases. The above processes formed a main microphysical chain of rainfall enhancement by AgI seeding.
Key words Stratiform cloud, Rainfall enhancement effect, Mesoscale seeding model, Aircraft track simulation, AgI nucleation, Microphysical chain, Dynamic effect

摘 要 层状云降水效率通常较低，但却具有较高的云水资源开发潜力，是人工增雨作业的重要对象。随着中国南方地区生态改善、水库增蓄、抗旱等社会需求的增加，针对这些地区降水云系的人工增雨研究显得愈发重要。使用三维中尺度冷云催化模式，对2018年10月21日湖北省一次层状云飞机人工增雨作业过程进行了数值模拟研究，并将模拟结果与卫星、降水和机载云物理观测数据进行了对比。模式合理地模拟出了云和降水的主要宏、微观特征，观测和模拟结果均显示作业云区具有较好的冷云催化条件，在此基础上，按照实际作业中的飞机播撒轨迹，完整地模拟了此次催化作业过程。对数值模拟结果的分析表明：凝结冻结核化和凝华核化是碘化银催化剂的主要核化方式；90%以上碘化银粒子的局地活化比为0.01%—2%，平均活化比为0.07%—0.27%；云系降水是由冷云降水和暖云降水两种机制共同作用的结果，催化作业使两种降水机制均有增强，增雨效果明显；催化后4 h，整个评估区内的累计净增雨量为2.12×10^8 kg，局地增雨率为−51.1%—306.7%，区域平均增雨率为8.1%；催化作业也使部分地区出现减雨，主要是由于催化过程中的潜热释放引起过冷层动力场扰动，一部分云区的上升气流减弱，从而导致降水粒子的成长减弱，地面出现减雨；在过冷云区，碘化银核化使冰晶浓度升高，导致冰晶-雪、雪-霰的转化过程增强，雪、霰粒子总量增加，更多的雪、霰粒子从冷区落入暖区，在暖区上层产生更多的大雨滴，从而使暖区的云雨粒子碰并过程增强，最终地面降水增加，这是此次催化作业导致增雨的主要微物理链条。
关键词 层状云，人工增雨效果，中尺度催化模式，飞机轨迹模拟，碘化银核化，微物理链条，动力效果
中图法分类号 P481

1 引 言

随着气候变化的加剧，水资源短缺已经成为许多国家面临的紧迫问题。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短缺问题的重要方法（李泽椿等，2006）。目前，人工增雨作为开发利用空中云水资源的一种可行的技术手段，已被许多国家用于解决水资源紧张或其他社会需求问题，相关的人工增雨计划和活动日益增多（WMO，2018）。层状云是人工增雨作业的重要对象，通常它们的降水效率不高，因此常具有较高的云水资源开发潜力（蔡淼，2013）。中国作为水资源短缺的国家，对层状云人工增雨开展了许多研究和实践（游来光等，2002；洪延超等，2012），但大多偏重于北方层状云系，而对南方层状云系人工增雨的研究相对偏少。近年来随着中国南方的生态改善、水库增蓄、抗旱等社会需求的增加，加强对南方地区层状降水云系的人工增雨理论和技术研究显得愈发必要。

对于层状云人工增雨，目前主要采用冷云催化作业的方式，而碘化银类催化剂是使用最为广泛的冷云催化剂，其核化特性及在催化过程中的作用是人工影响天气的重要研究内容。碘化银是优良的异质核化冰核，通常认为碘化银粒子是通过凝华、凝结冻结、接触冻结和浸没冻结4种核化机制形成冰晶（Marcolli, et al, 2016），在实际应用中，一般将碘化银与其他化学组分相结合以增强其核化性能。DeMott（1995）通过云室试验研究了碘化银粒子（含不同化学组分）的4种核化机制，并将试验结果应用于云模式来对比各核化机制的作用，研究指出接触冻结核化是潜在的最为高效的核化机制，但受限于碘化银冰核与过冷滴的碰并率低，其实际作用并没有凝华、凝结冻结两种核化机制有效，浸没冻结核化的作用则始终要低于接触冻结核化。Meyers等（1995）将DeMott（1995）的试验结果应用到气泡模式中，对碘化银4种核化机制的作用进行了比较，结论与DeMott（1995）的一致。刘诗军等（2005）根据DeMott（1995）的试验结果，使用混合相层状云模式和三维对流云模式对碘化银粒子的核化过程进行了模拟研究，结果显示在层状云中碘化银主要以接触冻结和浸没冻结方式核化，而在对流云中则主要以凝结冻结方式核化。Xue等（2013a）综合了DeMott（1995）的试验结果和Meyers等（1995）的处理方法，在WRF模式中实现了碘化银催化的模拟，并在二维地形云模拟中研究了飞机播撒和地基播撒碘化银的核化过程。结果表明，在稳定的层状地形云中，飞机播撒的碘化银主要以凝华核化方式形成冰晶，地基播撒碘化银的主要核化

方式是浸没冻结,其次为凝华和凝结冻结,接触冻结核化在两种播撒方式中均是最弱的。楼小凤等(2014)在对流云催化中采用了与刘诗军等(2005)相同的碘化银核化模块,模拟结果表明凝结冻结和浸没冻结是碘化银的主要核化方式。可见,即便采用同样的试验结果,在不同背景条件的数值模拟中,碘化银的核化方式也是有差异的,这也说明碘化银冰核所处云区的环境(如上升速度、温度、湿度等条件)对其核化是有影响的,因此碘化银催化剂在不同特征云系中的核化方式需要更多的深入研究,这对于开展科学的催化作业是很必要的。

在云中引入催化剂形成人工冰晶,然后通过水-冰转化的贝吉龙过程使云中过冷水转化为降水,这一机制是人工增雨技术的经典理论基础。胡志晋等(1983)基于一维层状云模式的研究结果指出,人工增雨的水分来源不完全出自水-冰的转化,而且可来自汽-冰转化,这为在低过冷水含量的层状云中进行人工增雨提供了理论依据。在多个数值模拟研究基础上,胡志晋(2001)进一步提出了新的层状云人工增雨机制,指出人工冰晶可通过上述水-冰和汽-冰转化过程形成降水,催化后水汽的补充凝华及过冷水冻结所释放的潜热会使局部云区升温、气流升速增大,从而促进催化云降水的发展。在人工增雨理论的研究中,数值模式一直发挥着重要作用,早期的人工增雨模拟大多基于云模式开展,近年来随着中尺度模式的不断发展,云催化的模拟研究开始向更接近真实催化状况的方向发展,因此,动力框架和物理过程(如陆面过程、辐射过程等)更为完整的三维中尺度模式越来越多地被应用于云催化模拟研究,有希望进一步推进人工增雨的理论发展。

对于层状云催化的数值模拟研究,Meyers 等(1995)在三维中尺度模式中模拟了碘化银的催化过程,其模拟的一次冬季地形云的催化增雪结果与实况基本一致;赵震等(2012)采用耦合了 Hsie 等(1980)碘化银核化方案的 MM5 三维中尺度模式,模拟了中国西北地区一次层状云降水的催化过程,其催化后 3 h 的增雨效果为 10%—30%;Xue 等(2013b)基于 WRF 模式建立了模拟碘化银催化的三维中尺度催化模式,对 4 个冬季地形云增雪个例进行了数值模拟研究,模拟结果显示在作业目标区的平均增雪效果最高可达 5%,研究也指出飞机播撒效果通常要比地基播撒更高效;何晖等(2013)在 WRF 模式中的 Morrison 微物理方案中耦合了碘化银的核化过程,并开展了层状云增雨的三维数值模拟,研究了不同催化剂量、催化部位和催化时间对降水的影响;刘卫国等(2016)以耦合了 CAMS(Chinese Academy of Meteorological Sciences)微物理方案的 WRF 模式为基础,在 CAMS 方案中增加了碘化银和致冷剂催化模块,使用该模式对山西省两次层状云飞机增雨作业过程进行了模拟,评估了作业效果,并对比了碘化银催化和致冷剂催化的异同;Xue 等(2016)利用耦合了碘化银催化过程的 WRF-LES(Large Eddy Simulation)模式,采用高达 100 m 的水平分辨率,更为精细地研究了地形云催化中地基播撒的碘化银扩散特征以及对动力场、微物理和降水的影响。总之,三维中尺度模式不但具备详细模拟云中微物理过程的能力,而且在模拟过程中能够兼顾从天气系统到中小尺度系统的影响,可以更好地实现对层状云系这种大范围降水云系及其催化过程的模拟。

湖北省地处长江中游,大部分区域属亚热带季风气候,位于该省西北部的丹江口水库是“南水北调”的重要水源地,在水库及其上游流域开展人工增雨已经成为解决水库增蓄需要的重要手段,有必要针对这一地区的层状云人工增雨开展深入研究。本研究采用基于 WRF 发展的三维中尺度冷云催化模式,对 2018 年 10 月 21 日湖北省一次层状云飞机人工增雨作业过程进行了数值模拟,在模拟结果合理反映云和降水宏、微观特征的基础上,按照飞机作业的真实轨迹和播撒方式开展了催化模拟,研究了碘化银粒子的核化特征,对此次作业的增雨效果进行数值评估,分析了碘化银催化的作用机制。

2 个例概述

2018 年 10 月 21 日,在湖北省西北部开展了一次飞机探测及人工增雨作业试验。试验中使用的作业飞机除搭载了碘化银播撒装备外,还安装了美国 DMT(Droplet Measurement Technology)机载云微物理探测系统(李宏宇等,2020;蔡兆鑫等,2019),主要包括云物理探头和机载综合气象要素测量系统 AIMMS-20(Aircraft-Integrated Meteorological Measurement System),前者可观测云和降水粒子的尺度、图像信息(表 1),后者可测量大气温度、湿度、气压、风向风速以及记录飞机轨迹等数据。

表 1 机载云微物理采样探头测量范围

Table 1 Measurement ranges of airborne cloud microphysics probe

采样探头	测量范围
Cloud Droplet Probe（CDP）	2—50 μm
Cloud Imaging Probe（CIP）	25—1550 μm
Precipitation Imaging Probe（PIP）	100—6200 μm
Liquid Water Content Sensor（LWC-200）	0—3 g/m^3

10 月 21 日，受高空槽系统影响，湖北省西北部有降水性层状云系发展，丹江口水库及其上游流域自西向东出现小雨量级的降水，降水持续到 17 时(北京时，下同)前后结束。图 1 是由 FY-2E 气象卫星观测数据反演的云顶温度，可以看到，湖北西北部云系云顶温度为−5—−20℃，其中飞机作业区的云顶温度为−10—−15℃。飞行观测记录显示，播撒作业期间机身有明显积冰，这说明云内过冷水含量较高，而作业云区的云顶温度恰好又处于−10—−24℃的冷云催化播云温度窗(Grant, et al, 1974)，上述特征表明，飞机作业的目标云区是冷云催化的适宜区域，在这一区域内开展催化作业有望取得较好的增雨效果。

飞机作业区域位于湖北省西北部(图 1)，作业目的是在丹江口水库及其西部的上游流域内实现增雨。飞机起飞后，于 12 时 51 分进入海拔高度 4500 m 的目标云区开始连续播撒作业，作业期间由于飞机出现较强程度积冰，13 时 34 分后上升至海拔 4800 m 高度，13 时 44 分后由于积冰严重又下降

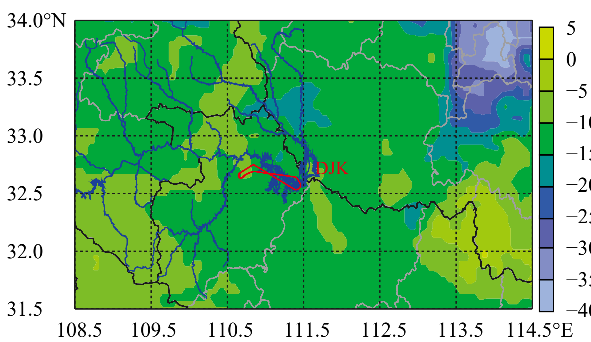


图 1 FY-2E 卫星观测资料反演的 2018 年 10 月 21 日 13 时 30 分的云顶温度（单位：℃）(DJK 指示丹江口水库位置，红色线条为飞机催化作业时段的飞行轨迹）

Fig. 1 Cloud top temperature（unit：℃）retrieved from FY-2E satellite at 13:30 BT 21 October 2018（DJK denotes the location of the Danjiangkou reservoir; red line indicates the flight trajectory of the seeding operation）

至 3000 m，13 时 52 分播撒作业停止，整个过程总计作业时间 3668 s，播撒的催化剂中碘化银含量共计 1375 g，平均播撒率为 0.375 g/s。在催化播撒段，飞机采用“8”字型作业轨迹，总计进行了两次“8”字形飞行，具体飞行轨迹水平投影见图 1(注：两次轨迹的位置几乎是重合的)。

3 模式及数值试验介绍

本研究采用刘卫国等(2016)基于 WRF 框架发展的三维中尺度冷云催化模式，该模式在 WRF 框架中耦合了 CAMS(陈德辉等，2004；Gao, et al, 2011)混合相双参数微物理方案，同时在 CAMS 方案中增加了一个冷云催化模块，可以直接模拟碘化银类催化剂形成冰晶的多种核化过程。CAMS 方案包括水汽混合比(Q_v)、云水混合比(Q_c)，雨滴、冰晶、雪、霰的混合比(Q_r、Q_i、Q_s、Q_g)和数浓度(N_r、N_i、N_s、N_g)以及控制云雨自动转化过程的云滴谱拓宽度，共计 11 个微物理预报量，考虑了冰晶的核化和繁生、不同水凝物之间自动转化、冻结融化、碰并、凝结蒸发、凝华升华等总计 31 种微物理过程，CAMS 方案曾耦合到多个模式中用于云和降水的数值模拟研究(楼小凤，2002；孙晶等，2008；Gao, et al, 2011)。

冷云催化模块中，碘化银的核化是基于 DeMott (1995)的试验结果，主要考虑了凝华核化(DEP)、凝结冻结核化(CDF)、接触冻结核化(CTF)和浸没冻结核化(IMF)4 种成冰核化过程以及作为云凝结核的凝结核化过程(本研究中关闭了这一过程)，该试验结果曾被耦合到云模式(刘诗军等，2005；楼小凤等，2014)和中尺度模式的不同微物理方案中(Meyers, et al, 1995；Xue, et al, 2013a, 2013b, 2016；刘卫国等，2016)用于开展催化模拟研究。在真实的催化作业过程中，飞机的作业轨迹往往比较复杂(孙玉稳等，2017；蔡兆鑫等，2013)，而以往的数值研究常常采用简化的方式来模拟催化播撒，一般假定在某一固定区域内瞬时或持续一段时间引入催化剂(Meyers, et al, 1995；孙晶等，2008；何晖等，2013；刘卫国等，2016)，引入的催化剂瞬时均匀分布到整个区域，这种处理方式并未考虑播撒过程中的时间和位置变化对催化播撒的影响，不能反映真实的飞机催化作业过程，在检验评估催化作业效

果时存在更多的不确定性。为更真实地在三维模式中模拟实际作业情况,刘卫国等(2021)在催化模式中增加了飞机轨迹仿真模块,并与碘化银核化方案相结合,实现了对飞机催化作业方式的合理模拟。本研究将基于上述基础,采用作业中的真实飞行轨迹,通过数值模拟评估催化作业的增雨效果,研究催化的作用机制。

模拟试验采用 3 层双向嵌套运行(图 2),D1、D2 和 D3 区域的水平分辨率依次为 9、3 和 1 km,垂直方向采用地形追随坐标,分为 65 层,垂直分辨率从约 50 m(地面附近)到约 360 m(高空),模式层顶取为 50 hPa。D1 区域采用 CAMS 微物理方案和 NSAS 积云参数化方案,D2 和 D3 区域只使用 CAMS 方案,其中 D3 区域的时间步长为 5 s。使用每 6 h 一次的欧洲中心 0.25°ERA-interim 再分析资料为模式提供初始场和侧边界条件。模拟时段为 10 月 21 日 02—18 时,共执行了两次模拟,一个是未施加催化的自然云(NC)模拟,另一个是催化云(SC)模拟,催化作业在 D3 区域进行,两次模拟除了是否催化的区别外,其他设置均相同。催化模拟中,碘化银播撒方式完全采用真实作业中的飞机作业轨迹(图 1)、作业时段以及平均播撒速率(0.375 g/s)等参数进行模拟,尽可能接近真实催化作业过程。

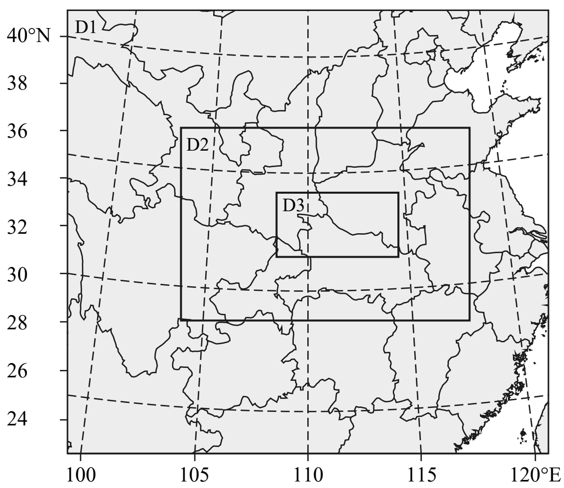


图 2 数值模拟的模式域

Fig. 2 Model domains for simulation

4 模拟结果分析

4.1 模拟结果检验

催化模拟前,需通过与实况观测数据的对比来检验模式对云和降水发展的模拟情况。图 3 为 FY-4A 气象卫星可见光云图与模拟的 D1 区域云带对比。模拟云带以垂直积分总水量表示,总水量大的区域表明云区较厚或云中大水凝物粒子较多,即云的发展状况较好。从图中对比可以看出,模拟的云带宏观形态及分布区域与实况基本一致。湖北区域降水云系表现出了明显的层状云特征,实况云图中湖北中部及西部地区(含试验区:32.2—33.2°N,110.5—113°E)的云层均匀细密,云顶平整,为发展

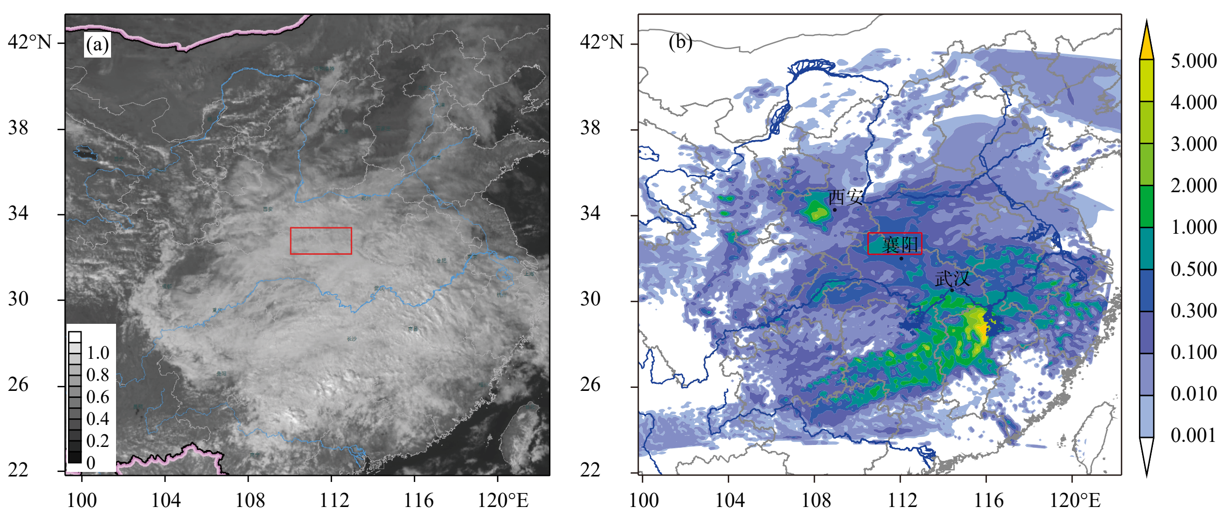
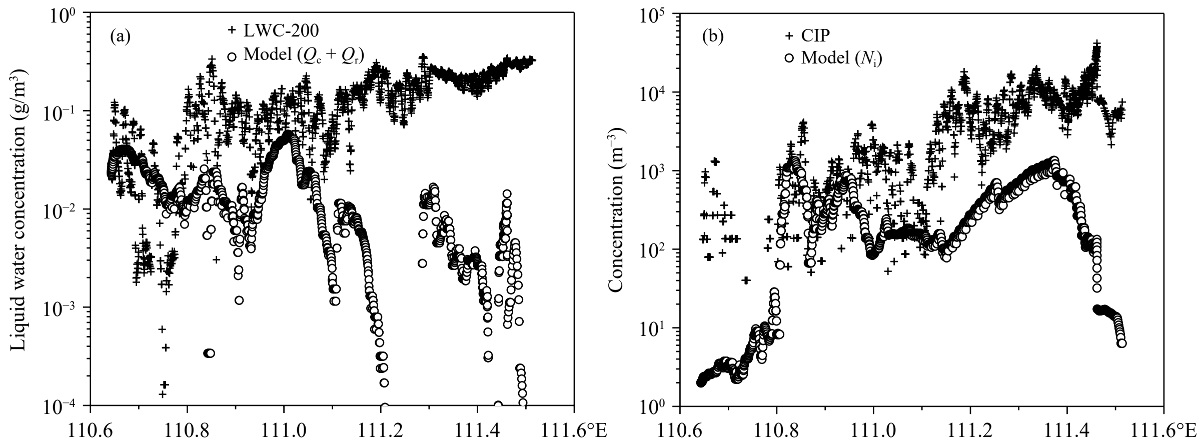


图 3 2018 年 10 月 21 日 14 时 FY-4A 气象卫星的可见光云图(a)和模式模拟的云带(b,单位:mm)
(图中红色方框为试验区位置)

Fig. 3 (a) Visual-light cloud image of FY-4A satellite and (b) simulated cloud band (unit: mm) at 14:00 BT 21 October 2018 (The red box represents the scope of the experiment area)

较为稳定的层状云系，而湖北东部及长江以南地区云顶起伏较大，云系发展较强；模拟云带所反映的云系发展状况也表现出了与实况类似的特征。

飞机在12时39分—13时08分完成了第一次“8”字形作业飞行，高度4490—4600 m，虽然在12时51分即开始进行播撒作业，不过从飞行轨迹看，播撒的催化剂在这段时间内对飞机探测的影响较小，因此机载DMT系统的观测结果可认为是对自然云的观测。AIMMS-20测量的作业区平均温度为−6.3℃（−7.1—−4.2℃），模拟结果为−6.1℃（−7.2—−5.3℃），二者非常接近。图4为上述时段内云微物理探测与模拟结果按经度方向的空间分布对比，其中模式结果取自飞机轨迹上所有格点的数据，并将12时40分—13时10分每5 min一次输出的模式数据进行了平均，用以代表飞机轨迹上的云层平均状况。飞行记录表明，在12时40分（作业区东部）和12时50分（作业区西部），均观察到飞机有积冰现象，这是云中有过冷水存在的直接证据。图4a中LWC-200的探测结果也表明云中过冷水含量较高，而模拟的液水含量（包括云滴和雨滴）总体上比观测值要低，其中作业区西部的模拟结果要好一些，作业区东部的模拟结果较差，其原因一方面可能与所在云区发展不均匀有关，另一方面LWC-200的探测机制也可能造成其测值偏高（李大山，2002；王柏忠等，2004），如冰相粒子打在LWC-200测量元件上造成的降温效应会造成含水量高估。图4b中模拟的冰晶粒子浓度较CIP观测的数值偏低，但在变化趋势上有一定的相似性，由于CIP观测的数据中不仅包括冰晶粒子，还包括大云滴等液相粒子，这可能是造成模拟的冰晶浓度低于观测值的原因。PIP探头主要观测云内外液相和冰相的降水粒子，从图4c中可看到，模拟结果与观测结果有较好的对应关系，粒子浓度的数量值和变化趋势均有较高的相似性。当然，由于模式对云中粒子的



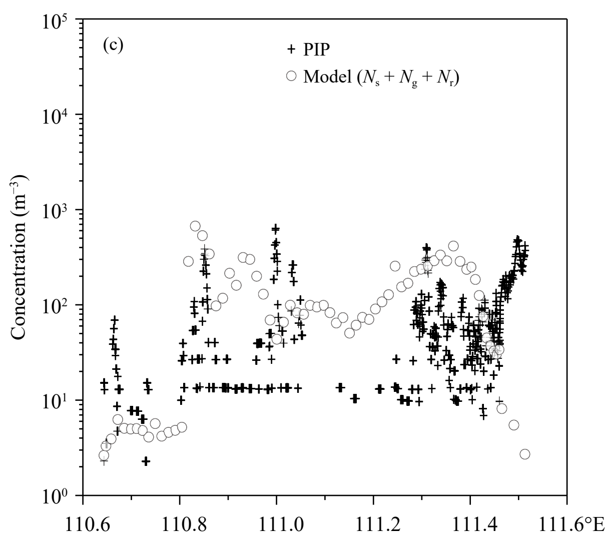


图4　2018年10月21日作业区的机载云微物理观测数据与模拟结果对比（a. 模拟的液水含量（云滴和雨滴）与LWC-200观测的云含水量，b. 模拟的冰晶浓度与CIP观测的粒子浓度，c. 模拟的降水粒子（雪、霰和雨滴）浓度与PIP观测的粒子浓度）

Fig. 4　Comparison of cloud microphysical characteristics between the data probed by aircraft in the operation area and the results simulated by the model on 21 October 2018 (a. simulated liquid water content of clouddrop and raindrop and cloud water content measured by LWC-200 probe, b. simulated concentration of ice crystals and concentration of particles measured by CIP probe, c. simulated concentration of snow, graupel, and raindrops and concentration of particles measured by PIP probe)

划分范围、种类与观测探头的测量范围、观测的粒子相态等并不完全一致，而且观测探头在过冷区不能完全区分出液相和冰相粒子，因此上述对比更多的是一种定性的趋势对比。从对比结果看，模拟结果总体上能表现出作业区云微物理的空间变化特征，其中对作业区西部的模拟结果要更好一些。

图5为催化作业前D3区域模拟的地面累计降水与实况降水对比。实况降水的主雨带位于109.5—112.0°E，与催化作业相关的丹江口水库周边区域（32.0—33.5°N，109.5—112.0°E）是降水较为集中的地区，其主要的降水区位于水库西部，模拟降水的区域分布和实况具有相似的特征。从降水量上看，模式域北部边界的降水模拟偏大，但试验区的降水与实况接近，其中水库周边大部分站点的实况降水为0.1—1 mm，水库西部的部分站点为1—2 mm，模拟的水库周边降水量也主要在0.1—2 mm，总体上，模拟降水稍强于实况。

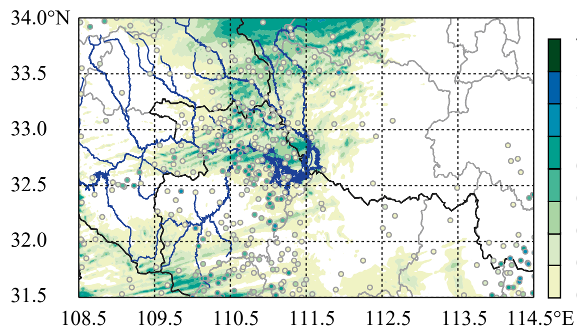


图5　2018年10月21日08—13时累计降水（单位：mm）模拟结果与实况对比（色阶：模拟；填色圆圈：实况；蓝色线条为丹江口水库及其上游流域河流）

Fig. 5　Comparison between rainfall simulated by the model and observed rainfall (unit: mm) from 08:00 BT to 13:00 BT 21 October 2018 (Colored circles represent stations and the amount of rainfall, and the shaded areas represent simulated rainfall; The color scale is the same for model results and observations; The blue lines indicate the Danjiangkou Reservoir and its upstream rivers)

上述对比表明，模式合理地模拟出了大范围层状云系的宏观形态，试验区的云微物理结构、地面降水等主要特征在模拟结果中也有相似的体现，基于上述基础，开展了催化模拟试验。

4.2　碘化银的核化特征

人工增雨作业中，播撒的碘化银催化剂首先需要通过核化过程形成冰晶，这是催化起效的关键阶段。图6为播撒作业进行到59分钟时(13时50分)，碘化银及其4种核化过程所形成的新生冰晶(指当前时刻碘化银新核化出的冰晶，不包括该时刻前碘化银所形成的冰晶)数浓度的水平和垂直分布。模式中，因为催化剂的播撒是按照真实的作业过程进

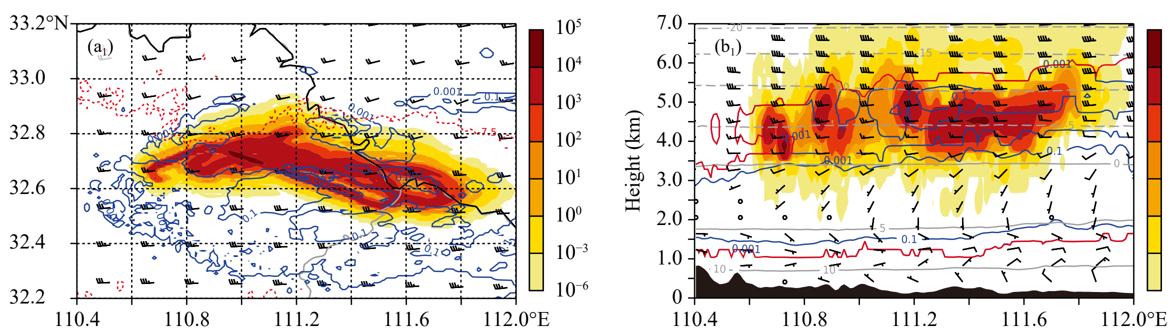
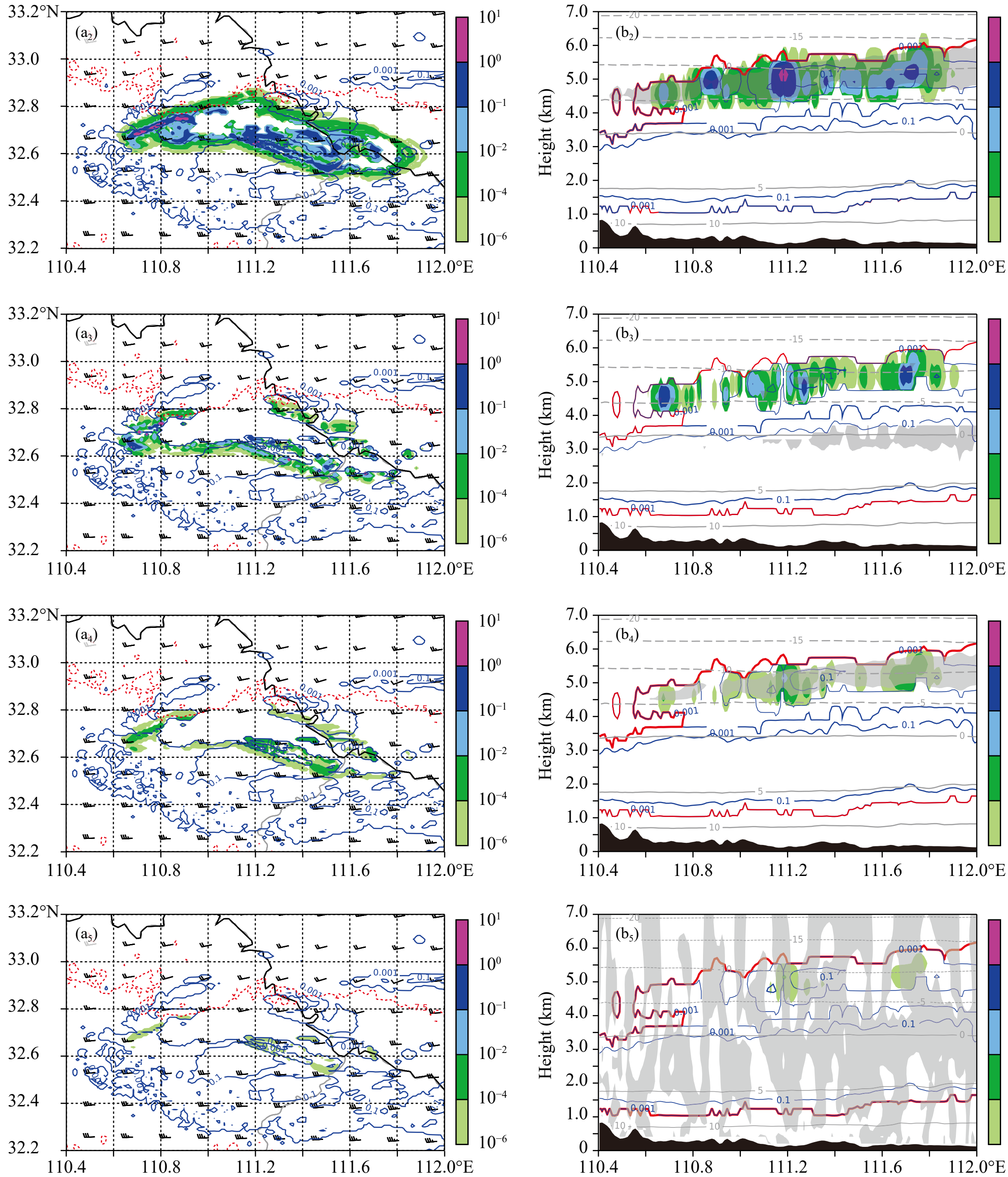


图6　2018年10月21日13时50分碘化银粒子及其新生冰晶数浓度（单位：L^{-1}）的水平和垂直分布（a_1—a_5. 海拔4800 m高度层，b_1—b_5. 沿32.65°N的垂直剖面；色阶分别为碘化银粒子（a_1、b_1）以及由凝华核化（a_2、b_2）、凝结冻结核化（a_3、b_3）、接触冻结核化（a_4、b_4）和浸没冻结核化（a_5、b_5）所产生的新生冰晶；蓝色等值线为云水（单位：g/kg），风向杆为水平风场（单位：m/s）；水平分布图中红色等值线为温度（单位：℃），垂直剖面图中红色等值线为0.001 g/kg总水量（不含雨水）；剖面图中灰色阴影区分别为（b_2）冰面过饱合度大于0.04区、（b_3）水面过饱合度大于0区、（b_4）冰面过饱合度大于0.055区和（b_5）上升气流区）

Fig. 6　Horizontal and vertical distributions of the number concentration (unit: L^{-1}) of AgI particles and newly nucleated ice crystals at 13:50 BT 21 October 2018 (a_1—a_5. 4800 m MSL, b_1—b_5. west-east cross sections along 32.65°N; The color shadings represent AgI particles (a_1, b_1) and ice crystals produced through (a_2, b_2) deposition nucleation, (a_3, b_3) condensation-freezing nucleation, (a_4, b_4) contact-freezing nucleation, (a_5, b_5) immersion-freezing nucleation; blue contours indicate cloud water mixing ratio (unit: g/kg), and wind barbs show horizontal winds (unit: m/s); Red contours are (a_1—a_5) temperatures (unit: ℃) and (b_1—b_5) total water content (excluding rain) with mixing ratio of 0.001g/kg; In cross sections, the areas shaded in gray indicate (b_2) ice supersaturated zone ($r_i>0.04$), (b_3) water supersaturated zone ($r_w>0$), (b_4) ice supersaturated zone ($r_i>0.055$) and (b_5) updraft zone)



续图 6

Fig. 6 Continued

行的，图 6a_1 中可清楚看到两次“8”字形播撒轨迹产生的碘化银烟羽，由于播撒时间有先后，图中碘化银烟羽不同部位的扩散状况以及向下游输送的距离有明显差别。图 6 中显示凝华核化具有最广泛的作用区域，而其他 3 种核化方式主要存在于过冷云水区。以总水量大于 0.001 g/kg 代表云区范围（下同），由图 6 垂直剖面可知，碘化银核化区域主要位于−4℃ 层（约 4.2 km 高）到−13℃ 层（约 6 km 高），处于云区的上部到云顶附近，各核化过程的作用峰值均在 4.5—5.5 km 高度，这一区间恰好也存在着较高的过冷云水含量。

由图 6b_1、b_5 可知，碘化银烟羽内大部分区域为

上升气流区,说明云中的动力条件总体上对碘化银冰核的核化是有利的。以冰面过饱和比值(r_i)和水面过饱和比值(r_w)来表示云中的水汽状况,根据碘化银的核化条件(刘卫国等,2016),图 6b_2—b_4 的灰色阴影区展示了过冷云层中满足不同核化方式的水汽适宜区(注:这些区域是根据当前时刻的模式结果计算所得,在一定程度上反映了下一时刻冰核核化的水汽条件)。可以看到,在−5℃层以上,凝华核化的区域范围最大;凝结冻结核化的适宜区域范围要比凝华核化的小很多;接触冻结核化不但对水汽条件有一定要求,它还受到云滴对碘化银粒子的搜集效率的影响,因此其适宜区域是水汽适宜区与过冷云水区重合的区域。浸没冻结主要与温度和含碘化银粒子的云滴浓度相关(本研究未考虑碘化银凝结为云滴的过程,一定程度上会低估含碘化银粒子的云滴浓度,但计算表明,在本个例的云区条件下,忽略凝结过程对浸没冻结核化的影响并不大),同接触核化类似,云滴对碘化银粒子的搜集效率也是影响浸没冻结核化的重要因素。由于催化作业的过冷云区温度高于−10℃,在这一温度区域,碘化银核化效率并不高,加之云滴对碘化银粒子还存在一定的搜集效率,这可能是接触冻结和浸没冻结核化过程偏弱的重要原因。此外,无论从水汽、温度还是动力条件上看,过冷云区上层存在较大范围的适宜凝华核化的区域,其中也包括过冷水区;一方面,过冷水区中,冰水之间的贝吉龙过程会促进人工冰晶通过凝华过程快速增长,从而大量消耗过冷水,另一方面,过冷水的消耗最终会抑制云水区中碘化银其他 3 种核化过程的增长。

受本身特性及周围环境的影响,碘化银粒子存在一个活化的比率。参考 Xue 等(2013a)的定义,将模式某一格点上、在一个时步(5 s)内已核化为冰晶的碘化银粒子数与核化前碘化银粒子总数的比值定义为局地活化比,将模拟域内碘化银已活化区域中的所有局地活化比取平均值得到平均活化比。表 2 统计了 12 时 51 分—17 时整个 D3 区域的碘化银活化信息,图 7 给出了碘化银 4 种核化过程在 D3 区域中的新生人工冰晶总量、活化区域总体

表 2 12 时 51 分—17 时碘化银的活化比统计(%)

Table 2 Statistics of AgI activation ratio (%) from 12:51 BT to 17:00 BT

种类	凝华核化(×10^{-2})	凝结冻结核化(×10^{0})	接触冻结核化(×10^{-4})	浸入冻结核化(×10^{-6})	总活化比(×10^{0})
平均活化比	3.45—5.33(4.97)	0.2—0.94(0.37)	2.67—8.54(6.28)	1.64—6.65(4.53)	0.07—0.27(0.13)
局地最大活化比	9.43—42.7(22.8)	2.09—94.1(30.4)	9.87—18.6(16.2)	7.78—14.4(12.9)	2.16—94.2(30.4)

注:括号中的数据为对应活化比在12时51分—17时的平均值。

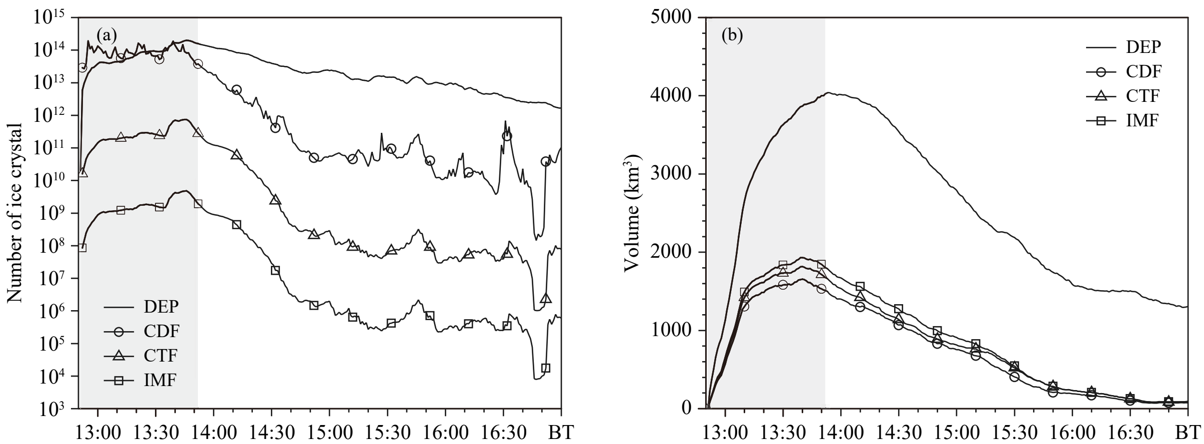


图 7 碘化银 4 种核化机制在一个时步内(5 s)形成的新生人工冰晶总数(a)以及对应的活化区域体积(b)随时间的变化(阴影区域对应催化作业时段,下同)

Fig. 7 Time series of (a) the number of new artificial ice crystals produced through four kinds of nucleation modes of AgI and (b) the corresponding volume of AgI activation region during a 5 s time step in model

(The seeding period is indicated by the gray area, the same hereafter)

积随时间的变化。由表 2 可知，碘化银凝结冻结机制的活化比远大于其他 3 种核化机制，凝华机制的平均活化比相较凝结冻结要低 1 个量级左右，接触冻结和浸没冻结的活化比则远低于前两种核化机制。从图 7a 可以看出，在飞机播撒过程的大部分时段，碘化银凝结冻结核化产生的人工冰晶总量要高于凝华核化或与之相当，在播撒作业末期及作业后，凝结冻结核化的新生人工冰晶数量明显减少，而凝华核化已成为主要的核化机制。结合图 6 分析可知，播撒作业期间，作业区内有较大范围的过冷水区存在，有利于碘化银的凝结冻结核化，由于其活化比高，尽管发生凝结冻结核化的空间范围始终小于凝华核化（图 7b），但总效果仍然是凝结冻结核化机制占据了主要地位，不过，随着云中过冷水以及水汽的消耗，满足水面过饱和的云区范围显著减小，最终导致凝结冻结核化的作用快速下降直至低于凝华核化。至于接触冻结核化和浸没冻结核化，它们无论是活化比还是对整个区域的贡献都远小于前两种机制，其中浸没冻结核化更是整个模拟过程中最弱的机制。

Xue 等（2013a）在冬季地形云催化的数值试验研究中发现，碘化银的局地活化比基本在 0.02%—2%，在优化的催化条件下最高可达 60%。本个例中，碘化银粒子的局地活化比（所有 4 种核化机制）的统计结果表明，90% 以上碘化银粒子的活化比为 0.01%—2%，活化比大于 2% 的碘化银粒子仅占总数的 0.3%，而活化比位于 0.02%—2% 的碘化银粒子占总数的 80% 以上，这与 Xue 的结果类似，不过本个例中碘化银最大局地活化比可达 94.2%，要高于 Xue 的结果。增雨作业需要在目标云区形成适宜浓度的人工冰晶，才可能达到增加降水的效果，一般认为人工冰晶的浓度要高于自然冰晶的浓度，甚至要达到一个量级的差距是必要的（余兴等，2002），胡志晋（2001）在层状冷云增雨的研究中也指出，由于云中自然冰晶的观测浓度典型值在 1—10 L^{-1}，人工冰晶催化的浓度达到 20—100 L^{-1} 是适宜的。本个例中，作业云区自然冰晶浓度的观测值和模拟值大多在 10^{-1}—10^{1} L^{-1} 的量级（图 4），考虑到碘化银的活化比，如按最大局地活化比计算，要使催化对自然云产生影响，云中碘化银粒子浓度至少需达到 1 L^{-1} 以上是必要的；但要在云中达到更有效的催化，进而增加地面降水，按平均活化比 0.13% 计算，在条件适宜的云区，碘化银粒子浓度达到 10^3—10^5 L^{-1} 的量级或更多对于增雨而言是合适的。

4.3 催化的增雨效果

飞机增雨作业的目的是在丹江口水库及其上游流域范围内实现增雨，以增加水库的蓄水。图 8 给出了 13—17 时累计雨量差的区域分布。可以看到，受催化影响，作业区及其下游的降水均出现了明显变化，降水变化区呈东西长、南北窄的狭长分布。由于模式域范围较大，而模拟结果显示，除图 8、9 所示的降水变化区外，模式域中大部分区域的降水没有变化或仅有微弱变化，因此，文中以包含了作业区及其下游降水变化区的一个矩形区域作为评估区（下文简称 EVA，见图 8、9 所示红色方框）。研究中，定义区域平均增雨率为整个区域的净增雨总量占该区域自然云降水总量的百分比，局地增雨率为一个格点上的净增雨量占该格点自然云降水量的百分比。表 3 增雨效果的统计数据表明，催化取得了明显的增雨效果，整个 EVA 区平均增雨率达到 8.1%。由图 8 可见，增雨区域完全覆盖水库库区及其部分上游入库河流，且增雨区的雨量变化幅度和增雨范围均大于减雨区，可以说，催化作业达到了为水库增蓄的目的。虽然自然云的降

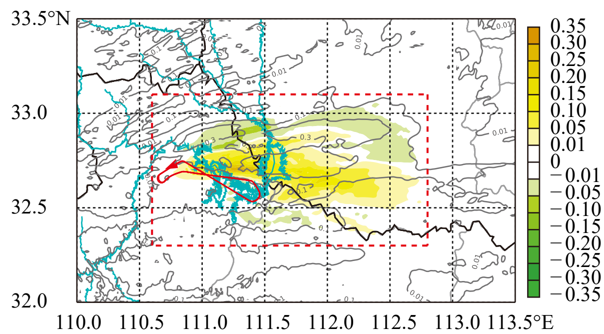


图 8 13—17 时自然云累计降水（灰色等值线，单位：mm）和催化后降水的变化（色阶，单位：mm）（红色实线为飞机催化作业的轨迹，红色箭头指示飞机开始催化的位置和飞行方向，红色虚线方框为评估区范围）

Fig. 8 From 13:00 BT to 17:00 BT, the accumulated rainfall (gray contours, unit: mm) of natural clouds and rainfall differences (color shaded, unit: mm) between the seeding clouds and the natural clouds (The flight seeding trajectory is represented by the red solid line, initial seeding position and flight direction are indicated by red arrow, the evaluation area is shown by the red dash-line box)

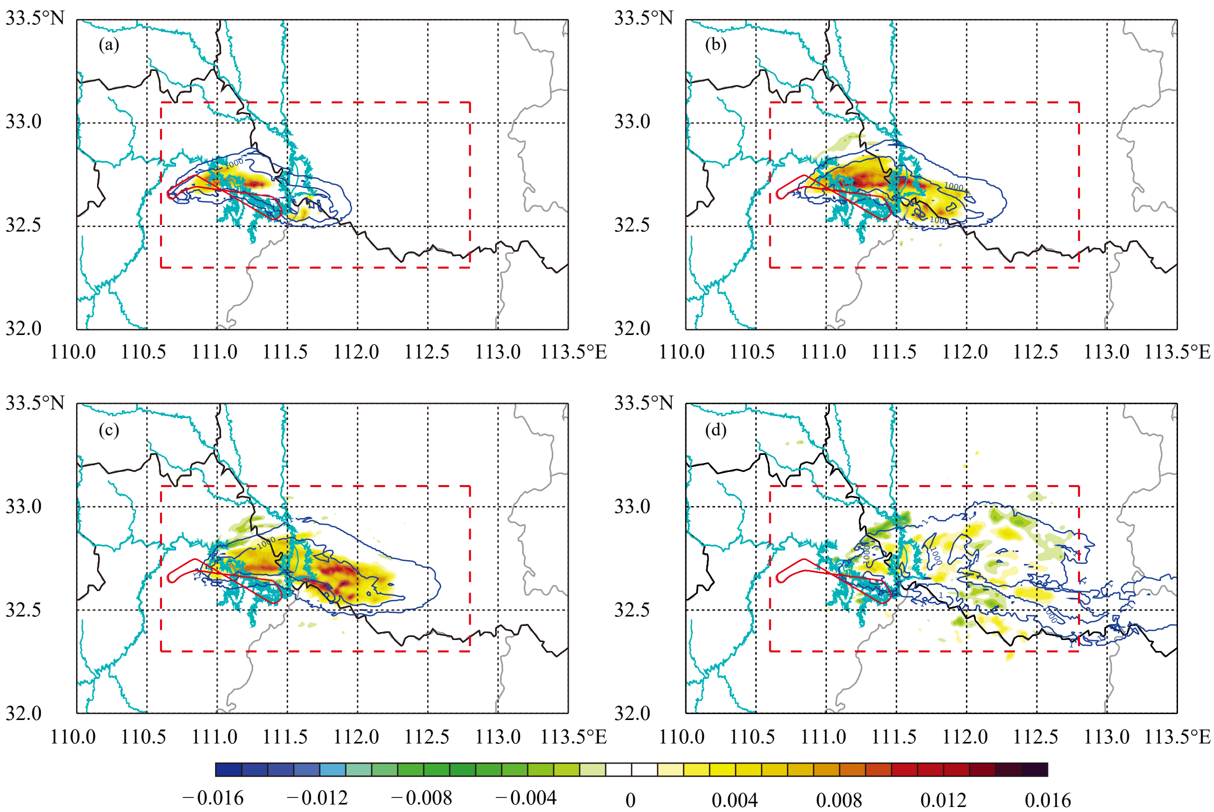


图 9 每 5 min 降水（单位：mm）变化和碘化银浓度（单位：L^{-1}）分布（a. 14 时，b. 14 时 35 分，c. 15 时，d. 17 时；蓝色等值线为 AgI 浓度，色阶区为 5 min 累计的雨量差，红实线为飞机催化作业的轨迹，红色虚线方框为评估区范围）

Fig. 9 Horizontal distributions of 5 min rainfall (color shaded, unit: mm) difference and AgI concentration (blue contours, unit: L^{-1}) at different moments (a. 14:00 BT, b. 14:35 BT, c. 15:00 BT, d. 17:00 BT; the flight seeding trajectory is represented by the red solid line, the evaluation area is shown by the red dash-line box)

表 3 催化作业效果统计（13—17 时）

Table 3 Statistics of rainfall enhancement effect from 13:00 BT to 17:00 BT

统计区域	模式域	评估区
自然降水总量(kg)	1.12×10^{10}	2.63×10^{9}
增雨总量(kg)	1.98×10^{8}	2.12×10^{8}
区域平均增雨率(%)	1.8	8.1
局地增雨率(%)	−70.9—306.7	−51.1—306.7

水偏弱(图 8)，但前面云条件的分析也表明，作业云系具有较好的冷云催化条件，上述评估结果暗示，这种发展稳定、降水较弱的层状云系，催化作业有希望达到较高的增雨效果，换言之，云系具有较高的云水资源开发潜力。

实际的飞机催化作业过程中，受客观条件所限，主要作业层的平均温度为−6.3℃，而碘化银在这一温度下的成核效率是较低的。从图 6 的剖面图可以看到，在低于−10℃的云区仍然存在一定的过冷水，这些区域的温度、水汽条件(冰面和水面的饱和比相差更大)对于冰核的核化、冰晶的贝吉龙增长过程可能更为有利。本研究中，分别模拟了在 5500 和 5800 m 高度进行催化(其他条件不变)的作业效果，发现降水变化区的分布特征与图 8 类似，但整个区域整体向下游偏移，且增雨区向下游伸展的距离更长(图略)。表 4 统计了在 5500 和 5800 m 两次催化模拟试验的结果，可以看到，两次催化模拟的增雨效果均好于实际作业，其中 5500 m 高度作业的催化效果更好，5800 m 高度虽然温度低于 5500 m，但该高度几乎处于催化云的云顶，过冷云

表 4　不同高度催化作业的数值模拟中作业层温度及催化效果的统计（13—17 时）
Table 4　Statistics of simulated temperature in the operation layer and seeding effect at different operating heights from 13:00 BT to 17:00 BT

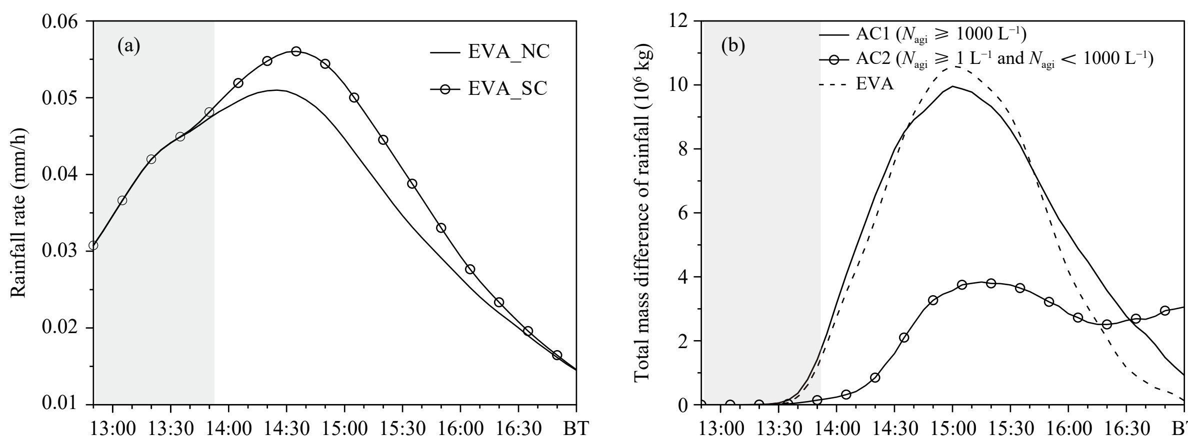
作业高度（m）	作业区温度（℃）	区域平均增雨率（%）	
		模式域	评估区
5500	−11.2—−10.5（−10.9）	3.5	11.6
5800	−12.9—−12.1（−12.4）	3.1	9.6

注：括号中的数值为平均温度。

水含量低，且容易出现云外播撒的情况，这可能是造成催化效果略差的原因。上述对比表明，实际作业的高度偏低，如果提升作业高度，在更适宜的温度区开展作业，有希望达到更好的催化效果。

图 9 显示了不同时刻的碘化银覆盖区与 5 min 累计降水量变化区相叠加的水平分布，图 10 则给出了降水强度、降水总量以及不同区域中增雨区范围（增雨区指降水为正增加的区域）等特征随时间变化。图 9 中碘化银覆盖区是指空中三维分布的碘化银烟羽垂直投影到地面所覆盖的区域，图 10 中 AC1、AC2 分别指图 9 中碘化银浓度不小于 10^3 L^{-1} 的区域和碘化银浓度为 1—10^3 L^{-1} 的区域。由图 9 的对比可看到，除模拟后期碘化银分布较零散外，在大部分时段，AC1 区域呈现为一个完整的连续分布区域，其东西跨度在百千米以上，而催化后的增雨区则主要位于上述范围内，这暗示碘化银浓度的分布与地面降水变化存在相关。

图 10a 和 b 的评估区降水特征对比表明，催化使降水强度和降水总量出现正增长，地面降水出现变化的时间大致在催化作业开始后 30 至 40 分钟，这反映了从云中催化到改变地面降水这一过程的时间尺度，结合图 6 作业层的水平风速（8—14 m/s），在这段时间内，根据风速计算的作业层云系的移动距离为 10—30 km（低层的云系移速会更慢，移动距



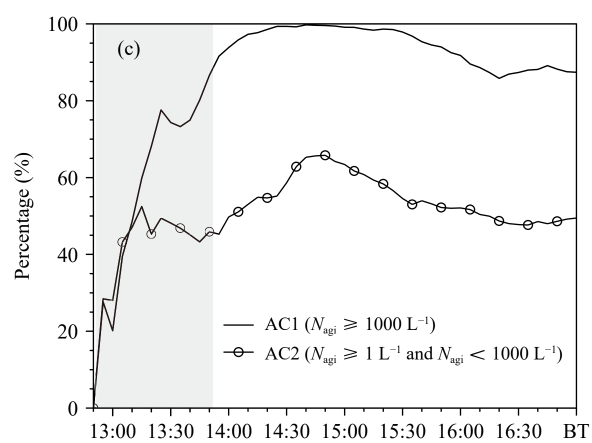


图 10　与降水相关的一些参量的时间变化（a.评估区平均降水强度，b. 区域降水总量差，c. AC1 和 AC2 区域中增雨区面积占总面积的百分比）（N_{agi}：碘化银浓度，EVA：评估区，NC：自然云，SC：催化云）

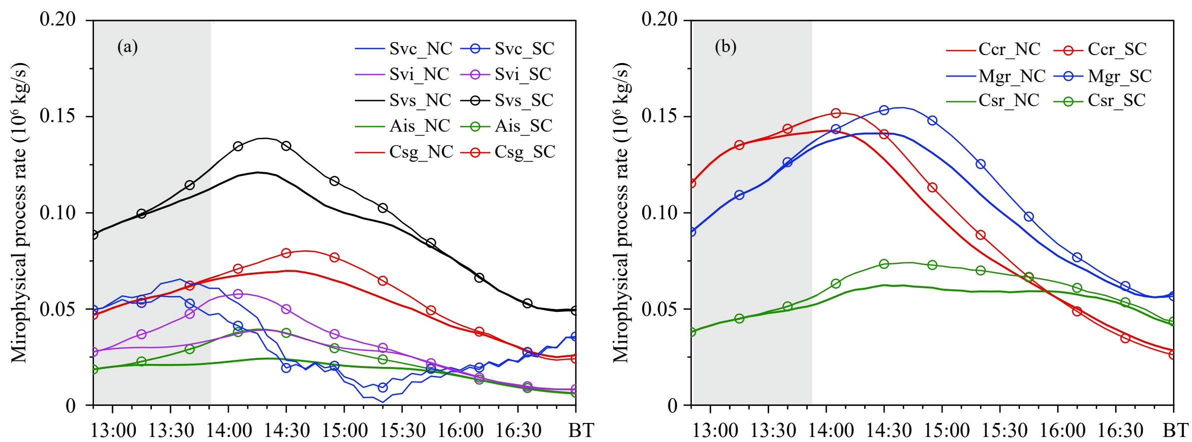
Fig. 10　Time series of（a）regional average rainfall intensity in the evaluation area，（b）total mass difference of rainfall，（c）percentage of rainfall enhancement area in AC1 and AC2（N_{agi}：the number concentration of AgI，EVA：the evaluation area，NC：Nature cloud，SC：Seeding cloud）

离更小),远小于碘化银影响区的覆盖尺度,考虑到这一因素,本个例中将碘化银的分布区与地面降水变化区域进行比较时,可忽略云系移动的影响。基于上述基础,图 10b 和 c 对比了不同浓度的碘化银区域与地面降水变化的联系。从图 10b 中可以看到,虽然 AC1 和 AC2 区的降水总量均是增加的,但 AC1 区和 EVA 区的降水总量差呈现出几乎一致的时变特征,且量值也相差不大,这表明 EVA 区的降水变化主要受到了 AC1 区的影响。由图 10c 可知,播撒作业期间,两区域中的增雨区占比不断增大,播撒结束后,AC1 中绝大部分区域为增雨区,在大部分时间内,AC1 中的增雨区域占该区域面积的 90% 以上(最高 99.8%),而 AC2 区中的增雨区占比大部分为 50%—60%(最高 65.8%)。上述对比表明,云中碘化银浓度与地面增雨有密切的联系,且当浓度值达到 10^3 L^{-1} 以上时对增雨更为有利,这与前面对碘化银核化分析所得到的结论一致。

4.4 催化的作用机制

对冷暖混合层状云而言,云系暖区中雨滴的变化与地面降水的变化直接相关。图 11 给出了评估区内自然云与催化云中各水凝物主要源汇项的转化率以及水汽总量、云水总量的对比。由图可知,Mgr(霰融化为雨滴)和 Ccr(雨滴碰并云滴)是雨滴的主要源项(图 11b),其次为 Csr(雨滴碰并雪)过程。Mgr 和 Ccr 分别是冷云降水机制和暖云降水机制的典型微物理过程,Csr 也属冷云降水机制。图 11b 中可看到 Ccr 过程一直是重要的雨滴源项,甚至在一段时间内超过了 Mgr 过程,这得益于云中暖区有很厚的云水区(图 6),对暖区中的雨滴通过 Ccr 过程增长非常有利。Mgr 过程是雨滴的初始源项,Ccr 和 Csr 过程则对雨滴增长起主要作用,可见此次降水的主要机制是冷云降水和暖云降水两种机制的共同作用。

模拟结果表明,催化导致层状云冷区和暖区中的云水总量均明显减少,而其他水凝物的总量则有不同程度的增大,其中冷区中冰晶、雪和霰总量的增加明显,而暖区中雨滴总量增加最多(图略)。源、汇项分析表明,Svi(冰晶凝华或升华)过程是冰晶的主要源项;雪的主要源项为 Svs(雪凝华或升华)过程,其次为 Ais(冰晶自动转化为雪)过程;



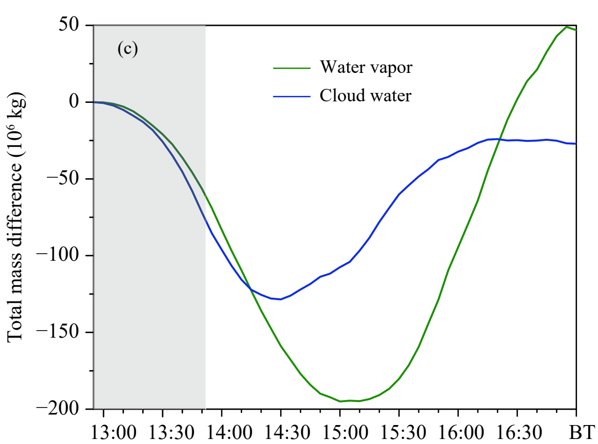


图 11 评估区内,自然云和催化云的(a)冷区和(b)暖区中主要微物理源汇项的区域总量转化率和(c)云区内的碘化银烟羽中云水和水汽的总量差(催化云减自然云)

Fig. 11 In the evaluation area, time series of (a, b) regional gross conversion rate of main microphysical processes and (c) total mass difference (Seeding cloud minus Nature cloud) of water vapor and cloud water in the AgI plume in the clouds (a. clouds in cold region, b. clouds in warm region)

Csg(霰碰并雪)则是霰的主要源项,上述各项在催化云冷区中均有明显增长(图 11a),这也说明云中的环境条件是适宜催化的。碘化银粒子核化造成云中冰晶浓度升高,从而使 Svi 过程增强,更多的冰晶长大并通过 Ais 过程形成雪,导致雪的浓度升高,Svs、Csg 过程也相应增强,最终冷区内的雪霰总量增加。而冷区中雪霰的增加会造成它们落入暖区的数量增多,导致 Mgr 和 Csr 过程增强(图 11b),从而为暖区上层提供更多更大的初始大雨滴,这些大雨滴的下落会显著增强暖区中的 Ccr 过程(图 11b)。显然,碘化银催化首先在层状云的冷区产生了明显的冷云催化效果,导致冰相降水粒子增加,然后通过落入暖区的冰相降水粒子间接增强了暖区中的暖云降水过程,即碘化银催化即有直接的冷云催化效果,也有间接的暖云催化效果。此外,模拟结果表明(图略),作业结束后,雷达反射率因子在暖区上层(约 2700 m)的最大增量维持在 14 dBz 以上(极值 18.4 dBz),而且在地面附近仍可达到最大 10 dBz 以上的增量(极值 15.9 dBz),这表明暖区雨滴获得明显增长,催化通过一系列作用链条有效地增加了降水。

由于作业云中含有过冷水,在这些冰水共存区,冰雪粒子会通过贝吉龙过程快速增长。从源汇项的转化率总量上看,Svi 增强和 Svc(云滴凝结或蒸发)的减弱实际上也反映了催化云中贝吉龙过程被增强。图 11a 中可看到,14 时 30 分前 Svc 的减弱和 Svi 的增强最为明显,说明贝吉龙过程较强,这一段时间整个区域的过冷水消耗也高于水汽的消耗(图 11c),此后,由于过冷水的减少,贝吉龙过程逐渐减弱。贝吉龙过程是水-冰转化的高效机制,有利于冰相粒子的凝华增长,但在过冷水缺少时,凝华增长过程仍是不可忽视的。14 时 30 分后可看到冰雪粒子的 Svi、Svs 过程仍有相当大的增量,此时水汽消耗也明显大于过冷云水的消耗(图 11c),说明在这种稳定的层状云中,冰雪粒子的凝华增长过程也是非常重要的。这也印证了胡志晋(1983,2001)提出的新机制,即不仅是水-冰转化过程,而且汽-冰转化也是层状云人工增雨非常重要的水分来源。

综合上述分析,在过冷云区适宜区域播撒碘化银,直接导致云中冰晶浓度升高,冰晶-雪、雪-霰的转化过程增强,雪、霰粒子总量增大,更多的雪、霰粒子从冷区落入暖区,在暖区上层产生更多的大雨滴,从而增强了暖区云雨碰并过程,导致暖区雨滴总量增大,最终地面降水增加,这是此次催化增雨的主要微物理链条。French 等(2018)通过观测验证了模式模拟的冬季地形云成冰剂催化的物理链条,其本质是催化增强了冷云降水机制,而本个例的降水受到冷云降水和暖云降水两种机制的影响,其催化作用的物理链条实际反映出催化的两种作用,即首先使层状云的冷云降水机制被增强,然后又间接增强了它的暖云降水机制。

图 8 中可看到,在增雨区两侧出现了不同程度的减雨现象。从模拟结果看,无论是增雨区还是减雨区,云和降水的主要微物理过程并没有本质上的区别,与前面的分析结果大同小异,而且这些微物理过程受催化影响而减弱(或增强)也是地面减雨(或增雨)的主要原因,但是在减雨区和增雨区,导致上述过程发生改变的主要影响机制是存在差异的。

图 12 为不同物理量的自然云背景值及其与催化云的差值沿不同时刻降水变化大值区的经向垂直剖面,图中 3 个时刻分别对应了降水增长阶段(13 时 30 分)、降水峰值阶段(14 时 30 分)和降水减弱阶段(15 时 30 分)。可以看到,冰晶浓度增加的区域大部分位于碘化银浓度高于 1 L^{-1} 的区域中(以 GT1A 表示),其中冰晶浓度增量的大值区基本位于 4.2—6 km 的范围内,而这一高度层也是碘化银核化的主要区域,这说明碘化银催化发挥了明显作用。同时,对应的雪霰粒子以及雨滴的增加区也基本位于 GT1A 区域的下方(图 $12c_1$—c_3),这印证了碘化银催化增雨的效果。在这些区域中,碘化银粒子核化、新增的冰相粒子通过消耗水汽和云水增长,这些都会释放大量潜热使得环境空气升温,从而导致上升速度的增大。图 $12b_1$—b_3 中均可看到冰相粒子增长区出现了较大范围的升温以及上升速度增大的现象,尤其在催化时段(图 $12b_1$)和降水峰值时段(图 $12b_2$)更为明显。上升速度的增大一方面会使冰相降水粒子在云中停留时间延长,有更长的时间长大,另一方面,也会使冰核和更多冰相粒子能到达其上层冰面过饱和比值更高的区域,这对冰核核化以及冰相粒子通过凝华、碰并等过程的增长有利,这种微物理过程和动力场相互促进的正

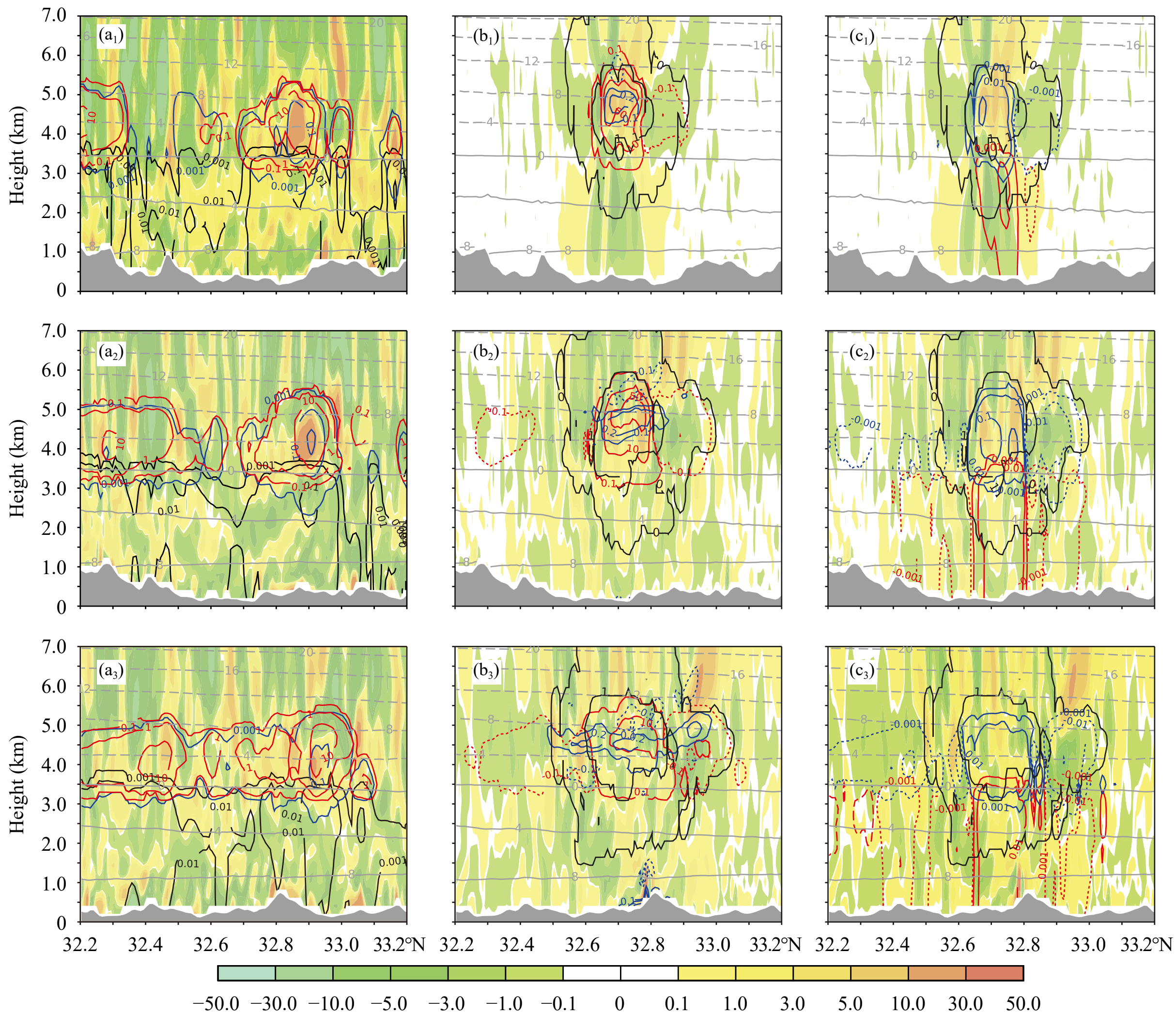


图 12 自然云的垂直气流和微物理量 (a_1—a_3) 及其与催化云的差值 (b_1—b_3, c_1—c_3; 催化云减自然云) 沿不同时刻降水变化大值区的经向垂直剖面 (剖面位置和时间分别为: a_1、b_1、c_1, 沿 110.9°E, 13 时 30 分; a_2、b_2、c_2, 沿 111.1°E, 14 时 30 分; a_3、b_3、c_3, 沿 111.4°E, 15 时 30 分; a_1—a_3. 垂直速度 (单位: 10^{-2} m/s, 色阶)、冰晶浓度 (单位: L^{-1}, 红色等值线)、雪霰混合比 (单位: g/kg, 蓝色等值线)、雨滴混合比 (单位: g/kg, 黑色等值线), b_1—b_3. 垂直速度差 (单位: 10^{-2} m/s, 色阶)、温度差 (单位: ℃, 蓝色等值线)、冰晶浓度差 (单位: L^{-1}, 红色等值线)、碘化银浓度 (单位: L^{-1}, 黑色等值线), c_1—c_3. 垂直速度差 (单位: 10^{-2} m/s, 色阶)、雪霰混合比差 (蓝色等值线)、雨滴混合比差 (红色等值线)、碘化银浓度 (单位: L^{-1}, 黑色等值线))

Fig. 12 South-north cross sections of (a_1—a_3) natural clouds and (b_1—b_3, c_1—c_3) differences between seeding clouds and natural clouds at different time and longitude (a_1, b_1, c_1. 13:30 BT along 110.9°E, a_2, b_2, c_2. 14:30 BT along 111.1°E, a_3, b_3, c_3. 15:30 BT along 111.4°E; a_1—a_3. vertical velocity (unit: 10^{-2} m/s, shaded), ice crystal concentration (unit: L^{-1}, red contours), snow and graupel mixing ratio (unit: g/kg, blue contours), rain mixing ratio (unit: g/kg, black contours), b_1—b_3. differences in vertical velocity (shaded), temperature (unit: ℃, blue contours), ice crystal (red contours) and AgI concentration (unit: L^{-1}, black contours), c_1—c_3. differences in vertical velocity (shaded), snow and graupel mixing ratio (blue contours), rain mixing ratio (red contours) and AgI concentration (unit: L^{-1}, black contours))

反馈过程即静力催化和动力效果的相互结合，对于降水的发展非常有利(胡志晋，2001)，而碘化银核化则是触发上述机制的主要因素。

与 GT1A 区域相比，在低于 1 L^{-1} 浓度的碘化银区域中(以 LT1A 表示)，冰晶和雪霰粒子虽然有增减变化，但变化量很小，其对应的地面降水大多为减雨，由于自然冰晶的浓度(图 12a_1—a_3)大多在 0.1—10 L^{-1}，少量区域高于 50 L^{-1}，说明在 LT1A 区域中的自然冰晶浓度甚至比碘化银粒子的浓度还要高。图 13 给出了催化云过冷云区内，碘化银烟

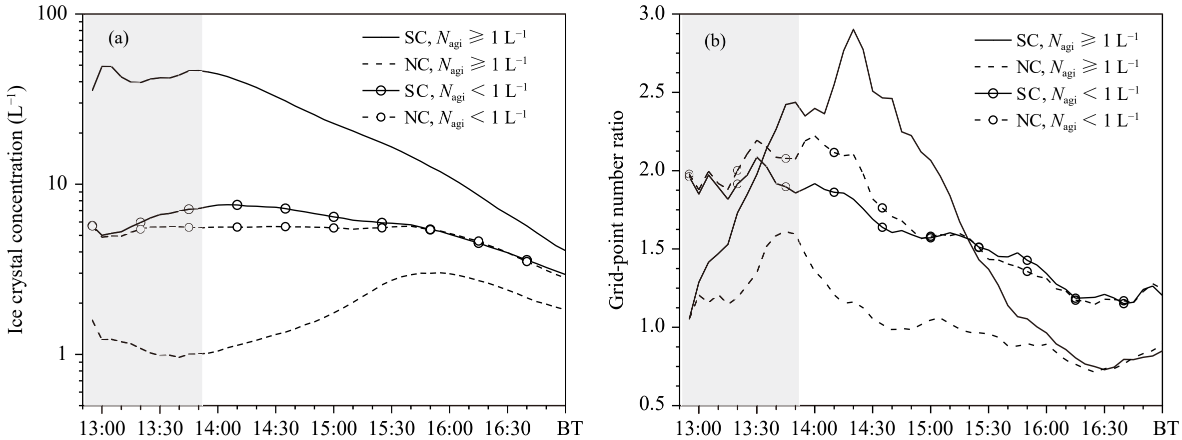


图 13　云区内碘化银浓度大于 1 L^{-1} 的区域和小于 1 L^{-1} 的区域中自然云和催化云的（a）冰晶平均浓度和（b）上升气流区与下沉气流区格点数的比值（N_{agi}: 碘化银浓度，单位：L^{-1}）

Fig. 13　(a) Ice crystal mean concentrations and (b) grid-point number ratio between updraft region and downdraft region in the natural and seeded clouds within the range where the AgI plume overlap with the cloud region (N_{agi}: AgI concentration, unit: L^{-1})

羽的 GT1A、LT1A 区与相同区域范围的自然云中冰晶浓度、垂直气流（以上升气流区和下沉气流区的格点数比值表示）的对比。图 13a 中可以看到云中 GT1A 区域内，催化云冰晶浓度远高于自然云，数据显示为 2.6—46.3 倍（平均值 19.4 倍）；而 LT1A 区域内，催化云的冰晶浓度仅略高于自然云，数据显示增量范围在−2.5%—35.4%（平均值 12.5%），显然，在 LT1A 区域中，碘化银核化增加的冰晶浓度有限，对云微物理过程的影响较小，对降水的影响就更小。图 13b 中垂直气流的对比表明，催化云 GT1A 区域中的上升气流区显著增大；与此相反，催化云 LT1A 区域中的下沉气流区相比自然云有明显增加，而且直到 15 时后二者的差异才减小，这种动力场的变化对降水是有影响的。

由图 12 可看到，在上升气流增强区的邻近区域会出现补偿性的下沉气流，例如图 12b_1、c_1 所示催化初期的垂直气流变化就明显表现出这种特征。随着云系的发展，这种动力场的扰动逐渐向周围扩展开来（图 12b_2—b_3、c_2—c_3），甚至已经扩展到碘化银烟羽区外。图 14 对比了催化云中冰相粒子主要微物理源项相对自然云的变化，其时间、位置与图 12a_2 相同。可以看到，过冷层中冰相粒子的微物理源项变化与垂直气流变化存在明显的相关，尤其是过冷层中冰相粒子的成长过程。微物理源项转化率在上升气流增强的区域增大，而在上升气流减弱区则减小，这说明上升气流的减弱对冰相粒子的成长造成不利影响。其原因可解释为：上升气流减弱使得一些冰相粒子不易到达冰面过饱和度更高的上层区域，导致 Svc、Svi、Svs 等减弱，从而造成其他如 Ais、Csg 等的减弱，同时，雪霰这些较大的冰相粒子在过冷层中停留的时间也会缩短，从而影响其增长，而雪霰等冰相降水粒子增长的减弱最终会导致暖层 Mgr、Csr、Ccr 等过程的减弱，造成地面降水减小。由此可见，出现减雨现象的主要原因是由于催化引起动力场扰动，造成这些区域的云中上升气流减弱所导致的。由于这些区域的碘化银浓度太低，碘化银核化对自然云的微物理过程影响有限，不再是主要的因素。此外，从图 12、14 中可以看到，催化造成的动力场扰动的传播范围也是很可观的，甚至传播到了碘化银烟羽外部，且部分区域的云中微物理过程也发生变化，并造成地面降水出现微弱的减少。不过，由于此次催化作业云系为稳定的层状云，其动力场较为稳定，这种发展到区域外的扰动影响并不大，但是在积层混合云或对流云系等动力场条件复杂的云系中开展催化作业时，上述作用可能会被云系中的不稳定结构所放大，需要注意其对云和降水发展的影响。

5　结论和讨论

采用基于 WRF 框架发展的三维中尺度冷云催化模式，对 2018 年 10 月 21 日湖北省一次层状云系的飞机增雨作业过程进行了数值模拟，利用卫星、

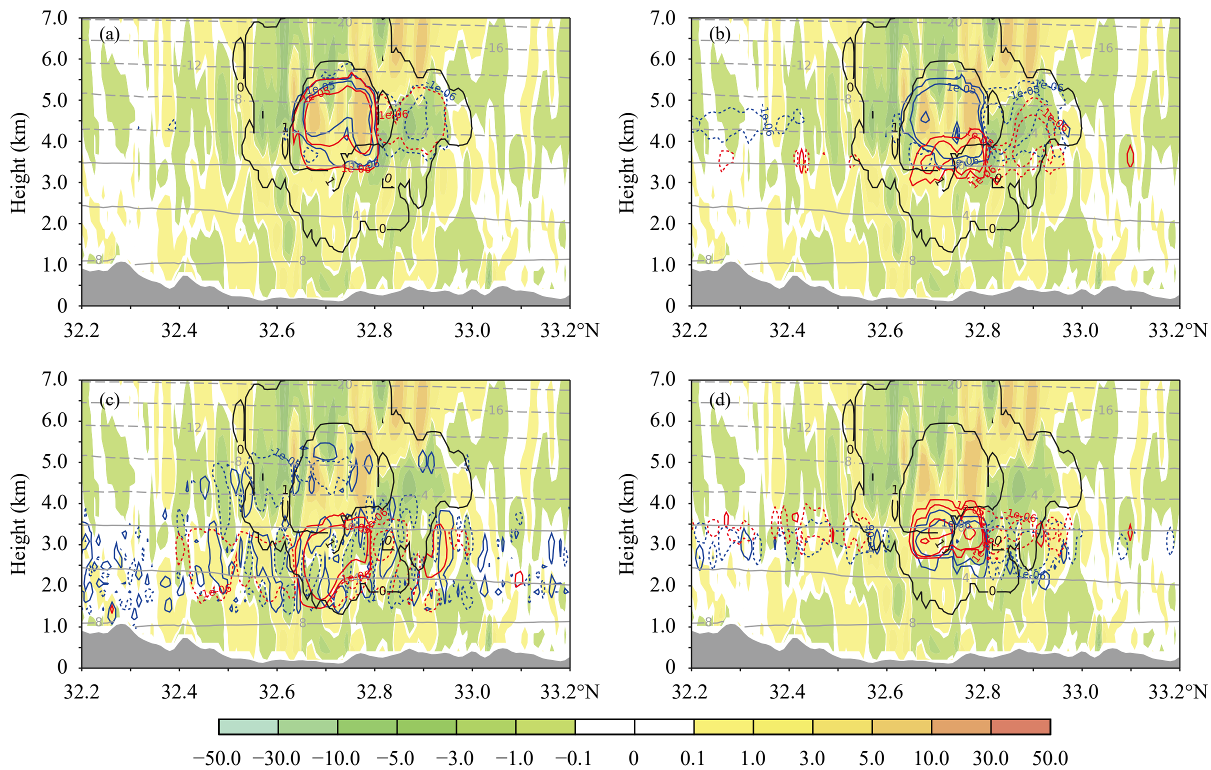


图 14　14 时 30 分沿 111.1°E 的垂直气流速度差（催化云减自然云，色阶，单位：10^{-2} m/s）、微物理转化率的差（催化云减自然云，单位：g/(kg·s）及碘化银浓度（黑色等值线，单位：L^{-1}）的垂直剖面
（a. Svi（蓝色）和 Ais（红色），b. Svs（蓝色）和 Csg（红色），c. Svc（蓝色）和 Ccr（红色），d. Mgr（蓝色）和 Csr（红色））

Fig. 14　Vertical cross sections of the vertical velocity difference（color shaded，unit：10^{-2} m/s）and the difference in microphysical process conversion rate（unit：g/(kg·s)）between the seeded and the natural clouds，and the AgI concentration（black contours，unit：L^{-1}）along 111.1°E at 14：30 BT
（a. Svi（blue）and Ais（red），b. Svs（blue）and Csg（red），c. Svc（blue）and Ccr（red），d. Mgr（blue）and Csr（red））

飞机观测和实况降水等资料对模拟结果进行了验证，模式合理地模拟出了催化作业目标云系的主要宏、微观特征，在此基础上，使用该模式并按照真实的飞机作业方式进行了碘化银催化的数值模拟，对碘化银粒子的不同核化机制进行了分析，评估了此次催化作业的增雨效果，对催化的作用机制包括微物理机制及动力机制进行了研究，得出的主要结论如下：

（1）凝结冻结核化和凝华核化是这次催化作业中碘化银的主要核化机制。凝结冻结核化受限于云内的水面过饱和区范围（这些区域往往存在于过冷水区内），它主要在过冷水较多的时期起主要作用，随着过冷水被消耗，凝华核化逐渐超过凝结冻结而成为主要的核化机制。接触冻结核化和浸没冻结核化两种机制所起作用较小，它们的冰晶贡献总量与前两种机制相差数个量级，其中浸没冻结核化是催化过程中碘化银最弱的核化机制。

（2）碘化银粒子的平均活化比为 0.07%—0.27%，其中 90% 以上粒子的局地活化比为 0.01%—0.2%。凝结冻结机制的活化比最高，其次为凝华机制，浸没冻结活化比最低。

（3）飞机催化作业取得了明显的增雨效果，在作业区及其下游区域出现大片连续的增雨区，增雨区南北两侧有小范围的减雨区。整个评估区范围内，催化后 4 h 的累计净增雨量达到 2.12×10^{8} kg，局地增雨率为−51.1%—306.7%，区域平均增雨率为 8.1%。

（4）冷云降水和暖云降水的共同作用是此次降水的主要机制。霰融化为雨滴是最主要的冷云降水机制，其次是雨滴碰并雪的增长过程；由于云区暖层厚度大，雨滴碰并云滴增长的暖云降水机制在降水过程中也起到了重要作用。

（5）碘化银催化既有直接的冷云催化效果，也有间接的暖云催化效果。在过冷云区，碘化银核化使冰晶浓度升高，更多的冰晶通过凝华（在过冷水存在时，贝吉龙过程增强了这种机制）和聚并过程成长为雪，雪的凝华增长以及雪霰碰并过程均增强，造成雪、霰粒子的总量增加，更多的雪、霰粒子从冷区落入暖区，使得暖区上部的大雨滴增加（即冷云降水机制增强），进一步增强了暖区的云雨碰并过程（即暖云降水机制增强），导致暖区雨滴总量增加，最终地面降水增加，这是此次催化增雨的主要微物理链条。

（6）过冷层中，碘化银粒子的核化、冰相粒子凝华成长等过程的增强也会造成催化云中的潜热释放增加，导致所在云区升温，引起上升气流速度的增大。云区内上升速度的增大对雪、霰粒子的增长有利，这种静力催化的动力效果对降水的增强也起到了促进作用。

（7）催化造成增雨区边缘出现减雨区的主要原因是催化引起的动力效应造成。云区的过冷层内，催化造成的上升气流增强区边缘会出现补偿性的下沉气流，这些边缘区域内由于碘化银浓度很低，对云的发展影响很小，冰相粒子成长主要是受到上升气流减弱的影响而减弱，造成雪、霰粒子减少，最终导致暖层雨滴减少，冷云降水机制和暖云降水机制均被削弱，地面出现减雨。

基于数值模拟给出了一次层状云增雨过程中催化作用的物理链条，其结论的普遍性需要更多个例的试验结果相互验证，而使用观测资料进行系统的检验也是非常必要的。目前，通过观测验证催化模拟效果仍然面临巨大的挑战，单一观测设备难以获得完整的证据链，采用多种地基、空基乃至星基观测设备进行有设计的综合观测是一条可行的途径，同时，也需要结合数值模式来指导和不断改进观测设计，而催化模式的一些模拟结果（包括模式预报和事后的模拟分析），如催化前后雷达反射率因子的变化、云中微物理量变化特征、从催化开始到地面降水发生变化的时间尺度等，都可以为观测设计提供指导。

需要指出的是，催化模式中的碘化银核化方案是基于 DeMott（1995）对特定组分的碘化银催化剂的试验结果，与本研究实际作业中使用的碘化银催化剂组分存在一定差异，但由于中国尚无可靠的有关该类型催化剂核化机制的研究数据，而 DeMott 方案仍是目前较完整地描述碘化银催化剂各种成核机制的研究结果，其在数值模式中的应用仍具有重要的参考意义。

参考文献

蔡淼. 2013. 中国空中云水资源和降水效率的评估研究 [D]. 南京：南京信息工程大学. Cai M. 2013. Cloud water resources and precipitation efficiency evaluation over China [D]. Nanjing: Nanjing University of Information Science & Technology (in Chinese)

蔡兆鑫，周毓荃，蔡淼. 2013. 一次积层混合云系人工增雨作业的综合观测分析. 高原气象，32(5)：1460-1469. Cai Z X, Zhou Y Q, Cai M. 2013. Analysis on comprehensive observation of artificial precipitation enhancement operation for a convective-stratiform mixed cloud. Plateau Meteor, 32(5): 1460-1469 (in Chinese)

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. 大气科学，43(6)：1191-1203. Cai Z X, Cai M, Li P R, et al. 2019. Aircraft observation research on macro and microphysics characteristics of continental cumulus cloud at different development stages. Chinese J Atmos Sci, 43(6): 1191-1203 (in Chinese)

陈德辉，胡志晋，徐大海等. 2004. CAMS 大气数值预报模式系统研究. 北京：气象出版社，59-67. Chen D H, Hu Z J, Xu D H, et al. 2004. Study on CAMS Atmospheric Numerical Prediction Model System. Beijing: China Meteorological Press, 59-67 (in Chinese)

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. 大气科学，37(4)：905-922. He H, Gao Q, Li H Y. 2013. Numerical simulation of stratiform precipitation enhancement in Beijing area and its mechanism. Chinese J Atmos Sci, 37(4): 905-922 (in Chinese)

洪延超，雷恒池. 2012. 云降水物理和人工影响天气研究进展和思考. 气候与环境研究，17(6)：951-967. Hong Y C, Lei H C. 2012. Research advance and thinking of the cloud precipitation physics and weather modification. Climatic Environ Res, 17(6): 951-967 (in Chinese)

胡志晋，秦瑜，王玉彬. 1983. 层状冷云数值模式. 气象学报，41(2)：194-203. Hu Z J, Qin Y, Wang Y B. 1983. An numerical model of the cold stratified clouds. Acta Meteor Sinica, 41(2): 194-203 (in Chinese)

胡志晋. 2001. 层状云人工增雨机制、条件和方法的探讨. 应用气象学报，12(S1)：10-13. Hu Z J. 2001. Discussion on mechanisms, conditions and methods of precipitation enhancement in stratiform clouds. Quart J Appl Meteor, 12(S1): 10-13 (in Chinese)

李大山. 2002. 人工影响天气现状与展望. 北京：气象出版社，213-214. Li D S. 2002. Present Situation and Prospect of Weather Modification. Beijing: China Meteorological Press, 213-214 (in Chinese)

李宏宇，周旭，张荣等. 2020. 不同机载设备观测的气象要素与飞行参数对比分析. 气象，46(9)：1143-1152. Li H Y, Zhou X, Zhang R, et al. 2020.

Comparison and analysis of several meteorological elements and flight parameters observed from different airborne detection instruments. Meteor Mon, 46(9): 1143-1152 (in Chinese)

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. 新疆气象, 29(1): 1-6, 11. Li Z C, Zhou Y Q, Li Q X, et al. 2006. A additional way for alleviating water resources shortage in arid and semi-arid region: Precipitation stimulation. Bimonth Xinjiang Meteor, 29(1): 1-6, 11 (in Chinese)

刘诗军, 胡志晋, 游来光. 2005. 碘化银核化过程的数值模拟研究. 气象学报, 63(1): 30-40. Liu S J, Hu Z J, You L G. 2005. The numerical simulation of AgI nucleation in cloud. Acta Meteor Sinica, 63(1): 30-40 (in Chinese)

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. 大气科学, 40(4): 669-688. Liu W G, Tao Y, Dang J, et al. 2016. Seeding modeling study of two precipitation processes over northern China in the spring of 2014. Chinese J Atmos Sci, 40(4): 669-688 (in Chinese)

刘卫国, 陶玥, 周毓荃. 2021. 层状云催化宏微观物理响应的数值模拟研究. 大气科学, 45(1): 37-57. Liu W G, Tao Y, Zhou Y Q. 2021. Numerical simulation of macro and micro physical response of stratiform cloud seeding. Chinese J Atmos Sci, 45(1): 37-57 (in Chinese)

楼小凤. 2002. MM5 模式的新显式云物理方案的建立和耦合及原微物理方案的对比分析 [D]. 北京: 北京大学. Lou X F. 2002. Development and implementation of a new explicit microphysical scheme and comparisons of original schemes of MM5[D]. Beijing: Peking University (in Chinese)

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. 气象学报, 72(4): 782-793. Lou X F, Sun J, Shi Y Q, et al. 2014. Numerical study of the AgI seeding principle for decreasing the convective cloud rainfall. Acta Meteor Sinica, 72(4): 782-793 (in Chinese)

孙晶, 楼小凤, 胡志晋等. 2008. CAMS 复杂云微物理方案与 GRAPES 模式耦合的数值试验. 应用气象学报, 19(3): 315-325. Sun J, Lou X F, Hu Z J, et al. 2008. Numerical experiment of the coupling of CAMS complex microphysical scheme and GRAPES model. J Appl Meteor Sci, 19(3): 315-325 (in Chinese)

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. 高原气象, 36(5): 1290-1303. Sun Y W, Yin Y, Sun X, et al. 2017. Observation and study of macro and micro response in cold cloud catalysis. Plateau Meteor, 36(5): 1290-1303 (in Chinese)

王柏忠, 刘卫国, 王广河等. 2004. KLWC-5 含水量仪原理及在人工增雨中的应用. 气象科技, 32(4): 294-296. Wang B Z, Liu W G, Wang G H, et al. 2004. Principles of KLWC-5 liquid water content guage and its application in cloud seeding. Meteor Sci Technol, 32(4): 294-296 (in Chinese)

游来光, 马培民, 胡志晋. 2002. 北方层状云人工降水试验研究. 气象科技, 30(S1): 19-50. You L G, Ma P M, Hu Z J. 2002. Experiment research on artificial enhancement precipitation for stratiform cloud in North China. Meteor Sci Technol, 30(S1): 19-50 (in Chinese)

余兴, 王晓玲, 戴进. 2002. 过冷层状云中飞机播云有效区域的模拟研究. 气象学报, 60(2): 205-214. Yu X, Wang X L, Dai J. 2002. Research on simulation of effective range for cloud seeding by aircraft within super-cooled stratus. Acta Meteor Sinica, 60(2): 205-214 (in Chinese)

赵震, 雷恒池. 2012. 层状云系催化增雨的中尺度模拟研究. 气候与环境研究, 17(6): 779-788. Zhao Z, Lei H C. 2012. Numerical simulation of precipitation enhancement by stratiform cloud seeding using a mesoscale model. Climatic Environ Res, 17(6): 779-788 (in Chinese)

DeMott P J. 1995. Quantitative descriptions of ice formation mechanisms of silver iodide-type aerosols. Atmos Res, 38(1-4): 63-99

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

Gao W H, Zhao F S, Hu Z J, et al. 2011. A two-moment bulk microphysics coupled with a mesoscale model WRF: Model description and first results. Adv Atmos Sci, 28(5): 1184-1200

Grant L O, Robert E E. 1974. The cloud seeding temperature window. J Appl Meteor, 13(3): 355-363

Hsie E Y, Farley R D, Orville H D. 1980. Numerical simulation of ice-phase convective cloud seeding. J Appl Meteor, 19(8): 950-977

Marcolli C, Nagare B, Welti A, et al. 2016. Ice nucleation efficiency of AgI: Review and new insights. Atmos Chem Phys, 16(14): 8915-8937

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 Appl Meteor, 34(4): 834-846

WMO. 2018. Peer review report on global precipitation enhancement activities. WWRP 2018–1. Geneva: WMO

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 Appl Meteor Climatol, 52(6): 1433-1457

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 Appl Meteor Climatol, 52(6): 1458-1476

Xue L 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 Appl Meteor Climatol, 55(2): 445-464