

基于火箭和高炮真实催化轨迹的一次对流云消减雨的数值模拟

刘卫国 史月琴 党娟 陶玥 周毓荃

中国气象局人工影响天气中心, 北京 10081

中国气象局云雾物理环境重点开放实验室, 北京 100081

摘要: 效果评估仍是人工影响天气研究面临的困难问题, 数值模式在催化效果的评估方面有望发挥更大作用, 建立能够模拟真实催化过程的数值模式是一条可行的途径。本文对一套三维中尺度催化模式进行了改进, 采用了新的碘化银核化计算方案, 在模式中增加了人工冰晶预报量及相关微物理过程, 并实现了对地面火箭和高炮作业方式的仿真模拟。使用改进后的模式, 采用 500m 的水平分辨率, 模拟了 2019 年 9 月 1 日华北地区一次对流云系的人工消减雨作业过程, 对催化作业的消减雨效果进行了数值评估, 并对碘化银在对流云中的核化特征及其催化作用机制进行了分析。结果表明: 1) 催化作业对目标云系的雷达回波强度产生了一些影响, 催化导致较多降水粒子滞留在高空, 使得云体上部的回波强度略有增加, 云体中下部的回波强度减弱, 但催化作业并未改变目标云系雷达回波的自然演变趋势。2) 催化作业达到了一定的消减雨效果, 作业区下游出现大面积减雨区, 降水总量减少, 降水强度减弱, 局地最大减雨量 0.27mm, 主要影响区的平均减雨率为 5.1%。3) 碘化银催化剂主要的核化方式为凝结冻结核化, 其次为接触冻结核化。4) 催化作业造成了过量播撒, 人工冰晶的成长占据竞争优势, 它抑制了过冷层中其他水成物的自然增长过程, 人工冰晶的凝华增长是导致云中水汽和云水消耗量增加的主要原因, 凝华潜热的释放最终也引起云中垂直气流发生变化。5) 冷云降水是此次降水的主要物理机制, 受催化的影响, 暖层中霰融化过程 (M_{gr}) 的减弱导致雨滴总质量减少, 这是降水减弱的主要原因, 落入暖层下部的雨滴数量减少则是降水减弱的另一原因。

关键词: 中尺度催化模式, 对流云消减雨, 碘化银核化, 人工冰晶, 效果评估, 催化作业仿真

文章编号

中图分类号 P48

文献标识码

doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2202.21077

Numerical simulation of a convective cloud rainfall reduction based on the realistic seeding trajectories of rocket and artillery

Liu Weiguo Shi Yueqin Dang Juan Tao Yue Zhou Yuquan

China Meteorological Administration Weather Modification Center, Beijing 100081

Key Laboratory for Cloud Physics of China Meteorological Administration, Beijing 100081

Abstract: Effect evaluation is still a difficult issue in the weather modification field. Numerical models can play a greater role in the effect evaluation of cloud seeding. Developing numerical models with some more realistic simulation of cloud seeding process is a workable way. In this paper, a three-dimensional mesoscale seeding model has been improved through coupling a new AgI (silver iodide) nucleation calculation scheme. Artificial ice crystal

收稿日期 2021-05-07; 网络预出版日期

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

资助项目 国家重点研发计划项目课题 (2018YFC1507901, 2016YFA0601701)、国家自然科学基金课题 (41075099)

Funded by National Key Research and Development Project (Grant 2018YFC1507901, Grant 2016YFA0601701), National Natural Science Foundation of China (NSFC) (Grant 41075099)

predictand and its associated microphysical processes have been introduced into the model, and the realistic seeding operation modes of both ground-based rockets and artillery have can be simulated by the model. The artificial rainfall reduction operation of a convective cloud system in North China on September 1, 2019, was simulated using the above seeding model with a horizontal grid spacing of 500m. The seeding effect of rainfall reduction operation was evaluated, and the nucleation characteristics and working mechanism of AgI agents in convective clouds were analyzed. The results showed the following: 1) Cloud seeding had some impact on the radar echo intensity of the target cloud system. More precipitation particles stayed in the upper cloud region because of the cloud seeding operation, which slightly increased the echo intensity of the upper part of the cloud body and weakened the echo intensity of the middle and lower part of the cloud body. However, the natural evolution tendency of radar echoes of the target cloud system has not been changed by cloud seeding. 2) Cloud seeding achieved certain rainfall-reducing effects. A large-area rainfall-reducing zone appeared downstream of the operation area. The total rainfall amount was decreased, and the rainfall intensity was weakened. The greatest local value of rainfall amount reduction was 0.27mm, and the rainfall in the main affected area decreased by 5.1% on average. 3) Condensation-freezing nucleation was the main nucleation mode of the AgI agent, followed by contact-freezing nucleation mode. 4) Cloud seeding operation caused an overseeding effect. The growth of artificial ice crystals was in a dominant position during competition, and the natural growth processes of other hydrometeors in the supercooling cloud area were suppressed. The deposition growth of artificial ice crystals was the main reason for the increase in depletion of water vapor and cloud water, and deposition latent heat release eventually led to the change of vertical airflow velocity in the cloud. 5) The cold cloud precipitation process was the main physical mechanism of the rainfall. Due to the influence of cloud seeding, the weakening of the graupel melting process (M_{gr}) in the warm layer led to the decrease of the total mass of raindrops, which was the main reason for the weakening of rainfall, while the decrease in the number of raindrops falling into the lower part of the warm layer was another reason for the weakening of rainfall.

Keywords: Mesoscale seeding model, Convective cloud rainfall reduction, AgI nucleation, Artificial ice crystal, Effect evaluation, Seeding mode simulation

1 引言

对流云是人工影响天气催化作业的主要目标云系之一。对流云催化可分为冷云催化和暖云催化两大类型, 其中冷云催化的研究相对成熟, 是国内外普遍采用的播云催化作业方法, 碘化银类催化剂则是使用最为广泛的冷云催化剂。在我国, 对流云催化主要以地基作业为主, 大多以火箭和高炮为催化剂载体, 利用它们将催化剂播撒到对流云中的特定位置。对流云的增雨、防雹是我国常年开展的人工影响天气作业类型, 此外, 人工消减雨的实践和研究也在发展(楼小凤等, 2014; 何晖等, 2012), 在减缓灾害性对流云强降水、大型社会活动的气象保障等方面有望发挥重要作用, 相关的理论和技术研究具有重要的科学和应用价值。

数值模式在人工影响天气研究中一直发挥着重要作用(Orville, 1996)。对流云的冷云催化模拟研究中, 早期曾简单的在一维定常积云模式中, 通过假定一定条件下液水冰晶化来模拟引晶催化过程(Simpson et al., 1965; Simpson and Wiggert, 1969), 模拟试验被用于解释观测结果或建立催化理论假说。随着模式的发展, 二维、三维对流云模式以及中尺度云分辨模式逐渐应用到催化模拟研究中。Hsie et al. (1980) 和 Kopp et al. (1983) 分别在二维时变对流云模式中实现了碘化银催化和干冰催化的详细模拟, 研究了对流云催化的效果, Farley et al. (1994) 将二者的催化模拟方案加入三维对流云模式中, 对深对流云的催化进行了研究, 他们的模拟试验均表明, 催化云的降水时间提前, 降水量增加, 同时云动力场有一定变化, 上升气流增强。Reisin et al. (1996) 使用二维非静力对流云模式, 通过直接增加冰晶的方式模拟冷云催化过程, 敏感性试验结果表明, 引晶催化存在一个最优“时间窗”, 播撒时间是获得正效果

的关键参数,海洋性积云和大陆性积云的催化效果存在差异。Ćurić and Janc (1990, 1993)、Ćurić et al. (2006, 2007) 使用一维云模式和 ARPS (Advanced Regional Prediction System) 中尺度模式对积雨云的碘化银催化进行了一系列研究,分析了碘化银的核化机制、催化剂云中驻留时间与温度和云动力场之间的关系,以及增雨防雹的效果。国内学者也采用不同的数值模式(何观芳和胡志晋, 1991; 洪延超, 1998; Guo et al. 2006; Chen and Xiao, 2010; 何晖等, 2012; 楼小凤等, 2014; 陈宝君等, 2016), 在对流云催化模式的发展、增雨防雹机制、不同催化剂(碘化银、干冰、液态二氧化碳)的催化效果以及微物理和动力效应、对流云的人工消减雨等多个方面进行了广泛研究,丰富了对流云催化的理论认识。总体而言,以往的研究中,云模式使用较多,而中尺度模式的应用偏少,近年来,能够将云系发展嵌入到大尺度环流中的三维中尺度模拟已经成为云模拟研究的新标准(WMO, 2018),因此,有必要加强中尺度模式在对流云催化方面的应用研究,这对深入了解不同背景条件下进行对流云催化作业的影响及其作用机制等具有重要意义。

合理准确地评估催化作业效果是人工影响天气研究面临的难点。随着计算机技术和数值模式性能的提高,使用数值模式定量评估催化效果具有了现实可行性和有效性,并正在成为发展各种人工增雨相关技术的不可或缺的工具(WMO, 2018),因此,提高模式对云降水过程的模拟能力、建立能模拟真实催化过程的数值模式已成为重要的发展方向。使用多源数据的同化场来改进数值模式的模拟和预报能力是一种有效的途径(Garstang et al., 2005),而对真实催化过程的完整模拟,则不仅需要包含催化剂相关的各种微物理过程的合理模拟,也包含对催化作业方式的合理模拟,这对开展实际催化作业的效果评估以及模式的业务化应用是必要的。对于冷云催化,一些主要的冷云催化剂(碘化银,干冰,液态二氧化碳/液氮)成冰过程的详细模拟已在多种云模式和中尺度模式中实现(Hise et al., 1980; Kopp et al., 1983; Ćurić and Janc, 1990; Ćurić et al., 2006; Meyers et al., 1995; Guo et al., 2006; 黄燕和徐华英, 1994; 刘诗军等, 2005; 何晖等, 2012; Xue et al., 2013, 2016; 刘卫国等, 2016),并在不同类型云系的催化模拟研究中发挥了作用。对催化作业方式的模拟,以往的研究大多采用简化的处理方式,一般直接设定在某一矩形区域范围内进行一次或多次的均匀播撒,这与真实的催化作业情况有较大差异。实际上,除地面烟炉为单点播撒作业外,飞机和火箭的播撒属于线源催化,高炮作业虽为点源播撒,但其位置需遵循其弹道轨迹来确定。飞机播撒作业的轨迹往往较为复杂,火箭和高炮均有不同的弹道轨迹,要完整描述真实的催化过程,需要在模式中模拟它们的作业轨迹。Hashimoto and Murakami (2016)、余兴等(2002)均在云模式中模拟了飞机播撒的作业方式,但云模式在现实业务应用中存在较大局限,刘卫国等(2021a, 2021b)在 WRF (Weather Research and Forecasting model) 中尺度模式中实现了飞机轨迹的仿真模拟,并试验了对实际发生的层状云催化作业进行数值模拟效果评估,使催化模式具备了面向业务应用的能力。火箭和高炮播撒催化剂在我国对流云催化中被广泛采用,催化模式中对其作业方式的完整模拟尚未见文献描述,本研究将在三维中尺度催化模式中实现这一功能。

本研究对一套三维中尺度催化模式进行了改进,使用改进后的模式,采用 500m 的水平分辨率,对华北地区一次对流云系的人工消减雨作业进行了模拟研究,尝试对实际作业的催化效果进行数值模拟评估,并对碘化银在对流云中的核化特征及其催化作用机制进行了探讨。文中第 2 节介绍了催化模式的改进,第 3 节介绍了研究个例的天气背景、催化作业概况和数值试验的设置,模拟结果的对比检验、催化效果评估以及催化作用机制的分析在第 4 节给出,第 5 节对全文进行了总结及讨论。

2 三维中尺度催化模式的改进

2.1 碘化银核化的计算

本研究采用了刘卫国等(2016, 2021a, 2021b)基于 WRF 发展的三维中尺度催化模式,模式微物理方案采用 CAMS (Chinese Academy of Meteorological Sciences) 双参数混合相方案(胡志晋和严采繁, 1986; 胡志晋和何观芳, 1987; 陈德辉等, 2004),模式中的催化模块能够详细模拟碘化银催化剂成冰核化的微物理过程,可以仿真模拟实际飞机的催化作业方式。该模式中,对碘化银核化的计算使用了定常处理方法,即忽略了核化发生时温度和饱和度的时间变率影响,为更合理准确的模拟催化过程,本研究中的

碘化银核化计算采用了刘诗军等（2005）的处理，由于碘化银的核化比 F 是温度 T 和过饱和度 S 的函数（刘卫国等，2016），考虑 T 、 S 随时间 t 的变化，其计算公式的形式如下：

$$F(T, S) = F(T_0, S_0) + \int_0^t \frac{dF(T, S)}{dt} dt = F(T_0, S_0) + \int_0^t \left(\frac{\partial F(T, S)}{\partial T} \frac{dT}{dt} + \frac{\partial F(T, S)}{\partial S} \frac{dS}{dt} \right) dt \quad (1)$$

其中 T_0 、 S_0 为碘化银播撒初始时刻的温度和过饱和度。上式表示，在播撒的初始时刻，碘化银会按照核化比 $F(T_0, S_0)$ 瞬时核化，此后随着环境的温度、饱和度分别以 $\frac{dT}{dt}$ 、 $\frac{dS}{dt}$ 的速率改变，碘化银按照上式右侧第二项积分计算的结果继续核化。模式中，碘化银核化相关的微物理源汇项以及初值的计算与刘诗军等（2005）的处理相同，此处不再赘述。

碘化银粒子播撒后，一方面通过凝华、凝结冻结或凝结过程进入到冰晶或云滴中，另一方面则通过接触冻结或浸没冻结方式使过冷云滴冻结形成冰晶。在对流云中，过冷雨滴也会随云内较强的上升气流到达很高的过冷云区，因此，本研究的碘化银核化方案中，也考虑了过冷雨滴与碘化银粒子的碰并，并通过接触冻结或浸没冻结机制以一定比率发生冻结而形成霰粒，模式中假设其冻结比与云滴核化的冻结比相同。

2.2 人工冰晶的预报

本文将自然冰晶核化形成的冰晶称为自然冰晶，碘化银粒子核化形成的冰晶称为人工冰晶。在催化作业中，人工冰晶会与同一环境中的自然冰晶竞争水汽、过冷水等资源，由于人工冰晶与自然冰晶的分布、尺度等均存在差别，二者的成长过程也会有一定差异。在原模式中，将碘化银核化形成的冰晶直接归入自然冰晶，即作为同一水成物种处理，这会人为造成自然冰晶粒子群的特征尺度瞬间发生改变，从而可能夸大催化的作用，因此，有必要将人工冰晶作为一种新的水成物种来处理，模拟其在云中的成长过程。本研究在模式中增加了人工冰晶混合比 (Q_a) 和数浓度 (N_a) 两个新的微物理预报量，并考虑了其参与的多种微物理过程。

依据 CAMS 方案中的约定（胡志晋和何观芳，1987），对微物理过程名使用三个英文字符表示，第一个字符为大写字母 P、C、S、A、M 分别代表核化、碰并、升华凝华（或蒸发凝结）、自动转化和融化过程，第二、三个字符为下标，以小写字母 a、i、r、s、g、v 分别代表人工冰晶、自然冰晶、雨滴、雪、霰和水汽各相，其中第一个下标代表被消耗的相，第二个下标代表生成相或作用相，上述过程名同时也表示混合比的转化率，在过程名前加 N 则表示数浓度的转化率。

除初始核化过程外，人工冰晶参与的其他微物理过程共计 9 种，包括雨、雪、霰等碰并人工冰晶 (C_{ar} , C_{as} , C_{ag})、人工冰晶的自碰并 (C_{aa})、人工冰晶与雨和自然冰晶的碰并 (C_{ra}/C_{ar} , C_{ia})、人工冰晶的凝华升华 (S_{va}) 和自动转化为雪 (A_{as})、人工冰晶融化为云滴 (M_{ac})，对应的微物理源汇项方程表示如下：

$$\frac{\delta Q_a}{\delta t} = P_{va} + C_{ia} - C_{ar} - C_{as} - C_{ag} - A_{as} - M_{ac} + S_{va} \quad (2)$$

$$\frac{\delta N_a}{\delta t} = NP_{va} - NC_{aa} - NC_{ar} - NC_{as} - NC_{ag} - NA_{as} - NM_{ac} + NS_{va} \quad (3)$$

式中， P_{va} 和 NP_{va} 为碘化银核化过程的混合比和数浓度的转化率，它包括了凝华、凝结冻结、接触冻结和浸没冻结四种核化机制，(3) 式中的 NM_{ac} 是原模式预报量 N_{aim} （浸没在云滴中的碘化银浓度；刘卫国等，2016）的源项。人工冰晶与雨滴碰并 (C_{ra} , C_{ar}) 的处理类似于胡志晋和何观芳等（1987）对自然冰晶微物理过程的处理：当温度高于 0°C 时，人工冰晶被雨滴 (Q_r , N_r) 碰并融化在雨滴中，即 $\frac{\delta Q_r}{\delta t} = -\frac{\delta Q_a}{\delta t} = C_{ar}$ ，

$\frac{\delta N_a}{\delta t} = -NC_{ar}$ ， $\frac{\delta N_r}{\delta t} = 0$ ；当温度低于 0°C 时，人工冰晶与雨滴碰并后冻结为霰 (Q_g , N_g)，即 $\frac{\delta Q_a}{\delta t} = -C_{ar}$ ， $\frac{\delta Q_r}{\delta t} = -C_{ra}$ ， $\frac{\delta Q_g}{\delta t} = C_{ar} + C_{ra}$ ， $\frac{\delta N_g}{\delta t} = -\frac{\delta N_a}{\delta t} = -\frac{\delta N_r}{\delta t} = NC_{ar} = NC_{ra}$ 。

假设人工冰晶与 CAMS 方案中自然冰晶的分布谱相同、物理性质相同，因此，除核化过程以及与自然冰晶的碰并过程外，人工冰晶其他 8 种微物理过程的方程形式均与 CAMS 方案中自然冰晶的对应过程类似。

人工冰晶与自然冰晶的碰并，使人工冰晶的混合比增加，自然冰晶的混合比和数浓度减少，由于人工冰晶与自然冰晶的落速相近，二者碰并过程转化率（ C_{ia} ， NC_{ia} ）的计算不能采用粒子群平均落速差近似的方法，需考虑冰晶单体的质量和落速，通过积分碰并方程来计算，相应的数浓度和混合比转化率公式如下：

$$NC_{ia} = \frac{\pi}{4} \rho A_{vi} E (6A_{mi})^{-\frac{7}{6}} \cdot N_a^{-\frac{1}{6}} Q_a^{\frac{7}{6}} N_i \cdot K_n(\beta) \quad (4)$$

$$C_{ia} = \frac{\pi}{24} \rho A_{vi} E (6A_{mi})^{-\frac{7}{6}} \cdot N_a^{-\frac{1}{6}} Q_a^{\frac{7}{6}} Q_i \cdot K_m(\beta) \quad (5)$$

其中

$$K_n(\beta) = \int_0^\infty \int_0^\infty D_1 D_2 e^{-(D_1+D_2)} (D_2 + \beta D_1)^2 |D_2^{\frac{1}{3}} - (\beta D_1)^{\frac{1}{3}}| \cdot dD_1 dD_2 \quad (6)$$

$$K_m(\beta) = \int_0^\infty \int_0^\infty D_1^3 D_2 e^{-(D_1+D_2)} (D_2 + \beta D_1)^2 |D_2^{\frac{1}{3}} - (\beta D_1)^{\frac{1}{3}}| \cdot dD_1 dD_2 \quad (7)$$

$$\beta = \frac{\lambda_a}{\lambda_i} = \frac{D_i}{D_a} = \left(\frac{N_a Q_i}{N_i Q_a} \right)^{0.5} \quad (8)$$

上述各式中， ρ 为空气密度， Q_i 、 N_i 为自然冰晶混合比和数浓度， $D_1 = \lambda_i D_i$ ， $D_2 = \lambda_a D_a$ ， λ_i 和 λ_a 为 Γ 分布谱斜率参数， D_i 和 D_a 分别为直径。参数 E 、 A_{vi} 和 A_{mi} 分别为冰晶间的碰并系数、计算单个冰晶落速及质量的经验参数（胡志晋和严采繁，1986），这里假定它们对人工冰晶和自然冰晶的取值均相同，（6）、（7）式的积分可采用数值拟合方法给出计算公式（9）和（10）：

$$K_n(\beta) = \begin{cases} 5.42075 + 1.07958 \cdot \exp\left(\frac{-\beta}{0.01436}\right) + 1.99448 \cdot \exp\left(\frac{-\beta}{0.18567}\right), & 0 < \beta \leq 0.494 \\ 7.10214 - 5.5527\beta + 3.90509\beta^2 + 2.25997\beta^3, & 0.494 < \beta < 1 \\ 0, & \beta = 1 \\ 9.87767 - 11.71098\beta + 8.96853\beta^2 + 0.74435\beta^3 - 0.01184\beta^4, & 1 < \beta \leq 10 \\ 6.32168(\beta - 0.38418)^{2.38101}, & 10 < \beta < 500 \\ 8.13122(\beta - 10.0)^{2.34377}, & \beta \geq 500 \end{cases} \quad (9)$$

$$K_m(\beta) = \begin{cases} 30.41337 + 7.08117 \cdot \exp\left(\frac{-\beta}{0.00953}\right) + 12.76443 \cdot \exp\left(\frac{-\beta}{0.12607}\right), & 0 < \beta \leq 0.308 \\ 47.16569 - 90.51691\beta + 117.95246\beta^2 + 46.51509\beta^3, & 0.308 < \beta < 1 \\ 0, & \beta = 1 \\ 135.33554(\beta - 0.05967)^{2.40646}, & 1 < \beta \leq 10 \\ 153.77162(\beta - 0.36621)^{2.37488}, & 10 < \beta < 500 \\ 192.1889(\beta - 9.97089)^{2.34186}, & \beta \geq 500 \end{cases} \quad (10)$$

2.3 火箭和高炮作业方式的仿真模拟

刘卫国等（2021a，2021b）在上述催化模式中引入了飞机催化作业的仿真模块，可以模拟现实中飞机的催化作业方式。在对流云催化中，实际作业更多采用的是地面火箭或高炮的作业方式，它们均遵循一定的弹道轨迹，火箭作业为线源催化，高炮为其弹道轨迹上的点源催化。本研究在模式的仿真模块中增加了弹道轨迹计算功能，实现了对不同型号人影火箭、人影三七高炮（李红斌等 2005；孙百安和姜水平，2010；秦长学，2005；黎祖贤等，2016）的弹道轨迹模拟，并根据火箭播撒的起播点和终播点位置确定了弹道轨迹上的催化剂播撒段，对高炮催化则一般选取弹道轨迹上最高点的位置为播撒点。基于该模块，根据作业点的海拔高度、经纬度坐标以及作业的时间、方位角、仰角、用弹量信息等数据，即可在模式中仿真模拟人影火箭和高炮催化的作业方式，从而使模式系统具备了再现地面人影作业真实过程的能力，便于开展业务应用。本研究即采用该仿真模块，模拟了地面火箭和高炮的催化作业，下文图 8 和图 9 中显示了由该模块计算的地面火箭和高炮作业的催化位置。

3 对流云催化的数值模拟

3.1 天气概况及作业情况

2019 年 9 月 1 日，河北西北部至北京地区出现了一次对流云系降水过程。图 1 显示了此次降水过程的天气背景，其数据采用欧洲中心的 ERA5 再分析资料。由图 1 可知，此次降水发生的区域位于东移的高空

槽后，低层含有一定的水汽，中高层干冷。从图 1b 的 850hPa 风场可见，河北北部存在一个东西走向的风场辐合区，辐合区南部有西南暖湿气流输送水汽至河北西北部地区，但该地区中高层（图 1a）水汽含量很少，且 700hPa 风场由西北转东北风具有辐散特性。这种低层暖湿且有辐合，高层干冷且有辐散的天气条件，有利于对流天气的发生，加之河北西北部地区以山地为主，北高南低，低层北上的西南暖湿气流受地形抬升作用更易触发局地对流性天气发生。上述条件影响下，河北西北部山地在中午前后出现多个对流系统发展，之后形成较大范围的对流云系，整体自西北向东南方向移动。

实况雷达观测显示，河北西北部在 11:00（北京时，下同）已经观测到回波出现，之后回波快速发展，到 12:00 已形成数十公里的大片回波区（图 2a），其中存在多个 30dBZ 以上的回波单体，最大回波强度可达 50dBZ 以上，但单体之间的组织性较差，对流云系整体由西北向东南方向移动，期间不断有单体生消合并过程发生，单体回波强度最大可达到 55dBZ 以上（15:00），14:00 后对流云系回波开始进入北京西北部地区（图 2b），15:00 后对流云系的发展总体趋弱，在 16:30 最后一次出现回波强度达 45dBZ 的单体后（图 2c），整个云系的发展持续减弱直至 18:00 回波基本消散。实况降水数据表明，对流云团降水的主要时段在 11:00–17:00 之间，站点最大小时雨量 13mm（12:00–13:00），降水区随对流云系由西北向东南方向移动（图 7）。

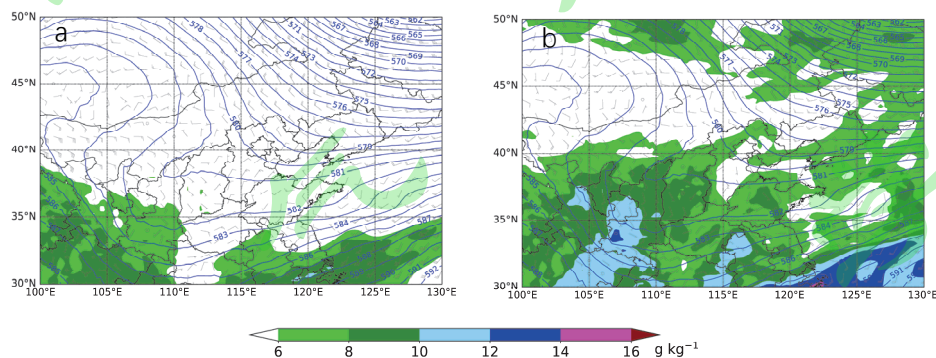


图 1 2019 年 9 月 1 日 11:00（北京时，下同）天气形势：(a) 500hPa 的高度场（等值线；单位：dagpm），700hPa 的风场（单位： m s^{-1} ）和比湿（阴影；单位： g kg^{-1} ）；(b) 500hPa 的高度场（等值线；单位：dagpm），850hPa 的风场（单位： m s^{-1} ）和比湿（阴影；单位： g kg^{-1} ）

Fig.1 The synoptic situation at 1100 BT (Beijing time) on September 1, 2019. (a) 500hPa geopotential height (contours, units: dagpm), 700hPa wind barbs (units: m s^{-1}) and specific humidity (color shaded; units: g kg^{-1}); (b) 500hPa geopotential height (contours, units: dagpm), 850hPa wind barbs (units: m s^{-1}) and specific humidity (color shaded; units: g kg^{-1})

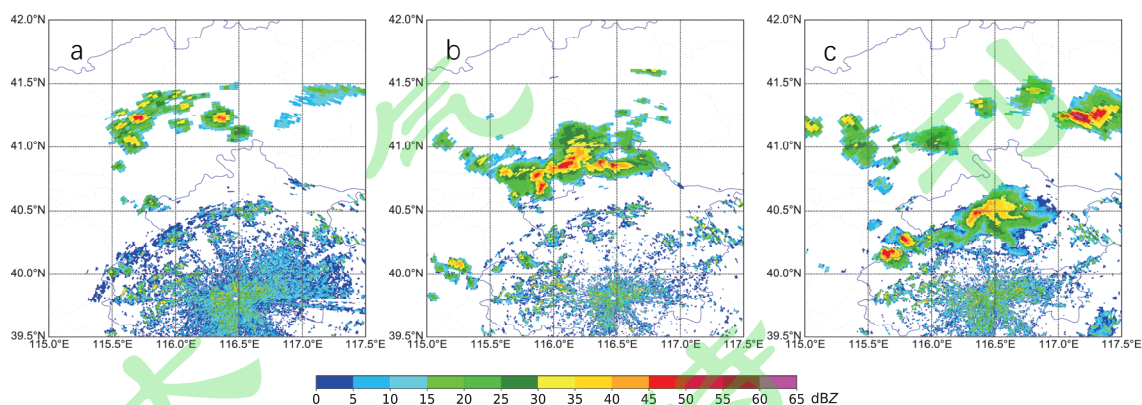


图 2 2019 年 9 月 1 日观测的 (a) 12:00, (b) 14:00 和 (c) 16:30 的雷达组合反射率（单位：dBZ）

Fig. 2 Observed radar composite reflectivity (units: dBZ) at (a) 1200 BT, (b) 1400 BT and (c) 1630 BT on September 1, 2019

9 月 1 日下午，北京延庆县的地面人影作业点对该对流云系开展了催化作业，这是一次人影保障活动的前期演练试验，作业目的为人工消减雨，作业方式采用火箭和高炮，具体作业信息见表 1。根据发射的

仰角不同，此次作业中，火箭催化的海拔高度范围在 3.8–5.0km，高炮播撒点海拔高度在 5.3–6.4km。图 3 显示了作业站点的地理位置、火箭和高炮作业的催化位置（水平面投影），以及作业临近时刻的雷达组合反射率。图中可看到，面向站点 2 方向移动的回波单体 A、B 在第 1 轮次（图 3a）和第 2 轮次（图 3b）作业期间是明显减弱了；站点 3–6 之间，在第 2 轮次作业后，有强回波单体 E 出现，并逐渐向站点 4、5、6 方向移动，期间上述站点也进行了第 3、4 轮次的作业（图 3c、d）。上述雷达回波的变化是受到了催化作业的影响，还是云的自然发展变化，将在第 4 节进行具体分析。

表 1. 地面火箭和高炮的作业信息

Table 1 The seeding operation information of both ground-based rockets and artillery

作业轮次	作业时段	地面作业点编号、用弹类型和用弹量												含 AgI 总量 (g)
		1	2	3	4	5	6	1	2	3	4	5	6	
		高炮炮弹						火箭弹						
1	14:41~14:42	18	18	26	32	-	-	-	-	-	-	-	-	94
2	14:58~14:59	-	-	-	-	-	-	5	2	6	3	6	5	675
3	15:13~15:15	-	22	20	-	23	-	-	6	3	3	6	6	665
4	15:27~15:28	-	-	-	-	-	-	-	-	-	3	6	6	375

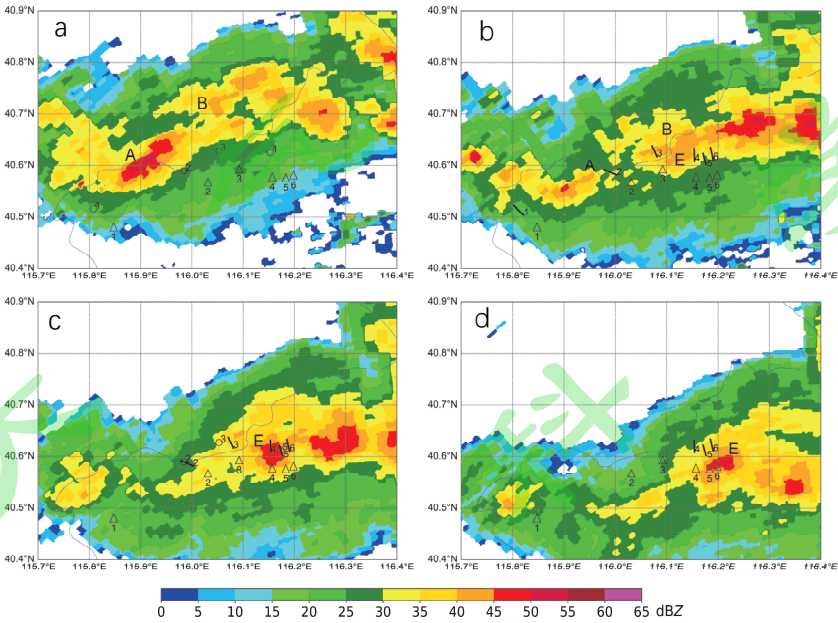


图 3 2019 年 9 月 1 日实际 4 轮次催化作业中，火箭作业轨迹（黑线）和炮弹播撒点（圆圈）的水平投影位置分别与 (a) 14:42, (b) 15:00, (c) 15:12 和 (d) 15:30 观测的雷达组合反射率叠加。图中三角为作业站点位置，数字对应表 1 中的站点编号，A、B、E 为各对流单体在正文中的名称

Fig. 3 The horizontal projection of both rocket seeding trajectories (black lines) and artillery seeding points (circles) in 4 rounds of actual seeding operation overlay with observed radar composite reflectivity (color shaded; units: dBZ) at (a) 1442 BT, (b) 1500 BT, (c) 1512 BT, (d) 1530 BT on September 1, 2019. The triangles in the figure indicate the location of operation sites. The numbers in the figure correspond to the site numbers in Table 1. A, B and E are the names of convection cells mentioned in the paper

3.2 数值模拟试验设置

火箭和高炮作业的播撒范围要远小于飞机播撒的范围，至少在播撒初期，碘化银扩散区域的尺度是很小的，目前的中尺度模式网格分辨率难以达到，因此模拟时会高估播撒初期的扩散范围，同时也会低估播撒初期碘化银的浓度，这些因素对催化模拟的影响需要进一步研究。本研究中，为使催化剂的扩散传输模拟更精确，催化模拟试验区域采用了 500m 的高水平分辨率和更多的垂直层次。模式采用四层双向嵌套方式运行，模式域范围如图 4 所示，各区域的水平分辨率由外向内依次为 13.5km、4.5km、1.5km 和 0.5km，

垂直方向共分 75 层，分辨率从约 30m（地面附近）到约 340m（高空），模式层顶取为 50hPa，各模拟域的云微物理方案均采用 CAMS 方案，最外层区域同时采用 Tiedtke 积云参数化方案，所有嵌套区域均关闭积云参数化选项。模式初始场采用 2019 年 9 月 1 日 08:00 的 GRAPES_GFS 全球模式（水平分辨率 0.25 度）分析场，并由该时次起报的每 3 小时一次的预报场数据为模式提供侧边界条件，模拟时段为 08:00–20:00。为使模式前几小时的模拟结果可用，使用了 WRF 模式的 DFI (Digital Filter Initialization, 数字滤波初始化) 运行方式以滤除模式运行初期的高频数值噪音（陈敏等，2012）。

数值试验首先进行未施加催化的自然云模拟，使用实况雷达和降水数据检验模式对作业前自然云系的模拟情况，由于模拟和实况之间仍然会存在一些差异，根据模式检验的结果，催化模拟中的作业时间、作业站点的位置也会有一定调整，其他催化设置则尽可能保持与实际作业一致，具体将在下文介绍。数值试验中，所有催化均在最内层嵌套区域进行，并通过对比自然云与催化云模拟的结果来评估实际作业的效果，下文分析中采用的模式数据均为最内层嵌套区域的结果。

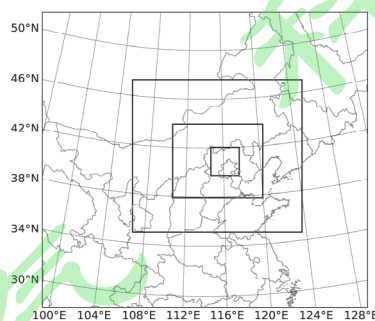


图 4 模拟区域设置

Fig. 4 Domains of the simulation

4 模拟结果

4.1 自然云模拟检验

将自然云模拟结果与地面人影作业前观测的雷达回波演变进行了对比，结果表明，从对流云系整体的发展演变来看，模拟与实况一样均表现出了云系的多单体特征，模拟的多个回波单体在南移过程中也呈现出与实况类似的生消合并现象，即模式较好地把握住了云系的整体发展状况。图 5 为作业前实况雷达组合反射率与模拟结果的对比，图 5a1–a3 的实况观测表明，催化作业开始前半小时左右，向南移动的对流云系主要有三个发展较强的对流单体（图中分别以 A、B、C 命名），其中 A 单体发展逐渐增强，B、C 单体的发展逐渐减弱，移向地面作业点的主要为 A、B 单体，结合图 3 可知，催化作业的目标区主要位于单体 A、B 的移动路径上。由图 5 中模拟和实况的对比可以看到，以实况（图 5a1–a3）观测时间为基准，模拟的 22–25 分钟前的雷达回波（图 5b1–b3）要比临近时刻的模拟结果（图 5c1–c3）能更好的反映实况特征，即当雷达回波出现相似变化特征时，模拟结果在时间上较实况偏早约 20–30 分钟。

基于上述的分析，下文在图 5 的雷达组合反射率以及图 6 雷达回波垂直剖面对比中（剖面位置选择经过 A、B 单体的强回波中心，由于模拟与实况的差异，图中二者剖面位置存在一定差异是合理的），选择图 5b1–b3 所在时刻的模拟结果与实况图 5a1–a3 时刻的观测结果进行比较。可以看到，模拟的雷达组合反射率对实况的 A、B、C 三个单体均有体现，其中模拟的 A、B 单体回波最大强度可达到 45dBZ 以上，剖面图上显示 40dBZ 回波顶高均在 7km 以上，这些均与实况特征一致，尤其是从图 5 和图 6 中单体的回波演变特征看，模拟的 A 单体逐渐增强，B、C 单体逐渐减弱的趋势与实况也是一致的。当然，在一些细节特征上，模拟结果仍与实况有所差异，如模拟结果中，A 单体的位置更偏南偏东，A、B 单体水平范围偏小，C 单体位置偏南且回波强度要强于实况等，这些差异在催化模拟设置时是需要考虑的。此外，图 5a1 和图 6a1 中实况监测出现的 D 单体，在模拟中也有体现，但发展较弱，消散时间更早一些，并未出现在图 5b1 和图 6b1 中。

模拟结果表明，在模拟时间 11:00，对流云系既已在河北西北部开始出现降水，之后雨带随云系向东南方向移动，上述特征与实况一致，只是模拟降水在 16:00 结束，较实况的 17:00 要偏早。此外，由于模拟的 C 单体发展强于实况，14:00–14:30 期间，其降水明显强于实况（图略），但作业目标区中的 A、B 单体的降水发展则与实况较为接近。图 7 显示了催化作业前模拟的 1 小时降水与实况观测的对比，由于模拟的对流云系回波发展与实况相比要偏早 20–30 分钟左右，考虑到这一因素，在对比模拟和实况的 1 小时降水时，图 7b1–b3 中将模拟降水的计算时间段进行了调整，即将模拟的 1 小时降水的计算截止时间比实况提前 30 分钟，为客观评估模式的模拟情况，同时在图 7a1–a3 显示了未做时间调整的模拟结果。图 7 降水的对比可以看到，经时间调整后的，模拟的降水区域与实况降水区域更为吻合，模拟的小时降水量级与大部分站点的实况雨量也基本相当。

上述对比表明，与实况观测相比，模拟的对流云系及其降水基本反映了实况云系的变化特征，基于上述基础，开展了对实际催化作业模拟和作业效果的数值评估。

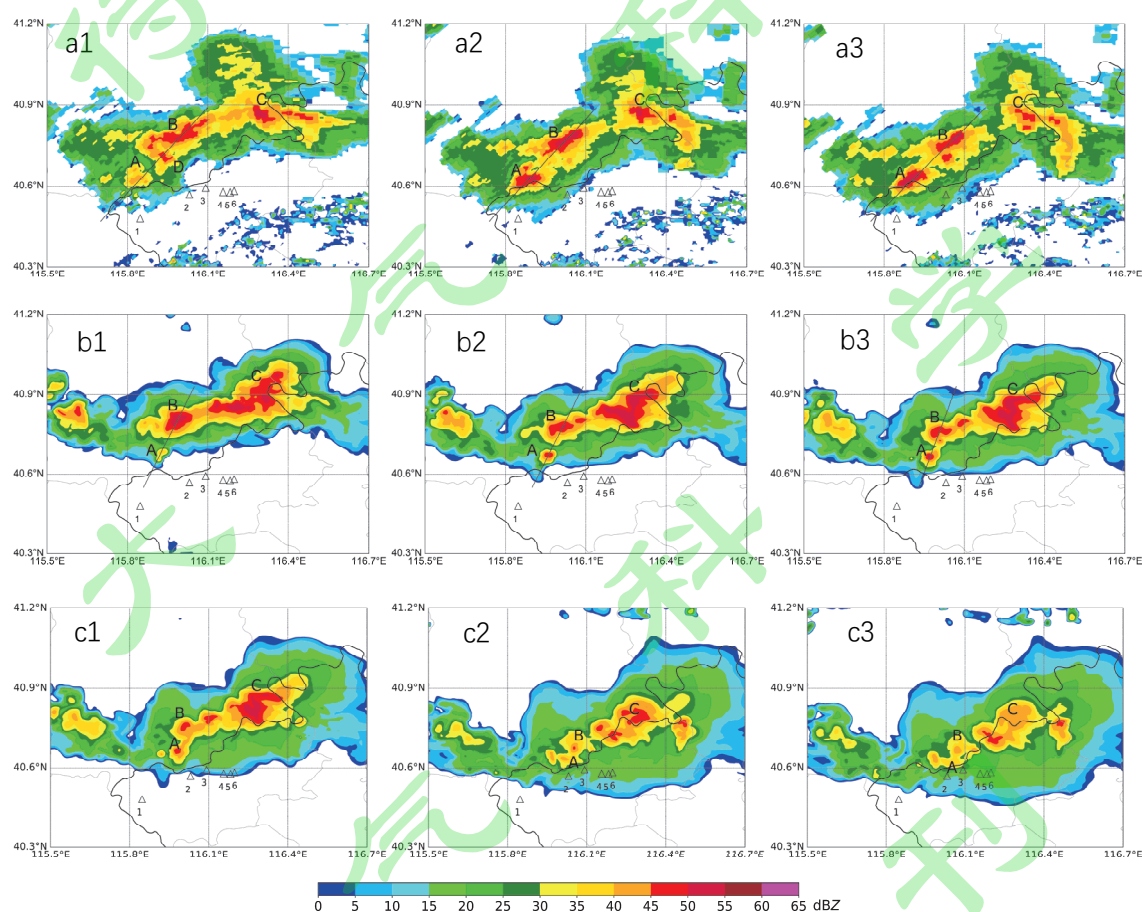


图 5 实况（第一行）与模拟（第二、三行）的雷达组合反射率(单位: dBZ)的对比。实况时间为 (a1) 14:12、(a2) 14:24、(a3) 14:30，模拟结果的时间分别为 (b1) 13:50、(b2) 14:00、(b3) 14:05、(c1) 14:10、(c2) 14:25、(c3) 14:30。图中三角形和数字为作业站点及其对应表 1 中的编号，黑色直线对应图 6 中垂直剖面的位置，A、B、C、D 为各对流单体在正文中的名称

Fig. 5 Comparison of radar composite reflectivity (units: dBZ) between observed data (first row) at (a1) 1412 BT, (a2) 1424 BT, (a3) 1430 BT and simulated results (second and third rows) at (b1) 1350 BT, (b2) 1400 BT, (b3) 1405 BT, (c1) 1410 BT, (c2) 1425 BT and (c3) 1440 BT on September 1, 2019. The triangles and digits in the figure are the operation sites and their corresponding site numbers in Table 1, while black lines correspond to the location of the vertical cross-section in Fig. 6. A, B, C, and D are the names of convection cells mentioned in the paper

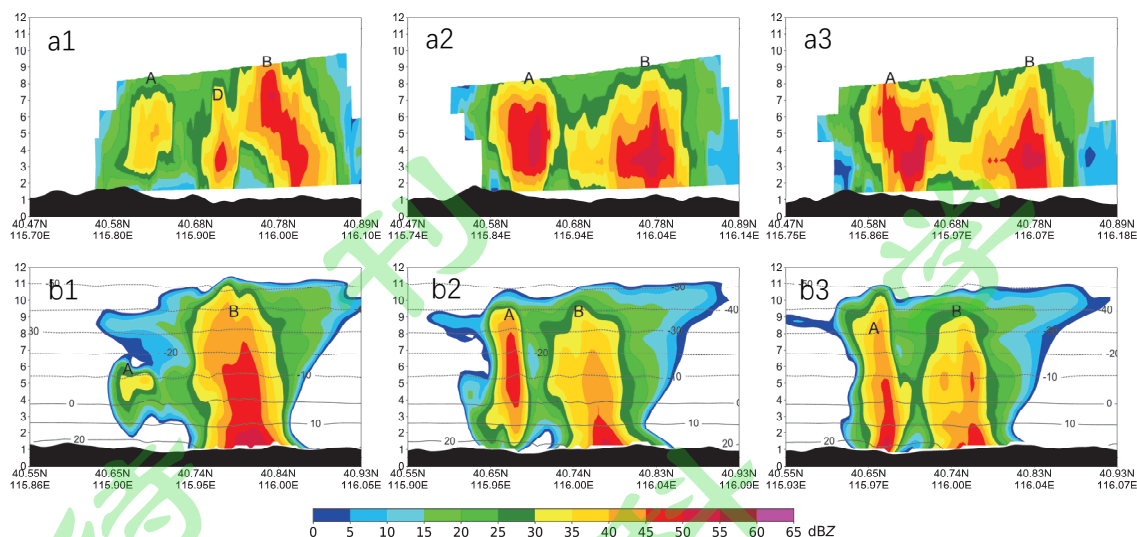


图 6 实况（第一行）与模拟（第二行）的雷达回波(单位: dBZ)垂直剖面对比。实况时间为 (a1) 1412 BT, (a2) 1424 BT, (a3) 1430 BT, 对应模拟结果的时间分别为 (b1) 1350 BT, (b2) 1400 BT, and (b3) 1405 BT。各垂直剖面的具体位置见图 5 中黑色直线所示, A、B、D 为各对流单体在正文中的名称, (b1-b3) 中的黑色等值为温度 (单位: °C)

Fig. 6 Vertical cross-section comparison of radar reflectivity (units: dBZ) between observed data (top row) at (a1) 1412 BT, (a2) 1424 BT, (a3) 1430 BT and simulated results (bottom row) at (b1) 1350 BT, (b2) 1400 BT, and (b3) 1405 BT on September 1, 2019. The locations of vertical cross-section are marked as the black solid lines in Fig. 5. A, B and D are the names of convection cells mentioned in the paper. Black contours in (b1-b3) denote temperature (units: °C)

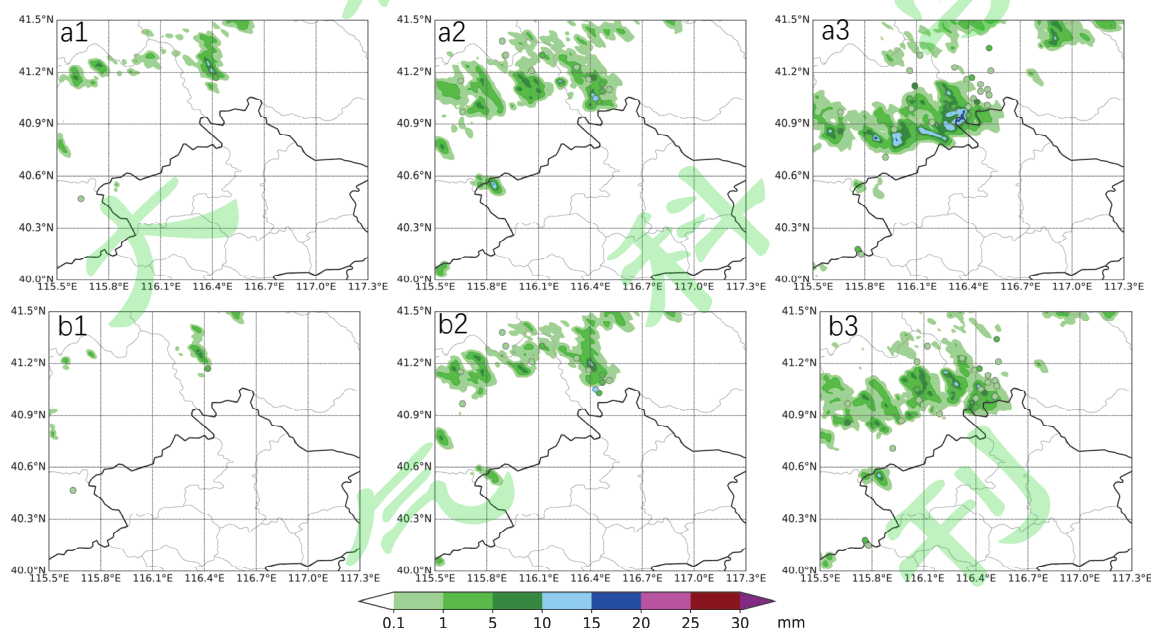


图 7 模拟(阴影)和实况(填色圆圈)的 2019 年 9 月 1 日的小时雨量(单位: mm)对比, 其中模拟结果分别为(a1) 12:00、(a2) 13:00、(a3) 14:00、(b1) 11:30、(b2) 12:30、(b3) 13:30 时刻的小时雨量, 实况为 (a1、b1) 12:00、(a2、b2) 13:00、(a3、b3) 14:00 时刻的小时雨量

Fig. 7 The 1-h rainfall (units: mm) of simulation (color shaded) and observation (colored circles) on September 1, 2019. Model rainfall were taken at (a1) 1200 BT, (a2) 1300 BT, (a3) 1400 BT, (b1) 1130 BT, (b2) 1230 BT and (b3) 1330 BT. Observation rainfall were taken at (a1, b1) 1200 BT, (a2, b2) 1300 BT, and (a3, b3) 1400 BT

4.2 催化模拟设置

为检验实际作业的效果, 需要尽可能的模拟真实的催化作业过程。4.1 节的对比表明, 数值模拟结果

较好的抓住了实况对流云团的发展变化特征，但具体到作业区内的对流单体而言，模拟结果与实况相比仍存在一定的偏差，因此，催化模拟时不能拘泥于固定的站点位置和实际的催化作业时间，需根据模拟的目标单体发展变化，选择与实况目标单体特征和变化趋势相似的模拟时段，分析确定对应的催化位置和时间，具体的催化轨迹形状（或炮弹播撒点高度）则依据仿真模块的计算结果。

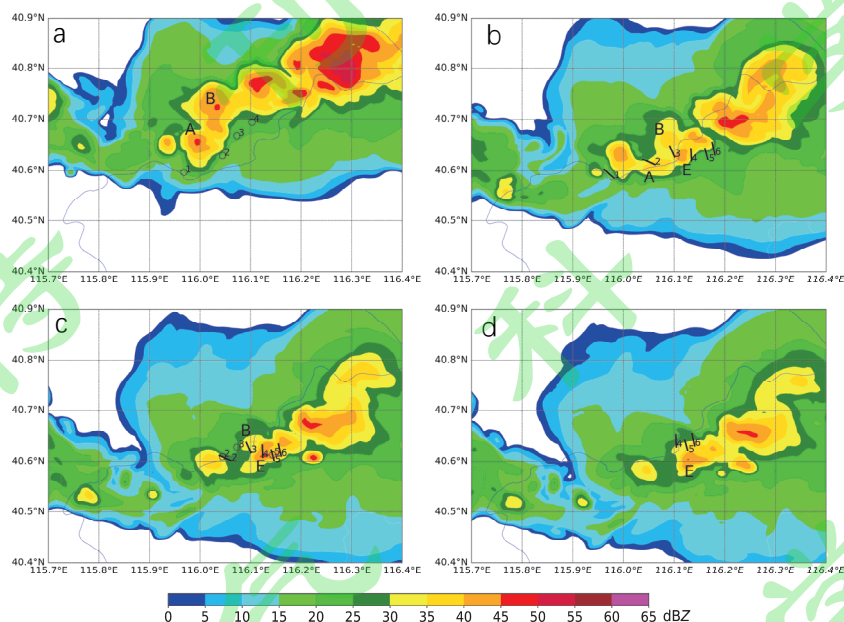


图 8 2019 年 9 月 1 日，催化模拟的 4 轮次作业中，火箭作业轨迹（黑线）和炮弹播撒点（圆圈）的水平投影位置分别与催化时的雷达组合反射率（阴影；单位：dBZ）的叠加，其中作业时间分别为（a）14:15, (b) 14:35, (c) 14:45, (d) 14:50。图中数字对应表 1 中的站点编号，A、B、E 为各对流单体在正文中的名称

Fig. 8 The horizontal projection of both rocket seeding trajectories (black lines) and artillery seeding points (circles) in the simulated 4 rounds of seeding operation overlay with simulated radar composite reflectivity (color shaded, units: dBZ) at (a) 1415 BT, (b) 1400 BT, (c) 1445 BT, (d) 1450 BT on September 1, 2019. The digits in the figure correspond to the site numbers in Table 1. A, B and E are the names of convection cells mentioned in the paper

根据上述原则，图 8 给出了催化模拟中四轮次催化作业所对应催化时间和水平位置。对比图 8 和图 3 可以看到，虽然模拟的催化时间较实况偏早一些，但催化作业期间，模拟和实况的对流单体发展均表现出一致的变化特征，A、B 单体均向南偏东移动，且 A 单体已经开始减弱、B 单体继续减弱，到第二、三轮作业时，在 B 单体东南侧已逐渐发展出新生单体 E，实况和模拟的回波中心强度均可达到 40dBZ 以上。由于模拟的对流云系位置较实况偏北，因此催化模拟中的作业位置整体向北移动一段距离，此外，模拟的 A 单体位置较实况偏东，故作业点 1、2 的催化位置向东也有较大的调整，同时其他站点的作业位置在东西方向也根据雷达回波发展略有调整。此外，通过对比不同时刻雷达回波的垂直变化特征，可进一步确定催化位置是否能反映实际作业的云系状况，篇幅所限，仅以作业点 4 为例（作业仰角均为 55 度），图 9 给出了实况和模拟的经过作业站点 4 的雷达回波垂直剖面以及对应时刻的播撒轨迹（或播撒点）。图中对比表明，在催化时刻，模拟和实况云系均有降水发生，虽然模拟的云发展状况在具体细节上与实况有所差别，如二者雷达回波强度的差别等，但综合图 3、图 8 和图 9 中四轮次作业中雷达回波的演变趋势看，模拟与实况在这方面具有较好的一致性，总体上，在催化模拟的作业时刻，目标云所处的发展阶段与实况作业时的情况是相似的，其他站点的模拟结果也有类似表现（图略）。基于上述判断，可认为上述催化模拟的设置能够合理反映实际的作业状况。需要指出的是，实际作业中包括高炮和火箭两种作业方式，其中高炮所用催化剂为纯碘化银，云室试验表明（党娟等，2016，2018；杨绍忠，2006），其成核率要低于火箭所用的多组分复合碘化银的值，由于缺乏定量的对比结果，且此次试验中所用高炮炮弹合计的碘化银质量不到总催

化剂量的 10%，因此模式中不再区分二者的差异，即催化模拟采用表 1 中实际播撒剂量，催化剂均按复合碘化银处理。此外，大量研究实践也发现，云中高炮炮弹的爆炸会产生动力和微物理作用（许焕斌，2014），从而影响对流云的发展，但相关的机理研究尚不成熟，一些研究结果仍需严格验证，因此本研究中也未考虑爆炸作用的影响。

图 9b1-b4 中，除高炮作业播撒位置的温度低于 -10°C 外，火箭播撒轨迹所处的温度大多高于 -5°C ，由于碘化银的成冰阈温一般要低于 -4°C ，因此火箭作业的播撒区温度是不利于碘化银核化的，但由于对流云中存在较强的上升气流，从图中作业时的垂直速度及作业后 5 分钟的碘化银的分布可以看到，由于火箭播撒轨迹全部或部分处于对流云的上升气流区，碘化银仍可以向上输送到更利于其核化的低温区，从而发挥催化作用；同时，图中也可看到，有相当一部分碘化银会被下沉气流带入低层的高温区，导致其无法核化成冰晶。碘化银的上述分布特征说明，为保证碘化银的核化，一方面，此次作业的仰角偏低，应采取更大的仰角进行作业，以使碘化银直接进入更适宜的温度区间，另一方面，催化作业也应尽可能保证播撒区位于上升气流区内。

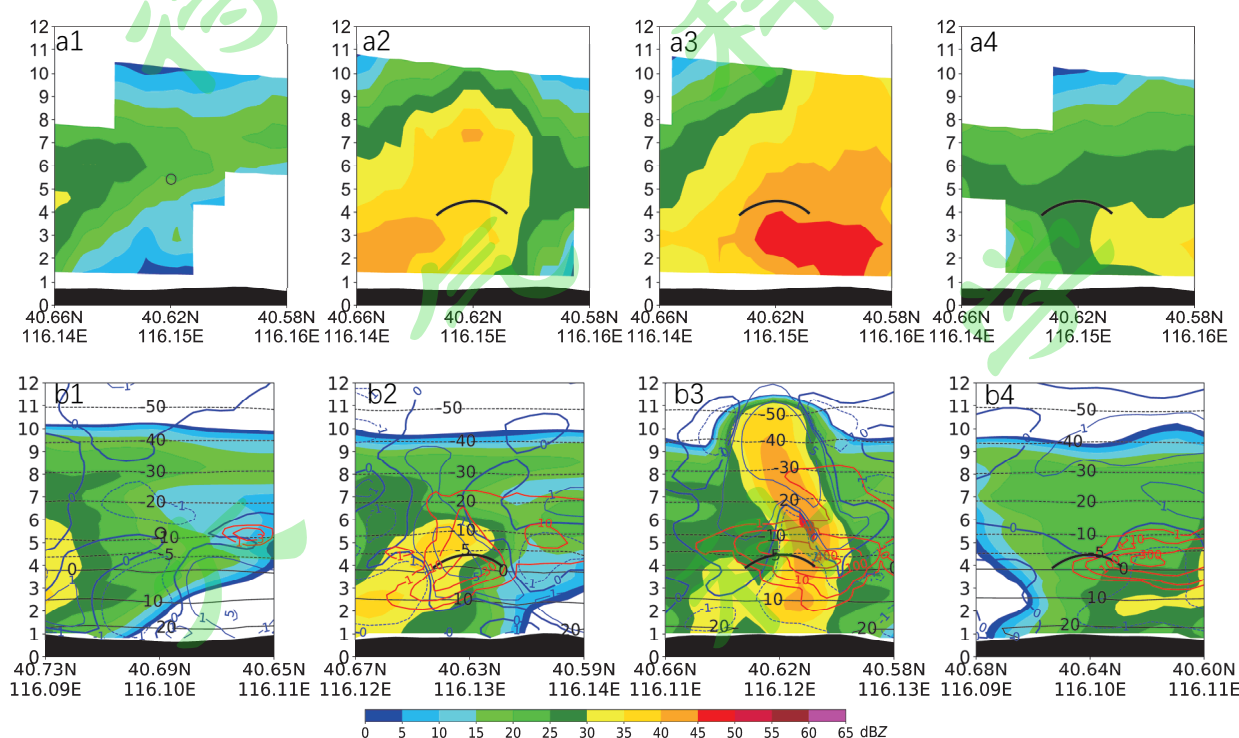


图 9 2019 年 9 月 1 日，经过作业点 4 及其催化轨迹的实况（a1-a4）和模拟（b1-b4）的雷达回波（阴影，单位：dBZ）垂直剖面。图中黑色曲线为火箭作业轨迹，黑色圆圈为高炮播撒点；b1-b4 中的黑色等值线为温度（单位： $^{\circ}\text{C}$ ），蓝色等值线为垂直速度（单位： m s^{-1} ），红色等值线为 5 分钟后的碘化银浓度分布（单位： 10^3 L^{-1} ）；a1-a4 时间分别为 14:42，15:00，15:12 和 15:30，b1-b4 时间为：14:15，14:35，14:45，14:50

Fig. 9 On September 1, 2019, observed (a1-a4) and simulated (b1-b4) radar reflectivity (color shaded, unit: dBZ) vertical cross-sections from operation site 4 to its rocket seeding trajectories (black solid lines) or artillery seeding points (black circles). Observation are at (a1) 1442 BT, (a2) 1500 BT, (a3) 1512 BT and (a4) 1530 BT. Simulation are at (b1) 1415 BT, (b2) 1430 BT, (b3) 1445 BT and (b4) 1450 BT. In b1-b4, black and blue contours denote temperature (units: $^{\circ}\text{C}$) and vertical flow velocity (units: m s^{-1}) respectively, and red contours represent the AgI concentration (units: 10^3 L^{-1}) at 5 minutes after seeding operation

4.3 催化作业效果评估

催化作业目标区主要是 A、B 单体所在的云区，其中大部分催化作业位于 B 单体的移动路线上，B 单体在南移减弱过程中，其前方又有新的对流单体生成发展，其中尤以新生的 E 单体发展最强，模拟结果显示（图略），14:20 左右 E 单体已在 B 单体南侧生成并出现大于 20dBZ 的回波，到 14:35，B、E 单体强回波

区已经开始合并，B 单体不断减弱，E 单体不断增强，14:45-15:10 时段，B 单体最终并入 E 单体，E 单体发展进入了成熟阶段，回波顶高最高可达 11km，回波中心强度超过 45dBZ（5-6km），单体上部的上升气流速度最大达到 17.4m/s（14:45），此后 E 单体的发展逐渐减弱。从时间和水平位置上看，作业站点 3、4、5 在第二至第四轮次的作业直接覆盖了 E 单体区域，作业时刻处于 E 单体的发展和成熟阶段，这正是云中降水粒子发展旺盛的时期，此时的催化作业对 E 单体的降水发展有可能产生较大影响。模拟结果分析也表明，催化使 A、B 单体的降水改变不大，最大的降水变化是由 B 单体移动路线上的新生单体所造成的。

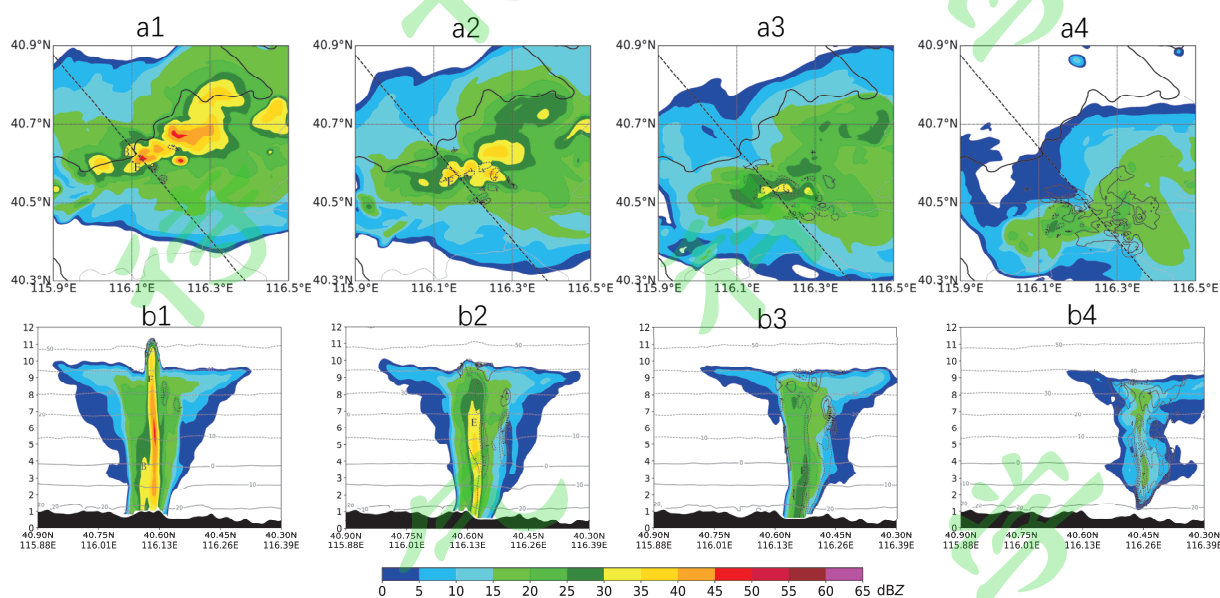


图 10 2019 年 9 月 1 日 (a1, b1) 14:45、(a2, b2) 15:00、(a3, b3) 15:15 和 (a4, b4) 15:40 的 (a1-a4) 雷达组合反射率及 (b1-b4) 雷达反射率垂直剖面。图中阴影为自然云的值，等值线为催化云减自然云的差值。图中 B、E 为对流单体在正文中的名称，a1-a4 中黑色短划线为剖面的位置

Fig. 10 The (a1-a4) radar composite reflectivity (units: dBZ) and (b1-b4) vertical cross-sections of radar reflectivity (units: dBZ) at (a1, b1) 1445 BT, (a2, b2) 1500 BT, (a3, b3) 1515 BT, (a4, b4) 1540 BT on September 1, 2019. The color shaded denotes reflectivity of the unseeded cloud, and the contours represent the reflectivity difference of seeded cloud minus unseeded cloud. B and E in plots are the names of convection cells mentioned in the paper, and the black dash lines in (a1-a4) indicate locations of vertical cross-sections

由模拟的雷达回波和云动力场分析可知，催化时段的 A、B 单体已由成熟阶段向消散阶段发展，雷达回波强度逐渐减弱，其中 A 单体减弱的速度更快，而以 E 单体为代表的新生单体，在自然云和催化云的模拟中均有出现。与实况对比表明(图 3、图 8)，上述雷达回波演变特征，在实况以及自然云和催化云的模拟中均有类似表现，由此判断，催化并未改变对流单体本身的自然发展趋势，因此，3.1 节观测到的雷达回波变化，更多的应是单体自然的发展所致。虽然如此，催化作业对对流单体雷达回波强度仍是有一些影响的，从模拟结果看，在第一轮次催化后 5 分钟，雷达回波强度就出现了微弱变化，到第 3 轮次作业后，雷达回波强度的变化达到 1dBZ 以上。图 10 给出了不同时刻自然云和催化云的雷达组合反射率以及沿 B、E 单体移动路线上的雷达回波垂直剖面的对比，由图 10a1-a4 可见，催化的作用在雷达组合反射率上有一定表现，图中组合反射率的差值表明，相对于自然云，催化云前期(图 10a1-a3)的组合反射率有增有减，但以减弱的居多，而后期的催化云组合反射率则出现了较大范围的增强(图 10a4)，总的来看，这些增减变化的绝对量值都不大。从剖面图上则可看到更细致的变化，图 10b1 是 E 单体发展的成熟阶段，此时回波强度已出现小范围的变化，E 单体顶部回波强度有增强，而且回波顶高略有增加，表明催化引起了对流单体内上升运动增强，数据显示此时上升气流的最大增量为 0.84m/s（该剖面位置的最大增量值为 1.54m/s，出现时间为 14:50），最大增温 0.46℃（14:45，此为该剖面位置的最大值）。实际上，催化造成了对流单体内大部分区域是以回波强度减弱为主，模拟结果表明在 15:00-15:35 之间，云体内持续出现从地面到高空

的连续回波减弱区（图 10b2、b3），表明降水被减弱了。发展到对流单体的消散阶段后，前期催化造成的回波强度减弱现象表现的更为明显（图 10b4）。注意到图 10a4 组合反射率图上显示的雷达回波增强区域，实际是位于回波区上部，而中下部的回波强度几乎都是减弱的，这一现象表明，催化导致了较多的降水粒子滞留在空中而未能形成有效的地面降水。

图 11 给出了 14:00–16:00 时段内作业的消减雨效果，图中碘化银的浓度是指 14:15（催化开始时刻）至 16:00（降水结束时刻）时段内碘化银的垂直最大浓度（注：这里的碘化银浓度取自每一时刻碘化银催化前的数据），可认为是“催化直接影响区”。由图 11a、b 中降水变化的水平分布可以看到，在作业区东南方向的下游地区，地面降水出现了变化，其中绝大部分区域为减雨；图 11c 的时间分布显示，催化开始后 10 分钟，降水量和降水强度即出现先减后增的轻微起伏，14:35 后，降水总量持续减少，降水强度减弱并于 15:10 达到极值；可见，催化确实起到了减雨的作用，不过，减雨的绝对量值并不大，最大减雨量为 0.27mm，对应的减雨率 6.8%；对于图 11b 中的主要降水变化区域（碘化银浓度大于 10^3L^{-1} 范围内，且降水变化绝对值大于 0.01mm 区域），统计的区域平均减雨率则为 5.1%。本研究中也试验了采用 10 倍于实际剂量的催化模拟（除剂量外的其他催化设置不变），模拟结果表明，两次催化模拟中，降水变化区域的位置及分布特征均是相似的（图略），催化剂量的增加使减雨区域和减雨量均有增大，说明减雨效果有所增强，最大减雨量提高到 0.7mm，对应减雨率 17.6%，主要降水变化区域的平均减雨率 7.9%。

图 11a 中，在催化直接影响区的周边，一些对流云的降水也出现了明显的变化，这些变化显然并不是催化的直接作用，这种“域外效应”显示了播云催化影响区的不确定性（WMO，2018），其机理需要深入分析，本文研究主要集中在催化直接影响区范围内。

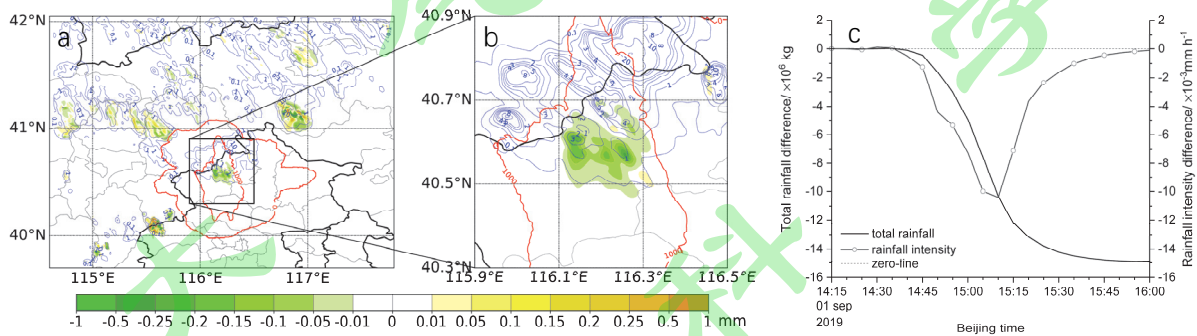
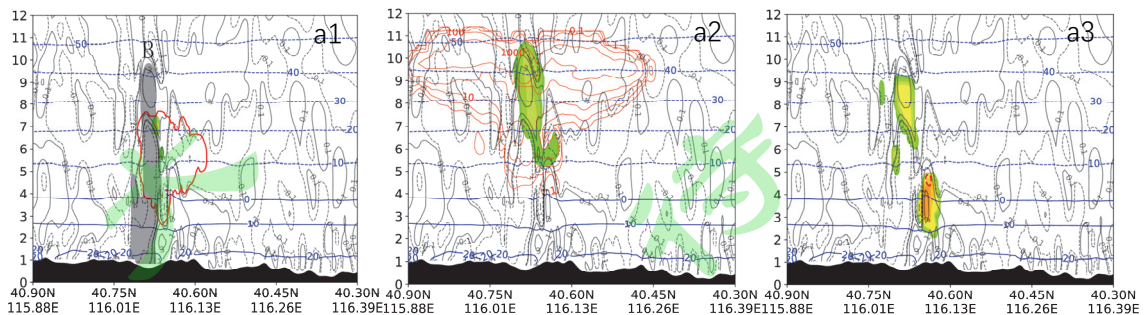


图 11 2019 年 9 月 1 日 14:00 至 16:00，模拟的 (a, b) 自然降水（蓝色等值线，mm）、降水量差值（填色阴影，催化云减自然云，mm）、碘化银垂直最大浓度（红色等值线， L^{-1} ）和 (c) 降水总量变化和降水强度变化（催化减自然云）的时间分布。
Fig. 11 From 1400 BT to 1600 BT on September 1, 2019, simulated (a, b) unseeded cloud rainfall (blue contours, units: mm), rainfall difference (color shaded, units: mm), vertical maximum concentration (red contours, units: L^{-1}) of AgI, and (c) temporal evolution of both total rainfall amount difference and rainfall intensity difference. All the above differences refer to the values of seeded cloud minus unseeded cloud



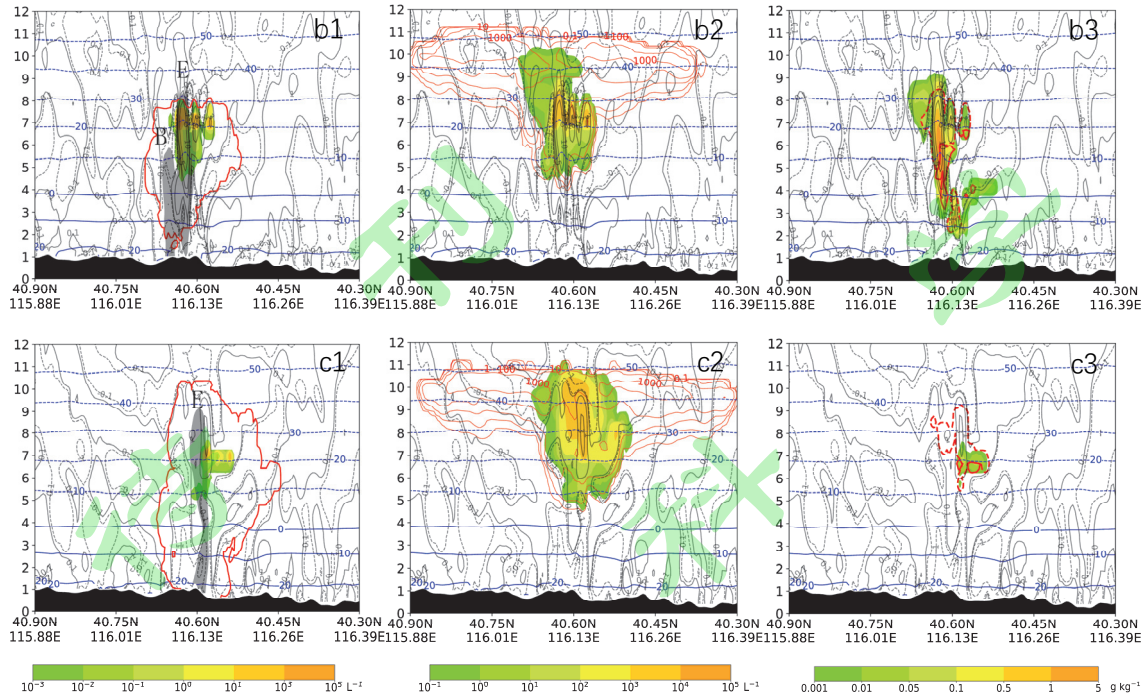


图 12 2019 年 9 月 1 日 (a1-a3) 14:25、(b1-b3) 14:40 和 (c1-c3) 14:55 时刻的催化云垂直剖面, 包括 (a1,b1,c1) 大于 30dBZ 雷达回波 (灰色阴影)、碘化银 (红色等值线, 等值线值为 10^{-6} L^{-1}) 及其核化新生的人工冰晶数浓度 (彩色阴影, 单位: L^{-1})、(a2, b2, c2) 自然冰晶 (红色等值线) 和人工冰晶 (彩色阴影) 的数浓度 (单位: L^{-1}) 以及 (a3, b3, c3) 云水 (彩色阴影, 单位: g kg^{-1}) 及其相对自然云的变化 (催化云-自然云; 红色等值线, 等值线值为 -0.001 和 0.001 g kg^{-1})。图中灰色等值线为垂直气流速度 (单位: m s^{-1}), B、E 指示正文中对应的回波单体。剖面位置参见图 10 所示。

Fig. 12 Vertical cross-sections of the seeded cloud, including (a1,b1,c1) radar reflectivity greater than 30 dBZ (gray shaded), the number concentration (unit: L^{-1}) of AgI (red contour with value 10^{-6} L^{-1}) and newly generated artificial ice crystal (color shaded), (a2,b2,c2) the number concentration (unit: L^{-1}) of unseeded ice crystal (red contour) and artificial ice crystal (color shaded), (a3,b3,c3) cloud water mixing ratio (color shaded, unit: g kg^{-1}) and difference (red contours with value -0.001 and 0.001 g kg^{-1} , unit: g kg^{-1} , seeded cloud minus unseeded cloud) at (a1-a3) 1425 BT, (b1-b3) 1440 BT and (c1-c3) 1455 BT on September 1, 2019. Gray contours in the figure represent vertical flow velocity (unit: m s^{-1}), and B, E in plots are the names of convection cells mentioned in the paper. See Fig. 10 for the vertical cross-section location

4.4 催化的作用机制

图 12 显示了催化作业不同阶段对流云团中的回波强度、碘化银核化、冰晶、云水的垂直分布以及垂直气流情况。其中, 图 12a1-a3 为第一轮高炮作业后 10 分钟, 此时 B 单体发展已开始减弱, 图 12b1-b3 为第二轮次作业后 5 分钟, 正处于 E 单体发展增强、B 单体减弱并入 E 单体期间, 图 12c1-c3 为第四轮次作业后 5 分钟, 此时 E 单体尚处于成熟阶段, 但上升气流已经减弱。图 13 给出了图 11b 所示区域内, 自然云和催化云中冷区的水汽和水成物特征、碘化银四种核化过程的新生人工冰晶数、人工冰晶源汇项的区域转化率等随时间的变化 (图 13e、f 中的各源汇项名称均遵循 2.2 节中所述 CAMS 微物理方案的命名规则, 不再逐一列出, 由于 Sva 包括了人工冰晶的凝华升华过程, 为讨论方便, 特用 Sva+表示凝华过程, Sva-表示升华过程)。

结合图 12、图 13 的对比可看到, 在 B 单体减弱时段, 催化作业的影响不大, 图 12a1-a3 中显示, 碘化银的核化并不活跃, 人工冰晶的浓度并不比自然冰晶浓度高, B 单体过冷水也无明显消耗, 同样, 图 13a、b 中过冷水和冰晶浓度的总量变化也不明显。催化作业出现明显影响是在第二轮次作业后, 图 12b1 中可见, 碘化银核化产生了大量的新生人工冰晶 (指当前时刻核化出的人工冰晶, 下文同), 表明碘化银的核化较为活跃, 同时, 图 12b2 显示此时过冷区内已累积了高浓度的人工冰晶, 其峰值区 ($-20 \sim -30^\circ\text{C}$ 之

间) 浓度 ($10^3 \sim 10^4 L^{-1}$) 更远高于同一区域的自然冰晶浓度 ($10^1 \sim 10^2 L^{-1}$), 且 $-10^\circ C$ 层以上特别是 $-20 \sim -30^\circ C$ 之间的过冷水均有明显消耗 (图 12b3); 从总量变化上看 (图 13a、b), 第二轮次作业后, 过冷水总量出现明显减少, 人工冰晶总量则有明显增加, 图 13d-f 中转化率的变化也可看到, 碘化银核化和人工冰晶增长在这一阶段也达到峰值。4.3 节的分析表明, 在第四轮次作业时, E 单体已经进入了成熟阶段, 图 12c1-c3 中 E 单体内的上升速度减弱, 难以持续维持较高的过冷水量, 碘化银的核化也减弱 (图 13b 可见 14:50 后人工冰晶总量的增长趋势放缓), 但此前累积的高浓度人工冰晶仍加剧了过冷水的消耗, 图 12c3 中的过冷水区已大幅减小, 这对云中仍存在的高浓度人工冰晶的增长是不利的。

Reisin et al (1996) 的研究指出, 在对流云的发展阶段自然冰晶开始产生时进行催化是获得增雨效果的关键因素, 这一时段是催化的最优“时间窗”, 但当播撒的冰核超过一定浓度时, 会导致过量播撒, 产生减雨。图 12 的分析也表明, 在 E 对流单体发展阶段的作业, 催化的作用最为明显, 碘化银的核化最为活跃, 产生大量人工冰晶, 在较大范围内形成人工冰晶的浓度远高于自然冰晶的局面, 而 E 单体在成熟阶段的发展强度偏弱, 云内过冷水资源不足, 而且成熟阶段的作业也进一步增加了人工冰晶的浓度, 催化作业最终产生了过量播撒的结果。

由图 12a1-c1 可见, 过冷区内, 并不是所有碘化银的分布区域内都适宜催化剂粒子的核化, 过冷水和上升气流的存在对碘化银的核化则是有利的。受云中温度、水汽过饱和度、过冷云水以及垂直气流等因素的影响, 碘化银的 4 种核化机制之间是存在差异的。由图 13d 可知, 此次催化作业中, 碘化银的主要核化方式为凝结冻结核化, 其次为接触冻结核化, 再次为凝华核化, 浸没核化的作用最小。凝结冻结过程需要较高的水面过饱和度, 而对流云中上升气流速度强, 可维持较长时间的高水面过饱和度, 这是凝结冻结成为主要核化过程的重要原因。15:00 后, 云中过冷水总量已经很少, 表明过冷云滴减少、水面过饱和条件变差, 此时凝华核化的作用逐渐增加, 不过, 从总量上看, 凝结冻结核化和接触冻结核化仍是整个催化过程中人工冰晶的主要源项。这一模拟结果与刘诗军等 (2005)、楼小凤等 (2014) 等对流云模拟的主要结论一致, 与层状云中碘化银的主要核化方式不同 (刘卫国等, 2021b, Xue et al. 2013)。

图 13a 显示, 在 14:40~15:15 这段时间内, 催化云中水汽和云水的消耗明显比自然云要多, 表明催化产生了作用。碘化银的接触冻结和浸没冻结核化过程必然会消耗大量过冷云水, 而凝结冻结和凝华核化过程则会消耗水汽; 同时, 人工冰晶的凝华增长也会消耗水汽, 当有过冷水同时存在时, 人工冰晶还会通过贝吉龙过程不断消耗过冷云水而快速增长。由图 12 可见, 在这段时间内, 过冷云水的主要消耗区 (图 12b3、c3) 与碘化银的核化区 (图 12b1、c1) 以及高浓度的人工冰晶分布区 (图 12b2、c2) 几乎位于相同的区域, 同时也可看到过冷水区以及其周边大多有高浓度的人工冰晶存在, 结合图 13e 中该时段内碘化银核化过程 (P_{va}) 以及人工冰晶凝华增长过程 (S_{va+}) 的转化率均处于高峰期的这一特征, 可以判断, 大量人工冰晶的产生及其凝华成长过程是造成催化云中水汽和云水被额外消耗的重要原因。图 13b、c 显示催化云中自然冰晶的总数量和平均直径 (该直径是将冷区中所有自然冰晶粒子的质量中值直径按数量加权平均进行计算所得) 与自然云中的对应量相比均有减小, 那么催化云中自然冰晶的总质量也必然是减少的, 而大量人工冰晶则弥补了自然冰晶的这种损失 (参见图 14a1、a2), 而且人工冰晶自生成后, 其粒子群平均尺度很快高于自然冰晶 (前期由于多轮次作业, 导致人工冰晶粒子群的平均直径计算值起伏较大), 可以说, 在与自然冰晶的成长竞争中, 人工冰晶的成长占据了明显优势。由于模拟中假设了人工冰晶与自然冰晶具有相同的物理特性, 人工冰晶之所以具有成长优势, 分析其原因, 一方面是由于催化区内, 特别是在过冷水区内, 人工冰晶具有远高于自然冰晶的浓度, 从而使人工冰晶获得更多的增长资源, 这反过来也抑制了自然冰晶的增长; 另一方面, 人工冰晶和自然冰晶的碰并过程 (C_{ia}) 是人工冰晶成长的重要源项, 许多自然冰晶在这一碰并过程中与人工冰晶并合, 从而使人工冰晶获得更快的增长, 结合图 13e 中 C_{ia} 过程一直保持有较强转化率的特征, 可推断该过程可能是图 13c 中人工冰晶平均尺度很快高于自然冰晶的主要原因。

由 (2)、(3) 式的源汇项方程可知, P_{va} 是人工冰晶唯一的初始源项, 人工冰晶的成长只依靠 S_{va+} 和 C_{ia} 两个微物理过程, 其他相关的微物理过程均为人工冰晶的汇项。由图 13e、f 可知, 在 15:15 前, 人工冰晶的质量增长主要依靠 S_{va+} 过程, 之后则主要通过 C_{ia} 过程增长; 在整个催化模拟过程中, 人工冰晶自动转化为雪 (A_{as}) 是其质量减少的主要汇项, 而升华过程 (S_{va-}) 则是人工冰晶数量减少的主要汇项。静力催化

的主要目的之一是要影响云中降水粒子的发展，对比图 13e、f 中人工冰晶各汇项的变化，可以看到，从 14:50 开始， A_{as} 过程的转化率逐渐超过雨、雪、霰等降水粒子碰并人工冰晶过程（简称为 C_{ar} 、 C_{as} 、 C_{ag} ）的转化率，成为人工冰晶向降水粒子转化的最主要的微物理过程，结合图 15 可知， A_{as} 过程也是雪总量增加的主要原因，可见，它是此次催化作用链条中一个关键的微物理过程。

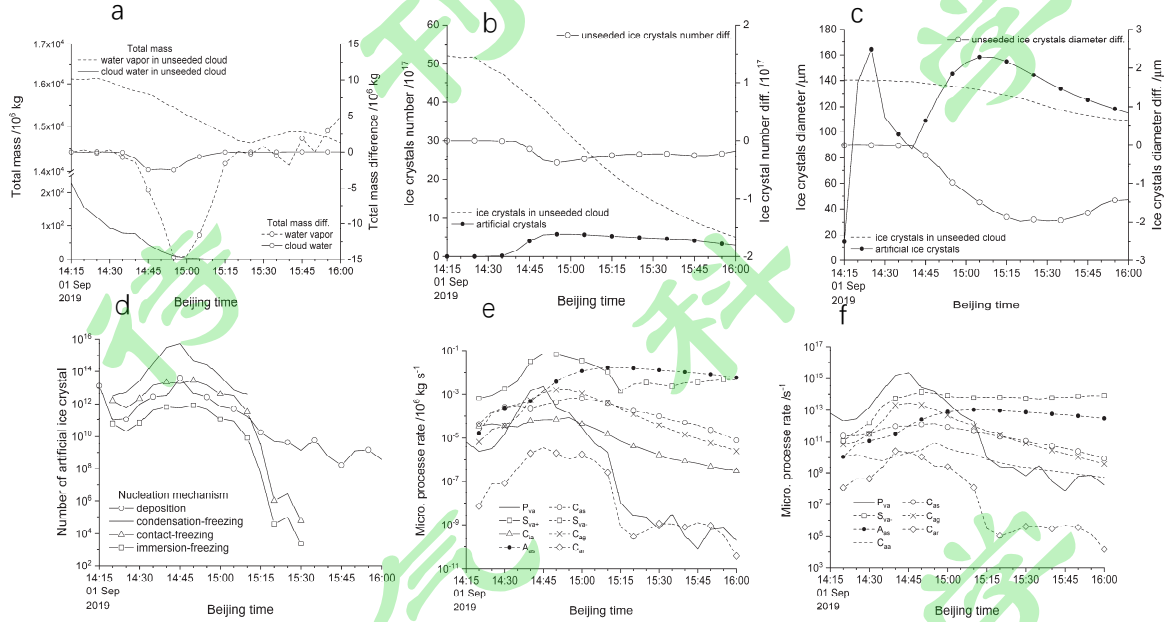


图 13 图 11b 所示区域中，自然云与催化云中冷区的 (a) 水汽和云水总量、(b) 冰晶总数、(c) 冰晶平均直径随时间变化的对比，催化云中 (d) 碘化银各核化机制的新生人工冰晶数以及人工冰晶 (e) 总质量和 (f) 总数量的转化率随时间变化。(d-f) 中实线为人工冰晶源项，虚线为人工冰晶汇项。(a、b、c) 中所示的差值均由催化云减自然云所得，其中 (b) 中的差值是指催化云中自然冰晶的数减自然云中的冰晶数

Fig. 13 In the region shown in Fig. 11b: The time series comparison of (a) the total mass of water vapor and cloud water, (b) the total number of ice crystals, and (c) the average diameter of ice crystals in the cold regions of both seeded cloud and unseeded cloud. The time series of (d) the number of new artificial ice crystals produced by each nucleation mechanism of AgI, and the conversion rates of both (e) total mass and (f) total number for artificial ice crystals in the seeded cloud. In (d-f), solid lines indicate the artificial ice crystal source terms, and dashed lines indicate the artificial ice crystal sink terms. All differences in (a, b, c) refer to the values of seeded cloud minus unseeded cloud, and unseeded ice crystals number diff. in (b) is obtained by subtracting the number of unseeded ice crystals in seeded cloud from that in unseeded cloud.

图 14 是云中冰相粒子和雨滴等物理量的总量及其差值随高度和时间的分布，图 15 则给出了雨、雪、霰降水粒子的主要微物理源汇项转化率的差值随时间的变化（图中的各源汇项名称均遵循 2.2 节中所述 CAMS 微物理方案的命名规则，为讨论方便，特以 S_{vr} 、 S_{vs} 和 S_{vg} 各自代表雨滴、雪、霰的蒸发或升华过程，以 S_{vs+} 代表雪的凝华过程），上述所有差值均指催化云减自然云的差。可以看到，由于人工冰晶的大量增加，催化云中冰晶群的总量相对自然云是净增加的（图 14a1、a2），图 13 分析已经表明人工冰晶的存在使水汽和云水的消耗增加，这一结果对过冷层雪霰粒子的增长造成了明显影响，几乎所有自然增长（指没有人工冰晶参与）的微物理源项均被削弱（图 15），特别是在 14:30-15:15 这一对流云发展较强的时段，云水和水汽的额外消耗，使得这一时期雪、霰的碰并过冷水云过程（ C_{cs} 、 C_{cg} ）减弱、升华过程（ S_{vs-} 、 S_{vg-} ）加强，雪和霰的成长受到抑制，总质量均下降（图 14b1、c1）。由于雪、霰的增长减弱，许多粒子的尺度及质量减小，从而造成雪霰碰并过程（ C_{sg} ）的减弱（图 14a1），由于 C_{sg} 过程是过冷层下部霰粒增长的主要机制（图略），这成为模拟后期过冷层下部霰粒总质量减少的主要原因。人工冰晶通过 A_{as} 过程转化为雪，这一过程是图 13b1、b2 中 7km 以上雪粒子总量在 15:15 后增长的主要原因，也是催化云中雪总量(图 14a1、

a2)的最大增长源,但显然 A_{as} 过程生成的雪粒子较小,而且雪的其他增长过程减弱,这些增加的雪粒子更多的是漂浮在高空,而对过冷层下部降水粒子的增加并无多大作用。由于冰晶粒子个体质量较小,霰碰并人工冰晶过程 (C_{ag}) 对霰的质量增长的作用有限,人工冰晶与雨滴的碰冻过程 (C_{ar}) 对霰的数量增长则更为有效(图 15b2),但 C_{ar} 过程对霰的质量增长贡献要小得多(由于数值太小,图 15 中未画出),综合图 15a2、b2 中霰的各源汇项变化,可推断催化云中霰粒个体的增长受到了抑制,可能导致出现更多的小霰粒。过冷层降水粒子的变化也会影响到暖层,从图 14 可看到,对暖层降水粒子而言,过冷层中雨、雪变化的直接影响不大,而霰的变化则直接影响了暖层中霰和雨滴的特征发生改变,模拟结果的分析也表明,降水的主要微物理机制是霰融化为雨滴 (M_{gr}),即以冷云降水为主,而 M_{gr} 过程也是暖区与降水相关的微物理过程中减弱最为明显的(图 15c1、c2),从而导致暖区雨滴总质量下降,这是导致地面降水减少的主要物理机制。

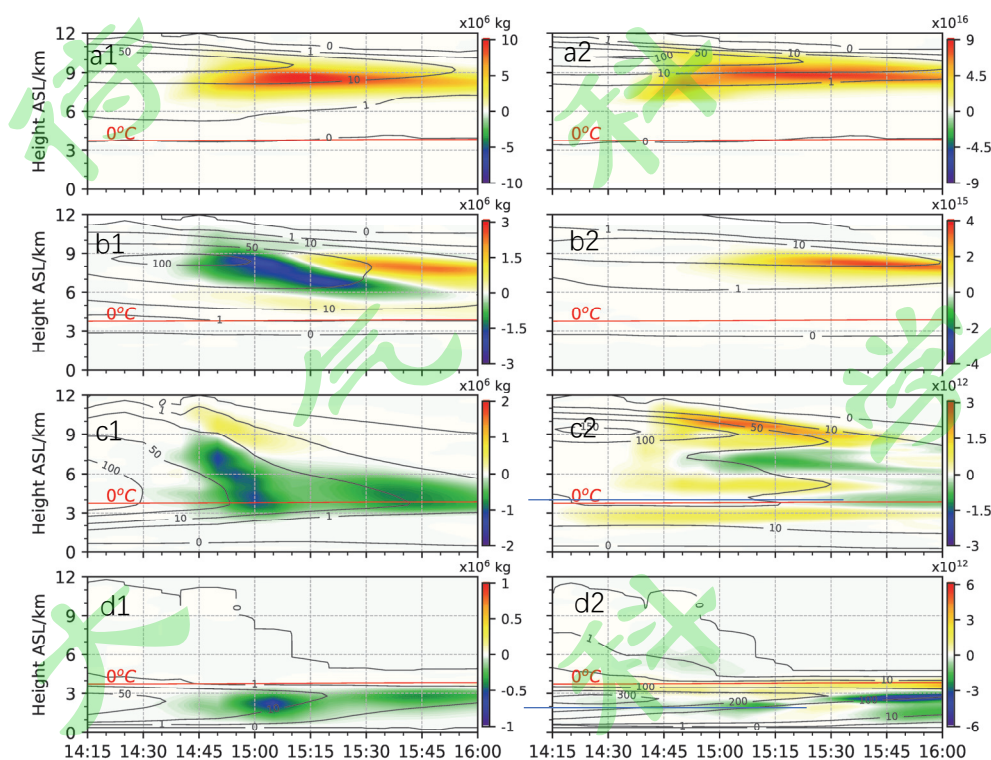
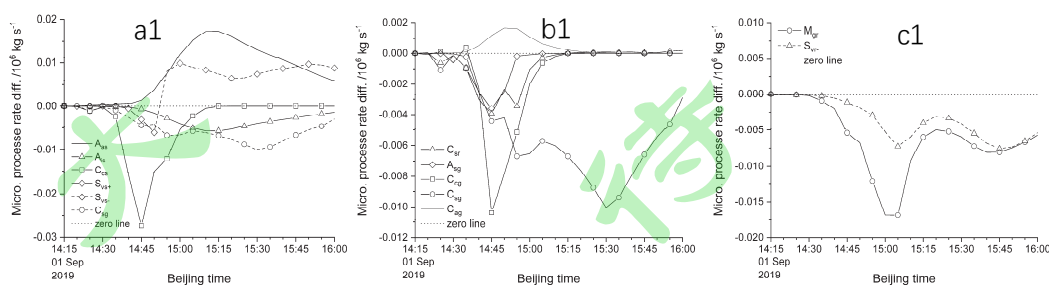


图 14 图 11b 区域中, (a1、a2)冰晶(含自然冰晶和人工冰晶)、(b1、b2)雪、(c1、c2)霰和(d1、d2)雨滴的质量(左列)和数量(右列)的总量(等值线)及差值(阴影;催化云减自然云)随高度和时间的分布

Fig. 14 In the region shown in Fig. 11b, the distribution over both height and time of both total amount (contours) and their difference (color shaded, seeded cloud minus unseeded cloud). (a1, a2) ice crystal (including unseeded ice crystal and artificial ice crystal), (b1, b2) snow, (c1, c2) graupel, and (d1, d2) rain. The left column is for mass, and the right column is for number



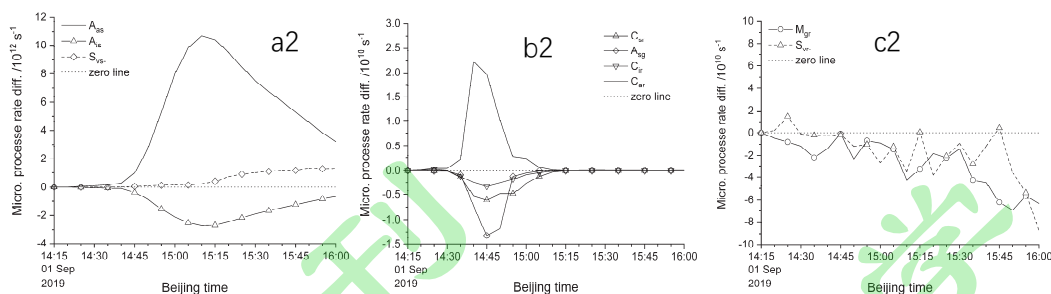


图 15 图 11b 区域中，冷区的雪 (a1, a2)、霰 (b1, b2) 和暖区雨滴 (c1, c2) 主要源汇项的质量（第一排）和数量（第二排）转化率差（催化云减自然云）随时间分布。图中实线代表源项，虚线代表汇项。

Fig. 15 In the region shown in Fig. 11b, the time series of conversion rates difference (seeded cloud minus unseeded cloud) of both total mass (first row) and total number (second row) for (a1, a2) snow, (b1, b2) graupel, (c1, c2) rain. Solid lines indicate the source terms, and dashed lines indicate the sink terms

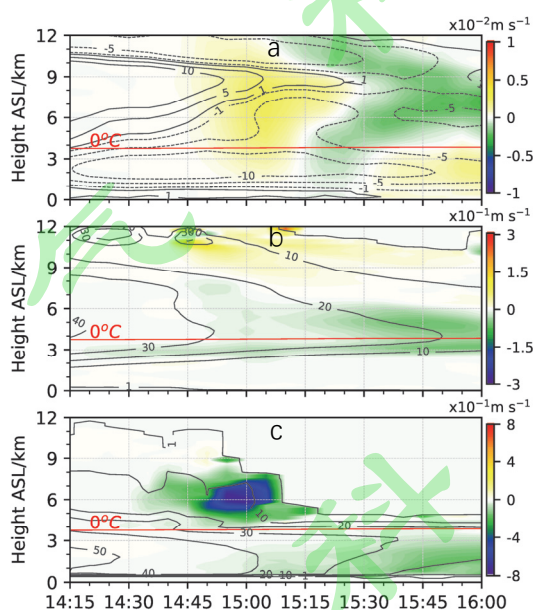


图 16 图 11b 区域中，垂直速度 (a)、霰粒 (b) 和雨滴 (c) 的下落末速及它们的差值（催化云减自然云）随高度和时间的分布

Fig. 16 In the region shown in Fig. 11b, the distribution over both height and time of (a) vertical airflow velocities (contours), (b) graupel particles terminal velocities (contours), (c) snow particles terminal velocities (contours), and their difference (color shaded, seeded cloud minus unseeded cloud)

大量人工冰晶的凝华增长会释放潜热使大气增温，造成云中垂直气流发生变化。图 15a 即反映了催化所引起的云动力场变化，同样是在 14:40-15:15 作业的目标单体发展旺盛期，垂直气流在不同高度层均出现了正变化，即上升气流增强，下沉气流减弱。对霰粒而言，图 16b 霰粒下落末速的变化表明，一方面由于催化的微物理作用，小霰粒增多，过冷层的中下层乃至暖层的霰粒下落末速减小；另一方面，上升气流的增强会使更多霰粒输送到高空（图 14c2），并在高空有一定增长（图 14c1），下落末速增加，而下沉气流减弱也相对延缓了过冷层霰粒的向下输送，综合作用的结果使得霰粒数量的垂直分布表现较为复杂（图 14c2）。在暖层，霰粒下落末速减小，这也会造成 M_{gr} 过程减弱，引起垂直减温率降低，下沉气流减弱（陶玥等，2009），同时，较小的霰粒受上升气流影响更易在暖层上部滞留，上述作用的结果都会造成霰粒在暖层上部的数量增加。暖层上部小霰粒的增加也会使得融化后的小雨滴数量增加，同样由于下落末速减小及上升气流的增强，进入暖层下部的雨滴总质量和数量均减少（图 14d1、d2），相应的蒸发总量转化率也

降低（图 15c1、c2），由于下落雨滴总质量和数量均有减少，地面降水总量减少，降水强度减弱，降水拖曳对下沉气流增强的作用也降低。15:15 后，对流云团本身的自然发展已经减弱，而且催化云在后期的减弱趋势要更强（图 10b3），聚集在高空的冰相粒子的蒸发增强（图 13e，图 14，图 15a1），引起过冷层下沉气流的增强（图 16a）。15:15-15:30 期间，暖层下沉气流略有增强，分析表明（图略），这与对流单体上升气流减弱后，单体内从高空下落的大霰粒增加引起下沉气流加强有关，暖区下沉气流增强也使该段时间内落入暖层下部的雨滴数量有一定增加（图 14d2）。

综上所述，碘化银的核化，特别是由此生成的高浓度人工冰晶在云内形成的过量播撒状况，导致作业区内的过冷水及水汽被大量消耗，使得云中其他水成物粒子的自然增长过程受到削弱，同时，也引起云内动力场发生一定变化，在微物理因素主导并结合动力因素的共同影响下，地面降水被减弱。

5 结论与讨论

本研究对三维中尺度催化模式进行了改进，采用新的碘化银核化计算方案，增加了人工冰晶预报量及相关微物理过程，实现了对地面火箭和高炮作业方式的仿真模拟，使用该模式，对 2019 年 9 月 1 日华北地区一次对流云系人工消减雨作业过程进行了模拟研究。模式模拟出了实况对流云系的多单体特征及对流单体的生消合并现象，雷达回波的发展演变趋势以及云系降水特征均与实况基本一致。基于上述基础，按照真实作业中火箭、高炮的作业方式，对此次作业过程进行了催化模拟，评估了催化作业的影响及其消减雨效果，并分析了碘化银催化剂的核化特征及其催化作用机制，主要的研究结果如下：

1）催化作业对目标云系的雷达回波强度产生了一定影响，但并没有改变目标云雷达回波的自然演变趋势。作业云区雷达回波强度的变化大多以减弱为主，且主要位于回波单体中下部区域，对流单体上部的回波则略有增强，这一特征在对流单体的消散阶段表现更为明显，这是催化导致更多降水粒子滞留在高空所致。

2）催化使作业区下游的降水发生变化，对流云系的总降水量减少，降水强度减弱，降水变化区域内大部为减雨区，最大减雨量 0.27mm，主要影响区内的平均减雨率为 5.1%，作业达到了一定的消减雨效果。

3）碘化银核化产生了大量人工冰晶，其主要的核化方式为凝结冻结核化，其次为接触冻结核化，再次为凝华核化，浸没冻结核化的作用最小。

4）催化作业造成了过量播撒，人工冰晶的成长占据竞争优势，它抑制了过冷层中其他水成物的自然增长过程。人工冰晶的凝华增长是导致云中水汽和云水消耗增加的主要原因，且凝华增长期间的潜热释放最终也引起云中垂直气流发生变化，云区内上升气流增强、下沉气流减弱的状况保持了较长时间。

5）冷云降水是此次降水的主要物理机制，其中霰融化为雨滴（ M_{gr} ）是降水形成的主要微物理过程，而催化使得过冷层内特别是其下部霰粒的自然增长过程被削弱，导致暖层 M_{gr} 过程减弱，从而暖层雨滴总质量减少，这是地面降水减弱的主要原因；此外，催化使得霰粒在暖层融化成的小雨滴增多，雨滴下落末速减小，加之催化引起的垂直气流增强，造成雨滴落入暖层下部的数量减少，这是地面降水减弱的另一原因。

关于对流云的催化，以往多以证明或分析播撒后达到正效果的研究居多，近年来，作为一些重大社会活动的气象保障手段之一，人工消减雨的实践越来越多（何晖等，2012；查思佳等，2020），相关的研究亟需深入。从已有的消减雨研究结果看，过量播撒应该是必要的条件，但研究也表明，无限增加播撒剂量并不能使减雨效果无限增加（张慧娇，2018），虽然过量播撒在对流云的不同发展阶段均可造成减雨，但减雨效果存在差异（张雨芳，2017）。与以往研究多采用简化的催化模拟、多针对单体深对流云等不同，本研究针对一次多单体对流云团，以接近实际的作业方式（多作业点多轮次）进行了催化模拟，注意到催化模拟中，催化的作业时段涵盖了多个单体的不同发展阶段，且碘化银在对流云不同发展阶段的核化效率是不同的（图 12），这也暗示，一方面碘化银能否核化限制了播撒剂量并不是越多越有效，另一方面，对流云消减雨在其不同发展阶段的播撒剂量是有区别的，对流云的发展阶段可能需要更大的剂量，但达到多少剂量才能导致减雨乃至最佳效果，这些都需要开展更多的数值模拟研究。

本研究的模拟评估结果表明实际作业起到了一定的消减雨作用，但从保障的角度而言，理想的效果是使目标区内的降水停止或至少要大幅减弱，而此次催化作业的最大减雨量远低于自然降水量，其减雨强度

并未达到保障需求,单纯的增加催化剂量,减雨效果的增加也有限,因此,需要探索更为优化的作业方案,根据云系的发展演变,结合催化的作业方式,进行合理的作业布点,选择合适的作业时间、部位、用弹量等,通过综合的调整优化,来达到最大限度发挥催化剂效力的目的,这一过程中,催化模式可以发挥重要的作用,有必要深入开展这方面的试验研究。

参考文献 (References)

- 陈宝君, 李爱华, 吴林林. 2016. 暖底对流云催化的微物理和动力效应的数值模拟 [J]. 大气科学, 40(2): 271–288. Chen Baojun, Li Aihua, Wu Linlin. 2016. Modeling the microphysical and dynamical effects of silver iodide seeding of warm-based convective clouds [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 40(2): 271–288. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1503.14271
- Chen B, Xiao H. 2010. Silver iodide seeding impact on the microphysics and dynamics of convective clouds in the high plains [J]. Atmos. Res., 96: 186–207. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2009.04.001>
- 陈德辉, 胡志晋, 徐大海. 2004. CAMS 大气数值预报模式系统研究 [M]. 北京: 气象出版社, 190pp. Chen Dehui, Hu Zhijin, Xu Dahai, et al. 2004. Study on CAMS atmospheric numerical prediction model system (in Chinese) [M]. Beijing: China Meteorological Press, 190pp.
- 陈敏, Huang X, Wang W. 2012. 数字滤波初始化(DFI)在高水平分辨率模式中的应用 [J]. 气象学报, 70(1): 109–118. Chen Min, Huang Xiangyu, Wang Wei. 2012. Difficulties in the implementation of the digital filter initialization in a high resolution numerical weather forecast model. Acta Meteorologica Sinica, 70(1): 109–118
- Ćurić M, Janc D. 1990. Numerical study of the cloud seeding effects [J]. Meteor. Atmos. Phys., 42: 145–164. <https://doi.org/10.1007/BF01041762>
- Ćurić M, Janc D. 1993. Dependence of the simulated seeding effects of Cb cloud on the types of the AgI agents [J]. Meteor. Atmos. Phys., 52: 91–100. <https://doi.org/10.1007/BF01025755>
- Ćurić M, Janc D, Vučković V. 2006. Seeding agent dispersion within convective cloud as simulated by a 3-D numerical model [J]. Meteor. Atmos. Phys., 92: 205–216. <https://doi.org/10.1007/s00703-005-0159-2>
- Ćurić M, Janc D, Vučković V. 2007. Cloud seeding impact on precipitation as revealed by cloud-resolving mesoscale model [J]. Meteor. Atmos. Phys., 95: 179–193. <https://doi.org/10.1007/s00703-006-0202-y>
- 党娟, 苏正军, 房文, 等. 2016. 三七炮弹的碘化银成核率检测 [J]. 应用气象学报, 27(2): 140–147. Dang Juan, Su Zhengjun, Fang Weng, et al. 2016. The experiment of ice nucleus generating efficiency by model 37 silver iodide shell [J]. J. Appl. Meteor. Sci. (in Chinese), 27(2): 140–147. doi:10.11898/1001-7313.20160202
- 党娟, 苏正军, 房文, 等. 2018. 几种碘化银焰剂成冰性能检测 [J]. 气象科技, 46(3): 619–624. Dang Juan, Su Zhengjun, Fang Wen, et al. 2018. Examination and analysis of ice nucleating properties of several AgI pyrotechnic nucleants [J]. Meteor. Sci. Technol. (in Chinese), 46(3): 619–624. doi:10.19517/j.1671-6345.20170290
- Farley R D, Nguyen P, Orville H D. 1994. Numerical simulation of cloud seeding using a three-dimensional cloud model [J]. The Journal of Weather Modification 26(1): 113–124
- Garstang M, Brientjes R, Serafin R, et al. 2005. Weather modification: finding common ground [J]. Bull. Amer. Meteor. Soc., 86(5): 647–656. <https://doi.org/10.1175/BAMS-86-5-647>
- 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. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2005.04.005>
- Hashimoto A, Murakami M. 2016. Numerical simulations of glaciogenic cloud seeding with dry ice pellets and liquid carbon dioxide under simplified conditions [J]. SOLA, 12: 22–26. <https://doi.org/10.2151/sola.2016-005>
- 何观芳, 胡志晋. 1991. 人工影响积雨云机制的数值研究 [J]. 应用气象学报, 2(1): 32–39. He Guanfang, Hu Zhijin. 1991. Numerical study on mechanism of artificial modification of cumulonimbus clouds [J]. J. Appl. Meteor. Sci. (in Chinese), 2(1): 32–39
- 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]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 17(1): 46–58. doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2011.10043
- 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.

[https://doi.org/10.1175/1520-0450\(1980\)019<0950:NSOIPC>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0450(1980)019<0950:NSOIPC>2.0.CO;2)

- 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 Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 18(5): 612–622
- 洪延超. 1998. 三维冰雹云催化数值模式 [J]. 气象学报, 56(6): 641–653. Hong Yanchao. 1998. A 3-D hail cloud numerical seeding model [J]. Acta Meteorologica Sinica, 56(6): 641–653
- 胡志晋, 何观芳. 1987. 积雨云微物理过程的数值模拟(一)微物理模式 [J]. 气象学报, 45(4): 467–484. Hu Zhijin, He Guanfang. 1987. Numerical simulation of microprocesses in cumulonimbus clouds (I) Microphysical model [J]. Acta Meteorologica Sinica, 45(4): 467–484
- 胡志晋, 严采繁. 1986. 层状云微物理过程的数值模拟(一)微物理模式 [J]. 气象科学院院刊, 1(1): 37–52. Hu Zhijin, Yan Caifan. 1986. Numerical simulation of microphysical processes in stratiform clouds (I) Microphysical model [J]. Journal of Academy of Meteorological Science (in Chinese), 1(1): 37–52
- 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
- 李红斌, 周德平, 濮文耀. 2005. 火箭增雨作业部位和催化剂量的确定 [J]. 气象, 31(10): 42–46. Li Hongbin, Zhou Deping, Pu Wen Yao. 2005. The determination of catalyzing points and project quantity in rocket rain enhancement [J]. Meteor. Mon. (in Chinese), 31(10): 42–46
- 黎祖贤, 刘红武, 廖俊, 等. 2016. 基于外弹道计算的人影高炮作业安全评估方法 [J]. 气象科技, 44(1): 152–156. Li Zuxian, Liu Hongwu, Liao Jun, et al. 2016. A safety assessment method of weather modification operation based on external trajectory calculation [J]. Meteor. Sci. Technol. (in Chinese), 44(1): 152–156
- 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 Meteorologica Sinica, 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
- 刘卫国, 陶玥, 周毓荃. 2021a. 层状云催化宏观物理响应的数值模拟研究 [J]. 大气科学, 45(1): 37–57. Liu Weiguo, Tao Yue, Zhou Yuquan. 2021a. Numerical simulation of the macro and micro physical responses of stratiform cloud seeding [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 45(1): 37–57. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2005.19209
- 刘卫国, 陶玥, 周毓荃, 等. 2021b. 基于飞机真实轨迹的一次层状云催化的增雨效果及其作用机制的模拟研究 [J]. 气象学报, 79(2): 340–358. Liu Weiguo, Tao Yue, Zhou Yuquan, et al. 2021. Simulation of stratiform cloud seeding, its rainfall enhancement effect and mechanism study based on a real trajectory of aircraft [J]. Acta Meteorologica Sinica, 79(2): 340–358. doi:10.11676/qxxb2021.011
- 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): 782–793. Lou Xiaofeng, Sun Jing, Shi Yueqin, et al. 2014. Numerical study of the AgI seeding principle for decreasing the convective cloud rainfall [J]. Acta Meteorologica Sinica, 72(4): 782–793. doi:10.11676/qxxb2014.044
- 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. [https://doi.org/10.1175/1520-0450\(1995\)034<0834:ACOSAN>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0450(1995)034<0834:ACOSAN>2.0.CO;2)
- Orville, H D. 1996. A review of cloud modeling in weather modification [J]. Bull. Amer. Meteor. Soc. 77(7): 1535–1556
- 秦长学. 2005. 火箭增雨作业相关技术研究 [J]. 气象科技, 33(增刊): 71–73. Qin Changxue. 2005. Study of rocket cloud-seeding techniques [J]. Meteor. Sci. Technol. (in Chinese), 33(suppl.): 71–73
- Reisin T, Tzivion S, Levin Z. 1996. Seeding convective clouds with ice nuclei or hygroscopic particles: a numerical study using a model with detailed microphysics [J]. J. Appl. Meteor. 35(9): 1416–1434. [https://doi.org/10.1175/1520-0450\(1996\)035<1416:SCCWIN>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0450(1996)035<1416:SCCWIN>2.0.CO;2)
- Simpson J, Simpson R H, Andrews D A, et al. 1965. Experimental cumulus dynamics [J]. Rev. Geophys. 3(3): 387–431. <https://doi.org/10.1029/RG003i003p00387>
- Simpson J, Wiggert V. 1969. Models of precipitating cumulus towers [J]. Mon. Wea. Rev. 97(7): 471–489. [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1969\)097<0471:MOPCT>2.3.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1969)097<0471:MOPCT>2.3.CO;2)
- 孙百安, 姜水平. 2010. 风对 BL-1A 型增雨防雹火箭弹道的影响及修正 [J]. 气象科技, 38(5): 625–628. Sun Baian, Jiang Shuiping. 2010. Effect of winds on trajectory of BL-1A hail-suppressing/rain-enhancing rockets and its correction [J]. Meteor. Sci. Technol. (in Chinese), 38(5): 625–628
- 陶玥, 齐彦斌, 洪延超. 2009. 霰粒子下落速度对云系及降水发展影响的数值研究 [J]. 气象学报, 67(3): 370–381. Tao Yue, Qi Yanbin, Hong Yanchao. 2009. Numerical simulations of the influence of the graupel fall terminal velocity on cloud system and precipitation development [J]. Acta Meteorologica Sinica,

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

许焕斌. 2014. 人工影响天气动力学研究 [M]. 北京: 气象出版社, 145pp. Xu Huanbin. 2014. The studies of dynamics in Weather Modification (in Chinese) [M]. Beijing: China Meteorological Press, 145pp.

Xue L L, Hashimoto A, Murakami M, et al. 2013. 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(6): 1433–1457. <https://doi.org/10.1175/JAMC-D-12-0148.1>

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]. J. Appl. Meteor. Climatol., 55(2): 445–464. <https://doi.org/10.1175/JAMC-D-15-0115.1>

杨绍忠. 2006. 含碘化银人工冰核检测问题 [J]. 气象, 32(11): 25–31. Yang Shaozhong. 2006. Detection about AgI type seeding agents of China [J]. Meteor. Mon. (in Chinese), 32(11): 25–31

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 [J]. 气象学报, 60(2): 205–214. Yu Xing, Wang Xiaoling, Dai Jin. 2002. Research on simulation of effective range for cloud seeding by aircraft within super-cooled stratus [J]. Acta Meteorologica Sinica, 60(2): 205–214

查思佳, 张慧娇, 李逍潇, 等. 2020. 2014 年南京青奥会开幕式日降水过程数值模拟研究 [J]. 大气科学, 44(6): 1258–1274. Zha Sijia, Zhang Huijiao, Li Xiaosa, et al. 2020. Numerical simulation of precipitation processes during the Opening Ceremony of the Nanjing 2014 Youth Olympic Games [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 44(6): 1258–1274. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2002.19200

张慧娇. 2018. 南京青奥会开幕式人工催化消减雨作业的效果和机理研究[D]. 南京大学硕士学位论文, 99pp. Zhang Huijiao. 2018. Study on the effect and mechanism of mitigating or suppressing precipitation by cloud seeding on Opening Ceremony of Nanjing Youth Olympic Games[D]. M.S. thesis (in Chinese), Nanjing University, 99pp.

张雨芳. 2017. 多单体对流云团的自然发展和人工催化的数值模拟[D]. 国防科技大学硕士学位论文, 84pp. Zhang Yufang. 2017. Research on the simulation and cloud seeding experiment of one multi-cell convective cloud process[D]. M.S. thesis (in Chinese), National University of Defense Technology, 84pp.