

刘香娥,高茜,何晖,等. 2016. 碘化银冷云催化的数值模拟研究. 气象, 42(3):347-355.

碘化银冷云催化的数值模拟研究^{* 1}

刘香娥^{1,2,3} 高茜^{1,2} 何晖^{1,2} 嵇磊^{1,2}

1 北京市人工影响天气办公室,北京 100089

2 中国气象局北京城市气象研究所,北京 100089

3 北京云降水物理研究与云水资源开发重点实验室,北京 100089

提 要: 利用加入碘化银冷云催化模块的中尺度数值模式 WRF 对 2014 年 5 月 9—11 日发生在华北地区的一次降雨天气过程进行了增雨催化数值模拟研究。模式的催化参数根据实际增雨作业信息进行设置,探讨了增雨的效果和机理,并针对催化高度和催化剂量进行了两组敏感性试验。结果表明:在高度 5~6 km,温度 -20~-15℃ 左右的冷云区位置引入碘化银冷云催化剂可使地面降水量显著增加。地面增雨开始于作业后 30 min 左右,70 min 左右达到最大,90 min 后出现减雨,110 min 后减雨效果大于增雨。增雨机制主要为:碘化银的播撒使融化层之上云中的过冷水含量显著减少,冰雪晶的含量增加,雨滴碰并雪的过程和雨滴捕获云滴的过程增强;增加的雪晶下落到暖区融化成雨滴的过程增多,最终造成地面降雨量的显著增加。从微物理过程的量级来看,雪晶粒子的融化是导致降水增加的最主要过程。不同催化高度和催化剂量的敏感性试验结果表明,针对这次过程在过冷云水丰富,温度较低而冰雪晶含量相对较少的高度进行催化效果较好。继续加大催化剂量,可以起到更好的增雨效果。

关键词: 碘化银,冷云催化,增雨机制

中图分类号: P481.456

文献标志码: A

doi: 10.7519/j.issn.1000-0526.2016.03.010

Numerical Simulation Research on Silver Iodide Cold Cloud Seeding

LIU Xiang^{1,2,3} GAO Qian^{1,2} HE Hui^{1,2} JI Lei^{1,2}

1 Beijing Weather Modification Office, Beijing 100089

2 Institute of Urban Meteorology, CMA, Beijing 100089

3 Key Laboratory of Beijing for Cloud, Precipitation and Atmospheric Water Resources, Beijing 100089

Abstract: Numerical simulation research on silver iodide (AgI) cold cloud seeding is conducted, focusing on the precipitation process that happened in North China from 9 to 11 May 2014. The WRF model coupled with silver iodide cold cloud catalytic module is used and the model parameter settings are based on actual artificial precipitation operations. The effect and mechanism of the precipitation are discussed and then two sensitivity tests on operation height and catalyst content are carried out. The results show that seeding appropriate catalyst content of AgI at about 5—6 km height and temperature of -20—-15℃ can make ground precipitation increased significantly. Ground rain enhancement begins at about 30 minutes after seeding operation, and 70 minutes to reach the maximum, while rain reduction occurs after 90 minutes, and 110 minutes later the reduction of rain is more than the increase of rain. The main mechanism for precipitation is as follows. The AgI seeding makes the cold water content above the melting layer in cloud remarkably reduced, snow and ice content increased, and coalescence processes of rain and snow and rain capture

* 北京市自然科学基金资助项目(6154027)、中国气象局预报预测核心业务发展专项(CMAHX20160202)、公益性行业(气象)科研专项(GYHY201306065)、国家自然科学基金项目(41205100 和 41375136)、中央高校基本科研业务费专项资金(NJ20140015)和国家电网公司科技项目(GCB17201400162)共同资助

2015 年 3 月 18 日收稿; 2015 年 8 月 3 日收修定稿

第一作者:刘香娥,主要从事云降水物理研究. Email: lxe3399@163.com

cloud droplets enhanced. Increased snow crystals fall into the warm zone and melt into raindrops, then the rainfall significantly increases. Regarding the magnitude of microphysical processes, the snow particles' melting is the main process leading to increased precipitation. Results of the two sensitivity tests show that the catalytic effects are better when seeding in clouds with rich super-cooled cloud water, low temperature and low ice crystal content, and increasing the amount of catalyst could have better seeding result.

Key words: silver iodide, cold cloud seeding, precipitation mechanism

引 言

对过冷云系播撒成冰剂进行催化是目前人工有意识降水催化的主要手段之一。碘化银(AgI)作为人工冰核,因其成核率高而成为常用的冷云催化剂。人工防雹的原理就是通过播撒大量人工冰核争食云中的过冷水滴使冰雹无法长大从而达到防雹的目的。

随着数值模式中微物理参数化方案的不断完善,数值模式已经成为人工影响天气理论研究及指导人影作业的重要工具。20世纪80年代以来已经发表了许多关于冷云催化数值模拟及其在人工防雹、增雨等方面的研究工作。国际上,Hsie等(1980)在Orville等(1977)的积云模式中增加了播撒AgI粒子的守恒方程,以便模拟播云作用,并考虑了碰冻过程和云冰的聚并过程。Koenig等(1983)、Levy等(1984)利用二维和三维云模式分析了增加冰晶数浓度对降水的影响。Farley等(1994)利用三维云模式研究了AgI和惰性气体在云中的运动及碘化银对云和降水的影响。Fritsch等(1981)利用中尺度模式研究了播撒的动力学效应。在国内,何观芳等(1991)采用一维时变模式对积雨云进行了人工播撒冰晶的研究。毛玉华等(1993)利用二维双参数雹云模式进行了人工冰晶和小水滴的播撒模拟,证实了适当播撒能消雹增雨。黄燕等(1994)发展了二维AgI云播撒模式,研究了播撒对云微物理结构的影响。洪延超(1998;1999)发展了三维双参数碘化银播撒模式,并进行催化防雹的机制研究。Guo等(2006;2007)建立了三维冰粒子分档播撒模式,通过设置不同播撒位置、播撒时间、播撒率等敏感试验分析了对云动力、微物理等过程的影响。史月琴等(2008)、孙晶等(2010)、高茜等(2011)利用CAM5中尺度云模式,通过在显式方案中直接改变冰晶数浓度的方法进行了催化数值试验。方春刚等(2009)和何晖等(2012)分别在中尺度模式WRF和MM5的显式云物理方案中加入了入AgI播撒剂与云

相互作用的过程并进行了催化模拟研究。在基于模式的基础上,利用飞机增雨做了研究和尝试(秦彦硕等,2015;嵇磊等,2014;孙晶等,2015)。

以上的数值试验基本都是基于模式进行的理论研究,普遍缺乏与外场实际作业的结合。本文利用耦合了AgI冷云催化过程的WRF中尺度模式(黄燕等,1994;Guo et al,2006;方春刚等,2009;何晖等,2012)对2014年5月9—11日发生在华北地区的一次降水过程进行了模拟研究,在对自然降水模拟较为成功的基础上,根据北京市人工影响天气办公室对此次降水过程的实际作业信息进行了催化模拟,分析了此次催化作业的增雨效果和机制,并通过设计不同催化剂量、催化高度的敏感性试验,对不同作业方法的效果进行了对比,从而为实际播撒或人影作业方式方法提供更多的参考。

1 个例概况及增雨作业情况

1.1 个例介绍

2014年5月10—11日,受江淮气旋北抬与黄河低压东移的共同影响,华北地区出现一次明显的较大范围降雨天气过程(蔡雪薇等,2014)。受此过程影响北京市出现入春后的首场大范围明显降雨天气,全市普降中雨。这次过程降水持续时间长,过程累计雨量较大,雨势平稳,雨强较小,雨量分布较均匀。北京市平均降雨量18.1 mm,城区平均20.0 mm。

1.2 实际增雨作业情况

2014年5月9—11日北京市人工影响天气办公室组织增雨飞机运十二型3830号、空中国王350ER型3587号,在官厅水库上游张家口地区和拒马河上游保定地区开展增雨作业。此次过程累计飞行7个架次,22 h39 min,增雨作业时间7 h39 min,燃烧机载碘化银烟条61根。图1给出该时段的飞机飞行路线图。

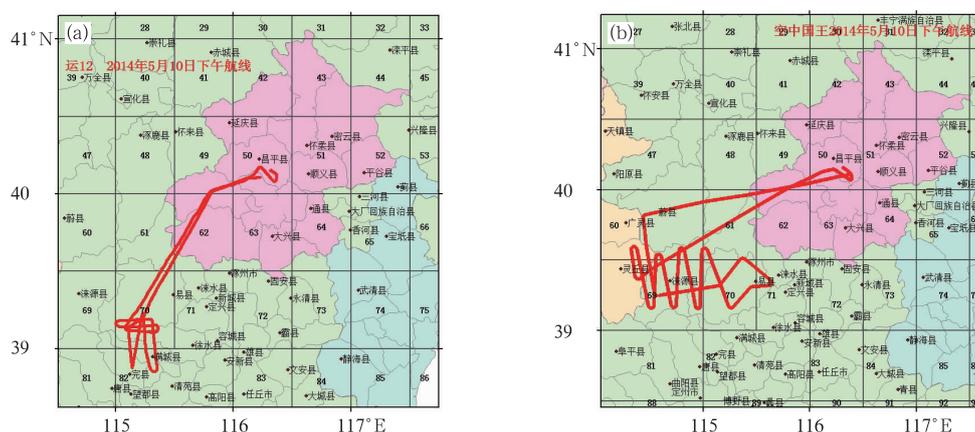


图 1 2014 年 5 月 10 日下午飞机飞行轨迹图

Fig. 1 Flight tracks on 10 May 2014

2 模式和试验设计

2.1 冷云催化模块介绍

WRF 中尺度数值模式中的 Morrison 2-moment 方案包括了水汽、云水、雨水、云冰、雪、霰等的比含水量以及雨水、云冰、雪、霰等的比数浓度预报量。文中运用的冷云催化模块是在该微物理方案中加入了碘化银的预报方程,主要考虑了云滴和雨滴与 AgI 粒子的接触冻结核化、水汽在人工冰核上的凝华核化(包括凝华-冻结核化)过程。具体的预报方程及云微物理过程在文献(黄燕等,1994;何晖等,2012;2014;方春刚等,2009)中有详细描述,在此不再赘述。理论上冰晶的核化除了上述三种机制,还包括浸润冻结核化,有观测和一些数值模拟试验表明,浸润冻结核化对播撒效果的影响并不显著(Deshler 等,1990;Chai et al, 1993;Li et al, 1997),因此文中所用的催化模块没有考虑这种成核机制。

2.2 试验设计

本文利用的 WRF(Weather Research and Forecasting)模式是由 NCAR、NCEP 和 FSL/NOAA 等联合开发研制的中尺度数值模式。本文采用 Kain-Fritsch 积云对流参数化方案、Morrison 2-moment 云微物理显式方案、RRTM 长波辐射计算方案、Dudhia 短波辐射计算方案、Monin-Obukhov 边界层方案。模式采用三重嵌套,格距分别是 27、9、3 km。模式在垂直方向上分 27 层,水平格点数分别

为 100×100 、 148×148 、 268×268 。采用分辨率为 $1^\circ \times 1^\circ$,时间间隔为 6 h 的 NCEP 再分析资料作为模式初始场和侧边界条件。模拟选用欧拉质量坐标和 Runge-Kutta 3rd 时间积分方案,在格距为 27 和 9 km 的区域分别采用 Kain-Fritsch 积云对流参数化方案和 Morrison 2-moment 云微物理显式方案,在格距 3 km 的区域仅采用显式方案。模拟的开始时间为 2014 年 5 月 9 日 12 时(世界时),共模拟 48 h。最内层嵌套每 3 min 输出一次结果。

2.3 模拟结果对比分析

2.3.1 实测和模拟的天气形势分析

模拟所得形势场与 NCEP 再分析数据形势场基本一致,10 日 08 时 500 和 700 hPa 图上显示,华北地区受蒙古低涡影响,北京处于槽前西南气流控制之下,且处于气压梯度大值区。在 850 hPa 高空图上,槽线接近北京上空。模式较好地模拟了不同高度层上此次降水过程的影响系统及其移动(图略)。

2.3.2 模拟和实测的云场

因实际获得的降水信息包含人影催化作业的效果,因此文中选用模拟格点水成物所代表的云场与实际的卫星云图进行比较,我们把 700 hPa 高度以上各格点水成物比质量做垂直相加,得出云带的分布。从 MICAPS 红外云图可以看出,此次过程为较大范围的降水过程,整个华北地区都被厚重的云系覆盖,另外,在山西、内蒙古两省交界附近有带状云带存在。从图 2 可以看出,模拟的主要云系分布和走向与实际比较接近,模拟效果较好。

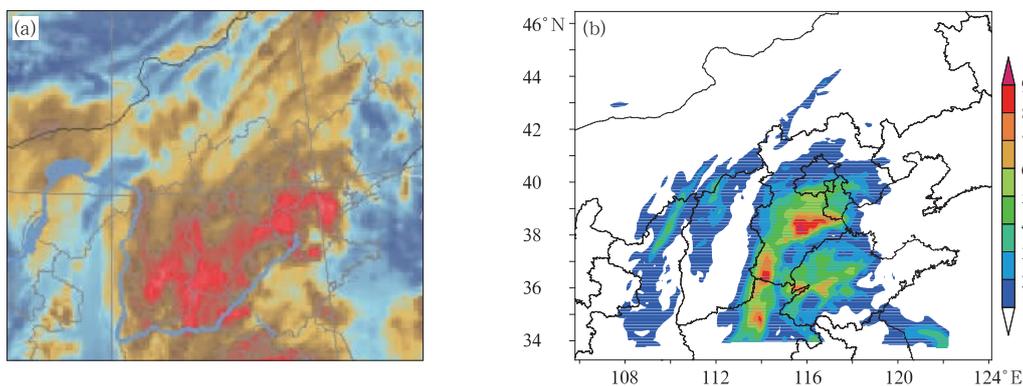


图 2 实测(a)和模拟(b)的 2014 年 5 月 10 日 17 时云场

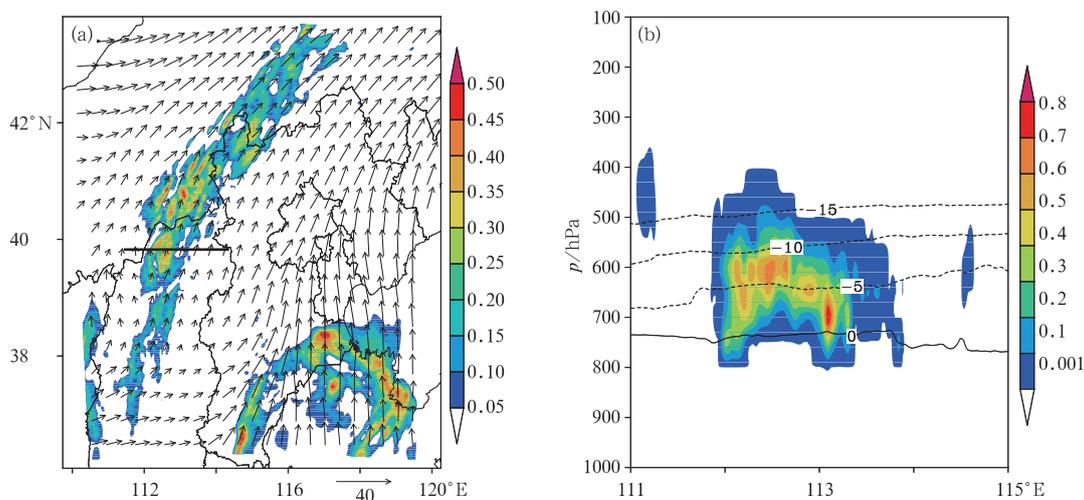
Fig. 2 Observed (a) and simulated (b) cloud images at 17 BT 10 May 2014

3 碘化银冷云催化试验

3.1 催化试验设计

北京市人工影响办公室于 5 月 10 日下午在北京西南部的河北保定地区进行了两个架次的飞机增雨作业,实际作业的时段为 17:56—19:04,作业区域在(39.16°N、115.08°E)附近,飞机在约 4500 m 的高空共点烟条 18 根,合计播撒碘化银 180 g。在该时段,没有相应的地基火箭或高炮作业。文中选择参照这个时段的实际飞机作业信息对模式催化参

数进行设置。选取在与实际作业高度 4500 m 接近的模式垂直层第 12 层进行 AgI 播撒,作业开始的时间选取与实际作业时间接近的 18:00,播撒剂量为与实际相同的 180 g,考虑到模拟云系与实际云系的差异,为了达到与实际作业相匹配云系的位置,模拟播撒的区域调整为图 3a 黑线所示的位置(39.6°~40°N、112.4°~113°E),此时该区域的温度低于 -10°C ,过冷云水含量为 $0.3\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 左右,风向为西南风。在此基础上进行了不同催化高度和不同催化剂量的人工播撒敏感性试验,对不同作业方案的效果进行对比分析。

图 3 2014 年 5 月 10 日 18 时 550 hPa 的云水(填色,单位: $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)及风场(a),沿图 3a 黑线位置的垂直剖面(b)Fig. 3 (a) Cloud water content (shaded, unit: $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$) and winds at 550 hPa, (b) cross-section along black line in Fig. 3a (Black dashed lines represent temperature, unit: $^{\circ}\text{C}$)

3.2 催化后降水的演变

图 4 给出催化后降水量较自然云降水的差值演变。可以看出,催化作业 30 min 之后地面降水开始出现变化,增雨效果开始显现,此时的增雨量不大,3 min 净增雨量最大仅为 0.004 mm 左右;70 min 后,增雨的范围和量级显著增加,增雨面积增加了近

一倍,中心 3 min 净增雨量最大大于 0.05 mm,接近甚至超过了该地区的自然降水。此后慢慢出现减雨区,但仍以增雨为主;催化后 110 min 时,消雨效果大于增雨,3 min 最大减雨量大于 0.02 mm。计算得到本次催化增雨作业 3 min 的净增雨量最大约为 23 万 t 左右,累积的增雨量最大为 230 万 t 左右,增雨效果比较显著。

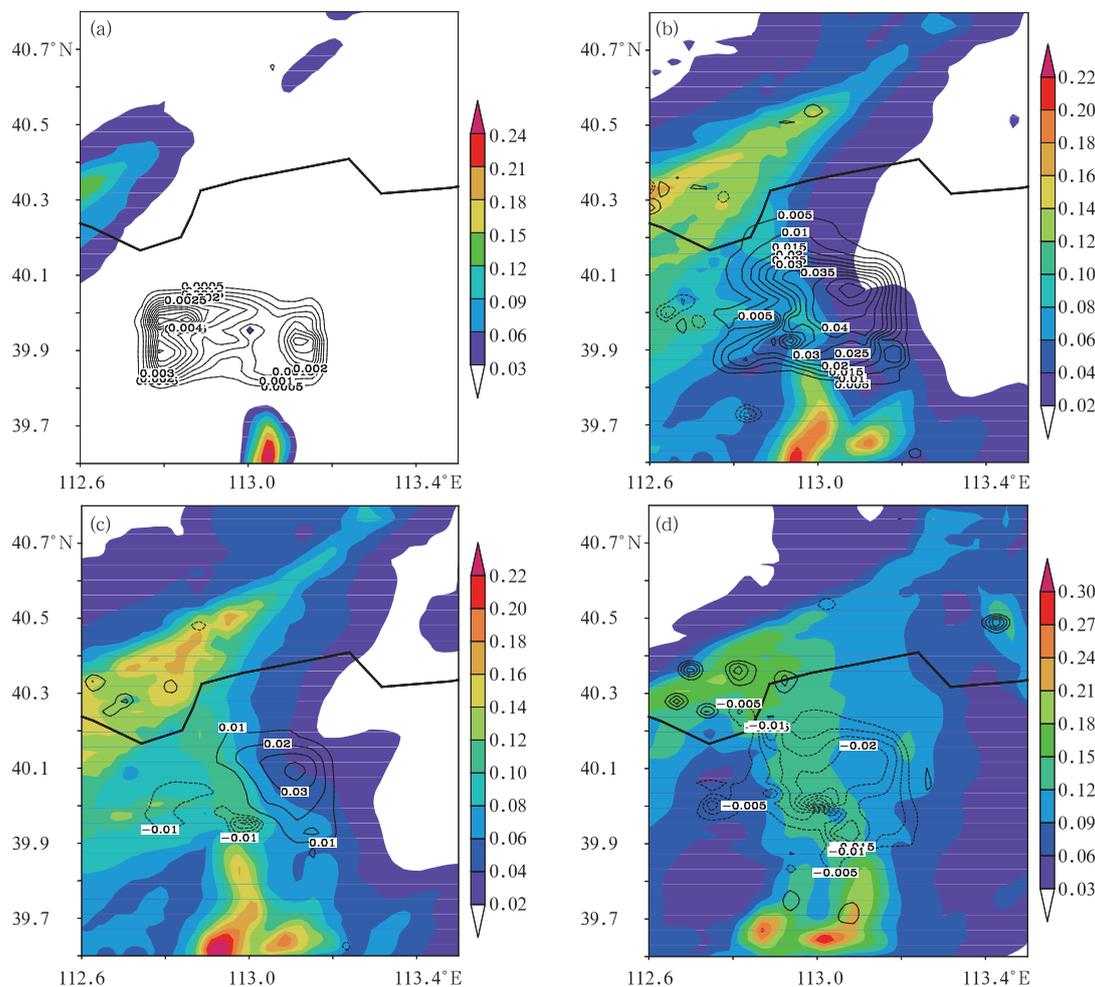


图 4 催化后降水量与自然降水量差值(单位: mm)

和自然降水量(阴影, 单位: mm)演变

- (a)催化后 36 min 的 3 min 降水量, (b)催化后 72 min 的 3 min 降水量,
(c)催化后 81 min 的 3 min 降水量, (d)催化后 111 min 的 3 min 降水量

Fig. 4 The rainfall variation in 3 min and natural rainfall (shaded, unit: mm)

(a) 36 min after seeding, (b) 72 min after seeding, (c) 81 min after seeding, (d) 111 min after seeding

3.3 增雨机制分析

图 5 是增雨作业效果较为显著时(催化作业后 1 h)沿 39.92°N 的催化云和自然云各物理量差值的東西向剖面。图中显示,在 0°C 层之上,与 AgI 粒子

分布相对应,催化区域过冷云水含量明显减少,同时冰晶和雪晶的比质量大量增加,这主要是因为播撒的 AgI 粒子与云中的过冷云水发生接触冻结核化,使云水转化为冰晶,增多的冰晶因为攀附聚并而转变为雪晶。霰的比质量浓度总体在减少,一方面是

因为云水的减少使淙附过程减弱,另一方面增多的冰雪晶因凝华增长消耗了大量的水汽,抑制了霰的凝华增长。在 0°C 层之下,冰雪晶增加区域的下方,

雨滴的质量浓度显著增加,这主要是增多的冰雪晶下落融化的结果。云中微物理相态转变引起温度变化, 0°C 层之上在冰晶和雪晶大量增多的区域,因为

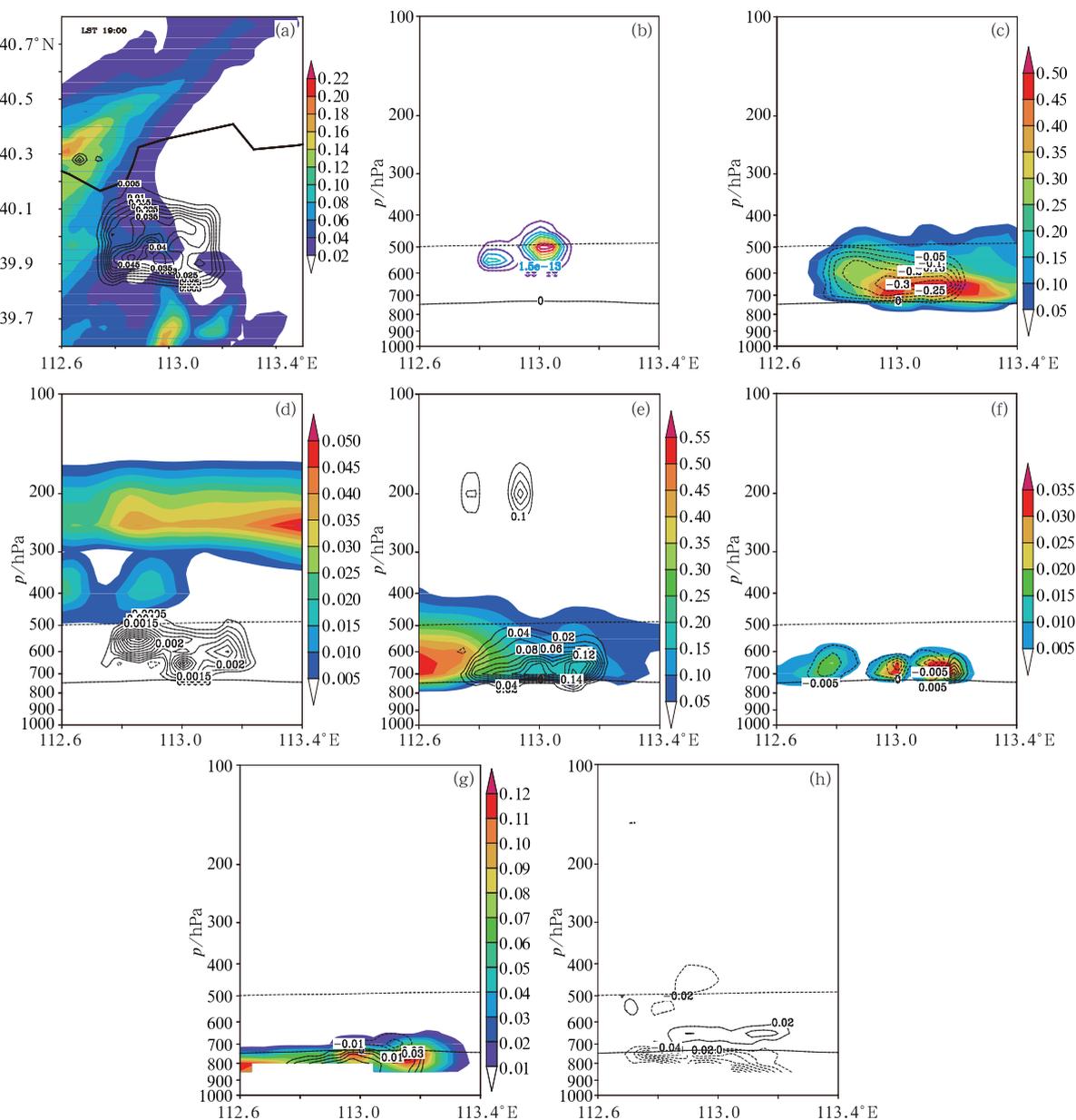


图 5 催化后 1 h 降水和沿 39.92°N 催化云和自然云各物理量的差值和自然云各物理量(阴影)分布

- (a)降雨量(单位:mm), (b)碘化银比质量(单位: $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$), (c)云水比质量(单位: $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$), (d)冰晶比质量(单位: $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$), (e)雪晶比质量(单位: $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$), (f)霰比质量(单位: $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$), (g)雨滴比质量(单位: $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$), (h)温度(单位: $^{\circ}\text{C}$)

Fig. 5 Difference of (a) rainfall (unit: mm), (b) AgI content (unit: $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$), (c) cloud water content (unit: $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$), (d) ice crystal content (unit: $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$), (e) snow content (unit: $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$), (f) graupel content (unit: $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$), (g) rain drop content (unit: $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$), (h) temperature (unit: $^{\circ}\text{C}$) in one hour after seeding operation and vertical cross-section along 39.92°N (seeding variables minus natural ones)

冰雪晶的凝华增长,释放大量潜热,最大增温达到 0.04°C ; 0°C 层之下因为冰雪晶的融化吸收潜热致冷,最大降温高于 0.08°C 。可以看出,雨水的增加主要归因于增加的冰雪晶下落至 0°C 层以下的融化。

下面对雨滴的源汇项进行解析,图 6 给出与雨滴相关微物理过程量催化试验与控制试验差值的垂直分布图。在 Morrison 方案中,与雨滴相关的过程一共有 12 个,其中雨滴收集雪、冰晶淞附雨滴转换成霰,雪和霰碰并雨滴产生冰晶这四个过程的贡献

均为零,雨滴接触冻结成霰和冰晶撞冻雨滴转换成雪的过程转化率较小,以上这些转化项在图中均被略去。图中可以看到,云水的减少导致 0°C 层之上云雨自动转换(Prc)过程显著减少,雪晶和霰粒子的增多导致两者在融化层下融化成雨水的过程显著增强(Psmilt 和 Pgmilt),雨滴碰并雪的过程(Pracs)和雨滴捕获云滴的过程(Pra)增强,雨滴的增多导致蒸发量(Pre)增大。此外,从以上几个微物理过程转换的量级来看,雪晶粒子的融化是导致降水增加的最主要过程。

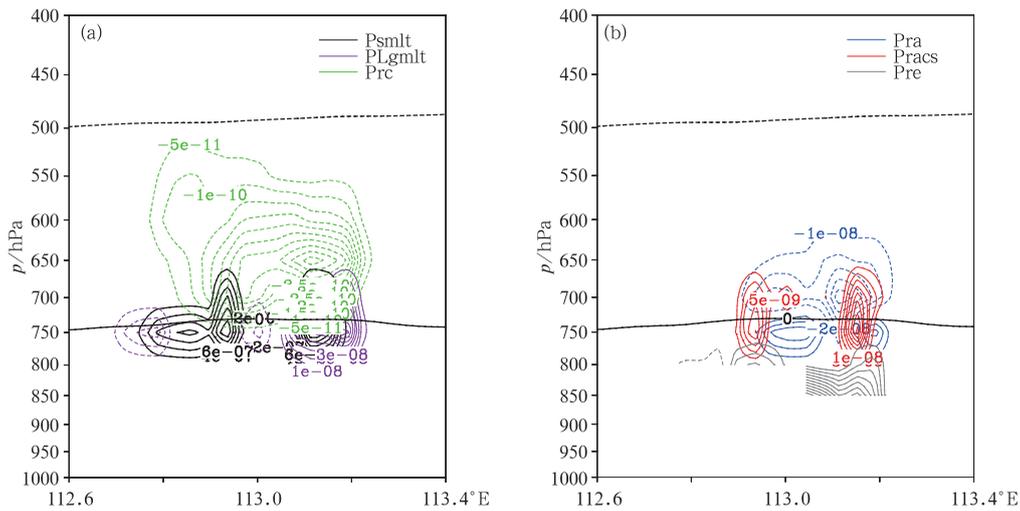


图 6 催化后 1 h 通过 39.92°N 的雨滴源汇项
(催化后的值减去相应自然云的值)

Fig. 6 Difference of the microphysical conversion rates of raindrop at 39.92°N in one hour after seeding operation
(Seeding variables minus natural ones)

4 不同高度、不同剂量的催化敏感试验

4.1 不同高度催化试验

如前文提到,数值催化试验的播撒高度是参照了实际作业高度(4500 m 高空)而选择在模式的第 12 层进行,为了研究在不同高度进行催化时催化效果的差异,以 180 g 的播撒剂量进行了不同高度的催化模拟试验,雨量统计选取了播撒可能影响的下游区域($39.5^{\circ}\sim 42^{\circ}\text{N}$ 、 $112.2^{\circ}\sim 115^{\circ}\text{E}$,下同)。图 7 是在不同的播撒高度进行催化后,地面累积增雨量随时间的演变。可以看出,在第 13 层催化,增雨效果最好,第 12 和 14 层效果次之。

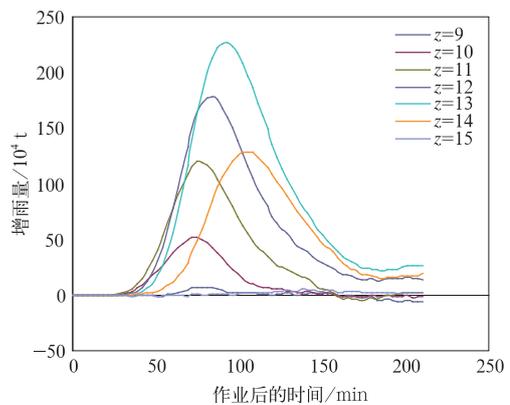


图 7 在不同高度进行催化时的地面累积净增水量随时间的演变

Fig. 7 Temporal evolution of net surface rainfall increment at different seeding levels

为分析在不同高度播撒产生不同增雨效果的原因,表 1 给出在催化时刻催化区域在不同高度上的物理量平均值。由于 AgI 粒子在环境中被活化的温度阈值为 -5°C ,因此在温度稍高的区域(第 9、10、11 层)播撒增雨效果不好,并且由于上升气流不大,在此区播撒的 AgI 粒子很难被带到高层的低温区,这也影响了增雨效果。AgI 的播撒应该选择过冷水含量比较丰富且冰雪晶含量偏少的区域,同时

由于 AgI 粒子在低于 -20°C 的环境中会被全部活化,因此应选择温度尽可能接近或低于 -20°C 的区域播撒。因此在第 12 层与第 13 层催化增雨效果最好,虽然 13 层与 12 层比较云水含量并不是更丰富,但可能由于温度更适宜,冰晶含量更少,催化后的冰晶由于重力沉降可以充分利用下层的云水,因此增雨效果很好。

表 1 不同催化高度试验在催化时刻的催化区域物理量平均值

Table 1 Regional mean values of physical quantity at different seeding heights

垂直层	云水含量 / $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$	冰雪晶含量/ $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$	冰雪晶数浓度 / kg^{-1}	垂直速度 / $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	温度/ $^{\circ}\text{C}$
9	0.15	0.024	46	0.034	-1.99
10	0.35	0.027	77	0.06	-3.97
11	0.54	0.024	141	0.077	-6.38
12	0.27	0.013	277	0.082	-10.26
13	0.027	0.009	798	0.068	-14.75
14	0	0.007	2253	0.027	-19.48
15	0	0.008	10661	-0.017	-26.37

4.2 不同剂量的催化试验

人工影响实际作业中由于各种条件的限制,增雨作业的播撒剂量可能并不是最优最合适的,为了检验此次作业剂量的增雨效果,文中在以上分析的基础上设置了不同播撒剂量的敏感性试验,分析播撒不同剂量的催化剂对降水的影响。图 8 是以不同剂量进行催化时地面累积净增雨量随时间的演变。

可以看出,不同的播撒剂量对地面雨量变化的趋势基本一致。地面累积净增雨量不断增加,到作

业后 80 min 左右达到最大,之后又开始减小。总体增雨效果基本随催化剂量的增加而增加。当播撒剂量达到 9000 g 以上时,增雨效果趋于稳定。总体而言,针对此次降雨过程,从增雨的角度来说,180 g 并不是首选的催化剂量,条件允许可以继续增加或者与地基火箭配合进行同步作业,可以起到更好的增雨效果。

5 结论和讨论

利用耦合了碘化银冷云催化模块的中尺度 WRF 数值模式,参照人工影响实际飞机作业信息对华北地区的一次降水过程进行了催化模拟研究,得出以下结论:

(1) 参照实际的催化作业高度,催化剂量,对模式进行催化,增雨效果明显,在催化作业 30 min 后地面雨量即有反应。70 min 后,增雨的范围和量级显著增加,某些区域的 3 min 净增雨量甚至超过了该地区的自然降水。作业 90 min 后,开始出现减雨,110 min 后减雨效果大于增雨,3 min 最大减雨量大于 0.02 mm。

(2) 分析增雨机制得到,加入的碘化银冷云催化剂使得云中过冷水含量显著减少,而冰雪晶含量增加,增加的冰雪晶下落至零度层下融化成雨并降至地面,最终导致地面雨量增加。从微物理转换过

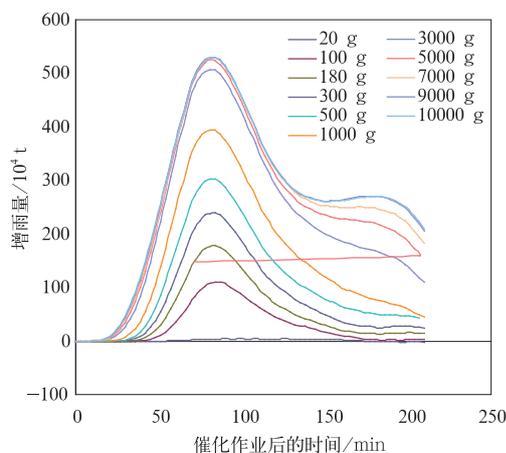


图 8 以不同剂量进行催化时地面累积增水量随时间的演变

Fig. 8 Temporal evolution of net surface rainfall increment by different seeding amount

程的量级来看,雪晶粒子的融化(Psmlt)过程是导致降水增加的最主要过程。

(3) 针对本次过程,对催化高度和催化剂量进行的敏感性试验显示,催化区域选择在过冷云水丰富,高度5~6 km,温度在-20~-15℃左右、冰雪晶含量相对较少的区域进行催化效果较好(如本例中的第12、13和14层);此外针对本次过程飞机作业的播撒剂量偏低,条件允许可以继续加大,同时增加地基火箭配合进行同步作业,可以起到更好的增雨效果。

参考文献

- 蔡雪薇,张芳华. 2014. 2014年5月大气环流和天气分析. 气象, 40(8):1026-1032.
- 方春刚,郭学良,王盘兴. 2009. 碘化银播撒对云和降水影响的中尺度数值模拟研究. 大气科学, 33(3):621-633.
- 高茜,王广河,史月琴. 2011. 华北层状云系人工增雨两个例数值研究. 气象, 37(10):1241-1251.
- 何观芳,胡志晋. 1991. 人工影响积雨云机制的数值研究. 应用气象学报, 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. 气候与环境研究, 17(1):46-58.
- 黄燕,徐华英. 1994. 播撒碘化银粒子进行人工防雹的数值试验. 大气科学, 18(5):612-622.
- 洪延超. 1998. 三维冰雹云催化数值模式. 气象学报, 56(6):641-653.
- 洪延超. 1999. 冰雹形成机制和催化防雹机制研究. 气象学报, 57(1):30-44.
- 毛玉华,胡志晋. 1993. 强对流云人工增雨和防雹原理的二维数值研究. 气象学报, 51(2):184-194.
- 嵇磊,周珺,李宏宇,张磊. 2014. 基于BJ RUC系统的人影冷云催化潜力识别模式平台设计. 气象, 40(8):981-991.
- 秦彦硕,段英,李二杰,等. 2015. 河北大茂山碘化银地面发生器增雪作业影响分析. 气象, 41(2):219-225.
- 史月琴,楼小凤,邓雪娇,等. 2008. 华南冷锋云系的人工引晶催化数值试验. 大气科学, 32(6):1256-1275.
- 孙晶,史月琴,蔡森,等. 2015. 南方三类云系云结构预报和增雨作业条件分析. 气象, 41(11):1356-1366.
- 孙晶,史月琴,楼小凤,等. 2010. 人工缓减梅雨锋暴雨的数值试验. 大气科学, 34(2):337-350.
- Chai S K, Finnegan W G, Pitter R L. 1993. An interpretation of the mechanisms of ice-crystal formation operative in the Lake Almanor cloud-seeding program. J Appl Meteor, 32: 1726-1732.
- Deshler T, Reynolds D W. 1990. The persistence of seeding effects in a winter orographic cloud seeded with silver iodide burned in acetone. J Appl Meteor, 29, 477-488.
- Farley R D, Nguyen P, Orville H D. 1994. Numerical simulation of cloud seeding using a three-dimensional cloud model. J Wea Mod, 26(1): 113-124.
- Fritsch J M, Chappell C F. 1981. Preliminary numerical tests of the modification of mesoscale convective systems. J Appl Meteor, 20(8): 910-921.
- Guo X L, Zheng G G, Jin D Z. 2006. A numerical comparison study of cloud seeding by silver iodide and liquid carbon dioxide. Atmos Res, 79(3): 186-226.
- Guo X L, Fu D H, Zheng G G. 2007. Modeling study on optimal convective cloud seeding in rain augmentation. J Korean Meteor Soc, 43(3):273-284.
- 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.
- Koenig L R, Murray F W. 1983. Theoretical experiments on cumulus dynamics. J Atmos Sci, 40(5): 1241-1256.
- Levy G, Cotton W R. 1984. A numerical investigation of mechanisms linking glaciation of the ice-phase to the boundary layer. J Climate Appl Meteor, 23(11): 1505-1519.
- Li Z, R L Pitter. 1997. Numerical comparison of two ice crystal formation mechanisms on snowfall enhancement from groundbased aerosol generators. J Appl Meteor, 36, 70-85.
- Orville H D, Kopp F J. 1977. Numerical simulation of the life history of a hailstorm. J Atmos Sci, 34(10): 1596-1618.