

楼小凤,师宇,卢广献. 一次降雹过程的 AgI 系列催化模拟研究. 应用气象学报, 2016, 27(2): 129-139.  
doi:10.11898/1001-7313.20160201

# 一次降雹过程的 AgI 系列催化模拟研究

楼小凤<sup>1)2)</sup>\* 师宇<sup>1)2)</sup> 卢广献<sup>1)2)</sup>

<sup>1)</sup>(中国气象科学研究院灾害天气国家重点实验室,北京 100081)

<sup>2)</sup>(中国气象科学研究院,中国气象局云雾物理实验室,北京 100081)

## 摘 要

云数值模拟是研究降雹过程和人工防雹试验的重要手段。利用三维冰雹云 AgI 催化模式,对北京 1996 年 6 月 10 日的一次降雹过程进行 AgI 不同催化高度、催化剂量和催化时间的系列催化模拟试验,并优选催化方案,为外场防雹设计和作业提供依据。在催化系列模拟中发现,不同催化高度的催化剂均在上升到  $-5^{\circ}\text{C}$  高度后开始核化。在 2.1~4.9 km 高度范围内催化,AgI 成核率比较高,防雹效果较好。核化的人工冰晶有效弥补了该高度上自然冰晶的不足。小剂量催化,可在减雹的同时增加部分降雨量,而大剂量催化,在减雹的同时会减少降雨。在催化时间、剂量和高度的系列催化试验中得出,采用在模拟的第 15 分钟在 5 km 高度附近播撒 AgI,连续 4 次以  $5 \times 10^6 \text{ kg}^{-1}$  的催化剂量进行催化,催化效果较好,可减少降雹量约 60%,同时可避免降雨量的大幅减少。

**关键词:** 冰雹模拟; AgI 催化; 系列催化试验

## 引 言

冰雹灾害给人们财产和农作物生产带来严重损失。近年来,我国和美国降雹日数明显下降<sup>[1-2]</sup>,但近 20 年加拿大 Ontario 严重冰雹灾害呈明显增长趋势<sup>[3]</sup>。世界上许多国家开展了人工防雹、消雹外场试验。1995 年世界气象组织(WMO)会议上提出冰雹形成的 6 种假说:①雹胚竞争水分的有限增长(利益竞争的说法),②发生在雹胚区的早期降水,③云水结冰,④轨迹降低,⑤加速了云中的碰并过程,⑥播种的动力效果<sup>[4]</sup>。云遥感观测手段和数值模式,提供了冰雹催化的时机、区域和催化剂剂量等方面的有效信息,但数值模拟还不能给出最后答案。目前已开展了少数防雹随机试验,但还未得出有效结论<sup>[5]</sup>。由于雹云结构十分复杂,冰雹生成机制尚不清楚,根据争食水分概念进行播撒能否起作用值得进一步讨论<sup>[6]</sup>。另一类防雹试验是设想用高炮炮弹、火箭弹在云中爆炸<sup>[7-8]</sup>,可引起云中气流变化并使过冷水滴冻结,从而破坏雹云发展,该理论还需进

一步验证。多普勒天气雷达在对冰雹过程和防雹理论发展中发挥了重要作用,并提高了对冰雹云体的识别和预报能力<sup>[9-14]</sup>。

云数值模式已成为云降水、降雹过程和人工防雹研究的重要手段。雹云中的微物理过程已有较多研究。在冰晶-过冷水-雹胚-冰雹链环中,没有过冷水参与很难形成强烈降雹<sup>[15]</sup>,冰相形成过程释放的潜热可使云体发展更加强盛,甚至引起风暴动力结构和生命史的改变。模拟研究发现,青藏高原雹云中存在较弱的过冷雨水累积带,但雹块的增长主要通过冰雹撞冻云水<sup>[16]</sup>。利用冰雹分档模式<sup>[17]</sup>,证明冰雹云中的“穴道”是冰雹形成和增长的有效区域<sup>[18]</sup>。当云凝结核(CCN)从低浓度增加到高浓度的同时,将云滴谱数浓度从  $100 \text{ cm}^{-3}$  增至  $2100 \text{ cm}^{-3}$ ,发现高 CCN 会影响降雹量和冰雹的大小<sup>[19]</sup>。人工雹胚与自然雹胚之间存在增长竞争机制<sup>[20]</sup>。数值模拟发现雹胚可以是霰粒子<sup>[21]</sup>,也可以是冻滴<sup>[22]</sup>,观测中也发现了这一现象<sup>[23]</sup>。

人工防雹催化效果研究发现,一般在云发展初期(15~20 min),云上升气流中心播撒 AgI 粒子

2015-07-28 收到, 2016-01-25 收到再改稿。

资助项目: 国家自然科学基金项目(41275148), 公益性行业(气象)科研专项(GYHY201406001)

\* email: louxf@camsma.cn

会获得减雹效果。减小播撒强度,可增加降水,但减雹效果变差<sup>[24]</sup>。对云底较暖的冰雹云(约 20℃)在上升气流区进行  $10^5 \text{ kg}^{-1}$  剂量的人工冰晶可减少降水,同时可增加约 25% 降水,而对云底较冷的冰雹云(低于 10℃)防雹效果略差,但仍能增加部分降水<sup>[25]</sup>。在回波强度大于 25 dBZ 的冷区进行 AgI 催化,可在减雹的同时增加降水<sup>[26]</sup>。利用干冰和 AgI 在云顶附近催化,能减少降水并少量增加降水,但干冰催化比 AgI 催化更能抑制冰雹的形成<sup>[27]</sup>。通过施加人工抑制上升气流的方法在雹云发展早期将使地面降水量增加,尤其是使降雹量显著减少<sup>[28]</sup>。而在发展阶段后期不会导致地面降水明显增加。当抑制强度足够大且范围较大时,只有发展到旺盛阶段进行人工抑制才能使降雹量和固态总降水量明显减小。无论播撒剂为 AgI 还是液态  $\text{CO}_2$ ,在最大过冷水区播撒均比最大上升气流区播撒效果好<sup>[29]</sup>。对中等及以下强度的冰雹云,在强回波中心催化即可,对于强冰雹云,一般在冰雹胚胎帘即过冷水累积区中作业效果最好<sup>[30]</sup>。

由于外场人工防雹作业中有地面燃烧炉催化、高炮和火箭催化作业,其催化高度从地面到高空有很大变化。不同的催化作业工具,催化剂量和理想的催化作业时间等均不明确。本文对北京的一次降雹过程进行模拟研究,并进行系列催化试验,优选催化方案,为外场防雹设计和作业方法提供依据。

## 1 冰雹过程模拟

1996 年 6 月 10 日北京市海淀、密云等地出现降雹过程。500 hPa 有一高空槽,从乌兰巴托东部向西南延伸,内蒙古东部巴彦乌拉浩特地面有一低压中心,从低压中心有一冷锋沿承德东侧向北京以北伸展<sup>[23]</sup>。锋面附近形成强对流天气系统,并有带状对流云图<sup>[23]</sup>。6 月 10 日 08:00(北京时,下同)北京地面为偏东风,925 hPa 为偏西风,风速从  $2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  逐渐增大到 250 hPa 的  $43 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。850 hPa 到 250 hPa 风速切变明显。对流层大气温度层结不稳定。中国气象科学研究院 S 波段多普勒天气雷达(波长为 10 cm)对此过程进行探测,雷达观测水平范围为 400 km,发现一条东北—西南向的回波带,由多块相互独立的对流回波组成,它们自西向东北移动,移速为  $16 \sim 20 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,整体回波带则向东南移动。实测最大回波顶高为 11 km,强中心 60 dBZ 位于 7 km 高度。单体宽度约 8~10 km。云的上部

有长的云砧。从相应的径向风垂直剖面来看,最西端回波的下部有明显辐合,上部有明显辐散(图略)。郭恩铭等<sup>[23]</sup>在观测雷达附近收集到 61 个雹块样本,测得最大冰雹长轴为 8 cm,短轴为 4.4 cm,小冰雹分别为 1.0 cm 和 0.6 cm。雹块的形状差异很大,多数为椭球形或锥形。一些大冰雹结构疏松落地即碎。冰雹为透明层和不透明层相间,大多数为冻滴胚。

本文利用三维对流云 AgI 催化模式对此冰雹过程进行数值模拟研究<sup>[25-31]</sup>。模式的预报量包括三维风、温、压、比湿、云水量、云滴谱拓宽度以及双参数微物理预报量雨、冰晶、霰、雹的比质量和比浓度。模式采用隐式格式计算凝结、凝华过程和水汽过饱和度和。考虑凝结蒸发、碰并、自动转化、核化繁生、融化冻结等,共 27 个云物理过程。模式中包含 AgI 催化过程,过程基于 Demott 的室内实验结果<sup>[32]</sup>,考虑 AgI 催化剂气溶胶在不同环境条件下的凝华、凝华冻结、接触冻结、浸没冻结的核化速率,分别用  $F_{\text{dep}}$ ,  $F_{\text{ctf}}$ ,  $F_{\text{ctf}}$  和  $F_{\text{imf}}$  表示,均为温度( $T$ )和水汽过饱和度(水面的  $S_w$  和冰面的  $S_i$ )的函数。其中,  $F_{\text{dep}}$  与水面和冰面过饱和度有关,  $F_{\text{ctf}}$  与温度和水面过饱和度有关,  $F_{\text{ctf}}$  与碰并效率和冰面过饱和度有关,  $F_{\text{imf}}$  与碰并效率和温度有关。模式中冰雹相关的微物理过程包括冰雹凝华、冰雹碰并冰晶、冰雹碰并霰、冰雹融化、霰雹转化和冰雹的干湿增长过程。

模式的水平格距为  $1.2 \text{ km} \times 1.2 \text{ km}$ ,垂直格距为 0.7 km,格点数为  $80 \times 80 \times 30$ ,积分步长为 2 s,采用 08:00 北京探空资料作为模式输入场。因高层风速过大,模拟云会移出计算区域,故模式计算时,水平风减去平均风速的 70%。考虑到白天增温,进行常规的边界层温度订正。对流采用热湿泡启动,水平范围为  $8.4 \text{ km} \times 8.4 \text{ km}$ ,垂直 1.4 km,最大温度扰动为  $1.5^\circ\text{C}$ ,最大相对湿度 90%。

在模拟开始后,云体很快出现并快速发展。在积分 10 min 内,仅有云水。随着上升气流的加强和云体的升高,积分 12 min 后出现了冰晶,并在第 15 分钟时出现少量霰粒子,随后有少量的冰雹粒子形成。此时云体也发展到 8 km 高度。积分 20 min 时,云体的中下部积累了大量冰雹,并接近地面,表明降雹过程即将开始。积分 24 min 时,云体发展最为强劲,此时云中上升气流超过  $30 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,同时地面出现了强降雹过程。此时的冰雹被上升气流带到非常高的位置,云体的中上部由云水、冰晶、霰和冰雹组成(图 1a)。由于云体在前方出流,上升气流很

弱,导致较大的霰粒子下落形成下沉气流。有一部分粒子随着气流再次进入到云体的主上升区,并再次与云水和雨水碰并,成长为较大的冰雹并下落形成降雹。所以冰雹粒子有循环增长的过程,这与理论研究一致,也与观测的冰雹多层结构一致<sup>[23]</sup>。降

雹的宽度可达 10 km,降雹中也有降雨发生。有部分冰雹融化成雨水,同时更多的雨水由霰融化形成。云体的水平流场在 4 km 的高度为辐合,8 km 的高度形成辐散,云体水平范围可达 30 km。地面冰雹格点最大平均尺度为 22 mm。

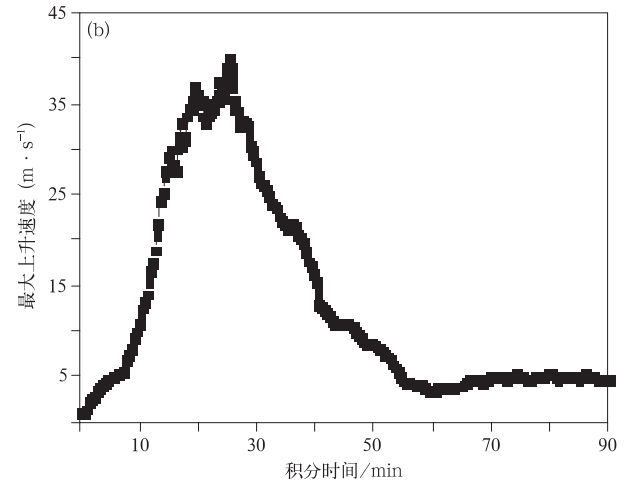
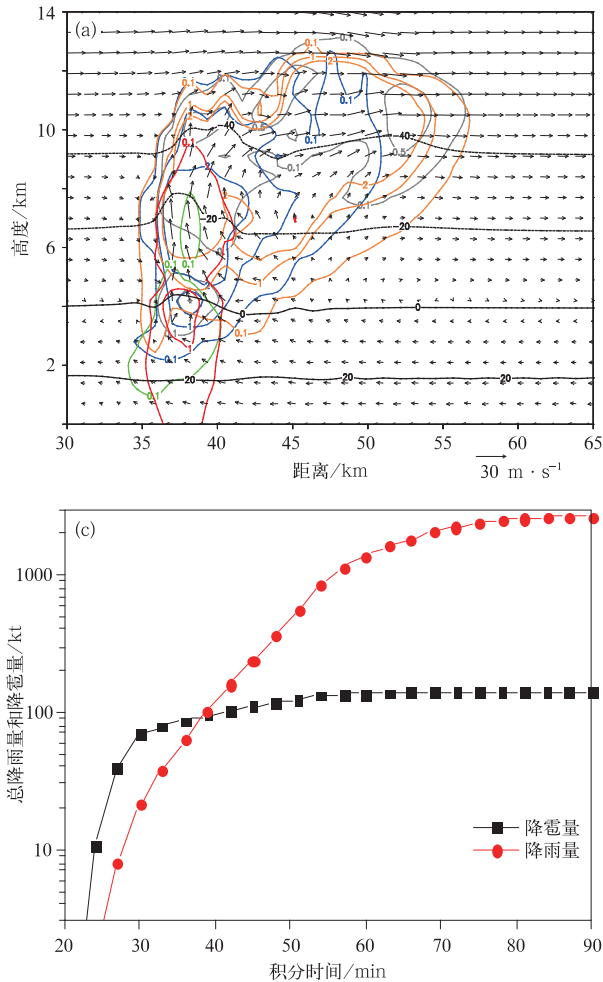


图 1 冰雹云模拟第 24 分钟各种水成物含量等值线(蓝色为云水,灰色为冰晶,橙色为霰,红色为冰雹,绿色为雨水,等值线值为 0.1,1,2 g · kg<sup>-1</sup>)及温度等值线(黑色)、流场(矢量)的垂直剖面分布(a)模拟的最大上升速度(b)及总降雨量和降雹量(c)随时间分布

Fig. 1 Subsection of mixing ratios of water substances (cloud water in the blue contour, ice in the grey contour, graupel in the orange contour, hail in the red contour, rain water in the green contour, contour values are 0.1,1,2 g · kg<sup>-1</sup>) and temperature (black contour), vector of the 24th min simulation results (a) time series of simulated maximum updraft (b) and total rainfall with hail precipitation (c)

根据模拟水成物的质量和数浓度计算的回波与雷达回波特征比较一致。降雹开始前大量的冰雹粒子堆积在云体的中部,此时强回波区位于 4~7 km 高度,大量冰雹到达地面后,强回波高度下降。图 1b 为刚开始降雹时的模拟回波垂直分布。从模拟水成物的水平分布看,在云体的西部有大量冰雹和霰粒子,该部位有较强的回波,强回波位于回波的西侧,在其前方有大片弱回波区(图略)。

模式启动后,云中上升气流发展非常迅速,尤其积分 10~20 min 内,最大上升气流速度从 5 m · s<sup>-1</sup> 发展到超过 35 m · s<sup>-1</sup>(图 1)。随后降雹过程开始。由于雹块和霰粒子的下落拖曳产生下沉气流,使上升气流减弱。第 30 分钟后,最大升速快速减弱,强

的降雹过程结束。强降雹过程结束后,取而代之的是降雨过程(图 1)。降雨过程主要是由大量的霰粒子融化形成,降雨水平范围东西可达 20 km。此时仅有少量冰雹存在,并有零星的降雹发生。降雨过程在积分 60 min 后减弱。整个过程模拟的地面自然总降雨量为 2663 kt,降雹量为 140 kt。

## 2 系列催化试验研究

由于外场人工防雹作业中催化作业工具多种多样,包括地面燃烧炉催化、高炮和火箭催化作业,其催化高度从地面到高空变化很大,催化剂量也存在很大差异,催化作业的理想时间等有很多不明确。

下面针对外场作业中可能出现的催化方案进行试验,以研究不同催化方案的催化效果。催化试验是在模拟的第 15 分钟,在 5 km 高度附近的第 7~8 垂直层播撒 AgI,催化剂量为  $1 \times 10^7 \text{ kg}^{-1}$  的基础上,对 3 个催化参数:催化高度、催化剂量和催化开始时间进行系列催化试验,以试验不同催化方案的催化效果。表 1、表 2 和表 3 分别给出了相应的催化参

表 1 不同催化高度系列试验的降雹量分布

Table 1 Hailfall amonts of series simulations at different seeding vertical levels

垂直层	高度/km	降雹量/kt
1~2	0~1.4	102
3~4	1.4~2.8	87
4~5	2.1~3.5	80
5~6	2.8~4.2	75
6~7	3.5~4.9	73
7~8	4.2~5.6	57
8~9	4.9~6.3	66
9~10	5.6~7.0	87
10~11	6.3~7.7	123
11~12	7.0~8.4	134

数和催化结果。每 2 min 催化 1 次,共催化 4 次。此次降雹过程的催化模拟发现,水平催化范围为  $4.8 \text{ km} \times 4.8 \text{ km}$ ,覆盖了底层模拟云水的范围和云体的上升区,可达到较好的催化效果。以每克 AgI (即 100 g 焰剂)可分散成 1016 个粒子计算(平均直径为  $0.2 \mu\text{m}$ ),假如单次催化剂量为  $5 \times 10^6 \text{ kg}^{-1}$ ,进行 4 次催化播撒,即共引入冰核总数为  $6.45 \times 10^{17}$ ,则共需要 AgI 64.5 g,相当于 7 枚焰剂火箭。单次

表 2 不同催化剂量系列试验的降雹量分布

Table 2 Hailfall amonts of series simulations with different seeding amounts

催化剂量/ $\text{kg}^{-1}$	催化剂总量/g	降雹量/kt
$5 \times 10^4$	0.65	137
$1 \times 10^5$	1.29	124
$5 \times 10^5$	6.45	107
$1 \times 10^6$	12.9	75
$5 \times 10^6$	64.5	57
$1 \times 10^7$	129	31
$5 \times 10^7$	645	9.9

表 3 不同催化开始时间系列试验的降雹量分布

Table 3 Hailfall amonts of series simulations with different seeding start times

催化开始时间/min	降雹量/kt
36	139
30	136
27	134
24	128
21	103
18	79
15	51
12	68
9	79
6	95

催化剂增加或减少,催化剂总量也会大幅增加或减少。文中未考虑 AgI 气溶胶的初始扩散过程,假定人工冰核在催化区内均匀分布。

### 2.1 不同催化高度试验

试验中设计了 10 个不同的催化高度,如图 2a 所示,催化的高度层分别为从地面开始的 1~2 模式

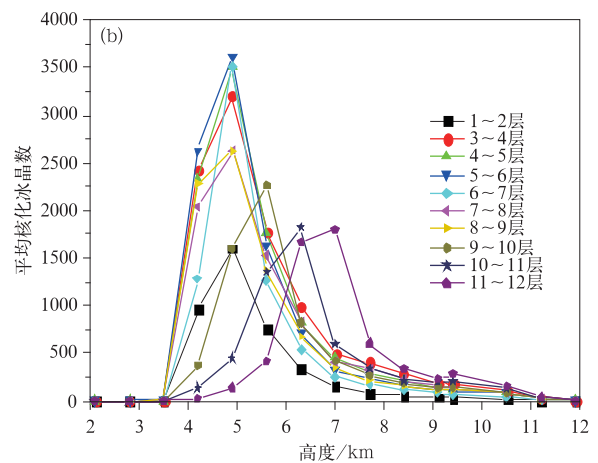
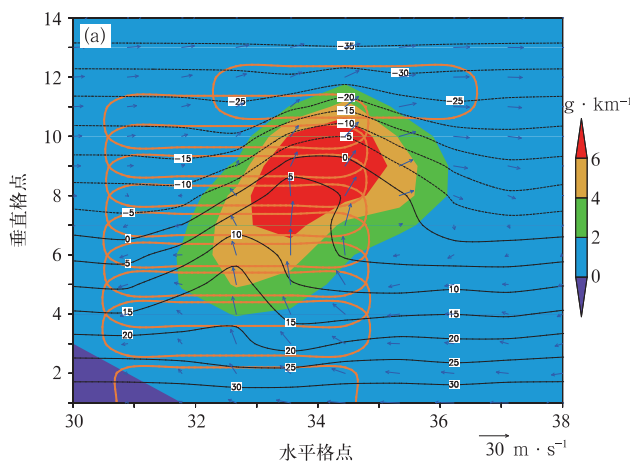


图 2 10 个不同催化高度的催化范围(橘色曲线)和云水(填色)、流场(矢量)和温度(等值线,单位:  $^{\circ}\text{C}$ )分布(a)及平均核化冰晶数量随高度分布(b)

Fig. 2 Subsections of seeding areas at 10 different levels(the orange curve), cloud water mixing ratios(the shaded), vector, temperature(the contour, unit:  $^{\circ}\text{C}$ ) (a) and domain averaged AgI nucleation rates(b)

层(每层高度为 0.7 km),一直到云水出现的最高处 11~12 层,对应的催化高度从地面到 7.7 km 的高空,共 10 个不同的催化高度,催化温度从地面的超过 30℃,到最高层的一 28℃,以研究不同催化高度的催化效果及造成不同催化效果的原因。

模式中考虑了凝结冻结、浸没冻结、凝华和接触冻结核化 4 种核化机制。AgI 的成核过程主要由云内上升气流速度、温度、湿度条件和催化剂的作用时间决定。以往研究分析得出层状云中由于水面过饱和度和低、催化剂作用时间长,AgI 主要以接触冻结、浸没冻结等慢核化方式成冰<sup>[33]</sup>。在对流云中,主要以受过饱和度和影响的凝结冻结和浸没冻结这两种方式成核<sup>[25]</sup>。

图 2b 给出了不同催化高度的平均核化冰晶数量随高度分布,可以发现,在任何高度上催化,催化剂均在扩散到 -5℃ 后才开始核化,核化高度可延伸到 11 km。从地面开始的前 7 个催化高度,催化后的核化峰值出现在 5 km 的高度,而随着催化高度的增高,核化峰值也逐渐抬升到 7 km 高度。

不同高度上催化的冰晶核化速率也有很大差异。在近地面的 1~2 层催化,产生所有催化试验中最少的人工冰晶。而在 3,4 层和 5 层催化高度,形成了比较多的冰晶数量,尤其是第 4 层催化高度。从第 6 层催化高度开始,随着催化高度的增加,核化的冰晶数量大幅减少。

不同高度催化试验形成的人工冰晶速率有很大差异,但催化效果并不完全由形成冰晶数量多少决定。如图 3 所示,在地面降雹量的分布中,-10~8℃ 之间催化(7~8 层),形成的降雹量最少,其附近层催化的减雹效果也非常好。即使在地面催化,由于催化剂要上升到 4 km 以上高度才开始核化,仅形成所有试验中最少的人工冰晶,但仍能有效减少冰雹,最后达到地面的冰雹量约为 100 kt,从自然云的 140 kt 减少约 30%。而在最高的两层催化,催化高度的温度范围为 -28~-14℃,尽管形成的人工冰晶数量多于地面催化试验,但防雹效果远低于地面催化,更低于其他催化高度的防雹效果。

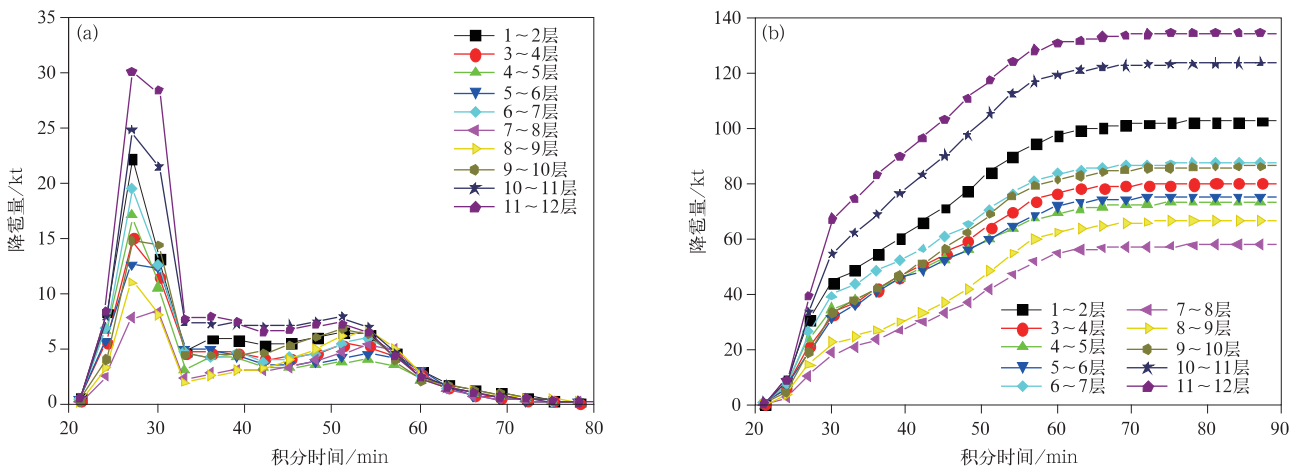


图 3 10 个不同催化高度试验积分 3 min 降雹量(a)和总降雹量(b)随时间分布

Fig. 3 Time series of hail precipitation amounts within 3 min simulation(a) and total hail precipitation(b) at 10 different seeding levels

催化效果不仅与核化形成的冰晶数量有关,还与人工冰晶出现的高度、自然冰晶、云水和霰的高度有关。由于催化后 12 min 时,即积分 27 min 时,云中升速最大,云体发展最强,同时降雹强度急速增加。为了使催化减弱降雹过程,在此时应有大量的人工冰晶形成,从而影响此时的冰雹形成和增长。图 4 给出了该时刻 3 个不同催化高度的总人工冰晶浓度、自然冰晶浓度和霰浓度的分布。地面催化时,

催化剂需要上升较大高度后才能达到核化温度,所以人工冰晶的数量最少,仅为  $20 \text{ L}^{-1}$ 。尽管在  $10 \text{ L}^{-1}$  的人工冰晶范围内,自然冰晶也普遍小于  $10 \text{ L}^{-1}$ ,甚至部分区域没有自然冰晶,但由于浓度较小,且大值高度偏低,所以并不能大量消耗云水,并增加霰的数量和比质量,从而影响防雹效果。

催化效果最好的 7~8 层催化,AgI 催化核化的冰晶可达到  $100 \text{ L}^{-1}$  以上,核化区域主要出现在自

然冰晶  $1\sim 10\text{ L}^{-1}$  的范围,人工冰晶有效补充了自然冰晶的数量,同时该范围内有云水、霰和雹存在,人工冰晶消耗掉云水,并增加霰的数量和比质量,使冰雹量大幅减少。

最高层催化试验中自然冰晶为  $10\sim 50\text{ L}^{-1}$ 。AgI 催化后快速核化,人工冰晶在小范围内可达到

$50\text{ L}^{-1}$  以上,但人工冰晶出现的高度偏高,主要出现在自然冰晶  $10\sim 500\text{ L}^{-1}$  的区域,使人工冰晶的作用效果减弱。同时该区域有云水、霰和雹的存在,所以为自然冰晶补充了一部分人工冰晶,消耗掉部分云水,并增加霰的数量和比质量,冰雹量有一定程度减少。

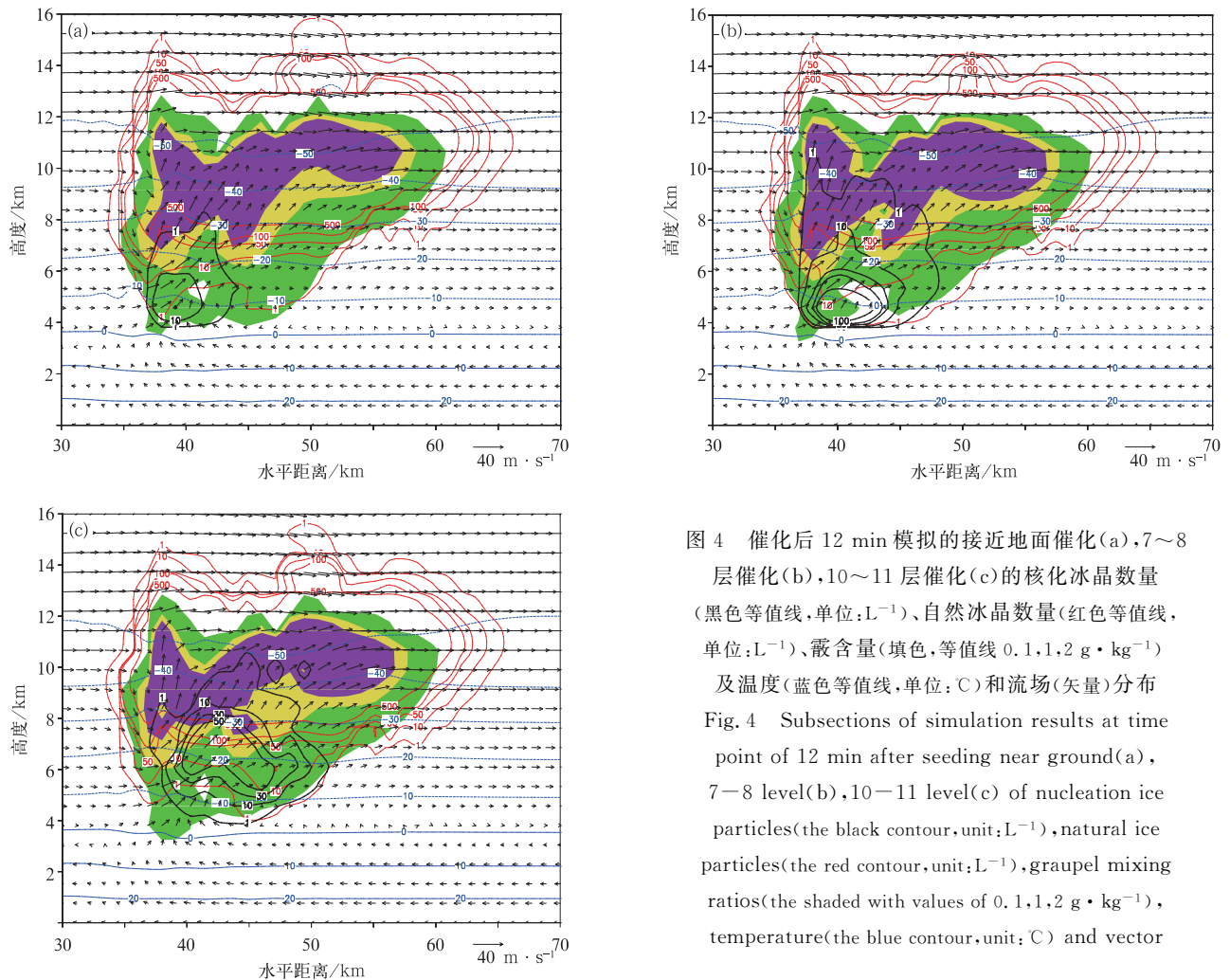


图4 催化后 12 min 模拟的接近地面催化(a),7~8 层催化(b),10~11 层催化(c)的核化冰晶数量(黑色等值线,单位: $\text{L}^{-1}$ )、自然冰晶数量(红色等值线,单位: $\text{L}^{-1}$ )、霰含量(填色,等值线  $0.1, 1, 2\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ )及温度(蓝色等值线,单位: $^{\circ}\text{C}$ )和流场(矢量)分布  
Fig. 4 Subsections of simulation results at time point of 12 min after seeding near ground(a), 7-8 level(b), 10-11 level(c) of nucleation ice particles(the black contour, unit:  $\text{L}^{-1}$ ), natural ice particles(the red contour, unit:  $\text{L}^{-1}$ ), graupel mixing ratios(the shaded with values of  $0.1, 1, 2\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ), temperature(the blue contour, unit:  $^{\circ}\text{C}$ ) and vector

## 2.2 不同催化剂量试验

图5给出了单次催化剂量从  $5\times 10^4\text{ kg}^{-1}$  到  $5\times 10^7\text{ kg}^{-1}$  共7种不同剂量的降雨量和降雹量的模拟结果。可以看出,所有的催化剂量可不同程度地减少降雹量,同时催化剂量越大降雹的减少量也越多。

催化剂量对降雨量也有非常明显的影响。小于  $5\times 10^5\text{ kg}^{-1}$  的催化剂量,可在减雹的同时增加部分降雨量,而大于  $5\times 10^6\text{ kg}^{-1}$  的催化剂量,虽然减雹效果非常好,但会减少一定的降雨。所以外场作业中的剂量选择,应结合当地水资源特点,确定催化方

案,是在减雹的同时增加降雨或适量减少降雨,还是最大限度地减少降雹量。

核化形成的冰晶总量与催化剂量成正比。催化剂量大的催化方案,形成的冰晶数量最多,可在小范围内形成  $500\text{ L}^{-1}$  的人工冰晶,而最少剂量的催化试验中仅形成小于  $1\text{ L}^{-1}$  的人工冰晶。小剂量的催化,由于形成的冰晶数量太少,不能大量增加霰的数量,对冰雹的数量和混合比没有形成较大影响,从而影响到防雹的催化效果。

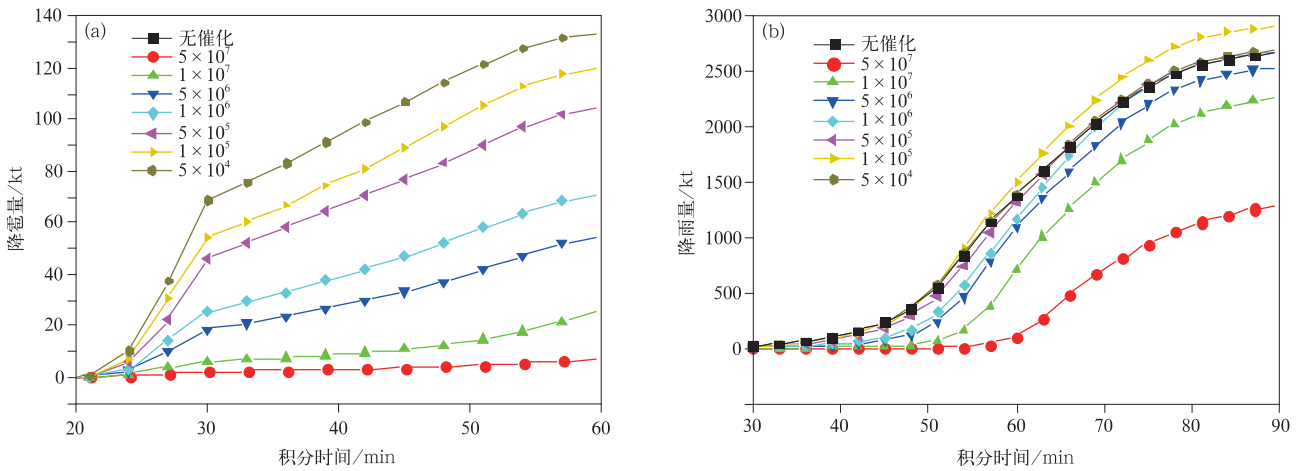


图 5 催化剂量从  $5 \times 10^7, 1 \times 10^7, 5 \times 10^6, 1 \times 10^6, 5 \times 10^5, 1 \times 10^5, 5 \times 10^4 \text{ kg}^{-1}$  共 7 种剂量的总降雹量(a)、降雨量(b)随时间分布

Fig. 5 Time series of hailfall(a) and rainfall(b) amounts with 7 seeding rates of  $5 \times 10^7, 1 \times 10^7, 5 \times 10^6, 1 \times 10^6, 5 \times 10^5, 1 \times 10^5, 5 \times 10^4 \text{ kg}^{-1}$

2.3 不同催化开始时间试验

不同催化开始时间的试验中,催化时间从积分 6 min 开始,每隔 3 min 进行 1 次催化试验。最晚催化在积分 30 min 后开始。降雹从积分的第 20 分钟开始,第 35 分钟结束,持续 15 min。防雹效果最好的试验是在积分 15 min 时开始催化,可减少 2/3 的降雹量,从第 6 分钟到第 21 分钟,均可取得非常好的减雹效果。由于降雹在第 20 分钟开始,在降雹开始后的催化试验催化效果均非常有限。不同的催化开始时间同样会对降雨量产生影响,但变化幅度较降雹量的变化幅度小。在减雹效果最好的第 15 分钟催化试验,会带来最大雨量减少的情况。而第 6

分钟开始催化,则会增加较多的降雨量。

从 AgI 核化冰晶数量(图 6)看,在第 12 分钟、第 15 和第 18 分钟催化,可以在积分 30 min 前形成更多的冰晶,而 30 min 前地面降雹快速增加,此时大量冰晶的形成,导致雹的数量比其他时间催化的试验形成更多的雹粒子,尤其是第 15 分钟的催化,其雹的数量比其他方案高很多。由于雹的数量较多,导致雹的粒径较小,最后转化冰雹的质量和数量均较少,使得第 15 分钟的催化方案中地面降雹量最少,从而取得最好的防雹效果。由于此时是冰雹云体快速发展阶段,从雷达回波上可进行判别,对外场人工防雹作业有指导作用。

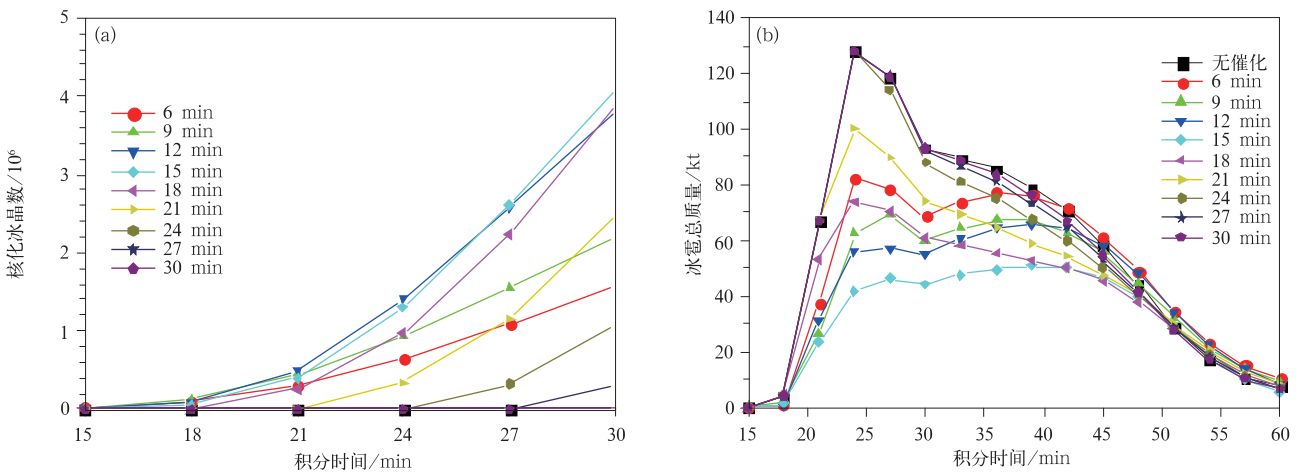
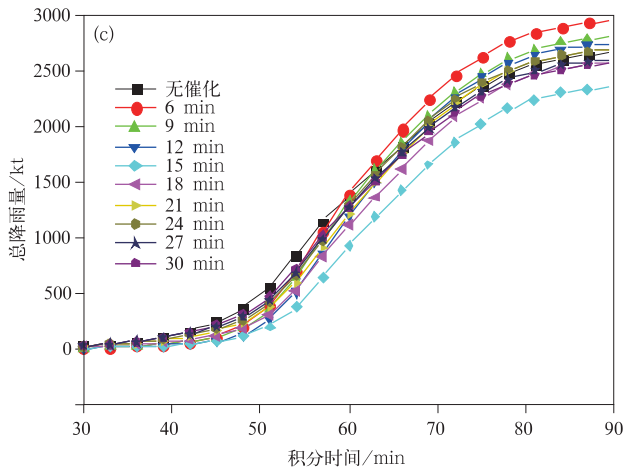


图 6 不同催化开始时间的核化冰晶数(a)、冰雹总质量(b)和总降雨量(c)随时间变化

Fig. 6 Ice nucleation numbers(a), hail amount(b) and total rainfall precipitation(c) with different seeding start time



续图 6

综合这些系列催化试验,得出在 2.1~4.9 km 高度层,云中温度为 -12~17℃,在模拟的第 15 分钟进行催化,可取得最好的减雹效果。当采用  $5 \times 10^7 \text{ kg}^{-1}$  或  $1 \times 10^7 \text{ kg}^{-1}$  的较大催化剂量时,防雹效果会更好,但会减少较多的降雨量。而当采用  $5 \times 10^6 \text{ kg}^{-1}$  的剂量时,降雨量从 140 kt 减少到 57 kt,可减少 59.3% 的降雨量,同时催化带来的降雨量的减少非常有限,是较理想的催化剂量。下面以此催化方案进行人工防雹催化模拟试验。

### 3 人工防雹 AgI 催化模拟

催化方案采用在模拟的第 15 分钟开始,在 5 km 高度附近的 7~8 垂直层播撒 AgI,连续 4 次以  $5 \times 10^6 \text{ kg}^{-1}$  的催化剂量进行催化。催化后 AgI 气溶胶粒子很快被上升气流带到云的上部(图 7)。在催化 10 min 后,整个云体都出现了浓度达到  $10 \text{ L}^{-1}$  的 AgI 气溶胶粒子,在催化区域及其上方浓度达到  $1000 \text{ L}^{-1}$ ,在出流的云砧部分也出现了超过  $100 \text{ L}^{-1}$  的区域。同时由于云体的后部存在下沉气流,部分气溶胶随着下沉气流出流。

气溶胶粒子被上升气流带到云体高处的同时,部分 AgI 粒子被包含在云滴中,并随着上升气流出现在云体的较高处。在催化 10 min 时,在播撒催化剂的高度层  $N_{\text{aim}}$  达到了  $100 \text{ L}^{-1}$  的量级。由于与液态水的关系, $N_{\text{aim}}$  分布范围比  $N_{\text{aer}}$  范围小很多。所以选择 5 km 高度附近催化,借助上升气流,可将催化剂扩散到云体的绝大多数位置,保证了凝结冻结核化和凝华核化的发生。该高度催化  $N_{\text{aim}}$  也能出现在云体的所有液态水存在的区域,保证了浸没冻结核化和接触冻结核化的发生。

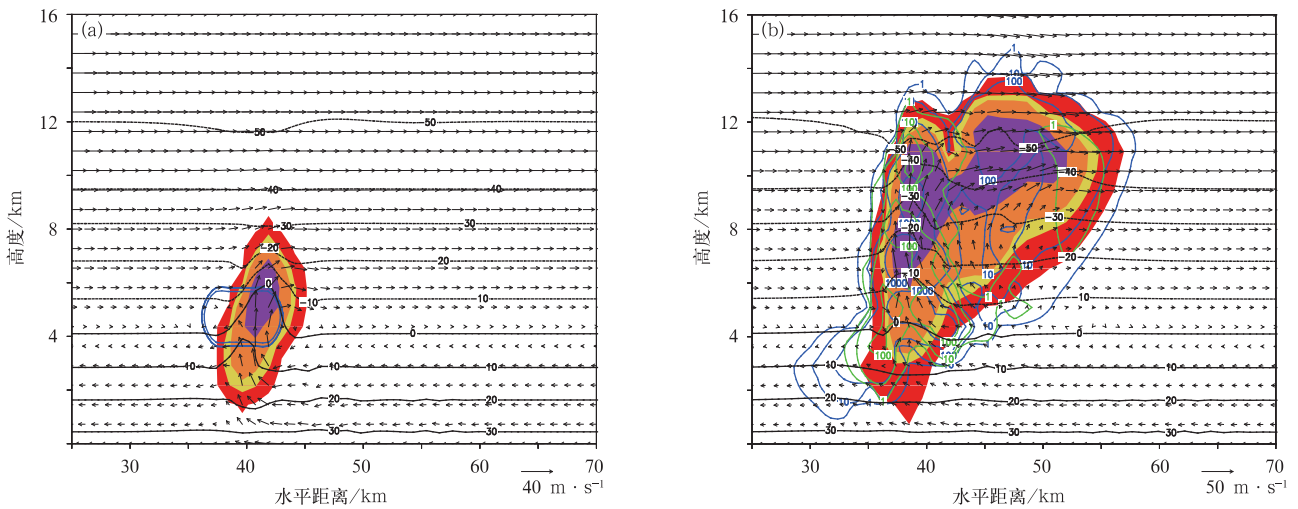


图 7 云中总水成物含量和 AgI 气溶胶粒子浓度 ( $N_{\text{aer}}$ , 蓝色线) 和包含在液态水中的碘化银粒子浓度 ( $N_{\text{aim}}$ , 绿色线) 及流场(矢量)和温度(黑色线,单位:℃)垂直分布(总水成物混合比(填色)等值线间隔为 1,2,3,4  $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,  $N_{\text{aer}}$  和  $N_{\text{aim}}$  的等值线分别为 1,10,100  $\text{L}^{-1}$  和 1000  $\text{L}^{-1}$ ) (a)催化时刻,(b)催化后 10 min

Fig. 7 Subsections of mixing ratios of total water substances(the shaded) and number concentrations of AgI aerosols ( $N_{\text{aer}}$ , the blue contour) and AgI particles immersed in drops ( $N_{\text{aim}}$ , the green contour), vector and temperature (the black contour, unit: °C) (total water substance in shaded contour with values of 1,2,3  $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$  and 4  $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,  $N_{\text{aer}}$  and  $N_{\text{aim}}$  with values of 1,10,100  $\text{L}^{-1}$  and 1000  $\text{L}^{-1}$ ) (a) seeding time point, (b) 10 min after seeding



由图 8 的降雹量和降雨量随时间分布看,非催化云的降雹过程从第 20 分钟后开始,并急速增加,几分钟后就达到降雹的峰值,即在 3 min 内累积降雹 30 kt。第 30 分钟后降雹减弱,弱降雹持续到第 55 分钟后再度减弱。在第 15 分钟催化后,降雹的开始时间出现了短暂的后延,在模拟到第 27 分钟时降雹最强,降雹量已明显减少,峰值从自然云的 30 kt 减

弱为 7 kt。在第 30 分钟时地面降雹大幅减少,随后弱降雹过程持续,同样在第 55 分钟前后再度急速减弱直至结束。

催化同样也影响降雨过程,降雨量随时间的分布,在自然云和催化云中保持非常一致的趋势,只是降雨开始时间在催化后稍有延缓,并在第 60 分钟前保持降雨偏少的情况。

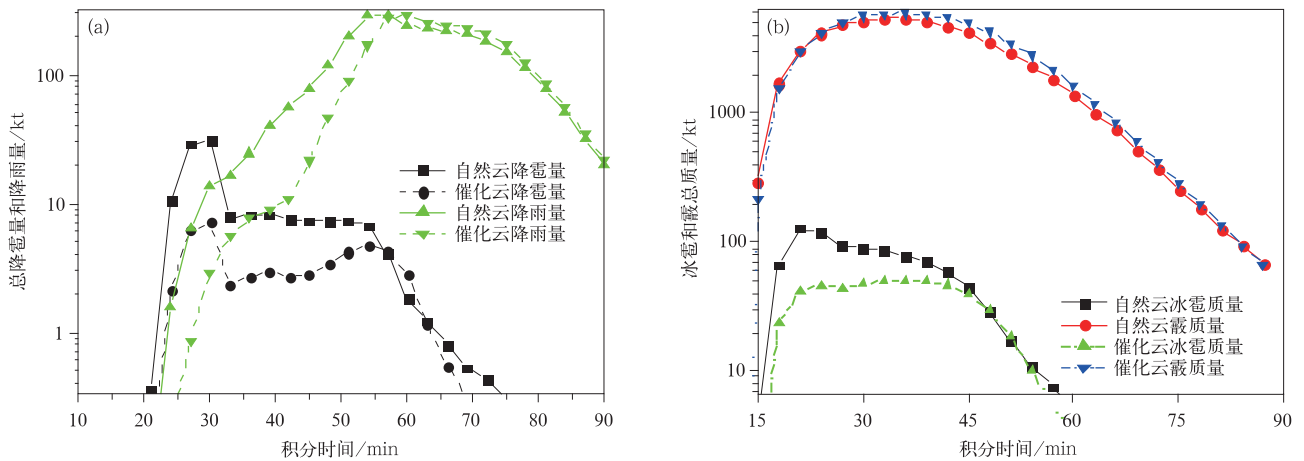


图 8 自然云和催化云的总降雹量和降雨量(a)及冰雹和霰总质量(b)随时间分布

Fig. 8 Time series of natural and seeded hail precipitation and rain quantity(a), hail and graupel quantity(b)

催化引起了云中霰和冰雹粒子数量和质量的改变。催化后霰粒子数量大幅增加(图略)。在强降雹发生前,催化后,前 10 min 霰质量减少,积分 30 min 后催化云中霰质量才出现小幅增加(图 8b),此时云体的发展强度已减弱(图 1),强降雹过程接近尾声。冰雹云发展前期霰数量的增加和霰质量的减少,直接影响到冰雹的形成和增长,导致催化后冰雹粒子数浓度大幅减少,同时冰雹质量也大幅减少。催化后 20 min 内,催化云一直保持比自然云中减少一半以上的冰雹质量,从而显著减少降雹量。

催化后降雹量减少了近 60%,冰雹微物理过程也会有较大改变。利用模式结果分析冰雹和雨水主要源项随时间的分布,计算的冰雹碰并液态水的增长分为干增长和湿增长。根据环境温度、水汽条件和冰雹数量及大小,计算干湿增长临界值。当冰雹碰并的云水和雨水之和不超过临界值,冰雹处于干增长状态;当碰并的液态水超过临界值时,液水冻结为湿增长状态。模拟发现自然云的冰雹最大源项为霰向雹的转化。同时冰雹的湿增长过程在 30 min 前一度超过了霰雹的自动转化。此时,冰雹的干增

长过程也达到了峰值,但干增长仅为湿增长的 1/4,仅 0.01 kt/s。催化后冰雹的 3 个微物理过程均大幅减少,与自然云中相应的微物理过程峰值出现的时间几乎没有变化。催化后霰雹转化几乎是自然云的一半,干增长和湿增长过程也仅为自然云的 1/2。正是这几个冰雹主要源项大幅减少,导致了云中冰雹总量和地面降雹量大幅减少。由于上升气流在云中并不均匀,冰雹处在云体的不同部位时会有不同运动轨迹,冰雹粒子湿增长和干增长交替出现,导致冰雹为透明层和不透明层相间,这一现象与冰雹切面的结果一致<sup>[17]</sup>。

雨水的源项中,催化前后的分布态势没有变化。自然云和催化云中贡献雨水最多的微物理过程均为霰的融化过程。碰并云水也贡献了一部分雨水,而冰雹融化成雨水量与其他两个过程相比非常少。催化使云中霰和冰雹的融化量减少,但随着云中动力过程的减弱,催化云中相对自然云中较小的冰雹粒子和霰粒子最终克服上升气流降落到融化区,融化了比自然云中更多的雨水,使降雨量在模拟的后期有所增加。

## 4 结 论

本文利用三维冰雹云 AgI 催化模式,08:00 北京探空资料作为模式输入场,模拟分析了北京 1996 年 6 月 10 日一次冰雹过程,对不同催化高度、催化剂量和催化时间进行 AgI 系列催化模拟试验。得出以下几点结论:

1) 在催化模拟中发现,不同催化高度的催化剂在上升到  $-5^{\circ}\text{C}$  高度后开始核化。2.1~4.9 km 高度范围内催化,AgI 成核率较高,防雹效果较好。核化的人工冰晶有效弥补了该高度上比较缺乏的自然冰晶,同时,该高度上存在大量霰,消耗过冷云水,从而抑制冰雹的增长。

2) 催化剂量对降雪量、降雨量也有非常明显的影响。小于  $5 \times 10^5 \text{ kg}^{-1}$  的催化剂量,可在减雹的同时增加部分降雨量,而大于  $1 \times 10^7 \text{ kg}^{-1}$  的催化剂量,虽然减雹的效果非常好,但会减少降雨量。剂量越大,减少的降雨量越多。

3) 由于上升气流和云水的分布特点,第 12 分钟、第 15 分钟和第 18 分钟催化,AgI 粒子可以形成更多的冰晶,导致霰的数量比其他时间催化的试验形成更多的霰粒子,均能达到较好的防雹效果,尤其是第 15 分钟时开始催化,催化效果最好。

4) 最佳的催化方案是在模拟的第 15 分钟,在 5 km 附近播撒 AgI,连续 4 次以  $5 \times 10^6 \text{ kg}^{-1}$  的催化剂量进行催化。催化后霰数浓度增加,冰雹粒子数浓度在减少的同时,冰雹的比质量也大幅减少。催化后降雪量减少超过一半,同时降雨量也略减少。

对于其他的防雹催化个例,要考虑到上升气流和云水的分布,使催化的 AgI 粒子最大限度核化,并补充人工冰晶的不足。在霰粒子和冰雹粒子开始出现的初期进行催化可取得较好的催化效果,催化剂量则应结合云体大小确定。

## 参 考 文 献

- [1] Xie B,Zhang Q,Wang Y. Trends in hail in China during 1960—2005. *Geophys Res Lett*, 2008, 35, L13801, doi: 10. 1029/2008GL034067.
- [2] Changnon S A. Long-term fluctuations in hail incidences in the United States. *J Clim*, 2000, 13: 658-664.
- [3] Cao Z. Severe hail frequency over Ontario, Canada: Recent trend and variability. *Geophys Res Lett*, 2008, 35, L14803, doi: 10. 1029/2008GL034888.
- [4] WMO. Expert Meeting to Review the Present Status of Hail Suppression. Geneva; WMO-TD No. 764, 1995.
- [5] WMO. WMO Documents on Weather Modification. Abu Dhabi, 2010.
- [6] 盛裴轩,毛节奏,李建国,等. 大气物理学. 北京:北京大学出版社,2003.
- [7] 许焕斌. 人工影响天气动力学研究. 北京:气象出版社,2014.
- [8] 段英,许焕斌. 爆炸防雹中的云微物理机制的探讨. *气象学报*, 2001, 59(3): 334-340.
- [9] 许焕斌,王思微. 关于爆炸防雹方法的理论依据和技术要点的探讨. *气象科学研究院院刊*, 1989, 4(3): 311-318.
- [10] 葛润生,姜海燕,彭红. 北京地区雹暴气流结构的研究. *应用气象学报*, 1998, 9(1): 1-7.
- [11] 朱君鉴,刁秀广,黄秀韶. 一次冰雹风暴的 CINRAD/SA 产品分析. *应用气象学报*, 2004, 15(5): 579-589.
- [12] 朱敏华,俞小鼎,夏峰,等. 强烈雹暴三体散射的多普勒多天气雷达分析. *应用气象学报*, 2006, 17(2): 215-225.
- [13] 王令,郑国光,康玉霞,等. 多普勒天气雷达径向速度图上的雹云特征. *应用气象学报*, 2006, 17(3): 281-288.
- [14] 胡胜,罗聪,张羽,等. 广东大冰雹风暴单体的多普勒天气雷达特征. *应用气象学报*, 2015, 26(1): 57-65.
- [15] 洪延超,肖辉,李宏宇,等. 冰雹云中微物理过程研究. *大气科学*, 2002, 26(3): 421-432.
- [16] 胡朝霞,李宏宇,肖辉,等. 旬邑冰雹云的数值模拟及累积带特征. *气候与环境研究*, 2008, 8(2): 196-208.
- [17] 郭学良,黄美元,洪延超,等. 三维冰雹分档强对流云数值模拟研究. *大气科学*, 2001, 25(5): 707-719.
- [18] 许焕斌,田利庆. 强对流云中“穴道”的物理含义和应用. *应用气象学报*, 2008, 19(3): 372-379.
- [19] Noppel H, Blahak U, Seifert A. Simulations of a hailstorm and the impact of CCN using an advanced two-moment cloud microphysical scheme. *Atmos Res*, 2010, 96: 286-301.
- [20] 许焕斌,段英. 冰雹形成机制的研究并论人工雹胚与自然雹胚的“利益竞争”防雹假说. *大气科学*, 2001, 25(2): 277-288.
- [21] 陈宝君,肖辉. 过冷雨水低含量条件下冰雹形成和增长机制及其催化效果的数值模拟. *大气科学*, 2007, 31(2): 273-290.
- [22] 胡朝霞,齐彦斌,郭学良,等. 青藏高原东部冰雹形成机理的数值模拟. *气候与环境研究*, 2007, 12(1): 37-48.
- [23] 郭恩铭,张纪淮,胡志晋,等. 冰雹云和多心冰雹结构的观测与分析. *辽宁气象*, 2003, 3: 6-9.
- [24] 黄燕,徐华英. 播撒碘化银粒子进行人工防雹的数值试验. *大气科学*, 1994, 18(5): 612-622.
- [25] 何观芳,胡志晋. 不同云底温度雹云成雹机制及其引晶催化的数值研究. *气象学报*, 1998, 56(1): 31-45.
- [26] Curic M, Janc D, Vuckovic V. Cloud seeding impact on precipitation as revealed by cloud-resolving mesoscale model. *Meteor Atmos Phys*, 2007, 95(3): 179-193.
- [27] Farley R D. Numerical modeling of hailstorms and hailstone growth. Part III: Simulation of an Alberta hailstorm-natural and seeded cases. *J Climate Appl Meteor*, 1987, 26: 789-812.
- [28] 周非非,肖辉,黄美元,等. 人工抑制上升气流对冰雹云降影响

- 的数值试验研究. 南京气象学院学报, 2005, 28(2): 153-162.
- [29] 肖明静, 郭学良, 肖稳安. 碘化银、液态 CO<sub>2</sub> 播撒对流云防雹增雨的数值模拟. 南京气象学院学报, 2006, 29(1): 768-775.
- [30] 巴特尔, 单久涛, 博格. 人工防雹催化效果的数值模拟. 安徽农业科学, 2013, 41(7): 3038-3040.
- [31] 楼小凤, 孙晶, 史月琴, 等. 减弱对流云降水的 AgI 催化原理的数值模拟研究. 气象学报, 2014, 72(4): 782-793.
- [32] DeMott P J. Quantitative descriptions of ice formation mechanisms of silver iodide-type aerosols. *Atmos Res*, 1995, 38(3-4): 63-99.
- [33] 刘诗军, 胡志晋, 游来光. 碘化银核化过程的数值模拟研究. 气象学报, 2005, 63(1): 30-40.

## Numerical Modeling of Hailstorms with AgI Seeding

Lou Xiaofeng<sup>1)2)</sup> Shi Yu<sup>1)2)</sup> Lu Guangxian<sup>1)2)</sup>

<sup>1)</sup> (State Key Laboratory of Severe Weather, Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081)

<sup>2)</sup> (Key Laboratory for Cloud Physics of China Meteorological Administration, Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081)

### Abstract

Cloud numerical simulations are important ways in research of hail processes and hail suppression activities. A 3-D hail model is used to simulate a hailfall case in Beijing on 10 Jun 1996. Series silver iodide (AgI) seeding simulations are designed on seeding height levels, seeding rates and starting seeding times, to get a best seeding scheme which can be used to advise outfield hail suppression operations. The 3-D hail model calculates 27 microphysical processes, which includes condensation, deposition, evaporation, collection, ice nucleation, ice multiplication, melting and freezing, auto conversions of cloud to rain, ice to graupel and graupel to hail. Seeding code is based on cloud chamber results of the mechanism of ice-forming processes by AgI which can be identified as deposition, contact freezing, condensation freezing and immersion freezing nucleation. The total nucleation activities are the sum of contributions from different nucleation modes. Humidity, temperature, cloud droplets concentration and cloud holding time are the main influence factors in AgI nucleation processes. The horizontal domain of the model is 96 km by 96 km with a constant grid increment of 1.2 km, and vertical resolution is 700 m and 20 km high. The time step is 2 s, and sounding data at 0800 BT are used as the initial.

In all seeding simulations of different height levels, AgI particles start to nucleate only when they are moved to regions where air temperature is lower than  $-5^{\circ}\text{C}$ . If seeding within 2.1–4.9 km height, much more ice nucleation happens, thus resulting in good hail suppression effect. The artificial ice particles make up insufficient natural ice particles. The seeding effect greatly depends on seeding amount. When the amount is less than  $5 \times 10^5 \text{ kg}^{-1}$ , hail precipitation is suppressed and rainfall is enhanced. When the amount is bigger than  $1 \times 10^7 \text{ kg}^{-1}$ , hail processes are greatly reduced and the rain processes also are weakened. For distributions of updrafts and cloud water, seeding at 12th, 15th, and 18th min, more ice nucleus is nucleated, which makes more graupel particles and better hail suppression effects than other seeding time tests. Among the series of seeding experiments, the best scheme is seeding with  $5 \times 10^6 \text{ kg}^{-1}$  near 5 km height, at the 15th min of simulation, when hail precipitation is decreased about 60% and no much rainfall is lost.

**Key words:** hail process simulation; AgI seeding; series seeding experiments