

播撒碘化银实施雹云催化的数值试验 ——一个例研究*

周毓荃^{1 4)} 陈宝君²⁾ 肖辉³⁾ 黄毅梅⁴⁾ 李子华¹⁾

1)(南京气象学院, 南京 210044)

2)(南京大学大气科学系, 南京 210093)

3)(中国科学院大气物理研究所, 北京 100029)

4)(河南省人工影响天气中心, 郑州 450003)

摘 要 在三维冰雹云模式基础上, 采用湿热泡扰动方式激发对流云, 对 1998 年 7 月 21 日发生在河南北部地区的一次冰雹过程进行模拟并做催化试验。结果表明, 该例雹云具有含水量累积区, 对累积区中心播撒碘化银能够减雹、增雨; 而在此中心之下较低的高度作业, 或播撒时间选取不当, 则有可能增加冰雹。

关键词: 雹云模式; 数值试验; 人工防雹。

1 引言

目前, 中国的人工防雹主要是通过三七高炮(或火箭)向冰雹云中播撒碘化银(AgI)来影响云的微物理过程, 以达到抑制冰雹增长的目的。其原理是依据雹云中存在含水量的累积带而提出来的。一些研究证实^[1]雹云中确实存在水分的累积区, 对累积区播撒碘化银可减雹、增雨。然而雹云具有明显的局地性, 研究不同地区冰雹云特征对人工防雹具有重要意义。

20 世纪 80 年代以来, 用 AgI 进行冷云催化的数值模拟工作广泛开展。Farley 等^[2]建立冰雹分档模式并进行催化试验, 结果表明催化后地面降水、降雹(尤其大雹)减少。Farley 等^[3, 4]、Holroyd 等^[5]以及 Heimbach 等^[6]分别在 Clark 的三维时变中尺度模式基础上, 增加了微物理过程模拟 AgI 粒子对地形云的播云效果, 结果表明催化后冰粒子浓度增加, 雹/霰等降水物形成时间提前, 地面降雨量增加而降雹量有所减少。黄燕等^[7]在孔凡铀等^[8]三维冰雹云模式的二维版本中, 引入 AgI 粒子的守恒方程, 模拟了不同环境条件下的雹暴个例播撒作用。洪延超^[9, 10]对孔凡铀三维雹云模式进行改进, 采用双参数体积水方案, 详细考虑了 8 种水物质的微物理过程, 并针对陕西旬邑 1997 年 7 月 8 日雹云过程作催化试验, 研究了催化防雹的物理机制。

本文在洪延超三维雹云模式^[9]基础上, 采用湿热泡扰动方式激发对流云, 模拟河南北部地区 1998 年 7 月 21 日一次降雹过程, 并研究了碘化银的催化作用。结果表明,

2001-02-02 收到, 2001-10-22 收到再改稿

* 河南省“九五”重大科技攻关项目(97-11-90421)和国家“十五”重大科技攻关项目(2001BA610A-06)联合资助

选择最佳时机和适当部位作业，可以减少冰雹，达到抑雹效果；如果作业时机不当，或者作业高度较低，则有可能出现反效果即增加冰雹。

2 三维冰雹云数值模式

2.1 模式方程组

模式的动力学框架和微物理过程以及初始条件、边界条件和数值计算技术与文献 [9, 10] 相同。模式中水物质分为水汽、云水、雨水、冰晶、雪、雹胚和冰雹七类。本文规定冰晶是以凝华增长为主的单个晶体，将雪晶和冰晶聚合体归为雪一类，雪可由单个冰晶结淞增长，冰晶碰并过冷小雨滴及冰晶聚合而成。雹胚可起源于雨滴核化冻结及以高速率增长的冰晶和雪的转化，即包括冻滴和霰。由于本文并非重点研究雹胚来源，故文中讨论时未将冻滴和霰分开，而将二者统称为雹胚。雹主要由雹胚转化而来。模式控制方程如下：

$$\frac{du}{dt} + c_p \bar{\theta}_v \frac{\partial \pi}{\partial x} = D_u, \quad (1)$$

$$\frac{dv}{dt} + c_p \bar{\theta}_v \frac{\partial \pi}{\partial y} = D_v, \quad (2)$$

$$\frac{dw}{dt} + c_p \bar{\theta}_v \frac{\partial \pi}{\partial z} = g \left(\frac{\theta}{\theta} + 0.608 Q'_v - Q_t \right) + D_w, \quad (3)$$

$$\frac{d\theta}{dt} = D_\theta + S_\theta, \quad (4)$$

$$\frac{dM}{dt} = \frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{\rho} \bar{V}_M M}{\partial z} + D_M + S_M, \quad (5)$$

其中， $M = [Q_A, N_B]$ ， Q 和 N 为比含量和比浓度，下标 $A = [v, c, r, i, s, e, h, X_s]$ ， $B = [r, i, s, e, h]$ 分别代表微物理过程中所考虑的 7 种水物质，即水汽 (Q_v)、云水 (Q_c)、雨水 (Q_r)、冰晶 (Q_i)、雪花 (Q_s)、雹胚 (Q_e) 和冰雹 (Q_h)，以及播撒物质 AgI 粒子的比含量 (X_s)。 D 和 S 分别代表次网格尺度混合项及微物理过程源汇项。可压缩流体质量连续方程为

$$\frac{d\rho}{dt} + \rho \nabla \cdot \mathbf{V} = 0, \quad (6)$$

无量纲气压 Π 的扰动量 π 的预报方程为

$$\frac{d\pi}{dt} + \frac{\bar{c}^2}{c_p \bar{\rho} \bar{\theta}_v^2} \frac{\partial \bar{\rho} \bar{\theta}_v U_j}{\partial X_j} = - \frac{R_d}{c_v} \pi \frac{\partial U_j}{\partial X_j} + \frac{c^2}{c_p \bar{\theta}_v^2} \frac{d\theta_v}{dt} + D_\pi, \quad (7)$$

式中， $c^2 = \frac{c_p R_d T_v}{c_v} = \frac{c_p R_d \pi \theta_v}{c_v}$ ， $\bar{c}^2 = \frac{c_p R_d \bar{\pi} \bar{\theta}_v}{c_v}$ 。各项符号意义同文献 [9]

2.2 对流启动方式

在文献 [9, 10] 中，初始对流云都采用热泡扰动方式启动。孙学金等^[11]通过不同初始扰动对冰雹云发展影响的数值研究表明，在同样的层结条件下，以湿热泡扰动触发的冰雹云最强，其次是湿泡，而热泡扰动最弱。因此本文采用湿热泡扰动方式激发初始对流云。该启动方式是在模拟域低层加一有限范围的正位温扰动场和水汽场，通

过垂直运动方程的浮力项来建立初始对流。即湿热泡内位温偏差由下式确定：

$$\Delta\theta = \begin{cases} \Delta\theta_c \cos^2 \frac{\pi}{2} \beta, & \text{当 } \beta^2 \leq 1 \\ 0, & \text{其余点} \end{cases} \quad (8)$$

而水汽混合比由下式给出：

$$Q_v = Q_{v0} + (Q_{vs} - Q_{v0}) \cos^2 \frac{\pi}{2} \beta \quad (9)$$

$$\beta = \left[\left(\frac{x - x_c}{x_r} \right)^2 + \left(\frac{y - y_c}{y_r} \right)^2 + \left(\frac{z - z_c}{z_r} \right)^2 \right]^{1/2}, \quad (10)$$

其中, (x_c, y_c, z_c) 是扰动场中心坐标, (x_r, y_r, z_r) 分别是扰动区在三个坐标方向的半径, $\Delta\theta_c = \Delta\theta(x_c, y_c, z_c)$ 是中心最大扰动位温值, Q_{vs} 、 Q_{v0} 分别为饱和混合比和初始水汽混合比。

3 冰雹云物理过程的数值模拟

1998 年 7 月 21 日午后, 有一强烈天气系统从鲁西南移入河南省北部地区, 造成民权、新乡、原阳、延津、封丘、郑州和洛阳等地龙卷风、冰雹、雷雨大风及暴雨过程。雷达观测表明, 造成降雹的云体回波高度在 13 km 左右, 云宽 15 km。本文利用当天 13 时郑州探空资料, 对此次降雹过程进行模拟。

为研究问题方便, 在模拟算例中把经向环境风设为沿模拟域 x 方向, 纬向环境风沿 y 方向。模拟区域水平尺度取 35 km, 垂直尺度 18.5 km; 水平格距 1 km, 垂直格距 0.5 km。时间尺度取大时步 10 s, 小时步 2 s。采用模拟域随风暴质心移动技术以保证风暴始终处于模拟域内^[8]。初始对流用位于模拟域中央 2 km 高度上的湿热泡激发, 扰动区半径 5 km, 厚度 4 km, 中心最大位温偏差 1.0℃。模拟时段取 50 分钟。相应初始环境场廓线如图 1 所示。由图 1 可见, 因本次冰雹发生在夏季, 地面温度很高。云

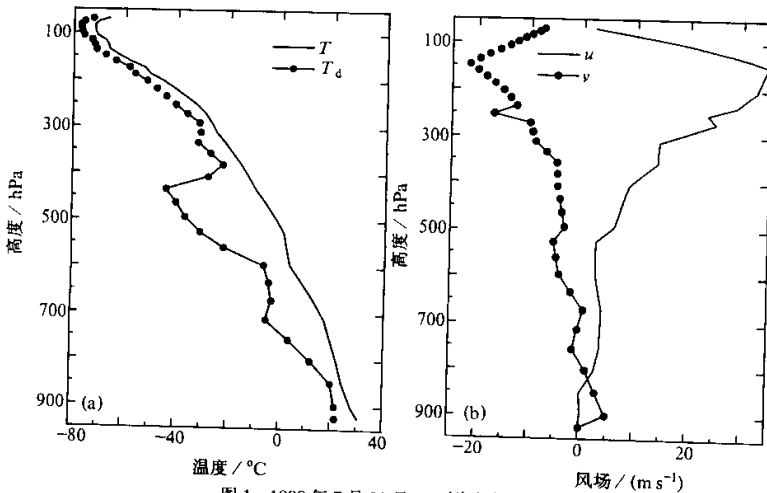


图 1 1998 年 7 月 21 日 13 时郑州探空资料

(a) 温度(实线)和露点(点线); (b) 经向风(实线)和纬向风(点线)

底高约 1.5 km, 该层气温 20°C 左右。200 hPa 高度风速达到 40 m s^{-1} , 但在 300 hPa 以下, 风速则比较均匀, 一般小于 10 m s^{-1} 。

图 2 是模拟自然云总含水量即 $Q_t (\text{g kg}^{-1})$ 以及流场分布。4 分钟时, 初始云泡在 2.5 km 高度出现, 随着云的发展, 含水量逐渐增大, 云顶有所上升。8 分钟, 云顶发展到 6 km, 上升气流速度最大值出现在 4 km, 为 22.3 m s^{-1} , 其上出现含量达 9.8 g kg^{-1} 的总含水量中心。11~12 分钟, 云顶发展到 10 km, 主上升气流区 0°C 等温线位

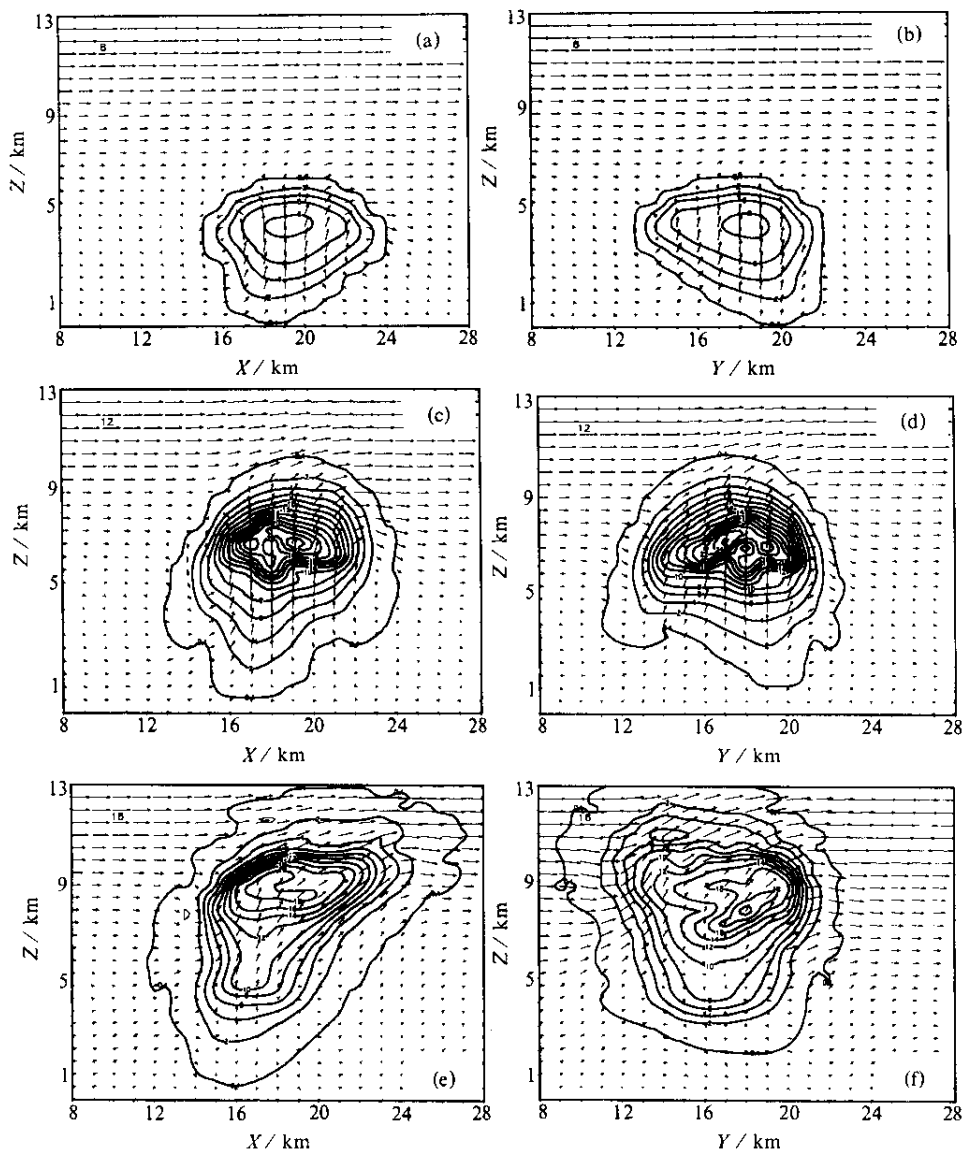


图 2 模拟自然云总含水量及流场

- (a) 8 min, X-Z; (b) 8 min, Y-Z; (c) 12 min, X-Z;
 (d) 12 min, Y-Z; (e) 16 min, X-Z; (f) 16 min, Y-Z

于 5~5.5 km 高度区域。而在 5~8 km 已有含量大于 10 g kg^{-1} 的过冷雨水累积区，其体积约 10 km^3 ，相当于整个云体的 1/50，其中心高度 6.5 km，中心值 18 g kg^{-1} (图 5)。此时，在 5~9 km 已经形成大量冰雹胚胎，中心高度 7.5 km。在雹胚中心下方，含水量中心之上约 7.0 km 高处，开始有冰雹形成。14~16 分钟，冰雹大值中心随雹胚中心上升并且迅速增长，中心位置达到 8.0 km 高度，由于部分大冰雹下落，其下方出现一个较大的冰雹中心，高度 6.0 km 左右。随着冰雹增长，过冷雨水大量被消耗，中心高度逐渐下降，16 分钟时，中心值仅为 3.5 g kg^{-1} ，中心高度下降到 5.0 km 之下。18 分钟，云顶达到最高 13 km，冰雹开始落地。从流场看，此时云体中下层出现下沉气流，中上层仍有上升气流维持。24 分钟，由于雨、雹下落，云体明显减弱，云砧向前拉大。到 36 分钟，云体中下部消亡，仅存云体砧部而成为层积云。

图 3 为当天郑州雷达观测到的 RHI 回波。可见回波顶高与模拟结果基本一致，且在 4~8 km 之间具有强回波中心，与模拟云含水量累积区所在高度大体相符。

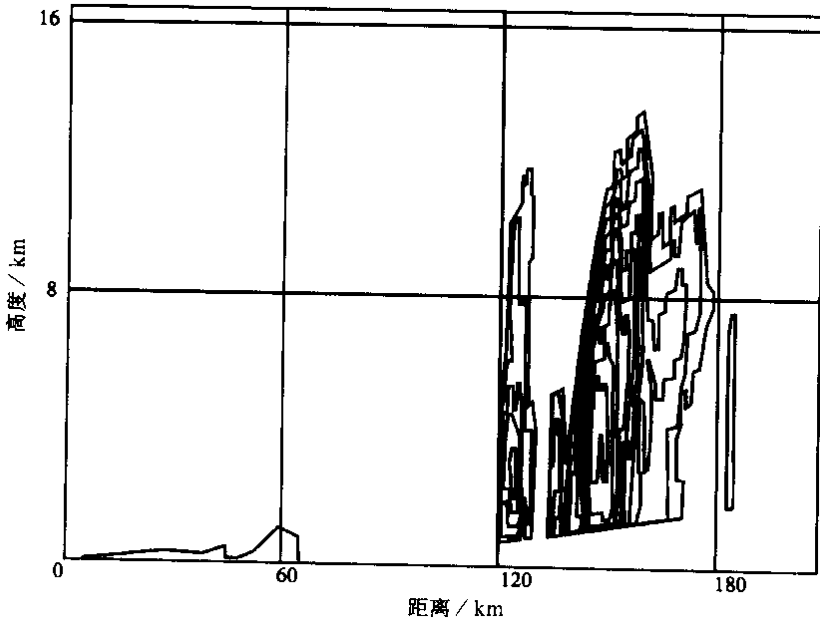


图 3 16 时郑州雷达 RHI 回波图

频率：200，时间 16:10，日期 1998-07-21，方位：83.24，等值线间隔 5 dBZ，中心最强 50 dBZ

表 1 给出了模拟云中上升气流、过冷雨水、雹胚和冰雹含量的最大值及所在高度。最大上升气流和过冷水中心都在模拟域中央区域，在冰雹形成前，过冷雨水中心位于最大上升气流上方，随着云的发展，其含水量也逐渐增大，第 11 分钟达最大值。第 10 分钟雹胚在过冷水中心部位形成，而后其中心抬到过冷雨水中心之上，约 7.5 km 高度。在过冷雨水量达最大值时，即第 11 分钟在雹胚中心之下、过冷雨中心位置，由雹胚碰冻过冷雨水而形成冰雹，而后在雹胚中心与过冷雨中心之间迅速增长，在 5 分钟之内，其中心值由 0.1 g m^{-3} 增长到 5.1 g m^{-3} ，达到最大值。与此同时，雹胚减少，过冷雨水量迅速减少。

表 1 模拟自然云上升气流、过冷雨水、雹胚和冰雹最大值及相应出现高度

时间 (min)	上升速度		过冷雨水		雹胚		冰雹		云水	
	最大值 (m s^{-1})	高度 (km)	最大值 (g m^{-3})	高度 (km)	最大值 (g m^{-3})	高度 (km)	最大值 (g m^{-3})	高度 (km)	最大值 (g m^{-3})	高度 (km)
8	22.3	4.0	0.7	5.5					3.8	3.5
9	24.8	4.0	3.0	6.0	0.0	6.5			3.6	3.0
10	29.3	4.5	6.8	7.0	0.2	7.0			3.7	3.5
11	30.4	5.5	18.7	7.0	9.3	7.5	0.1	7.0	3.3	4.0
12	32.1	6.0	17.0	6.5	24.6	7.0	1.0	7.0	4.4	6.5
13	30.5	6.5	7.3	6.0	21.6	8.0	2.1	7.5	3.8	7.0
14	29.2	7.5	5.3	5.5	20.7	6.5	4.5	7.0	6.2	10.0
15	26.2	9.0	4.0	5.5	16.7	8.5	4.8	7.0	5.0	10.0
16	24.2	10.0	3.3	5.0	14.0	10.0	5.1	8.0	4.1	9.5
17	18.0	11.0	1.2	4.5	13.4	10.0	5.0	5.0	3.6	8.5
18	14.1	12.0	0.7	4.5	12.1	9.5	5.0	5.0	3.5	8.5

图 4 给出了各水物质中心值及其高度随时间的变化。由图可以清楚地看到各种水物质增长之间的关系。当云顶冲过 0°C 层高度以后，出现了过冷雨水；而后随着云顶的升高，在 $7\sim 8\text{ km}$ 高度形成冰晶，与此同时在冰晶中心之下产生了雹胚，紧接着在雹胚中心与过冷雨中心之间出现冰雹。10~12 分钟，过冷雨与雹胚同时骤增，12~14 分钟，冰雹迅速增长，与此同时，过冷雨水中心值迅速下降，雹胚中心值逐渐减小。从雹胚、过冷雨及冰雹中心高度相互配置来看，雹胚在上，过冷雨在下，冰雹居中。可见雹胚的增长与过冷雨水相联，而冰雹则是由部分雹胚转化并在过冷雨区碰冻大量过

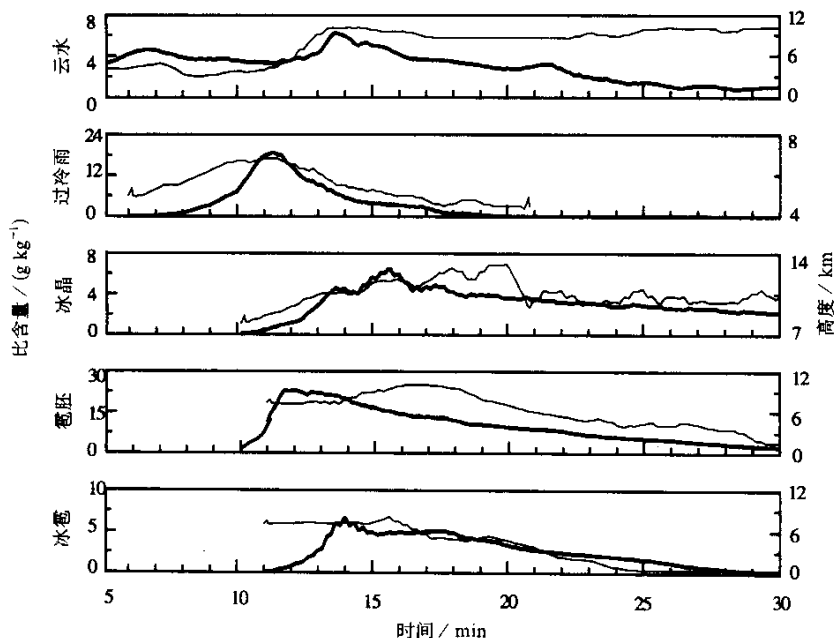


图 4 自然云水物质中心值 (粗实线) 和中心高度 (细实线) 随时间变化

冷雨水而增长的。

为了更清楚地看出冰雹生长与含水量累积区之间的关系,图 5 给出了云中过冷雨(细实线)、雹胚(粗实线)和冰雹(阴影区)的分布。可见冰雹是在过冷雨含量大于 10 g kg^{-1} 的累积区内形成,而且起始中心则位于累积区中心前上方、雹胚区中心前下方的负温区内。从流场看,冰雹形成于最强上升气流区的前方约 1 km 处。

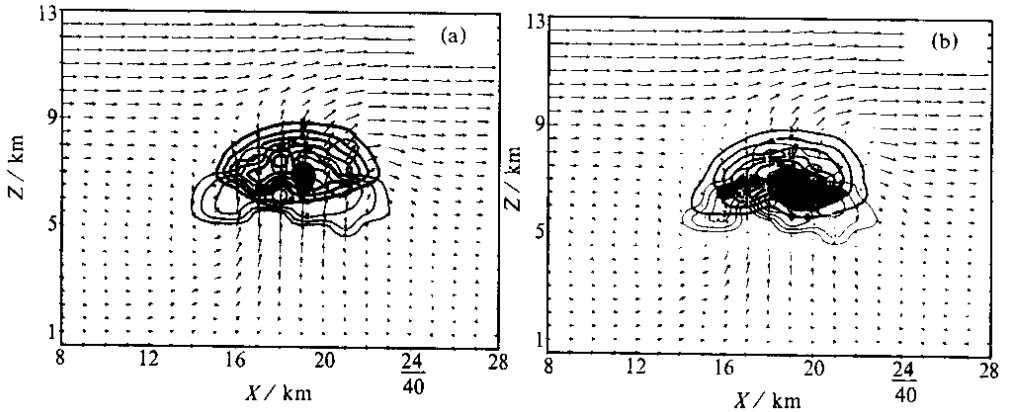


图 5 第 12 分钟模拟自然云 (a) 和 4km 作业云 (b) 过冷雨(粗实线)、雹胚(粗实线)和冰雹(阴影区)比含量分布

在表 3 中给出了第 16 分钟模拟自然云冰雹生长区中冰雹形成的主要微物理过程。由表可见,冰雹由雹胚转化及与雨、雹胚碰冻而来,而雹胚主要是由冰、雪晶碰冻过冷雨滴产生并与过冷雨碰冻而增长的。

综上所述,该例冰雹云在主上升气流区之上存在含水量累积区,区内总含水量最大值超过 20 g kg^{-1} ,其中过冷雨含量超过 18 g kg^{-1} ,冰雹最先在累积区上方、雹胚中心区下方由雹胚撞冻过冷雨滴而成,而后冰雹碰并过冷雨迅速增长,而过冷雨水则迅速消耗,直至基本耗尽,主要冰雹增长过程不到 10 分钟。这使我们得到启示:雹胚竞争的人工防雹作业必须抓住短短的冰雹增长期,而且应在冰雹增长期之前进行。

4 人工催化数值试验

考虑到国内多使用三七高炮进行人工防雹,因而模拟试验的播撒物质 AgI 由三七高炮送入云中。根据三七聚能炮弹 B 型弹平均情况^[12],其成核率为:

$$N_{\text{a}}(\Delta T) = \begin{cases} 0 & \Delta T < 4^{\circ}\text{C} \\ 10^6 \exp(-0.009\Delta T^3 + 0.324\Delta T^2 - 1.90\Delta T + 4), & 4^{\circ}\text{C} \leq \Delta T < 18^{\circ}\text{C} \\ 5 \times 10^5 \exp(-0.009\Delta T^3 + 0.324\Delta T^2 - 1.90\Delta T + 4), & 18^{\circ}\text{C} \leq \Delta T < 20^{\circ}\text{C} \\ 9.9 \times 10^{15} & \Delta T \geq 20^{\circ}\text{C} \end{cases}$$

其中, $N_{\text{a}}(\Delta T)$ 的单位是个 g^{-1} , $\Delta T = T_0 - T$ 。本文考虑三种 AgI 粒子的成核机制,即由于布朗运动和惯性碰撞而发生在人工冰核和云、雨滴之间的接触冻结核化,以及水汽在人工冰核上的凝华核化和凝结—冻结核化。由于 AgI 粒子的成核作用,使得水成物

和冰晶浓度发生变化，相应的过程包括：云滴冻结成冰晶，雨滴冻结成冻滴，水汽在人工冰核上凝华成冰晶。

本文对该例雹云进行不同催化时间、催化部位和催化剂量的数值试验。催化时间由冰雹形成前 4 分钟到云内出现冰雹后 4 分钟；播撒部位均在主上升气流区（格点为 $X = 18 \sim 20$, $Y = 17 \sim 19$ ），但垂直高度在 3 ~ 6 km 间变化；播撒剂量设计了 4 组，即 40 g、200 g、300 g 和 360 g。数值试验一共进行了 39 次，表 2 列出了部分试验结果以着重研究催化时间和高度对效果的影响。

表 2 不同催化方案的效果

时间 (min)	播撒高度 (km)	播撒剂量 (g)	地面总降雹量变化 (%)	地面总降雨量变化 (%)
7	4	300	-21.4	8.38
7	5	300	-33.7	11.1
8	4	300	17.2	-0.8
8	5	300	-18.7	8.5
9	4	300	1.90	1.94
9	5	300	5.97	1.5
10	4	300	-2.0	3.3
10	7	300	-6.8	28.7
11	4	300	-2.2	2.26
12	4	360	-1.58	0.51
12	5	360	-1.23	1.77
12	6	360	-3.29	2.40

由表 2 可见，不同的催化方案所产生的效果不同，催化方案选择适当可获得好的减雹效果，反之若催化方案选择不当，则有可能获得反效果。一般来讲，在冰雹形成前 1 ~ 4 分钟，在紧靠累积区中心催化效果较好，AgI 剂量越大越好；在冰雹形成后催化，虽能减雹，但减雹量很小；在累积区下方的正温区催化效果不如在累积区中心播撒好而且有可能使冰雹增加。以下将对第 8 分钟两种播撒高度和播撒高度同为 5 km 但作业时间相差 1 分钟而得到相反催化效果的试验进行详细分析。

4.1 累积区中心催化试验

选择冰雹形成前 3 分钟即第 8 分钟进行，催化部位选择当时过冷雨中心的底层，($x = 18 - 20$, $y = 17 - 19$, $z = 5$ km)，紧靠液水中心，AgI 剂量为 300 g。催化结果表明，催化使雹胚形成时间提前了 1 分钟。图 6 给出了第 16 分钟自然云和作业云的冰雹分布，由图可见，催化后云中冰雹明显减少，这表现在不仅雹区等值线变疏，其中心数值也至少减小了 1 g kg^{-1} 。

表 3 给出了本次催化试验第 16 分钟时冰相物质及过冷雨主要微物理过程的产生量。由表可见，催化后冰晶数量明显增加，冰晶向雪花的转化率增大，雪花向雹胚的转化率 P_{se} 也有所增大。实际上，云中冰雹胚胎主要是由过冷水滴与冰晶碰撞 (CLrie) 产生的。催化后云中雹胚的数量明显增加，而质量有所减少，因而雹胚向雹的转化率 P_{ch} 大大降低，由 5.7×10^{-5} 下降为 3.1×10^{-5} ，使冰雹量减少。本次催化试验使地面总降雹量减少了 18.7%，而降雹动能由 112 J m^{-2} 减小为 95 J m^{-2} 。与此同时，地面总降雨量增加了 85%。

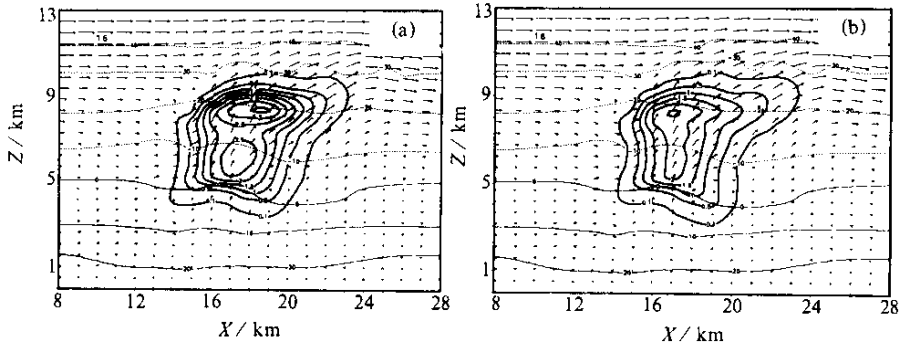


图 6 第 16 分钟自然云 (a) 和作业云 (b, 5km) 的冰雪分布

表 3 冰雹生长区内 ($x: 14 \sim 22, y: 12 \sim 20, z: 5 \sim 9$ km) 主要微物理过程产生量 (第 16 分钟)

冰相物质	主要微物理过程	模拟自然云	5 km, 8 min 催化	5 km, 9 min 催化	4 km, 8 min 催化	4 km, 7 min 催化	4 km, 10 min 催化
过冷雨	T_{Q_r}	9125.1	5606.4	7807.1	6715.6	5559.5	9132.2
冰晶	T_{Q_i}/T_{N_i}	68.8/18.72	110.42/18.77	93.5/18.76	100.0/18.85	113.8/18.85	82.4/18.85
	NUvi/NNUvi	0.00/14.14	0.00/14.46	0.00/14.23	0.00/14.44	0.00/14.51	0.00/14.24
	Pei/NPci	0.21/14.61	0.46/14.99	0.20/14.62	0.27/14.58	0.47/15.03	0.22/16.63
	HNUci/NHNUci	2.67/18.72	3.2/18.72	2.75/18.72	3.36/18.76	3.51/18.76	2.51/18.76
	VDvi	66.1	106.4	90.2	95.4	108.8	78.5
雪	X_{si}/N_{Xsi}	---	0.75/17.87	0.62/17.79	1.26/18.10	1.37/18.13	1.38/18.14
	T_{Q_s}/T_{N_s}	13.1/15.15	18.7/15.33	13.7/15.16	18.4/15.22	18.8/15.32	14.9/15.11
	CNis/NCNis	2.47/15.12	2.74/15.26	1.96/15.10	2.12/15.13	2.53/15.22	2.29/15.07
	CLii/NCLii	0.02/13.97	0.07/14.53	0.04/14.37	0.04/14.42	0.07/14.60	0.02/14.01
	CLris/NCLris	0.08/13.67	11.26/13.77	8.44/13.87	12.1/14.25	11.6/14.34	9.32/13.87
雹胚	VDvs	7.47	1.58	1.07	1.50	1.67	1.16
	T_{Q_e}/T_{N_e}	1189.3/15.01	1177.3/15.10	1185.3/15.02	1141.9/14.96	1162.6/15.12	1181.4/15.04
	CNie/NCNie	0.00/10.08	0.00/9.97	0.00/10.86	0.00/9.61	0.00/11.95	0.00/10.32
	CNse/NCNse	0.05/12.33	0.14/12.77	0.08/12.57	0.17/12.97	0.47/12.93	0.08/12.59
	CLrie/NCLrie	297.82/14.99	292.7/15.08	266.9/15.01	215.1/14.93	294.1/15.10	306.5/15.02
雹	CLrse/NCLrse	36.91/14.57	58.3/14.77	36.0/14.59	47.7/14.64	78.6/14.82	42.1/14.62
	HNUre/NHNUre	0.04/11.53	0.02/12.20	0.03/11.70	0.03/12.53	0.03/12.70	0.04/11.99
	CLre	12.1	20.8	13.3	17.6	24.8	16.6
	CLre	796.7	746.9	815.2	814.9	721.1	765.3
	CLie	18.2	35.9	25.7	30.1	38.2	26.3
冰雹	VDve	60.8	76.6	60.5	60.1	79.2	62.5
	NUrse/NHNUre	---	0.98/10.40	3.21/10.44	2.01/10.63	1.03/10.62	3.87/10.71
	T_{Q_h}/T_{N_h}	215.2/12.14	189.7/12.08	237.9/12.16	266.8/12.19	177.8/12.06	202.2/12.11
	CNeh/NCNeh	177.9/10.77	155.34/10.59	196.7/10.71	217.8/10.67	144.4/10.54	164.2/10.70
	CLeh	16.8	16.7	18.0	20.6	16.9	18.7
转化率	CLth	19.8	16.6	21.9	26.2	14.9	18.1
	CLch	0.57	1.02	1.15	2.05	1.47	1.01
	P_{is}	2.51×10^{-4}	3.09×10^{-4}	2.18×10^{-4}	1.90×10^{-4}	2.34×10^{-4}	1.66×10^{-4}
	P_{ie}	2.29×10^{-9}	1.58×10^{-9}	1.29×10^{-8}	0.57×10^{-9}	1.26×10^{-7}	2.95×10^{-9}
P_{se}	1.51×10^{-3}	2.75×10^{-3}	2.51×10^{-3}	5.62×10^{-3}	4.07×10^{-3}	3.02×10^{-3}	
P_{ch}	5.75×10^{-5}	3.09×10^{-5}	5.62×10^{-5}	5.13×10^{-5}	2.63×10^{-5}	4.57×10^{-5}	

注: (1) 表中水物质标数值意义: 斜杠前数值表示质量 (单位为 kt); 斜杠后数值表示数量, 即设斜杠后数值为 n , 则数量为 10^n 个。 T_Q 表示总质量, T_N 表示总个数, 各项符号意义见文末附表。

(2) P_{xy} 表示向 y 类粒子转化的 x 类粒子占 x 类粒子总数量的比例。

图 7 给出了 8 min、5 km 作业云的过冷雨、霰胚和冰霰中心值及云中霰块平均直径随时间的变化（细实线），为便于比较，图中同时叠加了自然云水物质的变化（粗实线）。由图可见 8 分钟作业后，第 9 分钟即提前产生了霰胚，比自然云提前了 1 分钟，所在高度为 6.5 km，此后 2 分钟急剧增长，最大中心值超过 22 g m^{-3} ，超出自然云霰胚值近 13 g m^{-3} 。12~14 分钟，作业云霰胚值与自然云相当，略有减少，但自 15 分钟之后，作业云霰胚又明显多于自然云。从霰中心值变化来看，作业使冰霰形成初期略有增多，但 13~15 分钟，即自然冰霰骤增阶段，作业云冰霰中心值明显小于自然云，

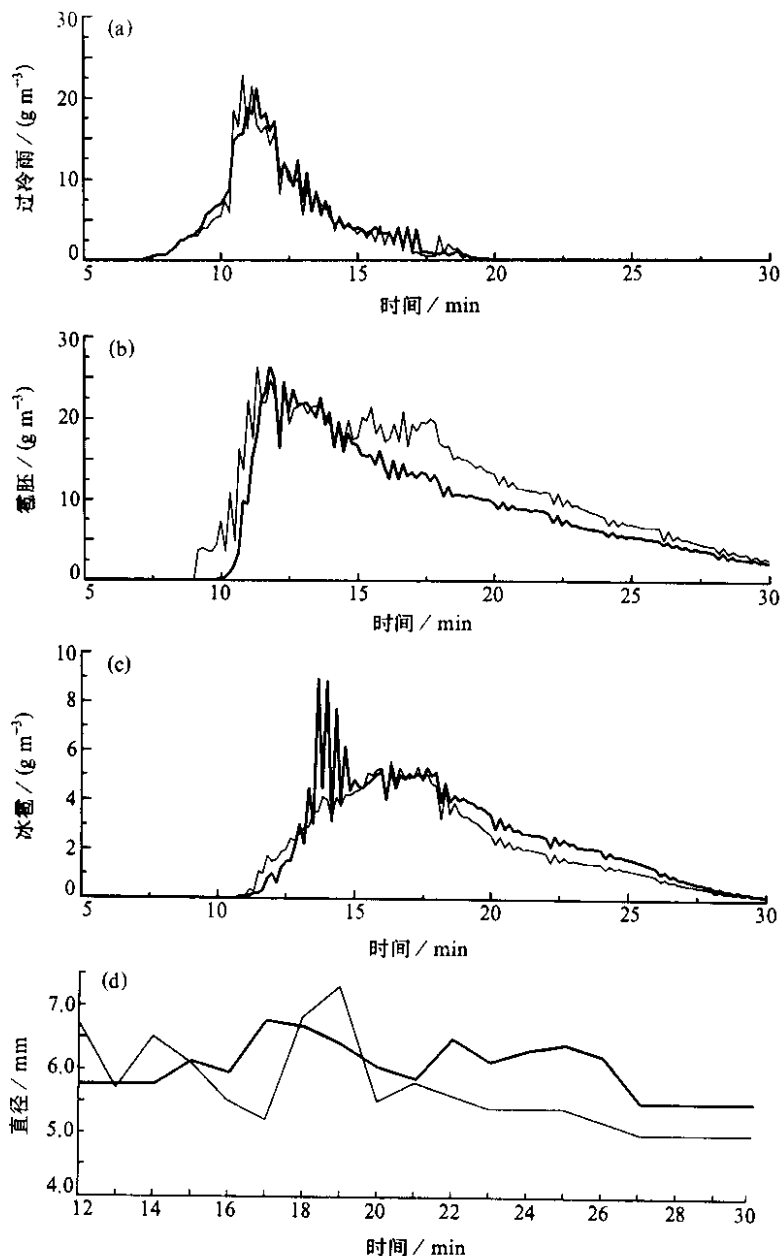


图 7 8 min、5 km 作业云（细实线）与自然云（粗实线）冰霰生长区的过冷雨、霰胚、冰霰中心含量和霰块平均直径的对比

17 分钟以后, 作业云冰雹中心值始终小于自然云。从云中雹块平均直径变化来看, 冰雹形成初期, 作业云雹块比自然云稍大些, 但从 15 分钟起, 作业云雹块比自然云平均约减少 0.6 mm。从过冷雨水中心值变化来看, 当作业云雹胚多于自然云时, 过冷雨水值一般都小于自然云。

上述事实进一步说明, 人工催化使雹云中增加了大量冰晶和雪花, 它们与过冷雨滴的碰并使冰雹胚胎明显增多, 使过冷雨滴减少, 因而既限制了雹胚向雹的转化, 又抑制了雹因碰冻过冷水滴的增长, 最终使落地冰雹的数量和质量减少, 部分雹胚下降融化为雨滴而使降雨量增加。

这次试验获得成功, 与所选择的作业时机和部位合适有关。8 分钟在 5 km 高度播撒 AgI, 根据当时云中上升气流情况, 大约 1 分钟后就可将 AgI 粒子带升至 6.5 km 高度, 进入当时刚开始形成的自然云雹胚区。虽穿过了过冷雨中心区, 但当时过冷雨水很少, 尚处形成初期。因而 AgI 粒子穿过过冷雨区时, 只能与过冷雨滴碰冻形成小雹胚, 而未能碰并增大就被带入自然雹胚区, 从而使总的雹胚数增多, 使雹胚向雹的转化率减小。同样道理, 9 分钟在 6 km 高度催化, 或是 10 分钟在 7 km 高度播撒作业, 都能取得减雹增雨效果 (见表 2)。

4.2 累积区中心下方催化试验

选择催化高度 4 km, 其他与前面试验相同。作业时该高度上的环境温度在 8~10℃ 之间, 在液水含量中心之下, 距离过冷水中心约 1.5 km。图 8 给出了第 16 分钟作业云的冰雹分布。与图 6 自然云冰雹比含量分布比较, 催化云中冰雹含量明显增多, 冰雹中心值要比自然云大 1.0 g kg^{-1} 。本次试验地面累积降雪量, 比自然降雪量增加 17.2%, 累积降雨量则减少了 0.8%。

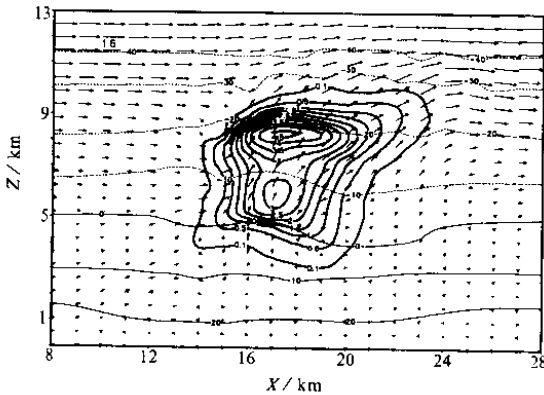


图 8 4 km 高度催化第 16 分钟云中冰雹分布

作业高度降低, 冰雹为何增加? 与前面一样, 重点分析第 16 分钟冰相微物理过程产生量。由表 3 可见, 由于 AgI 作用, 冰晶、雪晶都明显增加, 与 5 km 作业差别不大。由于人工冰核作用, 雨滴冻结成雹胚的数量达到 $10^{10.63}$ 个, 质量约为 2 kt, 但总的雹胚的数量和质量却有所减少, 与自然云相比, 雹胚的质量减少了 4%, 数量减少了 10.9%。由于数量减少量大于质量减少量, 单个雹胚的平均质量和尺度有所增大, 因而碰冻过冷水成雹的机率加大, 最终导致云中冰雹数量增加了 12.2%, 质量增加了 24%, 从而使地面降雪量增加。作业后冰、雪晶虽然都有所增加, 但从表 3 可知, 冰、雪晶自动转化为雹胚的数量所占比例较小, 雹胚主要是由冰晶和雪碰冻过冷雨滴形成的, 雹胚的质量增加最主要的微物理过程也是碰冻过冷水。表 3 中显示, 4 km 作业云的冰晶碰冻雨成雹胚量与自然云比较, 数量减少了 12.9%, 质量减少了 27.8%。作业后冰晶增多, 为何碰冻过冷雨成雹胚数反而减少? 主要是由于雹胚碰冻过冷水增加, 从而使过冷水减少。表 3 中 4 km 作业云

霰胚碰冻过冷雨水达到 814.9 kt, 比自然云多消耗了 2.3%, 过冷雨水的减少, 导致了冰晶撞冻过冷雨成霰胚的数量的减少。过冷雨水的消耗量在第 16 分钟之前更为明显, 如图 9 所示, 在第 12 分钟, 作业后霰胚碰冻过冷雨水比自然云约增加了 55%。这不仅使作业云霰胚质量增加, 使冰雪晶撞冻过冷雨成霰胚的数量减少, 而且有利于霰胚向霰的转化。

在表 3 中霰胚转化为霰的质量, 比自然云增加了 22.4%。冰霰的增大, 又使霰碰冻雨水质量增加, 与作业云相比, 增加了 32.3%。最终导致第 16 分钟冰霰总质量增加, 数量增多。

需要讨论的问题是, 4 km 作业云中霰胚为什么少于自然云, 霰胚碰冻过冷雨水为什么多于自然云? 为了解决这个问题, 将模拟自然云和 8 min、4 km 作业云各水物质中心值及高度做在一张图上(图 10), 以便比较分析。

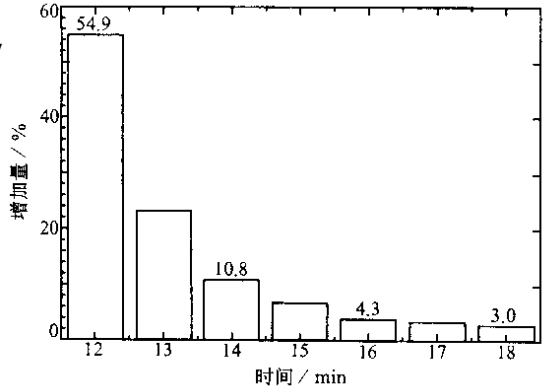


图 9 4km 作业云霰胚碰冻过冷雨水比自然云的增加量 (%) 随时间变化

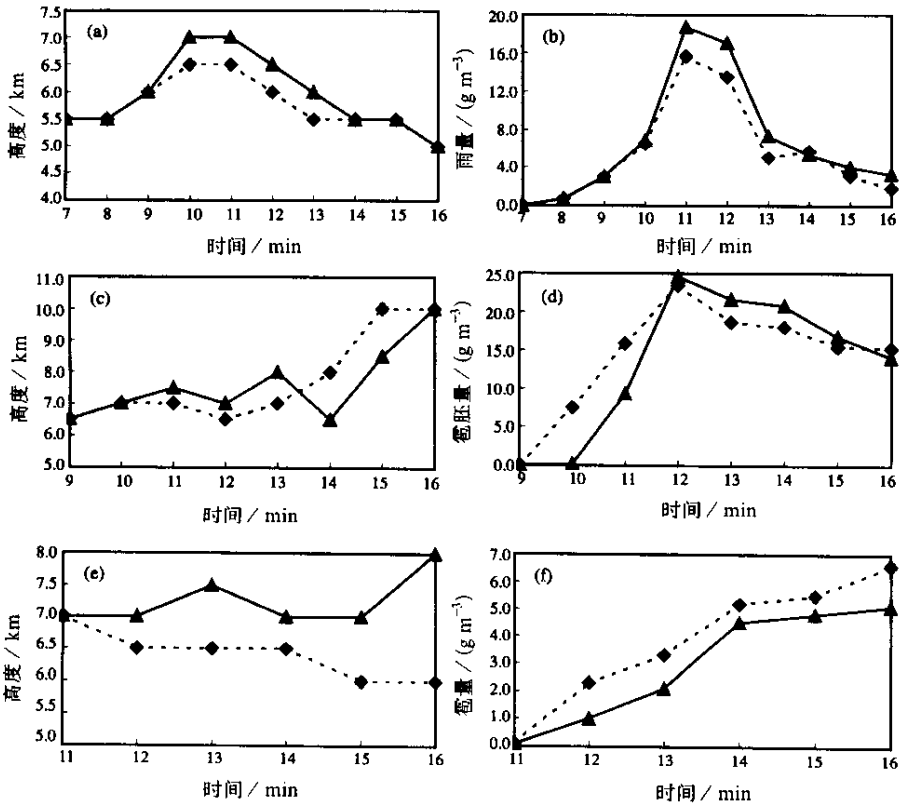


图 10 模拟自然云(实线)与 8 min、4 km 作业云(虚线)的过冷雨(a、b)、霰胚(c、d)、冰霰(e、f)中心值及高度的比较

可以看出,从第 10 分钟开始,作业云过冷雨水减少,中心高度下降,与此同时,霰胚量比自然云增加,霰胚中心高度有所下降。紧接着冰霰量增多,中心高度下降。显然,作业云中的这种变化是由 AgI 催化作业引起的。8 min 在 4 km 高度播撒 AgI,当时那里的上升气流约为 25 m s^{-1} ,2 分钟后可上升 3 km,达到 7 km 高度。而在 10 分钟时,过冷雨中心高度也在 7 km,而且处在急剧增长阶段。在这种情况下,AgI 粒子与过冷雨滴碰冻,形成大量霰胚,其中心值达到 7.5 g m^{-3} 。而在自然云中,此时霰胚刚开始出现,中心值仅为 0.2 g m^{-3} 。11~12 分钟,自然云中过冷雨达最大值,处于过冷雨中心区的人工冰核大量碰冻过冷雨成霰胚,霰胚碰冻过冷雨成冰霰。因此,与自然云相比,这段时间霰胚与冰霰量增多,其中心高度下降。比较图 5a、b 两图也可看到,作业云中霰胚和冰霰的中心高度比自然云要低,霰胚区更接近过冷雨水中心区,因此霰胚能与更多的过冷雨水碰并增长,结果使作业云中过冷雨水区中上部已被霰胚消耗殆尽,使冰霰区范围扩大。由于人工冰核、霰胚和冰霰在过冷雨发展关键时期,在过冷雨中心区大量碰冻过冷雨水,消耗过冷雨水,因而使自然冰雪晶碰冻过冷雨水数量减少,导致霰胚总量减少,单个霰胚的平均质量和尺度增大,最终使霰胚碰冻过冷雨水的机率增大。这就是说,这个试验的作业时机和作业高度选择不当,人工霰胚主体未能进入自然霰胚区,共同争食水分,使霰胚增多,冰霰减少,而是在自然霰胚进入过冷水中心区之前,先行进入正处强发展阶段的过冷雨水区,抢先与雨滴碰冻。由于人工霰胚少于自然霰胚,因而单个霰胚碰冻过冷雨水量要多,使冰霰增大。

选择在第 9 分钟对 5 km 高度催化作业,其他条件不变。与 8 min、4 km 作业相比,高度提高了 1 km,但作业时间推后 1 分钟。第 9 分钟自然云过冷水中心在 6 km 高度,因此仍属累积区下方作业类型。10~12 分钟自然云过冷雨骤增,中心高度上升到 7 km。播撒的 AgI 大约在 10 分钟之后进入发展强盛的过冷雨中心区,而先行与过冷雨碰冻。由表 3 可以看到,与自然云相比,冰雪晶虽有增加,但霰胚量没有明显增多。与 8 min、4 km 催化相同,霰胚碰冻过冷雨水比自然云增大了 2.3%,最终导致第 16 分钟冰霰质量增加了 10.5%,数量增加 4.7%。计算结果表明,在主要冰霰增长期,即 12~14 分钟,这个试验使冰霰中心高度下降了 0.5 km,接近过冷雨中心区,有利于霰胚和冰霰的碰并增长。因此,表 2 中列出的本试验的负效果,与 8 min、4 km 试验一样,应属同一原因。

10 分钟以后在低于 6 km 高度上的催化试验,如表 2 所示都有减霰效果,但减霰量很少。这是由于这些试验的作业时间比较晚,当上升气流将 AgI 粒子带升进过冷雨区时,自然霰胚已经落入过冷雨水区,并在那里碰冻增长。人工冰核的加入,可使霰胚增多,表 3 中 10 min、4 km 的试验与自然云相比,霰胚数约增加 7%,而质量略有减少,使得单个霰胚平均尺度减小,因而霰胚向霰的转化率减小,从而最终形成的冰霰数量和质量减少。但人工冰核毕竟是在过冷雨发展强盛时穿过其中心的,形成霰胚时间又比自然霰胚晚了一步,因而虽有效果,但不显著。计算表明,这个试验仅是在 14 分钟以后,冰霰才有所减少。

5 小结

通过对 98721 霰云实例的数值模拟试验,可以看到这次霰云在上升气流强烈发展

时，在强上升气流中心之上，过冷雨水骤增，形成含水量累积区；紧接着在累积之上，雹胚骤增；随后在过冷雨中心之上，雹胚中心区下方，由雹胚撞冻过冷雨滴而形成的冰雹迅速增长。对冰雹云进行催化作业，选择不同的时机和部位，可能获得不同的作业效果。如果催化时间早，或是作业部位高，使 AgI 粒子在累积区形成前进入自然雹胚区，则有可能增加大量雹胚，减少向冰雹的转化，从而减少地面降雹量，增加降雨量；如果作业部位低，AgI 粒子在过冷雨水骤增时进入过冷雨中心区，抢先与过冷雨水碰冻，则有可能增加冰雹，出现负效果；如果催化时间晚，AgI 粒子进入过冷雨中心区时，自然雹胚已经在那里碰冻增长，人工冰核也可少量增加雹胚，减少冰雹。

参 考 文 献

- 1 周玲、陈宝君、李子华等，冰雹云中累积区与冰雹的形成的数值模拟研究，大气科学，2001，**25**（4），536 ~ 550.
- 2 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 ~ 912.
- 3 Farley, R. D., P. Nguyen, and H. D. Orville., Numerical simulation of cloud seeding using a three - dimensional cloud model, *J. Wea. Mon.*, 1994, **26**, 113 ~ 124.
- 4 Farley, R. D., D. L. Hjermstad et al., Numerical simulation of cloud seeding effects during a four - day storm period, *J. Wea. Mon.*, 1997, **29**, 49 ~ 55.
- 5 Holroyd III, E. W., J. A. Heibach, and A. B. Super, Observations and model simulation of AgI seeding within a winter storm over UTAH ' S Wasatch Plateau, *J. Wea. Mon.*, 1995, **27**, 36 ~ 56.
- 6 Heimbach, J. A., W. D. Hall, and A. B. Super, Modeling and observations of valley - released silver iodide during a stable winter storm over the wasatch plateau of UTAH, *J. Wea. Mon.*, 1997, **29**, 731 ~ 734.
- 7 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.
- 8 孔凡铀，黄美元，徐华英，对流云中冰相过程的三维数值模拟 I. 模式建立及冷云参数化，大气科学，1990，**14**（4），441 ~ 453.
- 9 洪延超，三维冰雹云催化数值模式，气象学报，1998，**56**（6），641 ~ 651.
- 10 洪延超，冰雹形成机制和催化防雹机制研究，气象学报，1999，**57**（1），30 ~ 44.
- 11 孙学金，宫福久，李子华，初始扰动对冰雹云发展影响的数值研究，气象科学，1998，**18**（2），113 ~ 119.
- 12 石安英、樊慧新、从澜，“三七”炮弹聚能分散碘化银成冰核效率的试验研究，大气科学，1982，**6**（3），315 ~ 323.

A Case Study of Hail Suppression by AgI Seeding Using 3D Hailstorm Model

Zhou Yuquan^{1 A)}, Chen Baojun²⁾, Xiao Hui³⁾, Huang Yimei⁴⁾, and Li Zihua¹⁾

1) (*Nanjing Institute of Meteorology, Nanjing 210044*)

2) (*Department of the Atmospheric Science of Nanjing University, Nanjing 210008*)

3) (*Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029*)

4) (*The Weather Modification Center of Henan Province, Zhengzhou 450003*)

Abstract On the basis of the theory of liquid water accumulation for hail – formation and growth, some numerical experiments have been done to study effects of AgI seeding by using 3D hail cloud model. The data used here was taken from the profile of a hailstorm occurred in Henan Province on July 21, 1998. Through these experiments, we found that the seeding time and height were very important to effects. If the seeding time is not right, maybe the hail accumulation on ground will be increased. However, increasing hail will be occurred if seeding height is not reasonable even if the time is right. Generally, initial seeding in the accumulation core will lead to hail suppression, but below this level, maybe enable hail accumulation on ground to increase.

Key words hail cloud model; numerical experiment; hail suppression

附表 表 3 中各符号的物理意义

符号	物理意义	符号	物理意义
VDvi	冰晶的凝华过程	CLrse	雪和雨水相互碰撞冻形成雪或雹胚
VDvs	雪的凝华过程	CLre	雹胚撞冻雨水过程
VDve	雹胚的凝华过程	CLrh	雹撞冻雨水过程
HNUci	云水在 -40℃ 匀质冻结形成冰晶	CLii	冰晶积聚形成雪
HNUre	云水在 -40℃ 匀质冻结形成雹胚	CLis	雪撞冻冰晶
NUvi	自然冰核活化形成初始冰晶	CLie	雹胚撞冻冰晶
NUre	过冷雨滴异质核化冻结形成雹胚	CLih	雹撞冻冰晶
NUrse	过冷雨滴和人工冰核作用冻结形成雹胚	NUxai	云滴冻结和水汽凝华形成的冰晶
Pci	霰淞附过冷云滴过程中产生次生冰晶	CLsh	雹撞冻雪过程
CLei	冰晶结淞增长(冰晶撞冻云水)	CLeh	雹撞冻雹胚过程
CLcs	雪撞冻云水	CNis	冰晶自动向雪转化过程
CLce	雹胚撞冻云水	CNie	冰晶自动向雹胚转化过程
CLch	雹撞冻云水	CNse	雪花自动转化成雹胚
CLri(e)	冰晶撞冻雨滴形成雪或雹胚	CNeh	雹胚自动转化成雹