

人工防雹实用催化方法数值研究*

李宏宇 胡朝霞 肖 辉 洪延超

(中国科学院大气物理研究所, 北京 100029)

摘 要 目前, 我国普遍采用高炮和火箭两种催化工具进行人工防雹, 但就如何提高这两种作业工具的有效性还缺乏系统的研究。作者利用三维冰雹云数值催化模式, 选取 1999 年 7 月 18 日陕西省旬邑地区的冰雹云作为试验个例, 分别就高炮催化不同的作业时间、催化剂量、作业部位、催化方式等, 以及对火箭催化所携带的高效 AgI 焰剂的成核率与火箭在作业过程中以不同的发射距离、发射仰角和当火箭方位角发生偏离后对地面防雹效果的影响进行数值模拟, 以期为提高防雹效果提供一些技术参考。

关键词: 人工防雹; 数值模拟; 成核率; 高炮催化; 火箭催化

1 引言

冰雹作为一种短时强烈灾害性天气, 其发生、发展和影响过程只有数小时甚至几十分钟, 然而它以及与之相伴随的大风、雷暴常常给农作物带来毁灭性损失, 严重的雹灾甚至危及人的生命。自 Schaefer^[1] 和 Vonnegut^[2] 发现干冰和碘化银可以促使云内的过冷却水向冰晶转化以后, 国内外便普遍采用这两种成冰物质对冷云进行催化, 以达到防雹或增雨的目的。

随着先进探测仪器的发展, 在及时准确地识别雹云和云中雹源位置后, 将催化剂迅速地送入雹源区, 这是现今普遍被采用的催化防雹方法。前苏联及东欧一些国家主要使用大口径的高射炮和火箭作业工具来输送 AgI, 而北美的一些国家则经常采用飞机作业, 在云底或云顶附近将 AgI 粒子播撒入冰雹生长区。我国于 20 世纪 70 年代以后, 防雹作业工具普遍采用 37 mm 口径高炮, 并研制逐步试用新型高效防雹增雨火箭。随着火箭作业系统研究的不断发展及推广, 防雹增雨火箭也逐渐成为业务中另一种经常被使用的作业工具。

然而目前对实际防雹作业中具体的催化时间、催化剂量、催化部位和作业方式等研究仍然缺乏一个系统的认识, 而实践中催化火箭的使用则更多地依赖于直觉。本文即利用三维雹云模式^[3,4], 通过对选取的 1999 年 7 月 18 日陕西省旬邑地区的冰雹云个例进行详细的催化数值试验, 来全面了解高炮和火箭两种作业工具的防雹性能。

2 雹云数值模拟

1999 年 7 月 18 日在陕西省咸阳地区旬邑县境内出现一次强对流天气过程, 雷达回

波顶高 12.0 ~ 14.0 km, 并伴有猛烈大风和短时强降水。地面降落的冰雹直径达 30 mm。该县的五里镇等 4 个乡镇 14 个行政村受灾, 累计面积约达 860 公顷, 造成直接经济损失近 88 万元。由 17 和 18 两日天气形势可知, 高空 576 hPa 闭合低压中心大致位于海参崴附近, 槽线位于海参崴、朝鲜半岛、山东半岛以南至安康、成都一线。青藏高原、新疆至蒙古国为高压脊所控制。陕西旬邑县处于槽后脊前的偏北气流中。08:00 时地面的气压场较弱, 东北低, 西南高。高层强烈的西北气流带来干冷空气, 而低层随着太阳辐射的逐渐增强, 加上旬邑县高原山区地形的作用, 很快地面便有对流泡生成。

当日探空层结曲线显示, 低层 2.0 km 左右存在一逆温层, 整个大气层结不稳定。地面相对湿度较高, 为 78.9%, 而模拟域上部湿度仅为地面的一半。在不稳定层结条件下热对流形成后迅速得到发展, 导致强对流性天气的出现。

午后 12:45 时在雷达测站东 10.0 km 处便有积云出现, 随后云体开始发展壮大, 回波强度不断增大, 回波顶和强回波中心高度也很快抬升。至 13:05 时, 对流云已经发展得较为旺盛, 回波顶高接近 12.0 km, 40 dB 强回波中心已达 5.0 ~ 6.0 km。对应的模拟云体在第 20 分钟时总含水量极值也位于 5.0 km 左右, 与雷达回波相吻合。在随后的 1 ~ 2 分钟内, 中心回波强度又有所增加, 曾一度跃至 45 ~ 50 dB, 强回波顶高上升到 7.0 km ~ 8.0 km, 雷达回波顶高也至 13.0 km 以上。巨大的雹云砧延伸达几十公里。继而伴随强烈的大风, 地面出现降雹和强降雨。13:10 以后雹云强回波中心开始慢慢分裂, 中心强度亦减弱, 与雷达观测相仿。模拟云至第 26 分钟时顶高约 12.0 ~ 13.0 km, 与实测云相差不大。随后约在 5.0 km 和 8.0 km 两个高度分别出现一个较大的含水量中心, 雷达显示则表现为存在上、下两个较强的回波区。随着降水出现, 回波渐与地面相接, 雹云强度开始逐减, 强回波中心位置和回波顶高都不断下降。模拟雹云的变化过程也与此类同。

图 1 是实测雹云发展至 13:10 时雷达回波显示, 图 2 是模拟雹云在第 26 分钟时沿 Y 等于 16.0 km 处云内总含水量场垂直剖面结构。图中等值线代表云内总含水量, 水平线为温度, 这里简单地用总含水量场的分布状况来表明该例冰雹云的一些宏观特征。两图比较可以看出, 模拟云与实测云在强回波所在高度、回波顶高、云形以及整体结构上都很相似。

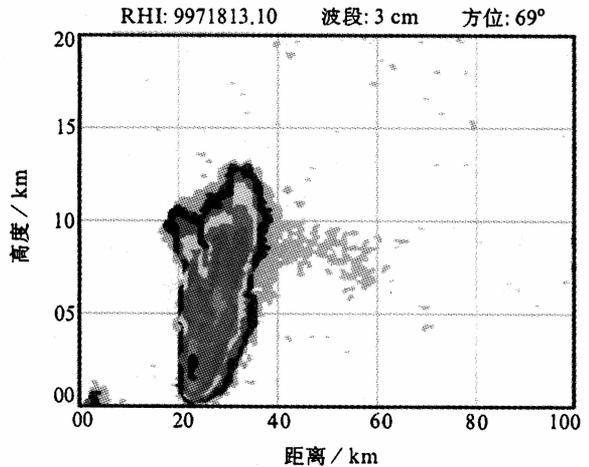


图 1 1999 年 7 月 18 日 13:10 时雹云雷达回波结构

3 高炮催化试验

高炮防雹主要是利用炮弹爆炸作用将携带的 AgI 剂分散入云, 通过 AgI 粒子与雹云

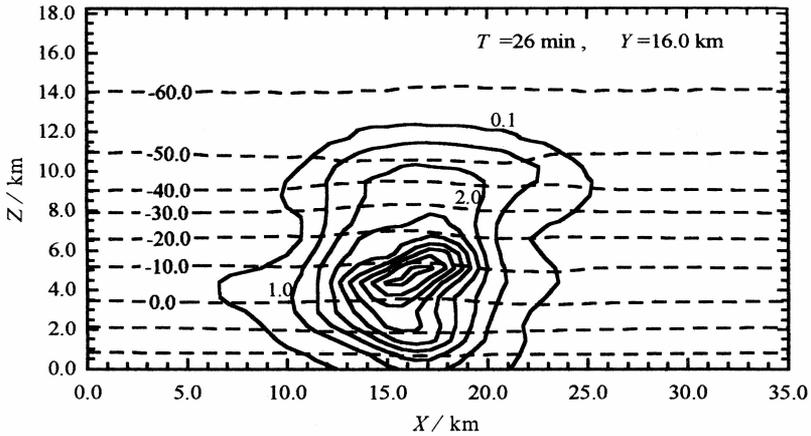


图2 模拟雹云在第26分钟时云内总含水量垂直分布(等值线间隔为1.0,单位: g m^{-3})

内各种水成物间的相互作用,以影响冰雹形成及增长的微物理过程,并达到防雹减灾的目的^[5]。本文只考虑加入催化剂的微物理作用^[6,7],而忽略炮弹爆炸作用所带来的动力影响^[8]。研究中选用河北省气象科学研究所石安英等^[9]研制的“三七”聚能 AgI 炮弹进行催化试验,其 AgI 成核数与温度之间的关系由表 1 给出。

表 1 “三七”聚能炮弹(含 1g AgI)成冰效率

温度/ $^{\circ}\text{C}$	AgI 粒子数上限/个	AgI 粒子数下限/个	平均 AgI 粒子数/个
-20.0	1.6×10^{16}	3.2×10^{15}	9.9×10^{15}
-18.0	1.1×10^{16}	1.0×10^{15}	3.5×10^{15}
-16.0	2.0×10^{15}	5.6×10^{13}	4.5×10^{14}
-14.0	2.0×10^{14}	5.6×10^{11}	1.0×10^{13}
-12.0	7.0×10^{12}	1.5×10^{10}	3.0×10^{11}
-10.0	1.9×10^{11}	1.0×10^8	5.0×10^9
-8.0	1.0×10^{10}	1.8×10^7	1.8×10^8
-6.0	2.5×10^8	3.0×10^6	1.7×10^7
-4.0	1.8×10^7	1.0×10^5	1.0×10^6

7月18日雹云咱发展到第10分钟时,出现初始回波,此时云内最大上升气流速度为 6.6 m s^{-1} ,极值高度约 5.0 km,对应温度 $-5.9 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 。该时刻模拟云体总含水量的垂直剖面结构见图 3。催化试验中各参数分别作如下选取:催化时间,第 10 分钟;催化区域,以第 10 分钟最大上升气流点为中心,沿东西、南北方向各 1 km 的一个水平区域,视作九点催化方式;催化剂量,“三七”聚能炮弹携带的 100 g AgI。通过地面降雹动能通量的改变来衡量防雹效果的好坏。以下各模拟例中只改变被试验的参数,而其他催化参数不变^[7]。

3.1 催化时间试验

人工防雹实践中,选取合适的作业时间对防雹的效果来说非常重要。分别在雹云发展的第 8、10、12、16 和 20 分钟对雹云作区域瞬时催化试验,模拟结果列在表 2 中。从表上看出,与非催化云相比,在第 16 分钟前催化的效果要比在其后催化效果好,若待雹云发展到了第 20 分钟后才催化,防雹效果甚微。作业时间愈早,地面降雹总量和

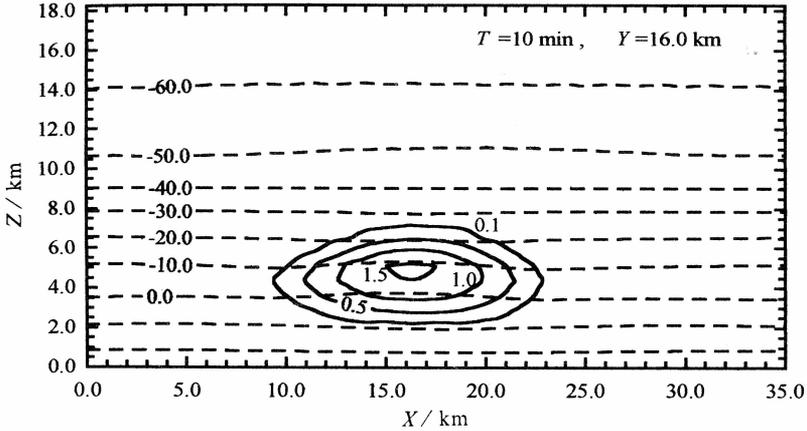


图3 模拟云在第10分钟时云内总含水量垂直分布(单位: g m^{-3})

表2 催化时间对地面降水的影响

催化时间/ min	降雨总量/ kt	降雪及冻滴总量/ kt	降雪总量/ kt	降水总量/ kt	降雹动能通量极值/ $\text{J m}^{-2} \text{s}^{-1}$
8	633.32	26.36	56.79	716.47	3.14
10	643.31	28.95	63.33	735.59	3.68
12	642.92	31.28	67.08	741.28	3.88
16	726.53	41.01	102.79	870.33	5.22
20	737.13	42.52	108.52	888.17	5.48
非催化	737.33	42.34	108.16	887.83	5.52

降雹动能通量极值就越小,且地面的总降水量(包括固态和液态)也越小。可见,催化时间应尽可能地提前,催化效果的好坏对作业时间的选取十分敏感。

如果从前32分钟(在第32分钟时地面降雹最强)云内各种水成物累积量的变化看(见表3),早期(第10分钟)和较晚时刻(第20分钟)催化云内显著的差别是,早期催化后冰晶与雪花的累积质量要比在较晚时刻催化大得多,冻滴的累积质量也较后者大,冰雹产生量则比后者小。浓度变化显示,早期催化后冰晶、雪花、霰粒以及冻滴的累积浓度都较晚期催化高。早期催化促使了作为该雹云内主要雹胚的冻滴数大大增加,平均直径减小,相应地其向冰雹的转化降低,冰雹产生量减少,地面降雹强度减弱。可见,实践中若能在雹云发展的早期即进行作业,防雹效果会好得多。如何

表3 前32分钟云内各水成物累积产生量

催化时间/min	雨滴	冰晶	雪花	霰粒	冻滴	冰雹	
累积质量/ kt	10	1501.64	727.38	288.05	388.12	1428.47	143.16
	20	1650.71	637.65	130.77	455.90	1406.87	235.55
	非催化	1658.16	471.83	124.51	390.63	1284.99	234.28
累积浓度/ 个	10	16.27	20.69	16.47	15.86	15.84	12.05
	20	16.18	20.65	16.19	15.63	15.67	12.24
	非催化	16.23	20.40	16.21	15.45	15.83	12.23

注:浓度值表示为 10^n , n 为表中的数值

准确、迅速地早期识别出冰雹云，这也是人工防雹研究亟待解决的问题。

3.2 催化剂量试验

仍然于第 10 分钟在雹云最大上升气流周围作区域瞬时催化，将 AgI 剂量分别由 50 g 增加到 100 g、200 g 和 300 g，模拟 40 分钟后各自地面降水情况列在表 4 中。可以看出，随着 AgI 剂量加大，地面降雹动能通量极值逐渐变小，防雹效果渐好，而地面的降雨量、降冰量及总降水量也减小。当 AgI 剂量增大到一定程度后，地面减雹效果的变化不再明显。如分别使用 200 g 和 300 g AgI 催化后，地面降雹动能通量极值只相差 $0.2 \text{ J m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ 。因此，为了在有效防雹减灾的同时又能够节约费用，选取合适的催化剂量非常重要。

表 4 催化剂量对地面降水的影响

催化剂量/ g	降雨总量/ kt	降霰及冻滴总量/ kt	降雹总量/ kt	降水总量/ kt	降雹动能通量极值/ $\text{J m}^{-2} \text{ s}^{-1}$
50	650.75	30.79	68.48	750.02	4.07
100	643.31	28.95	63.33	735.59	3.68
200	631.28	26.48	56.06	713.82	3.16
300	623.63	25.30	52.59	701.52	2.96
非催化	737.33	42.34	108.16	887.83	5.52

3.3 催化高度及催化方式试验

实际防雹作业中，高炮催化区域在雹云内通常呈扇面状。我们仍使用上面定义的水平九点催化区域来等效这一扇面区域，其中心点为催化时刻（第 10 分钟）对应的最大上升气流位置，AgI 剂量 100 g。现将该水平区域分别抬升或下降到最大上升气流高度的上方和下方 0.5、1.0、1.5 及 2.0 km 等处进行高度催化试验，催化中心对应于各高度层上的最大上升气流位置，模拟结果列于表 5 中。由表 5 可以看出，除了 7.0 km 高度催化个例外，随着催化高度的降低，所有的物理量都增大。在最大上升气流位置下方催化效果较差，而在其上方催化效果好。在 6.5 km 高度催化后地面总降雹量最小，相对于 7.0 km 高度，作业后地面降雹动能通量极值稍大。高度催化试验效果较好的个例其作业部位都位于上升气流极值区及其上方位置，而那里通常含有较多的过冷云水和雨水。

表 5 催化高度对地面降水的影响

催化高度/ km	降雨总量/ kt	降霰及冻滴总量/ kt	降雹总量/ kt	降水总量/ kt	降雹动能通量极值/ $\text{J m}^{-2} \text{ s}^{-1}$
7.0	827.46	21.43	56.99	905.88	1.38
6.5	629.85	22.45	45.42	697.72	2.28
6.0	624.39	24.21	49.23	697.83	2.51
5.5	631.66	26.44	55.28	713.38	3.02
5.0	643.31	28.95	63.33	735.59	3.68
4.5	653.28	31.42	71.19	755.89	4.52
4.0	665.58	33.51	77.43	776.52	4.65
非催化	737.33	42.34	108.16	887.83	5.52

以最大上升气流所在格点高度为中心点，在垂直方向上选取九个格点（相当于 3.0 ~ 7.0 km）催化来代表防雹过程中高炮同一方位角不同仰角的作业方式，视其为九点垂直催化方式；在高炮方位和仰角都不变的情况下将含有 100 g AgI 的炮弹全部集中发

射到最大上升气流区, 视为单点催化方式。对应于不同的催化方式, 催化结果列于表 6 中。总的可以看出, 区域催化要比单点催化效果好, 但相差不大。这说明在与催化相关的其他参数选定后, 作业区域的大小对地面的防雹效果影响并不大。不过, 相对于高炮的单点催化, 采用在区域内进行作业的方式更具实际意义。此外, 其他催化方式大多在减少降雹的同时也减少了地面液态降水量和无灾害降冰量(降霰及冻滴), 而在垂直方向催化不但减少了地面降雹量, 还使得作业后地面的液态降水量较其他方式来得多。

3.4 连续催化试验

对于高炮防雹来说, 将大量的炮弹一次性发射到要催化区域是不实际的, 现场通常是对雹云某个位置进行连续的射击作业, 这就需要一定的持续时间。假设高炮在 1 分钟内将含有 100 g AgI 的炮弹输送到以上选取的水平九点区域, 从连续催化和瞬时催化比较发现(见表 6), 地面防雹效果相差不大, 总的液态和固态降水量以及地面降雹动能通量极值均相近。可见, 在实践中于短时间内采用间歇性的高炮作业方式对地面防雹效果影响并不大。

表 6 催化方式对地面降水的影响

	降雨总量/ kt	降霰及冻滴总量/ kt	降雹总量/ kt	降水总量/ kt	降雹动能通量极值/ $J m^{-2} s^{-1}$
水平催化	643.31	28.95	63.33	735.59	3.68
垂直催化	695.93	26.67	60.48	783.08	2.30
单点催化	647.56	29.67	64.02	741.25	3.81
连续催化	643.59	29.58	665.18	738.35	3.98
非催化	737.33	42.34	108.16	887.83	5.52

4 成核率影响试验

较低的 AgI 成核率是影响高炮防雹效果的一个重要因素。实践中, 可以通过改进催化工具和提高催化剂自身成核率等办法来提高地面防雹效果。

对于各种 AgI 焰剂, 其成核率一般要比 AgI 聚能炮弹的成核率高几个数量级。为检验高成核率催化剂的防雹效果, 下面就利用中国气象科学研究院研制的 BR-91-Y 型高效 AgI 焰剂成核率^[10]来替代“三七”聚能 AgI 炮弹的成核率, 仿效高炮催化, 于第 10 分钟时将 AgI 送入雹云最大上升气流区, 加入的 AgI 剂量为 10 g, 焰剂成核率随温度的变化曲线如图 4 显示。作业后地面降水情况列在表 7 中。

B 例表明, 使用 10 g 高效 AgI 焰剂催化防雹后, 地面降雹动能通量极值减小到

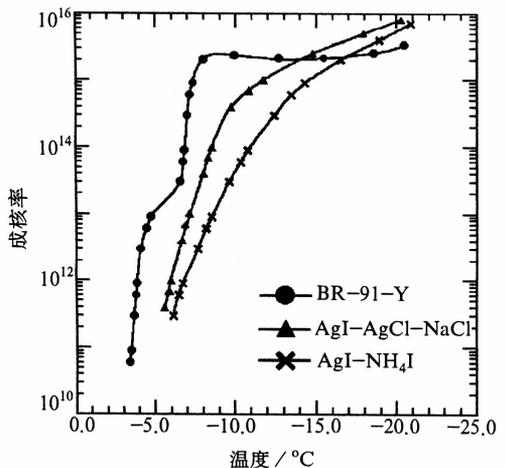


图 4 BR-91-Y 型 AgI 焰剂与另外两种复合核成核率的比较

表7 AgI 成核率对地面降水的影响

	降雨总量/ kt	降霰及冻滴总量/ kt	降雹总量/ kt	降水总量/ kt	降雹动能通量极值/ $J m^{-2} s^{-1}$
A	643.31	28.95	63.33	735.59	3.68
B	536.00	12.05	18.95	567.00	0.41
非催化	737.33	42.34	108.16	887.83	5.52

注: A 为使用含 100 克 AgI 的“三七”聚能炮弹催化; B 为使用含 10 克 AgI 的 BR-91-Y 型高效焰剂催化

$0.41 J m^{-2} s^{-1}$, 与 100 g “三七”聚能炮弹的作业效果相比, 使用焰剂催化不仅大大节约了催化剂量, 而且作业后云内冰晶与霰粒的出现时间都较未催化情形提前, 地面发生最强降雹的时间也向后推迟 6 分钟, 防雹效果非常好。这同时也表明, 提高催化剂成核率是改进催化效果的一种有效途径。

5 火箭催化试验

火箭催化具有作业路径长、高度高等特征, 火箭弹采用催化剂燃烧播撒扩散方式, 且系统机动性好, 发射架射向及射角变化范围大, 作业的面积也广, 此外在短时间内还可连续多次作业, 有利于抓住最佳催化时机。这里就采用携带 BR-91-Y 型高效 AgI 焰剂的火箭进行数值试验。由于模式采用了移动网格方案, 使模拟域随风暴系统同步移动, 保证了模拟雹云始终能位于模拟域的中央。

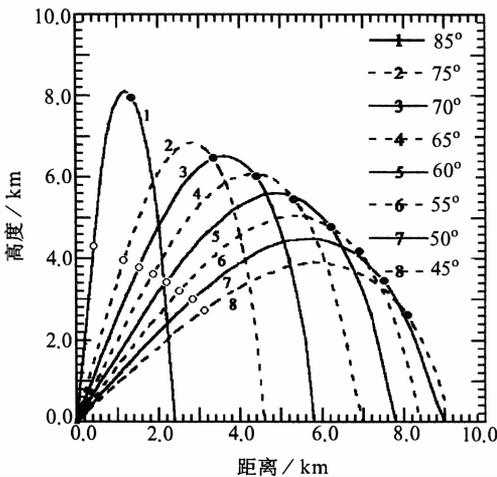


图5 火箭以不同仰角发射对应弹道曲线
(○: AgI 播撒起始点; ●: AgI 播撒终止点)

图 5 给出了对应于不同发射仰角的火箭弹道曲线, 并相应地标出了 AgI 焰剂播撒的起始点和终止点。催化火箭分别以不同发射仰角进行试验, 作业时间仍选择在云体发展到第 10 分钟时进行, 火箭用量为 1 枚 (含有 10g BR-91-Y 型 AgI 焰剂)。

5.1 发射仰角和发射距离试验

在雹云中心正东方向, 火箭从不同的发射点, 以不同的发射仰角进行作业, 催化后地面降水情况列于表 8 中。可以看出, 在离雹云中心水平位置 6.0 km 之内的每一距离段上都存在使地面降雹动能通量极值从 $5.52 J m^{-2} s^{-1}$ 降至 $1.0 J m^{-2} s^{-1}$ 之下的发射仰角, 火箭以这些角度催化后地面降雹动能通量极值均减少达 80% 以上。

发射点位置在 6.0 km 处时, 火箭以 55° 仰角发射催化后地面降雹动能通量极值最小, 仅为 $0.64 J m^{-2} s^{-1}$, 地面总降雹量只有 31.88 kt, 且催化后最强降雹发生的时间也推迟 4 分钟, 防雹效果最好。在该距离火箭以 85° 仰角催化效果最差。若以地面降雹动能通量极值不超过 $1.0 J m^{-2} s^{-1}$ 为最佳标准, 则 $50^\circ \sim 60^\circ$ 仰角范围都较可取。发射点位置在 4.0 km 处时, $50^\circ \sim 70^\circ$ 发射角范围也都可使地面降雹动能通量极值减小至 $1.0 J m^{-2} s^{-1}$ 以下, 而以 60° 仰角催化的效果最佳。从 2.0 km 处催化后各值分析看到,

表 8 火箭发射仰角与发射距离对地面降水的影响

发射仰角	发射距离	降雨总量/ kt	降雹及冻滴总量/ kt	降雹总量/ kt	降水总量/ kt	降雹动能通量极值/ $\text{J m}^{-2} \text{s}^{-1}$
85°	6 km	719.33	38.53	99.49	857.35	5.04
	4 km	686.43	32.34	79.55	798.32	4.07
	2 km	634.43	24.05	43.60	702.08	1.08
75°	6 km	700.66	34.40	88.23	823.29	4.38
	4 km	660.96	28.23	61.52	750.71	2.66
	2 km	595.86	18.33	30.01	644.20	0.62
70°	6 km	661.75	29.43	69.22	760.40	3.41
	4 km	610.31	20.62	36.87	667.80	0.86
	2 km	570.12	14.72	24.67	609.51	0.57
65°	6 km	623.33	23.87	45.30	692.50	1.15
	4 km	570.63	14.18	25.43	610.24	0.51
	2 km	577.12	16.54	25.31	618.97	0.55
60°	6 km	602.32	20.44	34.22	656.98	0.70
	4 km	558.47	13.67	21.78	593.92	0.45
	2 km	599.24	19.59	31.33	650.16	0.65
55°	6 km	602.93	20.46	31.88	655.27	0.64
	4 km	587.41	18.46	25.88	631.75	0.51
	2 km	656.68	26.06	46.89	729.63	1.20
50°	6 km	629.05	23.93	36.73	689.71	0.75
	4 km	631.93	23.73	35.43	691.09	0.73
	2 km	692.26	31.20	59.45	782.91	1.79
45°	6 km	673.16	30.39	50.25	753.80	1.11
	4 km	684.70	30.73	51.53	766.60	1.18
	2 km	720.82	36.57	73.58	830.97	2.70
非催化		737.33	42.34	108.16	887.83	5.52

以 65° 仰角催化后地面降雹动能通量极值减少最多，只有 $0.55 \text{ J m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ，且地面总降雹量也最小，此外，采用 60° 至 85° 以内各仰角也都可达到理想的作业效果。比较每一距离处的最佳催化仰角，在 2.0 km 上为 65°，4.0 km 处是 60°，6.0 km 处为 55° 角，即随着发射点距离增加，最佳催化角度降低。由三个距离上不同发射仰角催化后的地面降雹动能通量极值可以发现，4.0 km 是最佳的发射距离。

从各距离上最佳催化仰角的催化轨迹与云内上升气流区的位置配置情况可以发现，火箭在以该类角度作业时所携带的 AgI 焰剂被大量地播撒入了上升气流区，催化段具有横跨上升气流区并通过其极值区的特点。实践中，若火箭的机动性强，可以结合雹云结构特征、火箭的发射点位置及有效仰角范围来选择较好的催化配置。

5.2 发射方位试验

火箭发射点位置再分别置于雹云中心正西、正南及正北 4.0 km 处，并以 60° 仰角进行催化试验显示，各个方位的防雹效果都较好，地面总降雹量与降雹动能通量极值催化后很小，并且催化后冰雹含水量也减小很多。比较四个方位的作业效果可知，发射点位置选在雹云正东方 4.0 km 处时效果为最佳（表 9）。模拟分析知道雹云体基本上是呈东移，这就表明在实际作业过程中应尽可能地正对着雹云来向进行催化。

表 9 催化方位对地面降水的影响

方位	降雨总量/ kt	降霰及冻滴总量/ kt	降雹总量/ kt	降水总量/ kt	降雹动能通量极值/ $\text{J m}^{-2} \text{s}^{-1}$
正东	558.47	13.67	21.78	593.92	0.45
正西	576.33	16.51	25.47	618.31	0.51
正南	572.76	15.70	25.06	613.52	0.49
正北	571.92	15.65	24.83	612.40	0.48
非催化	737.33	42.34	108.16	887.83	5.52

实践中火箭在以某个仰角发射时,火箭方位会因诸多因素如水平风的作用而产生左右偏离。分别将火箭发射点位置固定在雹云中心正东方 4.0 km 和 6 km 处,并以 60°仰角催化,考虑火箭方位向南和向北分别偏离 5°或 10°时的情形,模拟结果列在表 10。容易发现,当发射点位置较近时,发射方位向南或向北偏离 5°或 10°对防雹效果影响很小。随着发射点位置变远,方位角偏离后作业效果相对变差。由此可见,为能更有效地达到催化防雹目的,应灵活机动地作业,最好将火箭发射点位置置于离雹云中心较近的距离。

表 10 方位偏离对地面降水的影响

方位 偏离	发射 距离	降雨总量/ kt	降霰及冻滴总量/ kt	降雹总量/ kt	降水总量/ kt	降雹动能通量极值/ $\text{J m}^{-2} \text{s}^{-1}$
南偏 10°	4 km	580.05	16.41	27.92	624.38	0.49
	6 km	617.46	22.75	40.75	680.96	0.96
南偏 5°	4 km	558.67	13.31	21.57	593.73	0.45
	6 km	602.23	19.83	34.15	656.21	0.68
正西	4 km	558.47	13.67	21.78	593.92	0.45
	6 km	602.32	20.44	34.22	656.98	0.70
北偏 5°	4 km	556.31	13.51	21.15	590.97	0.44
	6 km	598.25	19.62	33.84	651.71	0.70
北偏 10°	4 km	575.34	16.47	25.93	617.74	0.49
	6 km	614.48	22.71	39.68	676.87	0.87

6 结 论

通过对高炮催化防雹以及火箭催化防雹的详细数值模拟,可以得到如下一些看法:

(1) 对于高炮催化,作业的时间,亦即在雹云发展的哪个阶段进行催化对地面的防雹效果较为敏感。一般于雹云发展阶段,尽可能地在雹云识别早期作业,防雹效果较好,催化剂量取决于云体大小、催化时间及催化部位。选取适当的催化时间和作业部位可以节约大量催化剂。此外,在同样条件下催化剂量的使用也存在一定的限度,催化作业部位最好是置于上升气流极值高度及其以上邻近位置。由于高炮的射程有限,因此要尽可能地采用高仰角进行作业。在催化时间、作业部位、催化剂量都较合适的情形下,不论是以单点催化还是以区域催化、瞬时催化或连续催化,地面防雹效果变化都不大。

(2) 使用火箭催化防雹的原则是,根据不同的发射点位置、有效发射仰角范围及

方位角范围的配置,使火箭携带的 AgI 焰剂播撒段尽可能地横跨雹云上升气流区并通过极值区或通过雹云强回波区附近。固定发射点,火箭以不同的发射仰角催化,地面防雹效果不同,并存在一最佳催化仰角和有效的发射仰角范围。在最佳发射仰角处,随着发射仰角的抬高或放低,防雹效果渐差。随着发射点距离的增加,最佳催化仰角降低。当发射点位置距离雹云中心较近时,一般在 6 km 之内有效发射仰角可在最佳发射仰角上下摆动 $10^{\circ} \sim 15^{\circ}$ 。这也正是防雹作业实践中所需要的。固定某一发射仰角后,随着发射点位置的变化,防雹效果也不同。而当发射点距离雹云中心水平位置较近时,火箭方位角左右偏离 $5^{\circ} \sim 10^{\circ}$ 对地面防雹效果影响不大。

(3) 多数催化个例都是以减少地面的无灾降水量来换取防雹效果的^[11,12]。故而,从防雹增雨的角度考虑,探索出一种既能增加地面无灾降水量同时又能减少雹灾的催化技术是十分必要的。

本文选取了一块雹云个例作为试验对象,模拟结果仅作为参考。

参 考 文 献

- 1 Schaefer, V. J., The production of ice crystals in a cloud of supercooled water droplets, *Science*, 1946, **104**, 457 ~ 459.
- 2 Vonnegut, B., The nucleation of ice formation by silver iodide, *J. Appl. Phys.*, 1947, **18**, 593 ~ 595.
- 3 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.
- 4 洪延超, 三维冰雹云催化数值模式, *气象学报*, 1998, **56** (6), 641 ~ 651.
- 5 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.
- 6 何冠芳、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), 32 ~ 45.
- 7 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.
- 8 许焕斌, 关于爆炸影响气流的力学原理, *气象*, 1979, **10** (9), 26 ~ 29.
- 9 石安英、樊慧新、丛澜等, “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.
- 10 鄯大雄等, 高效碘化银焰剂及其成冰核性能的研究, *气象学报*, 1995, **53** (1), 82 ~ 90.
- 11 Farley, R. D., and H. D. Orville, Numerical Modeling of Hailstorms and Hailstone Growth. Part I: Preliminary Model Verification and Sensitivity Tests, *J. Appl. Meteor.*, 1986, **25**, 2014 ~ 2035.
- 12 毛玉华、胡志晋, 强对流云人工增雨和防雹原理的二维数值研究, *气象学报*, 1993, **51** (2), 184 ~ 194.

Numerical Studies of the Practical Seeding Methods in Hail Suppression

Li Hongyu, Hu Zhaoxia, Xiao Hui, and Hong Yanchao

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

Abstract Seeding tools of AgI – containing artillery shells and rockets are widely used in hail suppression at present. But systematic studies on their efficiencies are lacking. In this paper, a hailstorm occurred in Xunyi area of Shaanxi province on July 18, 1999 is detailedly simulated by using the three – dimensional hail cloud numerical model introduced (by IAP. CAS). First, the influences of varied seeding times, seeding amounts, seeding positions and seeding methods with flak shells on hail suppression are given. Second, we test the seeding efficiency with one kind of AgI pyrotechnics which generates a much higher nucleation rate. At last, detailed simulations of the same hail cloud seeded with a rocket which is fired at different distances, different elevations, and also at different azimuths when they deviate within 5 or 10 degrees are analyzed. From those results obtained above, we expect to get some guidances to the improvement of the seeding efficiencies in practice.

Key words : hail suppression ; numerical simulation ; nucleation rate ; seeding with flaks ; seeding with rockets