

冰雹形成机制和催化防雷机制研究^{*}

洪延超

(中国科学院大气物理研究所, 北京, 100029)

摘 要

利用文献[1]发展的三维弹性冰雹云催化模式模拟研究了 1997 年 7 月 8 日陕西省旬邑防雷试验区出现的一块冰雹云, 分析其冰雹形成的物理机制, 对雹云做了高度催化试验, 研究了催化防雷机制。结果表明, 97% 的雹块是以冻滴为核心增长的, 在云中冰雹还未形成前, 于强上升气流区的适当高度催化效果较好, 而在上升气流极值高度, 亦是高含水量区催化效果最好。催化使霰和冻滴的浓度增加, 粒子质量减小, 向雹的转化比例大为降低, 因此雹块的质量和浓度都减小, 达到了防雷的目的。

关键词: 雹云模拟, 催化试验, 机制研究。

1 引 言

人工防雷中, 催化技术是影响防雷效果的关键, 而与催化技术研究直接有关的两个问题是, 冰雹形成的物理机制和催化防雷机制。为了研究雹云催化技术, 国家“九五”攻关项目“农业气象灾害防御技术研究”中的“人工防雷减灾技术研究”专题组与陕西省人工影响天气中心合作, 选择陕西省旬邑地区为防雷研究试验区。作为催化防雷技术研究的第一步, 利用文献[1]发展的三维弹性冰雹云催化模式和实测探空资料, 模拟研究了 1997 年 7 月 8 日在旬邑地区出现的一块雹云, 试图分析该地区冰雹形成的物理机制, 在此基础上, 对雹云进行催化试验并选择催化效果最好的个例研究催化防雷机制。

2 雹云的数值模拟

2.1 实测冰雹云概况

1997 年 7 月 8 日在陕西省旬邑试验区出现一次降雹过程, 据实时探空资料, 地面气压 868 hPa, 海拔高度 1277 m, 地面温度 31.9^o, 露点温度 15.8^o, 0 层高度 4698 m(约 582 hPa), 对流层顶高 15802 m(约 118 hPa), 温度为-63.0^o。温度层结很不稳定, 10.0 km 以下温度直减率为-0.6^o/100 m ~ -1.0^o/100 m, 10.0 km 之上存在一逆温层。大气湿度较小, 2.0 km 高度以下低层大气相对湿度为 28% ~ 50%, 比湿为 0.007 ~ 0.012。风从 2.0 km 高度以下的 NE 风(9 ~ 10 m/s)顺时针变化 360 后又转向到 10.5 km 高度

* 初稿时间: 1997 年 12 月 20 日; 修改稿时间: 1998 年 7 月 20 日。

资助课题: 国家“九五”攻关项目“农业气象灾害防御技术研究”07 专题。

的 WN 风。12.0 km 高度以上基本为 W 风(260~290)。

雷达观测表明, 全天云体发展强烈, 初始回波一般出现在 5.0~6.0 km 高度, 处于发展阶段的对流云强回波区也在 5.0~6.0 km 高度(图 1b), 冰雹云的回波顶高约 12.0 km, 强度 50 dBz, 30 dBz 回波顶高 9.0 km。从 14:01 RHI 回波(图 1a)看, 此时回波及地。当时, 地面有降雪和降雨, 永乐县有 4 个村降雪, 雨大、雹小。马村降雪 7 min, 最大雹块如卫生球大, 还有软雹, 并伴有较强降水。山河村雹块直径 6 mm, 农作物受灾面积约 67 hm², 烤烟受灾约 250 hm²。

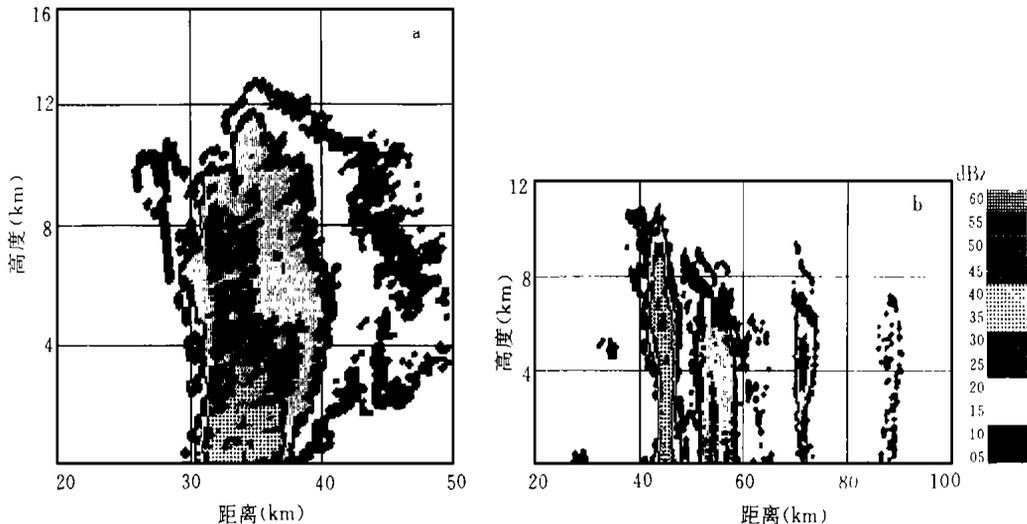


图 1 1997 年 7 月 8 日出现在陕西省旬邑防雷试验区的一块雹云的 RHI 回波

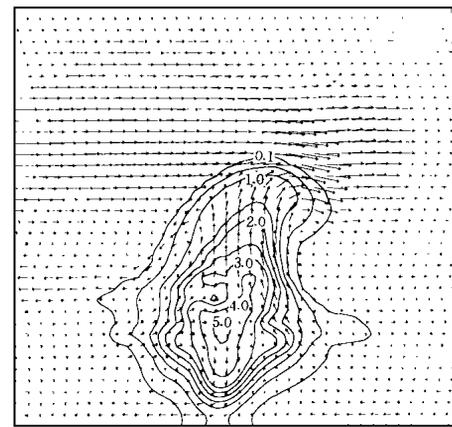
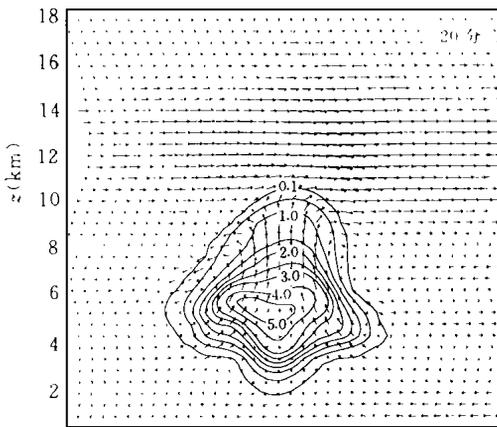
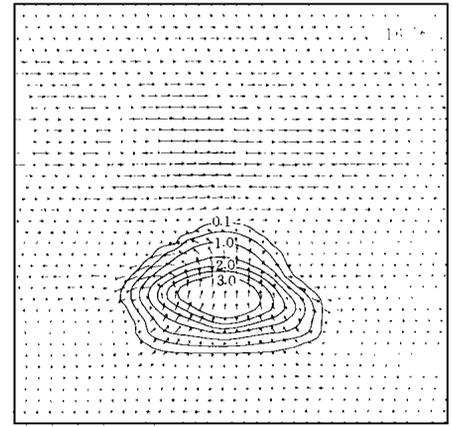
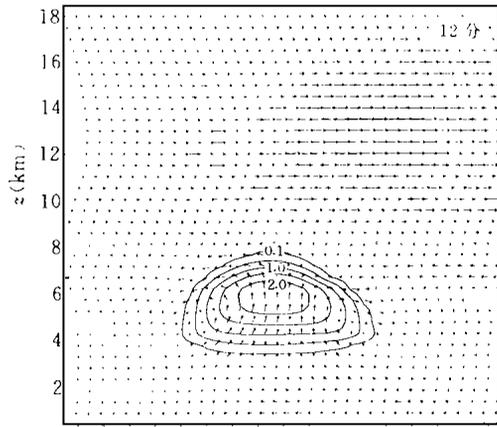
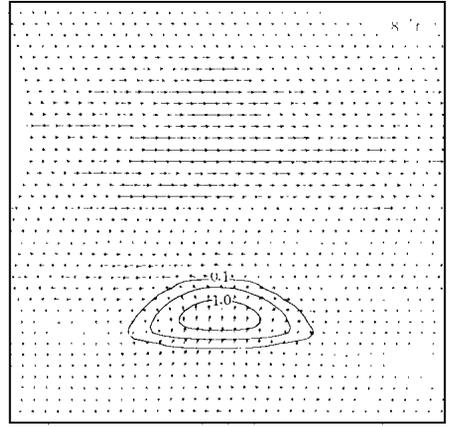
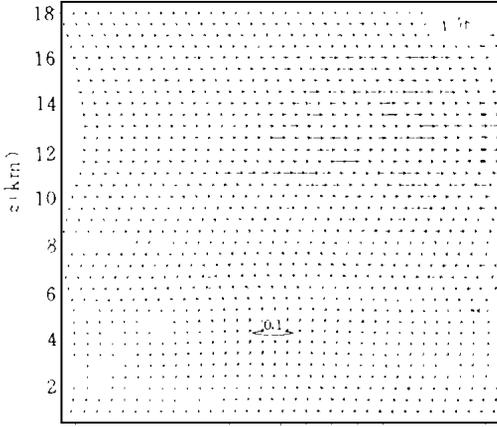
(a. 时间: 14:01, 方位: 57.9) 及其他对流云的 RHI 回波(b. 时间: 17:05, 方位: 249.9)

2.2 雹云的模拟

模式计算域为 36 km × 36 km × 18.5 km, 水平格距 1.0 km, 垂直格距 0.5 km。用 i, j, k 分别表示向东、向北和向上的 x, y, z 轴上格点序数。将实时探空资料输入雹云模式程序, 并给以极值为 4.5 的轴对称位温扰动, 扰动区中心坐标为(18, 18, 31), 位于 3.5 km 高度, 长宽均为 8.0 km, 厚为 3.5 km。计算出与实测雹云外形和结构相似的模拟云体。图 2 是雹云中总含水量 $\rho Q_t [= \rho(Q_c + Q_r + Q_i + Q_s + Q_g + Q_l + Q_h)]$ 在 x 轴方向上通过 ρQ_t 中心($j = 18$ 格点)的垂直剖面。图 3 是第 28 分时几个高度上的雹云总含水量的水平剖面。

从图 2 看, 4 分时, 云水出现在 4.5 km 高度, 随着云体发展含水量中心上升到 5.0 km 高度, 20 分以前维持在 5.0~6.0 km 高度, 24 分时高含水量区已降至 4.0~5.0 km 高度, 28 分时地面出现降水和强降雪, 此时在 6.5 km 高度又形成另一高含水量中心。将云体发展时含水量中心高度与上升气流极值高度比较表明, 它们配合得很好。即在 20 分以前, 上升气流极植高度与含水量中心高度相当吻合。第 28 分时垂直剖面图显示的云体结构特征与观测的雹云很类似(图 1a)。模拟雹云云顶高达 12.0 km, 1.5~2.0 g/m³ 含水量等值线顶高 9.0~10.0 km, 且均及地。这与观测到的 30 dBz 的回波顶高和厚度相当。模拟云体由于风切变作用稍向东倾斜。从图 3 可以看出模拟云的立体结构, 在 6.0 km 高

度以上高含水量区不在云体中心部位, 而偏向云的右侧(6.0 km 和 8.0 km 高度) 或左侧(10.0 km 高度), 而在 2.0 km 高度上高含水量区位于云体中心部位, 这与图 2 中 28 分时的雹云垂直剖面结构是一致的。总的来看, 模拟云与观测云强回波区所在高度、外形及结



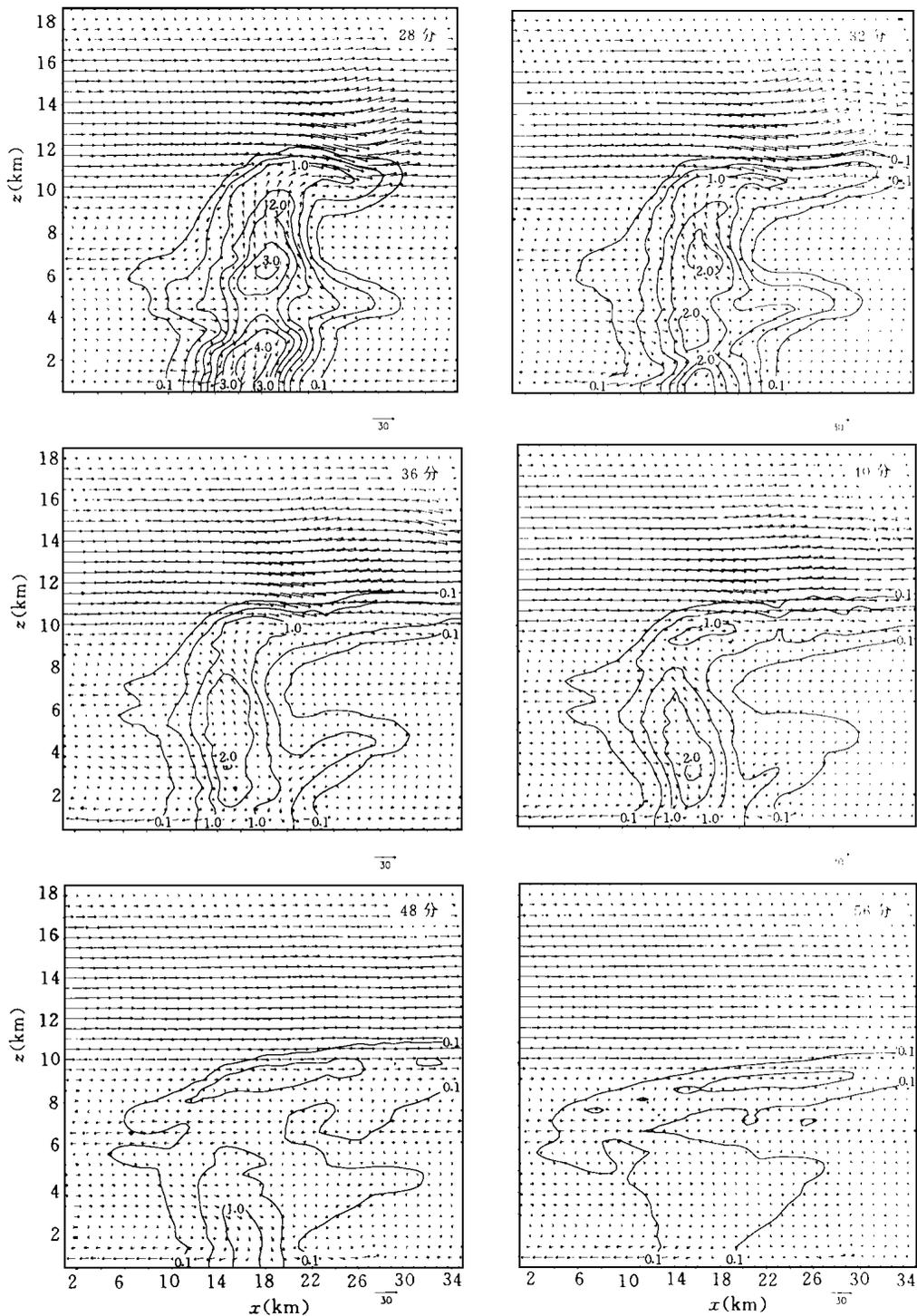


图2 模拟雹云总含水量 ρ_{Q1} (单位: g/m^3) 在 x 轴方向上通过含水量中心的垂直剖面结构的演变

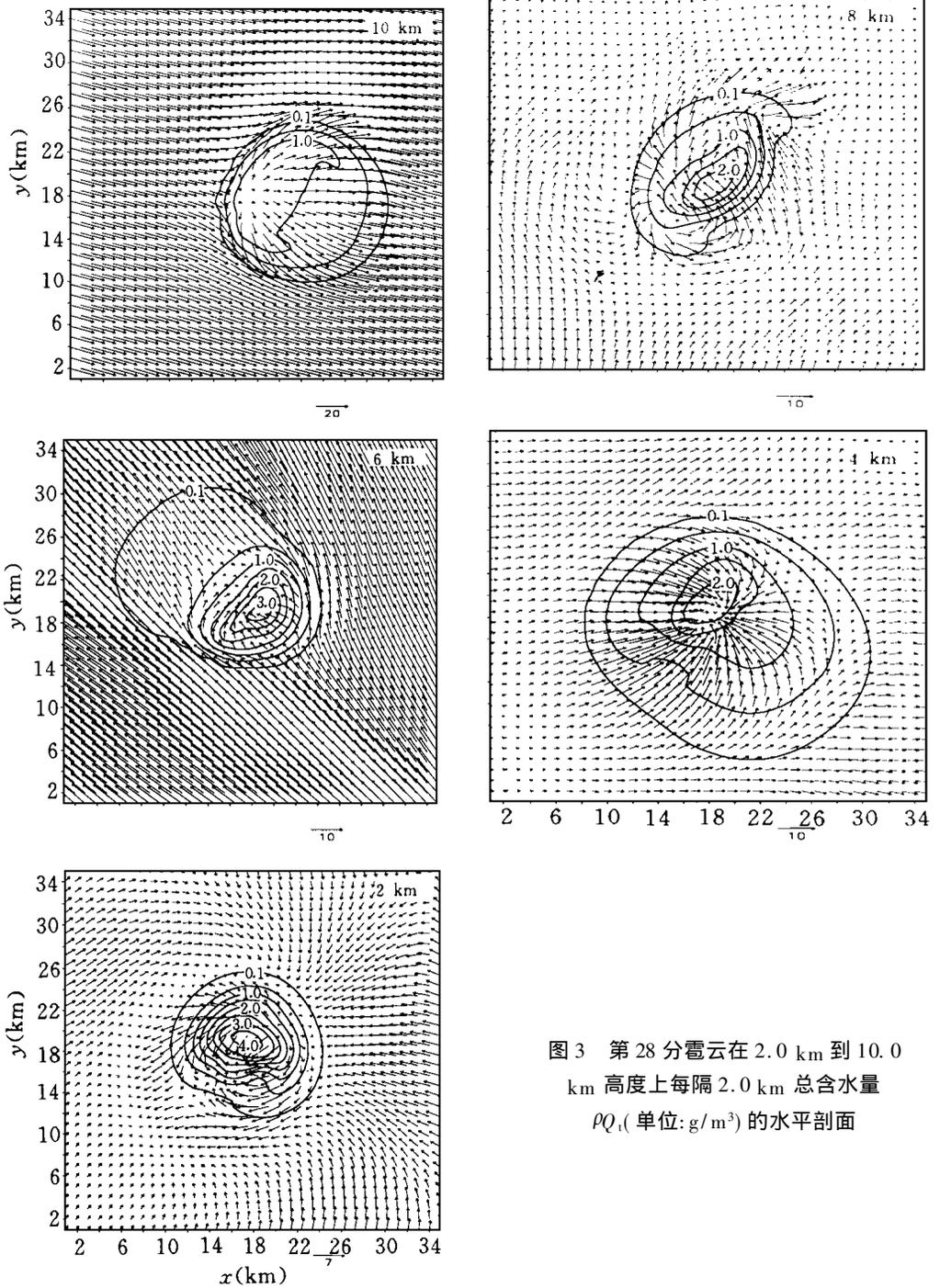


图3 第28分雷云在2.0 km到10.0 km高度上每隔2.0 km总含水量 ρQ_1 (单位: g/m^3) 的水平剖面

构上都比较相似。

模拟雷云约在24分地面出现降雹, 28~30分出现最强降雹, 最大降雹动能通量达 $1.95 \text{ J}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$, 雹块平均直径6.23 mm, 地面降雹动能通量水平分布情况与低层 ρQ_1 分布一致。

3 冰雹形成机制的分析

为了分析冰相降水粒子的形成过程, 图 4 给出了它们源项总量变化率及源项变化率的时间变化。由于雹云发展第 28~30 分地面出现最强降雪, 表 3~5 给出强降雪前第 15, 20, 25, 30 分 4 个时刻冰相粒子源项微物理过程产生的总量及总量之和。文中所用的微物理过程的符号意义参见文献[1]。

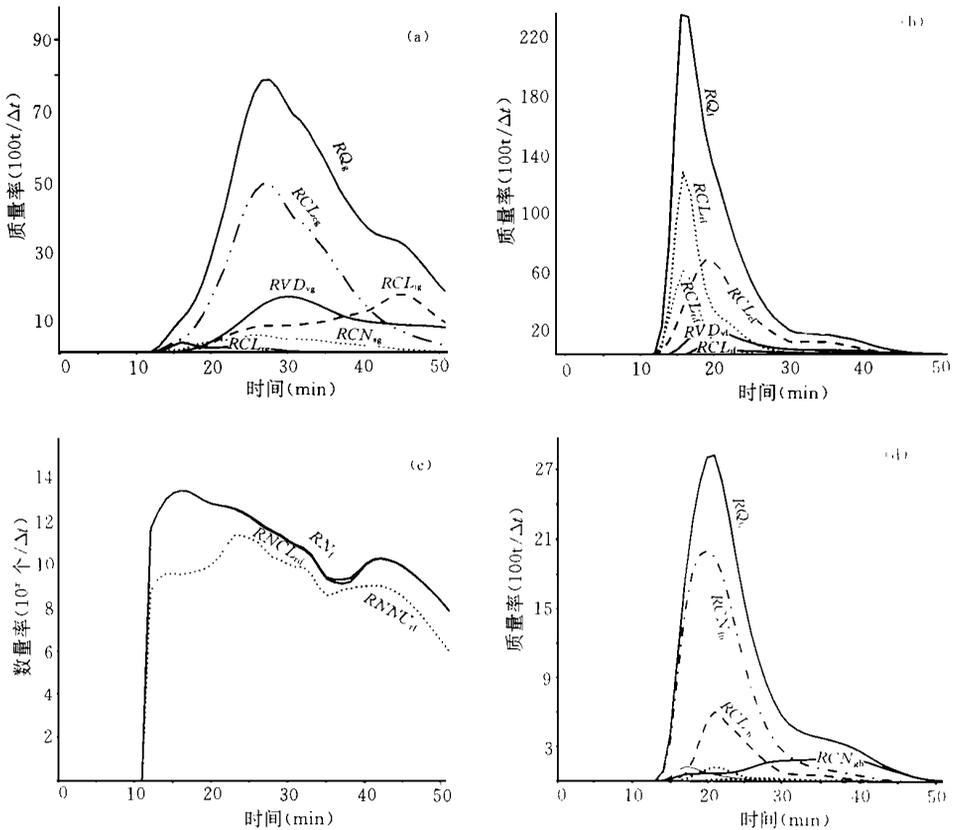


图 4 霰、冻滴和冰雹空间积分总量变化率 (RQ_g , RQ_f , RQ_h , RN_f) 及源项变化率 (用代表各微物理过程符号前加 R 表示) 的时间变化

3.1 云雨形成过程

7月8日大气层结有个显著的特点, 首先是温度层结很不稳定, 其次是低层湿度很小, 相对湿度只有 28%~50%, 比湿 0.007~0.012。因此对流形成凝结的高度较高, 雷达初始回波出现高度也较高。据当天观测, 初始回波一般位于 5.0~6.0 km 高度(图 1)。表 1 给出模拟的冰雹云在其发展阶段云水、雨水极值出现高度, 可见云水首先在 4.0 km 高度形成, 以后极值一直位于 5.0~6.5 km 高度(云底高度为 3.5 km)。12 分时在 6.0 km 高度出现雨水, 极值大于 0.1 g/m^3 , 以后也一直位于 6.0~7.0 km 高度。凝结形成的云水首先出现并维持在负温区(0 层高度为 3.4 km), 约有 1% 的云水通过自动转化(CN_{er})形成雨水(表 2)。雨水也在负温区碰并云水(CL_{er})增长, 碰并量约占雨水总量的 95%。由此

可见,云水、雨水都是在过冷区形成,并在云发展阶段维持在过冷区。

表 1 霰云发展阶段云水、雨水极值(单位: g/m^3)和极值高度(括号中数字,单位: km)

时间	4 分	8 分	12 分	16 分	20 分	24 分
ρQ_c	0.2(4.0)	1.2(5.0)	2.2(6.0)	2.1(5.0)	1.9(5.5)	2.0(6.5)
ρQ_r			0.1(6.0)	2.1(6.0)	0.5(6.5)	0.5(7.0)

表 2 产生的云水总量和雨水源项中各物理过程时空积分总量 (单位: kt)

时间	15 分	20 分	25 分	30 分
TQ_r	200.65	522.90	623.27	654.83
TCN_{cr}	10.20	15.52	24.24	27.43
TCL_{cr}	190.45	507.38	599.03	627.40
TQ_c	885.60	1527.80	2127.80	2507.60

注:表中代表微物理过程的符号前加 T 表示该过程产生的总量(质量/数量)。

3.2 冰晶和雪的形成过程

云中的冰晶首先是通过水汽在活化的冰核上凝华形成的,即 NU_{vi} 过程。从表 3 看,不同时刻霰云中冰晶总个数 TN_i 与 $TNNU_{vi}$ 在量级上相等,即 NU_{vi} 过程对冰晶数量贡献最大。如 25 分时,冰晶总数量为 $10^{18.55}$ 个,而 NU_{vi} 形成的冰晶个数也为 $10^{18.55}$ 。其次是霰粒和冻滴撞冻大云滴带来的冰晶繁生过程,前者一般比后者要大 1~3 量级。冰晶形成后,主要靠凝华增长,例如 25 分时,冰晶总质量(TQ_i)为 86.4 kt,而凝华增长量(TVD_{vi})为 81.8 kt,而撞冻云水增长量(TCL_{ci})只有 1.5 kt。

本模式将雪晶和冰晶聚合物都归为雪一类,雪可以由单个冰晶增长转化、接触冰晶过冷小雨滴的冻结及冰晶聚合形成。在本例中,雪花主要起源于冰晶的自动转化(CN_s)和受到冰晶接触扰动冻结的极小雨滴,即 CL_{ris} 过程。而冰晶聚并(CL_{ii})形成雪的数量比 CN_{is} 过程小 4 个量级。如 25 分时(表 4),上述过程形成雪的数量分别为 $10^{15.95}$, $10^{14.56}$, $10^{11.88}$ 个。就对雪的质量贡献而言,以 CL_{ris} 最大,为 34.1 kt,其次是 CN_{is} 为 18.1 kt, CL_{ii} 过程对雪质量贡献很小,到 25 分时还不到 0.01 kt,而雪的增长主要靠 CL_{cs} 和 VD_{vs} 过程。

表 3 冰晶源项中各物理过程时空积分总量

时间	15 分	20 分	25 分	30 分
TQ_i/TN_i	0.69/16.02	16.70/17.66	86.41/18.55	247.33/19.47
$TNU_{vi}/TNNU_{vi}$	0.01/16.02	0.45/17.66	3.12/18.55	20.91/19.47
TP_{ci}/TNP_{ci}	0.12/14.08	4.35/15.64	8.82/15.95	12.32/16.09
TCL_{ci}	0.03	0.22	1.50	2.67
TVD_{vi}	0.64	16.02	81.78	223.74

注: TP_{ci} 单位: t, 其余质量单位: kt, 数量: 10^x 个, x 为表中数字

表 4 雪源项中各物理过程时空积分总量 (质量: kt, 数量: 10^6 个)

时间	15 分	20 分	25 分	30 分
TQ_g/TN_s	2.72/13.79	30.01/15.24	94.87/15.97	194.05/16.35
$TCL_{ig}/TNCL_{ii}$	0.00/8.23	0.00/11.13	0.00/11.88	0.01/12.18
$T CN_{ig}/TN CN_{is}$	0.09/13.67	3.10/15.22	18.05/15.95	42.17/16.34
$TCL_{rig}/TNCL_{ris}$	1.36/13.20	16.37/14.00	34.11/14.56	43.43/14.79
TCL_{es}	1.15	7.30	19.08	32.43
TCL_{is}	0.00	0.32	4.29	23.53
VD_{vs}	0.12	2.92	19.35	52.49

表 5 霰和冻滴源项中各物理过程时空积分总量 (质量: kt, 数量: 10^6 个)

时间	15 分	20 分	25 分	30 分
TQ_g/TQ_t	2.7/23.81	35.76/608.23	147.05/929.45	360.34/1040.35
$T CN_{ig}/TCL_{rif}$	0.01/10.41	0.03/151.99	0.13/178.03	0.24/183.02
$T CN_{sg}/TN U_{rf}$	0.61/0.01	5.28/0.15	14.77/0.81	28.86/2.08
TCL_{eg}/TCL_{ef}	1.43/4.80	17.31/125.75	84.08/282.63	216.19/337.85
TCL_{rg}/TCL_{rf}	0.49/7.30	8.41/285.02	14.29/359.74	19.45/378.86
TCL_{ig}/TCL_{if}	0.05/0.04	1.59/8.12	14.20/22.07	35.47/29.17
TVD_{vg}/TVD_{vf}	0.11/0.37	3.14/33.82	19.58/80.08	60.12/101.06
TN_g/TN_f	13.18/13.81	14.22/14.85	14.77/14.97	15.07/15.05
$TN CN_{ig}/TNCL_{rif}$	12.23/13.81	12.82/14.85	13.34/14.96	13.54/15.00
$TN CN_{sg}/TNNU_{rf}$	13.13/10.68	14.20/11.58	14.75/13.43	15.06/14.08

注: TCL_{ig} , TCL_{if} 和 TCL_{rif} 的下标 i 表示粒子对冰晶和雪收集量之和。

3.3 霰和冻滴的形成过程

霰和冻滴都可以增长成冰雹, 因此它们都可以作为冰雹的胚胎。对于霰而言, 其形成通过冰晶和雪的转化, 即 CN_{ig} 和 CN_{sg} 过程, 不过 $T CN_{sg} > T CN_{ig}$, $TN CN_{sg} > TN CN_{ig}$, 如第 25 分时 $T CN_{sg}$ 为 14.8 kt, $T CN_{ig}$ 只有 0.1 kt; $TN CN_{sg}$ 为 $10^{14.75}$ 个, 而 $TN CN_{ig}$ 为 $10^{13.34}$ 个(表 5), 可见无论从质量上还是数量上, 雪的转化对霰贡献都比冰晶大得多。从表 5 和图 4a 看, 霰形成后, 主要通过撞冻过冷云水(CL_{eg}) 增长, 其次是自身的凝华增长(VD_{vg}) 以及对冰晶和雪的收集(CL_{ig}), 霰粒撞冻雨滴(CL_{rg}) 增长只发生 37 分以前, 在约 17 分达最大值。霰源项总量增加率(RQ_g) 在约 30 分出现最大值。从各源项总量看(表 5), 30 分时 CN_{ig} 对质量的贡献约占 0.07%, CN_{sg} 占 8.0%, CL_{eg} , CL_{ig} 和 VD_{vg} 分别占 60.0%, 9.8% 和 16.7%, CL_{rg} 贡献较小, 只占 5.4%, 但在降霰前的 20 min 里占 23.5%。

冻滴,即过冷雨滴通过核化和受到冰晶、雪接触时冻结形成的冰粒子。对冻滴初生有贡献的物理过程是,在过冷区与冰晶和雪接触的雨滴本身冻结(CL_{rf})和雨滴核化(NU_{rf})。由于模拟的冰雹云在初始发展时,雨滴首先在过冷区形成,和雨滴在暖区形成的其它雹云不同,雨滴不需随上升气流上升就可以在过冷区直接核化和接触冻结,这对作为雹胚胎的冻滴形成极为有利。从表5看,比较而言, CL_{rf} 过程不但对冻滴质量贡献大,浓度贡献也大。直到25分时, NU_{rf} 总量才达0.8 kt,而 CL_{rf} 达178.0 kt;就浓度贡献来说,在雹云发展早期如20分以前, $TNCL_{rf}$ 约比 $TNNU_{rf}$ 大3个量级,而降雹后两者总量差别缩小。图4c中在大多数时间里, NCL_{rf} 的产生率(10^x 个/ Δt)要比 NNU_{rf} 大1个数量级,有时可大3个数量级(如15分附近)。从表5和图4b看,冻滴形成后,主要靠收集雨水(CL_{rf})、云水(CL_{cf})和凝华(VD_{vf})增长,其次是收集冰雪增长(CL_{if})。此外各个增长过程对冻滴质量贡献率($t/\Delta t$)最大值出现时间也不同。如 RCL_{rf} , RCL_{cf} 和 RCL_{cf} 出现的峰值时间分别为20分、17分和20分。从表5看,20分以前 CL_{rf} 对冻滴累计质量源项总量(TQ_i)贡献最大,达285.0 kt,占增长量的48.2%,占源项总量38.7%,而 CL_{cf} 占37.9%,30.4%。而25分时, CL_{cf} 的贡献从20分的125.8 kt增长到282.6 kt,而 CL_{rf} 从285.0 kt增加到359.7 kt。此时两者贡献量差别已变小。图4b可以说明这一点。也就是说在地面出现强降雪之前3分钟, CL_{rf} 和 CL_{cf} 贡献最大,它们贡献量占总量(929.5 kt)的69.1%。

3.4 冰雹的形成过程

冰雹的形成由两个过程决定,霰和冻滴增长达到一定尺度后向雹转化,即 CN_{gh} 和 CN_{fh} 。表6给出冰雹源项中各物理过程总量。20分到25分是冰雹质量源项总量 TQ_h 增加速度最快时段,从42.4 kt增加到118.6 kt。这从图4d也可以看出,此时冰雹质量源项总量变化率 RQ_h 处于峰值区。在这两个时刻,冻滴的转化量(TCN_{fh})分别为35.0 kt和89.4 kt,各占 TQ_h 的82.7%和75.4%, TCN_{fh} 比 TCN_{gh} 大得多,即冻滴向雹的转化对雹质量贡献比霰转化的贡献大得多,约大15~26倍,这就是说,冰雹的质量主要由冻滴转化而来。这块云中冰雹增长量相对较小,冰雹主要收集过冷云水增长,其增长量(TCL_{ch})要占冰雹收集所有各类粒子的增长量之和的43%~67%。而在地面强降雪后,冻滴转化成雹的速率逐渐减小,35分后,冰雹主要由霰转化形成(图4d曲线 RCN_{gh})。

表6 冰雹源项中各物理过程时空积分总量(质量: kt, 数量: 10^x 个)

时间	15分	20分	25分	30分
TQ_h/TN_h	0.06/8.81	42.35/11.57	118.64/11.98	153.73/12.10
TCN_{gh}/TCN_{gh}	0.01/8.14	1.43/10.12	3.43/10.54	7.42/10.91
TCN_{fh}/TCN_{fh}	0.04/8.70	35.03/11.55	89.42/11.97	111.81/12.07
TCL_{ch}	0.00	2.54	17.18	23.90
TCL_{sh}	0.10	3.35	8.61	10.60
$TN_{CN_{fh}}/TN_h$	0.776	0.955	0.977	0.933

注:表中 $TCL_{xh} = TCL_{fh} + TCL_{gh} + TCL_{sh} + TCL_{rh} + TCL_{lh}$

3.5 冰雹形成的物理机制

冰雹胚胎的形成及其增长是研究冰雹形成机制的重要问题,也是人工防雹的关键问

题。作为雹胚, 有的是过冷水滴冻结形成的, 有的是冰晶雪转化形成的。从表 5 看, 在冰雹形成期间(15~30 分), 冻结形成的冻滴和转化产生的霰数量上相差不大, 如第 25 分时, 冰晶和雪向霰转化的个数为 $5.89 \cdot 10^{14}$ 个, 而雨滴冻结形成的冻滴个数为 $9.33 \cdot 10^{14}$, 冻滴从数量上讲约为霰的 1.58 倍。但两种粒子向霰的转化比例相差太大。据表 5 和表 6 结果, 霰向雹转化比例 $P_{gh} = TN_{CN_{gh}}/TN_g = 5.89/10^5$, 而冻滴向雹转化比例 $P_{fh} = TN_{CN_{fh}}/TN_f = 100/10^5$, 即冻滴向雹转化比例约为霰的 17 倍。因此, 尽管霰和冻滴数量上相差不大, 地面出现强降雪前 3min(第 25 分), 雹云中 97% 的雹块是以冻滴为胚胎的(见表 6 中 $TN_{CN_{fh}}/TN_h$)。冰雹形成区域与冻滴含水量区一致也说明这一点(见文献[1] 中图 1)。

从上面各种粒子形成过程归纳冰雹形成的机制(见图 5)是:

- (1) 首先由水汽核化(NU_{vi})和繁生(P_{ci})产生冰晶, 前者产生的冰晶浓度比后者大 2-3 个量级;
- (2) 冰晶形成后, 主要通过凝华增长, 并通过其自碰并、自动转换及受其接触扰动的过冷小雨滴冻结产生雪(CL_{ns}); 雪主要通过撞冻过冷云水(CL_{cs})和凝华(VD_{vs})增长。
- (3) 冰晶和雪向霰转化, 霰主要通过收集过冷云水(CL_{cg})增长。
- (4) 冻滴由与冰晶雪接触的过冷雨滴冻结(CL_{rf})形成, 也可以由雨滴核化而形成(NU_{rf}), 但前者产生冻滴无论从数量上还是质量上都比后者大得多。冻滴先以收集过冷雨水增长(CL_{rf})为主, 后以收集云水(CL_{cf})增长为主;
- (5) 由于霰雹转化比例 P_{gh} ($5.89/10^5$)比冻滴向雹转化比例 P_{fh} ($100/10^5$)低得多, 因此 97% 的冰雹以冻滴为胚胎。霰、冻滴的转化质量占雹总量的 70% 以上, 雹的增长也以撞冻过冷云水(CL_{ch})为主。因此适量的冰晶、雪和丰富的过冷水存在, 尤其是雹云发展初期过冷雨水的存在对雹形成和增长极为有利。

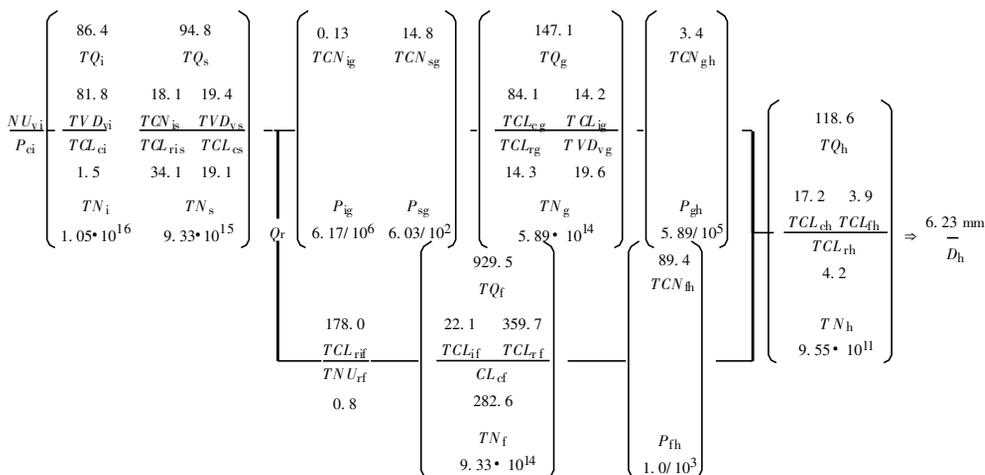


图 5 据表 3~6 中第 25 分的结果绘制的冰雹形成机制示意

(TQ 和 TN 分别表示各类粒子总质量(单位: kt)和总数量(单位: 个),

其他微物理过程符号前加 T 表示其过程贡献的总质量(单位: kt), P_{ig} , P_{sg} , P_{gh} , P_{fh} 值见表 9)

4 冰雹云催化防雷的物理机制

在对 1997 年 7 月 8 日雹云进行数值模拟及分析其成雹机制的基础上,对雹云用 AgI 进行催化数值试验,这里采用固定时间和催化剂量的高度序列试验。找出催化效果最好一例进行催化防雷机制研究。何为最好,其标准是:(1)地面降雹动能通量减小很多;(2)地面降雨量有所增加。

4.1 高度序列催化试验

在高度序列试验中,催化剂 AgI 为 285.6 g,当雹云发展到第 12 分时,分别在 3.5 km, 4.5 km, 5.5 km, 6.5 km 和 7.5 km 高度上瞬时将 AgI 播入云中,在每个高度上,催化是在以此高度上升气流极大值为中心的 9 个水平格点上进行。表 7 是 12 分时各个催化高度上催化区中心格点位置坐标、温度和极值上升气流速度。在催化的 5 个高度上,5.5 km 高度是 12 分时雹云最大上升气流所在高度。确定催化效果的数据放在表 8 中,为了便于比较,未催化云的相应数据也一并给出。从表 7 看,随着催化高度增加催化区中心向 x 轴方向偏离,同时也向 y 轴反向偏离,即东西方向偏离 2.0 km,而南北向偏离 4.0 km,说明由于风切变影响,12 分时雹云中上升气流是倾斜的。因此各高度催化的水平部位是不同的,但都在强上升气流区。

表 7 12 分时催化区中心点 P 坐标、温度(T) 和上升气流速度(w)

催化高度(km)	$P(i, j, k)$	$T()$	w (m/s)
3.5	(17, 23, 31)	2.27	5.87
4.5	(17, 22, 29)	- 2.51	7.96
5.5	(17, 21, 27)	- 8.05	8.73
6.5	(18, 20, 25)	- 15.65	6.31
7.5	(19, 19, 23)	- 26.73	2.16

表 8 地面强降雹时(28 分)各参数最大值及降水量

催化高度(km)	$f_{ev}(J/(m^2 \cdot s))$	$\rho Q_h(g/m^3)$	SP (kt)	SP_r (kt)	SP_h (kt)
3.5	1.33	0.97	1036.8	606.5	94.7
4.5	0.76	0.57	1002.4	622.7	70.0
5.5	0.28	0.19	925.5	617.0	43.1
6.5	0.24	0.22	899.2	598.4	36.6
7.5	1.03	0.68	1018.4	604.8	84.6
未催化	1.95	1.39	1089.5	609.7	123.9

注: f_{ev} 是地面降雹动能通量, ρQ_h 是冰雹含水量, SP, SP_r, SP_h 分别为地面降水量、雨水降水量及冰雹降水量。

从表 8 催化结果看, 与非催化云相比, 所有催化云的 f_{ev} , ρ_{Qh} , SP_h 都有所减小, 尤其是在 5.5 km 和 6.5 km 高度催化的霰云, 前两个量分别只有 $0.28 \text{ J}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$, $0.19 \text{ g}/\text{m}^3$ 和 $0.24 \text{ J}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$, $0.22 \text{ g}/\text{m}^3$, 这两例所不同的是地面降雨量 SP_r 不同。和非催化云相比, 5.5 km 催化云 SP_r 增加 7.4 kt, 而 6.5 km 催化云减少 11.3 kt。因此对霰云进行催化高度试验中, 可以确定在 5.5 km 高度催化效果最好, 降雹动能通量减小很多而降雨量有所增大。若以 f_{ev} 作为检验催化效果物理量, 霰灾损失减小 86%。

4.2 催化防雷机制分析

为了进一步分析催化防雷的物理机制, 选取 5.5 km 催化云和非催化云作对比分析。表 9 给出了地面强降雹前 3 min 即第 25 分时主要微物理过程产生的总量。由于催化, 冰晶和雪总质量 TQ_i 和 TQ_s 有所增加, 分别增加 70.2% 和 26.4%, 它们的数量也有所增加, 分别增加了 676.2% 和 20.2%。事实上, 催化的直接效果使冰晶增加了 $10^{15.57}$ 个 (TN_{xai}), 而

表 9 催化对霰云主要物理过程总量的影响(第 25 分)

	TQ_i	TNU_{vi}	TP_{ci}^*	TNU_{vai}^*	TNU_{cai}^*	TCL_{ci}	TVD_{vi}
冰晶	86.41/147.08	3.12/18.18	8.82/9.38	0.00/3.60	0.00/0.176	1.50/1.59	81.78/127.3
	TN_i	TNN_{vi}	TNP_{ci}	TN_{xai}			
	18.55/19.44	18.55/19.44	15.95/15.97	0.00/15.57			
雪	TQ_s	TCN_{is}	TCL_{ris}	TCL_{cs}	TCL_{is}	TVD_{vs}	
	94.87/119.93	18.05/21.24	34.11/41.06	19.08/25.51	4.29/6.77	19.35/25.35	
	TN_s	$TNCN_{is}$	$TNCL_{is}$	$TNCL_{ris}$			
	15.97/16.05	15.95/16.01	11.88/12.05	14.56/14.96			
霰	TQ_g	TCN_{ig}	TCN_{sg}	TCL_{ig}	TCL_{cg}	TCL_{rg}	TVD_{vg}
	147.05/153.88	0.13/0.08	14.77/18.49	14.20/16.92	84.08/85.98	14.29/7.92	19.58/24.48
	TN_g	$TNCN_{ig}$	$TNCN_{sg}$				
	14.77/14.87	13.34/13.16	14.75/14.87				
冻滴	TQ_f	TCL_{rif}	TNU_{raf}^*	TVD_{vf}	TCL_{if}	TCL_{df}	TCL_{rf}
	929.45/827.4	178.03/151.97	0.00/10.89	80.08/110.88	22.07/27.47	282.63/265.06	359.74/258.69
	TN_f	$TNCL_{rif}$	TNN_{uf}	TNN_{raf}			
	14.97/15.25	14.96/15.23	13.43/13.94	0.00/11.49			
雹	TQ_h	TCN_{gh}	TCN_{fh}	TCL_{ch}	TCL_{rh}	TCL_{gh}	TCL_{th}
	118.64/36.53	3.43/0.87	89.42/28.81	17.18/4.69	4.16/0.64	0.55/0.20	3.86/1.31
	TN_h	$TNCN_{gh}$	$TNCN_{fh}$				
	11.98/11.53	10.54/10.20	11.97/11.52				
\bar{m}	$\bar{m}_i (10^{-8})$	$\bar{m}_g (10^{-4})$	$\bar{m}_f (10^{-4})$	$\bar{m}_{rif} (10^{-4})$	$\bar{m}_{raf} (10^{-5})$	\bar{m}_h	$\bar{m}_s (10^{-5})$
	2.4/0.5	2.50/2.08	9.96/4.65	1.95/0.90	3.52	0.124/0.108	1.02/1.07
\bar{D}	\bar{D}_i	\bar{D}_g	\bar{D}_f	\bar{D}_{rif}	\bar{D}_{raf}	\bar{D}_h	\bar{D}_s
	0.05/0.02	1.06/1.00	1.24/0.97	0.72/0.55	0.41	6.23/5.94	0.58/0.59
P	$P_{ig} (10^{-6})$	$P_{is} (10^{-3})$	$P_{sg} (10^{-2})$	$P_{gh} (10^{-5})$	$P_{rh} (10^{-3})$		
	6.17/0.53	2.51/0.37	6.03/6.61	5.89/2.14	1.00/0.19		

注: (1) 除带* 的物理过程质量总量单位为 t 而外, 其余质量总量单位为 kt, 而数量总量的单位为 10^x 个, x 是表中数字; TN 表示总个数, TQ 表示总质量。

(2) 据表中数据计算出如下物理量: 转化比例 P_{xy} , 表示向 y 类粒子转化的 x 类粒子所占的数量比例; \bar{m}_x, \bar{D}_x 分别为 x 类粒子平均质量(g)和平均直径(mm); \bar{m}_{rif} 和 \bar{m}_{raf} 分别为由于 CL_{rif} 过程和 NU_{raf} 过程产生的冻滴的平均质量(g), D_{rif} 和 D_{raf} 是它们的平均直径(mm)。

(3) 分子和分母上数字是非催化云和催化云之值。

催化云中水汽核化产生的冰晶的数量大幅度增加, 达到 $10^{19.40}$ 个, 因此冰晶质量也增加了 60.67 kt, 但冰晶粒子的平均质量 \bar{m}_i 由 2.4×10^{-8} g 减少到 0.5×10^{-8} g, 平均直径 \bar{D}_i 由 0.05 mm 减小到 0.02 mm, 冰晶向雪转化比例 $P_{is}(= TN_{CN_{is}}/TN_s)$ 有所下降, 雪总质量增加了 25.1 kt, 雪花平均质量 \bar{m}_s 由 $1.02 \cdot 10^{-5}$ g 增加到 $1.07 \cdot 10^{-5}$ g, 平均直径 \bar{D}_s 由 0.58 mm 增加到 0.59 mm, 因此冰晶和雪向霰的转化比例 $P_{ig}(= TN_{CN_{ig}}/TN_i)$ 和 $P_{sg}(= TN_{CN_{sg}}/TN_s)$ 分别由原来 $6.17 \cdot 10^{-6}$ 下降到 $5.3 \cdot 10^{-7}$ 和由 $6.03 \cdot 10^{-2}$ 增加到 $6.61 \cdot 10^{-2}$ 。催化使霰的质量 TQ_g 有所增加, 约增加 4.6%, 使其数量却增加 25.9%, 因此霰平均质量 \bar{m}_g 和平均尺度 \bar{D}_g 都有所减小, 分别由 $2.50 \cdot 10^{-4}$ g 减小到 $2.08 \cdot 10^{-4}$ g 和由 1.06 mm 减小到 1.00 mm, 因此霰向雹的转化比例 $P_{gh}(= TN_{CN_{gh}}/TN_g)$ 也由 $5.89 \cdot 10^{-5}$ 下降到 $2.14 \cdot 10^{-5}$, 约下降 72.2%。

与催化对云内霰的影响不同, 催化后冻滴总质量 TQ_f 却减小, 由 929.5 kt 减小到 827.4 kt, 约减小 11.0%。但冻滴个数有所增加, 增加了 $8.45 \cdot 10^{14}$ 个, 约为非催化云的 2 倍, 因此冻滴平均质量 \bar{m}_f 大为减小, 由 $9.96 \cdot 10^{-4}$ g 减小到 $4.65 \cdot 10^{-4}$ g, 约减小 53.3%。冻滴平均直径 \bar{D}_f 由 1.24 mm 减小到 0.97 mm, 冻滴的数量增加而质量减小的主要原因是冻滴收集其他粒子的增长量, 如 TCL_{cf} 和 TCL_{rf} 都有明显减小, 尤其是冻滴撞冻雨滴 (CL_{rf}), 据前分析是冻滴增长的主要过程, 而现在约减小 101.1 kt, TCL_{cf} 也减小较多, 约减小 36 kt。此外从表 9 冻滴栏可以看出, 由于冰晶和雪扰动而冻结的雨滴, 虽然数量在增加 (见 $TN_{CL_{rf}}$), 但质量在减小 (见 TCL_{rf}), 因此冻结成冻滴的雨滴平均质量 \bar{m}_{rf} 由 $1.95 \cdot 10^{-4}$ g 减少到 $0.90 \cdot 10^{-4}$ g, 而由雨滴冻结的冻滴的平均直径 \bar{D}_{rf} 由 0.72 mm 减小到 0.55 mm。这说明, 催化云中由于冰晶和雪浓度大量增加, 使尺度较小的过冷雨滴发生接触冻结。当然由于催化, 活化的 AgI 粒子直接与雨滴接触使其冻结也是冻滴数量增加的一个原因。这一过程使冻滴数增加 $10^{11.5}$ 个, 而与 AgI 粒子直接接触而冻结的雨滴, 即冻滴的平均质量 \bar{m}_{rf} 约为 $3.52 \cdot 10^{-5}$ g, 比催化云中与冰晶和雪接触而冻结的雨滴质量 (\bar{m}_{rf}) 小得多, 如和非催化云相比就更小了, 通过此过程形成的冻滴平均直径 \bar{D}_{rf} 只有 0.41 mm。另外催化云中 $TS_{BR} = 4.27 \times 10^{-4}$ g 而 $TS_{IR} = 2.17 \times 10^{-2}$ g, 于是, 在 $10^{11.5}$ 个冻滴中, 雨滴通过惯性碰并收集 AgI 粒子形成冻滴数目约为通过布朗碰并的 51 倍。总之催化使冻滴的平均质量和直径有所减小, 因此向雹的转化比例 $P_{fh}(= TN_{CN_{fh}}/TN_f)$ 减小约 81%。

由于催化云中, 虽然霰的质量 (TQ_g) 和数量 (TN_g) 都增加, 而霰雹转化比例减小, 实际转化的质量和数量都在减小; 更由于冻滴质量 (TQ_f) 减小而数量 (TN_f) 增加, 致使冻滴向雹转化比例大大降低。因此冰雹的总质量和数量减小, TQ_h 减小约 69.2%, 数量减小约 64.5%。平均冰雹质量由 0.12 g 减小到 0.11 g, 平均直径由 6.23 mm 减小到 5.90 mm。也就是说, 虽然冰雹平均质量和平均直径减小不明显, 但数量只有非催化云的 35.5%, 这也是降雹动能通量减小的直接原因。从表 9 中冰雹栏看, 冰雹质量减小主要由于冻滴向雹转化量 ($T_{CN_{fh}}$) 减小, 其次是冰雹收集过冷云水 (TCL_{ch}) 增长量在减小, 这是两个主要原因。

通过对 5.5 km 高度催化云的分析, 可以概括出如下催化防雹的机制 (参见图 6):

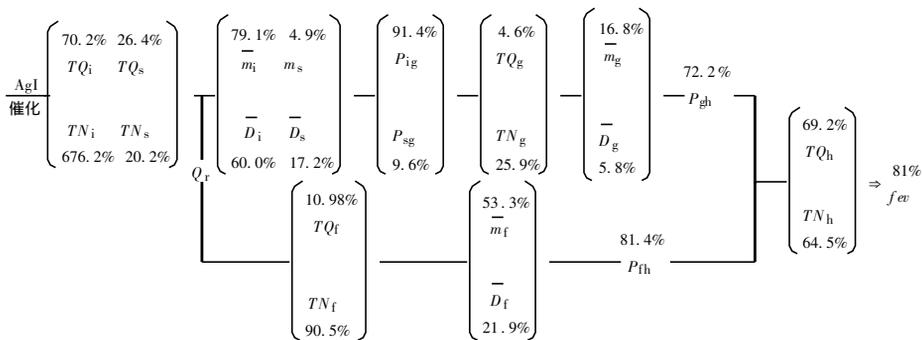


图 6 据表 9 绘制的催化防雷机制示意

(向上箭头表示增加, 向下箭头表示减小)

(1) 由于催化, 云中冰晶的质量尤其是数量明显增加, 但平均直径却比非催化云中中小得多, 因此冰晶向霰转化比例 P_{ig} 降低; 雪的质量、数量都有所增加;

(2) 冰雪晶转化形成的霰的质量、数量都有所增加, 但平均直径减小, 霰雹转化比例 P_{gh} 降低, 转化的质量 (TCN_{gh}) 在减小;

(3) 由于冰晶雪数量增加明显, 加之催化剂本身直接作用, 大量小雨滴产生接触冻结而形成冻滴, 使冻滴总质量减少, 而数量大幅度增加, 平均质量和直径减小, 向雹的转化比例 P_{th} 也减小。

(4) 由于(2)、(3)原因, 冰雹质量、数量都减小, 这是降雹通量减小的主要原因。

5 小结和结论

本文用三维冰雹云催化模式对实测的一例雹云进行模拟, 分析了成雹机制, 并对雹云进行高度序列催化试验, 选取催化效果最好的个例研究防雷机制。结果表明:

(1) 冻滴和霰都可以转化成为冰雹, 对这例雹云而言, 在地面出现强降雹前, 霰、冻滴数量相差不大, 但由于冻滴向冰雹转化比例比霰大得多, 有 97% 的雹块是以冻滴为胚胎的, 或者说, 考虑到有部分极小雨滴冻结成雪增长转化成霰而后成为雹, 至少有 97% 的雹块的原始核心是冻滴。

(2) 对对雹云进行高度序列催化试验结果可以看到, 在云体发展阶段将催化剂 AgI 送入云中上升气流极值高度催化效果最好。因为这里也是过冷雨水含量极值区。催化使冰晶和雪的质量、数量都有所增加, 总体上说向霰的转化比例虽然降低, 但转化还是使霰质量和数量有所增加, 而其平均质量和直径减小, 因此向雹的转化比例下降 72.2%。由于绝大多数雹块是以冻滴为核心增长的, 因此霰的变化对雹形成影响不大, 而催化对冻滴的影响与催化效果直接相关, 催化使冰晶和雪数量增加, 但使冻滴的质量减少 11.0%, 数量却增加 90.5%, 结果向冰雹的转化比例下降 81.4%, 因此冰雹无论从数量上还是质量上都是大为减小, 催化达到了防雷效果。

这一例是在温度层结很不稳定、大气湿度很低的环境中形成的冰雹云, 雷达初始回波出现较高, 液态水滴形成于过冷区。冰雹增长核心主要是冻滴, 因此对雹云催化时, 应尽可能将成冰催化剂送入过冷雨滴区, 只要剂量、时间合适就可以取得好的防雷效果, 达到防

雹的目的。在这种环境中形成的雹云是否都是如此,有待于今后进一步研究。此外还要对各类雹云做模拟和催化试验,找出其规律性的结果,研究出不同的催化技术方案。

致谢:文中的雷达回波图由肖辉、吴玉霞、刘得民等人观测和提供,在此表示感谢。

参考文献

- 1 洪延超. 三维冰雹云催化数值模式. 气象学报, 1998, 56(6): 641 ~ 653

STUDY ON MECHANISM OF HAIL FORMATION AND HAIL SUPPRESSION WITH SEEDING

Hong Yanchao

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

Abstract

Using the 3-D hail cloud numerical model developed by author, a hail cloud occurred in Xunyi area, Shanxi province on July 8, 1997 is simulated to analyze mechanism of hail formation and hail suppression with seeding. The results show that embryos of 97% of hail are frozen drops. The seeding experiments with AgI for heights show that if the seeding is made before hail formation, the optimum seeding position is located in the maximum updraft area and its center, i. e., AgI is seeded in the zone with high water content to be coordinated with maximum zone of the updraft. The seeding make concentration of graupel and frozen drop increase and their average mass/size decrease, so that proportion of conversion from graupel and frozen drop into hail descend greatly and mass and concentration of hailstone are all decrease to achieve our purpose for hail suppression.

Key words: Simulation of hail cloud, Seeding experiment, Mechanism study.