

郑飒飒,刘东升,邹勇,等.西昌一次降雹过程的催化数值模拟[J].干旱气象,2017,35(3):490-494,[ZHENG Sasa, LIU Dongsheng, ZOU Yong, et al. Numerical Simulation of a Hailstorm Process and AgI-seeding in Xichang of Sichuan Province[J]. Journal of Arid Meteorology, 2017, 35(3):490-494], DOI:10.11755/j.issn.1006-7639(2017)-03-0490

西昌一次降雹过程的催化数值模拟

郑飒飒^{1,2},刘东升^{1,2},邹勇³,余芳^{1,2}

(1.四川省人工影响天气办公室,四川成都610072;2.高原与盆地暴雨旱涝灾害四川省重点实验室,四川成都610072;3.四川省凉山州气象局,四川凉山彝族自治州615000)

摘要:利用三维冰雹云模式对2013年4月29日西昌一次降雹过程进行催化数值模拟,根据碘化银的催化时间、催化高度、催化用量和催化方式开展一系列防雹试验。结果表明:选择合适的催化时间、催化剂量、催化位置及催化方式,可以达到最佳防雹效果;通过对催化例和未催化例的冰雹形成机制对比分析得出,在播撒碘化银后,激发了“有利竞争”,雹块不能长大;霰胚的减少及冰雹碰并云水的减少,导致降雹减少。

关键词:人工防雹;AgI;催化试验;数值模拟

文章编号:1006-7639(2017)-03-0490-05 DOI:10.11755/j.issn.1006-7639(2017)-03-0490

中图分类号:P458.1+21.2

文献标识码:A

引言

冰雹的发生、发展常常只有几十分钟到数小时,是一种短时而强烈的灾害性天气^[1]。降雹造成的灾害,以及与它相伴而生的雷暴、大风也给农业带来严重经济损失,有时甚至危及生命安全。及时识别冰雹云和雹云中雹源的位置,把碘化银(AgI)催化剂^[2]播撒进雹源区,是现阶段普遍采用的防雹方法。

近几十年来,对冰雹云的数值研究取得了一些成果,如洪延超等^[3-5]在前人工作的基础上,发展了三维弹性冰雹云催化数值模式,模拟研究了1997年7月8日陕西省旬邑防雹试验区出现的一块冰雹云并分析冰雹形成的物理机制,对雹云做了高度催化试验;李宏宇等^[6]对三维冰雹云催化模式人工引晶微物理过程参数化部分进行了改进,将人工引晶单独作为预报量处理,导出人工冰晶与其他粒子发生的微物理过程参数化方程;楼小凤等^[7]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;王佳等^[8]对2010年6月18日苏北地区一次强降雹过程进行催化数值模

拟,催化试验表明,地面降雹刚形成或降雹强度刚增强时,在过冷雨水中心区播撒AgI,减雹效果显著,最大减雹量可达21.1%,催化后,霰的数量增加、尺度减小,导致霰向雹的自动转化减少,且大量小尺度霰成为雹胚后,争食云水,增长受阻;樊明月等^[9]利用三维冰雹云模式,对2006年7月5日山东境内一次以冰雹、雷雨大风为主的强对流过程进行催化数值模拟,人工催化试验表明:催化效果的好坏对作业时机的选取十分敏感,在强对流云中冰雹含量达到 $0.1\text{ g}\cdot\text{m}^{-3}$,前1~4 min进行催化能有效抑制冰雹粒子的增长,在过冷水含量中心(5.5 km)上方1.0~1.5 km催化防雹效果较好。

四川省凉山州地区属于冰雹天气多发区^[10],全州每年保护烤烟防雹作业近3 000次,耗用炮弹5~6万余发,火箭弹1万余枚。然而,在实际人工防雹中,存在对催化时间、剂量、催化高度不完全了解的问题,本文利用中国科学院大气物理研究所发展的三维冰雹云模式^[11-15]对2013年4月29日西昌一次降雹过程进行数值模拟,根据不同的AgI催化方案开展一系列的防雹试验,从地面降雹量和降雹动能通量极值的变化衡量出最佳催化方案,研究冰晶

收稿日期:2016-12-07;改回日期:2017-02-20

基金项目:四川省气象局科学技术研究开发课题(川气课题2014-开发-11)和“南方大范围云系人工增雨潜力探测研究”(GYHY201406032)共同资助

作者简介:郑飒飒(1987-),女,硕士研究生,工程师,主要从事人工影响天气方面研究。E-mail:524302035@qq.com

在雹云微物理过程中及防雹方面的作用,分析防雹机制。

1 资料与方法

三维冰雹云模式采用详细的微物理过程,考虑凝结(华)、核化、繁生、融化、碰并、自动转化、融化蒸发等,包含有雨水、云水、水汽、冰晶、雪、霰、冻滴和冰雹8种粒子,粒子采用双参数谱。以2013年4月29日08:00(北京时,下同)西昌探空站的温、湿、风场作为模式输入场。模式采用湿热泡扰动方式启动,最大扰动温度为3.5℃,扰动半径8km,厚6km,模拟时间为60min,计算区域为36km×36km×18.5km,水平格距为1.0km,垂直格距为0.5km,用*i, j, k*分别表示*x*轴(向东),*y*轴(向北),*z*(向上)轴上的格点序数。

2 模拟雹云

2013年4月29日19:00,四川西昌、冕宁市发生冰雹灾害,冰雹持续7min,造成严重经济损失。由于西昌14:00没有探空资料,因此以08:00的探空资料作为初始场。图1是模拟西昌雹云发展到28min时沿*y*=20km处的雷达回波图,可以看出,在雹云发展到28min时,雷达回波达到较大值,回波中心强度为63dBZ,强回波区高度基本维持在3~5km。

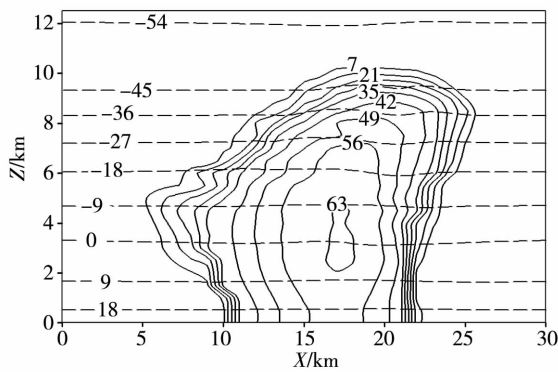


图1 2013年4月29日西昌冰雹云28min时的雷达回波(实线,单位:dBZ)和温度(虚线,单位:℃)在*y*=20km处的模拟垂直剖面

Fig.1 The *x*-*z* section of simulated radar echo (solid line, Unit: dBZ) and temperature (dashed line, Unit: °C) at *y*=20 km at the 28th minute of hail cloud development in Xichang of Sichuan on 29 April 2013

3 催化试验

这里只考虑 AgI 的静力催化作用(即微物理作

用),忽略炮弹爆炸的动力催化。模拟结果显示:冰雹云发展到12min时,还未出现雷达回波,模拟的冰雹云最大上升气流高度在5.5km,速度为4.1m·s⁻¹,对应温度为-12.8℃(图略)。图2为该时刻模拟云体总含水量和温度在*y*=16km处的垂直剖面结构,用总含水量的分布状况来表明该例冰雹云的一些宏观特征。

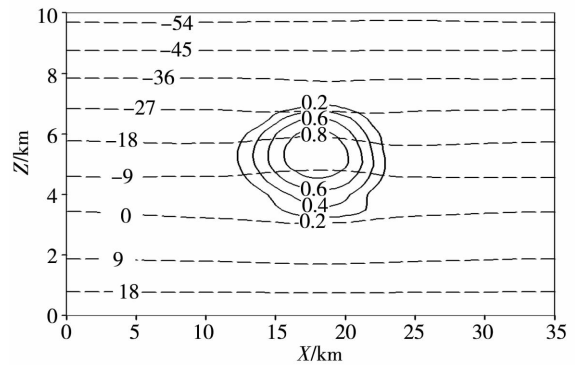


图2 2013年4月29日西昌冰雹云12min时云内总含水量(实线,单位:g·m⁻³)和温度(虚线,单位:℃)在*y*=16km处的模拟垂直剖面

Fig.2 The *x*-*z* section of simulated total water content (solid line, Unit: g·m⁻³) and temperature (dashed line, Unit: °C) at *y*=16 km at the 12th minute of hail development in Xichang of Sichuan on 29 April 2013

催化方案选择如下:在冰雹云发展12min时开始催化,催化剂量(AgI)为300g,在最大上升气流所在格点的东、西、南、北4个方向各1km的水平区域内(水平区域内共包含9个格点)播撒AgI,视为9点催化方式。以下开展的各催化试验只改变被催化参数,不改变其他参数。西昌主要使用37高炮和JFJ火箭开展防雹作业。表1是炮弹的AgI含量及AgI成冰核率。

3.1 催化时间试验

选择合理的催化时间,对防雹效果非常重要,此防雹试验分别在雹云发展8、12、16、20、24min时开始催化,模拟结果见表2。与未催化模拟结果相比,在20min以前播撒AgI,催化效果较好。即作业时间越早地面降雹量和降雹动能通量极值较小,防雹效果越好,因此防雹效果的好坏对催化时间的选取十分敏感。雹云发展8min时催化降雹动能通量极值最小,但降雹量比12min时的催化降雹量多,综合考虑,选取雹云发展到12min时为最佳催化时间。

3.2 催化剂量试验

在冰雹云发展到12min时,分别以50、100、200、300、400g催化剂量进行催化试验,模拟结果见表3。

表 1 炮弹的 AgI 含量及 AgI 成冰核率

Tab. 1 The AgI content of shells and the nucleation rate of AgI

项目	“83”型炮弹	JFJ 火箭弹
AgI 含量/g	1	2~4
温度为 -10 °C 时 AgI 成冰核率/个·g ⁻¹	2 × 10 ⁹	4.5 × 10 ⁹
温度为 -20 °C 时 AgI 成冰核率/个·g ⁻¹	2 × 10 ¹⁵	

表 2 防雹效果对催化时间的敏感试验

Tab. 2 The sensitivity test of seeding time of AgI on suppression hail

催化时间/ min	降水量/ kt	降雨量/ kt	降冻滴和霰量/ kt	降雹量/ kt	降雹动能通量极值/ J·m ⁻² ·s ⁻¹
8	208.64	140.28	6.41	61.96	0.56
12	213.29	144.86	7.20	61.23	0.61
16	248.79	142.59	6.52	99.70	0.79
20	288.01	151.25	7.84	128.94	1.54
24	303.34	157.92	8.50	136.94	1.54
未催化	307.31	159.42	8.61	139.30	1.54

表 3 防雹效果对催化剂量的敏感试验

Tab. 3 The sensitivity test of seeding amount of AgI on suppression hail

催化剂量/ g	降水量/ kt	降雨量/ kt	降冻滴和霰量/ kt	降雹量/ kt	降雹动能通量极值/ J·m ⁻² ·s ⁻¹
50	256.08	148.03	6.95	101.12	0.81
100	232.60	141.80	6.78	84.04	0.75
200	213.83	138.62	6.50	68.72	0.64
300	208.64	140.28	6.41	61.92	0.53
400	205.63	140.77	6.57	58.30	0.53
未催化	307.31	159.42	8.61	139.30	1.54

可以看出,随着催化剂量的增加,降雹量和降雹动能通量极值逐渐减小,地面降水量(固体降水和液体降水总和)逐渐减少,当 AgI 催化量增大到一定量的时候,各物理量的变化不再明显。如果使用 300 g 和 400 g 的催化剂量,降雹量分别为 61.92、58.30 kt,但地面降雹动能通量极值没有变化,出于节俭防雹成本的角度考虑,选择 300 g 的播撒剂量更为合理。

3.3 催化高度试验

实际防雹中,AgI 的扩散区域呈扇面状,在本次催化高度试验中,仍使用水平 9 点催化区域来等效扇面区域。当冰雹云发展到 12 min 时,在最大上升气流所在 5.5 km 高度处上升或下降一定高度,即分别在中心点的 4.0、4.5、5.0、5.5、6.0 km 处进行催化(表 4)。从表 4 可以看出,随着催化高度的降低,地面降雹量减少,在 4.5 km 处的催化防雹效果最

好。当下降至 4.0 km 处,各物理量变化不明显。反之,随着催化高度的上升,地面降雹量增加,防雹效果越不好,说明在最大上升气流所在格点处下方进行催化,上升气流会把催化剂带到较多过冷云水和雨水的部位,从而达到更好的防雹效果。

3.4 催化方式试验

表 5 给出不同催化方式的模拟结果。单点催化是把所有催化剂播散在最大上升气流区,模拟结果显示降雹量为 101.88 kt,降雹动能通量极值为 0.81 J·m⁻²·s⁻¹;垂直催化是在最大上升气流中心点的垂直方向上选取 9 个格点进行催化,模拟结果显示降雹量为 68.68 kt,降雹动能通量极值为 0.63 J·m⁻²·s⁻¹;而水平 9 点催化的降雹量为 61.92 kt,降雹动能通量极值为 0.53 J·m⁻²·s⁻¹,比单点催化和垂直催化更小,防雹效果更好。

表4 防雹效果对催化高度的敏感试验

Tab.4 The sensitivity test of seeding height on suppression hail

催化高度/ km	降水量/ kt	降雨量/ kt	降冻滴和霰量/ kt	降雹量/ kt	降雹动能通量极值/ $J \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$
4.0	210.15	135.93	6.03	68.20	0.59
4.5	208.64	140.28	6.41	61.96	0.56
5.0	225.63	148.48	8.44	68.72	0.65
5.5	247.10	156.91	10.02	80.18	0.68
6.0	256.83	145.42	9.52	101.91	0.89
未催化	307.31	159.42	8.61	139.30	1.54

表5 防雹效果对催化方式的敏感试验

Tab.5 The sensitivity test of seeding area on suppression hail

催化方式	降水量/ kt	降雨量/ kt	降冻滴和霰量/ kt	降雹量/ kt	降雹动能通量极值/ $J \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$
单点催化	257.61	148.74	7.01	101.88	0.81
垂直催化	216.85	141.14	7.04	68.68	0.63
水平9点催化	208.64	140.28	6.41	61.92	0.53
未催化	307.31	159.42	8.61	139.30	1.54

4 催化试验微物理过程

只考虑 AgI 静力催化作用,以最佳催化方案为代表,进一步分析催化后防雹的微物理过程。为方便后文及图3、图4简洁,表6给出文中及图中用到的符号及其相应的物理意义。图3是未催化和催化例雹云冰雹质量产生率随时间的演变,可以看出,冰雹的主要来源是霰自动转化成雹(CNgh),主要增长方式是冰雹碰并云水(CLch)。催化后,从质量上看,霰自动转化成冰雹和冰雹碰并云水减少,冰雹(Qh)最大质量产生率由 $191.81 t \cdot s^{-1}$ 减少到 $103.66 t \cdot s^{-1}$,从数量上看,冰雹的总数量减少 $10^{12.00}$ 个,说明防雹效果显著。

表6 文中符号的物理意义

Tab.6 Physical meanings of the symbols in this paper

符号	物理意义	符号	物理意义
Qh	冰雹	CLrh	冰雹碰并雨水
Qg	霰	CNig	冰晶自动转化形成霰
CNgh	霰自动转化成雹	CNsg	雪自动转化形成霰
CLch	冰雹碰并云水	CLig	霰碰并冰晶增长
CNfh	冻滴自动转化成雹	CLcg	霰碰并云水增长
CLgh	(湿)冰雹碰并霰	CLrg	霰碰并雨水增长
CLfh	(湿)冰雹碰并冻滴	VDvg	霰凝华增长

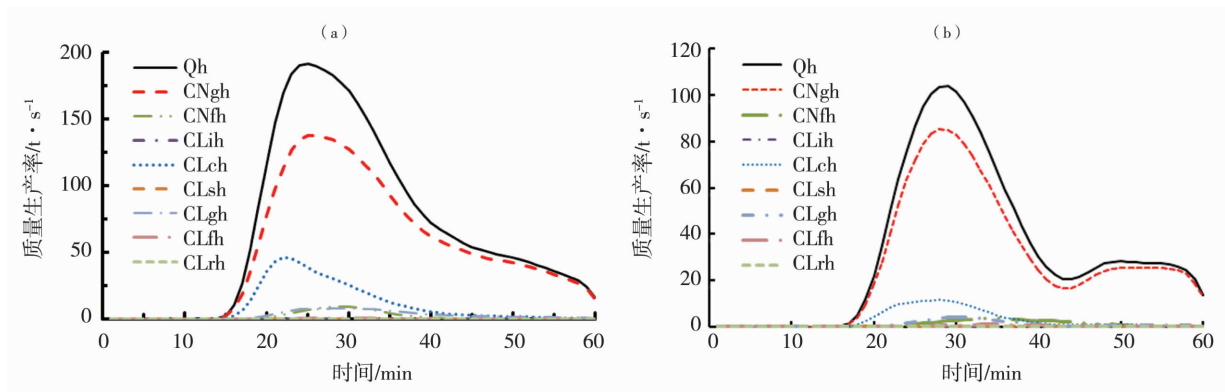


图3 未催化例(a)和催化例(b)雹云冰雹质量产生率随时间的演变

Fig.3 Temporal evolutions of mass producing rate of hail of the natural hail cloud (a) and the seeding hail cloud (b)

此例雹云存在过冷水累积带,在人工播散冰晶后,形成了人工胚胎与霰胚的“有利竞争”,有效减少了较大冰雹形成。霰是冰雹的主要源项,催化后,霰转化成冰雹的个数减少了 $10^{11.98}$ 个(图略)。图4为催化例冰雹云减去未催化例冰雹云后霰的质量生产率,可以看出,霰的质量生产率减少的主要原因是 CNig、CNsg、CLig、CLcg、CLrg、VDvg 减少,其中,霰碰并云水(CLcg)的减少尤为明显。综上所述,霰的减少导致霰自动转化成雹减少,在人工播撒 AgI 后,形成冰雹的霰胚减少,霰碰并云水也减少,从而达到有效的防雹效果。

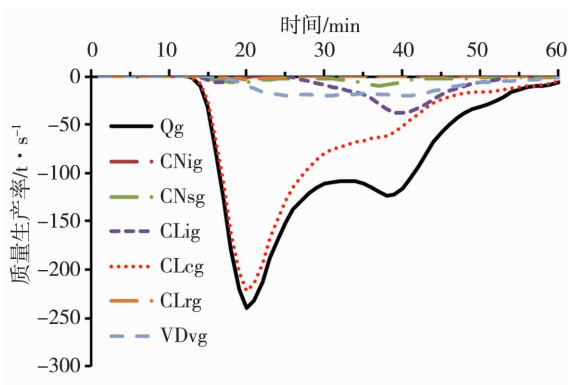


图4 催化例雹云减去未催化例冰雹云后霰的质量生产率

Fig. 4 Temporal evolutions of mass producing rate of graupel between the seeding cloud minus the natural hail

5 结论

(1)催化试验结果显示,该例冰雹云的最佳催化方案是:在雹云发展到 12 min 时开始催化,AgI 催化剂量为 300 g,催化方式为 9 点水平催化,催化位置为最大上升气流所在格点处下方 1 km。

(2)对催化微物理过程分析得出,在人工引入碘化银后,激发“有利竞争”,争食过冷水,雹块不能长大,另外由于霰胚数量和质量的减少,导致霰自动转化成雹的数量和质量减少,从而达到最佳的防雹效果。

参考文献

- [1] 陈关清,杨群,李伟栋,等. 贵州铜仁连续两次冰雹天气过程的对比分析[J]. 干旱气象,2016,34(1):163-172.
- [2] 黄美元. 人工防雹导论[M]. 北京:科学出版社,1980:92-95.
- [3] 洪延超. 三维冰雹云催化数值模式[J]. 气象学报,1998,56(6):641-653.
- [4] 洪延超. 冰雹形成机制和催化防雹机制研究[J]. 气象学报,1999,57(1):30-44.
- [5] 洪延超,肖辉,李宏宇,等. 冰雹云中微物理过程研究[J]. 大气科学,2002,26(3):421-432.
- [6] 李宏宇,胡朝霞,肖辉,等. 人工防雹实用催化方法数值研究[J]. 大气科学,2003,27(2):212-222.
- [7] 楼小凤,师语,卢广献. 一次降雹过程的 AgI 系列催化模拟研究[J]. 应用气象学报,2016,27(2):129-139.
- [8] 王佳,智协飞,陈钰文,等. 2010 年 6 月 18 日苏北一次强降雹过程及其催化数值模拟[J]. 气象科学,2012,32(5):526-533.
- [9] 樊明月,张佃国,龚佃文,等. 山东冰雹形成机制及雹云催化技术模拟[J]. 大气科学学报,2013,36(1):107-120.
- [10] 刘晓璐,张元,刘建西. 川西南山地冰雹灾害的时空特征[J]. 干旱气象,2016,34(1):75-81.
- [11] 郭学良,黄美元,洪延超,等. 三维冰雹分档强对流云数值模式研究 I. 模式建立及冰雹的循环增长机制[J]. 大气科学,2001,25(5):707-720.
- [12] 郭学良,黄美元,洪延超,等. 三维冰雹分档强对流云数值模式研究 II. 冰雹粒子的分布特征[J]. 大气科学,2001,25(6):856-864.
- [13] 胡朝霞,郭学良,李宏宇,等. 慕尼黑一次混合型雹暴的数值模拟与成雹机制[J]. 大气科学,2007,31(5):973-986.
- [14] 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[J]. 气候与环境研究,2007,12(1):37-48.
- [15] 李兴宇,洪延超. 三维冰雹云数值催化模式改进与个例模拟研究[J]. 气象学报,2005,63(6):874-888.

Numerical Simulation of a Hailstorm Process and AgI - seeding in Xichang of Sichuan Province

ZHENG Sasa^{1,2}, LIU Dongsheng^{1,2}, ZOU Yong³, YU Fang^{1,2}

(1. Weather Modification Office of Sichuan Province, Chengdu 610072, China; 2. Heavy Rain and Drought - Flood Disasters in Plateau and Basin Key Laboratory of Sichuan Province, Chengdu 610072, China; 3. Liangshan Yi Autonomous Prefecture Meteorological Bureau of Sichuan Province, Liangshan 615000, China)

Abstract: Based on the three - dimensional hail cloud model, a hailstorm process occurring in Xichang of Sichuan Province on 29 April 2013 was simulated. Several hail suppression tests with varied seeding time, seeding height, seeding amount and seeding method of AgI were carried out. The results show that the optimum hail suppression effect could be achieved by selecting the appropriate seeding time, seeding amount, seeding position and area. Through the comparative analysis of hail formation mechanism of the seeding and natural cloud, it could be known that after seeding AgI the hail couldn't grow because of "favorable competition", and reduction of the graupel embryo and hail hitting cloud water caused the reduction of hail.

Key words: hail suppression; AgI; seeding experiment; numerical simulation