

樊明月, 王庆, 刘文, 等. 2016. 低过冷雨水含量天气过程冰雹形成机制及催化机理模拟 [J]. 气候与环境研究, 21 (3): 293–305. Fan Mingyue, Wang Qing, Liu Wen, et al. 2016. Numerical study of hail formation in a storm with low supercooled rain water content and the seeding mechanism with AgI [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 21 (3): 293–305, doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2015.15128.

低过冷雨水含量天气过程冰雹形成机制及 催化机理模拟

樊明月 王庆 刘文 郭建

山东省人工影响天气办公室, 济南 250031

摘要 利用三维全弹性冰雹云模式, 对 2008 年 5 月 24 日山东境内一次受高空冷涡影响的大范围冰雹天气过程进行模拟, 分析了冰雹的形成机制和催化防雹机理。结果表明: 该过程过冷雨水中心位于最大上升气流中心下方, 不存在过冷雨累积区, 过冷雨水含量最大值仅为 4.9 g m^{-3} , 但雹云中过冷雨水含量仍然丰富, 对雹胚的形成及增长起着重要作用。雹胚以冻滴为主, 冻滴胚来源于冰雪晶与过冷雨水碰撞冻结以及雨滴核化过程。冻滴形成后主要以碰并过冷雨水、云水增长。冻滴胚自动转化过程是冰雹数量、质量的主要来源; 冰雹形成后, 前期主要靠碰并冻滴、霰和过冷雨水增长, 后期主要靠碰并过冷云水增长。催化试验表明, 播撒 57.5 g 催化剂足以通过“竞争”减雹 50% 以上, 增加 AgI 剂量, 防雹的同时能够兼顾增雨。催化剂用量为 230 g 时, 催化后液态降水有所增加, 固态降水量及占总降水量的比例减少显著, 特别是冰雹。AgI 主要以凝华核的作用产生人工冰晶, 冰晶凝华增长导致过冷云水、雨水含量降低。催化后雹胚特别是冻滴胚数量增多, 对过冷云水、雨水的竞争增强; 其平均尺度、质量的减小, 降低了向冰雹的转化率。冰雹碰并过冷云水、雨水增长过程被减弱, 导致冰雹总质量进一步减少, 达到消雹目的。

关键词 冰雹 过冷雨水含量 冻滴 AgI 数值模拟

文章编号 1006-9585 (2016) 03-0293-13

中图分类号 P482

文献标识码 A

doi: 10.3878/j.issn.1006-9585.2015.15128

Numerical Study of Hail Formation in a Storm with Low Supercooled Rain Water Content and the Seeding Mechanism with AgI

FAN Mingyue, WANG Qing, LIU Wen, and GUO Jian

Weather Modification Office of Shandong Province, Jinan 250031

Abstract The mechanism of hail formation and seeding effect of hail suppression were studied using a three-dimensional hailstorm numerical model with fully elastic primitive equations. The data used were taken from a large-area hailstorm affected by a high altitude cold eddy that occurred in Shandong Province on 24 May 2008. The simulation results showed that the height of the center of supercooled raindrops was below the maximum updraft center in this storm, so the accumulation zone of supercooled rain water was not present, and the maximum content of supercooled rain water was only 4.9 g m^{-3} . However, the supercooled rain water content was still rich in the hailstorm cloud, which played an important role in hailstone embryo formation. The main hailstone embryos were frozen droplets, with the dominant formation mechanisms being the collision freezing of ice crystals, snowflakes with supercooled rain water and the

收稿日期 2015-05-19; 网络预出版日期 2015-09-07

作者简介 樊明月, 1979 年出生, 男, 硕士, 工程师, 研究方向为云雾微物理过程与数值模拟研究。E-mail: mingyuefan@foxmail.com.

资助项目 山东省气象局项目 2012sdqxz07、2015sdqxm07

Funded by Program of Weather Bureau of Shandong Province (Grants 2012sdqxz07 and 2015sdqxm07)

nucleation of raindrops. Once formed, accretion of rain water and cloud water were the dominant growth mechanisms of frozen droplets. Both the main quality and quantity source mechanism of hail particles was the auto conversion of frozen droplets. After formation, the coalescence of frozen droplets, graupel particles and supercooled rain water were the dominant growth mechanisms of hail particles in the earlier stage, while in the later stage the dominant growth mechanism was the coalescence of supercooled cloud water. Catalytic results showed that hail-related disaster would have been suppressed by more than 50% by seeding 57.5 g AgI, and precipitation would have been enhanced along with the hail suppression by increasing the AgI content. Rainfall precipitation was increased with the solid-phase precipitation and its percentage decreased, especially hailstones, when seeding with 230 g AgI. Artificial ice crystals were produced with the deposition nucleus AgI, and the deposition growth of ice crystal resulted in a reduction of supercooled cloud water content. The number of hailstone embryos, especially frozen droplets, increased considerably after seeding, and these numerous smaller hailstone embryos competing for the lower availability of supercooled cloud water resulted in a reduction of average size and quality of frozen droplets. The quantity of hailstones reduced because the conversion rate of hailstone embryos to hailstones was decreased. Accretion of supercooled cloud and rain water by hailstones was decreased after seeding, resulting in a decrease in hail amount, and the hail was suppressed by seeding with AgI.

Keywords Hailstones, Supercooled rain water content, Frozen droplet, AgI, Numerical simulation

1 引言

中国是世界上冰雹灾害最严重的国家之一，我国平均每年由冰雹所造成的经济损失约为数亿元至十余亿元。在我国北方，冰雹灾害频繁，突发的冰雹袭击常给农作物带来毁灭性损失。形成冰雹至少需要 3 个条件：过冷水、适当数量的冰雹胚胎（霰或冻滴）以及足以支撑雹块长大的上升气流。当这 3 个条件都具备时，雹块最终的大小就取决于可用的过冷水含量和上升气流的强度（郑凯琳和陈宝君，2011）。理论上，有限数量的雹胚在有利的上升气流和充足过冷水的环境下都可能会长成大的冰雹。

采用催化剂防雹的一个主要理论依据是前苏联科学家 Sulakvelidze 提出的竞争防雹理论（黄美元和王昂生，1980）。在此理论及竞争防雹理论的基础上，前苏联在 20 世纪 60 年代进行了大量的人工防雹作业，减少雹灾损失 60%~90%，冰雹胚胎以冻滴胚为主。雷达观测（马振骅，1977）和数值模拟（周玲等，2001；胡朝霞等，2003；周毓荃等，2003）发现有些冰雹云具有过冷雨水累积区，其内过冷雨水的含量可达到 $9\sim 18\text{ g m}^{-3}$ ，冰雹在其中形成、增长，雹胚以冻滴为主（洪延超，1999；洪延超等，2002；胡朝霞等，2003）。对具有过冷雨水累积区，雹胚以冻滴为主的冰雹云播撒 AgI 会使雹胚的数量增加，竞争过冷雨水使冰雹增长受到抑制（洪延超，1999；周玲等，2001）。

但并非所有的冰雹云都具有过冷雨水累积区。

美国国家冰雹研究试验（NHRE）发现科罗拉多地区的冰雹云就没有过冷水累积区，雹胚主要由霰粒子构成（Foote and Knight, 1979; Knight et al., 1979）。瑞士、法国和意大利于 1977~1981 年在瑞士中部联合进行的随机防雹试验也没有发现过冷雨水的累积区（Federer et al., 1986）。美国 20 世纪 80 年代进行了对流降水协作试验（CCOPE），虽然在有些雹云探测到过冷水，但含量很低仅为 4 g m^{-3} 左右，地面雹块分析显示雹胚以霰为主（Rasmussen and Heymsfeld, 1987; Kubesh et al., 1988）。刘俊卿（2007）研究指出那曲、拉萨冰雹过程均无过冷水累积区，冰雹胚胎以霰为主。胡朝霞等（2007）分析慕尼黑雹云的成雹机制时发现该雹云不存在过冷雨水累积带，冰雹胚胎冻滴、霰数量相当。陈宝君和肖辉（2007）对过冷雨少、雹胚以霰为主的冰雹云催化研究发现，当雹胚和霰以碰并过冷水云增长为主时，播撒 AgI 仍然能够通过竞争机制达到减雹目的。三维冰雹云模式在雹云结构、冰雹形成和增长机制、催化方案的设计和效果检验以及催化效应的理解等方面得到了广泛应用（黄美元等，2000）。但利用数值模式研究无明显过冷雨水累积带，过冷雨水含量低且雹胚以冻滴为主的冰雹过程还很少。本文利用中国科学院大气物理研究所开发的三维雹云模式（孔凡铀等，1990，1991；孔凡铀，1991；洪延超，1998，1999；肖辉等，2004）对山东 2008 年 5 月 24 日的冰雹过程进行模拟，研究过冷雨水较少、雹胚以冻滴为主的雹云成雹增长机制，并详细探讨这类雹云的催化效果和影响机制。

2 冰雹灾情与天气形势分析

2008年5月23~26日,受高空冷涡影响,山东出现了一次较大范围的冰雹天气过程。鲁西北、鲁中、鲁北先后遭到了冰雹天气的袭击。山东省气象台灾情统计表明,23~24日淄博市城区、沂源县出现冰雹,未成灾;临沂市沂水、费县、蒙阴县出现冰雹灾害,受灾面积2602.5 ha;24~25日齐河县晏城、大黄、宣章出现了冰雹灾害,受灾人口13700人,受灾面积600 ha,直接经济损失 296×10^4 元。

24日08:00(北京时间,下同),500 hPa东北(图略)地区形成了大致为东北—西南向的椭圆形冷涡,涡后有冷中心,700 hPa和850 hPa(图略)有相应低压中心配合,形成深厚高空冷涡系统。850 hPa河套地区伸向鲁中一带的暖舌—加强,鲁西北地区出现中尺度切变线。地面图上华北中南部到山东维持低压槽区,深厚的辐合系统为低层水汽和动量的输送提供了良好条件,上冷下暖的垂直结构加剧了大气层结的不稳定,为强对流天气的发展提供了较好的条件。

济南章丘站24日08:00,整层大气的干湿分层明显,700 hPa以上出现了正不稳定能量,−20℃层高度有所下降,表明高层有冷空气侵入,24日20:00,整层大气仍具有明显的干湿分层和正的不稳定能量区,−20℃层高度与08:00相差不大,高层冷空气持续影响,层结不稳定,有利于强对流天气的发生。25日08:00整层大气为负不稳定能量,干湿分层不明显,且湿度明显下降,层结趋于稳定,冰雹形成的有利条件逐渐崩溃。

分析齐河雷达资料表明,过程初始阶段表现为

孤立发展的对流单体,几小时后零散对流单体开始组织化,并逐渐形成带状对流云带向西移动。24日20:30,受850 hPa中尺度切变线前部辐合上升气流的影响,鲁西北、鲁中地区有对流云团开始发展,云团发展强烈,部分地区出现冰雹。

3 冰雹云数值模拟

3.1 宏观结构

利用济南章丘20:00的实际探空资料作为初始场(图1)。模拟区水平范围 $36 \text{ km} \times 36 \text{ km}$,垂直高度为19 km;水平和垂直格距分别取1 km和0.5 km。采用湿热泡扰动方式激发初始对流云(在模拟域中央附近低层加一位温扰动场和水汽场,通过垂直运动方程的浮力项触发初始对流),水平扰动中心位于模拟域中央,高度在3.5 km,扰动半径水平、垂直方向分别为8 km和3 km,最大扰动位温值取为1.0℃。模拟时间60 min。模式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。

模拟回波5 dBZ高度在13.5 km左右,最大回波强度60 dBZ左右,与20:55实际雷达回波(最大回波强度为63 dBZ,回波顶高为13.5 km;图2)基本一致,说明模式对该冰雹过程有较好的模拟能力。

图3给出了模拟最大上升、下沉气流速度随时间的演变情况。对流在模拟10 min以后迅速发展,最大上升气流在20 min时达到极大值 38.9 m s^{-1} ,35 min左右下降到 6 m s^{-1} 以下;最大下沉气流在18 min达到极大值 14.8 m s^{-1} ,但此时地面并没有出现降水。以最大降水强度大于 0.1 mm h^{-1} 为标准,则降雨出现在23 min,地面24 min出现降雹。地面降水中(表1)固态降水占总降水量的6.9%,固态降水中(表2)以冰雹为主,占固态降水的

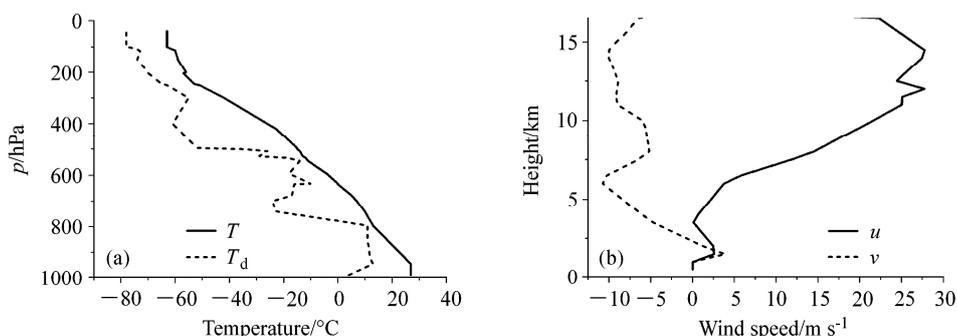


图1 2006年7月5日济南章丘单站探空的(a)温湿廓线和(b)风廓线

Fig. 1 (a) Temperature-moisture profile and (b) wind profile at Zhangqiu station on 5 July 2006

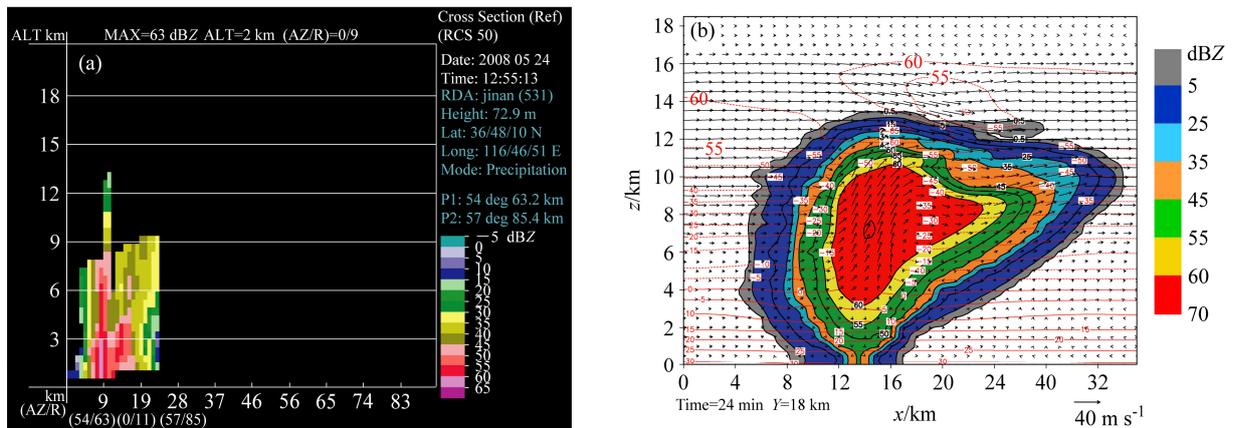


图2 2006年7月5日济南章丘单站探空的(a)雷达回波剖面以及(b)模拟的回波强度(填色单位: dBZ)。红色等值线表示温度(单位: °C), 矢量箭头表示风速风向

Fig. 2 (a) Echo cross section and (b) simulated echo intensity (dBZ) at Zhangqiu sounding station of Jinan on 5 July 2006. The red contour indicates temperature (°C), the vector arrow indicates wind speed and direction

81.4%, 冻滴降水量次之, 占 16.3%。根据地面刚出现降水时的水平流场和雷达回波发现(图略), 虽然 23 min 地面出现降水, 但没有造成有组织的水平辐散, 水平流场仍在低层辐合, 高层辐散。

表1 模拟域地面液态、固态降水总量及百分比

Table 1 Rainfall amount at the ground and its percentage		
	总量/kt	百分比
总降水量	899.0	—
液态降水	837.1	93.1%
固态降水	61.9	6.9%

表2 模拟域地面固态降水组成及百分比

Table 2 Composition of solid phase precipitation and its percentage		
	总量/kt	百分比
固态降水	61.9	—
冰雹	50.4	81.4%
冻滴	10.1	16.3%
霰	1.4	2.3%

3.2 微观结构

模式积分到 4 min 时云滴出现, 云水含量增加的很快, 10 min 时云水含量已经超过 2 g m^{-3} ; 并出现雨滴。过冷雨水和过冷水的高值区都在主上升气流区(表 3), 但过冷水中心一直位于最大上升气流中心下方, 可以认为本例雹云不存在过冷雨的累积区。这种情况下尽管过冷水有所累积, 但量值会比较小。模拟结果表明, 本个例中过冷云水含量维持在 2.5 g m^{-3} 左右; 过冷雨水含量最大值仅为 4.9

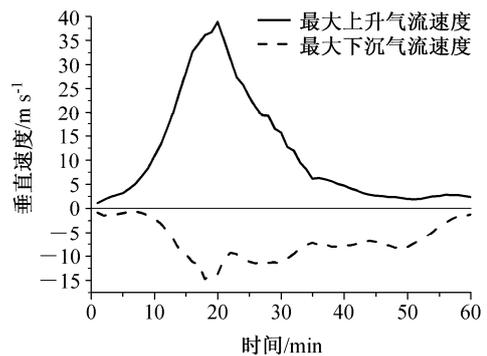


图3 模拟最大上升气流和最大下沉气流速度随时间的演变

Fig. 3 Maximum updraft and downdraft over the model domain as a function of time

g m^{-3} , 与陈宝君和肖辉(2007)模拟个例过冷雨水含量相差不多, 但比陕西旬邑(周玲等, 2001; 胡朝霞等, 2003)的 9 g m^{-3} 、河南个例(周毓荃等, 2003)的 18.7 g m^{-3} 低得多, 也远低于本地区 2006 年 7 月 5 日(樊明月等, 2013)冰雹过程过冷雨水含量 18.6 g m^{-3} 。

本例模拟雹云, 过冷雨水出现在 11 min、15 min 以前过冷雨水对雨水总量的贡献高于 90%。雹云发展初期, 过冷雨水含量高, 大滴多。胡朝霞等(2003)发现雹胚以冻滴为主的雹云中, 雹云发展阶段的雨水几乎都为过冷水。洪延超(1999)、洪延超等(2002)模拟结果表明, 如果在雹云初始发展阶段, 雨滴首先在过冷区形成, 就能够更快冻结形成冻滴。图 4 说明: 11~15 min 过冷雨水、冻滴和霰量

表 3 10~20 min 期间上升气流、过冷云水、过冷雨水、冻滴、霰和冰雹的最大值与所在位置

Fig. 3 Magnitudes and locations of maximum updraft, supercooled cloud water (SW) and supercooled rain water (SRW) content, frozen drop content, graupel content, and hail content from 10 to 20 min

时间/min	上升气流速度			过冷云水含量			过冷雨水含量			冰晶含量		
	最大值/ m s^{-1}	i, j	H/km	最大值/ g m^{-3}	i, j	H/km	最大值/ g m^{-3}	i, j	H/km	最大值/ g m^{-3}	i, j	H/km
10	10.9	20, 17	5.0	2.4	20, 17	4.5	/	/	/	/	/	/
11	13.2	19, 16	5.5	2.7	19, 17	5.0	0.3	18, 17	4.5	/	/	/
12	16.5	19, 17	5.5	2.7	19, 17	5.0	1.4	19, 16	5.5	/	/	/
13	20.1	20, 18	6.0	2.6	19, 18	5.0	2.8	19, 17	5.5	/	/	/
14	24.5	20, 18	6.0	2.6	19, 18	5.5	4.2	19, 18	5.5	/	/	/
15	28.4	20, 19	6.5	2.6	20, 19	5.5	4.8	19, 19	5.5	0.1	20, 15	9.5
16	32.6	20, 19	7.0	2.5	19, 19	5.5	4.9	18, 19	5.5	0.2	22, 15	10.0
17	34.4	20, 19	8.0	2.4	18, 19	5.5	4.4	18, 19	5.5	0.3	22, 14	10.0
18	36.1	19, 19	8.0	2.2	17, 19	5.5	4.1	17, 19	5.5	0.2	18, 14	10.0
19	36.7	19, 20	8.0	2.0	18, 20	5.0	3.3	18, 20	5.5	0.3	26, 13	9.0
20	38.9	18, 20	9.0	2.0	17, 20	5.0	3.0	17, 20	5.0	0.5	26, 12	9.0

时间/min	雪含量			霰含量			冻滴含量			冰雹含量		
	最大值/ g m^{-3}	i, j	H/km	最大值/ g m^{-3}	i, j	H/km	最大值/ g m^{-3}	i, j	H/km	最大值/ g m^{-3}	i, j	H/km
10	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/
11	/	/	/	0.1	19, 17	4.5	/	/	/	/	/	/
12	0.1	20, 13	6.5	0.3	19, 16	5.5	/	/	/	/	/	/
13	0.1	22, 14	7.0	0.6	19, 17	5.5	0.2	19, 16	7.5	/	/	/
14	0.1	22, 13	7.0	1.3	19, 18	5.5	0.8	20, 17	7.5	/	/	/
15	0.1	22, 13	7.0	2.2	19, 19	5.5	2.3	21, 17	8.0	0.1	20, 16	7.0
16	/	/	/	3.0	18, 19	5.5	4.7	19, 18	7.5	0.3	19, 17	7.5
17	/	/	/	3.0	18, 19	5.5	5.5	21, 18	7.5	0.5	19, 17	7.0
18	/	/	/	2.4	17, 19	5.5	5.6	19, 19	7.5	1.1	18, 18	7.0
19	0.1	24, 14	8.0	2.4	18, 20	5.5	5.0	19, 19	7.5	1.6	18, 19	7.0
20	0.1	24, 14	8.5	2.6	17, 20	5.0	4.2	19, 19	7.5	2.5	17, 19	7.0

注: 表中各项均为 1 min 内 6 个时步的平均值, i 、 j 、 H 分别为最大值所在位置横、纵坐标值及垂直高度, “/”表示该时刻无此类降水。

值都随着高度增加而增大, 在某一高度达到最大以后又减小。16 min 时, 6 km 高度上的过冷雨水的含量显著降低, 与之对应的是冻滴含量的明显增加, 反映了冻滴粒子对过冷雨水的快速碰并增长。霰尽管形成的较早 (12 min), 但由于过冷雨水、云水含量低, 霰粒子碰并增长受到限制, 霰含量明显比冻滴低的多 (图 4、表 3)。可见, 本例雹云冻滴形成过程相对较快, 雹胚以冻滴为主。这类雹云中冰雹形成的微物理机制有何特征?

3.2.1 冰晶形成过程

模拟冰晶首先在 2 min 时通过水汽核化形成 (图 5a; 图 5 及后文使用符号物理意义见表 4), 但其含量在 15 min 时才达到 0.1 g m^{-3} (表 3), 雹云中冰晶总个数与水汽核化形成的冰晶个数在量级上相当 (图 5a), 对冰晶浓度贡献最大的微物理过程是水汽核化; 其次是霰粒和冻滴撞冻大云滴带来的冰晶繁生过程。水汽核化对冰晶浓度的贡献一般比繁生过程大 1~5 量级。冰晶形成后, 主要靠

凝华增长, 其次是水汽核化增长 (图 5b)。

3.2.2 雪形成过程

模拟域出现雪的时间与冰晶基本一致 (图 6a、图 5a), 雪主要起源于冰晶的自动转化 (图 6a)。22 min 前冰晶自动转化对雪数量的贡献最大, 特别是 14 min 前冰晶自动转化形成雪的数量比冰晶聚并形成雪的数量大 2 个量级以上; 22 min 后雪数量的增加主要以冰晶聚并过程为主, 其次是冰晶自动转化增长。对雪质量来说, 15 min 以前雪主要以碰并云水过程 (图 6b), 15~30 min 冰晶自动转化对雪质量的贡献最大, 其次是碰并冰晶增长和水汽凝华增长; 30~35 min 雪以碰并冰晶增长为主, 其次为冰晶自动转化, 然后是水汽凝华增长和碰并过冷云水增长; 35 min 以后雪主要以碰并冰晶增长以及凝华增长为主, 然后是碰并云水增长。

3.2.3 雹胚形成过程

冰雹胚胎有霰和冻滴, 首先分析霰胚的形成过程。模拟 6 min 时霰来源于雪的自动转化 (图 7a),

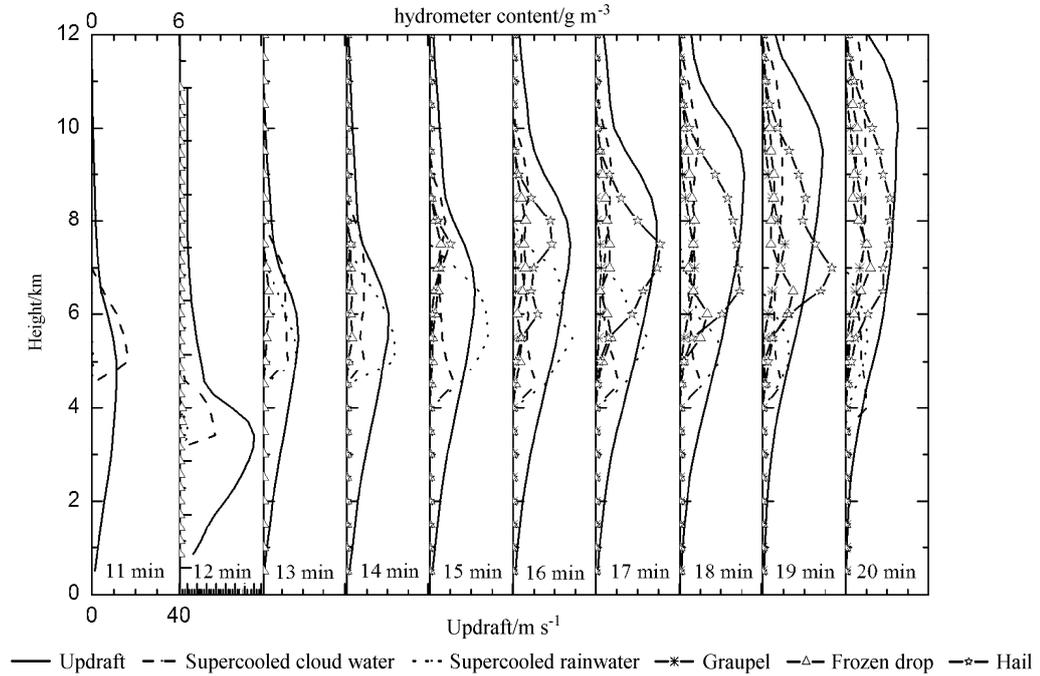


图 4 11~20 min 期间 (间隔 1 min) 主上升气流区的上升气流速度以及水物质含量随高度的分布

Fig. 4 Vertical profiles of updraft speed and hydrometeor content inside the maximum updraft region for the time period 11–20 min at 1-min interval

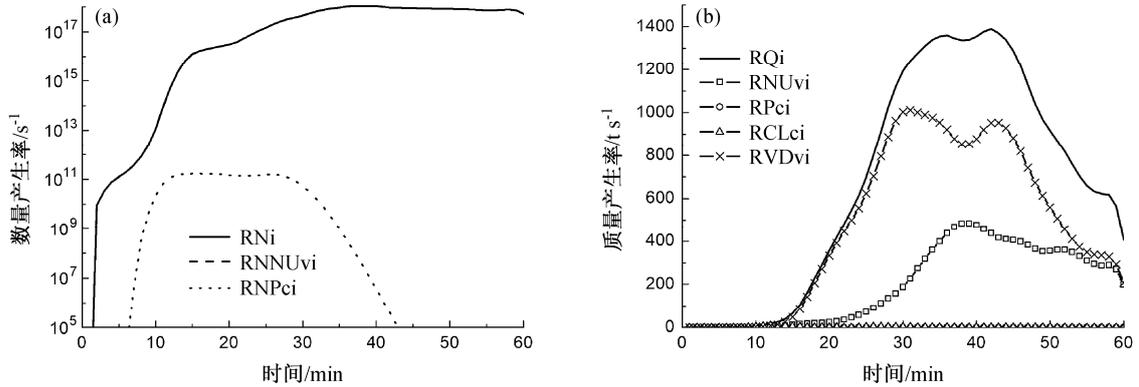


图 5 冰晶及其源项的 (a) 数量产生率和 (b) 质量产生率随时间的变化

Fig. 5 Temporal evolution of (a) number producing rates and (b) mass producing rates of ice crystal and its sources

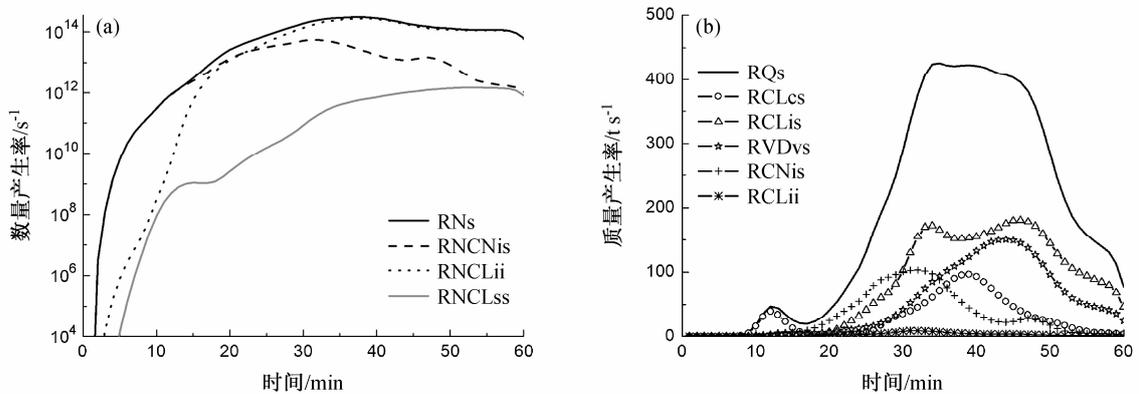


图 6 雪及其源项的 (a) 数量产生率和 (b) 质量产生率随时间的变化

Fig. 6 Temporal evolutions of (a) number producing rates and (b) mass producing rates of snow flake and its sources

表 4 文中使用符号及物理意义

Table 4 Physical meanings of symbols in this paper

符号	物理意义	符号	物理意义
i	冰晶	f	冻滴
NUvi	自然冰核活化形成冰晶	CLif	冻滴碰并冰晶增长
Pci	冰晶增生过程	CLsf	冻滴碰并雪增长
CLci	冰晶结淞增长	CLcf	冻滴碰并云水增长
VDvi	冰晶凝华增长	CLrf	冻滴碰并雨水增长
s	雪	CLrif	冰晶撞冻过冷雨水形成冻滴
CLcs	雪碰并云水增长	CLrsf	雪撞冻过冷雨水形成冻滴
CLis	雪碰并冰晶增长	VDvf	冻滴凝华增长
VDvs	雪凝华增长	NUrf	过冷雨水异质核化形成冻滴
CNis	冰晶自动转化形成雪	h	冰雹
CLii	冰晶聚并形成雪	CNgh	霰向冰雹自动转化
CLss	雪聚并过程	CNfh	冻滴向冰雹自动转化
g	霰	CLch	冰雹碰并云水增长
CNig	冰晶自动转化形成霰	CLrh	冰雹碰并雨水增长
CNsg	雪自动转化形成霰	CLih	冰雹碰并冰晶增长
CLig	霰碰并冰晶增长	CLsh	冰雹碰并雪增长
CLsg	霰碰并雪增长	CLfh	冰雹碰并冻滴增长
CLcg	霰碰并云水增长	CLgh	冰雹碰并霰增长
CLrg	霰碰并雨水增长	Xai	AgI 作业产生的人工冰晶
CLrig	冰晶撞冻雨滴形成霰	NUrag(f)	过冷雨滴和人工冰晶作用形成霰或者冻滴
CLrsg	冰晶撞冻雪形成霰		
VDvg	霰凝华增长		
NUrg	过冷雨滴异质核化形成霰		

注：符号前面加 T 表示总量，加 R 表示产生率，加 N 表示数量，加 Q 表示质量。

模拟 11 min 时霰含量达到 0.1 g m^{-3} ，31 min 霰含量达到最大值 4.0 g m^{-3} 。不同时段霰的主要产生机制不一样，例如：6~8 min 霰主要有雪自动转化形成；10~19 min 冰、雪晶碰冻过冷雨水是产生霰的主要物理过程；21~26 min 雪晶碰冻过冷雨水过程对霰的贡献减小，霰的主要产生机制为冰晶碰冻过冷雨水过程；27~31 min 过冷雨水异质核化过程对霰数量贡献最大；32 min 以后霰数量主要靠雪自动转化生成。但总的来说，32 min 前霰主要来自于冰雪晶与过冷雨水碰撞冻结以及过冷雨水异质核化过程，32 min 后霰主要靠雪的自动转化过程形成。这与 2006 年 7 月 5 日山东个例霰形成过程基本一致（樊明月等，2013），但与陕西旬邑霰主要通过冰晶、雪的自动转化生成（洪延超，1999）不同，也与江苏冰雹过程中霰主要通过冰雪晶与过冷云水碰撞冻结生成（吴海英等，2002）不同。可见，不同地区霰的生成过程存在差异，同一地区冰雹过程霰生成基本一致。霰形成后主要通过碰并过冷雨水、云水以及水汽凝华过程增长（图 7b），霰质量产生率高的时段（12~20 min），霰以碰并过

冷雨水增长为主，20 min 以后则以碰并过冷云水以及水汽凝华过程增长为主。

模拟 7 min 时冻滴胚由冰雪晶与过冷雨水碰撞冻结以及雨滴核化过程产生（图 8a）。其含量达到 0.1 g m^{-3} 比霰晚 2 min，最大含量为 18 min 时的 5.6 g m^{-3} （表 3）。地面降雹（24 min）以前，冰晶与过冷雨水碰撞冻结过程是冻滴数量最主要的产生项，其次是雪与过冷雨水碰撞冻结过程。雨滴核化对冻滴数量贡献稍小，但雨滴核化过程对冻滴质量的贡献比另外两个过程大得多（图 8b）。24 min 时的积分总量表明（表 5），雨滴核化产生冻滴的总质量达 354.1 kt，而冰晶、雪与过冷雨水碰撞冻结形成冻滴的质量分别只有 0.3 kt 和 0.2 kt。冻滴形成后增长过程分成两个时段讨论。地面出现降雹（24 min）前冻滴主要以碰并过冷雨水增长（图 8b），其次是雨滴核化对冻滴的质量贡献比较大，模拟结果表明（表 5），碰并过冷雨水对冻滴质量贡献占总量的

表 5 24 min 霰、冻滴和冰雹源项中各物理过程时空积分总质量

Table 5 Spatiotemporal integral amount of graupel, frozen and, hail particle sources at 24 minutes

		时空积分总质量/kt
霰	TQg	558.4
	TCNig	0.4
	TCNsg	2.3
	TCLrig	0.1
	TCLRsg	0.1
	TNUrg	84.5
	TCLcg	154.4
	TCLrg	226.5
	TVDvg	70.5
	冻滴	TQf
TCLrif		0.3
TCLrsf		0.2
TNUrf		354.1
TCLif		2.2
TCLsf		2.6
TCLcf		73.0
TCLrf		521.2
TVDvf		44.2
冰雹		TQh
	TCNfh	126.0
	TCNgh	9.1
	TCLch	7.9
	TCLrh	21.7
	TCLih	0.1
	TCLsh	0.1
	TCLfh	18.5
	TCLgh	13.9

53%，过冷雨滴核化过程的贡献略小，占总量的 27%，这两个过程的贡献将近占冻滴总质量的 90%。地面出现降雹（24 min）后，冻滴以碰并过冷雨水、过冷云水增长为主，其次是水汽凝华过程。过冷雨水对雹胚（霰、冻滴）的形成和增长至关重要，尽管该例冰雹云中不存在累积带，过冷雨水含量最大值也仅仅 4.9 g m^{-3} ，但分析模拟结果，发现霰和冻滴数量、质量增长率高时段与过冷雨水存在时段相一致（表 3，图 7、8），表明仍然有充分的过冷雨水足以产生大量霰、冻滴，并为霰、冻滴的增长提供有利条件，为冰雹的产生提供充足的胚胎，这与胡朝霞等（2007）研究结果相一致。

3.2.4 冰雹形成过程

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。对本个例来说，冰雹最初由霰转化而来，冻滴转化成冰雹的时间比霰晚 3 min。霰数量生成率比冻滴高一个数量级以上，质量生成率却比冻滴低（图 7、8）。致使地面降雹时刻模拟域霰质量仅为 558.4 kt，数量高达 $10^{15.9}$ 个；冻滴质量却高达 988.8 kt，数量仅为 $10^{14.9}$ 个（表 5），

冻滴平均直径比霰大的多，冻滴更易转化形成冰雹。模拟 24 min 时 93% 以上的冰雹以冻滴为核心增长，模拟域冰雹总量为 197.3 kt，其中冻滴的转化量占冰雹总量的 64%，霰转化量占冰雹总量的 5%（表 5），说明冻滴自动转化对冰雹数量、质量的贡献均比霰大（图 9a、9b），雹胚以冻滴为主，本地区 2006 年 7 月 5 日个例（樊明月等，2013）中 79% 左右的冰雹胚胎是霰，雹胚以霰为主，差别明显。冰雹形成后，前期主要靠碰并冻滴、霰和过冷雨水增长，后期主要靠碰并过冷云水增长，其余过程对冰雹质量的贡献很小。

4 催化防雹机制研究

本次冰雹过程淄博市城区、沂源县出现冰雹，未成灾；出现灾情的蒙阴、费县、沂水 3 县存在投入作业装备、作业持续时间、总用弹量等偏少的情况。本文将 AgI 剂量由 57.5 g 分别增加到 115.0 g、230.0 g、287.5 g 和 345.0 g，以讨论播撒剂量对防雹效果的影响。可以看出（表 6），各种剂量催化地

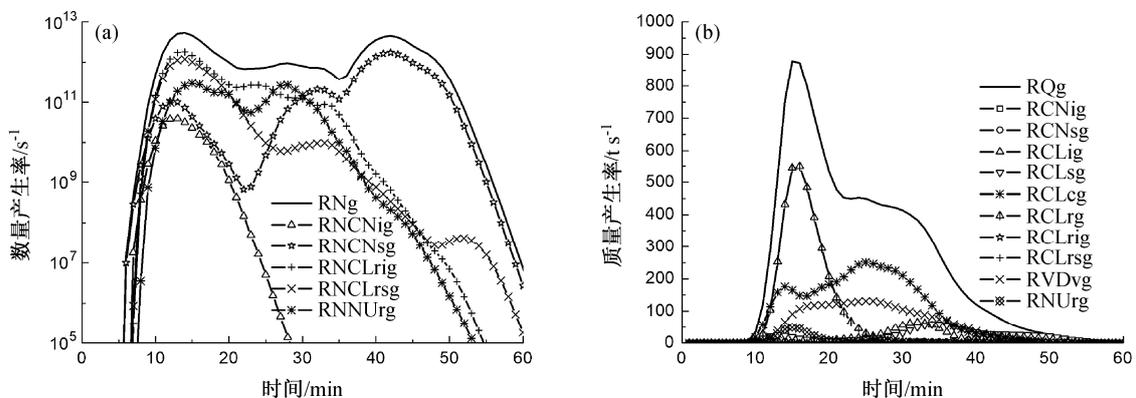


图 7 霰及其源项的 (a) 数量产生率和 (b) 质量产生率随时间的变化
Fig. 7 Temporal evolutions of (a) number producing rates and (b) mass producing rates of graupel and its sources

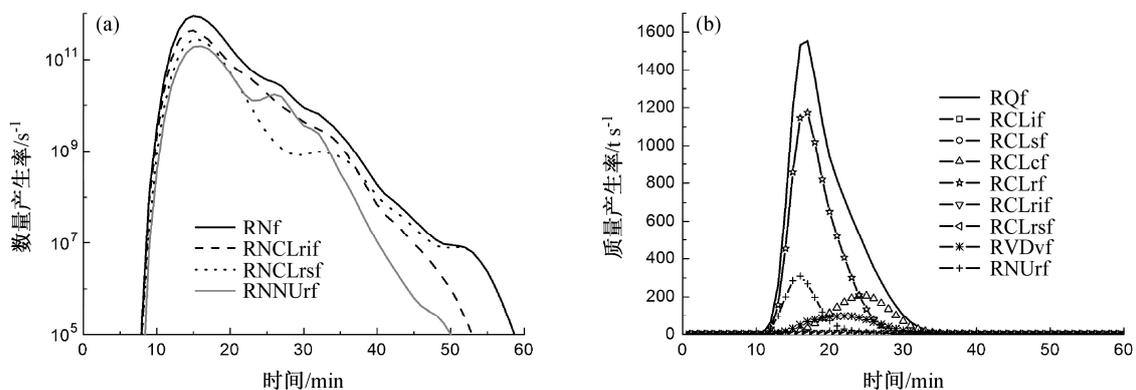


图 8 冻滴及其源项的 (a) 数量产生率和 (b) 质量产生率随时间的变化
Fig. 8 Temporal evolutions of (a) number producing rates and (b) mass producing rates of frozen droplet and its sources

面降雹减少都在 50% 以上, 地面的降雹量无明显规律性变化。降雨量随 AgI 剂量的增加而增大, AgI 剂量在 230 g 以上时, 降雨量高于未催化个例, 防雹的同时兼顾了增雨。

表 6 催化剂量对模拟结果的影响

Table 6 Influence of AgI content on simulated results

催化剂量/g	模拟结果					
	降水 量/kt	降雨 量/kt	降雨变 化率	冻滴和 霰/kt	冰雹/ kt	降雹变 化率
57.5	784.0	750.4	-10.4%	12.4	21.2	-57.9%
115.0	831.5	794.8	-5.1%	13.2	23.5	-53.4%
230.0	918.8	881.4	5.3%	15.1	22.2	-56.0%
287.5	964.5	925.1	10.5%	16.3	23.0	-54.4%
345.0	977.9	939.9	12.3%	16.8	21.3	-57.7%
—	899.0	837.1	—	11.5	50.4	—

注: —表示未催化。

以使用 230 g (未出现雹灾的沂源地区实际作业用量) AgI 模拟试验为例, 分析探讨 AgI 对过冷水含量低、雹胚以冻滴为主的雹云微物理过程的影响。该试验于 11 min 开始在过冷水含量极大值区播撒 AgI 催化剂, 持续 5 min。催化温度范围 $-1.2\sim-15.6\text{ }^{\circ}\text{C}$, 平均值 $-6.1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 左右。

表 7 催化后模拟域地面液、固态降水总量及百分比

Table 7 Rainfall amount at the ground and its percentage after seeding

	总量/kt	百分比
总降水	918.8	—
液态降水	881.4	95.9%
固态降水	37.4	4.1%

表 8 催化后模拟域地面固态降水组成及百分比

Table 8 Composition of solid-phase precipitation and its percentage after seeding

	总量/kt	百分比
固态降水	37.4	—
冰雹	22.2	59.4%
冻滴	11.0	29.4%
霰	4.1	11.0%

催化后(表 7、8), 总降水量为 918.8 kt, 增加了 19.8 kt; 液态降水量为 881.4 kt, 增加了 44.3 kt; 占总降水量的比例增加到 95.9%; 固态降水量为 37.4 kt, 减少了 24.5 kt, 占总降水量的比例由 6.9% 减少到 4.1%。37.4 kt 固态降水中, 冰雹为 22.2 kt, 减少了 28.2 kt, 为固态降水的 59.4%, 明显低于催化前的 81.4%; 冻滴和霰的质量分布为 11.0 kt 和 4.1 kt, 占固态降水的比例分别由 16.4% 和 2.3% 提高到

29.4% 和 11.0%。可见, 催化后液态降水量有所增加, 固态降水明显减少, 防雹的同时增加了有益降雨。固态降水中冰雹量及占固态降水的比例减少显著; 冻滴和霰量也有一定的减少, 但占固态降水的比例却明显增加, 固态降水平均粒子尺度减小, 有效削弱了雹灾程度。

图 10 给出了催化后冰晶的空间积分数量产生率、质量产生率及主要源项微物理过程随时间的变化(催化例减去自然例, 下同)。催化后冰晶的数量和质量都有所增加。在第 15 min 前, 冰晶数量的增加主要取决于 AgI 作用所产生的人工冰晶数量, 第 15 min 催化结束, 人工冰晶数量减少, 冰晶数量的增加主要由自然冰核活化所产生的冰晶数决定。冰晶数量的增加导致冰晶凝华增长量增加(图 10b), 这也是引起冰晶质量增加的最主要过程。此外, 冰晶碰并云滴的增长量在催化后有所减少, 特别是 15 min 前, 这与大量人工冰晶凝华增长消耗了较多的过冷水云水有关。催化后冰晶总质量增加了 475 kt (60 min 的总积分量), 增加率为 17%, 冰晶总数量增加了 6.02×10^{20} 个, 增加率为 29%, 数量增加率远大于质量增加率, 平均效果是冰晶的质量和直径在催化后都有所减小, 因此冰晶向雪的自动转化过程受到抑制。但由于冰晶数量的大量增加, 冰晶自动转化形成的雪数量、质量仍有一定的增加(图 11)。

雪的数量和质量在催化后都有所增加, 冰晶增多使得冰晶聚合形成雪的数量增加(图 11a), 这正是雪数量增加的主要过程。相比之下, 冰晶自动转化过程对雪的数量增加贡献较小。雪质量增加率在第 21 min 出现峰值, 这个峰值与冰晶对应, 反映了雪对冰晶的快速碰并增长以及冰晶自动转化对雪质量的贡献(图 11b), 凝华增长对雪质量的贡献在催化后也得到增强。催化 40 min 后, 雪质量生成率明显降低, 质量变化出现负值(图 11b), 主要原因是雪碰并冰晶增长过程的减少。

过冷雨滴和人工冰核接触后会冻结形成霰或冻滴, 但由于绝大部分 AgI 在云中是以凝华核形式起作用, 并且受过冷水含量限制, 由 AgI 直接作用形成的霰或者冻滴数量很少(图 12a、13a), 对霰或者冻滴数量增加的贡献很小, 同样该过程对霰或者冻滴质量变化的贡献几乎可以忽略不计。霰和冻滴的数量在催化后都有明显的增加, 其中过冷雨滴与冰晶撞冻是霰数量增多的主要机制, 也是冻滴

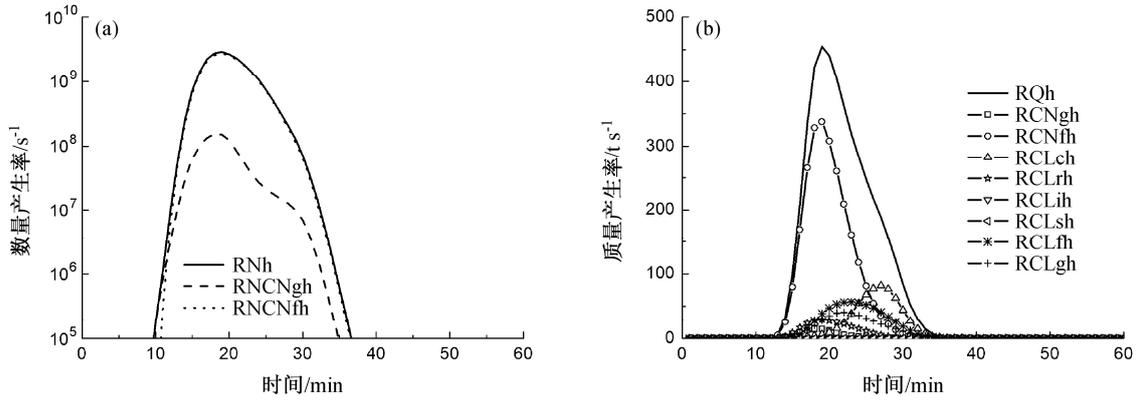


图9 冰雹及其源项的 (a) 数量产生率和 (b) 质量产生率随时间的变化
Fig. 9 Temporal evolutions of (a) number producing rates and (b) mass producing rates of hailstone and its sources

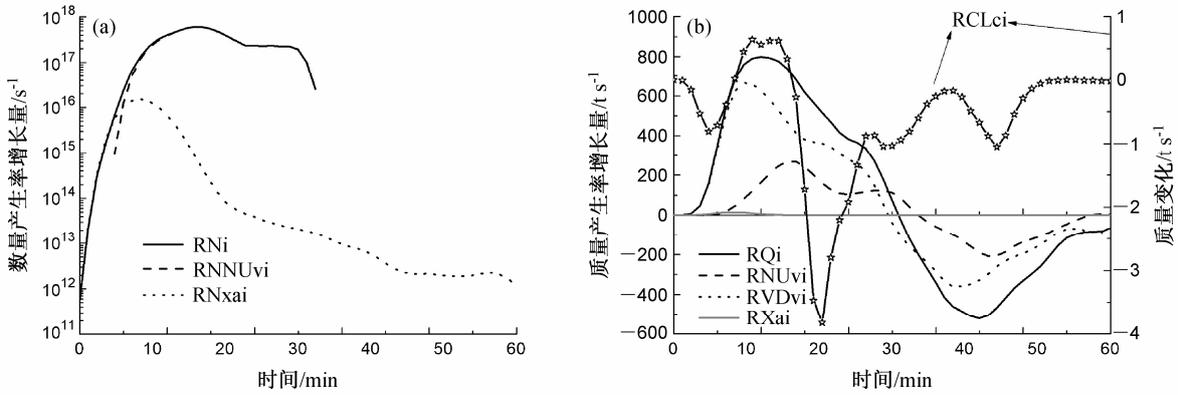


图10 催化后冰晶及其源项的 (a) 数量产生率和 (b) 质量产生率的增长量随时间变化
Fig. 10 Temporal evolution of the increments of the (a) number and (b) mass producing rates of ice crystal and its sources after seeding

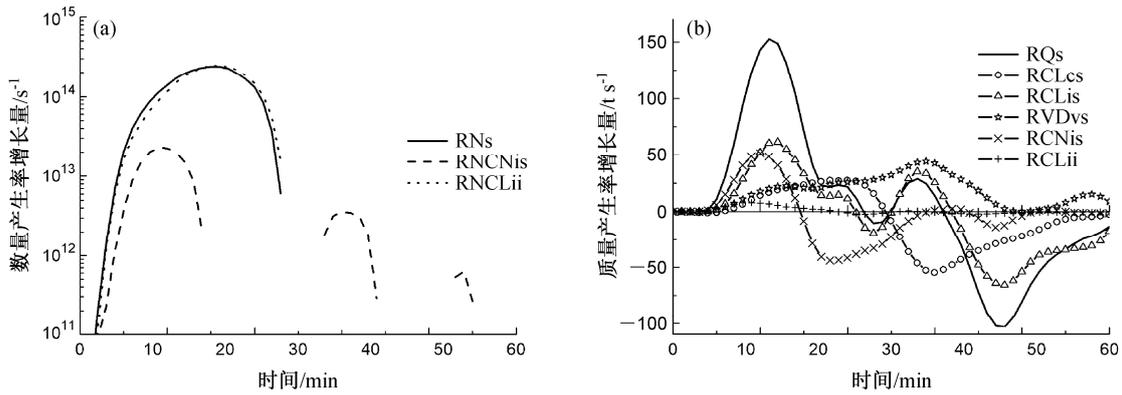


图11 催化后雪及其源项的 (a) 数量产生率和 (b) 质量产生率的增长量随时间变化
Fig. 11 Temporal evolution of the increments of (a) number producing rates and (b) mass producing rates of snow and its sources after seeding

数量增加的主要机制。催化后霰碰撞过冷云水增长过程的增强导致霰质量变化率增加明显 (图 12b)。冻滴对过冷雨水碰撞的减少是 15 min 左右冻滴质量变化率减少的主要机制, 而 18 min 以后冻滴质量变化的增加主要是由冻滴碰撞过冷云水过程造成

的 (图 13b)。

催化使霰数量、质量分布增加了 10% 和 48%, 霰平均质量和尺度有所变大, 但霰自动转化形成冰雹的数量、质量基本没有变化 (图 14a、14b)。相比而言, 做为主要雹胚的冻滴催化后数量增加了 1.3

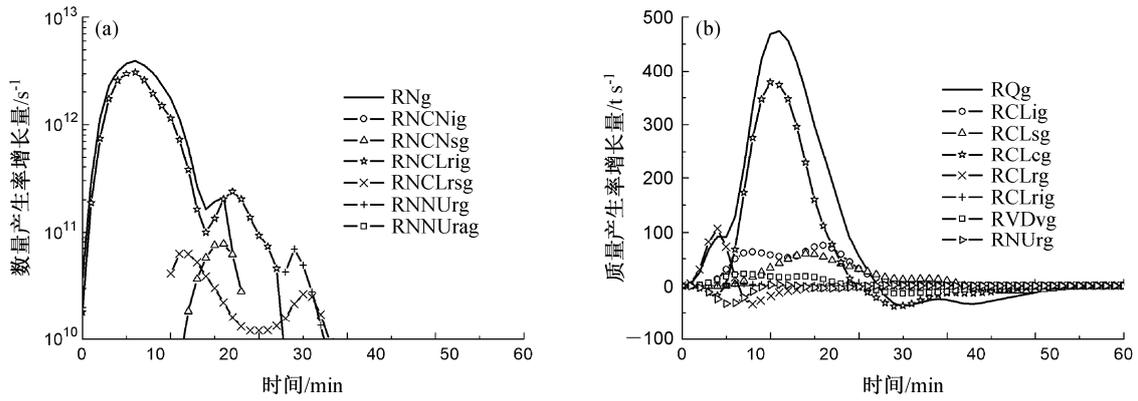


图 12 催化后霰及其源项的 (a) 数量产生率和 (b) 质量产生率的增长量随时间变化

Fig. 12 Temporal evolution of the increments of the (a) number and (b) mass producing rates of graupel and its sources after seeding

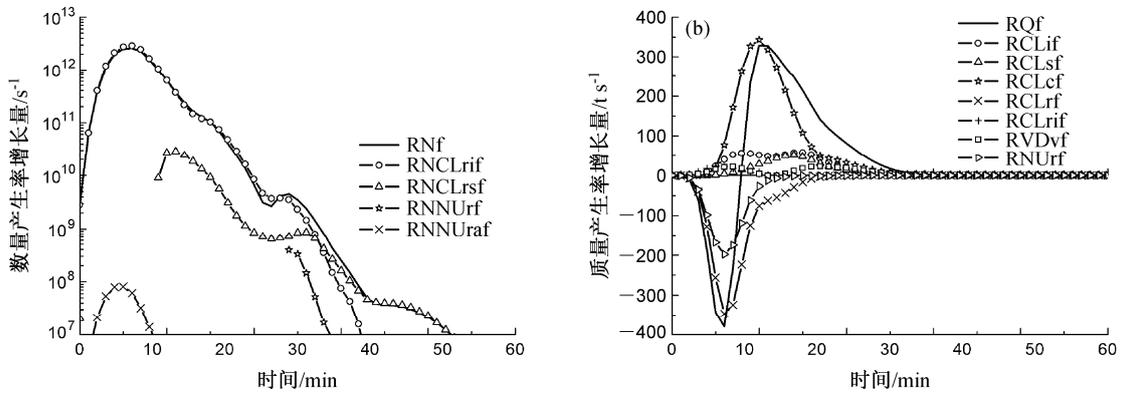


图 13 催化后冻滴及其源项的 (a) 数量产生率和 (b) 质量产生率的增长量随时间变化

Fig. 13 Temporal evolution of the increments of the (a) number and (b) mass producing rates of frozen drops and its sources after seeding

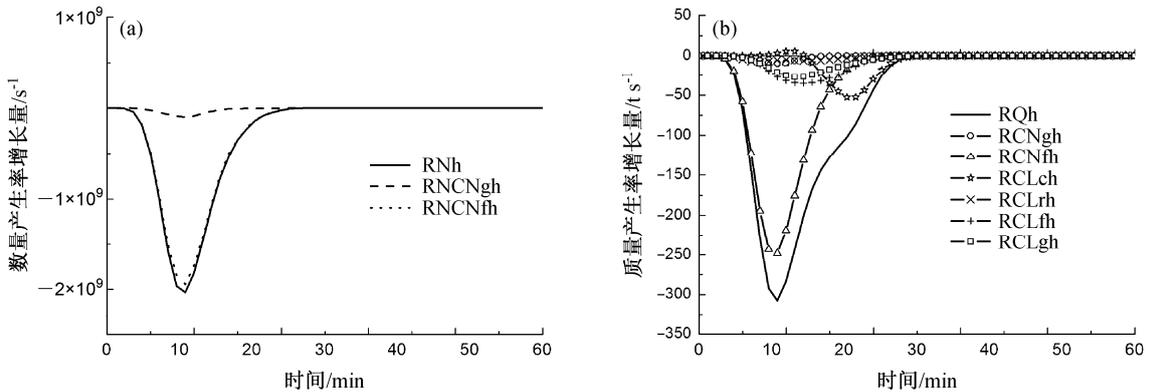


图 14 催化后冰雹及其源项的 (a) 数量产生率和 (b) 质量产生率的增长量随时间变化

Fig. 14 Temporal evolution of the increments of the (a) number and (b) mass producing rates of hailstone and its sources after seeding

倍, 质量仅增加了 15%, 平均质量和尺度明显变小, 冻滴自动转化形成冰雹的数量大幅度减少, 导致冰雹的数量变化率为负 (图 14a), 冰雹粒子总数减少。冰雹质量也因催化显著减少, 减少的主要机制是冻滴自动转化量的大量缩减 (图 14b)。

综上所述, AgI 播撒入云后主要以凝华核的作

用产生人工冰晶, 冰晶凝华增长消耗过冷云水, 使过冷云水含量降低。主要雹胚冻滴, 数量在催化后的增多, 对过冷云水的竞争增强, 使平均尺度、质量减小, 导致向冰雹的转化量减小。而冰雹形成后, 由于过冷云水的减少使得碰并增长进一步受到限制, 可见, 雹胚、冰雹以碰并过冷雨水、过冷云水

增长为主时, 播撒 AgI 能够通过“竞争”达到减雹目的。

5 结论

(1) 模拟表明, 2008 年 5 月 24 日冰雹过程过冷水中心一直位于最大上升气流中心下方, 该例雹云不存在过冷雨的累积区, 过冷雨水的含量最大值仅为 4.9 g m^{-3} 。但模拟雹云中仍存在丰富的过冷雨水足以产生大量霰、冻滴, 并为其增长提供有利条件。

(2) 雹胚主要是冻滴, 模拟地面降雹时刻 (24 min) 93% 以上的冰雹以冻滴为核心增长, 冻滴胚来源于冰雪晶与过冷雨水碰撞冻结以及雨滴核化过程。地面降雹以前, 冰晶与过冷雨水碰撞冻结过程是冻滴数量最主要的产生项, 雨滴核化对冻滴数量贡献稍小, 但该过程对冻滴质量的贡献比其它过程大得多。冻滴形成后主要以碰并过冷雨水增长、云水增长。

(3) 冰雹最初来源于霰胚的自动转化, 但冻滴胚自动转化过程是冰雹数量的主要来源, 同样是冰雹质量的主要来源。冰雹形成后, 前期主要靠碰并冻滴、霰和过冷雨水增长, 后期主要靠碰并过冷云水增长。

(4) 对本个例, 播撒 57.5 g 催化剂足以通过“竞争”减雹 50% 以上, 再增加 AgI 剂量, 防雹的同时能够增加有效降水, 兼顾增雨。分析催化剂用量为 230 g 的个例发现, 催化后液态降水有所增加, 固态降水量减少显著, 特别是冰雹; 但霰、冻滴占固态降水的比例有所增加, 说明固态降水粒子平均直径减小了, 降低了雹灾程度。

(5) 催化导致人工冰晶数量增加, 过冷云水减少。霰和冻滴的数量在催化后增多, 对过冷云水、雨水的竞争增强, 导致自动转化形成冰雹的数量减少。冰雹形成后, 因过冷雨水、云水减少碰并增长受到抑制, 致使地面降雹质量减少, 达到消雹目的。

参考文献 (References)

陈宝君, 肖辉. 2007. 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 [J]. 大气科学, 31 (2): 273-290. Chen Baojun, Xiao Hui. 2007. Numerical simulation of hail formation and growth in a storm with low supercooled rain water content and the effect of AgI seeding on hail suppression [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences

(in Chinese), 31 (2): 273-290, doi: 10.3878/j.issn.1006-9895.2007.02.09.
樊明月, 张佃国, 龚佃利, 等. 2013. 山东冰雹形成机制及雹云催化技术模拟——个例研究 [J]. 大气科学学报, 36 (1): 107-120. Fan Mingyue, Zhang Dianguo, Gong Dianli, et al. 2013. A case study of hail formation mechanism and hail suppression technique in Shandong Province [J]. Transactions of Atmospheric Sciences (in Chinese), 36 (1): 107-120, doi: 10.3969/j.issn.1674-7097.2013.01.012.
Federer B, Waldvogel A, Schmid W, et al. 1986. Main results of Grossversuch IV [J]. J. Climate Appl. Meteor., 25 (7): 917-957, doi: 10.1175/1520-0450(1986)025<0917:MROGI>2.0.CO;2.
Foote G B, Knight C A. 1979. Results of a randomized hail suppression experiment in Northeast Colorado. Part I: Design and conduct of the experiment [J]. J. Appl. Meteor., 18 (12): 1526-1537, doi: 10.1175/1520-0450(1979)018<1526:ROARHS>2.0.CO;2.
洪延超. 1998. 三维冰雹云催化数值模式 [J]. 气象学报, 56 (6): 641-653. Hong Yanchao. 1998. A 3-D hail cloud numerical seeding model [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 56 (6): 641-653, doi:10.11676/qxxb1998.060.
洪延超. 1999. 冰雹形成机制和催化防雹机制研究 [J]. 气象学报, 57 (1): 30-44. Hong Yanchao. 1999. Study on mechanism of hail formation and hail suppression with seeding [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 57(1): 30-44, doi: 10.11676/qxxb1999.003.
洪延超, 肖辉, 李宏宇, 等. 2002. 冰雹云中微物理过程研究 [J]. 大气科学, 26 (3): 421-432. Hong Yanchao, Xiao Hui, Li Hongyu, et al. 2002. Studies on microphysical processes in hail cloud [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 26 (3): 421-432, doi: 10.3878/j.issn.1006-9895.2002.03.13.
胡朝霞, 李宏宇, 肖辉, 等. 2003. 旬邑冰雹云的数值模拟及累积带特征 [J]. 气候与环境研究, 8 (2): 196-208. Hu Zhaoxia, Li Hongyu, Xiao Hui, et al. 2003. Numerical simulation of hailstorms and the characteristics of accumulation zone of supercooled raindrops in Xunyi County [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 8 (2): 196-208, doi: 10.3969/j.issn.1006-9585.2003.02.007.
胡朝霞, 郭学良, 李宏宇, 等. 2007. 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, 31 (5): 973-986. Hu Zhaoxia, Guo Xueliang, Li Hongyu, et al. 2007. Numerical simulation of a hybrid-type hailstorm in Munich and the mechanism of hail formation [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 31 (5): 973-986, doi: 10.3878/j.issn.1006-9895.2007.05.20.
黄美元, 王昂生. 1980. 人工防雹导论 [M]. 北京: 科学出版社, 92-95. Huang Meiyuan, Wang Angsheng. 1980. Introduction of Hail Suppression (in Chinese) [M]. Beijing: Science Press, 92-95.
黄美元, 徐华英, 周玲. 2000. 中国人工防雹四十年 [J]. 气候与环境研究, 5 (3): 318-328. Huang Meiyuan, Xu Huaying, Zhou Ling. 2000. Forty year's hail suppression in China [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 5 (3): 318-328, doi: 10.3969/j.issn.1006-9585.2000.03.012.
Knight C A, Foote G B, Summers P W. 1979. Results of a randomized hail suppression experiment in Northeast Colorado. Part IX: Overall discussion and summary in the context of physical research [J]. J. Appl. Meteor., 18 (12): 1629-1639, doi: 10.1175/1520-0450(1979)018<1629:ROARHS>2.0.CO;2.
孔凡铀. 1991. 冰雹云三维数值模拟研究 [D]. 中国科学院大气物理研

- 研究所博士学位论文 1-155. Kong Fanyou. 1991. Three-dimensional numerical simulation of hailstorms[D]. Ph. D. dissertation (in Chinese), Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, 1-155.
- 孔凡铀, 黄美元, 徐华英. 1990. 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 [J]. 大气科学, 14 (4): 441-453. Kong Fanyou, Huang Meiyuan, Xu Huaying. 1990. Three-dimensional numerical simulation of ice phase microphysics in cumulus clouds. Part I: Model establishment and ice phase parameterization [J]. Scientia Atmospherica Sinica (in Chinese), 14 (4): 441-453, doi: 10.3878/j.issn.1006-9895.1990.04.07.
- 孔凡铀, 黄美元, 徐华英. 1991. 对流云中冰相过程的三维数值模拟 II: 繁生过程作用 [J]. 大气科学, 15 (6): 78-88. Kong Fanyou, Huang Meiyuan, Xu Huaying. 1991. Three-dimensional numerical simulation of ice phase microphysics in cumulus clouds. Part II: Effects of multiplication processes [J]. Scientia Atmospherica Sinica (in Chinese), 15 (6): 78-88, doi: 10.3878/j.issn.1006-9895.1991.06.09.
- Kubesh R S, Musil D J, Farley R D, et al. 1988. The 1 August 1981 CCOPE storm: Observations and modeling results [J]. J. Appl. Meteor., 27 (3): 216-243, doi: 10.1175/1520-0450(1988)027<0216:TAMSOA>2.0.CO;2.
- 刘俊卿. 2007. 青藏高原冰雹形成机理及人工催化的数值研究 [D]. 南京信息工程大学硕士学位论文: 1-78. Liu Junqing. 2007. The numerical study on the formation mechanism and suppression of hailstorms in Tibet Plateau [D]. Master dissertation (in Chinese), Nanjing University of Information Science & Technology: 1-78, doi: 10.7666/d.y1079973.
- 马振骅. 1977. 一次累积带降雹的雷达观测 [J]. 大气科学, 1 (2): 149-152. Ma Zhenhua. 1977. Radar observation of an accumulation zone generating hail fallout [J]. Scientia Atmospherica Sinica (in Chinese), 1977, 1 (2): 149-152, doi: 10.3878/j.issn.1006-9895.1977.02.09.
- Rasmussen R M, Heymsfeild A J. 1987. Melting and shedding of graupel and hail. Part III: Investigation of the role of shed drops as hail embryos in the 1 August CCOPE severe storm [J]. J. Atmos. Sci., 44 (19): 2783-2803, doi: 10.1175/1520-0469(1987)044<2783:MASOGA>2.0.CO;2.
- 吴海英, 曾明剑, 顾亚进. 2002. 一次冰雹云过程及其催化试验的数值模拟分析 [J]. 气象科学, 22 (4): 425-434. Wu Haiying, Zeng Mingjian, Gu Yajin. 2002. Analysis on one course of hail cloud and catalytic test by numerical simulation[J]. Scientia Meteorologica Sinica (in Chinese), 22 (4): 425-434, doi: 10.3969/j.issn.1009-0827.2002.04.007.
- 肖辉, 王孝波, 周非非, 等. 2004. 强降水云物理过程的三维数值模拟研究 [J]. 大气科学, 28 (3): 385-404. Xiao Hui, Wang Xiaobo, Zhou Feifei, et al. 2004. A three-dimensional numerical simulation on microphysical processes of torrential rainstorms [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 28 (3): 385-404, doi: 10.3878/j.issn.1006-9895.2004.03.06.
- 郑凯琳, 陈宝君. 2011. 含水量累积区与冰雹增长行为之数值模拟 [J]. 大气科学, 35 (2): 298-310. Zheng Kailin, Chen Baojun. 2011. Numerical simulation of the accumulation zones and hail growth trajectories in hailstorms [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 35 (2): 298-310, doi: 10.3878/j.issn.1006-9895.2011.02.09.
- 周玲, 陈宝君, 李子华, 等. 2001. 冰雹云中累积区与冰雹的形成的数值模拟研究 [J]. 大气科学, 25 (4): 536-550. Zhou Ling, Chen Baojun, Li Zihua, et al. 2001. A numerical simulation of hailstorm accumulation zone and hail formation[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 25 (4): 536-550, doi: 10.3878/j.issn.1006-9895.2001.04.10.
- 周毓荃, 陈宝君, 肖辉, 等. 2003. 播撒碘化银实施雹云催化的数值试验——一个例研究 [J]. 大气科学, 27 (1): 8-22. Zhou Yuquan, Chen Baojun, Xiao Hui, et al. 2003. A case study of hail suppression by AgI seeding using 3D hail storm model [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 27 (1): 8-22, doi: 10.3878/j.issn.1006-9895.2003.01.02.