

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

陈宝君¹ 肖辉²

1 南京大学中尺度灾害性天气教育部重点实验室, 南京大学大气科学系, 南京 210093

2 中国科学院大气物理研究所云降水物理与强风暴实验室, 北京 100029

摘要 利用中国科学院大气物理研究所开发的三维全弹性冰雹云模式, 对美国对流降水协作试验(CCOPE)期间观测的1981年8月1日雹云进行模拟, 讨论在过冷雨水低含量条件下冰雹形成和增长机制及其碘化银催化效果。结果表明: (1) 自然云的模拟与观测事实一致, 如最大上升气流速度、云顶高度、流场结构以及雹胚组成等。(2) 雹胚以霰为主, 霰主要来自冰雪晶与过冷水水滴的碰冻, 其次来自雪的积聚转化; 霰、冻滴和冰雹在形成后主要靠碰并过冷水云水增长。(3) 人工催化试验表明, 碘化银主要以凝华核(包括凝结-冻结)的作用产生大量的人工冰晶, 加速了过冷水向冰晶的转化, 过冷水云因而大量减少; 催化后霰和冻滴的数浓度增大, 对过冷水云的竞争增强, 其平均尺度减小导致转化成雹的数量减少; 冰雹碰冻过冷水云的增长在催化后也被削弱, 导致冰雹总质量进一步减少。此外, 催化后降雨量也显著减少。

关键词 冰雹云 雹胚 过冷水 碘化银 CCOPE

文章编号 1006-9895(2007)02-0273-18

中图分类号 P426.6

文献标识码 A

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

CHEN Bao-Jun¹ and XIAO Hui²

1 Key Laboratory of Mesoscale Severe Weather of Ministry of Education, Department of Atmospheric Sciences, Nanjing University, Nanjing 210093

2 Laboratory of Cloud-Precipitation Physics and Severe Storms, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029

Abstract The 1 August 1981 CCOPE (Cooperative Convective Precipitation Experiment) storm is simulated using a three-dimensional compressible nonhydrostatic cloud model with two-moment bulk microphysical parameterization to investigate the mechanism of hail formation and growth and the effect of AgI seeding on hail suppression under low supercooled liquid water content conditions. The model microphysics has 2 liquid hydrometer categories (cloud droplets and rain) and 5 ice categories that are cloud ice, snow, graupel, frozen drops and hail. Frozen drops are formed by the probabilistic freezing of rain particles, and/or contact freezing resulting from collisions of rain with cloud ice crystals or active AgI particles only when the raindrop diameter is greater than 1 mm. If the raindrop diameter is smaller than 1 mm, frozen raindrops are converted to graupel. Results show that the observed storm features, such as the maximum updraft, cloud top height, radar echoes and flow structure, and liquid water content can be better simulated. Modeling results show that the maximum supercooled cloud water content and rain water content are

both about 4.4 g/m^3 , and 29% of the hailstone embryos are frozen drops, 71% graupel. The dominant formation mechanism for graupel is contact freezing resulting from collisions of rain with cloud ice crystals or with snow flakes and autoconversion (aggregation) of snow. Once formed, accretion of cloud water becomes the dominant growth mechanism for frozen drops, graupel and hailstone. Silver iodide is inserted into cloud at 10 min, 13 min and 16 min, respectively, to compare the effects of seeding time. Seeding location is in the core of the maximum updraft, supercooled liquid water and hail water, respectively. Seeding results in substantial decreases in hail fallout, hail impact energy and rain fallout for all seeded runs. The earlier the seeding time, the less the hail. Seeding produces significant effects, resulting in more cloud ice, more graupel but fewer cloud water. These numerous smaller hailstone embryos compete beneficially for the less available supercooled cloud water resulting in fewer hailstones than the unseeded run. Accretion of cloud water by hailstones is decreased after seeding, resulting in hail amount decrease. The rain from melting of hailstones is decreased. Although more embryos are increased by seeding, the average diameter become smaller, the rain from melting of embryos is decreased.

Key words hailstorm, hailstone embryos, supercooled liquid water, silver iodide, CCOPE

1 引言

目前,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^[1]。其基本思想是:雹云中存在着过冷雨水累积区,其中有些大的过冷雨滴会冻结形成雹胚,由于累积区中含水量很大而自然雹胚数量又不多,因此它们都能充分碰并过冷水而长成大冰雹;但如果向过冷雨水累积区引进适量的人工冰核,产生一些人工作胚,去和自然雹胚争夺累积区里的过冷水,就会使平均分配到每一个雹胚上的液态水减少而使其增长受到抑制,不能长成大冰雹,从而达到减雹目的。雷达观测^[2]和数值模拟^[3~5]都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 $9\sim 18 \text{ g/m}^3$,冰雹就在其中形成、增长。过冷雨水含量高的冰雹云,雹胚通常以冻滴为主,霰胚所占比例很小,冻滴由过冷雨滴冻结产生,并且靠碰冻过冷雨滴增长^[4, 6, 7]。对具有过冷雨水累积区的冰雹云播撒碘化银会使雹胚的数量增加,产生竞争机制而使冰雹增长受到抑制^[3, 6]。但并非所有的冰雹云都具有过冷雨水累积区,如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^[8, 9]。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(Grossversuch IV)也没有发现过冷雨水的累积区^[10]。美国在 20 世纪 80 年代进行的对流降水协作试验(CCOPE)中,虽然在有些雹云探测到过冷水(如 1981 年 8 月 1 日的迈尔斯城风暴),但含量很低仅为 4 g/m^3 左右,云滴

浓度则高达 1000 cm^{-3} ,地面雹块分析显示雹胚以霰为主^[11, 12]。在我国的青海^[13]和宁夏^[14]等地也观测到雹胚以霰为主。Knight 等^[15]分析了 NHRE 雹云微物理结构认为,这类云内云滴浓度过高,使得雨滴形成条件不佳,大水滴偏少,冰相过程占优,因此冻滴胚少,霰胚多。Khain 等^[16]对美国得克萨斯一例强对流云的模拟结果证明了这一点,他们发现气溶胶浓度高时云滴浓度也高,对应的雨水含量低而霰的浓度高,反之则雨水含量增大,霰的浓度减小。对过冷雨水含量高、雹胚以冻滴为主的雹云,催化后冰雪晶浓度增加促使过冷雨滴冻结,雹胚尤其是冻滴胚的数量增加而过冷雨滴减少,消耗了过冷雨水,冰雹碰冻过冷雨的增长受到抑制,因此,这类雹云催化减雹的机制主要是对过冷雨的竞争。对过冷雨少、雹胚以霰为主的冰雹云的催化效果如何,至今尚存疑问,原因之一在于我们对这类云的结构和成雹机理还没有完全理解^[17]。气溶胶污染所带来的无意识人工影响天气问题,也给有意识人工影响天气带来了更加复杂的不确定性。研究过冷雨水低含量条件下冰雹云的微物理结构和催化效果,也有助于理解人工影响天气作业受背景气溶胶浓度的影响程度如何。

作为工具之一的云数值模式在雹云结构、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^[17, 18]。但利用数值模式研究过冷雨水少的条件下雹胚以霰为主的雹云之催化效果仍很少。何观芳和胡志晋^[19]曾利用二维对流云模式模拟了两例冷云底雹云的成雹机制和人工引晶催化效果,发现这两例雹云的过

冷雨水含量不到 1 g/kg, 过冷云水的含量达到 6.6 g/kg 左右, 自然雹胚(霰)通过云霰转化机制形成, 靠碰并云雨增长形成雹, 雹在形成后靠碰并云滴增长; 人工引晶加强了云中冰水转化过程, 雹胚过多争食减雹。由于冰雹云具有典型的三维结构特征, 这种结构用二维模式不能很好地加以描述。采用人工引晶方法有助于理解催化效应, 但与实际作业中使用碘化银等催化剂有一定的差别, 因为碘化银活化成人工冰晶的程度受温度控制, 播撒部位不同直接影响到碘化银的成核率。当云中不存在足够的过冷雨滴、过冷水主要由云滴组成时, 播撒人工冰核不能迅速形成有效的冻滴胚, 却可以产生人工霰胚。为了实现人工霰胚和自然霰胚的同等竞争, Foote^[20]认为播撒区应该在自然霰胚的形成区。近年来, 段英等^[21]和许焕斌等^[22, 23]利用冰雹云模式和冰雹增长运行模式, 经过一系列模拟研究提出了雹云中存在冰雹“穴道”的动力与微物理相互耦合的概念模型, 康凤琴等^[24]的数值模拟结果以及田利庆等^[25]的雷达资料分析结果也表明雹云中存在“穴道”, 它不仅是冰雹形成增长的有效区域, 也应该是人工防雹的有效区域。但“穴道”是否就是有效的防雹区域, 尚需作进一步试验加以证实。

虽然传统的防雹理论曾遭到一些置疑, 但它仍然是目前人工防雹的主要依据, 而且多年的防雹实践也表明, 在作业搞得好的地区, 雹灾面积能够减少 40%~80%^[17]。本文利用中国科学院大气物理研究所开发的三维全弹性、五类冰(冰晶、雪、霰、冻滴和雹)并包含碘化银催化模块的雹云模式, 对 1981 年 8 月 1 日的实测 CCOPE 风暴进行模拟, 研究这类过冷雨水较少的雹云的成雹和增长机制, 并作碘化银催化试验, 详细探讨这类雹云的催化效果和影响机制。

2 模式和初边条件

2.1 数值模式

所用的数值模式要不仅能够描述冰雹云的三维结构特征, 而且能够区分霰和冻滴。本文使用中国科学院大气物理研究所开发的三维全弹性雹云模式。这里只对模式中霰和冻滴的形成和增长机制作简单介绍: (1) 冰晶凝华和撞冻过冷云滴增长到一定尺度后, 按其淞附率大小转化成雪或霰, 定义此尺度为 300 μm , 并规定淞附率大于 0.8 时, 冰晶转

化成霰(CNig); 类似于冰晶, 当雪的淞附率大于 0.8 时, 就转换成霰(CNsg); (2) 参照胡志晋等^[26]的处理方法, 按照冻结时雨滴大小将雹胚分为冻滴(冻结雨滴大于 1 mm, 相应过程为 NUrf、CLrif、CLrsf) 和霰(冻结雨滴小于 1 mm, 相应过程为 NUrg、CLrig、CLrsg)。详细的表达式参见文献[4]和[27], 本文所涉及符号的物理意义见附录 1。关于模式动力框架及其微物理过程参见文献[28]和[29]。

2.2 初始和边界条件

以 1981 年 8 月 1 日 CCOPE 风暴为例进行研究。对于此例的研究报道已有很多, 包括实际观测分析和数值模拟^[11, 12, 30]等, 但对这例雹暴的成雹机制和催化效果研究很少。该例风暴的云滴浓度高达 1000 cm^{-3} 而液态水的含量却很低。这种环境条件下冰雹的形成和增长机制及其人工催化效果是本文研究的主要内容。利用当日迈尔斯城 13:30 (MDT) 的探空资料(图 1)作为初始场。图 1 显示云底温度较冷为 10°C 左右, 云底高度在 3 km, 0°C 层位于 4.5 km 高度。风廓线(图 1b)显示地面附近以东南风为主, 随高度增加顺转为西南风, 中层盛行西风, 再往上则仍然为西南风。6 km 以下存在中等强度的风切变 ($5 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$), 在 6 km 以上风切变很弱。模拟区域水平范围取 $35 \text{ km} \times 35 \text{ km}$, 垂直为 15 km; 水平和垂直格距分别取 1 km 和 0.5 km。规定经向环境风沿模拟域的 x 方向, 纬向环境风沿 y 方向。时间积分采用时步分离技术, 大时步取 5 s, 小时步取 1 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。初始对流采用湿热泡扰动方式激发, 水平扰动中心位于模拟域中央, 高度在 3.5 km, 扰动半径水平方向为 8 km, 垂直方向为 3 km, 中心最大位温偏差取 0.5°C , 积分时间 50 min。根据实际观测结果, 模式中取云滴数浓度 $N_c = 1000 \text{ cm}^{-3}$ 。

3 自然云的模拟

3.1 宏观结构

图 2 给出了模式最大上升气流速度和下沉气流速度随时间的演变情况。对流在 10 min 以后迅速发展, 最大上升气流和下沉气流均在第 18 min 达到极大值, 其值分别为 45 m/s 和 21 m/s。上升气流在 26 min 时又出现一个次极值, 而下沉气流在 23 min 以后变化平缓, 维持在 8 m/s 左右。最大下

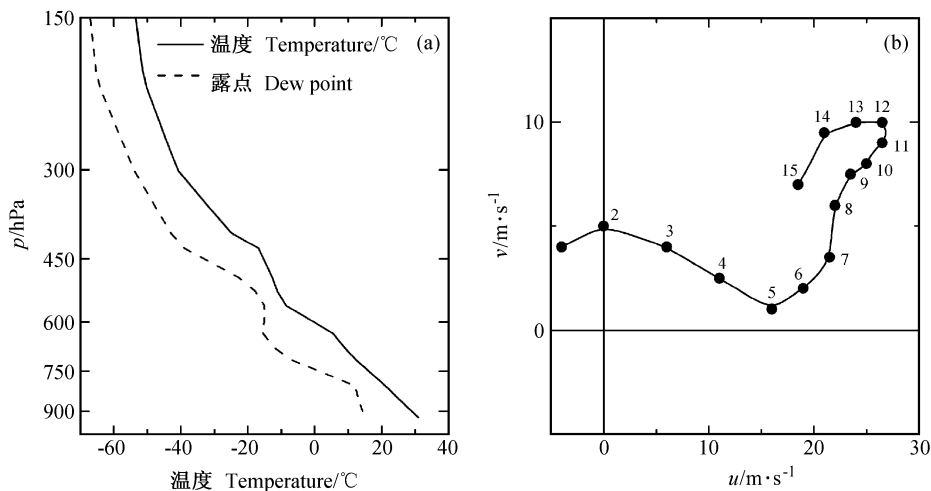


图1 1981年8月1日迈尔斯城探空资料: (a) 环境温度和露点; (b) 风廓线 [数字代表所在高度(单位: km)]

Fig. 1 Sounding curves at Miles City, Montana at 1330 MDT 1 Aug 1981: (a) Thermodynamic diagram; (b) wind at the heights (km) numbers indicate

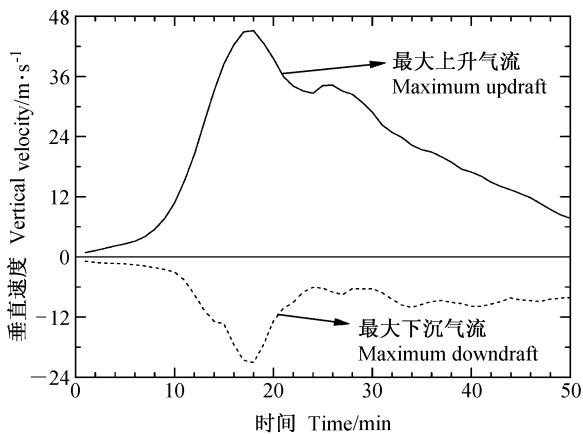


图2 最大上升气流与最大下沉气流随时间演变

Fig. 2 Maximum updraft and downdraft over the model domain as a function of time

沉气流虽然在 18 min 出现, 但此时地面并没有降水, 如果以最大降水强度大于 0.1 mm/h 为标准, 则降雨是在 21 min 出现, 降雹在 23 min 出现。

图 3 给出了地面刚出现降水时即第 21 min 的 0.5 km、3 km、6 km、9 km 和 11 km 高度上的水平流场和雷达回波 (等值线, 最小 10 dBZ, 间隔 10 dBZ), 以及大于 5 m/s 的上升气流 (阴影区)。虽然此时降水已经出现, 但并没有造成地面有组织的水平辐散, 水平流场在低层仍为辐合场 (图 3a), 以东南风为主, 高层为辐散场 (图 3e), 中层以上为西南风。模拟结果与雷达观测分析结果^[31]是一致的, 包括垂直剖面上的分布 (图 4)。

3.2 微物理分析

模式积分到 3 min 时, 云滴和冰雪晶出现, 6 min 时雨、冻滴和霰出现, 而冰雹在 8 min 出现。但在 10 min 以前, 这些水物质的含量都低于 0.001 g/m³。表 1 给出了 10~20 min 期间上升气流速度、过冷雨水、过冷云水、冻滴、霰和冰雹的最大含量与所在位置, 中低于 0.01 g/m³ 的相关项目没有列出 (以符号 “/” 标记)。从表 1 看, 过冷雨水和过冷云水的高值区都在主上升气流区, 两者水平中心位置差异很小, 但过冷云水的中心高度要低一些。13 min 以前, 过冷水的极值中心都位于最大上升气流中心右前上方, 厚度约 3 km, 中心值分别为 1.36 g/m³ 和 3.91 g/m³。第 14 min 以后, 过冷水中心下降到最大上升气流中心下方, 同时过冷雨水的含量很快降低, 而过冷云水的含量变化较小。表 1 说明, 虽然过冷雨水在上升气流区有所累积, 但维持时间很短, 仅 2 min 且含量很低。模拟的过冷雨水和云水的最大含量分别为 4.4 g/m³ 和 4.37 g/m³, 过冷雨水含量比陕西旬邑^[3, 4] 的 9 g/m³ 以及河南个例^[5] 的 18 g/m³ 都要低得多。可以认为, 本例雹云不存在过冷雨的累积区。CCOPE 外场试验期间, T-28 装甲飞机曾对成熟阶段的雹云进行了上升气流和液态水含量等的水平穿云观测 (高度在 7 km 左右), 结果发现上升气流区的液态水含量明显高于周围区域, 但最大值也仅为 4 g/m³ 左右^[12]。计算模拟云上升气流区的过冷水

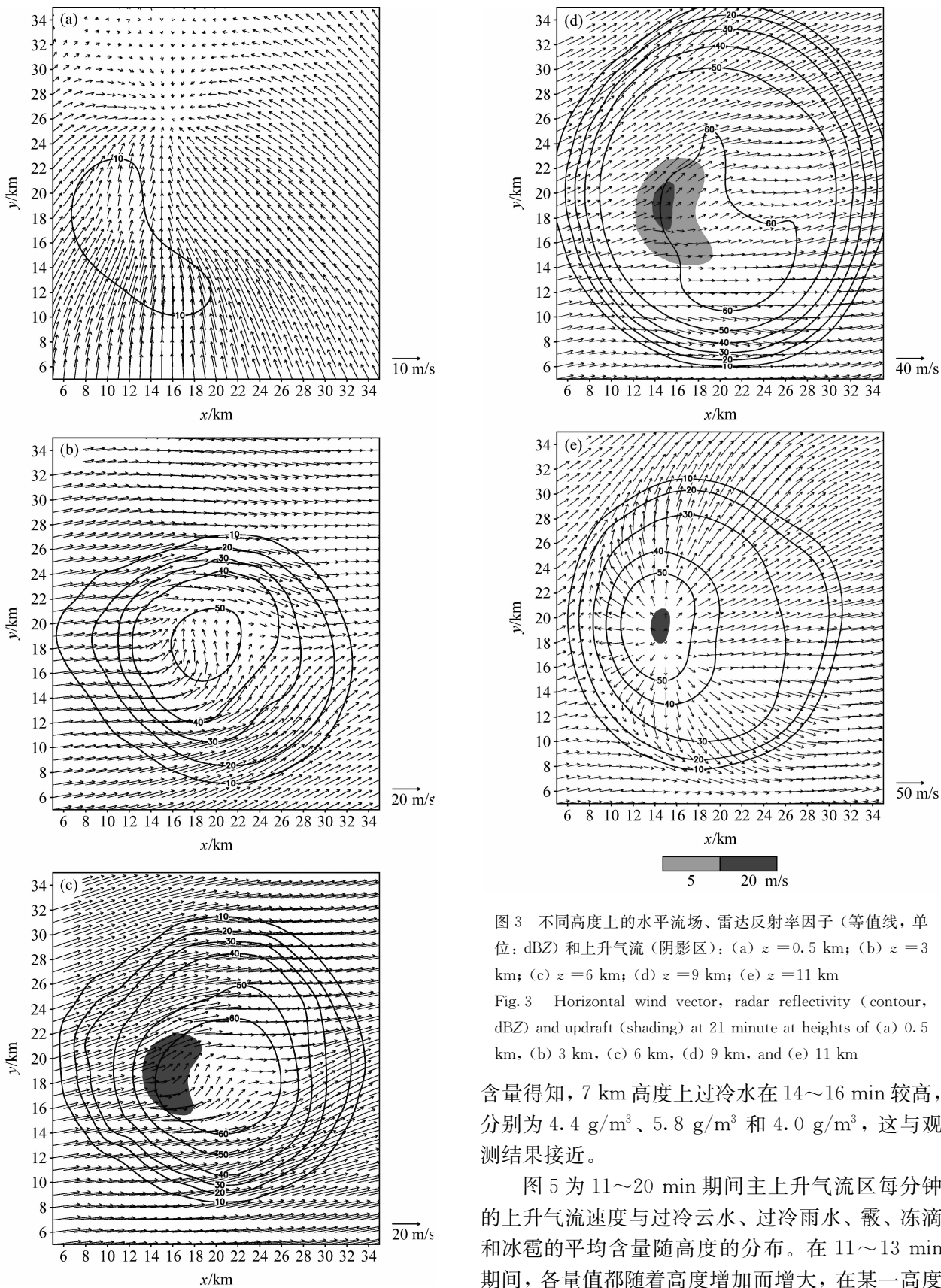


图3 不同高度上的水平场、雷达反射率因子(等值线, 单位: dBZ)和上升气流(阴影区): (a) $z=0.5$ km; (b) $z=3$ km; (c) $z=6$ km; (d) $z=9$ km; (e) $z=11$ km
Fig. 3 Horizontal wind vector, radar reflectivity (contour, dBZ) and updraft (shading) at 21 minute at heights of (a) 0.5 km, (b) 3 km, (c) 6 km, (d) 9 km, and (e) 11 km

含量得知, 7 km 高度上过冷水在 14~16 min 较高, 分别为 4.4 g/m^3 、 5.8 g/m^3 和 4.0 g/m^3 , 这与观测结果接近。

图 5 为 11~20 min 期间主上升气流区每分钟的上升气流速度与过冷云水、过冷雨水、霰、冻滴和冰雹的平均含量随高度的分布。在 11~13 min 期间, 各量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。14 min 和 15 min, 7 km 和

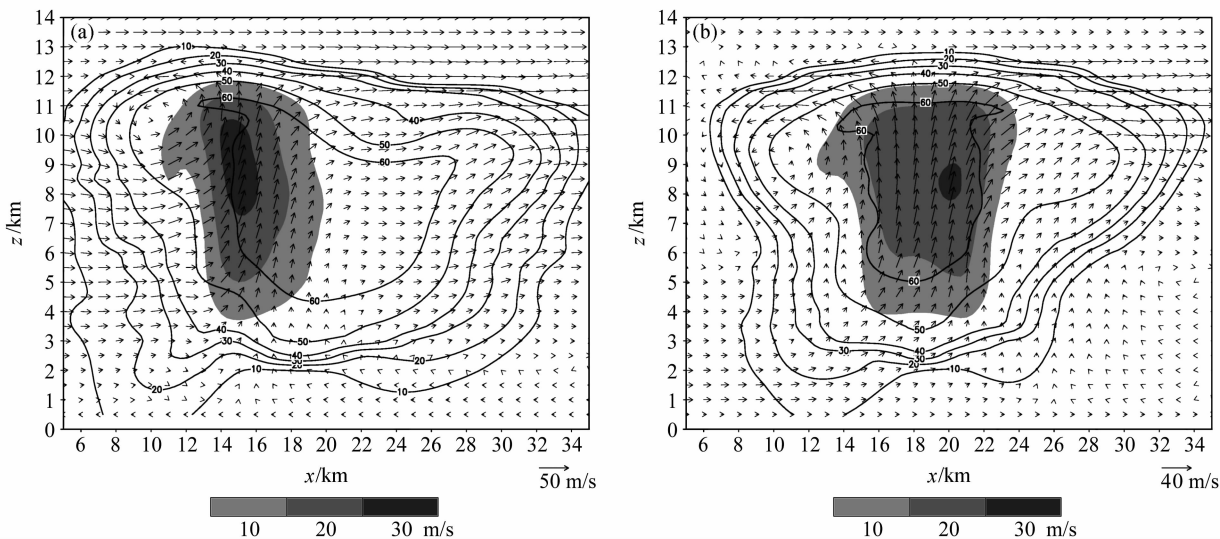


图4 第21 min时垂直剖面上流场和雷达回波结构(等值线,单位: dBZ)以及垂直速度(阴影区): (a) $x-z$ 剖面, $y=19$ km; (b) $y-z$ 剖面, $x=15$ km

Fig. 4 Simulated horizontal wind vector, radar reflectivity (contour, dBZ) and updraft (shading) at time 21 min: (a) $x-z$ section along $y=19$ km; (b) $y-z$ section along $x=15$ km

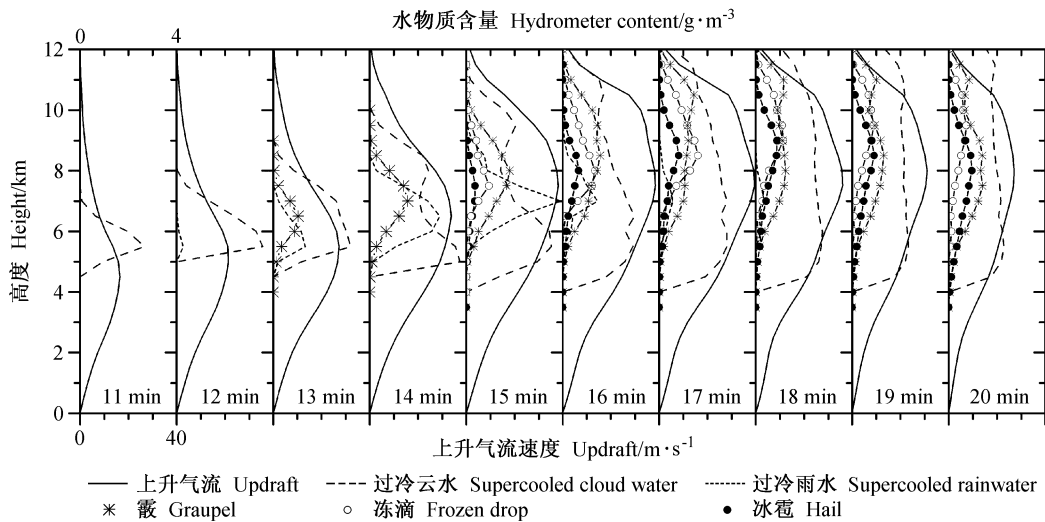


图5 11~20 min期间(间隔1 min)主上升气流区的上升气流速度以及水物质含量随高度的分布

Fig. 5 Vertical profiles of updraft speed (solid lines) and the hydrometer contents inside the maximum updraft region for the time period 11-20 min at 1-min interval

8 km 高度上的过冷云水的含量显著降低, 与之对应的是霰的峰值区, 反映了这一区间上霰粒子对云滴的快速碰并增长。17 min 以后, 过冷云水含量随高度的变化较小。过冷雨水的含量在 15 min 最大, 2 min 后即 17 min 时已降低到 15 min 时的 57%, 这一阶段也是冻滴快速增长阶段(表 1)。

从表 1 看, 冻滴在 13 min 时含量才达到 0.01 g/m^3 , 位于过冷雨水中心左前(即东南)上方, 17 min

时达到最大值 4.99 g/m^3 。霰在第 11 min 含量就达到 0.01 g/m^3 , 出现时间比冻滴早 2 min, 到第 12 min 霰的范围和含量都增大, 同时在霰区内出现冰雹, 中心值为 0.02 g/m^3 。冻滴形成落后于霰, 与大雨滴少、所在高度低, 不能快速冻结有关系。洪延超等^[6, 7]模拟结果表明, 粒子产生源所在高度与其源项发生高度及主要增长方式有关, 雹云发展初期过冷雨水的存在对冻滴胚的形成和增长极为有

表 1 10~20 min 期间上升气流、过冷雨水、过冷云水、冻滴、霰和冰雹的最大值与所在位置

Table 1 Magnitudes and locations of maximum updraft, supercooled rain water (SRW) and cloud water (SCW) content, frozen drop content, graupel content and hail content from 10 to 20 min

时间 Time	上升气流 Updraft				过冷雨水 SRW				过冷云水 SCW			
	$M/\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	i, j	H/km	$T/^{\circ}\text{C}$	$M/\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$	i, j	H/km	$T/^{\circ}\text{C}$	$M/\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$	i, j	H/km	$T/^{\circ}\text{C}$
10 min	10.8	16, 20	4.0	5.4	/	/	/	/	1.91	18, 20	5.0	-4.5
11 min	15.2	17, 20	4.5	3.3	/	/	/	/	2.85	18, 20	5.0	-0.8
12 min	20.4	17, 20	5.0	1.4	0.12	18, 20	5.5	-1.6	3.36	17, 20	5.5	-2.2
13 min	26.8	16, 21	5.0	1.4	1.36	17, 20	5.5	-0.5	3.91	16, 20	5.5	-0.8
14 min	33.2	17, 20	6.0	-4.5	3.59	18, 19	6.0	-5.0	3.94	18, 20	5.0	-0.4
15 min	38.6	17, 20	7.5	-13.4	4.40	17, 19	7.0	-11.1	4.37	16, 20	5.5	-3.0
16 min	42.3	16, 21	7.5	-16.3	4.21	16, 21	7.0	-14.4	4.23	16, 21	6.5	-10.4
17 min	44.9	15, 19	8.0	-20.2	2.52	16, 17	7.5	-18.8	4.01	16, 17	7.0	-15.4
18 min	45.1	16, 20	8.0	-22.6	1.68	17, 19	7.0	-15.5	3.89	16, 19	6.0	-9.1
19 min	42.6	15, 19	8.5	-28.4	0.73	15, 19	6.5	-13.5	3.37	16, 19	5.5	-6.0
20 min	39.6	15, 19	9.0	-32.1	0.72	16, 19	7.0	-15.9	3.12	16, 19	5.5	-6.3

时间 Time	冻滴 Frozen drops				霰 Graupel				冰雹 Hail			
	$M/\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$	i, j	H/km	$T/^{\circ}\text{C}$	$M/\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$	i, j	H/km	$T/^{\circ}\text{C}$	$M/\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$	i, j	H/km	$T/^{\circ}\text{C}$
10 min	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/
11 min	/	/	/	/	0.05	22, 19	5.0	-1.9	/	/	/	/
12 min	/	/	/	/	0.34	18, 20	5.5	-1.7	0.02	20, 22	5.0	-0.3
13 min	0.01	18, 21	7.0	-14.2	1.00	19, 21	6.5	-7.4	0.08	20, 20	5.5	-2.2
14 min	0.25	18, 21	8.0	-20.2	1.78	20, 20	7.0	-9.2	0.17	23, 19	5.5	-5.8
15 min	1.56	17, 22	7.5	-14.8	2.37	21, 19	7.5	-14.7	0.46	21, 19	7.0	-13.4
16 min	4.77	18, 20	8.0	-17.9	3.59	16, 19	7.5	-14.3	0.83	22, 19	7.0	-17.7
17 min	4.99	15, 19	8.0	-20.2	2.30	15, 18	9.0	-27.4	1.28	21, 19	8.0	-25.7
18 min	2.86	17, 21	9.5	-34.4	2.37	23, 22	8.5	-33.5	1.43	23, 21	8.5	-33.0
19 min	2.11	17, 23	10.	-42.4	2.34	22, 15	9.0	-35.4	1.65	21, 16	9.0	-34.8
20 min	1.74	16, 24	10.	-45.4	2.16	22, 18	7.5	-26.2	1.72	21, 16	9.0	-35.8

注: M 、 (i, j) 、 H 、 T 分别代表最大值、水平格点位置、高度和温度。
Note: M , (i, j) , H and T represent the maximum value, horizontal grid, height and temperature, respectively.

利,如果在雹云初始发展阶段,雨滴首先在过冷区形成,那么雨滴就能够更加快速冻结形成冻滴。在一些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,这种状态可维持较长的一段时间,在这一阶段,云水向雨水的转化和雨水碰并云水增长过程都发生在过冷区,因此,产生的大雨滴多,冻滴形成更加快速^[4]。本例中,过冷雨在6 min 出现,但总量仅 22 kt,只占雨水总量的 15%,11 min 前,过冷雨对雨水总量的贡献均低于 17%,12 min 和 13 min 上升到 54%和 91%,在 14 和

15 min 雨水则全部为过冷水,此后这一比例又降低。可见,本例雹云初期发展阶段,过冷雨含量低,大滴少、小滴多,冻滴形成过程相对较慢,而霰的过程相对较快。

从霰的主要源项物理过程对霰总质量的贡献(图 6a,均指空间积分总量)来看,霰最初在 6 min 时由过冷雨滴和冰、雪晶碰撞冻结(CLrig、CLrsg)产生,尤其 CLrsg 过程,贡献率达 85%,8~13 min 期间主要由雪的转化 CNsg 而成,13 min 至地面降雹前则以过冷雨滴异质冻结核化(NUrg)为主,而

在降雹后则主要来自 CNsg 过程。计算表明,雨滴冻结(即 NUrg+CLrig+CLrsg)对霰数量的贡献平均占 31%,在地面降雹前达到 50%,是霰的重要产生机制。霰在形成后主要依靠碰并收集云水(CLcg)增长,这一过程对霰总质量的平均贡献达 65%,云发展后期霰的凝华增长(VDvg)贡献也较

大,但仍比 CLcg 小,其余过程如霰碰并冰雪晶(CLisg)及碰并雨水(CLrg)增长的贡献都较小。霰出现后至模拟结束时其最大含量维持在 $1.8 \sim 2.8 \text{ g/m}^3$,最大浓度出现在第 17 min,数值为 $10^{4.62} \text{ m}^{-3}$,位于上升气流区 8.5 km 高处。在同一时刻和位置,冻滴浓度也达到最大,为 $10^{3.69} \text{ m}^{-3}$ 。

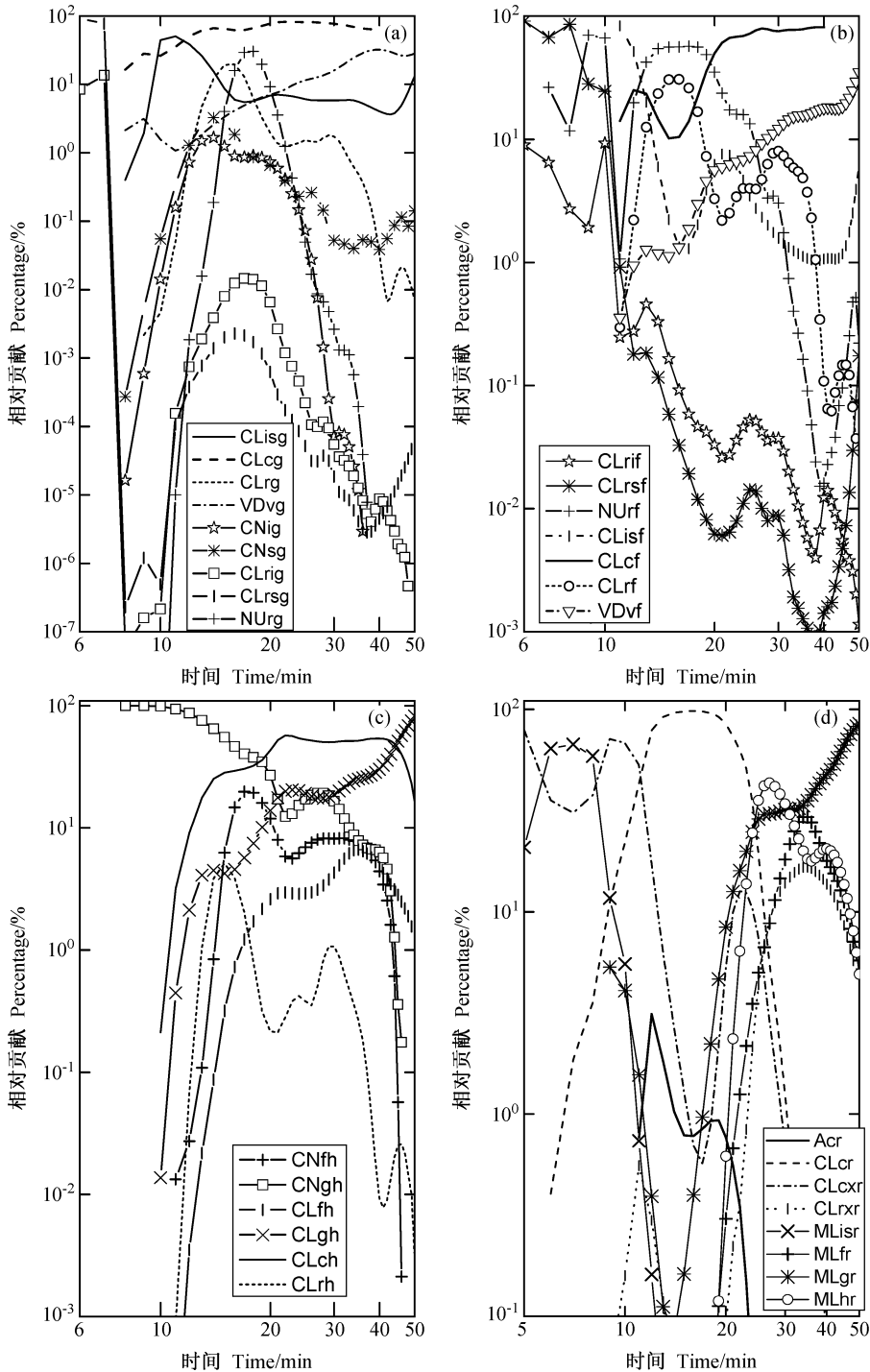


图 6 源项微物理过程(空间积分量)的相对贡献(%): (a) 霰; (b) 冻滴; (c) 冰雹; (d) 雨
Fig. 6 Percentage of major microphysical process to mass productions of (a) graupel, (b) frozen drops, (c) hail and (d) rain as a function of time

冻滴最初也是在 6 min 时由冰雪晶与过冷雨滴碰冻 (CLrif、CLrsf) 产生 (图 6b), 这两个过程也是冻滴最主要的产生项, 尤其 CLrif, 雨滴异质冻结核化 (NUrf) 在 14~18 min 阶段是冻滴最主要的产生过程, 这一阶段雨水中过冷雨的含量也比其他阶段高。对冻滴总质量贡献较大的是 NUrf 和碰并收集云水 (CLcf), 云发展后期凝华增长 (VDvf) 也是冻滴的一个主要增长过程, 冻滴碰并收集雨水增长只在过冷雨含量高时贡献大。

模拟的霰粒子的总数是 4.367×10^{15} 个或浓度 254 m^{-3} , 冻滴的总数是 5.583×10^{14} 个或 32 m^{-3} , 霰明显多于冻滴。如果霰仅由 CNig、CNsg 过程产生, 而雨滴不论大小冻结后都产生冻滴的话, 那么霰的总数是 5.989×10^{14} 个 (即 35 m^{-3}), 冻滴的总数是 4.326×10^{15} 个 (即 252 m^{-3}), 冻滴多于霰。在 Rasmussen 等^[11] 和 Kubesh 等^[12] 的工作中, 霰仅由 CNig 与 CNsg 产生, 他们的模拟结果都是冻滴多于霰, 冻滴主要由下落到暖区的冰粒子融化脱落的雨滴被上升气流重新夹带上去以后冻结产生的。他们推测认为地面雹块分析的胚胎组成中, 霰胚可能被高估而冻滴胚被低估了, 原因是采用晶体结构的分析方法不能识别直径小于 0.5 mm 的冻滴。若就实际观测分析结果比较, 我们认为将小雨滴冻结归为霰一类更接近于实际情况。最近 Straka 和 Mansell^[31] 开发了一套含 10 类冰物质的体积水参数化方案, 其中过冷雨滴与雪晶的碰撞冻结既可以产生冻滴, 也可以产生霰, 具体是按照生成物的密度大小来划分的。而本文所用的模式除了上述过程外还包含了冰晶与过冷雨滴的碰撞冻结过程。

冰雹最初是由霰胚转化 (CNgh) 来的 (图 6c), 冻滴胚转化成雹 (CNfh) 的时间比霰晚了 3 min。从图 6a、b 可见, 霰在形成后 2 min 就开始碰并云水和雨水增长, 而冻滴在形成后 5 min 才开始碰并增长, 霰有更充沛的时间长成雹。整个模拟时段上 CNgh 对雹总质量的贡献都比 CNfh 大, 由于霰的密度比冻滴小, 说明雹胚中霰胚多而冻滴少。计算雹胚中霰和冻滴数所占比例, 冻滴胚的最大贡献比为 49%, 出现在地面强降雪时, 在地面降雪前, 冻滴胚的最大贡献比为 35%, 整个模拟时段的平均值为 29%, 霰胚的平均贡献比为 71%, 这也说明雹胚以霰为主。地面观测分析结果给出的霰胚和冻滴胚所占的比例分别为 56% 和 24%^[11], 霰胚多、冻滴

胚少。现有研究表明, 云底温度降低, 会使霰胚的数量增加^[7, 19, 32]。这里试验初始云滴浓度 N_c 对雹胚组成的影响, 为此将模式中的 N_c 从 1000 cm^{-3} 减小到 100 cm^{-3} , 发现最大过冷云水和雨水含量分别为 2.9 g/m^3 和 6.2 g/m^3 , 过冷雨水含量增大, 霰胚和冻滴胚所占比例分别为 23% 和 77%。这说明高云滴浓度导致的过冷雨少也是造成霰胚多、冻滴胚少的因素之一。冰雹出现以后, 主要靠碰并收集过冷云水 (CLch) 增长, 这一过程对冰雹增长的贡献达到 69%, 其次为碰并收集霰粒子 (CLgh) 增长, 贡献率为 20%, 而冰雹碰并过冷雨水增长的贡献很小, 仅为 3% 左右。模拟冰雹的最大含量是 2.78 g/m^3 , 最大数浓度为 6 m^{-3} 。

地面降雪前, 雪主要靠冰晶的积聚转化产生。冰雪晶形成以后, 在 20 min 以前主要以淞附增长为主, 20 min 以后冰晶以凝华增长为主, 雪则靠碰并冰晶和凝华增长。

考察雨水的微物理过程 (图 6d)。10 min 前, 雨滴的主要产生过程是 CLcxr 和 MLisr, 前者是冰雪晶碰撞云滴溅落过程, 后者是冰雪晶融化过程。云滴向雨滴的自动转化 (Acr) 从 10 min 才开始, 至 22 min 这段时间里雨滴主要由这一过程产生, 但该项对雨水总质量的贡献很小。22 min 以后雨滴主要由冰粒子融化产生, 其中霰的融化 (MLgr) 贡献最大, 其次是冻滴融化 (MLfr) 以及霰、冻滴、雹碰撞云滴和雨滴溅落过程 (CLcxr, CLrxr)。22 min 前雨滴碰并收集云滴增长 (CLcr) 对雨水总质量的贡献最大, 22 min 以后雨水总质量主要决定于霰、冻滴和雹 (MLhr) 的融化, 贡献率分别为 45%、16% 和 24%。

从以上分析可见, 由于过冷雨水较少, 它对霰、冻滴和冰雹的增长贡献很小, 但它与冰雪晶的碰撞冻结却是霰和冻滴的重要产生机制。对霰、冻滴和雹的增长贡献最主要的过程是碰并收集过冷云滴, 平均贡献率分别为 65%、62% 和 44%。模拟的地面总降雪量是 349.2 kt, 总降雨量是 1612.3 kt, 最大降雪动能通量 $2.76 \text{ J} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 。周玲等^[3] 和周毓荃等^[5] 模拟表明, 对具有过冷雨水累积区、云中过冷雨水含量高的冰雹云, 播撒碘化银能够减雹、增雨; Farley 等^[33] 模拟发现, 如果过冷云水含量很高并且自然雹胚很少的情况下, 催化后增加的雹胚粒子就能够在丰富的过冷云水条件下碰并增

长,导致催化后雨和雹都显著增加,最大增加率甚至达到 280% (雹) 和 340% (雨)。毛玉华和胡志晋^[34]对 1980 年 7 月 19 日的 CCOPE 雹暴作引晶催化试验,结果是减雹、减雨。同样是 CCOPE 期间发生的雹暴,对本研究的个例来说,播撒碘化银的效果如何? 影响机理又是怎样?

4 催化试验

4.1 催化结果

催化剂在云中的扩散会受气流的影响,这已被观测和模拟研究所证实^[35, 36]。为了将催化剂有效送入对流云中,催化部位通常选择在主上升气流区。数值模拟也表明在主上升气流区播撒碘化银,只要播撒的时间、部位和剂量适当,就能够达到减雹和增雨效果^[3, 5, 6]。就催化时间而言,一般认为在冰雹形成前期或者初期催化,获得的减雹和增雨效果更好,冰雹形成后期催化效果就较差^[3, 5]。

本文以 BR-91-Y 型碘化银焰剂^[37]为例进行催化试验。关于该型焰剂的性能如文献^[37]所述,这里取其活化上限温度为 -4°C 。考虑三种碘化银粒子的成核机制^[38],即由于布朗运动和惯性碰撞而发生在人工冰核与云、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(包括凝结-冻结核化)。由于碘化银粒子的成核作用,使得水成物和冰晶浓度发生变化,相应的过程是:云滴冻结

形成冰晶、雨滴冻结形成霰(冻结雨滴直径小于 1 mm) 或者冻滴(冻结雨滴直径大于 1 mm)、水汽在人工冰核上凝华成冰晶。模式中碘化银粒子比含量的源项以一矩形空间内均匀分布的碘化银粒子初始浓度来表示,并假定碘化银粒子按点源方式瞬间释放到云中。在某一时刻,催化是以某一高度的上升气流极大值、过冷水极大值、冻滴极大值、霰极大值或者冰雹极大值为中心的 9 个水平格点上进行。选择第 13 min 即冰雹形成初期进行催化试验,因为这时云中冰相粒子都已形成,可以试验在不同水成物中心的催化效果。另外也做了 10 min、16 min 和不同播撒量的对比试验,以考察催化时间和剂量的影响。试验方案和结果见表 2。可见,所有的试验均使地面总降雹量和最大降雹动能减少,减幅分别达 14%~57% 和 7%~44%,减雹的效果明显,但同时地面总降雨量也减少了,达到 24%~55%,这与毛玉华和胡志晋^[35]的结果类似。同一时刻、相同播撒量的情况下,在冻滴或者霰的中心区播撒所获得的减雹效果较差,在上升气流中心或者过冷水中心区播撒效果较好。这是由于霰、雹等粒子的增长以碰并过冷云水为主,在上升气流中心或者过冷水中心播撒能使催化剂更快速有效地扩散到过冷水区域。某一时刻、播撒部位相同时,随着催化剂量增加减雹的效果也增强(S6→S1→S7);催化剂量不变时,减雹效果随着催化时间的推迟而变差

表 2 催化引起的地面总降雹量、最大降雹动能和总降雨量的相对变化

Table 2 Relative increments of surface accumulations of hail (Δh) and rain (Δr), the maximum hailfall kinetic energy flux (Δk) by seeding

试验 Expt	时间 Time/min	播撒位置 Seeding location		AgI 总量 Seeding AgI amount/g	地面总降雹量 相对变化 Δh	最大降雹动能 相对变化 Δr	地面总降雨量 相对变化 Δk
		水平格点	高度				
		Grid (i, j)	Height/km				
S1	13	(16, 21), W	5.0	180	-34%	-27%	-51%
S2	13	(17, 20), R	5.5	180	-33%	-27%	-45%
S3	13	(18, 21), F	7.0	180	-14%	-9%	-24%
S4	13	(19, 21), G	6.5	180	-17%	-7%	-31%
S5	13	(20, 20), H	5.5	180	-27%	-20%	-33%
S6	13	(16, 21), W	5.0	90	-30%	-20%	-48%
S7	13	(16, 21), W	5.0	360	-43%	-34%	-55%
S8	10	(16, 20), W	4.0	180	-57%	-44%	-48%
S9	16	(16, 21), W	5.0	180	-27%	-20%	-29%

注: W、R、F、G、H 分别代表上升气流、过冷水(云+雨)、冻滴、霰和冰雹的中心。
Note: Letters W, R, F, G and H represents the centers of updraft, supercooled water (cloud water and rain), frozen drops, graupel and hail, respectively.

(S8→S1→S9), 例如试验 S8 播撒时间在 10 min, 其地面总降雪量和最大降雪动能分别减少了 57% 和 44%, 而如果在 16 min 时催化, 这两个量分别减少了 27% 和 20%, 减雹效果变差。

虽然在上升气流区播撒获得的减雹效果较好, 但在某一高度上最佳的水平播撒区域却不在于主上升气流区, 而是在入流区。图 7 给出了在第 13 min、5 km 高度上不同水平格点催化(碘化银播撒量均为 360 g)所获得的减雹率(粗等值线)和水平风场及上升气流速度(细等值线)。可见, 在上升气流区催化能够减雹, 但最佳催化部位是在雹云后部的入流区, 位于过冷水区和上升气流区的后方。如果催化高度在 4 km 或者 6 km, 得到的结果类似(图略)。在主上升气流区催化, 碘化银很快在云内扩散(图略)并活化, 能够迅速产生大量的冰晶、霰和冻滴, 但是催化剂的含量也很快降低, 作用时间短; 在主上升气流区以外的入流区催化, 碘化银的扩散速度相对较慢, 但作用时间长。比较而言, 催化部位在主上升气流区, 初期阶段获得的减雹效果好, 而在以外的入流区, 虽然催化初期效果不如前者好, 但是作用时间长, 总的减雹效果相对更好。

4.2 催化减雹机制分析

以表 2 之试验 S7 为例分析碘化银对雹云的微物理过程的影响。碘化银在 13 min 初期被撒入云中时, 总量是 360 g, 在气流的作用下迅速扩散并活化, 3 min 后即第 16 min 云内剩余碘化银总量为 186 g, 48% 的碘化银粒子被活化, 6 min 后剩余的碘化银总量是 77 g, 活化的碘化银比例达到 78%, 9 min 以后云内还有 51 g 碘化银, 仅剩 14% 没有被活化。直至模拟结束时, 云内还剩余碘化银 11 g, 约 97% 的碘化银被活化。本例中, 约 99% 的碘化银粒子充当凝华(包括凝华—冻结)核, 在其他的[33, 38]中, 这一比例也达到 95% 以上。图 8 给出了催化后冰晶的空间积分数量产生率和质量产生率主要源项微物理过程的变化(催化例减去自然例)。催化后冰晶总数和总质量都有所增加。在 17 min 以前, 冰晶数量的增加主要决定于碘化银作用所产生的人工冰晶的数量 N_{xai} , 随着碘化银含量逐渐降低, N_{xai} 也减少, 第 18 min 以后冰晶数的增加主要由自然冰核活化所产生的冰晶数 NNU_{-vi} 决定。冰晶数量增加也使得其凝华增长(VDvi)量增加(图 8b), 这也是引起冰晶质量增加的最主

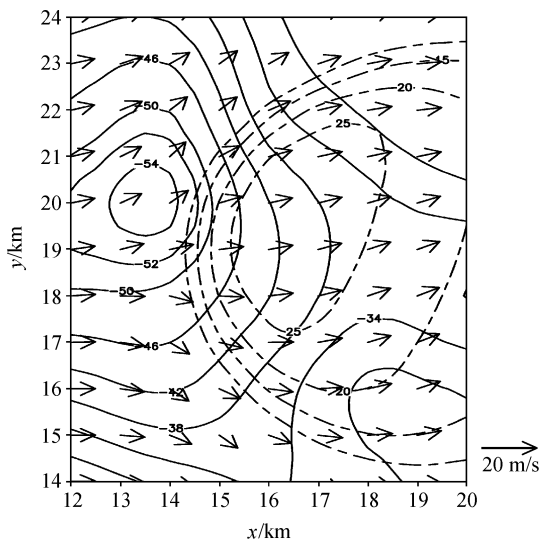


图 7 不同播撒位置对应的减雹率(%，实线)和上升气流速度(虚线，间距 5 m/s，起始值 10 m/s)及水平风场

Fig. 7 Percentage of decrease in total hailfall accumulated (solid contours) on the ground for different horizontal seeding locations overlaid with updrafts (dashed contours, interval=5 m/s, starting at 10 m/s) and wind vectors at 13 minute at the height of 5 km

要过程。其他过程对冰晶质量的增加贡献较小。此外, 冰晶碰并云滴的增长量(CLi)在催化后有所减少, 尤其在 20 min 以前, 这与大量的冰晶凝华增长消耗了较多的过冷云水有关。图 9 给出了因催化造成的云水的面积平均含量(单位: g/m^3)随时间和高度的变化, 可以看到 11 km 高度以上的过冷云水在催化后几乎都减少了, 19 min 以前几乎所有高度上的云水含量都减少, 而在 20 min 以后、9 km 高度以下, 云水含量却增加。在 20~30 min 期间、9~11 km 高度过冷云水含量降低最显著。

催化后冰晶的总质量增加了 1231 kt (50 min 的总积分量), 增加率 22%, 冰晶总数量增加了 8.37×10^{20} 个, 增加率 35%, 数量增加相对更大。冰晶质量增加最显著的阶段在 15~19 min, 达到 1.1~2.3 倍, 最大值出现在 16 min。冰晶数量增加最显著的阶段在 15~29 min, 其增加率都在 1 倍以上, 最大值出现在 19 min, 为 15.2 倍。在催化后的整个阶段里, 冰晶的总数量增加率都比总质量增加率大, 平均效果是冰晶的质量和直径在催化后都减小, 但并非所有时刻、在所有的网格点上冰晶的质量和直径都因催化而减小。在催化的前 2 min, 网格点的平均冰晶直径都比自然云小(图略), 因此冰晶向雪的自动转化过程受到抑制, 导致这一过

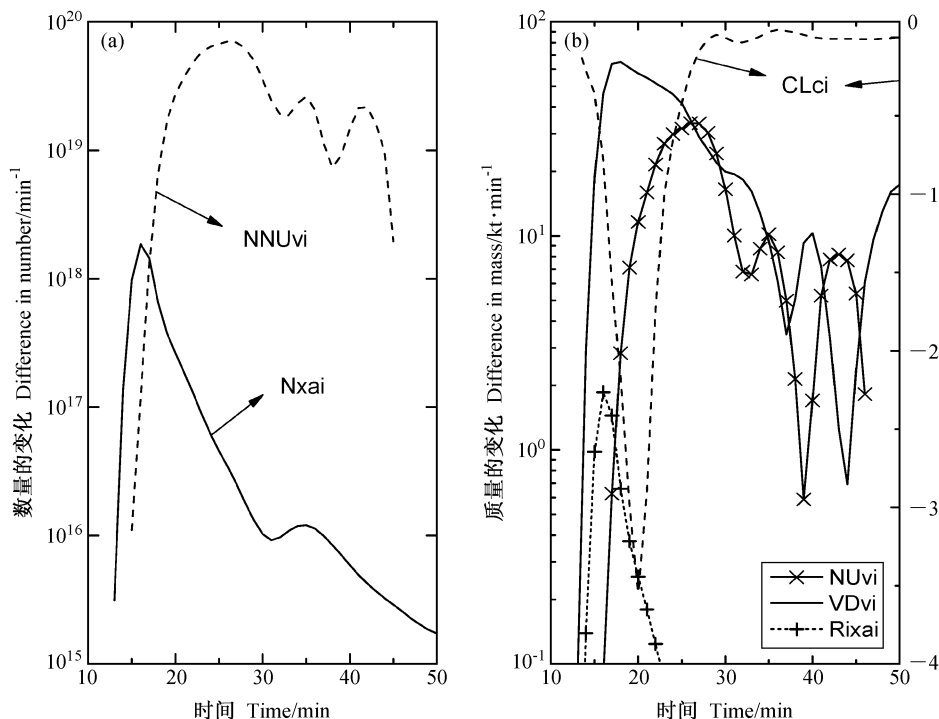


图 8 催化后冰晶的数量 (a) 和质量 (b) 随时间的变化

Fig. 8 Difference in (a) number and (b) mass production of cloud ice between the seeded and unseeded runs

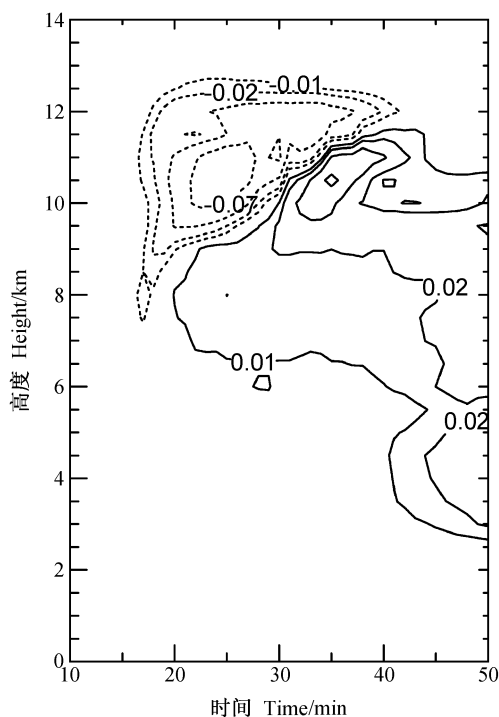


图 9 云水的面积平均含量差 (催化减去自然, 单位: g/m^3) 随时间和高度的分布

Fig. 9 Difference in cloud water content (g/m^3) between the seeded and unseeded runs

程形成的雪的数量 NCNis 在催化后减少 (图 10a)。

雪的总数量和总质量 TQs 在催化后都有所增加, 并且 TQs 分别在 23 min 和 40 min 出现了二个峰值 (图 10b), 这二个峰值与冰晶对应, 反映了雪对冰晶的快速碰并增长 (CLis)。冰晶增多也使得冰晶聚合形成雪的数量 (NCLii) 增加, 这也是雪数量增加的主要过程。相比之下, 冰晶自动转化过程 (NCNis) 对雪数量的增加贡献较小。雪的凝华增长 (VDvs) 在催化后也增强, 而雪碰并云滴增长 (CLcs) 在 20 min 前也减少了, 这与冰晶类似。

过冷雨滴和人工冰核接触后会冻结形成霰或者冻滴, 但由于绝大部分的碘化银以凝华核形式作用, 且受到过冷水含量的限制, 因此由碘化银直接作用形成的霰 NNUrag 或者冻滴 NNUraf 的数量很少 (图 11a、图 12a), 对霰或者冻滴总数的贡献也很小, 平均小 5 个量级, 这两个过程对霰和冻滴总质量的贡献就更小。霰和冻滴的数量在催化后都增加, 其中过冷雨滴与冰晶的碰冻 (NCLrif) 是冻滴增多的最主要机制, 这也是 25 min 以前霰数量增加的主要机制, 在 25 min 以后, 造成霰的数量增加的主要机制是雪的自动转化 (NCNsg)。霰的总质量 TQg 在催化初期的 3 min 里是减少的 (图

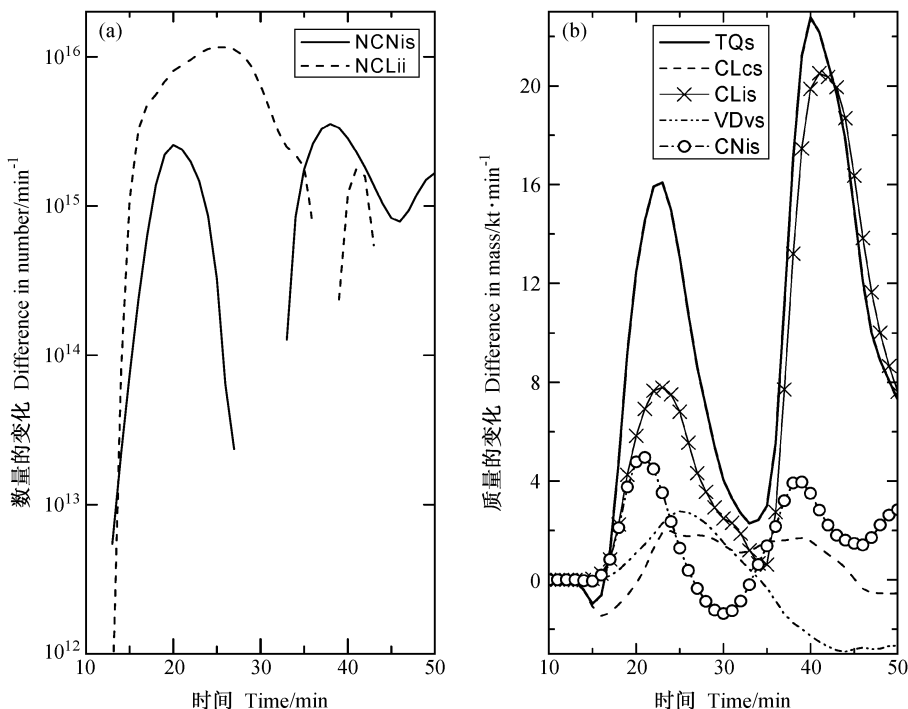


图 10 催化后雪的数量 (a) 和质量 (b) 随时间的变化 (TQs 为总质量)

Fig. 10 Difference in (a) number and (b) mass production of snow between the seeded and unseeded runs. TQs represents total mass production rate

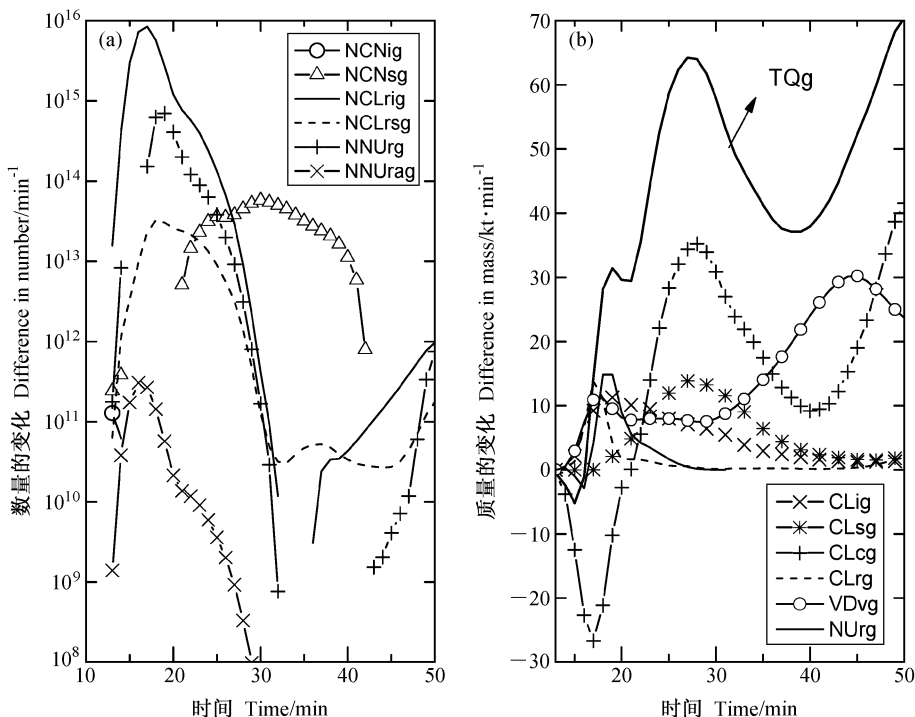


图 11 催化后霰的数量 (a) 和质量 (b) 随时间的变化 (TQg 为总质量)

Fig. 11 Difference in (a) number and (b) mass production of graupel between the seeded and unseeded runs. TQg represents total mass production rate

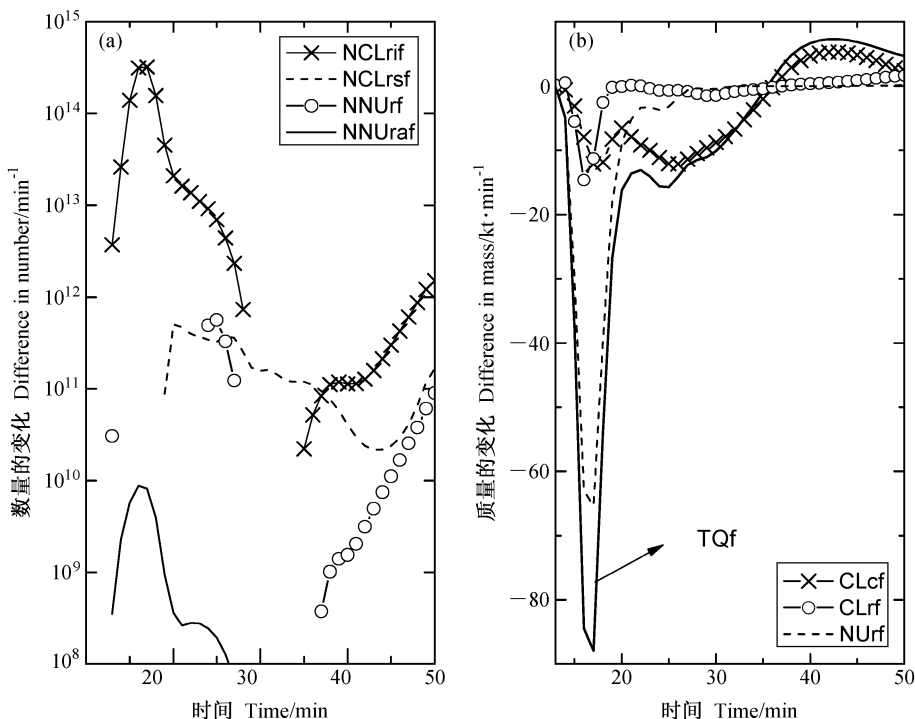


图 12 催化后冻滴的数量 (a) 和质量 (b) 随时间的变化 (TQf 为总质量)

Fig. 12 Difference in (a) number and (b) mass production of frozen drops between the seeded and unseeded runs. TQf represents total mass production rate

11b), 第 17 min 以后才增加, 霰对过冷云水的碰并增长在催化后的变化是造成这种结果的最直接原因。催化后过冷雨滴异质冻结产生的冻滴数 (NNURf) 减少, 使得冻滴的质量显著减少 (图 12b), 冻滴对过冷云水的碰并量的减少则是 20 min 后冻滴质量减少的主要机制。由于催化使得霰的总数量平均增多了 6 倍, 总质量平均增加了 1.44 倍, 霰的平均质量因而减少了 45%。冻滴在 35 min 以前总质量平均减少了 44%, 总数却增多了 99%, 35 min 以后冻滴的总质量增加了 18.6 倍, 总数也增多且达到 33.51 倍, 使得冻滴的平均质量减少了 191%。其结果是霰和冻滴都变小, 它们向冰雹的转化量也明显减少, 并导致冰雹总数减少 (图 13a)。从图 13a 中还可看出, 冰雹数浓度分别在第 18 min 和 26 min 出现了两个低谷, 前者主要是由于冻滴转化减少, 后者主要是霰的转化减少。冰雹的总质量也因催化而减少, 在催化后的 7 min 内即 20 min 前, 雹质量的减少主要是由冻滴和霰的转化量减少造成的, 在 20~30 min 时段内, 冰雹质量显著减少则是因为冰雹碰并过冷云水的增长量显著减少 (图 13b)。

催化后霰融化成雨的数量增加, 但由于平均尺度变小导致霰融化成雨的质量也减少; 冻滴融化成雨的数量和质量在 35 min 前都减少, 冰雹融化成雨的数量和质量也因催化而减少, 这些因素最终导致雨水的总质量在催化后减少 (图 14)。但雨碰并云滴增长量在催化初期阶段则是增加的。

由以上分析可见, 碘化银撒入云中后主要以凝华核 (包括凝结-冻结核) 的作用产生人工冰晶, 冰晶通过凝华增长消耗掉大量的过冷云水, 从而使过冷云水含量降低。霰和冻滴的数量在催化后增多, 对过冷云水的竞争增强, 其平均质量和尺度变小, 导致向冰雹的转化量减少。冰雹在形成后因过冷云水减少而使其碰并增长进一步受到抑制, 因而长不成大雹。可见, 如果雹胚和雹以碰并过冷云水增长为主, 那么播撒碘化银仍然能够通过“竞争机制”达到减雹目的。

5 结论

本文以 1981 年 8 月 1 日 CCOPE 雹云为例, 利用三维冰雹云模式对其成雹机制和催化效果进行了模拟研究, 结果如下:

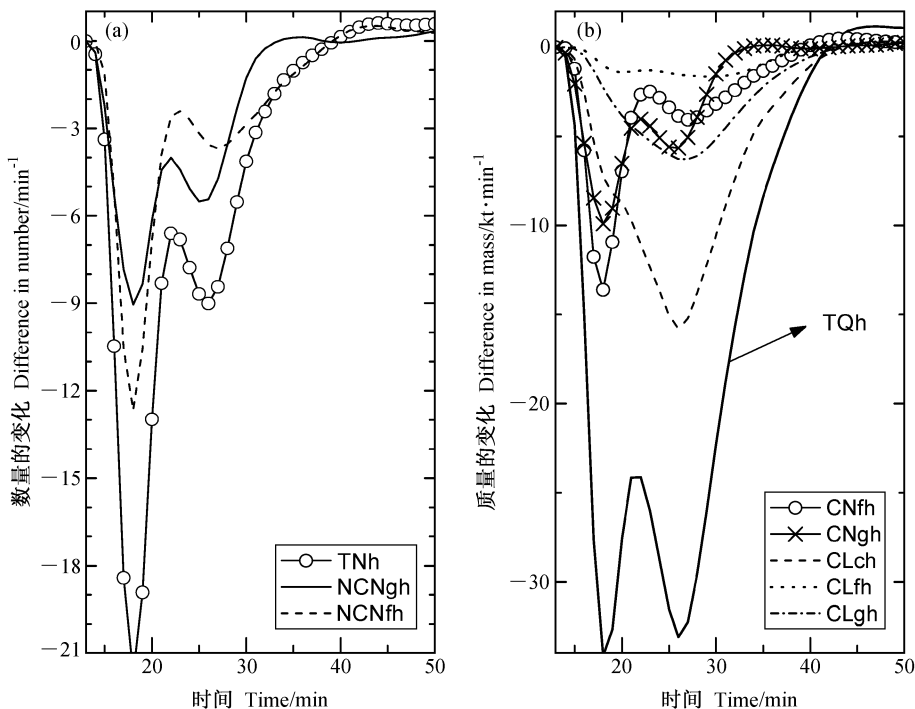


图 13 催化后冰雹的数量 (a) 和质量 (b) 随时间的变化 (TNh 为总数量, TQh 为总质量)
Fig. 13 Difference in (a) number and (b) mass production of hailstones between the seeded and unseeded runs. TQh represents total mass production rate and TNh is total number production rate

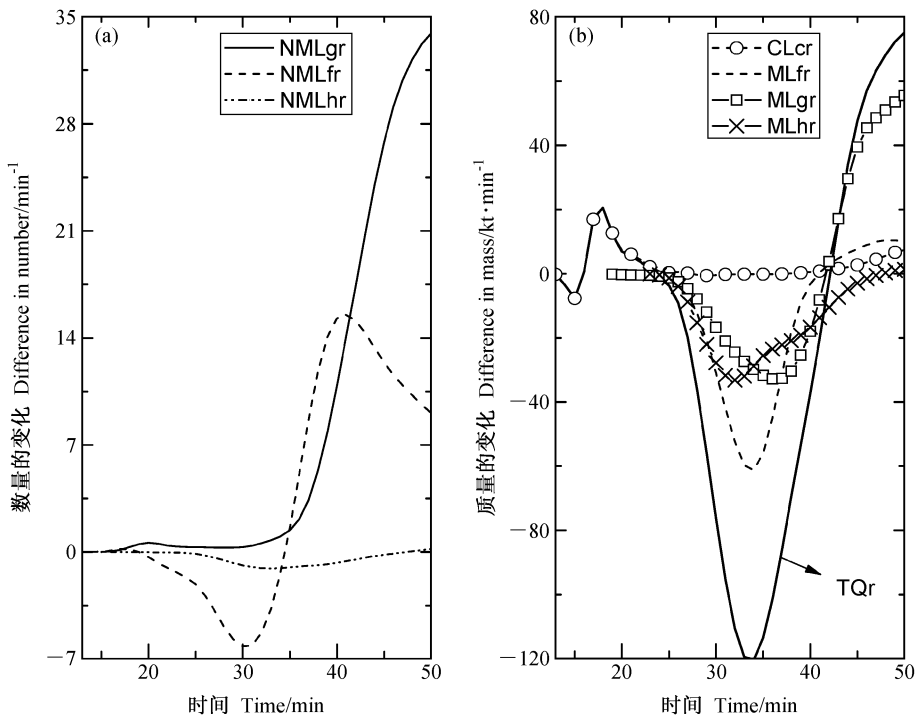


图 14 催化后冰粒子融化成雨的数量 (a) 和雨水质量 (b) 随时间的变化 (TQr 为总质量)
Fig. 14 Difference in (a) number and (b) mass production of raindrops between the seeded and unseeded runs. TQr represents total mass production rate

(1) 通过模拟结果与实测雷达回波和风场结构以及雹胚组成等比较,表明模式对此类雹胚云具有可靠的模拟能力,能够用来了解这类雹云的成雹机制。

(2) 本例雹云过冷雨水较少,且小滴多、大滴少,因此雹胚以霰为主。霰主要来自冰雪晶与过冷小雨滴的碰撞冻结。在雹云发展阶段,由于雨水中过冷雨较少且以小滴为主,导致霰的形成比冻滴快。霰、冻滴和冰雹在形成后主要依靠碰并过冷云水增长。

(3) 催化试验表明,对本例雹云播撒碘化银能够减雹,但同时降雨也减少。减雹效果随着播撒时间的提前和播撒量的增加而增强。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,对过冷云水的竞争增强,向冰雹的转化量减少。冰雹在形成后因过冷云水减少而使其碰并增长受到抑制,导致雹的总质量减少。因此,即使云中过冷雨水较少但如果过冷云水丰富,雹胚和冰雹依靠碰并过冷云水增长,播撒竞争防雷机制就依然存在,但却是通过过冷云水的竞争实现的。而在一些过冷雨水含量较高的雹云中,催化增加的雹胚主要通过过冷雨水实现利益竞争。

参考文献 (References)

- [1] 黄美元,王昂生.人工防雷导论.北京:科学出版社,1980
Huang Meiyuan, Wang Angsheng. *Introduction to Hail Suppression* (in Chinese). Beijing: Science Press, 1980
- [2] 马振骅.一次累积带降雹的雷达观测.大气科学,1977,1 (2): 149~152
Ma Zhenhua. Radar observation of an accumulation zone generating hail fallout. *Chinese J. Atmos. Sci. (Scientia Atmospherica Sinica)* (in Chinese), 1977, 1 (2): 149~152
- [3] 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
Zhou Ling, Chen Baojun, Li Zihua, et al. Numerical simulation of hailstorm accumulation zone and hail formation. *Chinese J. Atmos. Sci. (in Chinese)*, 2001, 25 (4): 536~550
- [4] 胡朝霞,李宏宇,肖辉,等.旬邑冰雹云的数值模拟及累积带特征.气候与环境研究,2003,8 (2): 196~208
Hu Zhaoxia, Li Hongyu, Xiao Hui, et al. Numerical simulation of hailstorms and the characteristics of accumulation zone of supercooled raindrops in Xunyi county. *Climatic and Environmental Research* (in Chinese), 2003, 8 (2): 196~208
- [5] 周毓荃,陈宝君,肖辉,等.播撒碘化银实施雹云催化的数值试验——个例研究,大气科学,2003,27 (1): 8~22
Zhou Yuqian, Chen Baojun, Xiao Hui, et al. A case study of hail suppression by AgI seeding using 3D hailstorm model. *Chinese J. Atmos. Sci. (in Chinese)*, 2003, 27 (1): 8~22
- [6] 洪延超.冰雹形成机制和催化防雷机制研究.气象学报,1999,57 (1): 30~44
Hong Yanchao. Study on mechanism of hail formation and hail suppression with seeding. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 1999, 57 (1): 30~44
- [7] 洪延超,肖辉,李宏宇,等.冰雹云中微物理过程研究.大气科学,2002,26 (3): 421~432
Hong Yanchao, Xiao Hui, Li Hongyu, et al. Studies on microphysical processes in hail cloud. *Chinese J. Atmos. Sci. (in Chinese)*, 2002, 26 (3): 421~432
- [8] Foote G B, Knight C A. Results of a randomized hail suppression experiment in Northeast Colorado. Part I: Design and conduct of the experiment. *J. Appl. Meteor.*, 1979, 18: 1526~1537
- [9] Knight C A, Foote G B, Summers P W. Results of a randomized hail suppression experiment in Northeast Colorado. Part IX: Overall discussion and summary in the context of physical research. *J. Appl. Meteor.*, 1979, 18: 1629~1639
- [10] Federer B, Waldvogel A, Schmid W, et al. Main results of Grossversuch IV. *J. Appl. Meteor.*, 1986, 25: 917~957
- [11] Rasmussen R M, Heymsfield A J. 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. Atmos. Sci.*, 1987, 44: 2783~2803
- [12] Kubesh R J, Musil D J, Farley R D, et al. The 1 August 1981 CCOPE storm: Observations and modeling results. *J. Appl. Meteor.*, 1988, 27: 216~243
- [13] 赵仕雄.关于雹胚的研究.气象学报,1986,44: 307~313
Zhao Shixiong. A study of hail embryo. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 1986, 44: 307~313
- [14] 陈玉山,牛生杰.宁南冰雹胚胎的研究.大气科学,1990,14: 369~372
Chen Yushan, Niu Shengjie. Research of hailstone embryos for southern Ningxia. *Chinese J. Atmos. Sci. (Scientia Atmospherica Sinica)* (in Chinese), 1990, 14: 369~372
- [15] Knight C A, Knight N C. Results of a randomized hail suppression experiment in northeast Colorado Part V: Hailstone embryo types. *J. Appl. Meteor.*, 1979, 18: 1583~1588
- [16] Khain A, Rosenfeld D, Poklovsky A. Simulating convective clouds with sustained supercooled liquid water down to -37.5°C using a spectral microphysics model. *Geophys. Res. Lett.*, 2001, 28: 3887~3890
- [17] 黄美元,徐华英,周玲.中国人工防雷四十年.气候与环境研究,2000,5 (3): 318~328
Huang Meiyuan, Xu Huaying, Zhou Ling. 40 year's hail suppression in China. *Climatic and Environmental Research* (in Chinese), 2000, 5 (3): 318~328

- [18] Orville H D. A review of cloud modeling in weather modification. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 1996, **77**: 1535~1555
- [19] 何观芳, 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): 31~45
He Guanfang, Hu Zhijin. Numerical study on ice seeding in hailstorms with various cloud base temperatures. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 1998, **56** (1): 31~45
- [20] Foote G B. Future aspects of the hail suppression problem. Seventh Conference on Inadvertent and Planned Weather Modification. Banff, Alta, Canada, 1979, 180~181
- [21] 段英, 刘静波. 超级单体、单体、多单体雹云及其成雹特点的数值模拟研究. *气象学报*, 1998, **56** (5): 529~539
Duan Ying, Liu Jingbo. A numerical simulation about the hailstone growing processes in super-cell, multi-cell and single-cell hailstorm. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 1998, **56** (5): 529~539
- [22] 许焕斌, 段英. 冰雹形成机制的研究并论人工雹胚与自然雹胚的“利益竞争”防雹假说. *大气科学*, 2001, **25** (2): 277~288
Xu Huanbin, Duan Ying. The mechanism of hailstone's formation and the hail suppression hypothesis: "Beneficial competition". *Chinese J. Atmos. Sci.* (in Chinese), 2001, **25** (2): 277~288
- [23] 许焕斌, 段英. 强对流(冰雹)云中水凝物的积累和云水的消耗. *气象学报*, 2002, **60** (5): 575~584
Xu Huanbin, Duan Ying. The accumulation of hydrometeor and depletion of cloud water in strongly convective cloud (hailstorm). *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 2002, **60** (5): 575~584
- [24] 康风琴, 张强, 马胜萍, 等. 青藏高原东北边缘冰雹形成机理. *高原气象*, 2004, **23** (6): 749~757
Kang Fengqin, Zhang Qiang, Ma Shengping, et al. Mechanism of hail formation on the northeast border of Qinghai-Xizang Plateau and its neighborhood. *Plateau Meteorology* (in Chinese), 2004, **23** (6): 749~757
- [25] 田利庆, 许焕斌, 王昂生. 雹云机理新见解的观测验证和复现. *高原气象*, 2005, **24**: 77~83
Tian Liqing, Xu Huanbin, Wang Angsheng. Verification and reproduction of the new understanding for mechanism of hail cloud. *Plateau Meteorology* (in Chinese), 2005, **24**: 77~83
- [26] 胡志晋, 何观芳. 积雨云微物理过程的数值模拟——微物理模式. *气象学报*, 1987, **45** (4): 467~484
Hu Zhijin, He Guanfang. Numerical simulation of microphysical processes in cumulonimbus cloud (1). Microphysical model. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 1987, **45** (4): 467~484
- [27] 肖辉, 王孝波, 周非非, 等. 强降水云物理过程的三维数值模拟研究. *大气科学*, 2004, **28** (3): 385~404
Xiao Hui, Wang Xiaobo, Zhou Feifei, et al. A three-dimensional numerical simulation on microphysical processes of torrential rainstorms. *Chinese J. Atmos. Sci.* (in Chinese), 2004, **28** (3): 385~404
- [28] 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
Kong Fanyou, Huang Meiyuan, Xu Huaying. Three-dimensional numerical simulation of ice phase microphysics in cumulus clouds. Part I: Model establishment and ice phase parameterization. *Chinese J. Atmos. Sci. (Scientia Atmospherica Sinica)* (in Chinese), 1990, **14** (4): 441~453
- [29] 洪廷超. 三维冰雹云催化数值模式. *气象学报*, 1998, **56** (6): 641~653
Hong Yanchao. A 3-D hail cloud numerical seeding model. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 1998, **56** (6): 641~653
- [30] Miller L J, Tuttle J D, Foote G B. Precipitation production in a large Montana hailstorm: Airflow and particle growth trajectories. *J. Atmos. Sci.*, 1990, **47**: 1619~1646
- [31] Straka J M, Mansell E R. A bulk microphysics parameterization with multiple ice precipitation categories. *J. Appl. Meteor.*, 2005, **44**: 445~466
- [32] Knight N C. The climatology of hailstone embryos. *J. Appl. Meteor.*, 1981, **20**: 750~755
- [33] Farley R D, Chen H, Orville H D, et al. Numerical simulation of hail formation in the 28 June 1989 Bismarck thunderstorm. Part II, Cloud seeding results. *Atmos. Res.*, 2004, **71**: 81~113
- [34] 毛玉华, 胡志晋. 强对流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
Mao Yuhua, Hu Zhijin. The 2-D numerical study of rain enhancement and hail suppression principles on convective clouds. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 1993, **51** (2): 184~194
- [35] Hsie E Y, Farley R D, Orville H D. Numerical simulation of ice-phase convective cloud seeding. *J. Appl. Meteor.*, 1980, **19**: 950~977
- [36] Bruintjes R T, Clark T L, Hall W D. The dispersion of trace plumes in mountainous regions in central Arizona: Comparison between observations and modeling results. *J. Appl. Meteor.*, 1995, **34**: 971~988
- [37] 鄯大雄, 陈汝珍, 蒋耿旺, 等. 高效碘化银焰火剂及其成冰性能的研究. *气象学报*, 1995, **53** (1): 82~90
Feng Daxiong, Chen Ruzhen, Jiang Gengwang et al. The high efficient AgI pyrotechnics and their ice nucleating properties. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 1995, **53** (1): 82~90
- [38] 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
Huang Yan, Xu Huaying. Numerical experiments on hail suppression by AgI seeding. *Chinese J. Atmos. Sci. (Scientia Atmospherica Sinica)* (in Chinese), 1994, **18** (5): 612~622

附录 1 文中符号的物理意义
Appendix 1 List of symbols

符号 Symbol	物理意义	Meaning
Acr	云水自动转化为雨水	Autoconversion of cloud water to form rain
CLcr	雨滴碰并收集云水增长	Accretion of cloud water by rain
NUvi	自然冰核活化形成冰晶	Activitation of ice nuclei to form cloud ice
VDvi	冰晶凝华增长	Depositional growth of cloud ice
CLci	冰晶结凇增长	Accretion of cloud water by cloud ice
VDvs	雪的凝华增长	Depositional growth of snow
CNis	冰晶向雪自动转化	Autoconversion of cloud ice to form snow
CLii	冰晶积聚形成雪	Aggregation of cloud ice to form snow
CLis	雪碰并冰晶增长	Accretion of cloud ice by snow
CLcs	雪碰并云水增长	Accretion of cloud water by snow
CNig	冰晶向霰自动转化	Autoconversion of cloud ice to form graupel
CNsg	雪花向霰自动转化	Autoconversion of snow to form graupel
VDvg	霰的凝华增长	Depositional growth of graupel
CLcg	霰碰并云水增长	Accretion of cloud water by graupel
CLrg	霰碰并雨水增长	Accretion of rain by graupel
CLig	霰碰并冰晶增长	Accretion of cloud ice by graupel
CLsg	霰碰并雪增长	Accretion of snow by graupel
CLrig (f)	冰晶撞冻雨滴形成霰或者冻滴	Accretion of rain by cloud ice to form graupel or frozen drop depending on the raindrop size
CLrsg (f)	雪和雨滴撞冻形成霰或者冻滴	Accretion of rain by snow to form graupel or frozen drop depending on the raindrop size
NUrg (f)	过冷雨滴异质核化冻结形成霰或冻滴	Freezing of rain to form graupel or frozen drop depending on the raindrop size
NUrag (f)	过冷雨滴和人工冰核作用冻结形成霰或冻滴	Accretion of rain by AgI to form graupel or frozen drop depending on the raindrop size
VDvf	冻滴的凝华增长	Depositional growth of frozen drop
CLcf	冻滴碰并云水增长	Accretion of cloud water by frozen drop
CLrf	冻滴碰并雨水增长	Accretion of rain by frozen drop
CLif	冻滴碰并冰晶增长	Accretion of cloud ice by frozen drop
CLsf	冻滴碰并雪增长	Accretion of snow by frozen drop
CN _g (f) _h	霰向雹自动转化	Autoconversion of graupel/frozen drop to form hail
CLch	雹碰并云水增长	Accretion of cloud water by hail
CLrh	雹碰并雨水增长	Accretion of rain by hail
CLgh	雹碰并霰增长	Accretion of graupel by hail
CLfh	雹碰并冻滴增长	Accretion of frozen drops by hail
MLxr	冰晶、雪、霰、冻滴、雹融化形成雨水	Melting of cloud ice, snow, graupel, frozen drop and hail to form rain
CLcxr	冰雪晶、霰、冻滴和雹碰撞云滴溅落的雨水	Shedding during accretion of cloud water by cloud ice, snow, graupel, frozen drop and hail to form rain
CLrxr	霰、冻滴和雹碰撞雨滴溅落的雨水	Shedding during accretion of rain by cloud ice, snow, graupel, frozen drop and hail to form rain