

广西积云人工增雨防雹的个例数值研究

邹光源

(广西壮族自治区人工影响天气办公室, 南宁 530022)

提 要: 利用三维积云模式模拟 2006 年 4 月 9 日下午发生在广西东兰县境内的一次冰雹天气过程。结果表明, 三维模式对该个例具有一定的模拟能力。个例催化数值试验表明, 该积云具有一定的人工催化潜力, 当在出现过冷水后, 自然冰晶浓度较低前在过冷水区的底部实施适量的催化, 则可达到最佳的效果, 既能一定程度增雨又能一定程度消雹; 当过量催化时则既能一定程度消雨又一定程度消雹。

关键词: 积云 增雨 防雹 数值模拟

A Numerical Simulation Study on the Hailstorm in Guangxi

Zou Guangyuan

(Weather Modification Office of Guangxi, Nanning 530022)

Abstract: The hailstorm process in the northwest Guangxi is simulated with 3-D convective cloud model. The results show that the model is capable to simulate the case to some extent. A series of seeding experiments indicate that the cumulus cloud has some potential to be artificially modified. Effect can be optimized by proper seeding at the base of the super-cooled water area as natural crystal concentration is still at a low level. Seeding may somewhat cause the rainfall enhancement as well as the hail suppression. Meanwhile over seeding may lead to the rainfall decrease as well as the hail suppression.

Key Words: cumulus rain enhancement hail-suppression numerical simulation

引 言

由于受地形和暖湿气流的共同影响, 春夏之交是广西西北地区冰雹天气的多发期。2006 年 4 月 9 日下午, 在高空槽和切变线的

共同作用下, 地处河池市西部的东兰县境内出现了一次强降雹天气过程。根据现场观测记录, 地面降雹持续了 16 分钟, 最大冰雹直径达 40mm, 最大降水量 26.4mm。因为申请作业空域没获批准, 没有实施高炮、火箭人工防雹作业, 致使冰雹影响区受灾严重, 受灾人

数超过 6 万人,房屋损坏 11000 多间,农作物受灾面积 4000hm² 以上。跟据不完全统计,直接经济损失超过了 4000 万元。

为了了解冰雹云的发生发展过程,以便更好地减少冰雹灾害,万蓉等^[1]利用二维准弹性积云模式,对鄂西 1997 年 9 月 13 日一次积云自然降水进行了多次模拟计算。结果表明,二维模式具有较好的稳定性。另外,通过模拟计算,研究了云雨的自动转化,云、雨、霰碰并凝结作用以及降水的主要来源,并对积云内部微物理转化过程有所揭示。冯桂力等^[2]利用二维雹云模式模拟了济南地区 1996 年 7 月 24 日出现的一次冰雹过程,模拟结果表明对雹云 26 个主要微物理过程双参数化能较细致地描述强对流过程的热、动力反馈和微物理特点。根据计算结果,对该次冰雹过程进行了 AgI 催化试验,结果得出在云发展初期对暖底雹云实施高浓度的冰晶催化,可起到减少地面冰雹和增加地面降水的作用。周颖等^[3]利用三维冰雹云催化数值模式,采用立体催化数值试验,模拟催化剂量、催化高度、催化时间对高炮消雹效率和消雹区域的影响;通过比较催化雹云和未催化雹云的总含水量,分析催化消雹机制,从而揭示贵州 37 高炮防雹作业的有效性和最佳催化方案。本文利用中国气象科学研究院研发的三维弹性冰雹云模式对 2006 年 4 月 9 日下午出现在东兰县境内的冰雹天气过程实施事后数值模拟,了解冰雹云的生消过程,并进行催化数值试验。

1 模式方程组

模式方程组包括动力方程、热力方程、连续性方程和微物理量方程。

1.1 基本方程

$$\frac{\partial u}{\partial t} = -u \frac{\partial u}{\partial x} - v \frac{\partial u}{\partial y} - w \frac{\partial u}{\partial z} - c_p \theta_{v0} \frac{\partial \pi}{\partial x} + D_u \quad (1)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} = -u \frac{\partial v}{\partial x} - v \frac{\partial v}{\partial y} - w \frac{\partial v}{\partial z} - c_p \theta_{v0} \frac{\partial \pi}{\partial y} + D_v \quad (2)$$

$$\frac{\partial w}{\partial t} = -u \frac{\partial w}{\partial x} - v \frac{\partial w}{\partial y} - w \frac{\partial w}{\partial z} - c_p \theta_{v0} \frac{\partial \pi'}{\partial z} + g \left[\frac{\theta'}{\theta_{v0}} + 0.608(Q_v - Q_{v0}) - Q_c - Q_r - Q_i - Q_g - Q_h \right] + D_w \quad (3)$$

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = -u \frac{\partial \theta}{\partial x} - v \frac{\partial \theta}{\partial y} - w \frac{\partial \theta}{\partial z} + \frac{\theta_0}{c_p T_0} (L_v S_v + L_s S_s + L_f S_f) + D_\theta \quad (4)$$

$$\frac{\partial \pi}{\partial t} = -\frac{\beta^2 c_0^2}{c_p \rho_0 \theta_{v0}^2} \left[\frac{\partial(\rho_0 \theta_{v0} u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho_0 \theta_{v0} v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho_0 \theta_{v0} w)}{\partial z} \right] + f_\pi \quad (5)$$

$$\frac{\partial A}{\partial t} = -u \frac{\partial A}{\partial x} - v \frac{\partial A}{\partial y} - w \frac{\partial A}{\partial z} + S_A + F_A + D_A \quad (6)$$

$$f_\pi = -u \frac{\partial \pi'}{\partial x} - v \frac{\partial \pi'}{\partial y} - w \frac{\partial \pi'}{\partial z} - \frac{R_d \pi'}{c_v} \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} \right) + \frac{c_0^2}{c_p \theta_{v0}^2} \frac{d\theta v}{dt} + D_\pi$$

式(1)~(3)为积云的三维动力方程;式(4)为热力方程;式(5)为连续性方程;式(6)为微物理量方程,包括比湿 Q_v 变化方程,云、雨、冰晶、霰、雹的比质量 Q_c 、 Q_r 、 Q_i 、 Q_g 、 Q_h ,以及后四者的比浓度 N_r 、 N_i 、 N_g 、 N_h 的变化方程。

对方程组中连续性方程的处理见文献[4]。

式中 $A = A_0 + A'$, A_0 为背景场, A' 为模式尺度量。共有 16 个预报量,它们是水平和垂直速度 u 、 v 、 w ,位温 θ ,无量纲气压 π ,比湿 Q_v ,云、雨、冰晶、霰、雹的比质量 Q_c 、 Q_r 、 Q_i 、 Q_g 、 Q_h ,以及后四者的比浓度 N_r 、 N_i 、 N_g 、 N_h 。 U 、 V 、 θ 、密度 ρ 、 π 、 Q_v 的背景场量 U_0 、 V_0 、 θ_0 、 ρ_0 、 π_0 、 Q_{v0} 只随高度变化,其它量的背景场值均为零。

云物理量的源汇项 S_A , 降水粒子下落项 F_A 和云微物理过程源汇项方程见文献[5]; 各微物理过程的参数化方程取自胡志晋, 何观芳(1986)的结果; 次尺度混合项 D_A 见文献[5]; 边界条件见文献[6]。

1.2 计算方法

本模式模拟区域为 $60\text{km} \times 60\text{km} \times 15.6\text{km}$, 空间水平步长 $\Delta x = \Delta y = 1\text{km}$, 垂直步长 $\Delta z = 0.4\text{km}$ 。采用交错网格, 时间差分采用时间步长分离法, 对含有声波的项采用小时间步长, 欧拉前差格式; 其它量采用大时间步长、蛙跃格式, 空间用中央差。

2 积云天气的个例模拟

2.1 初始条件

2006年4月9日在广西东兰境内出现了强对流天气。因此我们利用上述三维积云模式和2006年4月9日20时河池探空资料预报积云生消过程, 由探空值计算出模式的背景场值 $U_0, V_0, \theta_0, \rho_0, \pi_0, Q_{t0}$, 其中 U_0 为西风分量, V_0 为南风分量。

对流采用低空湿熟泡启动, 最大温度扰动为 1.5°C , 最大湿度扰动为 92% , 扰动范围水平 6km , 垂直 1.6km 。

2.2 模式模拟结果

2.2.1 自然云模拟结果

模拟到3分钟时形成云, 云底高 0.8km 。云从6到21分钟发展迅速, 云顶高度由6分钟时的 2.8km 迅速抬高到21分钟时的 12km 。42分钟时云出现云砧。云中最大上升速度出现在15分钟左右达 $29\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。8分钟时云中出现过冷水, 过冷水在18分钟时最大, 总量达 327 千吨, 对冰雹成长非常有利。表1是三维层积云模式模拟的主要特征

量与实测的比较, 图1是冰雹云发展成熟时的雷达回波高显图, 观测时间是17时34分, 观测站是南宁雷达站, 方位角为 338.23° 。从表和图中可以看出, 除了模拟云的降水量偏小外, 模拟云的其它主要特征量与实测基本相符, 说明本文的三维积云模式对该个例具有一定的模拟能力。

表 1 模拟结果与观测结果的比较

| 特征量 | 积云模拟结果 | 观测结果 |
|------------|--------|------|
| 地面最大雨量/mm | 10.2 | 大雨 |
| 雷达回波强度/dBz | 48 | 62 |
| 雷达回波顶高/km | 11.6 | 12 |
| 回波水平尺度/km | 25 | 25 |

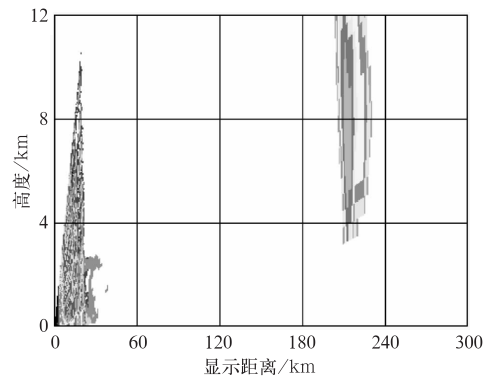


图 1 冰雹云的雷达回波高显图
时间 17:34, 南宁站, 方位: 338.23°

图2和图3分别是18分钟时总水凝物与垂直速度的垂直剖面图。比较两张图可见, 总水凝物的最大中心处在垂直速度中心的上部, 即存在水分积累区, 对冰雹的生长有利。

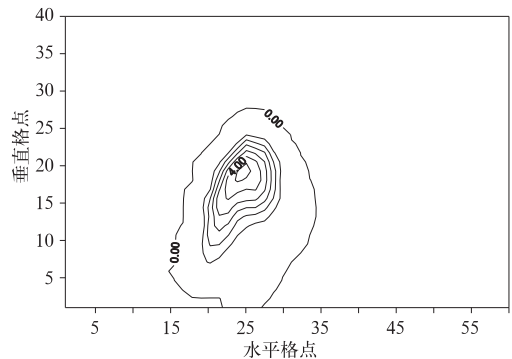


图 2 模拟自然云 18 分钟时的
总水凝物垂直剖面图/(g/kg)

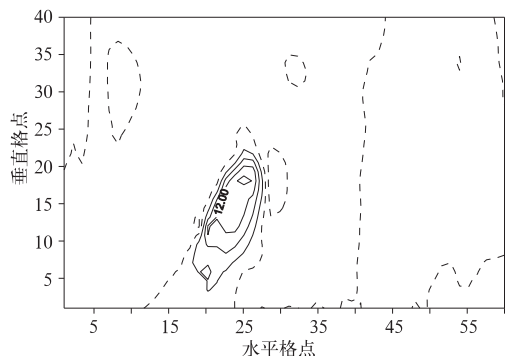


图 3 模拟自然云 18 分钟时的垂直速度垂直剖面图(单位: $m \cdot s^{-1}$)

模拟的雷达回波演变情况见图 4。

11 分钟出现初始回波,高度 4km,强度 34dBz,此时云中产生雨水、霰和冰雹,从模拟结果看霰的增长主要由碰并云滴、碰并雨滴和雨滴冻结而成。冰雹开始主要由霰自动转化为主,然后是碰冻云滴和雨滴长大。18 分钟时地面出现降水,同时出现降雹。与云水一样,在 45 分钟时出现砧状回波。

最大云水含量出现在 15 分钟达 8.5 g/kg,高度 6.4km。同时雨水含量也达到最大

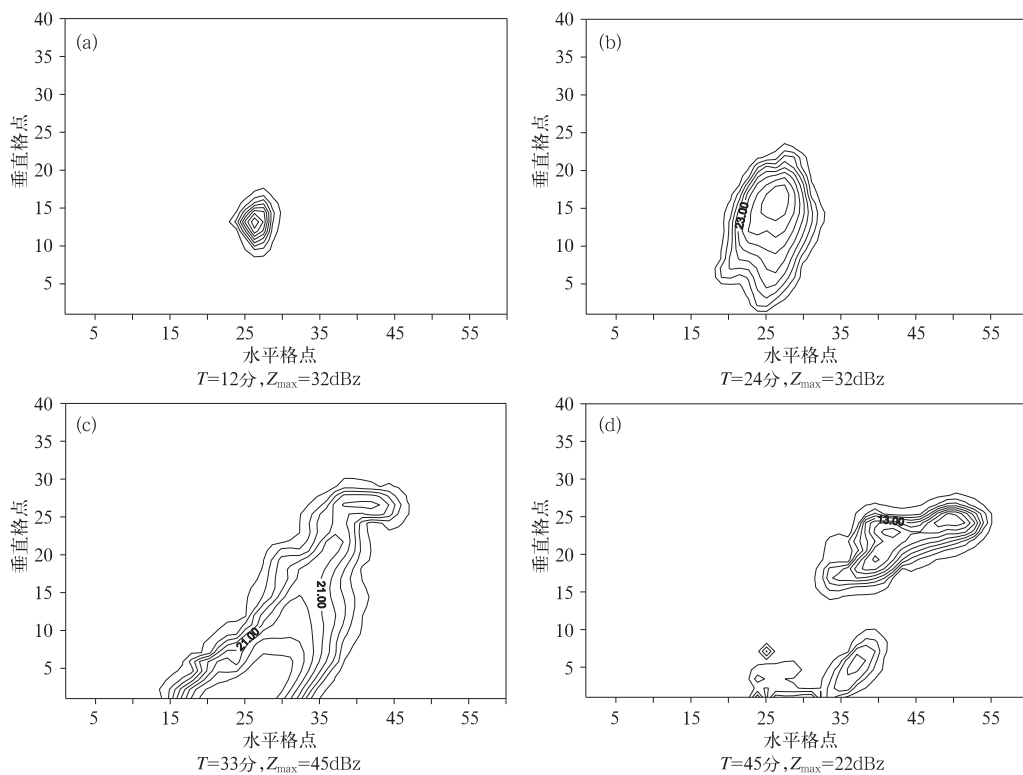


图 4 模拟积云的雷达回波演变过程(X-Z 垂直剖面)

为 2.3g/kg,在 5.6km 的高度。而最大霰含量则出现在 18 分钟达 8.1g/kg,高度为 7.6km。最大冰雹含量出现在 24 分钟为 1.6g/kg,高度 4.8km。最大冰晶含量为

2.04g/kg,出现在 45 分钟、10km 的高度上。39 分钟时雷达回波达最大 49dBz。

各时刻云水、雨水和霰总量的空间分布见图 5。

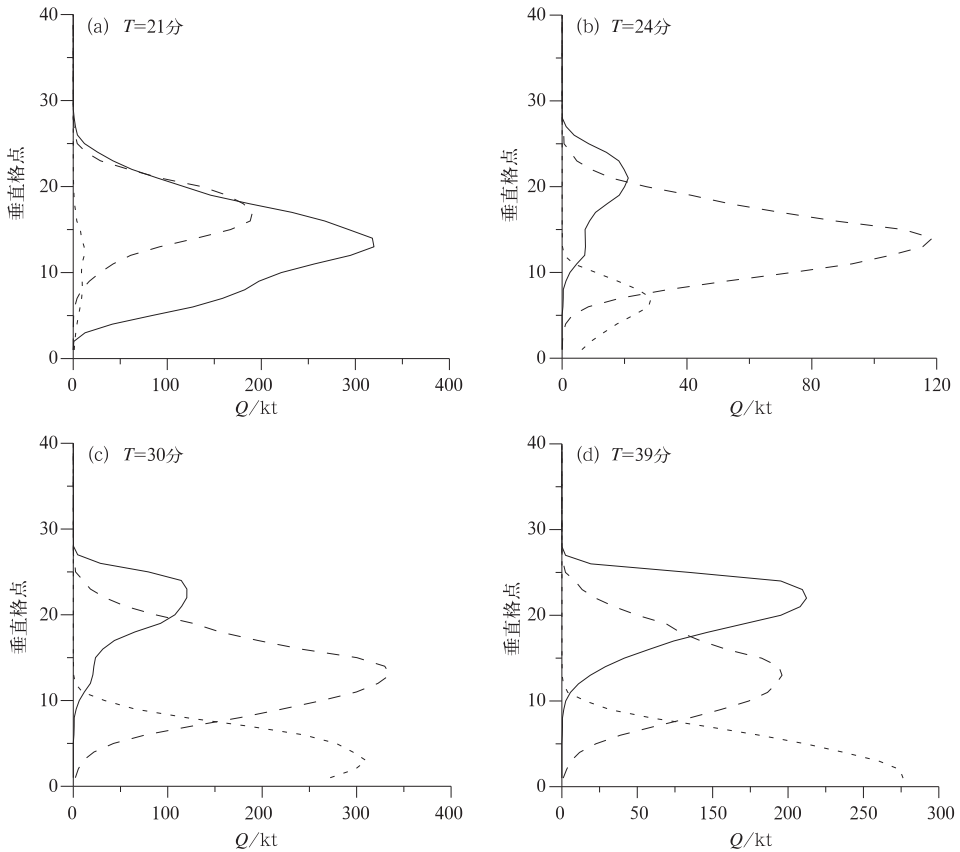


图 5 各时刻云水、雨水和霰总量的空间分布
实线：云水；短虚线：雨水；长虚线：霰

21 分钟时以云水含量为主，云水从云底 (0.4km) 开始随高度增加而增大，约到 5.2km 处达最大，然后则随高度增加而减小，到约 10.8km 处为零。霰的含量其次，2.4km 处为零，然后随高度上升而增大，在 6.8km 处达最大，接着随高度增加而减小，到云顶为零。雨水的含量则比较小。

24 分钟时以霰含量为主，分布情况同 21 分钟时的情形，云底和云顶小，云中部最大。云水和雨水的总含量相差不大，分布亦同前，但雨水接地，云水主要分布在云的上部。

30 分钟时的情况是雨水和霰的总量最大值相不大，雨水主要分布在云底部，霰主要分布在云的中部，云水主要分布在云体的上

部。

39 分钟时则三者的总量相差不大，但最大雨水含量则比其它两者的大得多。分布也是雨水在云的底部，霰在云体的中部，云水在云体的上部。

2.2.2 催化云模拟结果

本个例属混合云，即云的底部温度大于 0°C ，云中 0°C 层附近有过冷水，因此，我们利用冰晶进行催化试验。单粒冰晶的重量为 10^{-9}g 。冰晶浓度由 10^4 个/kg 到 10^6 个/kg 不等。

我们用模式进行不同时间、不同部位、不同剂量的催化模拟试验。表 2 是不同时间的催化试验结果。由表可见，在自然云形成不

久,9 分钟到 15 分钟之间处在冰晶形成期,在过冷水区的底部(4400m)实施催化,结果地面降水增加,降雹减小。在 12 分钟时催化,增雨量最大达 45.353 千吨,效果最好,同时消雹的效果亦不错,减小了降雹 20.796 千吨。在此之前催化,地面增雨量随着催化时间的增加而有所增加;在此之后催化,地面增雨量随着催化时间的增加而有所减小。总的来看,在 9~15 分钟之间催化,既能增加降水又能减小降雹。

表 2 不同时间的催化试验

 $I=24\sim 26, J=32\sim 34, H_i=10^5$ 个/kg

| 催化时间 /min | 催化高度 /m | 总降水量 /千吨 | 降雹量 /千吨 | 增雨量 /千吨 |
|--------------|------------|-------------|------------|------------|
| 自然云 | | 592.918 | 102.113 | |
| 9 | 4400~4800 | 609.658 | 99.602 | 16.74 |
| 10 | 4400~4800 | 618.038 | 93.754 | 25.12 |
| 12 | 4400~4800 | 638.271 | 81.317 | 45.353 |
| 13 | 4400~4800 | 636.719 | 80.772 | 43.801 |
| 14 | 4400~4800 | 635.940 | 79.087 | 43.022 |
| 15 | 4400~4800 | 604.609 | 89.445 | 11.691 |

表 3 是不同剂量的催化试验结果,催化时间是 12 分钟。由表可见,剂量小(冰晶浓度: 10^4 个/kg; 比含量: 10^{-5} g/kg)时,效果不

表 3 不同剂量的催化试验

 $I=24\sim 26, J=32\sim 34, k=12, t=12$ 分

| 催化剂量/(个/kg) | 总降水量/千吨 | 降雹量/千吨 | 增雨量/千吨 |
|----------------|---------|---------|--------|
| 自然云 | 592.918 | 102.113 | |
| 10^4 | 605.057 | 101.025 | 12.139 |
| 2×10^4 | 606.667 | 98.764 | 13.749 |
| 3×10^4 | 609.815 | 96.152 | 16.897 |
| 4×10^4 | 611.998 | 94.685 | 19.080 |
| 5×10^4 | 615.992 | 93.760 | 23.074 |
| 6×10^4 | 616.972 | 92.734 | 24.054 |
| 7×10^4 | 621.092 | 91.601 | 28.174 |
| 8×10^4 | 622.452 | 90.687 | 29.534 |
| 9×10^4 | 624.037 | 89.575 | 31.119 |
| 3×10^5 | 640.974 | 77.316 | 48.056 |
| 4×10^5 | 650.790 | 74.921 | 57.872 |
| 8×10^5 | 644.799 | 65.954 | 51.881 |
| 1×10^6 | 637.339 | 63.153 | 44.421 |
| 3×10^6 | 596.334 | 47.652 | 3.416 |

大明显,增雨量为 12.139 千吨,此时消雹效果也不明显,约减少 1 千吨。随着催化剂量的增加,增雨量增加,消雹量也增加。当剂量增加到浓度为 4×10^5 个/kg、比含量为 4×10^{-4} g/kg 时,催化效果最好,增雨量最大达 57.872 千吨,降雹 74.921 千吨,减小了 27.192 千吨。当剂量增加到浓度大于 4×10^5 个/kg 时,随着剂量的增加增雨量减小,但同时降雹量也减小。

表 4 不同高度的催化试验

 $I=24\sim 26, J=32\sim 34, t=12$ 分

| 催化高度/m | 降水量/千吨 | 降雹量/千吨 | 增雨量/千吨 |
|--------|---------|---------|--------|
| 自然云 | 592.918 | 102.113 | |
| 4400 | 626.017 | 88.590 | 33.099 |
| 5200 | 602.499 | 98.785 | 9.581 |
| 5600 | 601.865 | 102.954 | 8.947 |
| 6000 | 598.608 | 102.619 | 5.690 |

表 4 是不同高度的催化试验结果,催化剂量为 10^5 个/kg,在 12 分钟时催化。由表 4 可见,在较低的部位(4400m)催化效果最好达 33.099 千吨。原因是 12 分钟时自然冰晶浓度较低,只有 2844 个/kg,4400m 是过冷水的底部,因此在此时此部位催化效果较好。随着催化高度的增加,增雨量减小,在 6000m 高度催化时增雨量只有 5.69 千吨。在 4400m 到 5200m 部位催化时既能增雨又能消雹,在 5600m 到 6000m 部位催化时虽然能有小量的增雨,但降雹却反而有所增加。

通过以上分析可见,当在出现过冷水(8 分钟)后,自然冰晶浓度较低(15 分钟)前在过冷水区的底部实施适量的催化,则可达到最佳的效果。

2.2.3 自然云和催化云微物理过程的比较

催化云个例:在 12 分钟时催化,催化位置在 $I=24\sim 26, J=32\sim 34, K=12\sim 13$,催化剂量为 $H_i=1\times 10^5$ 个/kg。比较微物理过程的转化率可见,30 分钟开始,催化云的雨滴碰并云滴的速率(crc)有所减小。20 分钟开始到 37 分钟左右催化云的霰融化成雨的速率(grm)有所加大。12 分钟(催化时)到

30 分钟,催化云的冰雹融化成雨的速率(hrm)有所减小,随后则有所加大。霰自动转化成雹的速率 60 分钟前没有多大的变化,随后则有较大幅度的减小。从冰雹碰并云滴的速率(chc)来看,60 分钟后有较大的减小。冰雹碰并雨滴的速率(rhc)在 20~30 分钟时有所减小,30~50 分钟有所增大,68 分钟后减小明显。冰雹碰并冰晶的速率(ihc)在 40 分钟前后有所增加,54 分钟后减小明显。雨滴冻结成雹的速率在 15 分钟、26 分钟时减小,26~50 分钟时有所增加,65 分钟后明显减小。

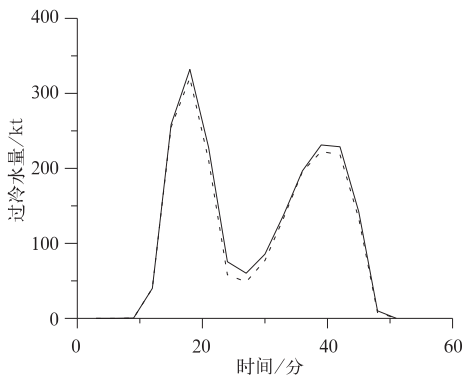


图 6 过冷水随时间的变化

实线:自然云;虚线:催化云

从图 6 可见,催化云的过冷水比自然云小,说明有部分过冷水被播撒的冰晶争食,从而增加降水。

3 结 论

所用三维积云模式能够模拟出积云的基本结构。个例催化试验表明,本个例的积云具有一定的人工催化潜力。本个例属冰雹云。催化结果与催化时间、催化部位和催化剂量有一定的相关。当在出现过冷水后,自然冰晶浓度较低时在过冷水区的底部实施适量的催化,则可达到最佳的效果,积云会增加降水,同时地面降雪量也相应减小。如果过量催化,则地面降水和降雪都会减小。

参 考 文 献

- [1] 万蓉,李盾,徐永和.利用二维积云模式对一次积云降水微物理过程的模拟[J].湖北气象,1999,(2):20-23.
- [2] 冯桂力,陈文选,刘文.一次冰雹过程人工催化的数值模拟试验[J].气象,1997,23(12):3-8.
- [3] 周颖,文继芬.贵州一次降雪过程的数值催化试验[J].成都信息工程学院学报,2006,21(5):704-710.
- [4] 胡志晋,邹光源.大气非静力平衡模式和弹性适应[J].中国科学(B辑)1991,(5):550-560.
- [5] 毛玉华,胡志晋.强对流云人工增雨和防雹原理的二维数值研究[J].气象学报,1993,51(2):184-194.
- [6] 邹光源.用二维冰雹云模式预报桂西北地区降雪[J].气象,2004,30(3):39-42.