

人工影响积雨云机制的数值研究

何观芳 胡志晋

(国家气象局气象科学研究所)

提 要

本文用一维时变积雨云模式对一块积雨云进行了播撒人工冰晶或水滴的多种数值试验,得到了增加降水或减轻冰雹灾害等效果。对各种催化方法的作用作了分析对比,并得出人工催化可能改变降水元形成的主导微物理过程。

一、引 言

积雨云人工降水和防雹是人工影响天气的主要目标。通常采用播撒催化剂的方法使云中增加一定数量的人工冰晶胚胎或雨滴胚胎,从而改变自然降水过程的发展。用数值模拟方法定量地研究人工影响积雨云的原理对于指导作业及提高实效具有重要意义。

Hsie 等^[1](1980)、Kopp 等^[2](1983)、Farley 等^[3,4](1986)、(1987)用二维积雨云模式模拟了播撒碘化银和干冰的人工降雨和防雹过程。他们的模式对降水元(雹胚)的形成过程模拟十分粗糙,过高估计了自然过程中冻滴胚(成雨—冻结)和雹胚(冰晶长大成雹)的产生效率。

胡志晋等^[5](1987)提出了一个积雨云微物理模式,包括的微物理过程较全面,有26种之多。本文利用这个模式在一维时变框架内对人工催化积雨云作原理性的数值试验。

本文主要对1981年7月19日美国CCOPE计划中的一个积雨云进行模拟和催化数值试验。对不同的催化方式分别作了下述四种模拟:(1)某一时刻在模拟云的一定部位里增加一定浓度的冰晶胚胎(初始质量为 10^{-9}g),以模拟火箭、高炮、焰弹等在云内直接播撒成冰剂的催化作用;(2)在一段里以一定时间间隔反复地在一定部位里增加冰晶胚胎,以模拟云内反复播撒成冰剂的作用;(3)将自然本底冰核浓度在 -30°C 以上温度区间里增大10到100倍,以模拟本底冰核浓度的作用,也是近似地模拟地面长期播撒碘化银的可能作用;(4)某一时刻在云中一定部位增加一定浓度的雨滴胚胎(质量为 $4.2 \times 10^{-6}\text{g}$)以模拟云中播入吸湿性颗粒的催化作用。因本文的目的是研究人工催化的原理,所以对催化剂的扩散、形成冰晶或雨滴胚胎的过程都不予详细模拟,即在催化是最有效最直接的假定下,讨论人工造成的微物理变化能否引起降水的显著变化。

二、数值试验结果

1. 自然云(例 1)

用 1981 年 7 月 19 日美国 CCOPE 计划的一个积雨云的探空资料作输入,用我们的模式计算了该云发展过程,结果列于图 1(a、b)、图 2 和表 1 中。它们与实测结果相比较为一致(见表 2)。

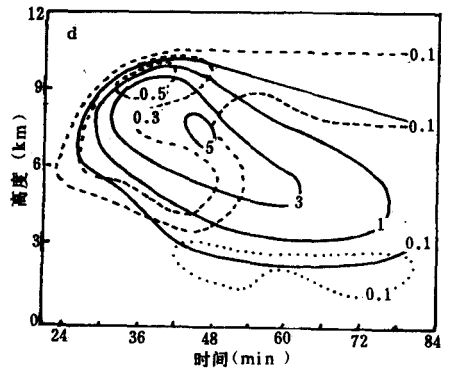
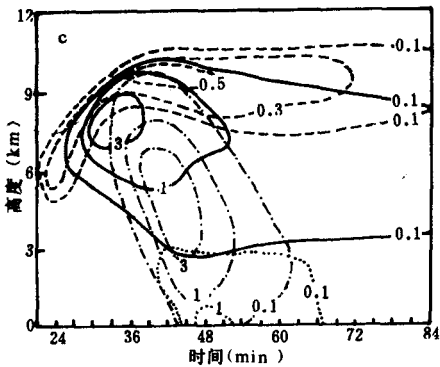
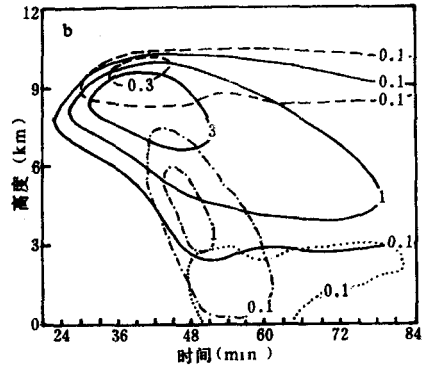
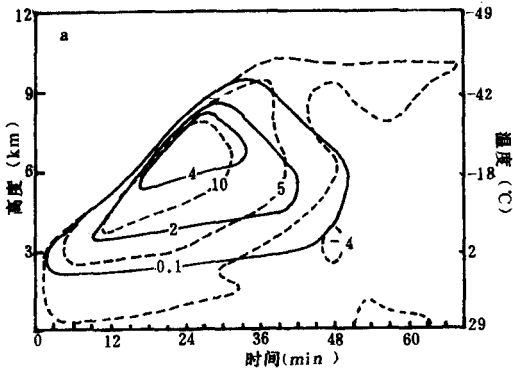
表 1 人工催化积雨云数值试验结果一览表

序号	播云方式					降水量 (mm)	降雹量 (mm)	降水效率 (%)	最大降水	
		播撒量 (个/kg)	高度 (km)	时间 (min)	频数				时间 (min)	速率 (mm/3min)
1	自然云					3.92	0.41	6.7	54	1.04
2	冰晶	10 ⁷	4.9—5.8	21	1	9.24	1.45	15.4	51	2.14
3	冰晶	10 ⁷	4.9—5.8	24	1	6.40	0.70	10.7	54	1.47
4	冰晶	10 ⁷	4.3—5.8	24	1	3.63	0.27	6.1	54	0.72
5	冰晶	10 ⁷	4.9—5.8	18	1	11.47	3.09	18.9	48	3.09
6	重复冰晶	10 ⁷	4.9—5.2	21	7	0.045	0.006	0.07	78	0.007
7	重复冰晶	2×10 ⁶	4.9—5.2	21	7	1.32	0.15	2.2	57	0.28
8	重复冰晶	2×10 ⁶	5.5—5.8	21	7	3.69	0.48	6.2	54	0.88
9	地面冰核	×100				9.54	3.50	14.9	42	2.75
10	大滴	10 ³	4.9—6.1	18	1	8.94	2.03	15.0	45	1.45
11	大滴	10 ³	4.9—6.1	21	1	8.19	1.60	13.8	48	1.63
12	大滴	10 ²	4.9—6.1	21	1	5.09	0.57	8.7		
13	大滴	10 ³	3.7—7.6	21	1	9.97	2.02	16.6	48	2.28
序号	方式	最大霰量			最大雹量			最大冰晶量		
		量 (g/kg)	高度 (km)	时间 (min)	量 (g/kg)	高度 (km)	时间 (min)	量 (g/kg)	高度 (km)	时间 (min)
1	自然云	5.0	8.9	39	1.4	5.3	48	0.42	10.7	39
2	冰晶	4.0	9.2	33	2.8	5.9	42	0.55	10.7	36
3	冰晶	4.3	8.9	36	1.8	5.3	45	0.64	9.8	33
4	冰晶	4.2	9.2	36	0.6	5.3	45	0.91	8.3	30
5	冰晶	3.0	8.9	30	3.4	6.8	39	0.91	9.8	48
6	重复冰晶	5.2	8.6	45	0.006	9.2	39	0.69	10.4	36
7	重复冰晶	4.5	8.0	45	0.5	7.7	45	0.53	10.4	36
8	重复冰晶	4.6	9.2	36	1.2	6.5	42	0.46	10.4	36
9	地面冰核	1.2	6.2	51	2.6	5.6	36	2.43	10.7	39
10	大滴	3.4	9.2	33	1.9	5.9	45	0.62	10.7	39
11	大滴	3.8	9.2	33	1.9	6.5	42	0.55	10.7	39
12	大滴									
13	大滴	3.1	9.2	33	2.2	6.5	42	0.70	10.7	42

表2 自然云模拟结果同实测资料对比

项 目	云底高 (km)	最大云顶高 (km)	云顶升速 (m/s)	迅速发展阶段 (min)	液水云直径 (km)	最大液水含量	
						高度(km)	量(g/m ³)
实测	3.8	10.5	5—7	16:20—16:30	6	7	2.5
模拟	3.2	10.6	3—5	15—27	6—7	6.5	2.7

项 目	液水始变干 时(min)	初始霰出现		最大垂直速度 (m/s)	云底上升速度 (m/s)	初始雷达回波		云始消 (min)
		高(km)	时(min)			高(km)	时(min)	
实测	16:32	5.8	16:26	10—15	1—5	7	16:23	16:32
模拟	30	7	21	10—14	1—5	7	21	33



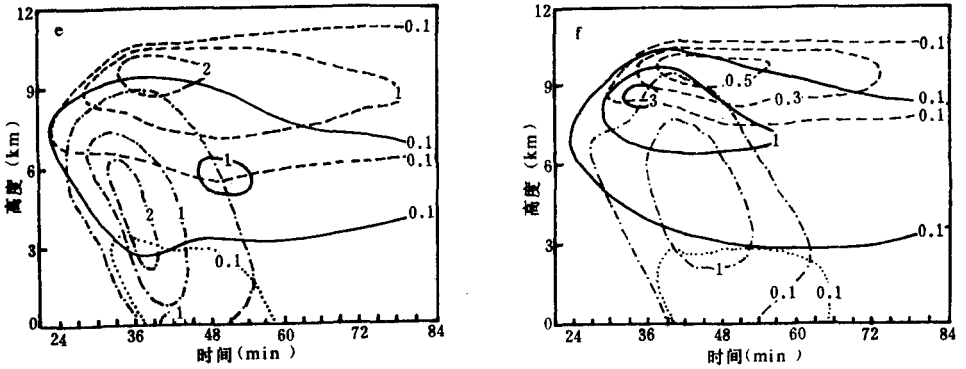


图 1 (a)自然云(例 1)中上升气流速度(虚线)和云水量(实线)高度时间剖面(b)、(c)、(d)、(e)、(f)分别为自然云(例 1)、冰晶播撒(例 2)、重复冰晶播撒(例 6)、背景冰晶(例 9)和大滴播撒(例 10)中霰水量(实线)、霰水量(点划线)、冰晶量(虚线)和雨水量(点线)的高度时间剖面

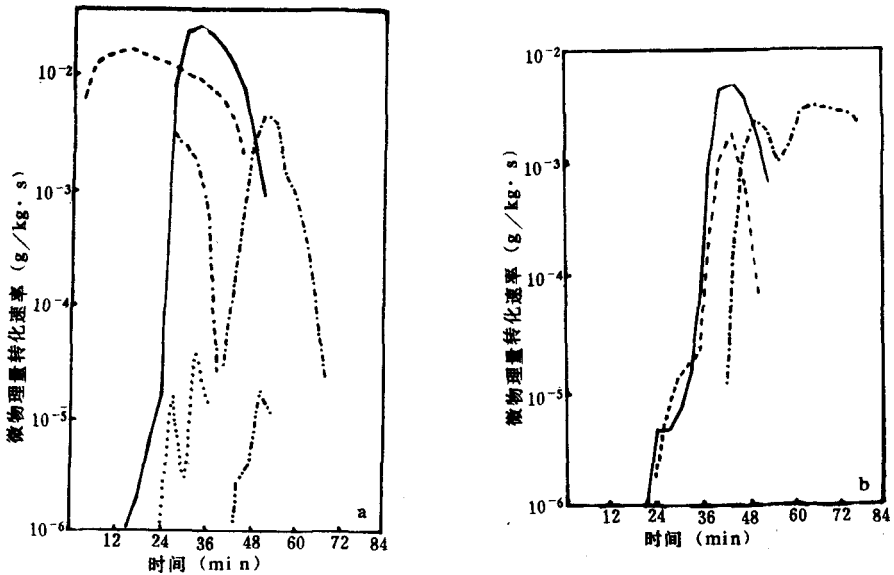


图 2 自然云中(例 1)微物理转化速率 (a)Svc(虚线), Ccg(实线), Mhr(点划线), Acg(二划一点线), Mrg+Cri(点线) (b)Agh(实线), Cch(虚线), Mgr(点划线)

由图 1(b)可见,大量的降水粒子是在 27 分钟时在 9km(-31~-37℃)处出现的,它们是云滴通过凝结和随机碰并过程产生的小雨滴因低温冻结转化为霰(Acg)。该过程的速率很大($3 \times 10^{-3} \text{g/kg} \cdot \text{s}$),霰浓度很快达到 10^4 个/kg 的量级。由于云水量很大,霰粒碰冻云滴增长的速率很高($Ccg = 2.8 \times 10^{-2} \text{g/kg} \cdot \text{s}$),在 27 分到 36 分的 9 分钟内霰水量从 0.4 增大到 4.8g/kg,平均直径从 0.3 增大到 0.7mm。

与此同时该高度上的云水量大量消耗,从 4.7 减小到 0.5g/kg。随着云内升速的减小,霰粒下落扩散到较低层次,在 6.8km(-19℃)附近,39 分钟时霰粒浓度近 1000 个/kg。那里的云水量仍维持很高值(3.4g/kg),具有良好的撞冻增长条件,从 39 分到 45 分霰粒平

均直径从 1.5 增大到 2.2mm。大量霰粒长大成霰块,在这 6 分钟内霰水量从 0.1 增大到 1.2g/kg,浓度达 9 个/kg。这是成霰的关键阶段。冰雹撞冻增长($C_{ch} = 1.8 \times 10^{-3} \text{g/kg} \cdot \text{s}$),

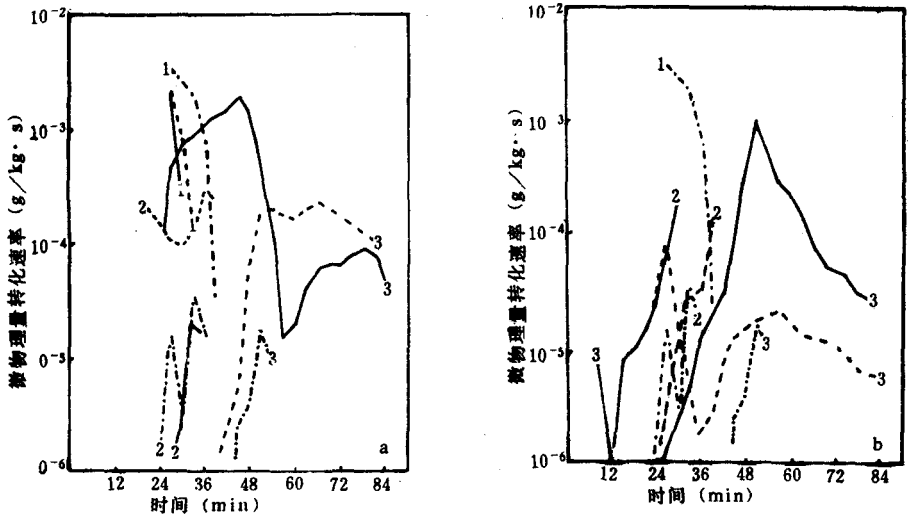


图3 催化云与自然云中主要成雨过程的比较,图中数字表示:①Acg ②Mrg+Cri,③Aig;点划线为自然云的相应值,(a)实线为例6,虚线为例10的相应值(b)实线和虚线分别为例9和例2的相应值

下落到 0°C 线以下大部分融化成雨($M_{hr} = 4.6 \times 10^{-3} \text{g/kg} \cdot \text{s}$)。霰和雨在 51 分时到达地面,54 分时降水最强。高层的霰粒随云的消散不断下落,最大值所在高度从 42 分的 9km 下降到 75 分时的 5.6km,相应地霰水量从 4.6 减小到 1.3g/kg。霰粒部分长大成霰块,小部分融化成雨($M_{gr} = 3 \times 10^{-3} \text{g/kg} \cdot \text{s}$)下落及地,大部分蒸发了。冰晶是通过核化形成,温度低于 -40°C 区核化率很高($NP_{vi} = 2.5 \times 10^5 \text{个/kg} \cdot \text{s}$),最大冰晶浓度达 $3.7 \times 10^7 \text{个/kg}$ 。由于过冷水少,高层冰晶不能长大下落,长期在那里维持成为云砧。本例降水量 3.9mm,降霰量为 0.41mm。降水效率仅 6.7%。从本例云的升速和云水量的演变来看发展最旺盛的阶段约在 15 分到 33 分;而降水发展的关键阶段为 39 分到 48 分。这种时间上的不匹配可能是造成降水效率低的原因。

2. 云中播撒冰晶(例 2)

在例 2 中,我们假定在 21 分钟时在 4.9~5.8km(-6~-11°C)处引入人工冰晶,其浓度为 10^7个/kg ,平均质量为 10^{-9}g ,谱分布同自然冰晶相似。由图 1(c)、图 3(b)和表 1 可见,从 21 分到 27 分人工冰晶随上升气流升到 9km 的云顶部分。通过凝华,冰晶量从 0.01 增大到 0.5g/kg,平均直径从 4 长到 40μm。冰晶最大浓度的位置也增高到 9km 附近。冰晶分布范围明显扩大。由于冰晶平均半径和比质量的加大,在 24 分到 30 分冰晶长大成霰的速率比自然云增大几个量级。霰粒碰冻云滴、开始有少量长成霰块(浓度为 0.07/kg)。在 33~42 分,中层云水量较丰富(1.9~0.9g/kg),霰粒长得最大(2.4mm),大量地转化为霰块($A_{gh} = 7.5 \times 10^{-3} \text{g/kg} \cdot \text{s}$),浓度达 16/kg,比质量增大到 2.8g/kg。霰量最大值所在高度从 8km 降到 5km。霰、霰下落在暖区融化成雨,39 分降水及地。42 分后云下出现下沉气

流,云底抬高,51 分时降水强度达到最大,为 2.14mm/3min。降水效率也大大提高,达到 15.4%。引晶催化后冰晶成霰的过程大大加强而且提前,成为产生霰粒的主导过程,霰粒长大到霰的时间比自然云提早约 6 分钟,所在位置也略有提高。

3. 云中反复播撒冰晶(例 6)

在例 6 中,我们假定从 21 分到 42 分在 4.9—5.2km 处每隔 3 分钟引入人工冰晶,浓度为 $10^7/\text{kg}$,平均质量 10^{-9}g 。由图 1(d)可见,反复播撒造成冰晶长大成霰的过程在中高层长期维持,霰粒在高层积累浓度达 $3 \times 10^4/\text{kg}$,比质量达 4.9g/kg,但平均直径仅 0.7mm,云水量也被消耗殆尽。霰粒长大成霰的过程很弱,只有 $10^{-4}\text{g}/\text{kg} \cdot \text{s}$ 的量级,产生的霰量只有 0.05g/kg。这些冰霰在已衰退的云中下落,增长很慢。少数落到暖层融化成雨。本例霰水量很大,在暖层霰粒融化成雨,造成地面降雨持续时间特长,雨强小,最大雨强在 78 分才出现,仅 0.007mm/3min(表 1)。

由图 3 可见,人工冰晶的凝华使云中水量减小。不利于云滴自动转化为雨滴,其作用时间比自然云要短很多,位置也高。本例计算中出现了典型的贝吉隆过程——云滴蒸发、冰晶增长。这在我们模拟的大量对流云例子中是比较少见的。本例地面降水量仅 0.045mm,降霰仅 0.006mm。反复播撒大量冰晶可能消除该例地面降霰,但降雨量也被抑制(表 1)。

4. 背景冰晶浓度的增大(例 9)

在例 9 中,假定冰晶本底浓度在 -30°C 以上增加 100 倍来计算,以了解本底冰核的作用以及近似地模拟地面连续大量播撒碘化银的情况,结果列于图 1e、图 3 和表 1。较高温下形成的冰晶(浓度达 600/kg),因云中初期升速较小,能长得较大,部分转化成霰。 A_{ig} 短时达到 $10^{-6}\text{g}/\text{kg}$ 的量级,9 分钟时霰浓度已达 30/kg。霰粒撞冻云滴迅速长大,24 分平均直径达 2.5mm,部分转化为霰, A_{gh} 接近 $10^{-3}\text{g}/\text{kg} \cdot \text{s}$ 。此后,中层(-20°C 附近)冰晶浓度维持 $2 \times 10^5/\text{kg}$ 左右,而平均半径迅速长大,各种冰相粒子都加速发展(见图 3b)。冰霰下落,部分融化成雨,33 分降水及地,36 分时霰水量达最大。从 33 分到 42 分中层霰水量逐渐减小。此后因下层升速减小,冰晶在云中增长时间较长,中层的冰晶平均半径迅速增大到 6.3 μm 。 A_{ig} 增大了约 2 个量级,造成本例霰水量特迟才出现极大值(见图 1e)。这些霰粒下落,部分融化成雨降到地面。本例总降水量 9.5mm,其中降霰量为 3.5mm,分别比自然云增多 143%和 754%。降水效率提高到 14.9%(表 1)。

本例降水是纯冷云过程。霰、雹的出现,雹和地面降水达到极大值的时间都比自然云的提早了十多分钟。降水发展的主要过程集中在云的中层(-20°C)进行。由于降水发展在时空上同云中升速和云水量大值匹配较好,降水效率就明显提高。

5. 云中播撒大滴(例 10)

在例 10 中,假定在 4.9~6.1km 范围内播入吸湿性颗粒,它们在 18 分时形成浓度为 $10^3/\text{kg}$ 、质量为 $4.2 \times 10^{-6}\text{g}$ 的小雨滴,其谱分布同自然雨滴相似。为了保持水质量守恒,该处的云水量被减去了人工雨滴相同的比质量。由图 1(f)可见,人工小雨滴随气流上升并

碰并云滴长大,21分雨滴位置上升到6.5km,雨水量从 4×10^{-3} 增大到 1.5×10^{-2} g/kg。在云顶附近(8km, -26°C)部分雨滴通过冻结($\text{Mrg} = 1.3 \times 10^{-4}$ g/kg·s)和碰并冰晶($\text{Cri} = 1 \times 10^{-4}$ g/kg·s)转化为霰(图3b),比水量达到 1.7×10^{-2} g/kg。此后几分钟内雨滴绝大部分冻结成霰。24—39分在8km(-26°C)处霰浓度达到 10^2 /kg,并维持;比质量通过碰冻云滴而从0.14增大为1.7g/kg,平均直径从1.5mm发展为2.1mm。大量霰粒长大成雹($\text{Agh} = 10^{-3}$ g/kg·s)。加上碰冻云滴($\text{Cch} = 10^{-3}$ g/kg·s)在7.4km处雹量从 8×10^{-3} 增加到1.57g/kg。27—30分云滴在高层(8.6km)通过自动转化产生小雨滴,冻结成霰($\text{Acg} = 10^{-2}$ g/kg·s),但持续时间很短。少数霰粒长大下落,成为中层霰粒的补充来源。39分降水开始及地,45分降水最强,比自然过程提前9分钟。高层霰粒大部分没有落到地面,对降水贡献很小。

同自然过程相比,本例引入的人工雨滴浓度虽小,但使整个降水过程明显提早。这是因为人工雨滴能直接开始碰撞云滴增长。本例霰长成雹和雹碰冻云滴过程的开始时间均提早了12分钟。这样能充分利用对流发展阶段提供的凝结水量,提高降水效率,使降水量增加了130%,但降雹量也明显加大了。

6. 其它播云试验

我们还计算了不同部位不同时刻引入不同浓度的冰晶、雨滴胚胎的催化过程。结果亦列于表1。从表1可见,云中微物理特征和催化效果对这些催化技术参数是相当敏感的。

三、结论与讨论

1. 在云底较冷的对流云中降水增长微物理过程的关键在于霰的生长和雹的形成。霰的形成有三种途径:(a)冰晶长大超过阈值尺度后撞冻过冷云滴长大成霰(Aig),如本文中例2—9;(b)雨滴在 0°C 以下温度环境中冻结(Mrg)或撞冻冰粒子冻结成霰(Cri),如本文中例10—13;(c)云滴群通过自动转化过程长出雨滴胚胎,由于冻结率同水滴体积成正比,所以它们在低温下容易冻成霰粒(Acg),如本文中例1。

2. 云中动力过程和降水微物理过程的匹配对降水效率有较大的影响。本例1中自然云的升速和云水量在15—33分时在云的中偏高部位达到最大(见图1a),但降水过程较迟,雹的产生(Agh)主要在39—51分,两者匹配不好,未能充分利用云水资源,降水效率较低。在例2、6、9、10的催化过程中雹的产生(Agh)明显提前,这样就使动力和微物理过程较好匹配,更好地利用云水资源,提高降水效率。人工降水的这种基本思路同胡志晋^[6](1985)模拟盐粉催化不同生命史的暖积云时得出的结果是一致的。

3. 当引晶部位较高时,消雹效率降低(比较例7与例8)。此时冰晶随气流上升到云顶的增长时间缩短,冰晶凝华增长的温度条件也变差,不利于长大成霰去“争食”云水消雹。这对人工降水也很重要。所以在催化时要求作业部位不能太高,更重要的是催化剂必须具有良好的高温成冰性能。

4. 人工引入雨滴胚胎能直接开始降水碰并增长过程,是最为直接的催化方法。从表1例10—13看出,对于云底较冷的积雨云,引入大水滴也能提前加速降水过程。它们有效地

将云水转化为降水。长大了的雨滴在冷区转化为霰,初始尺度较大,有利于长大为雹。模拟还发现人工引入雨滴胚胎对冰晶过程有一定作用。

5. 模拟结果表明不论冰晶催化或大水滴催化都有一定的动力效应。主要通过凝华潜热释放,降水转化加强或减轻液水负荷以及降水提早下落促进云下下沉气流发展等机制。但对降水过程的作用不甚明显。

综上所述,这一模式有能力模拟对流云中主要微物理过程以及引入冰晶、大滴增加降水或消雹的过程。但所用的一维时变框架在动力学方面过分简单,缺乏能力模拟多单体、超级单体、飑线等对流云的结构和物理过程。因此,进一步在二维和三维框架中作数值研究是十分必要的。

参 考 文 献

- [1] Hise E. y., R. D. Farley, H. D. Orville, Numerical simulation of ice-phase convective cloud seeding, *J. Applical. Meteor.*, **19**, 950—977, 1980.
- [2] Kopp F. J., H. D. Orville, R. D. Farley, J. H. Hirsch, Numerical simulation of dry ice cloud seeding experiments. *J. Climate Appl. Meteor.*, **22**, 1545—1556, 1983.
- [3] Farley, R. D., & H. D. Orville, Numerical modeling of hailstorms and hailstone growth, Part I : Preliminary model verification and sensitivity test, *J. Appl. Meteor.*, **25**, 204—2035, 1986.
- [4] Farley, R. D., Numerical modeling of hailstorms and hailstone growth, Part I : Simulation of an alberta hailstorm natural and seeding cases, *J. Appl. Meteor.*, **26**, 789—812, 1987.
- [5] 胡志晋、何观芳, 积雨云微物理过程的数值模拟 (一) 微物理模式, *气象学报*, **45**, 4, 467—484, 1987.
- [6] 胡志晋、严采繁, 盐粉催化不同生命史的浓积云的数值模拟, *大气科学*, **9**, 62, 1985.

NUMERICAL STUDY ON MECHANISM OF ARTIFICIAL MODIFICATION OF CUMULONIMBUS CLOUDS

He Guanfang Hu Zhijin
(Academy of Meteorological Science, SMA)

Abstract

A series of numerical experiments have been done to test the seeding effect of artificial ice-crystals or raindrop embryos using a one-dimensional time dependent cumulonimbus cloud model. Some effects of precipitation enhancement or hail reduction are achieved by seeding in different cases. Analysis results show that the artificial modification can change the leading microphysical process of precipitation element formation.