

人工催化暖云底积雨云的个例数值试验

吴明林

胡志晋

(福建省气象科学研究所)

(国家气象局气象科学研究院)

提 要

本文用一维积雨云双参数模式模拟了福建雨季一块发展强度中等、云底较暖的积雨云自然降水过程,发现该云有两段降水:前段为暖云降水,后段有冰相过程参与。对这块云进行的一系列人工催化数值试验表明,一定方式的冷云催化或暖云催化能使后段降水增加,其效果同催化方式有关,最多可达总降水量的24%。文中对人工催化这类积雨云的增雨机制进行了讨论,得到了一些有益的启示。

一、引 言

十几年来福建和我国南方各省进行了大量的高炮(或火箭)人工降水作业,对云底较暖的积雨云引晶催化。人们希望了解其催化机制,以便指导作业的正确进行。最近沈鹰等^[1]曾用一个包含了冰相的积云模式对福建积云进行了冰晶催化的数值模拟,但该模式对冰相的处理过分简单。本文应用胡志晋的一个一维时变双参数积雨云模式^[2]模拟了福建雨季(5—6月)积雨云的发展演变过程,并作了大量的催化数值试验。结果表明,对于一小部分积雨云引晶催化可能增加降雨。本文介绍其中一个个例的结果。

二、模式概况

本模式考虑了积雨中常见的五种水粒子:云滴、雨滴、冰晶、霰和雹,以及这五种水粒子相互作用的26个微物理过程,模式不仅预报各水粒子比质量的变化,也预报其比浓度的变化。模式所用的动力-热力框架是一个综合夹卷模式,认为云内气流辐合应由水平外流和云体半径改变来平衡。有关本文的积雨云微物理模式部分详见文献[3],一维时变动力-热力框架以及边界条件和初始扰动等参见文献[4]。

在本文计算中,模式主要参量取值如下:云体初始半径 $R_c = 5000$ m,最大初始扰动升速 $W_c = 1$ ms⁻¹,湍流扩散系数 $k = 100$ m²s⁻¹,云底滴谱特性值 $N_0/D_0 = 1200$,运动学夹卷和参数化夹卷的比率 $C_c = 0.2$ 。在微物理模式的冰核化方程中 N_{in} 和 B_{in} 取福建石塔山的实测值,其它微物理参量与文献[3]相同。

本文1989年2月27日收到,9月13日收到修改稿。

本文是国家气象局气象科学基金资助课题。

三、自然降水过程的模拟

以1983年6月10日福州08时探空资料经预报订正后作为模式输入,模拟产生一块中等强度的积雨云,该云生命史约18分钟(以地面降水终止时间计),云顶高度为7.5km,温度为-13.9℃,云内外温差最大值为1.95℃,云内最大上升气流为8.95ms⁻¹。该云各主要参量的时空剖面见图1。由图1(a)可见云中有两个高云水区:一个在暖区,一个在冷区。与这两个高云水区相对应,产生了两阵降水,第一阵降水是在暖区进行的,云雨转化过程约在25分钟开始,基本无冰相过程参与,因此是单纯的暖雨降水;第二阵降水在冷区进行,因此有冰相粒子参与,情况要复杂得多。由图1(b)可见,由于云顶不高,冰晶核化率极低($P_{vi}=9.32\text{kg}^{-1}\text{s}^{-1}$ 指最大值,下同),在云体进入0℃层后很长时间内云中冰晶浓度小于 10^3kg^{-1} ,约在56分钟冷区云雨转化过程开始,新产生的雨滴和冰晶撞冻是一个非常迅速的过程(撞冻率 $C_{vi}=0.023\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}\text{s}^{-1}$),霰粒子很快由撞冻而产生,霰在-3~-8℃区域碰并云滴,引起 Hallett-Mossop 繁生过程而使冰晶增多(最大繁生率 $P_{ci}=260\text{kg}^{-1}\text{s}^{-1}$),冰晶又撞冻雨滴产生霰,霰又碰并云滴繁生冰晶,通过这个“撞冻-繁生”正反馈过程,冰粒子浓度和霰水量很快增加,部分霰粒子转化为雹,霰和雹在0℃层以下融化成雨滴,因此第二阵降水是暖雨过程发动的冰相降水。图2为地面3分钟雨强的时间变化曲线,由图可见,和两阵降水相对应地面雨强呈双峰分布,整个过程降水22.7mm,地面无降雹。

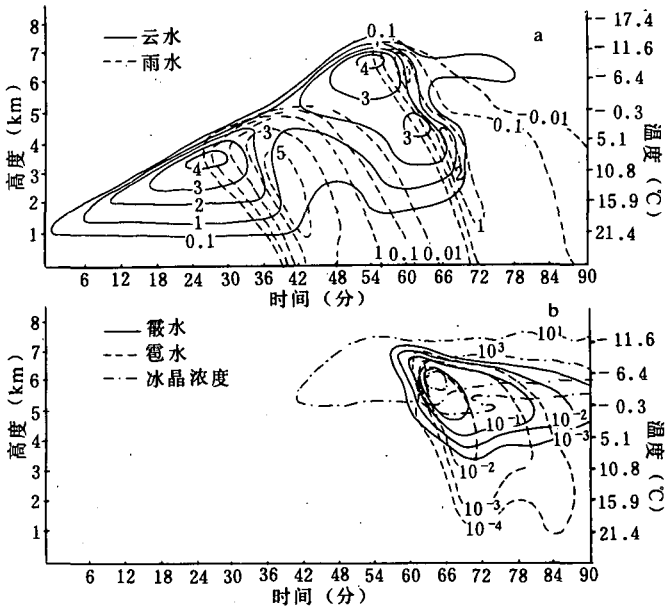


图1 自然云各主要参量时空剖面图(a)云水、雨水(b)霰水、雹水、冰晶浓度

1983年6月10日福州位于地面冷锋锋前,北岭雷达站观测表明,当日福州地区主要以分散对流型回波为主,回波顶高平均为7—10km,17—18时福州上空观测到一块积雨云,该积雨云在福州站降水22.8mm,但无实测云顶高度资料。

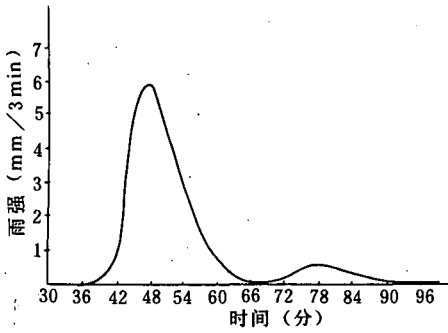


图2 自然模式云地面3分钟雨强分布

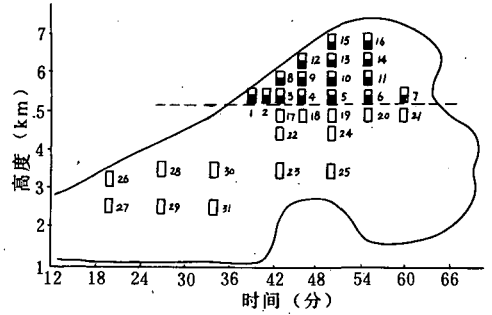


图3 暖云催化和冷云催化时空分布示意图
(□为暖云催化, ■为暖云或冷云催化, 虚线为0℃层位置)

四、人工催化的数值试验

在本模式中假定在云体发展的一定时刻和一定高度上,在相邻两个网格点内(垂直影响范围约为500m)分别让冰晶浓度 N_i 和雨滴浓度 N_r 的数值瞬间成量级地增加(它们的初始质量很小),来近似模拟冷云催化试验和暖云催化试验。在模式中还假定冰晶核化方程中 N_{in} 在整个模拟过程中在所有高度上以 10^6 增加,来近似模拟地面碘化银烧烟试验。本文应用这三种方法进行了一系列的催化试验。图3给出了冷云催化和暖云催化的时空位置示意图,表1给出了各位置的具体时间和高度。

表1 催化位置时间、高度一览表

编号	时间 (min)	高度 (10 ³ m)	编号	时间 (min)	高度 (10 ³ m)	编号	时间 (min)	高度 (10 ³ m)
1	39	5.4	12	46	6.3	23	43	3.5
2	41	5.4	13	50	6.3	24	50	4.4
3	43	5.4	14	55	6.3	25	50	3.5
4	46	5.4	15	50	6.8	26	20	3.2
5	50	5.4	16	55	6.8	27	20	2.5
6	55	5.4	17	43	4.9	28	27	3.5
7	60	5.4	18	46	4.9	29	27	2.5
8	43	5.8	19	50	4.9	30	34	3.5
9	46	5.8	20	55	4.9	31	34	2.5
10	50	5.8	21	60	4.9			
11	55	5.8	22	43	4.4			

1. 冷云催化试验

(1) 不同时空位置的催化试验

本文选择 $N_i = 5 \times 10^5 \text{kg}^{-1}$ 的剂量进行了不同时间不同高度的催化试验,催化结果见

表 2, 由表可见催化效果随催化高度和时间的不同而异。1—4 号位置催化相对增雨均在 17% 以上, 而其他位置不超过 4%。可见播云效果对催化时间和高度是相当敏感的。本例要求在云体发展到 0°C 层以上的前期阶段在紧贴 0°C 层的地方人工产生冰晶, 才有增雨效果。这对催化剂的成冰温度提出了严格要求。

表 2 不同位置冷云催化降水一览表

编 号	催 化 降 水 (mm)	相 对 增 雨 (%)	绝 对 增 雨 (mm)	编 号	催 化 降 水 (mm)	相 对 增 雨 (%)	绝 对 增 雨 (mm)
1	26.98	18.91	4.29	9	22.69	0	0.00
2	27.11	19.48	4.42	10	22.75	0.26	0.06
3	28.14	24.02	5.45	11	23.07	1.67	0.38
4	26.75	17.89	4.06	12	22.70	0.04	0.01
5	23.33	2.82	0.64	13	22.75	0.26	0.06
6	23.43	3.26	0.74	14	22.9	0.03	0.01
7	22.59	-0.44	-0.10	15	22.74	0.26	0.05
8	22.68	-0.04	-0.01	16	22.76	0.31	0.07

(2) 不同剂量的冷云催化试验

选择表 1 中催化效果最好的 3 号位置进行不同剂量的催化试验, 催化效果见表 3。由表可见在本文所用剂量范围内催化效果随剂量的增加而增加, 这与胡志晋^[5]在层状冷云催化数值试验的结果相同。图 4 给出了不同剂量地面 3 分钟雨强随时间的变化曲线, 由图可见催化主要促使第二阵降水提前且加大, 当剂量较小时催化曲线与自然降水曲线基本相同, 随着剂量的增加第二降水峰值不断加大。

表 3 不同剂量的冷云催化结果

参 量	剂 量						
	0	1	2	3	4	5	6
总降水 (mm)	22.689	22.698	22.706	23.605	26.399	28.142	29.241
相对增雨 (%)		0.04	0.08	4.64	16.35	24.03	28.88
绝对增雨 (mm)		0.009	0.017	0.916	3.710	5.453	6.552

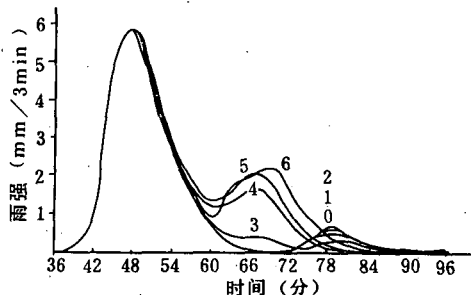


图 4 不同剂量冷云催化地面 3 分钟雨强曲线(图中数字表示不同剂量的编号同表 3)

2. 暖云催化试验

(1) 不同时空位置的催化试验

本文选择 $Nr = 10^6 \text{kg}^{-1}$ 的剂量, 对自然云进行了不同时间不同高度的暖云催化试验 (见图3)。结果见表4。由表可见与冷云催化一样, 催化增雨效果随催化位置的不同而异。对第二阵降水的催化试验表明, 1—5、8—9、12—13、18—19号位置相对增雨在12%以上, 其他位置的催化效果则十分微弱。最佳催化位置和冷云一样也在3号位置, 绝对增雨 5.5mm, 相对增雨24.24%。

26—31号位置是催化第一阵降水, 由表可见除30号位置外催化第一阵降水均使降水减少, 尤其在云雨自动转化过程开始前的26和27号位置, 降水减少达35%以上。图5给出了27、29、31号位置催化地面3分钟雨强分布, 由图可见催化减雨的原因是第一阵降水的强度减弱或持续时间缩短。

表4 不同位置暖云催化降水一览表

编号	催化降水 (mm)	相对增雨 (%)	绝对增雨 (mm)	编号	催化降水 (mm)	相对增雨 (%)	绝对增雨 (mm)	编号	催化降水 (mm)	相对增雨 (%)	绝对增雨 (mm)
1	27.19	19.83	4.50	12	25.53	12.52	2.84	23	20.90	-7.89	-1.79
2	27.69	22.04	5.00	13	25.41	12.00	2.72	24	23.43	3.26	0.74
3	28.19	24.24	5.50	14	23.35	2.91	0.66	25	23.27	2.56	0.58
4	27.57	21.51	4.88	15	24.55	7.32	1.66	26	13.41	-40.90	-9.28
5	26.11	15.07	3.42	16	23.11	1.85	0.42	27	14.46	-36.27	-8.23
6	23.82	4.98	1.13	17	22.94	1.10	0.25	28	22.49	-0.88	-0.20
7	22.78	0.40	0.09	18	27.89	22.92	5.20	29	19.48	-14.15	-3.21
8	26.97	18.86	4.28	19	25.80	13.71	3.11	30	23.27	2.56	0.58
9	26.44	16.53	3.75	20	24.16	6.48	1.47	31	21.17	-6.70	-1.52
10	24.13	6.35	1.44	21	22.91	0.97	0.22				
11	23.62	4.10	0.93	22	23.01	1.42	0.32				

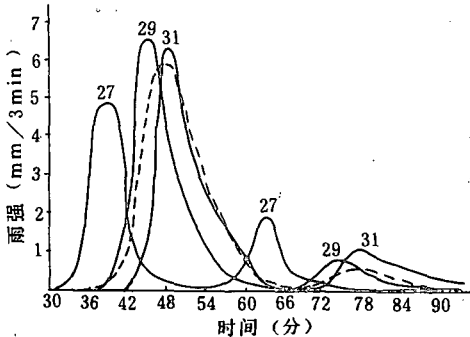


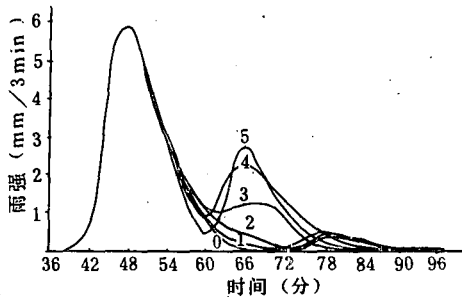
图5 不同位置暖云催化地面3分钟雨强曲线(虚线为自然模式云雨强)

上述试验表明, 本例暖云催化的有效部位也在冷区, 这同本例自然云在冷区有相当多的云水量可资利用有关 (见图1)。人工雨滴促进了冰相降水粒子的发展。同引晶催化相比, 人工雨滴可以在更大的时空范围内播入, 而取得一定增雨效果。对第一阵暖雨的催化没有达到增雨目的, 这同本例积云发展特别缓慢、动力过程长期维持有关。同胡志晋 (1985)^[4]对浓积云的盐粉催化结果一致。

(2)不同剂量的暖云催化试验

表5 不同剂量的暖云催化试验

参 量	剂 量 降水(mm)	0	1	2	3	4	5
		0	10^2	10^3	10^4	10^5	10^6
		22.689	23.101	23.537	25.498	28.186	28.858
	相对增雨(%)		1.82	3.74	12.38	24.23	27.19
	绝对增雨(mm)		0.412	0.848	2.809	5.497	6.169

图6 不同剂量暖云催化地面3分钟雨强曲线
(图中编号同表5)

本文选择3号位置进行了不同剂量的暖云催化试验,试验结果见表5。由表可见在本文所用的剂量范围内催化效果随剂量的增加而增大,这与胡志晋^[6]层状暖云盐粉催化的数值试验结果相同。图6给出了不同剂量催化地面3分钟雨强分布,由图可见与冷云催化一样催化使第二阵降水提前且加强了,随着剂量的增加,第二降水峰值也在不断加大。

3. 地面碘化银烧烟试验

在冰晶核化方程中让 N_{in} 取不同的值来模拟不同剂量的地面碘化银烧烟试验,表6给出了不同剂量烧烟试验的催化结果。由表6可见催化效果随烧烟剂量的增加而增加。当人工冰核浓度大于自然的1000倍以上,催化效果反而减小。不同剂量碘化银烧烟催化下的地面雨强变化和冷云、暖云催化的相似,使第二阵降水提前且加强。

表6 不同剂量烧烟试验结果

参 量	N_{in}	20	200	2000	20000	200000
		20	200	2000	20000	200000
	总降水(mm)	22.689	23.407	26.661	28.581	27.743
	相对增雨(%)		3.17	17.51	25.60	22.28
	绝对增雨(mm)		0.718	3.972	5.892	5.054

五、增雨机制的探讨

为了探讨催化试验的增雨机制,本文选择催化效果较好的3号位置剂量为 $5 \times 10^5 \text{kg}^{-1}$ 的冷云催化算例、剂量为 10^5kg^{-1} 的暖云催化算例和 N_{in} 值为 $2 \times 10^4 \text{kg}^{-1}$ 的烧烟算例进行详细分析,来探讨3种催化方法的增雨机制。图7给出了3个催化算例及自然降水算例垂直气流、云水、雨水、冰晶浓度、霰和雹量时空剖面图。表7给出4个算例催化后(即43分钟后)各主要参量的最大值、出现时间和所在高度。

表7 4个算例各主要参量的最大值

	W(m/s)				T - Te(°C)				Qc(g/kg)				Qr(g/kg)			
	自然	冷云	暖云	烧烟	自然	冷云	暖云	烧烟	自然	冷云	暖云	烧烟	自然	冷云	暖云	烧烟
最大值	8.95	8.96	8.81	8.95	1.70	1.76	1.70	1.78	4.22	2.67	2.89	2.84	2.31	1.95	1.92	2.06
时间(分)	46.7	46.7	46.7	46.7	45.5	45.7	45.5	45.5	54.5	49.7	49.5	49.5	67.50	62.00	58.83	61.00
高度(km)	6.0	6.0	6.0	6.0	5.8	5.8	5.8	5.8	6.7	6.5	6.5	6.5	18	11	11	11
	Qg(g/kg)				Qh(g/kg)				Ni(个/kg)				Svi(g/kg·s)			
	自然	冷云	暖云	烧烟	自然	冷云	暖云	烧烟	自然	冷云	暖云	烧烟	自然	冷云	暖云	烧烟
最大值	2.65	0.96	1.07	2.07	0.05	1.44	1.24	1.49	1.5× 10 ⁴	4.9× 10 ⁵	2.9× 10 ⁴	1.9× 10 ⁶	6.6× 10 ⁻⁶	2.8× 10 ⁻³	3.5× 10 ⁻⁵	2.4× 10 ⁻³
时间(分)	63.2	54.2	54.7	55.7	64.5	56.8	57.5	55.3	62.8	43.2	55.5	58.2	68.2	43.2	59.5	60.7
高度(km)	5.8	5.8	6.0	5.0	5.0	4.8	4.8	5.0	6.0	5.5	6.2	7.2	6.2	5.3	7.2	7.2
	Pvi(个/kg·s)				Pci(个/kg·s)				Ccr(g/kg·s)				Ccg(g/kg·s)			
	自然	冷云	暖云	烧烟	自然	冷云	暖云	烧烟	自然	冷云	暖云	烧烟	自然	冷云	暖云	烧烟
最大值	9.36	11.86	11.38	1.2× 10 ⁴	261.0	354.4	374.6	372.0	1.49× 10 ⁻²	4.89× 10 ⁻³	6.56× 10 ⁻³	5.35× 10 ⁻³	7.3× 10 ⁻³	7.6× 10 ⁻³	7.8× 10 ⁻³	1.0× 10 ⁻²
时间(分)	52.5	52.0	52.3	55.2	62.0	50.5	51.7	51.3	60.2	59.7	52.5	57.3	62.2	50.7	51.7	52.2
高度 km	7.0	7.0	7.0	7.2	6.0	6.0	6.0	6.0	6.2	3.4	4.8		6.0	6.2	6.2	5.3
	Cch(g/kg·s)				Cri(g/kg·s)				Crg(g/kg·s)				Crh(g/kg·s)			
	自然	冷云	暖云	烧烟	自然	冷云	暖云	烧烟	自然	冷云	暖云	烧烟	自然	冷云	暖云	烧烟
最大值	1.1× 10 ⁻⁴	2.2× 10 ⁻³	1.8× 10 ⁻³	2.0× 10 ⁻³	2.3× 10 ⁻³	6.0× 10 ⁻³	9.6× 10 ⁻³	8.0× 10 ⁻²	9.0× 10 ⁻³	4.7× 10 ⁻³	5.9× 10 ⁻³	8.4× 10 ⁻²	5.4× 10 ⁻⁵	3.6× 10 ⁻⁴	3.0× 10 ⁻⁴	4.3× 10 ⁻⁴
时间(分)	65.3	55.7	56.0	55.3	62.0	44.5	50.3	57.2	65.8	57.3	59.7	73.3	65.8	59.7	60.3	59.2
高度(km)	4.6	5.0	5.0	4.8	6.0	5.3	5.8	5.0	4.8	4.8	4.8	5.0	4.6	3.6	3.6	3.6
	Mgr(g/kg·s)				Mhr(g/kg·s)				Mir(g/kg·s)				Acr(g/kg·s)			
	自然	冷云	暖云	烧烟	自然	冷云	暖云	烧烟	自然	冷云	暖云	烧烟	自然	冷云	暖云	烧烟
最大值	9.6× 10 ⁻³	1.9× 10 ⁻³	2.0× 10 ⁻³	5.1× 10 ⁻³	1.2× 10 ⁻⁴	3.4× 10 ⁻³	2.9× 10 ⁻³	3.4× 10 ⁻³	1.7× 10 ⁻⁵	2.8× 10 ⁻³	2.0× 10 ⁻⁷	1.2× 10 ⁻⁴	2.77× 10 ⁻³	0.00	0.00	0.00
时间(分)	67.3	58.5	59.8	58.5	69.7	60.0	60.5	59.3	60.0	43.8	70.0	38.2	54.7	/	/	/
高度(km)	4.6	4.6	4.6	4.6	2.6	3.6	3.6	3.6	4.8	5.0	4.8	5.0	6.7	/	/	/
	Aig(g/kg·s)				Agh(g/kg·s)				Cig(g/kg·s)				Cci(g/kg·s)			
	自然	冷云	暖云	烧烟	自然	冷云	暖云	烧烟	自然	冷云	暖云	烧烟	自然	冷云	暖云	烧烟
最大值	6.7× 10 ⁻⁵	1.5× 10 ⁻⁴	2.4× 10 ⁻⁵	2.3× 10 ⁻³	4.3× 10 ⁻⁴	4.6× 10 ⁻³	4.5× 10 ⁻³	6.1× 10 ⁻³	2.1× 10 ⁻⁵	3.5× 10 ⁻⁶	6.0× 10 ⁻⁷	4.5× 10 ⁻⁴	7.3× 10 ⁻⁴	4.4× 10 ⁻⁵	2.0× 10 ⁻⁷	2.4× 10 ⁻⁴
时间(分)	59.67	43.83	61.17	63.17	69.7	54.7	55.2	53.8	59.7	45.3	57.0	63.7	59.7	44.3	56.2	63.7
高度(km)	22	23	31	31	6.0	5.8	5.8	5.3	5.0	5.8	6.5	7.2	5.0	5.3	5.0	7.2

注:表中符号参见附录

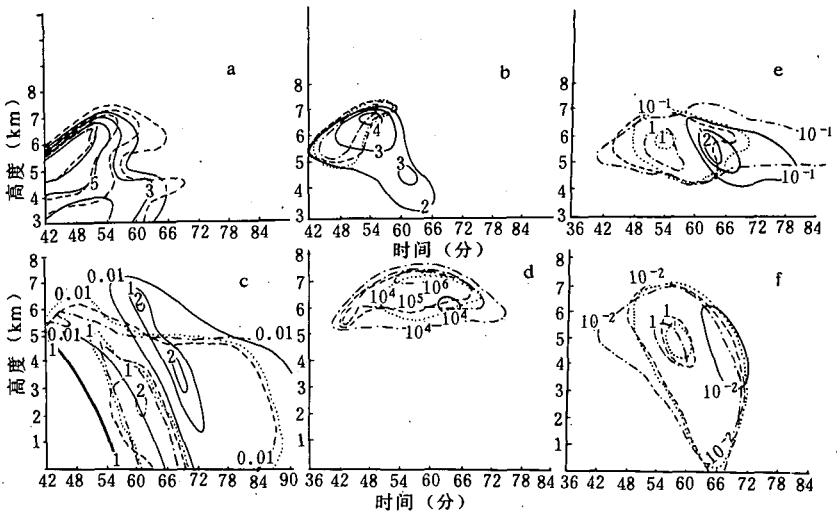


图7 3个催化算例及自然降水的各要素参量时空剖面

(a)垂直速度(b)云水(c)雨水(d)冰晶浓度(e)霰量(f)雹量

(实线:自然降水,点划线:烧烟试验,虚线:冷云催化,点线:暖云催化。图a中虚线代表3种催化,图c中粗实线代表第一阵降水)

从图7、表7和图1可以看出,三种催化的动力效应很小,云顶高度没有明显变化。微物理结构演变和微物理过程强度则有明显变化,而且三种催化方式造成的变化很相似。本例自然云存在两阵降水。第二阵降水为暖雨过程发动的冰相降水,云雨自动转化过程在冷区进行,因而存在着丰富的过冷云水(见图1a)。同时由于云中核化率不高,在暖雨过程发动之前,云中冰晶浓度较低(见图1b),且无雨滴存在(见图1a)。因此在云体发展的适当时刻和高度进行冷云催化或暖云催化或进行地面烧烟试验,使云中冷区雨滴提前出现(见图7a),这些冷区初始雨滴与冰晶撞冻迅速转化为霰,霰又撞冻云滴和雨滴增长,霰在 $-3 \sim -8^{\circ}\text{C}$ 区域与云滴碰并引起H-M 繁生过程产生冰晶。这样,通过催化可使“撞冻—繁生”的正反馈过程提前出现(见表7Pci和Cri)。通过这个正反馈机制,霰粒子很快增加,霰水量的高值区很快出现(见图7e),部分霰转化为雹,雹又撞冻云水和雨水增大,雹的高值区也很快出现(见图7f),霰和雹的高值区的提前出现是以消耗云水和雨水为前提的,霰雹高值区出现后雨水已渐减少,其后霰雹主要以消耗云水而增长,因此云水量的高值区明显缩小(见图7b),3个算例均未产生云雨自动转化过程(见表7Acr)。霰的最大值和自然降水过程相比略有减小,而雹的最大值却增大两个量级。霰和雹由于落速较大很快下降。霰于58分钟在4.6km附近融化率(Mgr)达最大,雹则于60分钟在3.6km附近融化率(Mhr)达最大。由于霰和雹的下降融化,导致第二阵降水提前及地。同时由于雹的融化率比自然降水增大一个量级,因而第二阵降水增大了。由于第二阵降水的增大导致地面总降水增多,3个算例的相对增雨都在24%以上。

从上述分析看来,本例中冷区雨滴的提早出现、霰和雹的提前产生以及云水的消耗是催化增雨的三个重要环节。

表8 5.4km 高度上各时刻雨滴浓度(个/kg)

时间(min)	自然降水	冷云催化(个/kg)						烧烟试验(m ⁻³)			
		5×10 ¹	5×10 ²	5×10 ³	5×10 ⁴	5×10 ⁵	5×10 ⁶	2×10 ²	2×10 ³	2×10 ⁴	2×10 ⁵
44	0.0	0.0	0.0	42.2	188.0	1876.7	20498.6	19.9	193.7	359.5	1110.0
46	0.0	0.0	0.0	29.7	274.3	474.0	3022.7	10.3	146.8	252.3	1170.5
48	0.0	0.0	0.0	19.8	164.3	253.3	931.2	6.3	105.8	437.1	1208.7
50	0.0	0.0	0.0	12.7	164.1	117.6	412.6	3.4	86.8	508.0	1245.8
52	0.0	0.0	0.0	10.1	54.5	55.4	137.4	2.6	73.7	353.5	1410.9
54	0.0	0.0	0.0	10.5	56.3	56.8	83.0	2.3	63.5	149.1	2717.4

表9 冷云催化霰雹最大值出现时间(min)

编号	增雨(%)	霰	雹	编号	增雨(%)	霰	雹
0		63.2	64.5	9	0.0	63.2	64.3
1	18.91	42.7	55.5	10	0.26	63.0	64.3
2	19.48	54.5	56.2	11	1.67	63.2	64.2
3	24.02	54.2	56.8	12	0.04	63.2	64.5
4	17.89	57.2	59.8	13	0.26	62.8	64.3
5	2.82	62.7	61.5	14	0.93	63.0	64.3
6	3.26	62.5	64.3	15	0.26	63.3	64.3
7	-0.44	63.0	63.7	16	0.31	63.3	64.0
8	-0.04	63.2	64.5				

表10 暖云催化霰雹最大值出现时间(min)

编号	增雨(%)	霰	雹	编号	增雨(%)	霰	雹	编号	增雨(%)	霰	雹
0		63.2	64.5	9	16.53	58.0	60.3	18	22.92	57.5	60.0
1	19.83	55.2	57.2	10	6.35	63.3	61.2	19	13.71	60.7	62.2
2	22.04	54.5	56.8	11	4.10	62.3	63.5	20	6.48	63.5	64.7
3	24.24	54.7	57.5	12	12.52	62.7	60.1	21	0.97	63.2	64.5
4	21.51	57.7	59.8	13	12.06	61.2	61.5	22	1.42		
5	15.07	60.0	61.8	14	2.91	62.7	63.5	23	-7.89		
6	4.98	63.0	65.0	15	7.32	61.7	61.3	24	3.26	63.8	65.2
7	0.40	63.2	64.3	16	1.85	62.7	63.8	25	3.56	63.3	64.5
8	18.86	56.5	58.7	17	1.10	62.8	64.0				

(1)冷区初始雨滴的作用:表8给出了5.4km 高度上(紧贴0℃层上方),不同剂量冷云 and 烧烟试验在催化后10分钟内各时刻雨滴浓度值。由表可见,催化后冷区的确产生了初始雨滴且雨滴浓度随剂量的增加而增大。分析表明这些初始雨滴是由于播入或核化产生的

大量的冰晶向下扩散,在 0°C 层之下融化而后碰并云滴增大,又被上升气流带到冷区而产生的。暖云催化直接增加初始雨滴,其数量随剂量而增大。所以在一定剂量范围内这三种催化方法的剂量增大会增加冷区初始雨滴浓度,从而导致较好的增雨效果。

(2)霰和雹的作用:前面提到霰和雹的提前出现,消耗过冷水是催化增雨的关键环节。表9和表10分别给出了不同的催化时空位置下霰和雹最大值出现的时间。由表可见,冷云催化效果较好的1—4号位置和暖云催化效果较好的1—5、8—9、12—13、18—19号位置霰和雹最大值出现时间比自然过程明显提前,而其余位置则与自然过程接近。

(3)云水的消耗:根据不同剂量暖云催化后云水量的演变(图略),结合图7(b)可以看出催化使云水量大为减小。剂量越大,云水量消耗越强,增雨效果也越明显。引晶催化方法也有类似结果。

六、结 语

1. 本例是一个云底较暖、发展较缓的积雨云。降水由暖雨过程发动,后期有冰相过程介入。在发展过程中出现了两个云水大值区:早期在暖区,后期在冷区。

2. 暖云催化可以影响积雨云的冰相降水过程。本例中人工雨滴能在冷区发动“撞冻—冰晶繁生”的正反馈过程,促进了霰和雹的产生和发展。霰、雹碰冻云水增长,下落、融化成雨。这样就更充分地利用冷区云水资源而增加雨量。

3. 引晶催化在本例中没有产生显著的动力效应。但在 0°C 层附近的人工冰晶能提前产生小雨滴,进一步推动霰、雹的生成发展,利用冷区云水资源增加雨量。

4. 暖云底积雨云的催化原理是一个十分困难又迫切要求解决的问题。本文通过个例的数值试验指出在一定条件下引入冰晶或大云滴来促进冰相降水过程的一种人工增雨机制。由于模式是一维的,动力过程大为简化;微物理方面虽然考虑了26种过程,但仍为总体方案(bulk scheme),不能计算谱型的演变。所以上述结果可以认为是一种定性的假说。

参 考 文 献

- [1] 沈鹰等,福建古田积云降水及其人工催化的数值模拟,南京气象学院学报,11,1,1988。
- [2] 胡志晋等,积雨云微物理过程的数值模拟:(二)阵雨、冰雹和暴雨的个例研究,气象学报,46,1,1988。
- [3] 胡志晋等,积雨云微物理过程的数值模拟:(一)微物理模式,气象学报,45,4,1987。
- [4] 胡志晋等,盐粉催化不同生命史的浓积云的数值模拟,大气科学,9,1,1985。
- [5] 胡志晋等,层状冷云数值模式,气象学报,41,2,1983。
- [6] 胡志晋等,层状暖云降雨及其催化的数值模拟,气象学报,41,1,1983。

附录:

W: 垂直速度	Cch: 云雹撞冻率
$T-T_c$: 云内外温差	Cri: 雨冰撞冻率
Qc: 云水比含量	Crg: 雨霰碰并率
Qr: 雨水比含量	Crh: 雨雹碰并率
Qg: 霰比含量	Mgr: 霰融化率
Qh: 雹比含量	Mhr: 雹融化率
Ni: 冰晶比浓度	Mir: 冰晶融化率
Svi: 水汽凝华率	Acr: 云雨自动转化率
Pvi: 冰晶核化率	Aig: 冰霰自动转化率
Pci: 冰晶繁生率	Agh: 霰雹自动转化率
CCR: 云雨碰并率	Cig: 冰霰碰并率
CCg: 云霰撞冻率	Cci: 云冰碰并率

A NUMERICAL EXPERIMENT OF CLOUD SEEDING IN CUMULONIMBUS

Wu Minglin

(Fujian Institute of Meteorological Science, Fuzhou)

Hu Zhijin

(Academy of Meteorological Science, SMA)

Abstract

A Cumulonimbus cloud with moderate intensity and a warm cloud base has been simulated by using a dual-parameter cumulonimbus cloud model in the rainy season in Fujian. It is shown that the cloud precipitation process has two phases, the first one is a warm-rain process and the second with ice phase process. A series of numerical experiments of cloud seeding show that ice-seeding or large droplet seeding could enhance the precipitation in the second phase. The effect of precipitation enhancement is concerned with the seeding pattern, the maximum can reach 24% of the total precipitation. In this paper, the mechanism of precipitation enhancement is also discussed.