

南方层积混合云催化 作业与数值模拟

万 蓉 李 盾

(湖北省人工影响天气办公室, 武汉 430074)

提 要

利用一维套柱模式对层积混合云进行了模拟实验,并以1995年夏季在鄂西北上空6次飞机增雨作业为例,对积云催化的效果做了定性验证。通过探讨云的催化机制,探求有效的催化技术方法,将实际作业、自然模拟、催化模拟进行了对比。

关键词: 催化作业 数值模拟 对比分析

引 言

在湖北省夏季,飞机增雨作业主要对象是以积云为主的混合云系。1988年、1995年夏季鄂西北飞机作业都收到较好的增雨效果。我们以1995年7月6次作业实例做模拟分析,探讨积云催化机制和作业方法,加强对积云催化机制的理论研究,减少盲目作业,增强作业效果。

1 天气背景分析

1995年夏季,西太平洋副高阶段性变化明显,欧亚西风带环流前期经向环流占优势,与常年同期相比,副高势力很强,范围比往年大,致使台风活动偏少,南方雨水偏多。7月中下旬南方晴热少雨,汉水流域降雨量与常年相比,偏少6成以上。

位于湖北省汉水流域的鄂西北地区,从1994年冬开始干旱,特别是十堰、襄樊一带旱情严重。而鄂西北在盛夏季节,常处于副高外围西北侧,盛行西南气流,水汽条件充足,遇有川东小槽或西南低涡东移时,易形成降水,且午后有对流增强配合,常常形成局地强对流降水天气。其次,鄂西北处于大陆高压东移与副高合并前的辐合区。

2 1995年湖北省飞机作业情况简介

我们将鄂西北山区划分为4个区域:郧西、郧县为1区,十堰、丹江口一带为2区,谷城、保康、老河口一带为3区,襄樊、南漳、宜城、枣阳一带为4区。根据当天天气预报及雷达回波情况,飞行催化重点区域不同,总的路线环绕十堰或作多中心环绕飞行,或在某一区域盘旋多次催化,在增强降雨的前提下,扩大影响区范围。以7月16号为例,上午局部受副高控制,午后副高加强北抬,鄂西北的辐合区减弱退缩,全省境内无云。在十堰雷达上反映,西北方向有大片块状回波,回波顶高7km左右,催化后5—10分钟,回波强烈发展,回波顶高升高。此次飞行高度5200—6300m,主要在十堰西北方向作业,总降水21mm—105mm。7月12日、18日、23日情况略,实际作业及降水情况如表1。

3 模拟计算及分析

本文输入南阳当日08点的探空资料,用一维时变积云套柱模式^[1]进行计算。该模式在胡志晋的一维积雨云时变模式^[2]的基础上,考虑环境大气与积云群的发生、发展及降水之间相互作用,仍保留原一维时变模式的所有微物理过程:考虑26种主要微物理过程中水汽云滴比水量和冰晶、霰、雹、雨滴的群

体比水量,比浓度的转化率。包括凝结、蒸发、撞冻、冰晶核化、繁生、冻结、融化、云—雨、冰—霰、霰—雹的自动转化等。而对于积云为主的混合云系,积云内外的大气变化规律都

用一维时变模式来模拟,将两个一维时变模式套在一起,积云内部和外部由质量守恒及动力夹卷和混合夹卷联系起来。

表1 实际作业情况

日期	作业时段 /min	播撒高度 /km	干冰用量 /kg	作业影响区域的雨量分布状况/mm
950712	20—30	5—6	300	鄆西北部 8—10,竹溪 22,竹山 9.7,十堰(小…中雨),老河口 2,南漳 1
950715	20—30	3.2—5	300	竹溪 16,鄆西 2,鄆县 12,十堰 5,老河口 11,房县 8,保康 6,南漳 61,宜城 3
950716	20—30	5.2—6.3	288	竹溪 3,竹山 36,鄆西 21,鄆县 10,十堰 105,房县 7
950718	20—30	4.5—5.5	288	鄆西 1,鄆县 4,十堰 12,丹江口 33,老河口 18,襄阳 8
950719	20—30	4—6	240	鄆西 49,鄆县 50,十堰 35,丹江口 30,谷城 14,保康 12,南漳 9,宜城 17
950723	20—30	4—6	240	鄆西 6,十堰 4,老河口 6,谷城 35,保康 16,南漳 38,宜城 7,襄阳 27

假设积云在发展过程中它所影响或被影响的大气范围是初始半径的几倍,因为影响范围毕竟是有限的。若积云半径为 r ,模式中所考虑的半径 $R=mr(m \leq 10)$,一维套柱模式将 m 倍于 r 的范围看成一封闭系统(如图 1)。系统区域大气的水平辐合辐散速度为 0,经推导,把云内外大气运动相互影响、相互反馈以一维形式联系起来的公式为:

$$\frac{\partial(\rho w_2)}{\partial z} = -\frac{r^2}{R^2 - r^2} \frac{\partial(\rho w_1)}{\partial z} - \frac{2\rho R v_0}{R^2 - r^2}$$

w_1 为积云内垂直速度, w_2 为环境大气垂直速度, ρ 为大气密度, r 为积云半径, R 为区域大气半径。

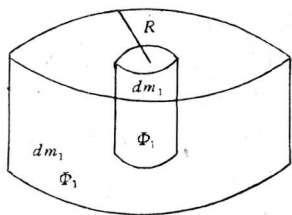


图1 积云与环境大气示意

考虑积云内空气由于流体连续原理,有云内外的夹卷混合运动,将夹卷运动分为两部分,一部分为运动夹卷,另一部分为混合夹卷。

云外空气进入云柱区迅速同云内空气混合(反之亦然),使云内任一平均特征量 φ_1 及

云外任一平均特征量 φ_2 产生的变化为:

动力夹卷:

$$\frac{\partial \varphi_1}{\partial t} = \frac{C_a}{\rho} \cdot \frac{\partial(\rho w_1)}{\partial z} (\varphi_2 - \varphi_1)$$

$$\text{当 } \frac{\partial(\rho w_1)}{\partial z} > 0$$

$$\frac{\partial \varphi_2}{\partial t} = \frac{r^2}{R^2 - r^2} \cdot \frac{C_a}{\rho} \frac{\partial(\rho w_1)}{\partial z} (\varphi_2 - \varphi_1)$$

$$\text{当 } \frac{\partial(\rho w_1)}{\partial z} < 0$$

混合夹卷:

$$\frac{\partial \varphi_1}{\partial t} = \frac{0.2}{r} |w_1| (1 - C_a) (\varphi_2 - \varphi_1)$$

$$\text{当 } \frac{\partial(\rho w_1)}{\partial z} > 0$$

$$\frac{\partial \varphi_2}{\partial t} = -\frac{r^2}{R^2 - r^2} \frac{0.2}{r} |w_1| (1 - C_a) (\varphi_2 - \varphi_1)$$

$$\text{当 } \frac{\partial(\rho w_1)}{\partial z} < 0$$

由此建立的一维时变双重套柱模式,详细考虑积云内外大气运动和微物理过程,因此,针对非孤立的积云单体研究选用套柱模式进行模拟计算。

3.1 对4次作业的自然降水模拟

我们输入4天08点的探空资料,调试各天的初始条件^[4]作自然模拟,采用向过冷水区引入冰晶的方法,进行催化模拟,4天情况大致如表2。

表2 模拟计算

日期	初始条件			自然模拟				催化模拟				
	初始升速 /m·s ⁻¹	初始温差 /°C	云半径 /km	时间 /min	云底高度 /km	云顶高度 /km	降雨量 /mm	时间 /min	云底高度 /km	云顶高度 /km	降雨量 /mm	相对增雨 /%
950716	1	0.5	3.5	102	1.02	7.2	17.725	108	0.94	9	19.801	11.7%
950718	1	0.2	3	84	1.57	9.8	16.343	108	1.41	>9.8	17.511	7.1%
950719	1	1.8	6	84	1.6	7.2	1.611	84	1.5	7.4	1.744	8.3%
950723	2	1	3	126	1.13	9.4	13.537	136	1	9.8	15.333	13.9%

我们从表2中可以看出,经过催化后,云顶高度将升高,云发展时间也相对延长,降水量有所增大,定性地同其他方法估计的积云催化效果一致。根据实际作业情况,我们选取有代表性的16日作具体分析。

经过探空资料输入,计算得出模拟16号自然降水过程中,降水粒子比质量,比浓度及微物理过程的一些特征参量。

自然模拟:云顶高7200m,云顶温度-10.1°C,云内外温差最大值为2°C,云内最大上升气流7.87m·s⁻¹,其他主要参量雨水含量 Q_R 、云水含量 Q_c ;冰晶浓度 N_i 、霰水含量 Q_g 、雹水含量 Q_h 的时空剖面如图2(a、b)。

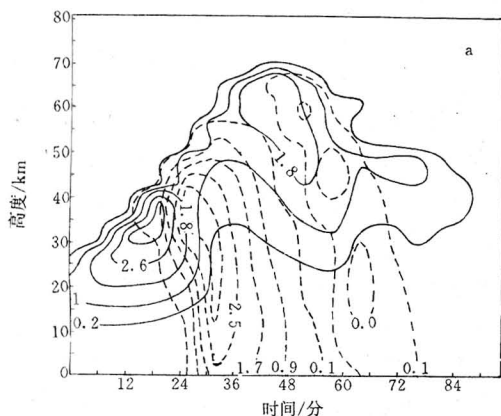


图2a 自然模拟云水量 Q_c 、雨水量 Q_R
实线: $Q_c/g \cdot kg^{-1}$,虚线: $Q_R/g \cdot kg^{-1}$

由图2可见云中两个云水区,一个在暖区,一个在冷区,与之对应产生了两阵降水,第一阵降水从15分钟开始,在暖区进行,第二阵降水在冷区进行,有冰相粒子参与。冰

晶核化率 P_{vi} 不高, P_{vi} 最大值为0.9个·kg⁻¹·s⁻¹,在0°C层(5600m左右),冰晶浓度在42分钟之前小于10³个·kg⁻¹,约在48分钟产生冷区的云雨转化过程,新产生的雨滴和冰晶撞冻,产生霰粒子,霰在-3°C—8°C之间碰并云滴,引起Hallett-Mossop 繁生过程,繁生率 P_{cr} 最大值为39.84个·kg⁻¹·s⁻¹,繁生率较小;冰晶撞冻雨产生霰,霰部分转化为雹;在0°C层以下,霰、雹融化形成雨滴,产生第二阵降水。整个过程降水17.7mm,地面无降雹。

3.2 催化模拟

3.2.1 在特定部位投放催化剂 我们设定在不同时段,在-5°C—10°C之间的云区内直接投入冰晶的催化方法进行模拟计算,催化结果如表3。

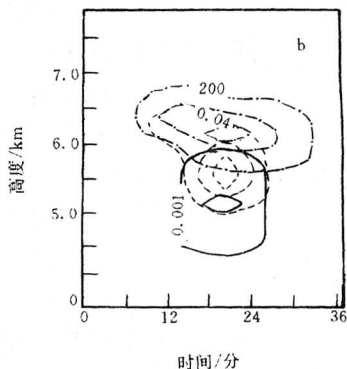


图2b 自然模拟冰晶浓度 N_i 、霰水量 Q_g 、雹水量 Q_h
点划线: $N_i/个 \cdot kg^{-1}$,虚线: $Q_g/g \cdot kg^{-1}$,实线: $Q_h/g \cdot kg^{-1}$

表3 不同时段催化模拟实验

时段/min	32—36	36—39	39—42	42—45	45—48	48—51	51—54	54—57	57—60
雨量/mm	17.599	18.5	19.801	18.542	18.21	17.744	17.343	18.121	17.949
绝对增雨/mm	-0.126	0.775	2.076	0.817	0.485	0.019	-0.382	0.396	0.224
相对增雨/%	-0.71	4.37	11.71	4.61	2.74	0.11	-2.16	2.23	1.26

由表3可见,在不同时段引入相同剂量(5×10^5 个 \cdot kg $^{-1}$)冰晶,结果是在过冷云水发展初期或后期引入冰晶,效果不明显,甚至产生负效果,使降水减少。即当过冷水很少时,引入过多冰晶争食过冷水,冰晶不能长大

下落,长期在空中维持成为云砧。

3.2.2 在催化时段上,我们选取三段作不同剂量的催化计算。

我们选39—42分钟、32—36分钟、54—57分钟作催化时段,计算结果见表4—6。

表4 32—36min 催化结果比较

催化剂量/个 \cdot kg $^{-1}$	0	50	500	5000	50000	500000	5000000
总降水/mm	17.725	18.577	18.07	17.942	17.599	17.536	17.235
绝对增雨/mm	0	0.852	0.345	0.217	-0.126	-0.189	-0.49
相对增雨/%	0.00	4.81	1.95	1.22	-0.71	-1.07	-2.76

表5 39—42min 催化结果比较

催化剂量/个 \cdot kg $^{-1}$	0	50	500	5000	50000	500000	5000000
总降水/mm	17.725	18.058	18.673	19.539	19.801	19.429	19.445
绝对增雨/mm	0	0.333	0.948	1.814	2.076	1.704	1.72
相对增雨/%	0.00	1.88	5.35	10.23	11.71	9.61	9.70

表6 54—57min 催化结果比较

催化剂量/个 \cdot kg $^{-1}$	0	50	500	5000	50000	500000	5000000
总降水/mm	17.725	18.076	17.968	18.06	18.121	17.288	17.667
绝对增雨/mm	0	0.351	0.243	0.335	0.396	-0.437	-0.058
相对增雨/%	0.00	1.98	1.37	1.89	2.23	-2.47	-0.33

表4处于云水转化前期,此阶段过冷区 Q_c 云水量较小,引入冰晶剂量易因偏大,造成过量争食水汽而产生负效果。而在 Q_c 较充足的时段(表5),引入冰晶,随冰晶量增大,在小于50/L的范围内,催化效果会较好。后期的催化效果不如中期(表6)。说明投放催化剂时机很重要且需同适当剂量相配合。

3.2.3 增雨机制探讨 选取催化时段30—50分钟向 -5°C — -10°C 层直接引入比浓度 5×10^5 个 \cdot kg $^{-1}$ 的冰晶催化算例进行分析,探讨冰晶催化的增雨机制^[3]。

表7是自然降水与催化算例主要参量的最大值及出现时间和高度,催化和非催化算例的雨水、冰晶比浓度、霰水量和雹水量的时空剖面如图3。从图3、表7可以看出,第二阵

降水为冰相降水,云雨自动转化在冷区进行,云中存在丰富的过冷云水,如图2a,如果在这一区域引入冰晶催化,将会使云中冷水区雨滴浓度提前出现高值如图3a,过冷区初始雨滴与冰晶撞冻转化为霰,霰又撞冻云滴和雨滴生长,霰在 -3°C — -8°C 区域碰并云滴繁生产生冰晶,这样通过催化可使“撞冻-繁生”过程加强且提前出现。(比较表7中 P_{ci} 、 C_n),由正反馈机制,霰粒子很快增加,霰水量的高值区也提前出现,消耗雨水和云水,部分霰转化为雹,雹水量的高值区也提前,霰水量的最大值与自然降水过程相比增大一倍,雹水量最大值也有所增加(如表7),霰、雹下降融化,导致第二阵降水提前,由于霰、雹的融化率增大, $M_{gr} = 3.5 \times 10^{-3}$ 、 $M_{hr} = 1.2 \times$

10^{-3} 且都增大一个量级,使第二阵降水增大。

表7 特征参量最大值

参量	$W/m \cdot s^{-1}$		$T - T_e / ^\circ C$		$P_{vi}/个 \cdot kg^{-1} \cdot s^{-1}$		$P_{ci}/个 \cdot kg^{-1} \cdot s^{-1}$		$C_{ri}/g \cdot kg^{-1} \cdot s^{-1}$	
	未催化	催化	未催化	催化	未催化	催化	未催化	催化	未催化	催化
最大值	7.87	7.87	1.76	4.88	0.9	0.1	39.84	172.9	0.0015	0.02
时间/min	30	30	30	36	42	54	54	48	54	42
高度/m	4800	4800	4800	7200	7200	7400	6200	6200	6400	8000
参量	$Q_r/g \cdot kg^{-1}$		$Q_g/g \cdot kg^{-1}$		$Q_h/g \cdot kg^{-1}$		$Q_c/g \cdot kg^{-1}$		$C_{rg}/g \cdot kg^{-1} \cdot s^{-1}$	
	未催化	催化	未催化	催化	未催化	催化	未催化	催化	未催化	催化
最大值	4.03	4.03	0.34	0.61	0.02	0.28	3.81	3.81	0.0018	0.18
时间/min	30	30	60	48	60	48	24	24	60	42
高度/m	3800	3800	5600	6200	4800	5200	3800	3800	5400	5400
参量	$N_i/个 \cdot kg^{-1}$		$N_g/个 \cdot kg^{-1}$		$N_h/个 \cdot kg^{-1}$		$A_{ig}/g \cdot kg^{-1} \cdot s^{-1}$		$C_{rr}/g \cdot kg^{-1} \cdot s^{-1}$	
	未催化	催化	未催化	催化	未催化	催化	未催化	催化	未催化	催化
最大值	3334.6	874346	443.6	611.1	0.17	5.62	0.003	0.003	1.3	0.8
时间/min	60	36	60	54	60	42	66	54	42	48
高度/m	6800	7400	5600	7200	5200	6400	6200	7000	4000	2200
参量	$C_{gr}/g \cdot kg^{-1}$		$P_{ci}/个 \cdot kg^{-1} \cdot s^{-1}$		$C_{cr}/g \cdot kg^{-1} \cdot s^{-1}$		$C_{cg}/g \cdot kg^{-1} \cdot s^{-1}$		$C_{ii}/g \cdot kg^{-1} \cdot s^{-1}$	
	未催化	催化	未催化	催化	未催化	催化	未催化	催化	未催化	催化
最大值	0.208	79.051	39.84	172.9	0.018	0.013	0.00083	0.457	0.0282	1.66
时间/min	60	48	54	48	30	30	54	42	42	36
高度/m	3400	7600	6200	6200	3400	3400	6400	7600	6600	7000

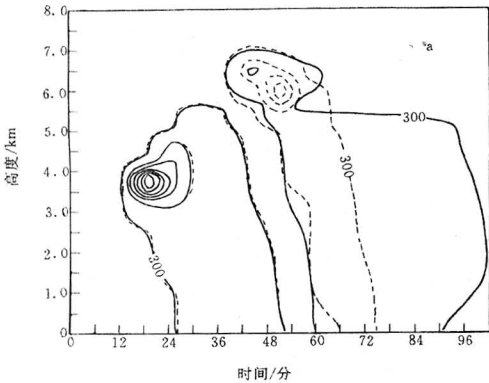


图3a 催化模拟与自然模拟时空剖面

实线:催化模拟;虚线:自然模拟;

雨滴浓度 $M_r/个 \cdot kg^{-1}$

由此我们可以得出:①在过冷水充足区域引入冰晶催化,使冰晶一霰繁生过程加强,霰粒高值区位置略有提高,给霰、雹转化提供充足时间长大,从而达到增雨效果;②固态水凝物的提前出现,在雨水减少情况下,消耗云水,也能较好地利用空中水资源,达到增雨目的;③催化还有一定动力效应,使云顶升高了(见表2)。

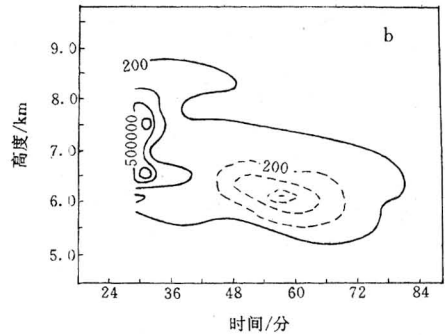


图3b 催化模拟与自然模拟时空剖面

说明同图3a,冰晶浓度 $N_i/个 \cdot kg^{-1}$

4 小结

4.1 通过模拟计算,进一步验证了一维时变积云套柱模式能定性地反映鄂西北山区不同条件下积云的发生发展演化过程,且对以积云为主,层状云为辅的混合云系,考虑到积云发展不仅取决于大气不稳定能量的大小,以及初始“起动”能量,故使用套柱模式更趋于合理并能较客观地反映云发展变化。

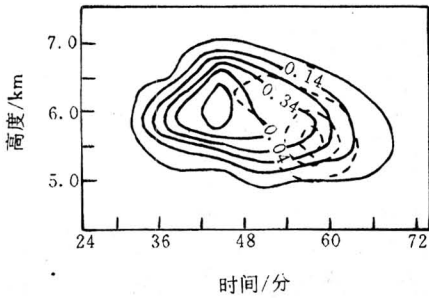


图3c 催化模拟与自然模拟时空剖面
说明同图3a, $Q_g/g \cdot kg^{-1}$

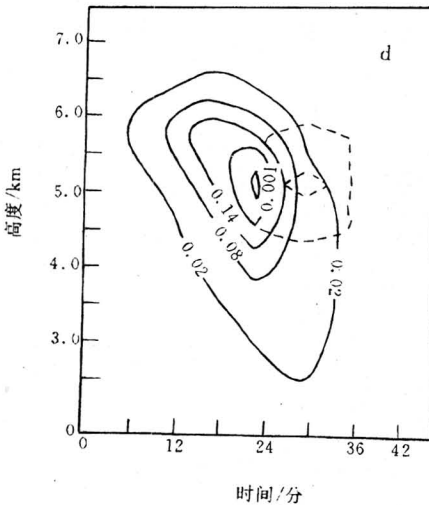


图3d 催化模拟与自然模拟时空剖面
说明同图3a, $Q_n/g \cdot kg^{-1}$

4.2 数值模拟实验说明所模拟的积云有一定的催化增雨潜力。模拟计算平均增雨率11.7%，由于催化剂直接投放部位、时机及催化剂量不一定是最佳配置，模拟催化最好效果可能大于11.7%。

4.3 催化部位、投放时机及剂量的配置对作业效果影响较大，综合文中分析讨论得出：最佳催化部位在过冷云水较充足区域，在冰相粒子出现初期引入适当大剂量的冰晶，能达到比较好的增雨效果。在云水充足前提下，投充足剂量冰晶，不至于冰晶因过冷水偏少而不增长下落；而在冰相粒子前期投放，有利于冰相粒子的繁生增长，延长时间和下落高度，充分利用云水资源，增加雨量。在实际作业中必须重视所用催化剂的成核特点、播撒部位、时机和剂量，才能得到较好的增雨效果。

参考文献

- 1 李盾, 胡志晋. 一维时变积云套柱模式. 人工影响天气技术体系的研究, 北京: 气象出版社, 1991, 157.
- 2 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, 1987, 45(4).
- 3 何观芳, 胡志晋. 人工影响积云机制的数值研究. 应用气象学报, 1991, 2(1).
- 4 李盾, 朱慧斌. 初始扰动与积云降水的数值模拟分析. 人工影响天气技术体系的研究, 北京: 气象出版社, 1991, 169.

Analysis of Seeding Operation and Numerical Simulation for Stratocumulus Cumulogenutus in South of China

Wan Rong Li Dun

(Weather Modification Office of Hubei Province, Wuhan 430074)

Abstract

Seeding target is mainly stratocumulus in south of China. The simulation of the seeding using One-dimension Time-varying Cumulus Interactive Model is presented, and the qualitative verification on the effect of cumulus seeding is given through the examples of six seeding operations with plane in the northwest part of Hubei province in the summer of 1995. By studying the seeding mechanism of the cloud, the effective seeding technology, and comparing practical operation with no-seeding simulation and with seeding simulation, some conclusions are drawn.

key Words: seeding operation numerical simulation comparison analysis