

# 积云模式在人工增雨中的应用

郑淑贞 曾光平 张长安 隋平 何观芳

(福建省气象科学研究所,福州 350001) (中国气象科学研究院)

## 提 要

采用胡志晋的一维时变双参数积云模式,利用福建省1985~1994年间的夏秋早期可能出现的12种天气类型(台风除外)对测站(福州)为主的十年早期出现的积云降水日( $R \geq 0.1\text{mm}$ )进行分类,并按12种天气类型分别调试的结果(降水预报准确率达75%以上),经催化试验,确定福建省早期积云降水的物理特征,人工增雨催化的方法、催化剂量和催化窗口,得到了一些有意义的结果,并根据催化试验的结果采用NDP-FORTRAN和BORLAND C++交互使用的方法,将云模式业务化成人工增雨指挥系统中的积云模式分系统,该系统可以进行早期积云降水预报,人工增雨效果检验和作业方法的选择。

**关键词:** 模式 应用研究 人工增雨

## 引 言

目前,国内外云模式的研究正日趋深入,已发展到进行云场、云群甚至中尺度云群的模拟,他们在研究云物理机制方面曾展示风采,但往往是某个例子或几个个例的研究,在业务化或准业务化方面的应用仍不多见。刘光宝采用刘公波的中尺度层状云模式尝试了北方层

状云降水过程的模拟和业务化运行,二维模式用于人工防雹、人工降雨的现场作业指导也作了小批量试验,但仍未见用于业务化运行的详细报道。目前国内用于人工防雹和积云人工增雨的模式仍然是胡志晋80年代问世的一维时变模式,也许正如专家们曾预言的“最适用的可能不是最复杂的。”

福建省二级基地人工增雨指挥系统建设中的积云模式分系统的建设过程实际上是将云模式业务化的研究过程,它结合福建夏秋旱季可能出现的天气类型进行分类,同时对模式进行调试,得到一整套能较好地预报福建早期积云降水的模式参数,其降水预报准确率达75%以上。此后,我们又对福建早期积云的物理特征进行分析,经催化试验后找到了适用福建早期积云人工增雨的作业条件,形成了一个可预报福建夏、秋早期积云降水和人工增雨效果评估和作业条件选择的云模式系统,该系统经试用效果良好。通过试验分析,发现了福建省夏秋早期积云的一些规律性,得到一些有意义的结果。

## 1 模式调试

根据福建省1985~1994年间夏秋早期的500hPa天气形势,将可能出现的天气形势分为12种天气类型(台风除外)。它们是:①造成福建省全省性干旱的主要环流型——副高控制型G1;②旱区位于副热带高压南侧,在偏东气流控制下的副高南侧型G2;③旱区位于副热带高压北侧的副高北侧型G3;④旱区位于副热带高压西北侧的西南气流控制下的副高西北侧型G4;⑤旱区位于副热带高压西南侧,受东南气流影响的副高西南侧型G5;⑥旱区位于大陆高压控制下的大陆高压型G6;⑦旱区位于南海高压北部或东北部的南海高压型G7;⑧旱区位于低涡槽前或低涡东南侧的低涡型;⑨旱区位于副热带辐合带区内的副热带辐合带影响型;⑩西风槽南伸时旱区位于西风槽前的动力抬升区的西风槽前型(L);⑪旱区位于西风槽后影响的西风槽后型(L');⑫旱区位于环流形势发生调整过渡时期的弱环流型(R)。再将福建省相应10年间的夏、秋早期的对流云降水日( $R \geq 0.1\text{mm}$ )的福州站共84份和邵武站的18份探空资料中选择具有雷达回波资料比较的约60份资料,也同样按

12种天气类型进行分类调试,结果不同天气类型的确有自己不同的一组参数(如表1),其中初始云体半径的变化范围为3000~6000m,初始扰动温度的变化范围为0.1~5.4℃。

表1 不同天气类型所对应的模式参数

天气类型	扰动温度/℃	初始云体半径/km
G1	0.3	5.0
G2	2.7	4.0
G3	0.1	3.0
G4	1.8	4.0
G5	5.4	5.0
G6	1.3	4.3
G7	3.0	3.5
R	1.6	3.0
D	2.1	3.5
F	1.0	4.0
L	1.0	6.0
L'	0.8	6.0

将84个例子分别用不同天气类型下相应的模式进行计算,结果模拟云降水的预报准确率达75%以上,同时非降水日的探空资料输入24份相应模式计算结果未出现降水。将有雷达回波资料比较的个例云顶高度与北岭、长乐雷达站实测结果比较相关较好,但降水量与福州站实测值相比较,这是一维模式本身的缺陷,而且常规雨量站网太稀,难以捕获小尺度的降水,此外由于模拟云降水量是指单块积云在整个发展过程中的降水而实测地面降水是积云经过测站期间的降水,两种降水在概念上存在着差异。但由于积云的对流强度不论实测或模拟云都主要由层结不稳定能量而定的,因而积云模式能较好地预报云顶高度反应对流强度和预报降水,除非层结随时空变化较大。

由于人工增雨的效果评价主要是表征同一模式在催化前后的相对增雨情况,因此认为取之作为人工增雨效果的评估还是可以的。

## 2 早期积云的物理特征

众所周知,人工增雨要获得一定的效果,

首先必须对作业对象有一个较详细的了解。因此,为了了解福建省早期积云的特征,我们对10年夏秋季节早期出现的积云进行全面模拟。发现夏秋早期的积云零度层较高,一般在5500m左右,该零度层的规定纯由模式的催化试验和人工增雨方案的设计而定(因积云无明显的0°C层分界,它与观测到的层状云零度层的概念有所不同),云体多为塔状有云砧,如图1的外轮廓线所示,云顶较高,一般在9~12km,部分大于12km。少数小于9km里的一般呈蘑菇状,如图2的外轮廓线所示。此外从云体开始发展到降水终止计算其生命史一般为1.5小时左右,少数为几十分钟,这说明福建省夏秋早期的积云热力对流旺盛,积云尺度较大。

量少以霰和雹,霰、雹下落经0°C层后融化成雨滴。高层冰晶浓度量级一般大于或等于 $10^5$ ,说明冷区并非缺乏自然冰晶。暖区仍以云水和雨水为主。部分天气类型的云顶高度在8000m左右时云体内出现两个云水大值区,一个位于云体前部零度层下方,另一个位于零度层上方或零度层附近,以G2型尤为典型,如图2中用粗实线表示的两个等值线区,暖区内的云水大值区的云水分布类似单个大值区的积云云水区分布情况,但分布尺度较小。冷区或0°C层附近的云水大值区分布尺度也不大,与暖区差不多,大值区内云水比质量一般不超过 $4.0g \cdot kg^{-1}$ ,云顶一般没有冰晶出现,但个别出现1~2个量级的冰晶浓度,云体内尚未发现霰和雹的生成。

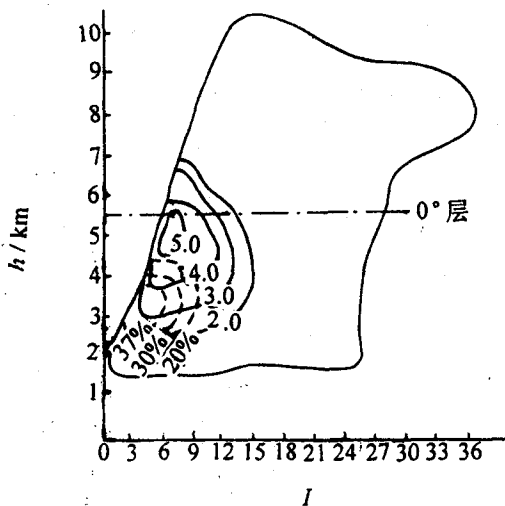


图1 1989年7月2日个例(G3)的云体特征,云水大值区和催化窗口的时空分布

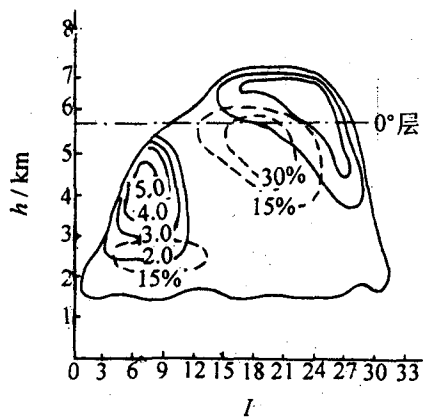


图2 1989年7月31日个例(G2)的云体特征,云水大值区和催化窗口的时空分布

此外,积云单体一般有一个云水大值区位于零度层下方的暖区中,如图1中用粗实线表示的等值线区,大值区内云水区最大值一般大于 $5.0g \cdot kg^{-1}$ 比质量,具体位置在云体前部零度层下方的暖云区中,冷区液水含

由以上分析可见福建省夏秋早期的积云的物理特征存在较大差异,不仅特征和特征值有差异,而且其分布情况也不同,但一般而言,同一种天气类型,特征值和特征分布都比较相似,如G2型的6个个例就有3个是出

现双云水区的个例。而这一切都可能与作业条件的选择有直接的关系。

### 3 作业条件选择

#### 3.1 夏秋早期积云的催化方法的确定

已知福建省夏早期积云云水主要集中在暖区,即冷区缺少过冷水,高层自然冰晶较丰富,自然冰晶一般大于或等于 $10^5$ 个,经催化试验后发现以暖云催化为佳,冷云催化效果不明显,这可能与高层自然冰晶充足冷区过冷水量缺乏有关,但具体原因有待进一步探讨。

#### 3.2 催化窗口的确定

根据福建省夏秋早期积云的物理特征及催化试验的结果,我们采用暖云催化的方法,在云体某一高度上的相邻两个网格点内(垂直影响范围600m)分别播入浓度为 $N_R=10^5$ 个 $\cdot\text{kg}^{-1}$ 剂量的雨滴胚胎(质量为 $4.2\times 10^{-6}\text{g}$ )用于模拟云中播入吸湿性颗粒,结果发现不同天气类型的积云确实存在催化窗口,但位置不定,与云水大值区的位置有关,一般位于大值区的前部和下前部,少数出现在云水大值区的后部。例如图1的虚线等值

线所示,这是一个云体发展较高的个例,该个例仅有一个窗口,窗内最大相对增雨大于35%,随相对增雨最大值区外,相对增雨等值线值递减。这是一种类型,也有的类型窗口内相对增雨值分布比较没有规律,除前部和下前部外,其它位置一般没效果或效果不明显。

对于具有两云水大值区的云体,催化窗口也有两个,具体位置均在云水大值区的下部或下前部,如图2中虚线等值线区所示,这是G2型的个例,该虚线等值线就是催化作业的窗口,暖区云水大值区下方的窗口内相对增雨大于15%,冷区云水大值区下前方的窗口较大但相对增雨量大于30%的区域就比前者大。分析以上情况,可给人工增雨作业的指挥者在作业窗口的选择上以启发性的指导,也即当雷达观测到云顶高度较高,云状呈塔状时,可先在自然暖区内寻找窗口,对云顶高度不太高,云型出现蘑菇状的积云单体,催化窗口应选择在 $0^\circ\text{C}$ 层附近。尽管如此,有的天气类型如G1、G3、G5、G6、D型的作业窗口基本可定,具体如表2所示:

表2 部分天气类型云的催化窗口及最佳增雨范围

天气类型	催化时间/min	催化高度/km	绝对增雨/mm	相对增雨/%
G1	6~15	2.0~4.0	5.00~10.46	17.09~62.50
G3	9~18	3.0~3.4	1.00~6.63	7.17~41.29
G5	12~18	2.0~4.4	1.382~10.93	59.10~1159.8
G6	9~15	3.6~4.4	5.16~5.55	19.62~25.55
D	6~39	1.8~3.0	2.57~3.46	12.16~16.72

#### 3.3 催化剂量的选择

由于福建省夏季积云的冷区内云水缺乏,且自然冰晶丰富,因此试验过程就不进一步对冷云催化剂量进一步探讨,而主要对暖区催化的催化剂量作进一步研究。

我们选用从不同天气类型中催化效果较佳的个例中分别随机抽取1~2份(视各类型

中所占份数比例抽取,共抽取18份),并在最佳催化窗口上对它们分别改变催化剂量,据以上的播撒方式进行分档试验播撒,求出各档的平均相对增雨量,并将各档的催化剂量与之对应的平均相对增雨量的对应关系作出图3。

从图3中可以看出,福建省夏秋季节积

云的暖云催化剂量的最佳值为  $1.0 \times 10^5$  个  $\cdot \text{kg}^{-1}$ , 其平均最大相对增雨量为 28%, 当催化剂量小于  $1.0 \times 10^5$  个  $\cdot \text{kg}^{-1}$  时, 相对增雨量随催化剂量的增加而增大, 当催化剂量大于  $1.0 \times 10^5$  个  $\cdot \text{kg}^{-1}$  时, 相对增雨量随催化剂量的增加而减少, 也即催化剂量随相对增雨量的变化呈单峰谱分布形式, 这一结果很有意义, 它不但揭示出暖云催化增雨剂量的最佳值, 也为人工消雹原理的假设提供一份有意义的论据。

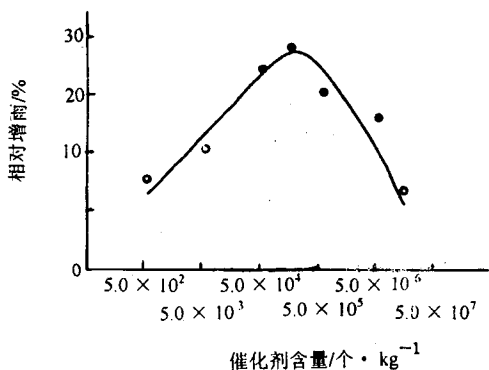


图3 相对增雨量随催化剂量变化

针对福建省夏秋早期积云的物理特征以及催化试验的结果分析, 我们确定对 10 年个例选用催化剂量为  $1.0 \times 10^5$  个  $\cdot \text{kg}^{-1}$  的大滴用于模拟吸湿性人工核, 在各天气类型的催化窗口进行全面播撒, 结果 95% 以上有增雨效果, 这进一步说明了福建省早期人工催化积云增雨是有效果的, 但效果的大小须视如何选择科学的方法进行作业而定。一般情况下, 副热带辐合型(F)和西风槽影响型催化效果较差或出现无效, 具体原因待进一步探讨。

#### 4 应用举例

根据福建省夏、秋早期积云的物理特征和催化试验结果, 我们对福建省夏秋积云的概况, 以及采用什么样的作业方法, 选择什么样的作业条件已有一定的认识, 因此, 对不同

的天气类型采用不同的模式初始参数, 选用 NDP-FORTRAN 和 BORLAND C++ 交互作用的方法, 建立了人工增雨指挥系统中的积云模式分系统, 该系统可在任选不同天气类型、不同催化窗口、不同催化剂量、不同作业方法进行催化试验, 并能将模拟催化效果的评估及其作业条件和催化前后雨强随时间变化分布图分别显示出来。我们选用图 1 的个例, 这是 1989 年 7 月 2 日的个例, 是早期的一个积云降水日。那年当 6 月底梅雨结束后福建省便进入了历史上少有的大旱期, 旱期一直持续到 8 月 23 日才宣告结束, 在此期间福州单站出现了 15 个积云降水日, 但因降水量很少, 缓解不了旱情, 1989 年 7 月 2 日当天福建省沿海受西伸的副热带高压控制, 旱区位于副高北侧 588 线附近, 属副高北侧型 G3, 如图 4 所示, 由于低层扰动影响, 测

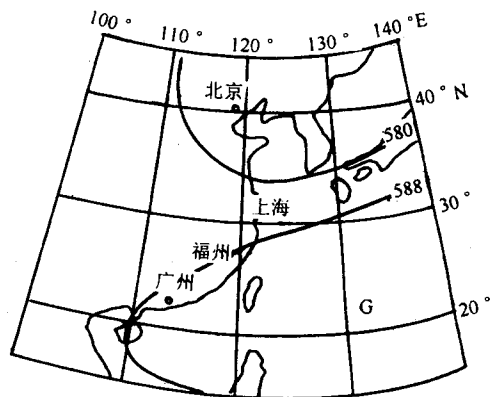


图 4 1989 年 7 月 2 日 08 时 500hPa 天气形势  
站(福州)附近于午后多处出现对流云发展, 地面观测有 Cb 云出现, 雷达观测福州地区上空有 10km 高 41dBz 强回波, 我们将福州站 07 时的探空输入系统。经自然降水考察发现, 云水大值区在  $0^\circ\text{C}$  下方的暖区中, 如图 1 所示, 此后决定选择暖云催化方法, 并在催化窗口内随机抽取  $T = 18\text{min}$ 、 $H = 3200\text{m}$  的位置播撒入大滴(质量为  $4.2 \times 10^{-6}\text{g}$ )以模拟吸湿性核进行催化, 运行 2 分钟后, 得出结果如表 3 和图 5 所示。

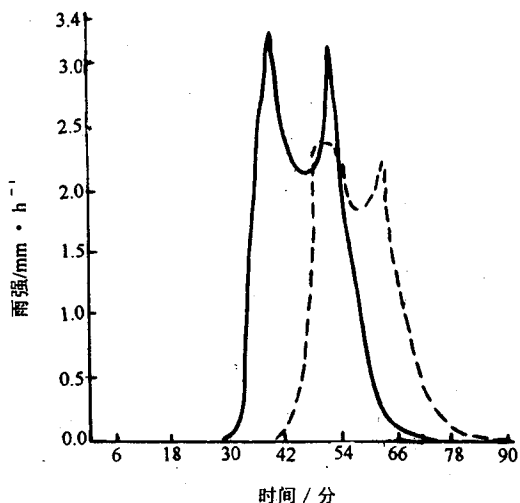


图5 催化云和自然云降水随时间变化

表3 催化效果评估及其作业条件

项目	数值
自然降水量/mm	15.830
催化降水量/mm	20.853
绝对增雨量/mm	5.023
相对增雨/%	31.73
催化方法	暖云催化
催化剂量/个·kg <sup>-1</sup>	1×10 <sup>5</sup>
催化高度/m	3200
催化时间/min	18

表3显示评估结果和相应作业条件,图5是催化云和自然云降水随时间变化的曲线分布图。从表3可见,在当天积云的下前部的3200m高度上播入吸湿性核可以达到明显的增雨效果,相对增雨量达30%左右。再看图5,催化后降水量增大,雨强峰值增大,降水时间提前,说明了该积云经暖云催化后改变了降水分布达到了催化增雨的效果。

### 5 结论

通过人工增雨云模式分系统的建设,我们摸索出一条云模式在人工增雨系统中业务化的研究路线和方法,并得到一些有意义的结论。

① 一维时空云模式要转化成为业务化运行必须经过充分的调试才能确定符合相应

实际降水情况的云模式,经过天气形势分类后调试出的云模式系统,可以较好地定性预报积云自然降水,预报准确率达75%以上。

② 通过广泛催化试验可以了解当地云的物理特征。

福建省夏秋早期的积云主要有两种类型,一种是对流发展旺盛、云顶高度约9km以上的积云,另一种是受层结制约云顶高度约8km左右的积云,前者仅有一个云水大值区位于零度层下方,后者一般有两个云水大值区,一个位于零度层下方的暖区中,另一个位于零度层附近。

③ 福建省夏秋早期的积云过冷水缺乏,自然冰晶充足,因而催化方法选择暖云催化效果较佳,冷云催化一般无明显效果。

④ 福建省夏秋季早期积云存在催化窗口,一般位于云水大值区的下方或下前方。

⑤ 福建省夏秋早期积云在催化窗口上播入质量为 $4.2 \times 10^{-6}g$ 的雨滴胚胎,用于模拟吸湿性颗粒,其最佳的撒播剂量为 $1.0 \times 10^5$ 个·kg<sup>-1</sup>,大于或小于该剂量的相对增雨量,均远小于剂量为 $1.0 \times 10^5$ 个·kg<sup>-1</sup>的效果。

⑥ 采用NDP-FORTRAN与BORLAND C++交互使用的云模式系统具有界面美观、操作简便、计算速度快、可进行人工增雨效果评估、作业条件选择等优点。

### 参考文献

- 何观芳等. 人工影响积雨云机制的研究. 应用气象学报, 1991, 2(1): 32~39.
- 胡志晋等. 积云微物理过程的数值模拟: (一) 微物理模式. 气象学报, 1987, 45(4): 467~483.
- 胡志晋等. 层状云微物理过程的数值模拟: (一) 微物理模式. 气象科学研究院院刊, 1986, 1(1): 37~50.
- 梁必骥. 天气学. 北京: 气象出版社, 全国高等气象院校试用教材, 1980版.
- 叶家东. 积云动力学. 北京: 气象出版社.

(下转 39 页)

# Application of Cumulus Model to Artificial Precipitation Enhancement

Zheng Shuzhen Zeng Guangping Zhang Changan Sui Ping

(Fujian Research Institute of Meteorological Science, Fuzhou 350001)

He Guangfan

(Academy of Meteorological Science)

## Abstract

Cumulus precipitation days ( $R \geq 0.1\text{mm}$ ) in Fuzhou, Fujian during summer and autumn drought seasons from 1985 to 1994, were classified to twelve weather patterns, and were simulated respectively by and 1-D time dependent dual-parameter cumulonimbus cloud model. The precipitation forecast accuracy is more than 75 percent. By artificial seeding simulation, the physical character of cumulus precipitation during drought season in Fujian, the artificial seeding method, the seeding dose and seeding position were determined. Some significant results were achieved. Using NDP-FORTRAN and BORLAND C++ program design the cumulus model systems were applied to the system of command of artificial precipitation enhancement.

**Key Words:** cumulus model seed operation artificial increasing precipitation