

# 对流云人工增雨作业等级预报

叶建元 徐永和 丁建武

石 燕

(湖北省人工影响天气办公室, 武汉 430074) (中国气象局武汉暴雨研究所)

## 提 要

结合南方对流云人工影响天气作业特点, 在人影作业判据各项分指标的基础上, 提出一种综合性判据, 为基层人影作业提供操作性较强的人影作业指标。通过 2001 年作业试验, 将作业等级结论与积云数值模拟结果和实际降水进行分析, 验证了人影作业等级预报的可行性, 这对于对流云人工影响天气作业指挥具有实际的意义。

**关键词:** 对流云 人工增雨 作业等级

## 引 言

盛夏季节, 湖北省人工影响天气作业(简称人影作业)对象云以对流云居多。根据 1975~1987 年武汉 8 月份共 403 个算例模拟计算得出积云总频率为 80%。由于对流云生命史一般为几十分钟到几小时, 因此对对流云实施人工增雨作业指挥, 尤其是作业催化机会的把握难度极大。

目前, 全国各省尤其是北方省份, 如吉林、黑龙江、河北以及河南等地, 都在建立有各自地域特色的人工增雨作业指挥系统, 但由于在这些省份, 作业主要在春、秋季开展, 作业对象主要针对层状云, 对流云作业指挥系统并不多见。另一方面, 在开发作业指挥系统过程中, 各项指标使用相对比较独立<sup>[1]</sup>, 国内利用综合指标实施人工增雨作业指挥的情况尚不多见。

“九五”末以来, 湖北省重点建设人工增雨作业指挥系统。其中, 为更好地指挥飞机及各级地面人工增雨作业, 我们引入了人工增雨作业等级的概念, 主要是运用天气资料及预报、卫星、雷达, 以及云的相关探测资料, 综合各项指标, 得出人影作业的等级, 为基层人影作业指挥提供一个综合判据, 从而提高作业效率。

## 1 对流云人工增雨作业等级预报概念及等级划分

在对流云人工增雨作业指挥过程中, 对作业产生影响的因子很多, 本文主要考虑天气预报和云的宏微观方面的因子, 即从天气预报、云模式、雷达回波、物理量分析、闪电定位等方面选择影响因子。

### 1.1 作业等级因子

根据对流云人工增雨作业特点, 其作业等级考虑因子主要有:

- ①常规天气预报: 武汉气象中心 MI-CAPS 本地接口的全省分片降水预报;
- ②中尺度模式预报: 武汉区域气象中心预报模式 MAPS 降水预报;
- ③云模式: 预期增雨率、最大上升气流;
- ④雷达回波: 湖北省武汉、宜昌、十堰雷达的回波强度、顶高、底高;
- ⑤物理量分析: 理查逊数;
- ⑥闪电定位系统(中国电波传播研究所 XDD03A 型): 闪电强度和频数;
- ⑦地面加密观测资料: 云高等。

### 1.2 各因子等级标准

各因子依据经验和湖北干旱情况划分为 4 个等级(见表 1)。部分因子等级划分根据我们在 1998 年湖北省暖积云人工催化试验结果可选取: 无降水及地时, 云底高约 1km; 云中最大上升气流  $\geq 5\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ; 雷达回波强度  $\geq 15\text{dBz}$ ; 云模式模拟增雨率  $> 0$ 。

表1 人影作业等级因子等级划分

序号	因子	等级(A <sub>i</sub> )			
		1	2	3	4
1	常规降水量预报(mm)	0或>50	5~10	10~25	>25
2	MAPS降水预报片平均(mm)	0~5或>50	5~10	10~20	20~50
3	云模式增雨率计算(%)	0	0~5	5~10	>10
4	雷达回波强度(dBz)	<15	15~30	30~40	>40
5	回波顶高(km)	<5	5~8	8~10	>10
6	回波底高(km)	>1.5	1.5~1.2	1.2~1	<1
7	最大上升气流(m·s <sup>-1</sup> )	<5	5~8	8~10	>10
8	理查逊数 <sup>[2]</sup>	>0.25	0.25~-1	-1~-2	<-2
9	闪电强度	<6000	6000~12000	12000~18000	>18000

1.3 作业等级计算方法

作业等级计算使用下式:

$$M = \sum_{i=1}^9 A_i P_i$$

上式中, *i* 为因子数; A<sub>i</sub> 为相关因子等级; P<sub>i</sub> 为各因子对应的权重系数; M 取值去除小数取整。

作业预报时限可根据需要分为 12h、3~6h, 各因子权重系数由作业预报经验给定。当预报时限为 12h 时, 天气预报、物理量分析、云模式等权重系数起主要作用; 当预报时限为 3~6h 时, 天气预报权重系数则起次要作用, 其它权重系数则起主要作用。其具体取值见表 2。

作业预报等级标准: 1 级, 无作业条件; 2 级, 作业条件一般; 3 级, 作业条件较好; 4 级, 作业条件好。

等级预报地面可作业点可依据相应作业等级确定人工增雨催化剂(炮弹、火箭弹)用量。

表2 权重系数取值

因子	12h 预报	3~6h 预报
常规降水量预报(mm)	0.5	0
MAPS降水预报片平均(mm)	0.3	0
云模式增雨率计算(%)	0.1	0
雷达回波强度(dBz)	0	0.4
回波顶高(km)	0	0.2
回波底高(km)	0	0.2
最大上升气流(m·s <sup>-1</sup> )	0.1	0
理查逊数	0	0.1
闪电强度	0	0.1

2 试验分析

2001年7~8月, 我们利用飞机及地面人工增雨作业时机, 以湖北省作为试验区, 开展了作业等级预报试验。为更有效地指挥人工增雨作业, 结合飞机飞行情况和全省作业布局, 将全省划分为 0、1、2、3、4、5、6 共 7 个区(见图 1), 其中由于空域限制, 0 区仅开展地面高炮、火箭作业。由于 0 区位于湖北省西部, 且在飞机作业期间, 较少开展地面人工增雨作业, 本文选取 0 区为试验点, 区内(含边界)有竹溪、竹山、房县、保康、神农架、兴山、十堰、谷城、南漳等 9 个站点。

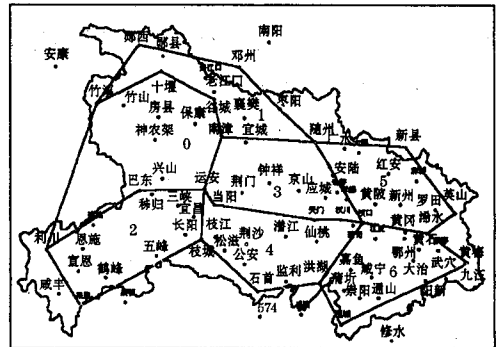


图1 湖北省人影作业分区图

2.1 积云模式计算

湖北省人影作业指挥系统中, 设计可引用一维或二维模式进行计算。本文计算选用一维时变积云套柱模式<sup>[3]</sup>, 该模式是在胡志晋的一维积雨云时变模式<sup>[4]</sup>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。而对于夏季积云为主的混合云系,积云内外部的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合起来。

假设积云在发展过程中所影响或被影响的大气范围是初始半径的几倍,且其半径为  $r$ ,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。系统区域大气的水平辐合辐散速度为 0,则云内外大气运动相互影响、相互反馈的一维公式为:

$$\frac{\partial(\rho w_2)}{\partial z} = -\frac{r^2}{R^2 - r^2} \frac{\partial(\rho w_1)}{\partial z} - \frac{2\rho R v_0}{R^2 - r^2} \quad (1)$$

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

考虑云内空气流体连续,将云内外夹卷混合运动分为运动夹卷和混合夹卷。并且,空气从云内→云外或云外→云内时迅速混合,使云内任一平均特征量  $\varphi_1$  及云外任一平均特征量  $\varphi_2$  产生的变化为<sup>[5]</sup>:

动力夹卷:

$$\frac{\partial \varphi_1}{\partial t} = \frac{C_a}{\rho} \cdot \frac{\partial(\rho w_1)}{\partial z} (\varphi_2 - \varphi_1) \quad \text{当} \frac{\partial(\rho w_1)}{\partial z} > 0 \quad (2)$$

$$\frac{\partial \varphi_2}{\partial t} = \frac{r^2}{R^2 - r^2} \cdot \frac{C_a}{\rho} \frac{\partial(\rho w_1)}{\partial z} (\varphi_2 - \varphi_1) \quad \text{当} \frac{\partial(\rho w_1)}{\partial z} < 0 \quad (3)$$

混合夹卷:

$$\frac{\partial \varphi_1}{\partial t} = \frac{0.2}{r} |w_1| (1 - C_a) (\varphi_2 - \varphi_1) \quad \text{当} \frac{\partial(\rho w_1)}{\partial z} > 0 \quad (4)$$

$$\frac{\partial \varphi_2}{\partial t} = -\frac{r^2}{R^2 - r^2} \frac{0.2}{r} |w_1| \cdot$$

$$(1 - C_a) (\varphi_2 - \varphi_1) \quad \text{当} \frac{\partial(\rho w_1)}{\partial z} < 0 \quad (5)$$

由此,一维时变双重套柱模式由上述公式建立。

增雨率计算公式为:

$$\text{增雨率} = \frac{\text{催化模拟降雨量} - \text{自然模拟降雨量}}{\text{自然模拟降雨量}} \times 100\%$$

本文采用积云模式自然模拟计算时初值为:初始升速取  $1 \sim 2 \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ;初始温差取  $0.5 \sim 1.8^\circ\text{C}$ ,云半径取  $5 \sim 6 \text{km}$ 。探空资料取安康站每天 08:00 资料。采用向过冷水区引入冰晶的方法进行催化模拟。

模式计算结果(见表 3)存在较大差距。究其原因,一是探空资料每日均为 08:00 和 20:00;二是 0 区使用安康站探空资料进行计算,由于安康站和 0 区尚有一段距离,且夏季天气过程有时尺度不大,用探空资料替代会造成一定误差。

## 2.2 作业等级计算结果

试验期间,由于作业主要针对飞机增雨作业,所以作业过程中出现一些计算间断日数,我们对 7~8 月 33 个日数,应用每天 08:00 资料进行了计算分析。计算结果见表 3。

表 3 中,最大降雨量为观测值,平均降雨量根据观测值算术平均求得。根据表 1 各因子分级标准,表 2 计算结果中,作业等级与平均雨量对比,人影作业预报正确率达 99.94%;若与区域最大降雨量对比,则预报准确率仅为 36.46%。由此可见,作业预报等级与区域平均降雨量有很好的对应关系。

## 3 小结

(1) 提出人影作业等级预报的概念,旨在为基层人影地面作业,提供一种简便、适用的新做法,有利于人影作业指挥的具体操作。其结果既考虑了天气方面的因素,也考虑了云的宏微观主要因子,并且结合了积云数值模式模拟情况,基本能适应人影作业预报要求。

表3 作业等级计算结果

日期 (月.日)	模式增 雨率(%)	作业等 级(0区)	最大降 水量(mm)	平均降 水量(mm)	日期 (月.日)	模式增 雨率(%)	作业等 级(0区)	最大降 水量(mm)	平均降 水量(mm)
7.02	12	1	0	0	7.24	6.42	2	36.8	10.6
7.03	10	1	4.4	1.8	7.25	25.3	1	38.7	15.8
7.05	0	1	0	0	7.26	29.7	1	9.2	1.1
7.07	5.88	1	2.9	0.6	7.27	37.7	1	3.5	0.4
7.08	20	1	0.3	0.0	7.28	38.5	2	84.5	11.1
7.09	0	1	0	0	7.29	34.4	2	20	4.0
7.10	32	1	0.8	0.1	7.30	4.23	2	35.1	15.6
7.11	14.49	2	17.4	2.1	8.01	15.2	1	0	0
7.13	15	1	2.0	0.3	8.02	6.8	1	0	0
7.14	1.2	1	0	0	8.03	7.02	1	0	0
7.15	0	1	6.2	1.4	8.04	4.07	1	2.4	0.3
7.17	1.45	1	0	0	8.07	36.84	1	0	0
7.19	0	1	0	0	8.13	14	1	0	0
7.20	1.97	1	0	0	8.14	26	1	20.4	2.9
7.21	30.1	1	6.0	1.0	8.22	8.05	1	4.1	0.7
7.22	3.2	1	24.1	5.1	8.24	0.85	1	0	0
7.23	10.3	2	34.3	10.9					

(2)作业等级计算时,可以根据预报时段,调整各因子的权重系数,体现出各因子在不同预报时段对作业等级的贡献不同。

(3)作业等级存在不足,可以从三个方面加以改进。一是可引进模糊数学理论,使得作业等级值呈连续分布;二是探空资料可进行空间内插,形成区域内网格分布,减小积云模式计算误差;三是级间界定问题,尤其是3、4级天气极不稳定,边界层地形将起重要作用,应加以考虑。

参考文献

- 1 陈怀亮等.人影决策指挥地理信息平台的建立和应用.南京气象学院学报,2002,25(2):265~270.
- 2 杨大升等.动力气象学.北京:气象出版社.1980:323~325.
- 3 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.
- 4 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).
- 5 万蓉等.南方层积混合云催化作业与数值模拟.气象,1996,23(9):21~26.

Operating-grade Forecast of Precipitation  
Enhancement for Convective Cloud

Ye Jianyuan Xu Yonghe Ding Jianwu

(Hubei Weather Modification Office, Wuhan 430074)

Shi Yan

(Wuhan Institute of Heavy Rain)

Abstract

In consideration of the features of precipitation enhancement operations on convective clouds in South China, a kind of comprehensive criterion, which is more workable for weather modification activities in grass-roots regions, is advanced based on several kinds of branch indexes. The operating-grade results are compared with the cumulus numerical simulation results and real precipitation results during the operation experiments period in 2001. Thus the feasibility of the operating-grade forecast is certificated, which is significant to the guidance of precipitation enhancement operations on convective cloud.

**Key Words:** convective cloud precipitation enhancement/rainmaking operating-grade