

# 抗旱型火箭人工增雨效果检验 方法初步研究

蒋年冲<sup>1</sup> 吴林林<sup>2</sup> 曾光平<sup>3</sup>

(1. 安徽省人工影响天气办公室, 合肥 230061;

2. 安徽省气象台; 3. 福建省气象科学研究所

**提 要:** 为了在人工增雨作业中及时进行效果评估, 利用 2005 年江淮地区人工增雨试验基地的资料, 采用区域雨量对比分析、地面增雨效果的回归分析和增雨效果的物理检验方法, 对 2005 年 6 月 9 日、8 月 3 日两次人工增雨的效果进行了分析。结果表明: 两次增雨作业都取得了较好的正效果; 相对增雨在 120%~140%。

**关键词:** 人工增雨 效果检验 物理检验

## On Effect Test of Drought-resistant Rocketry Artificial Precipitation Enhancement Operation

Jiang Nianchong<sup>1</sup> Wu Linlin<sup>2</sup> Zeng Guangping<sup>3</sup>

(1. Weather Modification Office of Anhui Province, Hefei 230061;

2. Anhui Meteorological Observatory; 3. Fujian Meteorological Institute)

**Abstract:** In order to carry out the effect evaluation in drought-resistant artificial precipitation enhancement operation in time, Using the data of the artificial precipitation enhancement experiment base of the Yangtse River and the Huai River area, the effects of two artificial precipitation enhancement operations on 9th June and 3rd August, 2005 are analyzed by means of the methods of area rainfall comparison analysis, regression analysis of the surface precipitation enhancement and physical testing method of precipitation enhancement effect. The results show that ideal positive effects are obtained in both the two drought-resistant op-

资助项目: 中国气象局气象新技术推广项目《基于新一代天气雷达的省级人影业务系统》资助

收稿日期: 2006年3月13日; 修定稿日期: 2006年5月26日

erations, which added the rainfall from 120% to 140%.

**Key Words:** artificial precipitation enhancement effect test physical test

## 引言

人工影响天气的效果检验是一项既重要又困难的研究性和业务性工作。科学的效果检验是发展人工增雨学科的基础、是不可缺少的技术环节;是公众十分关心的问题,也是领导决策的重要依据。随着工农业生产及防灾、减灾的迫切需要,人工影响天气技术已作为科研与应用相结合的抗灾减灾手段被广泛应用。近年来,国内对人工增雨的效果评价(检验)做了许多工作,也取得了一些研究成果<sup>[1-3]</sup>。由于云和降水的时空分布自然变率很大,并受到不同时期气候变化制约,以及作业工具、作业方式和作业时机等因素的制约,如何科学地进行人工增雨效果检验仍是国内外的一个难题,也是我国人工增雨技术的最薄弱环节。为使人工增雨科学技术能持续、健康的发展,科学定量的人工增雨效果检验技术是亟待解决和不可回避的科学问题。随着探测技术的发展,国内已开始利用卫星、新一代天雷达资料做这方面的研究工作<sup>[4,5]</sup>。

安徽近年来在江淮地区人工增雨试验基地对人工增雨试验的效果评估进行了研究,旨在找出适合安徽实际的人工增雨效果检验技术方法,以便为人工增雨的效果评估提供科学依据。

## 1 效果评价方法

新一代天气雷达在人工增雨作业中已得到广泛应用,不仅使人工增雨外场作业指挥更加科学化,而且也给人工增雨作业效果的物理分析提供了更多的客观信息。通过新一代天气雷达提供的产品(主要有作业前后回波强度、高度、VIL等的变化)不仅可以分析作业效果,其统计结果也可为人工增雨效果分析提供因果关系依据。

### 1.1 人工增雨催化效果地面雨量评价方法

目前,人工增雨催化效果评价方法很多,但都是比较单一的,利用几种方法对一次过程进行评价,并用程序方法来实行的还不多。这里主要采用区域雨量对比分析、地面增雨效果的回归分析和增雨效果的物理检验进行综合分析。

#### 1.1.1 区域雨量对比分析

应急抗旱型人工增雨作业其流动性和随机性大,难以设计出一套较严谨的科学方案来进行效果评价。通过区域雨量对比分析给出作业后影响区雨量增值。并通过云型和雷达回波参数确定不同作业云的P值以确定增雨作业影响区面积,即可对作业效果进行评估。

设影响区的平均降水量 $\bar{R}_i$ ,对比区的平均降水量 $\bar{R}_m$ ,影响区面积为S,则人工催化后总增雨量W为:

$$W = (\bar{R}_i - \bar{R}_m)S \quad (1)$$

上述方法实际上假设自然降水在局部范围内分布是均匀的。在实际业务中关键是如何较科学客观地确定影响区面积S。

#### (1) 人工增雨影响区面积估算

人工增雨影响区面积估算是人工增雨效果评估的关键之一。人工增雨后影响区范围受众多因素的影响,如催化云移动、云内湍流大小、云的谱型变化等诸多微物理过程影响。这些因子的影响极为复杂,特别是对流云,其生命史短,云中物理过程变化复杂,所以确定催化后影响区的困难更大,也难以在业务上使用。为了适应抗旱人工增雨作业工作需求,参考福建省提出的效果评价思路,结合安徽抗旱增雨实际情况,提出一种简易实用半定量估算催化作业影响区的方法。该方法是用抛物线来近似模拟催化影响区域。

$$y^2 = P[x + (a^2/P)] \quad (2)$$

$$x = u \cdot t \quad (3)$$

取直角坐标系,  $x$  轴为水平风向,  $y$  轴垂直于水平风向, 坐标原点取作业点 (如图 1), 则抛物线所包围的区域就作为催化作业影响区。

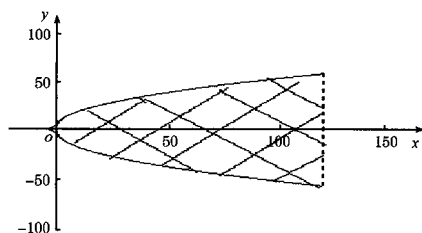


图 1 催化作业影响区示意图

式 (2) 和式 (3) 中  $a$  为火箭 (或高炮) 水平射距,  $u$  为水平风速, 风向为  $x$  轴,  $t$  为催化剂影响的时间,  $y$  为垂直于水平风向上的影响区边界。  $P$  为系数, 在水平风速确定的情况下, 不同作业云可通过不同云型和雷达回波参数确定它的  $P$  值。对安徽来说, 根据不同的水平风速, 雷达回波的顶高、组合反射率因子、回波面积等参数, 积状云  $P$  值一般取 1.0~1.5, 积层混合云  $P$  值取 1.5~2.0。

### (2) 人工增雨作业对比区确定

估算出影响区范围和面积后, 根据作业云的移向, 在作业点上风方依据影响区范围大小选定一个同样大小的区域作为人工增雨作业对比区, 从而评估人工增雨效果。

#### 1.1.2 地面增雨效果的回归分析

利用试验区各站点的地面雨量建立多个一元线性回归预报方程, 以便估算作业期间影响区的自然降水量, 求出增雨值, 来分析增雨效果。程序中对试验区 7 个站 (滁州、定远、凤阳、来安、明光、全椒、天长) 20 年的 4—9 月历史自然降雨量资料按月、按型 (混合型、对流型) 分别进行两两相关分析, 并建立一一对应的一元线性回归方程, 同时进行显著性检验。取相关系数显著度检验的结果均在  $\alpha$  小于 0.05 水平上显著的建立方程计算增雨效果。

## 1.2 增雨效果的物理检验

人工降水试验, 到目前为止, 主要还是从设法改变云的某些微物理条件入手, 进而促使降水的形成或增加雨量。因此, 试验效果不仅能从雨量反映出来, 而且还可以从云的物理结构发生的异常变化中反映出来。云的宏微观结构因催化而发生的这种变化是人工影响的直接效果, 而雨量的增加则是间接的效果。效果检验的另一种分析方法, 主要分析作业前后云的宏微观结构变化, 空中和地面降水的形成和发展, 然后将各方面的资料综合起来, 判断作业效果是否明显。

利用合肥多普勒雷达 6 分钟一次的观测资料回放作业前后降水云系的雷达回波顶高 ( $ET$ )、组合反射率因子 ( $CR$ )、垂直积分液态水含量 ( $VIL$ ) 以及地面测站降水量等的变化, 也可评价人工增雨的催化效果。

对目标云和对比云采用双比分析。通过分析相关物理量催化前后目标区 “A” 和对比区 “B” 变化来评价效果, 取双比值  $D$ :

$$D = (E_{Ai}/E_{A0}) / (E_{Bi}/E_{B0}) \quad (4)$$

式中  $E$  为供比较的物理量。  $E_{A0}$ 、 $E_{B0}$  分别为目标区 “A” 和对比区 “B” 作业时的值;  $E_{Ai}$ 、 $E_{Bi}$  分别为目标区 “A” 和对比区 “B” 作业前后第 “ $i$ ” 时刻的值。供比较的物理量有  $CR$ 、 $ET$ 、 $VIL$  以及地面测站降水量。

## 2 个例分析

### 2.1 地面雨量增值分析

2005 年 6 月 9 日 08 时 500hPa 上, 定远县受西南气流影响, 850hPa 受低涡和切变线影响。22 时云图上低槽切变云系从西南偏西方向移来, 雷达回波强度在 40dBz 左右。23 时利用 WR 型增雨火箭向西方向对云层中部进行人工催化作业。作业仰角为  $57^\circ$ , 扇面为  $22.5^\circ$ , 催化剂量为碘化银 20 克。

2005 年 8 月 3 日定远县受西南气流影响, 从云图和雷达回波上看也是低槽切变云

系。04 时 44 分利用 WR 型增雨火箭向西方对移来的云层中部进行人工催化作业。作业的仰角为 55°，扇面为 22.5°，催化剂量为碘化银 20 克。

现根据 1.1.1~1.1.2 所述内容建立的人工增雨作业效果检验评估系统，对 2005 年江淮地区 6 月 9 日、8 月 3 日人工增雨（定远作业点）个例进行分析。

(1) 区域雨量对比分析

首先输入作业点的经纬度，然后输入雷达回波的移向、移速以及水平风速，作业效果评估系统即可显示出作业点影响区 A 和

在上风方依据影响区 A 范围大小选定的同样大小人工增雨作业对比区 B。当输入测站 3 小时雨量后，即可显示公式 (1) 的结果。从系统界面中总增雨量显示框中可以得出江淮地区 6 月 9 日人工增雨影响区对比区增雨 26354m<sup>3</sup>；8 月 3 日人工增雨影响区对比区增雨 18116m<sup>3</sup>（显示图略）

(2) 地面雨量增值回归分析

利用已经建立的人工增雨效果统计检验分析系统对江淮地区 6 月 9 日、8 月 3 日人工增雨作业过程的增雨效果进行了计算，其结果列于表 1。

表 1 江淮地区 6 月 9 日、8 月 3 日人工增雨（目标区一对比区）效果

时间	目标区	对比区	相关系数 $\gamma$	相关系数显著度	回归方程	对比区实测雨量/mm	目标区雨量		目标区增雨 $\Delta R_{ij}$ /mm	相对增雨 %	t 检验结果	检验结果
							$R_{ij}$ /mm	$R_{ij}$ 实/mm				
6 月 9 日 23 时	定远	凤阳	0.4026	<0.01	$R_{ij}=2.0357+0.3426R_{ij}$	7.3	4.5	28.4	23.9	531.1	7.22	显著
10 日 02 时	定远	天长	0.3272	<0.01	$R_{ij}=2.9508+0.2668R_{ij}$	15.0	7.0	28.4	21.4	305.7	6.05	显著
8 月 3 日 05 时	定远	来安	0.296	<0.01	$R_{ij}=2.7516+0.2825R_{ij}$	0.9	3.0	18.0	15.0	500.0	3.00	显著
3 日 08 时	定远	全椒	0.5729	<0.01	$R_{ij}=1.7629+0.4411R_{ij}$	0.6	2.0	18.0	16.0	800.0	3.72	显著

从表 1 可以看出：定远县这 2 次增雨作业效果是非常显著的。相对增雨 305.7%~800%之间。其差异主要与对比区的选择、相关系数、云的发展强弱有关。

2.2 催化效果的雷达回波变化分析

在人工增雨效果分析系统中，通过点击不同时刻的雷达体扫图，即可得到不同时刻目标区和对比区各物理量的变化数据，见表

2、表 3。

从表 2、表 3 可以看出：催化后，目标区云的回波强度 (CR) 10 分钟后开始增强，30 分钟后开始减弱；垂直积分液态水含量 (VIL) 30 分钟后开始减弱；回波顶高 (ET) 变化不大。而对比区云的 CR、VIL、ET 均变化平稳。根据双比值分析，催化作业 10~30 分钟内，所分析的物理量都发生了非常明显的变化。

表 2 2005 年 6 月 9 日作业区与对比区不同时刻雷达参量变化

时间	22: 59	23: 05	23: 11	23: 17	23: 23	23: 29	23: 35	23: 41	23: 47	23: 53	23: 59	24: 05
项目	$S_{-1}$	$S_0$	$S_1$	$S_2$	$S_3$	$S_4$	$S_5$	$S_6$	$S_7$	$S_8$	$S_9$	$S_{10}$
目标区 CR/dBz	37.5	38.3	39.7	40.9	41.7	41.2	41.0	39.9	38.5	37.5	36.2	36.2
对比区 CR/dBz	39.2	38.7	38.5	37.5	37.4	37.3	37.2	37.1	37.1	37.2	37.3	38.1
双比值 D	0.97	1.00	1.03	1.10	1.12	1.13	1.11	1.08	1.05	1.01	0.99	0.97
目标区 VIL/ (kg·m <sup>-2</sup> )	4.21	4.72	5.67	6.08	6.88	6.11	5.66	5.08	4.31	3.86	3.37	3.41
对比区 VIL/ (kg·m <sup>-2</sup> )	4.89	4.43	4.48	4.09	3.79	3.94	3.81	3.77	3.57	3.73	3.69	4.06
双比值 D	0.81	1.00	1.19	1.40	1.69	1.45	1.40	1.27	1.12	0.98	0.86	0.78
目标区 ET/km	7.6	7.8	7.9	7.7	8.0	8.1	8.0	8.0	7.7	7.4	7.3	7.4
对比区 ET/km	7.1	7.3	7.2	7.2	7.5	7.3	7.3	7.4	7.4	7.6	7.6	7.7
双比值 D	1.00	1.00	1.02	1.00	1.00	1.04	1.03	1.02	0.98	0.91	0.90	0.90

表3 2005年8月3日作业区与对比区不同时刻雷达参量变化

时间	04: 41	04: 47	04: 53	04: 59	05: 05	05: 11	05: 17	05: 23	05: 29	05: 35	05: 42	05: 48
项目	$S_{-1}$	$S_0$	$S_1$	$S_2$	$S_3$	$S_4$	$S_5$	$S_6$	$S_7$	$S_8$	$S_9$	$S_{10}$
目标区 CR/dBz	35.2	35.9	38.4	41.9	43.3	43.2	42.0	41.3	39.8	38.2	35.6	35.0
对比区 CR/dBz	37.4	36.3	36.2	36.2	36.2	35.6	34.9	34.6	33.6	32.9	32.3	32.6
双比值 $D$	0.94	1.00	1.07	1.17	1.21	1.22	1.21	1.21	1.19	1.17	1.11	1.09
目标区 VIL/ ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$ )	2.18	3.64	6.67	8.31	9.29	9.68	8.54	7.28	6.55	5.07	3.80	3.06
对比区 VIL/ ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$ )	3.41	2.46	2.42	2.77	2.57	2.56	2.46	2.36	2.21	1.91	1.63	1.86
双比值 $D$	0.43	1.00	1.86	2.02	2.44	2.55	2.34	2.08	2.00	1.79	1.57	1.11
目标区 ET/km	7.6	8.9	9.2	9.3	9.4	9.4	9.6	9.7	9.6	9.2	8.9	8.7
对比区 ET/km	7.3	6.9	6.8	8.3	8.3	8.0	8.1	7.6	7.3	7.2	7.1	7.1
双比值 $D$	0.81	1.00	1.04	0.87	0.88	0.91	0.92	0.99	1.01	0.99	0.97	0.95

另外,在这两次抗旱作业过程中,作业区(定远)和对比区(长丰)降水时间、降水量的变化趋势比较一致。6月9日的降水,定远、长丰均从21时50分左右开始,10日06时结束;两区小时最大降水量都是在24时。8月3日,定远、长丰从04时40分左右降水开始,10时结束,两区小时最大降水量出现在06时。根据6月9日24时—10日02时地面测站降水量(长丰12.6mm,定远28.4mm)计算得出催化区降雨量是目标区的2.3倍,相对增雨约125.3%;8月3日06—08时地面测站降水量(长丰7.4mm,定远18.0mm)计算得出催化区降雨量是目标区的2.4倍,相对增雨约143.2%。

### 3 结 语

(1) 利用1.1.1节提出的区域雨量对比分析,在程序中可以迅速得到一次作业的增雨结果。这种分析充分考虑了作业的云型和多种雷达参量,物理意义明确,对地面抗旱型人工增雨效果评估非常实用。但它假定了自然降水在局部范围内是均匀的,影响面积是半定量的,因此,计算出的增雨量与实际增雨量之差别还有待于进一步的研究。

(2) 地面增雨效果回归分析方程的建立

充分考虑了不同时间、不同云型。其相关显著度检验达到了统计学的要求。但它仅适用于特定地区。

(3) 利用雷达有关参数对人工增雨作业后的效果进行物理检验,直观、明了,各地均实用。但它只能给出作业有效的证据,而不能给出增雨量的多少。

(4) 由于是对2次过程的分析,其增雨效果的量还值得进一步探讨;其次,催化剂在云中扩散是复杂的,提出一种简易实用半定量估算催化作业影响区的方法是否科学,还值得进一步研究;增雨效果回归方程仅考虑了一元线性,今后还应从物理学考虑试用其它因子建立适用的多元回归方程。

### 参考文献

- 1 白卡娃. 我国南方夏季人工增雨效果评估 [J]. 气象, 2002, 28 (增刊): 38-41.
- 2 蒋年冲, 申宜运. 安徽省人工增雨效果评价研究 [J]. 气象, 2002, 28 (增刊): 48-49.
- 3 文继芬. 一种检验对流云人工增雨效果的方法 [J]. 气象, 2002, 28 (增刊): 43-44.
- 4 王勇, 段昌辉, 徐军昶等. 气象卫星资料在人工增雨效果评估中的应用 [J]. 气象, 2002, 28 (11): 26-28.
- 5 陈冰, 张深寿, 冯晋勤. 新一代天气雷达在人工增雨作业中的应用 [J]. 气象, 2003, 29 (11): 23-26.