

# 1975—1986年古田水库人工降雨效果总分析\*

曾光平 方仕珍 肖 锋

(福建省气象科学研究所)

## 提 要

本文对福建省古田水库地区1975—1986年人工降雨试验效果进行总评价。12年共进行244次随机试验,三种不同的统计分析方法(区域回归分析法、双比分析法和多元回归分析法)均表示122次催化平均相对增雨在20%左右,显著度高于5%水平。此外,按云型、天气条件、雷达回波顶温度分类统计,为选择有利作业条件提供科学依据。云和降水物理观测(冰核、雨水中银离子含量、雷达回波和雨滴谱)及数值模拟的工作,其结果为人工增雨统计结论提供某些初步物理学解释。

关键词: 人工降水; 古田水库, 冰核。

## 一、试验概况

1975—1986年在古田河流域开展人工降雨效果及其检验方法研究。在统计分析基础上,从1982年开始又先后在试验区开展云和降水的物理观测(冰核、雨水中银离子含量、雨滴谱和雷达回波)及数值模拟工作,对这些资料进行总分析。

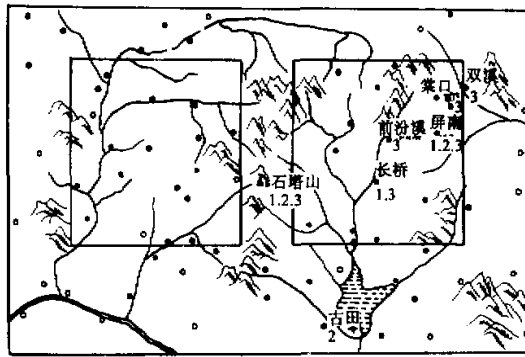


图1 试验区地理位置

- ▲ 作业点(石塔山) ● 自记雨量点 ○ 人工观测雨量点 + 雷达位置  
●<sub>1</sub> 雨滴谱观测点 ●<sub>2</sub> 冰核观测点 ●<sub>3</sub> Ag<sup>+</sup>含量观测点

1989年11月27日收到,1990年3月5日收到 修改稿。

\* 参加本课题有王鸿恩、高步云等人工影响天气室全体同志。

本试验采用固定目标区和对比区的随机回归试验方案<sup>[1-4]</sup>。图1是试验区地理位置及雨量测点布置图。

试验区面积为 14000km<sup>2</sup>，作业点设在古田县西北偏北29km 处的石塔山(1629m)上。试验期主要降水云系是自西向东移动，且 500hPa 高空主要吹西南偏西风，这样把目标区 A 设在作业点下方(石塔山东偏北方向)，面积为 1500km<sup>2</sup>，在它的正西面选一个面积相等的对比区 B。二区间隔 11km，作业点位于二区中间，可以防止催化剂对 B 区的污染。二区地理条件大体相似，区域雨量相关很好( $r=0.8605, \alpha < 0.001$ )，回归分析比较有效。

试验区共有 83 个雨量站，此外在目标区还设置云物理观测点(进行大气冰核、地面雨滴谱和雨水中 Ag<sup>+</sup> 等观测)。

试验单元取 3 小时时段。根据雷达观测，试验云的移速一般在 30 km/h 左右，被催化云移过目标区需 1.5 小时，作业时间一般不超过半小时。所以前一催化单元所播撒的催化剂基本上不会残留到下一试验单元，在一定程度上避免了试验单元间的污染。

根据天气预报、雷达观测、探空资料及事先规定的指标来选定试验单元。当天气预报有降水系统过境时，即由 711 雷达监视，若在试验单元前半小时二区云的回波顶高在 5500m(层状云)或 6000m(积状云和混合云)以上，回波强度为中等强度以上，且 500 hPa 高空风向介于 217—290° 就选为试验单元。根据随机程序，决定是否催化。

随机化程序是由不参加现场试验人员从随机数字表上抽取若干随机数码，顺序编号作为签码，密封备用。事先规定单数为催化单元，双数为非催化单元。为避免试验人员在判断作业条件时掺杂主观偏见，现场试验人员事先不知道它的内容，只是根据上述指标作出是否符合作业条件。如合宜就作为试验单元，然后顺序抽取一个随机签码，如单数，就催化，如为双数，就不催化，作为对比。

试验期作业云云顶高度都在零度层以上，云的上部为冷云。同时，作业点自然冰核背景观测结果表明，试验区大气冰核浓度为  $10^{-1}—10^0$  个/L\*。可见试验区自然云中冰晶不足，降雨效率不高\*\*，因此我们采用人工影响冷云的方法在云中引入人工冰核。

播撒工具采用“三七”高炮和小火箭，发射高度为 2600—5000m，加上作业点石塔山高度(1629m)，可把催化剂直接送到零度层附近。每次碘化银用量(324—132g)平均为 230g，介乙醛平均用量为 1500g。根据作业云相对炮点不同位置分别采用前倾梯度组合、水平组合和同心圆组合方法射击。作业时一般采取打打停停或集中时间射击。一次催化单元打炮时间控制在半小时内。

## 二、效果统计分析

### 1. 统计分析方案

我们采用区域回归分析方法、双比分析法及多元回归分析法分析催化效果。

由于降水自然起伏影响人工降水效果检验，所以在效果统计分析前首先用数值模拟

\* 肖锋，石塔山自然冰核观测，福建气象科技，1984 年第 1 期。

\*\* 曾光平等，华南前汛期锋面云系降水效率及其人工影响(待发表)。

方法(自然复随机化试验法)确定,要在一定的显著度上,以一定的检出率检出一定的试验效果,需多长的试验周期(试验单元)。

(1)区域回归分析 由于采用参量性检验法—— $t$ 检验法检验其显著度,这就要求参加统计的变量服从正态分布,综合考虑统计变量的正态“拟合度”和区域相关性,取3小时区域面积加权平均雨量的四次方根作为统计变量(其正态拟合概率达0.9以上,区域相关系数达0.8以上)。回归分析时采用多个事件 $t$ 检验法和方差不相等的双样本回归分析法检验效果<sup>[5]</sup>。回归分析时不仅进行合计统计分析,而且还按云型、天气条件以及雷达回波云顶温度分类统计。

按云型分作三类: S(层状云), C(积状云), S+C(积层混合云,指在大片层状云中嵌入对流单体)。

按试验区天气条件分成四类: 锋前、锋区、锋后和高压。

按作业云回波顶温度分四类:  $T > -5^{\circ}\text{C}$ ,  $-10^{\circ}\text{C} < T \leq -5^{\circ}\text{C}$ ,  $-15^{\circ}\text{C} < T \leq -10^{\circ}\text{C}$ ,  $T \leq -15^{\circ}\text{C}$ 。

(2)双比分析 假设目标区和对比区3小时区域雨量加权平均值成比例,作双比值

$$R = \frac{\bar{Y}_s / \bar{X}_s}{\bar{Y}_{ns} / \bar{X}_{ns}}$$

式中,  $\bar{Y}_s, \bar{X}_s$  为催化时段目标区和对比区3小时区域雨量加权平均值;  $\bar{Y}_{ns}, \bar{X}_{ns}$  为非催化时段目标区和对比区3小时区域雨量加权平均值,如果人工降水无效,则双比值  $\bar{R} = 1$ ;  $\bar{R} > 1$  表示正效果,  $\bar{R} < 1$  表示负效果。

双比分析时取区域雨量的本身,效果的显著性检验采用非参量性的秩和检验法。

(3)多元回归分析法<sup>[6]</sup> 在效果统计检验中,我们选择一些与自然降水有密切关系,而又不受人工影响的物理量作为协变量( $X_i$ )来估计目标区的自然降雨量( $Y_0$ )。这样所建立的 $Y$ 倚 $X_i$ 的多元回归方程不仅能反映出降雨量和这些因子间的物理规律,而且也可提高人工降雨效果检验的可靠性,并可望缩短试验的周期。

本文挑选试验区区域面积加权平均雨量,雷达参数,大气稳定度和水汽条件等10个因子作为协变量。

利用逐步回归方法挑选因子建立自然降水预报方程,对试验效果进行回归分析时,采用 Welch 检验法<sup>[3]</sup>检验其显著度。

## 2. 催化效果的合计统计分析

降水自然起伏对人工降水效果检验影响的数值模拟结果表明:要在 $\alpha < 0.05$ 显著度上,检出率在80%条件下,检出20—30%增雨效果,需200个左右样本;若检出率为90%则需样本数为250个左右<sup>[7]</sup>。12年来共进行244次随机试验,所取的样本数基本符合数值计算结果的要求。

### (1)区域平均雨量回归分析

统计结果列于表1。

表 1 区域面积平均雨量增雨效果的合并回归分析和按云型分类回归分析

		合并统计	按云型分类统计		
			层状云	积状云	混合云
试验次数	总计	244	57	58	129
	催化试验	122	19	24	79
	非催化试验	122	38	34	50
非催化试验单元	区域雨量相关系数 $r_2$	0.8389	0.9371	0.8000	0.7965
	$r_2$ 的显著度 $\alpha_2$	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001
	区域回归方程	$Y=0.3194+0.7852X$	$Y=0.2131+0.8577X$	$Y=0.3979+0.7313X$	$Y=0.3435+0.7703X$
催化试验单元	区域雨量相关系数 $r_1$	0.8514	0.8241	0.9406	0.8273
	$r_1$ 显著度 $\alpha_1$	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001
	区域回归方程	$Y=0.3728+0.8044X$	$Y=0.1203+0.9802X$	$Y=0.3335+0.7911X$	$Y=0.4377+0.7748X$
试验效果	绝对增雨量(mm/3h)	1.21	0.97	0.25	1.90
	相对增雨量(%)	23.81	24.23	5.90	33.96
	显著度 $\alpha$ (%)				
	$\alpha$ 双	0.14	3.3	10.7	0.09
	$\alpha$ 多	0.21	4.5	13.2	0.17

注： $\alpha$  双是按双样本回归分析法检验的单边显著度  $\alpha$  多是按多个事件检验法检验的单边显著度

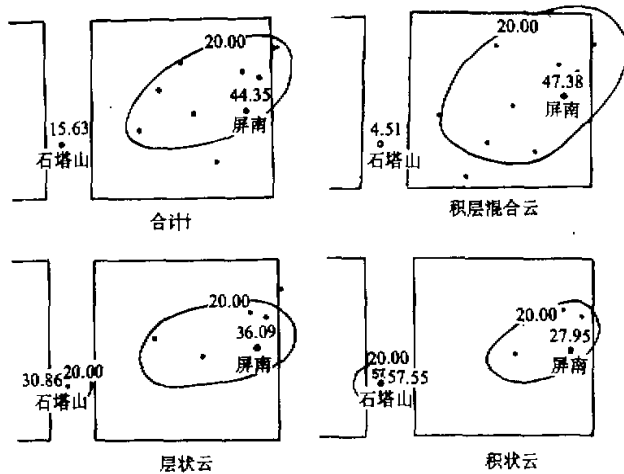


图 2 单站增雨效果等值线图(%)

● 显著性水平高于5%的站

122 次催化在 1500km<sup>2</sup> 目标区内平均相对增雨 23.81%, 平均绝对增雨 1.21 mm/3h, 显著度达到 0.14% 水平, 配合物理量的观测还采用双样本回归分析法检验目标区单站雨量的催化效果, 控制变量仍取双比区区域面积平均雨量, 倚变量则取目标区各单站雨量. 统计结果: 石塔山平均相对增雨 15.63%, 平均绝对增雨 1.13 mm/3h, 显著度为 4.1%; 屏南站平均相对增雨 44.35%, 平均绝对增雨 1.77 mm/3h, 显著度达到 0.1% 水平. 单站增雨分布见图 2.

### (2) 区域平均雨量的双比分析

结果见表 2.

$\bar{R} = 1.2021$ , 即人工催化增雨 20.21%, 显著度为 0.45%.

表 2 区域平均雨量增雨效果 (合并) 双比分析

	样本数	$\bar{Y}$	$\bar{X}$	$\bar{Y}/\bar{X}$	$\bar{R}$	秩序和	$\alpha$	显著度 $\alpha$ (%)
非催化	122	6.2499	6.4830	0.9640	1.2021	13504	2.6140	0.45
催化	122	8.2671	7.1515	1.1588		16386		

### (3) 多元回归分析

经逐步回归分析得出如下预报方程:

$$Y = 5.1692 \times 10^{-2} + 6.9130 \times 10^{-1} X_1 + 8.6095 \times 10^{-5} X_3 + 5.5494 \times 10^{-5} X_4,$$

$$F = 141.33. S(\text{标准差}) = 0.1826.$$

其中  $X_1$  为试验单元对比区区域面积加权平均雨量(mm/3h)的四次方根,  $X_3$  为作业云厚度(m),  $X_4$  为作业云过冷却层厚度(m),  $Y$  为试验单元目标区区域面积加权平均雨量(mm/3h)的四次方根.

$r_{Y, X_1} (= 0.8902) > r_{Y, X_3} (= 0.8594)$ , 可见利用多元回归提高预报自然降水能力. 分析结果表明 113 次催化(1975—1984 年)平均相对增雨 24.16%, 绝对增雨 1.24mm/3h (显著度达到 0.21%, “Welch” 检验法).

从回归方程还可以看出  $X_1$  是主要因子, 但其它因子也有一定的作用, 它们在某种程度上反映出云体宏观物理量对降水的影响. 如在方程中  $X_3$ ,  $X_4$  表示云层厚度和过冷却层厚度, 这表明云层厚度和过冷却层厚度这两个参量对降水有一定影响, 即云层越厚、过冷却层越厚, 影响区自然降雨量比对比区自然降雨量越大.

## 3. 催化效果分类分析

### (1) 按云型分类

分析结果见表 1, 可以看出, 积层混合云催化效果最好, 催化 79 次, 平均相对增雨 33.96%, 显著度为 0.09%, 平均绝对增雨 1.90mm/3h; 层状云次之, 积状云效果不显著. 从单站增雨分布(图 2)来看, 相对增雨  $\geq 20\%$  区域积层混合云最大, 积状云最小. 增雨中心屏南站积层混合云增雨 47.38%, 积状云仅增加 27.95%. 这可能是积层混合云

表 3 区域面积平均雨量增雨效果按试验区天气条件分类回归分析

		锋 前	锋 区	锋 后	高压控制或 高压边缘
试 验 次 数	总 计	59	96	37	44
	催 化 试 验	33	46	15	22
	非 催 化 试 验	26	50	22	22
非催化 试验单元	区域雨量相关系数 $r_2$	0.8279	0.8588	0.6429	0.9437
	$r_2$ 的 显 著 度 $\alpha_2$	<0.001	<0.001	$\approx 0.01$	<0.001
	区 域 回 归 方 程	$Y_2 = 0.1903 + 0.8522 X$	$Y_2 = 0.4161 + 0.7399 X$	$Y_2 = 0.7153 + 0.5198 X$	$Y_2 = 0.0283 + 0.9844 X$
催 化 试验单元	区域雨量相关系数 $r_1$	0.8923	0.8425	0.7103	0.8537
	$r_1$ 的 显 著 度 $\alpha_1$	<0.001	<0.001	$\approx 0.001$	<0.001
	区 域 回 归 方 程	$Y_1 = 0.4523 + 0.7683 X$	$Y_1 = 0.2158 + 0.9281 X$	$Y_1 = 0.5851 + 0.6466 X$	$Y_1 = 0.3708 + 0.7504 X$
试 验 效 果	绝对增雨量(mm/3h)	2.06	1.27	1.11	0.24
	相对增雨量(%)	40.15	23.40	19.74	6.86
	显著度 $\alpha$ (%) $\alpha$ 双 $\alpha$ 多	0.09 0.32	2.3 3.6	4.8 5.3	10.4 12.8

表 4 区域面积平均雨量增雨效果按回波顶温度分类回归分析

		$T \geq -5^\circ\text{C}$	$-5^\circ\text{C} > T \geq -10^\circ\text{C}$	$-10^\circ\text{C} > T \geq -15^\circ\text{C}$	$-15^\circ\text{C} > T$
试 验 次 数	总 计	30	68	56	77
	催 化 试 验	17	30	33	39
	非 催 化 试 验	13	38	23	38
非催化 试验单元	区域雨量相关系数 $r_2$	0.9416	0.8747	0.8546	0.7529
	$r_2$ 的 显 著 度 $\alpha_2$	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001
	区 域 回 归 方 程	$Y = 0.2599 + 0.8533 X$	$Y = 0.2904 + 0.7770 X$	$Y = 0.2486 + 0.8422 X$	$Y = 0.4095 + 0.7384 X$
催 化 试验单元	区域雨量相关系数 $r_1$	0.8020	0.6898	0.9285	0.8797
	$r_1$ 的 显 著 度 $\alpha_1$	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001
	区 域 回 归 方 程	$Y = 0.4500 + 0.7250 X$	$Y = 0.4649 + 0.7521 X$	$Y = 0.2555 + 0.8999 X$	$Y = 0.4778 + 0.7301 X$
试 验 效 果	绝对增雨量(mm/3h)	0.11	1.93	1.48	0.85
	相对增雨量(%)	2.42	43.64	27.17	15.24
	显著度 $\alpha$ (%) $\alpha$ 双 $\alpha$ 多	25.6 30.7	0.08 0.03	2.7 3.3	4.5 4.7

人工降水潜力大于积状云,且积状云尺度小,导致其区域增雨效果不明显。积状云作业点增雨效果均大于层状云及积层混合云,这也可能是积状云“炮响雨落”现象最明显。

### (2) 按天气条件分类统计

计算结果列于表3。统计结果表明在锋前条件时催化效果最佳。33次催化平均相对增雨40.15%,绝对增雨2.06mm/3h,显著度达到0.09%。在锋区天气条件下催化效果次之。46次催化平均相对增雨23.40%,绝对增雨1.27mm/3h,显著度达到2.3%。高压条件下催化效果都不显著。

### (3) 按回波顶温度分类统计

计算结果列于表4。统计结果表明:当回波顶温度在 $-5 \sim -10^{\circ}\text{C}$ 时催化效果

表5 不同雨强下催化效果合并回归分析和按云型分类回归分析

	对比区自然雨量 (mm/3h)	目标区平均雨量增值		
		绝对增雨 (mm/3h)	相对增雨 (%)	显著度(%)
合 并	0.40	0.26	32.43	} >5
	1.00	0.43	28.99	
	3.00	0.85	25.37	} <5
	5.11	1.21	23.81	
	9.00	1.77	22.29	
	16.00	2.66	20.89	
层 状 云	0.40	0.01	2.08	} >5
	1.00	0.15	11.56	
	3.00	0.71	22.00	} <5
	3.86	0.97	24.23	
	9.00	2.60	31.21	
	16.00	4.91	35.50	
积 状 云	0.40	-0.06	-6.70	} >5
	1.00	-0.03	-1.61	
	3.00	0.15	4.27	
	4.12	0.25	5.90	
	9.00	0.75	9.75	
	16.00	1.49	12.40	
混 合 云	0.40	0.44	52.12	} ~5
	1.00	0.69	45.13	
	3.00	1.28	37.80	} <5
	5.80	1.90	33.96	
	9.00	2.50	31.62	
	16.00	3.63	28.83	

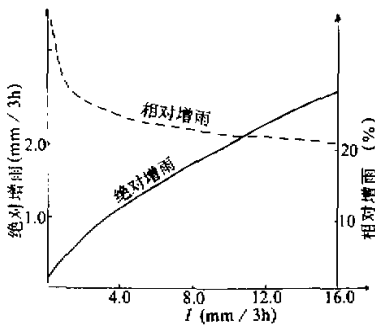


图 3 增雨效果随对比区自然雨强变化的关系曲线

最好,30 次催化平均相对增雨 43.64%,平均绝对增雨 1.93mm/3h,显著度达到 0.08%;回波顶温度在  $-10^{\circ}\text{C}$ — $-15^{\circ}\text{C}$  催化效果次之,33 次催化平均相对增雨 27.17%,绝对增雨 1.48mm/3h,显著度达到 2.7%; $T > -5^{\circ}\text{C}$  条件下催化效果不显著。

(4)按对比区自然雨量分类统计

1)合并统计

计算结果列于表 5.图 3 是增雨效果随对比区自然雨强变化的关系曲线,从表 5 和图 3 可以看出在自然雨强  $I > 1\text{mm}/3\text{h}$  时,绝对增雨随雨强增大而增大,而相对增雨却缓慢地减小。

表 6 不同雨强下催化效果按天气条件分类回归分析

	对比区自然雨量 (mm/3h)	目标区平均雨量增值		
		绝对增雨 (mm/3h)	相对增雨 (%)	显著度 (%)
锋 前	0.40	0.71	125.16	<5
	1.00	1.04	87.92	
	3.00	1.62	54.86	
	5.67	2.06	40.15	
	9.00	2.40	31.09	
	16.00	2.76	21.41	
锋 区	0.40	-0.19	-18.68	>5
	1.00	-0.07	-4.12	
	3.00	0.54	14.35	
	5.08	1.27	23.40	<5
	9.00	2.75	33.06	
	16.00	5.51	42.65	
锋 后	0.40	-0.61	-10.00	>5
	1.00	-0.03	-1.09	
	3.00	0.42	10.90	
	6.33	1.11	19.74	~ 5
	9.00	1.64	24.04	
	16.00	2.96	31.23	
高 压 控 制 或 边 缘	0.40	0.44	102.43	>5
	1.00	0.53	50.24	
	3.00	0.33	10.85	
	3.48	0.24	6.86	
	9.00	-1.24	-13.72	
	16.00	-5.63	-22.86	



## 2)按云型分类统计

计算结果也列于表5.虽然这三类不同的云催化后绝对增雨量都随着自然雨强的增大而增大,但还是各有特点:第一,积状云催化效果不显著.第二,层状云,只当 $I > 3\text{mm}/3\text{h}$ 时显著的水平才高于5%水平.在这个自然雨强区间里,相对增雨和绝对增雨随雨强增大而增大.第三,混合云增雨效果都显著,显著度高于5%水平,随自然雨强增大,绝对增雨有增大趋势,而相对增雨只有减小趋势.

可见,不同云型中只有混合云催化效果显著,层状云只有中—大雨催化效果才显著.

## 3)按天气条件分类

计算结果见表6.可以看出在锋前天气条件下催化效果都是显著的,显著度高于5%的水平.随自然雨强增大绝对增雨缓慢增大,相对增雨有减小趋势.锋区天气条件下和锋后天气条件下催化效果显著区间都是 $I > 3.0\text{mm}/3\text{h}$ ,在这个区间里随自然雨强增加,这二种天气条件下绝对增雨和相对增雨都有增大趋势,只是增大速度有差异,锋区条件下增大快些.高压天气条件下催化增雨效果都不显著.

表7 不同雨强下催化效果按回波顶温度分类回归分析

	对比区自然雨量 (mm/3h)	目标区平均雨量增值		
		绝对增雨 (mm/3h)	相对增雨 (%)	显著度 (%)
$T \geq -5^\circ\text{C}$	0.40	0.34	43.51	> 5
	1.00	0.38	24.46	
	3.00	0.24	6.60	
	4.49	0.11	2.42	
	9.00	-0.63	-6.88	
	16.00	-1.88	12.56	
$-5^\circ\text{C} > T \geq -10^\circ\text{C}$	0.40	0.60	87.58	< 5
	1.00	0.90	68.98	
	3.00	1.51	50.68	
	4.97	1.93	43.64	
	9.00	2.59	36.19	
	16.00	3.46	29.91	
$-10^\circ\text{C} > T \geq -15^\circ\text{C}$	0.40	0.18	25.05	< 5
	1.00	0.37	25.87	
	3.00	0.91	26.74	
	5.35	1.48	27.17	
	9.00	2.33	27.47	
	16.00	3.88	27.81	
$T < -15^\circ\text{C}$	0.40	0.27	27.15	< 5
	1.00	0.39	22.60	
	3.00	0.64	17.67	~ 5
	5.50	0.85	15.24	
	9.00	1.09	13.39	> 5
	16.00	1.45	11.42	

由此可见在各种天气条件下,锋前天气条件下催化效果都显著,锋区,锋后天气条件下只有中一大雨时(对比区自然雨强大于 $3.0\text{mm}/3\text{h}$ ),催化效果才显著。

#### 4)按回波顶温度分类统计

计算结果列于表7.可见回波顶温度在 $-5^{\circ}\text{C}$ — $-10^{\circ}\text{C}$ 和 $-10^{\circ}\text{C}$ — $-15^{\circ}\text{C}$ 时催化效果都显著,显著度高于5%水平,随自然雨强的增大,前者相对增雨有减少趋势,绝对增雨有增大趋势;后者相对增雨和绝对增雨均有增大趋势,只是相对增雨变化很缓慢.回波顶温度 $\geq -5^{\circ}\text{C}$ 时效果不显著,不宜人工催化.回波顶温度 $< -15^{\circ}\text{C}$ 小雨时才显著.

可见在各种不同回波顶温度条件下, $-5^{\circ}\text{C}$ — $-10^{\circ}\text{C}$ 和 $-10^{\circ}\text{C}$ — $-15^{\circ}\text{C}$ 催化效果都显著, $T < -15^{\circ}\text{C}$ 小雨时催化效果才显著.

#### 4. 不同作业工具、不同催化剂增雨效果差异显著性讨论

1975—1981年利用小火箭携带介乙醛(MA)和碘化银播云,1982—1986年用“三七”高炮携带碘化银进行播云试验.我们采用方差分析法检验不同作业工具和不同催化剂增雨效果是否有差异,结果见表8.方差分析表明:不同催化剂和不同作业工具的F值,分别是0.4456和0.2599,远达不到 $F_{0.05}$ 值.可见用小火箭携带MA和AgI以及用小火箭和“三七”高炮携带AgI的播云增雨效果无显著差异.

表8 不同催化剂、不同作业工具催化效果差异显著性检验

	催化样本数		相对增雨 (%)	显著度 (%)	方差分析	
					F	$F_{0.05}$
不同催化剂 (作业工具:小火箭)	MA	29	25.92	2.5	0.4456	3.98
	AgI	46	26.95	2.1		
不同作业工具 (催化剂:AgI)	小火箭	46	26.95	2.1	0.2599	3.95
	“三七”高炮	47	23.72	2.3		

### 三、结 论

1. 1975—1986年在古田水库地区利用小火箭和“三七”高炮携带碘化银和介乙醛播云进行人工降雨试验得到增雨效果,12年共进行244次随机试验,其中催化122次.区域平均雨量回归分析结果表明122次催化在 $1500\text{km}^2$ 影响区内平均相对增雨23.81%,平均绝对增雨为 $1.21\text{mm}/3\text{h}$ ,显著度达到0.14%水平.

区域平均雨量双比分析表明人工催化平均增雨20.21%,显著度达到0.45%水平.

多元回归分析表明人工催化平均增雨24.16%,显著度水平达到0.21%.

2. 按云型分类回归分析,混合云催化效果最好,催化79次,平均相对增雨33.96%,绝对增雨 $1.90\text{mm}/3\text{h}$ ,显著度达到0.09%水平.层状云催化效果次之,积状云催化效果不显著.

3. 按天气条件分类回归分析,锋前天气条件下催化效果最好,33次催化,区域平均

相对增雨 40.15%，绝对增雨 2.06mm/3h，显著度达到 0.09% 水平，锋区天气条件下催化效果次之，46 次催化，区域平均相对增雨 23.40%，绝对增雨 1.27mm/3h，显著度水平为 2.3%。高压条件下催化效果不显著。

4. 回波顶温度分类回归分析结果表明人工降雨试验存在催化条件最佳的温度区间。本试验在  $-5^{\circ}\text{C} \sim -10^{\circ}\text{C}$  区间里催化效果最好，平均相对增雨 43.64%，绝对增雨 1.93mm/3h，显著度达到 0.08%。 $T > -5^{\circ}\text{C}$  时催化效果不显著。

5. 人工降雨效果与自然雨强关系密切

从云型看，只有混合云催化效果才显著，此外层状云在中—大雨时催化效果才显著。

从天气条件看，只有锋前天气条件下催化效果都显著，此外锋区、锋后天气条件下只有中—大雨时催化效果才显著。

从回波顶温度看，当  $-5^{\circ}\text{C} > T \geq -15^{\circ}\text{C}$  时增雨显著度达到 5% 是播云“窗区”。此外， $T < -15^{\circ}\text{C}$  小雨时催化效果才显著。

6. 方差分析表明，不同催化剂、不同作业工具播云效果均无显著差异。

7. 单站增雨效果回归分析表明，作业点积状云增雨效果最明显，混合云最差。影响区单站增雨值及增雨区域范围，积状云最小，混合云最大。

8. 古田水库人工降雨试验取得明显经济效益，每年平均为古田水库增加蓄水 8900 多万立方米<sup>[8]</sup>。

## 四、讨 论

随着人们对云和自然降水以及人工催化物理过程的进一步认识，人工降雨的物理检验方法及数值模拟受到了广泛的重视。将地面降雨的统计检验、物理效应的多例检验及数值模拟等方法结合起来，对人工降雨效果进行综合评价，既能保证增雨效果在统计上合理、可靠，又能反映出一定的物理本质。为了进一步探讨自然降水和人工催化的机制以及播云的微物理效应，为统计结果提供物理解释。几年来在试验区进行自然与人工影响后的雨滴谱（共取 1850 份资料），雨水中  $\text{Ag}^+$  含量（取 777 个水样），雷达回波特征（取 109 次完整资料）等观测、分析以及积云数值模拟等研究工作。

这些云物理观测及数值模拟工作取得了相当数量的有关人工降水及云与降水的微结构资料。其结果可为人工降雨统计结论提供某些初步的物理学解释。这些工作将另文讨论并有待于深入研究，以进一步揭示云、降水及人工催化的机制，使人工降水原理及效果建立在可靠的物理学基础上。

## 参 考 文 献

- [1] 福建省气象局气象科学研究所，南京大学气象系，1979，古田水库人工降水试验效果统计分析，大气科学，第 3 卷，第 2 期，131—140。
- [2] 叶家东，程克明，曾光平，1981，闽中雨季区域雨量统计特性及人工影响的效果，气象学报，第 39 卷，第 4 期，474—482。
- [3] Zeng, G., Xiao, F., Fang, S., Yeh, J., 1985 Rainfall results of the Gutian area cloud seeding experiment 1975—1984.

- hina. Presented at the fourth WMO scientific conference on weather modification, Honolulu, Hawaii, U. S. A., 12—14 August, 1985.
- [4] 曾光平、肖锋等, 1986, 福建省古田水库地区 1975—1984 年人工降雨效果统计分析, 气象科技, 第 5 期, 59—65.
- [5] 叶家东、范蓓芬, 1981, 方差不相等的双样本回归分析, 大气科学, 第 5 卷, 第 2 期, 214—224.
- [6] 曾光平、方仕珍, 1986, 福建省古田水库人工降雨试验效果的多元回归分析, 热带气象, 第 2 卷, 第 4 期, 336—342.
- [7] 曾光平, 1983, 降水自然变异对人工降水效果检验的影响, 气象科学, 第 2 期, 79—87.
- [8] 曾光平、方仕珍, 1987 年, 福建省古田水库人工降雨效益, 南京气象学院学报, 第 10 卷, 第 2 期, 243—251.

## THE TOTAL ANALYSIS OF THE EFFECT OF ARTIFICIAL RAINFALL IN GUTIAN RESERVOIR AREA, FUJIAN (1975—1986)

Zhen Guangping, Fang Shizhen and Xiao Feng

(*Meteorological Institute of Fujian*)

### Abstract

The randomized cloud seeding experiments from April to June of 1975—1986 were taken in Gutian Reservoir Area, Fujian. The total 244 experimental units were selected, 122 of them were seeded and the others unseeded as controlled by randomized procedure. In these experiments, the experimental effect was evaluated with the two-sample regression analysis, the double contrast analysis and multi-variate regression analysis. These analyses indicated that the average rainfall in the target area (1500 km<sup>2</sup>) was increased by a factor of 20% by seeding, with the significant level of 5% (one side test).

The classified statistics with cloud type, temperature of echo top of seeded cloud and natural rainfall intensity provides scientific foundation for selecting the favourable seeding condition.

**Key words:** Artificial precipitation; Gutian Reservoir; Ice nucleus.