

古田水库人工降雨效果的综合评价

曾光平 吴明林 林长城 林祥明

(福建省气象科学研究所,福州 350001)

提 要

该文是对福建省古田水库地区12年(1975—1986年)人工降雨随机试验效果进行综合评价。统计分析表明244次随机试验得出20% ($\alpha < 0.05$)左右增雨效果。各种观测分析(冰核、雨水中 Ag^+ 含量,雷达回波、雨滴谱)及数值模拟结果为人工增雨统计结论提供了初步的物理解释。

关键词:人工降雨;综合分析;古田水库;增雨效果。

1 引 言

人工降雨效果检验是人工影响天气的重要研究课题。将地面降雨的统计分析,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。本文应用福建古田水库地区1975—1986年人工降雨试验期间收集的地面雨量资料,大气冰核观测资料,雷达回波资料,地面雨滴谱观测资料,地面雨水银含量资料及数值模拟方法对人工增雨的效果进行综合评价。

2 试验概况

图1是试验区地理位置及各种云物理观测布点示意图。本试验采用固定目标区和对比区的随机回归试验方案。试验区面积为 14000km^2 ,试验单元取3小时时段^[1]。

从1975—1986年共进行随机回归试验244次。按随机化规则决定,其中122次催化,122次不催化留作对比。为了对降雨效果进行综合评价,除在试验区布置雨量站外(82—93个),还进行了下列云物理观测:

(1) 大气冰核观测:布置三个取样点(石塔山,屏南,古田),采用半格云室法和微孔滤膜法,从1983年到1985年共取413个滤膜样品和644个半格云室观测记录。

(2) 雨滴谱观测:布置 3 个取样点(石塔山、长桥、屏南),采用滤纸斑迹法取样。从 1981 年到 1985 年五年共观测到 1850 份雨滴谱资料。

(3) 雨水中 Ag^+ 含量分析:布置 6 个取样点(石塔山、前汾溪、屏南、长桥、棠口、双溪)。采用多次进样石墨炉原子吸收法对雨水样品中 Ag^+ 含量进行痕量测定。1982—1985 年共分析 785 个雨水样品中 Ag^+ 含量。

(4) 雷达跟踪观测:利用 711 型测雨雷达对符合作业条件的作业云体回波参量进行连续跟踪观测,从正点前 10 分钟起,每隔 10 分钟观测一次。直至作业云移出影响区。几年来共取 109 套完整的回波资料(即 109 个作业单元)。

为探讨人工催化的微物理过程,还应用胡志晋的积云一维时变模式^{[2][3]}模拟积状云自然降水和人工催化过程。

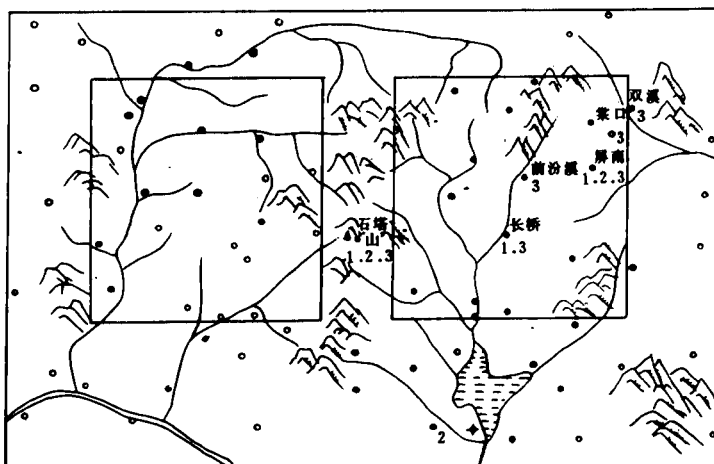


图 1 试验区地理位置

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

3 效果统计分析

我们采用区域回归分析法,双比分析法及多元回归分析法分析催化效果。回归分析时不仅进行合计统计分析,还按云型、天气条件、以及雷达回波顶温度分类统计^[1]。

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% 则需要样本数为 250 个左右^[4]。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结果表明:122 次催化试验合并统计平均相对增雨 23.81%,平均绝对增雨 1.21mm/3h($\alpha < 0.01$)。

其中,按云型分类:混合云催化效果最佳,催化 79 次,平均相对增雨 33.96%,平均绝对增雨 1.90mm/3h($\alpha < 0.01$)。层状云次之,积状云催化效果不显著。按天气条件分类:锋

前天气条件催化效果最佳,33次催化区域雨量平均相对增雨40.15%,绝对增雨2.06mm/3h($\alpha < 0.01$)。锋区天气条件下催化效果次之。高压条件下催化效果不显著。按雷达回波顶温度分类,当回波顶温度在 $-5 \sim -10^\circ\text{C}$ 时催化效果最好,30次催化区域雨量平均相对增加43.64%,绝对增加1.93mm/3h($\alpha < 0.01$)。回波顶温度在 $-10 \sim -15^\circ\text{C}$ 效果次之, $> -15^\circ\text{C}$ 时催化效果不显著。

(2) 区域平均雨量的双比分析结果表明:人工催化增雨20.21%($\alpha < 0.05$)。

(3) 经逐步回归分析得出如下预报方程:

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

其中: X_1 为试验单元对比区区域面积加权平均雨量(mm/3h); X_3 作业云的云厚(m); X_4 为过冷却层厚度(m)。 $r_{\text{总}} = 0.8902$ ($\alpha < 0.01$)。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1.22mm/3h($\alpha < 0.05$,"Welch"检验法)。

4 效果的物理分析

4.1 冰核浓度特征分析

统计结果表明:试验区两种方法观测到的各温度下的冰核浓度与我国北方各地观测到的结果无量级上的差异($-12 \sim -25^\circ\text{C}$ 为 $10^{-1} \sim 10^0$ 个/l; $-25 \sim -27^\circ\text{C}$ 为 10^1 /l)。

福建雨季云顶温度高于 -18°C 的云体出现频率是80.4%,大气冰核观测结果表明:活化温度为 $-12 \sim -20^\circ\text{C}$ 时,冰核浓度为 $10^{-1} \sim 10^0$ 个/l,估计对福建雨季云系进行冷云催化是可行的。

4.2 催化对雨滴谱的影响

通过对不同类型的云催化前后以及催化单元与非催化单元雨滴平均谱的变化来分析催化对雨滴谱的影响,进行比较的平均谱特征量有:由雨滴谱计算的雨强,空间雨水含水量,空间滴的浓度,平均直径,均立方根直径。计算结果见表1和图2。由于作业云移到屏南站需1小时左右,所以表中屏南点取正点后第2小时滴谱资料(下同)。

表1 催化与非催化雨滴谱平均谱的比较

取 样 点	作业 性质	作业样 单元本 数数	雨强 (mm/h)	空间雨 水含水量 (mg/m ³)	平均 直径 (mm)	均立方 根直径 (mm)	谱宽 (mm)	空间浓度(个/m ³)			空间相对浓度(%)				
								小	中	大	合计	小	中	大	
石 塔 山	催化 f_1	36	318	7.69	348	0.207	0.478	5.8	5846	232.3	2.08	6061	96.15	3.82	0.03
	非催化 f_2	24	197	4.23	223	0.192	0.410	4.9	5949	206.2	0.60	6156	96.64	3.35	0.01
	$\Delta f = f_1 - f_2$			3.46	125	0.015	0.068	0.9	-103	26.1	1.48	-76	-0.49	0.47	0.02
	$\Delta f/f_2(\%)$			81.80	56.06	7.81	16.59	18.37	-1.73	12.66	246.67	-1.23			
屏 南	催化 f_1	17	171	5.35	282	0.194	0.410	4.3	7641	204.4	0.71	7846	97.39	2.61	0.01
	非催化 f_2	11	91	3.04	156	0.184	0.394	4.2	4760	99.3	0.48	4860	97.94	2.04	0.01
	$\Delta f = f_1 - f_2$			2.31	126	0.010	0.16	0.1	2881	105.1	0.23	2986	-0.55	0.57	
	$\Delta f/f_2(\%)$			25.99	90.77	5.43	4.06	2.38	60.52	105.84	47.92	61.45			

注 小滴 $0.1 \leq D \leq 0.6\text{mm}$ 中滴 $0.6 < D \leq 3.0\text{mm}$ 大滴 $D > 3.0\text{mm}$

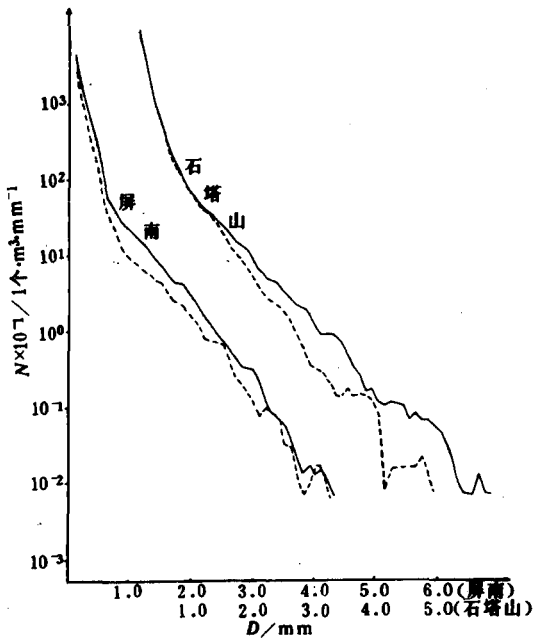


图2 催化云和非催化云雨滴平均谱

(— 催化云, --- 非催化云, 屏南 $N_{\text{催}} = 614.2 e^{-2.6983D}$, $N_{\text{非催}} = 295.7 e^{-2.5986D}$, 石塔山 $N_{\text{催}} = 286.4 e^{-2.0772D}$, $N_{\text{非催}} = 404.7 e^{-2.5337D}$)

从表1和图2可以看出:无论是石塔山或屏南,催化都会引起雨滴平均谱变化。此外,催化后雨滴谱特征量还发生明显变化:①催化后屏南点雨强增加75.99%,石塔山增加81.10%;空间雨水含水量催化后石塔山增加56.06%,屏南增加80.77%;平均直径,均立方根直径,催化单元均比非催化单元大。②石塔山催化单元空间总浓度比非催化单元略有减少,但只是小滴减少,而对降雨起主要作用的中、大滴催化单元有明显增加。屏南点空间总浓度催化单元比非催化单元增加了61.45%,中滴增加最为明显。③催化单元谱宽都大于非催化单元,这些谱特征量平均状况的变化表明催化促使云中中一大滴发展,导致地面雨量增加,与目标区增雨效果统计结果相吻合。

4.3 雨水中 Ag^+ 含量变化

(1)自然雨水和催化雨水中 Ag^+ 含量变化。统计结果表明(表2):除石塔山外,催化雨水中 Ag^+ 含量显著大于自然雨水中 Ag^+ 含量。

表2 自然雨水和催化雨水中 Ag^+ 含量统计结果(10^{-11}g/mol)

取样点	类别	样本数	均值	标准差	最大值	最小值	差异显著度
石塔山	自然雨水	102	0.42	0.24	1.2	0.1	> 0.20
	催化雨水	73	0.44	0.23	1.1	0.2	
屏南	自然雨水	214	0.39	0.24	1.3	0.1	< 0.05
	催化雨水	80	0.89	0.55	2.5	0.1	
长桥	自然雨水	100	0.38	0.20	1.0	0.2	< 0.05
	催化雨水	9	0.96	0.61	1.4	0.2	
双溪	自然雨水	36	0.29	0.16	0.9	0.1	< 0.10
	催化雨水	6	0.36	0.31	1.6	0.1	
棠口	自然雨水	48	0.31	0.14	0.8	< 0.1	< 0.10
	催化雨水	6	0.61	0.30	1.2	0.2	
前汾溪	自然雨水	49	0.27	0.12	0.9	< 0.1	< 0.10
	催化雨水	7	0.44	0.22	1.1	0.2	

(2)雨水中 Ag^+ 含量随时间分布及与地面雨强变化的关系。在增雨中心屏南点共取24

个作业单元加密水样(其中催化 14 次,非催化 10 次),结果表明:14 次催化作业后屏南点水样中 Ag^+ 含量均出现峰值,而 10 次非催化作业 Ag^+ 含量却未出现峰值。根据作业云回波移速粗估,14 次催化作业屏南点雨水中 Ag^+ 含量达到峰值时间与催化云移到屏南时间较一致,同时其峰值都比均值高 2—4 倍。

(3) AgI 浓度随时间、空间的变化与地面区域雨量的关系。利用简化后过冷云中点源扩散方程^[5]来计算 14 次催化作业 AgI 扩散情况,并与相应时段区域雨量进行比较,可以看出区域雨量中心轴线与催化剂最大浓度轴线相吻合,且雨量中心范围与催化剂扩散范围也较一致。

图 3a 是 1982 年 6 月 1 日 17:00—20:00 时段对积层混合云作业雨强与 AgI 随时间变

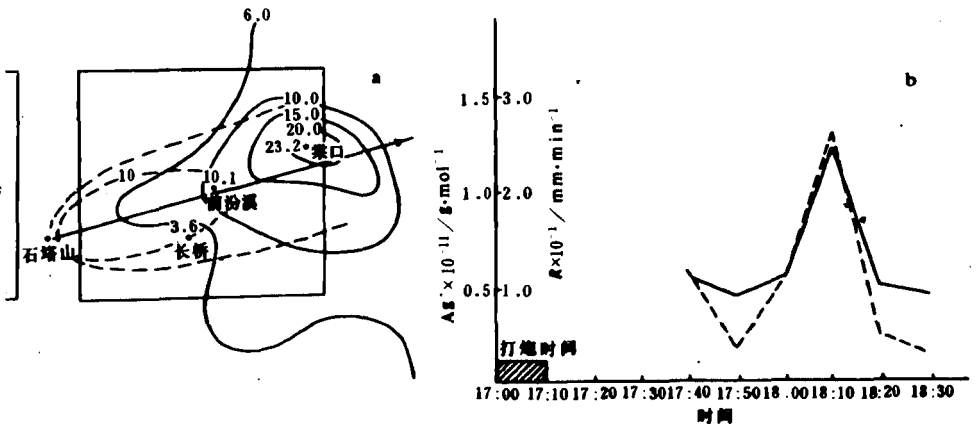


图 3 催化时段 Ag^+ 含量与雨强时空分布图

(a) 区域雨量与 Ag^+ 空间分布图(实线雨量等值线(mm/3h) 虚线 Ag^+ 等值线(个/l)

(b) 屏南站 Ag^+ 与雨强随时间变化图

化剖面图。图 3b 是该作业单元屏南点雨量与 AgI 浓度空间分布图。湍流系数 $k = 80m^2/s$, $U = 10m/s(255^\circ)$, 共发射 58 发炮弹, AgI 348 克, 以每克 AgI 的核生成率为 10^{11} 计算扩散浓度。从图 3a 中可以看出区域雨量中心轴线与催化剂最大浓度轴线相吻合。从图 3b 还可以看出屏南站在 18:10 左右 Ag^+ 含量与 10 分钟雨强同步达到峰值分别为 1.2×10^{-11} 个/mol 和 2.6mm/10 分钟; Ag^+ 峰值为均值的 3 倍, 雨强为前、后 1 小时均值的 3 倍左右。

这表明不仅雨水中 Ag^+ 含量增加与催化有密切关系, 而且 Ag^+ 含量的时、空分布与地面雨强及增雨效果很吻合。

4.4 作业云雷达回波宏观结构的分析

考虑到返回雷达天线的回波信号在途中受降水, 距离和波束宽度等影响, 必须对观测的参量(回波顶高、回波厚度、回波强度)作各项相应的衰减订正和误差订正^{[6][7]}, 并以等效反射率因子(单位 dBz)来表征作业云的回波强度及反映云体内部中大滴分布的变化情况。由于两组样本在作业前就存在差异, 所以采用双比分析来检验不同类型云催化前后这些参量的变化。取双比值:

$$\bar{D} = \frac{\bar{A}_1/\bar{A}_0}{\bar{A}_2/\bar{A}_0}$$

其中: \bar{A} 、 \bar{A}_{n_0} 分别为催化、非催化作业正点后每隔十分钟雷达观测的回波参量算术均值; \bar{A}_{n_1} 、 \bar{A}_{n_2} 分别为催化和非催化作业正点前 10 分钟回波参量算术均值。计算结果列于表 3。

表3 催化与非催化雷达回波参量双比值 \bar{D}

云型分类	样本数		回波参量	0—10分		10—20分		20—30分		30—40分		40—50分	
	催化	非催化		\bar{D}	α	\bar{D}	α	\bar{D}	α	\bar{D}	α	\bar{D}	α
合计	56	53	顶高	1.016		1.053		0.981		1.109	<0.05	0.984	
			厚度	1.001		1.123		1.029		1.172	<0.05	0.990	
			强度	1.023		1.019		1.093		1.111	<0.05	1.172	<0.05
S	8	14	顶高	1.004		1.039		1.032		1.057			
			厚度	0.992		1.053		1.011		0.915			
			强度	1.060		1.007		1.033					
C	13	13	顶高	0.936		1.128		0.940		1.077		0.995	
			厚度	0.939		1.250		1.027		1.195		0.989	
			强度	0.867		0.996		1.064		1.114		0.895	
S+C	35	26	顶高	1.092		1.026		1.007		1.164	<0.05	0.960	
			厚度	1.090		1.067		1.031		1.214	<0.05	0.970	
			强度	1.087		1.047		1.107		1.124	<0.05	1.209	<0.05

合计双比分析结果表明:催化作业后 30—40 分钟云宏观参量发生明显的变化,回波顶高度增加 10.9%,厚度增加 17.2%,回波强度增强 11.1% ($\alpha < 0.05$)。40—50 分钟回波强度仍发生明显变化,增强 17.2% ($\alpha < 0.05$)。

按云型分类双比分析结果表明:积层混合云在催化后 30—40 分钟回波参量以及 40—50 分钟回波强度都发生明显变化。

4.5 人工催化效果的数值模拟

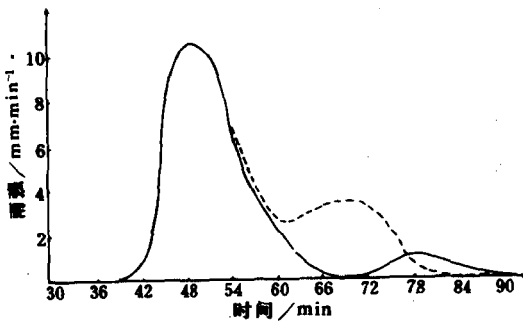


图4 自然雨强与催化雨强的时间变化图
(—自然雨强 ---催化雨强)

本文所用的模式参见文献[2][3],用 1983 年 6 月 10 日 07 时经预报订正的福州探空作为输入来模拟雨季积状云的自然降水过程。模拟表明,这块模式云从初生、发展到消亡共经历了 90 分钟,降水 23.07mm。福州当天 17 时—18 时降水 22.8mm,这与模拟结果较为吻合。

图 4 是自然雨强和催化雨强随时间变化图。由图可见自然雨强存在两个峰值,第一个峰值主要由暖层降水过程产生。第二个峰值主要由冰相降水过程产生。在云体发展到 42 分钟时,在 5500 米附近的 250 米厚度层播入不同剂量冰核来模拟人工催化过程,播入的冰核只影响冰晶浓度,其它参量与自然降水过程完全相同。从播撒后的雨强变化曲线,可以看出催化改变了自然降水过程,其结果使第二个峰值提前到来,并使降雨量加大。播入冰核量为 10^0 个/1、 10^1 个/1、 10^2 个/1。到模拟结束的 90 分钟止,分别增雨 4.0%、16.0%、24.0% 左右。

各微物理参数的分析表明,播入 AgI 后冰晶浓度成量级增加,通过贝吉隆等一系列微物理过程,使冰晶增长并撞冻雨滴转化成霰。霰又碰并云滴和雨滴增大。霰和云水的碰并导致了 Hallett—Mossop 繁生过程的产生,繁生使冰晶大量增加。冰晶又撞冻雨滴成霰,霰又碰并云滴繁生通过这个正反馈过程霰水量的高值区很快出现。同时部分霰又转化成雹,雹的高值区也相继出现。霰和雹消耗云水增长下落,在 0°C 层以下融化成雨滴,最后降到地面,导致地面降水的增加。

5 古田人工降雨试验经济效益分析

12 年试验结果表明,人工降雨试验取得明显增雨效果,给古田水库蓄水发电带来明显经济效益。

利用区域雨量回归分析法分析人工降雨效益。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在 1500km^2 影响区内平均相对增雨 23.81%,平均绝对增雨为 $1.21\text{mm}/3\text{h}$,这样共可增加降水 2.2 亿立方米,按 1.5 立方米水可发 1 度电计算,则增加发电量 3.3 亿度。另外,由于人工催化,使入库水量每年 4—6 月平均增加 8940 万立方米。

上述分析表明古田人工降雨试验取得明显经济效果,据估算,投入与产出比为 1:50。

6 结 论

(1) 古田人工降雨试验采用固定目标区和对比区的随机回归试验方案。在众多试验方案中该方案较为科学,能较客观地定量估计出人工降雨效果。

回归分析、双比分析、多元回归分析结果均表明古田水库人工降雨取得平均相对增雨 20% 左右 ($\alpha < 0.05$),这一结果是可信的。

(2) 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,克服盲目性提供科学依据。

(3) 物理分析表明人工引入 AgI 后,雨水中 Ag^+ 含量时空分布分析表明催化后相应的时间,地区里 Ag^+ 明显增多且与地面雨量区域分布、催化增雨关系密切。雷达回波分析表明催化使云体(特别是积层混合云)回波强度,回波高度,回波厚度增加,说明催化可能使云中成雨过程加强,使云内中大滴数密度增大。雨滴谱分析表明催化使雨滴平均谱平均直径、均立方根直径、谱宽增大,且雨滴空间浓度,特别是对降水贡献最大的中、大滴有明显的增大,这说明催化可能促进云中中—大降雨粒子的发展和下落。

(4) 数值模拟提出一个云底较暖、暖雨过程较强的云中通过冰相催化增加降雨的可能机制。表明在云体发展的适当时刻,适当部位播入适量的人工冰核有可能促使冰相降水过程加强并提前,导致地面降雨的增加。

(5) 古田试验科研与生产相结合,取得了明显经济效益,投入与产出的经济效益比为 1:50。

参 考 文 献

- 1 Zhen Guang-ping. A comprehensive evaluation of the effect of artificial rainfall in Gutian reservoir area, China, Fifth WMO Scientific Conference on Weather Modification and Applied Cloud Physics, Beijing, China, 8-12, May 1989, 551-554.
- 2 胡志晋,何观芳. 积雨云中微物理过程的数值模拟 (一)微物理模式. 气象学报, 1987, 45(4): 467-484.
- 3 胡志晋. 盐粉催化不同生命史的浓积云的数值模拟. 大气科学, 1985, 9(1): 62-71.
- 4 曾光平. 降水自然变异对人工降水效果检验的影响. 气象科学, 1983, 第2期: 79-87.
- 5 申亿铭. 碘化银炮弹在过冷层状云中爆炸后催化剂的扩散问题. 气象科学技术集刊, 第2期: 27-29.
- 6 张培昌. "711"雷达测定回波数据订正的方法. 南京气象学院学报, 1982, 第1期: 83-90.
- 7 庄荫模等. 雷达气象. 北京: 国防工业出版社, 1984. 116-122.

A COMPREHENSIVE EVALUATION OF THE EFFECT OF ARTIFICIAL PRECIPITATION IN GUTIAN RESERVIOR AREA

Zhen Guangping Wu Minglin
Lin Changcheng Liu Xiangming

(Fujian Institute of Meteorology, Fuzhou 350001)

Abstract

Artificial experiments were performed in the Gutian reservoir region during April to June of 1975-1986. The statistical analyses from 244 experiments indicate that the effect of precipitation enhancement can reach about 20% by seeding. Meanwhile, the various cloud physics observations, including the concentration of ice nuclei, the Ag^+ content in rain water, the features of radar echoes and the raindrop size distribution, and numerical simulations have been conducted. The results provide a preliminary physical explanation for the statistical conclusions.

Key words: Artificial precipitation; Comprehensive analysis; Gutian reservoir; Effect of precipitation enhancement.