

湖南单块积云高炮增雨随机化 试验效果的分析^①

刘耀宗 王治平 陈历舒

(湖南省气象局,长沙 410007)

提 要

根据湖南8年夏秋积云随机化高炮AgI增雨试验获得的28块作业云和20块对比云的观测资料,经雷达回波和降水参数的统计和双比分析表明,催化作业对积云的顶高和面积无明显影响,但可能增加回波强度和降低其强中心高度,使作业积云总降水量增加17%,雨量增加28%,雨强增大24%,降雨持续时间延长7%,但统计样本少,显著度不高。

关键词: 湖南 夏秋积云 高炮增雨 随机化试验 效果分析

引 言

湖南省位于中国长江以南,南岭以北,24°39'~30°08'N,108°47'~114°15'E,属亚热带季风气候区。进入夏季后,由于受副热带高压控制,几乎年年都有不同程度的干旱发生。在副高西部边缘和南部东风气流区,常有积云生成,如果对其进行人工影响,能适当增加降水,则可能增加电站和农业灌溉用水,以缓解旱情。基于这一设想,湖南省1959年开展了人工增雨试验,是中国最早进行人工影响天气试验的少数几个省之一。1959~1976年用飞机进行了积云盐粉催化试验,同时做了积云的微物理观测,并在地面用雷达和经纬仪做了积云的宏观特征观测^[1]。本试验期间亦对湖南积云雷达回波及降水特征做过观测与分析。湖南有降水的积云顶高为5.5~19km,云顶温度为0~-79℃、面积为4~400km²、降雨量为0.6~56.2mm,总降水量为100×10³t~300×10³t的频率为23%,≥1000×10³t(相当于一个小型水库的库容量)的频率为37%^[2]。虽然用盐粉催化积云有一

定的效果,但由于湖南降水积云几乎都是顶部温度低于0℃的混合相云。所以用碘化银、干冰催化积雨云更受重视,因其直观效果好,这种试验一直持续至今。

叶家东(1978年)对1975~1977年在湖南凤凰地区进行的37高炮区域回归试验做了统计分析,结果平均增雨55%^[2]。但这个区域回归试验只有3年,各年增雨量起伏很大,且降雨历史资料年代短。为了克服上述缺陷,结合农业抗旱进行了单块积云随机化增雨试验。我们在1989年曾发表一个关于本试验的初步分析^[3],本文是在增加了一些样本后所做的关于本试验效果问题的最终报告。

1 试验设计和资料

1.1 试验区的位置和装备

1979~1981年的7~9月在湖南新化、安化县交界的山区(I区);1983~1988年(1986年做室内分析除外)在浏阳、长沙交界的丘陵区(II区)进行了单块积云增雨随机试验。试验区内的炮点、雷达及雨量自计及雨量筒的设置如图1所示:

^① 湖南省气科所大气物理室全体人员;新化、安化、浏阳县气象局部分人员参加了本试验外场工作。

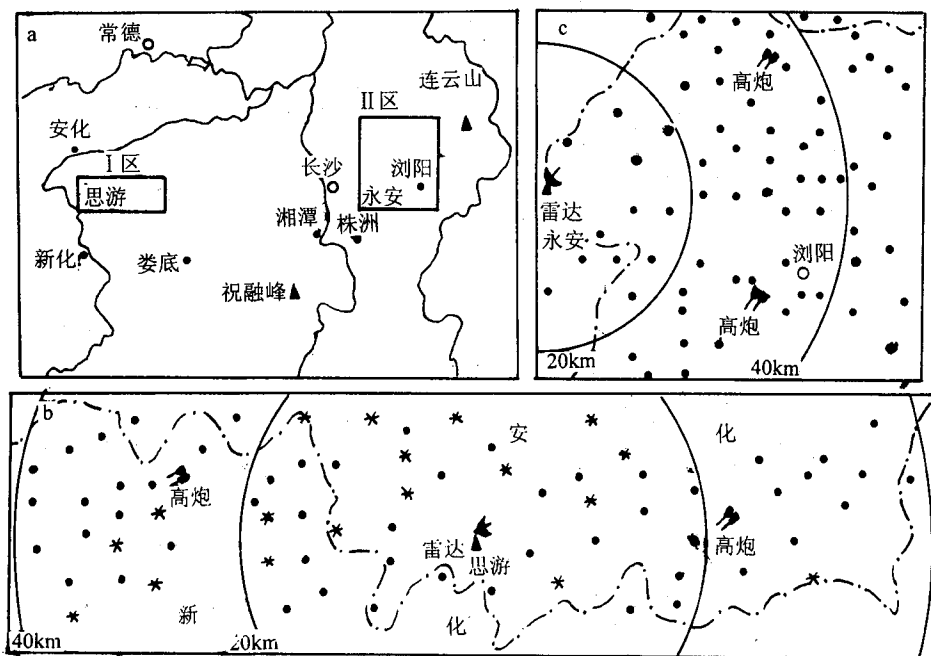


图1 试验区地理位置及设备配置图

a. 试验区的地理位置; b、c 试验区 I、II 设置分布; 实点, 雨量计, 星号: 雨量筒

I 区面积为 1800km², 区内设有 50 个雨量自计和 18 个雨量筒; II 区面积为 3300km², 区内设有 120 个雨量自计, 平均每 25km² 布有一个雨量自计。两区内都有二门 (1987 年三门) 37mm 高炮及一部 711 型 3cm 波长测雨雷达。

1.2 试验催化原理

本试验采用微物理催化原理, 视云块大小每块云发射每发含 AgI 4~6g 的炮弹 10~50 发。在 -10℃ 时每发炮弹可产生约 10¹⁰~10¹¹ 个冰晶, 炮弹爆炸的高度为 3~4km, 湖南夏季 0℃ 层的高度为 5.0~5.5km, 碘化银由上升气流带入云的过冷却区。陈历舒等的计算表明, 这种作业方式是合理而有效的, 有可能迅速达到每升云内增加人工冰核 10⁰~10¹ 个^[4]。

1.3 积云及其降水的观测

当试验区处于有利作业的天气形势下, 每天午后雷达开机, 一旦发现有向炮点移动的积云时, 便交替使用 PPI 和 RHI 进行观测, 记录下回波顶、底高度, 强度和强中心高

度, 并照相存档, 观测周期约 5min, 直至回波基本消失才停止。积云降水量由试验区内稠密的雨量自计网进行观测和记录。

1.4 试验云的选择标准和随机化方法

选择试验云的判据是向炮点移动的单块积云, 其回波顶高于 6km, 水平宽度大于 4km, 雷达反射因子强于 30dBz, 变化趋势呈发展或维持, 离炮点的距离近于 5km。当回波符合以上条件时立即随机抽签确定为作业云或对比云。签码根据随机数字表或由计算机随机函数输出事先制作, 指挥人员在抽签前并不知道将抽出的签码是为作业或对比。由于农业抗旱的迫切要求, 在农作物急需雨水的 7 月中下旬和 8 月初, 有意识的多安排一些作业云, 即在制作签码时, 作业云与对比云的签码数为 2:1, 并尽量避免连续 3 个以上都是对比云的情况。

1.5 资料与处理

8 年来雷达和雨量自计网共观测到 174 块自然对流云。如前所述, 徐永胜等曾分析过这些云的雷达回波的一般特征^[5]。另外还观

测了作业云 36 块,对比云 31 块,对应有雨量记录的自然云 73 块,作业云 29 块,对比云 22 块。。

每块云的降雨是根据试验云的雷达回波位置所对应的雨量点的记录,人工读取每 2 分钟的雨量值输入计算机,由计算机处理后供分析使用,因此降水参数精度符合分析要求并较为客观^[6]。

由于有些云的降雨大部分不在试验区,或发现雷达点与回波间降水云衰减较大,为了保证资料的可靠性,我们在做雷达回波参数与降水参数回归分析时,只选择了大部分降水在试验区内且雷达记录较为完整的 27 块自然云的资料。根据这些资料,建立了用雷达回波参数估算降水的回归方程^[5],然后用

这些方程计算了雷达观测较为完整而又有降雨的 22 块作业云和 15 块对比云的降雨参量,再与这两类降雨过程的实测值比较,探讨其催化效果。

2 增雨的效果分析

在统计分析人工影响的效果之前,我们首先比较了作业云和对比云在作业前的高度和水平尺度及所处的发展阶段是否相同,即考虑是否出自同一样本总体。然后分析高炮碘化银催化对雷达回波和降水的影响。

2.1 作业前回波顶高及水平尺度的比较

由于在观测过程中,积云是不断发展变化的,表 1 列出了作业前、后雷达回波参数的极大值的平均值、标准差等。

表 1 雷达回波参数的统计

	$H_{\text{顶}}/\text{km}$ $n_c/n_a=20/34$				A/km^2 $n_c/n_a=20/29$				$I/10^4\text{mm}^6 \cdot \text{m}^{-3}$ $n_c/n_a=18/31$				$H_{\text{强中心}}/\text{km}$ $n_c/n_a=19/29$				
	平均值	标准差	最大	最小	平均值	标准差	最大	最小	平均值	标准差	最大	最小	平均值	标准差	最大	最小	
对比回波	a	9.4	2.3	14.7	6.0	68.2	61.6	271	4	10.1	21.8	69.0	0.1	3.6	1.1	5.5	1.8
	b	9.6	2.5	15.3	5.4	82.4	75.3	354	6	4.9	7.2	22.8	0.03	3.8	0.8	4.8	1.8
	b-a	0.2	0.7	7.2	-5.5	14.3	26.7	83	-26	-5.2	20.9	9.3	-47.1	0.2	0.9	1.9	-1.0
作业回波	a	11.1	2.9	16.5	6.6	137.9	116.0	480	19	15.5	27.4	110.0	0.2	3.7	1.2	5.8	1.0
	b	11.1	3.3	17.4	4.9	165.1	168.3	753	8	16.7	22.9	63.4	0.1	3.4	1.1	5.5	1.4
	b-a	0.0	2.4	6.9	-3.5	27.2	107.0	358	-176	1.2	21.0	61.5	-29.0	-0.3	1.1	1.3	-1.8
作业-对比	-0.2	1.7	-0.3	2.0	12.9	80.3	275	-150	6.4	0.1	52.2	37.2	-0.5	0.2	-0.6	-0.8	
双比值		0.98				0.99				2.22				0.87			

注:a,b 代表作业前后下同。

由表 1 看出,作业前对比回波的顶高为 9.4km,面积为 68.2km²,作业回波的顶高为 11.1km,面积为 137.9km²,较对比回波高 18%,面积大一倍。强度值大 53%,强中心高度高 3%。经 t 检验与秩和检验表明,作业前作业回波的顶高、面积明显大于对比回波,显著性水平 α 分别小于 0.1 和 0.05,强度和强中心高度的差异不显著, α 均大于 0.1。

2.2 作业时回波所处的发展阶段的比较

因受雷达探测能力的限制,只有当回波离雷达很近时,才有可能测到未降雨的浓积云。由雨量资料表明,对比云和作业云在作业时已降雨的几率为 58% 和 72%,降雨量分别为 $280 \times 10^3\text{t}$ 、 $633 \times 10^3\text{t}$,对作业前的降雨量

经 1/4 次方变换后,符合正态分布,作 t 检验,表明在 0.1 的水平上存在明显差异。另由雷达的 RHI 显示,对比回波“作业时”顶高上升的有 8 块,占对比云总样本数的 38%,平均顶高 8.7km。其中 5 块“作业后”顶高上升了 2.4~6.0km,另外 3 块上升不到 1km 后就下降,平均上升高度为 2.2km,上升时间为 16min。

作业回波作业时顶高上升的有 7 块,占作业云总样本数的 21%,平均顶高 11.3km。其中 2 块因与邻近回波合并,顶高分别上升 3.6 和 3.9km,另 5 块在作业后 10 分钟内上升不到 1km 就下降,平均上升高度为 1.3km,上升的时间为 10min。

以上现象表明,作业云和对比云在作业

时大多已处于云体发展的成熟期,且作业云所处的发展阶段相对要晚一些。

2.3 催化作业对雷达回波参数的影响

表1列出了对比回波和作业回波作业前后的雷达参数值。作业后,对比回波的顶高上升200m,作业回波持平,通过对作业前、后差值的比较,作业回波顶高相对下降200m,强中心高度下降500m,面积增大 12.9km^2 ,强度增大 $6.4 \times 10\text{mm}^6 \cdot \text{m}^3$ 。周和生等人分析四川冕宁地区防雹期间雷达观测,也发现炮击强对流云后,回波顶高明显下降^[7]。

表2 总降水量/ 10^3t

		有降雨的总样本 $n_c=20, n_s=28$	$H_{\text{顶}} \leq 10\text{km}$ $n_c=10, n_s=9$	$H_{\text{顶}} > 10\text{km}$ $n_c=5, n_s=18$	去掉系统性降水和雷达缺测的样本 $n_c=15, n_s=22$
对比云	a	280	313	105	243
	b	654	790	496	691
	b-a	374	477	391	448
作业云	a	633	326	821	440
	b	1424	930	1744	1410
	b-a	791	604	923	970
作业-对比		417	127 D=1.13	532	522 D=1.13

表2表明,对有降雨的总样本而言,对比云的样本数为20,作业云的样本数为28。作业前对比云的总降水量为 $280 \times 10^3\text{t}$,作业云为 $633 \times 10^3\text{t}$,作业后两类云的总降水量都较作业前增加,但作业云比对比云增加得更多,增值为 $417 \times 10^3\text{t}$ 。表2还列出了按回波顶低于10km和高于10km分类的结果,差值都为正值,分别增雨 $127 \times 10^3\text{t}$ 和 $532 \times 10^3\text{t}$ 。因本文讨论的是单块积云,故去掉系统性降水和雷达缺测的样本后,差值也为正值,增雨 $522 \times 10^3\text{t}$ 。

2.4.2 作业前后雨量双比值的分析

对于同一类型的云,若作业前的降雨量没有明显差异,则可采取通用的双比分析法来检验增雨效果,即:

$$D = \frac{\bar{X}_{sa}/\bar{X}_{sb}}{\bar{X}_{ca}/\bar{X}_{cb}} \quad (1)$$

下标s,c分别表示作业云和对比云,a,b表示作业后和作业前。如果 $D > 1$,表示有正的增雨效果, $D < 1$ 则为负效果。

对于总样本和回波顶高于10km的云,

对这两类回波参数作业前、后的差值作符号检验,表明差异尚不显著,显著性水平大于0.1。

2.4 催化作业对降雨的影响

2.4.1 作业前后雨量差值的分析

众所周知,积云的降雨主要与其顶高、面积、强度成正相关。以上检验表明,作业回波的顶高、面积明显大于对比回波,故不能直接比较两类云的总降雨量。但仍可比较两类云作业后与作业前的降水量差值,以此来探讨催化效果。结果见表2。

因作业前作业云的雨量分别是对比云的2.3倍和7.8倍,对雨量 $1/4$ 次方变换后符合正态分布,用t检验表明,作业云的降雨量明显大于对比云,不宜作前、后差值的双比分析。

对作业前雨量无明显差异的回波顶低于10km的云和去掉系统性降水和雷达缺测的样本,经双比分析其D值同为1.13%,表明总降水量一致增加13%。但经t检验,显著性水平大于0.1。

2.4.3 实测值与估算值的双比分析

上面比较了用作业前、后的总降量来分析增雨的效果,当样本不是足够多时,受个别样本的影响很大,结果不稳定。并且这种分析方法要求作业前两类云的降水量应没有明显差异。

根据前面的分析结果,即有高炮作业对雷达回波顶高、面积无明显影响的结论,我们仿照前苏联乌克兰单块积云增雨试验的分析方法^[8],应用雷达回波参数估算两类云的降雨,然后与实测值比较,作双比分析。

以下是刘耀宗等根据湖南人工降雨试验

期间观测的降水大部分在试验区内的 27 块自然积云的雷达回波参数和降雨参数建立的二元回归方程^[3]。

$$\log Q = -0.41 + 0.146H_m + 0.8895 \log A_m \quad (2)$$

$$I = -21.39 + 1.44H_m + 7.713 \log A_m \quad (3)$$

$$L = -10.89 + 0.8522H_m + 3.621 \log A_m \quad (4)$$

$$T = -104 + 4.863H_m + 69.25 \log A_m \quad (5)$$

式中, Q 、 I 、 L 、 T 分别是总降水量, 雨强、雨量 and 降雨持续时间, 单位分别是 10^3t , $mm/10min$, mm , min ; H 和 A 分别是雷达回波的

最大顶高和面积, 单位分别是 km 和 km^2 。

这些方程的相关系数分别是 0.88, 0.78, 0.81 和 0.61, 显著性水平小于 0.1。在用以上公式计算两类云降雨时引起的误差属系统误差, 在作双比分析时可减小这种误差的影响。

在计算对比云和作业云的降雨时, 考虑到大范围降雨对波长为 $3cm$ 雷达衰减较为严重, 去掉了系统性降水和雷达资料不全的样本。单块积云对比云和作业云的样本数分别是 15 和 22。这两类云的实测和计算结果的平均值见表 3。

表 3 降雨参数实测值和估算值

	总降水量/ 10^3t		雨强/ $mm/10min$		雨量/ mm		降雨持续时间/ min	
	平均值	标准差	平均值	标准差	平均值	标准差	平均值	标准差
对比云 实测值	935	780	6.2	5.2	3.6	3.5	71.4	37.2
$n_c = 15$ 估算值	1580	2358	9.1	4.7	5.4	2.6	85.3	25.3
作业云 实测值	1850	1765	10.0	5.7	5.8	4.3	87.0	41.0
$n_s = 22$ 估算值	2672	2425	11.8	5.1	6.8	2.9	97.0	28.2
对比值	1.17		1.24		1.28		1.07	

双比值也用式(1)计算, 只是分子为作业云的实测值比计算值, 分母为对比云的实测值比计算值。结果是作业云的总降水量增加 17%, 雨强增加 24%, 雨量增加 28%, 降雨持续时间增加 7%。对两类云降雨参数的实测和计算值的比值作秩和检验, 差异尚不显著, $\alpha > 0.1$ 。

3 结果与讨论

①本试验表明高炮发射 AgI 催化积云对回波的顶高、面积影响不大, 有可能使回波强度增大和强中心高度下降, 这与微物理催化的原理是相吻合的。

②用作业前后实测值的双比分析得到总降水量增加 13%; 用实测值与估算值作的双比分析得到作业云的总降水量增加 17%, 雨量增加 28%, 雨强增大 24%, 降雨持续时间延长 7%; 两个结果很相近。

③上述结果的统计显著度不高, 这与样本数过少有关。今后若采用数字化雷达, 样本采集效率则可大大提高。

④本试验表明, 作业时大多数对比云和作业云已处于云体发展的成熟期, 这与 $3cm$ 波长

的雷达不易探测到浓积云有关。积云人工增雨试验应采用多波长雷达, 才能提高对积云的生长、发展及降水的探测能力。

⑤作业前作业回波明显较对比回波高大, 且降雨量也较对比回波多, 主要原因是 8 月 10 日前的作业云多 (14 块), 占作业云总数的 64%, 对比云少 (6 块), 只占对比云总数的 40%, 湖南的天气往往是立秋后转凉, 不利于对积云的发展。本试验表明, 在农业生产区进行随机化人工增雨试验, 在一定程度上受到农业生产需要的制约。

参考文献

- 胡志晋, 苏茂等. 长沙夏季积云宏观特征的观测分析. 中国南方云物理和人工降水论文集. 北京: 气象出版社, 1986: 1~8.
- 叶家东. 湖南凤凰地区高炮人工降水效果统计分析. 中国南方云物理和人工降水论文集. 北京: 气象出版社, 1986: 160~167.
- Liu Yaozun, Wang Zhiping, and Chen Lishu. Effect Analysis of Rain Enhancement Single Cumulus Randomized Seeding Experiment in Hunan Province. The Fifth WMO Scientific Conference on Weather Modification and Applied Cloud Physics, Vol. I : 559~562.
- Chen Lishu, Wang Dafan and Xuiong Huanan. Numerical

- cal Calculation of the AgI Diffusive Problem in Cumuli and Statistical Analysis of Silver Concentration in Rainwater from Hunan. The Fifth WMO Scientific Conference on Weather Modification and Applied Cloud Physics, Vol. I :175~178.
- 5 徐永胜,刘耀宗等.夏秋积云的雷达回波和降水特征及估算.应用气象学报,1992,3(3):334~339.
- 6 刘国生,王治平.高炮人工增雨随机试验雨量资料分析系统.气象,1989,15(2):31~32.
- 7 周和生,杨秀蓉.炮击引起强对流回波顶高度变化的统计分析.中国南方云物理和人工降水论文集.北京:气象出版社,1986:197~207.
- 8 КОРНИЕКО,И.И,ИТ Д.云物理与人工影响天气,1997:69~72.

Effect Analysis on Rain Enhancement of Single Cumulus Randomized Seeding Experiment in Hunan Province

Liu Yaorong Wang Zhiping Chen Lishu

(Hunan Meteorological Bureau, Changsha 410007)

Abstract

Statistical analysis and double ratio analysis between the radar echo and the rainfall parameters of single cumulus were conducted by use of the 8 years (1979~1986) randomized experiment data of 28 seeded clouds and 20 controlled clouds observed in Hunan province. The results show that the total precipitation, rainfall amount, rainfall intensity and rainfall duration of the seeded clouds increase by a factor of 17%, 28%, 24% and 7% than those of the controlled clouds respectively. It is not obvious that anti-aircraft gun seeding affects on the cloud top height and the cumulus area as well, but it is obvious that the seeding perhaps increases the radar echo strength of cumulus and decreases the echo depth of the strong core in the randomized experiment.

Key Words: Hunan province single cumulus anti-aircraft gun seeding randomized experiment rainfall enhancement