

古田水库地区人工降水试验效果统计分析

福建省气象局气科所* 南京大学气象系

提 要

1975年和1977年4—7月,在福建古田水库地区进行了由小火箭携带介乙醛(MA)和碘化银(AgI)播云的人工降水试验,采用区域回归随机试验方案,利用统计方法检验效果。试验对象主要是系统天气影响下的降水性层状云和积状云,以三小时时段为试验单元,总共进行了62次随机试验,其中实际作业31次,对比试验31次。试验结果平均增加目标区雨量达40—78.7%,显著性水平 $\alpha < 0.0025$ 。有效区域的范围可延伸到作业点下风方40—60公里远,层状云和积状云的有效范围区是不同的。对比区自然雨量强度小时,试验效果好,随着自然雨强的增大,效果变差。MA和AgI两种催化剂的播云效果,差异不显著。

一、引 言

近年来,我国各地广泛开展了以高炮和小火箭发射冷云催化剂播云的人工降水试验。这类试验的效果究竟如何?在什么条件下效果较好?效果较明显的区域有多大?所有这些是实际工作中迫切需要解决的问题。但是,由于自然降水的时空变差很大,影响降水量的因素又多,降水的定量预报问题尚未解决,所以人工降水效果的客观评价一直是一个相当复杂的问题。至今为止,差不多所有的人工降水试验效果的定量估价,都是依靠或结合统计分析的方法获得,而要进行这种分析,试验必须有严谨的设计。在各种试验设计方案中,较客观的是随机试验。1974年在福建古田水库流域利用三七高炮发射AgI炮弹播云的方法,进行了人工降水试验。区域回归分析结果发现可以增加日雨量24.7%,统计显著度接近0.05,对台风天气影响下的降水性云系进行区域回归随机试验,结果表明三小时时段区域面积平均增雨量接近1倍,显著度 $\alpha < 0.05^{[1]}$ 。在1974年试验的基础上,1975年和1977年4—7月份,利用机动性更大的小火箭发射介乙醛和碘化银播云的方法,开展人工降水试验。试验的目的,是结合增加水库蓄水发电的具体任务,检验这种播云方法的实际效果,判别有利的天气条件和有效区域的范围。

二、试 验 设 计

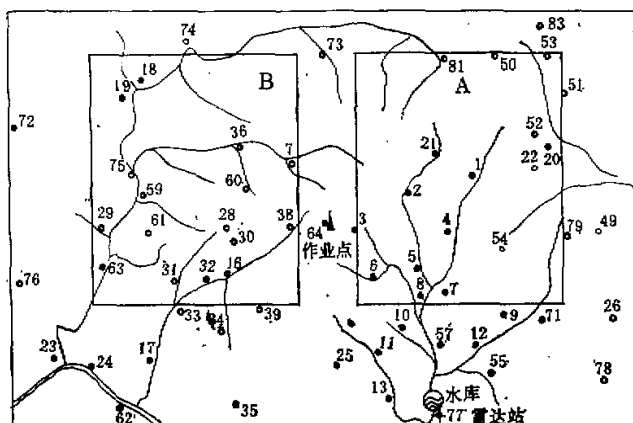
试验设计的主要目的之一是使样本资料符合随机抽样的原则,为此,我们采用区域回归随机试验方案。选择两个试验区,A区为目标区,B区为对比区。在有利的天气条件

1978年7月8日收到修改稿。

* 本文由叶家东、程克明二同志执笔。

下,以三小时时段为试验单元,按照事先制定的随机程序,随机地决定A区播云或不播云,得到两组雨量资料 Y_{As} 和 Y_{An} 。B区一直不播云,作为对比,与A区相对应,B区也可得到两组雨量资料 X_{As} 和 X_{An} 。这四组雨量资料中只有 Y_{As} 是播云后的雨量,其余均系自然降水量。根据 Y_{An} 和 X_{An} 建立区域回归方程,再将 X_{As} 代入回归方程求出A区播云单元的自然降水量的期待值 $\hat{Y}$,比较 Y_{As} 和 $\hat{Y}$ 可以确定试验效果。由于A区两组降雨机会中的试验单元是否播云是随机决定的,所以在这样两组机会中,除了播云这一人为因素有着系统差异以外,其他因子对降水的贡献,彼此是相当的。因此那些对降水有影响而与人工播云无关的因子,在这里是作为偶然因素出现的,从而当试验次数足够多时,它们将作为“随机误差”而从两组机会的平均结果中排除出去。因此,如果在这两组机会中观测到雨量有系统的差异,或者两组的平均雨量之间存在显著的差异,就可以归因于播云作业,据此即可评定人工降水的效果。利用对比区雨量作为控制变量,可以减小目标区估计雨量的误差,提高效果分析的准确率。

作业点设在古田西北32公里处的石塔山。试验期(4—7月)的主要降水性云系是自西向东的。目标区A设在作业点的下风方,面积约1500余平方公里。对比区B选在作业点上风方,面积与目标区相等,两区间隔11公里以防止催化剂对对比区的污染(图1)。两个试验区都是山区,地理条件大体相似。根据两年试验期内31次随机决定的对比试验,计算两区雨量的相关系数 $r = 0.8270 (\alpha < 0.001)$,可见两区雨量的相关性很好,回归分析比较有效。



- 人工观测雨量器 ▲ 作业点 ⊙ 水库
- 雨量自记器 + 雷达位置

图1 试验区的地理位置

○ 人工观测雨量点, ● 雨量自记器。

两个试验区的雨量站,A区15个,B区16个,连同试验区周围地区共有81个雨量站的雨量资料供制作雨量图之用。

为了增加试验期随机样本的容量,试验单元时间取3小时时段。与日雨量相仿,3小时雨量也是一种具有雨强性质的统计变量,但它与降水过程的平均雨强不同,还迭加了一

个该时段在降水过程中所处部位这样一个随机因素,由于比较是在随机选取的播云单元与对比单元之间进行的,因此,自然条件的有利程度,在两组雨量中在统计上仍是彼此相当的,所以仍可将它们作为随机变量处理。此外,据雷达观测,试验云的移动速度一般在20公里/小时左右,它移过目标区只需2小时。而作业时间一般不超过半小时,所以前一播云单元所播撒的催化剂基本上不会残留到下一试验单元,从而在一定程度上避免了试验单元之间的污染问题。

有利天气条件主要根据天气预报、雷达观测和探空资料判断,当天气预报有降水系统过境时,即由雷达监视,若在试验单元前半小时两试验区的云的回波顶高在5000(层状云)和5500(积状云)米以上,该天500mb高空风向介于217—290°,且估计在该时段云层条件仍能维持或发展的,即选作试验单元。2年的试验期共选了62个试验单元,按随机规则决定其中31次播云,31次对比。按云型分类,层状云播云13次,不播云15次;积状云播云18次,不播云16次。

31次播云试验中,19次用介乙醛,平均每次用量2450克;12次AgI播云试验平均每次用量224克。发射工具采用自制小火箭,发射高度约2600—4000米,加上作业点高度1625米,催化剂可以发射到4200—5600米高度上爆炸播撒,试验期福州地区0℃层高度为4400—5200米,所以催化剂一般是在0℃层附近播撒,而后随上升气流带到云的过冷却区的。

三、效果分析

参加统计分析的雨量资料取3小时区域面积平均雨量。由于雨量的概率分布通常是偏态的,因此在作统计检验时就不能直接用 t -检验法。关于一次降水过程为单元的雨量的分布函数,Thom等用 Γ -分布来拟合^[2],Schickedanz等则用对数正态分布来拟合^[3]。现在我们假设试验期3小时面积平均雨量服从对数正态分布,利用柯尔莫哥洛夫定理进行“拟合度”检验。检验结果拟合概率达到0.544,说明对数正态分布和观测资料的拟合度还是较好的,所以统计分析时,统计变量取雨量的对数,变换成正态变量,然后采用回归分析求取人工降水的增雨量,并用 t -检验法对它进行显著性检验。

对试验效果进行双比分析时,取雨量本身,所以效果的显著性检验采用非参量性的秩和检验法。

1. 双比分析 假定目标区的自然降水量和对比区的雨量成比例,作双比值

$$\bar{R} = \frac{\bar{Y}_{AS}/\bar{X}_{AS}}{\bar{Y}_{An}/\bar{X}_{An}} \quad (1)$$

其中 $\bar{Y}_{AS}$ 和 $\bar{X}_{AS}$ 是历次播云单元目标区和对比区的平均面积平均雨量; $\bar{Y}_{An}$ 和 $\bar{X}_{An}$ 是历次非播云单元目标区和对比区的平均面积平均雨量。如果人工降水无效,则双比值 $\bar{R}$ 的期待值为1; $\bar{R} > 1$ 表示有正效果, $\bar{R} < 1$ 表示负效果,计算结果列于表1。

由表1可见,合并统计的结果,双比值 $\bar{R} = 1.40$,人工播云平均增加雨量40%,统计显著度达0.0007。按云型分层统计,层状云和积状云的增雨量分别为86%($\alpha = 0.0069$)和11%($\alpha = 0.0227$)。

表 1 双 比 分 析 表

类 别	n_{AS}	n_{An}	$\bar{Y}_{AS}$	$\bar{X}_{AS}$	$\bar{Y}_{An}$	$\bar{X}_{An}$	$\bar{R}$	α	α (秩和检验)
合并统计	31	31	8.61	7.11	5.42	6.25	1.40	-3.19	0.0007
层状云	13	15	9.20	7.04	4.64	6.58	1.86	2.46	0.0069
积状云	18	16	8.18	7.16	6.15	5.95	1.11	-2.00	0.0227

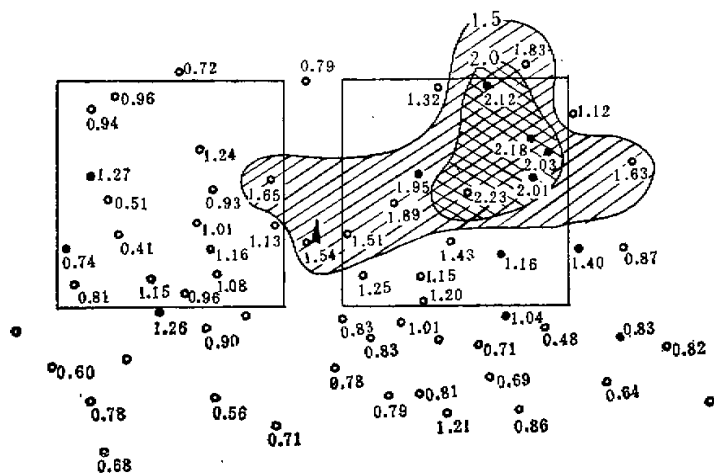


图 2 试验区各雨量站的双比值
($R \geq 1.5$ 的区域用影线表示, $\alpha \leq 0.05$ 的站用●表示)

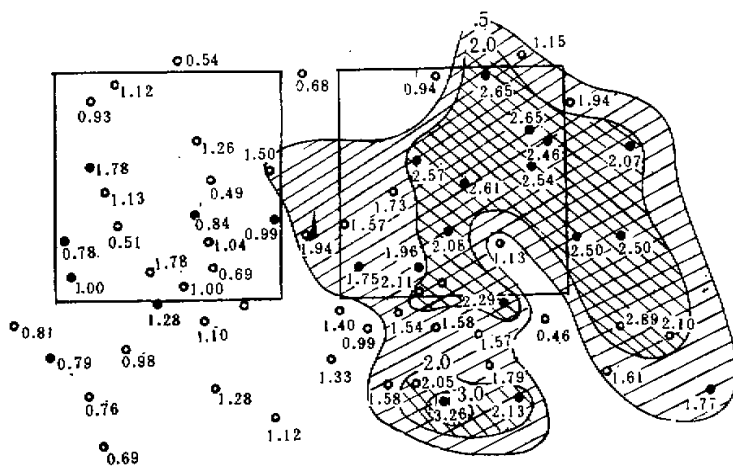


图 3 层状云试验各雨量站的双比值
($R \geq 1.5$ 的区域用影线表示 $\alpha \leq 0.05$ 的站用●表示)

我们进一步假定整个试验区中各雨量站的单站自然雨量是和对比区的面积平均雨量成比例的,据此可以分析效果比较明显的区域与作业点的位置及高空风的关系。为此,作

双比值^[4]

$$R = \frac{Y_{AS}/\bar{X}_{AS}}{Y_{An}/\bar{X}_{An}} \quad (2)$$

式中 Y_{AS} 和 Y_{An} 分别是试验区中某个雨量站的播云单元和对比单元的平均雨量,其他符号如前述。这样对整个试验区内外的雨量站分别求出双比值 R , 并用秩和检验法检验其显著性,结果列于图 2。由图可见,雨量增值达到 50% 以上的区域位于从作业点到下风方约 50 公里处,而 $R \geq 2.0$ 的范围在作业点下风方 15 公里到 40 公里,宽约 20 公里的区域。 $R \geq 2.0$ 区内 5 个雨量站的双比值统计上都是显著的。

层状云和积状云相应的双比值分布见图 3 和图 4。层状云主要是对系统天气的降水性层状云系试验的, 500mb 高空风向主要是西偏北或西偏南风; 积状云主要也是系统天

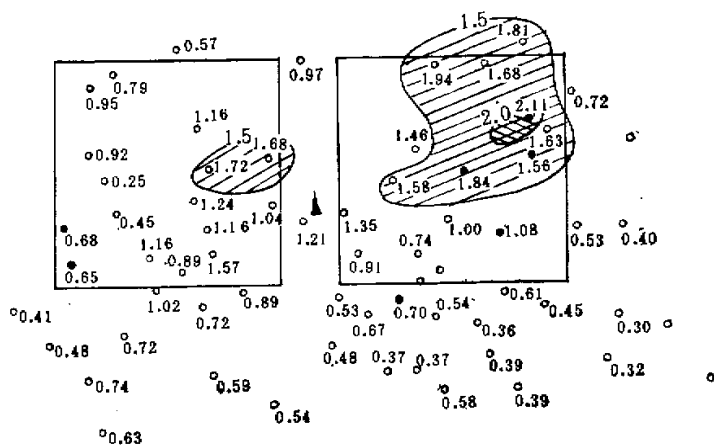


图 4 积状云试验各雨量站的双比值
($R \geq 1.5$ 的区域用影线表示 $\alpha \leq 0.05$ 的站用●表示)

气影响下的 cb 云,有的是层状云幕中的对流云团,高空风以西偏南风为主。所以图 3 和图 4 $R \geq 1.5$ 和 $R \geq 2.0$ 的区域都落在作业点的下风方,这与雷达“PPI”回波的移向也是一致的。层状云 $R \geq 1.5$ 的区域最远可延伸到离作业点 60 公里远处,而 $R \geq 2.0$ 的区域在作业点下风方 15—50 公里范围,宽度 20 公里左右;积状云 $R \geq 1.5$ 的范围限于作业点下风方 10—40 公里之间,宽度约 20 公里的区域,基本上都在预定的目标区内。积状云效果较显著的区域较小,这与积状云生命期较短有关。看来对不同的降水过程,目标区的设置应该是不同的。

2. 回归分析 31 次非播云单元 A、B 两区的 3 小时面积平均雨量(对数值,下同)之间的相关系数 $r = 0.8270$,其显著度 $\alpha < 0.001$ 。根据这 31 次自然雨量数据建立区域回归方程为

$$\hat{Y} = -0.1235 + 1.0122X \quad (3)$$

样本回归线和实测雨量散布点列于图 5。将第 i 次播云单元的 B 区雨量 X_i 代入回归方程,得到 A 区自然降水量的期待值 $\hat{Y}_i$,并求出雨量增值:

$$\Delta Y_i = Y_i - \hat{Y}_i \quad (j = 1, 2, \dots, k)$$

31次播云单元的平均值分别为 $\bar{Y}_k = 0.8062$, $\bar{\hat{Y}}_k = 0.5542$ 和 $\Delta \bar{Y}_k = 0.2520$ ($k = 31$), 相应的雨量真数值为 $\bar{Y}'_k = 6.40$ (毫米/3小时), $\bar{\hat{Y}}'_k = 3.58$ (毫米/3小时)和 $\Delta \bar{Y}'_k = 1.787$. $\Delta \bar{Y}'_k$ 是实测平均雨量 $\bar{Y}'_k$ (几何平均, 下同) 对期待平均雨量 $\bar{\hat{Y}}'_k$ 的比数, 所以人工降水的平均相对增雨量为 0.787, 而平均绝对增雨量为

$$E' = 0.787 \bar{\hat{Y}}'_k = 2.82 \text{ (毫米/3小时)}$$

利用多个事件检验法对这个增雨量进行显著性检验, 平均增雨量的 t 值为

$$t = \frac{\Delta \bar{Y}_k}{\sqrt{\frac{1-r^2}{n-2} \sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y}_n)^2 \left[\frac{1}{k} + \frac{1}{n} + \frac{(\bar{X}_k - \bar{X}_n)^2}{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X}_n)^2} \right]}} = 3.15 \quad (4)$$

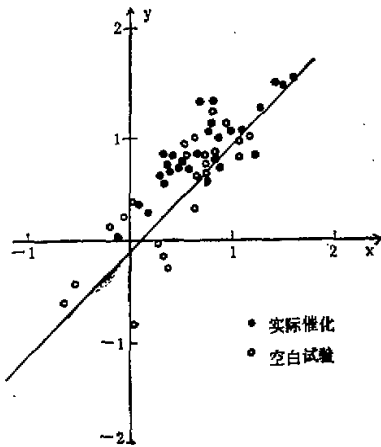


图5 3小时雨量(对数值)区域回归线和实测雨量散布图。

式中 $n = 31$ 和 $k = 31$ 是对比单元和播云单元数目。由 t -分布表知 $t > t_{0.005}$, 意即人工降水效果显著, 单边检验的显著度 $\alpha < 0.0025$ 。

雨量增值的 90% 单边置信区间为 $\Delta Y'_k > 1.44$ (毫米/3小时), 表示人工降水增加雨量超过 1.44 (毫米/3小时) 的概率达到 90%。

3. 分层统计 按天气条件对播云效果进行分层统计, 是判断有利天气条件的一种有用的方法。分层统计不仅是缩小抽样变差提高统计分析效率的一种手段, 而且也是提高样本的随机性所需要的。它把统计总体限制在一个物理过程比较单一的统计实体内。这样, 在各个层次的次级总体内, 对所欲检验的效应或属性有重要影响的那些物理因子就不存在系统性的差异, 于是把与人工影响无关的各种因素当作

随机因子就比较合理。下面我们就现有的资料, 按云型催化剂和对比区自然雨量强度对试验效果进行分层统计。

1) 按云型分层统计

分别对层状云和积状云的试验效果进行区域回归分析, 结果列于表 3 和图 6, 图 7。

层状云降水 A、B 两区的自然雨量相关系数 $r = 0.9288$, 其显著度 $\alpha < 0.001$ 。人工影响的结果, 目标区平均增加雨量 3.65 (毫米/3小时), 相对增加率达 91.6% ($\alpha < 0.005$); 雨量增值的 90% 单边置信区间为 $\Delta Y'_k > 2.07$ (毫米/3小时)。

积状云降水 A、B 两区的自然雨量相关系数 $r = 0.8657$, 显著度 $\alpha < 0.001$ 。人工影响使得目标区平均增加雨量 2.85 (毫米/3小时), 相对增值达 102.5%, 其显著度 $\alpha < 0.01$; 雨量增值的 90% 单边置信区间为 $\Delta Y'_k > 1.24$ (毫米/3小时)。

由图 6, 图 7 和表 3 可见, 不同云型 A、B 两区的雨量回归关系是不一样的, 所以合并统计时, 两区的雨量相关系数小, 回归分析的效率也较低, 不过两种降水过程的区域雨量

表3 区域回归随机试验效果分析表

项 目	合 并 计 计				分 层 统 计			
	积 状 云				层 状 云			
随机试验次数	75+77年	75年	77年	75+77年	75年	77年	75+77年	77年
	31	19	12	18	11	7	13	5
	31	15	12	16	8	7	15	5
A、B两区雨量相关系数 r	62	34	24	34	19	14	28	10
	0.8270	0.854	0.7231	0.8657	0.922	0.7500	0.9288	0.9644
	<0.001	<0.001	<0.01	<0.001	<0.01	≈0.05	<0.001	<0.01
A、B两区雨量的回归方程	$\hat{y} = -0.1235x + 1.0122x$	$\hat{y} = -0.1716x + 1.086x$	$\hat{y} = 0.0005x + 0.7956x$	$\hat{y} = -0.7042x + 1.8094x$	$\hat{y} = -0.8885x + 2.1071x$	$\hat{y} = -0.4113x + 1.3519x$	$\hat{y} = 0.0199x + 0.8093x$	$\hat{y} = -0.0661x + 0.3135x$
	2.82	3.16	2.39	2.85	3.01	2.18	3.65	3.07
	78.65%	81.8%	76.16%	102.49%	82.7%	101%	91.6%	65.35%
A区雨量增量的显著性水平 α (单边)	<0.005	<0.05	<0.05	<0.01	<0.075	≈0.1	<0.005	<0.01
	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90		0.90	0.90
	1.44	0.85	0.61	1.24	0.53		2.07	1.69
A区雨量增量的置信区间	置信水平 $1 - \alpha$				置信下限			
	<mm/3 小时>				<mm/3 小时>			

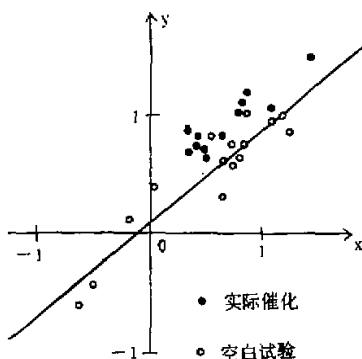


图 6 层状云降水区域回归线和雨量散布图

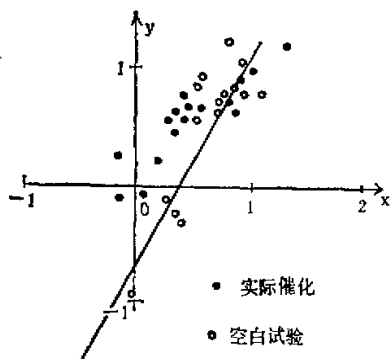


图 7 积状云降水区域回归线和雨量散布图

相关系数的差异是不显著的,统计显著度只 $\alpha = 0.21$.

2) 按催化剂分层统计

1975 年采用介乙醛,1977 年用碘化银。两年所用催化剂是不同的,这两种不同的催化剂的播云效果,从表 3 看是有差异的,介乙醛的效果普遍好一些。我们用方差分析方法对这种差异的显著性进行统计检验,结果列于表 4、表 5 和表 6。

表 4 层状云效果的一元方差分析表

自由度	离 差 平方和	F	$F_{0.05}$
总和 $n-1=12$	$Q=0.2368$	3.528	4.84
组间 $r-1=1$	$Q_1=0.0575$		
组内 $n-r=11$	$Q_1=0.1793$		

表 5 积状云效果的一元方差分析表

自由度	离 差 平方和	F	$F_{0.05}$
总和 $n-1=17$	$Q=5.7842$	0.020	4.49
组间 $r-1=1$	$Q_1=0.0073$		
组内 $n-r=16$	$Q_1=5.7769$		

表 6 合并统计一元方差分析表

自由度	离 差 平方和	F	$F_{0.05}$
总和 $n-1=30$	$Q=1.1245$	0.036	4.18
组间 $r-1=1$	$Q_1=0.0014$		
组内 $n-r=29$	$Q_1=1.1232$		

由表可见,两种催化剂的播云效果的差异都是不显著的,合并统计和积状云的 F 值分别是 0.036 和 0.020,远小于 $F_{0.05}=4.18$ 和 4.49;层状云的 $F=3.53$,仍达不到 $\alpha=0.05$ 的水平,所以还没有足够的证据说介乙醛的效果比碘化银好。但介乙醛有较好的效果这个迹象值得在今后的试验中进一步分析,看是否有实质性的意义。

3) 按对比区自然雨量强度分层统计

为了比较不同的自然降水条件下的播云效果,我们根据播云单元对比区的雨量强度对播云效果进行分层统计,结果列于表 7。

由表 7 可见,对比区雨量强度小于 1(毫米/小时)时,播云效果比较好,相对增加率超过 1 倍,显著度都达到 0.01 以上,而当对比区雨量强度大于 3(毫米/小时)时,播云效果就很不显著,特别是积状云,效果是负的,当然这个负效果也不显著。播云效果随对比区自然雨量增加

而减小的这种趋势,在美国佛罗里达的试验中也相当明显^[5],如果这种趋势能在更多的试验中继续得到证实,那它说明了一个很重要的事实,就是人工降水的效果很可能既不是可加的,也不是可乘的,而以往总认为效果是可乘的^[6]。从降水物理的角度看,这也许意味着

表 7 播云效果按对比区雨量强度分层统计表

类 别	对比区面积平均雨量强度 (毫米/小时)					
	$X' \leq 1$		$1 < X' \leq 3$		$X' > 3$	
	n	相对增雨量% α	n	相对增雨量% α	n	相对增雨量% α
合并统计	11	116.0 <0.005	15	82.9 ≈ 0.005	5	9.5 ≈ 0.42
层 状 云	2	139.8 ≈ 0.01	9	91.8 <0.005	2	52.6 <0.1
积 状 云	9	361.6 <0.005	6	39.6 <0.15	3	-64.0 <0.21

自然降水条件好时,自然降水效率比较高,人工播云就“无用武之地”,弄得不好反而会“帮倒忙”,减少雨量;而当自然雨量小时,人工播云在提高降水效率方面起作用的余地就比较大。从统计上看,这意味着人工影响不仅改变了雨量的平均值,而且也改变了雨量的方差。如果这是真的,则将对效果检验的方法本身提出重大的修正,因为通常的检验方法都是在方差不变的前提下适用的,所以这是一个值得进一步研究的问题。

参 考 资 料

- [1] 福建省气象局、南京大学,南京大学学报(自然科学版),第一期,137—151页,1975。
- [2] H. C. S. Thom, Final Report of the Advisory Committee on Weather Control, vol II, p. 5—26, 1957.
- [3] P. T. Schickedanz and F. A. Huff, *J. of Appl. Meteor.*, vol. 10, No. 3, p. 502—524, 1971.
- [4] B. D. Elliott, P. S. Amand, and J. R. Thompson, *J. Appl. Meteor.*, vol. 10, p. 785—795, 1971.
- [5] J. Simpson, et al., *J. of Appl. Meteor.*, vol. 10, No. 3, p. 526—543, 1971.
- [6] R. Biondini, *J. of Appl. Meteor.*, vol. 15, p. 205—224, 1976.

STATISTICAL EVALUATION OF THE ARTIFICIAL RAINFALL STIMULATION EXPERIMENT IN GUTIAN VESERVOIR REGION, PROVINCE FUJIAN

Weather Bureau of Fujian Province and Department of Meteorology,
Nanking University

ABSTRACT

From April to July, 1975, and 1977, a series of artificial stimulating precipitation experiments by seeding clouds with metaldehyde (MA) and silver-iodine (AgI) from the ground by the small rockets were carried out in Gutian reservoir region of Fujian province. In these experiments, the design of random regression of area was used and the experimental effect was evaluated with statistical method. The objects in these experiments were mainly the strati- and cumuliiform clouds under the influence of precipitating weather system, and the 3hrs period was taken as experimental time unit. Of all 62 stochastic experimental units were selected in which, 31 were seeded and the others were unseeded as controls. The statistical analysis indicated that (1). the average rainfall on target area was increased about 40—78.7% by seeding, with a significance level of 0.0025 (one side), (2). the area of marked effect extended 40—60 Km downwind of the operation set. (3) the effect of seeding was larger when the natural rainfall was small, and decreased with increasing natural rainfall, (4) there was not appreciable difference in seeding effectiveness between MA and AgI.