

用雷达回波的平均参量检验福建省古田 溪流域人工降水效果*

张 令 钊

(福建省气象科学研究所)

本文提出一种计算空间和时间平均雷达等效反射因子 \bar{Z} 的方法。用 \bar{Z} 分析福建古田 1982—1984 年 75 次随机增雨试验效果, 催化 37 次平均相对增量 20.34%, 绝对增量 26.50 mm³/m³。且与降水效果比较, 印证了 \bar{Z} 的有效性。 \bar{Z} 增大表明催化使云中较大水滴数浓度加大。

1. 试 验

古田人工降水随机试验, 采用固定区域回归方案^[1], 图 1 是试验区位置环境图, 凭目标和对比两区自然雨量建立的回归关系, 估算催化时目标区的自然雨量, 用它与实际雨量相比得出效果。1975—1984 年的分析, 催化使目标区平均相对增雨 29.49%, 绝对增雨 1.45 mm/3 h^[2]。除用增雨表示效果外,

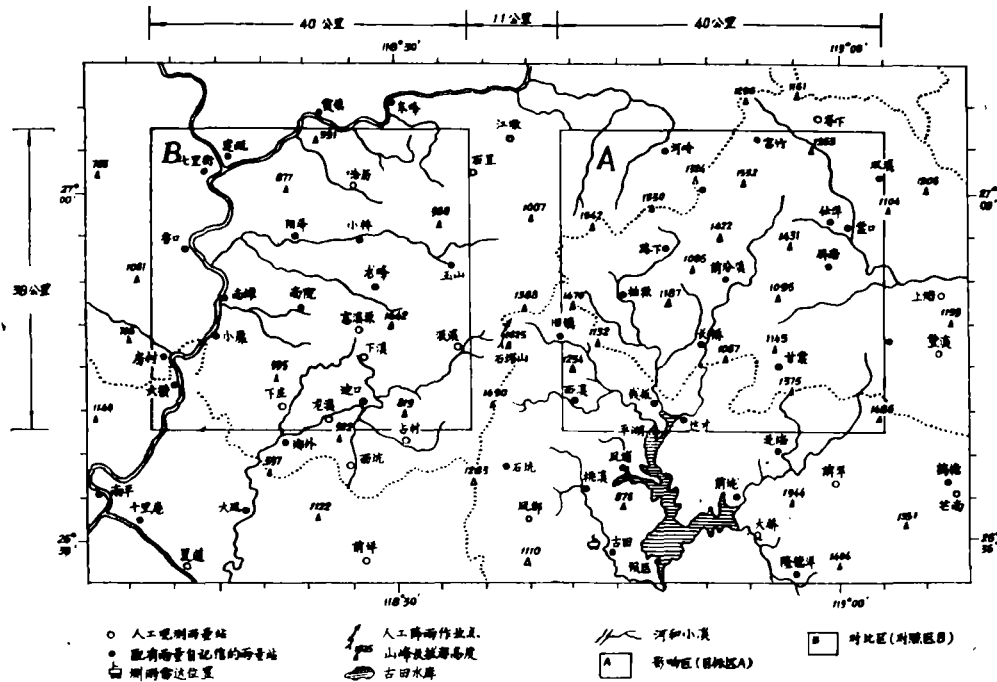


图 1 试验区的地理位置

* 本文于 1987 年 3 月 2 日收到, 1987 年 12 月 19 日收到最后修改稿。

还可用云宏微观物理特征变化反映效果。雷达等效反射因子 Z_e 表示云和降水粒子数浓度和直径六次方乘积的总和, 它的变化可反映云和降水粒子数浓度及其直径谱的改变。从古田试验专用 711 雷达资料中提取等效反射因子, 并用它评定效果, 无疑是有意义的。本文计算了 1982—1984 年试验区上空的空间和时间平均雷达等效反射因子, 且进行效果统计分析。

2. 资料的处理

短时单点目标物的雷达等效反射因子 Z_e , 可由气象雷达方程给出:

$$Z_e = \frac{1}{C^*} R^2 \frac{1}{K} P_{\min} 10^{\frac{N}{10}} \quad (1)$$

为求 Z_e 在空域面积为 S 、时长为 T 时段上的平均值, 须将(1)式对 S 和 T 积分与平均。

$$\begin{aligned} & \frac{1}{T} \int_0^T \frac{1}{S} \iint_S \log Z_e ds dt \\ &= \frac{1}{T} \int_0^T \frac{1}{S} \iint_S \log \frac{P_{\min}}{C^*} ds dt + \frac{1}{T} \int_0^T \frac{1}{S} \iint_S \log R^2 ds dt \\ & \quad - \frac{1}{T} \int_0^T \frac{1}{S} \iint_S \log K ds dt + \frac{1}{T} \int_0^T \frac{1}{S} \iint_S \frac{N}{10} ds dt \end{aligned} \quad (2)$$

雷达标定后, 其灵敏度 P_{\min} 和雷达常数 C^* 都是不变量。古田试验采用固定区域, 目标物到雷达的距离 R 不是时间的函数。则(2)式可简化为:

$$\begin{aligned} & \frac{1}{T} \int_0^T \frac{1}{S} \iint_S \log Z_e ds dt \\ &= \log \frac{P_{\min}}{C^*} + \iint_S \log R^2 ds - \int_0^T \iint_S \log K^{\frac{1}{ST}} ds dt + \frac{1}{10} \int_0^T \iint_S \frac{N}{ST} ds dt \end{aligned} \quad (3)$$

把(3)式改成有限差分形式, 再进行适当变换可得:

$$\begin{aligned} & \left\{ \prod_{j=1}^m \prod_{i=1}^n Z_{i,j}^{\Delta S_i \Delta t_j} \right\}^{\frac{1}{ST}} \\ &= \frac{P_{\min}}{C^*} \left\{ \prod_{i=1}^n R_i^{\Delta S_i} \right\}^{\frac{1}{S}} \left\{ \prod_{j=1}^m \prod_{i=1}^n K_{i,j}^{\Delta S_i \Delta t_j} \right\}^{-\frac{1}{ST}} \log^{-1} \frac{1}{10} \left\{ \sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n N_{i,j} \Delta S_i \Delta t_j / ST \right\} \end{aligned} \quad (4)$$

此式表示 Z_e 在面积为 S 区域和时长为 T 时段上, 空间和时间加权几何平均值 \bar{Z}_e , 等于其右端各因子连乘积。具体计算说明如下:

P_{\min} 和 C^* 在标定雷达时可测定。

划积分分区域 S 成 n 个面积元, 以面积元的面积为权, 对相应面积元离雷达的距离平方 R^2 施行几何加权平均, 就得(4)式中的距离因子。因 S 不变, 对比与目标两区各可得一固定因子。此处用差分替换积分, 由其余项产生的相对误差 ρ_n 为 $\rho_{000} < 2 \times 10^{-5}$ 。

$K_{i,j}$ 是雷达波衰减因子, 由下式给定:

$$K_{i,j} = 10^{-0.2 \int_0^{R_{i,j}} k_{i,j} dr} \quad (5)$$

因而(4)式中含 $K_{i,j}$ 因子可写成:

$$\left\{ \prod_{j=1}^m \prod_{i=1}^n K_{i,j}^{\Delta S_i \Delta t_j} \right\}^{-\frac{1}{ST}} = 10^{0.2 \left\{ \sum_{j=1}^m \frac{\Delta t_j}{T} \left[\sum_{i=1}^n \frac{\Delta S_i}{S} \left(\sum_{l=1}^L k_{i,j,l} \Delta t_l \right) \right] \right\}} \quad (6)$$

其中 k 是雷达波束在发射和返回途中, 主要受降水粒子削弱, 通过单位行程时衰减的分贝数, 它与波在传播途中遇到降水状况有关。据试验区内五个测站 1713 分雨滴谱资料分析, k (dB/km) 和雨强 I (mm/

h)的经验关系是:

$$k = 8.6 \times 10^{-3} I^{1.0882} \quad (7)$$

其相关系数为 0.9746 ($\alpha < 10^{-3}$)^[3]。凭面积元与雷达的连线上各处的雨强 I , 代入(7)可得该处的 k 值, 用此 k 乘以对应行程后累加, 即得该连线上波的衰减总量。以面积元的面积为权, 对 n 条连线的衰减总量施行面积加权平均, 再以同个试验单元的 m 次雷达观测间隔时长为权, 对 m 个面积平均值进行时间加权平均。把此平均值代入(6)就得该试验单元的 $\left\{ \prod_{j=1}^m \prod_{i=1}^n K_{ij} \Delta S_{ij} \Delta t_{ij} \right\}^{-\frac{1}{ST}}$ 。

用区域回归法计算效果, 最好用目标和对比区同步观测资料, 现有资料中只有 PPI 回波照片符合条件。又因试验区内山地阻挡, 雷达观测最低仰角是 5° (波束扫描面在目标区中心高 3.2 km, 对比区中心高 4.4 km), 所以本文一律选用仰角是 5° 的 PPI 照片制作回波强度分层 (0, 10, 15, 20, 25, 30, ... (dB)) 图。图形记录了回波强度衰减分贝数 N 的分布状态, 用求积仪测量在目标区、对比区范围内, $n-1$ 条等 N 值线之间的面积, 以此 n 个面积数为权, 对 N 进行面积加权平均。再用同试验单元的 m 次观测间隔时长为权, 再次进行时间加权平均。由此平均数就可算得因子 $\log^{-1} \frac{1}{10} \left\{ \sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n N_{ij} \Delta S_{ij} \Delta t_{ij} / ST \right\}$ 。

将以上取得的各因子代入(4)式, 即得某试验单元目标区或对比区的 \bar{Z}_e 值。按此处理 1982—1984 年 75 次随机试验资料, 可得 75 对 \bar{Z}_e 值。 \bar{Z}_e 值的大小分布特点是频数峰值偏敲于小值一方, 以非催化试验单元 \bar{Z}_e 的频数和频率分布情况为例, 其偏度系数达 3.9802 (图 2)。为适应概率统计 t 检验

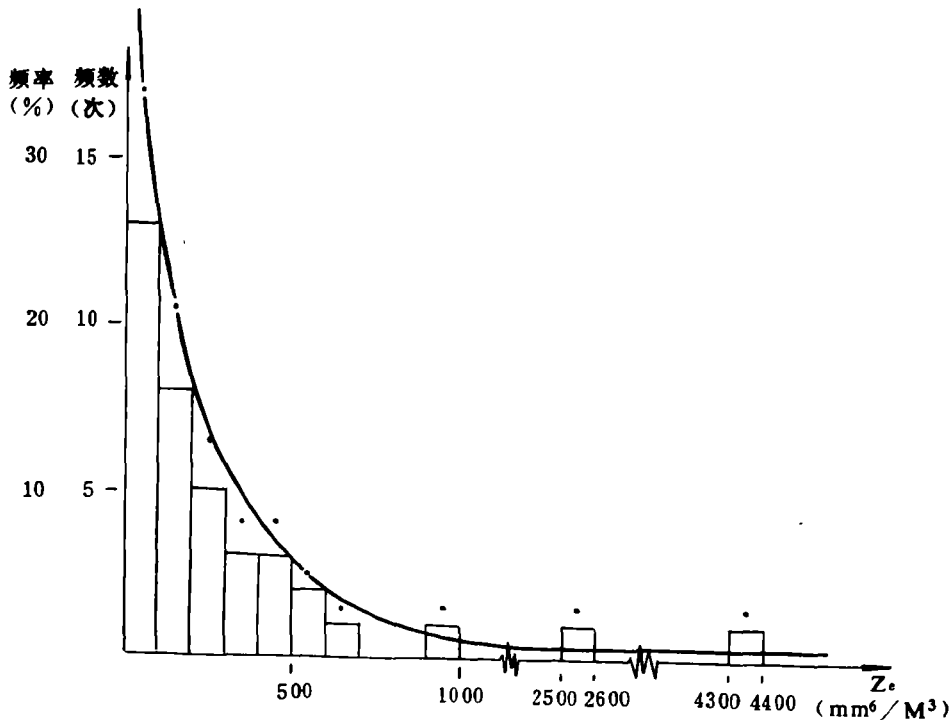


图 2 雷达等效反射因子区域、时间平均值的频数、频率图

的要求, 必须变换 \tilde{Z} , 使它的分布形式接近正态分布。表 1 是对比区 \tilde{Z} 值经过变换后, 用柯尔莫哥洛夫定理^[4]进行正态分布“拟合度”检验的结果。由表 1 可知, \tilde{Z} 经开五次方根变换所得新变量 $\tilde{Z}^{\frac{1}{5}}$ 的分布正态拟合概率最高, 且相关系数也达 0.84 以上。据此, 以下选用 $\tilde{Z}^{\frac{1}{5}}$ 为统计变量进行效果分析, 最后还原成用 \tilde{Z} 表示的效果。

表 1 雷达等效反射因子平均值 \tilde{Z} 及其变换值的正态性“拟合度”检验与区域相关性的检验

变换 种类	分 类 检 验 项 目	非 催 化 单 元			催 化 单 元		
		正 态 性 拟 合 概 率 1-ky	区 域 相 关 系 数 r	相 关 系 数 显 著 度 α	正 态 性 拟 合 概 率 1-ky	区 域 相 关 系 数 r	相 关 系 数 显 著 度 α
	\tilde{Z}	0.0010	0.6371	<0.001	0.0335	0.8485	<0.001
	$\tilde{Z}^{\frac{1}{2}}$	0.2202	0.7756	<0.001	0.6272	0.8512	<0.001
	$\tilde{Z}^{\frac{1}{3}}$	0.6545	0.8134	<0.001	0.9124	0.8618	<0.001
	$\tilde{Z}^{\frac{1}{4}}$	0.9013	0.8308	<0.001	0.9758	0.8694	<0.001
	$\tilde{Z}^{\frac{1}{5}}$	0.9700	0.8409	<0.001	0.9800	0.8745	<0.001
	$\tilde{Z}^{\frac{1}{6}}$	0.9700	0.8474	<0.001	0.9497	0.8781	<0.001
	$\tilde{Z}^{\frac{1}{7}}$	0.9572	0.8521	<0.001	0.9325	0.8807	<0.001
	$\tilde{Z}^{\frac{1}{8}}$	0.9572	0.8535	<0.001	0.9325	0.8825	<0.001
	$\tilde{Z}^{\frac{1}{9}}$	0.9572	0.8581	<0.001	0.9124	0.8839	<0.001
	$\tilde{Z}^{\frac{1}{10}}$	0.9572	0.8602	<0.001	0.8772	0.8852	<0.001
	$\log \tilde{Z}$	0.8896	0.8784	<0.001	0.6545	0.8953	<0.001

3. 效果分析

统计效果是多次试验的平均效果, 必须受多个事件的 t 检验, 它要求供比较的两个样本总体方差相等。表 2 是目标区催化和非催化样本余方差的比较检验结果, 大多数情况两者余方差的差异不显著的 ($\alpha > 0.05$), 满足多个事件 t 检验的要求, 但考虑少数差异显著情况的检验, 以下将同时进行方差不相等的双样本回归分析的 t 检验^[5]。

1) 合并分析

75 次随机试验合并分析结果见表 3。37 次催化试验的平均效果, 绝对增量为 0.25×10^{-4} (mm^6/m^3) ^{$\frac{1}{5}$} , 相对增量为 4%, 统计显著度接近 0.1。可用下式把此效果还原成用 \tilde{Z} 表示。

$$\Delta y = y - y' = (y^{\frac{1}{n}} - y'^{\frac{1}{n}}) (y^{\frac{n-1}{n}} + y^{\frac{n-2}{n}} y'^{\frac{1}{n}} + \dots + y^{\frac{1}{n}} y'^{\frac{n-2}{n}} + y'^{\frac{n-1}{n}}) \quad (8)$$

$$\frac{\Delta y}{y'} = \left\{ \frac{y^{\frac{1}{n}} - y'^{\frac{1}{n}}}{y'^{\frac{1}{n}}} \right\} \left\{ (y^{\frac{n-1}{n}} + y^{\frac{n-2}{n}} y'^{\frac{1}{n}} + \dots + y^{\frac{1}{n}} y'^{\frac{n-2}{n}} + y'^{\frac{n-1}{n}}) / y'^{\frac{n-1}{n}} \right\} \quad (9)$$

取 $n=5$ 得绝对增量为 26.50 (mm^6/m^3), 相对增量为 20%。人工催化促进 \tilde{Z} 值增大, 反映了云中较大水滴的增长和增多。

2) 分类分析

按云型分类分析结果见表 3。 \tilde{Z} 增量最大的是积状云, 最小是混合云。

取雷达回波顶温度分类统计效果见表 4。高于零度为负值, 低于零度为正值, 且随温度下降效果趋佳。

以天气背景分类计算结果列于表 5, 锋前效果比锋区明显, 锋后因样本容量太小, 结果可信度差。

依三小时自然雨量 R 分类分析结果见表 6。当 $5 \text{ mm} \leq R < 15 \text{ mm}$ 时催化有正效果, 否则是负效果。

表 2 影响区的催化样本和非催化样本余方差相等性检验

统计分类		项 目		催 化 样 本		非 催 化 样 本		方 差 F 检 验	
		分 析 内 容		容 量 N_1	余方差 S_1^2 ($\times 10^{-9}$)	容 量 N_2	余方差 S_2^2 ($\times 10^{-9}$)	F 值 S_1^2/S_2^2 或 S_2^2/S_1^2	显 著 度
合并统计			37	7.9871	38	7.6988	1.0374	$0.05 < \alpha$	
分 类 统 计	云 型	层 状	3	3.3922	8	1.3395	2.5377	$0.05 < \alpha$	
		积 状	6	3.3794	9	2.3482	1.4392	$0.05 < \alpha$	
		混 合 状	28	9.5087	21	8.2484	1.1528	$0.05 < \alpha$	
	回 波 顶 温 度	$0 < T$	11	1.9821	11	0.9383	2.1124	$0.05 < \alpha$	
		$-10 < T \leq 0$	15	3.3986	19	3.5711	1.0508	$0.05 < \alpha$	
		$T \leq -10$	9	18.7934	7	18.6055	1.0101	$0.05 < \alpha$	
	天 气 型	锋 前	7	5.1190	10	9.8400	1.9223	$0.05 < \alpha$	
		锋 区	18	1.0268	21	4.2549	2.4132	$0.01 < \alpha < 0.05$	
		锋 后	2		3	0.1832			
		高 压	10	6.6656	4	0.0058	115.1562	$\alpha < 0.01$	
	自 然 降 水 量	$R < 5$	18	3.7268	18	8.4401	2.2647	$0.01 < \alpha < 0.05$	
		$5 \leq R < 15$	15	11.0563	10	2.0535	5.3842	$\alpha < 0.01$	
		$15 \leq R$	4	7.7918	10	11.7744	1.5111	$0.05 < \alpha$	

表 3 人工影响的增值效果合并回归分析和按云型分类回归分析

分析项目		统 计 分 类		按云型的回波特征分类			
		合 并 统 计		层 状 云	积 状 云	混 合 状 云	
试验次数	总 计	75	11	15	49		
	催 化 试 验	37	3	6	28		
	非 催 化 试 验	38	8	9	21		
平均等效反射因子的五次方根 \tilde{Z}_t	非催化 试验单元	区域相关系数 R_2 R_2 的显著度 α_2	0.8409 $\alpha < 0.001$	0.9677 $\alpha < 0.001$	0.9448 $\alpha < 0.001$	0.8691 $\alpha < 0.001$	
		区域回归方程	$y_2 = 0.000173$ $+ 0.693182x_2$	$y_2 = 0.000074$ $+ 0.787211x_2$	$y_2 = 0.000270$ $+ 0.505621x_2$	$y_2 = 0.000075$ $+ 0.880185x_2$	
	催化试 验单元	区域相关系数 R_1 R_1 的显著度 α_1	0.8745 $\alpha < 0.001$	0.8887 $0.1 < \alpha$	0.8870 $0.01 < \alpha < 0.02$	0.8719 $\alpha < 0.001$	
		区域回归方程	$y_1 = -0.000051$ $+ 1.04337x_1$	$y_1 = 0.000160$ $+ 0.659991x_1$	$y_1 = 0.000050$ $+ 0.860818x_1$	$y_1 = -0.000050$ $+ 1.053089x_1$	
	试验效果	绝对增量 ($\times 10^{-4}$)		0.2510	0.0354	0.1570	0.0117
		相对增量		0.0377	0.0061	0.0259	0.0016
		α (单边)	双样本	$0.1 < \alpha < 0.15$	$0.45 < \alpha$	$0.3 < \alpha < 0.35$	$0.45 < \alpha$
			多个事件	$0.1 < \alpha < 0.15$	$0.4 < \alpha < 0.45$	$0.25 < \alpha < 0.3$	$0.45 < \alpha$
		绝对增量		26.5042	2.0731	11.1999	1.5307
		相对增量		0.2034	0.0307	0.1363	0.0082

表 4 人工影响的增值效果按雷达回波顶温度分类回归分析

分析项目		统计分类	雷达回波顶温度			
			$T > 0$	$0 \geq T > -10$	$-10 \geq T$	
试验次数	总计		22	34	16	
	催化试验		11	15	9	
	非催化试验		11	19	7	
平均等效反射因子的五次方根 \tilde{Z}_e	非催化 试验单元	区域相关系数 R_2	0.9813	0.9441	0.2321	
		R_2 的显著度 α_2	$\alpha < 0.001$	$\alpha < 0.001$	$0.1 < \alpha$	
	区域回归方程		$y_2 = -0.000068 + 1.019458x_2$	$y_2 = 0.000069 + 0.830632x_2$	$y_2 = 0.000467 + 0.343348x_2$	
	催化试 验单元	区域相关系数 R_1	0.9473	0.8107	0.8887	
		R_1 的显著度 α_1	$\alpha < 0.001$	$\alpha < 0.001$	$0.001 < \alpha < 0.01$	
	区域回归方程		$y_1 = 0.000006 + 0.898005x_1$	$y_1 = 0.000214 + 0.657548x_1$	$y_1 = -0.000132 + 1.203900x_1$	
	试验效果	绝对增量 ($\times 10^{-4}$)		-0.0954	0.2874	0.8854
		相对增量		-0.0152	0.0458	0.1195
		显著度 α (单边)	双样本	$0.25 < \alpha < 0.3$	$0.05 < \alpha < 0.1$	$0.2 < \alpha < 0.25$
			多个事件	$0.2 < \alpha < 0.25$	$0.05 < \alpha < 0.1$	$0.2 < \alpha < 0.25$
绝对增量		-7.2143	24.4574	169.4686		
相对增量		-0.0737	0.2507	0.7582		

表 5 人工影响的增值效果按天气形势分型分类回归分析

分析项目		统计分类	按天气形势分型分类				
			锋前	锋区	锋后	高压、高压边缘	
试验次数	总计		17	39	5	14	
	催化试验		7	18	2	10	
	非催化试验		10	21	3	4	
平均等效反射因子的五次方根 \tilde{Z}_e	非催化 试验单元	区域相关系数 R_2	0.9011	0.9023	-0.9974	0.9936	
		R_2 的显著度 α_2	$\alpha < 0.001$	$\alpha < 0.001$	$0.1 < \alpha$	$0.001 < \alpha < 0.01$	
	区域回归方程		$y_2 = 0.000158 + 0.668741x_2$	$y_2 = 0.000051 + 0.885125x_2$	$y_2 = 0.002114 - 1.938262x_2$	$y_2 = -0.000279 + 1.329052x_2$	
	催化试 验单元	区域相关系数 R_1	0.8433	0.8607	-0.9999	0.9400	
		R_1 的显著度 α_1	$0.01 < \alpha < 0.02$	$\alpha < 0.001$	$0.1 < \alpha$	$\alpha < 0.001$	
	区域回归方程		$y_1 = 0.000178 + 0.695703x_1$	$y_1 = -0.000108 + 1.128448x_1$	$y_1 = 0.000899 - 0.206271x_1$	$y_1 = -0.000098 + 1.136402x_1$	
	试验效果	绝对增量 ($\times 10^{-4}$)		0.3886	0.1258	1.9265	0.4532
		相对增量		0.0619	0.0186	0.3579	0.0691
		显著度 α (单边)	双样本	$0.15 < \alpha < 0.2$	$0.3 < \alpha < 0.35$		$0.05 < \alpha < 0.1$
			多个事件	$0.2 < \alpha < 0.25$	$0.25 < \alpha < 0.3$	$0.025 < \alpha < 0.05$	$0.005 < \alpha < 0.01$
绝对增量		34.2074	13.6647	163.4986	84.1274		
相对增量		0.3500	0.0965	3.6163	0.3966		

表 6 人工影响的增值效果按自然降水量大小分类回归分析

分 析 项 目		统 计 分 类	自 然 降 水 量 分 类			
			$R < 5$	$5 \leq R < 15$	$15 \leq R$	
试验次数	总 计		36	25	14	
	催 化 试 验		18	15	4	
	非 催 化 试 验		18	10	10	
平均等效反射因子的五次方根 \tilde{Z}_s	非 催 化 试 验 单 元	区域相关系数 R_2 R_2 的显著度 α_2	0.7517 $\alpha < 0.001$	0.9176 $\alpha < 0.001$	0.7538 $0.01 < \alpha < 0.02$	
		区域回归方程	$y_2 = -0.000032$ $+ 1.042209x_2$	$y_2 = 0.000131$ $+ 0.729057x_2$	$y_2 = 0.000309$ $+ 0.550338x_2$	
	催 化 试 验 单 元	区域相关系数 R_1 R_1 的显著度 α_1	0.8721 $\alpha < 0.001$	0.9092 $\alpha < 0.001$	0.2500 $0.1 < \alpha$	
		区域回归方程	$y_1 = -0.000033$ $+ 1.034634x_1$	$y_1 = -0.000173$ $+ 1.215754x_1$	$y_1 = 0.000598$ $+ 0.194646x_1$	
	试验效果	绝对增量 ($\times 10^{-4}$)		-0.0549	0.5662	-0.1574
		相对增量		-0.0085	0.0842	-0.0202
		显著度	双 样 本	$0.4 < \alpha < 0.45$	$0.025 < \alpha < 0.05$	$0.35 < \alpha < 0.4$
			α (单边)	多 个 事 件	$0.4 < \alpha < 0.45$	$0.005 < \alpha < 0.01$
		绝对增量		-4.7360	68.4069	-27.9991
		相对增量		-0.0417	0.4983	-0.0969
\tilde{Z}_s						

表 7 区域平均三小时降水量 I 与平均等效反射因子 \tilde{Z}_s 的相关系数和回归方程

分 类	项 目		相 关		回 归 方 程 \tilde{Z}_s (mm ⁵ /m ⁶), I (mm/3h)
			系 数	显 著 度	
合并统计			0.5319	$\alpha < 0.001$	$\tilde{Z}_s = 308.68 + 36.59I$
分 类 统 计	云 型	层 状	0.7189	$\alpha < 0.001$	$\tilde{Z}_s = 168.37 + 13.13I$
		积 状	0.7859	$\alpha < 0.001$	$\tilde{Z}_s = 324.19 + 62.27I$
		混 合 状	0.4454	$\alpha < 0.001$	$\tilde{Z}_s = 335.44 + 31.55I$
	回 波 顶 温 度	$0 < T$	0.7968	$\alpha < 0.001$	$\tilde{Z}_s = 187.26 + 23.54I$
		$-10 < T \leq 0$	0.5848	$\alpha < 0.001$	$\tilde{Z}_s = 246.06 + 29.15I$
		$T \leq -10$	0.2827	$0.1 < \alpha$	$\tilde{Z}_s = 485.41 + 27.58I$
	天 气 型	锋 前	0.8194	$\alpha < 0.001$	$\tilde{Z}_s = 472.60 + 64.30I$
		锋 区	0.2842	$0.01 < \alpha < 0.02$	$\tilde{Z}_s = 242.63 + 13.94I$
		锋 后	-0.0904	$0.1 < \alpha$	$\tilde{Z}_s = 253.17 - 3.23I$
		高 压	0.5094	$0.001 < \alpha < 0.01$	$\tilde{Z}_s = 313.48 + 62.00I$
自 然 降 水 量	$R < 5$	0.0766	$0.1 < \alpha$	$\tilde{Z}_s = 126.56 + 3.86I$	
	$5 \leq R < 15$	0.1668	$0.1 < \alpha$	$\tilde{Z}_s = 362.65 + 24.36I$	
	$15 \leq R$	0.7082	$\alpha < 0.001$	$\tilde{Z}_s = 680.64 + 72.21I$	

3) 与雨量效果比较

等效反射因子 Z_s 与降水强度间有与(7)式形式相似的关系, 降水量又与降水强度关系密切, 估计等效反射因子 Z_s 的几何平均值 \tilde{Z}_s 与降水量的值会有一定联系, 算得其相关系数为 0.5319 ($\alpha < 10^{-3}$) (表

表 8 同期区域平均降水量分析的效果与等效反射因子分析的效果比较表

分析项目 统计分类	用等效反射因子进行效果回归分析结果										用区域平均降水量进行效果回归分析结果									
	平均等效反射因子的五次方根					平均等效反射因子					平均降水量的四次方根					平均降水量				
	绝对增量 ($\times 10^{-1}$)	相对增量	显著度(单边)			绝对增量	相对增量	绝对增量	相对增量	绝对增量	相对增量	显著度 α (单边)			绝对增量	相对增量				
			双样本 t 检验	多个事件 t 检验	多个事件 t 检验							双样本 t 检验	多个事件 t 检验	多个事件 t 检验						
合并统计	0.25	0.04	$0.1 < \alpha < 0.15$	$0.1 < \alpha < 0.15$	$0.1 < \alpha < 0.15$	28.5	0.20	0.09	0.06	$0.025 < \alpha < 0.05$	$0.0125 < \alpha < 0.025$	$0.0125 < \alpha < 0.025$	<1.45	<1.45	0.17					
层状云	0.04	0.01	$0.45 < \alpha$	$0.4 < \alpha < 0.45$	2.07	0.03	0.01	0.01	0.01	$0.45 < \alpha$	$0.4 < \alpha < 0.45$	$0.4 < \alpha < 0.45$	0.17	0.17	0.02					
积状云	0.16	0.03	$0.3 < \alpha < 0.35$	$0.25 < \alpha < 0.3$	11.2	0.14	-0.12	-0.08	-0.08	$0.1 < \alpha < 0.15$	$0.15 < \alpha < 0.2$	$0.15 < \alpha < 0.2$	-0.13	-0.13	-0.19					
混合状云	0.01	0.002	$0.45 < \alpha$	$0.45 < \alpha$	1.53	0.01	0.14	0.09	0.09	$0.0125 < \alpha < 0.025$	$0.025 < \alpha < 0.05$	$0.025 < \alpha < 0.05$	2.13	2.13	0.26					
$T > 0$	-0.10	-0.02	$0.25 < \alpha < 0.3$	$0.2 < \alpha < 0.25$	-7.2	-0.07	0.03	0.02	0.02	$0.3 < \alpha < 0.35$	$0.3 < \alpha < 0.35$	$0.3 < \alpha < 0.35$	0.43	0.43	0.06					
$0 > T > -10$	0.29	0.05	$0.05 < \alpha < 0.1$	$0.05 < \alpha < 0.1$	24.5	0.25	0.13	0.08	0.08	$0.025 < \alpha < 0.05$	$0.025 < \alpha < 0.05$	$0.025 < \alpha < 0.05$	2.14	2.14	0.24					
$-10 \geq T$	0.89	0.12	$0.2 < \alpha < 0.25$	$0.2 < \alpha < 0.25$	169.5	0.76	0.14	0.09	0.09	$0.15 < \alpha < 0.2$	$0.15 < \alpha < 0.2$	$0.15 < \alpha < 0.2$	2.58	2.58	0.25					
锋前	0.39	0.06	$0.15 < \alpha < 0.2$	$0.2 < \alpha < 0.25$	34.2	0.35	0.27	0.20	0.20	$0.0125 < \alpha < 0.025$	$0.01 < \alpha < 0.0125$	$0.01 < \alpha < 0.0125$	3.61	3.61	0.81					
锋区	0.13	0.02	$0.3 < \alpha < 0.35$	$0.25 < \alpha < 0.3$	13.7	0.10	0.07	0.05	0.05	$0.1 < \alpha < 0.15$	$0.1 < \alpha < 0.15$	$0.1 < \alpha < 0.15$	1.27	1.27	0.13					
锋后	1.93	0.36	$0.025 < \alpha < 0.05$	$0.025 < \alpha < 0.05$	163.5	3.62	0.12	0.08	0.08	$0.15 < \alpha < 0.2$	$0.25 < \alpha < 0.3$	$0.25 < \alpha < 0.3$	2.13	2.13	0.23					
高压	0.45	0.07	$0.05 < \alpha < 0.1$	$0.005 < \alpha < 0.01$	84.1	0.40	-0.26	-0.14	-0.14	$0.15 < \alpha < 0.2$	$0.15 < \alpha < 0.2$	$0.15 < \alpha < 0.2$	-5.29	-5.29	-0.25					
自然降水量	-0.05	-0.01	$0.4 < \alpha < 0.45$	$0.4 < \alpha < 0.45$	-4.7	-0.04	-0.002	-0.001	-0.001	$0.45 < \alpha$	$0.45 < \alpha$	$0.45 < \alpha$	-0.02	-0.02	-0.003					
	0.57	0.08	$0.025 < \alpha < 0.05$	$0.005 < \alpha < 0.01$	68.4	0.50	0.16	0.09	0.09	$0.025 < \alpha < 0.05$	$0.01 < \alpha < 0.0125$	$0.01 < \alpha < 0.0125$	3.16	3.16	0.27					
	-0.16	-0.02	$0.35 < \alpha < 0.4$	$0.4 < \alpha < 0.45$	-28.0	-0.10	0.24	0.12	0.12	$0.0025 < \alpha < 0.005$	$0.025 < \alpha < 0.05$	$0.025 < \alpha < 0.05$	8.62	8.62	0.30					

* 单位为(毫米)±。

** 用(7)式,取 $n=4$,把*值代入求得,单位为毫米。

++ 用(9)式,取 $n=4$,把+值代入即得。

7)。比较两者各自独立分析的效果,将有助于印证用 \tilde{Z}_c 表示效果的确凿性。为此把同试验单元的区域面积平均雨量的四次方根^[6],进行相同的区域回归分析,表 8 把雨量分析与 \tilde{Z}_c 分析的结果平行列出,以资比较。

在表 8 合并统计栏中,雨量的相对增量为 17%,与 \tilde{Z}_c 的相对增量 20% 颇为接近。分类统计栏中两者还有好些相似的地方,如两者增量都随回波顶温度下降而加大,锋前增量比锋区大,自然雨量小于 5 mm 时增量都较小等。这些相似可在一定程度上证实 \tilde{Z}_c 的内涵,承认用它来检验人工催化效果的有效性。 \tilde{Z}_c 效果与雨量效果也有迥异之处,如云型分类中 \tilde{Z}_c 增量最大位于积状云,最小在混合云,而增雨最大与最小的位置恰好与此相反。这可能因不同云的云雨转化率不同所造成,据表 7 相应的回归方程

可得 $\left(\frac{dI}{d\tilde{Z}_c}\right)_{\text{积状}} \approx \frac{1}{2} \left(\frac{dI}{d\tilde{Z}_c}\right)_{\text{混合}}$,表示 \tilde{Z}_c 对 I 的贡献积状云比混合云差,即云雨转化率混合云比积状云

好。也由此可见,用 \tilde{Z}_c 表示的效果主要反映空中云雨物理特征的改变,不同于增雨效果直接反映地面增水情况。

因为供用的雷达资料是相隔 12 分钟左右的 PPI 分层图,每试验单元雷达观测时长平均 48 分,而用于计算平均雨量的是三小时雨量图,两者时长不等及自然雨强不均匀所引起的差异,会削弱 \tilde{Z}_c 与雨量的相关程度,表 7 的相关系数偏小有此因素。但不会影响单独用 \tilde{Z}_c 评定的效果,因为分析 \tilde{Z}_c 效果使用的资料是目标区和对比区的同步资料,具有相对比较性。当然须要指出,本文用 \tilde{Z}_c 评定的效果,其平均时效应当是 48 分钟。

又因各试验单元雷达观测时长不等,取得的 PPI 图张数多寡不一,必然影响回波强度因子的时长加权运算,使各试验单元的 \tilde{Z}_c 值之间比较性减弱,增大 \tilde{Z}_c 的离散度,表 8 显著度栏里 \tilde{Z}_c 的 α 值普遍比雨量的 α 值大些,可能与此有关。

4. 结 论

1) 用平均的方法对于消除雷达测雨中的不确切性误差,提高测雨精度是有帮助的^[7]。本文用平均方法算得 \tilde{Z}_c ,并用它评定催化效果,且与雨量效果比较,在一定程度上印证了 \tilde{Z}_c 的内涵。用 \tilde{Z}_c 评定催化效果,能揭示催化对云雨结构的影响,配合地面增雨效果可更客观、全面评价人工降水效果。

2) 在 1982—1984 年的 75 次随机增雨试验中,37 次催化作业 \tilde{Z}_c 的平均绝对增量为 26.50 (mm³/m³),相对增量为 20.34%。分类分析表明,在积状云、锋前、回波顶温度低于零度、三小时自然雨量大于等于 5 mm 且小于 15 mm 等条件下,催化可望云中较大水滴数浓度加大,效果较好。

参 考 文 献

- [1] 福建省气象局气科所、南京大学气象系,古田水库地区人工降水试验效果统计分析,大气科学,3,2,131—140,1979。
- [2] 曾光平、叶家东等,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,1986 年第 5 期,59—65。
- [3] 张令钊、林祥明,福建 711 雷达衰减系数与降水强度关系的初步分析,福建气象科技,1986 年 1 期,99—100。
- [4] 复旦大学,概率论,第二册数理统计,高等教育出版社,268—272,1984 年。
- [5] 叶家东、范蓓芬,方差不相等的双样本回归分析,大气科学,5,2,214—224,1981 年。
- [6] 叶家东、程克明、曾光平,闽中雨季区域雨量统计特性及人工影响的效果,气象学报,39,4,474—482,1981 年。
- [7] B.J. 梅森,云物理学,科学出版社,501—502,1978。

TO TEST THE EFFECT OF CLOUD-SEEDING AT FUJIAN GUTIAN RIVER BY AVERAGE PARAMETER OF RADAR ECHO

Zhang Lingzhao

(Fujian Research Institute of Meteorological Science)

Abstract

In this paper a method of computing spatial and temporal average radar's equivalent reflection factors \tilde{Z}_e is suggested. The effect of 75 randomized precipitation enhancing experiments (1982—1984) in Fujian Gutian River Basin with the method is analysed. The result of 37 seeding experiments indicates that the average relative increment is 20.34 % and absolute increment is 26.50 (mm^6/m^3). The effectiveness of \tilde{Z}_e has been confirmed as compared with the regression analysis of precipitation. An increase in \tilde{Z}_e indicates that the bigger drop's number density in cloud may be increased by seeding.