

人工降水试验效果检验的统计模拟方法研究*

曾光平 刘 峻

(福建省气象科学研究所, 福州 350001)

本文以灵敏度、准确度、功效三条作为选择、评价试验方案、统计方法的依据。采用统计模拟方法对各种试验方案的灵敏度、准确度、功效进行讨论, 并提出一种灵敏度、准确度、功效最高的新的随机试验方案。

灵敏度指在一定显著度 α 上检出试验效果所需的增雨效果的最低值 θ , θ 值越小灵敏度越高; 也可指在一定增雨效果下, 统计检验的显著度 α 的大小, α 越小, 灵敏度越高。灵敏度的高低表征对催化效果反应的敏感程度及检验的能力。

准确度指统计效果与实际增雨效果之间差值的大小。用 η 表示他们之间的相对变差, 也称失真率。

$$\eta = \frac{|\text{统计效果} - \text{催化效果}|}{\text{催化效果}} \times 100\%$$

准确度 $\zeta = 1 - \eta$, η 越小, 准确度越高。准确度的高低表征准确地反映增雨效果的能力。

功效是指在一定的试验期内(一定的样本容量), 在一定的显著度上检出一定的试验效果的概率(即检出率, 检出率越高, 功效越高)。也可指在一定的显著度上, 以一定的检出率检出一定的试验效果所需的试验周期(样本容量), 功效的高低表明从自然降水变率背景上检出人工降水效果的能力。

本文利用古田人工降雨试验区 1975—1988 年 4—6 月份非催化单元资料^[1](试验单元为 3 小时)对各种方案(随机试验和非随机试验)进行模拟试验, 并对各种方案进行比较。

1 非随机化试验方案

非随机化试验通常有序列试验、区域对比试验和区域回归试验。

各种非随机化试验方案模拟过程统计量均取雨量本身。模拟结果见表 1。

模拟结果表明:(1) 降水自然起伏影响效果评价, 三种非随机试验方案均产生假效果(其中序列试验最大, 超过人工催化可能的增雨值), 且不会随样本增加而单调下降, 无法通过延长试验期排除这种影响, 即无法在显著上(如 $\alpha = 0.05$ 或 0.01) 以一定的检出率检出人工降雨效果(20%—30%)。(2) 灵敏度低。其中序列试验和区域对比试验 θ 达到 100%, α 仍大于 0.05; 历史回归试验灵敏度高于前二种方案, 但仍满足不了人工降雨检验要求。(3) 准确度低; 序列试验最低, 区域对比试验居中。 $\theta = 20\%$ 时, 前者失真率 $> 100\%$, 后者除 $N = 150$ 外失真率 $> 60\%$ 。历史回归试验准确度比前面二种高, $\theta = 20\%$, $N = 100, 250$ 时, 失真率为 20%—25%, N 为其它值时, 失真率 $> 25\%$ 。(4) 这三种方法灵敏度, 准确度随增雨效果 θ 的增加而提高, 但无法通过增加试验样本来提高灵敏度、准确度、功效。而且模拟结果随历史资料年限长短以及对比区选取而变。

由于这三种非随机试验方案功效、灵敏度、准确度低, 使得它们在人工降雨试验中的应用受到很大限制。

2 各种随机化试验方案数值试验

随机化试验通常有单区随机试验(J_1)、区域随机回归试验(J_2)、区域交叉随机试验(J_3)三种^[2]。另

* 1990 年 5 月 21 日收到原稿, 1991 年 8 月 25 日收到最后修改稿。国家气象局基金课题。

表 1 非随机化试验数值模拟分析结果*

θ (%)	N:30			N:100			N:150			N:250			N:320		
	E	αE	η												
序 0	26.64	0.41		43.88	0.35		32.21	0.39		25.43	0.41		18.4	0.14	
列 10	39.30	0.36	293.00	58.26	0.30	482.60	45.43	0.34	354.30	37.97	0.37	279.70	30.24	0.39	202.40
20	51.97	0.32	159.85	72.65	0.26	263.25	58.66	0.30	193.30	50.51	0.33	152.55	42.08	0.36	110.46
试 30	64.63	0.28	115.43	87.04	0.22	190.13	71.88	0.26	139.60	53.06	0.29	110.20	53.92	0.32	79.73
验 50	89.96	0.21	79.92	115.81	0.15	131.62	98.32	0.19	96.64	88.14	0.22	76.28	77.59	0.25	55.18
70	115.29	0.15	64.67	144.59	0.10	106.56	124.76	0.14	78.23	113.23	0.16	61.76	101.27	0.19	44.67
100	153.28	0.08	53.28	173.37	0.06	92.63	164.43	0.07	64.43	150.86	0.09	50.85	136.79	0.11	36.79
区 1	-10.51	0.44		-8.19	0.47		-3.14	0.49		-13.93	0.45		-10.08	0.43	
域 10	-1.56	0.49	115.60	0.99	0.50	90.10	6.26	0.48	37.40	-4.78	0.50	147.80	-1.92	0.48	119.20
对 20	7.39	0.46	63.05	10.18	0.46	49.10	15.92	0.44	20.40	1.37	0.50	78.15	7.90	0.44	60.50
比 30	16.34	0.41	45.53	19.36	0.43	35.47	25.58	0.41	14.73	13.53	0.45	51.90	16.89	0.40	43.70
试 50	34.24	0.32	31.52	37.72	0.37	24.56	44.90	0.35	10.20	31.83	0.33	36.34	34.87	0.30	30.26
验 70	52.14	0.24	25.51	56.08	0.31	19.89	64.22	0.29	8.26	50.13	0.24	28.39	52.86	0.22	24.29
100	78.99	0.14	21.01	83.63	0.23	16.37	93.20	0.21	6.80	77.58	0.15	22.42	79.83	0.12	20.17
历 0	-9.32	0.20		-4.15	>0.20		-10.80	0.20		-3.22	>0.20		-5.94	>0.20	
史 10	-0.25	>0.20	102.47	5.43	>0.20	45.67	1.86	>0.20	118.60	6.46	>0.20	35.39	3.46	>0.20	65.40
回 20	8.82	0.20	55.90	15.02	0.10	24.91	7.06	>0.20	64.70	16.14	0.10	19.30	12.86	0.15	35.70
归 30	17.89	0.10	40.37	24.60	0.05	17.99	15.99	0.10	46.70	25.82	0.01	13.94	22.27	0.05	25.77
试 50	36.03	<0.05	27.95	43.77	<0.01	12.45	33.83	0.05	32.34	45.17	<0.01	9.65	41.08	<0.01	17.84
验 70	54.16	<0.01	22.62	62.95	<0.01	10.08	51.67	<0.01	26.19	64.53	<0.01	7.81	59.89	<0.01	14.44
100	81.37	<0.1	18.37	91.70	<0.01	8.30	78.44	<0.01	21.56	93.57	<0.01	6.43	88.10	<0.01	11.90

* E为催化效果统计值(%), αE 为E的显著度, η 为失真率(%), N为样本数, θ 为催化效果。

外,本文提出一种新的随机试验方案——区域随机交叉回归试验(J_4)。

区域随机交叉回归试验(J_4)方案设置二个目标区 A_1, A_2 及一个对比区 B 。根据随机化规则决定 A_1 区催化(A_2 区不催化)或不催化(A_2 区催化),而 B 区一直不催化,留作对比。采用方差不相等的双样本回归分析法统计出 A_1 区催化(B 区对比)的效果统计量 $E_{1,1}$ 以及 A_2 区催化(B 区对比)的效果统计量 $E_{1,2}$,则该方案效果统计量 $E_4 = [E_{1,1} \cdot E_{1,2}]^2$ 。效果的显著性可采用秩和检验法或 t -检验法检验。

2.1 降水自然变异对效果检验的影响

在模拟试验中,令增雨效果指标 $\theta=0$,统计模拟试验结果是降水自然起伏引起的增雨值。计算结果见图 1。分析该图可以得出(1)不同试验方案降水自然变异影响不一样,随机交叉回归试验最小,随机交叉试验次之,单区随机试验最大。(2)降水自然变异影响随样本数的增大而减小。

2.2 功效分析

不同试验方案的功效模拟试验结果表明:

1 随机交叉回归试验功效最高,随机交叉试验次之,单区随机试验功效最低。它们功效之比见表 2。当样本容量和增雨效果较小时, J_4 功效是 J_1 的 2—5 倍,是 J_2, J_3 的 1—2 倍左右,且其比值随样本容量和增雨效果的增大而减小(各种方案功效趋于 1)。

2 虽然四种不同方案的功效均是随增雨效果的增大而增大,但是增大的速率差异极大(见图 2), J_4 方案增大最快, J_2 次之, J_1 最缓慢,如 $N=30$ 时, $\theta=30\%$ 时 J_4 的功效已大于 0.70, J_2 为 0.67, J_1 才只有 0.26。当 θ 达到一定值时,功效曲线趋于平缓,当功效值 >0.9 时曲线变化非常缓慢了。

3 功效随样本容量的增加而增加,但不同方案变化速度差异很大, J_1 方案变化较慢, J_2 次之, J_4 最

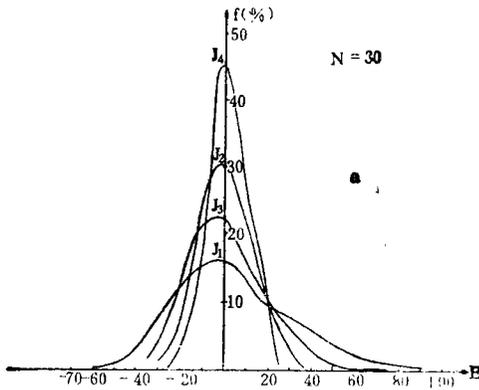


图 1a 不同试验方案降水自然起伏引起的相对“增雨效果”分布图 (N=30)

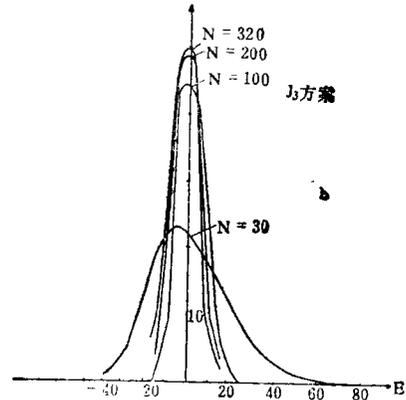


图 1b 不同样本容量降水自然变差引起的“增雨效果”的分布图 (J₃)

快。如当 $\theta=20\%$ 时, N 从 30 增大到 100 时, J_1, J_2 方案的功效分别从 0.17 和 0.53 增到 0.23 和 0.94, 相对增雨分别为 35% 和 77%。

4 试验周期估计, 图 3 给出不同试验方案下检出率 (功效) 为 0.80 和 0.90 时增雨效果和样本容量的关系曲线。可以看出在给定检出率和增雨效果条件下, J_4 方案所要的样本数量最少, J_2 次之, J_1 所需的样本数最多, 如以一年 30 个样本计算 (下同), 在检出率为 80%—90%, $\theta=20\%$ 时, J_4, J_2, J_3, J_1 所需的试验周期分别为 2—3 年、3—4 年、4—6 年及 10 年以上。

表 2 不同试验方案功效比

$\theta(\%)$	10				20				30				50				
	N	30	100	200	320	30	100	200	320	30	100	200	320	30	100	200	320
功	J_4/J_1	2.29	5.44	5.16	4.60	3.06	4.02	2.61	2.24	2.93	2.94	1.63	1.40	2.13	1.66	1.11	1.03
效	J_4/J_2	1.23	1.51	1.18	1.10	1.19	1.05	1.00	1.00	1.15	1.00	1.00	1.00	1.05	1.00	1.00	1.00
比	J_4/J_3	1.69	1.75	1.51	1.24	1.82	1.35	1.03	1.00	1.75	1.02	1.00	1.00	1.33	1.00	1.00	1.00

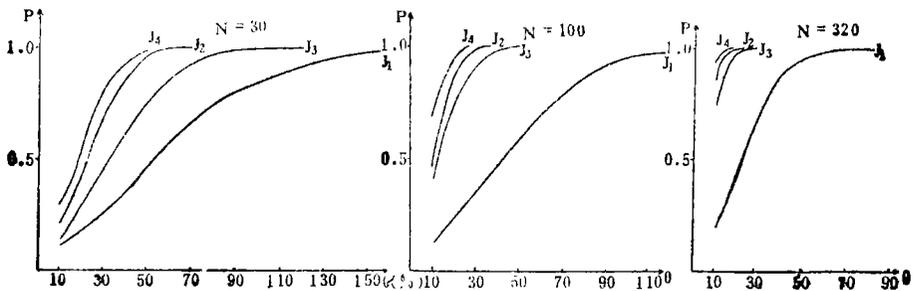


图 2 不同试验方案功效与增雨效果关系曲线

2.3 准确度

不同试验方案失真率数值分析结果表明:

- 1 对同一样本数, 相同增雨效果, J_4 方案失真率最小, 是 J_1 的 $\frac{1}{4} - \frac{1}{8}$ (准确度最高), 其次是 J_2 ,

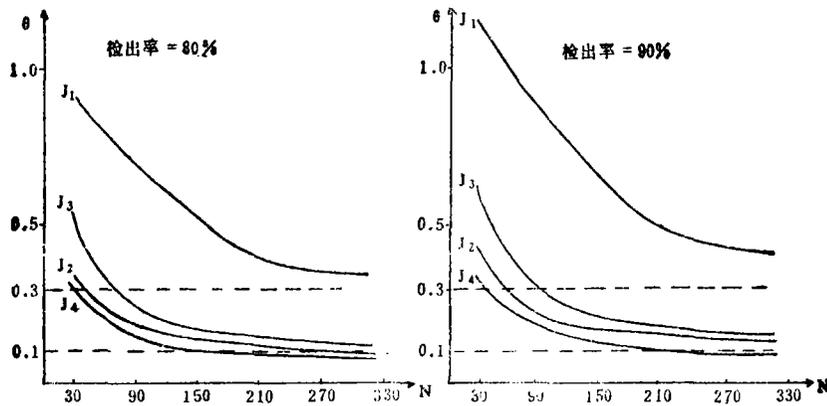


图 3 不同试验方案增雨效果与样本容量关系曲线

J_1 准确度最差。

2 失真率随样本容量增大及增雨效果增大而减小。在 θ 较小时 (<0.30) 和 N 较小 (<100) 时变化较快, 其后趋于缓慢。

3 一定准确度下, 试验周期估计: 图 4 给出 $\theta=0.20, 0.30$ 时 η 与 N 关系曲线。如以 $\eta=25\%$ 为可接受的上限, J_1 方案周期 3—2 年, J_2 为 4—3 年, J_3 为 6—4 年, $J_4 > 10$ 年。

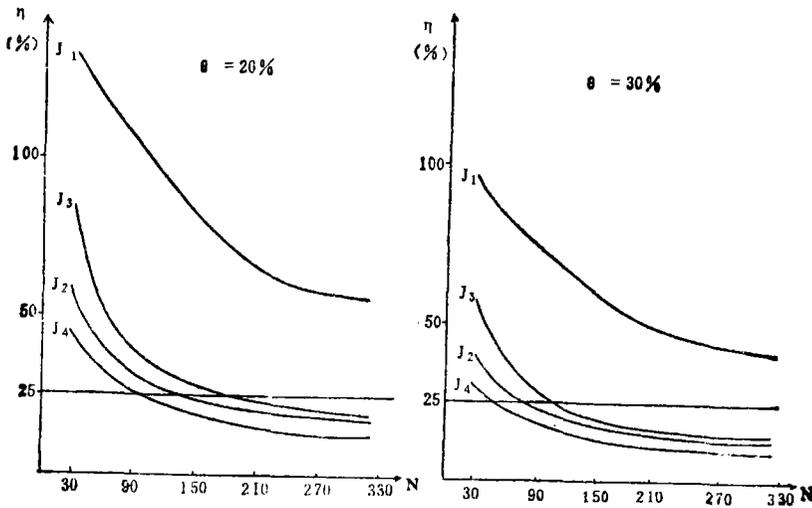


图 4 不同试验方案失真率 η 与样本容量关系曲线

2.4 灵敏度

分布结果表明: (见图 5)

1 J_4 方案灵敏度最高, 要使增雨效果在 $\alpha=0.05$ 上显著, 其增雨效果 θ 只需 J_1 的 $\frac{1}{4} - \frac{1}{3}$ 即可, 其次是 J_2, J_3 最差。灵敏度差异不仅与试验方案有关, 而且与检验方案关系密切。 J_1 和 J_4 方案采用秩和检验, J_2 和 J_3 采用 t -检验法, 显然后者显著性检验的灵敏度最高。

2 灵敏度随样本容量增大而提高, $N=320$ 时, 要在 $\alpha=0.05$ 上显著, 其增雨效果仅为 $N=30$ 时的 $\frac{1}{4}$ 左右。

3 试验周期的估算,从图 5 中可以得出要使增雨效果 20%—30% 在统计上显著 ($\alpha=0.05$), J_1 方案要 2.5—1.5 年, J_2 要 3.5—2 年, J_3 要 10—5.5 年, J_4 要远大于 10 年的周期。

综合考虑灵敏度、功效、准确度,随机交叉回归试验,是一种最佳的试验方案,随机交叉试验次之,单区随机试验不宜采用。

3 不同雨量相关试验的数值试验

人工降水效果统计分析是通过地面雨量采用统计学方法来评价效果,显然目标区和对比区区域雨量相关将直接影响到效果的评价。下面对五组区域雨量相关不同 ($\gamma=0.4900-0.9831$) 的资料采用随机回归试验方案进行统计模拟,分析相关系数对灵敏度、功效、准确度的影响。为了便于比较模拟时统计变量都取 $R=R^2$,其正态拟合率 $[1-K(g_0)]$ 为 0.9738—0.9703,拟合率极高,且差异很小。

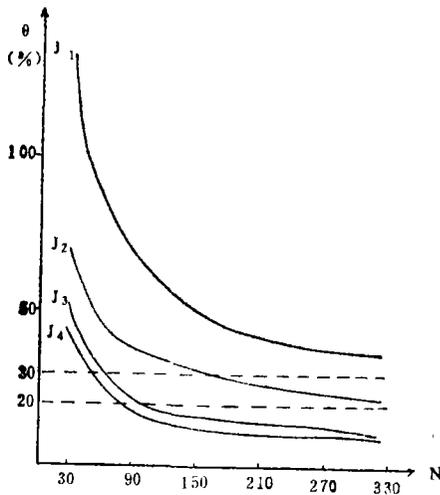


图 5 不同试验方案灵敏度 ($\alpha=0.05$) 与样本容量关系曲线

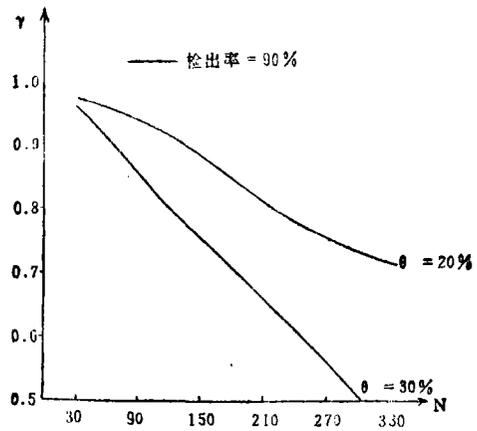


图 6 检出率=0.90 时样本容量与相关系数关系曲线

3.1 功效

1 分析表明,功效与相关系数及样本容量的关系十分密切。功效不仅随样本容量和增雨效果增大而提高,而且随 r 增大功效迅速提高,在 $r>0.70$, 尤为显著。当样本容量和增雨效果较小时, $r=0.98$ 功效是 $r=0.50$ 的 4—6 倍。随着样本容量和增雨效果增加,不仅这一比值减小,且功效随 r 增大变得缓慢,曲线趋于平稳(功效趋于 1)。

2 试验周期的估计,图 6 给出检出率为 90% 相关系数和样本容量关系曲线,当增雨效果为 20% 时, $r=0.95, 0.85, 0.75, 0.70$ 所需的试验周期分别为 2.5 年、6 年、9 年和 10 年,当增雨效果为 30% 分别为 1.5 年、3 年、5 年和 6 年。

3.2 准确度

分析结果表明失真率除随样本容量和增雨效果增大而减小时,与区域雨量相关系数关系密切,随 r 的增大失真率显著下降,即准确度明显提高。

当 $\eta=25\%, \theta=30\%$ 和 20% 时, $r=0.95$ 试验周期为 1.5—2.5 年, $r=0.85$ 时分别为 3.5—6.5 年,若 $r<0.75, \theta=20\%$ 时实际上无法进行分析。

3.3 灵敏度

分析表明(表3)灵敏度随相关系数增大显著提高,在样本容量较小时提高更为迅速,在小样本下 $r=$

0.95, 所需要的催化效果是 $r=0.50$ 的 $\frac{1}{7}$ 左右, 在大样本时为 $\frac{1}{4}$ 左右。

此外, 从图7可以估算出试验周期, 当 $\theta=20\%$ 时 $r=0.95, 0.90, 0.80, 0.75$ 周期分别为 1.5 年、2.5 年、5 年和 7 年。 $\theta=30\%$ 时它们周期分别为 1 年、1.5 年、2.5 年和 3.5 年。

由此可见, 人工降雨试验中目标区和对比区的选择极为重要, 二区相关的优劣直接影响到试验的周期、分析的灵敏度及统计结果的准确度。

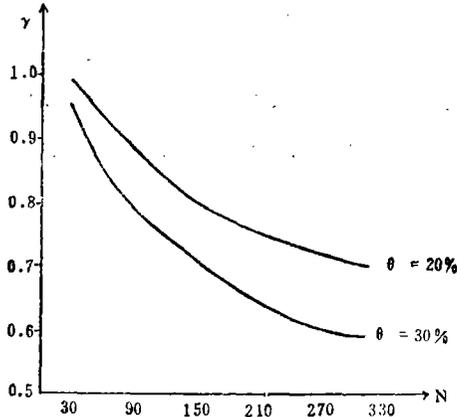


图7 显著水平 $\alpha=0.05$ 时、样本容量与相关系数关系曲线

表3 不同区域雨量相关系数灵敏度数值(θ)
分析结果($\alpha=0.05$)

r	N: 30	N: 100	N: 200	N: 320
r_1	148.25	64.20	40.64	35.20
r_2	89.49	38.75	24.27	23.42
r_3	52.46	22.00	14.98	10.93
r_4	34.11	16.75	10.98	8.88
r_5	20.42	11.92	9.36	7.94

4 不同统计变量数值试验

回归分析时, 采用方差不相等双样本回归分析法, 要求参加统计的变量具有正态分布, 因此要对雨量进行变数变换。雨量变换一般有 $R' = R^{\frac{1}{n}}$ ($n=1, 2, 3, \dots$) 和 $R' = \log R$ 。本文取 $n=1, 2, 3, 4, 5$ 及 $R' = \log R$ 。相关系数 $r=0.84-0.85$, 正态拟合率分别为 0.0418, 0.5336, 0.8457, 0.9703, 0.9990, 0.0389。

4.1 功效

不同统计变量功效的统计模拟分析结果表明, (1) 各统计变量功效也是随样本容量和增雨效果增大而增大, 其特点与前二章所述一样, (2) $R^{\frac{1}{n}}$ 各变量功效之间差异不大, 只是 $\log R$ 功效偏低。

模拟试验结果表明, (1) 失真率同样随样本数和增雨效果的增大而减少, (即准确度提高)。变量 $R^{\frac{1}{n}}$ 之间差异不大, $\log R$ 准确度略有偏低。

4.2 灵敏度

不同统计变量模拟试验结果表明, (1) 灵敏度不仅随样本数和增雨效果的增加而提高, 而且不同变量之间差异极大, 尤以 R 和 $\log R$ 极低根本无法用来检验人工降水效果。这可能是由于效果统计分析时采用 t -检验法, 要求统计变量服从正态分布, 统计变量 $R, \log R$, 正态拟合度极差, 导致分析时灵敏度极低。随着正态拟合率提高, 灵敏度相应提高。

不同统计变量功效、准确度数据分析结果表明 $R^{\frac{1}{n}}$ 之间无明显差异, $\log R$ 稍偏低, 灵敏度分析表明不同变量之间由于正态拟合率差异导致它们之间差异也极大, $R^{\frac{1}{5}}$ 最高, $R, \log R$ 最低, 不宜采用。综合考虑功效、准确度、灵敏度统计变量效果分析时采用 $R^{\frac{1}{n}}$ 和 $R^{\frac{1}{5}}$ 最好, 在检出率为 80%, $\alpha=0.05, \eta=25\%$, 增雨效果为 20%—30% 时需样本 200—240 个左右。

5 结论

1) 模拟试验结果表明: 非随机化试验灵敏度、准确度、功效比随机试验方案低。而且非随机化试

验模拟结果随历史资料年限长短和对比区选择而变。

2) 各种随机试验方案中, 随机交叉回归试验灵敏度、准确度、功效均优于其他各种方案。

3) 区域雨量相关系数直接影响到试验的周期、灵敏度和准确度, 区域雨量相关系数低于 0.75, 周期过长, 无法进行效果分析。

4) 由于效果统计分析时采用 t -检验法, 所以统计变量选取时应注意变量的正态拟合率, 综合考虑功效、准确度和灵敏度, 本文结果表明取 $R^{\frac{1}{4}}$, $R^{\frac{1}{5}}$ 为宜。

参考文献

- [1] Zhen Guang-Ping. A comprehensive evaluation of the effect of artificial rainfall in Gutian reservoir area, China. Papers Submitted to Fifth WMO Scientific Conference on Weather Modification And Applied Cloud Physics, Beijing, China, 8-12 May 1989, 551-554.
- [2] 叶家东, 曾光平. 随机试验功效的数值分析. 气象学报, 1984, 42(1): 69-79

A RESEARCH ON A STATISTICAL SIMULATION METHOD FOR THE TEST OF THE ARTIFICIAL RAINFALL EFFECT

Zeng Guangping Liu Jun

(Fujian Institute of Meteorology, Fuzhou 350001)

Abstract

The simulation research for the test of the artificial rainfall effect with a statistical simulation method on the basis of the three standards of the statistical power, accuracy and sensitivity shows that: (1) the statistical power, accuracy and sensitivity vary with the experimental scheme, statistical method, natural fluctuation of the rainfall, correlation of the regional rainfall and normal fitting probability, etc; (2) the random cross-regression experiment is a new scheme of the highest statistical power, accuracy and sensitivity; (3) the better the correlation of the regional rainfall (r), the higher the statistical power, accuracy and sensitivity; if r is too small ($r < 0.75$ in this paper), the scheme can not be adopted, because the required large numbers of experimental samples; (4) when its statistical variable selected, it must be considered normal fitting probability, under normal condition when $R^{\frac{1}{4}}$ and $R^{\frac{1}{5}}$ are taken.