

# 古田人工降雨应用研究<sup>1)</sup>

曾光平 朱鼎华 王祖炉

(福建省气象局,福州 350001)

## 提 要

在古田水库人工降雨试验研究基础上,根据水库蓄水和发电的需要,开展了6年应用研究。统计分析表明,作业后平均增雨1.52mm/3h( $\alpha < 0.05$ ),效益十分显著。

**关键词:** 人工降雨 效果检验 入库流量

## 前 言

福建省古田人工降雨分为试验研究和应用研究两个阶段。试验研究阶段自1975年起至1986年,应用研究阶段自1989年起至1996年。福建省古田人工降雨试验研究是国内第一个有严格科学设计的研究和生产相结合的项目。该项研究历时12年,采用随机试验方案,获取244个试验单元,分析结果表明每次作业在1500km<sup>2</sup>影响区内平均相对增雨23.81%,绝对增雨1.21mm/3小时( $\alpha = 0.14\%$ )<sup>[1]</sup>。

单站增雨效果分析结果表明,相对增雨 $\geq 20\%$ ( $\alpha < 0.05$ )的区域接近椭圆形位于作业点东北偏东方向<sup>[1]</sup>。

古田水库位于福建省中部,是全省最大的水力发电站之一,水库蓄水量直接影响到水库蓄水发电。由于水库集水面积仅1325km<sup>2</sup>,正常年份达不到满库水位。古田人工降雨试验研究期间,增加了水库入库流量。试验研究结束后,在该项研究成果基础上,根据业务生产需要,自1989年起开展应用研究。本文详述应用研究方案设计和作业效果评价。

## 1 应用研究概况

古田人工降雨试验研究采用随机回归试

验方案,影响区面积为1500km<sup>2</sup>,作业点设在影响区上风方的石塔山,在它的正西设一个面积相等的对比区<sup>[1]</sup>。水库流域位于影响区中一西南部。

古田人工降雨应用研究根据水库流域地理位置,单站增雨效果以及作业期主要风向将人工降雨作业点从石塔山移到风埔,该点位于石塔山南偏东17度19.5km处。影响区也作相应的调整,对比区位置不变,影响区面积约为1400km<sup>2</sup>,对比区面积约为1500km<sup>2</sup>。图1是试验区地理位置图。

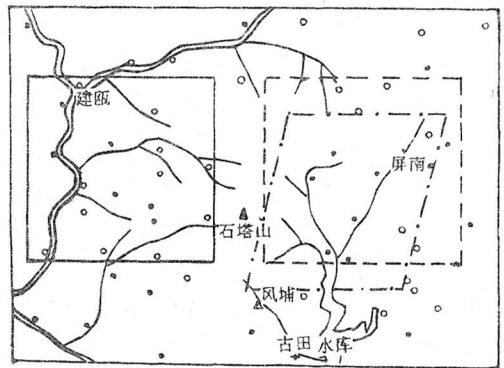


图1 试验区地理位置图

- ▲作业点石塔山(1975—1986年)
- △作业点风埔(1989—1996年)
- 自记雨量点 ○人工观测点 + 雷达
- 对比区 虚线框:影响区(1975—1986年)
- 点划线框:影响区(1989—1996年)

1) 邓家铨、方仕珍参加本研究。

古田人工降雨应用研究采用非随机化试验方案。作业单元与试验研究一样取3小时。

催化作业单元指标与试验研究一样:根据天气预报、雷达观测、探空资料及事先规定的指标来选定试验单元。当天气预报有降水系统过境时,即由设在建阳的数字化713雷达监视,若在试验单元之前半小时二区回波顶高在5500m(层状云)或6000m(积状云和积层混合云)以上,回波强度中强以上(15—20dBz区),回波移向介于东北偏东—东北偏北,就选为催化作业单元。播撒工具采用“三七”高炮,发射高度一般在4500—5000m,加上作业点风埔高度,可把催化剂(AgI)直接送到零度层附近。每次AgI用量120—320g,平均为220g。

## 2 效果分析方案

古田人工降雨应用研究效果评价采用区域回归分析法和双比分析法分析催化效果,此外还采用序列分析法和历史回归分析法通过分析人工催化对水库入库流量、库容量和水位的影响来评估作业效果和经济效益。

### 2.1 区域回归分析

由于应用研究作业单元指标与试验研究一样,所以以1975—1986年随机试验研究中122个对比单元作为应用研究的对比单元,以此建立影响区自然降水量( $y$ )与对比区自然降水量( $x$ )的回归方程,然后将作业单元对比区自然降水量代入回归方程,求出催化单元影响区自然降水量的估算值。回归分析时采用多个事件 $t$ 检验法和方差不相等的双样回归分析法检验效果的显著性。

### 2.2 双比分析

假设目标区和对比区3小时区域面积加权平均雨量的平均值成比例,作比值

$$R = \frac{\bar{y}_s/\bar{x}_s}{\bar{y}_m/\bar{x}_m}$$

式中, $\bar{y}_s$ 和 $\bar{x}_s$ 为催化时段目标区和对比区3

小时区域面积加权平均雨量的平均值, $\bar{y}_m$ 和 $\bar{x}_m$ 为非催化时段目标区和对比区3小时区域面积加权平均雨量的平均值。如果人工降水无效,则双比值 $R=1$ ;  $R>1$ ,表示正效果;  $R<1$ ,表示负效果。

双比分析时取区域雨量的本身,效果的显著性检验采用非参量性的秩和检验法。

### 2.3 水库水位、入库流量对比分析

水库水位和入库流量与降雨量关系极为密切,可以通过分析水库水位和水库入库流量的变化来评估作业效果和经济效益。分析时采用序列试验分析法和历史回归分析法。

## 3 效果统计分析

古田人工降雨应用研究(1989—1996年)共催化作业83次,表1是作业一览表。

表1 作业一览表

| 年    | 作业次数 | 炮弹数  |
|------|------|------|
| 1989 | 11   | 1000 |
| 1991 | 5    | 260  |
| 1993 | 17   | 1383 |
| 1994 | 16   | 995  |
| 1995 | 12   | 695  |
| 1996 | 22   | 1396 |
| 合计   | 83   | 5729 |

### 3.1 区域回归分析

由于采用参量性检验法— $t$ 检验法检验效果的显著度,则要求参加统计的变量服从正态分布。综合考虑统计变量正态“拟合度”和区域相关性,取3小时区域面积加权平均雨量的四次方根作为统计变量,经柯尔莫哥洛夫拟合度检验,其正态拟合度达0.88以上,区域相关系数达0.80以上。这表明雨量四次方根的回归分析是有效的,以下统计分析时取3小时区域面积加权平均雨量的四次方根值作为统计变量。回归分析时采用多个事件 $t$ 检验法和方差不相等的双样本回归分析法检验效果。

区域面积平均雨量回归分析结果列于表2。

将作业单元对比区域面积加权平均雨量的平均值代入上述回归方程,求出区域面积增雨效果。统计结果证明,83次催化在1400km<sup>2</sup>,目标区内平均相对增雨26.73%,平均绝对增雨1.52mm/3h( $\alpha < 0.01$ )。此外,还采用双样本回归分析法检验目标区单站雨量的催化效果,控制变量仍取对比区域面积加权平均雨量,其变量取目标区各单站平均雨量。统计结果作业点风埔平均相对增雨18.10%( $\alpha \approx 5\%$ ),屏南县站平均相对增雨23.31%( $\alpha = 5.0\%$ ),前汾溪平均相对增雨42.83%( $\alpha < 1.0\%$ ),长桥平均相对增雨75.64%( $\alpha < 0.1\%$ )。图2是单站增雨分布图。从图中可以看出,由于作业点从石塔山移到风埔,使单站增雨 $\geq 20\%$ ( $\alpha < 0.05$ )的区域相应移动,其位置与水库流域基本一致,这样使催化的增雨都流入水库,提高了应用效益。

表2 作业单元和对比单元区域面积平均雨量回归分析结果

|          | 对比单元                     | 作业单元                     |
|----------|--------------------------|--------------------------|
| 试验次数     | 122                      | 83                       |
| 相关系数 $r$ | 0.8103                   | 0.8315                   |
| $r$ 显著度  | $< 0.01$                 | $< 0.01$                 |
| 回归方程     | $y_2 = 0.3327 + 0.7562x$ | $y_1 = 0.3128 + 0.8155x$ |

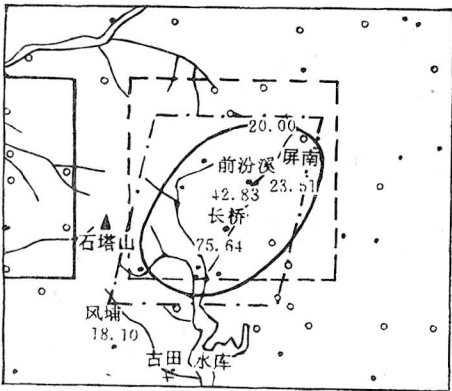


图2 单站增雨效果(%)分布图

### 3.2 区域平均雨量的双比分析

区域平均雨量双比分析结果列于表3。

表3 区域平均雨量作业效果双比分析

|                   | 非催化    | 催化     |
|-------------------|--------|--------|
| 样本容量              | 122    | 83     |
| $\bar{y}$         | 6.2499 | 8.2209 |
| $\bar{x}$         | 6.4830 | 6.8133 |
| $\bar{y}/\bar{x}$ | 0.9640 | 1.2066 |
| $R$               |        | 1.2517 |
| 秩序和               | 11490  | 9625   |
| $u$               |        | 2.5808 |
| 显著度(%)            |        | 0.49   |

$R = 1.2517$  即83次作业经双比分析在目标区平均增雨25.17%,显著度为0.49%。

### 3.3 水库水位、入库流量对比分析

3.3.1 序列试验分析 利用应用研究期(4—6月)的未作业年份入库流量值与作业年份入库流量平均值进行比较分析。

4—6月水库历史入库流量取1958—1974年及1976年和1979年资料进行平均,结果为  $\bar{M}_{历} = 63201.49 \times 10^4 \text{m}^3$ 。

4—6月作业年份(1989年、1991年、1993—1996年)入库流量平均值为  $\bar{M}_{作} = 71130.16 \times 10^4 \text{m}^3$ 。

作业后平均入库流量较历史入库流量增加为  $\Delta \bar{M} = (\bar{M}_{作} - \bar{M}_{历}) = 7928.67 \times 10^4 \text{m}^3$ 。相对增加量为  $\Delta \bar{M} / \bar{M}_{历} = 12.55\%$ 。利用t检验法检验作业年份入库流量增加值的显著性。计算结果表明人工催化作业后水库入库流量增值在 $\alpha = 0.20$ 水平上显著。

3.3.2 历史回归分析法 根据历史资料建立入库流量与降雨量之间的历史回归方程,然后用催化作业年份自然降雨量代入回归方程估算出催化作业年份自然降雨入库流量 $\bar{M}$ ,则催化作业年份入库流量增值 $\Delta M$ 等于催化作业年份实测入库流量减去 $\bar{M}$ 值。

取水库周围降雨量不受催化影响的雨量站古田县、宁德市、福州市、建瓯市、政和县、闽清县、南平市、建阳市、周宁县作为自变量采用逐步回归方法,建立水库月入库流量逐月降水量的多元回归方程(见表4)。以 $x_1, x_2, \dots, x_9$ 表示上述各站的月雨量。

表 4 水库入库流量逐步回归分析结果

| 月份 | 复相关系数  | 月入库水量多元回归方程                              | F      | $\alpha$ |
|----|--------|--|--------|----------|
| 4  | 0.9163 | $M_4 = -0.3803 + 0.2846x_1$              | 83.75  | <0.05    |
| 5  | 0.9799 | $M_5 = -35.7698 + 0.1561x_1 + 0.2722x_9$ | 180.99 | <0.05    |
| 6  | 0.7924 | $M_6 = 7.0616 + 0.3160x_7$               | 27.00  | <0.05    |

根据上表中各月入库流量多元回归方程计算作业年份 4—6 月各月入库流量平均值,结果列于表 5。

表 5 作业年份各月入库水量增值计算结果

| 月份 | 入库水量平均值( $10^4 m^3$ ) | 相对增值/% |
|----|-----------------------|--------|
| 4  | 717.80                | 5.71   |
| 5  | 4059.60               | 19.52  |
| 6  | 2871.02               | 10.35  |
| 合计 | 7648.42               | 11.86  |

表 5 结果表明,经多元回归分析,人工降雨作业使水库流量每年平均增  $7648.42 \times 10^4 m^3$ ,相对增值 11.86%,增雨效果的显著性水平  $\alpha \approx 0.10$ (单边 t 检验)。

#### 4 作业后水库水位和入库流量变化的个别分析

##### 4.1 1994 年人工降雨作业后水库水位入库流量变化

1994 年汛期结束早,从 5 月下旬至 6 月 8 日福建省处于西太平洋副热带高压控制下,天气炎热、干旱少雨,水库入库流量和库水位急剧下降。水库入库流量降到  $30 m^3 \cdot s^{-1}$  以下,水位降至 363.8m 左右(满库 383m),严重影响水库蓄水发电。从 6 月中旬起抓住两次锋面过程开展人工降雨作业,共作业 16 次。图 3 是作业前后水库入库流量和库水位变化图。

从图 3 可以看出 6 月上旬由于干旱少雨,水库入库流量极小(小于  $30 m^3 \cdot s^{-1}$ ),水位急剧下降(降至 363.8m)。9 日开始作业。至 11 日共作业 8 次,效果明显,水库流域 14 个雨量站日雨量超过 50mm 的有 11 个站,作业点风埔日雨量达 61.8mm。作业后第二天水库入库流量有明显增加,到 11 日已高达  $259 m^3 \cdot s^{-1}$ 。约为上旬平均入库流量的 10 倍,水库水位也上升了 0.9m。14—17 日天气

过程共作业 8 次,作业后流域各站日降水量达 20—55mm,14—18 日入库流量分别升至  $70.5 m^3 \cdot s^{-1}$ 、 $134 m^3 \cdot s^{-1}$ 、 $204 m^3 \cdot s^{-1}$ 、 $230 m^3 \cdot s^{-1}$  和  $331.0 m^3 \cdot s^{-1}$ ,至 18 日水库水位上升了 4.27m。

##### 4.2 1995 年人工降雨作业后水库水位和入库流量变化

1995 年共作业 12 次,作业期水库水位和入库流量变化绘于图 4。

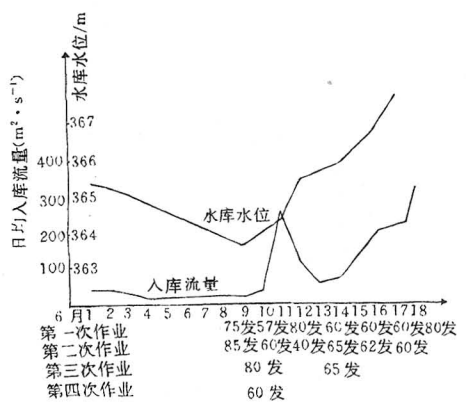


图 3 1994 年人工降雨作业后水库入库流量和库水位变化图

从图 4 中可以明显看出未作业日正常水库入库流量平均为  $40-60 m^3 \cdot s^{-1}$ ,作业后特别是第二天出现明显的增加。6 月 3 日和 4 日各作业 1 次,作业后的第二天入库流量迅速升到  $298 m^3 \cdot s^{-1}$ ,是 6 月 3 日的 4 倍。水位上升了 1.0m 左右。14—19 日作业 8 次,14 日入库流量仅有  $41.5 m^3 \cdot s^{-1}$ ,从 6 月 15 日开始入库流量出现直线上升,15 日为  $144.0 m^3 \cdot s^{-1}$ ,16 日为  $661 m^3 \cdot s^{-1}$ ,17 日达到最高为  $729 m^3 \cdot s^{-1}$ ,是未作业日入库流量的 10 多倍,水库水位也相应地提高了 4m 多。

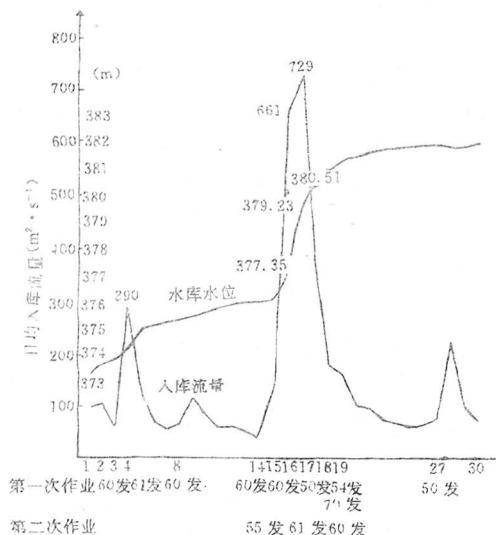


图4 1996年6月作业后入库流量和水位变化

## 5 结论

古田人工降雨应用研究使古田水库人工降雨试验研究成果成功地得到应用。在1989—1996年总共6个作业季节中作业83次,回归分析结果平均相对增雨26.73%,绝对增雨1.52mm/3h ( $\alpha < 0.01$ );双比分析平均相对增雨25.17% ( $\alpha \approx 0.49\%$ );入库流量序列试验分析结果每年入库流量增加7928.67 × 10<sup>4</sup>m<sup>3</sup>;相对增加12.55%。入库流量历史回归分析结果每年入库流量增加7648.42 × 10<sup>4</sup>m<sup>3</sup>,相对增加11.86%。作业期水库入库流量和水位变化,配合地面降水量分析均表明作业后水库流量和水位有明显增加,取得明显的增雨效果。

## 参考文献

- 1 曾光平,方仕珍,肖锋. 1975—1986年古田水库人工降雨效果总分析. 大气科学, 1991, 15, (4).

# An Application Study on the Artificial Rainfall over Gutian Reservoir Region

Zeng Guangping Zhu Dinghua Wang Zulu

(Fujian Meteorological Bureau, Fuzhou 350001)

## Abstract

On the basis of the fundamental experiment study of the artificial rainfall over Gutian reservoir, the application study has been made for six years in accordance with the requirement of the stored water and power generation. Statistical analysis shows that amount of precipitation after seeding increases 1.52mm/3h ( $\alpha < 0.05$ ), the benefit is very obviously.

**Key Word:** artificial rainfall impact test discharge into reservoir