

蓄水型人工增雨效果检验

冯宏芳¹ 隋平¹ 蔡英群² 余永江¹

(1 福建省气象科学研究所, 福州 350001; 2 福建省古田县气象局, 古田 352200)

摘要 利用 1960~2007 年古田水库的雨量资料和入库流量资料, 采用非随机化试验方案, 根据水库流域面雨量、入库流量和径流系数的变化开展蓄水型人工增雨效果检验。结果表明, 在水库流域开展科学的蓄水型人工增雨, 使 1350 km² 水库流域面雨量增加 18.87%, 绝对增加 22.4 mm, 总降水量增加 3024 万 m³, 径流系数提高 9.31%, 入库流量增加 29.95%, 绝对增加 5.17 m³/s, 总入库流量增加 1359.395 万 m³。改善了水库流域生态环境, 提高了地表土壤的湿润度, 使径流系数增大, 使得入库流量相对增值比水库流域面雨量相对增值大。蓄水型人工增雨的经济效益大于“抗旱型”人工增雨。

关键词 蓄水型人工增雨 效果检验 面雨量 入库流量 径流系数

引言

随着国民经济高速发展和人们生活水平的日益提高, 对水资源安全越来越高的要求与由于气候变暖等诸多因素造成的水资源短缺的矛盾日趋严重。针对水资源短缺问题, 各国政府在“节流”的同时, 想方设法挖掘“开源”的渠道。人工增雨是一条有效可行的渠道。经过半个多世纪的研究和实践, 当前科学界一致认为, 只有在适宜的地理背景和自然环境条件下, 开展有科学指导的人工催化作业才能取得预期的结果。这表明人工催化作业后要得到正效果首先必须满足严格的天气条件, 但在干旱季节这一条件往往难以满足。因此近年来各地极为重视在天气条件相对有利的季节在水库开展蓄水型人工增雨作业。如北京市近年来在密云水库开展人工增雨增加水库蓄水的研究和应用^[1]; 安徽省在大别山建立水库蓄水型人工增雨基地^[2]; 江西省长期以来在柘林水库开展人工增雨增加水库蓄水作业^[3]; 福建省在 12 年古田水库试验基础上, 根据水库需求在省内几个大型水库开展蓄水型人工增雨作业。由于蓄水型人工增雨作业选在作业催化条件较为有利的季节, 因而均取得了较理想的效果。

蓄水型人工增雨和“抗旱型”人工增雨的效果

评价方法有一定的区别, “抗旱型”人工增雨主要着眼于旱区面雨量的变化, 而蓄水型人工增雨除关注水库流域面雨量的变化外, 更需关注的是水库入库量(或水位)的变化。国内许多学者根据面雨量的变化评估效果, 秦长学等^[4]在区域回归数值模拟分析基础上, 根据飞机、火箭增雨作业状况求综合增雨率的方法, 得出 2004 年密云水库流域增雨作业可增加降水量 13% 左右的结论; 唐林等^[5]采用非随机区域控制回归方法和单门高炮人工增雨算法对湖南省夏季大型水库人工增雨效果进行检验与评估, 并对水电产生的直接经济效益进行评估。鉴于水库入库流量的变化除与降水量密切相关外, 还与其他因素有关, 本文利用古田水库人工增雨资料, 采用统计库区降水量变化和统计水库入库流量变化这两种方案探讨蓄水型人工增雨评价统计方法。

1 资料及处理

福建省古田水库建于 1951 年, 是福建省大型水库之一。水库位于福建省古田县和屏南县, 流域面积 1350 km², 库容量 4 亿 m³, 为年调节水库, 主要蓄水季节为前汛期(4~6 月), 其次为台风季节(7~9 月)。

1.1 资料

影响区的作业资料为2004年7月古田水库人工增雨作业资料,历史资料为古田水库1960~2007年库区的雨量资料和入库流量,这期间的1975~1986年4~6月由于开展古田水库人工增雨试验研究,因此影响区的历史资料不包括1975~1986年4~6月的资料。

由于古田县气象站位于古田水库流域侧面,1975~1986年古田水库人工增雨试验研究期间单站增雨效果分析表明,古田县气象站不受催化剂影响,所以把古田县气象站选定为对比区,对比区的资料为对应时期古田县气象站观测资料。

研究中统计时间单元取月,因此水库流域面雨量、入库流量及古田县降水量均取月面雨量、月入库流量和月降水量。

1.2 资料分类处理

为提高统计功效,本文采用分类分析方法。将参与分析的资料按对比区(古田县气象站)逐年月降水量分为降水偏少月、降水正常月和降水偏多月3类,划分标准采用福建省气候中心制定的月降水量异常的等级标准:

降水偏少月: $R_i < \bar{R}_i(1 - 0.25)$

降水正常月: $\bar{R}_i(1 - 0.25) \leq R_i \leq \bar{R}_i(1 + 0.25)$

降水偏多月: $R_i > \bar{R}_i(1 + 0.25)$

式中: R_i 为古田县气象站第 i 月降水量, \bar{R}_i 为相应第 i 月历史降水均值。

2 统计量选择及处理

2.1 统计量选择

影响区统计量取水库流域的月面雨量(H)和月入库流量(Q),对比区统计量取古田县气象站对应月份的月降水量(R)。

2.2 统计量处理

2.2.1 水库流域月面降水量计算方法

水库流域月面降雨量的计算方法通常有以下3种:①水库流域各雨量站点月降水量的算术平均方法,②水库流域各雨量站点月降水量的面积加权平均方法,③泰森面雨量计算方法。这3种方法中,当地形复杂,雨量站点分布不均匀且降水不均匀时第①种方法会产生较大误差。面积加权平均方法与其他两种方法相比能较客观较准确地计算面雨量,但这种方法要求绘制雨量等值线图并求积,工作量较

大,故在业务作业时常采用水利部门通用的泰森法求面雨量。本文采用泰森面雨量方法计算古田水库流域月面雨量。

2.2.2 降水入库延时对入库量影响的订正

由于水库流域内降水经地表流入水库要有一定时间,因此在研究确定的统计时间单元内入库流量大小时不仅要计算在统计时间单元内降水的流量,还要计算在该时间单元前降水流入该单元的流量以及该时间单元末降水流入下一时间单元的流量。

降水流入水库延时时间依赖于流域大小及地形,古田水库降水入库延时时间为3天左右。针对古田水库具体情况,通过建立试验单元入库流量与该单元内面雨量以及与单元前5天降水量之间相关关系和回归方程,计算试验单元前降水流入该单元的流量,用同样方法计算试验单元末降水流入下一时间单元的流量,以此对降水流入水库延时效应进行订正。

3 蓄水型人工增雨效果检验

采用统计库区降水量变化和统计水库入库流量变化两种方案探讨蓄水型人工增雨效果检验方法,资料利用古田水库人工增雨作业资料。

根据福建省人工增雨指挥系统干旱动态监测分析,古田水库流域2002年出现小旱,2003年春到2004年6月又连续干旱,2003年降水量1040 mm。比常年偏少3成,为1971年以来的最少年份;2004年上半年继续偏少3成,使旱情进一步加剧。由于持续高温少雨,古田水库库容明显减少,截止2004年5月21日,一级库水位364.49 m,库容为 $1.24 \times 10^8 \text{ m}^3$,仅占汛限库容的23%,水库运行遭遇困难,有3/4的时间处于降低运行,严重影响发电能力。2004年6月初至16日,一级电站仅发电 $490 \times 10^4 \text{ kW}\cdot\text{h}$,与多年平均相比,下降 $620 \times 10^4 \text{ kW}\cdot\text{h}$,给工农业生产和人民生活带来严重影响。按福建省防汛抗旱指挥部部署,福建省气象局于2004年7月在古田水库开展蓄水型人工增雨作业。

根据汛期作业云移动方向,在水库流域设置了6个移动作业点,其中4个作业点位于流域西面,作业对象为西风带系统的云系;2个作业点位于流域东面,作业对象为东风带系统。2004年7月,应用新一代天气雷达市级人工增雨指挥系统,抓住主要天气过程在古田水库流域组织开展人工增雨作业5

次。2004年7月古田县降水量为75.3 mm,作业时段降水量为64.1 mm,其余时段日降水量均未超过2 mm。1960~2007年7月平均降水量为124.1 mm,2004年7月降水比历史平均值少39.3%,属降水偏少年份。1950~2007年7月降水偏少年份有19年(含2004年7月)。以下采用分类中降水偏少年份来分析2004年7月人工增雨效果。

3.1 水库流域面雨量增值统计分析

根据作业目的,人工增雨作业项目可分为3种类型:纯业务型、纯研究型和业务与研究相结合型。第1种类型一般采用非随机化试验方案,后2种类型一般采用随机化试验方案。蓄水型人工增雨作业属纯业务型,拟采用非随机化试验方案研究效果检

验方法。因此本文采用常规的3种非随机化试验方案:序列分析、双比分析和回归分析^[6]。

3.1.1 序列分析

2004年7月水库流域面雨量 $H=141.1$ mm,7月降水偏少年份水库面雨量历史均值 $\bar{H}=92.7$ mm。月面雨量绝对增值= $H-\bar{H}=48.4$ mm,月面雨量相对增值= $(H-\bar{H})/\bar{H}=52.21\%$ 。

增雨效果采用 u 检验法检验: $u=(H-\bar{H})/S_H=48.4/44.29=1.0928$, $u < u_{0.40}$, $\alpha > 0.4$,增雨效果不显著。

3.1.2 双比分析

表1列出水库流域月面雨量相关数据及双比分析结果。

表1 古田水库人工增雨面雨量增值双比分析结果

历史资料(均值)		2004年7月资料		$A=\frac{H}{R}$	$B=\frac{\bar{H}}{R}$	$\frac{A}{B}$
古田站降水 \bar{R}	流域面雨量 \bar{H}	古田站降水 R	流域面雨量 H			
58.0	92.7	75.3	141.1	1.8738	1.5983	1.1724

月面雨量双比值=1.1724,表明2004年7月人工增雨使水库流域面雨量增加17.24%。效果显著性采用比值的秩和检验法检验,作业单元比值秩和 $T=15$, $u=0.913$, $u < u_{0.20}$, $\alpha > 0.2$,增雨效果不显著。

3.1.3 增雨效果回归分析

7月降水为偏少月份的古田水库流域面雨量(H)与古田县降水量(R)回归方程为:

$$\hat{H} = 6.611 + 1.489R$$

2004年7月古田县降水量 $R=75.3$ mm,古田水库流域面降水量实测值 $H=141.1$ mm。将 R 代入上式得古田水库流域2004年7月自然降水面雨量估计值 $\hat{H}=118.7$ mm。

则面雨量绝对增雨值 $\Delta H = H - \hat{H} = 22.4$ mm,相对增雨值 $E_H = \frac{\Delta H}{\hat{H}_{04}} = 18.87\%$ 。

人工增雨作业在水库流域降水量总增雨值为3024万 m^3 ,采用单个事件 t 检验法检验增雨效果显著性, $\alpha < 0.05$,增雨效果显著。

3.2 水库入库流量增值统计分析

3.2.1 水库入库流量订正

入库流量需将降水入库延时效应进行订正后作为统计量。经订正后的入库流量记作 $Q_{订}$ 。利用1950~2007年7月降水偏少年份的18年(2004年

7月除外)数据建立入库流量与雨量的订正方程:

$$Q_{订} = Q - 0.566X_1 - 0.176X_2 + 0.026X_3 + 0.324X_4 \quad (1)$$

式中: Q 为实测入库流量, X_1 为6月30~29日雨量和, X_2 为6月28~26日雨量和, X_3 为7月31~30日雨量和, X_4 为7月29~27日雨量和。

2004年7月实测入库流量为22.1 m^3/s ,将2004年6月26~30日和7月27~31日雨量($X_1=2$ mm, $X_2=0$, $X_3=20$ mm, $X_4=0$)代入式(1),得到订正后的2004年7月入库流量为22.0368 m^3/s 。

3.2.2 径流系数变化量分析

在不考虑人为用水情况下,入库流量除受水库流域降水量影响外,还受地表渗透、林木吸收和蒸发等自然因素影响,这些自然因素对于给定水库主要取决于气候干旱程度。由于这些因素影响入库流量,使总入库流量小于流域总降水量。

水利部门通常使用径流系数(Z)来描述总降水量(P)与总入库量(Q)的关系,即

$$Z = \frac{Q}{P} \quad (2)$$

人工增雨活动对入库流量的影响可以表现在以下两个方面,即对面雨量的影响和由于面雨量的影响改变了影响区(即水库流域)的干旱程度,进而影响径流系数。可见在分析人工增雨作业对入库流量

的影响时应综合分析人工增雨对面雨量和径流系数的影响。

利用1950~2007年7月降水偏少年份的18年(2004年7月除外)数据建立自然径流系数(Z)与水库流域降水量的回归方程:

$$Z = -0.0046y_1 + 0.0019y_2 + 0.0003y_3 + 0.6787 \quad (3)$$

式中: y_1 为当月水库流域月面雨量, y_2 为上一个月1~25日降水, y_3 为上一个月26~30日降水。复相关系数 $r=0.7710$,显著性水平 $\alpha < 0.05$ 。

将2004年相应数据代入式(3),得2004年7月自然径流系数估计值 $\hat{Z}=0.2835$,2004年7月人工增雨作业后,实测总降水量 $H=0.1411(\text{m}) \times 1350(\text{km}^2) \times 1000 \times 1000$,总入库量 $Q=Q_{\text{订}} \times 3600(\text{s}) \times 24(\text{h}) \times 31(\text{天})$,径流系数 $Z_{\text{实}}=Q/H=0.3099$,即人工增雨作业使水库径流系数发生变化,径流系数绝对增值 $\Delta Z=Z_{\text{实}}-\hat{Z}=0.0264$,径流系数相对增值 $E_Z=\Delta Z/\hat{Z}=9.3\%$ 。

3.2.3 水库入库流量增值的统计分析

人工增雨后,实际入库流量 $Q_{\text{实}}=22.0368 \text{ m}^3/\text{s}$,根据2004年7月的自然径流系数估计值,可计算出自然降水入库流量 $Q_{\text{自}}=\hat{Z}H=16.9614 \text{ m}^3/\text{s}$,因此,2004年7月在水库流域开展人工增雨作业后,水库入库流量增值为:

$$\text{入库流量绝对增值: } \Delta Q = Q_{\text{实}} - Q_{\text{自}} = 5.0754 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$\text{入库流量相对增值: } E_Q = \frac{\Delta Q}{Q_{\text{自}}} = 29.92\%$$

即人工增雨使水库入库流量增加,入库流量每秒增加 5.0754 m^3 (月入库流量增加 1359.395 万 m^3),相对增加 29.92% ,入库流量相对增值比水库流域面雨量相对增值(18.87%)大。

4 小结

(1)蓄水型人工增雨是减轻旱情的一个重要手

段,越来越引起政府和公众的关注,不仅可选择降水条件较好的季节在水库开展蓄水型人工增雨,而且还可以在干旱季节在库区开展人工增雨作业。只要抓住有利的天气条件采用科学方法完全可以取得增加水库流域降水和入库流量的效果。

(2)1975~1986年4~6月古田水库人工增雨结果表明,在有利降水季节(4~6月是福建省雨季,自然条件很好)开展蓄水型人工增雨可取得显著的增雨效果^[4]。2004年在降水条件不好的干旱季节在古田水库开展蓄水型人工增雨使 1350 km^2 水库流域面雨量增加 18.87% ,绝对增加 22.4 mm ,总降水量增加 3024 万 m^3 ,径流系数提高 9.31% ,入库流量增加 29.95% ,绝对增加 $5.17 \text{ m}^3/\text{s}$,总入库流量增加 1359.395 万 m^3 。同样取得明显的经济效益。

(3)在库区开展人工增雨,由于降水增加,改善了水库流域生态环境,提高了地表土壤的湿润度,使径流系数增大,使得入库流量相对增值比水库流域面雨量相对增值大。

参考文献

- [1] 赵习方,张蔷,赵淑艳,等.人工增雨对密云水库 Ag^+ 等化学组分影响研究[J].气象科技,2008,36(4):468-473.
- [2] 张中平,刘高平,刘洪民,等.水库蓄水人工增雨业务系统[J].气象科技,2007,37(5):687-691.
- [3] 李玉林,曾光平,杨梅,等.飞机人工增雨区域控制模拟试验效果评价[J].气象,2000,26(4):37-40.
- [4] 秦长学,张蔷,李书严,等.密云水库蓄水型增水作业效果分析[J].气象科技,2005,33(增刊):74-77.
- [5] 唐林,蔡荣辉,王治平,等.湖南省夏季大型水库人工增雨效果效益评估方法[J].长江流域资源与环境,2008,17(Z1):20-24.
- [6] 曾光平,吴章云.人工降水[M].福州:福建科学技术出版社,1997:111-118.

Effectiveness Evaluation of Precipitation Enhancement for Water Storage

Feng Hongfang¹ Sui Ping¹ Cai Yingqun² Yu Yongjiang¹

(1 Fujian Provincial Institute of Meteorology, Fuzhou 350001; 2 Gutian Meteorological Bureau, Fujian Province, Gutian 352200)

Abstract: By using of a non-randomized experiment scheme and the data of rainfall and inflow of Gutian Reservoir between 1960 and 2007, the effectiveness evaluation method of precipitation enhancement effectiveness for water storage was studied based on the drainage area rainfall, inflow and runoff coefficients of the reservoir. After the reasonable precipitation enhancement operation over the Gutian Reservoir drainage area of 1350 km², the precipitation of drainage area increased by 18.87%, with absolute value increased 22.4 mm, total rainfall 30.24 million m³, runoff coefficient of the reservoir 9.31%, inflow 29.95%, absolute increment 5.17 m³/s, the total inflow 13.59395 million m³. The precipitation enhancement operation improved the eco-environment, heightened soil moisture, and enhanced the runoff coefficient. The relative increment of inflow is larger than that of area rainfall. The economic benefit of water-storage precipitation enhancement operation is larger than that of drought-resistant precipitation enhancement operation.

Key words: water storage, precipitation enhancement, effectiveness evaluation, area rainfall, inflow, runoff coefficient

欢迎订阅《气象科技》、《气象科技合作动态》、 《中国气象科学研究院年报》

《气象科技》由中国气象科学研究院、北京市气象局、中国气象局气象探测中心、国家卫星气象中心及国家气象信息中心联合主办。报道大气科学和相关科学各领域新理论、新方法和新技术,也刊载反映大气科学各领域发展水平的综合评述。主要栏目:动力气象与天气预报,气候分析与预测,探测与遥感,信息技术及应用,城市与环境气象,农业与生态气象,人工影响天气,雷电防护,应用与服务,台站实用技术等。欢迎气象部门和相关学科的业务、科研、技术开发人员以及相关院校师生投稿和订阅。《气象科技》为大16开本双月刊,全年定价:120元。

《气象科技合作动态》介绍各国气象局的综合概况及我国与其他国家在气象科技领域的合作、交流情况,双月刊,全年定价:30元。

《中国气象科学研究院年报》(中英文对照),反映该院研究和技术领域内的新成果和新进展以及该年度内的重大学术活动,每年1期,定价:30元。

全年随时订阅。

联系地址:北京市海淀区中关村南大街46号中国气象科学研究院,《气象科技》编辑部

http: //qk.cams.cma.gov.cn, **邮政编码:** 100081, **电话:** (010)68407256, **Email:** qxkj@cams.cma.gov.cn

户名: 中国气象科学研究院, **账号:** 11001028600056086013, **开户行:** 建行北京白石桥支行