文章编号：1004-4965(2007)02-0205-04

库区蓄水型人工增雨效果评估及其应用

张中平[1, 2]，钱霞荣[2]，叶祥玉[2]，马建国[2]，
李强[2]，季松群[3]，余常新[3]

(1. 南京大学大气科学系，江苏 南京 210093；2. 安徽省六安市气象局，安徽 六安 237008;
3. 安徽省响洪甸水电站，安徽 六安 237335)

摘　　要: 通过对降水影响系统分型，给出了以同一影响天气系统下的降水时段为评估单元，对降水前后目标区和控制区的流域面雨量、入库流量和作业前后雷达回波参量进行评估，并对 2005 年夏季增雨作业个例进行了计算，结果表明，雷达回波参量在作业前后有明显的变化，平均增雨率为 19.61%，投入产出比为 1: 37，经济效益显著。

关　键　词：人工增雨；蓄水型；效果评估

中图分类号：P426.67　　文献标识码：A

1　引　　言

近年来我国空中水资源开发利用工作，在“应急型”抗旱增雨的同时，越来越关注水库“蓄水型”增雨的研究和应用。广东、北京、江西、浙江、吉林、福建等省都把蓄水型人工增雨作为缓解水资源紧张的重要手段。依托“安徽省空中云水资源开发利用工程”，安徽省近年来在皖西大别山区水库群开始“蓄水型”人工增雨基地建设。

在水库“蓄水型”增雨评估方面，各地采取的主要是回归分析、双比分析和对比分析方法，评估对象一般为增雨率、增蓄量和雷达回波的物理特征，而评估结果差异较大[1-6]。曾光平、郑国恩、李玉林、李冰、王立国、朱胜瑞等分别对古田水库、龙羊峡水库、柘林水库、鸭河口水库、山门水库、洪门水库的作业评估增雨率在 8%～40%，投入产出比 1：24～1：59。本文根据“蓄水型”人工增雨特点和基地内水库群的控制流域特征，采用同一影响天气系统下的降水时段作为评估单元，对基地增雨作业效果进行评估。

2　研究区域

大别山水库“蓄水型”人工增雨基地位于东经 115 °20′～116 °55′，北纬 30 °58′～31 °44′，基地共有大中小型水库 1 300 多座，流域面积 7 473 km^2，其中梅山、响洪甸、佛子岭、磨子潭、龙河口五大水库创造了新中国水利史上的多个第一，其总库容 66 亿 m^2，占整个安徽省水库总容量的 1/3。基地被划分为试验区和应用区(图 1，见 P207)，目标区和控制区在地形地貌、气候背景、水文特征和兴利功能等方面都较为相似或接近。两区距离合肥多普勒雷达站 100～200 km，可被有效监测。

3　效果评估

基地外场作业采用固定目标区和对比区非随机试验方案。由于“蓄水型”人工增雨的效果主要关注的是最终增水量的大小，对于目标区和控制区来说，即使在同一系统下，在小时或日的时间尺度上，降水时间难以一一对应，因此本文采取以同一影响天气系统下的降水时段作为评估单元进行评估。本文利用 1979～1998 年 2 446 个降雨日根据高空形势、移动路径、降水分布等将研究区域划分为 5 类天气型，其中春季以低槽切变为主，夏季以副高及其边缘、低槽切变和台风倒槽为主，秋季以副高及其边缘、低槽切变为主，冬季以低槽切变为主。

3.1　流域同一影响天气系统下降水时段的流域面雨量分析

评估目标区和控制区在气候背景上有较好的相似性，两区自然降水面雨量存在线形关系[7-8]

$$R_1=a+b*R_2 \tag{1}$$

收稿日期: 2006-03-06; 修订日期：2006-04-18

基金项目：中国气象局“基于新一代天气雷达的省级人影业务系统”课题；“安徽省空中云水资源开发利用试验研究”项目共同资助

作者简介: 张中平(1967-)，男，安徽霍山人，高级工程师，从事气候资源开发与利用，电话：0564-3212828。E-mail: zhzhpp@21cn.com

其中 R_1 为响洪甸水库流域的逐日自然降水量，R_2 为梅山水库流域的逐日自然降水量。a、b 为回归系数。

若响洪甸水库流域实测雨量为 R_0，则增雨量

$$\Delta R=R_0-R_1 \tag{2}$$

表 1 选取 1989～1998 年研究区域及其周边未开展人工增雨作业期间的资料，计算了不同季节 a、b 值的大小，得到 4 个回归方程。

表 1 不同季节目标区和对比区雨量历史回归结果(1989～1998 年, α=0.05)

季节	降水类型	a	b	相关系数	t	样本数
春季(3～5 月)	层状云为主	7.617 8	0.652 8	0.774 8	14.6	144
夏季(6～8 月)	对流云为主	12.979 3	0.676 0	0.820 5	17.0	142
秋季(9～11 月)	积层混合云为主	5.635 4	0.823 1	0.837 8	15.0	98
冬季(12～2 月)	层状云为主	0.052 8	0.983 6	0.962 7	33.6	92

3.2 来水量分析

计算径流总量以扣损法和 $P+Pa$～R 合轴相关法，通过响洪甸水库 $P+Pa$～R 经验关系图，由式(1)和(2)计算的 ΔR，求定流域径流深 $\Delta R'$。则入库来水量即增水量

$$\Delta W=\Delta R'\times S \tag{3}$$

其中 P 为流域平均次雨量，Pa 为流域前期影响雨量，R 为流域径流深，S 为流域控制面积。

3.3 雷达回波参量分析

通过比较目标区内同一块雷达回波参量作业前后的变化，对增雨效应进行分析。

4 个例分析

个例选取 2005 年 6～7 月期间 4 个影响天气系统下的人工增雨作业资料。作业地点为响洪甸水库上游的青山镇，设备为火箭 WR-1B，每次发射火箭弹 2～3 枚。根据式(1)、(2)、(3)计算，结果见表 2。4 次作业平均增雨率 19.61%、投入产出比为 1∶37。

表 2 作业增雨和增水结果计算表(2005.6～2005.7)

作业日期/月-日	影响系统	过程开始日期/月-日	过程结束日期/月-日	R_2/mm	R_1/mm	R_0/mm	ΔR/mm	ΔW/亿方
6-9	低槽切变	6-9	6-11	67.80	58.81	66.80	7.99	0.114 3
6-26	低槽切变	6-26	6-27	74.20	63.12	95.40	32.28	0.461 9
7-6	副高边缘	7-5	7-7	3.00	15.00	1.46	–	–
7-20	台风倒槽	7-19	7-23	107.10	85.38	88.70	3.32	0.047 5
合计	–	–	–	252.10	222.31	361.86	43.59	0.623 7

回波参量个例选取 2005 年 6 月 26 日增雨过程合肥多普勒雷达回波资料进行对比分析。作业时间为 26 日 05∶52，天气系统为低槽切变，云状为积雨云，云量 10，风向西北，风速 6 m/s。

分别对作业云块计算了作业前后组合反射率>40 dBz、垂直积分液态含水总量>10 kg/m^2 和 1 h 预报降雨量>2.54 mm 的面积，以及平均回波顶高度，这些指标反映着较强降水的可能，并点绘在图 2 中。

从图 2 可以看出：(1) 4 个回波参量高值区面积的大小随时间变化基本一致；(2) 组合反射率和液态含水量高值区面积在作业后 10～50 min 内明显上升，并在 50～60 min 后出现一个峰值。作业前后的面积分别扩大 400 和 350 km^2。(3) 组合反射率和液态含水量高值区面积和实测降水量在出现时间和量值大小上提前 5～10 min，趋势一致。(4) 回波顶高度在作业后 30 min 逐渐上升, 50 min 后由 7 km 上升到峰值 11 km。(5) 1 h 预报降水量峰值出现时间滞后实测降水量峰值约 10 min，作业前后面积增大 4 倍。综前所述，本次作业在雷达回波上有明显的反映。

根据吴兑、王以琳等[9-10]对低纬热带地区暖云降水和温带降水的研究，虽然所研究的不同区域在降雨的微物理机制方面有所不同，但本评估方法忽略了微物理过程的限制，可以为低纬度热带地区水库“蓄水型”人工增雨评估时提供可借鉴的参考。

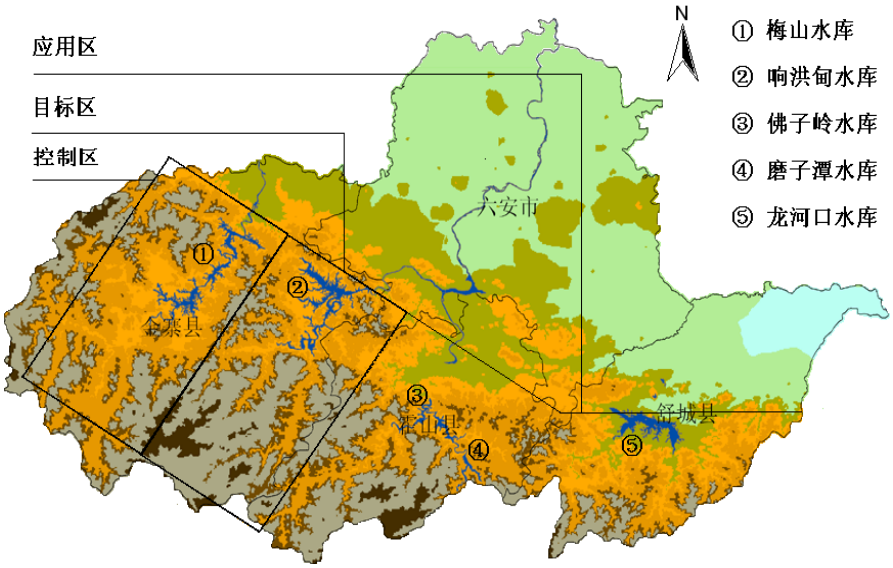

图 1　大别山水库“蓄水型”人工增雨应用研究区域

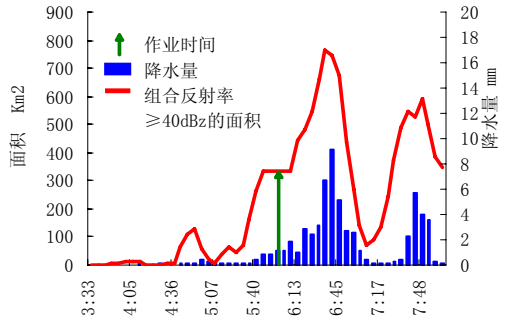

图 2a　组合反射率作业前后强度>40dBz 面积的变化

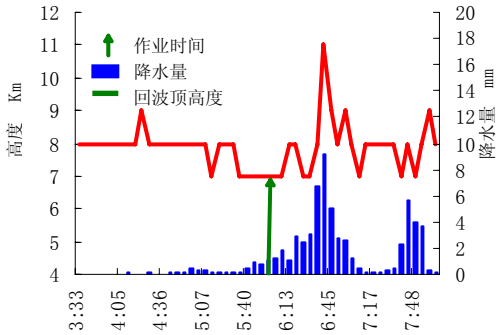

图 2b　回波顶高度作业前后的变化

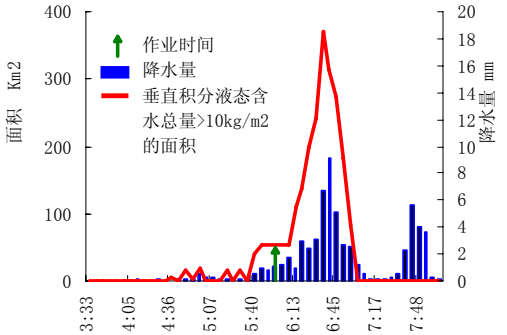

图 2c　液态含水量作业前后强度>10 kg/m^2 面积的变化

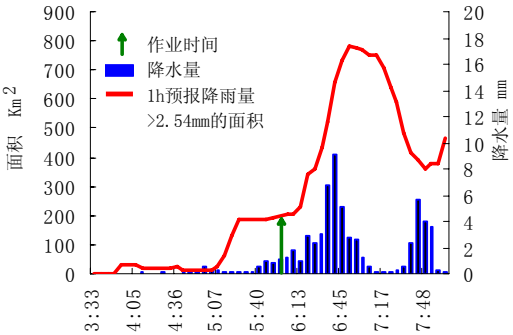

图 2d　1 h 预报降水量作业前后>2.54 mm 面积的变化

5　结　　论

(1) 采取以同一影响天气系统降水时段作为评估单元进行库区“蓄水型”增雨作业效果评估，能够较客观地反映增雨率和增水量的大小，其结果可作为考核水库人工增雨效益的参考依据。

(2) 基地外场试验平均增雨率为 19.61%，投入产出比为 1:37，经济效益显著。

(3) 雷达回波参量对增雨作业有较好的响应。作业后 10～50 min 后组合反射率高值区逐渐增大，50～60 min 后达到一个峰值，回波顶高度、垂直积分液态含水量等具有同

反射率同步变化趋势。其分析方法可用于“蓄水型”增雨作业效果评估。

致 谢：印邦辉、刘高平、仇多春等同志参加了本文的统计工作。本文得到安徽省气象局客座研究员曾光平先生的悉心指导和安徽省人影办副总工蒋年冲先生的帮助，特此致谢。

参 考 文 献：

[1] 曾光平，方仕珍. 福建省古田水库人工降雨试验效果的多元回归分析[J]. 热带气象，1986, 2(1): 48-54.

[2] 郑国恩，包为民，瞿思敏. 龙羊峡水库人工增雨增水效果评估[J]. 河海大学学报，2002(3)：58-62.

[3] 李玉林，曾光平，杨梅. 飞机人工增雨区域控制模拟试验效果评价[J]. 气象，2001, 26(1): 37-40.

[4] 李冰，冶林茂，李海彬，等. 鸭河口水库流域高炮人工增雨试验效果评价[J]. 河南气象，2001(1)：38-40.

[5] 王立国，李忠惠. 水库区地面高炮增雨作业效果评估[J]. 吉林气象，1995：23-24.

[6] 朱胜瑞，游加清. 洪门水库区域人工增雨试验与探索[J]. 江西气象科技，2005(1)：46-48.

[7] 周益辉，唐林，熊华南. 湖南省人工增雨效果检验及效益评估系统方法之一——用五日滑动平均日平均降水选取对比区方法[J]. 热带气象学报，2001, 17(3): 135-144.

[8] 叶家东，李铁林. 区域趋势控制协变量回归分析效果评估方法研究[J]. 气象科学，2001(1)：64-72.

[9] 吴兑，何应昌，陈桂樵，等. 广东省新生丰江流域 4-5 月暖云的微物理特征[J]. 热带气象，1988，4(4)：341-349.

[10] 王以琳，刘诗军，刘文，等. 机载温、湿度计在飞机人工增雨中的应用[J]. 热带气象学报，2005，21(2)：217-224.

ASSESSMENT OF EFFECT OF ARTIFICIAL RAINFALL ENHANCEMENT FOR WATER STORAGING RESERVOIRS AND ITS APPLICATION

ZHANG Zhong-ping [1, 2]，QIAN Xia-rong[2]，YE Xiang-yu[2]，MA Jian-guo[2]，
LI Qiang[2]，JI Song-qun[3]，YU Chang-xin[3]

(1. Department of Atmospheric Sciences, Nanjing University, Nanjing 210093, China;
2. Luan Meteorologic Office in Anhui Province, Lu’an 237008, China;
3. Anhui Xianghongdian Hydroelectric Power Station, Lu’an 237335, China)

Abstract：With weather systems categorized by the effect on precipitation, periods of precipitation under the same governing system are set as units of assessment, which are used to assess rainfall over the area of river valleys for target and control regions and water inflow for reservoirs before and after the rain and parameters of radar echo before and after the enhancement operation. Cases of rainfall enhancement operations in the summer of 2005 are calculated. The results show significant changes in the echo parameters around the point of operation, with mean rate of rain enhancement at 19.61% and a ratio of 1: 37 between input and output, achieving remarkable economic effect.

Key words: artificial rain enhancement；increasing water for reservoirs；assessment of benefits