

樊志超,周盛,高继林,等. 湖南省柘溪水库人工增雨试验优化技术研究[J]. 气象,2012,38(8):997-1003.

# 湖南省柘溪水库人工增雨试验优化技术研究<sup>\*1</sup>

樊志超<sup>1</sup> 周 盛<sup>2</sup> 高继林<sup>1</sup> 彭 月<sup>3</sup>

1 湖南省人工影响天气领导小组办公室,长沙 410007

2 湖南省气象台,长沙 410007

3 长沙市气象局,长沙 410205

**提 要:** 在总结柘溪水库多年人工增雨发电试验经验的基础上,通过分析资水流域的气候特征、防汛形势、发电需求和安全生产要求,确定了柘溪水库人工增雨作业的适宜时段。通过分析近 5 年资水流域 37 次典型降雨日的天气形势和降雨特征,将影响流域降水的主要天气系统归类分型为西风带降雨系统、东风带降雨系统和地形云,并进一步确定了柘溪水库人工增雨作业的优化布局和作业方式。在分析库区特大致洪暴雨典型个例的基础上,找出了柘溪水库人工增雨作业需要规避的强降雨自然灾害高风险区域。

**关键词:** 大型水库,人工增雨,优化

## Study on the Optimum Operation of Artificial Precipitation in Zhexi Reservoir of Hunan Province

FAN Zhichao<sup>1</sup> ZHOU Sheng<sup>2</sup> GAO Jilin<sup>1</sup> PENG Yue<sup>3</sup>

1 Hunan Provincial Weather Modification Office, Changsha 410007

2 Hunan Provincial Meteorological Observatory, Changsha 410007

3 Changsha Meteorological Bureau, Changsha 410205

**Abstract:** On the basis of the successful experience of artificial precipitation experiment summarized at Zhexi Reservoir during many years, the climatic characteristics, the situation of flood control, the electrical power requirement and the safe production requests over the Zishui Basin are analyzed, and the suitable time period of artificial precipitation operation at Zhexi Reservoir are defined. According to the analysis of 37 synoptic cases and precipitation characteristics of the typical precipitation day in the recent five years, the main cause for precipitation is attributed to the westerly system, easterly system and orographical clouds. Moreover, the optimized layout and operation mode of artificial precipitation operation at Zhexi Reservoir are proposed. After discussing a typical example of torrential rain leading to flood in the reservoir area, we found that the artificial precipitation operation at Zhexi Reservoir needs avoiding the high-risk areas of the heavy rainfall-caused natural disasters. The effect and benefit of artificial precipitation operations at Zhexi Reservoir are significantly increased through practical application, and this method is available for reference to artificial precipitation experiments at other large reservoirs.

**Key words:** large reservoir, artificial precipitation enhancement, optimization

\* 湖南省气象局“2012 长沙地区秋季飞机人工增雨技术研究”课题资助

2011 年 3 月 22 日收稿; 2012 年 5 月 28 日收修定稿

第一作者: 樊志超,主要从事人工影响天气技术与开发. Email: zjjqx001@yahoo.com.cn

## 引言

利用水库地区的云水资源和日渐成熟的人工影响天气技术对水库流域实施人工增雨,是缓解水资源紧张、增加发电效益的重要手段,福建、北京、湖南等省市都开展了水库人工增雨试验与研究<sup>[1-6]</sup>。福建省古田水库人工增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 1500 km<sup>2</sup> 影响区内平均相对增雨 23.81%,绝对增雨 1.21 mm·(3 h)<sup>-1</sup> ( $\alpha=0.14\%$ )<sup>[7]</sup>。湖南是我国水库数量最多的省份,共有各类水库 1.3 万多座,约占全国水库总数的 1/7,水库蓄水总量 365.7×10<sup>8</sup> m<sup>3</sup>。其中大型水库 21 座,总库容 249.5×10<sup>8</sup> m<sup>3</sup>,发电装机容量 358.2×10<sup>4</sup> kW。由电力部门管理的东江、柘溪、凤滩和五强溪是湖南最大的 4 个水库,总库容 190.1×10<sup>8</sup> m<sup>3</sup>,发电装机容量 324.3×10<sup>4</sup> kW,分别占 76.2%、90.5%。因为蓄水发电的需求,省人工影响办公室与省电力公司联合于 1994—2008 年在 4 大水库流域进行了 10 次人工增雨蓄水发电外场工程性试验。其中柘溪水库开展了 5 次,经多部门联合进行效果评估,投入与产出比均在 1:10 以下,最高的 2008 年为 1:8.01,最低的 2003 年为 1:2.37<sup>[8]</sup>。为进一步提高效益,依托柘溪水库开展大型水库人工增雨优化技术研究,希望找出柘溪水库人工增雨作业的最佳方案,从而更多开发库区空中云水资源,并推广到其他水库应用。

## 1 资料来源和方法

雨量资料使用资水流域上中游、柘溪水电站坝址以上区域,包括湖南省新宁县、武冈市、洞口县、隆回县、邵阳市、邵阳县、新邵县、新化县、冷水江市和安化县 10 县(市)的地面气象观测资料,其中多年平均值是指 1971—2000 年的 30 年资料整编值,近 5 年是指 2004—2008 年。典型降水过程的天气形势分析使用 GrADS 读取 NCEP 再分析高度场网格资料。水文水电资料由柘溪水电站提供。

## 2 资水流域的地形与降水分布特征

### 2.1 基本情况与地形特征

资水流域面积 28142 km<sup>2</sup>,干流 653 km,柘溪水电站位于资水中游安化县东坪以上 12.5 km 处,控制流域面积的 80%,总库容 35.7×10<sup>8</sup> m<sup>3</sup>,原装机容量 50×10<sup>4</sup> kW,2008 年扩建后达 100×10<sup>4</sup> kW,年发电量 27.31×10<sup>4</sup> kW·h<sup>-1</sup>,是湖南第一座大型水电站、集防洪抗灾发电于一体的重要大型水利水电工程<sup>[9]</sup>。资水流域形状南北长、东西窄,地势西南高、东北低,干流自西南流向东北略成“S”形。电站装机容量后耗水量增大和库区狭长地带的特殊地形造成有效积雨面积和积雨时间较小,这对人工增雨作业和优化技术提出了更大更高的要求。资水分水岭的山峰平均高度 1600 m,向南延伸到广西的资源县境内,东部边缘与湘水的分水岭最低垭口约 300 m 的高程。流域内东南西部沿山脉一带多属丘陵区,邵阳盆地位居其中,流域地形如图 1 所示。流域西南方向的山地也为布设碘化银地面燃烧炉开展人工增雨作业提供了可能。

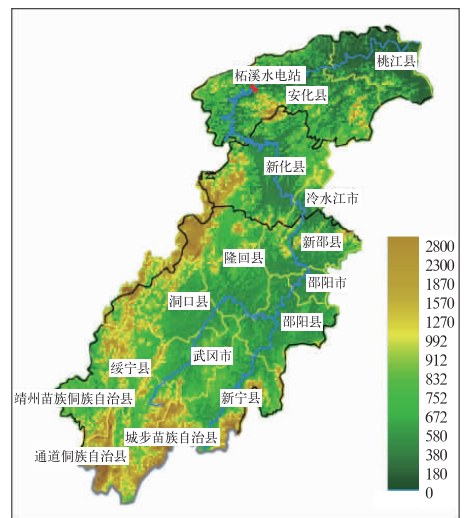


图 1 资水流域地形图(单位: m)

Fig. 1 The topographic map (unit: m) of Zishui Basin

### 2.2 降雨时空分布与防汛调度

资水流域年平均降雨量分布如图 2 所示

(1971—2000年),从图中可以看出,柘溪水库大坝所在地安化县由于南北高山阻挡气流形成夹管效应,年平均降雨在1600 mm以上,是湖南省的3个暴雨中心和最为严重的山洪地质灾害高发区之一;年平均降雨量第二高值区分两块,其中南部绥宁、洞口一带相对周边降雨量偏多,与该地区西南方向地形相对低洼平坦,有利西南暖湿气流输送有关。

湖南4—9月为汛期,5—7月中旬为主汛期,后期一般年份是少雨期,最大月雨量一般出现在5—7月。据统计,资水流域的暴雨多出现在5—7月,6月是一年中暴雨日最多的月份;流域雨季结束的平均日期是7月5日,雨季结束最早的年份是6月10日(1985年),结束最迟的年份是8月3日(1986年),多集中于6月下旬至7月中旬,占74.2%<sup>[10]</sup>。

资水暴雨洪水呈现出明显的时段特征,4—5月虽然已进入汛期,但历史上典型的大洪水均不是发生在此时段,而且该时段一般不与长江洪水遭遇,防汛形势相对缓和,从防洪和发电统一考虑,该时段可以适当抬高水库运行水位;6—7月份进入主汛期,洪水峰高量大,有时还与长沙、洞庭湖洪水遭遇,由于水库防洪能力有限,尾闸防洪应蓄泄结合,综合治理,但总体上说,因防洪形势严峻,水库需控制在汛限水位运行;8月开始进入后汛期,该时段也时有洪水发生,但大多洪水量级较小,且持续时间不长,应加强预报,及时蓄水,并抓住有利时机开展人工增雨作业。

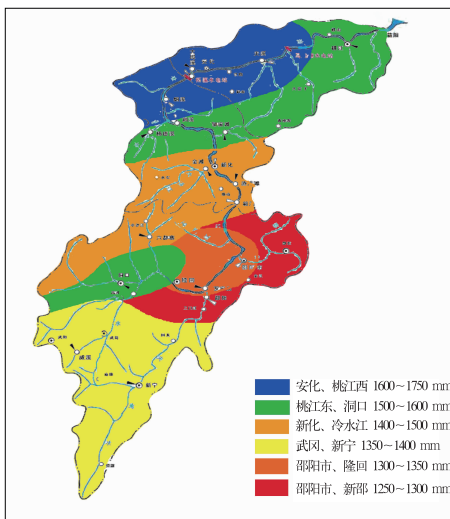


图2 资水流域年平均降雨量分布图(单位: mm)

Fig. 2 Average annual rainfall distribution (unit: mm) in Zishui Basin

柘溪水库于1958年动工、1962年开始发电,1969年6月、1975年5月分别发现1<sup>#</sup>、2<sup>#</sup>支墩劈头裂缝扩展并漏水严重,1983年再次发现多条水平裂缝并与原劈头缝形成不利组合,至此大坝被定为险坝而降低水位运行。1980—1986年间进行了空腔回填并使用环氧砂浆块压贴迎水面裂缝,摘除了“险坝”帽子。中南勘测设计研究院在分析了裂缝稳定性后指出:在高水位低水温作用下,裂缝容易发展,今后应避免在低水温季节水库水位蓄得过高,要求每年12月底库水位降至165 m以下,并一直维持到汛期来临<sup>[11]</sup>。因此柘溪水库在冬季不适合开展人工增雨(雪)蓄水作业。

### 2.3 柘溪水库人工增雨作业的适宜时段

综上所述,资水流域冬季(12月至翌年2月)和3月份库区高水位低水温可能导致大坝裂缝发展,不适合开展人工增雨(雪)作业;汛期(4—7月上旬)降水充沛,考虑到防汛抗洪等因素,不需要也不宜开展人工增雨作业。根据流域的气候特征、防汛形势、发电需求,为争取人工增雨作业的最大投入产出比,同时确保水库和作业安全,柘溪水库人工增雨作业的适宜时段在常年可定为资水流域雨季结束(7月初)至11月份,其中7—8月主要是对对流云适合开展地面高炮火箭人工增雨作业;秋季(9—11月)主要是层积混合云和层状云,云系相对稳定<sup>[12-14]</sup>,适合开展火箭或飞机人工增雨作业。

### 2.4 资水流域典型降雨日天气形势与作业云系特征

#### 2.4.1 典型降雨日与天气形势分析

将库区流域内出现大雨过程且其中任意两站以上出现暴雨的天气过程定为典型降雨日,典型降雨日产生的面雨量较大,可有效增加水库径流量,典型降雨日的降雨云系也是柘溪水库人工增雨作业的典型云系。统计近5年资水流域10县市的降雨情况共出现37次典型降雨日天气过程(略)。进一步分析典型降雨日的天气形势并归类(略),则在资水流域37次典型降雨日天气过程中,受偏东气流影响3次,其他34次主要是西风带强降水天气系统影响,包括低槽、切变线和西南低涡,其中有4次是在强降雨天气形势并不明朗的情况下,安化或洞口县仍然出现了暴雨,应主要属地形影响产生强降水。典型的西风带强降水、台风外围强降水天气形势分别如图3和图4所示。

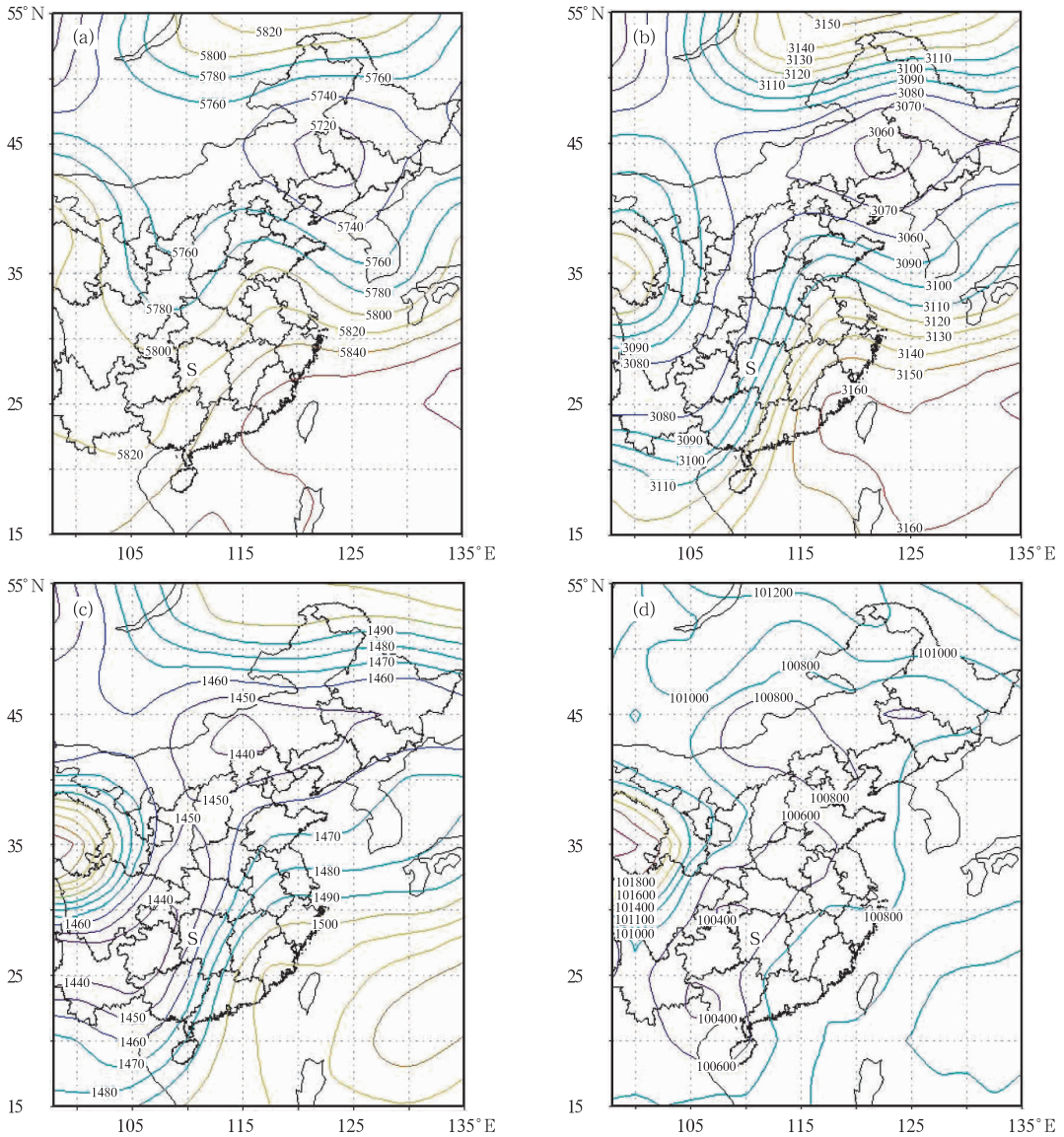


图 3 2004 年 7 月 11 日资水流域西风带强降水天气形势图

(a) 500 hPa, (b) 700 hPa, (c) 850 hPa, (d) 海平面

(图中 S 为柘溪水库大坝位置)

Fig. 3 Synoptic situations of the 7 November 2004 heavy rain process

under the westerly belt influence over Zishui Basin at

(a) 500 hPa, (b) 700 hPa, (c) 850 hPa, and (d) sea level

(Letter “S” represents the position of Zhexi Reservoir)

### 2.4.2 新邵县“2005·5·31”特大致洪暴雨

2005 年 5 月 31 日夜间到 6 月 1 日白天, 湖南自北向南出现一次对流性强降雨过程, 湘中新邵县太芝庙乡是此次暴雨过程中的最大雨量点, 5 月 31 日 20 时至 6 月 1 日 08 时 12 小时降雨 197.7 mm, 其中 21 至 23 时 10 分 130 分钟内降雨 163.3 mm, 21—22 时 1 小时降雨 90 mm。暴雨引发山洪, 全乡死亡 82 人、失踪 5 人、重伤 480 人, 倒塌房屋上万

间, 直接经济损失 10 亿元, 属于重大自然地质灾害。分析表明: 大气层结的强烈不稳定, 超强的风垂直切变, 是形成此次对流性暴雨的重要条件; 在有利的大尺度环流背景下, 大暴雨同一条东北西南向的切变线上  $\beta$  中尺度气旋的演变和发展密切相关, 暴雨区上空的经向次级环流的形成和维持是大暴雨形成的另一个条件<sup>[15-16]</sup>。另外, 太芝庙乡复杂的地形对大暴雨的产生及特大山洪的爆发起着十分重要的作

用<sup>[17]</sup>,太芝庙三面环山,整体山势东北高西南低,太芝庙位于山底盆地,与山脉最大落差高达 800 m,中间一条河流贯通南北,一旦遇有大的降雨,特别是连续性强降雨,因地表红、黄壤土层较厚,土质疏松,极易发生山洪泥石流。

新邵县太芝庙乡位于柘溪电站上游东南方直线距离约 140 km 处,是柘溪库区内的暴雨中心之一,其特殊的地形地貌导致山洪泥石流灾害易发。新邵和坝址所在地安化是柘溪水库人工增雨作业需要规避的强降雨自然灾害高风险区域。

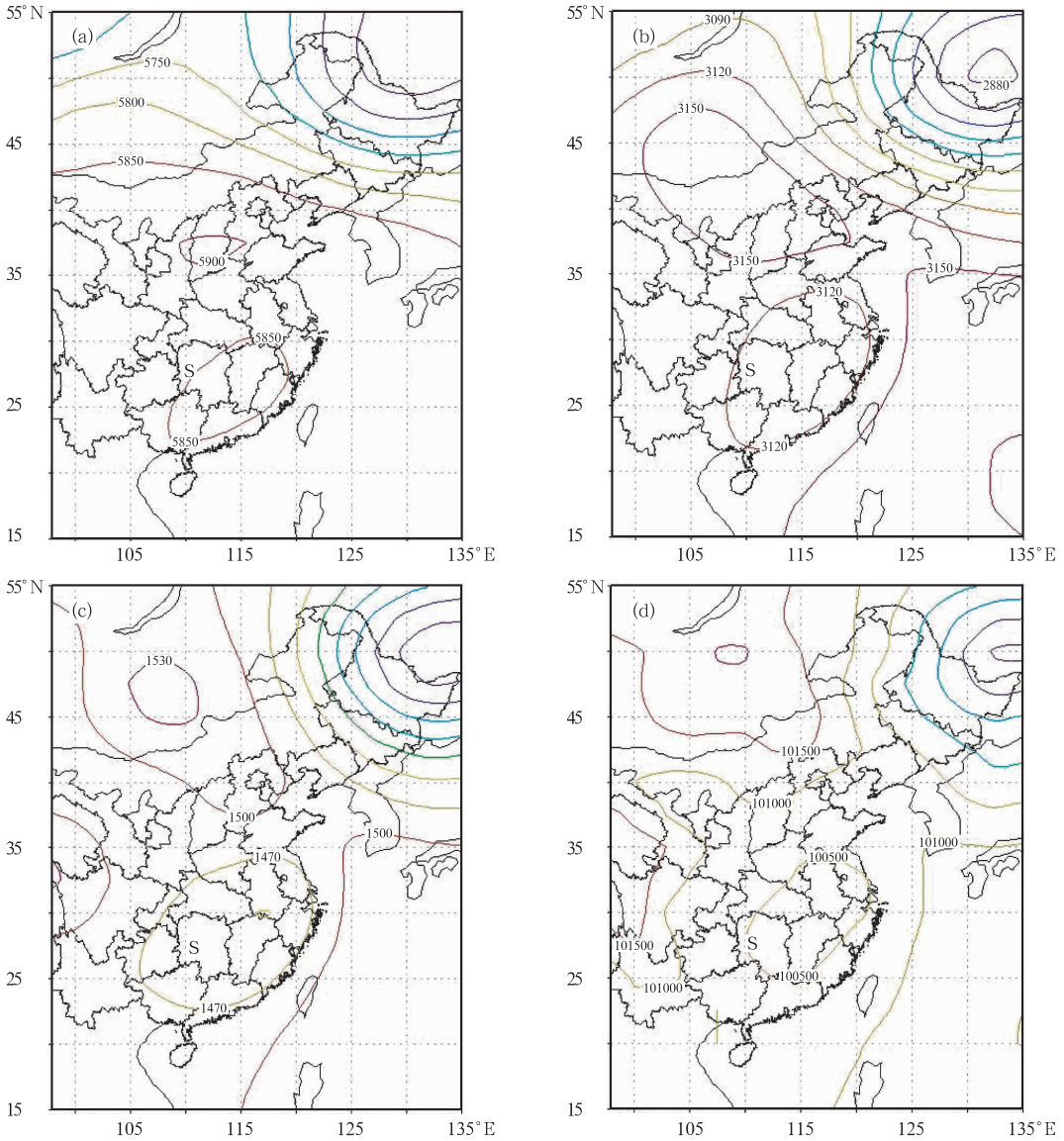


图 4 2007 年 8 月 22 日资水流域“圣帕”台风影响强降雨天气形势图

(a) 500 hPa, (b) 700 hPa, (c) 850 hPa, (d) 海平面

(图中 S 为柘溪水库大坝位置)

Fig. 4 Synoptic situations of the 22 August 2007 heavy rain process under typhoon Sepat influence over Zishui Basin at

(a) 500 hPa, (b) 700 hPa, (c) 850 hPa, and (d) sea level

(Letter “S” represents the position of Zhexi Reservoir)

### 2.4.3 人工增雨典型作业云系特征

柘溪水库人工增雨作业的主体是西风带降水系

统和台风外围云系,当降水天气系统开始影响湖南以后,利用卫星云图和多普勒天气雷达对天气系统

进行实时跟踪,对进入库区流域内雷达回波强度 $\geq 25$  dBz、回波顶高 $\geq 6$  km,水平尺度 $\geq 10$  km的云体

就可运用高炮和火箭进行人工增雨催化,表 1 是 2008 年柘溪水库人工增雨的典型作业云系特征。

表 1 柘溪水库 2008 年人工增雨典型作业云系特征

Table 1 The cloud system characteristics of the artificial precipitation experiment at Zhexi Reservoir in 2008

作业时间	作业区域	天气系统	作业云系多普勒天气雷达特征			探空 $\text{C}$ 层 /gpm	作业点数 /个	日降雨量 /mm
			CR/dBz	ET/km	VIL /kg $\cdot$ m $^{-2}$			
7月18日	邵阳	中低层切变、地面冷空气	30~45	8~9	5	5229	3	23.5~58.4
8月2日	安化、新化、邵阳	高空低槽、中低层切变	30~45	6~9	1~5	5280	5	20.5~49.7
8月16日	安化、新化、邵阳	低槽、切变、弱冷空气	35~40	6~8	1~5	5392	5	17.4~37.9
8月25日	安化、新化、邵阳、冷水江、邵阳	台风“鹦鹉”登陆后减弱为低气压	30~40	6	1	5168	11	13.1~39.3

注:多普勒天气雷达资料 8 月 16 日使用长沙 CINRAD/SA,其余 3 次为永州 CINRAD/SB;探空使用临近怀化站(57749)资料。

## 2.5 柘溪水库人工增雨最佳作业布局与作业方式

根据资水流域三类主要降雨天气过程的形成特征,柘溪水库人工增雨作业炮(箭)点相应主要布设在流域内西风带、东风波和地形云降雨天气系统经过频数最多的路径上。西风带降雨云系人工增雨炮点应主要设置在流域西北部的安化县、西南部的洞口县,以高炮固定作业为主,其他区域适当补充火箭流动作业,考虑到近坝区产流系数高、同时下泄快,可在安化县适当多布炮点;东风系统降雨云系人工增雨作业点应主要设置在流域东南部的邵阳市、邵阳县一线,以火箭流动作业为主;在易产生地形云降水的安化县、洞口县的高山南坡可设置远程控制碘化银地面燃烧炉。

人工增雨作业要规避强降雨自然灾害风险,重点应关注影响区内出现过暴雨洪涝多灾、重灾的区域,柘溪水库人工增雨作业须密切注意 7 月上中旬安化县和新邵县的致洪暴雨。具体作业时,还需注意“台风外围影响型”增雨云系的过冷水含量丰富,而冰晶数浓度较少,非常适合开展人工增雨作业,但相对“高空低槽影响型”增雨云系来说,其生消比较

突然和迅速<sup>[18]</sup>,要密切关注云系的发生发展、抓住时机迅速作业,台风外围云系作业还要根据防汛形势服从全省统一调度;进行人工增雨效果检验与评估时,两种作业云系因引导气流的不同,相应的对比区选择也不同。

## 3 柘溪水库人工增雨试验

2001 年以来,柘溪水库共开展过 5 年次人工增雨蓄水发电试验(表 2),从表中可以看出,经过不断总结经验和优化改进人工增雨技术,投入与产出比呈逐年上升趋势。2008 年人工增雨试验效益最好,主要是在三个方面进行了改进。(1)作业时间比往年提前了近一个月,于 7 月中旬初开始作业,抓住了汛期结束前最后一场强降水或后汛期的局地对流云系作业机会;(2)将近坝区的作业点调整充实到了全库区流域(如图 5),作业区域更大,可产生更大面雨量 and 有效径流;(3)更多使用火箭发射系统灵活机动作业,通过这三项措施抓住了更多人工增雨作业机会,在用弹量没有增加的情况下,库区增水总量、经济效益均明显提高。

表 2 柘溪水库人工增雨蓄水发电试验基本情况

Table 2 Basic information of the artificial precipitation experiment at Zhexi Reservoir

年度	作业 点数	作业时 段 /月.日	作业云系	作业 次数	用弹量		库区增水总 量/亿 m $^3$	经济效益 /万元	投入与 产出比
					炮弹/发	火箭/枚			
2001	10	8.22—10.10	切变线、台风外围、积层混合云	31	1975	28	2.81	281.36	1:7.0
2003	10	8.1—9.5	局地对流云	34	1681	49	0.7696	109.9	1:2.37
2005	10	8.13—9.13	局地对流云	20	80	10	0.08	36	1:3.6
2007	10	7.24—9.10	局地对流云	36	989	20	0.67	257.42	1:5.72
2008	11	7.12—8.26	局地对流云、台风外围云系	46	848	39	1.44	554.15	1:8.01

注:表中库区增水总量=催化影响面积 $\times$ 库区面降雨总量 $\times$ 增雨效率系数 $\times$ 产流系数,其中催化影响面积 $S=L\times V\times T$ <sup>[19]</sup>,经综合考虑,湖南单块积云的增雨效率系数平均取为 0.24<sup>[20]</sup>,库区面降雨总量采用算术平均法等计算方法<sup>[21]</sup>,柘溪水库 7—9 月的产流系数一般为 0.5~0.6,由柘溪水电站提供实况;经济效益=库区增水总量/单位水电耗水率 $\times$ 价格因子;投入与产出比=增雨试验经费/经济效益。

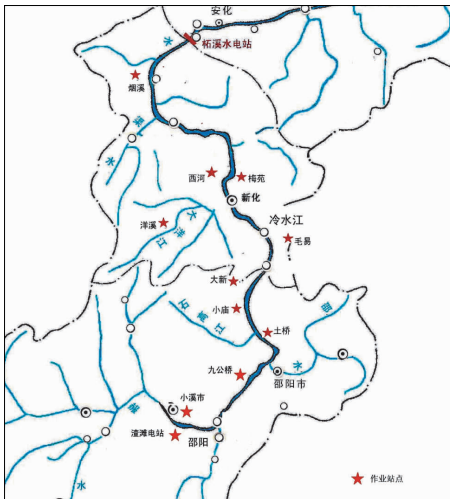


图5 柘溪水库2008年  
人工增雨试验布局示意图

Fig. 5 Layout of the artificial precipitation  
experiment at Zhexi Reservoir in 2008

## 4 结果与讨论

(1)柘溪水库人工增雨作业的适宜时段在常年可定为资水流域雨季结束(7月初)至11月,其中7—8月主要是对对流云适合开展地面高炮火箭人工增雨作业;秋季(9—11月)主要是层状云和层积混合云适合开展火箭或飞机人工增雨作业。

(2)影响资水流域降水的天气系统主要是西风带降雨系统、东风带降雨系统和地形云。柘溪水库地面人工增雨作业的优化布局和作业方式为西风带降雨云系人工增雨炮点主要设置在库区西北部的安化县、西南部的洞口县,以高炮固定作业为主,其他区域适当补充火箭流动作业,近坝区的安化县适当多布炮点;东风系统降雨云系人工增雨作业点主要设置在库区东南部的邵阳市、邵阳县一线,以火箭流动作业为主;在易产生地形云降水安化县、洞口县的高山南坡可设置远程控制碘化银地面燃烧炉。

(3)柘溪水库人工增雨作业需要注意的问题包括规避7月上中旬安化县和新邵县的致洪暴雨风险;台风外围影响时,云系生消移动比较突然和迅速,需根据防汛形势密切关注迅速作业。

## 参考文献

- [1] 曾光平,朱鼎华,王祖炉. 古田人工降雨应用研究[J]. 气象, 1997,23(12):34-38.
- [2] 秦长学,张蕾,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.
- [3] 唐林,王治平,丁岳强,等. 湖南省柘溪水库流域空中水汽资源特征及人工增雨潜力[J]. 气象,2006,32(5):29-34.
- [4] 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,2002,30(2):58-62.
- [5] 赵国石,陈连友. 秦皇岛水库区汛期人工增雨作业风险评估[J]. 气象科技,2007,35(2):274-277.
- [6] 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,2007,35(5):687-691.
- [7] 曾光平,方仕珍,肖锋. 1975—1986年古田水库人工降雨效果总分析[J]. 大气科学,1991,15(4):97-108.
- [8] 中国气象学会人工影响天气委员会. 中国人工影响天气事业50周年纪念文集[M]. 北京:气象出版社,2004:24.
- [9] 湖南省电力公司. 湖南省大型水库防洪调度研究[M]. 北京:中国电力出版社,2002:44.
- [10] 潘志祥,刘建平,等. 湖南省大型水电厂流域专业天气预报方法研究[M]. 北京:气象出版社,2000:63.
- [11] 湖南省电力公司. 湖南省大型水库防洪调度研究[M]. 北京:中国电力出版社,2002:45.
- [12] 郭学良,杨军,章澄昌. 大气物理与人工影响天气[M]. 北京:气象出版社,2011:190-194.
- [13] 赵增亮,毛节泰,魏强,等. 西北地区春季云系的垂直结构特征飞机观测统计分析[J]. 气象,2010,36(5):71-77.
- [14] 孙鸿娉,李培仁,闫世明,等. 华北层状冷云降水微物理特征及人工增雨可播性研究[J]. 气象,2011,37(10):1252-1261.
- [15] 李峰,杨克明,毛冬艳,等. 2005年“5.31”湖南大暴雨中尺度模拟和发生机制[J]. 高原气象,2007,26(3):442-452.
- [16] 张芳华,杨克明,毛冬艳,等. 2005年6月湖南大暴雨过程的天气动力学诊断分析[J]. 气象,2006,32(3):78-85.
- [17] 周雨华,刘志雄,谭一洲,等. 湖南新邵太芝庙乡特大致洪暴雨分析[J]. 气象,2006,32(11):81-87.
- [18] 樊志超,高继林,丁岳强,等. 国家级人影指导产品在湖南的释用方法与初步结果//中国气象局人工影响天气委员会,中国气象科学研究院,中国气象局人工影响天气中心,等. 第十五届全国降水与人工影响天气科学会议论文集II[M]. 北京:气象出版社,2008:1090-1093.
- [19] 中国气象局科技教育司. 高炮人工防雹增雨作业业务规范(试行)[M]. 北京:气象出版社,2000:15-16.
- [20] 刘耀宗,王治平,陈历舒. 湖南单块积云高炮增雨随机化试验效果的分析[J]. 气象,1999,25(8):16-21.
- [21] 毕宝贵,徐晶,林建. 面雨量计算方法及其在海河流域的应用[J]. 气象,2003,29(8):39-42.