

河西走廊东部人工降水试验效果评估

杨永龙^{1,2,3}, 薛生梁², 钱莉², 丁瑞津^{1,3}

(1. 中国气象局兰州干旱气象研究所, 甘肃 兰州 730020; 2. 甘肃省武威市气象局, 甘肃 武威 733000;

3. 甘肃省干旱气候气候变化与减灾重点实验室, 甘肃 兰州 730020)

摘要: 采用非随机试验, 运用序列试验法、区域对比试验法、区域回归试验法, 分析了在河西走廊东部凉州区 1997~2004 年夏秋季进行的高炮、火箭人工增雨作业和 2002~2004 年冬春季进行的焰弹人工增雪作业。试验发现, 1997~2004 年夏秋季累计增加降雨量 134 mm, 平均相对增雨率为 47%; 2002~2004 年冬春季累计增加降雪量 12.5 mm, 平均相对增雪率为 40%。说明河西走廊东部进行的人工增雨(雪)效果是明显的, 进行人工增雨(雪)是可行的, 并对武威市人工增雨(雪)季节、布点和时机等提出了思考。

关键词: 人工增雨(雪); 效果; 评估; 河西走廊东部

中图分类号: S161.6 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-7601(2006)05-0218-07

人工影响天气的效果评估, 是人工增雨(雪)作业中必不可少的重要环节之一。但是由于云和降水自然变率大, 评估对象具有不确定性, 不同的时间、空间条件下各种因子互相制约, 复杂多变, 因此进行严格的效果检验, 在国内外都仍然是一个困难的问题。

目前国际上采用的效果检验(评估)方式主要有^[1]: (1) 作为科学上可接受的最可靠的检验播云效果方法, 统计学家推荐随机化试验, 由于试验周期很长, 需要大量的样本, 而且方法本身难以排斥自然云本身的不确定因素, 主要用于研究工作中。(2) 划定目标区和对比区的非随机化播云方法, 同时使用多种统计推断方法对资料进行统计分析, 对业务性作业来说, 是一种花费少、易获取播云效果信息的方法, 已在世界范围广泛应用。(3) 随着对云与降水机制的深入研究; 探测技术, 数值模拟和计算机技术的发展; 通过探索物理预报因子以减少降水自然变率的制约; 新的资料集为统计方法、物理方法和数值模拟相结合的综合效果检验等, 从多方面开辟了效果评估的有效途径。

我国人工影响天气作业发展迅速, 迫切需要采用适合国情及当地条件的人工影响天气效果的评估方法。在许多地方开展的试验中, 有关于非随机化统计试验、统计检验与物理检验相结合的试验报告; 胡志晋^[2]评述了数值模拟在人工影响天气作业设计与效果评估中的应用等问题; 曾光平等^[3,4]对古田人工增雨中多种非随机化效果评估方法进行了分析。1995 年以来祁连山东部的武威市凉州区为了抗旱和改善生态环境目的每年 5~9 月进行人工增

雨作业试验, 增雨效果明显。为了充分发挥人工影响天气的效果, 在原夏秋季开展人工增雨的基础上, 2002 年以来又开展了冬春季的增雪作业试验, 通过在祁连山区积雪明显增加, 直观上看产生了较为理想的作业效果。然而目前对干旱区的人工增雨(雪)作业还没有形成一套科学的效益评估模式。因此, 对增雨(雪)效果做定量、客观、科学地评价将是十分必要的。

1 作业基本情况

河西走廊东部凉州区开展人工增雨作业开始于 1995 年, 增雨季节为汛期的 5~9 月, 人工增雨的方式采用 37 高炮或增雨火箭向云中撒播 AgI, 增加云中凝结核, 进行人工影响的降水云为大范围的层状云系和局地发展旺盛的积雨云。选取武威市凉州区 1997~2005 年 5~9 月增雨样本 71 个, 进行人工增雨后平均降雨量 9.3 mm, 最大降雨量 26.3 mm。

冬春季人工增雪作业开始于 2002 年 3 月, 人工增雪的方式采用氢气球悬挂点燃的焰弹向云中投放 AgI 烟雾增加云中凝结核, 作业的主要对象为大范围的层状云系。选取武威市凉州区 2002 年 3 月~2004 年 11 月冬春季增雪样本 26 个, 作业区域平均降雪量 3.1 mm, 最大降雪量 13.8 mm。

2 分析方案

2.1 效果检验方法的确定

以抗旱为目的的业务性人工增雨(雪), 从效果检验角度划分, 它属于一种非随机试验, 可以采用公

收稿日期: 2006-03-20

基金项目: 国家科技部攻关计划“西部开发科技行动”重大项目(2004BA901A16-02)

作者简介: 杨永龙(1964—), 男, 甘肃酒泉人, 工程师, 主要从事天气气候研究工作。E-mail: wwwqxjql@163.com

认可行的一些方法进行检验^[5~7]。20 世纪 80 年代我国北方层状云人工降水试验研究项目取得了卓有成效的进展。上述的研究成果,在现有认识水平和设备条件下,对于作业区的设置、催化对象的选择以及播撒方案和剂量控制等技术方面都有了很多的经验,力求使每次作业有增雨效果。这是抗旱增雨作业的基本目标所在,也是效果评估的前提条件。本文采用了序列试验法、区域对比试验法和区域回归试验法。

2.2 作业试验区和对比区的确定

人工增雨(雪)试验是在自然条件无法控制甚至难以预测或监测的大自然环境中进行的,为了科学地进行这类试验,人们往往求助于随机化试验设计,将适于作业的对象随机地分出一部分不作业,保持其自然状态作为对比样本,并据以检验作业样本的效果。

抗旱人工增雨(雪)作业是在不确定因素众多的场合下进行的一种难以预料其结果的试验。因此,不仅作业方案、催化技术需要符合科学原理,作业效果的评估也要有科学性,特别是强调客观地评估作业效果。在目前物理监测手段还相当不齐备而又不宜采用随机化设计的前提下,如何客观地评估作业效果,确实是一个难题。现有的各种非随机化试验所采用的统计评估方法都是在一定的假设前提下利用一定的控制变量估计作业区自然雨量,再与作业区实测雨量对比评估作业效果。对于系统性降水过程,可以采用区域趋势对比分析方法评估作业效果,即选择云系结构与作业区相似的邻近地带作为对比区。

确定对比区和试验区,应使两区间满足以下基本原则:(1) 基本的气候指标具有可比性;(2) 出现的降水系统和主要云系相似;(3) 地理特征相似;(4) 区域面积相似;(5) 对比区不受试验区催化剂的污染;(6) 区内的比较站点分布较为合理,具有代表性;(7) 所取资料基本同步。

根据对比区与试验区选择的基本原则,增雨(雪)试验区选定为武威市的凉州区。增雨对比区选择位于目标区偏北方向(上风方向,500hPa 风向为 NW)与凉州区毗邻的民勤县(因民勤县人工增雨作业始于 2003 年,开展时间较晚,满足对比区和试验区选择的基本原则,可选作对比区;位于凉州区上风 NW 方向的永昌县开始人工增雨作业始于 1992 年,早于凉州区,对比区进行人工影响天气作业势必造成试验区催化剂的污染,故不满足对比区和试验区选择的基本原则,不能选择永昌县作为对比区),对比区与试验区相距 91 km;增雪对比区选择位于目

标区 NW 方向(上风方向,500hPa 风向为 NW)与凉州区毗邻的金昌市永昌县(永昌县、民勤县开始人工增雪作业于 2004 年冬季,均位于凉州区上游,均满足对比区和试验区选择的基本原则,但永昌在凉州的 NW 方向与系统移动路径一致,相比之下选择永昌作为对比区,比选择民勤作为对比区更加适合),对比区与试验区相距 72 km。试验区和对比区的基本情况见图 1 和表 1。

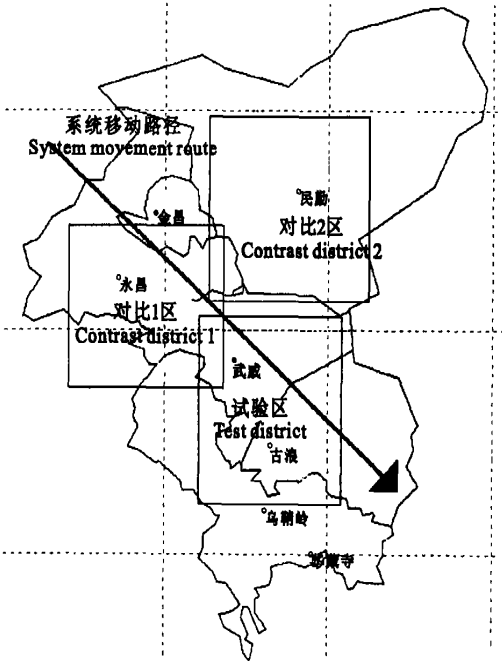


图 1 人工增雨(雪)试验区与对比区分布图
Fig.1 Distribution chart of artificial rain (snow) in test and contrast districts

2.3 效果检验时段和资料的选取

凉州区人工增雨作业效果评估选取资料的时段为 1997~2004 年,作业的月份为 5~9 月;历史资料采用武威市武威观测站、民勤县气象站 1967~1996 年同期 30 a 的降水资料;试验区和对比区资料从 1997~2003 年实施人工增雨的降水资料中选取凉州区(试验区)进行人工增雨,而民勤县(对比 2 区)未实施人工增雨的过程共 52 场(次)。

凉州区人工增雪作业效果评估选取资料的时段为 2002~2004 年冬、春季,作业的月份为 1、2、3、4、11、12 月;历史资料采用武威市武威观测站、永昌县气象站 1971~2000 年同期 30 a 的降水资料;试验区和对比区资料从 2002 年~2004 年实施人工增雪的降水资料中选取凉州区(试验区)进行人工增雪,而永昌县(对比 1 区)未实施人工增雪的过程共 15 场(次)。

表 1 目标区和对比区基本情况

Table 1 General situation of test and contrast districts

区域 District	地名 Place	面积 Area (km ²)	海拔(km) Altitude	年降水量(mm) Rainfall	气候特征 Climate characters
目标区 Test district	凉州区 Liangzhou distret	6200	1.53	165.9	温带大陆性干旱气候 Temperate continent arid climate
对比 1 区 Contrast district 1	永昌县 Yongchang county	7400	1.98	201.7	温带大陆性干旱气候 Temperate continent arid climate
对比 2 区 Contrast district 2	民勤县 Minqin county	16000	1.67	113.4	温带干旱荒漠气候 Temperate arid hungriness climate

3 效果检验

3.1 序列试验

3.1.1 增雨(雪)量效果统计 序列试验是以作业区历史平均雨(雪)量作为作业区自然降水量估计值,然后与试验期的实测降水量作比较,得出人工影响的效果值。

人工增雨资料选取 1997 ~ 2004 年试验期实施人工增雨作业各月的实测降水量计为 x_{1i} ;取 1967 ~ 1996 年 30 a 试验区历史同期各月平均降水量计为 x_{2i} ,作为试验期降水量的估计值。

人工增雪资料选取 2002 ~ 2004 年试验期实施

人工增雪作业各月的实测降水量计为 x_{1i} ;取试验区冬春季 11、12、1、2、3、4 月 1971 ~ 2000 年 30 a 历史降水量各月平均值计为 x_{2i} ,作为试验期降水量的估计值;由于历史样本的年代较长,可以认为试验区自然降水在时间分布上是平稳的。根据公式:

$$\triangle R = \sum (X_{1i} - X_{2i})$$
$$E = \sum (X_{1i} - X_{2i}) / \sum X_{2i}$$

可计算出作业时段中的绝对增值 $\triangle R$ 和相对增值 E 。月平均绝对增雨 13.8 mm,平均相对增雨 53%;月平均绝对增雨 1.6 mm,平均相对增雨 40.6%(增雪效果检验见表 2、表 3;增雨效果检验表略)。

表 2 凉州区人工增雪序列试验检验

Table 2 Evaluation of sequential test of PSO in Liangzhou district

项目 Item	时间(年-月) Time(y-m)										
	2002-01	2002-03	2002-11	2002-12	2003-01	2003-03	2003-04	2003-11	2004-01	2004-03	2004-04
X_2	1.4	6.1	3.6	1.2	1.4	6.1	4.5	3.6	1.4	6.1	7.9
X_1	4.1	4.4	5.9	5.1	3.2	4.8	8.1	7.9	3.1	4.4	9.9
评定 Evaluation	+	-	+	+	+	-	+	+	+	-	+

表 3 凉州区人工增雪序列试验各参量

Table 3 Parameters of sequential test of PSO in Liangzhou district

增雪月数 Total month number n	正效果月数 Month number with positive effect n^+	负效果月数 Month number with negative effect n^-	$\text{Min}(n^+, n^-)$ r	历史降水合计 Historic average rainfall $\sum X_2$	实况降水合计 Actual rainfall $\sum X_1$
11	8	3	3	43.3	60.9
绝对增雪量 Absolute snow stimulation $\triangle R$	相对增雪量 Relative snow stimulation $E(\%)$	显著度 Significance level α	检验临界值 Critical value t_α	显著性分析 Significance analysis t	
17.6	40.6	0.01	-2.58	-2.82	

3.1.2 效果显著性检验

(1) 增雨效果显著性检验
设 $H_0: \sum X_{1i} = \sum X_{2i}$,即增雨前后的降雨量无显著差异。

进行增雨的月份数 $n = 22$,增雨为正效果的月

数 $n^+ = 19$,增雨为负效果的月数为 $n^- = 3$, $r = \text{min}(n^+, n^-) = 3$ 。由数理统计理论知,当 $n \geq 10$ 时,可以认为近似呈 $N[\frac{n}{2}, (\frac{\pi}{4})^{1/2}]$ 的正态分布。

采用 t 检验,统计量 $t = (r - \frac{n}{2}) / (\frac{\pi}{4})^{1/2}$
计算得 $t_{\text{增雨}} = -7.34$;当 $\alpha = 0.01$ 时, t_α 的置

信区间为 $(-2.58, 2.58)$ 。由于 $t_{\text{增雨}} = -7.34 < t_{\alpha} = -2.58$, 拒绝原假设。说明试验区增雨后的降水明显高于未增雨的降水, 且显著度小于 0.01(表略)。

(2) 增雪效果显著性检验

设 $H_0: \sum X_{1i} = \sum X_{2i}$, 即增雪前后的降雪量无显著差异。

进行增雪的月份数 $n = 11$, 增雪为正效果的月数 $n^+ = 8$, 增雪为负效果的月数为 $n^- = 3$, $r = \min(n^+, n^-) = 3$ 。由数理统计理论知, 当 $n \geq 10$ 时, 可以认为近似呈 $N(\frac{n}{2}, (\frac{\pi}{4})^{1/2})$ 的正态分布。

采用 t 检验, 计算统计量 $t = (r - n/2)/(\frac{\pi}{4})^{1/2}$

计算得 $t_{\text{增雪}} = -2.82$; 当 $\alpha = 0.01$ 时, t_{α} 的置信区间为 $(-2.58, 2.58)$ 。由于 $t_{\text{增雪}} = -2.82 < t_{\alpha}$

$= -2.58$, 拒绝原假设。说明试验区增雪后的降水明显高于未增雪的降水, 且显著度小于 0.01(见表 3)。

3.2 区域对比试验

3.2.1 增雨、雪量效果统计 区域对比试验是利用同期对比区雨量作为作业区自然雨量的估计值, 同试验区进行人工增雨后的实测降水量进行比较, 求得催化效果。

增雨效果统计: 取试验区(A)为凉州区, 对比区(B)为民勤县; 增雪效果统计: 取试验区(A)为凉州区, 对比区(B)为永昌县。由于凉州区与民勤县、永昌县毗邻, 其试验区自然降水在空间分布上可以认为是平稳的, 可以计算出最小增雨效果为 28%(表略)、最小增雪效果为 90%(见表 4、表 5)。

表 4 人工增雪区域对比试验
Table 4 Contrasting experiments of PSO in different districts

统计效果	n														
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
试验区 A Test district A (mm)	4.3	4.7	1.9	3.1	1.4	1.0	3.2	0.2	4.9	0.1	2.9	0.5	1.6	1.9	1.9
对比区 B Contrast district B (mm)	0.1	1.5	1.0	1.2	0.2	0.5	1.7	0.7	5.1	0.0	0.5	1.9	0.8	0.1	0.0
评定 Evaluation	+	+	+	+	+	+	+	-	-	+	+	-	+	+	+
A-B(mm)	4.2	3.2	0.9	1.9	1.2	0.5	1.5	-0.5	-0.2	0.1	2.4	-1.4	0.8	1.8	1.9
(A-B)/B(mm)	42	2.1	0.9	1.6	6.0	1.0	1.2	-	-	10	4.8	-	1.0	18	19

表 5 人工增雪区域对比试验各参量
Table 5 Main parameters of contrasting experiments of PSO

增雪场数 Times of snow stimulation n	正效果数 Times of positive effect n ⁺	负效果数 Times of negative effect n ⁻	Min(n ⁺ , n ⁻) r	最小增雪率 P Minimum snow increase rate (%)	显著度 Significance level α	检验临界值 Critical value t _α	显著性分析 Significance analysis t
15	12	3	3	90	0.01	-2.58	-5.39

3.2.2 效果显著性检验

(1) 增雨效果显著性检验

设 $H_0: A=B$, 即试验区与对比区降雨量无显著差异。

进行增雨试验的场次 $n = 52$, 增雨为正效果的个数 $n^+ = 47$, 增雨为负效果的个数为 $n^- = 5$, $r = \min(n^+, n^-) = 5$ 。由数理统计理论知, 当 $n \geq 10$ 时, 可以认为近似呈 $N(\frac{n}{2}, (\frac{\pi}{4})^{1/2})$ 的正态分布。

采用 t 检验, 计算统计量 $t = (r - n/2)/(\frac{\pi}{4})^{1/2}$

计算得 $t_{\text{增雨}} = -20.88$; 当 $\alpha = 0.01$ 时, t_{α} 的置信区间为 $(-2.58, 2.58)$, 由于 $t_{\text{增雨}} = -20.88 < t_{\alpha} = -2.58$, 拒绝原假设。说明增雨后的降水明显高于

未增雨的降水, 且显著度小于 0.01(表略)。

(2) 增雪效果显著性检验

设 $H_0: A=B$, 即试验区与对比区降雪量无显著差异。

进行增雪试验的场次 $n = 15$, 增雪为正效果的个数 $n^+ = 12$, 增雪为负效果的个数为 $n^- = 3$, $r = \min(n^+, n^-) = 3$, 由数理统计理论知, 当 $n \geq 10$ 时, 可以认为近似呈 $N(\frac{n}{2}, (\frac{\pi}{4})^{1/2})$ 的正态分布。

采用 t 检验, 计算统计量 $t = (r - n/2)/(\frac{\pi}{4})^{1/2}$

计算得 $t_{\text{增雪}} = -5.39$; 当 $\alpha = 0.01$ 时, t_{α} 的置信区间为 $(-2.58, 2.58)$, 由于 $t_{\text{增雪}} = -5.39 < t_{\alpha} = -2.58$, 则拒绝原假设。说明试验区增雪后的降水

明显高于对比区未增雪的降水,且显著度小于 0.01(见表 5)。

3.3 区域回归试验

3.3.1 增雨(雪)效果统计 区域历史回归试验是利用对比区自然雨量作为预报(控制变量),对试验区的自然雨量进行统计推断。它基于一个或一个以上的对比区,按历史资料建立目标区与对比区的自然降水量回归方程,据此以试验期对比区自然降水量估计影响区的自然降水量。

在进行区域回归中,增雨效果评估使用凉州区(试验区)与民勤(对比 2 区)1967~1996 年 30 a 5~9 月的资料,分月对降水资料进行了统计分析,建立区域历史回归方程,计算其增雨效果;增雪效果评估使用试验区凉州(试验区)与永昌(对比 1 区)1971~2000 年 30 a 的资料,分月对降水资料进行了统计分

析,建立区域历史回归方程,计算其增雪效果。经试验,凉州(试验区)与民勤(对比 2 区)的降雨历史平均月雨量相关系数在 51%以上,凉州(试验区)与永昌(对比 1 区)的降雪历史平均月雨量相关系数在 55%以上,回归系数显著性水平均在 0.01 以上;方程显著性检验,显著性水平在 0.01 以上。表 6 给出了各月降水区域历史回归的主要参量,表 6 中的 $\bar{x}$ 平均为对比区各月降水量的多年平均值, $\bar{y}$ 平均为试验区各月降水量的多年平均值, s_x 为对比区各月降水量的标准差, s_y 为试验区各月降水量的标准差, r 为对比区与试验区的相关系数;表中还有各月的区域历史回归方程、绝对增雨量、增雪量以及平均相对增雨率、增雪率。表 7 给出了各月区域历史回归主要显著性检验参数。

表 6 降水区域历史回归主要参量分析表
Table 6 Main parameters of historical regression in precipitating area

月份 Month	$\bar{x}$ 均 $\bar{x}_{average}$	$\bar{y}$ 均 $\bar{y}_{average}$	s_x	s_y	r	回归方程 Regression equation	增雪量(mm) Snow increase	平均增雪率(%) Mean increase rate
1	1.16	1.4	1.2	2.0	0.61	$y = 0.703 + 0.064x$	3.4	47
2	19.8	21.7	19.0	19.8	0.73	$y = 0.339 + 0.092x$	未实施人工增雪试验 No experiment of PSO	
3	58.4	61.2	52.3	60.1	0.71	$y = 1.35 + 0.0815x$	2.7	66
4	71.1	79.3	50.9	43.9	0.58	$y = 5.36 + 0.036x$	1.7	17
5	9.2	16.1	9.1	10.9	0.79	$y = 0.095x + 6.14$	10.6	55.0
6	16.0	26.8	14.9	18.9	0.54	$y = 0.069x + 12.79$	33.1	37.8
7	24.6	29.7	16.7	13.7	0.58	$y = 0.048x + 17.21$	36.1	67.2
8	29.7	39.1	21.2	27.4	0.57	$y = 0.074x + 15.04$	29.1	26.3
9	17.5	24.4	12.1	17.3	0.70	$y = 0.101x + 8.09$	25.1	49.6
11	30.8	35.8	41.3	50.2	0.74	$y = 0.82 + 0.090x$	1.8	14
12	8.5	11.5	9.4	15.8	0.55	$y = 0.077 + 0.015x$	2.9	57

表 7 降水区域历史回归主要参量显著性检验表

Table 7 Significance test of main parameters of historical regression in precipitating area

月份 Month	回归系数检验 Test of regression coefficients T	显著度 Significance level α	方程显著性检验 Significance test of equation F	显著度 Significance level α
1	5.14	0.001	16.6	0.01
2	8.27	0.001	31.9	0.01
3	7.57	0.001	28.5	0.01
4	4.62	0.001	14.2	0.01
5	4.15	0.001	47.50	0.01
6	2.84	0.01	11.50	0.01
7	3.06	0.01	14.35	0.01
8	3.00	0.01	13.49	0.01
9	3.63	0.01	27.30	0.01
11	8.66	0.001	33.9	0.01
12	4.17	0.001	12.1	0.01

在统计分析区域历史回归方程时,将未实施人工增雨、雪的月份、对比区与试验区同时进行增雨、雪的月份剔除。分析得出:1997~2003 年凉州 5 月份绝对增雨量为 10.6 mm,平均相对增雨率为 55.0%;6 月份绝对增雨量为 33.1 mm,平均相对增雨率为 37.8%;7 月份绝对增雨量为 36.1 mm,平均相对增雨率为 67.2%;8 月凉州绝对增雨量为 29.1 mm,平均相对增雨率为 26.3%;9 月绝对增雨量为 25.1 mm,平均相对增雨率为 49.6%;各月平均相对增雨效果达 47%。2002~2004 年凉州 1 月份绝对增雪量为 3.4 mm,平均相对增雪率在 47%;3 月份绝对增雪量为 2.7 mm,平均相对增雪率为 66%;4 月份绝对增雪量为 1.7 mm,平均相对增雪率为 17%;11 月绝对增雪量为 1.8 mm,平均相对增雪率为 14%;12 月绝对增雪量为 2.9 mm,平

均相对增雪率为 57%;各月平均相对增雪效果达 40%。由此可见河西走廊东部进行的人工增雨、雪试验有明显的效果,1997~2003 年 5~9 月的人工增雨累计增加降雨量 134 mm,2002~2004 年冬春季累计增加降雪量 12.5 mm。

从表 6 中不难看出,本身降水场次多、降水过程持续时间长的月份人工增雨的效果更为显著,如 7 月增雨效果为 67.2%,这与适宜人工增雨的过程较多、增雨云系中水汽含量充沛、AgI 催化充分有关。进行气球悬挂焰弹施放烟雾的冬春季人工增雪,在气温较低,降水性质为纯雪时,增雪效果十分显著,如 1、3、12 月的试验增雪效果为 47%、66%、57%;而气温较高,降水性质为雨夹雪时,虽有增雪效果,但不如纯雪时显著,如 4、11 月增雪效果仅为 14%和 17%。

3.3.2 效果显著性检验

(1) 增雨效果显著性检验

设 $H_0: X = Y$,即非催化单元与催化单元降雨量无显著差异。

增雨显著性检验采用秩和 U 检验,所用样本为 1997~2003 年 5~9 月进行增雨月的所有非催化和催化单元的降雨样本。 X_{ns} 和 X_s 分别为非催化单元和催化单元目标区降雨量,样本容量数 $n_1 = 65$ 、未作业的样本容量数 $n_2 = 84$,秩次列表略,秩次和

T_{n1} 为 7078,计算统计量 U :

$$U = (T_{n1} - n_1(n_1 + n_2 + 1)/2)/(n_1 n_2(n_1 + n_2 + 1)/12)^{1/2}$$

计算得 $U_{\text{增雨}} = 2.98$;当 $\alpha = 0.01$ 时, u_α 的置信区间为 $(-2.58, 2.58)$,由于 $U_{\text{增雨}} = 2.98 > t_\alpha = 2.58$,则拒绝原假设。说明非催化单元目标区降雨量明显小于催化单元目标区降雨量,且显著度小于 0.01(表略)。

(2) 增雪效果显著性检验

设 $H_0: X = Y$,即非催化单元与催化单元降雪量无显著差异。

增雪显著性检验采用秩和 U 检验,所用样本为 2001~2004 年 11~12、1~4 月的所有非催化和催化单元的降雪样本。 X_{ns} 和 X_s 分别为非催化单元和催化单元目标区降雪量,样本容量分别为 $n_1 = 10$ 和 $n_2 = 11$,秩次排列见表 8,秩次和 $T_{n1} = 60$,计算统计量 U :

$$U = (T_{n1} - n_1(n_1 + n_2 + 1)/2)/(n_1 n_2(n_1 + n_2 + 1)/12)^{1/2}$$

计算得到 $U_{\text{增雪}} = -3.52$;当 $\alpha = 0.01$ 时, u_α 的置信区间为 $(-2.58, 2.58)$,由于 $t = -3.52 < t_\alpha = -2.58$,则拒绝原假设。说明非催化单元目标区降雪量明显小于催化单元目标区降雪量,且显著度小于 0.01 (见表 9)。

表 8 冬春季人工增雪实验非催化单元和催化单元目标区雪量(mm/24h)及秩次

Table 8 Snow amount (mm/24h) and rank in non—catalytic unit and catalytic unit of snow stimulation experiment													
秩次 Rank	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	10	11	12	13
x_{ns}	0.0	0.1	0.1	0.2	0.3	0.9	1.5	1.8	2.4				
x_s										3.1	3.3	4.0	4.1
秩次 Rank	14	(15)	16	17	18	19	20	21					
x_s	4.4		4.8	5.1	5.9	7.9	8.1	9.9					
x_{ns}		4.5											

表 9 人工增雪区域回归试验各参量

Table 9 Main parameters of regression test of snow stimulation				
非催化单元样本 Non-catalytic units n_1	催化单元样本 Catalytic units n_2	显著度 Significance level α	检验临界值 Critical value u_α	显著性分析 Significance analysis u
10	11	0.01	-2.58	-3.52<-2.58

3.4 试验效果的统计方案比较

由上述试验可以看出,序列试验、区域对比试验、区域回归试验均证明在河西走廊东部凉州区进行的人工增雨(雪)试验效果显著,但由于自然降水的起伏,可能产生增雨(雪)的假效果,哪种试验能较

为客观、准确地评价增雨(雪)效果呢? 由大量人工增雨非随机化试验证明^[8~10]:序列试验、区域对比试验其灵敏度低、失真率较大,引起的假效果可能较大、功效较低;区域回归由于使用的样本容量较大,其灵敏度高、失真率较小,产生的假效果相比其它试

验最小、功效最高。故区域回归试验方案能比较客观、准确地反映增雪的实际情况,能够满足人工降水效果评价的要求。由此可知,1997~2003 年 5~9 月在凉州区进行的人工增雨试验累计增加降雨量 134 mm,平均相对增雨效果为 47%;2002~2004 年冬春季在凉州区开展的人工增雪试验累计增加雪量 12.5 mm,平均相对增雪效果为 40%。

4 总结与讨论

1) 运用序列试验法、区域对比试验法和区域回归试验法等多种人工增雨试验法均定性证明在河西走廊东部开展的人工增雨(雪)试验有显著效果。检验结果显著性水平平均优于 0.01,可信度在 99%以上。由此可知,在武威市凉州区进行的人工增雨(雪)试验效果是明显的,进行人工增雨(雪)作业是可行的。人工增雨(雪)作业为武威市开发空中水资源、改善生态环境提供了新的途径。

2) 增雨效果检验方法中,区域回归分析比较客观、准确地分析了增雨效果,在武威市凉州区开展的人工增雨试验的定量相对增雨效果为 47%,冬春季人工增雪试验的定量相对增雪效果为 40%。

3) 从区域回归试验中可以看出,气温较低、降雪性质为纯雪时,进行气球悬挂焰弹增雪效果十分显著,焰弹增雪效果可达 57%以上;而气温较高,降水性质为雨夹雪或湿雪时,进行气球悬挂焰弹增雪效果较差,平均增雪效果仅为 15.5%。

4) 降水过程出现频繁、降水过程持续时间长的月份人工增雨的效果更为显著,如 7 月增雨效果为 67.2%,这与适宜人工增雨的过程较多,增雨云系中水汽含量充沛,AgI 催化充分有关。

5) 一个增雨(雪)点的催化面积是有限的,若在有限区域中多设增雨(雪)点,同时进行增雨(雪)作业,不同区域间进行联合作业,其催化作用将更为充分,增雨(雪)效果也将会更为显著。

参考文献:

- [1] 李大山,章澄昌,许焕斌.人工影响天气现状与展望[M].北京:气象出版社,2002.
- [2] 胡志晋.检验人工降水效果的协变量统计分析方法[J].气象,1979,6(9):31-33.
- [3] 曾光平,方化珍,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.
- [4] 曾光平.非随机化人工降雨试验效果评价方法研究[J].大气科学,1998,18(2):232-242.
- [5] 叶家东,范蓓芬.人工影响天气的统计数学方法[M].北京:科学出版社,1982.
- [6] 中国气象局科技发展司.人工影响天气岗位培训教材[M].北京:气象出版社,2003.
- [7] 章澄昌.人工影响天气概论[M].北京:气象出版社,1992.
- [8] 曾光平.人工降水[M].福州:福建科学技术出版社,1997.
- [9] 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,2000,26(4):37-40.
- [10] 钱 莉,杨永龙,杨晓玲.祁连山东部人工防雹消雹效果评估[J].地球科学进展,2005,20(特刊):46-50.

Assessment of precipitation stimulation experiment in eastern Hexi Corridor

YANG Yong-long^{1,2,3}, XUE Sheng-liang², QIAN Li², DING Rui-jin^{1,3}

(1. Arid Climate Research Institute, CMA, Lanzhou 730020, China; 2. Wuwei Meteorology Bureau, Wuwei, Gansu 733000, China; 3. Key Laboratory of Arid Climate Change and Reducing Disaster, Lanzhou 730020, China)

Abstract: The impact of precipitation stimulation was analyzed in Liangzhou district of eastern Hexi Corridor during summer and autumn from 1997 to 2004 with anti-aircraft gun and during winter and spring from 2002 to 2004 with pyrotechnic shoot by means of non-random experiment, such as sequential test method, regional comparative experiment and regional regression test method. It was found that the total rainfall increased by 134mm during summer and autumn from 1997 to 2004, and the mean increasing rate of rainfall was 47%; the total snowfall increased by 12.5mm during winter and spring from 2002 to 2004, and the mean increasing rate of snowfall was 40%. The operation of rain (snow) stimulation was quite effective and feasible in eastern Hexi Corridor. The rational seasons, spot distribution and ideal time of precipitation stimulation in Wuwei city were also discussed.

Keywords: rain (snow) stimulation; impact; assessment; eastern of Hexi Corridor