

# 祁连山非随机试验下地面碘化银烟炉作业合理性研究

孙占峰, 郭小芹, 李光明, 王兴涛

甘肃省武威市气象局, 甘肃 武威

收稿日期: 2023年8月20日; 录用日期: 2023年9月18日; 发布日期: 2023年9月26日

## 摘要

本文对甘肃省武威市大红沟、祁连、细水、乌鞘岭、毛毛山等9个地面烟炉人工增雨雪作业为研究对象, 运用非随机人工增雨试验中的区域对比数理统计效果检验评估方法, 通过对2020~2023年上述地面烟炉作业点非随机化作业过程及降水资料进行分析, 依托典型作业过程效益评价结果, 对地面烟炉作业条件进行分类分析, 确立阈值指标。

## 关键词

人工增雨雪, 碘化银, 烟炉, 降水, 合理性研究

## Study on Operation Rationality of Ground Silver Iodide Smoke Furnace under Non-Randomized Test in Qilian Mountain

Zhanfeng Sun, Xiaoqin Guo, Guangming Li, Xingtao Wang

Wuwei Meteorological Bureau, Wuwei Gansu

Received: Aug. 20<sup>th</sup>, 2023; accepted: Sep. 18<sup>th</sup>, 2023; published: Sep. 26<sup>th</sup>, 2023

## Abstract

In this paper, nine ground smoke furnaces with artificial rain and snow enhancement in Dahonggou, Qilian, Xishui, Wushaoling and Maomaoshan, Wuwei City, Gansu Province, were selected as the research objects. The non-random operation process and precipitation data of the above ground smoke furnaces during 2020~2023 were analyzed by using the regional comparison mathematical

statistics evaluation method in the non-random rain enhancement experiment. Based on the benefit evaluation results of typical working process, the working conditions of ground smoke furnaces were classified and analyzed, and the threshold index was established.

## Keywords

Artificial Rain and Snow, Silver Iodide, Smoke Furnace, Precipitation, Rationality Study

Copyright © 2023 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

地面碘化银烟炉(简称地面烟炉)是一种新型的地面碘化银发生装置,可根据地形科学布点和开展人工增雨雪作业。其工作原理是通过远程遥控点燃烟炉里安装的碘化银烟条,通过自然的上升气流作用将催化剂输送到云层的适当部位,催化剂与云相互作用形成增雨效果。因此对作业条件和作业时的要求比较苛刻。另一方面祁连山地形复杂,高原影响、群山环抱,是西北地区地形云的主要源地之一,也是开展地形云试验研究的重要场地,同时这种复杂的地形对烟炉的催化方案提出了更高的要求。建立适宜的催化方案和作业指标是祁连山区开展人工影响天气作业的重要保障。武威市近年来积极实施“祁连山及早作农业区人工增雨(雪)体系建设项目”等,已在武威段祁连山腹地布设9部地面烟炉,初步形成地形云地面烟炉催化作业布局。然而适宜于地面烟炉作业的指标体系尚未建立。因此,建立科学的作业指标对体系将对地面烟炉作业水平、作业效率和祁连山生态修复具有十分重要的意义。

## 2. 祁连山区基本情况

祁连山地形复杂,群山环抱,受地形和高原影响,地形云空中云水资源蕴藏丰富,是西北地区地形云的主要源地之一,山区降水和冰雪融水产生的地表径流每年可为石羊河内陆河水系提供年径流量约15.67亿方的自然降水。尹宪志等[1]研究表明,祁连山一带是西北地区降水云量最大地区之一,最大降水量达800毫米以上,但85%的水汽只蕴藏于山区云层当中,在自然条件下这些水汽转化为降水的比例不足15%,开展人工增雨(雪)是投入产出比高、见效快、增加降水量的直接、高效的“开源”途径之一。武威市自2010年开始大规模地面火箭人工增雨雪作业,随着经济社会的发展,空中航线不断加密,航班不断增加,导致地面火箭、高炮作业空域批复困难,造成作业时机错失,很大程度上影响了祁连山空中水资源的开发利用。近年来通过“祁连山及早作农业区人工增雨(雪)体系建设项目”实施,已在祁连山武威市天祝县大红沟、祁连、细水、乌鞘岭、毛毛山等地布设了9部地面碘化银烟炉,初步形成武威段祁连山地形云地面烟炉催化作业布局。

## 3. 研究区域增雨雪作业及检验评估

### 3.1. 人工增雨雪情况

武威市于2010年开始沿祁连山区陆续布设火箭点45个、高炮点14个、焰弹4个,2019年在祁连山腹地布设地面碘化银烟炉9部,并于次年开始作业。至此,共建成72个地面人工影响天气作业点,作业覆盖面积达到6000平方公里以上。近10年,共开展作业5934点次,发射火箭18,506枚、高炮弹15,205

发、焰弹 6017 枚、燃烧焰条 1403 根(2020 至 2023 年),有效增加了自然降水、祁连山区积雪和天然河道来水,本文数据分析采用 2020 至 2023 年相关降水数据。

### 3.2. 作业区 and 对比区

试验区选择位于祁连山北坡东部地面烟炉作业点所在乡镇,具体为武威市凉州新华、古浪县黑松驿、十八里铺、天祝大红沟、祁连、安远、张掖市肃南县皇城,总面积 5184 km<sup>2</sup>,区域内年平均降水量 285.9 mm;对比区选择地理位置相似的金昌市永昌县,总面积 5879 km<sup>2</sup>,区域内年平均降水量为 206.9 mm。由于所选的对比区位于天气系统上游,处在试验区的上风方向(500 hPa 风向为 NW),而试验区相对于对比区位于天气系统下游,因对对比区不会受到试验区地面烟炉碘化银烟剂催化的污染,且两地均属于温带干旱与半干旱气候,符合对比区与试验区选择的要求,见图 1、表 1。

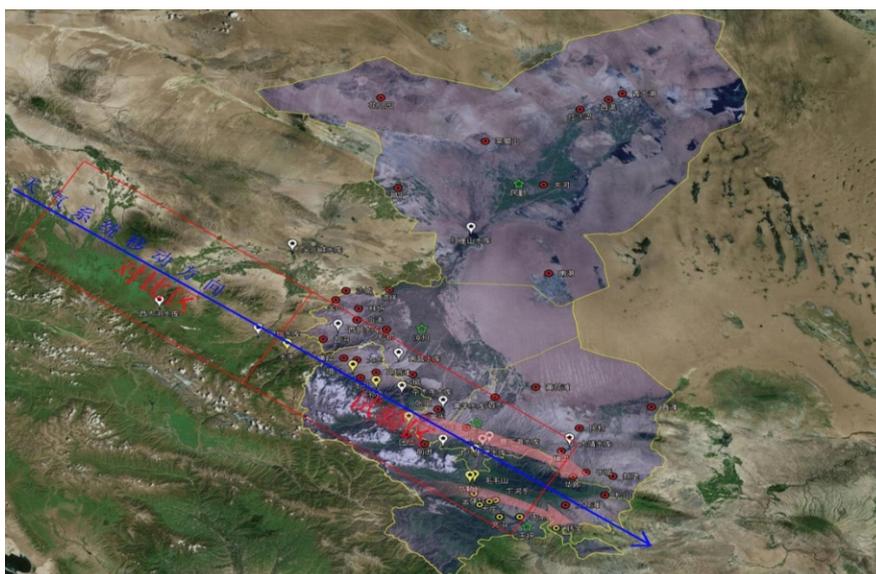


Figure 1. Distribution chart of test and contrast districts of artificial rain  
图 1. 人工增雨试验对比区分布图

Table 1. General situation about test and contrast districts  
表 1. 对比区和实验区基本情况

	地名	面积(km <sup>2</sup> )	海拔高度(m)	年降水量(mm)	气候特征
试验区	凉州区新华	43	1540	167	温带干旱气候
	古浪县黑松驿	134	2580	269.2	温带干旱气候
	古浪县十八里堡	89	2332	269.2	温带干旱气候
	天祝县大红沟	250	2485	310.2	温带半干旱气候
	天祝县祁连	490	2490	302.7	温带半干旱气候
	天祝县安远	206	2759	419.3	温带半干旱气候
	肃南县皇城	3972	2072	263.5	温带半干旱气候
	总面积	5184	平均降水量	285.9	
对比区	永昌县	5879	2093.9	206.9	温带干旱气候
	总面积	14,968	平均降水量	252.8	

### 3.3. 区域对比检验实验

武威段祁连山开展的人工增雨雪作业，其目的为增加山区降水和冰雪储备，服务祁连山生态环境保护及抗旱减灾，作业时依据降水天气条件，属非随机试验，采用人工增雨效果检验评估中公认的一些方法进行检验[2]。

以对比区永昌县同期降水量为试验区自然降水量的预估值，其前提是假定对比区与试验区的自然降水量为均匀分布空间。选取试验区设定实测雨量阈值为有效作业雨量，需要同时满足的条件还有：试验区在本次降水天气过程中实施了地面烟炉人工增雨雪作业，而对比区未开展任何形式的人工增雨雪作业，对比区不受作业区任何形式的催化剂污染。

在实验检验中假定符合要求的降水天气过程次数为  $n$ ，有效催化的正作用次数记为  $p$ ，过度催化或不到位催化导致的反作用次数  $q$ ，在有效催化的正作用中取最小相对增雨率作为本方法的效果值。

检验效果的显著性

设： $H_0: \sum X_{1i} = \sum X_{2i}$ ，即人工增雨作业区与对比区降雨量无显著差异。

检验同公式(1)，

$$u = (\bar{x}_1 - \bar{x}_2) / \left( \sqrt{\frac{\delta_2}{n_2} + \frac{\delta_1}{n_1}} \right) \quad (1)$$

$\bar{x}_1$  为作业区作业后降水量的平均值， $\bar{x}_2$  为对比区同期降水量的平均值， $\delta_1$  为作业区作业后降水量的方差， $\delta_2$  为对比区同期降水量的方差， $n_1$  为作业区作业后的样本数、 $n_2$  为对比区同期的样本数。计算得  $u$ ，给定置信度  $\alpha$  和置信区间  $ua$ 。当  $u$  在置信区间之内，则接受原假设，说明试验区增雨后的降水量与对比区降水量无显著差异；当  $u$  在置信区间之外，则拒绝原假设，说明试验区增雨后的降水量明显高于对比区的降水量。

### 4. 所用资料及相关数据的处理

依据武威市地面烟炉作业点及相关地域区域气象站布点情况，为使资料序列尽可能保持完整性和可靠性，降雨雪资料选取天祝、乌鞘岭、古浪、凉州及永昌县，共 5 个站点的 2020~2023 年的逐月气象观测数据。综合考虑祁连山区地貌种类多，地形复杂的因素，同时考虑降水过程中的空间分布不均匀性，故而为使效果检验更加科学和接近理论实际，采用面雨量降水资料，理论上也可以进一步确保增雨效果检验更加客观。

某地某一时间段内按面积求出的平均降水量称为面雨量，公式表示为：

$$\bar{R} = \frac{1}{A} \int_A R dA \quad (2)$$

式中  $\bar{R}$  为面雨量， $R$  为有限元  $dA$  上的降雨量，为指定区域的面积。

算数平均法、森多边形法等面雨量计算常用的方法。方慈安等[3]用气象资料算数平均法、泰森多边形法、气象资料加水文资料算数平均法对洞庭湖流域的面雨量进行计算，发现气象资料算数平均法、森多边形法计算的面雨量基本无差异。徐晶等[2]认为雨量站分布稠密均匀，算数平均法简单易行。综上所述，这里面雨量采用算数平均法计算，算公式如下：

$$\bar{R} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n r_i \quad (3)$$

式中  $\bar{R}$  为面雨量， $r_i$  为雨量点的降水量，为区域内雨量点的个数。逐日面雨量计算时，对通过质量检验的区域站日降水量计算算数平均值作为日面雨量资料。

序列试验中试验区逐月面雨量计算为凉州区新华南营水库、古浪县黑松驿、十八里堡、天祝县大红沟、

祁连、安远乌鞘岭、肃南皇城 7 个区域自动站逐月降水量的平均值, 显著性检验所用资料为月面雨量资料。

区域对比、双比、区域历史回归试验中试验区的月面雨量计算同序列试验, 对比区月面雨量计算为永昌县国家级自动站逐月降水量的平均值。区域对比、区域历史回归试验中显著性检验所用资料为对比区和试验区月面雨量资料; 双比试验中显著性检验所用资料为试验区日面雨量  $\geq 2.0$  mm 的降水资料。

## 5. 区域对比试验效果检验

### 5.1. 增雨效果统计

用 2020~2023 年试验区和对比区中的历史月面雨量进行相关分析(见图 2), 发现试验区与对比区的平均月面雨量的相关系数  $r = 0.768$ , 用  $t$  检验求出  $t = 5.28 > t_{\alpha=0.01} = 2.79$ , 通过了  $\alpha = 0.01$  的信度检验, 可选取对比区的实测降水与增雨试验区的增雨后的降水进行区域对比试验。选取试验区日面雨量  $\geq 2.0$  mm 的降水为有效作业, 剔除日面雨量  $\geq 2.0$  mm 未进行人工增雨作业或对比区也进行人工增雨作业的样本。2020~2023 年共开展地面烟炉增雨雪作业 308 次, 满足条件的样本共有 106 次, 增雨为正效果的为 77 次, 负效果为 29 次, 正效果远大于负效果次数, 试验区最小增雨效果为 9%。

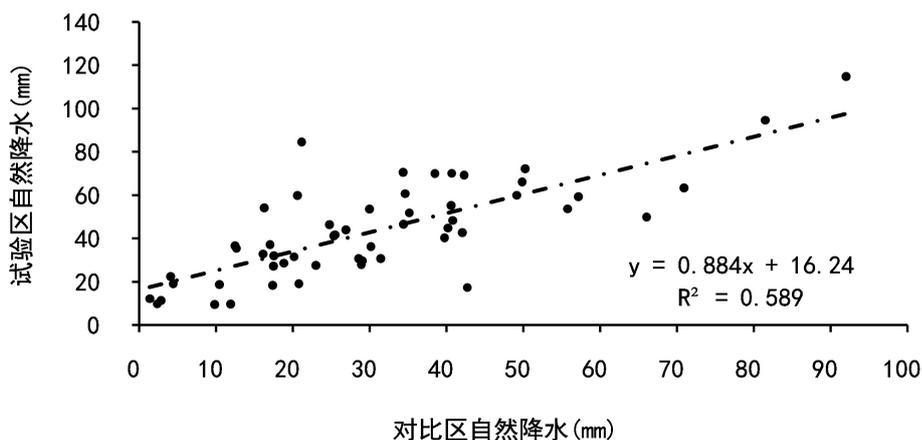


Figure 2. Scatter plots of monthly precipitation in the comparison area and the test area from 2020 to 2023

图 2. 2020~2023 年对比区和试验区逐月降水量散点图

### 5.2. 增雨雪效果检验

2020~2023 年共开展地面烟炉增雨雪作业 308 次, 所取的样本数远大于数值计算要求的次数, 故采用  $u$  检验, 试验区进行增雨的月份数  $n = 36$ , 作业区作业后月平均值降水量  $\bar{x}_1$  为 51.1 mm, 对比区同期平均值降水量  $\bar{x}_2$  为 35.2 mm, 作业区作业后降水量的标准差  $S_{X1}$  为 73.5 mm、对比区同期降水量的标准差  $S_{X2}$  为 19.5 mm, 根据公式 3 计算  $u = 1.652$ 。由于  $u < u_{\alpha=0.10} = 1.645$ ,  $\alpha < 0.1$ , 说明试验区增雨效果显著(见表 2)。

Table 2. Main parameters of the contrasting experiments of artificial rain

表 2. 试验区人工增雨区域对比试验各参量

增雨月数	作业区月平均面雨量 $\bar{x}_1$ (mm)	对比区月平均面雨量 $\bar{x}_2$ (mm)	作业区月面雨量标准差 $S_{X1}$ (mm)	对比区月面雨量标准差 $S_{X2}$ (mm)	最小增雨率 $p$ (%)
36	51.1	35.2	73.5	47.8	2381
	置信度 $\alpha$		置信区间 $u_\alpha$		显著性分析 $u$
	0.1		1.645		1.652

### 5.3. 试验效果的统计方案比较

以上效果评估试验均证明在祁连山东北部 2020~2023 年开展的地面烟炉人工增雨雪试验为正效果, 区域对比试验效果是显著的, 通过了  $\alpha \leq 0.1$  的信度检验。由大量人工增雨非随机化试验证明[4]: 由于天气形势变化、地形差异以及作业时机选择偏向于天气条件有利于作业区等主观因素, 引起的假效果可能较大、功效较低。因此, 2020~2023 年在祁连山武威段开展的地面烟炉人工增雨雪试验年绝对增水量为 59.6 mm, 平均相对增水率为 26%。

## 6. 结论

1) 祁连山人工增雨雪作业对象主要为对流云、层状云和山区地形云。因天气类型, 云系的结构等影响, 各地判别指标亦有所差异, 应根据各地气象台预报及云高、云厚、含水量等具体判别。

2) 祁连山地形云作业效果较佳。由于地形云为具有一定湿度的空气在盛行风作用, 在地形抬升作用下形成。抬升过程中由于气温降低, 达到一定高度情况下水汽演变为饱和状态。且地面烟炉大多安置在地势较高的山脊、山顶或迎风坡等位置, 地面烟炉燃烧播撒过程中烟剂可直接播撒入云。

3) 主要的大范围降水系统为层状云系, 由于范围比较大, 移动缓慢, 作业机会多, 但也要选择云系发展比较旺盛的时机作业, 过早、过晚或处云系处于消散阶段时作业效果不佳。

4) 积状云是夏季祁连山一带最主要的降水云系。由于其底部温度较高, 含水量丰富, 降水可通过暖雨过程产生, 也可通过冰晶过程形成。对积云进行人工增雨, 降水量较大, 适合在夏秋雨季开展增雨增雨作业。作业时一定要借助上升气流, 抢抓其发展旺盛的阶段开展作业, 让上升气流将其带入云中, 提高催化效果。

5) 祁连山地面烟炉人工增雨雪作业可行性很高, 通过运用先进的人工影响天气技术, 作业目的由应急减灾向生态修复方向转变, 将更好服务于祁连山环境保护, 实现祁连山生态文明的可持续发展。

## 基金项目

非随机实验下地面烟炉作业合理性研究(ZcMs2023-28)。

## 参考文献

- [1] 尹宪志, 王毅荣, 徐文君, 等. 祁连山空中云水资源开发潜力研究新进展[J]. 沙漠与绿洲气象, 2020, 14(6): 134-140.
- [2] 李大山, 章澄昌, 许焕斌, 等. 人工影响天气现状与展望[M]. 北京: 气象出版社, 2002: 325-345.
- [3] 方慈安, 潘志祥, 叶成志, 等. 几种流域面雨量计算方法的比较[J]. 气象, 2003, 29(7): 23-26.
- [4] 徐晶, 姚学祥. 流域面雨量估算技术综述[J]. 气象, 2007, 33(7): 15-21.