

# 祁连山北坡地形云人工增雨（雪）试验研究

尹宪志<sup>1</sup> 王研峰<sup>1\*</sup> 李照荣<sup>2</sup> 程鹏<sup>1</sup> 李宝梓<sup>1</sup> 王毅荣<sup>1</sup> 张丰伟<sup>1</sup> 杨瑞鸿<sup>1</sup> 庞朝云<sup>1</sup>

(1 甘肃省人工影响天气办公室, 兰州 730020; 2 甘肃省气象局, 兰州 730020)

**摘要:** 概述介绍了祁连山北坡地形云研究试验的进展及相关成果等。该试验重点在祁连山试验区开展作业天气背景条件分析、综合观测对比、增雨作业技术验证等研究试验工作, 并就祁连山北坡地形云的特殊性, 开展针对性研究, 提高北坡地形云的降水效率。此外, 通过研究试验, 掌握地形云作业技术, 为准确预测和预报作业条件、作业量、作业时机等方面提供科学的方法和手段。

**关键词:** 祁连山北坡, 地形云, 人工增雨(雪), 试验

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2021.05.017

## Experimental Study on Artificial Rain (Snow) Enhancement of Topographic Clouds on the Northern Slope of Qilian Mountains

Yin Xianzhi<sup>1</sup>, Wang Yanfeng<sup>1\*</sup>, Li Zhaorong<sup>2</sup>, Chen Peng<sup>1</sup>, Li Baozi<sup>1</sup>, Wang Yirong<sup>1</sup>, Zhang Fengwei<sup>1</sup>, Yang Ruihong<sup>1</sup>, Pang Zhaoyun<sup>1</sup>

(1 Gansu Weather Modification Office, Lanzhou 730020 2 Gansu Province Meteorological Bureau, Lanzhou 730020)

**Abstract:** The experimental progress and related results of the topographic cloud research experiment on the northern slope of Qilian Mountain are reviewed in this paper. The field experiment focuses on the analysis of operating weather background conditions, comprehensive observation comparison, and verification of precipitation enhancement techniques in the Qilian Mountain test area, and conducts targeted research on the particularity of topographic clouds on the northern slope of Qilian Mountain to improve precipitation efficiency of the northern slope of topographic clouds. In addition, and The field test provide scientific methods and means for accurately predicting and forecasting operating conditions and time by through research and experimentation, master the topographic cloud operation technology.

**Keywords:** the northern slope of Qilian Mountains, the topographic clouds, artificial rain (snow) enhancement, the field experiment

### 0 引言

祁连山是青藏高原东北部重要的生态屏障, 是黄河流域重要水源产流地, 由于人类活动的干扰和气候变暖等因素的影响, 祁连山地区的各种生态系统日趋恶化, 生产力急剧下降, 水源涵养等生态系统功能降低, 河流径流减少, 已成为严重制约该区经济社会发展的重大问题<sup>[1-3]</sup>。

祁连山地区大部分降水偏少, 但由于祁连山的地

形抬升作用, 山区有利于地形云的发展, 是祁连山地区水资源的重要补给。大量人工增雨试验结果表明, 地形云是人工增雨效率较高的催化作业云系, 祁连山增雨试验统计分析得出人工增雨雪可增加降水15%左右<sup>[4-5]</sup>。在祁连山开展地形云人工增雨(雪)试验研究, 可以为有效开发空中云水资源、提高地形云降水效率和增加地面降水量提供科技支撑, 是改善祁连山地区水资源欠缺的有效途径之一, 也是恢复和改善西北生态脆弱地区的重要途径<sup>[6]</sup>。

地形云因地形的影响而变得复杂, 特别是地形云形成过程中水汽场、气流场受地形影响形成不同特征的地形云, 其宏观和微观云物理特征也变化多端, 了解和掌握这些特征和机理, 是科学开展祁连山北坡人工增雨(雪)业务必不可少的重要一环<sup>[7-8]</sup>。

因祁连山地形云的复杂性、广泛性、多样性、以及作业背景的气候特征差异性等, 开展地形云的水汽场、气流场、云物理特征等的综合观测非常必要; 同

收稿日期: 2021年7月24日; 修回日期: 2021年8月24日  
第一作者: 尹宪志(1964—), Email: gsqxjywcxyz@163.com  
通信作者: 王研峰(1986—), Email: wangyanfeng\_1986@163.com  
资助信息: 祁连山北坡地形云人工增雨(雪)技术研究试验(RYSY201901); 第二次青藏高原综合科学考察研究(2019QZKK010405); 西北区域人工影响天气能力建设项目研究试验项目(ZQC-R18208); 甘肃省气象局创新团队(GSQXCXTD-2019-02); 甘肃省气象局英才计划(2122rczx-英才计划-01)

时,开展针对地形云的人工增雨(雪)作业指标的验证和各类作业装备催化效果的验证工作,对提高地形云降水效率也起到关键作用。此外,通过研究试验,掌握地形云作业技术,为准确预测和预报作业条件、作业量、作业时机等方面提供科学的方法和手段。

## 1 试验内容

### 1.1 试验概况

本研究在祁连山中段北坡开展进行地形云观测,在试验区的民乐县人影作业区开展地形云外场试验,对祁连山大范围降水过程进行立体观测,包括地面云雷达、C波段双偏振雷达、探空火箭、微波辐射计等综合观测,为全面了解祁连山地形云成云致雨条件和增雨潜力奠定了基础。

### 1.2 试验内容和方法

利用试验区雷达、降水类天气现象观测仪、探空等观测仪器在祁连山试验区开展作业天气背景条件分析、综合观测对比、增雨作业技术验证等开展研究试验,形成高质量的祁连山区探测数据集,结合数值模式,分析得出试验区不同降水类型的平均雨滴谱特征,地形云中大气水汽含量、液态水含量等,获得地形云水汽场气候特征和时空变化特征,得出增雨(雪)条件判别指标及作业技术方案,形成可业务应用的技术指标体系。

## 2 试验结果初步分析

### 2.1 人工增雨(雪)催化试验及效果检验

2019年10月开始开展祁连山区域增雨(雪)试验,并收集作业效果信息,截至目前,祁连山北坡实施地面人工增雨(雪)117点次,共收集15次作业过程,86条作业信息。联合西北区域气候中心对作业区域开展卫星遥感监测的作业效果检验评估。2020年2月9日祁连山区积雪总面积比历年同期增加了25.77%,其中东段、中段和西段的积雪面积分别比历年同期增加了38.45%、17.81%和25.99%。2020年3月下旬,根据对祁连山冰川积雪的实地监测发现,祁连山腹地海拔近4000 m的宁缠垭口(冰川雪线变化动态监测点)积雪面积和厚度为近7年来最大,雪线明显下移、雪深加厚。

### 2.2 祁连山云水资源分析

利用欧洲中心 $0.5^{\circ} \times 0.5^{\circ}$ 高分辨率再分析资料,结合卫星和地面降水观测资料,分析了祁连山水凝物总量(图1)和祁连山降水总量(图2),结果表明2016—2018年祁连山地区年平均水汽总量约为38053.7亿t,水凝物为2293.9亿t;总降水量为1771.7亿t;水汽更新周期平均为11.3 d,水凝物更新周期为2.4 h;水汽降水效率约为4.7%,水凝物降水效率约为77.2%;空中云水资源总量约为522.2亿t。

水汽更新周期平均为11.3 d,水凝物更新周期为2.4 h;水汽降水效率约为4.7%,水凝物降水效率约为77.2%;空中云水资源总量约为522.2亿t。

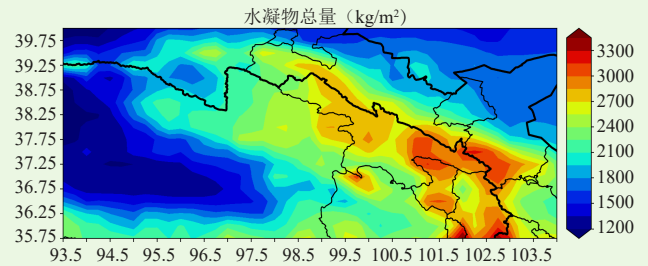


图1 2016—2018年祁连山水凝物总量(单位: mm)

Fig. 1 Total amount of hydrometeor in Qilian Mountains during 2016 to 2018 (unit: mm)

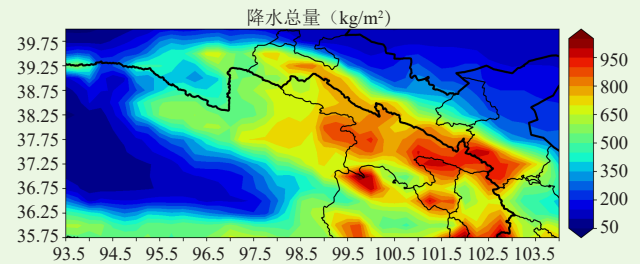


图2 2016—2018年祁连山降水量(单位: mm)

Fig. 2 Total amount of precipitation in Qilian Mountains during 2016 to 2018 (unit: mm)

### 2.3 祁连山地区地形地貌

研究祁连山的地形地貌,揭示不同天气类型下地形地貌下祁连山云和降水机理,为人工增雨作业提供科学依据。祁连山 $30^{\circ}$ 以下坡度占据86.6%(图3),空间分布格局复杂,沟壑遍布,各个坡向占比例均衡(图4);祁连山草地、裸地占据86.7%;其次森林、水体、农地占用10.5%,具有明显的空间分布格局(图5)。

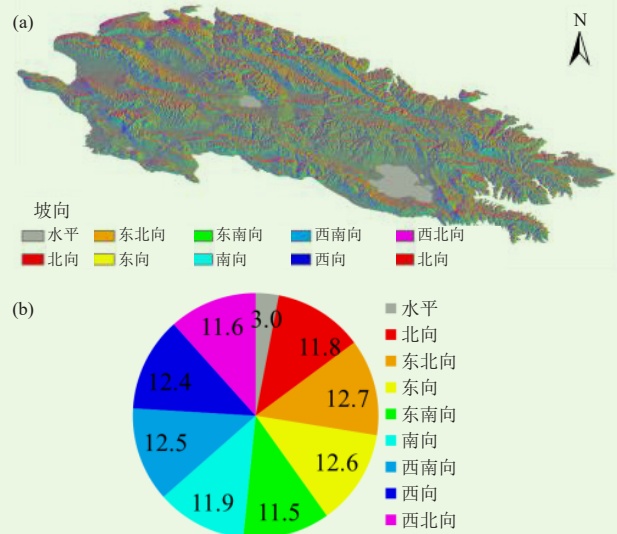


图3 祁连山坡向分布(a)和比例(b)

Fig. 3 The distribution (a) and proportion (b) of slope aspect in Qilian Mountains

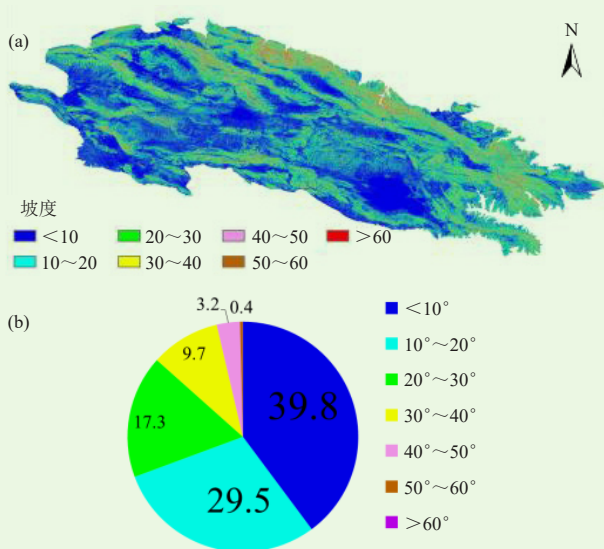


图4 祁连山坡度角分布 (a) 和比例 (b)

Fig. 4 The distribution (a) and propotion (b) of slope angle in Qilian Mountains

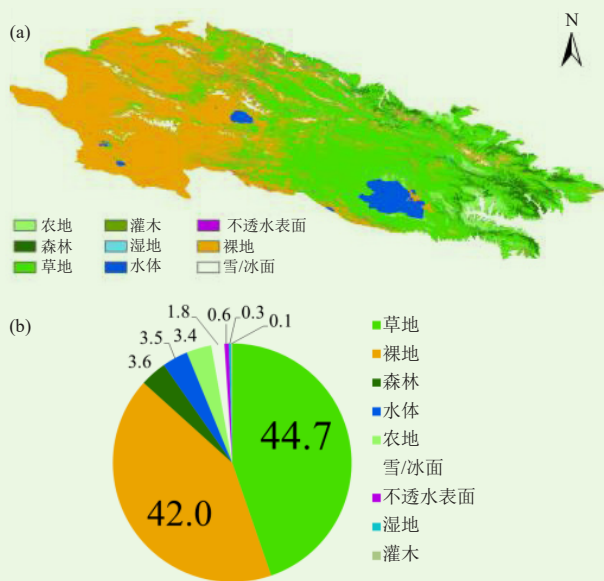


图5 祁连山植被分布 (a) 和占比 (b)

Fig. 5 The distribution (a) and propotion (b) of vegetation in Qilian Mountains

## 2.4 云滴谱特征

2020年8月29日, 甘青两省联合实施祁连山有人飞机探测, KA-350探测飞机从西宁机场起飞, 经门源(南坡)一永昌(北坡)一民乐(北坡)一祁连(南坡), 完成跨越祁连山探测后返回西宁; 位置信息: 门源10: 14一永昌12: 06; 云顶高: 6800 m; 云顶温度:  $-8.1\text{ }^{\circ}\text{C}$ ; 云厚度: 2.3 km. 分析云滴谱特征(图6), 得出云层下部粒子主要集中在 $10\sim 20\text{ }\mu\text{m}$ 左右,  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 层及以下各尺度粒子均有分布, 其以上在

$7\sim 9\text{ }\mu\text{m}$ 尺度段出现断层, 云滴在经过 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 层后, 由于固态粒子融化变为液态,  $<10\text{ }\mu\text{m}$ 的粒子碰并增长数浓度减小,  $>20\text{ }\mu\text{m}$ 的粒子在下落过程中破碎, 数浓度明显减小,  $10\sim 20\text{ }\mu\text{m}$ 的粒子由于碰并和破碎造成数浓度明显增大。

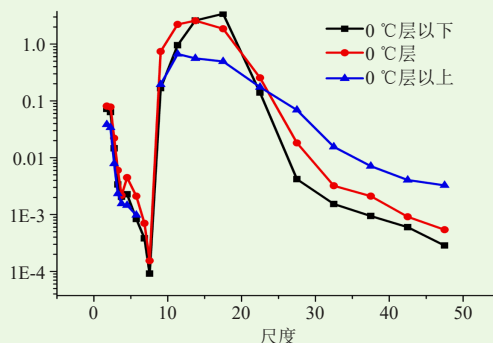


图6 云滴谱特征

Fig. 6 The characteristics of cloud droplet spectral

## 2.5 催化作业雨滴谱变化特征

以2020年8月21日在祁连山开展的人工增雨外场试验为例, 分析了祁连山北坡增雨作业前后雨滴谱特征参量和谱型的变化。作业后雨滴尺度、总数浓度、雨强等均出现增大趋势。作业后雨滴谱的谱宽逐渐变宽, 作业后10 min, 峰型由单峰转变为双峰, 谱宽持续增大。

## 3 结语

祁连山是我国西部重要生态安全屏障和冰川与水源涵养生态功能区, 通过研究可以提高空中水资源的利用率, 缓解地区水资源短缺, 提升区域生态环境承载能力, 提高祁连山地形云人工增雨(雪)作业的科技水平和综合业务服务能力。本研究未来将继续在云模式模拟、云催化模拟、降水机理、地形云对比观测和空中云水资源潜力等方面, 开展进一步的研究。

### 参考文献

- [1] 车克钧, 傅辉恩. 祁连山森林、冰川和水资源现状调查研究. 北京林业大学学报, 1998, 20(6): 95-99.
- [2] 宜树华, 刘洪利, 李维亮, 等. 中国西北地区云时空分布特征的初步分析. 气象, 2003, 29(1): 7-11.
- [3] 张杰, 韩涛, 王健. 祁连山区1997—2004积雪面和雪线高度变化分析. 冰川冻土, 2005, 27(5): 649-654.
- [4] 张强, 孙昭莹, 陈丽华, 等. 祁连山空中云水资源开发利用研究综述. 干旱区地理, 2009, 32(3): 381-389.
- [5] 钱莉, 王文, 张峰, 等. 河西走廊东部春季人工增雪实验效果评估. 干旱区研究, 2006, 23(2): 349-354.
- [6] 杨永龙, 薛生梁, 钱莉, 等. 河西走廊东部人工降水试验效果评估. 干旱地区农业研究, 2006, 24(5): 218-224.
- [7] 周毓荃, 蔡森, 欧建军, 等. 云特征参数与降水相关性的研究. 大气科学学报, 2011, 34(6): 641-652.
- [8] 郭学良, 付丹红, 胡朝霞. 云降水物理与人工影响天气研究进展(2008~2012年). 大气科学, 2013, 37(2): 351-363.