

# 青海高原人工消（减）雪试验效果分析探讨

周万福<sup>1,3</sup> 姚展予<sup>2</sup> 马学谦<sup>1</sup> 田建兵<sup>1</sup> 贾烁<sup>2</sup> 张博越<sup>1</sup> 赵文慧<sup>2</sup> 王伟健<sup>2</sup> 张沛<sup>2</sup>

(1 青海省人工影响天气办公室, 西宁 810001; 2 中国气象科学研究院中国气象局云雾物理环境重点实验室, 北京 100081; 3 青海省防灾减灾重点实验室, 西宁810001)

**摘要:** 利用2017年1—5月在青海省泽库县实施的人工消（减）雪试验, 应用气象台站和布设的测雪点数据, 通过双比分析方法分析人工消（减）雪作业效果, 探讨了消（减）雪作业设计, 使用物理检验分析消（减）雪试验过程。结果显示: 通过4次过程作业前、后的液态水含量分析, 所选作业高度较合适, 水汽条件较好, 作业后整体回波强度减弱, 回波体积减小, 后续回波有继续发展, 但持续时间较短; 双比分析方法得到4次相对消（减）雪1%, 绝对消（减）雪0.03 mm。通过对作业过程的定量统计分析和基于观测资料的定性分析表明, 人工消（减）雪作业有一定的减雪作用, 但作业不适当也有可能增大降雪量而形成雪灾, 还需通过大量实例总结和验证开展人工消（减）雪的技术可行性和技术方案。

**关键词:** 人工消（减）雪, 效果分析

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2023.04.009

## Effect Analysis on Artificial Snow Dispersal Experiment in Qinghai Province

Zhou Wanfu<sup>1,3</sup>, Yao Zhanyu<sup>2</sup>, Ma Xueqian<sup>1</sup>, Tian Jianbing<sup>1</sup>, Jia Shuo<sup>2</sup>, Zhang Boyue<sup>1</sup>, Zhao Wenhui<sup>2</sup>, Wang Weijian<sup>2</sup>, Zhang Pei<sup>2</sup>

(1 Weather Modification Office of Qinghai Province, Xining 810001; 2 Key Laboratory of Cloud Physics of China Meteorological Administration, Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081; 3 Key Laboratory of Disaster Prevention and Mitigation in Qinghai Province, Xining 810001)

**Abstract:** Based on weather station data and snowfall data from the target area and the contrast area, the effect of artificial snow dispersal in Zeku County of Qinghai Province from January to May 2017 is analyzed with double contrast method. The design of the operation for artificial snow dispersal is discussed and the mechanism of the operation is analyzed by physical investigation. According to the research results, the change of liquid water content before and after the four operations proves that the selected operation height was appropriate, with proper water vapor conditions. After operation, the echo intensity decreased, so did the echo volume. Although the echo continued to develop, the duration shortened. Based on double contrast method, it is found that, for the four experiments, the relative reduction of snow is 1% and the absolute reduction of snow is 0.03 mm. The quantitative statistical analysis of the operation processes and the qualitative analysis of the observation data show that the artificial snow dispersal has a certain effect on snow reduction. However, it may also increase the snowfall with improper operation. Hence the technical feasibility and plans for artificial snow dispersal have to be validated and summarized by a large number of experiments.

**Keywords:** artificial snow dispersal, effect analysis

### 0 引言

青海高原高海拔和常年气温偏低的地理气候环境是雪灾发生的客观条件。冬春季青海省大部分地区具有“十年一大灾, 五年一中灾, 年年有小灾”的雪灾规律<sup>[1-3]</sup>, 迫切需要通过人工影响天气来加强雪灾监测、防御及减灾能力。人工消（减）雨（雪）技术属于

气象科学前沿<sup>[4-6]</sup>, 众多科技工作者进行了这方面研究。王婉等<sup>[7]</sup>利用区域历史回归方法对北京市2006年人工影响天气作业效果进行了统计评估。王俊等<sup>[8]</sup>运用激光雨滴谱仪对人工消（减）雨作业的效果进行物理检验。樊明月等<sup>[9]</sup>运用三维云模式对2008年奥运会开幕式人工消（减）雨作业进行了数值模拟和过量播撒催化效果进行研究。何晖等<sup>[10-11]</sup>用雷达资料分析了2008年奥运会开幕式人工消（减）雨过程的回波特征。尹宪志等<sup>[12]</sup>利用降水场分析西北地区一次人工消雨试验效果, 进行了人工消雨防线的设计。本文利用两种统计检验方法分析2017年1—5月青海省泽库县人工消

收稿日期: 2022年5月12日; 修回日期: 2023年5月10日  
第一作者: 周万福(1976—), Email: zhouwanfu@sina.com  
资助信息: 国家自然科学基金项目(42165008, 41775139);  
青海省科技厅研究项目(2021-ZJ-745)

(减)雪试验作业效果,通过物理检验分析消(减)雪作业机理。

## 1 人工消(减)雪理论依据及青海省雪灾特征

### 1.1 理论依据

人工消(减)雪是指在适当条件下通过人工手段对局部大气的宏微观物理过程进行人工干预,设法改变自然云的降水状态或过程,使降水提前,或拖延降水过程,致使降水时空再分布。人工消(减)雪的原理与人工增雨近似,人工消(减)雪是人工影响天气技术的延伸和扩展。人工消(减)雪是在降雪云中过量播撒催化剂,过量播撒产生的人工冰核争夺云中水汽资源,抑制雪晶和大滴粒子的长大,从而达到抑制降雪的目的。人工消(减)雪作业首先要对天气状况及其变化趋势进行细致的观测和预测,确定是否存在降雪的可能。如果预测有降雪的可能,则进一步掌握天气系统何时、何地可能产生降雪,之后针对拟保护区制定人工消(减)雪方案。消(减)雪方案有两种:一是根据天气系统的移向在保护区上游实施人工增雪作业,让降雪提前降到地面,从而减缓或消除保护区降雪;二是在保护区针对降雪云系进行过量播撒作业,充分“争食”云中的水分,使云滴很难长大,实现减弱或消除降雪的目的<sup>[4-5]</sup>。前种方案通常在上游60~120 km的距离实施人工增雪作业,后者在目标区上风方大约30~60 km距离往云中过量播撒人工冰核。

### 1.2 人工消(减)雪试验风险

人工消(减)雪作业试验,需要对天气系统准确预测预警,精准判识云中过冷水、冰晶、水汽共存区,实施高效组织的人工催化作业,但此过程中多个环节需紧密配合,这为试验增加了不确定性,有可能试验效果不理想,甚至会产生适得其反的效果。目前人工消(减)雪只能在范围小、强度弱的降水天气过程中实施作业会取得比较理想的效果。若遇上强降水天气过程,即使开展了大范围、高强度的作业,但强天气系统的水汽输送更强,实施作业有可能会在保护区产生更大的降雪,使消雪减灾变为加重雪灾的情况。就目前的技术手段,在某些天气条件下还达不到完全人工消(减)雪的效果。

### 1.3 青海高原雪灾特征

雪灾是青海牧区的主要自然灾害之一,每年10月中下旬一次年5月上中旬,青南牧区玉树、果洛、黄南南部、海南南部等地区极易出现局地或区域性强降雪天气过程,加之气温较低,积雪难以融化,时常造成大雪封山、冻死饿死牲畜,使牧区人民生命财产遭

受巨大损失。一般用实测积雪深度资料和积雪持续时间来确定雪灾的严重程度。

#### 1.3.1 雪灾空间分布

2004—2013年,青海全省共出现雪灾208站次,除格尔木等11个站没有出现雪灾外,全省大多数地区出现了雪灾。发生频率最多的地区依次是天峻、玛沁、湟源、大通、兴海、贵南、都兰、泽库、河南,各站均出现2次以上雪灾。其次是共和、德令哈、都兰、达日、甘德、玉树、称多、曲麻莱,均出现了1次雪灾(图1)。雪灾重点发生区在玉树东部、果洛东北部、黄南南部、海南中南部、海西东部地区。此外对与雪灾相关的气象、畜业、牧业、居民、社会经济等评价因子进行综合评价,得到甘德、久治、称多、达日、玉树、班玛、泽库等地区为青海雪灾风险度最高发的7个中心<sup>[13]</sup>。

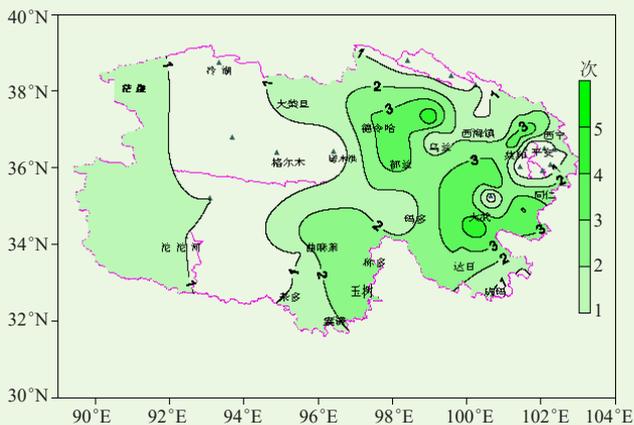


图1 2004—2013年青海省雪灾空间分布图

Fig. 1 Spatial distribution of snow disaster in Qinghai Province from 2004 to 2013

#### 1.3.2 雪灾随时间的变化

2004—2013年,青海省发生雪灾站次总体上呈下降趋势,但年际波动较大,2008年全省发生最大面积雪灾,2005年、2012年分别为第二、第三大范围年。雪灾主要发生在每年10月一次年5月,1—2月是雪灾发生的高峰期(图2)。

### 1.4 天气背景分析

#### 1.4.1 天气形势分型占比

通过对1961—1999年的500 hPa环流形势综合分析,青海省中到大雪天气环流形势主要有5种<sup>[14]</sup>,出现频率依次为两槽一脊型、西高东低型、两脊一槽型、东高西低型、纬向环流型(表1)。

#### 1.4.2 天气形势致灾分析

因前两类天气形势致灾达50%以上,因此以前两类为主要试验对象进行消减雪试验。

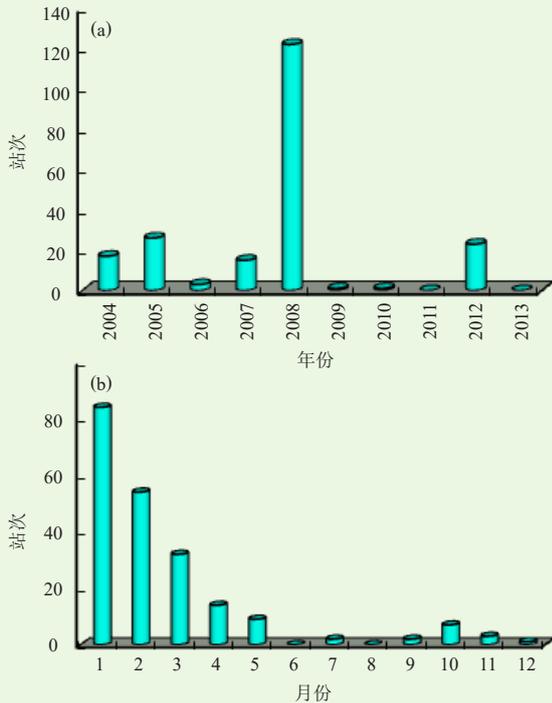


图2 2004—2013年青海省雪灾变化趋势 (a) 与各月雪灾站次分布 (b)

Fig. 2 Change trend of snow disaster (a) and the monthly distribution of snow disaster at meteorological stations (b) in Qinghai Province from 2004 to 2013

表1 青海省中到大雪天气环流形势

Table 1 Circulation situation of medium to heavy snow in Qinghai Province

天气形势	两槽一脊型	西高东低型	两脊一槽型	东高西低型	纬向环流型
出现次数	38	36	26	22	15
所占比例/%	28.0	26.3	19.0	16.1	11.0

1) 两槽一脊型。亚欧中高纬为明显的两槽一脊，中低纬南部印度地区或帕米尔高原附近多短波槽脊活动。高原短波槽经常形成并发展，造成明显的降雪天气过程，此类天气系统常发生于冬季，温度较低容易造成灾害。虽天气系统影响比较稳定，降雪量相对较小，但上空天气系统含有的水汽量和系统供给的水汽输送量均较大，在合适的天气条件下，容易产生较大的雪灾，因此需要对此类天气系统开展人工消（减）雪工作，减轻雪灾的损失。

2) 西高东低型。南支槽位于印度，高原南部有偏南气流，暖湿空气随偏南气流输送至高原南部，配合冷空气造成明显降雪天气过程。此类天气形势下，主要在系统的前期有暖湿气流供给，使得大量水汽通过偏南暖湿气流输送，而后期受北方冷空气的侵入，形成较大的降雪天气过程。此类天气降雪量的大小受冷空气侵入的多少影响，如果冷空气侵入较多，形成降雪的气象条件充足，则降雪量偏大。此种情况一般出

现在初春时段，加上高原地区海拔高、温度低，积雪难以融化，容易造成春季雪灾，因此对于此类天气系统需要开展较大强度的人工消（减）雪作业，才能降低雪灾的损失。

### 1.4.3 水汽来源分析

天气形势分析表明，青海中到大雪天气过程500 hPa上空水汽来源一般有三条：一条从阿拉伯海沿着中东槽前或印度西部的高压后部经巴基斯坦、帕米尔高原进入青藏高原西部，从高原西部到达青海省；第二条主要是沿孟加拉湾和印度槽前西南气流到达青海省；第三条一般是在副热带高压维持时随高压南部的偏东南气流从四川经甘肃到达青海省。随水汽来源不同，青海省产生的降雪强度有所不同。一般情况下，第一条到达青海省范围时，已经在中途有一定的消耗，进入青海省的水汽量有限，仅在有很好的环流形势配合下才能产生中到大雪；但后两者一方面携带的水汽通量较大，中途消耗的较少，在有利的天气形势下，极易造成灾害性天气，其中第二条路径在冬春季占的比例更高。因此，在开展人工消（减）雪试验时一定紧密跟踪和分析天气形势的发展，并特别关注水汽来源，科学适度地开展人工消（减）雪试验。

## 2 试验设计及试验过程

### 2.1 试验区选择

通过对上述雪灾发生时空分布、灾害程度以及人工影响天气作业能力和观测设备布设等方面综合考虑，并根据天气背景、水汽来源、冷空气侵入、作业能力、基础条件、效果评估对比区选择以及进行试验安全便利性等方面因素，最终选择黄南州泽库县为消雪目标区，同时把相邻的河南县作为对比区。试验时间选择在2017年1—5月，共进行4次人工消（减）雪。

### 2.2 试验方式

采用地面火箭作业方式实施过量催化作业。消（减）雪作业一般要求使云中过冷水丰富区域内的冰晶浓度要大于100个/L，从而抑制冰晶的生长，相应地，要求火箭催化作业人工冰核播撒率要大于 $1.0 \times 10^{15}$ 个/km，即根据火箭催化剂装载数量，每间隔10 min向上游3个不同方向实施催化作业，每轮催化至少发射30枚火箭，使催化剂量达到增雪剂量的3~5倍。

### 2.3 试验流程

依据探空资料（包括计算的K指数、SI指数、对流有效位能等）、实时雷达回波、雷电监测资料及卫星云图分析云系稳定度，将降水云系分为层状云、弱

积层混合云（对流性云系不足四成）和强积层混合云（对流性云系占四成以上）三种，对不同云系采用不同的作业方法。

第一步：根据天气过程预报，当72~24 h有适合实施消（减）雪试验的天气过程出现时，青海省人影办根据消（减）雪需求，结合各种模式预报产品和云物理量分析产品制定具体试验计划，并向外场作业组发布试验计划，包括地面作业时段和重点作业区域等信息。

第二步：试验条件潜力预报和试验预案制订。当24 h内有降水天气系统影响试验区时，制作发布未来24~3 h试验条件潜力预报。主要参考短期预报、短时预报和灾害性天气预报，结合卫星、雷达等实况监测和本省作业指标，制作试验区未来24~3 h试验条件潜力预报，包括云系性质和结构、潜力区分布、作业时段、作业方式等，每天定时向作业实施单位发布。

第三步：试验条件监测预警和试验方案设计。当临近作业时，按照临近预报制作并订正作业条件监测预警和试验方案，并向实施作业的部门及时发布。

第四步：跟踪指挥和试验作业实施。利用实时雷达数据，根据试验实际情况，实时、准确地发布地面作业指令，根据实际情况对作业指令进行调整。

第五步：试验作业效果检验。在作业过程结束后，收集汇总作业信息，同时开展对试验效果的直观对比分析和定量检验。

## 2.4 试验布局

人工消（减）雪试验作业设备采用区域内现有6部地面火箭发射装置，并新增4套移动式作业点。观测设备主要利用青海省人工影响天气办公室车载天气雷达及微波辐射计以及雨滴谱仪，同时，在泽库县（目标区）布设14个测雪点、河南县（对比区）布设6个测雪点，气象要素观测则利用区域内基准站和区域自动站设备。作业设备、观测设备布局具体见图3。根据催化剂反映时间、水汽条件、动力特征等方面的因素影响，以及主要天气系统盛行的高空风风向，试验目标区主要为作业点下游10~20 km范围内，因此泽库县主要保护区为布点位置的东部区域，而对比区主要为河南县以及泽库县西北区位置。

## 2.5 试验过程

2017年1—5月青海省冬春季人工消（减）雪试验抓住有利天气过程，共开展了4次人工消（减）雪作业：1）2月7日，高原短波槽和地面冷空气的共同影响，黄南州境内出现了一次降温降水天气过程，15: 18—15: 20（北京时，下同），泽库县10个地面

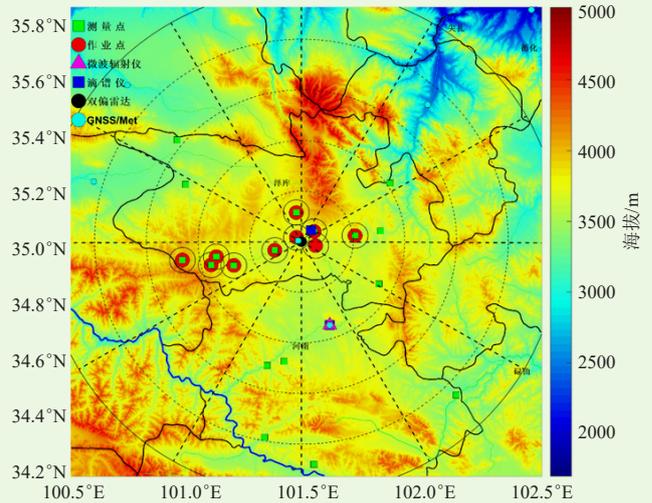


图3 试验区观测仪器和作业设备布局

Fig. 3 Layout of observation instruments and operation equipment in the test area

火箭作业点开展人工消（减）雪作业，共发射33枚火箭弹；2）2月21日，青海省大部受北部冷空气影响出现一次明显的降水天气过程，黄南南部由于受南支槽影响，出现明显降雪，18: 19—18: 24，泽库县9个作业点同时开展了第一轮地面火箭作业，发射27枚火箭弹；18: 33—18: 39，泽库县10个作业点同时开展第二轮地面火箭作业，发射33枚火箭弹；3）4月9日，青海省受北部冷空气和西南暖湿气流共同影响，出现一次大范围降水天气过程，其中黄南南部由于受南支槽影响，出现明显降雪，18: 31—19: 43，泽库县10个作业点共开展了44次作业，发射117枚火箭弹；4）4月24—26日，青海省受高原低涡切变影响，出现一次大范围降水天气过程，其中黄南南部由于受南支槽影响，出现明显降雪，09: 20—10: 42，泽库县10个作业点共开展了44次作业，共发射131枚火箭弹。具体作业概况详见表2。

表2 2017年1—5月人工消（减）雪试验作业概况  
Table 2 Overview of the artificial snow dispersal experiments during January—May 2017

作业时段	作业点/个	作业次数	火箭弹用量/枚
2月7日15: 18—15: 20	10	13	33
2月21日18: 19—18: 39	10	19	60
4月9日18: 31—19: 43	10	44	117
4月26日9: 20—10: 42	10	44	131

## 2.6 试验降水数据

4次作业过程对应的天气形势类型以及作业影响区和对比区的区域日降雪量详见表3。

## 2.7 对比样本建立

通过前面对雪灾概况的天气背景分析，主要对第

表3 4次作业过程对应的天气形势类型以及作业影响区和对比区的日降雪量

Table 3 Synoptic situations corresponding to four operation processes and daily snowfall in the target area and the contrast area

作业日期	天气形势类型	08:00—次日08:00降雪量/mm	
		作业影响区	对比区
2月7日	第1类	1.08	1.04
2月21日	第1类	2.69	1.81
4月9日	第2类	4.25	3.98
4月26日	第1类	2.13	3.03

1类两槽一脊型和第2类西高东低型这两类降雪天气过程进行了人工消(减)雪作业试验,根据天气形势分析对作业样本和对比样本归类。统计了1998—2017年试验区出现降雪天气过程的共计803个样本,从中挑选作业区和对比区同时出现中雪(降水大于2.5 mm)天气,且没有人工影响天气作业的对比样本共计73个(表4)。

表4 1998—2017年中到大雪天气环流形势分型及研究区日平均降雪量

Table 4 Average daily snowfall in the study area and circulation situations of medium to heavy snow in Qinghai Province from 1998 to 2017

天气形势	两槽一脊型	西高东低型	两脊一槽型	东高西低型	纬向环流型
出现次数	24	17	11	6	15
所占比例/%	32.9	23.3	15.1	8.2	20.5
作业区平均日降雪量/mm	5.48	5.87	6.86	7.18	4.89
对比区平均日降雪量/mm	5.34	5.56	7.06	5.78	5.24

### 3 效果评估

针对4次有利天气过程开展的过量催化人工消(减)雪作业,收集到的资料主要包括:泽库县、河南县20个测雪点日降雪量数据,泽库县、河南县滴谱仪观测数据,河南县微波辐射仪观测数据,泽库县郊区X波段双偏振多普勒雷达探测数据。

双比分析假设自然降水情况下,作业期作业影响区与对比区的降水量比值和非作业期的对应比值是相同的,以非作业期作业影响区与对比区自然降水量的比值代替作业期二者的比值,求出作业影响区作业期自然降水量的估计值,然后与其实测值比较,得到人工消(减)雪效果。效果分析采用了相对消(减)雪率和绝对消(减)雪量两种指标。

相对消(减)雪率 $R_{DR}$ :作业影响区作业期实测降水量 $Y_2$ 与其非作业期实测降水量 $Y_1$ 的比值,除以对比区作业期实测降水量 $X_2$ 与其非作业期实测降水量 $X_1$ 的比值,减去1的值再乘以100%,公式为:

$$R_{DR} = \left( \frac{Y_2 / Y_1}{X_2 / X_1} - 1 \right) \times 100\% \quad (1)$$

绝对消(减)雪量 $O_{DR}$ :作业影响区作业期实测降水量 $Y_2$ 与雪量期望值(指计算出的假定未进行人工消(减)雪作业情况下的作业影响区的降水量)的差值,公式为:

$$O_{DR} = Y_2 \times \left( \frac{R_{DR}}{1 + R_{DR}} \right) \quad (2)$$

采用双比分析方法对4次作业过程的效果进行统计分析,详见表5。

表5 基于双比分析方法的4次作业过程的效果分析  
Table 5 Effect analysis on four operation processes with double contrast method

日期	$X_1$ /mm	$X_2$ /mm	$Y_1$ /mm	$Y_2$ /mm	$R_{DR}/\%$	$O_{DR}$ /mm
2月7日	5.34	1.04	5.48	1.08	1.2	0.01
2月21日	5.34	1.81	5.48	2.69	45.0	0.83
4月9日	5.56	3.98	5.87	4.25	1.2	0.05
4月26日	5.34	3.03	5.48	2.13	-31.5	-0.98

注:负值代表减雪。

结果表明,4次试验中只有1次有消(减)雪效果,其他3次均为增雪。2月7日和2月21日的降雪量属于小雪量级,且作业过程中只实施了2个批次作业,作业量未达到过量催化剂量,因此形成增雪效果;4月9日天气过程系统深厚,且系统本身水汽条件充沛,虽作业剂量达到预设过量催化剂量,但未能按照预期设计取得消(减)雪效果。4月26日作业剂量达到过量催化剂量,消(减)雪作业效果为相对减雪31.5%,绝对减雪0.98 mm。

### 4 物理检验

#### 4.1 基于微波辐射仪观测的水汽条件分析

对比区内的河南县布设了微波辐射仪,利用该微波辐射仪测得的液态水含量近似代表试验区整体的水汽状况。分析4次过程作业前、后液态水含量的垂直分布廓线(图4),3~4 km、4.5~5 km和7~8 km均存在液态水含量的峰值区,说明所选作业高度水汽条件较好。

对比4次过程各峰值区数值,发现4月9日过程各峰值区数值均大于其他3次过程,其次是4月26日过程。由于4月9日过程作业高度层液态水含量较高,若希望按照试验设计通过过量播撒达到消(减)雪效果则需播撒足够剂量的催化剂,但统计分析得到该过程未取得消(减)雪作业效果,可能是由于水汽供应充沛,催化剂剂量未能实现过量播撒。

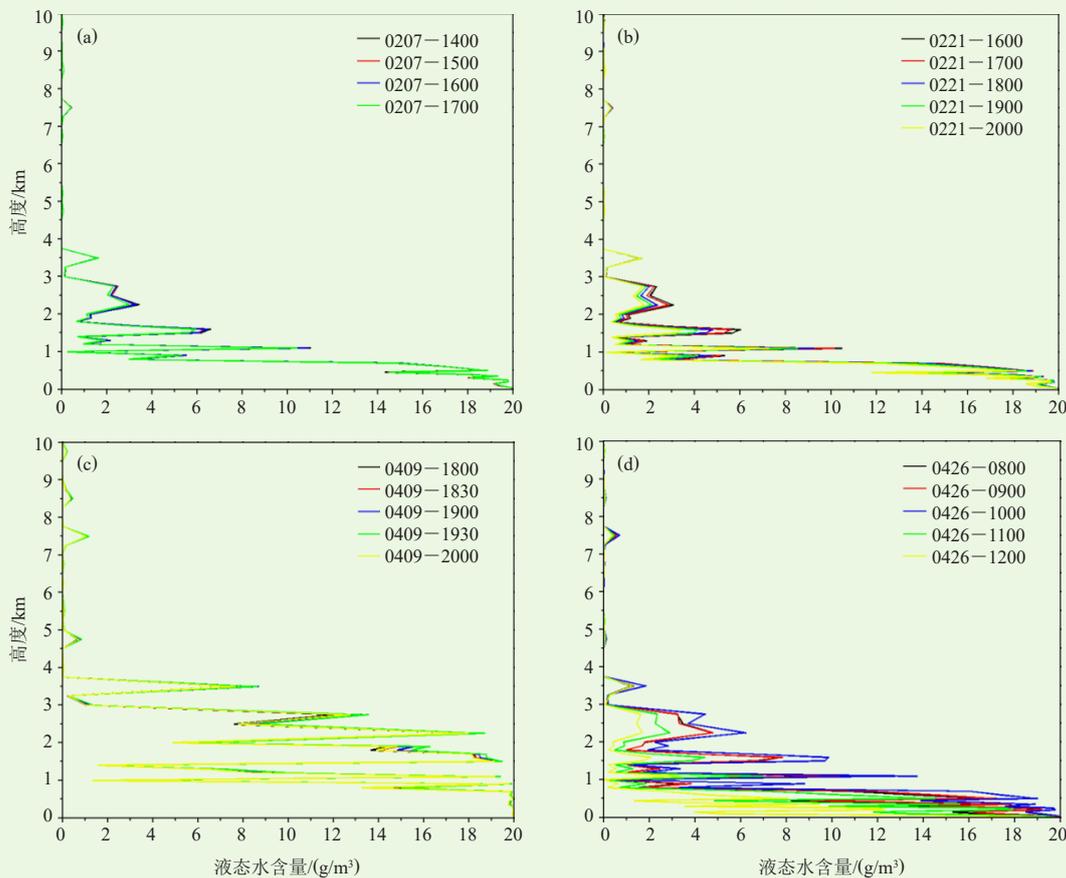


图4 4次试验过程作业前、后液态水含量的垂直分布廓线

(a) 2月7日; (b) 2月21日; (c) 4月9日; (d) 4月26日

Fig. 4 The vertical profile of liquid water content before and after four experiments

(a) 7 February; (b) 21 February; (c) 9 April; (d) 26 April

## 4.2 基于雷达的物理检验

4月9日作业过程, 选取地面火箭作业前后共12次雷达体扫基数据进行消(减)雪作业效果分析。从雷达仰角 $1^\circ$ 每15 min的无抑制反射率的PPI(图略)看出, 作业前(18: 13)泽库县有较强的降雪回波, 强回波中心强度达到38.5 dBZ, 回波覆盖范围较广, 且强回波中心强度和范围有增加趋势; 作业后(19: 15、19: 46), 回波强度明显减弱, 回波范围明显减小, 中心强度已降至18 dBZ; 后续回波虽有继续发展趋势(20: 17), 但持续时间较短, 至21: 00左右已基本无降雪回波; 通过雷达回波分析认为过量催化作业对整个云体发展及降雪有消减的作用。

尽管雷达分析有消(减)雪作用, 但效果评估未能检出消(减)雪效果, 本次试验结果为增雪。查看4月9日地面台站自动降水仪观测记录(图5), 发现当天降雪为两个阶段, 第一阶段为17: 00—21: 00, 此时段也是消(减)雪作业时段, 影响区台站累计降雪为2.0 mm; 第二阶段为00: 00—04: 00, 此时段没有

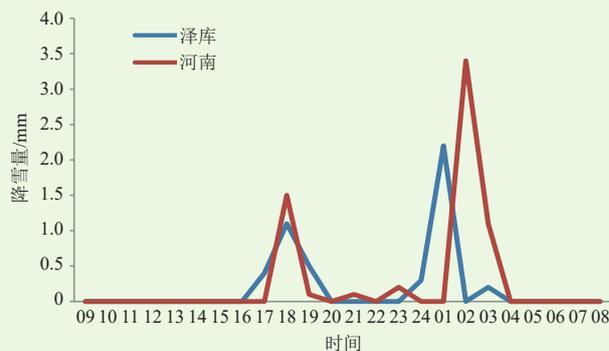


图5 2017年4月9日观测的降雪量变化

Fig. 5 The observed snow change chart on 9 April 2017

进行消(减)雪作业, 影响区台站累计降雪为2.7 mm。从降雪过程分析, 因本次系统深厚, 后期水汽供应充沛, 未作业第二阶段降雪量较大, 可能平滑了第一阶段的消(减)雪效果。在效果评估中使用的降雪量为观测的20个测量点的08: 00—08: 00数据平均值, 虽然代表了整个作业区和对比区面上的降雪量, 但是在时间段上没有详细划分, 应在今后试验中完善降雪观

测方法。

4月26日作业过程,选取地面火箭作业前后共6次雷达体扫基数据(30 min一次)进行消(减)雪作业效果分析。从雷达仰角0.5°每30 min的无抑制反射率的PPI(图6)看出,作业前(08:59—09:30)泽库县有较强的降雪回波,回波中心强度为19.5 dBZ,回波覆

盖范围较广,且回波中心强度和范围无明显变化;作业实施期间(09:30—10:34),回波强度略有减弱,回波范围有减小趋势;作业后(10:49—11:20),回波中心强度以及回波范围明显减小,至11:20已基本无降雪回波。通过雷达回波分析认为过量催化作业对整个云体及降雪有消(减)的作用。

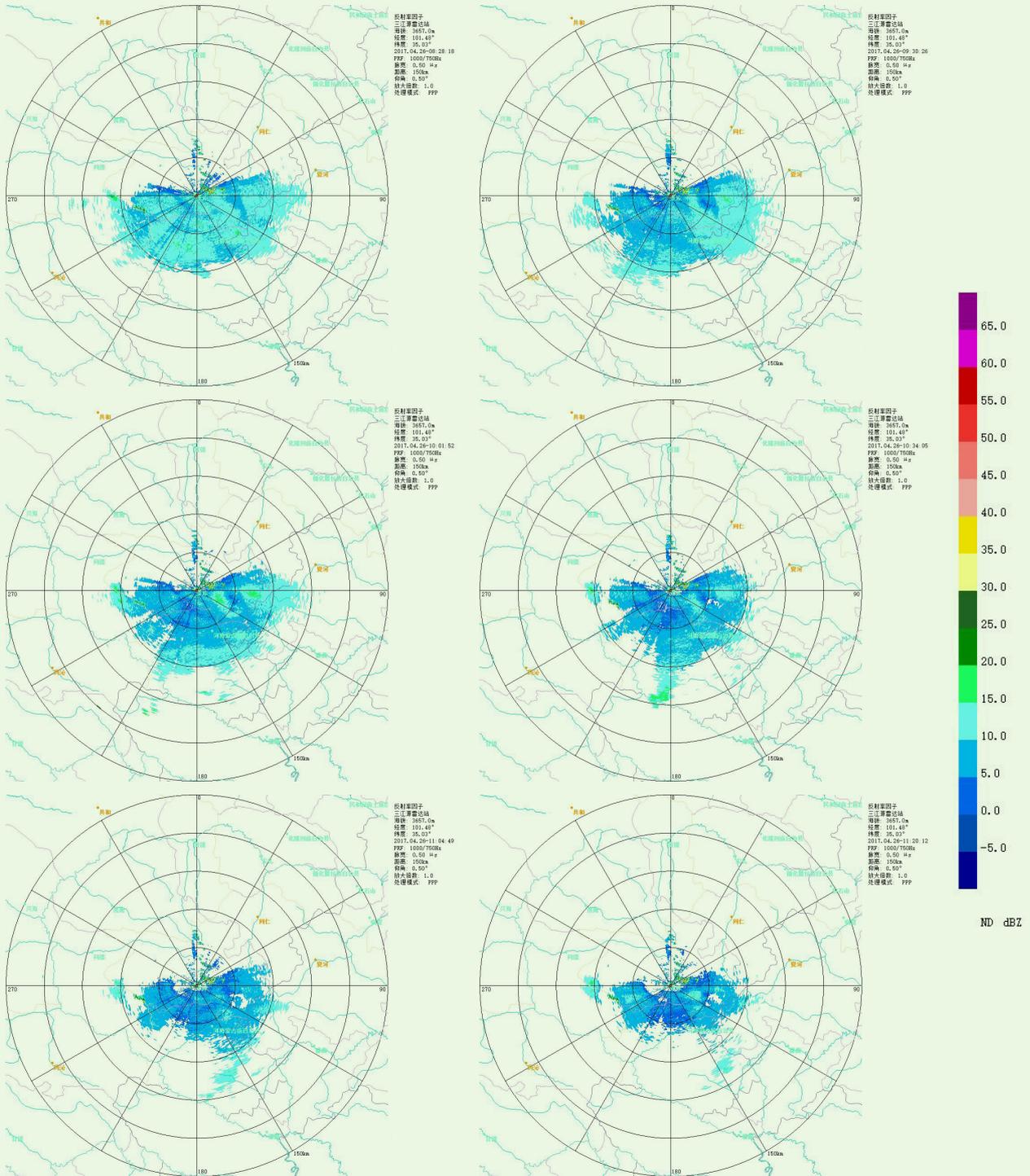


图6 2017年4月26日作业期间多普勒雷达PPI变化图  
Fig. 6 Doppler radar PPI chart during the operation on 26 April 2017

综上所述, 过量催化消(减)雪作业短期有消(减)雪的作用, 但若天气系统供给水汽量较强时, 会延迟系统的发展, 会影响降水强度空间分布, 总量有可能增加。

## 5 结论与讨论

在客观地分析青海省雪灾的时空分布以及引起雪灾的各类天气形势后, 建立了本次试验的样本序列, 通过于2017年2月7日、2月21日、4月9日和4月26日在泽库县实施4次地面火箭消(减)雪作业, 利用试验区测雪点的降雪量数据、微波辐射仪观测数据、气象观测站数据以及布设的20个测雪点降雪资料等, 应用双比分析方法对4次过程的消(减)雪作业效果进行分析, 得到以下结论:

1) 4次作业过程中, 2月7日、2月21日未能按照试验设计实施过量催化, 通过双比分析, 两次均为增雪; 4月9日尽管作业剂量达到预设过量催化剂量, 但人工消(减)雪作业未能按照预期设计取得显著的消(减)雪效果, 分析原因为本次天气过程系统深厚, 水汽条件充沛, 后期非作业期间降水平滑了前期消(减)雪作业效果; 4月26日作业剂量达到过量催化剂量, 消(减)雪作业效果为相对减雪31.5%, 绝对减雪0.98 mm。

2) 对4次过程作业前、后的液态水含量进行分析, 所选作业高度较合适, 水汽条件较好, 作业后整体回波强度减弱, 回波体积减小, 后续回波有继续发展, 但持续时间较短。在试验方案和观测方案设计时应充分考虑各种观测资料的匹配性。

3) 通过对作业过程的定量统计分析和基于观测资料的定性物理分析, 表明在青海开展人工消(减)雪有一定的减雪作用, 但是对于稳定天气形势下形成的中到大雪量级消(减)雪效果还未可知, 且消(减)雪作业有可能增大降雪量而形成雪灾的风险, 还需通过大量实例总结出科学开展人工消(减)雪的技术可行性和成套技术。

## 参考文献

- [1] 张宪州, 杨永平, 朴世龙, 等. 青藏高原生态变化. 科学通报, 2015, 60(32): 3048-3056.
- [2] 周景博, 杨小明, 何霄嘉, 等. 气候变化适应措施的选择与偏好分析——基于青藏高原生态功能保护区的调查. 气候变化研究进展, 2016, 12(6): 484-493.
- [3] 何红艳. 青藏高原森林生产力格局及对气候变化响应的模拟. 北京: 中国林业科学研究院, 2008.
- [4] 章澄昌. 人工影响天气概论. 北京: 气象出版社, 1992.
- [5] 郭学良, 杨军, 章澄昌. 大气物理与人工影响天气. 北京: 气象出版社, 2010.
- [6] 王佳, 智协飞, 白卡娃, 等. 一次人工消雨试验数值模拟及物理过程分析. 大气科学学报, 2010, 33(4): 460-468.
- [7] 王婉, 姚展予. 2006年北京市人工增雨作业效果统计分析. 高原气象, 2009, 28(1): 195-202.
- [8] 王俊, 张洪生, 王庆, 等. 利用激光雨滴谱仪检验消减雪作业效果. 气象科技, 2010, 38(12): 46-50.
- [9] 樊明月, 张佃国, 王永政, 等. 十一运开幕式消减雨作业数值模拟研究. 气象科技, 2012, 38(12): 60-66.
- [10] 何晖, 金华, 李宏宇, 等. 2008年奥运会开幕式日人工消减雨作业中尺度数值模拟的初步结果. 气候与环境研究, 2012, 17(1): 46-50.
- [11] 何晖, 马建立. 人工消减雨作业雷达回波特征综合分析. 气象, 2008, 34(S1): 145-149.
- [12] 尹宪志, 付双喜, 李宝梓, 等. 西北地区一次人工消雨试验效果分析. 干旱区地理, 2015, 38(3): 517-524.
- [13] 周秉荣, 李凤霞, 申双和, 等. 青海高原雪灾预警模型与GIS空间分析技术应用. 应用气象学报, 2007, 18(3): 373-379.
- [14] 王江山, 李锡福, 马云仓, 等. 青海天气气候. 北京: 气象出版社, 2004.
- [15] 把黎. 祁连山地区大气背景场及地形云降水过程的特征分析. 兰州: 兰州大学, 2020.
- [16] 张国庆, 孙安平, 肖宏斌, 等. 祁连山南麓河谷地形云生长的层结特征. 山地学报, 2010, 28(3): 274-282.
- [17] 刘蓓. 祁连山南麓夏季地形云特征及山谷风影响分析. 气象科技, 2016, 44(1): 67-75.
- [18] 朱平, 张国庆. 祁连山南麓湟水河谷地形云雷达回波特征. 干旱区研究, 2015, 32(3): 551-564.
- [19] 马学谦, 陈跃, 张国庆, 等. X波段双偏振雷达对不同坡度地形云探测个例分析. 干旱气象, 2015, 33(4): 675-683.
- [20] 曹宁, 张立新, 桑建人, 等. 基于微雨雷达的六盘山区地形云降水宏观特征观测分析. 气象科学, 2019, 39(6): 775-785.
- [21] 张文煜, 黄颖, 尹宪志, 等. 祁连山地形云人工增雨(雪)试验观测与研究进展. 气象科技进展, 2021, 11(5): 102-116.
- [22] 李俊, 李国梁. 相控阵雷达技术及其数据处理方式的研究. 科学与信息, 2017, (24): 23-25.
- [23] 于明慧, 刘黎平, 吴翀, 等. 利用相控阵及双偏振雷达对2016年6月3日华南一次强对流过程的分析. 气象, 2019, 45(3): 330-344.
- [24] 姚振东, 余勇, 杜雨滔, 等. Ma XPOL雷达及在人影探测业务中的应用. 气象科技进展, 2022, 12(2): 37-44.
- [25] 杨宁, 苏德斌, 苏立娟, 等. 冰雹云探测技术研究进展——基于巴彦淖尔人工防雹技术研究试验. 气象科技进展, 2021, 11(5): 141-148.
- [26] Li D J, Zhao C F, Li P R, et al. Macro and micro physical characteristics of different parts of mixed convective stratiform clouds and differences in their responses to seeding. Advances in Atmospheric Sciences, 2022, 39(12): 2040-2055.
- [27] 黄勇, 吴林林, 冯妍, 等. 两次对流云合并过程的双偏振雷达观测研究. 高原气象, 2015, 34(5): 1474-1485.
- [28] 王雪芹, 徐卫红. 四川盆地暴雨过程对流云合并特征初探. 气象科技, 2019, 47(6): 969-975.
- [29] 朱士超, 郭学良. 华北一次积层混合云微物理和降水特征的数值模拟与飞机观测对比研究. 大气科学, 2015, 39(2): 370-384.
- [30] 蔡兆鑫, 周毓荃, 蔡森. 一次积层混合云系人工增雨作业的综合观测分析. 高原气象, 2013, 32(5): 1460-1469.
- [31] 康增妹, 李忠亮, 刘伟, 等. 河北省一次降水云系云物理结构的飞机探测研究. 气象与环境学报, 2019, 35(4): 1-7.
- [32] 元鹏, 郭学良, 卢广献, 等. 华北太行山东麓一次稳定性积层混合云飞机观测研究: 对流云/对流泡和融化层结构特征. 大气科学, 2019, 43(6): 1365-1384.
- [33] 郑国光, 陈跃, 陈添宇, 等. 祁连山夏季地形云综合探测试验. 地球科学进展, 2011, 26(10): 1057-1070.
- [34] 陈添宇, 郑国光, 陈跃, 等. 祁连山夏季西南气流背景下地形云形成和演化的观测研究. 高原气象, 2010, 29(1): 152-163.

(上接49页)

ice concentration in a shallow convective cloud embedded in stratiform cloud over North China. Advances in Atmospheric Sciences, 2017, 34(4): 509-520.