

文章编号: 2096-1618(2025)02-0220-06

2022年2月青藏高原东侧大型无人机人工增雪试验分析

范思睿^{1,2,3}, 王维佳^{1,2,3}, 王博为³, 刘贵华⁴, 孙方林⁵, 张丰伟^{1,2,3}, 张征东⁶

(1. 四川省人工影响天气办公室, 四川 成都 610072; 2. 中国气象局云降水物理与人工影响天气重点开放实验室, 北京 100081; 3. 四川省气象局, 四川 成都 610072; 4. 陕西省气象科学研究所, 陕西 西安 710016; 5. 中国科学院西北生态环境资源研究院, 甘肃 兰州 730000; 6. 中航(成都)无人机系统股份有限公司, 四川 成都 611743)

摘要:为验证大型无人机在高原地区进行人工影响天气作业和飞行观测的可行性,也为研究高原地区的云降水特征和人工增雪作业效果,2022年四川省人工影响天气办公室联合中航(成都)无人机系统股份有限公司在青藏高原东侧(川西高原)开展多个架次人工增雪试验,并利用卫星资料和常规气象观测资料对2022年2月11–12日在青藏高原东侧开展的2架次人工增雪试验进行分析。结果表明:2022年2月青藏高原东侧人工增雪试验目标云的云底温度低于 $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$,云底粒子半径较大,云底粒子有效半径为 $31\text{ }\mu\text{m}$,云顶粒子有效半径为 $15\sim 20\text{ }\mu\text{m}$ 。无降水云和降水云的云顶均发生冰晶化,在云顶存在冰晶粒子递减带,无降水云的冰晶化高度低于降水云,无降水云的冰化高度为 $-22\text{ }^{\circ}\text{C}$,降水云的冰化高度为 $-29\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

关键词:青藏高原;无人机;人工增雪;MODIS

中图分类号:P481

文献标志码:A

doi:10.16836/j.cnki.jcuit.2025.02.013

0 引言

作为亚洲水塔的青藏高原,孕育着亚洲几大河流,是重要水源地,拥有冰川、积雪、冻土,被誉为地球中低纬度高海拔永久“冻土和山地冰川王国”^[1-2]。积雪是青藏高原下垫面最为活跃的特殊自然景观之一,是高原环境和气候的联系纽带,对区域气候变化和生态环境演变产生重要影响^[3]。积雪所孕育的青藏高原丰富多样的生态系统蒸散发从源地产生的水汽,通过大气环流传输至下风向地区以降水形式降落,青藏高原一半以上的蒸散发都在高原以外形成降水,使得人口密集的东亚地区获益^[4]。然而在全球变暖的背景下,近40年来,青藏高原积雪面积和积雪日数减少,特别是2006–2018年积雪面积减少加剧,而海拔5100 m以下的区域积雪日数减少趋势明显^[5-6]。利用气象台站雪深资料得到1961–2014年青藏高原中东部雪深为波动减少趋势,特别是1993–2014年是显著减少的^[7]。

人工增雪是指对具有人工增雪条件的云,采用科学的方法,在适当的时机,将适当的催化剂引入云的有效部位,达到人工增加降雪目的的科学技术措施。利用人工增雪手段合理开发和利用空中云水资源是缓解

水资源紧张,减轻干旱灾害影响,保障国家粮食安全和生态安全的重要途径^[8]。近年来,无人机的人工影响天气应用得到了巨大发展。2004年,中国首次开展微型无人机人工影响天气试验,使用的无人机能搭载1 kg催化剂,但只能在稳定性降雨天气下进行播撒^[9]。2009年,在青海省进行无人机人工增雨试验,证明无人机适应高原地区人工增雨任务,且能够穿越较厚的云层,实现平稳飞行和规划播云^[10]。2019年,在黄河源区实施无人机人工增雪试验,证明无人机在高原高寒地区实施播撒的可行性,同时利用Ka/Ku雷达、微波辐射计、微雨雷达、风廓线雷达等设备的观测资料分析了无人机人工增雪作业效果的物理响应^[11]。2020年,甘肃省利用大型无人机开展增雨试验,验证了大型无人机在人工影响天气中的可适用性^[12]。

青藏高原地形复杂,地面气象观测站点稀疏。卫星能够提供多时次、大范围、连续性的云微物理探测信息。随着越来越多卫星的发射和卫星反演技术的发展,云降水特征和人工增雨(雪)作业效果的分析有了更为广阔的思路。Rosenfeld等^[13]建立了基于卫星反演云微物理的方法,分析云垂直结构,并用飞机探测资料对反演的云微物理进行验证。Lensky等^[14]和Freud等^[15]进一步利用飞机探测资料和卫星资料进行验证,证明基于卫星反演云微物理方法的可靠性。刘贵华等^[16]、傅云飞等^[17-18]、戴进等^[19]利用MODIS、TRMM、NOAA多种卫

收稿日期:2024-08-13

基金项目:四川省科技计划资助项目(2019YJ0621);中国气象局创新发展专项资金资助项目(CXFZ2024J035)

通信作者:王维佳. E-mail:wjwang1998@163.com

星资料反演青藏高原及其周边云降水的微物理特征,分析云降水内部结构。岳治国等^[20]利用 NPP/VIIRS 卫星资料反演青藏高原对流云微物理特征,指出 NPP/VIIRS 卫星在反演对流云方面有独特的优势。

2022 年,四川省人工影响天气办公室联合中航(成都)无人机系统股份有限公司在青藏高原东侧开展了多个架次人工增雪试验。本文分析了 2022 年 2 月青藏高原东侧大型无人机人工增雪试验,探讨利用大型无人机进行人工增雪的作业条件和作业效果,探索高原地区生态保护和修复的新途径。



(a) 大型无人机



(b) 地面指挥方舱

图1 青藏高原东侧开展人工增雪试验现场

2022 年 2 月 11 日、2 月 12 日,翼龙-2H 气象型大型无人机挂载碘化银焰条以四川省凉山州青山机场为起降机场和地面指挥方舱布设点,在青藏高原东侧的四川省甘孜州境内实施人工增雪试验 2 架次,试验研究区域如图 2。甘孜州位于四川省西部,青藏高原东侧,是青藏高原向四川盆地过渡地带,随海拔高度呈明

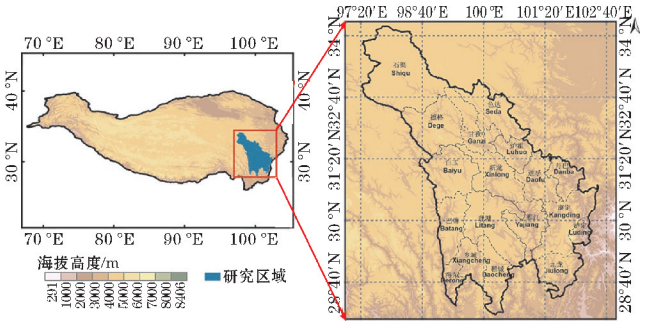


图2 试验研究区域(红框)

1 试验概述及数据、方法

1.1 试验概述

试验使用的人工增雪作业平台为中航(成都)无人机系统股份有限公司设计研制的翼龙-2H 气象型无人机(图 1)。该型无人机为中高空、长航时多用途无人机,具备高原起降和大载荷能力,起降方式为滑跑起降,机翼外挂点为 7 个。根据人工影响天气作业和大气探测进行的适应性改装,主要包括地面控制站、机载焰条播撒系统、机载大气探测系统、翼面防除冰系统。

显的垂直分布特征,冬季长、降水少、冬季积雪时间长。

开展的 2 次大型无人机人工增雪试验飞行概况见表 1。2 月 11 日无人机从西昌青山机场起飞,平飞至试验研究区(图 2),19:33 开始在试验研究区内进行催化,作业高度 6000 m,温度 -22 ℃,20:15 爬升到 7000 m 继续催化,温度 -30 ℃,共燃烧碘化银烟条 20 根;12 日无人机从西昌青山机场起飞,平飞至试验研究区,17:41 开始在试验研究区内进行催化,作业高度 7200 m,温度 -36 ℃,20:32 降低到 6500 m 继续催化,温度 -28 ℃,共燃烧碘化银烟条 19 根。2 次人工增雪作业实现了远距离、长航时飞行,证明大型无人机在高原地区实施人影作业的可行性,且能够夜航和高空飞行,平稳飞行,实战验证了大型无人机的远程控制播撒催化剂和视频观察催化剂点火及燃烧时间,具备精准播云能力。

表1 飞行概况

日期	飞行时间	最大飞行高度/m	播撒催化剂	播撒作业时间	播撒作业高度/m
2 月 11 日	18:39–22:40(4h1min)	7200	20 根碘化银焰条(2500g 碘化银)	19:33–21:33(2h)	6000 ~ 7000
2 月 12 日	15:13–22:33(7h20min)	7200	19 根碘化银焰条(2375g 碘化银)	17:41–20:54(3h13min)	6500 ~ 7300

1.2 资料

MODIS 卫星资料时间选取 2022 年 2 月 11–12 日;探空资料为 L 波段探空数据,来源于四川省气象探测数据中心,时间为 2022 年 2 月11–12 日;高空温度、风场和位势高度资料来自中国全球大气再分析

40 年产品(CMA-CRA),时间分辨率为 6 h,空间分辨率为 0.25°×0.25°,来源于国家气象信息中心(<http://data.cma.cn/>),时间为 2022 年 2 月 11–12 日。

1.3 卫星反演方法

为了解云内状况,Rosenfeld 等^[13]提出基于卫星反

演技术的云微物理特征分析方法,通过假定条件进行时空转换,用不同顶高的云近似云中不同高度云的性状。通过选取不同高度的云得到粒子半径随温度的变化曲线,即 T - Re 图, T - Re 可以反映云中微物理过程。为与 T - Re 特征相对应,将云中微物理过程简化为 5 个主要过程,即:凝结增长过程、碰并增长过程、雨胚形成过程、混合相增长过程、冰化增长过程,用于分析云降水的垂直结构^[13,21]。戴进等^[19]、刘贵华等^[22-23] 和范思睿等^[24] 将此方法用于人工影响天气中,证明利用卫星资料能够反演云和降水微物理特征,从而判别过冷水区和高度,为人工增雨(雪)提供技术指导。

2 观测和反演结果分析

图 3 为 2022 年 2 月 11-12 日 500 hPa 温度、位势高度和风矢量分布,11 日 14 时(图 3a)可见试验研究区位于弱脊控制,温度偏高,为西南气流控制,上游有低槽可能东移影响试验研究区。12 日 14 时(图 3b)上游低槽东移,槽后有冷空气输送,为西风气流控制。可见 2 月 11-12 日,试验研究区受低槽东移和地面弱冷空气影响,有一次弱降温过程。

图 4 为 2022 年 2 月 11-12 日 08 时和 20 时甘孜

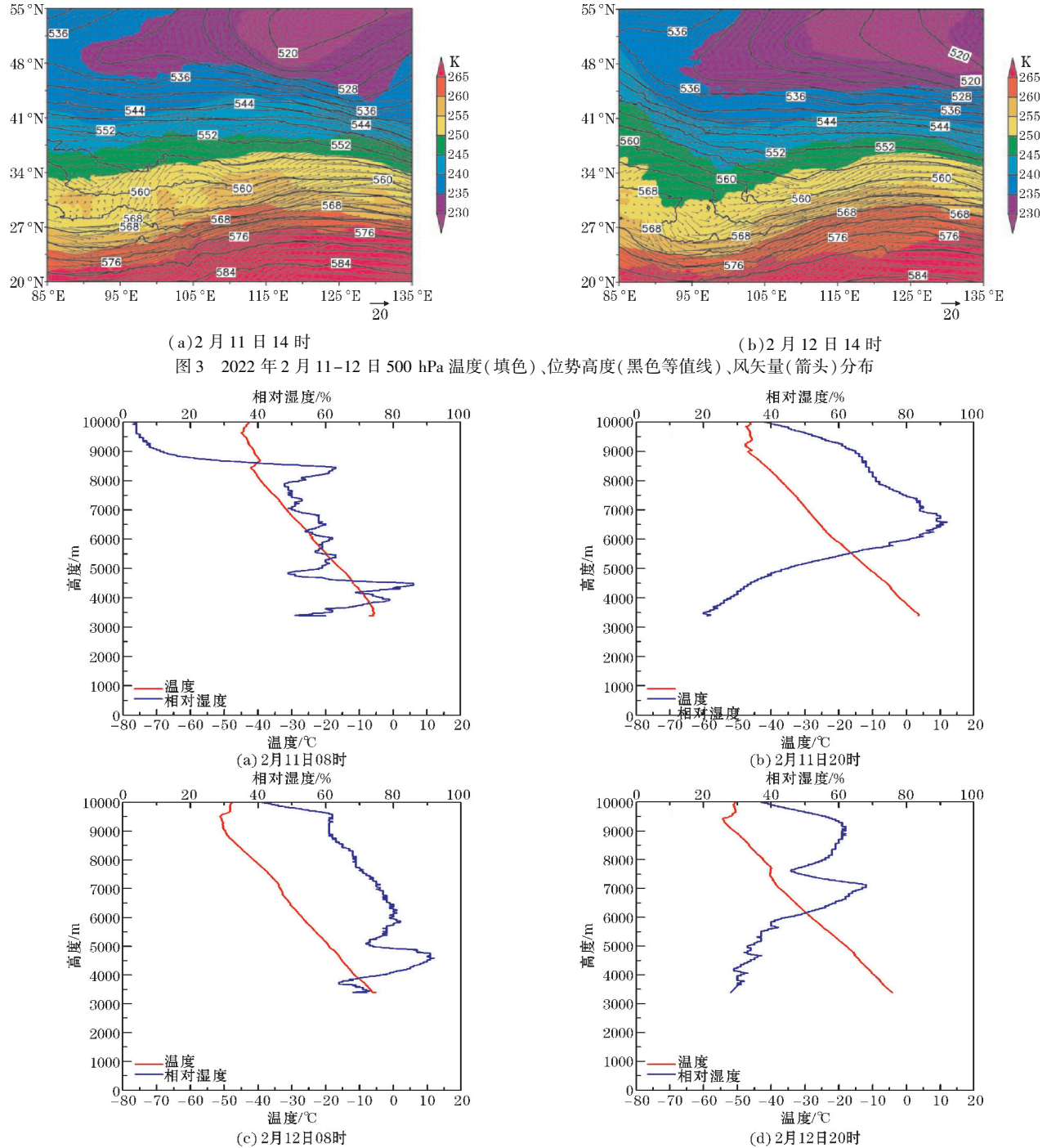
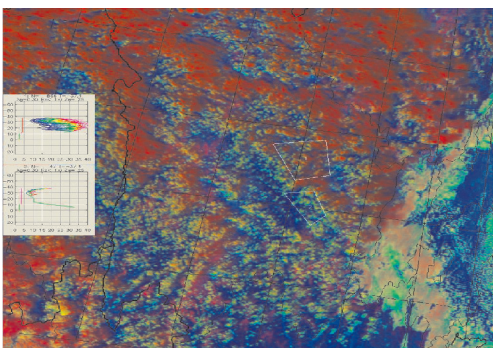


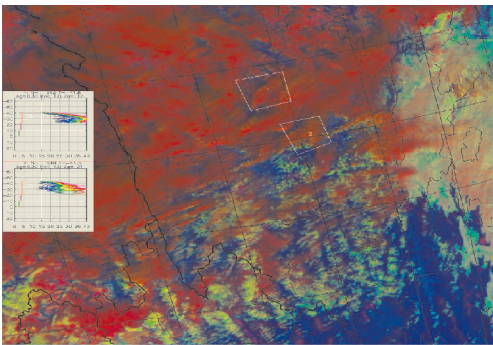
图4 甘孜探空站温度和湿度垂直分布图

站探空的温度和湿度垂直分布图,根据相对湿度阈值法^[25]来判断云层,11 日 08 时低层有单层云,云底高度 4300 m,云底温度 $-10.2\text{ }^{\circ}\text{C}$,云顶高度 4520 m,云顶温度 $-11.9\text{ }^{\circ}\text{C}$,云厚 220 m,云层较薄,且云下湿度降低较快,说明云下水汽供应不充分,11 日云层温度适合进行人工催化但是云层较薄且水汽供应不足,进行人工催化湿度条件不充分。12 日 08 时有双层云存在,第一层云底高度 4121 m,云底温度 $-12.3\text{ }^{\circ}\text{C}$,第一层云顶高度 4924 m,云顶温度 $-18.5\text{ }^{\circ}\text{C}$,云厚 803 m;第二层云底高度 5738 m,云底温度 $-24.9\text{ }^{\circ}\text{C}$,第二层云顶高度 6514 m,云顶温度 $-30.7\text{ }^{\circ}\text{C}$,云厚 876 m。12 日进行人工催化湿度和温度条件较适宜。

根据 Rosenfeld 等^[13]的方法,利用 MODIS 卫星资料反演云降水物理特征(图 5~6)。2 月 11 日,人工增雪作业前 14:41 试验研究区主要为分散的红色云和黄绿色云,可见地面。红色云为午后分散性对流云,云顶温度 $-36\text{ }^{\circ}\text{C}$,云粒子有效半径 $20\text{ }\mu\text{m}$;云底温度 $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$,云粒子有效半径 $31\text{ }\mu\text{m}$,说明云顶粒子半径小,温度低,主要为冰相粒子,而云底粒子半径大,温度高,为冰水共存。绿色云为小粒径冰云,云顶温度 $-37\text{ }^{\circ}\text{C}$,云粒子有效半径 $16\text{ }\mu\text{m}$;云底温度 $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$,云粒子有效半径 $8\text{ }\mu\text{m}$ 。从 $T\text{-Re}$ 分布图(图 6a)可以看出,红色云在中高层有 Re 递减带,当 $T<-22\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,Re 随温度降低逐渐从 $33\text{ }\mu\text{m}$ 减小至 $15\text{ }\mu\text{m}$ 。Yuan 等^[26]发现当云粒子完成完全冻结后,冰晶大小随高度增加而略微减小,云粒子达到冰晶化温度,在冰晶化高度以上的云粒子基本全部成冰,说明 $-22\text{ }^{\circ}\text{C}$ 为冰晶化温度。结合 2 月 11 日 08 时甘孜站探空图(图 4a),可以得出,红色云的冰晶化高度为 5790 m。说明 2 月 11 日试验研究区域 5790 m 以下有过冷水存在,云粒子有效半径大,过冷水较多,但 5790 m 以上基本为冰晶,不存在过冷水,不适宜播撒人工增雪催化剂。结合 2 月 11 日 12:00 小时降雨实测,试验研究区没有地面降雨。2 月 12 日,人工增雪作业前 12:02 试验研究区域上空基本上被深红色云覆盖,不可见地面,深红色云体积大,覆盖面积大,说明深红色云发展深厚,云粒子大、温度低、云厚。云顶温度 $-43\text{ }^{\circ}\text{C}$,云粒子有效半径 $15\sim 18\text{ }\mu\text{m}$;云底温度 $-23\text{ }^{\circ}\text{C}$,云粒子有效半径 $31\text{ }\mu\text{m}$ 。说明云顶粒子半径小,温度低,主要为冰相粒子,而云底粒子半径大,可能有雪或者过冷水存在。从 $T\text{-Re}$ 分布图(图 6b)可以看出,当 $T>-29\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,Re 随着温度降低缓慢增长,从 $31\text{ }\mu\text{m}$ 增长到 $37\text{ }\mu\text{m}$,这是因为冰水共存导致冰晶粒径增长,Re 随高度增长;当 $T<-29\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,Re 随温度逐渐降低,特别是区域 1(黑线)随温度降低递减速度更快,Re 从 $37\text{ }\mu\text{m}$ 减小到 $15\text{ }\mu\text{m}$,说明 $-29\text{ }^{\circ}\text{C}$ 为红色云的冰晶化温度,结合 2 月 12 日 08 时甘孜站探

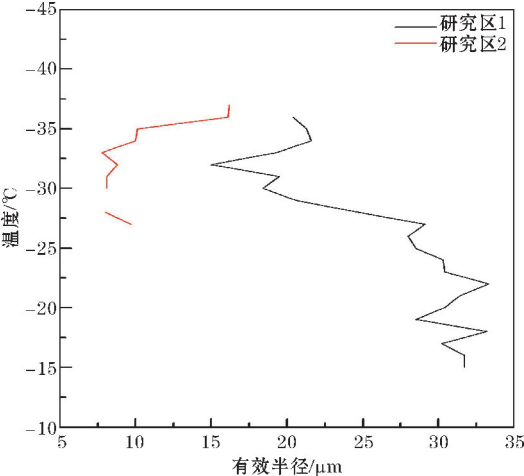


(a) 2 月 11 日 14:41

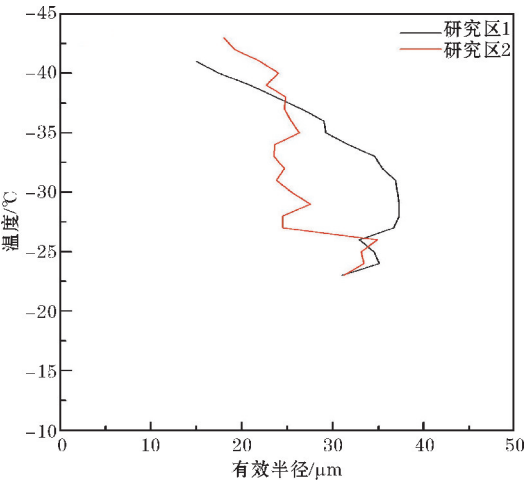


(b) 2 月 12 日 12:02

图 5 MODIS 卫星反演云微物理 RGB 特征图



(a) 2 月 11 日 14:41



(b) 2 月 12 日 12:02

图 6 MODIS 卫星反演 $T\text{-Re}$ 垂直分布图

空图(图4c),冰晶化高度为6366 m。这与戴进等^[19]研究青藏高原强对流云的冰化温度为 $-20\text{ }^{\circ}\text{C} \sim -25\text{ }^{\circ}\text{C}$,与本文的冰化温度有一定差异,这主要和研究季节不同有关,本文研究的是冬季云降水,戴进等^[19]研究的夏季对流云。2月12日,试验研究区6366 m以下存在过冷水,但6366 m以上基本为冰晶,不存在过冷水,徐小红等^[27]在研究强对流的卫星物理特征时也有类似结论,强对流云会表现出云顶高、云顶以小粒子为主,云上部存在Re递减带。结合2月12日12:00小时降雨实测,试验研究区北部降小雨和雪,雨量 $0.1 \sim 0.2\text{ mm/h}$ 。

3 结束语

2022年2月在青藏高原东侧开展多个架次人工增雨(雪)试验,实战验证了大型无人机在高原地区进行人工增雪的可行性,取得第一手的观测资料,为发展安全高效的人工影响天气作业技术和新型作业装备提供了新思路,也为研究高原地区的云降水特征和人工增雪作业效果,加深对高原地区云降水机理的认识,提高人工增雪作业有效性提供新的的重要途径。

(1)本文选取2022年2月11-12日在青藏高原东侧开展的2架次人工增雪试验,分析此次云降水结构发现,2月11-12日青藏高原东侧冬季的云顶和云底温度低,均低于 $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$,主要为冷云;无降水云的云顶温度为 $-37\text{ }^{\circ}\text{C}$,云底为 $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$;降水云的云顶温度为 $-43\text{ }^{\circ}\text{C}$,云底温度为 $-23\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。云底粒子半径偏大,降水云和无降水云的云底粒子有效半径均为 $31\text{ }\mu\text{m}$;无降水的云顶粒子有效半径为 $16 \sim 20\text{ }\mu\text{m}$,降水云的云顶粒子有效半径为 $15 \sim 18\text{ }\mu\text{m}$ 。

(2)无降水云和降水云都发生了冰晶化,在云顶存在冰晶粒子递减带,无降水云的冰化高度为 $-22\text{ }^{\circ}\text{C}$,冰晶化高度为5790 m,降水云的冰化高度为 $-29\text{ }^{\circ}\text{C}$,冰晶化高度为6366 m,冰晶化高度以上没有过冷水存在。

参考文献:

- [1] 徐祥德,赵天良,Lu Chungu,等. 青藏高原大气水分循环特征[J]. 气象学报,2014,72(6):1079-1095.
- [2] 徐祥德,董李丽,赵阳,等. 青藏高原“亚洲水塔”效应和大气水分循环特征[J]. 科学通报,2019,64(27):2830-2841.
- [3] 叶红,易桂花,张廷斌,等. 2000-2019年青藏高原积雪时空变化[J]. 资源科学,2020,42(12):2434-2450.
- [4] LI Y,XU R,YANG K,et al. Contribution of Tibet-

an Plateau ecosystems to local and remote precipitation through moisture recycling [J]. Global Change Biology,2023,29(3):702-718.

- [5] 保云涛,游庆龙,谢欣汝. 青藏高原积雪时空变化特征及异常成因[J]. 高原气象,2018,37(4):899-910.
- [6] 黄晓东,马英,李雨馨,等. 1980-2020年青藏高原积雪时空变化特征[J]. 冰川冻土,2023,45(2):1-12.
- [7] 沈鑒澄,吴涛,游庆龙,等. 青藏高原中东部积雪深度时空变化特征及其成因分析[J]. 冰川冻土,2019,41(5):1150-1161.
- [8] 邵洋,刘伟,孟旭,等. 人工影响天气作业装备研发和应用进展. 干旱气象,2014,32(4):649-658.
- [9] 马舒庆,郑国光,汪改,等. 一种人工影响天气微型无人驾驶飞机及初步试验[J]. 地球科学进展,2006,21(5):545-550.
- [10] 马学谦,孙安平,张小军,等. 适应高原天气与地形的人工增雨无人机研制及试验[J]. 农业工程学报,2017,33(15):105-111.
- [11] 乔祺,魏加华,赵杰,等. 黄河源区冬季冷云催化降雪过程的物理特征研究[J]. 应用基础与工程科学学报,2022,30(5):1121-1137.
- [12] 程鹏,罗汉,甘泽文,等. 大型无人机一次人工增雨试飞及催化响应分析[J]. 气象,2022,48(8):1053-1061.
- [13] Rosenfeld D, Lensky I M. Spaceborne sensed insights into precipitation formation processes in continental and maritime cloud [J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 1998, 79(11):2457-2476.
- [14] Lensky I M, Rosenfeld D. The time-space exchangeability of satellite retrieved relations between cloud top temperature and particle effective radius [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2006,6(10):2887-2894.
- [15] Freud E, Rosenfeld D, Andreae M O, et al. Robust relations between CCN and the vertical evolution of cloud drop size distribution in deep convective clouds [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2008,8(6):1661-1675.
- [16] 刘贵华,余兴,贾玲,等. 2009年陕西春季层状云增雨卫星观测分析[J]. 干旱区研究,2011,28(4):699-704.
- [17] 傅云飞,李宏图,自勇. TRMM卫星探测青藏高

- 原谷地的降水云结构个例分析[J]. 高原气象, 2007, 26(1): 98–106.
- [18] 傅云飞, 潘晓, 刘国胜, 等. 基于云亮温和降水回波顶高度分类的夏季青藏高原降水研究[J]. 大气科学, 2016, 40(1): 102–120.
- [19] 戴进, 余兴, 刘贵华, 等. 青藏高原雷暴弱降水云微物理特征的卫星反演分析[J]. 高原气象, 2011, 30(2): 288–298.
- [20] 岳治国, 余兴, 刘贵华, 等. NPP/VIIRS 卫星反演青藏高原夏季对流云微物理特征[J]. 气象学报, 2018, 76(6): 968–982.
- [21] 刘贵华, 余兴, 戴进. 不同积云云微物理特征的卫星反演分析[J]. 南京信息工程大学学报, 2009, 32(1): 101–107.
- [22] 刘贵华, 余兴, 戴进, 等. 地形云人工增雨条件卫星探测反演个例分析[J]. 气象学报, 2011, 69(2): 363–369.
- [23] 刘贵华, 余兴, 岳治国, 等. 卫星遥感人工增雨作业条件 II: 层状云[J]. 气候与环境研究, 2012, 17(6): 758–766.
- [24] 范思睿, 王维佳. 利用 FY-4A 卫星反演产品对飞机增雨作业的分析[J]. 高原山地气象研究, 2018, 38(4): 60–66.
- [25] 蔡森, 欧建军, 周毓荃, 等. 2014. L 波段探空判别云区方法的研究[J]. 大气科学, 38(2): 213–222.
- [26] Yuan T L, Li Z Q. General Macro-and Microphysical Properties of Deep Convective Clouds as Observed by MODIS[J]. Journal of Climate, 2010, 23(13): 3457–3473.
- [27] 徐小红, 余兴, 朱延年, 等. 一次强飚线云结构特征的卫星反演分析[J]. 高原气象, 2012, 31(1): 258–268.

Analysis of Artificial Snow Enhancement Experiment of Large UAV on the East Side of Tibet Plateau in February 2022

FAN Sirui^{1,2,3}, WANG Weijia^{1,2,3}, WANG Bowei³, LIU Guihua⁴, SUN Fanglin⁵, ZHANG Fengwei^{1,2,3}, ZHANG Zhengdong⁶

(1. Weather Modification Office of Sichuan Province, Chengdu 610072, China; 2. CMA Cloud-Precipitation Physics and Weather Modification Key Laboratory, Beijing 100081, China; 3. Sichuan Meteorological Bureau, Chengdu 610072, China; 4. Meteorological Institute of Shanxi Province, Xi'an 710016, China; 5. Northwest Institute of Eco-Environment and Resources, CAS, Lanzhou 73000, China; 6. AVIC (Chengdu) UAS Co., Ltd., Chengdu 611743, China)

Abstract: In 2022, Weather Modification Office of Sichuan Province and AVIC (Chengdu) UAS Co., Ltd. carried out several flights of artificial snow enhancement experiments on the eastern side of the Tibet Plateau, which has verified the feasibility of large-scale UAVs for artificial weather modification operation and flight observation on the Tibet Plateau, and has also provided a new effective way to study the characteristics of cloud precipitation and the effect of artificial snow enhancement on the Tibet Plateau. In this paper, two artificial snow enhancement experimental flights carried out on the eastern side of the Tibet Plateau on February 11–12, 2022 were analyzed. Based on satellite data and routine meteorological observation data, the experimental flights were analyzed. The results show as following: On the eastern side of the Tibetan Plateau in February 2022, the temperature of the cloud bottom of the target clouds of the artificial snow enhancement experiment is lower than $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$. The radius of cloud bottom particles is large, the effective radius of cloud bottom particles is $31\text{ }\mu\text{m}$, and the effective radius of cloud top particles are $15\text{--}20\text{ }\mu\text{m}$. Ice crystallization has occurred in the cloud tops of both non-precipitating and precipitating clouds. In the tops there are decreasing bands of ice crystal particles. The height of ice crystallization in non-precipitating clouds is lower than in precipitating clouds. The icing altitude is $-22\text{ }^{\circ}\text{C}$ for non-precipitating clouds and $-29\text{ }^{\circ}\text{C}$ for precipitating clouds.

Keywords: Tibet Plateau; UAV; artificial snow enhancement; MODIS