

程鹏, 罗汉, 甘泽文, 等, 2022. 大型无人机一次人工增雨试飞及催化响应分析[J]. 气象, 48(8): 1053-1061. Cheng P, Luo H, Gan Z W, et al, 2022. A large UAV artificial precipitation enhancement experiment and physical response analysis of the cloud seeding processes[J]. Meteor Mon, 48(8): 1053-1061 (in Chinese).

## 大型无人机一次人工增雨试飞及催化响应分析\*

程 鹏<sup>1,2,3</sup> 罗 汉<sup>2</sup> 甘泽文<sup>4</sup> 庞朝云<sup>2</sup> 黄 山<sup>2</sup> 尹宪志<sup>2</sup> 张丰伟<sup>5</sup>

1 中国气象局兰州干旱研究所/甘肃省干旱气候变化与减灾重点实验室, 兰州 730020

2 甘肃省人工影响天气办公室, 兰州 730020

3 甘肃省气象服务中心, 兰州 730020

4 兰州市气象局, 兰州 730020

5 四川省人工影响天气办公室, 成都 610072

**提 要:** 采用大型无人机开展人工增雨作业具有较好的应用前景。利用 2020 年 10 月 27 日大型无人机试验资料, 分析了无人机作业性能及人工增雨微物理参量变化特征。结果表明: 无人机操控灵活, 具备较好的防除冰和抗侧风能力, 作业、探测时长达 5 h 以上, 可在大范围开展人工增雨及探测工作。催化作业后水平探测的云粒子微物理量呈现出浓度和直径增加的特征, 低层粒子浓度明显高于高层; 催化前后云微物理特征的变化与选取的云体位置及时间有很大关系。在催化作业结束后 20~30 min 内, 地面降水现象仪中雨滴数浓度先减小后增大, 而粒子有效直径持续增加; 受催化影响, 云粒子谱呈现大云粒子增加、降水粒子谱拓宽的特征。

**关键词:** 大型无人机, 云微物理结构, 云粒子谱, 飞机观测, 祁连山

**中图分类号:** P481

**文献标志码:** A

**DOI:** 10. 7519/j. issn. 1000-0526. 2022. 010601

## A Large UAV Artificial Precipitation Enhancement Experiment and Physical Response Analysis of the Cloud Seeding Processes

CHENG Peng<sup>1,2,3</sup> LUO Han<sup>2</sup> GAN Zewen<sup>4</sup> PANG Chaoyun<sup>2</sup>  
HUANG Shan<sup>2</sup> YIN Xianzhi<sup>2</sup> ZHANG Fengwei<sup>5</sup>

1 Key Laboratory of Arid Climatic Changing and Reducing Disaster of Gansu Province/Institute of Arid Meteorology, CMA, Lanzhou 730020

2 Gansu Weather Modification Office, Lanzhou 730020

3 Gansu Meteorological Service Centre, Lanzhou 730020

4 Lanzhou Meteorological Bureau, Lanzhou 730020

5 Sichuan Weather Modification Office, Chengdu 610072

**Abstract:** With the bright prospects of application of large unmanned aerial vehicles (UAV) in artificial precipitation enhancement operation, an UAV artificial precipitation enhancement experiment was carried out in Qilian Mountains. This paper discusses the UAV operating performance and analyzes the change characteristics of the microphysical parameters during the cloud seeding processes on 27 October 2020. The results show that the UAV has the ability of large-scale artificial precipitation enhancement and detection with more than 5 h endurance and good anti-deicing and crosswind resistance capabilities. After the cloud seeding processes, concentration and diameter of cloud particles get increased in every level, and the

\* 甘肃省自然科学基金项目(20JR10RA455)、中国气象局创新发展专项(CXFZ2021Z036)、中国气象局兰州干旱气象研究所干旱基金项目(IAM202112)和甘肃省气象局科研重点项目(Zd2021-03)共同资助

2021 年 5 月 31 日收稿; 2022 年 3 月 4 日收修定稿

第一作者: 程鹏, 主要从事云降水微物理和人工影响天气研究. E-mail: tfreefish@163.com

concentration of low-level cloud particles is significantly higher than that of high level. The change of cloud microphysical characteristics before and after seeding operation is related to cloud position and time to select. Within 20–30 min after the seeding, the concentration of the number of raindrops at the ground decreased at first and then increased, while the effective diameter of the particles continued to increase. The cloud particle spectrum showed the characteristics of an increase in large cloud particles, and the precipitation particle spectrum was broadened.

**Key words:** large unmanned aerial vehicle (UAV), cloud microphysical structure, cloud particle spectrum, aircraft observation, Qilian Mountains

## 引 言

“甘霖-I”大型无人机在祁连山北坡成功开展了增雨(雪)作业试验,填补了国内大型无人机人工增雨(雪)的空白,开创了大型无人机人工增雨的先例。人工增雨是通过影响云中微物理过程来实现的(雷恒池等,2008;郭学良等,2019),研究认识云滴和冰晶增长等云微物理过程是开展人工催化的关键环节(洪延超和雷恒池,2012;郭学良等,2013)。祁连山是我国西北地区重要的生态屏障和水源涵养生态功能区,降水是影响生态保护区生态安全的重要因素(程鹏等,2021b)。地形云降水是祁连山区主要降水云系,也是人工增雨的重点作业对象(陈添宇等,2010;郑国光等,2011)。云的微物理结构与降水关系密切,云物理结构及降水机制是云降水物理和人工影响天气的重要研究对象和热点问题。

利用飞机观测能够获得高时空分辨率的资料,能有效分析云微物理结构及演变过程(朱士超和郭学良,2015;郝团等,2019)。通过飞机观测研究云的微物理结构、催化对云和降水的影响有了深入认识(亓鹏等,2019;白婷等,2020;杨怡曼等,2020)。美国爱达荷州地形云播撒试验结果显示(Tessendorf et al,2019),进行飞机播撒后雷达出现锯齿状回波,云中粒子直径出现了爆发性增长的现象;French et al(2018)首次明确给出了播撒催化剂后云微物理和降水的物理链变化过程;杨文霞等(2005)对河北层状云降水云系研究发现,冷云中冰晶尺度随高度减低而增大,增长最快的高度区间是 3 100~3 400 m,并得出了适宜河北地区秋季催化作业的指标(孙玉稳等,2019;康增妹等,2019);华北地区的积层混合云的飞机观测数据分析表明(高茜等,2020),积层混合云中的层云区和积云区冰粒子的形成过程差别明显,层云区的粒子形状组成更为复杂;王维佳等(2011)对

多层云系的飞机探测结果分析得出云系中液态水含量主要由小云粒子浓度决定。虽然基于机载探测资料对云的微物理特征作了大量研究,但不同地区和不同降水云系的微物理特征存在明显区别(蔡兆鑫等,2019;孙晶等,2019)。

无人机在人工影响天气探测和作业方面的应用成为人影作业装备研发和应用新的发展方向(邵洋等,2014)。无人机增雨具有安全风险低、机动性好、可操作性强、覆盖区域大等优势,可实现全天候、全季节、立体化、规模化的增雨作业,能有效弥补目前人工增雨作业体系中的不足,在人工影响天气探测和作业中有较好的应用前景(邵洋等,2014;Axisa and DeFelice,2016)。当前国内外主要是应用小型无人机开展大气状态参数、液态水含量等播撒条件参数的探测(段婧等,2017;王宏斌等,2020)。马舒庆等(2006)研制的微型无人机实现了在雨天的播撒作业和探测,但仅能携带 1 kg 播撒剂,作业半径为 20 km。青海、新疆等省(自治区)人工影响天气办公室和航天科技四院中天火箭公司等先后尝试开展过无人机人工增雨试验,但都采用的是小型或微型无人机,因受催化剂携带量、飞行时间、防除冰等技术问题的制约,无人机增雨技术并未取得显著进展(马学谦等,2017)。

为提升祁连山生态文明建设气象保障能力,甘肃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,选用翼龙-II 大型无人机作为试验机型,在祁连山开展生态修复大型无人机增雨(雪)试验,完成了机载探测设备和作业系统的改装。无人机在前期进行了多次试验飞行,本文利用 2020 年 10 月 27 日在祁连山区东部成功开展的一次增雨作业及探测试飞资料,对无人机作业性能及催化后云微物理量变化特征进行分析和探讨,以期为大型无人机人工增雨业务化应用提供参考。

# 1 无人机探测与分析方法

## 1.1 无人机改装及探测设备情况

在综合考虑防除冰、有效载荷、抗侧风、续航时间等多种需求条件下,选用翼龙-Ⅱ型号的无人机作为试验机开展了大型无人机增雨试验(后被命名为“甘霖-Ⅰ”号)。该型号无人机为中空、长航时多用途无人机,具备高原起降和大载荷能力,最大载重为 480 kg,起降方式为滑翔起降,最大升限可达 9000 m,续航时间可达 20 h,地面抗侧风可达  $10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,机翼挂架 6 个。根据人工增雨(雪)作业和探测装备技术要求,对无人机进行了改装,改装后的无人机平台由增雨作业系统、探测系统和地面通讯指挥系统组成(图 1),其中增雨作业系统包括两部碘化银焰条播撒器,可携带 20 根焰条;并增加供电吊舱和防除冰装置,通过加热和防冰涂层消除空中结冰,突破了无人机空中防冰除冰等技术瓶颈。探测系统由中国兵器工业集团生产的云粒子谱探头(ZBT-CPS,以下简称 CPS)、云粒子成像仪(ZBT-CPI,以

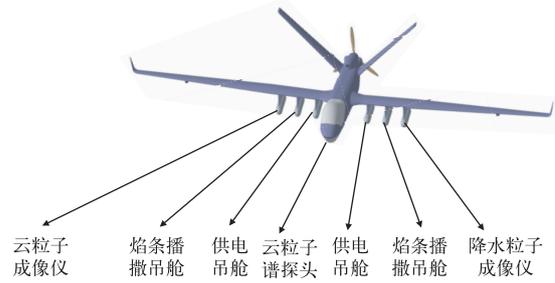


图 1 人工增雨试验无人机载人影作业、探测设备示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the airborne operation and detection equipment of the large UAV

下简称 CPI)和降水粒子成像仪(ZBT-PPI,以下简称 PPI)组成,后期可根据用途改装为作业机型,全部挂载焰条播撒器(可携带 40 根焰条),探测仪器具体性能参数见表 1(郭学良等,2020)。试验过程中,无人机通过通讯指挥系统将探测数据实时返回地面指挥舱,便于作业人员了解掌握云中微物理量实际情况。因为在此次探测过程中 CPS 资料缺失,本文利用 CPI 和 PPI 探测资料进行分析。

表 1 人工增雨试验无人机装备的机载云和降水探测仪器(郭学良等,2020)

Table 1 Airborne cloud and precipitation detection instruments mounted on UAV (Guo et al, 2020)

仪器名称	量程/ $\mu\text{m}$	测量分辨率/ $\mu\text{m}$	探测内容
云粒子谱探头(ZBT-CPS)	2~50	1.86	云粒子谱及浓度
云粒子成像仪(ZBT-CPI)	25~1550	25	云粒子二维图像、粒子谱及浓度
降水粒子成像仪(ZBT-PPI)	100~6200	100	降水粒子谱、浓度及二维图像

## 1.2 试验飞行概况

2020 年 10 月 27 日 17:01—21:27,在祁连山中东部开展了一次无人机增雨试飞试验,试验前由空管部门划定了无人机试验区(图 2),本次探测作业在试验区内进行。17:01 无人机从甘肃金昌机场起飞,起飞时天气为阴,云层较厚,温度为  $-0.4^\circ\text{C}$ 。起飞后至 17:38,无人机在 3000~6000 m 高度开展了第一次垂直探测;飞机爬升至 4700 m 时温度为  $-12^\circ\text{C}$ ,相对湿度为 80%,温度露点差小于  $2^\circ\text{C}$ ,高空风速为  $4 \sim 6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,风向为  $70^\circ \sim 110^\circ$ 。17:38—19:38 无人机根据预设的播撒方案开展了“耕犁式”播撒作业,作业总量为 20 根机载焰条,播撒碘化银 2500 g,总燃烧时长为 2 h,作业航线见图 2。从 19:38 开始,无人机进行回穿探测,作业和探测试验过程划分见表 2。在完成播撒作业和探测后,无人机于 21:27 在金昌机场降落。飞行过程中无人

机开启加热除冰装置,通过无人机携带的前视和后

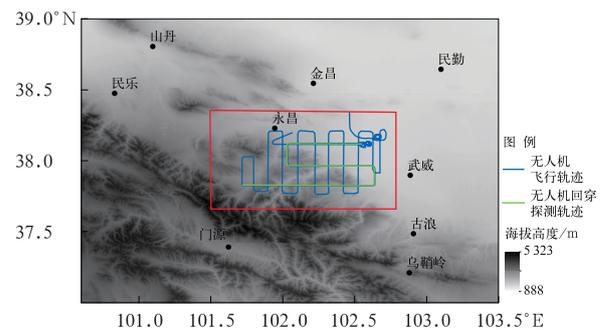


图 2 2020 年 10 月 27 日无人机增雨作业及探测航线(蓝色线条为播撒作业航线,绿色线条为回穿探测航线,红色方框为试验区)

Fig. 2 The UAV rain enhancement operation and detection route on 27 October 2020 (Blue line is the detection route, green line is the seeding operation route, and red frame is the test area)

表 2 2020 年 10 月 27 日无人机人工增雨试验过程

序号	时间/BT	探测过程名称	高度/m
1	17:19—17:38	作业前探测和第一次垂直探测	3000~6000
2	17:38—19:38	催化播撒作业及探测	4450~4700
3	19:38—19:56	第一次回穿探测(自西向东水平和下降探测)	3000~4800
4	20:01—20:10	第二次回穿探测(自东向西)和第二次垂直探测	3000~4800
5	20:17—20:26	第三次回穿探测(自西向东)	3000~4800
6	20:29—20:38	第三次垂直探测	2700~4800

视影像监测,机身未见结冰。飞行结束后无人机除油机后部有少量碎冰外,其余部分未见积冰。在金昌机场降落过程中,观测到  $9 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  的侧风,无人机平稳降落返回。此次播撒作业航线间隔  $10 \sim 12 \text{ km}$ ,相比有人飞机,无人机作业转弯半径较小,易操控。

## 2 结果与分析

### 2.1 天气背景及影响系统

2020 年 10 月 27 日祁连山区出现了一次大范围雨雪天气过程,其中试验区附近降水量为  $1.5 \sim 3.7 \text{ mm}$ (图 3),降水主要集中在 27 日 18:00—23:00,降水持续时间近 5 h。27 日 08:00,500 hPa 形势图上亚欧中高纬度为“两槽一脊”的环流形势,乌拉尔山受高压脊控制,极地冷空气沿高压脊前西北气流向西伯利亚地区输送,在  $70^\circ\text{E}$  的西伯利亚地区形成了中心强度为 526 dagpm 的低涡,冷空气在此堆积,低涡底部分裂的短波槽位于青藏高原西部。伴随低涡东移,短波槽进一步发展东移并南压,开始影响祁连山中东部,试验区受短波槽前的西南

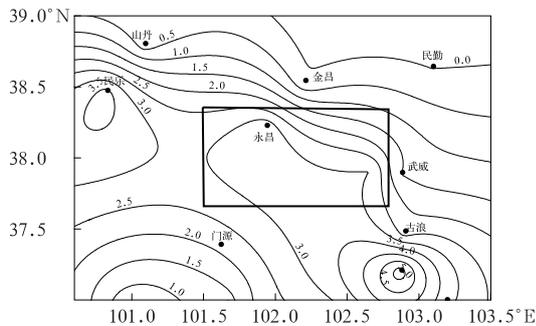


图 3 2020 年 10 月 27 日试验区地面 6 h 降水量分布  
(单位: mm, 方框为试验区)

Fig. 3 The 6 h ground precipitation distribution  
(unit: mm) in the test area on 27 October 2020  
(Frame is the test area)

气流控制,云系发展并加强。700 hPa 形势图上,来自孟加拉湾的西南暖湿气流沿着高原边坡发展,其前端已到祁连山中西部,相对湿度达到了 90% 以上,为此次降水过程提供了水汽条件。地面图上,试验区附近存在地面辐合线,为降水的加强提供了动力抬升条件。

### 2.2 云微物理特征

#### 2.2.1 水平方向云粒子变化特征

图 4 为云粒子成像仪观测得到的无人机在同一位置作业期间和作业后粒子浓度、直径变化特征。作业期间探测高度为 4450 m, CPI 粒子浓度在  $0.2 \sim 0.8 \text{ cm}^{-3}$  波动,变化起伏较大;粒径在  $650 \sim 1100 \mu\text{m}$ ,可以看出粒子浓度与直径呈明显的反相关变化特征,粒子浓度较低的时段粒径较大,粒子浓度较高的时段粒径较小。催化作业后 80 min 的探测结果显示(探测高度为 3950 m),粒子浓度和直径平均值较催化期间时有所增加,粒子浓度在  $0.4 \sim 0.6 \text{ cm}^{-3}$ ,直径增大较为明显,粒径在  $800 \sim 1000 \mu\text{m}$ 。可以看出,冷云经催化后粒子浓度及直径明显增加。因为 CPS 资料缺失,不能对小云粒子的变化特征分析,但从大云粒子催化前后的变化特征来看,催化后有利于云粒子长大。

表 3 为平飞探测时各高度层云粒子特征参数统计情况。在 4450 m 高度,整层粒子平均数浓度为  $0.27 \text{ cm}^{-3}$ ,最大值为  $0.99 \text{ cm}^{-3}$ ;粒子平均有效直径为  $724.46 \mu\text{m}$ ,最大值为  $1360.29 \mu\text{m}$ 。19:38—19:56,在 3950 m 高度进行了水平探测,粒子平均数浓度和平均有效直径较 4450 m 高度层有所增加,粒子平均数浓度为  $0.32 \text{ cm}^{-3}$ ,最大值为  $0.84 \text{ cm}^{-3}$ ;粒子平均有效直径为  $858.74 \mu\text{m}$ ,最大值为  $1348.06 \mu\text{m}$ 。20:17—20:26,在 3250 m 高度粒子数浓度有所下降,平均值为  $0.16 \text{ cm}^{-3}$ ,最大值为  $0.46 \text{ cm}^{-3}$ ;粒子平均有效直径和 4450 m 高度层接近,平均值为  $715.42 \mu\text{m}$ 。从表 3 可以看出,粒子

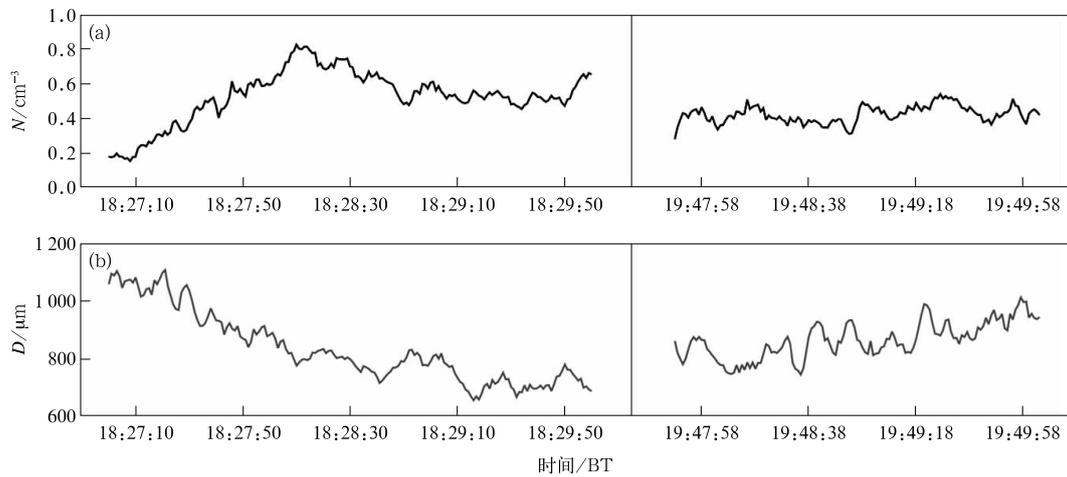


图 4 2020 年 10 月 27 日无人机作业期间(4450 m)和作业后(3950 m)云粒子成像仪探测的 (a)数浓度和(b)有效直径的变化 (黑色直线左侧为作业期间,右侧为作业后)

Fig. 4 Time distribution of (a) number concentration and (b) effective diameter by cloud particle imager (CPI) over seeding period (3950–4450 m) on 27 October 2020 (left of the black vertical line: detection of the seeding, right of the black vertical line: detection after the seeding)

表 3 2020 年 10 月 27 日无人机飞行探测过程中不同高度云粒子特征参数统计  
Table 3 Statistics of cloud particle characteristic parameters at various heights during UAV detection flight on 27 October 2020

高度/m	探测时间/BT	平均数浓度/cm <sup>-3</sup>	数浓度最大值/cm <sup>-3</sup>	平均有效直径/μm	有效直径最大值/μm
3250	20:17—20:26	0.16	0.46	715.42	1077.30
3950	19:38—19:56	0.32	0.84	858.74	1348.06
4450	17:38—19:35	0.27	0.99	724.46	1360.29

平均数浓度在 3950 m 高度最大(0.32 cm<sup>-3</sup>),4450 m 高度次之,3 250 m 高度最低;平均有效直径在 3950 m 高度最大,其他两个探测高度接近。与祁连山夏季降水探测结果相比(程鹏等,2021a),此次降水过程中粒子浓度小、直径大。

### 2.2.2 云微物理量的垂直结构特征

此次试验共进行了三次垂直探测,在播撒作业前进行了第一次垂直探测,探测时间为 17:19—19:36,探测高度为 3 500~5 650 m;播撒作业后 30 min(20:01—20:10)进行了第二次垂直探测,探测高度为 2 750~4 550 m;作业后 60 min(20:29—20:38)进行了第三次垂直探测,探测高度为 2 750~4 550 m,其中第一次和第三次垂直探测位置基本接近。在第一次垂直探测期间,大气环境温度在 -16~-6℃,整个云层为冷云。粒子数浓度随高度的变化起伏较大,粒子直径随高度先增大后减小(图 5);云粒子平均数浓度为 0.14 cm<sup>-3</sup>,平均有效直径为 701.8 μm。低层(3 700~4 500 m)粒子浓度在 0.1 cm<sup>-3</sup> 以下,4 500~5 650 m 粒子浓度在

0.2 cm<sup>-3</sup> 附近变化,低层粒子浓度明显小于高层,而低层粒子直径明显高于高层。在 3 500~3 700 m, CPI 云粒子浓度出现跃增,达到了 0.8 cm<sup>-3</sup> 以上。

无人机在作业后 30 min(20:01—20:10)进行了第二次垂直探测。云粒子数浓度较第一次垂直探测期间明显增大(图 5),在 0.4 cm<sup>-3</sup> 附近变化,整层平均数浓度为 0.327 cm<sup>-3</sup>,在 3 900 m 出现最大值为 0.8 cm<sup>-3</sup>,云粒子数浓度在 4 300 m 以上开始减小。粒子有效直径较第一次探测期间减小,在 800 μm 附近变化,最大值出现在 3 000 m(1 013 μm)。无人机在催化作业后 60 min(20:29—20:38)进行了第三次垂直探测,此次探测位置与第一次垂直探测位置基本接近。整层云粒子平均数浓度为 0.265 cm<sup>-3</sup>,平均有效直径为 666 μm。第三次垂直探测粒子直径变化特征与第二次基本一致,粒子浓度呈现出随高度先增大后减小的特征;粒子平均数浓度较第二次探测有所下降,但仍高于第一次。

分析云粒子和降水粒子探头资料可见:第一次垂直探测期间,粒子浓度随高度变化起伏较大,后两

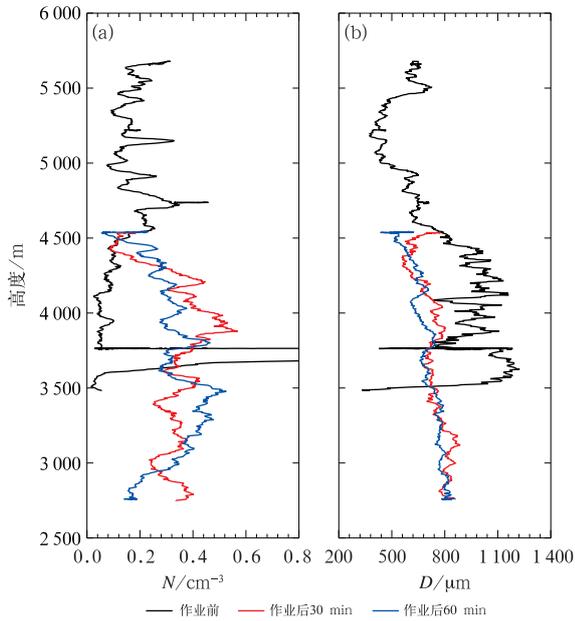


图 5 2020 年 10 月 27 日作业前及作业后云粒子  
(a) 数浓度和 (b) 平均有效直径的垂直廓线

Fig. 5 Vertical profile of particle (a) number concentration and (b) average effective diameter by CPI before operation and after seeding operation on 27 October 2020

次探测粒子浓度变化相对稳定, 粒子有效直径在 600~900 μm, 量级相同, 变化不大; 催化作业前低层粒子浓度明显小于高层, 催化作业后低层粒子浓度明显增加; 而催化作业后的粒子直径均明显减小, 这与水平方向云粒子催化前后的变化特征不同。

从给出的云粒子形状随高度和温度的垂直变化 (图 6) 可以看到, 飞机在 4400 m 高度以上观测到的冰晶主要有枝状、凇附枝状、六角板状和枝星状; 在 3600~4400 m 高度, 观测到的冰晶主要有六角枝状、六角板状、枝星状、板状; 在 3000~3600 m 高

度, 观测到的冰晶主要有板状、六角空心状; 3000 m 高度以下观测到的冰晶形态主要为霰粒。探测过程中无人机的视频录像及试飞结束落地后无人机油机后部少量碎冰表明, 云中过冷水含量丰富。

2.2.3 粒子谱分布特征

图 7 为此次探测过程中不同高度层云粒子谱分布, 分别选取 3250、3950、4450 m 高度的云粒子谱

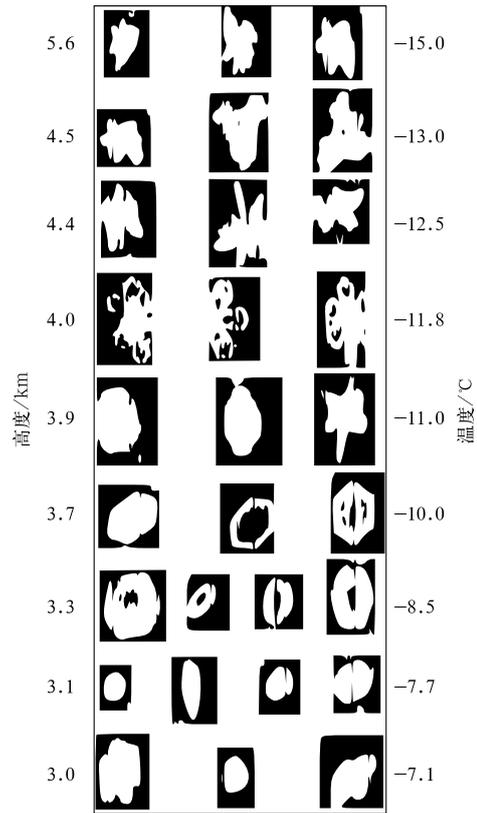


图 6 2020 年 10 月 27 日探测的云粒子图像  
Fig. 6 Images of cloud particles by CPI during detecting flight on 27 October 2020

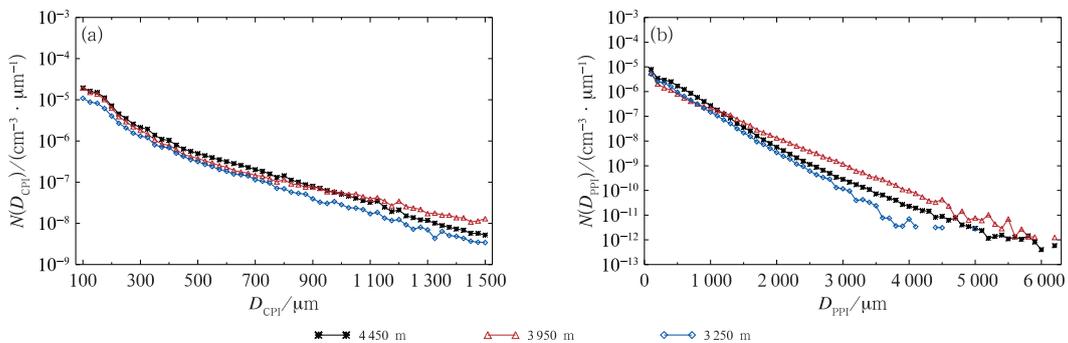


图 7 2020 年 10 月 27 日不同高度层 (a) 云粒子谱和 (b) 降水粒子谱分布变化  
Fig. 7 Changes of (a) cloud particle spectrum distribution and (b) precipitation particle spectrum distribution at various heights on 27 October 2020

进行分析比较。不同高度层云粒子谱型呈单调递减特征(图 7a),峰值出现在  $150 \mu\text{m}$  处,数浓度量级为  $10^{-5} \text{ cm}^{-3} \cdot \mu\text{m}^{-1}$ 。在  $900 \mu\text{m}$  以下较小粒径段,谱分布基本相同,云粒子谱随高度而增加,说明小粒子浓度大于下层;而在  $900 \sim 1500 \mu\text{m}$  较大粒径段,  $3950 \text{ m}$  云粒子浓度最大、 $4450 \text{ m}$  次之、 $3250 \text{ m}$  最小,有可能是本次降水过程存在干层,上层云中部分大云滴在下落过程中蒸发,且一定程度上阻碍了上层冷云中冰雪晶粒子下落。降水粒子谱与云粒子谱分

布特征相近(图 7b),不同高度层降水粒子谱分布基本相同。粒径  $1100 \mu\text{m}$  以下,粒子数浓度由高层向低层减小;  $1100 \mu\text{m}$  粒径以上,  $3950 \text{ m}$  高度层的浓度值明显高于其他两层。

### 2.3 作业前后云微物理特征响应

作业前后粒子谱的变化可以反映催化后的作业效果。图 8 给出无人机催化作业前(17:36—17:44)和作业后(19:36—19:44)云粒子、降水粒子的谱对

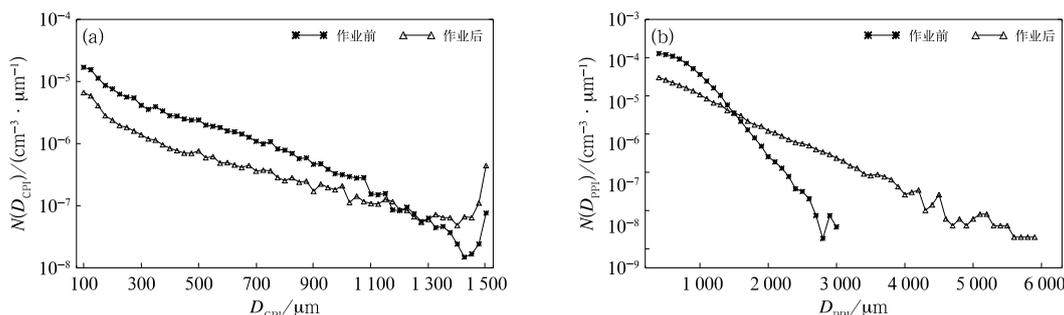


图 8 2020 年 10 月 27 日催化作业前后(a)云粒子谱和(b)降水粒子谱变化特征  
Fig. 8 (a) Cloud particle spectrum and (b) precipitation particle spectrum before and after seeding operation on 27 October 2020

比。作业前和作业后云粒子浓度值随粒径增大均呈减小趋势(图 8a),云粒子谱峰值均在  $150 \mu\text{m}$  处;在  $1200 \mu\text{m}$  以下作业后的粒子浓度明显低于作业前,而在  $1200 \mu\text{m}$  以上作业后的粒子浓度高于作业前,说明催化作业后大云粒子增加。图 8b 为催化作业前和作业后的降水粒子谱,作业前和作业后粒子浓度值随粒径增大均呈减小趋势,作业后粒子谱拓宽。在  $1400 \mu\text{m}$  以下段,作业后粒子浓度低于催化作业前,而在  $1400 \mu\text{m}$  段以上,作业后粒子浓度较作业前明显增大。浓度值发生变化的粒径值位于  $1400 \mu\text{m}$ ,与 CPI 探测结果相比略偏大,可能是因为仪器观测误差造成。作业后粒子浓度发生变化而且谱宽变宽,由作业前的  $3000 \mu\text{m}$  增加到  $6200 \mu\text{m}$ 。

无人机在试验区永昌站上空进行催化作业的时间为 19:02—19:10,考虑到上下游影响(永昌站位于下游),受催化影响的时间应早于 19:02。从永昌站地面降水现象仪数据(图 9)可以看出,催化作业期间雨滴数浓度和直径均出现了增加,催化作业结束后 20 min 内永昌站雨滴数浓度出现了先减小后增大的特征,而粒子有效直径持续增加,30 min 后粒子浓度和直径均开始减小。同时分析了位于永昌站上游皇城水关站地面雨滴谱数据,其浓度和直径

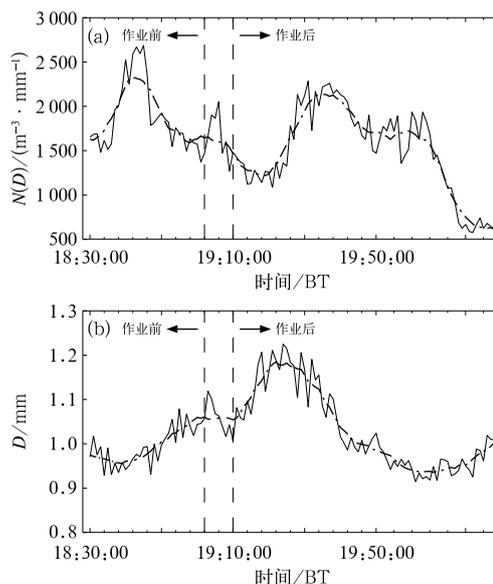


图 9 2020 年 10 月 27 日作业影响区永昌站催化作业前后雨滴谱分布(a)粒子数浓度,(b)粒子平均有效直径(点划线为 5 点滑动平均,两条垂直虚线之间为永昌站上空催化作业时间段)

Fig. 9 Raindrop spectrum distribution before and after the seeding operation at Yongchang Station on 27 October 2020  
(a) particle number concentration,  
(b) average effective particle diameter  
(dash dot line: the 5-point moving average, range between the vertical dotted lines: the time period of seeding over Yongchang Station)

变化特征与永昌站相似(图略)。

表 4 为无人机作业前、作业中和作业后 60 min 的云粒子平均浓度及平均直径统计值,选取的作业中和作业后的位置基本接近,作业前的探测位置位于催化作业区的上游。从表中可以看出,云粒子浓度在作业前平均值为  $0.44 \text{ cm}^{-3}$ ,催化作业期间浓度值有所增加,为  $0.53 \text{ cm}^{-3}$ ,催化作业结束 80 min 后粒子浓度为  $0.42 \text{ cm}^{-3}$ ,较作业前有所下降;平均直径则由作业前  $717.21 \mu\text{m}$  增大为  $865.37 \mu\text{m}$ 。从前面平飞的分析结果也可知,催化作业后出现云粒子浓度和直径增加的特征,而从垂直探测的结果可见,催化后出现云粒子浓度增加、直径减小的特征,其原因可能是选取分析的云体位置不同有关。

表 4 无人机催化作业前后云粒子特征参数  
Table 4 Statistics of cloud particle characteristics parameter before and after catalytic operation

高度/m	探测时间/BT	时段	$N_{\text{CPI}}$ 平均值 / $\text{cm}^{-3}$	$D_{\text{CPI}}$ 平均值 / $\mu\text{m}$
4500	17:36—17:38	作业前	0.44	717.21
3950	18:27—18:30	作业中	0.53	836.89
3950	19:47—19:50	作业后	0.42	865.37

### 3 结 论

利用 2020 年 10 月 27 日“甘霖-I”大型无人机在祁连山区的人工增雨试验资料,对此次探测和作业结果及无人机性能进行了分析,主要结论如下:

(1) 飞行试验表明,此次播撒作业航线间隔 10~12 km,无人机转弯半径较小,操控灵活;飞行高度在 2700~6000 m,可挂载 20 根焰条,作业、探测时长达 5 h 以上,具备较好的防除冰和抗侧风能力,能满足大范围人工增雨及探测需求。此次试验无人机催化作业 2 h,播撒碘化银 2500 g。

(2) 无人机平飞探测结果表明,不同高度 CPI 云粒子浓度平均值在  $0.16 \sim 0.32 \text{ cm}^{-3}$ ,粒径在  $715.42 \sim 858.74 \mu\text{m}$ ;催化作业后水平探测的云粒子微物理特征呈现出浓度和直径增加的特征。从催化前后垂直探测的结果来看,催化作业前低层粒子浓度明显小于高层,催化作业后低层粒子浓度明显高于高层;催化前后云微物理特征的变化与选取的云体位置及时间有很大关系。在催化作业结束后 20~30 min 内,地面降水现象仪中雨滴数浓度出现了先减小后增大的特征,而粒子有效直径持续增加。

(3) 此次降水过程中不同高度的云粒子谱呈单调递减分布特征,在  $900 \mu\text{m}$  以下较小粒径段,谱分布基本相同,云粒子谱随高度而增加;而在  $900 \sim$

$1500 \mu\text{m}$  较大粒径段云粒子谱随高度先增加后减小;催化作业后云粒子谱呈现大云粒子增加、降水粒子谱拓宽的特征。

本次无人机试飞展现出了较好的性能,针对大型无人机的人工影响天气作业、探测改装取得了较大进展,突破了除冰等技术,为后续开展无人机增雨试验奠定了基础;但无人机作业性能及作业效果的探讨需要积累更多的个例和资料,以便进行深入分析。

### 参考文献

- 白婷,黄毅梅,樊奇,2020. 河南一次降水天气过程人工增雨作业条件综合分析[J]. 气象,46(12):1633-1640. Bai T, Huang Y M, Fan Q, 2020. Comprehensive analysis on the conditions of artificial precipitation enhancement during a precipitation weather process in Henan Province[J]. Meteor Mon, 46(12):1633-1640 (in Chinese).
- 蔡兆鑫,蔡森,李培仁,等,2019. 大陆性积云不同发展阶段宏观和微观物理特性的飞机观测研究[J]. 大气科学,43(6):1191-1203. Cai Z X, Cai M, Li P R, et al, 2019. Aircraft observation research on macro and microphysics characteristics of continental cumulus cloud at different development stages[J]. Chin J Atmos Sci, 43(6):1191-1203(in Chinese).
- 陈添宇,郑国光,陈跃,等,2010. 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[J]. 高原气象,29(1):152-163. Chen T Y, Zheng G G, Chen Y, et al, 2010. Observational experiment on generation and development of summer orographic cloud during the southwest air current pattern in Qilian Mountain[J]. Plateau Meteor, 29(1):152-163(in Chinese).
- 程鹏,罗汉,常祎,等,2021a. 祁连山一次地形云降水微物理特征飞机观测[J]. 应用气象学报,32(6):691-705. Cheng P, Luo H, Chang Y, et al, 2021a. Aircraft measurement of microphysical characteristics of a topographic cloud precipitation in Qilian Mountains[J]. J Appl Meteor Sci, 32(6):691-705(in Chinese).
- 程鹏,罗汉,刘琴,等,2021b. 基于地基 GPS 的祁连山大气可降水量特征[J]. 气象,47(9):1135-1145. Cheng P, Luo H, Liu Q, et al, 2021b. Characteristics of precipitable water vapor in Qilian Mountains based on ground-based GPS data[J]. Meteor Mon, 47(9):1135-1145(in Chinese).
- 段婧,楼小凤,卢广献,等,2017. 国际人工影响天气技术新进展[J]. 气象,43(12):1562-1571. Duan J, Lou X F, Lu G X, et al, 2017. International recent progress in weather modification technologies[J]. Meteor Mon, 43(12):1562-1571(in Chinese).
- 高茜,郭学良,何晖,等,2020. 基于飞机观测的华北积层混合云降水微物理特征的数值模拟研究[J]. 大气科学,44(5):899-912. Gao Q, Guo X L, He H, et al, 2020. Numerical simulation study on the microphysical characteristics of stratiform clouds with embedded convections in northern China based on aircraft measurements[J]. Chin J Atmos Sci, 44(5):899-912(in Chinese).
- 郭学良,方春刚,卢广献,等,2019. 2008—2018 年我国人工影响天气技术及应用进展[J]. 应用气象学报,30(6):641-650. Guo X L, Fang C G, Lu G X, et al, 2019. Progresses of weather modification technologies and applications in China from 2008 to 2018

- [J]. *J Appl Meteor Sci*, 30(6): 641-650(in Chinese).
- 郭学良, 付丹红, 胡朝霞, 2013. 云降水物理与人工影响天气研究进展(2008~2012年)[J]. *大气科学*, 37(2): 351-363. Guo X L, Fu D H, Hu Z X, 2013. Progress in cloud physics, precipitation, and weather modification during 2008—2012[J]. *Chin J Atmos Sci*, 37(2): 351-363(in Chinese).
- 郭学良, 于子平, 杨泽后, 等, 2020. 高性能机载云粒子成像仪研制及应用[J]. *气象学报*, 78(6): 1050-1064. Guo X L, Yu Z P, Yang Z H, et al, 2020. Development and application of the high-performance airborne cloud particle imager[J]. *Acta Meteor Sin*, 78(6): 1050-1064(in Chinese).
- 郝团, 陈景华, 濮梅娟, 等, 2019. 华东地区夏季云微物理结构的飞机观测分析[J]. *气象科学*, 39(4): 524-531. Hao J, Chen J H, Pu M J, et al, 2019. Aircraft measurements of microphysical properties of clouds over eastern China in summer[J]. *J Meteor Sci*, 39(4): 524-531(in Chinese).
- 洪延超, 雷恒池, 2012. 云降水物理和人工影响天气研究进展和思考[J]. *气候与环境研究*, 17(6): 951-967. Hong Y C, Lei H C, 2012. Research advance and thinking of the cloud precipitation physics and weather modification[J]. *Climatic Environ Res*, 17(6): 951-967(in Chinese).
- 康增妹, 李忠亮, 刘伟, 等, 2019. 河北省一次降水云系云物理结构的飞机探测研究[J]. *气象与环境学报*, 35(4): 1-7. Kang Z M, Li Z L, Liu W, et al, 2019. Aircraft observations on physical properties of precipitation clouds in Hebei Province[J]. *J Meteor Environ*, 35(4): 1-7(in Chinese).
- 雷恒池, 洪延超, 赵震, 等, 2008. 近年来云降水物理和人工影响天气研究进展[J]. *大气科学*, 32(4): 967-974. Lei H C, Hong Y C, Zhao Z, et al, 2008. Advances in cloud and precipitation physics and weather modification in recent years[J]. *Chin J Atmos Sci*, 32(4): 967-974(in Chinese).
- 马舒庆, 郑国光, 汪改, 等, 2006. 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*, 21(5): 545-550. Ma S Q, Zheng G G, Wang G, et al, 2006. The study of miniature robot aircraft for weather modification[J]. *Adv Earth Sci*, 21(5): 545-550(in Chinese).
- 马学谦, 孙安平, 张小军, 等, 2017. 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*, 33(15): 105-111. Ma X Q, Sun A P, Zhang X J, et al, 2017. Development and experiment of enhancement precipitation unmanned aerial vehicle adapted to weather and topography of plateau[J]. *Trans Chin Soc Agric Eng*, 33(15): 105-111(in Chinese).
- 亓鹏, 郭学良, 卢广献, 等, 2019. 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[J]. *大气科学*, 43(6): 1365-1384. Qi P, Guo X L, Lu G X, et al, 2019. Aircraft measurements of a stable stratiform cloud with embedded convection in eastern Taihang Mountain of North China: characteristics of embedded convection and melting layer structure[J]. *Chin J Atmos Sci*, 43(6): 1365-1384(in Chinese).
- 邵洋, 刘伟, 孟旭, 等, 2014. 人工影响天气作业装备研发和应用进展[J]. *干旱气象*, 32(4): 649-658. Shao Y, Liu W, Meng X, et al, 2014. Development and application advances of cloud seeding instruments[J]. *J Arid Meteor*, 32(4): 649-658(in Chinese).
- 孙晶, 蔡森, 王飞, 等, 2019. 安庆地区一次飞机积冰的气象条件分析[J]. *气象*, 45(10): 1341-1351. Sun J, Cai M, Wang F, et al, 2019. A case study of aircraft icing conditions in Anqing Area[J]. *Meteor Mon*, 45(10): 1341-1351(in Chinese).
- 孙玉稳, 董晓波, 李宝东, 等, 2019. 太行山东麓一次低槽冷锋降水云系云物理结构和作业条件的飞机观测研究[J]. *高原气象*, 38(5): 971-982. Sun Y W, Dong X B, Li B D, et al, 2019. The physical properties and seeding potential analysis of a low trough cold front cloud system at Mountain Taihang based on aircraft observations[J]. *Plateau Meteor*, 38(5): 971-982(in Chinese).
- 王宏斌, 吴泓, 李永, 等, 2020. 旋翼无人机盐城试验观测资料分析及其在一次浓雾天气观测中的应用[J]. *气象*, 46(1): 89-97. Wang H B, Wu H, Li Y, et al, 2020. Validation of rotorcraft UAV boundary layer meteorological observation data and its application in a heavy fog event in Yancheng[J]. *Meteor Mon*, 46(1): 89-97(in Chinese).
- 王维佳, 董晓波, 石立新, 等, 2011. 一次多层云系云物理垂直结构探测研究[J]. *高原气象*, 30(5): 1368-1375. Wang W J, Dong X B, Shi L X, et al, 2011. Study on vertical microphysical structure of cloud for a multi-layer cloud system[J]. *Plateau Meteor*, 30(5): 1368-1375(in Chinese).
- 杨文霞, 牛生杰, 魏俊国, 等, 2005. 河北省层状云降水系统微物理结构的飞机观测研究[J]. *高原气象*, 24(1): 84-90. Yang W X, Niu S J, Wei J G, et al, 2005. Airborne observation for microphysical structure of precipitation system of stratiform cloud in Hebei Province[J]. *Plateau Meteor*, 24(1): 84-90(in Chinese).
- 杨怡曼, 周毓荃, 蔡兆鑫, 2020. 气溶胶垂直分布及活化特性的飞机观测个例研究[J]. *气象*, 46(9): 1199-1209. Yang Y M, Zhou Y Q, Cai Z X, 2020. A case study of aircraft observation of aerosol vertical distribution and activation characteristics[J]. *Meteor Mon*, 46(9): 1199-1209(in Chinese).
- 郑国光, 陈跃, 陈添宇, 等, 2011. 祁连山夏季地形云综合探测试验[J]. *地球科学进展*, 26(10): 1057-1070. Zheng G G, Chen Y, Chen T Y, et al, 2011. The observational study of summer orographic clouds structures of Qilian Mountains[J]. *Adv Earth Sci*, 26(10): 1057-1070(in Chinese).
- 朱士超, 郭学良, 2015. 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[J]. *大气科学*, 39(2): 370-384. Zhu S C, Guo X L, 2015. A case study comparing WRF-model-simulated cloud microphysics and precipitation with aircraft measurements in stratiform clouds with embedded convection in northern China[J]. *Chin J Atmos Sci*, 39(2): 370-384(in Chinese).
- Axisa S, DeFelice T P, 2016. Modern and prospective technologies for weather modification activities: a look at integrating unmanned aircraft systems[J]. *Atmos Res*, 178/179: 114-124.
- French J R, Friedrich K, Tessendorf S A, et al, 2018. Precipitation formation from orographic cloud seeding[J]. *Proc Natl Acad Sci USA*, 115(6): 1168-1173.
- Tessendorf S A, French J R, Friedrich K, et al, 2019. A transformational approach to winter orographic weather modification research: the SNOWIE Project[J]. *Bull Amer Meteor Soc*, 100(1): 71-92.

(本文责编:戴洋)