

中天山试验区人工增雨(雪)试验: 方案设计与初步结果

刘恩弘 杨璟 银燕 李斌 李圆圆 景晓琴 陈魁 王红磊 杨军 陈倩

试验初期,完成了多部雷达的架设、观测和数据质量监控。在2019年夏季以乌鲁木齐牧试站为基地成功观测了多个降水过程,完成了气溶胶和冰核的连续地面观测以及无人机观测;在2019—2020年冬季成功观测两次降雪过程,并进行了烟炉增雪作业。

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2021.05.024

新疆位于我国西北部,地处欧亚大陆腹地,远离海洋,气候不受季风系统的直接影响,新疆北部是阿尔泰山脉,南部是昆仑山脉,中部有横贯全境的天山山脉,三山环抱塔里木盆地和准噶尔盆地形成三山夹两盆的独特地形。研究发现,新疆西部和北部的气候主要受西风带系统的影响,在天山、帕米尔高原等地则出现多雨带,山区年降水量一般超过400 mm,个别地方超过500 mm,所以天山山地也被称为干旱区的“湿岛”,是新疆重要的水资源来源。姚俊强等指出天山空中拥有丰富的云水资源,运用人工增雨(雪)技术来提高云水资源降水转化率,可以极大改善西北部干旱缺水的情况,增加河流径流量,增加山区积雪、冰川储水量。

在人工增雨(雪)研究中,催化剂在大气中的扩散是近年来研究的主要问题之一。如Boe等基于地面冰核计数器以及飞机冰核采样发现,冬季地面播撒的催化剂粒子基本只在近地面的边界层内传播,通常垂直传播高度在距地面600 m以内,同时表明催化剂的扩散角度大约为 10° 。Xue等通过大涡模拟发现,在复杂地形地区,地形引起的近地面湍流是碘化银垂直传播的主要机制。另外一个重要的研究方面是催化剂在云内增强降水的物理机制。Jing等通过冬季地面播撒碘化银实验,以及双偏振雷达数据分析,发现在冬季,不论是层云还是浅对流云,播撒碘化银后,云雾中冰晶增长的主要方式是贝吉龙过程。French等在美国爱达荷通过试验发现,在冬季地形云中播撒碘化银粒子后,在受到碘化银影响的区域粒子谱明显变宽,

雷达回波反射率增大。

对人工增雨(雪)的效果验证也是一项重要的研究内容。王婉等基于区域历史回归统计方法对北京市2006年的人工增雨效果进行了统计检验,结果表明人工增雨效果约为13%。李斌等基于1957—2016历年12月份的历史降水数据对新疆克拉玛依人工增雨(雪)的效果进行了统计分析,结果表明人工增雪效果为24.5%。Rasmussen等基于13年的地面降水观测和模拟研究表明地面播撒碘化银的增雪效果为5%。

在天山地区,由于综合观测资料的缺乏,对地形云降水的形成机制和物理特征还不够清楚,也缺乏对人工播撒碘化银引起的云物理过程变化的相关研究,从而导致该地区人工增雨(雪)效果还有较大不确定性。新疆自治区人工影响天气办公室联合南京信息工程大学、成都信息工程大学于2018年开始在中天山试验区开展了为期三年的人工增雨(雪)试验,基于飞机、遥感和地面观测平台对中天山北坡地形云降水发生演变过程进行综合观测,分析研究天山山区降水过程宏观、微观物理结构,并对人工播撒碘化银的效果进行检验。具体科学目标包括:

- 1) 中天山地区不同季节典型地形云降水系统的特征及其形成机制;
- 2) 不同天气条件下人工播撒碘化银扩散到云内起到增雨(雪)效果的过程;
- 3) 人工播撒碘化银引起的地形云内物理特征变化;
- 4) 人工播撒碘化银的增雨(雪)效果是否能够

收稿日期: 2021年8月14日; 修回日期: 2021年10月11日

第一作者: 刘恩弘, Email: 20191203014@nuist.edu.cn

通信作者: 杨璟, Email: jing.yang@nuist.edu.cn

资助信息: 西北人工影响天气项目(ZQCR18211); 中国气象局西北区域人影建设研究试验项目(RYSY201902)

从复杂的自然变化中观测及其效果大小。

1 试验场背景和仪器

1.1 试验场背景

已有研究表明新疆地区夏季水汽输送量最大，冬季水汽输送量最小，由于新疆三面环山，四季均为对流层中层水汽输送量最大。大量的暴雨个例分析指出有三条主要水汽输送路径，一支为西风气流和影响系统本身携带的西风水汽输送，另一支为中亚低槽或低涡南伸槽前西南气流携带的偏南水汽输送，还有一些极端情况在合适环流配置下阿拉伯海水汽以接力输送方式输送水汽，这三支水汽在新疆汇合造成暴雨。除了考虑水汽输送条件外，天山地区人工增水试验区的选择应充分兼顾可行性、科学性及其对经济，环境，生态文明建设的影响。

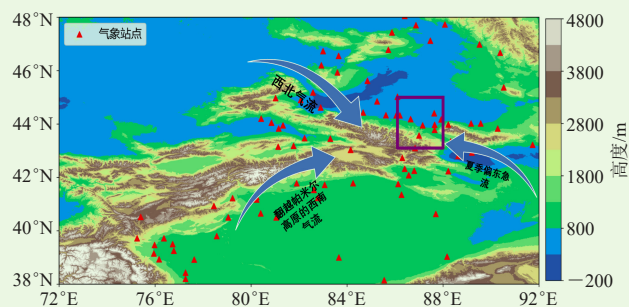


图1 试验区(紫色框内)和气象站点(红色三角)

依据已有的研究成果，选择在乌鲁木齐市西南方中天山北坡地区建设天山地形云人工增雨(雪)试验示范基地外场试验区(图1)。该地区相对来说水汽条件较好，在西北或偏北气流的背景下，水汽通过中天山北坡地形抬升作用形成地形云。此外，该地区基础设施较为完善、气象观测基础条件好，已有较多的观测仪器，通过合理的试验设计，可以利用此区域的地形云作业。

1.2 仪器介绍和布设

为了观测地形云降水系统的三维宏观特征、精细的微观特征，并分析地形对云降水产生的作用，需要采用不同波段的雷达，包括云雷达、微雨雷达、降水雷达等，并通过飞机观测云内微物理特征。通过微波辐射计、GNSS/MET、探空气球等观测气象条件，从而更好得分析地形云形成的背景。此外，在中天山北坡从山脚到山顶布设的气象站进行梯度观测，研究从山脚到山顶的降水变化。用于播撒碘化银的地面烟炉主要布设在中天山北坡山脚和山腰处。

具体仪器布置如图2所示，观测设备如表1所示。

在位于天山白杨沟风景区中天山草地生态气

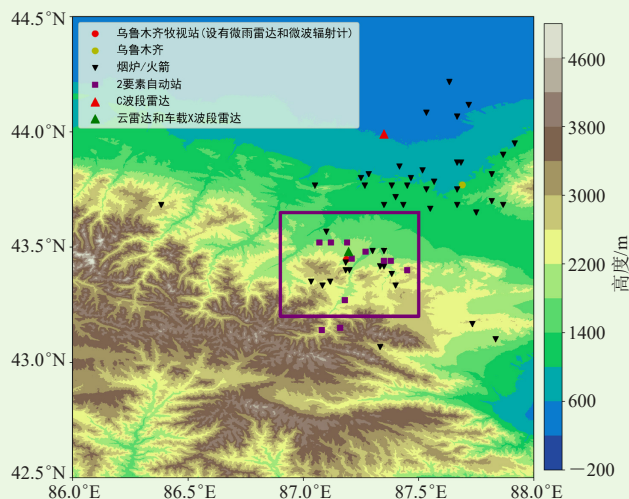


图2 试验区地形及地面仪器位置分布

象监测站对天山气溶胶数浓度粒径分布和云凝结核(CCN)进行连续观测，气溶胶数浓度观测仪器使用美国MSP公司生产的宽范围颗粒粒径谱仪(WPS)，测量粒径范围为 $0.01 \sim 10 \mu\text{m}$ ，观测中使用的分辨率为5 min。CCN数浓度观测采用的是美国DMT公司的CCNC-100。对冰核的观测采用自行搭建的大气冰核高压静电采样器作为大气冰核主要的采样工具，利用抽气泵使含有大气冰核的空气通过采样片，在高压静电的作用下，大气冰核吸附在采样片上，将采集的样本于实验室内进行不同条件的活化实验(即离线观测)，得到大气冰核浓度。

此外，在空域允许的情况下，设计了飞机播撒催化剂和云微物理观测方案(见2.3节)，机载仪器包括：

- 1) 机载Ka波段云雷达观测，用于提供飞行剖面的云降水系统的特征，可以探测到地面，包括雷达回波和多普勒速度，帮助理解云物理过程和动力的相互作用；
- 2) 飞机基本气象要素观测：提供温度、气压、风速、湿度等的气象要素测量；
- 3) 飞机微物理探头观测：用于研究云中微物理过程，包括云滴和冰晶粒子的生成及其微观形态特征、云中液态水含量、云微物理过程和环境之间的相互作用等。

飞机微物理探测设备即观测目的：

- 1) 云粒子谱探头CDP：观测直径为 $1 \sim 50 \mu\text{m}$ 的云滴粒子谱；
- 2) 云降水粒子探头CIP：观测直径为 $50 \sim 2000 \mu\text{m}$ 的云与降水粒子二维图像；
- 3) 降水粒子探头PIP：观测直径大于 $2000 \mu\text{m}$ 的

表1 天山地形云人工增雨(雪)试验示范基地设备

名称	仪器型号	厂家	分辨率/m	数量/个
降水现象仪	DSG1	江苏省无线电科学研究所有限公司	—	8
微波辐射计	MWP967KV	北方天穹信息技术(西安)有限公司	50, 100, 250	1
车载毫米波云雷达	ACP30000	北京爱尔达电子设备有限公司	300	1
全球导航卫星系统气象观测(GNSS/MET)站	PolaRx4	北京创宇星通科技有限公司	—	2
自动气象站(含固态降水观测)	DZZ4	江苏省无线电科学研究所有限公司	—	14
车载双偏振多普勒X波段雷达	724XSP	南京鹏力科技集团	150	1
冰核采样器	自行搭建	南京信息工程大学	—	1
云凝结核计数器	CCNC-100	美国DMT公司	—	1
气溶胶采样器	WPS	美国MSP公司	—	1
探空气球	300G	广州双一气象器材有限公司	—	1

降水粒子二维图像;

4) 气溶胶粒子谱仪PCASP: 观测直径为0.1~3 μm的气溶胶粒子谱;

5) 热线液态含水量仪: 观测云中云滴液态含水量。

6) 高压静电冰核采样器: 采集气溶胶粒子, 用于后期实验室内水汽静力扩散云室实验, 分析冰核数浓度及其理化特征。

2 试验方案

2.1 地形云地面观测

利用自动气象站、气象探空、微波辐射计、全球导航卫星系统气象观测(GNSS/MET)等设备, 收集不同天气地形云的水平及垂直方向大气的湿度、温度资料, 开展观测研究, 为精确实施人工增雨作业提供依据。通过再分析资料、中尺度模式结果研究并获取水汽场气候特征, 并开展不同云型的水汽综合观测对比试验, 分析垂直方向不同设备针对地形云探测的水汽变化特征, 比较设备之间的误差并研究订正算法, 结合卫星资料开展地形云云水资源和降水效率研究。

降水期间使用Ka波段云雷达、微雨雷达、X波段降水雷达和C波段天气雷达对地形云降水系统的三维宏观结构进行综合观测, 分析云内精细结构的变化, 并结合再分析资料和模式模拟结果研究地形对云宏观、微观和微物理过程的影响。C波段天气雷达位于乌鲁木齐站, 天气雷达可以提供大范围的四维立体云降水回波特征可以同时探测到播撒区和非播撒区。云雷达和X波段雷达架设在乌鲁斯台, 其中, 云雷达采用RHI连续扫描, 扫描时间间隔为5 min, 在夏季, 由于降水过程中, 风向多为偏北风和西南风, 因此扫描方向设置为南北向。在冬季, 风向多偏西风, 因此扫描方向设置为东西向。X波段雷达采用体扫, 其波长为3 cm, 可以较好地探测降水结构, 与云雷达结合使用, 实现了大范围的云降水系统同步观测。微雨雷达架设在牧试站, 提供垂直向上的连续观测资料, 时

间间隔设置为30 s。

2.2 气溶胶和冰核观测

结合现有仪器设备新增设1个气溶胶超级观测站点, 主要观测气溶胶粒径谱分布、CCN数浓度、雾滴谱、冰核、中流量或者小流量的滤膜采样、气象要素、黑碳等要素, 用于分析地形云生消过程及人影作业期间云的物理化学演变特征。这种站点进行夏、冬季连续观

测, 用于研究人影增雨和增雪, 每次观测的连续有效时间为20天左右。此外, 可利用已有的观测设备进行东北—西南朝向的梯度观测。若气流为偏西气流时, 此区域的仪器也可对下风区的气象环境要素及降水情况进行观测, 并可以用于验证人工增雨(雪)的效果。此外, 在夏季选取2~3次过程使用超级站的仪器设备对乌鲁木齐市区和天山试验区加密观测, 期间进行人工增雨(雪)作业, 用于补充气象站梯度观测数据, 还进行冰核数浓度及其化学特性的观测, 通过对比上风区和下风区的冰核数浓度, 用来研究人工催化剂的扩散范围。将采集的样本于实验室内进行不同条件的活化实验, 建立冰核参数化方案。

2.3 地面人工增雨(雪)及观测

选取中亚槽型、北支槽型、西北气流型、横槽型4种典型天气类型, 利用试验区建设的高炮、火箭、和烟炉开展人工增雨(雪)试验。如图2所示, 烟炉和火箭等设备大部分布设在试验区山脚和山腰处。火箭所播撒的碘化银通常能直接打入云中, 并随气流抬升。烟炉所播撒的碘化银随着爬坡气流抬升, 并通过边界层湍流和对流混合到地形云内。为了观测碘化银的影响, 需要通过不同波段的雷达进行观测。实验中, 车载X波段雷达采用体扫模式, 探测半径约50 km, 播撒后进行平行于风向的剖面扫描, 分析人工增雨(雪)对降水的增强作用及对降水粒子生长过程的影响。此外, 车载Ka波段云雷达探测距离为30 km, 采用RHI扫描模式, 可以用于判断云顶高度、云层结构, 尤其是在随机播撒碘化银期间云层结构随时间的变化。根据高炮、火箭、烟炉实施的催化作业综合探测结果, 分析催化云和对比云的背景场、宏观特征、微观特征和降水特征及其演变的差异, 结合数值模拟结果, 分析差异的合理性, 确定合理差异的物理参量, 用于验证催化作业效果, 分析得出不同典型天气型, 不同播散方式, 不同催化方式的最佳播撒时

机、最佳播撒部位、最佳播撒剂量和催化影响范围。

2.4 飞机人工增雨(雪)及观测

夏季和冬季观测方案的设计如图3。

夏季,天山北坡主要盛行偏北风,使用观测飞机沿蓝色线进行梯度观测(图3a),最北侧飞行路径在作业飞机路径的上风向,飞行高度在作业飞机上方,保持安全距离。从上风向到下风向的相邻飞行路径之间高度差约为300 m。橘黄色区域为受到碘化银影响的区域,蓝色飞机观测线路能够覆盖到该催化区和非催化区。此外,观测飞机可沿风向进行剖面观测,用于研究地形云沿山体的发展过程,如图3a蓝色线所示。为了评估飞机对云内冰晶生成的影响,作业飞机应在作业之后关闭碘化银播撒系统,但仍然沿着红色线来回飞行一定次数。所得数据用于分析飞机的飞行

本身是否会使得云内冰晶数浓度增加,从而更好地评估碘化银的作用。若飞机作业条件不具备,可将移动高炮和移动火箭布置在图3a红线所示位置进行地面作业,催化区范围同样为图3a中橘黄色区域。若此时观测飞机无法飞行,只能依靠地面观测。

冬季观测方案则针对偏西气流设计(图3b),当偏西气流带来水汽时,在此区域的上风区进行飞机来回播撒催化剂作业,飞行温度区间在-10~-20℃,所播撒的催化剂随西风向东扩散,会形成折线形带状降水增强带。该实验的目的是通过飞机观测降水增强带,同时结合地面仪器,分析气流及催化剂沿着三座连续山脉的传播过程,以及三座连续山脉的云降水物理过程,尤其是可以针对带状降水增强区进行微物理观测,并和降水未增强的区域进行对比,分析人工增雨(雪)作业导致的云中微物理过程的变化。

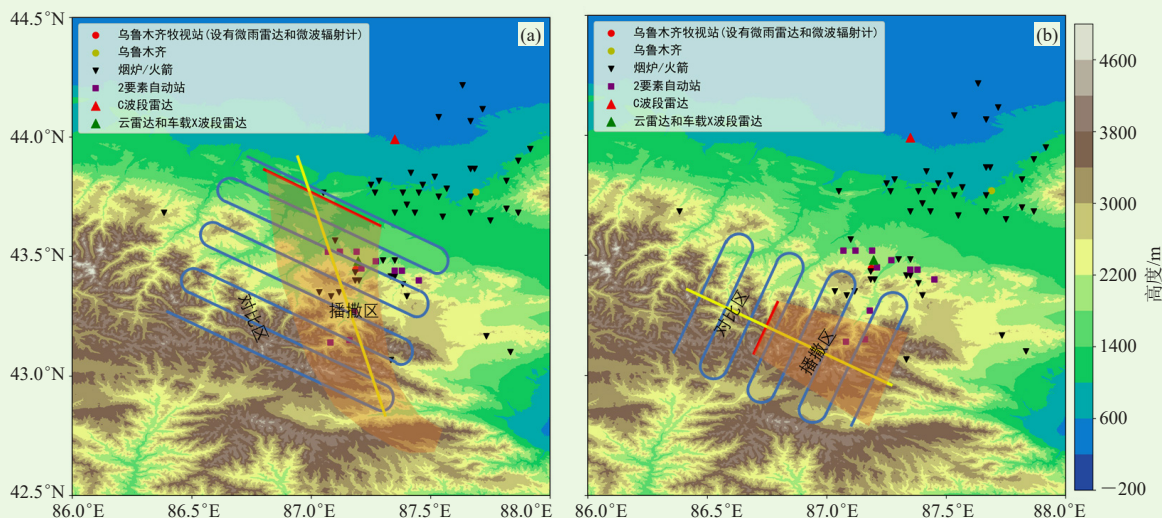


图3 2019年夏季(a)和冬季(b)试验方案示意图(红色线为飞机播撒催化剂的路径,蓝色线为观测飞机的路径,橘色区域为催化剂随偏西气流的扩散区域)

3 结果分析

3.1 概述

实验初期,完成了多部雷达的架设、观测和数据质量监控。在2019年夏季以乌鲁木齐牧试站为基地成功观测了多个降水过程,完成了气溶胶和冰核的连续地面观测以及无人机观测;在2019—2020年冬季成功观测两次降雪过程,并进行了烟炉增雪作业。完成了冬季地面气溶胶和冰核连续采样,并进行了气溶胶和冰核的飞机观测,设计了不同的飞行方案(图4)。除了利用地面气象站进行基本气象要素的梯度观测,还进行了冰核数浓度及其化学特性的观测,具体观测个例情况如表2所示。各个仪器设备均能正常工作,提供了较好的连续观测数据,为后续分析地形云及降

水结构提供了支持。研究结果将有助于加深理解中天山地区气溶胶和冰核的垂直分布结构,以及不同高度气溶胶和冰核的物理化学特性。

3.2 地形云观测个例初步分析

对2019年7月27日一次中天山地区典型降水过程进行了观测,根据乌鲁木齐牧试站点记录,从27日18—20时,27日23时—28日00时有降水记录,最大小时降水量发生在18时,约为0.8 mm。

2019年7月26日20时500 hPa高度上,欧亚大陆中高纬地区为三槽两脊型,两脊分别位于里海和贝加尔湖,三槽为西西伯利亚至里海的长波槽,蒙古高原的低压槽和我国东北沿海的低压槽,槽脊随西风带向东移动;7月27日14时500 hPa高度上,随着里海高压脊向北发展加强至50°N,致使西西伯利亚槽转竖并分裂

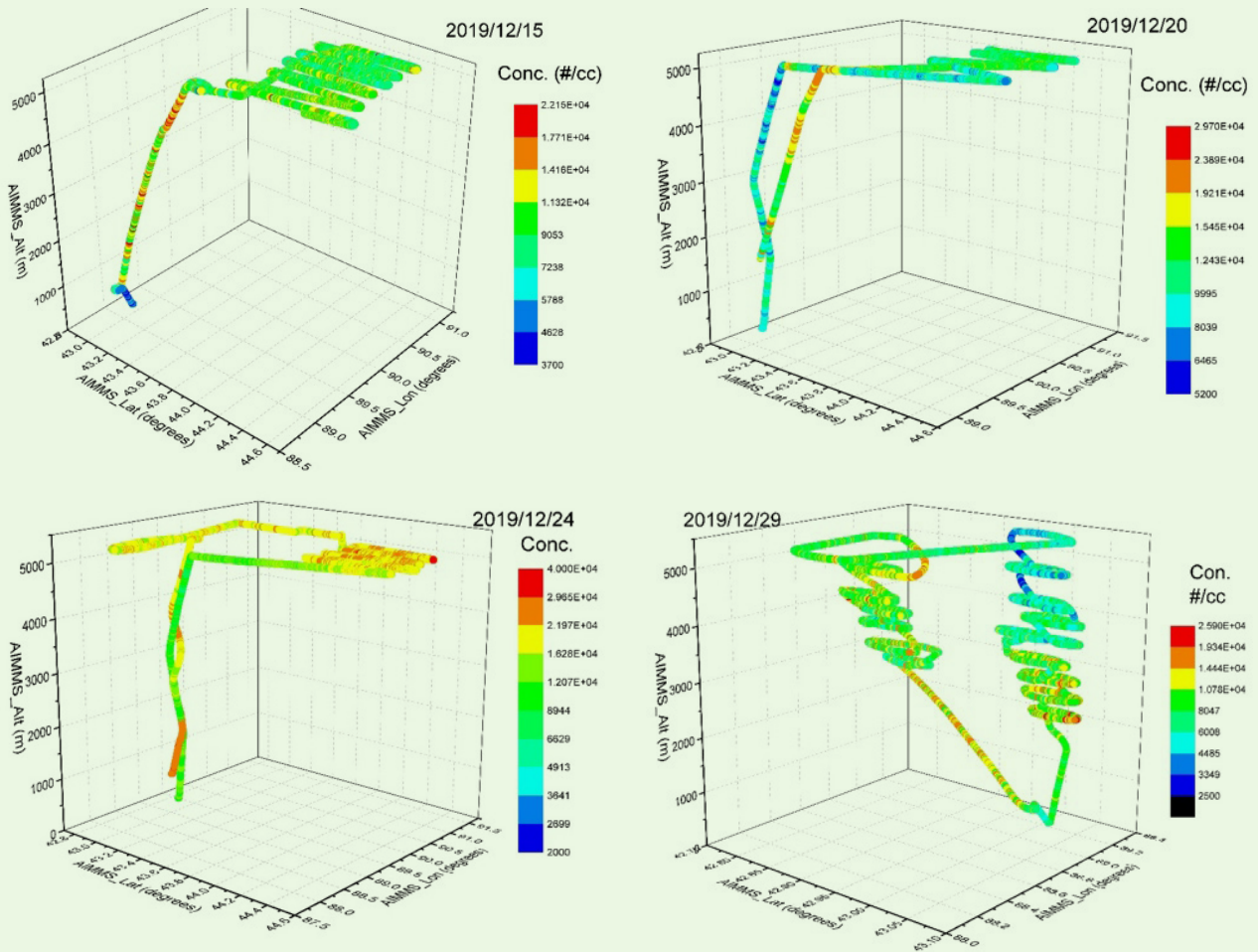


图4 四次气溶胶和冰核飞机观测飞行轨迹

表2 天山研究试验个例
Table 2 list of Tianshan area test cases

试验日期	试验内容	天气系统/降水类型	作业类型及作业量	是否空地联合	地面探测及设备概况	飞机探测及设备概况
2019.07.27	地形云降水过程综合观测	低压槽、西风、中天山局地低空偏北风、高空偏南风	无	是	C波段雷达、云雷达、MRR、雨滴谱、微波辐射计	无
2019.09.05	地形云降水过程综合观测、人工增雨	低压槽、西风、中天山北坡低空偏北风、南坡低空偏南风	火箭, 10发	是	C波段雷达、MRR、雨滴谱、微波辐射计	无
2019.09.10	地形云降水过程综合观测、人工增雨	西风, 中天山局地强对流过程, 对流性降水	火箭, 11发	是	C波段雷达、MRR、雨滴谱、微波辐射计	无
2020.01.14	地形云降水过程综合观测、人工增雪	低压槽、西风、大范围层状云降水	天山大峡谷, 雅山碘化银地面烟炉, 27根烟条	是	C波段雷达、云雷达、MRR、雨滴谱、微波辐射计	无
2020.01.16	地形云降水过程综合观测、人工增雪	低压槽、西风、层状云降水、云顶高度低、降水强度较弱	天山大峡谷, 雅山碘化银地面烟炉, 45根烟条	是	C波段雷达、云雷达、MRR、雨滴谱、微波辐射计	无
2019.12.15	气溶胶、冰核垂直观测	有雪, 4-5级西北风	无	否	无	空中国王飞机、PCASP气溶胶采样
2019.12.20	气溶胶、冰核垂直观测	微到小雪, 风力不大	无	否	无	空中国王飞机、PCASP气溶胶采样
2019.12.24	气溶胶、冰核垂直观测	中雪, 5级左右西北风, 气温下降5℃	无	否	无	空中国王飞机、PCASP气溶胶采样
2019.12.29	气溶胶、冰核垂直观测	阴霾, 风力不大	无	否	无	空中国王飞机、PCASP气溶胶采样

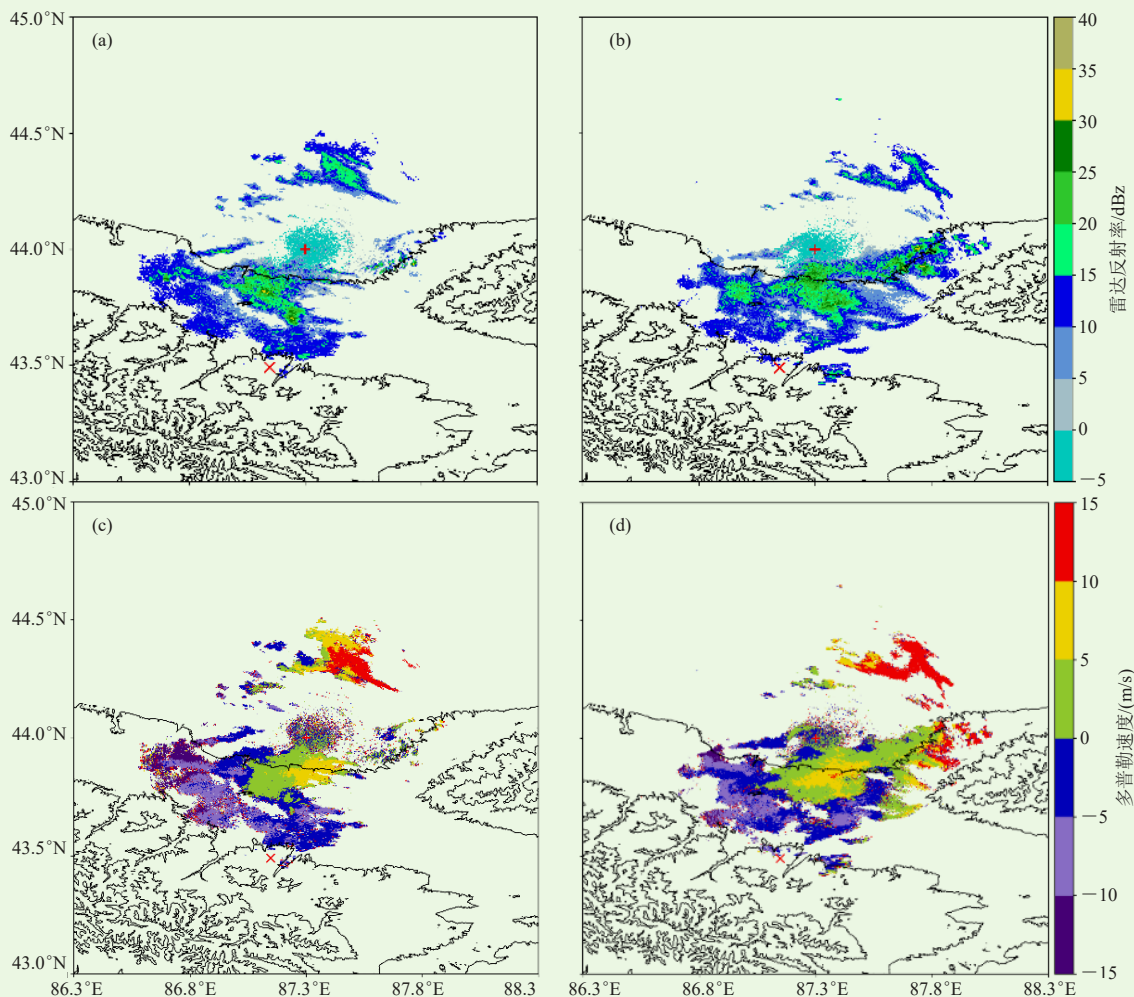


图5 2019年7月27日C波段雷达PPI扫描17: 03 (a) 和17: 35 (b) 雷达反射率及17: 03 (c), 17: 35 (d) 径向速度 (x表示云雷达位置, +表示C波段雷达位置, 仰角2.4°)

为两个分别位于巴尔喀什湖和中西伯利亚短波槽, 由于巴尔喀什湖短波槽较弱, 此时天山山区受槽前西风气流控制。在800 hPa高度上水平流场可以看出西风气流遇天山被阻挡而分成南北两支气流绕过山脉, 南支气流翻越山体, 北支气流受中天山北坡阻挡, 在山前堆积或回流, 促使对流产生, 与南侧移过来的高层云系混合, 北支的低层气流有较充足的水汽向上输送产生降水。

从C波段天气雷达的雷达反射率和多普勒速度图可以看出云团宏观特征(图5), 17时雷达西南侧有较大的对流单体生成, 回波强度在10~35 dBz, 在偏西气流引导下向东移动并进一步发展。

从Ka波段云雷达RHI扫描的反射率因子及径向速度可见本次过程既有较低的暖云降水也有较高层的混合相态云降水, 红线为通过ERA5再分析资料得到的0℃线。16: 56时高低层云发生混合, 5 km以上位置有零星的强回波(>30 dBz), 对应到此时的径向速

度可知, 这一高度存在上升气流, 云内粒子在对流中增长, 产生降水。在雷达北侧上空4 km左右观测到零度层亮带, 但回波强度分布并不连续, 存在团状强回波(>30 dBz), 同时与高低层风切变的高度对应较好, 表明风切变层可能存在湍流对降水的增强。

图6a为微雨雷达垂直指向雷达反射率随时间和高度变化, 可以看出本次观测期间主要表现为混合相态云降水和低层暖云降水交替出现。17时左右近地面回波较强, 雷达反射率在10 dBz以上, 说明降水相对较强, 此时云顶高度较高, 为混合相态云降水, 18: 16左右和19: 06同样云顶高度较高, 为混合相态云降水, 对比低层暖云降水, 混合相态云降水在0℃层以下回波强度较强, 可达25 dBz以上, 对应近地面回波也比低层云降水强5~10 dBz, 但持续时间较短。图6b和6c为本次云顶较高的混合相态云和低层暖云降水过程中微雨雷达平均雨滴谱随高度的变化, 可以看出在0℃层以下, 混合相态云降水小粒子数浓度随高度

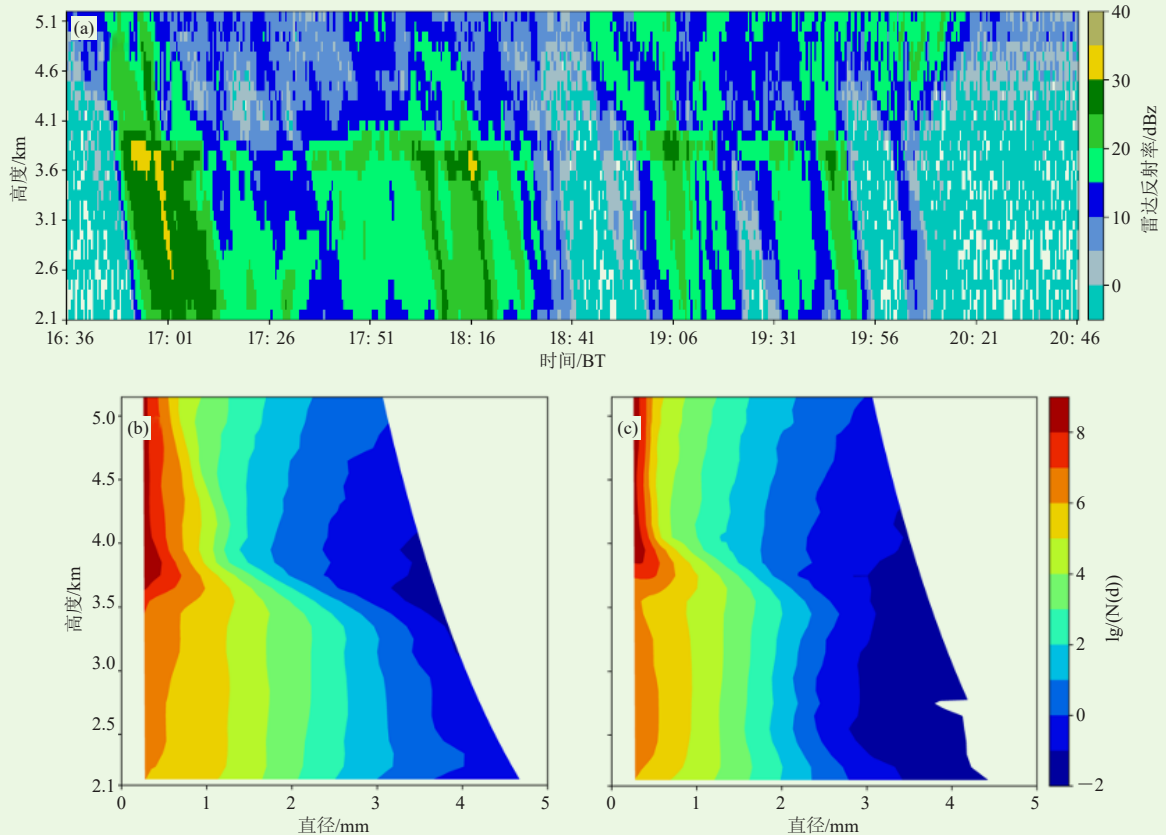


图6 2019年7月27日 16: 36—20: 46微雨雷达反射率因子(a)及16: 52—17: 14 (b), 17: 45—18: 00 (c) 平均雨滴谱的垂直分布

降低而迅速减小，大粒子数浓度随高度降低而增大；低层暖云降水小粒子随高度降低而增大，大粒子数浓度随高度降低而减小，这是由于低层较为干燥，环境相对湿度低，近地面蒸发作用明显，使得垂直雨滴谱随高度降低而变窄。

本次实验的观测结果表明，通过结合不同波段的雷达、以及微波辐射计等设备进行综合观测，可以对天山地形云降水物理过程进行详细研究，为检验人工播撒碘化银的增雨（雪）效果及其引起的物理过程变化提供支撑。

4 结论

在新疆天山地区进行人工增雨（雪）的效果目前仍有较大不确定性，且对播撒碘化银引起地形云物理过程变化不够清楚。本试验的实施，可以为研究该地区典型地形云降水过程和检验人工增雨（雪）作业效果提供可靠的观测资料，以达科学目标，包括：1) 阐明中天山地区不同季节典型地形云降水系统的宏观特征及其形成机制；2) 阐明不同天气条件下人工播撒碘化银的扩散方式；3) 加深理解人工播撒碘化银对地形云内微物理过程的影响；4) 检验在不同类型地形云中进行人工增雨（雪）的效果。

为了保证试验的成功，本试验采用了飞机、遥感、地面等多种观测仪器进行综合观测，并详细设计了人工播撒碘化银作业和观测方案。试验中采用云雷达对云内精细结构进行观测，采用微雨雷达和C波段天气雷达对降水宏观结构进行观测，采用飞机微物理探头对云内微物理特征进行观测，采用微波辐射、GNSS/MET等对温度、水汽等背景条件进行观测，采用地面自动站对地形云降水进行梯度观测，并对气溶胶和冰核进行地面和飞机采样。按照所设计的方案对不同典型天气过程的地形云降水过程进行观测，并对各观测数据进行融合分析，可以详细研究中天山试验区地形云的宏观特征，以及人工播撒碘化银引起的云降水过程变化，并检验人工增雨（雪）作业的效果。

通过对一次地形云降水综合观测个例进行了初步分析。观测结果表明，该个例为一次由地形热力强迫作用形成的对流云过程，西风气流东移遇天山山脉阻挡分为南北两支气流绕流，在地形的作用下在中天山辐合，形成局地对流。此次过程中同时存在暖云降水和混合相态云降水。混合相态云的云滴在云内迅速增大产生降水，在零度层以下，小粒子数浓度随高度降低而迅速减小，大粒子数浓度随高度降低而增大。该

过程中存在明显风切变,并在风切变层观测到了团簇回波,表明风切变引起湍流,增强降水。该个例的观测说明,通过结合多种仪器的综合观测,可以对天山

地形云降水物理过程进行详细研究,为检验人工播撒碘化银的增雨(雪)效果及其引起的物理过程变化提供支撑。

深入阅读

- 白磊,李兰海,师春香,等,2017.中国天山山区降水特征及其研究进展.华北水利水电大学学报(自然科学版),38(5):38-48.
- 金华,何晖,张蕾,等,2012.人工消雾试验中的雾微物理响应.热带气象学报,28(2):228-236.
- 李斌,郑博华,兰文杰,等,2018.克拉玛依市冬季飞机人工增雪作业效果统计分析.干旱区地理,41(4):686-692.
- 刘蕊,杨青,2010.新疆大气水汽通量及其净收支的计算和分析.中国沙漠,30(5):1221-1228.
- 史玉光,孙照渤,2008.新疆水汽输送的气候特征及其变化.高原气象,27(2):310-319.
- 王婉,姚展予,2009.2006年北京市人工增雨作业效果统计分析.高原气象,28(1):195-202.
- 魏文寿,胡汝骥,1990.中国天山及其北麓的降水变化及其原因分析.干旱区地理,13(1):29-36.
- 杨莲梅,张云惠,汤浩,2012.2007年7月新疆三次暴雨过程的水汽特征分析.高原气象,31(4):963-973.
- 姚俊强,杨青,韩雪云,等,2012.天山及周边地区空中水资源的稳定性及可开发性研究.沙漠与绿洲气象,6(1):31-35.
- 张家宝,邓子风,1987.新疆降水概论.北京:气象出版社:400.
- 赵克明,黄艳,于碧馨,2017.2013年南疆西部暴雨天气的水汽特征.气象科技,45(1):121-129.
- 赵勇,黄丹青,古丽格娜,等,2010.新疆北部夏季强降水分析.干旱区研究,27(5):773-779.
- Binod P, Geerts B, Jing X, et al, 2017. A multi-sensor study of the impact of ground-based glaciogenic seeding on clouds and precipitation over mountains in Wyoming. Part II: Seeding impact analysis. Atmospheric Research, 183: 42-57.
- Boe B A, Heimbach J A, Krauss T W, et al, 2014. The dispersion of silver iodide particles from ground-based generators over complex terrain. Part I: observations with acoustic ice nucleus counters. Journal of Applied Meteorology and Climatology, 53(6): 1325-1341.
- Chu X, Xue L, Geerts B, et al, 2014. A case study of radar observations and WRF LES simulations of the impact of ground-based glaciogenic seeding on orographic clouds and precipitation. Part I: observations and model validations. Journal of Applied Meteorology and Climatology, 53(10): 2264-2286.
- French J R, Friedrich K, Tessendorf S A, et al, 2018. Precipitation formation from orographic cloud seeding. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 115(6): 1168-1173.
- Holroyd E W, Mcpartland J T, Super A B, 1988. Observations of silver iodide plumes over the grand mesa of Colorado. Journal of Applied Meteorology, 27(10): 1125-1144.
- Jing X Q, Geerts B, 2015. Dual-polarization radar data analysis of the impact of ground-based glaciogenic seeding on winter orographic clouds. Part II: convective clouds. Journal of Applied Meteorology and Climatology, 54(10): 2099-2117.
- Jing X Q, Geerts B, Boe B, 2016. The extra-area effect of orographic cloud seeding: observational evidence of precipitation enhancement downwind of the target mountain. Journal of Applied Meteorology and Climatology, 55(6): 1409-1424.
- Jing X Q, Geerts B, Friedrich K, et al, 2015. Dual-polarization radar data analysis of the impact of ground-based glaciogenic seeding on winter orographic clouds. Part I: mostly stratiform clouds. Journal of Applied Meteorology and Climatology, 54(9): 1944-1969.
- Rasmussen R M, Tessendorf S A, Xue L, et al, 2018. Evaluation of the Wyoming Weather Modification Pilot Project (WWMPP) using two approaches: traditional statistics and ensemble modeling. Journal of Applied Meteorology and Climatology, 57(11): 2639-2660.
- Super A B, 1974. Silver iodide plume characteristics over the Bridger Mountain Range, Montana. Journal of Applied Meteorology, 13(1): 62-70.
- Xue L, Chu X, Rasmussen R, et al, 2016. A case study of radar observations and WRF les simulations of the impact of ground-based glaciogenic seeding on orographic clouds and precipitation. Part II: AgI dispersion and seeding signals simulated by WRF. Journal of Applied Meteorology and Climatology, 55(2): 445-464.
- Xue L, Chu X, Rasmussen R, et al, 2014. The dispersion of silver iodide particles from ground-based generators over complex terrain. Part II: WRF Large-Eddy Simulations versus Observations. Journal of Applied Meteorology and Climatology, 53(6): 1342-1361.

(作者单位:刘恩弘、杨璟、银燕、景晓琴、陈魁、王红磊、杨军、陈倩,南京信息工程大学气象灾害预报预警与评估协同创新中心;李斌、李圆圆,新疆维吾尔自治区人工影响天气办公室)



进 2021 展报告 西北人工影响天气

<http://cmalibrary.cn/amst/202105/>