

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.

## 国际人工影响天气技术新进展\*

段 婧<sup>1,2</sup> 楼小凤<sup>1,2</sup> 卢广献<sup>1,2</sup> 薛麓林<sup>3</sup> 郭学良<sup>1,2</sup>

1 中国气象科学研究院灾害天气国家重点实验室,北京 100081

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 国家大气研究中心,布尔德,科罗拉多,美国

**提 要:** 本文总结了近年来国际人工影响天气相关技术的新进展,概述了人工影响天气试验及效果综合评估、高性能遥感探测装备在人工影响天气领域的应用、催化模式及应用、作业装备研发改进等四个主要方面的进展及现状。在分析近年来我国人工影响天气相关技术进展与存在问题的基础上,结合国际新进展,从多个方面讨论并提出了促进我国人工影响天气技术进步可借鉴的经验与建议。

**关键词:** 人工影响天气,催化模式,效果检验及评估,新型技术装备,国际新进展

**中图分类号:** P401

**文献标志码:** A

**DOI:** 10.7519/j.issn.1000-0526.2017.12.012

## International Recent Progress in Weather Modification Technologies

DUAN Jing<sup>1,2</sup> LOU Xiaofeng<sup>1,2</sup> LU Guangxian<sup>1,2</sup> XUE Lulin<sup>3</sup> GUO Xueliang<sup>1,2</sup>

1 State Key Laboratory of Severe Weather, Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081

2 Key Laboratory for Cloud Physics of China Meteorological Administration, Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081

3 National Center for Atmospheric Research, Boulder, Colorado USA

**Abstract:** This paper summarizes the international progress in weather modification technologies during 2013–2016, reviews the comprehensive evaluation of weather modification experiments, application of high performance remote sensing equipment, application of cloud and seeding models, research and development of weather modification equipment and other related researches. In addition, combining the status of weather modification technologies in China with recent international progress, the experiences and suggestions for promoting the related weather modification technologies are discussed from different aspects.

**Key words:** weather modification, seeding models, effect evaluation, weather modification equipment, international recent progress

## 引 言

用人为手段使天气现象朝着人们预定的方向转化称为人工影响天气,主要包括人工降水、人工降雪、人工消云、人工消雾等人类对天气有意识的影响活动。国际人工影响天气工作从 20 世纪 50 年代开

始兴起,期间一些著名的科学试验(例如美国中部的白顶计划、美国西部山区的 Climax 试验、以色列试验、美国佛罗里达区域积云试验 FACE、印度试验和南非试验等)结果对世界范围人工影响天气的发展起到了重要的引领和示范作用(郑国光等,2005)。我国早期的人工影响天气主要服务于人工增雨和人工消雹(游来光等,2002;毛节泰和郑国光,2006)。

\* 国家自然科学基金面上项目(41675137,41275148)、中国气象科学研究院基本科研业务重点项目(2016Z006)、公益性行业(气象)科研专项(GYHY201406001)和人社部留学回国人员科技活动择优资助项目共同资助

2017 年 3 月 9 日收稿; 2017 年 7 月 31 日收修定稿

第一作者:段婧,主要从事气溶胶、云降水物理和人工影响天气研究。Email:duanjing@cma.gov.cn

近年来,随着防灾减灾对人工影响天气服务需求的不断增长,人工影响天气工作得到了各级政府和社会的高度重视,我国人工影响天气的作业水平和探测能力也得到了显著提高,作业需求和规模不断增长,服务范围已扩展到人工消减雨、消雾和森林防火等领域。

我国开展人工影响天气半个多世纪以来,在云降水物理学科及作业技术等方面已经取得了长足的进步(游来光等,2002;黄美元等,2003;姚展予,2006;雷恒池等,2008;洪延超和雷恒池,2012;郭学良等,2013;楼小凤等,2016;许焕斌和尹金方,2017)。在飞机探测云物理结构方面,依托飞机作业,开展了全国多地区多年的云降水物理观测,获取了大量宝贵的云物理资料,完成了很多研究计划,增加了对不同降水云系降水形成过程的认识。概括起来,近年来我国人工影响天气的技术进步主要体现在几个方面,一是探测装备和技术水平得到了显著提高,毫米波云雷达技术有了新进展,偏振雷达已经应用在一些外场试验研究中。二是数值模式方面发展迅速,适用于人工影响天气作业设计和效果验证试验的云和降水模式已经建立;云数值模式产品已经应用于作业方案设计、作业过程指导以及作业后效果分析等方面的业务中。三是研发了多种先进的催化剂及催化工具,并在全国人工影响天气作业业务中广泛应用。总之,随着近年来探测水平的提高和数值模拟研究及其应用技术的发展,一些先进的探测和作业设备在人工影响天气中得到了应用,数值模式在人工影响天气作业条件预报、识别、效果评估及机理等方面的研究中都起到了重要作用。

另一方面,人工影响天气技术是一门以云降水物理学为基础且涉及有关科学的综合性应用技术,因此其发展受到很多因素制约。就我国的实际情况而言,目前仍有许多的基础问题和相关技术的应用需要引起有关方面高度重视。首先是先进大气探测技术手段应用于人工影响领域的的能力不足,从而在很大程度上制约了人们对云降水物理过程的认识水平;另外,如何将所有播云后的效果从自然变化中精确地检测出来存在着不确定性。就目前常用的效果检验方法而言,主要有物理检验、统计检验和数值模式方法,另外示踪法作为间接方法也可以对上述几种方法进行补充和验证。其中进行统计检验时,需要进行有科学设计的人工影响天气综合外场试验,并且需要经过严谨的实施,方可取得播云效果的合理

证据,然而我国在这方面的科学试验能力很薄弱,因此难免使人们对有些播云效果还存在着不同的看法。

然而,值得注意的是,近年来在国际范围内,尤其是在美国近期的播云试验和对以前的“效果”进行综合再评估中,获得了更为令人鼓舞的结果(Defelice et al, 2014; Witze, 2014; Griffith et al, 2016);随着含催化过程的高分辨率云模式的发展,极大提高了数值模式进行效果检验的能力(Xue et al, 2013a);多种新型遥感探测技术在云结构的定量化描述研究中进展显著(Pokharel et al, 2014a);示踪法在近年来美国地形云催化试验中也得到了深入的实践(Pokharel et al, 2015)。毫无疑问,这些人工影响天气关键技术的最新成果与进展,不仅对我国面临需要解决的问题具有重要借鉴作用,而且对我国人工影响天气科学技术的发展也将产生巨大的推动作用。

综上所述,虽然目前我国人工影响天气作业规模大、政府支持力度大,国家和地方已建和在建的人工影响天气工程,都为我国人工影响天气技术的发展创造了有利的条件。但是,需要注意的是这些有利条件带来的既是新的发展机遇也是严峻的挑战。所谓机遇,便是先进的技术装备的应用可为我们提供深入认识云降水物理学科、加快发展的机会;而如何有效借鉴和利用国际上已经获得的各种新技术、新成果,开展具有科学设计的人工影响天气作业和试验,加强作业效果检验技术的研究和业务应用,显著提升人工影响天气的防灾减灾效益,是目前我国人工影响天气面对的重要挑战。

本文总结了2013—2016年国际人工影响天气相关技术的主要进展,包括国际上的人工影响天气试验、关于对人工影响天气效果进行的最新评估技术与综合性结果、高性能遥感探测设备的应用、催化模式模拟及应用、人工影响天气装备及其他相关方面的进展,以期为我国人工影响天气技术的研究、外场作业试验以及未来发展提供可借鉴的技术参考。

## 1 人工影响天气试验及对以往试验效果的综合评估

人工影响天气的效果评估一直是人工影响天气研究和作业的关键问题。要将播云的效应从自然变化中区分出来,有科学设计的人工影响天气综合试验必不可少,除此之外,还必须要有足够的样本数量来

满足效果评估的统计学要求。国际人工影响天气服务和科学试验工作开展至今,部分地区特别是开展人工影响天气最早美国,已经进行了一定规模和数量的业务或研究试验,其大部分播云计划集中在美国中西部的一些州(例如,犹他州、怀俄明州、北达科他州以及加利福尼亚州等)。近几年,在这些成果的基础上,开展了对播云效果的综合评估。同时,法国和加拿大等国家近年来根据需求也在持续开展相关试验及研究工作。通过对多年的业务及以科学研究为目的的人工影响天气试验的综合评估,研究了播云的效果、对降水的域外效应(extra area effect)及微物理、动力效应在播云中的作用等问题;综合评估表明播云试验是确实有效的,但仍需要更多有计划长时间的试验来评估和验证。

### 1.1 怀俄明地形云催化试验

怀俄明人工影响天气试验项目(Wyoming Weather Modification Five-Year Pilot Project, WWMP)由怀俄明州水利局和美国自然基金委员会出资,并由美国国家大气研究中心设计。其前期已进行了 10 年试验研究,发现增雪可达 10%~15%。随后的 5 年计划中,由怀俄明大学负责机载雷达、PMS 观测和资料分析,美国人工影响天气公司负责外场作业。作业手段为燃烧炉和飞机,采取了随机催化方案。每个冬季可完成近 40 个催化过程(其中作业时间 4 h,缓冲时间 2 h)。试验(图 1)首先要求覆盖两个试验山区,通过探空以及布设在两个试验山区山顶的微波辐射计的探测结果判断是否有过冷水存在,依据 700 hPa 温度低于  $-8^{\circ}\text{C}$ ,风向范围  $210^{\circ}\sim 315^{\circ}$  等要素来确定随机催化个例。将地面燃烧炉催化速率设置为  $25\text{ g}\cdot\text{h}^{-1}$ 。结合模式模拟催化轨迹来确定要点燃的地面燃烧炉位置。经统计,该地区每年冬季降雪平均  $65\sim 70\text{ d}(>0.25\text{ mm})$ ,5~6 年的冬季降雪方可达到统计的样本数,评估后人工增雪效果可达 10%~15%(Breed et al, 2014)。不断积累的研究证据表明播云试验是确实奏效的,但是只分析这些数据仍远远不够(Witze, 2014)。真正认识播云后降水的偏差是非常重要的,需用严格科学试验和数据进行论证。如何评估增雨成本及其对下游地区可能产生的影响也是需要回答的问题。目前非随机试验在北部的风河(Wind River)流域继续开展。

### 1.2 美国地形云降雪碘化银催化效果研究

2012—2013 年在美国怀俄明州南部开展了碘化银催化效果研究[The AgI Seeding Cloud Impact Investigation (ASCII) campaign],试验区是与怀俄明地形云催化试验同样的两个山头,对冬季地形云降雪开展地面燃烧炉成冰剂催化试验(图 2)。地面布有微波辐射计、两部 1.2 cm K 波段微雨雷达(Micro Rain Radar, MRR)、一部 3 cm 移动体扫 X 波段多普勒雷达(Doppler-on Wheels, DOW)及气压计等观测设备;飞机搭载 3 mmW 波段机载廓线云雷达(Wyoming Cloud Radar, WCR)、激光云雷达、云降水粒子探测仪。地面燃烧炉垂直于低层风排列,以便于目标区与上风方的控制区进行对比。催化前、后各飞行两个架次。采用割草机模式逆风飞行 5 个轨道,其中 4 个在催化影响区,另 1 个轨道在催化的上风方。利用布设在上风方并指向山顶的微波辐射计测量过冷水。采集降雪并分析雪中 Ag 含量,以确认催化烟羽覆盖目标区。催化指标与 WWMP 的指标一致,并依据四维实时同化模式的模拟结果,选取 4 h 内比较稳定的条件,以进行对比。利用飞机和地面的 3 部不同雷达(WCR、DOW 和 MRRs)对比催化云和自然云的回波强度。结果表明,21 个个例中自然云低于 1.5 km 的平均 WCR 回波强度比催化云少 1.5 dBz。催化云 DOW 雷达回波比非催化的要强,两者的最高差值出现在 1 km 以下的目标区。催化云小粒子( $D<400\ \mu\text{m}$ )多于非催化云,而在地面燃烧炉的小风方大粒子( $D>1\text{ mm}$ )却小于非催化云(Pokharel and Geert, 2016; Pokharel et al, 2017)。

### 1.3 加拿大飞机防雹试验

为了保护城市,1996 年加拿大人工影响天气公司开始利用 3 架飞机开展防雹作业,2008 年第四架飞机加入。2011 年由 C 波段雷达替代原先的 WR-100 天气雷达,使用了 TITAN 雷达软件,每 4 min 体扫一次。2013 年停靠在 Springbank 机场的空中国王飞机也加入防雹作业。3 架空中国王飞机将 20 g 碘化银成冰剂从云顶播撒,下落过程中点燃并可催化 1 km 范围,同时携带有固定在机翼下的 48 个 150 g 末端燃烧器成冰剂。另外 2 架飞机为 Cessna model 340A,在云底播撒(发射 20 g 的焰弹),或燃烧碘化银溶液低剂量播撒。当预报有大冰

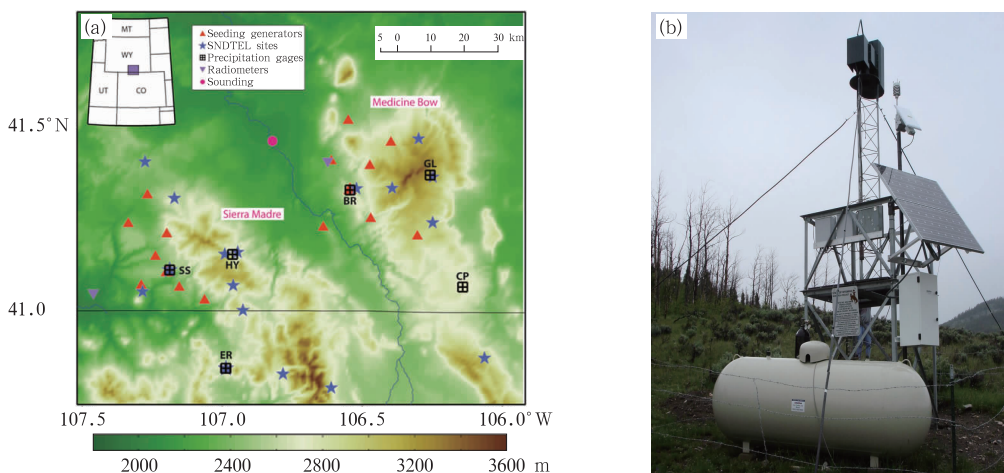


图 1 WWMPP 随机试验山区地形(图下彩色色标)、播撒装置和观测设备分布图(a)(引自 Breed et al,2014)及地基碘化银发生器(b)

Fig. 1 Site map of the WWMPP randomized experiment including topography in Wyoming (a) (Breed et al,2014) and the ground-based seeding generators (b) (Breed et al,2014) (All facilities are denoted with color-coded symbols, including SNOTEL sites, sounding site, two radiometer sites, ground-based seeding generators and high-resolution precipitation gauge sites)

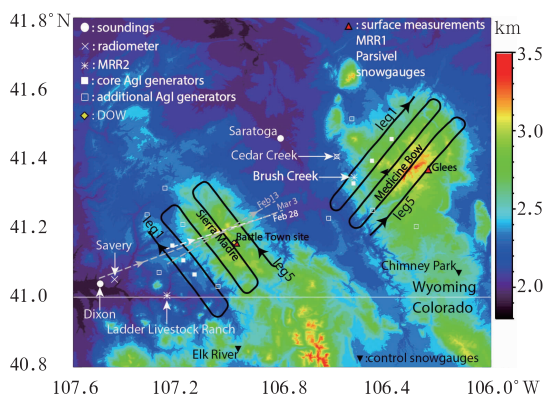


图 2 ASCII 试验飞行路线设计、多种观测设备布局图(引自 Pokharel and Geerts,2016)

(黑实线为飞机飞行轨迹,方形图标表示地基碘化银发生器的位置)

Fig. 2 ASCII experimental design map over two mountains in southern Wyoming (Pokharel and Geerts,2016) (Solid black lines show the flight tracks and square symbols show the ground-based AgI generators)

雹时,采用在城市的上风方利用飞机云顶催化和云底催化,催化时间至少 20 min。机翼上的冰核发生器燃烧碘化银溶液,大剂量催化由燃烧焰剂产生。由于防雹时间窗常常不超过 10 min,所以应当选择快速核化的催化剂。雷达回波和垂直累积液态含水量(vertical integrated liquid, VIL)用来预报冰雹的发生。Alberta 冰雹和庄稼保险公司报告指出,早期

的催化效果认为减少了 20% 的损失。通过分析 3 次强冰雹过程,得出催化使大于 60 dBz 的回波区面积比相邻没催化的冰雹云面积分别减少了 46% 和 18%,催化云的 VIL 和最大回波强度也出现减少。得益于过去 20 年私人保险公司的连续资金支持,防雹项目成功地减少了冰雹灾害造成的损失(Gilbert et al,2016)。

### 1.4 法国地面燃烧炉 AgI 催化防雹试验

法国防雹外场试验项目(ANELFA)从 1952—2015 年连续开展了 64 年。前 20 年研究了防雹地区自然大气的冰核浓度,并一直改进地面燃烧炉。从开始仅有少量木炭燃烧的地面燃烧炉,至 1984 年共布设了 455 个涡流燃烧炉,保护区域达到 5.5 万 km<sup>2</sup>。2015 年已有 838 个催化点,覆盖 7 万 km<sup>2</sup> (图 3)。地面燃烧炉燃烧含 8 g · L<sup>-1</sup> 的 AgI-0.5 NaI 丙酮溶液,燃烧速率为 1.1 L · h<sup>-1</sup>,并利用 1275 块测雹板监测冰雹的下落动能。早期防雹目的是为了减少农作物的损失,所以 1986 年前的防雹效果是通过农业保险公司的数据来统计分析催化影响区与其他地区,催化影响区农作物损失减少 41%。1988 年后利用测雹板连续 8 年测量冰雹的数量(>0.7 cm),得出在密集催化的云体中冰雹数量减少 42%。随后用测雹板测量的动能取代冰雹数量来统计催化效果。在统计的 18 个主要降雹日中,10 个燃烧炉

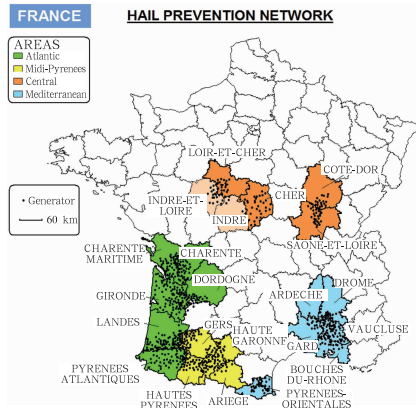


图 3 法国防雹试验(ANELFA)地面燃烧炉分布图(2015 年)  
(引自 Dessens et al, 2016)

Fig. 3 Map of the ANELFA generator networks in 2015 (Dessens et al, 2016)

覆盖  $1000 \text{ km}^2$ , 每个燃烧炉燃烧  $\text{AgI}(9 \text{ g} \cdot \text{h}^{-1})$ , 可以减少冰雹 50% 的动能。后来统计了 24 个主要降雹日的冰雹半径和下落动能, 半径  $1.2 \sim 3.5 \text{ cm}$  的冰雹粒子动能变化显著, 大剂量催化 ( $121 \text{ gAgI}$ ) 比小剂量催化 ( $11 \text{ gAgI}$ ) 冰雹动能减少 47% (Dessens et al, 2016)。

### 1.5 其他试验及效果的综合评估

除了作业范围以内的催化影响, 目前对播云可能的持续影响区域并没有准确的评估。域外效应是指超出试验设计目标区和目标时段的作业效果 (Defelice et al, 2014)。具体来说, 有人认为在某一区域增加降水会减少其下风方的降水 (通过“偷走”大气中的水汽), 或者相反增加下风方的降水 (通过增加蒸发和蒸腾作用, 从而为云体提供更多的水汽), 即“拆东补西”的问题 (robbing Peter to pay Paul), 然而这种推论与猜想并没有经过大量的研究证实。针对这个问题, Dennis (1980) 通过分析多项随机试验指出目标区增雨 (减雨), 其下风方远距离也会增雨 (减雨)。Defelice et al (2014) 首次综合分析了美国西部加利福尼亚州和犹他州早期的 5 个人工影响天气业务或研究试验 (包括冬季增雪和夏季增雨)。其中包括了随机化和非随机化试验, 采用了历史目标区、地面降水量以及利用雷达资料选取控制区的评估方法, 得到的综合结果是播云对降水的域外效应影响无论在冬季和夏季均出现了正效应 (5%~15% 的增加, 针对一些对流系统可能会更大), 在空间上外围的正效应可能会延伸到上百千米

范围, 目前的结果表明微物理和动力效应都对其有贡献。

北美天气咨询公司 (North American Weather Consultants, NAWC) 受托在加利福尼亚西部 Cuyama 河上游流域开展冬季云播撒的可行性研究。调研了在该地区开展过的地面和飞机播撒试验, 根据长期研究计划中 12—3 月的统计结果, 使用了历史资料的目标和控制区的分析方法, 针对每个目标区域, 使用控制区或目标区中没有播云的事件计算线性 (控制区所有单点计算平均值与目标区所有单点平均值计算回归关系) 和多线性回归方程 (控制区每个单点的平均值与目标区所有单点平均值一起计算回归关系), 目标和控制区间的相关系数控制在  $0.84 \sim 0.91$ 。关于控制区的选取, 需要有足够长记录数据的站点支持分析, 期间需排除可能受播撒影响的时段, NAMC 认为至少大于 20 个没有播撒活动的历史季节将可使回归方程更具代表性。评估结果认为, 冬季碘化银播撒可以使得 12—3 月的降水增加 9%~21% (Griffith et al, 2015; 2016)。

Delene (2016) 研究了美国北达科他州 3 年吸湿性播撒试验, 将吸湿性播撒增加降水的概念模型与飞机观测到的云底云凝结核 (cloud condensation nuclei, CCN)、云底温度、云底高度以及云微物理测量的统计分析结果相结合来确定开展吸湿性播撒的可行性。分析结果表明云凝结核的浓度、云滴的粒子谱分布及云底的温度和高度是最重要的环境因素; 观测到相对较高的 CCN 浓度 ( $1260 \text{ cm}^{-3}$ ) 可以证明加入大的吸湿颗粒产生更多的收集滴, 增加了降水效率; 通过对云底温度和高度等的观测, 得到北达科他对流云云底温度相对较低, 云层厚, 冰相水成物在降水过程中起到重要作用。因此降水效率的增加并不仅仅依赖于暖雨过程, 还涉及到冷云中霰的生成。云底高度相对较接近表面, 这表明降水的增加可能导致到达地表的雨量增加。综合评估表明, 北达科他州适宜开展吸湿性催化来增加降水。

通过对多年的业务及以科学研究为目的的人工影响天气试验的综合评估, 累积的研究证据表明播云试验是确实有效的, 但仍需要更多有计划长时间的试验来评估和验证; 同时也研究了播云对降水的域外效应及微物理、动力效应在其中的作用。

## 2 高性能遥感探测装备及应用

在美国, 近年来随着毫米波云雷达技术的发展,



对云的观测能力得到了显著提升,机载 W 波段云雷达在地形云催化试验中得到了深入应用。激光雷达比天气雷达有更短的波长,可以测量气溶胶和薄云。这两种雷达结合微波辐射计,可以探测云中不同尺度的粒子,是探测云宏微观特征的最佳遥感设备组成。

## 2.1 怀俄明大学机载遥感探测装备

怀俄明大学的飞机观测研究较有代表性,是近年来飞机遥感探测的一支重要力量。其飞机观测研究已经开展了 50 多年。20 世纪 60 年代中期,大学的研究学者就开始利用 3 架不同的飞机开展对流层低层的探测,目前最新的是怀俄明大学的空中国王飞机,可以探测对流层中层的下部(Wang et al, 2012)。本节对怀俄明大学的机载遥感设备进行介绍。

机载 WCR 怀俄明云雷达为 95 GHz 极化多普勒雷达,有四个接收天线,反射率产品的绝对精度约小于 3 dB。雷达的灵敏度根据天线和选择的采集模式而变化,在 1 km 处其值在  $-40 \sim -25$  dBz。WCR 的这种多波束配置可以在飞机飞行轨迹上实现水平和垂直方向的近同时探测。雷达反射率因子和多普勒速度的剖面图可用来描述云降水的结构。两个侧向波束及两个向下波束的多普勒测量被用于在飞行时沿水平面和垂直平面进行双多普勒综合观测,依次得到云和降水动力学的二维高分辨率( $50 \text{ m} \times 50 \text{ m}$ )结构。由于毫米波云雷达的后向散射信号与粒子直径的 6 次方成正比,因此毫米波雷达的反射率因子主要由云中最大的粒子决定。在非降水性的水云中,WCR 有足够的探测能力探测到云滴的反射;但在混合相云中,WCR 只能提供有限液态云滴的信息,因为大尺度冰晶在反射率因子中起决定作用。

怀俄明云激光雷达(Wyoming cloud lidar, WCL)是一种紧凑型的偏振激光雷达,可以获取后向散射和退极化比的垂直分布。WCL 在波束方向上的分辨率可达 3.75 m 或更好。沿着飞行轨迹上的分辨率典型值为 5~20 m,其距离飞机最近的可用范围是 30 m。WCL 较短的波长可以检测弱的分子及气溶胶信号。对云来说,WCL 对颗粒尺寸的依赖性远远低于 WCR。因此在降水云和混合相云中,WCL 的信号往往由小云滴决定;但是,WCL 的信号也很容易被较厚水云的光学厚度衰减。因此,WCL 探测的云信息补充了 WCR 的观测,将它们结合起来,可改进云特征探测的能力。

G 波段水汽辐射计(G-band water vapor radiometer, GVR)由 ProSensing 公司开发。GVR 使用四个双边带接收通道测量亮度温度,中心频率为  $183.31 \pm 1, \pm 3, \pm 7$  和  $\pm 14$  GHz。使用神经网络算法,利用观测得到的亮温和飞行高度的温度估算可降水水汽量(precipitable water vapor, PWV)和液水路径(liquid water path, LWP)。由于 183 GHz 附近的水汽和液态水的吸收率高,与常规的 23 和 31 GHz 微波辐射计相比,GVR 对飞机或寒冷地区的 LWP 检测灵敏度要高出许多。PWV 和 LWP 的观测,与垂直方向 WCR 和 WCL 相结合被用来研究混合相云和降雨水云的微物理特征。

## 2.2 机载遥感探测装备的应用

Geerts et al(2015)利用机载双偏振云雷达,收集了 2006—2013 年 16 次在怀俄明山区上空平行于风向飞行的冬季风暴个例,研究了其中雪的生长、传输以及沉降过程。结果表明该地区主要有三种降水模式,认为其地形气流的动力作用是降水的主导。由边界层对流产生的降水主要落在上风方;而抬升对流产生的降水主要落在下风方;对于第三种由于地形强迫空气抬升导致位势不稳定释放而产生的降水,通常是在垂直传播的地形波或强的潜流影响下,降落在下风方,从而导致风暴在山顶快速扫过。

2012—2013 年在南怀俄明的马德雷山脉开展 ASCII 试验,利用机载云雷达、微雨雷达以及地基多普勒雷达等多传感器,开展了多个不同天气系统和云况的个例研究。本次试验,首次使用多种雷达探测系统研究地形云和降水的地基 AgI 播撒效应(Pokharel et al, 2014a),分别包括搭载在飞机上的 WCR、一对地基 MRR 和一部 DOW。探测表明目标区含有丰富的过冷水,并给出了风暴发展情况和云底及云顶温度;比较三部雷达探测结果表明,播撒时近地面的反射率更高;与邻近的风暴区发展对比,表明目标区近地面的降雪效率在碘化银播撒时段是增加的,基于地面的 AgI 催化提高了 2012 年 2 月 21 日山脉风暴期间的近地表降雪效率。2 月 13 日的积云个例研究表明(Pokharel et al, 2014b),冰晶播撒期间增加了在浅对流中所有尺度的冰晶浓度,特别是 1 mm 冰晶数浓度显著增加。针对包含有较大过冷水滴( $35 \mu\text{m}$ )的浅薄地形云个例,Pokharel et al(2015)认为雪的增长是依赖于碰冻积聚(淞附)过程产生的,通过降雪的痕量化学分析发现位于山

口目标区有 AgI 播撒的影响。结合厘米波雷达系统综合分析表明,即使考虑上风方控制区的自然趋势,播撒时段低层反射率也是增加的;雨滴谱仪观测到直径小于 1 mm 的冰晶与大于 1.5 mm 的粒子浓度增加;目标区降水粒子无论大小,水成物数浓度均是增加的。

利用机载雷达分析了 ASCII 试验期间的对流云和层状云个例。其中 1—2 月的三个对流云个例中,为了检验 AgI 播撒效率,将研究区域定于为两个目标区和三个控制区,对比了两种区域间雷达反射率在不同高度和位置的变化(Jing and Geerts, 2015)。相对于控制区,目标区低层反射率有增加趋势、对流单体回波顶并没有变得更高;较远一个目标区的反射率增加大于近处目标区,这说明对流出现时,使降水增加延迟。分析结果表明,动力播撒机制对本研究中对流云云底作用不大;从雷达反射率和雪的图像分析来看,增雪机制以静力播撒为主。而对于六个层状云个例来说(Jing et al, 2015),播撒期间低层可以观测到雷达反射率的变化,增加了雪的增长;观测到未依附的雪片更多,以及更大的枝状冰晶。枝状冰晶的增多,可能表明雪的长大主要来源是水汽扩散,而不是播撒期间云滴浓度的增加产生的。

因此,遥感探测技术的发展和运用,加强了对云的探测和定量化描述。发展高分辨率的机载多普勒、偏振雷达,将在人工影响天气领域具有重要的潜在价值。

### 3 人工影响天气催化数值模式及应用

国际上数值催化云模拟研究主要围绕冬季地形云降水开展。Xue et al (2013a)将 AgI 催化模块耦合到 WRF 模式中,并开展了冬季地形云催化试验。二维理想场模拟研究发现,飞机催化中凝华核化为主,而地面燃烧炉催化中浸没冻结核化更为重要,但凝华核化和凝结冻结核化也是地面催化的主要核化过程。AgI 粒子核化成冰晶后消耗水汽和液态水,导致地面冰相过程降水增加。地面催化导致背风坡降水增加,而飞机催化导致迎风坡降水增加。美国爱达荷州催化发现,增加的降水主要来自水汽的消耗。同时尽管催化结果与气象条件有关,但总体来说,增加目标区的降水,飞机催化比地面催化更有效(Xue et al, 2013b)。Xue et al(2014)利用 500 和 100 m 的水平分辨率进行 WRF 大涡模式模拟 AgI

地面催化,500 m 或更高分辨率的模拟结果与观测比较接近。AgI 扩散的烟羽窄而浅,AgI 的垂直分布主要由地形引起的湍流决定。Chang et al(2016)也利用 WRF 开展了冬季地形云 AgI 催化增雪试验。AgI 通过凝华和凝结冻结核化形成的冰晶,主要靠消耗水滴增长成雪和霰。催化剂量增加能导致降水增加。同时不同的气溶胶背景,海洋性气溶胶(低气溶胶浓度)时凝华和凝结冻结核化为主,而大陆性气溶胶(高气溶胶浓度)时接触冻结为主。总之,包含云催化研究的高分辨率云模拟是美国地形云催化模拟方面的主要新进展。云模拟研究已可以半自动运行,极大增加了计算的效率和能力(Xue et al, 2013a; 2013b)。

为了研究人工播撒的方式是否会改变平流层下部的水汽含量,Chen and Yin(2014)利用三维对流云模式,模拟不同情况下播撒 AgI 对 2005 年 11 月 30 日发生在澳大利亚达尔文的一次热带深对流云的影响。结果发现,如果在对流云发展初期对其进行 AgI 播撒,会对云微物理及动力特性有显著影响,从而进一步影响平流层下部的水汽含量;而如果在对流云成熟阶段进行播撒,则影响会非常轻微。另外,平流层水汽含量的变化与播撒量之间呈非线性关系,播撒少(大)量的碘化银可以增加(减少)平流层下部的水汽含量,通过播撒可以促进(抑制)云中冰晶的生成及冰雪粒子从对流层往平流层的垂直输送,冰雪粒子在平流层的升华使得平流层的水汽含量增加。总的来说,可以通过播撒适当剂量催化剂来人工改变平流层的水汽含量。该研究同时发现,播撒后云中霰粒子浓度和质量的变化,在云微物理和动力特性变化,以及进一步的平流层水汽含量变化过程中发挥着重要作用。

因此,随着计算能力的逐步提升,高分辨率云模式在云播撒研究中应用,特别是 WRF 模式中碘化银播撒参数化方案的发展,极大地促进了模式对云的模拟研究。另外,高分辨率模式模拟冬季地形云物理过程的能力也得到了证明(Rasmussen et al, 2014)。模式快速模拟随机历史个例的能力,大量减少了建立稳健的统计样本所需要的时间。

### 4 作业装备的研发改进及其他相关研究

在作业装备方面,美国近两年改进了地面燃烧

炉,提高了自动化程度,并降低了保养成本。部分地区开展吸湿性和碘化银联合催化作业。新的地基雪样自动采集装备正在研发。

无人机系统(unmanned aircraft systems, UAS)在人工影响天气中也有较好的应用前景(Ax-isa and Defelice,2016)。当前对无人机系统最迫切的需求是简单、经过校订并有较大有效荷载的小型无人机,主要用于大气状态参数、风、湍流、云中水成物的粒子谱以及液态水含量等有助于播撒条件参数的探测。云中湍流、结冰情况的实时探测结果,可以为无人机飞行提供实时导航,引导其自动飞行到适宜温度、上升气流以及高液态水含量的作业目标区,该应用可以改进和验证模式参数化方案。此外,多架无人机同时纵排飞行可以实现对催化剂的传输和扩散进行欧拉和拉格朗日分析;配置用于验证和监测人工影响天气活动的无人机系统,通过算法实现自动化之后,最适合应用于长期的随机云播撒试验。

在气候工程方面,近两年气候工程(通过干预地气系统的辐射平衡来冷却地球)有一些小型试验的尝试(Long et al,2015),包括播撒人工冰核到高纬度卷云中研究云是否会消散,从而会有更多的长波辐射逃离地球。Penner et al(2015)开展了卷云催化减少加热效应的可能性研究,结果发现卷云催化并不能有效减缓气候变暖的趋势。

关于催化剂的影响研究,通常认为播云后的 AgI 会经过沉降等过程保留在土壤和沉积物中,其游离的量很低,但其对生物环境的影响效应并不明确。Fajardo et al(2016)通过生态毒理学试验,评估了在实验室条件下 AgI 浓度引起的潜在环境影响,利用常见的陆生和水生生物来评估 AgI 对生物的可能毒性。试验中,AgI 浓度设置分别为 0.25、0.43、2.5、5 和 12.5  $\mu\text{mol}$ (0.43  $\mu\text{mol}$  为饮用水中 AgI 的阈值)。试验结果表明,暴露在相应 AgI 浓度下,土壤蠕虫线虫的生长和生存终点没有影响,但在研究浓度下,两种评估的土壤细菌菌株均发现细胞活力适度下降。当环境 AgI 浓度为 0.43  $\mu\text{mol}$  时,对光合作用有一定影响,土壤细菌活力适度降低。因此,评估结果认为如果在一个区域播撒 AgI 并累积达到饮用水安全阈值程度,则播云使用的 AgI 才可能会缓慢影响陆地和水圈的生态系统。根据对人工增雨后北京密云水库中 Ag 离子的变化情况表明,作业期间水质中 Ag 浓度远低于饮用水阈值标准约两个数量级(赵习方等,2006);美国与前苏联

等国家监测了长期增雨作业区域水体和土壤中的 Ag 离子,结果也远低于国际卫生组织的标准。因此,人工影响天气使用的催化剂并不会对环境、生态系统造成影响。

## 5 结论与讨论

综上所述,近年来以美国为代表的国际人工影响天气技术取得了较大进展,特别是美国怀俄明地形云播撒试验的持续开展、高性能遥感探测设备的应用、人工影响天气催化数值模式的应用,以及作业装备的改进和研发等。

21 世纪以来我国人工影响天气的作业规模和投入已达到国际领先,在云降水监测、数值模拟和作业技术等研发和实时应用等方面也有了显著发展,有了不少云结构和作业个例分析研究成果,但缺乏科学的人工影响天气试验项目,对国际人工影响天气科技发展的贡献不大,总体科学水平不高。因此,借鉴国际最新结果、经验与做法,充分利用我国现在已经具备的新技术装备,开展具有科学设计的云系结构综合探测和播云作业试验研究,高效科学地开展作业服务,是我们迫切需要考虑的问题,也是推动我国人工影响天气科技水平发展有效途径。

人工影响天气技术的进步与云降水物理学科技发展息息相关。对云降水过程的深入认识,是提高人工影响天气技术科学性的重要保障。目前我国人工影响天气仍然面临多个关键科学问题,包括作业条件选择、催化作业技术等,特别是人工影响天气效果检验和评估仍需重点关注。长期以来人工影响天气的发展主要是通过一系列的效果检验为核心的有严格科学设计的长期持续的人工影响天气试验项目来推动和引领的。科学界能够接受的人工影响天气作业结论要求包括:有增雨、减雹等效果的随机统计显著性结果;有与催化相同效果的因果性关系的物理和理论(数值试验)证据支持。这将是效果评估工作需要长期努力的方向。

虽然对自然云降水或播云降水的研究,数值模式都是十分有效的工具,但是其存在自身的不确定性,而这些不确定性在未来需要进一步研究以及定量化。我国未来的模式发展与应用,应借鉴国际先进思维,更加注重云模式的改进及精细化,提高模式模拟能力,开展模拟催化试验与检验,以便能更有效地指导、优化云播撒作业方案的科学实施,并能更好



地对播撒计划所能取得的效益进行科学评估。

国际最新进展表明,发展高分辨率的机载多普勒技术、地基偏振雷达等遥感设备的综合应用技术,已在人工影响天气领域发挥极其重要的作用,且具有潜在的应用价值。目前我国基本上已经具备了诸如此方面的新技术装备条件,但是应用潜力发挥欠缺。因此,应充分借鉴国际先进经验与新成果,结合利用机载和地基云降水观测设备,有组织地开展针对不同目的性、具有科学设计的空基(飞机)、地基(多种雷达等)外场综合探测研究和播云试验,综合分析探测研究和播云试验所得到的观测结果,开展利用有效观测数据对不同类型云降水微物理特性研究及数值模式结果的可靠性检验与评估,加强对我国不同播云物理概念模型构建能力的研究,从而使我国的人工影响天气科技水平,能在充分借鉴国际先进经验的基础上获得更加显著的提高。

## 参考文献

- 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.
- 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.
- 黄美元,沈志来,洪延超,2003.半个世纪的云雾、降水和人工影响天气研究进展[J].大气科学,27(4):536-551.
- 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.
- 楼小凤,师宇,李集明,2016.云降水和人工影响天气催化数值模式的发展及应用[J].气象科技进展,6(3):75-82.
- 毛节泰,郑国光,2006.对人工影响天气若干问题的探讨[J].应用气象学报,17(5):643-646.
- 许焕斌,尹金方,2017.关于发展人工影响天气数值模式的一些问题[J].气象学报,75(1):57-66.
- 姚展予,2006.中国气象科学研究院人工影响天气研究进展回顾[J].应用气象学报,17(6):786-795.
- 游来光,马培民,胡志晋,2002.北方层状云人工降水试验研究[J].气象科技,30:19-56.
- 赵习方,张蕾,秦长学,等,2006.实施飞机人工增雨对密云水库水质中Ag<sup>+</sup>影响研究[J].气象,32(5):46-51.
- 郑国光,陈跃,王鹏飞,2005.人工影响天气研究中的关键问题[M].北京:气象出版社:17-21.
- Axisa D,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.
- Breed D,Rasmussen R,Weeks C,et al,2014.Evaluating winter orographic cloud seeding: design of the Wyoming Weather Modification Pilot Project (WWMPP)[J].J Appl Meteor Climatol,53(2):282-299.
- Chang K K,Yum S S,Park Y S,2016.A numerical study of winter orographic seeding experiments in Korea using the Weather Research and Forecasting model[J].Meteor Atmos Phys,128(1):1-16.
- Chen Bojun,Yin Yan,2014.Can we modify stratospheric water vapor by deliberate cloud seeding[J].J Geophys Res Atmos,119(3):1406-1418.
- Defelice T P,Golden J,Griffith D,et al,2014.Extra area effects of cloud seeding—an updated assessment[J].Atmos Res,135-136(1):193-203.
- Delene D J,2016.Suitability of North Dakota for conducting effective hygroscopic seeding[J].J Wea Modif,48(1):43-67.
- Dennis A S,1980.Weather modification by cloud seeding[M].New York:Academic Press.
- Dessens J,Sanchez J L,Berthet C,et al,2016.Hail prevention by ground-based silver iodide generators: results of historical and modern field projects[J].Atmos Res,170:98-111.
- Fajardo C,Costa G,Ortiz L T,et al,2016.Potential risk of acute toxicity induced by AgI cloud seeding on soil and freshwater biota[J].Ecotoxicol Environ Saf,133:433-441.
- Geerts B, Yang Yang,Rasmussen R,et al,2015.Snow growth and transport patterns in orographic storms as estimated from airborne vertical-plane dual-Doppler radar data[J].Mon Wea Rev,143(2):644-665.
- Gilbert D B,Boe B A,Krauss T W,2016.Twenty seasons of airborne hail suppression in Alberta,Canada[J].J Wea Modif,48(1):68-92.
- Griffith D A,Beall S D,Yorty D P,2016.Feasibility/design study for a winter cloud seeding program in the upper Cuyama River Drainage[R].California:North American Weather Consultants, Inc.
- Griffith D A,Yorty D P,Beall S D,2015.Target/control analyses for Santa Barbara county's operational winter cloud seeding program[J].J Wea Modif,47:10-25.
- Jing Xiaqin,Geerts B,2015.Dual-polarization radar data analysis of the impact of ground-based glaciogenic seeding on winter orographic clouds. Part II: convective clouds[J].J Appl Meteor Climatol,54(10):2099-2117.
- Jing Xiaqin,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[J].J Appl Meteor Climatol,54(9):1944-1969.
- Long J C S,Loy F,Morgan G M,2015.Policy: Start research on climate engineering[J].Nature,518(7537):29-31.
- Penner J E,Zhou Cheng,Liu Xiaohong,2015.Can cirrus cloud seeding be used for geoengineering[J].Geophys Res Lett,42(20):8775-8782.
- Pokharel B,Geerts B,2016.A multi-sensor study of the impact of ground-based glaciogenic seeding on clouds and precipitation over mountains in Wyoming. Part I: project description[J].Atmos Res,182:269-281.
- Pokharel B,Geerts B,Jing Xiaqin,2014a.The impact of ground-

- based glaciogenic seeding on orographic clouds and precipitation: a multisensor case study[J]. *J Appl Meteor Climatol*, 53(4): 890-909.
- Pokharel B, Geerts B, Jing Xiaoqin, 2015. The impact of ground-based glaciogenic seeding on clouds and precipitation over mountains: A case study of a shallow orographic cloud with large supercooled droplets[J]. *J Geophys Res Atmos*, 120(12): 6056-6079.
- Pokharel B, Geerts B, Jing Xiaoqin, et al, 2014b. The impact of ground-based glaciogenic seeding on clouds and precipitation over mountains: a multi-sensor case study of shallow precipitating orographic cumuli[J]. *Atmos Res*, 147-148: 162-182.
- Pokharel B, 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[J]. *Atmos Res*, 183: 42-57.
- Rasmussen R, Ikeda K, Liu C, et al, 2014. Climate change impacts on the water balance of the Colorado Headwaters: high-resolution regional climate model simulations[J]. *J Hydrometeor*, 15(3): 1091-1116.
- Wang Zhien, French J, Vali G, et al, 2012. Single aircraft integration of remote sensing and in situ sampling for the study of cloud microphysics and dynamics[J]. *Bull Ame Meteor Soc*, 93(5): 653-668.
- Witze A, 2014. Major cloud-seeding test gives mixed results[J]. *Nature*. DOI:10.1038/nature.2014.16537.
- Xue Lulin, Chu Xia, 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[J]. *J Appl Meteor Climatol*, 53(6): 1342-1361.
- Xue Lulin, Hashimoto A, Murakami M, et al, 2013a. Implementation of a silver iodide cloud-seeding parameterization in WRF. Part I: model description and idealized 2D sensitivity tests[J]. *J Appl Meteor Climatol*, 52(6): 1433-1457.
- Xue Lulin, Tensendorf S, Nelson E, et al, 2013b. Implementation of a silver iodide cloud-seeding parameterization in WRF. Part II: 3D simulations of actual seeding events and sensitivity tests[J]. *J Appl Meteor Climatol*, 52(6): 1458-1476.