

郭学良,方春刚,卢广献,等. 2008—2018 年我国人工影响天气技术及应用进展. 应用气象学报,2019,30(6):641-650.

DOI: 10.11898/1001-7313.20190601

## 2008—2018 年我国人工影响天气技术及应用进展

郭学良<sup>1)2)\*</sup> 方春刚<sup>1)</sup> 卢广献<sup>1)</sup> 楼小凤<sup>1)</sup>  
苏正军<sup>1)</sup> 于子平<sup>3)</sup> 李培仁<sup>4)</sup> 杨泽厚<sup>5)</sup>

<sup>1)</sup>(中国气象科学研究院,北京 100081)

<sup>2)</sup>(中国科学院大气物理研究所,北京 100029)

<sup>3)</sup>(中国兵器科学研究院,北京 100821)

<sup>4)</sup>(山西省人工降雨防雹办公室,太原 030032)

<sup>5)</sup>(中国兵器工业 209 研究所,成都 610041)

### 摘 要

在抗旱、防雹、生态环境保护 and 重大活动气象保障等国家和地方重大需求的推动下,2008—2018 年我国人工影响天气技术和应用得到快速发展。在气溶胶粒子、云(雾)物理垂直结构和降水形成机理等方面,开展了大量科学试验研究,取得了重要成果,建立了国家级人工影响天气实时业务数值预报模式,提高了对作业云特征和演变过程的预报能力,对作业方案的科学设计具有重要作用。在机载云粒子谱仪与成像仪、多通道微波辐射计、X 波段偏振雷达、雨(雾)滴谱仪、先进火箭作业系统等核心关键技术装备的国产化研发方面也取得重要进展,研制成功国产机载云粒子测量系统、地基多通道微波辐射计和立体播撒火箭作业系统,并应用于业务,提高了作业条件监测识别和地基作业能力。建立了空中国王、新舟 60 等型号的先进飞机探测和作业平台,大幅度提高了作业飞行高度、续航时间和空中作业能力。在电离、飞秒激光、声波等人工增雨新技术领域开展了理论和实验探索研究,在飞秒激光诱导降雪机理实验和数值模拟等方面取得了重要进展。

**关键词:** 人工影响天气; 技术及应用; 进展

### 引 言

我国自 1958 年开始人工影响天气试验以来,由于对抗旱、防雹、生态环境保护 and 重大活动气象保障等方面的迫切需求,促进了人工影响天气技术和装备的现代化水平的快速提升。经过 60 年的发展,我国已成为世界人工影响天气大国。尽管在不同地区存在不平衡发展情况,但整体上看,我国目前已经形成了较为完备的人工影响天气相关技术、业务与管理体制,综合实力与科技水平不断提高。建立在基本气象业务体系基础上的人工影响天气作业条件监测预报、作业技术和装备等方面有了明显提高。自

20 世纪 60 年代以来,我国云降水物理和人工影响天气领域在理论、数值模式、观测、技术和装备等方面的进展<sup>[1-12]</sup>可归纳总结为几个方面:①基于我国不同地区云和降水观测试验的相关理论认识不断加深。尽管当时观测仪器设备简陋、试验条件艰苦,但对高山云雾形成、冰雹云传播路径、人工增雨和防雹爆炸影响和云雾观测设备研制等方面取得了重要进展。②云和降水数值模式和模拟研究从无到有,逐步发展到具有复杂动力框架和微物理过程的云尺度数值模式。③地基和空中作业装备显著提高。从土火箭发展到现代化人工影响天气火箭作业系统,作业可靠性和安全性显著提高。空中飞机作业装备由原来依靠部队的战斗机发展为以运 12(Y12)等为

2019-07-15 收到,2019-09-30 收到再改稿。

资助项目: 国家重大科学仪器设备开发专项(2011YQ110059),河北省“十三五”气象重点工程——云水资源开发利用工程的示范项目(hbry-wcsy-2017-01),公益性行业(气象)科研专项(GYHY201306047)

\* 邮箱: guoxl@mail.iap.ac.cn

主的专业飞机。④先进观测和定位技术的应用,显著降低了作业的盲目性。数字化雷达、卫星等遥感观测数据与飞机飞行定位和地理信息系统的有机结合,实现了作业飞机在云中位置的实时显示和数据传输,对于地面作业科学指挥和减小作业盲目性具有重要作用。

2008—2018年是我国人工影响天气技术、装备及其应用进入快速发展阶段,探测和作业装备的现代化水平明显提高,显著提高了研究能力,科学试验活动显著增加,加深了对作业效果以及自然云和降水物理过程的了解,促进了对人工影响天气科学机理的认识<sup>[12]</sup>。人工影响天气技术的进展主要表现在云降水物理探测技术和作业技术方面,先进的探测技术和装备,如机载云降水粒子谱仪和成像仪测量系统、偏振雷达、多通道微波辐射计、雨(雾)滴谱仪等关键设备实现了国产化,并在业务中得到应用。在作业技术方面,研发了更为先进的火箭作业技术,实现了立体播撒,使播撒体积更大,火箭初速度、残骸降落伞回收技术等也得到显著提高,使火箭飞行的弹道更加稳定,作业安全性和可靠性进一步提高;对“37”高炮的自动化改造也显著提高了作业的安全性;研发了吸湿性暖云烟条,实现了机载和地面的暖云催化剂播撒。

人工影响天气技术的业务应用取得了长足进步。除国产探测和作业技术实现业务应用外,先进的模式模拟和预报技术、北斗导航定位和通信技术、物联网技术、具有技术集成和显示的数据处理系统等也在人工影响天气业务中得到广泛应用,显著减小了作业的盲目性,提高了作业的科学性。

通过国家和地方人工影响天气工程建设项目,促进了飞机平台的更新换代,使原来以Y12为主导的飞机作业平台逐渐向空中国王350(King-Air 350ER)、新舟60(M-60)等更为先进的飞机平台发展,特别在华北、东北和西北等省市。同时,通过工程建设项目,以偏振雷达为主的地基观测系统、作业系统和云室实验系统等也得到显著提升。

人工影响天气作业和科学试验能力显著提高。自2008年北京夏季奥运会首次开展了人工消减雨作业活动以来,我国先后开展了多次人工消减雨作业活动,包括2009年北京庆祝中华人民共和国成立60周年、2010年广州亚运会、2014年南京青奥会、2015年北京纪念抗战胜利70周年等。通过近10年的以重大活动保障为目的的人工消减雨活动,得

到了一些初步的认识和技术。同时,重大活动保障为有组织和设计人工影响天气作业活动和科学试验提供了很好的平台。

开展了人工影响天气新技术的探索研究。近几年,国内一些高校和科研单位针对电离、飞秒激光、声波等人工影响天气技术,开展了初步的探索实验研究,在电离、飞秒激光对云雾影响的原理等方面取得了重要进展。

近10年,我国人工影响天气技术及应用取得了显著进步,资金投入在增加,但科技创新能力、创新动力和人才仍显不足,特别是针对人工影响天气的关键核心技术以及新理论、新技术和新方法的创新研究方面亟待加强<sup>[9,13]</sup>。

## 1 理论与关键技术进展

在抗旱、防雹、生态环境保护和重大活动气象保障等国家和地方重大需求的推动下,“十一五”期间,在国家科技支撑计划重点项目“人工影响天气关键技术与装备研发”支持下,中国气象科学研究院联合北京、河北和山西人工影响天气办公室在华北地区开展了多架飞机同时观测的云物理探测科学试验,在气溶胶粒子垂直分布、层状云微物理垂直结构和降水形成等方面取得了重要研究成果<sup>[14-17]</sup>,揭示了层状云与积层混合云微物理结构及降水形成机制,开展了飞机观测与模式微物理参数化的对比研究,对改进数值模式云物理过程具有重要作用。同时,开展了数值模式技术、暖云催化剂和作业技术、人工消雾技术、效果检验技术等研发和业务应用试验,为后续数值模式<sup>[18]</sup>和暖云催化剂业务应用奠定了基础。

“十二五”期间,在气象行业专项、国家重大科学仪器设备专项等项目的支持下,开展了大量气溶胶-云(雾)-降水相互作用机理<sup>[19-24]</sup>、探测和作业装备技术、新型云室技术、催化剂核化实验技术、随机化人工增雨效果检验技术,以及卫星、雷达、雨滴谱仪等应用技术的研究。

依托第三次青藏高原大气科学试验,我国首次在青藏高原中部地区开展了青藏高原云和降水过程的飞机综合观测研究,取得了一些重要成果<sup>[25-29]</sup>,如发现高原云内过冷水含量丰富,云滴粒子尺度大,浓度小,而霰粒子浓度高,冰相过程在高原降水中具有十分重要的作用,高原夏季对流云易产生降水等。

河北省“十三五”气象重点工程——云水资源开发利用工程的示范项目“太行山东麓人工增雨防雹作业技术试验”,运用目前最先进的多种观测设备,如先进的飞机观测系统、地基多波段偏振雷达、微波辐射计、雨滴谱仪等,结合高分辨率数值模式模拟研究,针对华北太行山东麓积层混合云、冰雹云结构、形成、演变和人工影响开展综合科学试验研究,取得了一些重要的新认识,具有示范作用。

## 2 先进飞机平台的建设及应用

通过国家人工影响天气能力建设项目以及其他一些省级人工影响天气建设项目,我国以飞机为主的人工影响天气综合探测试验能力显著提高,飞机探测平台由以原来的 Y12 为主,逐步向以空中国王、M-60

等先进飞机探测和作业平台发展<sup>[30]</sup>。通过国家工程项目,建设完成了 3 架国家高性能人工影响天气探测与作业飞机。北京、河北、山西等省市依托省(市)级工程建设项目建设了以美国空中国王为主的先进飞机探测与作业系统(图 1)。先进人工影响天气飞机的建设使探测和作业的性能明显提高,解决了 Y12 飞机飞行高度不足的问题,新建设的空中国王飞机飞行高度可达到 10 km 以上,续航时间超过 5 h。飞机上搭载了先进的气象基本要素、过冷水、云粒子测量系统等,基本满足了人工影响天气对探测的需求。M-60 飞机具有大剂量冷暖云作业能力,先进的空地通信能力,集成度和自动化程度高等优点。这些先进的飞机平台的建设和业务应用,显著提高了作业条件的探测和作业能力,对提高人工影响天气作业科学性和减小盲目性起到重要作用。



图 1 通过人工影响天气重大工程项目建设的高性能探测和作业飞机

(a)国产新舟 60 飞机,(b)美国空中国王 350 飞机

Fig. 1 Advanced weather modification aircraft established by national weather modification engineering construction projects (a)M-60 aircraft,(b)King-Air 350ER aircraft

## 3 探测与作业技术装备研制及应用

近 10 年,我国人工影响天气探测与作业装备的现代化水平呈现快速提高的趋势。卫星定位系统、地理信息系统和遥感观测系统的广泛应用,使作业目标的跟踪、作业条件的判识和作业效果分析等更加直观和科学,显著降低了作业的不确定性。特别是一些先进的观测和作业系统,如高性能飞机探测平台、云粒子测量系统、偏振雷达等的应用,使作业科技水平显著提高。

在国家各类科技项目的支持下,我国一些人

影响天气相关的核心关键设备的自主研发取得重要进展。在国家重大科学仪器开发专项“机载云粒子谱仪与成像仪研制”的支持下,首次实现机载云粒子谱仪与成像仪的国产化研制并成功应用于外场观测试验(图 2)。

为联合国内优势科技力量,2009 年 2 月 26 日中国气象科学研究院与中国兵器科学研究院在北京签订了人工影响天气装备技术联合研发战略合作伙伴协议,拟共同推进我国人工影响天气装备技术的进步。双方开展了卓有成效的合作研究与开发,先后成功研制了一系列“中兵”高新技术成果,如多通道微波辐射计<sup>[31]</sup>、X波段偏振雷达(图 3)、雾滴谱

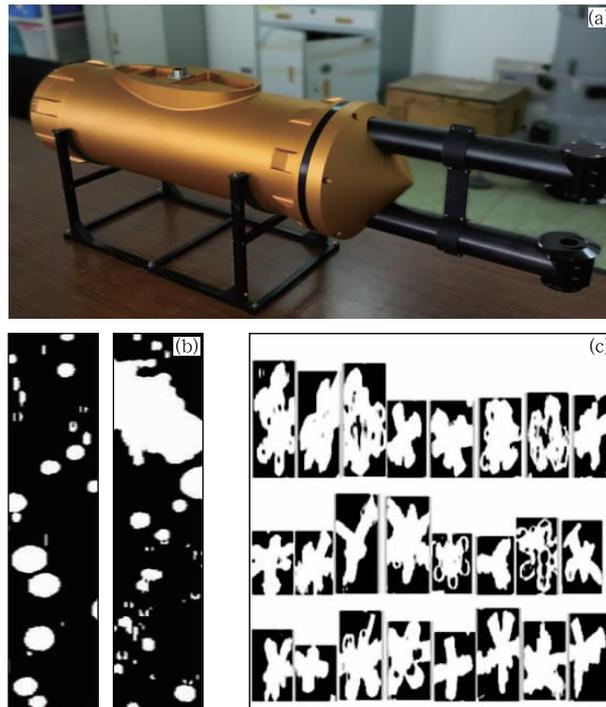


图2 国家重大科学仪器设备开发专项研制的机载云粒子谱仪与成像仪(a), 2018年6月2日在云南飞机观测中取得的雨滴和冰粒子融化图像(b) 以及2018年9月27日山西观测的枝状冰粒子图像(c)

Fig. 2 Airborne cloud particle spectrum and imaging system established by National Key Scientific Instrument and Equipment Development Project(a), raindrops and melted ice particles images obtained in Yunnan on 2 Jun 2018(b) and the dendritic ice crystals observed in Shanxi on 27 Sep 2018(c)

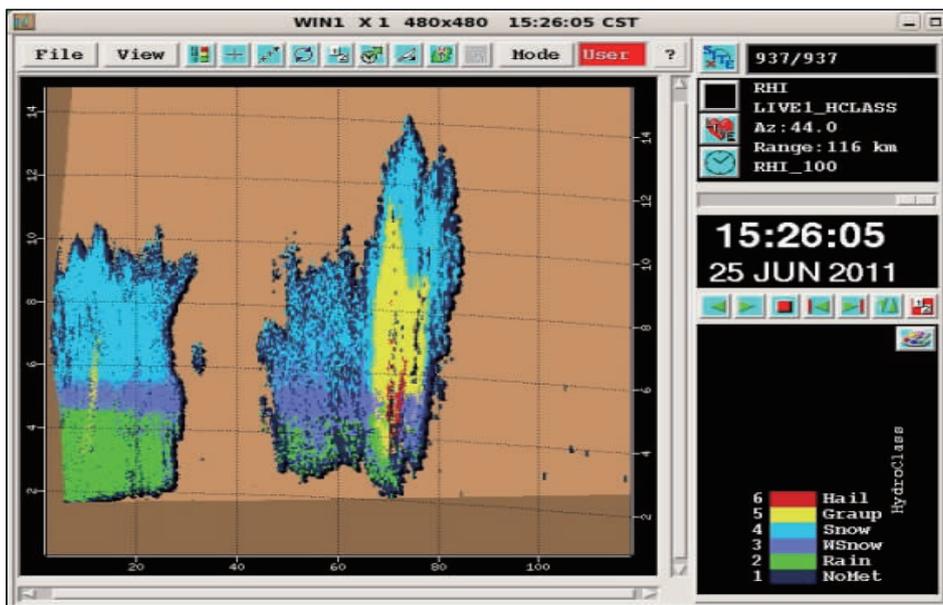


图3 中国气象科学研究院与中国兵器科学研究院联合研制的X波段双偏振雷达系统对2011年6月25日甘肃平凉冰雹云垂直结构探测 (云中红色部分表示已形成正在下降的冰雹,黄色表示霰粒子形成区)

Fig. 3 The vertical structure of a hail cloud at Pingliang of Gansu on 25 Jun 2011 observed by X-band polarized Doppler radar system jointly developed by Chinese Academy of Meteorological Sciences and Ordnance Science and Research Academy of China (red color denotes hailstone and yellow one denotes graupel in cloud)

仪、先进的火箭作业系统等。这些观测设备均采用了激光、微波先进技术,通过自主研发,部分原来依靠进口的仪器设备已基本实现了国产化和产业化。而这些核心探测设备成功应用在高性能膨胀云室中,首次实现了我国云室中粒子谱与图像的自动化监测。火箭作业系统采用了立体播撒、软件控制等先进技术(图4),与雷达观测有机结合,在作业精准度、强度和安全性等方面大幅度提高。中兵人工影响天气战略合作伙伴关系建立的最初目标是充分利用我国军工技术,发挥军工和气象两部门各自的专业优势,提高我国人工影响天气核心关键技术的自主研发,最终实现核心装备的国产化。事实证明,这一合作关系的建设具有前瞻性与战略性,取得了重要成果和进展。



图4 中国气象科学研究院与中国兵器科学研究院联合研制的新型自动化火箭作业系统

Fig. 4 The new cloud-seeding rocket system jointly developed by Chinese Academy of Meteorological Sciences and Ordnance Science and Research Academy of China

#### 4 人工消减雨技术进展

2008年以来,为避免云和降水天气对重大活动的影响,在很多重大活动场合,如2008年北京夏季

奥运会开展了人工消减雨作业活动。这些人工影响天气作业具有作业强度大、作业时间集中、安全性要求高和作业效果易于检验等显著特点。由于具有比较好的空域条件,使实施更为严格和复杂的科学设计作业方案及效果检验成为可能。同时,这些重大活动往往集中了国内不同部门的优势科技力量,在作业条件监测预报、识别、作业效果检验等各个环节紧密衔接和科学性等方面明显提高,既能检验作业的协同能力和科技水平,又能锻炼和培养不同团队的工作人员。

2008年北京夏季奥运会人工消减雨作业活动,是我国历史上最大规模的一次人工影响天气作业活动,此次人工影响天气作业活动主要基于地面火箭作业和雷达观测指挥,通过多次反复作业,可以明显看到雷达回波的变化及对流云过程的减弱<sup>[32]</sup>。由此可见,通过大剂量碘化银催化剂作业,对北方夏季的对流云和降水过程会产生重要影响,但影响机理有待深入探讨。

对2014年南京青奥会开幕式中开展人工消减雨期间观测的雷达和雨滴谱数据分析表明<sup>[33-34]</sup>,人工减雨作业后,南京站雨滴谱较作业前谱宽变窄,直径小于1 mm的小滴粒子占比增加,大于1 mm的大滴粒子减少,雨滴粒子各特征直径均小于作业前,这些特征表明人工减雨作业明显改变了雨滴谱分布,有效减小了雨滴群中的大粒子,从而抑制了降雨的发展,起到减雨效果。回波强度和回波顶高均呈减弱趋势,减雨作业在播撒催化剂间歇时段和作业后会导致更显著的短时强降水。2016年9月初杭州G20人工影响天气保障活动主要采用多架飞机进行作业,可以明显看到作业后云中粒子的变化情况。

通过近10年的以重大活动保障为目的的人工消减雨活动,得到了一些初步的认识和技术。一是提前降水技术和原理,一般在保护区上游对于适合增雨的云实施增雨作业,由于降雨会使云的强度减弱,甚至消散,使保护区的降水减弱或不产生降雨,如2008年北京奥运会人工消减雨作业。二是过量播撒技术和原理,一般在云中大量播撒催化剂,争食水分,使降水形成滞后,经过保护区后再产生降水。但这种作业方法不适合水分充足、发展强大的云,对于这类云,即使过量播撒也会显著增加降水。但人工消减雨是一项很复杂的工作,要依据当时云的状况决定采取的手段,实时监测非常重要。由于人工可影响的

范围和强度毕竟有限,对于大范围持续性降水性云系,实施人工消减雨的技术难度非常大。

## 5 新技术探索研究

人工影响天气技术已发展了70多年,主要技术原理基于在云中增加云凝结核(CCN)或冰核(IN)。但在实际操作中,由于对云微物理结构观测手段的限制,一些关键技术,如播撒量、播撒时间和播撒位置很难精确掌握。另外,云和降水过程本身自然变率很大,播撒作业也受制于很多因素的影响,很难建立人为影响的云微物理量变化与地面降水的关系,这些因素导致效果检验困难。

过去50多年国际人工影响天气科学试验结果表明:基于增加云中凝结核和冰核的播撒技术,由于可播撒的窗区非常窄,也就是说,目前人工影响天气技术的适用条件非常苛刻,但这些条件很难通过现有的常规观测或数值模式技术准确获取,从而导致作业存在盲目性。因此,基于现代科技发展,试验和发展人工影响天气新技术,满足各种条件下的作业活动非常重要。近几年国内外开始研究一些人工影响天气的新技术,并且在实验室层面和少量的外场试验中取得了一些结果。

一是电离人工增雨(雪)技术。其原理与利用吸湿性物质、碘化银、干冰等催化剂进行播云的技术原理不同。吸湿性催化剂(氯化钠)、碘化银、干冰等播云技术是利用了云粒子形成需要凝结核和冰核的原理,在一定条件下,人为增加具有形成这些核的化学物质,可以促进云中云滴和冰晶的形成过程,这些云滴、冰晶的进一步增长就可以产生能到达地面的降水性大云粒子,从而增加了地面降水。而基于电离法的人工影响天气技术是采用高压放电产生电晕,使空气电离,从而释放大量带电粒子,这些粒子借助有利的风速和上升气流进入云中,使云粒子荷电,从而促进云中粒子的加速碰并形成较大降水性粒子。最早开展这项试验研究的也是碘化银催化剂的发现者 Vonnegut,他从1959年开始开展了大量科学试验<sup>[35]</sup>,随后开展的大量试验研究均来自这一技术。

但利用电离法的人工影响天气技术在原理上仍然存在未解决的问题,如进入云中带电离子的分布、对云中电场的影响,以及与云粒子荷电过程和相互作用过程等。这种技术在一些国家进行了试验,如澳大利亚开展的 Atlant 电离技术试验,由澳大利亚

人工增雨技术部门(ART)分别在2008年、2009年和2010年共开展了3年,2010年试验采用了更为严格的随机检验方法,结果表明平均有9%的增雨效果。尽管3年的试验结果具有很好的一致性,均为正效果,但需说明的是,有关试验结果产生机制仍不明确。另一个引起国际上关注的试验是2010年6—10月在沙特阿布扎比开展的电离技术人工增雨试验,声称成功制造50多次强降水过程。从德国马普生物地球化学研究所开展的评估报告看,利用电离技术进行人工增雨有明显效果,但还需要进一步开展科学试验验证。

我国华中科技大学、中国科学院上海光学精密机械研究所等部门也开展了电离法人工影响天气新技术实验研究,取得了一些室内实验结果。通过数值模式比较研究了考虑云中荷电过程和不考虑荷电过程的云和降水形成过程,发现云中荷电过程及电场的形成仅对小云粒子形成过程有明显影响,而对大云粒子的形成过程没有明显影响,云中电过程增加降水约为10%<sup>[36]</sup>。这一结果与澳大利亚外场试验结果一致。

二是飞秒激光人工增雨(雪)技术。飞秒是时间单位,1飞秒即 $10^{-15}$  s。飞秒激光是一种脉冲形式的激光,持续时间非常短,仅几个飞秒。飞秒激光具有非常高的瞬时功率,可达到百万亿瓦。飞秒激光能聚焦到比头发的直径还要小的空间区域。研究表明:在相对湿度大于70%的情况下,飞秒激光丝可以引起水汽凝结,水滴快速长大到几个微米。该技术主要原理是通过光化学过程,形成了 $H_2O-HNO_3$ 粒子,光化学反应促进了凝结过程。一些研究表明:对于大于25 nm的粒子,飞秒激光可以促进这种粒子的聚集和气相核化过程(类似污染中二次气溶胶的形成过程),一旦粒子尺度达到500 nm,水汽分子的扩散增长减弱,需要高水汽含量和较高温度才能维持增长(吸湿增长过程),一般情况下,由于空气处于未饱和状况,会导致蒸发过程,通过电离和光氧化过程产生的高浓度 $HNO_3$ 具有强吸湿作用,维持了粒子增长过程。印度研究人员提出用飞秒激光诱导凝结核形成的能量原理,飞秒激光导致大气中的 $O_2$ 和 $N_2$ 处于激发态,激发态的N和O随后氧化形成ON和 $O_3$ ,该过程具有强烈的吸热降温效应,导致凝结核的形成。

我国在飞秒激光诱导降雪方面开展了很多科学实验,取得了很好的进展,如中国科学院上海光学精密机械研究所飞秒激光诱导降雪室内实验研究(图

5)<sup>[37]</sup>。另外,清华大学也开展了声波消雾、增雨技术试验。

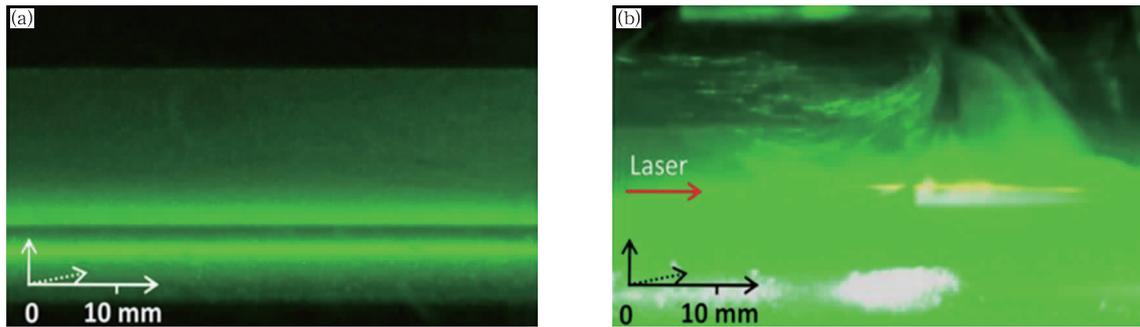


图 5 在低温( $-5^{\circ}\text{C}$ )和高湿(90%)环境下,采用 22 TW 飞秒激光诱导降雪室内实验结果<sup>[37]</sup>

(a)发射飞秒激光脉冲前,(b)发射飞秒激光脉冲后(红色箭头表示激光脉冲发射方向,上部是激光诱导形成的气流变化,低层白色部分是雪粒子堆积)

Fig. 5 Laboratory experiment of snow condensation induced by femtosecond laser with the temperature of  $-5^{\circ}\text{C}$  and relative humidity of 90% (from Reference [37])

(a) before the arrival of the laser, (b) after the arrival of the laser (the red arrow is the direction of the laser pulse, the upper-layer is the wind turbulence and the low-layer white is the accumulative snow induced by laser pulse)

## 6 小 结

在抗旱、防雹、生态环境保护 and 重大活动气象保障等国家和地方需求的推动下,我国人工影响天气得到快速发展。2008—2018 年基于重大活动保障的人工影响天气活动明显增加,同时通过人工影响天气工程项目建设,探测和作业装备的现代化水平明显提高,科学试验和研究能力显著提高,从而促进了云和降水物理研究及人工影响天气科学机理的认识:

1) “十一五”和“十二五”期间,在国家科技项目支持下,在云物理探测科学试验、气溶胶垂直分布、层状云微物理垂直结构和降水形成等方面取得了重要研究成果,建立了国家级人工影响天气业务数值模式,开展了大量气溶胶-云(雾)-降水相互作用机理研究。我国首次在青藏高原中部地区开展了青藏高原云和降水过程的飞机综合观测研究,取得了一些重要成果。

2) 在国家科技项目的支持下,我国一些人工影响天气相关的核心关键设备的自主研发取得重要进展。在国家重大科学仪器开发专项“机载云粒子谱仪与成像仪研制”的支持下,首次实现机载云粒子谱仪与成像仪的国产化研制,并成功应用于外场科学试验。联合国内优势科技力量,在多通道微波辐射计、X 波段偏振雷达、雾滴谱仪、先进火箭作业系统

等核心关键技术装备的国产化研发方面取得重要进展,并成功应用在高性能云室中,首次实现了我国云室中粒子谱与图像的自动化监测。

3) 通过国家“东北区域人工影响天气能力建设”以及其他一些省级人工影响天气建设项目,我国以飞机为主的人工影响天气探测综合试验能力显著提高,飞机探测平台由原来的 Y12 为主,逐步向以空中国王、M-60 等先进飞机探测和作业平台发展。在电离、飞秒激光人工增雨新技术领域开展了室内实验研究,取得了重要进展。

但同时应该看到,我国人工影响天气的科技水平和创新能力仍然存在明显不足,特别是针对人工影响天气关键理论、技术研究,以及新理论、新技术和新方法的创新研究方面亟待加强。人工影响天气的主要对象是云,但在大气科学领域,对云的认识仍然处在半定量化阶段,由于自然云和降水过程的不可完全重复性以及人工影响天气技术本身的限制,导致人工影响天气科学试验结果重复验证困难,存在很多不确定性。目前的天气预报主要依赖数值模式,但数值天气模式中对云和降水物理过程的描述和定量化预报仍存在很多不确定性,从而使在人工影响天气领域应用数值模式存在更大的挑战性。随着数值天气模式时空分辨率的提高,各种物理过程的不断完善,对云和降水物理过程定量化预报能力的提高,将会大幅度促进人工影响天气一些关键技术的解决。云和降水物理的精细化探测能力的提

高,对人工影响天气作业的每一个环节至关重要。目前在云粒子相态、云中上升气流等重要物理量方面的探测能力有限,极大限制了人工影响天气科技水平的提高。随着这些关键技术的提升和广泛应用,人工影响天气将进入一个新的发展时期。

现代人工影响天气技术于20世纪40年代末提出,经过70年的发展,在一些方面取得了重要进展和认识,但在原理上未取得突破性进展。由于自然界中也存在云凝结核和冰核,因对微观物理过程观测条件和能力的限制,在云中人工增加云凝结核或冰核的条件、时机等方面很难把握,目前的大部分作业,只能依靠对云宏观过程的观测数据,从而造成人工影响天气作业或多或少存在盲目性。另外,目前的大部分科学试验结果表明:人工影响天气可增加地面降水5%~25%左右。但自然降水变率可达到30%以上,从而造成效果检验非常困难。因此,发展和试验更为直接高效的人工影响天气新技术非常必要。从现在开展的激光等技术的室内实验结果可以看到,一旦这些技术达到外场应用的能力,地面降水的增加量将大幅度提高。

尽管目前人工影响天气效果检验非常困难,今后开展大量具有针对性和科学设计的人工影响天气科学试验研究,对于提高自然云降水形成和人工影响天气机理的科学认识及降低作业效果的不确定性仍然具有十分重要意义。2018年French等<sup>[38]</sup>介绍了美国怀俄明大学牵头开展的美国西部冬季地形云增雪的试验结果,研究结果表明:成冰剂播撒可引起冰晶的形成、增长和下落过程,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,对于今后我国开展人工影响天气的物理检验具有重要借鉴意义。特别是最近几年我国人工影响天气现代探测和作业技术和装备的发展,对于开展人工影响天气相关科学试验活动提供了良好的条件。

在国内大气科学发展状况及优先领域分析中<sup>[39]</sup>指出,不论重视基础研究还是应用研究,人工影响天气和大气物理领域应是优先资助领域。尽管我国在人工影响天气理论研究、外场试验和业务方面取得了重要进展<sup>[40]</sup>,但在某些方面仍存在较大的不确定性,如高炮作业中爆炸和催化剂的作用问题,2013年室内实验测试表明炮弹中碘化银的成核率比较高<sup>[41]</sup>,而实际作业中高炮的用量也比较大,爆炸和催化剂各自的作用和贡献需进一步深入探讨。另外,催化剂的核化机理也是非常重要的问题,由于实验条件限制,目前大部分催化剂核化实验侧重过

冷水滴的接触冻结核化过程研究<sup>[42]</sup>,凝华核化、凝结冻结核化、浸入冻结核化3种核化机制研究较少。涉及作业技术和作业条件监测方面,飞机优化作业方法以及先进雷达、卫星在人工影响天气业务中的深入应用也值得进一步研究<sup>[43-44]</sup>。

## 参考文献

- [1] 顾震潮. 论近年来云雾滴谱形成理论的研究. 气象学报, 1962, 32(2): 267-284.
- [2] 黄美元, 徐华英, 周玲. 中国人工防雹四十年. 气候与环境研究, 2000, 5(3): 318-327.
- [3] 黄美元, 沈志来, 洪延超. 半个世纪的云雾、降水和人工影响天气研究进展. 大气科学, 2003, 27(4): 536-551.
- [4] 姚展予. 中国气象科学研究院人工影响天气研究进展回顾. 应用气象学报, 2006, 17(6): 786-795.
- [5] Ma J Z, Guo X L, Zhao C S, et al. Recent progress in cloud physics research in China. *Adv Atmos Sci*, 2007, 24: 1121-1137.
- [6] 雷恒池, 洪延超, 赵震, 等. 近年来云降水物理和人工影响天气研究进展. 大气科学, 2008, 32(4): 967-974.
- [7] 段婧, 毛节泰. 气溶胶与云相互作用的研究进展. 地球科学进展, 2008, 23(3): 252-261.
- [8] Guo X L, Zheng G G. Advances in weather modification from 1997 to 2007 in China. *Adv Atmos Sci*, 2009, 26(2): 240-252.
- [9] 郑国光, 郭学良. 人工影响天气科学技术现状与发展趋势. 中国工程科学, 2012, 14(9): 20-27.
- [10] 方春刚, 郭学良, 王广河. 我国人工影响天气探测装备技术. 气象知识, 2012(2): 16-17.
- [11] 郭学良, 付丹红, 胡朝霞. 云降水物理与人工影响天气研究进展(2008—2012年). 大气科学, 2013, 37(2): 351-363.
- [12] Guo X L, Fu D H, Li X Y, et al. Advances in cloud physics and weather modification in China. *Adv Atmos Sci*, 2015, 32(2): 230-249.
- [13] 毛节泰, 郑国光. 对人工影响天气若干问题的探讨. 应用气象学报, 2006, 17(5): 643-646.
- [14] Zhu S C, Guo X L, Lu G X, et al. Ice crystal habits and growth processes in stratiform clouds with embedded convection examined through aircraft observations in Northern China. *J Atmos Sci*, 2015, 72: 2011-2032.
- [15] 朱士超, 郭学良. 华北积层混合云中冰晶形状、分布与增长过程的飞机探测研究. 气象学报, 2014, 72(2): 366-389.
- [16] 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, 9(2): 370-385.
- [17] 卢广献, 郭学良. 环北京春季大气气溶胶分布、来源及其与CCN转化关系的飞机探测. 科学通报, 2012, 57(15): 1334-1344.
- [18] 楼小凤, 史月琴, 孙晶, 等. 中国人工影响天气准隐式云分辨模式的研制和应用. 科学通报, 2012, 57(7): 580.
- [19] 郭丽君, 郭学良. 利用地基多通道微波辐射计遥感反演华北持续性大雾天气温、湿度廓线的检验研究. 气象学报, 2015, 73(2): 368-381.
- [20] 郭丽君, 郭学良, 方春刚, 等. 华北一次持续性重度雾霾天气的

- 产生、演变与转化特征观测分析. 中国科学(D辑), 2015, 45(4): 427-443.
- [21] 郭丽君, 郭学良. 北京2009—2013年期间持续性大雾的类型、垂直结构及物理成因. 大气科学, 2016, 40(2): 296-310.
- [22] Luan T, Guo X, Guo L, et al. Quantifying the relationship among PM<sub>2.5</sub> concentration, visibility and planetary boundary layer height for long-lasting haze and fog-haze mixed events in Beijing city. *Atmos Chem Phys*, 2018, 18: 203-225.
- [23] Xu X, Guo X, Zhao T, et al. Are precipitation anomalies associated with aerosol variations over eastern China? *Atmos Chem Phys*, 2017, 17: 8011-8019.
- [24] 栾天, 郭学良, 张天航, 等. 不同降水强度对PM<sub>2.5</sub>的清除作用及影响因素. 应用气象学报, 2019, 30(3): 279-291.
- [25] 常祎, 郭学良. 青藏高原那曲地区夏季对流云结构及雨滴谱分布日变化特征. 科学通报, 2016, 61(15): 1706-1720.
- [26] Chang Y, Guo X L, Tang J, et al. Aircraft measurement campaign on summer cloud microphysical properties over the Tibetan Plateau. *Scientific Reports*, 2019, 9: 4912.
- [27] 唐洁, 郭学良, 常祎. 2014年夏季青藏高原云和降水微物理特征的数值模拟研究. 气象学报, 2018, 76(6): 1053-1068.
- [28] 唐洁, 郭学良, 常祎. 青藏高原那曲地区夏季一次对流云降水过程的云微物理及区域水分收支特征. 大气科学, 2018, 42(6): 1327-1343.
- [29] 汪会, 郭学良. 青藏高原那曲地区一次深对流云垂直结构的多源卫星和地基雷达观测对比分析. 气象学报, 2018, 76(6): 996-1013.
- [30] 中国气象科学研究院科研进展: 大气物理与人工影响天气. 中国气象科学研究院年报, 2017: 57-74.
- [31] 卢建平, 黄建平, 郭学良, 等. 探测大气温湿廓线的35通道微波辐射计设计原理与特点. 气象科技, 2014, 42(2): 193-197.
- [32] 刘丰. 北京奥运会开幕式火箭作业延迟降水时间浅析. 气象, 2008, 34(增刊I): 156-157.
- [33] 潘雯菁, 吴奕霄, 周嘉健, 等. 南京青奥会开幕式期间人工减雨作业对雨滴谱的影响分析. 气象科学, 2019, 39(2): 237-246.
- [34] 倪思聪, 魏鸣. 2014年8月南京青奥会开幕式人工减雨作业回波分析. 气象科学, 2018, 38(1): 104-112.
- [35] Vonnegut B, Maynard K, Sykes W G, et al. Technique for introducing low density space charge into the atmosphere. *J Geophys Res*, 1961, 66(3): 823-830.
- [36] 周志敏, 郭学良, 崔春光, 等. 强风暴电过程对霰粒子含量和谱分布影响的数值模拟研究. 气象学报, 2011, 69(9): 830-846.
- [37] Ju J J, Sun H Y, Hu X K, et al. Temporal evolution of condensation and precipitation induced by a 22-TW laser. *Optics Express*, 2018, 26(3): 2785.
- [38] French J R, Friedrich K, Tessendorf S A, et al. Precipitation formation from orographic cloud seeding. *PNAS*, 2018, 115(6): 1168-1173.
- [39] 许小峰, 胡欣, 王卫丹, 等. 国内大气科学发展状况及优先领域分析. 应用气象学报, 2006, 17(6): 657-664.
- [40] 张人禾. 开拓领域, 推动业务, 努力创新——纪念中国气象科学研究院成立50周年. 应用气象学报, 2006, 17(6): 647-648.
- [41] 党娟, 苏正军, 房文, 等. 三七炮弹的碘化银成核率检测. 应用气象学报, 2016, 27(2): 140-147.
- [42] 苏正军, 郑国光, 关立友, 等. 含AgI人工冰核粒子的电镜分析. 应用气象学报, 2008, 19(2): 137-144.
- [43] 樊志超, 周盛, 汪玲, 等. 湖南秋季积层混合云系飞机人工增雨作业方法. 应用气象学报, 2018, 29(2): 200-216.
- [44] 袁野, 曾光平. 利用双多普勒雷达分析对流云垂直运动结构试验. 应用气象学报, 2007, 18(3): 306-313.

## Progresses of Weather Modification Technologies and Applications in China from 2008 to 2018

Guo Xueliang<sup>1,2)</sup> Fang Chungang<sup>1)</sup> Lu Guangxian<sup>1)</sup> Lou Xiaofeng<sup>1)</sup>

Su Zhengjun<sup>1)</sup> Yu Ziping<sup>3)</sup> Li Peiren<sup>4)</sup> Yang Zehou<sup>5)</sup>

<sup>1)</sup> (Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081)

<sup>2)</sup> (Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029)

<sup>3)</sup> (Ordnance Science and Research Academy of China, Beijing 100821)

<sup>4)</sup> (Shanxi Weather Modification Office, Taiyuan 030032)

<sup>5)</sup> (Southwest Institute of Technical Physics, Chengdu 610041)

### Abstract

Important progresses of weather modification technologies and application are made from 2008 to 2018 in China due to the strong requirements from drought relief, hail suppression, bioenvironmental protection, and important activities support. Supported by both national and provincial projects, important field

experiments and achievements have been made in aspects of aerosols, cloud and fog structure and precipitation formation mechanism. The national weather modification operational model is established and utilized in real-time operation, and it can greatly improve the forecasting ability of properties and evolution of target clouds and plays an important role in designing operational plan. Some key observational instruments and seeding instrumentation relevant to weather modification such as airborne cloud particles measuring system, multi-channel microwave radiometer, X-band polarized Doppler radar, fog monitor, and advanced cloud-seeding rocket are developed and applied, and this achievement greatly improve the surveillance and identification of seeding condition and seeding ability. Advanced weather modification aircraft based on King-Air 350ER and M-60 are refitted and applied to weather modification activities through national and local projects of engineering construction, which largely improve the operational flight height, navigation time and seeding ability. The new weather modification technologies, such as ionization, femtosecond laser and acoustic wave etc. , are tested in laboratory experiment. Important progresses are made on the mechanism and numerical simulation of snow formation induced by femtosecond laser.

There are still many aspects, such as effectiveness evaluation, the theory and observation in identification of suitable conditions for weather modification operation, needing improvement. The research and application of new theories, technologies and methods relevant to weather modification should be further strengthened. The cloud is the target for weather modification operation, however, the knowledge and treatment of clouds and precipitation in atmospheric community is still semi-quantitative. The non-repeatability of natural clouds and precipitation processes and limitation of current weather modification technologies cause the difficulty of repeatable experiment of weather modification, and many uncertainties for effectiveness evaluation. The present weather prediction primarily depends on numerical models, and the incomplete quantitative treatments of cloud physical processes in these models restrict the accurate prediction of clouds and precipitation, and the application of model results is also challenging. It is critical to improve the observation ability of cloud structure and precipitation formation processes. The current remote sensing technologies in the phase detection of cloud particles and cloud dynamics are very limited and greatly impede the improvement of weather modification.

**Key words:** weather modification; technologies and applications; progresses