

人工影响天气科学技术现状及发展趋势

郑国光¹, 郭学良²

(1. 中国气象局, 北京 100081; 2. 中国气象科学研究院, 北京 100081)

[摘要] 对人工影响天气学科发展的历史、现状和发展趋势进行了概述。随着人类文明的发展和进步,对天气的敏感性和脆弱性呈现显著增加的趋势。自1946年现代人工影响天气开创以来,基于人类对水资源开发利用以及减轻由恶劣天气引起的自然灾害的强烈需求,促进了人工影响天气学科的快速发展。经过60多年的发展,随着人类对自然天气过程认识的不断提高,人工影响天气的科技水平有了明显的发展和提高。笔者介绍了人工影响天气科学技术的基本原理、应用范围、科学技术现状、存在的关键科学技术问题以及发展趋势。

[关键词] 人工影响天气; 国内外科技现状; 发展趋势

[中图分类号] S16 [文献标识码] A [文章编号] 1009-1742(2012)09-0020-08

1 前言

美国是现代人工影响天气的发源地。1946年美国最早的诺贝尔化学奖获得者 Langmuir 研究团队在试验中发现碘化银(AgI)和干冰(固态CO₂)可以成为冰晶,由此开创了现代人工影响天气的序幕(见图1~图3)。由于人工影响天气具有巨大潜在的经济、社会和军事用途,有关的科学试验和研究从来没有停止过。

目前世界上大约有40多个国家每年开展100多项与人工影响天气相关的研究试验与作业项目。人工影响天气活动范围很广,从人工增雨(雪)、防雹、消雾、防霜以及人工消减雷暴、雷电、龙卷风、台风等,到更大范围的气候变化,包括目前国际上为应对气候变化提出的“地球工程”。这些活动涉及水安全、粮食安全、生态环境安全,也涉及交通、应对气候变化、森林灭火、重大活动保障、军事等领域。

人工影响天气分为无意识人工影响天气和有意识人工影响天气。无意识人工影响天气是指人类活动,如工业活动、城市化发展、森林砍伐、植被破坏等

引起的地球辐射系统改变导致的天气、气候变化,已为大家所熟知。有意识人工影响天气就是通常所指的人工影响天气,是建立在科学认识的基础之上,有效利用自然天气过程,达到“趋利避害”的目的,这是与无意识人工影响天气之间的本质差别。

人工影响天气概念的提出,是基于人类为了生产和生活的需要,希望通过人为干预以防止或减轻由恶劣天气引起的自然灾害(如干旱、冰雹、雷电、暴雨等),进而在适当条件下,促使天气向有利于人类需要的方向发展。随着人类文明的发展和进步,对天气的敏感性和脆弱性呈现显著增加的趋势。人口数量的增长、城市化发展以及工业化水平的提高,使一个地区的人口居住数量、密度显著增加,对高科技产品的依赖性越来越强,已经渗透到人类生产、生活的每一个环节。异常天气可能会带来灾难性后果,由强降水引发的大风、洪水、泥石流、山体滑坡等自然灾害直接威胁人类的生存。1970年发生的波拉台风登陆孟加拉国带走了30万人生命,2005年,卡特琳娜台风让美国损失了1250亿美元。

[收稿日期] 2012-06-25; 修回日期 2012-07-20

[基金项目] 国家科技支撑重点项目(2006BAC12B00)

[作者简介] 郑国光(1959—),男,江苏涟水县人,研究员,主要研究方向为云物理与人工影响天气; E-mail: zgg@ema.gov.cn

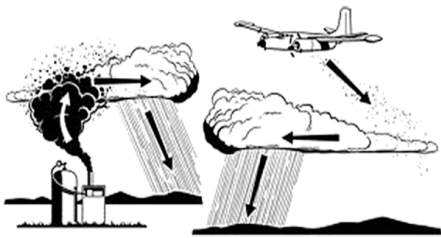


图1 人工增雨(雪)作业示意图

Fig. 1 Schematic diagram of rain (snow) augmentation



图2 飞机人工增雨作业

Fig. 2 Aircraft cloud seeding



图3 火箭人工增雪作业

Fig. 3 Rocket cloud seeding

2 人工影响天气的原理及关键科学问题

现代人工影响天气的科学原理是建立在云形成基本原理的基础之上,云和降水的形成需要三个基本条件:首先要有水汽,水汽是通过地表蒸发过程(内循环)和输送过程(外循环)产生的;有了水汽还不行,还必须要有上升气流,使水汽通过上升过程凝聚成液态(固态)水,但水汽成为水滴(冰晶)还需要凝结核(冰核),如果没有这个核,水汽很难成为水滴(冰晶)。因此,目前的人工影响天气就是通过影响云形成所需的凝结核(冰核),而不是改变水汽和上升气流。通过飞机、火箭、高炮和地面燃烧炉等手

段向云中播撒一定量的凝结核(冰核),实现降水增加的目的。因此,目前的人工影响天气是利用了云和降水形成过程中对云微物理的敏感性(见图4、图5)。

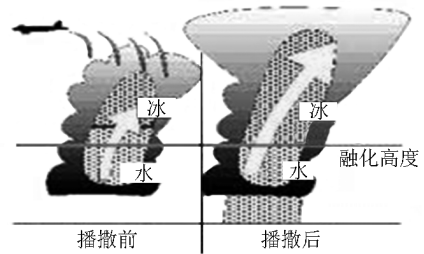


图4 作业前后云的变化

Fig. 4 The change of cloud before and after cloud seeding

注:图片来源于美国国家海洋和大气管理局(NOAA)台风研究中心

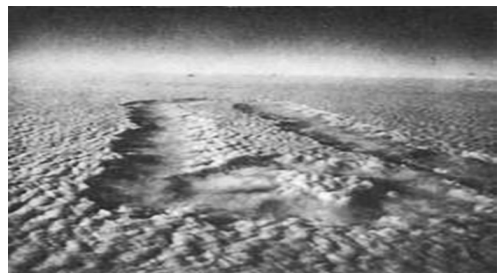


图5 美国1947年首次飞机播云试验结果:从上部看云的宏观特征出现显著改变

Fig. 5 The first aircraft cloud seeding result: the important change of cloud structure can be clearly seen

人工影响天气科学研究、试验与作业一直存在一些争论,其中的一个争论是纯科学问题,即如何把自然和人为影响的结果科学地区分出来。另外一些争论是对人工干预天气造成后果表示担心,即频繁的人工干预天气是否会引引起一个地区自然天气过程的反常,是否会造成一个地区降水增加,另一个地区降水减少,或引发新的天气灾害,是否会对环境有影响等等。

有关人工影响天气的效果评估问题是一个世界性难题,首先云降水过程的自然变率很大,自然界发生的每一次云降水过程没有完全相同的,就像很难找到完全相同的两个人一样(克隆人除外)。这对人工影响天气的试验造成非常大的困难,很难找到两个对比的对象。第二个方面是受到对自然云降水形成过程的科学认识限制。就一块云而言,受目前科技水平的限制,对其形成不是完全了解,现有的探测技术能力还不能达到对云降水形成的整个物理过

程进行有效跟踪和观测,因此,造成对云降水的定时、定点和定量预报困难。假如对降水的预报能力接近 100%,人工影响天气的效果自然就出来了。第三个方面是受到目前人工影响天气自身技术水平的限制。现代人工影响天气技术是基于播云理论,利用了云微物理对凝结核(冰核)的敏感性,这种技术本身是基于自然云形成的,并没有超越自然云形成的过程,由此决定了人工影响天气作业是有条件的,只有符合一定条件的云播撒才会起到效果。

目前国际上一般采用三种方式对人工影响天气的效果进行评估,即统计检验、物理检验和数值模拟检验。单纯的统计检验需要的样本数大,需要长期积累。美国科罗拉多州多年开展冬季增雪业务的评估效果是 10%~25%,平均为 15%。目前国际上一些大型人工影响天气科学试验中普遍采用的是随机性统计检验,这种检验的核心是随机性,是基于大量随机播撒作业后,对比影响和不影响的对地面雨量得到播撒效果,如早期的以色列及我国古田水库等地开展的科学试验。以色列试验结果得出平均增雨效果可达到 10%~15%以上,我国古田水库开展的增雨效果可达到 24%。随着雷达探测技术的发展,很多随机性检验采用了物理检验,通过对比影响和不影响的云的回波强度、体积、云顶高度等参数评估影响效果。在泰国、南非等国开展的暖云对流云物理检验增雨效果在 30%以上。俄罗斯对流云增雨效果在 15%~45%,投入产出比在 1:20 以上。

计算机技术的发展促使数值模拟天气技术发展迅速,数值模拟技术最大的优点是可重复性,随着数值模拟技术的不断完善,可成为人工影响天气效果检验的重要手段。目前数值模式已经应用于我国人工影响天气作业条件预报业务。

世界气象组织(WMO)指出:应把人工影响天气作为水资源综合管理战略的一部分,并建议在各国建立开展云、雾和降水气候学分析,加强新观测工具和数值模拟技术的应用,开展跨国外场试验和独立专家评估等,以便向人工影响天气、水资源研究和业务提供有力的依据(见图 6)。因此,新技术的应用将是国际人工影响天气发展的趋势,具有重大的潜在价值。

WMO 在《关于人工影响天气现状的声明》中,对混合相态地形云、层状云、积状云的局部人工增雨(雪)等催化技术给予了基本肯定。美国、俄罗斯、以色列等国还把人工增雨成套技术向发展中国家

(如叙利亚、摩洛哥、泰国等)输出,并成立一些专门的人工影响天气商业公司,承接人工增雨计划和大坝工程设计咨询等项目,按照市场规律运作,按客户的要求有偿提供播云服务。

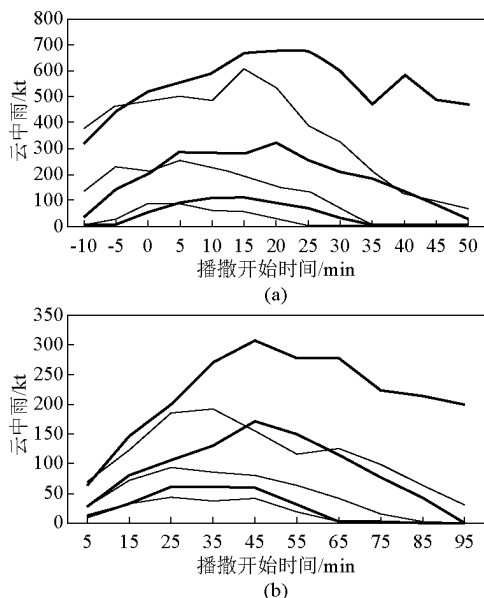


图 6 雷达观测的云中雨的质量变化

Fig. 6 Radar observed rain mass change after seeding

注:(a)墨西哥暖云人工增雨随机播撒试验(1996—1999年),进行了 99 个风暴试验,其中 47 个做了播撒,52 个没有播撒。(b)南非暖云人工增雨随机播撒试验(1991—1996 年),选择了 127 个风暴,其中播撒了 62 个,65 个没有播撒。粗实线表示针对不同强度云播撒后云中雨滴质量的时间变化,细实线表示对应的不同强度未播撒云的情况,两个国家的试验表明,云中雨滴质量呈显著增加的趋势

美国国家大气海洋局 2008 年的统计显示,美中西部的 9 个州有 63 个人工影响天气项目,而 10 年前为 48 个,增加了 15 个,主要集中在美国西部冬季人工增雪方面,增加的雪第二年融化后可用于农业、生态和饮用水。美国国家大气海洋局 1979—1993 年主持研究了长达 15 年的“大气影响计划”,试验区域包括美国的 7 个州、泰国和摩洛哥。2002—2006 年,在 6 个西部州开展了“天气灾害改变计划”,主要是针对美国西部严重干旱,开展大气云水资源的开发利用研究。最近美国怀俄明大学牵头主持了约 6 000 多万人民币的冬季人工增雪研究计划(2006—2011 年)。另外,美国国家大气科学研究中心(NCAR)和拥有 40 架飞机、80 名员工的人工影响天气公司及部分大学近几年承担了南非、墨西哥、泰国、澳大利亚等国的人工增雨(雪)作业和试验计划。

澳大利亚于 2004—2010 年进行了为期 6 年的冬季播云增雪研究计划。2006—2011 年,澳大利亚

昆士兰政府投入约 5 000 多万人民币进行“暖云”播撒研究,该研究计划是澳大利亚气象局和美国 NCAR 合作进行,目的是缓解澳东南区域的持续性干旱。

印度在 2003 年和 2004 年在美国 WMI 的协助下,在 Maharashtra 州开展播云作业。2008 年在 Andhra Pradesh 的 12 个地区开展播云试验,以缓解严重干旱。

另外,俄罗斯、法国、以色列、泰国、阿联酋等国最近几年也开展了多项新的人工影响天气作业试验。

3 我国人工影响天气现状

云雾物理与人工影响天气是我国发展最早的学科领域。1956 年 1 月毛泽东主席提出“人工造雨是非常重要的,希望气象工作者多努力”,在《气象科学研究 12 年远景规划》中提出了云与降水物理过程和人工控制水分状态的试验研究。在全国向“科学进军”的号召下,我国科学家提出“人工控制天气”,为解决人才缺乏问题,1957 年选派留学生赴苏学习云物理和人工控制天气理论和技术。在条件极端艰苦的情况下,涂长望、赵九章等组织和开展了云雾物理研究及人工影响天气工作,建立了庐山云雾试验站与天气控制研究所。从 20 世纪 50 年代开展云雾物理特征与人工影响天气研究以来,针对我国干旱、冰雹灾害的需求,创建了我国现代人工增雨与防雹技术,并取得了丰硕的成果。1958 年,我国在吉林省首次使用飞机进行人工增雨试验,此后人工影响天气技术得到快速发展。

20 世纪末期至 21 世纪以来,随着我国综合国力的显著提高,云雾物理与人工影响天气学科有了质的飞跃和发展,先进大气物理探测技术、数值模式的应用与经济社会发展面临的新需求,使人工影响天气学的发展呈现出多学科交叉与结合发展的特点。人工影响天气是以大气物理学为基础建立和发展起来的。在过去的 50 年中,我国的云物理学研究在云的宏观、微观特征的研究,以及发展和应用一些新的技术手段对云的基本特性进行空基和地基的直接和间接观测等方面取得了显著进展。

我国建成投入运行的 156 部新一代天气雷达网、334 部局地天气监测和作业指挥雷达,覆盖了大部分作业站点。人工影响作业监测和科学指挥能力显著增强,极大地减少了作业的盲目性(见图 7)。

目前我国人工影响天气工作基本形成了依托天

气、气候预报预测掌握降水天气过程,以地面常规观测网、卫星、雷达和云物理特种观测技术装备观测云和降水的发展演变过程,利用云数值模式、雷达及卫星反演产品对作业条件、潜力区进行识别预测,以雷达实时指挥作业,以飞机播撒 AgI、制冷剂(液氮、干冰)对层状云和积层混合云进行催化,以高炮和火箭等运载工具播撒 AgI 催化对流云,以物理检验和统计检验方法评估作业效果的人工影响业务流程。



图7 新一代人工影响天气移动偏振雷达指挥系统
Fig.7 The new polarized movable radar system used in weather modification operation

我国自主研发的达到国际先进水平的 AgI 复合焰剂、不同高度的新型增雨防雹火箭和机载播撒设备已广泛投入业务使用;发展了具有国际先进水平的多维云数值模式,并投入业务应用;建立了作业指挥业务系统和不同温度催化剂的使用指标,部分地区采用了有一定科学依据的物理和统计方法检验增雨效果(见图 8)。国家和省级人工影响业务单位共同加强作业效果评估方法研究和业务应用工作,吉林、青海、河南、山西、安徽等地建立了作业效果检验评估示范区,初步规范了作业效果评估工作。

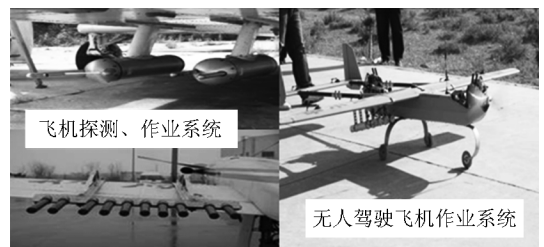


图8 我国人工增雨飞机(有人与无人驾驶)
探测与作业系统

Fig.8 Observational and cloud seeding system of aircraft (unmanned and manned) in rain enhancement operation in China

庆典等重大社会活动等方面发挥了重要作用。

4 人工影响天气发展趋势

科技进步是推动人工影响天气发展的源动力。随着现代科技的迅猛发展,人类对自然天气过程的认识和影响能力将显著提高,这是发展的大趋势。频发的自然天气灾害和不断加剧的淡水和粮食资源短缺促使各国寻求新的技术途径化解危机。

现代人工影响天气的测量和观测技术具有良好的发展趋势,将充分利用当今先进的地球环境监测和观测技术。将从最初的单一波长的雷达、飞机探测技术发展到现在集装载先进探测系统的飞机、大气廓线探测、卫星、多普勒雷达、偏振雷达、毫米波雷达、微波辐射计、GPS 系统、地面中尺度监测网络为一体、综合先进探测和观测的技术。由于人工影响天气业务的复杂性和特殊性决定了应用于人工影响天气的飞机本身需具有良好的性能,在续航能力、飞行高度、抗不良天气等方面有更高的要求。

飞机上装载的先进探测系统有利于了解云中水物质的类型、数量和演变过程,可以观测播撒前后所发生的云中水物质的演变情况。目前广泛采用的机载粒子测量系统(PMS)是基于激光拍摄粒子图像和对粒子计数的粒子谱测量系统。由多个探头组成,分别装在飞机的不同部位,经过多年的发展,可以覆盖很大范围的粒子尺度(0.1 μm 到几毫米),包括气溶胶和云粒子。在人工影响中另一个需要测量的重要参数是液态水含量(LWC),目前广泛使用的仪器是 King 热线含水量仪,其原理是由云滴撞击暴露在飞机外气流中的一个加热传感器元件产生冷却效应的大小决定,其局限性是对大于 50 μm 的大滴的测量误差较大。改进和研发过冷水探测技术将是人工影响科技发展的重要趋势之一。

目前我国多普勒雷达网已初步建立,在降水观测、强天气监测与预警方面将发挥重要的作用。如何从多普勒雷达观测信息中获取人工影响天气作业所需的相关信息,支撑人工影响业务工作,是今后人工影响面临的紧迫任务之一。目前美国 NCAR、NOAA、NASA(美国国家航空航天局)的探测飞机上装备了高精度、高分辨率的机载多普勒雷达,这将在以后的人工影响天气领域具有重要的潜在应用价值,也是我国飞机探测方面的重要发展趋势。偏振雷达的最大作用是可分辨云中水成物的种类,获得更精确的降水测量。这些能力使其在云播撒试验评估中

我国在人工增雨雪、防雹、消雾、消云等作业监测、条件识别、作业机理、技术方法、效果评估和装备研发等方面,取得了一批理论和技术成果并应用于业务。“十五”国家科技攻关计划重点项目《人工增雨技术研究及示范》获得国家科技进步二等奖。“十一五”科技支撑计划重点项目《人工增雨关键技术研究及装备研发》已取得多项成果。在近期中国气象局制订印发的《应用气象研究计划(2009—2014年)》中,重点加强对不同云体的人工增雨条件、催化方法和效果评估等关键科技问题进行科学研究。与此同时,国际交流合作日趋活跃,开展了多项双边试验研究、技术交流和人员培训。2005年我国人工影响天气荣获 WMO 人工影响天气 UAE 奖。

我国基本形成了国家—省—地—县 4 级业务体制。国家级业务主要牵头负责科技研发与业务指导;省级业务主要包括作业(飞机增雨)组织、技术指导和技术开发;地市级业务主要为业务指导,指挥高炮、火箭作业;县级业务主要包括组织实施高炮、火箭作业、装备管护和信息收集上报。

1994 年国务院批准建立了以中国气象局为牵头单位的“人工影响天气协调会议制度”,对组织、协调和指导全国人工影响工作发挥了重要作用。目前,地方基本建立了以各级政府领导,同级气象主管机构管理、实施和指导的人工影响管理体系。《人工影响天气管理条例》、地方法规、部门规范性文件和行业标准等法规体系不断完善,建立健全了安全责任制,作业人员培训和作业装备管理日趋规范。

中国气象局和国家发展和改革委员会已于 2008 年 11 月联合制订印发了全国《人工影响天气发展规划(2008—2012 年)》,并将人工增雨防雹工程纳入《全国新增 1 000 亿斤粮食生产能力建设规划(2009—2020 年)》中,人工影响工作的发展将进一步科学规范。

我国人工影响天气学科经过 50 多年的发展,已逐步成为我国气象防灾减灾的重要科技手段之一。目前我国有 30 个省(区、市)开展飞机、高炮、火箭增雨防雹作业,从业人员达到 4.6 万人。人工增雨作业区面积达 360 万 km^2 ,防雹保护面积达 45 万 km^2 。中央和地方财政加大人工影响经费投入,中央财政自 2009 年起设立了专项资金支持人工影响作业。人工影响工作在农业抗旱减灾、水资源安全保障、生态环境建设和保护、森林草原防火扑火以及保障 2008 年北京奥运会、新中国成立 60 周年

具有极大的潜在价值。在成冰剂播云试验中,可以利用偏振雷达监测云中过冷水滴如何转变为冰晶,在吸湿性物质播撒试验中,可以监测云中大滴的发展过程。还可以采用偏振雷达跟踪具有反射微波的金属箔片示踪物质,了解云中播撒物质的运动、扩散过程。目前偏振雷达仅用于研究领域,在一些国家的人工影响试验中采用了偏振雷达。美国的 S 波段天气监测雷达网(WSR-88D 或 NEXRAD)在未来几年内将升级为具有偏振测量能力的雷达网系统。我国最近几年在一些试验研究中也采用了偏振雷达系统。在不断完善的的基础上,偏振雷达系统将在我国未来的人工影响业务中发挥重要作用。毫米波雷达具有波长短(3 mm 或 8 mm)、灵敏度和分辨率高(小于 50 m)的特点。由于不需要大的天线和强大功率的发射机就可以实现对弱信号目标的探测,获取良好、详细的信息,且其重量轻,因此可以方便地装载在地面移动、飞机、卫星等观测平台上,目前在外国已经投入业务使用,在我国也得到初步发展和应用。其主要缺点是易被液态水衰减,探测范围有限。

由于卫星监测可以提供较大范围的云和降水状况,如水汽场、气溶胶粒子数及其谱分布、滴谱特征、云顶温度等,在人工影响天气领域具有重要的应用价值,如可见光、红外监测卫星、装载降水雷达、微波成像仪、可见光、红外辐射计的热带测雨卫星(TRMM)、装载毫米雷达的测云卫星 CloudSat 及其他卫星系统的应用,提供了丰富的人工影响天气所需的云信息。卫星观测已经在无意识人工影响天气的研究中发挥了重要的作用,卫星信息可用于反演云降水结构、演变特征等各个方面。大力发展卫星信息在有意识人工影响天气业务中的应用无疑是今后发展的必然趋势。

随着电子技术的发展,高灵敏度的风廓线仪已经投入实际应用,可以实现对对流层风廓线的连续测量,其与声雷达的配合可以实现温度廓线探测。地基 GPS 接收器可以进行垂直水汽总量探测,也可以采用激光雷达实现对水汽廓线的测量。在人工影响天气中,垂直水汽的分布特征是一个重要参数,如何有效利用这些新型大气廓线测量系统测量的大气风廓线、温度廓线、湿度廓线等进行人工影响天气业务指导也是很重要的发展趋势。

数值模式将成为提高人工影响天气能力和发展的重要组成部分。目前的计算机资源已经能够提供

具有短期预报价值的云实际模拟能力,把具有详细云物理过程、具备资料同化功能的数值模式应用于人工影响天气的实际业务中已经成为可能。特别是与人工影响天气有关的各种微物理过程,在不断检验的基础上采纳和引入,可以降低人工影响天气工作的很多不确定性,提升业务能力和科技水平。

数值模式在三个方面可以应用于人工影响天气作业,即有关的方案设计、论证,作业过程的指导,作业后的分析。这样有利于建立优化播云方案、凝练和建立物理假设。数值模式能够在相同的云况条件下比较播撒与无播撒的异同,明确播云效果,也可以模拟播撒物质的扩散路径,提供外场试验和作业所需的实时预报,提供不同播撒方式产生的潜在效应。

数值模式和资料同化可以降低传统统计检验的不确定性。采用复杂的数值模式,可以显示处理不确定性因素,并能进行作业和控制试验的时空对比。目前我国在数值模式研究方面发展迅速,已经初步具备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,但还没有完全实时应用到外场作业试验中,要达到这个目标,需要解决模式运行速度(如采用较低的分辨率、较简单的物理过程),同时需要采用快速云物理参数的资料同化和初始化技术。模式技术总是具有一定的不确定性,人工影响天气模式和其他数值模式一样,需要对一些因初始条件、边界条件、模式本身和人工影响过程所具有的不确定性量化,提升模式的应用能力。

实验室研究在人工影响天气的研究中具有不可缺少的作用,实验室研究最大的特点是具有可控实验环境条件和观测条件,试验可以重复进行。实验室研究在人工影响天气领域具有重要的作用,可以研究云粒子的形成过程、播撒剂的成核率检测等,为人工影响提供了扎实的科学基础。但实验室研究也具有局限性,只有实验室研究与理论、数值模式研究及观测研究有机结合在一起,才能实现人工影响天气业务科学水平的真正提高。

GPS 的大量采用可以实现播云作业中作业目标位置的精确显示及作业飞机的精确定位,这有利于掌控和评估播云作业。如美国 NCAR 开发的 TITAN 软件包,可以实现跟踪风暴单体的运动和发展,除了可以对实时作业提供指导,还可以进行作业效果的后期评估。有效利用这种软件系统,精确的 GPS 定位起关键作用。目前 GPS 探空仪已经能够提供很高分辨率的风、温、湿垂直廓线资料,在人工影响天

气业务中将发挥重要的作用。在我国的人工影响天气业务中, GPS 系统基本用于飞机航线定位, 还没有很好地利用 GPS 探空系统, 基于 GPS 的作业目标跟踪软件系统相当薄弱, 这也是今后重点发展的方向。

播撒技术的发展趋势就是要建立具有扎实科学基础的优化播撒技术。发展优化的人工影响天气播撒技术无疑对提高人工影响天气的科技水平具有极其重要的作用, 是决定播撒作业效果的关键因素。实现“适当时间、适当位置、适当剂量”的优化播撒技术, 必须对作业目标有深入、全面的了解, 采用高效播撒物质和可靠、先进的播撒设备。这里主要重点介绍成冰剂与吸湿剂播撒相关技术的发展趋势。

成冰剂播撒主要是针对冷云的播云技术, 采用合适的成冰物质(如 AgI), 或致冷物质(如固(液) CO₂, 液氮、液体丙烷等), 启动或提高冰晶的形成过程, 成冰物质具有与冰晶相似的晶格结构, 可以促使云中过冷水快速冰晶化。不论采用静力催化还是动力催化方法, 播撒剂量的选择在实际业务中是一个难点, 因为目前还没有有效的方法快速确定云中自然冰晶的数量、过冷水的位置、大小等重要参数。这些参数对复杂的云系而言, 往往是一个动态变化的三维参数。今后先进探测技术、实验室技术和数值模拟技术的有效应用可以显著减小这些参数的不确定性。为利于实际播撒和提高成冰率, AgI 往往与其他物质混合, 制成各种混合性播撒剂, 其实验室和外场试验检测、验证工作是今后播撒技术需要加强、发展的一个重要方面。成冰剂的物理化学特性对冰晶的形成速率和效率起着重要的作用, 发展新型高效成冰播撒剂配方仍然是今后人工影响发展的趋势之一。另外, 过去有关成冰剂播云试验的研究发现, 往往对一连串物理事件和因果关系缺乏完整的观测资料, 对一些物理过程理解不完整, 今后需要重点开展相关观测试验、模拟研究和试验统计评估, 建立合乎逻辑的物理过程链, 加强对一些不确定性问题的解决。

吸湿剂催化技术主要针对暖云区的催化技术, 通过使用具有吸湿特性、适当尺度的物质(如盐粒等), 增加云中凝结核(CCN)或促进暖云和混合相云碰并降水形成过程。目前有关吸湿剂催化试验分为两种, 一种是大吸湿性粒子催化试验, 采用的盐粒子直径大于 10 μm, 不通过凝结增长过程, 直接产生启动碰并过程的较大尺度云滴。另一种是由吸湿性烟剂产生的很小云凝结核(平均干直径为 0.5 ~

1 μm), 并且有一相当宽向更大直径延伸的粒子谱, 与自然凝结核相比, 人工凝结核由于其尺度和化学特性, 在争夺水汽形成云滴、扩展云滴谱和启动凝结增长方面具有较大的优势, 可以提高降水形成的效率。

在过去几年中, 尽管国际上吸湿性播云试验取得了较好的统计结果, 但有关其物理过程的一些基本问题需要得到解决, 以提供更坚实的科学基础。其中的一个基本问题是播撒物质的扩散、传输问题。第二个问题是催化粒子的尺度大小问题。另外, 播云的动力效应、物理与动力过程相互作用、播撒的影响区域等一系列问题都需要进一步研究。

播云优化技术的建立是决定播云效果的关键, 对一些关键不确定性科学问题的深入探讨和理解有利于从根本上提高人工影响业务的科技水平。如何识别可播性云, 确定播撒剂量、时间、位置, 播撒后的响应时间、播撒的覆盖面和影响体积、播撒物质的跟踪、扩散、传输等, 这些关键问题的解决需要利用现代观测和数值模拟技术, 这是今后人工影响科研和业务面临的紧迫任务, 也是人工影响科技发展的趋势。

5 结语

尽管我国的人工影响天气学科取得了很大发展, 但当前我国人工影响天气的科技水平和服务能力与经济社会发展需求不相适应的矛盾仍然十分突出, 为解决这些问题, 提出如下建议。

1) 提高人工影响天气关键技术的创新发展能力, 重视和加强高层次学科领军人才队伍建设。人工影响天气是一门高科技系统工程类学科, 学科的发展取决于创新技术和人才队伍建设, 目前我国人工天气领域创新能力不足, 领军人才缺乏, 需要大力加强。

2) 重视基础研究和基础设施建设。我国总体人工影响天气的科技支撑能力仍显薄弱。人工影响天气基础性研究亟待加强, 催化作业和效果检验的科技水平有待提高。我国性能优良的飞机探测平台和先进的探测装备不足, 尚缺乏满足大范围、高强度的专用探测飞机, 现有的气象监测站网和手段还不能适应人工影响天气的要求。

3) 建议开展以科学试验为目的的中长期人工影响天气研究计划, 建立针对我国不同云系、不同作业目的的量化指标与评价方法。

4) 针对人工影响天气的作业对象和目的, 开展

相关先进观测技术研究,特别是先进偏振雷达、微波及激光探测技术等的应用与改进研究。

5) 建立先进的云雾物理室内试验技术,开展自

然云形成和人工影响的定量化模拟试验。

6) 积极探索人工影响天气技术新途径,推进学科创新性发展。

Status and development of sciences and technology for weather modification

Zheng Guoguang¹, Guo Xueliang²

(1. China Meteorological Administration, Beijing 100081, China; 2. Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081, China)

[**Abstract**] The brief introduction of history, status and development of weather modification is presented here. With development and progress of human civilization, the sensitivity and vulnerability to weather show an increasing trend. Since the creation of modern weather modification in 1946, the strong demands for water resource and relief of natural disaster induced by severe weather have promoted the rapid development of weather modification. The obvious advancement and development of science and technology of weather modification have been achieved in the past 60 years due to the increased understanding of natural weather process. The basic principle, application, status and key issues of science and technology, and development trend of weather modification are introduced and discussed in this paper.

[**Key words**] weather modification; status of science and technology; development trend