

人工增雨的需求、现状和某些科学技术问题

Demands, Status and Scientific and Technical Problems on Rain Enhancement

刘奇俊¹ 楼小凤²

(中国气象科学研究院, 博士¹; 博士生² 北京 100081)

一、经济和社会的发展, 对人工增雨的需求迫切

中国是全球的贫水国家之一,虽然水资源总量为 28 124 亿 m^3 ,居世界第 6 位,但人均占有量只有 2 300 m^3 ,仅为世界人均水量的 1/4。预计到 21 世纪中叶,中国人均水量将下降到 1 750 m^3 。全国天然降水的时空分布严重不均,河川径流的年际年内变化很大,年降水量不足 400mm 的地区占国土面积的 45%。统计资料表明,自 1949 年以来,全国平均每年受旱面积大约 3 亿亩。全国 670 个城市中,有 400 个不同程度地缺水,严重缺水的达 108 个。进入 20 世纪 90 年代,黄河春季年年断流,造成流域内农业灌溉和城市用水困难。目前全国相当一部分地区地下水开采过量,人口增长、经济发展与水资源短缺的矛盾日益加剧,生态环境进一步恶化,水资源短缺已严重影响着中国部分地区经济和社会的持续健康发展,有可能成为 21 世纪比能源短缺更为严重的重大难题。由于大气降水是一切水资源的根本来源,在合理利用现有水资源的同时,通过人工影响天气以增加空中降水已成为十分迫切的工作。特别是西部地区,地处干旱、半干旱气候带,且大部分地区地形复杂、土地贫瘠、自然降水量少,随着全球气候变暖、蒸发量增加,降水将更趋减少、干旱可能更频繁发生,所以在西部地区进行人工增雨更是当务之急。

人工增雨技术是在云中播撒一定的催化剂,促使大雨滴或冰晶的生成,使更多的云水转化为雨水,或者在一定范围内促进大气的上升运动,使云体增大以得到更多降水。现代人工增雨开始于 1946 年,以后一直受到一些国家政府和公众的重视,其科学基础已被大量室内实验、数值模拟和外场试验所证实。目前全世界已有 20 多个国家开展了这项工作。在美、俄、以色列、乌克兰和中国的一些地区通过长期深入的科学试验研究,初步掌握了结合当

地云雨特点的人工增雨技术,并证实了这类技术的增雨效果。以色列曾先后在 1961~1967 和 1969~1975 期间开展了两期人工增雨试验,分别得到了 15%和 13%的增雨结果,并于 1975 年开始了正式人工增雨作业计划。据以色列 1976~1991 年的作业检验结果,获得相对增雨 6%,取得了良好的经济效益,投入产出比在 1~10 以上。这些作业大都在云雨条件好的季节开展,同时配以水库渠道等水利设施的调蓄作用,取得了较好的大气水资源利用成果。

中国的人工增雨试验和作业始自 1958 年,规模逐年扩大,到 1997 年,绝大部分省,共计 1 167 个县开展了人工增雨作业,并有 18 个省开展了飞机人工增雨作业。同时全国也开展了多项人工增雨长期试验。福建古田水库地区在 1975~1986 期间连续 12 年开展了随机催化人工增雨试验,使该地区增雨 24%;新疆白杨河的地形云催化作业,1984~1995 作业期间的年径流量增加 11.6%;在黄河上游河曲地区的人工增雨试验,使年降水增加 20 亿立方米并有 4.7 亿流入龙羊峡水库。在上述试验与作业期间,在人工增雨催化剂配方、增雨条件的实时监测识别技术和催化方法优选决策技术方面也取得了一定进展。目前正筹划开展国家级人工增雨试验示范,计划在西北地区正式建立人工增雨基地,以提高人工增雨作业水平和效果检验技术,并力求今后在国内逐步推广。

二、人工增雨技术的现状

1. 国际状况 根据世界气象组织(WMO)最近发布的“关于人工影响天气现状的声明”中的信息来看,近年来国外在人工增雨科学技术领域已获得显著进展,主要表现在以下方面。

(1) 云和降水的监测手段显著改善 装备云微物理和空气运动观测仪器的飞机、雷达(包括具有多波长、多普勒和偏振能力)、卫星、微波辐射计、风廓线仪、自动雨量站网以及中尺度观测网等,已在

人工增雨中获得日益广泛的开发和应用。可以处理大量数据的计算机和通讯网络系统已普遍应用于人工增雨的设计、作业实施和效果评价。化学和金属箔示踪技术为确定流入和流出云的气流以及作为播云催化剂的冰核或吸湿性核是否已有效核化提供了新的途径。在人工增雨的云和降水学基础研究中,这些新的监测手段和技术的作用日益明显。

(2) 云和降水数值模式已广泛应用 中尺度和可分辨云尺度的数值模拟技术,已在云降水物理过程、催化机理和方法、作业方案设计、效果预测和检验的研究和应用中发挥了重要作用。

(3) 基础研究工作不断深入 利用室内实验、外场观测和数值模拟技术,对撒播成冰剂和吸湿性核分别影响冰相和暖雨过程,以及对增加降水的物理原理、过程和技术的研究正不断深入。

2. 国内状况 自 80 年代以来,我国的人工增雨科学技术研究和业务应用亦有显著进步,主要表现在以下方面。

(1) 探测技术的提高 利用引进的云、降水粒子测量系统和自行研制的探测设备和技术,开展了有关人工增雨云水资源、作业条件选择及其自然背景等方面的外场考察和试验研究,研制了人工增雨实时监测技术,大大扩展了探测范围、提高了探测质量和时空分辨,并为人工增雨提供了更加丰富的资料。

(2) 催化技术的改善 研制了高效碘化银焰剂,显著提高了成冰阈温和成核率;研制了多种类型的焰剂式火箭、焰弹,及用于飞机和地面的发生器等。这些新的催化剂和催化工具为提高人工增雨的作业水平和成效提供了基础。

(3) 云和降水的数值模式已启用 一些中尺度云模式已开始实际应用于人工增雨方案设计、催化机理研究和效果检验,起到了避免盲目性,增加科学性的作用。

(4) 作业指挥系统的建立 各省初步建立了包括信息监测、实时传输、数据处理和分析判断的人工增雨作业指挥系统,为提高作业的科学性创造了条件。

三、人工增雨尚有待解决的 科学问题和技术关键

近年来,大气科学的整体水平已有长足进展,且综合利用了多参数气象雷达、云物理探测飞机、气象卫星、地基遥感技术,还引入了中小尺度气象监测网、高效的播云催化剂和播撒工具、多尺度的数值预报模式和云物理模式,使已有的人工增雨理论和技术得到验证成为可能,也有利于今后进一步取得突破性发展。但要把这个可能性变为现实,还

有以下几个科学技术问题需要深入研究解决。

1. 尚面临的一些基本科学问题

(1) 验证、完善和发展播云催化假说 目前为止,人工增雨的原理探讨有静力催化和动力催化两个方向。静力催化的理论认为,冷云降水是由冰晶过程开始的,并通过“冰—水”转化的“贝吉隆”过程及随后的淞附或碰并过程完成。有些云的降水效率不高或根本无降水,是因为自然云中缺乏足够的冰晶,通过播撒干冰或碘化银的人工引晶技术可弥补冷云中自然冰晶不足,促使降水过程得以有效发动和进行,进而达到增雨目的。动力催化理论则假设,若在孤立积云的过冷却部位大量播撒冷云催化剂,可使过冷云水迅速冰晶化,释放冻结潜热,使云的浮力增大,并随空气加速上升,云体增高变大,使云的生命期更持久,从而可预期更多的降雨。此外,对积云群体实施过量播撒,还可促使云体合并,有可能大大增加区域降雨量。此外,该理论还认为,动力催化降雨的同时,也将增强降水引起的冷湿气流下沉,从而激发出新的对流单体,进而延长云降水系统的生命期,增加总降水量。

国外一些建立在静力和动力催化概念上的随机播云试验表明,在一定条件下的播云作业,云系或云体在宏观上均未产生催化假说所期望的变化,甚至还可导致减雨。这一方面说明,云降水系统有较大的地域差异,建立在相同播云原理下的催化作业技术并不能完全移植到其它地区。例如,以色列的人工增雨试验表明,沙尘对增雨效果有明显影响。这表明发展具有地域特点的人工增雨播云假说,对特定地区的人工增雨技术有重要的理论价值。另一方面也说明,云的结构和演变十分复杂,对催化时机、部位和剂量也十分敏感,催化引起的各种微物理变化和动力效应有时是互相抵触的,并不总能达到增雨目的。这表明,已有的播云催化假说还需进一步试验验证,予以完善,同时也需加强对基本的云动力和微物理过程的监测和模拟研究。

已有观测表明,经济发展和人类活动造成的排放导致了某些地区大气中云凝结核和冰核浓度的增加,这是人类对云层的一种无意识的影响和催化,其对人工增雨的原理和技术将产生何种影响,尚有待研究。

(2) 播云催化后是增雨还是减雨 数值模拟试验和成功的播云试验表明,人工引晶催化后在增雨中心的下风方或外围地区出现减雨区,故催化作业后的降水变化再分配规律还不十分清楚。为此,需研究多尺度大气水循环的相互作用,并研究人工催化云体后云微物理变化、局地热力、动力和水循环变化规律及其与控制局地水循环的中小尺度云降水过程的关系。也需将人工增雨机理研究同中尺度云降水过程研究结合起来。

(3) 何种云或云系适合人工增雨 目前通过对云的监测和数值试验表明,不同的云降水过程的冰晶和过冷水含量、云中上升运动以及播云条件等差异很大,催化结果也有很大不同。数值模拟还表明,即使对有些满足催化条件假说的云、云系实施催化,仍然达不到增雨的目的。这一方面显示目前对云降水系统的宏微观结构和演变过程,中尺度环境大气与云系—云体的多尺度相互作用、动力过程和微物理过程的相互作用等云降水的基本物理过程的认识尚不足,模式还存在一定的缺陷;另一方面提示我们需充分借鉴天气尺度、中小尺度、卫星遥感、雷达气象、地基遥感和飞机监测的最新进展,结合有详细云降水过程和催化过程的多尺度数值模式,加强对播云原理进行验证和试验,在验证和完善已有的播云条件假设的基础上,发展新的播云催化原理和技术。

中国西部水资源很大一部分来自山区,山区降水量往往比附近的平原降水量高得多。地形抬升有利于低层水汽的供应,国外人工增雨作业很多是针对山区降水的。目前对西部山区云降水结构的研究比较薄弱,有关云降水的历史资料也较少,为了开发西部空中云水资源,合理利用人工增雨(雪)技术,日后应重点对西部山区的云水资源、云降水特征和催化潜力进行系统的探测和研究。

2. 需解决的重大技术问题

(1) 大气云降水过程和人工增雨的实时监测和模拟预报技术 人工增雨的科技发展很大程度上需借鉴大气科学中的最新监测、遥感和数值模拟技术,并需综合利用多参数气象雷达、大气探测飞机(装有多种先进设备和粒子测量系统)、气象卫星(反演云含水量和相态技术)、微波辐射仪(用于复杂天气条件下监测云柱总含水量)和化学示踪技术(判断催化剂扩散和是否有效催化)等构成云雨监测识别和催化后物理响应的技术体系,结合中小尺度气象监测网建立人工增雨的实时监测分析系统。

由于实施人工增雨野外试验的自然条件复杂多变,各次人工催化试验很难重复,人工催化的物理响应和效果往往被云和降水过程本身巨大的自然变率所淹没,使试验难以得出明确的结论。因此,数值模拟技术可作为人工增雨试验和研究的主要手段之一,在明确的物理量基础上,可通过对不同云体的催化时机、催化部位和催化剂量的模拟计算,再结合实际观测和数值试验结果,给出不同云降水过程的最佳催化技术方法、催化效果和产生这些效果的物理过程。同时数值模拟技术也是发现人工增雨的新理论和新方法的可能途径。从长远来看,用数值模式作精确定量的降水预报是人工增雨机理研究、作业方案设计、效果预测和检验的重要

途径。为此,要建立不同尺度云降水过程相互作用、云中详细微物理过程和催化过程的中尺度云系和云尺度模式;建立多尺度云场初始化与多种云观测资料的同化技术;建立催化作业后云微物理、中小尺度热力、动力和水汽变化效应的数值模拟分析和预测技术。在改进中尺度云系模式和可分辨云尺度模式预报能力的基础上,力求比较真实地模拟自然云在多尺度相互作用下的发展过程和催化机理,进而结合人工增雨的实时监测分析系统,建立大气云降水过程和人工增雨的实时监测和模拟分析预报系统。

(2) 高效的催化作业技术 人工增雨作业在催化对象的选择、播撒时机和播撒部位的确定以及催化剂量的控制等方面都要力求符合播云原理假说所限定的可播性条件,方能使作业达到预期增雨目的。为提高人工增雨作业的成效,需要开发研制新型高效的人工增雨催化剂和催化作业工具及其优化播撒方法,包括高效人工增雨高炮炮弹、焰剂火箭、飞机焰弹和地面燃烧炉等。利用飞机观测的云微结构资料、卫星和地基遥感资料、雷达观测资料,结合数值模式,研制不同降水云和云系的催化作业条件判据,选择相应技术,进而结合催化剂的性能及催化工具的特点,确定作业时机、部位和剂量。再在上述基础上研制相应的实用软件和作业指挥系统,形成人工增雨的催化作业综合技术体系,从总体上提高人工增雨的催化作业技术水平。

(3) 科学的外场试验设计方案 科学地设计外场试验研究,是突破人工增雨关键技术难题的重要基础。可在自然条件有利、工作基础良好的地区,建立人工增雨的试验研究基地,开展重要的科学试验。外场试验方案需包括增雨效果的预测,包括综合利用先进监测设备和遥感技术、高效的播云催化剂和相应的播撒工具,以及云降水过程和催化过程的详尽的数值模式。作业设计应力求满足效果检验及播云原理假说所限定的可播性条件。

(4) 综合效果检验和预测技术 为了使人工增雨科学技术持续有效地发展,定量的人工增雨效果检验技术是急待解决和不可回避的科学问题。目前的效果检验方法中物理证据不足、科学基础比较薄弱。国外比较重视随机作业的效果统计方法,但需要大量的样本,且试验周期长,无法检验有目的的人工增雨作业。今后应结合统计检验、外场监测和数值模式,发展作业一次、检验一次的效果综合检验技术,以摆脱单一统计检验方法的束缚,这对人工增雨的健康发展有重要意义。人工增雨效果检验,除需利用先进的设备对云降水物理过程、催化后可能发生的物理响应进行监测、分析和数值模拟计算外,还需根据效果检验和催化原理的要求,对

(下转第 64 页)

供的关于事故危害程度的信息含糊其辞、难以理解,甚至相互矛盾。另外,三哩岛核事故主要是由于操作失误造成的。这更证明了核事故风险概率分析中关于操作符合规章的假设不成立。

在三哩岛事故发生后,核管会设立了大量的新的安全规章管理条例,扩大了安全监督范围,如更加注重管理人为的操作失误、小设备的故障,等等。另外,核管会还重新检查和设计了它的事故紧急应付措施,以便在预防事故发生的同时,也作好应急准备,把事故发生后的损失减到最小。

政治学家在对政府监督机构运转的研究中发现,一个成熟的管理监督机构,其立法往往倾向于对被管理行业有利。这是因为在和被监督行业打交道的过程中,监督机构会变得越来越官僚、自满,越来越受行业的影响。美国核管会由此遭致许多认为其管理不严、监督不够的批评。由于核电站具有潜在的发生灾难性事故的可能,核电监督管理部门尤其应该防范这种倾向。美国政治学家也提出了若干建议,诸如采用经济鼓励方式以促进监督人员尽职尽责、任命与核电工业没有当前和既往联系的人作监督人员等。这些建议,也许有助于保持管理部门的独立性,增强公众对核电管理部门的信任度。

四、固有安全性

当前世界上运行的核电反应堆,大多是 40 多年前的压水反应堆。当初选择压水反应堆并不是出于其安全性能,而是出于其发展速度的考虑。压水反应堆能够快速地从军用转为民用,因而在 50 年代中期在美国被推广用作商业发电。在三哩岛事故发生后,压水反应堆的安全设施有一定改进。据研究估计,当今美国军舰上核反应堆堆芯熔化的概率是 1 万反应堆年 1 次。尽管这个概率对于单独一个反应

堆来说很小,但对全世界 400 多个反应堆而言,风险还是太高因而难以给公众支持核电发展的信心。

不过,核电的推动者指出,随着技术的飞速发展,第二代设计的核反应堆比当前运行中的反应堆在安全性能上有很大的提高。这些被称作具有“固有安全性”的第二代核反应堆的设计,能够解决机器故障和操作人员失误导致事故的问题。因为如果任何故障发生,它不需要像第一代设计那样依靠备用设备启动或者操作人员正确反应来关闭核反应堆,而是会自动停堆。在具体技术上,有几种不同的设计方式能实现这一目标。例如,在一种设计中,紧急停堆系统不再依靠泵等设备,而是依靠重力来完成。另外一种设计被称作“球形燃料反应堆”,铀燃料被装在表面镀了一层坚硬的碳化硅的球形容器中,这使核燃料能够耐高温达 2 300 摄氏度也不会熔化,堆芯熔化的事故也就大大减少。

尽管工程师们提出了很多设计来确保核反应堆的安全,实际上至今仍然没有任何一种第二代反应堆设计完全投入施工并经过全面测试。面对目前尚在设计图纸上的新型核反应堆设计,投资商往往更关注它们可能非常高的成本投入。另外,很多专家提醒,即使是第二代反应堆设计,也并不是万无一失。例如前面提到的球形燃料反应堆,因为含有大量石墨,故而有失火的可能。已经有批评指出,“固有安全性”这一提法具有误导性。专家认为,新设计的核反应堆的确要比第一代核反应堆安全,但任何时候,对任何涉及大量放射性物质的运用,都不能忽视其中的安全运行问题,必须保持高度警觉,并严格监督。

(省略 16 篇英文参考文献)

(责任编辑 蔡德诚)

(上接第 55 页)

外场试验进行严格的科学设计和实施。

人工增雨试验方案中还应包括对作业效果进行预测。由于云降水数值模拟技术的不断进步,已在一定程度上能够描述中尺度云降水宏观过程和催化过程,并预测人工播撒后的中尺度和局地热力、动力和各种微物理过程的响应。数值模拟不仅可作为人工增雨理论研究和效果预测、检验的最重要的手段之一,还可在外场试验设计中,对涉及效果物理检验的物理量提出监测、检验精度和时空变化等方面的理论方案,进而形成观测—理论—试验的人工增雨效果检验科学体系,建立有较高时空分辨率的物理、统计和数值模式相结合的效果综合检验技术和催化效果的预测方法。

四、结语

“八五”和“九五”期间,中国在北方层状云降水

研究、催化剂和催化工具研制、云降水监测技术和数值模拟以及省级通信指挥系统现代化建设等方面已取得了一批初步成果,国家级人工增雨西北试验基地一期工程也已启动,一些地方正在进行省级人工增雨作业试验示范基地的建设。这对突破人工增雨中某些基本科学问题,提供了相应关键技术,也提供了一定的支撑条件。

鉴于对人工增雨技术的客观需求和学科本身发展的需要,目前,中国应着手建立大气综合探测飞机实验室,以加大这一领域国家级的科研投入,支持关键科学问题和技术的研究。同时,应对全国水资源严重短缺地区云水资源展开研究和分析,提高合理开发云水资源的规划意见,并在试验示范区内研制相应的人工增雨的监测、作业和效果检验技术,以求明显提高人工增雨的成效,使人工增雨技术达到一个新水平。

(责任编辑 蔡德诚)