

# 人工影响天气工程系统

胡志晋, 王广河, 王雨增

(中国气象科学研究院, 北京 100081)

**[摘要]** 文章介绍了人工影响天气(人工增雨、防雹、消雾等)的基本科学原理、国内外的历史、现状、科技水平、效益以及国内的需求、组织、规模等概况。描述了我国典型的人工影响天气工程系统及其各组成部分,即天气云况监测预测、催化技术、数值模拟、通信指挥和效果评估等分系统。强调了科研支持系统的重要性,提出了当前有关应用基础和技术开发的主要研究课题,阐述了长期稳定的科学示范试验的重要作用以及本领域的今后开拓方向。

**[关键词]** 人工影响天气; 人工增雨; 人工防雹; 人工消雾; 工程系统

## 1 引言

人工影响天气是在一定的有利时机和条件下,通过播撒催化剂等技术手段,对局部区域大气中的云雾降水物理过程进行影响,达到人工增雨、防雹、消雾等目的。

## 2 概述

现代人工影响天气开始于1946年,美国科学家用干冰催化过冷的层云人工降雪试验成功。随后从人工降水迅速扩大到防雹、消雾、消云、抑制闪电、削弱台风等许多领域。其中有些项目,如人工增雨、防雹、消雾等已在世界一些地区形成防灾减灾业务。

我国有组织的人工影响天气活动始于1958年,为了抗早在吉林等地用飞机播撒干冰,取得人工增雨成功。以后在全国各地迅速发展起来。改革开放以来,由于社会和国民经济发展的迫切需要,以人工增雨和防雹为主的人工影响天气工作有了进一步的发展。目前,我国人工影响天气的规模已居世界前列,但科学技术水平同世界先进水平相比还有相当差距。

### 2.1 科学原理

1) 大气中的水汽在上升冷却过程中凝结成细微的云滴,漂浮在空中。在温度低于 $0^{\circ}\text{C}$ 的冷云中,云滴往往仍为过冷水滴。在这种冷云中,如果有冰晶存在,这些冰晶就会很快的凝华长大,下落成雪。雪在温度高于 $0^{\circ}\text{C}$ 的暖区会溶化成雨。雪和雨在下落时都会碰撞并合云滴而进一步长大,最后降到地面。在暖区或者没有冰晶的云中,云滴大小和落速不一,大的云滴可能碰并小的云滴而长大成为雨滴,降落及地。

在强烈发展的风暴之中,雨、雪被气流携带上升,碰并过冷云滴增大成为霰粒。霰粒进一步碰并过冷水滴增大就形成冰雹。

2) 人工降水(人工增雨)是在自然冰晶不足的云中,播撒干冰、碘化银等催化剂,产生大量人工冰晶(每克催化剂可形成 $10^{11} \sim 10^{15}$ 个冰晶),促进降水的发展。同时由于冰晶凝华潜热的释放,可以使云体温度提高,促进上升气流的发展,进一步加强成云降雨的过程。在自然暖云中播撒吸湿性颗粒可以增加一定数量的大云滴,加速水滴碰并长大成雨的过程。人工催化自然发展较弱的云,激发的降水量很小,缺乏经济价值。自然发展较强的云

自己会产生一定的降水,人工催化后可以增加雨量,达到实用目的,称为人工增雨(雪)。

3) 人工防雹是在发展的冰雹云中播撒催化剂产生大量人工冰晶,长大成为众多的霰粒(冰雹胚胎),它们在增长中争夺云中有限的过冷水滴长大,结果它们都不能成为大的冰雹。这些小冰雹在低空暖区会溶化成雨,即使到达地面,造成的灾害也会大大减轻。

4) 人工消雾是在温度低于 $0^{\circ}\text{C}$ 的过冷雾中播撒催化剂,增加大量冰晶,导致雾滴的蒸发,冰晶长大沉降,使雾消散。消除温度高于 $0^{\circ}\text{C}$ 的暖雾比较困难,可以采用加热、搅拌、播撒吸湿性粒子等方法使雾滴蒸发消散,大雾滴沉降。

## 2.2 国际概况

1) 据世界气象组织的统计资料,目前有30多个国家开展近百项人工增雨、防雹和消雾活动。美、俄、以色列等国在对当地云降水的科学认识、人工影响天气的科学概念模型、作业的监测催化仪器装备以及作业设计和效果检验等方面处于世界前列。以色列经过20年的研究试验确认了增雨效果,现在其北部约 $5\,000\text{ km}^2$ 地区建立了人工增雨业务,日雨量平均增加 $6\% \sim 15\%$ ,每年增加水资源量为 $8\,000\text{ 万 m}^3$ ,折合每立方米水的成本为2.5美分,投入产出比为 $1:6.5$ 。在美国西部干旱山地,人工增水作为业务手段用于增加蓄水发电和灌溉已有几十年的历史。前苏联进行了大量的科研试验和作业活动,特别是长时期大规模的人工防雹作业在不同地区得到了减少雹灾 $60\% \sim 90\%$ 的结果。在美、俄、法等国的一些机场建立了消雾的业务工程系统。

2) 在科学研究方面,美国在20世纪70年代曾有每年2000万美元以上的投入,以后逐渐减少。前苏联解体后研究规模也大大缩小。但是全世界作业的规模并未缩减,由于气象灾害和水资源短缺,需求正进一步加大。当前,人工影响云雾微结构的可能性已在实验室得到论证,并通过数值模拟和对云物理量的测量得到证实。但是自然云雾降水复杂多变,人工影响天气的有利条件和针对性的催化技术方法的实时掌握以及人工增雨、防雹效果的客观评估仍有较大难度,人工影响天气至今仍是一项发展中的科学技术。

## 2.3 国内概况

1) 我国是世界上气象灾害发生最频繁的国家

之一。农业受旱灾影响最大,20世纪90年代平均每年受旱 $2\,667\text{ 万 hm}^2$ ,为70年代的2.3倍。1997年因旱灾减少的粮食达到476亿kg。

我国又是水资源短缺的国家,北方和西部地区更为突出。70年代以来,干旱缺水更趋严重,地下水开采过量,生态环境恶化,黄河断流。随着人口增长和经济的进一步发展,干旱缺水已成为制约我国可持续发展的重大难题。

2) 我国人工影响天气工作在社会经济迫切需求推动下得到了很大的发展。这项工作作为防灾减灾的一项措施基本上由地方各级政府领导、协调和投入,并主要由各地气象部门负责管理、实施和技术指导。很多省(区、市)政府设有影响天气领导小组,下设办公室。1994年,国务院批准建立13个部、委、局参加的全国人工影响天气协调会议制度,进一步加强对全国人工影响天气工作的组织、协调和指导,标志着这项工作进入一个健康发展的新阶段。改革开放以来,各级地方政府对人工影响天气的投入逐年增加,人工增雨、防雹作业规模不断扩大。据1998年统计,全国绝大部分省市开展了人工增雨防雹作业,拥有“37”高炮5800余门,约15个省市开展了飞机人工增雨作业,飞行近340架次,约700h。

3) 人工影响天气工作取得了明显的社会效益,得到了各级政府和社会各界的充分肯定。福建古田水库地区连续12年随机催化增雨试验的统计结果表明,催化作用区域作用时段的雨量增加 $24\%$ ,统计显著度小于 $0.05$ ;根据各地试验的鉴定结果,河北省1990~1994年旱季人工增雨作业初步评估得出增加催化区域催化时段的雨量 $18\%$ ,投入产出比在 $1:100$ 以上。青海黄河河曲地区1997~1998年的人工增雨作业投入为200~800万元/年,初步估计增加黄河流入龙羊峡水库的水量为 $2 \sim 4\text{ 亿 m}^3/\text{a}$ ,所增水量不但能供阶梯式多次发电而且能增加黄河中下游的水资源供应。河北满城1986~1990年人工防雹5年的年平均雹灾面积比防雹前10年平均减少 $78\%$ ,投入产出比为 $1:20$ 。虽然目前一般作业的效果评估不够严格,催化的强度(时段和面积)也嫌不足,但已显示了其可能的经济社会效益。此外,人工增雨扑灭森林(草场)火灾、人工消雾保障机场开放、人工消雨保障重大节日活动等方面也作了大量有益的尝试,取得了一定的成效。

4) 我国人工影响天气的科学技术水平也有了很大的发展。四十年来在云雾降水的科学认识、监测预测技术、人工影响天气的科学概念模型、催化指标、催化工具和高效催化剂、数值模拟技术、室内试验装备建设和技术、作业设计、通讯指挥系统以及效果评估等方面,都取得了显著的进展。

### 3 工程系统

人工影响天气是一项复杂的系统工程,涉及气象、农业、水利、航空、军工、火工、空中管制、通讯等多学科、多部门、多行业,需要周密计划和科学组织。

人工影响天气的成败在于它能否抓住适当的云况,在适当的部位和时机实施适当的催化。云和降水的变化很快,一块雹云从发展、产生、初始雷达回波到开始降雹的时间不足30 min,防雹催化的有效时机十分短促。所以严密的天气云况监测预测和识别、迅速的信息传递、正确的决策指挥和及时准确和高效的催化作业是进行人工增雨、防雹取得良好效果的基本保证。

人工增雨防雹作业一般是在自然降雨、降雹的背景下进行的,要从自然多变的背景下把作业的效果评估出来有相当的难度,但又是必不可少的。所以人工影响天气工程系统一般由天气云况监测预测系统、数值模拟系统、通讯指挥系统、催化系统以及效果评估系统组成。

#### 3.1 天气云况监测预测系统

1) 气象监测预测系统 主要依靠气象业务系统,了解天气云况背景状况及其发展趋势,及时做好作业准备(如飞行申请等)。

2) 人工影响天气监测预测系统 通过气象卫星、气象雷达以及飞机和地面的云物理监测系统获取云降水的多尺度宏观微观结构演变的多种实时信息,为作业条件的实时判断(包括冰雹云识别)、催化部位时机方法的实时决策、实时数值模拟和效果评估提供最主要的依据。

#### 3.2 催化技术系统

1) 催化决策系统 通过已有科学认识和数值试验提出当地作业的科学概念模型和相应的具体条件判别和催化方法指标,形成相应的催化决策软件系统,根据监测系统获取的云降水信息,实时确定催化方法,即催化时机、部位、剂量、工具等。

2) 高效催化剂系统 冷云催化剂的成冰效率

可以有上千倍的差异,我国一般采用干冰、液氮或碘化银气溶胶等。我国研制的碘化银焰剂新配方成核率为每克碘化银产生 $10^{14} \sim 10^{15}$ 个冰晶,达到了国际先进水平,已用于火箭和飞机焰弹。90年代研制的增程焰剂高炮炮弹的成核率已提高到每克产生 $10^{12}$ 个冰晶。

暖云催化具有重要开发潜力,但一般采用飞机播撒食盐、氯化钙、尿素等吸湿性粉末,所需剂量远大于冷云催化剂。最近国际上研制的吸湿性焰弹,所需剂量较少,有待进一步研究开发。

3) 催化工具系统 目前我国采用的人工影响天气催化工具主要是飞机、高炮和火箭。飞机一般采用安-26,最大高度为4~7 km,航程约2 000 km;高炮采用三七高炮,射高为3.5~7 km,有效射程约为3~6 km,每弹含碘化银约1 g。90年代研制的多种型号的专用人工增雨防雹火箭射高可达4~8 km,有效射程约3~8 km,每枚含碘化银3~10 g。

地面催化工具需要按其作业有效射程和当地地形云况特点布设成网,飞机催化的航线需有一定设计,保证能够对影响目标区的所有云体及时有效的催化。

#### 3.3 数值模拟系统

1) 云雾降水模式和自然过程的模拟预测 研制建立一、二、三维层状云、对流云(冰雹云)和雾的数值模式,可以模拟云雾整体及其中云、雨、冰、雪、霰、雹等的发展演变过程。利用实测气象信息计算预测云雾降水的发展。

2) 人工影响天气催化模式和作用效果的模拟预测 研制建立不同催化剂的催化作用子程序,计算不同催化方法作用下的云雾降水演变过程,同自然过程对比得出催化的增雨减雹消雾的效果,为效果检验、有利催化条件判别和最佳催化方法选择提供依据。

3) 实时数值模拟预测系统 建立实时数值模拟预测系统,包括监测信息的自动输入和计算结果的自动输出显示等,达到实时应用的目的。

#### 3.4 通信指挥系统

1) 组成 主要依托国家气象业务系统及其通讯网络;同时为了人工影响天气的特殊需要还采用短波、超短波电台、手机、寻呼机、移动电话等无线有线通讯设备以及联网的微机等,组成省、市、县和指挥中心-监测点-作业点的计算机-通讯网

络。

2) 功能 要求在很短的时间内(如几分钟内)把监测系统获取的不同地点、不同方式、不同内容的信息迅速自动集中到指挥中心;迅速处理各种信息,根据一定要求,综合形成各种催化判据和指标的显示产品,提供作业和监测方案的决策;形成决策命令迅速下达到各催化作业单位(作业飞机、火箭、高炮点等)和监测单位;同空中管制、航空等部门及时联系,获得飞行或炮击的空域准许;实时了解作业情况和催化后云雾降水变化的信息;资料建档、分析。

### 3.5 效果评估系统

1) 统计评估 降水(雨、雹)的时空分布自然变率很大,需要通过统计对比等方法在自然变率背景下以一定可信度评估检验人工催化引起的增雨减雹量;人工增雨一般采用固定目标区或非固定目标区同对比区的雨量历史回归分析方法,河流的径流量的目标对比历史回归方法;人工防雹一般采用历史上防雹前后(以及作业区和对比区)的雹灾变化,如雹灾面积、雹日、降雹强度等的统计评估等。上述方法仍有一定偏差,目前统计学界唯一认可的方法是随机化统计评估,它要求将一部分作业机会,留下不催化,用来对比检验催化效果。催化不催化的决策必须采用随机化方案,避免人为偏差。这种方案要求牺牲一部分作业机会,在抗灾作业中很难被用户接受。但在科学试验中是需要的。

2) 物理评估 分析监测得到的催化前后云降水物理量的变化给出增雨减雹同人工催化的因果关系的物理证据。如在层状云人工增雨中用飞机观测到催化以后催化区的冰晶浓度迅速增多,随后雪晶变大变多下落;用雷达观测到催化后在飞行航线上雷达回波增强。在人工防雹作业中用雷达观测到回波顶高、强度等在催化后的减少。化验降水样品发现催化目标区在催化后银离子量明显增多,说明降水中已含有催化剂碘化银的成分等等。

3) 数值模式评估 云降水模式可以提出作业后降水和其他物理量变化(催化效果)出现的大致时段、地区和数量,为效果的统计评估和物理评估提供理论依据。

4) 经济效益评估 人工增雨在农业抗旱中的效益往往根据增加的水量(增雨量乘上增雨面积)来估价。考虑到农业用水价格、或者抽水灌溉费用、或者单位水量能增加的农作物产量和相应的价

值来评估。有的作业中根据增加河流径流量和水库蓄水量,估价用于发电和灌溉所能得到的较高的经济效益。人工防雹则根据减少雹灾的面积乘以作物价值来估价。

## 4 科研支持系统

科学研究和技术开发是提高人工影响天气实际效益的唯一途径,也是人工影响天气工程系统中不可缺少的组成部分。

### 4.1 应用基础研究

云降水学是现代人工影响天气的科学基础,深入认识作业地区云雾降水的结构特征和发展规律是建立人工影响天气科学概念模型确定有效催化方法和作业方案的科学基础。了解全国云水资源和冰雹、雾害状况,研究认识其人工影响的可能性是制订全国规划的主要依据。除野外观测试验和数值模拟外,室内实验是认识云降水的微物理过程的主要手段,也是研制和检测高效催化剂的主要手段,应予以重视。

### 4.2 技术开发研究

开发研究监测技术、催化技术、数值模拟技术、通信指挥技术、效果检验评估技术等。针对各地实际情况,选优集合形成先进实用的成套优化技术,形成生产力。

### 4.3 科学示范试验和基地建设

国内外大量实践表明只有通过有科学设计的、长期稳定的科学示范试验才能对效果作出可靠的科学评估,对所采用的技术手段和方法进行科学的检验,对当地云降水的结构规律有深入系统的认识,才能使人工影响天气技术逐项地转化为效益可靠的业务或产业。科学示范试验需分成先行性试验、验证性试验和业务性试验等三个阶段。整个试验成功后即可投入生产运行,并可在大范围推广应用。为了进行科学示范试验必须选择需求迫切、云雾降水条件好的地区,按科学布局,建立监测、作业、通信系统和网络,形成高水平的科学试验基地。

### 4.4 服务领域的开拓

人工影响天气的服务潜力很大,需要进一步开拓。人工增雨不仅可在干旱季节作为抗灾救急手段。还可在非生长季节(如北方秋季)增加降雨改善墒情;结合水利工程的调蓄输运功能,在降水较多的地区和季节进行人工增雨,增加可用水资源。西北地区的水资源大部分来自山区,开展山区地形

云人工增雨作业，可望成为缓解西北水资源短缺的重要途径。人工增雨还可以增加雪盖厚度，保障冬小麦安全越冬；有助于清除大气中的悬浮颗粒物，改善城市大气环境；在扑灭森林和草场火灾和结合飞播造草造林保护林业生态方面也可以发挥很大的作用。

防雹技术目前还有一定局限，保护区内仍有一定的降雹风险。除积极提高防雹技术外，同保险部门合作以防雹为主，防雹和保险赔偿结合是一条可开拓的路子。

人工消雾具有重要的应用前景。随着我国航空事业飞速发展，机场起降飞机数量剧增，机场消雾的需求日趋紧迫。我国已做了一些机场消雾试验，需要进一步业务化。

人工消雨是在局部地区短时期消除降雨以保障重大节日活动，它有一定技术难度，我国已作了一些尝试。

人工削弱暴雨对于我国具有十分重要的意义，社会呼声很高，但其难度很大，应首先进行数值试验和技术方案设计，再逐步开展外场试验。

## Engineering System of Weather Modification in China

Hu Zhijin, Wang Guanghe, Wang Yuzeng

(Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081, China)

**[Abstract]** Weather modification (rain enhancement, hail suppression, fog clearing, etc.) is introduced in this paper, including the basic scientific principle, history of development, present status, scientific-technical progress, scope of activities, increasing demand, organization, etc., in China and abroad. A typical operational system of weather modification in China is described, which consists of monitoring and forecasting of weather and cloud, seeding technology (conception model, seeding criteria, effective agent, delivery system), numerical modeling, communication-commanding and evaluating systems. The importance of scientific-technical research system is emphasized. The main aspects of research on the concerned applied sciences and technical development are proposed. The important role of long-term stable scientific demonstrative experiments is explained. The direction of further development in this field is also suggested.

**[Key words]** weather modification; precipitation enhancement; hail suppression; fog clearing; engineering system.

---

### 中国科学院沈阳自动化研究所研制 6 000 m 水下有手机器人

据 [<http://www.cnnews.com>] 报道，中国最大的机器人研发基地——中国科学院沈阳自动化所目前正在加紧研制世界上首个 6 000 m 水下有手机器人。

1995 年该所研制的我国第一部 6 000 m 水下无手臂机器人深海试验获成功，使我国在这一领域跃居世界先进行列。

目前，中科院沈阳自动化研究所正在研制的是具有爬坡能力以及有手臂的 6 000 m 水下机器人，比原先的只具有深海观测功能的 6 000 m 水下机器人要先进得多。目前世界上只有少数几个国家能够生产 6 000 m 深海机器人的能力。