

中国人工防雹四十年*

黄美元 徐华英 周玲

(中国科学院大气物理研究所, 北京 100029)

摘要 简述了人工防雹在中国发展的历程, 并从科学技术的角度, 总结和概括了40年来中国人工防雹的进展和成绩, 指出中国已经走上了比较科学、比较现代化的人工防雹发展道路; 还分析了中国人工防雹中存在的主要科学技术问题, 并提出了解决这些问题的一些看法; 最后, 提供了较为丰富的中国人工防雹文献。

关键词: 中国; 人工防雹

1 引言

所谓人工防雹, 就是对将要降冰雹的冰雹云施加人工影响, 以减少和避免降雹灾害。现在使用的人工影响方法主要是播撒碘化银催化剂, 还有研究其他方法。世界上许多地区有严重的冰雹灾害, 所以人工防雹一直受到人们的欢迎和重视。人工防雹是一种复杂的科学技术, 有理论, 也有实用技术。实现和完善人工防雹, 可以对农业等的抗灾保丰收起到重要作用, 同时将促进大气科学和控制技术的发展。

人工防雹活动在中国有很长的历史。据说, 从明代开始中国就有人工防雹活动的记载, 那时都是一些自发的防雹活动。所用方法有敲锣打鼓、土枪、土炮以及炸药包和空炸炮的爆炸等, 其中土炮和空炸炮等方法一直沿用到70年代^[1~13]。从1958年开始, 在国家科委的领导下, 由中国气象局和中国科学院地球物理研究所具体组织, 开展了以人工降水和人工防雹为主的人工影响天气的野外试验, 并陆续在中国许多省市开始了有组织有领导的人工影响天气活动和抗灾作业。目前, 全中国约有20个省市开展了人工防雹的试验和作业。到现在, 中国开展有组织的人工防雹已经40年了。本文试图从科学技术的角度总结中国40年来人工防雹的进展和成绩, 提出存在的主要科学技术问题, 与大家一起讨论。

2 中国人工防雹的主要科学技术进展

1958年以后, 中国气象局、中国科学院等单位以及有些地方的政府开始组织人工防雹的科学试验和实用性作业。70年代以来, 先在山西昔阳、甘肃岷县和平凉、新疆昭苏等地, 后来发展到华北、西北、西南和东北等20个省、市和自治区, 开展了比较有组织有设计的人工防雹试验。有的省、市和自治区还建立了相对固定的人工防雹作业

1999-03-05 收到, 1999-05-07 收到修改稿

* 国家自然科学基金资助项目 49675247

和试验研究基地,有专业科技人员参加组织指挥。通过 70 和 80 年代的试验和实践,逐步建立和发展了一套适应现代科技发展的人工防雹方法和技术,即采用雷达监测冰雹云和指挥作业,用能播撒碘化银和爆炸的高炮和火箭为作业工具,采用统计对比方法检验防雹效果,从而摆脱了过去凭经验,打土炮的陈旧方法,走上了比较科学,比较现代化的人工防雹发展道路。在中国,人工防雹是边试验研究,边作业应用,国际上也是如此。进入 90 年代以来,现代化的数值模拟方法、通讯技术和专家系统开始被引入人工防雹试验,日益发挥其重要的作用。

中国人工防雹的科学技术进展反映在应用基础研究和作业试验两方面。

2.1 对中国多雹地区降雹的时空分布规律有了清楚的了解

通过调查研究和统计分析,对中国一些多雹地区降雹的时空分布情况有了清楚的了解,为开展人工防雹的布局,选择时机等打下了基础^[13~29]。中国年降雹日的地理分布特点为:山区多于平原,内陆多于沿海,中纬度多于低纬度地区。降雹时间主要集中在 6~9 月,而且大部分发生在午后 12~18 时。

2.2 对中国冰雹云及冰雹微物理的特点有了明确的认识

通过对 70 年代和 80 年代大量的雷达、闪电等的观测和分析研究^[12,13,21,22,25~78],对北京、山西、甘肃、新疆、河北、宁夏和青海等地冰雹云进行了分类(其主要类型有弱单体雹云、强单体雹云、多单体雹云、传播雹云和点源雹云等),阐明了各类雹云的云体结构、降雹特点、形成条件和出现概率,分析和明确了冰雹云生命的不同发展阶段特点,从而对中国冰雹云物理的一些基本特点有了明确的认识,为中国人防雹提供了云物理学基础。

青海、甘肃、新疆、宁夏、河北等地开展了冰雹微物理结构、雹谱和物理特性的测量和分析研究,对中国冰雹的大小、形状、冰雹胚胎、雹谱以及冰雹的层次和结构有了一个概括的了解^[13,22,28,39,62,68,71,79~97]。

2.3 就爆炸对冰雹云等的作用提出了一些物理假说

在爆炸对冰雹云和其他云的作用方面,许多地方的人工防雹实践反映,爆炸在人工防雹中有作用,爆炸对云有作用。中国科学院大气物理研究所、中国气象科学研究院人工影响天气研究所、新疆和内蒙古气象局等开展了爆炸作用的野外观测^[12,13,21,71,98]、野外试验^[13,21,71,75,99~101]、室内实验^[6,7,13,21,102~105]和理论研究^[13,102,106~109],发现和证实了“炮响雨落”现象(即在合适条件下,爆炸后 2~10 分钟地面观测到突然降雨或降雨的突然增大),提出了爆炸可以影响云中云下上升气流,爆炸扰动气流等物理假说。还发现,爆炸可以促进云中凝结和碰并过程,通过数值模拟计算表明,这些作用可以影响冰雹形成过程,在合适条件下可以起到防雹的作用。

2.4 冰雹云和人工防雹的数值模拟有很大发展

中国科学院大气物理研究所、总参大气环境研究所和北京大学地球物理系等单位开展了冰雹云和人工防雹的数值模拟和理论研究^[12,13,39,78,109~134]。从 80 年代到 90 年代先后建立和发展了一维、二维和三维冰雹云模式,对微物理过程考虑有单参数、双参数和分档谱模式,达到了国际先进水平。研究了冰雹形成过程和条件,山地和水面对冰雹云发展和运动的影响,动力结构和冷云过程对降雨、降雹和风暴分裂的影响,下击暴流的形成及其结构等。还比较成功地模拟了几次实际观测到的冰雹云演变过程。还进行了人

工防雹作用和作业方法的数值模拟研究,指出作业方法(作业时间、部位、剂量和持续时间等)对防雹效果很敏感,只有选择合适的作业方法,才能取得较好的防雹效果,针对一些冰雹云个例提出了最适宜的作业方法。

2.5 建立和发展了多种冰雹的短期预报方法

在冰雹(降雹)的短期预报方面取得了很显著进展^[13,19,22,25,29,135,139~151]。从 70 年代以来,结合人工防雹试验的需要,甘肃、山西、青海、北京、辽宁、河北等先后发展了单站降雹预报方法、天气图区域降雹预报方法以及数值模式降雹预报方法。前两种方法在全国各地人工降雹中广泛使用,发挥了很好作用,其准确率达到 80%~85%。中国科学院大气物理研究所和北京大学地球物理系、青海和河北省气象局等开展了利用冰雹云模式计算来预报降雹的试验,也取得了可喜的成绩。

2.6 建立和发展了很有成效的识别冰雹云方法

北京、山西、甘肃、新疆、辽宁、四川、青海、河北等地率先开展了冰雹云的雷达观测,分析了冰雹云与雷雨云回波特征的差异,提出了区分二者的指标,从而发展了适合本地的用雷达识别冰雹云的方法^[12,13,26,28,38,43,67,69,71,75,77,127,132,152~154],识别准确率达 80%~85%。中国科学院兰州高原大气研究所和大气物理研究所等率先建立和发展了闪电(闪电频数及其变化)识别冰雹云方法^[12,13,26,29,35,36,67,81,155~158],准确率约 80%。这些识别雹云的方法在全国许多地区得到推广和发展,在各地人工防雹中发挥了很重要的作用。各地也总结了许多根据雷声、闪电、云体颜色和状态等宏观特征来识别冰雹云的群众经验^[1,2,4,5,13,29,69]。

2.7 防雹工具和探测技术有较大发展

在防雹工具方面也有较大的改进和发展^[8~12,29,73,159]。建立和发展了以“三七”高炮及内装碘化银的炮弹为主的防雹工具。继而,中国气象科学研究院人工控制天气研究所等改进和提高了炮弹内碘化银的成核率^[13,29,160~164]。中国气象科学研究院人工控制天气研究所、中国科学院大气物理研究所、航天部 41 所等研制和试验了多种防雹火箭。

在人工防雹的监测和作业指挥技术及装备方面也有很大发展^[13,29,68,76,77,165~173]。从 70 年代开始,发展了 711 雷达和 713 雷达在人工防雹中的应用。到 80 年代末 90 年代初,已实现了雷达的数字化,并开始试验应用双线偏振雷达和多普勒雷达。从 70 年起,闪电计数器、闪电频谱仪、闪电定位仪等先后应用到人工防雹。多种测雹仪、垂直气流探空仪、冰雹切片和分析仪器等也在人工防雹中试验和应用。90 年代以来,现代化的通讯设备和计算机(微机)已开始人工防雹中广泛应用。初步发展了由人工防雹研究成果,计算机和通讯设备组成的人工防雹专家系统和人工防雹作业指挥系统。这些系统的发展和完善,将在人工防雹中起到十分有效的作用,是人工防雹实用技术发展的主要方向。

2.8 在搞得好的地区,人工防雹取得了良好的社会和经济效益

全国约有 20 个省、市、自治区(其中华北 5 个、东北 3 个、西南 3 个、西北 6 个、华东 1 个、华中 1 个和华南 1 个)先后开展了人工防雹,其中多数防雹地区取得了一定的社会和经济效益,得到了当地政府和群众的肯定和好评^[1~6]。在一些有专业科技人员参加组织试验的防雹地区(基地),进行了防雹效果的统计分析^[13,26,27,75,174~179],初步结果表明,在搞得好的地区,进行人工防雹后,雹灾面积减少了 40%~80%。

3 中国人工防雹存在的主要科学技术问题及今后的发展方向

在回顾和总结了中国人工防雹四十年来的成绩和进展的同时, 我们分析了中国人工防雹存在的主要科学技术问题, 并提出解决这些问题的一些看法。中国人工防雹的状况和科学水平与国际上的状况和水平是有关联的。就国际上来说, 人工防雹的科学技术还不很成熟。有一些重要的科学和技术问题尚未解决。人工防雹的效果仍然有其不确定成分。

3.1 人工防雹的基本理论需要新的突破

人工防雹的基本理论是指冰雹形成理论和防雹理论。关于冰雹形成理论, 国际上比较有名的是苏联科学家 G. Sulakvelidze 60 年代提出的累积带理论、K. Browning 和 F. Ludlam 提出的循环增长理论以及 G. Foote 的补充^[13]。这些理论基本上是一些物理概念模型, 得到了一些观测事实支持, 能解释一定类型冰雹云中冰雹的形成。应该通过观测和数值模拟对这些理论作更多更广泛的验证和鉴别, 分析其适用条件和局限性, 发展成定量的理论。中国乃至国际上这类研究都不多。中国冰雹云有多种类型, 其冰雹形成过程也不尽相同。近年来, 国内已开始从数值模拟的角度来分析这些理论适用的条件和局限性^[78,119,129,131]。以后, 需要加强冰雹云结构和冰雹形成过程的观测研究, 加强冰雹微物理结构和雹谱的观测研究, 要加强冰雹云和冰雹形成的数值模拟研究, 发展适用于不同冰雹类型的冰雹形成理论。

国际上最著名的人工防雹理论是 Sulakvelidze 提出的过量撒播理论^[13,29]。中国用催化剤防雹就是采用这个理论。这个理论可能比较适合于以冻滴为胚胎的冰雹, 对以霰为胚胎的冰雹来说, 可能防雹效果较差。但是, 这些问题并未得到深入研究。对冰雹云结构和冰雹微物理特性的同步观测, 加上对其数值模拟的研究, 应该是迫切需要的。另外, 对超级单体冰雹云是否能用过量撒播方法来防雹也要深入研究。

大量的观测事实表明, 爆炸对云和冰雹云有一定影响^[12,13,29,105,109,180,181]。爆炸方法在中国广泛采用, 肯尼亚、瑞士、意大利等国也有采用^[13,29]。中国对爆炸人工防雹作用提出了一些物理假说, 但还没有形成理论。应该加大力度进行研究, 重点研究爆炸对冰雹云的动力效应, 爆炸是怎样和多大程度上影响了云中(或云下)气流, 要明确其物理动力过程及定量关系。

3.2 人工防雹作业方法要客观化和量化

目前, 国内各地人工防雹的作业方法, 基本上是靠一些基本知识和经验。作业方法是否适当直接影响防雹效果。各地人工防雹效果的好坏很大程度上依赖于作业指挥者的云物理学知识, 防雹经验和临场的判断。各地应建立适合本地的客观而又定量的作业方法。为此, 就要对当地冰雹云的特点和冰雹的形成过程有很好的了解, 对作业方法(作业时间、部位、剂量等)要有理论和采用模式计算。根据不同冰雹云类型, 不同雷达探测的回波参量, 用较完整的(先进的)冰雹云模式和现代人工防雹理论, 计算出最佳作业技术参数, 从而建立人工防雹专家系统(知识库)。在实际现场应用时, 用自然控制论为指导, 建立把上述专家系统与现场雷达探测、计算机和通讯设备耦合的人工防雹作业指挥系统^[182,183]。通过实践检验, 不断提高和完善这个系统的有效性。这个系统的核

心是人工防雹专家知识库(系统)。这样,可以摆脱凭个人知识和经验的手工作业方式,采用由现代云物理学知识,现代化的计算机和通讯技术相结合的综合系统,实现人工防雹作业方法的客观化和定量化。

3.3 要发展有效而实用的人工防雹效果的检验方法

取得良好的效果是人工防雹的根本目的,效果的好坏也是检验人工防雹科学水平的重要标准。但是,人工防雹效果的检验很复杂、很困难。由于冰雹形成过程的复杂性,目前我们还不能对降雹的时间、地点和强度做准确的预报。由于降雹是一种小概率事件,降雹的时空变率很大,用简单的前后或左右对比方法是缺乏说服力的。国内一些地方的人工防雹效果,都只进行了简单的对比,在一些有专业科技人员参加的试验基地作了一般的统计检验。国际上重视随机作业的效果检验,但也需要多年的大量作业样本,而且极值对效果的重要影响还难以避免。在以实用为目的的人工防雹活动中是无法采用随机作业的。人工防雹效果检验方法的发展要注重两个方面:一是要加强发展定量的降雹预报,显著提高降雹量和落区的预报准确率,二要发展有云物理内容的统计检验方法,加强降雹状况和灾害的监测。

3.4 数值模拟要应用到人工防雹各个环节

近一二十年来,国内外云和降水的数值模拟发展和进步很快^[78],几乎可以模拟各主要类型云和降水的形成和演变过程。冰雹云和人工防雹的数值模拟研究在国内也发展起来了^[78,109,120~126,128~131,150,151,159]。但是,在人工防雹的试验和作业过程中实际应用还很不夠,从人工防雹的预报、识别、作业到效果检验的各环节,基本上依赖于经验和统计分析结果。具体的、实时的、定量的判断和决策很不够。现在已经可以看出来,数值模拟应该而且可以在人工防雹各个环节上发挥重要作用,应该把数值模拟研究推广到实际应用,提高人工防雹各个环节的科学水平,与现场观测,研究结果,计算机和通讯技术结合起来,发展有现代云物理成果,有现代化技术的能快速反应的人工防雹作业指挥系统。

展望 21 世纪,人工影响天气将有重大突破。人工防雹的一些主要科学技术问题将得到解决。冰雹形成理论和防雹理论将成熟,人工防雹实用技术将完善,人工防雹效果十分明显。人工防雹将成为一种高科技实用技术,为减灾防灾,改善人类生存环境起到重大作用。希望中国的科学和技术人员能在 21 世纪的重大突破过程中有重要贡献。

参 考 文 献

- 1 云南省鹤庆县农委会农水科,云南省鹤庆县预测和消除冰雹的经验总结(摘要),气象学报,1959,30(1),1~4.
- 2 甘肃省气象局,甘肃省群众性人工防雹试验工作情况汇报,全国人工降水防雹座谈会报告选编(下),北京:气象出版社,1973,1~6.
- 3 陕西省气象局,土炮防雹的野外试验和效果分析,全国人工降水防雹座谈会报告选编(下),北京:气象出版社,1973,32~36.
- 4 四川省气象局,土炮、三七高炮人工防雹试验初步总结,全国人工降水防雹座谈会报告选编(下),北京:气象出版社,1973,37~45.
- 5 云南省防雹试验小组,土炮、土火箭防雹效果调查分析,全国人工降水防雹座谈会报告选编(下),北京:气象出版社,1973,46~52.

- 6 新疆气象局研究所, 土炮轰击冰雹云垂直气流的模拟实验及其对雹云影响的讨论, 全国人工降水防雹座谈会报告选编(下), 北京: 气象出版社, 1973, 58~59.
- 7 中国科学院大气物理研究所消雹组, 土炮冲击波的强度和传播规律, 全国人工降水防雹座谈会报告选编(下), 北京: 气象出版社, 1973, 74~78.
- 8 中国科学院兰州高原大气物理研究所, 52 型土火箭, 全国人工降水防雹座谈会报告选编(下), 北京: 气象出版社, 1973, 309~314.
- 9 新疆气象局研究所, 装配式火箭, 全国人工降水防雹座谈会报告选编(下), 北京: 气象出版社, 1973, 322~325.
- 10 北京市气象台, 礼花炮弹定型试验小结, 全国人工降水防雹座谈会报告选编(下), 北京: 气象出版社, 1973, 328~332.
- 11 中国科学院大气物理研究所消雹组, 1971 年防雹土炮技术改进工作总结, 全国人工降水防雹座谈会报告选编(下), 北京: 气象出版社, 1973, 340~343.
- 12 黄美元, 人工防雹简介, 人工降水, 防雹基础知识, 北京: 气象出版社, 1974, 223~235.
- 13 黄美元, 王昂生等, 人工防雹导论, 北京: 科学出版社, 1980.
- 14 刘全根、汤懋荃, 中国降雹的气候特征, 地理学报, 1966, 33(1), 11~18.
- 15 兰州中心气象台, 岷县八郎地区冰雹活动规律的认识, 全国人工降水防雹座谈会报告选编(下), 北京: 气象出版社, 1973, 79~89.
- 16 王鹏飞, 冰雹移动规律初探, 全国人工降水防雹座谈会报告选编(下), 北京: 气象出版社, 1973, 90~105.
- 17 新疆气象局研究所, 新疆冰雹分布的一些特征, 全国人工降水防雹座谈会报告选编(下), 北京: 气象出版社, 1973, 109~114.
- 18 兰州中心气象台, 地形对降水和冰雹分布的影响, 全国人工降水防雹座谈会报告选编(下), 北京: 气象出版社, 1973, 115~127.
- 19 中央气象局气象台, 我国的大范围冰雹及其预报, 气象科技资料, 1974, 7, 13~16.
- 20 中央气象台天气气候分析情报组, 我国冰雹的地理与时间分布, 气象科技资料, 1976, 7, 11~12.
- 21 王昂生、黄美元, 冰雹和防雹研究述评, 大气科学, 1978, 2(1), 76~84.
- 22 雷雨顺、吴宝俊、吴正华, 冰雹概论, 北京: 科学出版社, 1978, p133.
- 23 黄美元, 昔阳县雷暴和冰雹概况, 冰雹和人工防雹研究, 北京: 科学出版社, 1983, 1~8.
- 24 王昂生、郑双治, 昔阳地面降雹分析, 冰雹和人工防雹研究, 北京: 科学出版社, 1983, 9~19.
- 25 全国冰雹预报方法科研协作组, 全国冰雹文摘, 北京: 气象出版社, 1984.
- 26 施文全、郑国光等, 新疆昭苏地区冰雹和冰雹云若干问题的研究, 北京: 气象出版社, 1989.
- 27 石安英等, 张家口地区“三七”弹防雹对雹日及雹灾影响的统计效果检验, 防雹及雹云物理文集, 北京: 气象出版社, 1989, 1~12.
- 28 赵仕雄、李正贵等, 青海高原冰雹云研究, 北京: 气象出版社, 1991.
- 29 王雨增等, 人工防雹实用技术, 北京: 气象出版社, 1994.
- 30 葛润生, 1964 年北京地区降雹过程的雷达分析, 气象学报, 1966, 36(2), 213~220.
- 31 青海气象局, 青海互助县一次入雹云探空资料的初步分析, 全国人工降水防雹座谈会报告选编(下), 北京: 气象出版社, 1973, 128~132.
- 32 中国科学院大气物理研究所消雹组, 昔阳地区冰雹云回波特征, 全国人工降水防雹座谈会报告选编(下), 北京: 气象出版社, 1973, 144~151.
- 33 中国科学院兰州高原大气物理研究所, 1972 年平凉地区雷达观测雷暴云的初步分析, 全国人工降水防雹座谈会报告选编(下), 北京: 气象出版社, 1973, 152~156.
- 34 中国科学院大气物理研究所, 垂直气流探测, 全国人工降水防雹座谈会报告选编(下), 北京: 气象出版社, 1973, 169~179.
- 35 黄美元、王昂生, 闪电观测在人工防雹中的应用, 1974, 气象科技资料, 7, 26~30.
- 36 王昂生、黄美元, 冰雹与人工防雹, 物理, 1975, 4(1), 14~20.
- 37 中国科学院兰州高原大气物理研究所雷达组, 一次雹暴的特征随时间演变分析, 大气科学, 1976, 1(2), 62~69.
- 38 马振骅, 一次累积带降雹的雷达观测, 大气科学, 1977, 1(2), 149~152.
- 39 顾震潮, 云雾降水物理基础, 北京: 科学出版社, 1980.
- 40 王昂生、赵小宁等, 昔阳地区冰雹云形成过程的一些特征, 大气科学, 1980, 4(2), 186~194.
- 41 龚乃虎、瞿章等, 平凉地区雹云回波移动特征, 气象学报, 1980, 38(3), 281~287.

- 42 杨培才等, 华北地区降雹回波系统的分类及单体特征, 大气科学, 1980, 4(3), 236~244.
- 43 葛润生, 冰雹云回波的特征与其判别方法, 气象, 1980, 6(5), 19~21.
- 44 王昂生, 黄美元等, 冰雹云物理发展过程的一些研究, 气象学报, 1980, 38(1), 64~72.
- 45 王雨增, 魏新尧, 两次冰雹过程的观测分析, 气象, 1981, 8, 37~39.
- 46 王昂生, 赵小宁等, 冰雹云“酝酿期”研究, 大气科学, 1981, 5(1), 92~100.
- 47 杨培才, 郭裕禧, 爬线型降雹回波系统的初步分析, 大气科学, 1981, 5(1), 85~91.
- 48 甄长忠, 78810 冰雹过程的分析, 大气科学, 1981, 5(4), 456~460.
- 49 寿绍文, 一个“超级单体”雹云的成因及结构, 南京气象学院学报, 1982, 2, 223~228.
- 50 叶宗秀, 陈倩等, 冰雹云的闪电频数特征及其在防雹中的应用, 高原气象, 1982, 1(2), 53~59.
- 51 廖远程, 李生相, 冰雹云气流和温度结构分析, 大气科学, 1982, 6(1), 203~210.
- 52 瞿章, 从一次降雹过程看六盘山的一种地形影响, 大气科学, 1982, 6(2), 203~210.
- 53 刘全根, 马镇德, 平凉地区的降雹及其环境场要素的关系, 高原气象, 1982, 1(1), 53~62.
- 54 冰雹云雷达回波图集编辑组, 冰雹云雷达回波图集, 北京: 科学出版社, 1982.
- 55 王昂生, 赵小宁, 云体合并及雹云形成, 气象学报, 1983, 41(2), 204~210.
- 56 王昂生, 施文全等, 点源冰雹云研究, 大气科学, 1983, 7(3), 317~327.
- 57 刘锦丽, 郭裕禧, 杨培才, 冰雹云雷达回波的统计特征、冰雹和人工防雹研究, 北京: 科学出版社, 1983, 52~59.
- 58 王昂生, 黄美元等, 冰雹云中闪电、雷达回波和温度的相互关系, 冰雹和人工防雹研究, 北京: 科学出版社, 1983, 60~65.
- 59 王昂生, 洪延超等, 甘阳地区冰雹云的物理研究, 冰雹和人工防雹研究, 北京: 科学出版社, 1983, 66~76.
- 60 杨培才, 一次降雹过程雷达回波的中尺度分析, 冰雹和人工防雹研究, 北京: 科学出版社, 1983, 77~83.
- 61 郭恩铭, 西藏冰雹云观测, 气象学报, 1984, 42(1), 110~113.
- 62 杨颂禧, 马镇勋, 陈玉山等, 由晶体大小和气泡含量分析雹块生长的垂直轨迹, 高原气象, 1985, 4, 157~166.
- 63 王昂生等, 强单体雹暴研究, 大气科学, 1985, 9(3), 260~267.
- 64 俞樟孝等, 浙江冰雹天气与边界层辐合的关系, 大气科学, 1985, 9(3), 268~275.
- 65 叶宗秀, 徐宝祥等, 一次由回波合并形成的超级单体雹暴, 高原气象, 1987, 6(1), 75~85.
- 66 廖远程, 弱雹暴与强雷雨云的某些异同分析, 高原气象, 1988, 7(4), 382~386.
- 67 郭恩铭, 李风声, 云和冰雹云物理基础, 北京: 气象出版社, 1989.
- 68 石安英, 梁敬等, 防雹及雹云物理文集, 北京: 气象出版社, 1989.
- 69 廖远程, 甘肃冰雹云结构研究, 北京: 气象出版社, 1990.
- 70 刘黎平等, 用 C 波段双线偏振雷达研究冰雹云, 大气科学, 1992, 16(3), 370~376.
- 71 章澄昌, 人工影响天气概论, 北京: 气象出版社, 1992.
- 72 成都人工影响天气办公室, 高炮人工降雨防雹, 四川科学技术出版社, 1992.
- 73 张纪淮, 金恒泰, 焰弹火箭防雹的一些设计考虑, 中国云物理和人工影响天气 40 年进展和展望学术研讨会文集, 北京: 气象出版社, 1998, p49.
- 74 陶善昌等, 1998, 暴雨和冰雹天气的闪电特征及宏观气象参数的比较分析, 中国云物理和人工影响天气 40 年进展和展望学术研讨会文集, 北京: 气象出版社, 1998, p55.
- 75 张鸿发, 1998, 甘肃省平凉市凉十年人工防雹综述, 中国云物理和人工影响天气 40 年进展和展望学术研讨会文集, 北京: 气象出版社, 1998, p67.
- 76 伍志方等, 1998, 714CD 多普勒天气雷达和 711 测雨雷达探测超级单体雹云的对比分析, 中国云物理和人工影响天气 40 年进展和展望学术研讨会文集, 北京: 气象出版社, 1998, p70.
- 77 张鸿发等, 1998, 偏振雷达观测雹云的偏振特性和判别, 中国云物理和人工影响天气 40 年进展和展望学术研讨会文集, 北京: 气象出版社, 1998, p138.
- 78 黄美元, 徐华英等, 云和降水物理, 北京: 科学出版社, 1999.
- 79 徐家骥, 黄孟蓉等, 1965, 甘肃岷县地区 1964 年 6~7 月两次冰雹雹谱、雹切片的分析, 气象学报, 35(2), 251~256.
- 80 徐家骥, 冰雹微物理与成雹机制, 农业出版社, 1979.
- 81 杨颂禧等, 一次雹暴回波和雹块微结构分析, 大气科学, 1981, 5(2), 157~165.
- 82 赵仕雄, 高原东部地区雹谱时空分布特征分析, 高原气象, 1982, 1(4), 92~98.
- 83 施文全, 王昂生, 冰雹微结构的分析研究, 气象学报, 1983, 41(1), 89~96.

- 84 北方冰雹科研协作组, 华北大范围雹暴的天气学研究, 北京: 气象出版社, 1984.
- 85 郭恩铭, 冻滴、霰微物理观测及分析, 气象学报, 1983, 41(3), 343~347.
- 86 李子华, 宋乃会等, 长江下游地区一次超级单体降雹云的切片分析, 南京气象学院学报, 1984, 12(1), 75~81.
- 87 李子华, 宋乃会, 周文贤, 1984, 由“5.1”雹块微结构推论其生长条件, 南京气象学院学报, 13(2), 219~225.
- 88 施文全, 李子华等, 昭苏雹谱的时空分布, 南京气象学院学报, 1984, 13(2), 226~233.
- 89 李子华, 施文全, 圆锥形雹块微结构的分析研究, 气象学报, 1985, 43(3), 358~364.
- 90 王鹏飞, 郑国光等, 双连四胚雹块的分析, 气象学报, 1985, 43(3), 352~357.
- 91 李子华等, 圆锥形雹块生长方程和热平衡方程的初步研究, 大气科学, 1985, 9(4), 428~433.
- 92 赵仕雄, 关于雹胚的研究, 气象学报, 1986, 44(3), 307~313.
- 93 施文全, 徐家骝, 雹块微物理和雹云单体关系的初步探讨, 气象学报, 1986, 44(3), 357~360.
- 94 郑国光, 冰砧冻增长的实验研究, 气象学报, 1986, 44(1), 82~90.
- 95 赵仕雄, 高原五个雹块的同位素研究, 气象学报, 1987, 45(2), 169~178.
- 96 石安英等, 冰雹谱分布特征的探讨, 高原气象, 1989, 8(3), 279~383.
- 97 陈玉山, 牛生杰, 宁南冰雹胚胎的研究, 大气科学, 1990, 14(3), 369~372.
- 98 徐华英, 何珍珠, 黄美元等, 爆炸影响降水的观测分析, 大气科学, 1976, 1(1), 62~67.
- 99 新疆气象局研究所, 土炮影响云雾的一次试验总结, 全国人工降水防雹座谈会报告选编(下), 北京: 气象出版社, 1973, 60~69.
- 100 内蒙多伦气象站, 地面爆炸对云雾影响的试验, 全国人工降水防雹座谈会报告选编(下), 北京: 气象出版社, 1973, 70~73.
- 101 徐华英, 何珍珠等, 炮击和雷电对降水的影响, 冰雹和人工防雹研究, 北京: 科学出版社, 1983, 96~106.
- 102 黄美元, 徐华英等, 爆炸影响对流云发展的物理研究, 大气科学, 1979, 3(3), 280~288.
- 103 徐华英, 何珍珠等, 爆炸影响上升气流的模拟实验, 冰雹和人工防雹研究, 北京: 科学出版社, 1983, 84~95.
- 104 陈汝珍等, 爆炸对云滴碰并增长的实验研究, 应用气象学报, 1992, 3(4), 410~417.
- 105 黄庚, 胡志晋等, 1998, 爆炸对云滴影响的实验研究, 中国云物理和人工影响天气40年进展和展望学术研讨会文集, 北京: 气象出版社, 1998, p86.
- 106 许焕斌, 关于爆炸影响气流的力学原理, 气象, 1979, 10, 26~29.
- 107 许焕斌, 王思微, 关于爆炸或声振动对降水粒子运动的影响, 气象科技集刊, 1985, 9, 93~97.
- 108 许焕斌, 王思微, 关于爆炸防雹中的若干问题, 防雹及雹云物理文集, 北京: 气象出版社, 1989, 214~236.
- 109 徐华英, 黄美元, 周玲, 1998, “炮响雨落”的实验和数值模拟, 中国云物理和人工影响天气40年进展和展望学术研讨会文集, 北京: 气象出版社, 1998, p82.
- 110 徐华英, 顾震潮, 起伏条件下重力碰并造成的暖性薄云降水, 气象学报, 1963, 33(1), 108~114.
- 111 赵柏林, 薛炳凡, 关于冰雹成长的机制, 气象学报, 1963, 33(4), 411~420.
- 112 徐家骝, 起伏条件对冰雹增长的影响, 大气科学, 1978, 2(3), 230~237.
- 113 徐华英, 李桂忱, 有云泡结构的对流云中降水形成的研究, 气象学报, 1980, 38(3), 260~268.
- 114 Xu Jialiu, 1983, Hail growth in a three dimensional cloud model, *J. Atmos. Sci.*, 40, 185~203.
- 115 许焕斌, 王思微, 一维时变冰雹云模式研究(一)反映雨和冰雹的双参数演变, 气象学报, 1985, 43(1), 13~25.
- 116 许焕斌, 王思微, 一维时变冰雹云模式研究(二)反映融化对雹谱双参数演变的影响, 气象学报, 1985, 43(2), 162~171.
- 117 徐家骝, 经验性三维云模式中冰雹生长的数值试验研究, 气象学报, 1985, 43(4), 469~478.
- 118 胡志晋, 何观芳, 积雨云中微物理过程的数值模拟(二)阵雨, 冰雹暴雨的个例研究, 气象学报, 1988, 46(1), 28~40.
- 119 许焕斌, 王思微, 二维冰雹云数值模式, 气象学报, 1988, 46(2), 227~236.
- 120 许焕斌, 王思微, 三维可压缩大气中的云尺度模式, 气象学报, 1990, 48(1), 80~90.
- 121 王谦, 胡志晋, 三维弹性大气模式和实测强风暴的模拟, 气象学报, 1990, 48(1), 91~101.
- 122 孔凡铀, 黄美元, 徐华英, 对流云中冰相过程的三维数值模拟(I)模式建立及冷云参数化, 大气科学, 1990, 14(4), 441~453.
- 123 孔凡铀, 黄美元, 徐华英, 对流云中冰相过程的三维数值模拟(II)繁生过程作用, 大气科学, 1991, 15(6), 78~88.

- 124 孔凡铀、黄美元、徐华英, 冰相过程在积云发展中的作用的三维数值模拟研究, 中国科学 (B 辑), 1991, 35(7), 1000~1008.
- 125 毛玉华、胡志晋, 强对流人工增雨和防雹原理的二维数值研究, 气象学报, 1993, 51(2), 184~194.
- 126 Kong Fanyou, Huang Meiyuan and Xu Huaying, Three-dimensional numerical simulation of the effects of a cold water surface on the evolution and propagation of thunderstorms, *Advances in Atmospheric Sciences*, 1993, 10(3), 261~272.
- 127 黄燕、徐华英, 播撒碘化银粒子进行人工防雹的数值试验, 大气科学, 1994, 18(5), 612~621.
- 128 孔凡铀、黄美元、徐华英, 微下击暴流的数值模拟, 大气科学, 1994, 18(1), 11~21.
- 129 郭学良、黄美元、徐华英, 1998, 三维冰雹云分档模式及其应用研究, 中国云物理和人工影响天气 40 年进展和展望学术研讨会文集, 北京: 气象出版社, 1998, p82.
- 130 周玲、黄美元、洪延超, 1998, 冰雹云催化试验的数值模拟, 中国云物理和人工影响天气 40 年进展和展望学术研讨会文集, 北京: 气象出版社, 1998, p83.
- 131 洪延超, 1998, 三维冰雹云数值模拟研究, 中国云物理和人工影响天气 40 年进展和展望学术研讨会文集, 北京: 气象出版社, 1998, p84.
- 132 漆梁波、黄美元等, 1998, 多参量雷达识别冰雹区的数值计算, 中国云物理和人工影响天气 40 年进展和展望学术研讨会文集, 北京: 气象出版社, 1998, p85.
- 133 何观芳、胡志晋、张纪淮, 1998, 内蒙中部地区冰雹云自然降雹和人工引晶防雹效果的数值研究, 中国云物理和人工影响天气 40 年进展和展望学术研讨会文集, 北京: 气象出版社, 1998, p88.
- 134 陈宝君、李子华、黄美元, 1998, 使用高炮进行人工防雹的数值模拟, 中国云物理和人工影响天气 40 年进展和展望学术研讨会文集, 1993, 246~252.
- 135 南大气象系、江苏灌云气象站, 利用地面单站资料作冰雹短期预报, 全国人工降水防雹座谈会报告选编 (下), 北京: 气象出版社, 1973, 190~203.
- 136 顾震潮、何珍珍、于仁成, 昔阳地区的冰雹预测, 全国人工降水防雹座谈会报告选编 (下), 北京: 气象出版社, 1973, 229~234.
- 137 中国科学院地理研究所, 北京地区的降雹分析和预报, 全国人工降水防雹座谈会报告选编 (下), 北京: 气象出版社, 1973, 235~245.
- 138 北京气象科学研究所人工控制天气研究室, 利用探空资料预报冰雹天气, 全国人工降水防雹座谈会报告选编 (下), 气象出版社, 1973, 246~252.
- 139 中国科学院兰州高原大气物理研究所, 平凉地区的冰雹预报方法, 全国人工降水防雹座谈会报告选编 (下), 北京: 气象出版社, 1973, 253~256.
- 140 毛节泰、盛裴轩等, 用积云数值模式预报冰雹的探讨, 气象学报, 1982, 40(1), 73~79.
- 141 张喜轩, 预报冰雹的方法, 气象, 1983, 4, 14~15.
- 142 张喜轩, 冰雹天气的短期预报检验, 高原气象, 1983, 2(4), 71~78.
- 143 于仁成、何珍珍, 昔阳地区的冰雹天气形势和冰雹预报, 冰雹和人工防雹研究, 北京: 科学出版社, 1983, 20~31.
- 144 何珍珍等, 昔阳降雹天气的高空气象分析, 冰雹和人工防雹研究, 北京: 科学出版社, 1983, 32~43.
- 145 张喜轩, 冰雹大小单站补充预报的一点经验, 高原气象, 1989, 8(4), 357~359.
- 146 孙玉隐、石安英, 1989, 用积雨云数值模式预报冰雹的探讨, 防雹及雹云物理文集, 北京: 气象出版社, 1989, 46~56.
- 147 刘荣福等, 一种预报最大降雹大小的方法, 应用气象学报, 1992, 3(3), 383~384.
- 148 吴宝骏等, 1998, 降雹预报的多指标叠套法, 中国云物理和人工影响天气 40 年进展和展望学术研讨会文集, 北京: 气象出版社, 1998, p51.
- 149 张可友, 1998, 江苏 4~6 月区域性冰雹的分析和预报, 中国云物理和人工影响天气 40 年进展和展望学术研讨会文集, 北京: 气象出版社, 1998, p61.
- 150 黄美元、周玲等, 1998, 降雹 (冰雹云) 数值模式预测试验, 中国云物理和人工影响天气 40 年进展和展望学术研讨会文集, 北京: 气象出版社, 1998, p81.
- 151 伍志方、张春良, 1998, 应用二维冰雹云模式做冰雹预报, 中国云物理和人工影响天气 40 年进展和展望学术研讨会文集, 北京: 气象出版社, 1998, p100.
- 152 李子华等, 雷达识别冰雹云的综合指标方法, 大气科学, 1979, 3(4), 385~387.
- 153 王雨曾、冉永梅, 雹云的早期识别与作业判据的研究, 中国云物理和人工影响天气 40 年进展和展望学术研讨会文集, 北京: 气象出版社, 1998, p49.

- 154 樊鹏, 1998, 一种简便快捷识别冰雹云的模型, 中国云物理和人工影响天气 40 年进展和展望学术研讨会文集, 北京: 气象出版社, 1998, p63.
- 155 江爱良、杨超武, 雷电接收机及其在冰雹分析中的作用, 全国人工降水防雹座谈会报告选编(下), 北京: 气象出版社, 1973, 262~280.
- 156 兰州高原大气所, 用闪电计数器区别冰雹和雷雨, 全国人工降水防雹座谈会报告选编(下), 北京: 气象出版社, 1973, 281~290.
- 157 中国科学院大气物理研究所消雹组, 雷雨云和冰雹云中闪电的初步观测, 全国人工降水防雹座谈会报告选编(下), 北京: 气象出版社, 1973, 291~308.
- 158 王昂生、黄美元等, 防雹时识别雷雨云和冰雹云的闪电观测, 科学通报, 1976, 12, 546~549.
- 159 刘文生, 1998, 一种新型的防雹增雨火箭弹系统, 中国云物理和人工影响天气 40 年进展和展望学术研讨会文集, 北京: 气象出版社, 1998, p119.
- 160 成核率检定小组, “三七”高炮碘化银炮弹冰核生成率的鉴定, 气象, 1975, No.1, 10~11.
- 161 石安英等, “三七”炮弹聚能分散碘化银成冰核效率的试验研究, 大气科学, 1982, 6(3), 315~323.
- 162 丰大雄、陈汝珍, 关于冷云催化剂, 气象科技集刊, 1985, 9, 71~76.
- 163 丰大雄, 几种 AgI 炮弹成冰性能的比较, 气象科技集刊, 1985, 9, 77~87.
- 164 陈汝珍、丰大雄, “三七”高炮碘化银炮弹的成冰核性能, 防雹和雹云物理文集, 北京: 气象出版社, 1989, 202~205.
- 165 赵仕雄等, 半导体致冷冰雹切片仪, 气象, 1982, 3, 33~34.
- 166 何珍珍、沈志来等, 冰雹谱仪, 冰雹和人工防雹研究, 北京: 科学出版社, 1983, 44~51.
- 167 杨颂楮、马镇勋等, 机床式冰雹切片仪及其应用效果, 大气科学, 1985, 9(3), 308~311.
- 168 石安英等, QZ-1 型雪雨分测计的研制, 防雹及雹云物理文集, 北京: 气象出版社, 1989, 96~102.
- 169 樊慧新等, 测雹板检定试验, 防雹及雹云物理文集, 北京: 气象出版社, 1989, 103~106.
- 170 施文全等, 1998, 应用 XDR 数字化雷达早期识别雹云的新方法研究, 中国云物理和人工影响天气 40 年进展和展望学术研讨会文集, 北京: 气象出版社, 1998, p73.
- 171 金恒泰, 1998, 内蒙古自治区人工影响天气技术系统, 中国云物理和人工影响天气 40 年进展和展望学术研讨会文集, 北京: 气象出版社, 1998, p79.
- 172 伍志方等, 1998, 雷达—火箭防雹作业体系的初步试验结果, 中国云物理和人工影响天气 40 年进展和展望学术研讨会文集, 北京: 气象出版社, 1998, p75.
- 173 王贤勤等, 1998, X 波段双极化雷达和人工影响天气, 中国云物理和人工影响天气 40 年进展和展望学术研讨会文集, 北京: 气象出版社, 1998, p149.
- 174 黄美元、元雪巧, 关于我国人工防雹效果的统计分析, 1978, 2(2), 124~130.
- 175 陈立祥, 甘肃人工防雹效果浅析, 大气科学, 1981, 5(2), 225~229.
- 176 黄美元等, 甘阳县人工防雹效果统计分析, 冰雹和人工防雹研究, 北京: 科学出版社, 1983, 107~110.
- 177 邢玉春等, 1998, 天津 20 年高炮防雹的经济效益, 中国云物理和人工影响天气 40 年进展和展望学术研讨会文集, 北京: 气象出版社, 1998, p58.
- 178 冉永梅等, 1998, 满城防雹效果统计分析, 中国云物理和人工影响天气 40 年进展和展望学术研讨会文集, 北京: 气象出版社, 1998, p59.
- 179 王干元、杨大生, 1998, 内蒙古河套平原“杭—临”地区高炮防雹十五年效果检验及其效益评估, 中国云物理和人工影响天气 40 年进展和展望学术研讨会文集, 北京: 气象出版社, 1998, p78.
- 180 中科院大气所雷达组, 雷达探测冰雹云, 北京: 科学出版社, 1980.
- 181 周和生, 1998, 爆炸对强对流云降水的影响, 中国云物理和人工影响天气 40 年进展和展望学术研讨会文集, 北京: 气象出版社, 1998, p68.
- 182 曾庆存, 自然控制论, 气候与环境研究, 1996, 1(1), 11~20.
- 183 黄美元, 前景广阔的云和降水学以及人工影响天气, 现代大气科学前沿与展望, 北京: 气象出版社, 1996, 122~124.

40 Year's Hail Suppression in China

Huang Meiyuan, Xu Huaying and Zhou Lin

(*Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029*)

Abstract The history of hail suppression in China is briefly described in this paper. Achievement and development of hail suppression in China during 40 years are summarized from the point of view of sciences and technics. It is indicated that the hail suppression in China is going to develop on the relative scientific and modernized way. Main problems of sciences and technics for development of hail suppression in China and suggestions of improvement are analyzed and indicated. A wealth of references of hail suppression in China is shown in the end of this paper.

Key words: China; hail suppression

《气候与环境研究》征订、征稿启事

中国科学院大气物理研究所主办的《气候与环境研究》自 1996 年创刊以来, 在主编曾庆存院士的领导下, 积极跟踪我国气候和环境领域的重大研究课题, 及时发表了一大批最新科研成果, 在广大作者和读者中建立起很好的声誉。自 1999 年起, 《气候与环境研究》被同时收录进中国科技信息研究所和中国科学院文献情报中心两家权威的情报统计机构的“中国科技期刊引文数据库”的核心期刊名单。

《气候与环境研究》一贯坚持全心全意为读者、作者服务的宗旨。我们欢迎所有从事气候和环境领域研究的专家、学者投稿, 欢迎一切对气候和环境领域的科学研究感兴趣的单位和个人订阅《气候与环境研究》。

本刊已开始 2001 年的征订工作。《气候与环境研究》为季刊, 每期定价 15 元, 全年定价 60 元。有意订阅者, 请通过邮局汇款至《气候与环境研究》编辑部, 并请务必注明“订阅 2001 年《气候与环境研究》”字样。本刊收到汇款后即寄发票。

本刊地址: 北京中国科学院大气物理研究所《气候与环境研究》编辑部

邮政编码: 100029

联系电话: (010)62050179

E-mail: daqi@public.east.cn.net