

文章编号:1006-7639(2004)-03-0068-09

中国冰雹研究的新进展和主要科学问题

董安祥, 张 强

(中国气象局兰州干旱气象研究所, 甘肃省干旱气候变化与减灾重点实验室, 甘肃 兰州 730020)

摘 要:简要总结了自1990年以来中国人工防雹在科学技术方面的进展, 分析了冰雹研究和防雹作业方面存在的一些科学技术问题, 提出了解决问题的建议。

关键词:中国; 冰雹; 研究; 进展

中图分类号: P482

文献标识码: A

引 言

冰雹是对流云中的一种固态降水物, 它是一种严重的自然灾害。据WMO统计, 每年冰雹给世界带来的经济损失约20亿美元^[1]。中国平均每年遭受雹灾面积 $2 \times 10^6 \text{ hm}^2$ ^[2], 2002年风雹使全国农作物受灾面积达500多万 hm^2 , 造成直接经济损失138亿元。因此, 国内外对它的研究都十分重视。自1958年起, 中国气象局、中国科学院等单位以及有些地方政府和气象局开始组织人工防雹的科学试验和实用性作业。进入20世纪90年代以来, 现代化的模拟方法、通讯和探测技术以及专家系统开始引入人工防雹试验, 在冰雹科学研究中日益发挥其重要作用, 从而对冰雹的科学探索和探索有了很大发展。本文试图反映20世纪90年代以来国内科技工作者在冰雹方面的成果和新进展, 以增进对冰雹科学问题的系统了解和认识。

1 “穴道”理论

1995年WMO防雹专家会议认为在人工催化防雹的假说中, 人工雹胚的迅速形成及其与自然雹胚的“有利竞争”的实现是最有希望的^[3]。

许焕斌和段英等通过研究发现, 可长大成雹的水凝物, 是绕水平零线循环运行增长的, 并逐步进入上升气流的冰雹增长区。在上升气流侧边的水平气流零值区段, 即使垂直速度有变化, 由于质粒的运动与对流场可自动调节适应, 会进入合适的存留位置,

这就为雹胚的形成创造了条件。质粒进入该位置, 只能随着它的长大而由人流区逐步带进主上升气流区, 很难从该位置吹离。零区段的弱上升气流端是雹胚生长区, 而零区段的主上升气流端是冰雹增长区。中间的零值域下方人流区是质粒增长旋转进入主上升气流区的通道, 构成一个冰雹生长的“穴道”。“穴”是指质粒进入后不易出去, “道”是指冰雹形成区的必经之途。质粒在长大成雹后才能从“穴道”落出。

“穴道”的存在和所在位置由雹云流场特征决定, 而过冷水场(包含过冷量和比含量)决定了冰雹的增长率, 即影响冰雹在“穴道”内的循环路径长度和速度。正是由于“穴道”的存在和作用, 当实施播云催化防雹时, 只要在“穴道”区播撒, 它就具备充分条件形成人工雹胚, 而且它们的运行增长轨迹会与自然雹胚运行增长轨迹相交叉, 从而实现人工雹胚与自然雹胚平等竞争过冷水分。甚至只需通过有利竞争, 耗尽“穴道”内局部性过冷水量, 就可中断向主上升气流输送大质粒。尽管主上升气流区以外的其它场所存在大量的过冷水量, 也难有大冰雹形成。

基于新的“穴道”概念, 考虑爆炸防雹对流场和质粒末速产生明显影响, 而流场和质粒末速又是决定质粒增长运行轨迹的两大要素, 也是决定“穴道”部位、强度的关键参量。对雹云“穴道”区进行爆炸, 虽然单发作用半径为100 m量级, 但序列爆炸叠加起来作用范围可达数百米量级。根据冰雹增长运行轨迹研究和防雹原理研究进展, 爆炸的动力作用和

收稿日期: 2004-07-05; 改回日期: 2004-08-20

基金项目: 国家科技部社会公益类项目《西北地区人工防雹消雹技术》(2002DIB10046)资助。

作者简介: 董安祥(1944-), 男, 江苏省南京市人, 研究员, 主要从事干旱气候变化规律和预测方法研究。

微物理作用,皆可通过对雹云中的冰雹“穴道”引入爆炸来实施。一旦改变了流场和质粒末速,就会明显影响“穴道”的动力性能和干扰冰雹增长运行的进程,数值模拟表明其防雹作用相当明显。

目前,“穴道”理论是一种假设,需要在防雹理论研究和作业实践中继续验证和改进。

2 冰雹天气系统中微物理起电的电场与动力耦合和相互作用的研究

孙安平、言穆弘等^[4-8]在一个 3 维冰雹云模式和一个 2 维轴对称积云起电模式基础上初步建立的 3 维强风暴动力与电耦合模式,各种微物理过程参数化方案,模式的初边值条件和对流启动方式。为我国数值模式模拟在雷电环境下强对流雷暴云微物理与动力之间的相互作用和耦合关系研究,对我国发展开发强对流雷暴云和雷暴电理论是重要参考依据,对人工影响天气防灾减灾(冰雹、雷电等)都有重大意义和应用研究价值。

周筠珺等^[9]利用 1998 年 4~9 月间进行的 GAME-TIBET 青藏高原云和降水的多普勒雷达及大气平均电场加强期观测实验资料,对青藏高原那曲地区的冰雹天气系统中的大气电场作了定量观测和研究。结果表明,在降雹过程中大气电场强度基本上均为负值,其峰值也均 $> -22 \text{ kVm}^{-1}$ 。在降雹过程中随着降雹时间的临近,大气电场强度不断增强,但降雹开始时大气电场强度并未达到峰值,峰值出现的时刻比开始降雹的时刻略有滞后;在各降雹日中,较强的大气电场强度基本上对应着各冰雹谱分布段较多的冰雹数目,而这种较好的相关在各谱分布段上都表现出来;随着降雹时间的临近,每 5 min 闪电频数不断增强。在开始降雹时每 5 min 闪电频数平均达到 43,峰值出现的时刻略滞后于开始降雹时刻,这一滞后时间一般平均在 3 min 左右;在降雹过程中,单位面积中的冰雹数目与对应时段内总闪电数有着较好的对数关系,相关系数 R 为 0.954。在降雹过程的时间序列上,冰雹云成熟期过后,总闪电次数与冰雹降雹率成反相关。

郭凤霞等^[10]利用一个 3 维时变双参数动力电耦合模式,对决定雷暴云空间电荷结构的 3 个初始场,选择了 3 个环境参数(反转温度、最大中心扰动位温和扰动区域),数值模拟雷暴云发展过程中空间电荷结构的变化,得到以下结论:(1)在雷暴云的 5 种起电机理中,非感应起电机理占绝对优势,反转温

度 T_r 的选取对雷暴云内电荷结构至关重要,反转温度不同,主要的起电区域范围不同。(2)在同一层结条件下,不同的中心最大扰动位温 $\Delta\theta_c$ 会形成不同强度及不同电荷结构的雷暴云。(3)在其它条件不变的情况下,增加扰动区域的垂直或水平范围,可以较大地减弱反转温度层以上的起电活动,但对反转温度层以下的起电区域影响不大。

今后,应加强气候变暖对雷电活动影响的研究,加强对流风暴中电活动与动力及微物理过程的相关性研究。预计上述研究将会在近期内取得进展。

3 3 维云数值模拟

冰雹云是中小尺度的,它们的回波都具有中小尺度结构。降雹的强中心皆是中小尺度系统,或是具有中小尺度结构的大尺度系统。根据人工影响天气所面对的天气特点,其适用的模式应当具有描述中小尺度天气系统发生发展和演变的功能,特别要具有高分辨、非静力平衡、多维的特点。其特征尺度范围应当在 2~200 km,但为了分辨中小尺度,模式网格的分辨尺度应在 1km 以下,模式范围应达到

表 1 3 维云模式^[3]

Tab. 1 Three-dimensional cloud model^[3]

非时变/ 时变(S/T)	坐标系 (P/T)	动力框架 (K/H/Da/De)	微物理 (S/B)	研究内容	第一作者	发表刊物	出版年份 及期号
S	P	K	S	冰雹生长 轨迹	徐家骥	气象学报	1998 年 第 4 期
T	P	De	B	对流云	许焕斌	气象学报	1990 年 第 1 期
T	P	De	B	对流风暴	王谦	气象学报	1990 年 第 1 期
T	P	De	S	对流云	孔繁铀	大气科学	1990 年 第 4 期
T	P	De	S	对流云, 冰晶簇生	孔繁铀	大气科学	1991 年 第 6 期
T	T(z)	De	B	套网格(1 -2)	刘玉宝	气象学报	1993 年 第 3 期 1993 年 第 4 期
T	T(p)	H	B	层状云系 (MM2)	刘公波	气象学报	1994 年 第 1 期
T	T(z)	De	B	非均匀环 境场,锋 生,中尺 度雨带	许焕斌	气象学报	1994 年 第 2 期
T	T(p)	H	B	云场宏、 微观结构 (MM4)	许焕斌	气象学报	1995 年 第 3 期
T	T(p)	H	B	云系 (MM2)	王成恕	气象学报	1995 年 增刊
T	T(z)	De	隐式云	风暴	周晓平	大气科学	1996 年 第 1 期
T	T(z)	De	隐式云	风暴	王东海	大气科学	1996 年 第 3 期
T	P	De	B	催化防雹	洪延超	气象学报	1998 年 第 6 期
T	T(z)	De		催化剂扩 散	余兴	气象学报	1998 年 第 6 期
T	P	De-K	B	冰雹形成 机制和播 撒防雹	许焕斌	大气科学	2001 年 第 2 期

100~1 000 km^[3]。

自20世纪80年代以来,曾因计算机能力的限制采用了1维(z)和2维(x,z)模式,对冰雹云进行了模拟,取得了许多成果。但是,大气运动是3维的,所以模式大气也应当是3维的。人为降维处理会带来一系列的歪曲^[3]。它不能正确地考虑风场,1维不能描述水平转动流,只有3维才能正确地描述风场及其作用。2维模式限制了环境风场与对流环流之间的能量交换。而3维则不会有这种限制。在环境风场中发展起来的对流性系统仍然是3维性的,也不宜用2维模式。为了正确地模拟中小尺度天气,在20世纪90年代3维模式开始建立和发展起来,在冰雹云的模拟中得到了广泛的应用^[3,11~24]。许焕斌给出了3维云模式的研究总结(表1)。

洪延超等^[17]在3维冰雹云催化数值模式中采用孔繁铀^[18]的动力学框架、初始条件、边界条件,启动云发展的方法及数值计算技术。考虑了冰雹中详细的微物理过程,对各种质粒采用双变参数谱。将云中水物质分成水汽、云水、雨水、冰晶、雪、霰、冻滴和雹8类。可以预报质粒的比浓度和比含量,尤其可以计算雹块数量,适合研究冰雹的形成机制。同时建立了催化剂AgI的守恒方程,考虑了人工冰核的凝华核化及与云滴、雨滴接触的冻结核化,并用地面降雹动能通量来检验催化防雹效果,故可用以研究催化防雹机制和对雹云的催化方法。

运用上述3维冰雹云催化数值模式,对1997年7月8日出现在陕西旬邑防雹试验区的冰雹云,输入最近时刻的探空资料。根据雹云数值模拟分析冰雹形成机制^[19],得到如下结论:

(1)冰晶通过水汽凝华,冰晶繁生产生,前者的作用比后者大2~3量级。

(2)冰晶主要通过凝华增长,也通过碰并、自动转换、接触扰动的过冷水雨滴冻结产生雪,雪主要通过撞冻过冷云水和凝华增长。

(3)由于霰转化为雹的比例($5.89/10^5$)比冻滴向雹转化的比例($100/10^5$)低得多,故冰雹中97%为冻滴胚,冻滴、霰转化的质量占雹总质量的70%以上,雹增长也以撞冻过冷云水为主,因此说明出现适量的冰晶、雪,存在丰富的过冷水,尤其是雹云发展初期,过冷雨水的存在,对雹形成和增长极为有利。

模拟发现5.5 km高度催化效果最好。以降雹

动能通量(雹云发展12 min)作为检验的物理量,雹灾损失减小86%。说明在云体发展阶段,最好是在雹胚尚未形成或初始回波出现时,及时将AgI播入云中上升气流极值高度效果最好,因为这里也是过冷水含量的极值区。

许焕斌,段英^[20]针对冰雹云中有关水凝物的累积和过冷水消耗中的疑问和不确定性,利用3维欧拉强对流云模式^[21],给出冰雹云的温、湿、云水场和流场,再通过3维拉格朗日质流群运行增长模式^[20]来描述质粒群在云的背景场中的增长行为。通过上述数值模拟得出的雹云流场和云水场以及质粒群累积特征可以发现,强对流云具有翻滚的对流流场,在主上升气流区两侧的水平风场就具有切变特征,不要求环境风必须具有切变场特征。而且也不要求质粒在运行增长中,其落速的增加,一定要和上升气流速度的增加相一致。冰雹云的回波结构是云中大质粒瞬间分布的反映。模拟给出的340条大质粒的运行轨迹,清楚地显示了强回波主体、前悬回波,弱回波区和回波墙的结构,与观测的实例非常相似^[21]。

上述结果综合了冰雹形成机制的水分累积带理论和循环增长理论,具有比较完善的流场结构特征和微物理过程模型。

许焕斌针对当前防雹原理中的疑问和解决这些疑问的近期进展,提出了新的冰雹增长机制概念模型^[23]。

虽然人工影响天气的数值模式模拟取得了突破性进展,但成功只是初步的。与实况相比仅是轮廓性的相似,模拟结果只可定性应用。今后要随着大气物理学的发展,不断改进模式性能。

4 冰雹云监测方法

对于一块积云,准确了解它的发展消亡情况,移动路径,判断它是否是雹云等信息,对防雹减灾作业的决策是至关重要的,只有这些信息,才能判断和确定是否作业,何时作业,作业部位在哪里以及作业量多少等防雹作业中所需确定的基本参数,而这些信息的获取需依靠先进的探测仪器。

我国在冰雹云的监测方面有很大发展。从20世纪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,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

的通讯和计算机已在冰雹云的监测中广泛应用。目前,全国布网的多普勒雷达已广泛应用于冰雹云监测。初步发展了由人工防雷研究成果,计算机和通讯设备组成的人工监测和防雷专家系统。这些系统的发展和完善,将在人工防雷中起到十分有效的作用。

4.1 利用常规雷达和双线偏振雷达相结合,建立相应雷达识别雹云的指标

张鸿发等^[25]用 C 波段双线偏振雷达,在试验期间观测到 4 例强对流暴雹演变过程的定量回波资料,分析雹云不同浓度阶段的回波量和偏振特性的关系,发现 Z_H 和 Z_{DR} 双参量对判别降雹具有明显优势。其中差分反射率因子定义为

$$Z_{DR} = 10 \lg (Z_H / Z_V) \quad (1)$$

式中 Z_V 为垂直偏振辐射的雷达反射率因子, Z_H 为水平偏振辐射的雷达反射率因子^[26]。冰雹的 Z_{DR} 往往 ≤ 0 dB。

用 L_{DR} (线退偏振比) > -35 dB,可以识别有冰雹区域。其定义为:

$$L_{DR} = 10 \lg (P_c / P_p) \quad (2)$$

式中 P_c, P_p 分别为雷达接收的目标后向散射功率中的正交分量和平行分量。

具有双线偏振和多普勒功能的多参数雷达用于冰雹云的监测识别,效果会更好。因为它们不仅可获取常规雷达所能获取的雹云相关信息,还能获取云内粒子的相态和气流结构信息。这些信息在雹云的识别和作业部位的选取方面更有用^[27]。

雹云的早期识别是一个难题,因为这时它们和雷雨云非常相似。有的把回波顶高度的变化快慢作为判别指标。如果云顶在短时间内升高很快,说明上升气流强烈,发展成雹云的可能性就越大。这可作为对雹云早期作业的判据。

4.2 利用闪电定位系统监测和识别冰雹云

冰雹云一般都伴有强烈的雷电活动。冰雹云产生发展的同时,也是云内电荷产生和积累较快的时候。通过对雷电研究发现,雷电信息在防雷减灾工作中有很大的应用潜力^[28]。

(1)负地闪的空间位置对应风暴强上升气流区和风辐合汇聚区,而正地闪多发生在风暴初始发生和消散阶段。据此可以识别冰雹云的发展期和消亡期,负地闪的位置为作业部位的选取提供了依据。

(2)某些雹暴天气过程中对地闪电的位置移动较之雷达强回波有约 30~40 min 的超前性,据此可

作为降雹的短时预报依据。

(3)利用闪电频数区分雷雨云和冰雹云。在平凉的野外实验中发现,当云闪电频数达到 100 次/5 min 以上时一般是冰雹云,而且降雹时间与闪电频数的最大时间有 10 min 的滞后性。闪电频数被用于雷暴云的监测和冰雹云的预警。配合天气雷达的观测,其识别准确率达 80% 以上。

周筠君等利用 1997 年设在陇东地区的闪电定位系统及双线偏振雷达资料,分析研究了该地区冰雹云系发展演变及其地闪的关系。结果表明,在降雹前 30 min 左右时,每 5 min 地闪频数陡然上升,降雹前 18 min,每 5 min 地闪频数平均上升为 3.5,每 5 min 地闪频数的最大值一般出现在开始降雹前 16 min 到前 6 min 之间,在冰雹云演变的发展、成熟和消散 3 个阶段中负地闪数远大于正地闪数,并且起着主导作用。冰雹云中心的冰相粒子含量变化与地闪数变化相对应,间接表明冰雹云起电机机制主要以非感应起电机机制为主^[29]。

4.3 利用卫星遥感监测和识别冰雹云

自 1997 年以来,我国已发射了两颗“风云二号”系列气象卫星,多通道、多光谱的卫星遥测和反演技术在云物理和人工防雷技术上获得了一些开发和应用。

白洁等^[30]利用 GMS 静止气象卫星探测所得到的红外云图资料,用计算机图象学技术来研究强对流云团的识别和追踪,以求能够准确、及时地发现并追踪象强对流云团这种能够造成强烈灾害的天气系统。对红外云图的图象处理,提出区域平滑滤波和阈值剔除相结合的强对流云团过滤算法,对于过滤出的强对流云团,应用图象处理中轮廓编码法的 T 算法和 IP 算法提取出它的边界、边界初始点。张水平等^[31]给出了一种利用高分辨率红外卫星云图的估算模式,得到中尺度对流云团内垂直上升速度,该方法可定量地揭示中尺度对流发展演变特征。马禹等^[32]指出,对流云团是冰雹云的主体。新疆降雹云团尺度小、形状不规则、云顶温度较高。王旭等^[33]利用静止气象卫星逐时红外云图资料,给出了喀什地区冰雹天气的中尺度云团特征。

卫星遥感监测冰雹云的技术作用日益明显。但是,我国已经发射的气象卫星遥感监测仪器都属于光学遥感的范围。在微波遥感和主动遥感方面还没有起步。今后应当加强科研的力度。在开展卫星定量遥感方面,还要做艰苦的工作。

4.4 雹云识别的物元可拓模型^[34]

雹云识别是一个多参数的模式识别问题。应用物元可拓思想将单参数雹云识别的不相容性转化为相容性问题。通过构造雹云和雷雨云2类样本的经典物元和节域物元,根据计算出的待识别云体与2类样本云体之间的关联度大小,进行雹云识别。该方法用于成都地区雹云识别结果的正确率达85%以上。

5 冰雹预测方法

5.1 数值模式预报

用云模式来预报当天冰雹天气的方法得到广泛应用,当前用得最多是1维模式,其它2维和3维云模式也有用于当天冰雹天气预报的。伍志方等^[35]应用2维冰雹云模式,模拟分析了渭干河灌区一次冰雹云过程的流场结构和云中含水量等宏微物理量的分布及演变,并用1995年7~8月的探空资料,进行冰雹预报试验。结果表明,本模式可以真实地模拟出适合于冰雹产生的环境流场、温度场、湿度场的分布及其演变过程,还可模拟出多单体雹云的发生、发展演变过程。根据大气层结稳定度,选择不同的热扰动强度,可使空报次数明显减少,模式准确率提高到69.3%。由于采用了可描述流场发展过程的2维雹云模式,加入了风场信息,因而能够模拟出雹云中的流场结构,为预报员提供了更多的预报信息。

5.2 单站预报模型

张鸿发等^[3]根据雹云形成的环境条件,总结雹云概念模式,把冰雹云数值模式与微机化单站统计预报模式相结合,指导人工防雹中降雹天气预测,初步建立了根据单站统计预报模式计算的物理量,来确定3维冰雹云数值预报模式初始参数值的方法,使得用冰雹云数值模式进行预报计算时选用的扰动参数更具科学性。在此基础上综合分析单站预报模式与冰雹云数值模式产品,并给出预测报告,内容包括天气类型(例如暴雨、冰雹、雷雨、阵雨)等极可能发生的概率,特别是降雹的可能性。当有强对流天气时,预测最大云顶高度,最大上升气流速度的高度、0℃层和-20℃层高度以及降雹强度、冰雹可能大小。

在1999年夏季预报试验中,综合预报对雹日和非雹日的准确率的 TS_{total} 达86%,预报日准确率的TS评分 TS_{hail} 为67%。比较发现,综合预测比单独使用冰雹数值模式预报或单站预报模式预报的结果

要好;对于降雹天气 TS_{hail} 综合预测结果与单独使用冰雹云数值模式结果相同。

6 人工防雹技术

近年来在防雹技术手段方面有较大改进,建立和发展了以“三七”高炮及内装AgI的炮弹为主的防雹体系。继而,中国气象科学研究院人工控制天气研究所改进和提高了炮弹内AgI的成核率。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和航天部41所等研制和试验了多种防雹火箭。地面高炮、火箭催化防雹技术能快速将大剂量成冰核撒入云中。利用雹云模式模拟研究了雹云发展特征和演变过程。通过数值试验展示了适当的人工引晶可以减少地面降雹增加降雨;指出防雹作业方法(时间、部位、剂量等)对效果影响很大,必须严格掌握。先后有20个省、市、自治区通过雷达等技术装备监视冰雹云、采用各种指挥系统实施防雹作业,取得了减少冰雹灾害的效果^[3]。

我国科学家大量的野外防雹作业实践,观察到“爆炸”和“闪电”对冰雹的形成有一定影响,并把爆炸方法应用到防雹减灾实验和作业中。爆炸法防雹,属于防雹概念的第6种,即要云内引起动力效应。

许焕斌等^[3]指出,前苏联在防雹作业中采用高炮弹、火箭等,均有爆炸作用参与影响,防雹效果显著。山东、陕西、四川、贵州、甘肃、黑龙江等20多个省市持续开展了多年的高炮人工防雹作业,实践表明,利用高炮进行人工防雹作业是一种有效的方法^[36,38-58]。

在人工防雹作业中,我国所使用的“三七”高炮弹,大部分含有一定量的AgI,含有AgI的炮弹(火箭弹)在冰雹生长区或上升气流区附近进行小部位、大剂量的定点快速序列爆炸,可以大量增加云中胚胎数目,争食云中含水量,改变或影响云的微物理过程。另一方面可能短时破坏或影响上升气流结构。

在云中适当部位爆炸对雹云的作用可能有:(1)短时间削弱或切断上升气流。使用“三七”炮弹进行定点序列快速爆炸的时间间隔最好控制在100s内,这样才会连续不断地对上升气流产生影响。(2)爆炸触发过冷水滴冻结。实验表明,一定强度的冲击波能够触发过冷水滴冻结。(3)爆炸使冰雹变成软雹。从1500m爆炸高度下落也要2min多,因此,他们认为只能是爆炸波直接作用引起冰雹变软,

爆炸波产生的空腔作用而振裂冰雹形成软雹。

刘晓天根据唐河的面积和冰雹路径,确定了炮点的布局;根据实践经验,确定了对系统性降水云团和对流云作业的时机及作业部位,并介绍了1999年5月9日的防雹作业过程及作业效果^[39]。刘耀武针对因受地形影响,咸阳市北5县多冰雹的情况,防雹采用高炮联防作业方式,根据雹云特征采用不同射击组合方式和准确的射击部位、时机,有效地发挥联防炮位火力^[49]。郭巍通过多年防雹作业经验总结了高炮防雹作业的6种方式和对用弹量做出统计分析和估算。他根据雷云的不同方向、距离、高度,设计防雹作业有6种射击形式:(1)前倾梯度射击组合。(2)垂直梯度射击组合。(3)水平射击组合。(4)同心圆射击组合。(5)后倾射击组合。(6)侧向梯度射击组合。在防雹作业中,高炮催化用弹量主要根据雷达观测和探空资料估算雹源体积、含水量和防雹弹的成核率来确定,并给出了计算公式^[47]。江智全将WR火箭、JFJ火箭与“三七”高炮3种人工影响天气武器的主要性能、技术参数加以对比,结合实践经验,根据天气状况合理使用人工影响天气装备,使现有人工影响天气武器发挥最佳效能,提高人工影响天气效益^[44]。范广平利用闪电定位仪、711雷达2图重叠进行相关比较定位,对判断雷暴的位置,准确及时地指挥高炮进行人工防雹作业是一种有效方法,能够适时指挥高炮进行人工防雹作业,提高作业准确率和效果^[40]。

BR-91-Y高效AgI焰剂用于制作人工影响天气的催化工具,对目标云实施催化作业。它的成核率高,核化速率快,能节约白银,提高AgI的使用,比爆炸分散AgI方法的成核率提高3~4个量级,因而可增加人工影响天气的效果。BR-91-Y焰剂的特点在于在较高温度段有比其它焰剂更高的成核率,因此能拓宽对被催化云温度的要求,增加催化机会;同时它有很高的核化速率,特别适合于要求在短时间内迅速产生冰晶的对流云(积云、雹云)及风速大的地形云等生命史短的云的催化,因此在防雹及积云催化中更能显示其优越性。目前,BR-91-Y焰剂已推广应用。

“九五”国家科技部攻关计划“农业气象灾害防御技术研究”、“人工防雹技术研究”等一些科研项目,取得以下突出成果^[36]:

(1)雷达识别技术研究将观测统计分析 with 3维冰雹云数值模拟结果相结合,获得了准确率较高

(86%)、数目较少(2个)的识别指标。该指标便于作业使用,使识别雹云的时间可提前5~10 min,对提高防雹效果有重要意义。

(2)通过大量的数值模拟和现场试验,系统研究了高炮和火箭的催化技术,给出了催化时间、催化部位和催化剂量3个指标的防雹优化催化技术。

(3)在单项技术研究的基础上,专题做了技术集成,形成了包括冰雹天气预测、冰雹云监测,识别和催化等技术和环节优化组合的人工防雹技术系统,规范了试验区人工防雹的流程,提高了防雹技术的整体性能。该专题注重科研与防雹作业相结合,旬邑试验区已成为陕西省人工防雹的示范区。

为了提高防雹减灾工作的效益和作业的科学性,王致君等研制了防雹减灾专家系统^[57]。防雹专家系统主要理论和技术由5部分组成:(1)冰雹天气预测;(2)冰雹云监测;(3)作业技术;(4)效果检验技术;(5)信息库。该系统是一个知识库,集成了防雹减灾工作需要的有关理论技术和数据。对于防雹减灾工作者它可作为防雹减灾作业的决策工具,用于指导防雹减灾作业。对于科研人员它是一个研究平台,可以提供研究工作所需要的观测数据和设备。

7 防雹效果的评估方法

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^[3],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%。

王千元对内蒙古河套平原高炮防雹效果进行了分析^[58],针对防雹开展前后时期平均雹面积对比,进行了分区回归试验。为了提高统计检验功效,并对峡谷个面积较大的试验区分别进行协变量回归试验。得出的防雹效果相对值,分区回归试验和协变量回归试验两者一致性很好(约90%±1.5%)。由此说明该地区的防雹作业是肯定有效的。

为了探讨防雹效果,本文分别介绍近几年来使用的几种防雹效果的评估方法^[37]。

7.1 序列试验

序列试验是最简单的统计效果检验方法。这种方法的要点是根据试验区某个变量的历史资料,统计得到该地区的历史平均值作为试验期的自然降雹期待值,然后与实测值比较得出人工防雹的效果估计值。

使用该方法的具体步骤如下:

(1)确定统计量。为了进行效果估计,选用防雹地区的一个变量作为统计变量。

(2)历史平均值。根据防雹地区防雹前的历史资料得出该地区的统计变量的历史平均值。

(3)选定检验方法。进行序列分析时,一般采用秩和检验法。在我国山西昔阳、河北满城、新疆昭苏、广西巴马等地的试验中,都曾采用秩和检验法检验防雹效果。

7.2 区域回归试验

区域回归试验不用历史平均值,只借助于一个或一个以上的对比区,并根据历史资料建立目标区与对比区的历史回归方程,若两区相关性较好,可进行参数检验和预测,即用对比区试验期的雹灾面积估计试验期目标区的自然降雹面积,这个值称为目标区自然雹灾面积的期望值,这种方法叫做区域控制法。其具体步骤是:(1)对比区的选定;(2)变量的选择;(3)分析与计算;(4)多次试验的平均效果。

该方法的主要缺点是:

(1)理想的对比区实际上难以选择好,导致了回归分析法灵敏度不高。

(2)由于历史资料不够长,不同的对比区,建立的回归方程,可以得出不同的结论。

(3)依赖历史记录。对比区与目标区的历史记录常常太短,难于满足建立回归方程的要求。

(4)不能预测历史记录上没有出现过的天气现象。

7.3 随机试验

由于理想的对比区难以选择以及试验地区的历史记录太短,很难满足建立回归方程的要求。为了排除这些困难,有的地区采用随机试验方法。把宜于防雹作业的机会分成两组,按照随机性规则决定一组作业,一组不作业,留作对比,这样不依赖历史资料,因此在选择目标区时就不受历史资料的限制。在目标区可以专门设置代表性较好的测雹站网进行观测,按照随机抽样理论,不管作业不作业,照常进行观测记录,获取两组资料。

7.4 雷达回波参量对比法

为了探讨防雹作业是否抑制了冰雹云的发展和冰雹的形成,一般选用识别冰雹云的雷达回波参量在作业前后的变化进行对比分析,并对其变化量(即差值)进行检验,然后得出防雹作业效果。

7.5 落地冰雹动能法

近20 a来,国内外一些科学家选用了与冰雹大

小、雹块数密度、雹灾损失有关的冰雹动能、动能通量以及一些冰雹参量作为评估防雹效果的检验量。通过有关计算,对作业与不作业(或试验区与对比区)情况下的检验量的差值进行对比分析,并对其差值进行显著性检验,最后确定防雹作业效果。

此外,还有双重因子估计法等,本文不再一一介绍。

国内约有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,得到了当地一些单位和群众的肯定和好评。人工影响天气一定要有效果评估。这是人工防雹作业中必不可少、难以回避的重要环节之一。但是由于云和降雹自然变率大,评估对象具有不确定性,不同的时空条件下各种因子互相制约,复杂多变,因此进行严格的效果检验,在国内外都还继续需要研究和实践。

8 主要科学问题

自20世纪90年代以来,随着科学技术的巨大进步,信息技术等高新技术的广泛应用,使得人工防雹科研和作业取得了跨越式发展,人工防雹的科技水平步入了发展中国的先进行列,从而得到了政府和社会各界的充分肯定。但也应当清醒地看到,还存在着一些问题。全球变暖对冰雹气候变化影响的研究是缺少的,人工防雹在基本理论、作业客观定量化、效果评估、对冰雹云物理特征的认识及数值模拟的应用等方面还有待于改进^[59]。要解决这些问题,有必要从以下方面开展研究。

(1)继续提高人工防雹理论水平。尤其是集中于自然和催化后的云特征、雹胚特征、来源和生长特点、催化剂扩散和浓度以及雹云结构、微物理和动力过程等,要研究出针对不同类型雹暴及其适用的人工防雹理论和方法,对雹云进行及时有效地监测、识别和催化作业。要加强针对不同地区、不同季节、不同云系的人工防雹等科学概念模型研究。目前的云数值模式仍有许多不足之处,需要在动力学、微物理学以及多尺度相互作用方面继续改进,特别是要搞好数值模拟结果同实测资料的对比分析。

自20世纪90年代以来,冰雹形成机制的基本物理模型已经建立,模式的结构和功能不断完善,已从云雨微物理或云宏观物理的环节性研究步入了宏观相耦合的全过程研究,建立了一系列模式系统。

在一些机理探讨和实例模拟中获得了成功,但细究起来,成功只是初步的,就模式设计而言,在处理各种物理环节中,所依据的观测和实验资料所提的物理模型有相当大的局限性,与实况相比也只是轮廓性的相似,因而目前模拟结果尚只能定性地应用,一些关键问题仍然是模糊的,例如在迅速发展变化的冰雹云中,雹胚是如何形成的?冰雹又如何长大的?冰雹怎么形成分层结构?这些都需要进一步的具体研究,并希望寻找出规律性的结果。今后,应当在当今知识和技术装备的基础上,进入新一轮的观测—实验—理论分析—模式改进的循环发展研究过程。

(2) 加强全球变暖对冰雹气候变化影响的研究,逐步开展冰雹短期气候预测业务,使冰雹短期和短时预报逐步走向定时、定点和定量。

(3) 建立和完善不同地区和季节选择作业条件的指标和判据,提出有针对性、有充分科学依据的作业方案。近年来研制的高效催化新技术还需要进一步的完善和推广使用,还缺乏不同地区和季节的催化技术、催化概念、监测指挥、催化指标判据的系统集成,这需要作为一项系统工程来研究解决。

(4) 用多普勒雷达和卫星等资料确定冰雹云微物理参数的宏观特征,探索具有代表性和普遍性的冰雹云典型的闪电频谱和方位特征。

(5) 由于目前还无法做出准确的定量降雹预报,加之自然降雹的变率大,而人工影响天气所引起的变化幅度常低于自然起伏量,因此,人工影响天气作业效果检验十分困难。目前主要采用的统计学检验方法仍有争议,物理检验方法由于缺乏很好的监测手段和作业设计而没有得到广泛应用。具有偏振和多普勒技术的多参数雷达,将能在这方面发挥很好的作用,应大力开展这方面的研究。研究既客观又实用,并将统计学方法和物理学方法相结合的人工影响天气作业效果检验方法是当务之急。

参考文献:

- [1] 宋显荣. 防雹科研工作的现状和前言[J]. 江西气象科技, 1988, (增刊): 21-26.
- [2] 胡志晋. 人工影响天气的科技发展前沿[A]. 21世纪初大气科学回顾与展望[M]. 北京: 气象出版社, 2000. 172-175.
- [3] 李大山. 人工影响天气现状与展望[M]. 北京: 气象出版社, 2002. 163-206, 251-324, 400-402.
- [4] 孙安平, 言穆弘. 播撒金属丝对雷暴云电结构影响模拟研究[J]. 高原气象, 2000, 19(1): 32-42.
- [5] 孙安平, 言穆弘. 三维强风暴动力—电耦合数值模拟研究[J]. 高原气象, 2000, 19(4): 435-440.
- [6] Sun Anping, Yan Muhong. Numerical Study of Thunderstorm Electrification With A Three-Dimensional Dynamics And Electrification Coupled Model: Model Description And Parameterization of Electrical Processes [J]. ACTA METEOROLOGICA SINIA, 2002, 16(1): 107-122.
- [7] 孙安平, 言穆弘, 张义军. 三维强风暴动力—电耦合数值模拟研究, I: 模式及其电过程参数化方案[J]. 气象学报, 2002, 60(6): 722-731.
- [8] 孙安平, 言穆弘, 张义军. 三维强风暴动力—电耦合数值模拟研究, II: 电结构形成机制研究[J]. 气象学报, 2002, 60(6): 732-739.
- [9] 周筠君, 陈成品, 刘黎平, 等. 青藏高原那曲地区冰雹天气系统中的大气电场研究[J]. 高原气象, 2000, 19(3): 339-347.
- [10] 郭凤霞, 张义军, 郝秀书, 等. 雷暴云不同空间电荷结构数值模拟研究[J]. 高原气象, 2003, 22(3): 268-274.
- [11] 许焕斌, 王思微. 三维可压缩大气中的云尺度模式[J]. 气象学报, 1990, 48(1): 80-90.
- [12] 许焕斌, 段英. 云粒子谱演化中的一些问题[J]. 气象学报, 1999, 57(4): 450-460.
- [13] 黄燕, 徐华英. 播撒碘化银粒子进行人工防雹的数值试验[J]. 大气科学, 1994, 18(5): 612-622.
- [14] 许焕斌. 云系模式研究: 云场的宏微观结构模拟[J]. 气象学报, 1995, 53(3): 349-357.
- [15] 许焕斌, 段英. 冰雹形成机制的研究并论人工雹胚与自然雹胚的“利益竞争”防雹假说[J]. 大气科学, 2001, 25(2): 277-288.
- [16] 许焕斌, 段英, 吴志会. 防雹现状回顾和新防雹概念模型[J]. 气象科技, 2000, 28(4): 1-12.
- [17] 洪延超. 三维冰雹云催化数值模式[J]. 气象学报, 1998, 56(6): 641-653.
- [18] 孙繁铀. 对流云中冰相过程的三维数值模拟: (1) 模式建立及冷云参数化[J]. 大气科学, 1990, 14(4): 441-453.
- [19] 洪延超. 冰雹形成催化防雹机制研究[J]. 气象学报, 1999, 57(1): 30-44.
- [20] 许焕斌, 段英. 对流(冰雹)云中水凝物的积累和云水的消耗[J]. 气象学报, 2002, 60(2): 151-160.
- [21] 许焕斌, 王思微. 三维可压缩大气中的云尺度模式[J]. 气象学报, 1990, 48(1): 80-90.
- [22] 许焕斌, 段英. 冰雹形成机制的研究并论人工雹胚与自然雹胚的“利益竞争”防雹假设[J]. 大气科学, 2001, 25(2): 277-288.
- [23] 许焕斌. 防雹的原理和设计, 人工影响天气(十四). “全国人工影响天气办公室”印, 2001, 78-91.
- [24] 黄美元, 徐华英, 周玲. 中国人工防雹四十年[J]. 气候与环境研究, 2000, 5(3): 318-328.
- [25] 张鸿发, 郝秀书, 李致君, 等. 偏振雷达观测强对流雹暴云[J]. 大气科学, 2001, 25(1): 38-48.
- [26] 章澄昌. 人工影响天气概论[M]. 北京: 气象出版社, 1992. 84-98, 211-214, 198-201, 184-185, 242-243.
- [27] 中国科学院大气物理研究所. 人工防雹减灾技术研究. 国家重点科技攻关计划专题执行情况验收自评报告[R]. 2000, 4-6, 31-33.

- [28] 刘欣生. 雷电物理及人工引发雷电研究十年进展[J]. 高原气象, 1999, 18(3): 266-271.
- [29] 周筠君, 张义军, 郑秀书. 陇东地区冰雹云系发展演变与其地闪的关系[J]. 高原气象, 1999, 18(2): 236-244.
- [30] 白洁, 王洪庆, 陶祖钰. 卫星红外云图强对流云团的识别与追踪[J]. 热带气象学报, 1997, 13(2): 158-167.
- [31] 张水平, 石汉青. 利用卫星资料估算中尺度对流云团上升速度的一种方法[J]. 解放军理工大学学报(自然科学版), 2001, 2(5): 95-99.
- [32] 马禹, 王旭, 李进忠, 等. 新疆降雹云团的特征分析[J]. 新疆气象, 2002, 25(2): 7-8.
- [33] 王旭, 阿不里米提·塔西, 马禹. 喀什地区特强冰雹天气云图特征[J]. 新疆气象, 2002, 25(2): 11-12.
- [34] 李祚泳, 蔺雷, 邓新民. 雹云识别的物元可拓模型及其效果检验[J]. 高原气象, 2001, 20(2): 197-201.
- [35] 伍志方, 张春良, 许焕斌. 应用二维冰雹云模式做冰雹预报[J]. 高原气象, 2000, 19(1): 121-128.
- [36] 中国科学院大气物理研究所. 人工防雹减灾技术研究. 国家重点科技攻关计划专题执行情况验收自评报告[R]. 2000, 4-6, 31-33.
- [37] 王雨增, 李凤声, 伏传林. 人工防雹实用技术[M]. 北京: 气象出版社, 1994. 63-65, 88-104.
- [38] 洪延超, 黄美元, 张纪淮. 人工防雹减灾技术的研究. 中国科学院资料室(96200107), 2000, 12.
- [39] 刘晓天, 刘青松. 高炮人工增雨防雹作业的时机和部位[J]. 河南气象, 2000, (4): 35-36.
- [40] 范广平, 王建, 扬继安. 雷达与闪电定位资料在高炮人工防雹中的应用[J]. 气象, 28(4): 40-41.
- [41] 秦长安, 刘玉超. 北京市高炮防雹效果和经济效益分析[J]. 中国减灾, 2001, 11(2): 36-37.
- [42] 邓安中. 我省实施 37mm 高炮防雹工作存在的问题与对策[J]. 中国减灾, 2001, 11(1): 17-18.
- [43] 卿清涛. 成都平原 37 高炮防雹效果的研究[J]. 四川气象, 1996, 16(1): 48-50.
- [44] 江智全. WR 火箭、JFJ 火箭与三七高炮在人工影响天气工作中的应用对比[J]. 四川气象, 2003, 23(1): 63-64.
- [45] 赵学业, 山义昌, 郑学山. 高炮防雹作业效果检验方法的研究[J]. 山东气象, 1994, 14(1): 17-19.
- [46] 夏军, 徐太安. 一次高炮消雹作业过程的效果分析[J]. 山东气象, 2000, 20(2): 45-46.
- [47] 郭巍. 高炮防雹作业方式和用弹量初探[J]. 黑龙江气象, 2003, 2: 34-37.
- [48] 马延庆, 朱海利. 咸阳市北五县高炮防雹联防作业效果分析[J]. 陕西气象, 1994(1): 29-31.
- [49] 刘耀武, 马延庆, 朱海利. 咸阳市北五县高炮防雹联防作业技术方法探讨[J]. 陕西气象, 1994(3): 38-40.
- [50] 王莉萍, 罗德建. 高炮人工增雨消雹作业参数的设计[J]. 湖北气象, 2002, (2): 7-9.
- [51] 瓦黑提, 施文全, 王红岩, 等. “三七”高炮防雹对昭苏县气象站雹日数影响的统计分析[J]. 新疆气象, 2003, 26(1): 25-26.
- [52] 郭巍. 高炮防雹作业方式和用弹量初探[J]. 黑龙江气象, 2003, (2): 34-37.
- [53] 卫红德. 从“6·7”雹灾看我县高炮防雹的效果[J]. 山西气象, 1995, (2): 63-64.
- [54] 宓建业, 吴新. 高炮防雹经济效益评估[J]. 贵州气象, 1996, 20(4): 27-30.
- [55] 唐渝萍. 遵义 950509 冰雹生成的条件及高炮作业[J]. 贵州气象, 1996, 20(4): 24-26.
- [56] 谢纪民, 李培仁, 赵丽萍. 山西省运城市防雹高炮设置体系分析[J]. 山西气象, 2002, (4): 24-25.
- [57] 王致君, 冯锦明, 楚荣忠, 等. 防雹减灾专家系统[J]. 高原气象, 2001, 20(4): 461-467.
- [58] 王千元. 内蒙古河套平原高炮防雹效果分析[A]. 全国云物理和人工影响天气会议文集[C]. 北京: 气象出版社, 1989. 223-236.
- [59] 郑国光. 在第十三次全国云降水物理和人工影响天气科学讨论会闭幕式上的讲话, 人工影响天气(十四). “全国人工影响天气办公室”印, 2001, 16-29.

New Development of Hail Research in China and Main Scientific Problem

DONG An - Xiang, ZHANG Qiang

(Key Laboratory of Arid Climatic Change and Reducing Disaster, Institute of Arid Meteorology, CMA, Lanzhou 730020, China)

Abstract: Development of hail suppression in China since 1990 are briefly summarized from the point of sciences and techniques in this paper. Some problems of sciences and techniques for hail research and hail suppression are analyzed, some suggests for them are indicated.

Key words: China; hail; research; development