

专题评述

冰雹和防雷研究述评

王昂生 黄美元

(中国科学院大气物理研究所)

冰雹是一种严重灾害性天气。我国冰雹灾害的危害很大,二十多个省市,八百多个县都遭受不同程度的雹灾,它影响了农业的丰收,因此防雷研究已成为我国气象科研中的重要课题之一。就科学意义来说,冰雹与暴雨、雷暴和龙卷等中小尺度天气具有不少共性,它涉及云物理学、中小尺度天气学、雷达气象和大气探测等方面内容。近十年来有关冰雹研究和人工防雷研究的进展也推动了上述学科的发展。本文就有关冰雹研究和防雷研究中的几个问题作一评述。

几种冰雹云类型

认识冰雹云结构和冰雹形成的物理过程是有效进行人工防雷作业的依据。近年来不少国家采用了大气科学中各种先进探测技术对冰雹云进行观测研究,试图获得完整的雹云结构。

1959年 Browning^[1] 和 Ludlam^[1] 用五部雷达对英国沃肯汉地区的一次强烈雹云进行了观测研究,这是近十余年来人们对冰雹云结构详细研究的一个起点,但这次研究中气流场是推测得到的。在以后的十几年里,对冰雹云中气流场结构和水汽凝成物分布这些成雹的基本因素又进行了大量观测研究,对冰雹云发生发展的物理机制,取得不少深刻的认识。

在冰雹云中,有一类称作“超级单体”的雹云,发展最为强烈。它由一个大单体构成,生命史较长,个别可达六小时以上。这类冰雹云在西风带里普遍存在着。超级单体中有一对突出的上升和下沉气流(见图1)^[2] 上升气流从雹云右前侧进入云内,倾斜地向上升高,上升速度随高度增大,在云体中上部达到最大值,然后迅速减小。这股流入云中的上升气流在对流层上部随高空风向外流出,形成庞大的云砧。在对流层中部有一股强风速的冷气流,它从云后部流入云中,冷气流的低位温有利于下沉,云中降水拖带作用使它变成下沉气流,它与上升气流相峙。下沉气流在近地层向四周扩散,大部分随着向后方流出的气流一起从云中流出,小部分重新进入上升气流,加强云的发展。在雹云前面的低空是流入层。地面入流和出流交界处有一条飑锋。在飑锋附近有明显的风切变。同时,伴随着大风大雨。由于下沉出流强度不同,大小不等的冰雹就降落在飑锋后边远近不同的地方。

1977年5月30日收到。

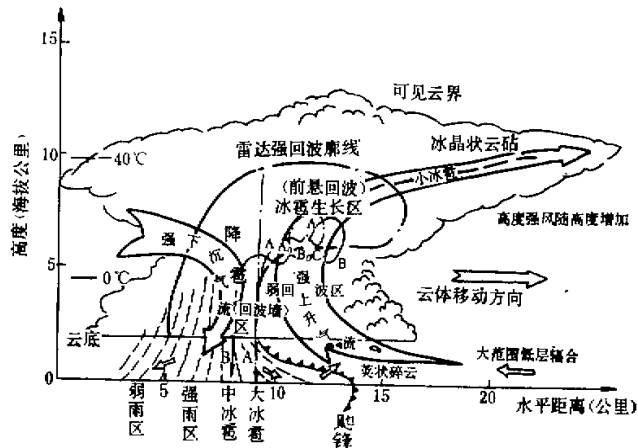


图1 “超级单体”冰雹云结构图。

与这个气流场相对应,出现了特殊的水汽凝成物场。在最大上升气流层以下的上升气流区回波较弱,称为“弱回波区”(或称“回波穹窿”);在上升气流最大区附近,由于积累着大量的水滴和冰晶,容易形成冰雹,这里是冰雹生长区,在回波形态上似悬于空中,故有“前悬回波”之称。弱回波区后,降水常造成直立或陡峭的“回波墙”。由于云中高低层风向具有交角,入流出流不在同一剖面以及附近流场的动力影响等原因,入流的上升气流易有旋转运动,对应在雷达观测上出现了钩状、涡旋状或外伸指状等冰雹云的特殊回波。这些气流影响造成的特殊回波,不但为识别冰雹云提供了指示,更为研究雹云结构、揭示物理本质提供了重要线索。

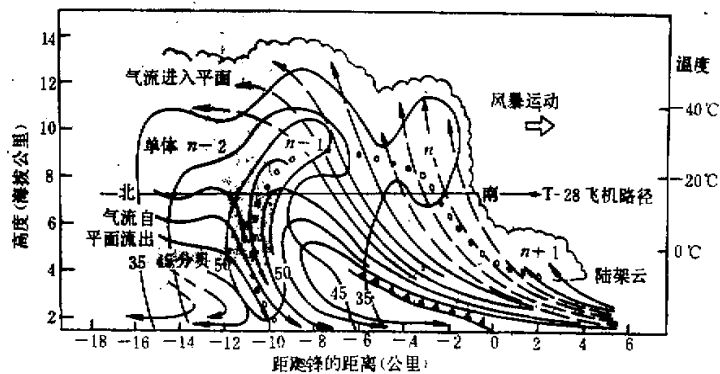


图2 多单体冰雹结构图

另一类冰雹云称做“多单体”冰雹云。这类冰雹云同时存在几个单体,每个单体都经历了初生、发展、成熟和消亡几个阶段。在同一时刻几个单体是处于不同发展阶段,新生单体不断在云体移向的右前侧出现,而老的单体在其左后侧消亡,云整体以传播方式前进。图 2^[3]是一次典型的多单体冰雹云结构,该云体中先后形成过四个单体。新单体不断

在图 2 右部上升气流右前侧出现,而产生降雹降雨后的单体则不断在云的左后侧消亡,冰雹云整体就向右前方传播运动。Browning 和 Ludlam^[4] 曾指出:当回波整体右移时,每个单体是向右上运动的,新生单体是在雹云移向右侧形成,逐渐发展成熟,最后在雹云移向左侧消亡(见图 3)。

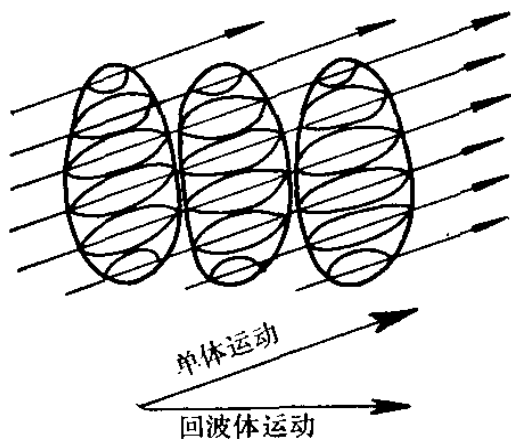


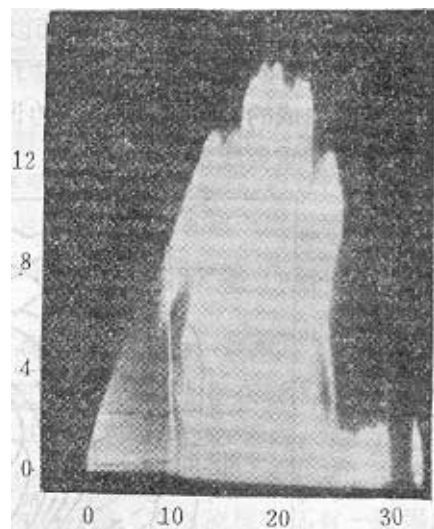
图 3 多单体冰雹云运动时单体传播示意图(引自^[4]文)。

上述两类冰雹云结构研究是近年大气观测中的一个成果,它概括了较强冰雹云基本特征,对人们认识冰雹云形成和相应采取防雹措施的研究很有价值。据苏联某些统计,在各类冰雹云中属于超级单体的只有 8%,但所造成的灾害却占总数的 50—75%;在国内也有一些地方有类似情况,即占总受灾面积相当大比例的是由少数几次严重雹灾造成的,所以我们应当特别注意这些雹云。

还有一类称为“对称雹云”的云体,它们多为热力作用形成。对称雹云的特征是垂直展发比较强烈,呈轴对称向上发展,雷达回波为柱

状,多在水平风速切变不太强烈条件下出现,它与周围空气交换较弱,云砧尺度不大,生命史较短。1976 年 7 月 22 日我们在山西 昔 阳 县,观测到一次对称雹云,从图 4 的回波上可以看到,云体垂直发展旺盛。这时地面已开始降雹。这种云体结构如图 5 所示,云体以 AB 线为轴,近似对称,气流把附近湿热空气卷入云中,垂直气流随高度增大,在中上部达到最大,以后减弱并向两侧辐散,形成弱云砧,这类云体也可部分形成水量累积。图 5 右图是以左图 AB 线所作剖视图,云体略向左侧运动,云体上升气流入流倾角很大,近似热对流上升,降水粒子在云中形成,它稍离上升气流就垂直降到云的后侧,于是形成两股接近的有组织的上升和下沉气流。地面飊锋比超级单体和多单体冰雹云飊锋要弱,且移动缓慢。实际上,自然界不少弱冰雹都属于对称雹云。由于这类雹云出现频繁且造成局部灾害,所以我们也不能忽视。

(图 4) 回波



水平距离 (公里)

图 4 山西省昔阳县一个 对称雹云的回波照片(RHI),距标:水平10公里,垂直2公里

冰雹形成过程的设想

早在人们对雹云结构有较充分了解以前,根据地面冰雹切片观测就已经有人推论了

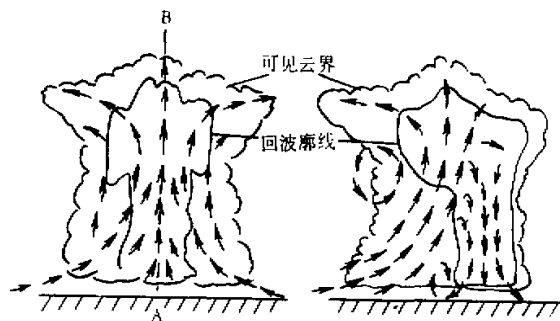


图5 对称雹云结构模式图。左图: 正视图, 右图: 沿左图 AB 线的剖视图。

云中冰雹形成的可能途径。近年来通过云中冰雹生长的理论分析、实验工作和冰雹的同位素分析, 进一步研究了冰雹在雹云上升气流影响下的“干增长”和“湿增长”过程, 结合云中条件, 比较合理地解释了有层结构的的大冰雹在云中形成的云物理本质^[5]。关于云中冰雹的干湿增长微物理过程, 近年来人们提出了以下几种说法。

1. 冰雹在含水量累积区形成。对积雨云垂直气流观测表明, 云中上升气流随高度常呈抛物型分布, 垂直气流在入云前后逐渐增大, 随高度增长, 在云体中上部达到极大, 再向上时则迅速减小。这种分布有利于含水量累积区^[6]的形成, 这里容易满足冰雹生长的条件, 所以叫冰雹生长区, 亦称雹源。云中最大上升气流成为冰雹能长成大小的关键因子, 其上部垂直运动迅速减弱, 于是造成不同大小粒子在这个区间不同高度上排列, 称为“筛选作用”。这些较稳定的悬浮粒子像“吸附层”一样, 与上升气流带来的各种大小粒子碰并粘合, 迅速长大并下落到与其末速相平衡的上升气流层。当冰雹尺度大到最大上升气流无法支托时, 它就从云中降落下来。累积区的假说能解释冰雹为什么能在短时间内形成和长大, 但不能说明冰雹的分层结构。为此有人提出云中有多分布在不同高度的累积区, 但这种说法依据不足。

2. 冰雹的循环增长。在观测基础上, Browning 提出了冰雹循环增长说^[7]。这种假说强调了冰雹粒子在三维气流场中可以上下翻滚, 不时依次处于干、湿生长条件的特点, 于是形成明暗相间的层次。如图 1 所示, 大冰雹就在 A_0-A 路径上运动增长。开始时冰雹胚胎 A_0 被上升气流带入冰雹生长区, 这里水份充足, 垂直气流强, 温度低, 冰雹不断通过水汽凝结和过冷水滴碰并而增长。同时它又为上升气流影响沿 A_0-A 路径运动。在高层温度低、含水量小, 碰并到冰雹上的过冷水滴和冰晶大部能够冻结或粘合, 形成密度较小的不透明冰, 属于干增长; 在冰雹生长区里有大量过冷水滴, 这时碰到冰雹表面的过冷水滴不能全部冻结, 而在冰雹表面形成一层水膜, 再上升时冻结成密度较大的透明冰, 这属湿增长。由于云中上升气流是倾斜的, 下落的冰雹可能重新进入上升气流区里, 又重复上述过程。这样, 经过多次上下翻滚起伏, 冰雹经历了不同温度、含水量和气流场区域, 就造成了有不同层次、不同明暗和密度的结晶环带, 最终长成大冰雹。如沿 B_0-B 路径增长, 由于处于较差的生长环境里, 只形成中等或较小的冰雹。某些冰雹胚胎在上升气流中滞留时间很短, 仅沿 C_0-C 路径形成小冰雹。

3. 胚胎帘造成的冰雹增长。前两类雹云中的冰雹形成过程,虽然对超级单体的冰雹形成有所解释,但对造成最初冰雹生长的胚胎形成未作说明,近年 Foote^[5] 等人的观测表明,气溶胶粒子在强烈上升气流中,由于含水量不足和运动时间短暂,所以不能长到可供循环增长的胚胎大小。他们认为,超级单体雹暴的前悬回波具有供应冰雹胚胎的作用,其形状似帘幕,故称“胚胎帘”。上升气流所携带的气溶胶粒子,大部分无法长成雹胚而被上升气流带至云砧,但其中少量的为云前侧较弱上升气流所携带,生长时间较长,可长得较大。Foote 还认为这部分可以被卷入胚胎帘之中,这里水量充足,上升气流不很强。于是可以长成毫米大小的雹胚。这样的胚胎最后离开胚胎帘,进入超级单体雹云的上升气流里,才可能进入循环生长形成冰雹。

4. 冰雹在多单体雹云中的形成。冰雹在多单体雹云中形成过程是与单体生命史几个阶段密切相连的。这里不需要经历超级单体那种“胚胎帘”增长,因为在单体初生阶段,气溶胶粒子进入的初生“陆架云”时,垂直气流较弱,粒子生长时间长,这儿就起了供应冰雹胚胎的作用。随着雹胚进入发展阶段的较强云体时,云中气流起伏和水量增大,将加速冰雹生长,迅速长大的冰雹在成熟阶段降落。由于多单体雹云不如超级单体强烈,所以冰雹大小,层次等形成都类似前边假说,只是弱些而已。

5. 小冰雹在对称雹云中的形成。人们认为在缺乏强大动力因子触发条件下,热力作用形成的雹云一般多为对称形式,生命史较短,移动不大,降雪范围小,冰雹小而弱。Бартшвили^[9] 提出了小冰雹在对称雹云中形成的看法。基本之点是云中气流低层辐合、高层辐散,在有利的垂直气流分布条件下可造成含水量累积区。这时粒子可以在云中形成上下翻滚的循环增长,条件较好的粒子可形成小冰雹或霰。若存在含水量累积区,则更有利于冰雹形成或长大。

上面提出的几种冰雹形成过程,多数尚属物理设想,它需要观测事实的检验。现有的观测事实还并不充分,有时甚至分歧很大。例如云中是否存在相对稳定的累积区,它的特点和形成过程怎样?目前的雷达观测事实还没有说清楚。冰雹的胚胎是什么?有的观测说,大部分胚胎是冻滴,但另一些观测认为大部分是霰或小冰粒。这些问题直接涉及云中冰雹形成的源地,也就是哪种冰雹形成的设想最为可取。看来,对雹胚胎应很好观测。很可能对于不同的雹云和不同大小的冰雹,其冰雹胚胎的组成也应不同。另一方面上述几种冰雹形成的设想基本上都缺少定量的估计,对冰雹生长所需要的条件说得也很含糊,如为了使冰雹能循环增长究竟需要怎样的气流和微结构条件,在现实的云中条件下,冰雹能否循环增长?长到多大?需要多少时间?没有定量的估计还是不能判断真伪的。

人工防雹原理的研究

十多年来,人工防雹取得了一定的进展。随着人们对雹云结构和冰雹形成的逐渐认识,对人工防雹原理进行了设想和研究。

1. 过量播撒作业。Сулаквелидзе 等^[6]根据雹云垂直气流和雷达观测提出了冰雹形成的含水量累积区原理,从而把整个雹云的影响缩小到累积区,体积上将减少二、三个量级,也就使人工影响作业经济有效,他们认为在一个不太长的时间里累积区含水量近乎不变,

于是提出,在冰雹形成区人工大量增加冰雹胚胎可以争食有限水量,从而限制冰雹生长。

但是,这一原理并不严格,比如对假定冰雹云累积区含水量常定的说法就有争议;又如美国观测到具有多个强上升气流区雹云,就对此原理提出了新问题,等等。看来,这种办法可能适用于多单体雹云、有累积带的对称雹云和比较弱的超级单体雹云,而不能对任何雹云都适用。这些雹云的影响也只有作业时机恰当、累积区判定正确、作业部位准确才可能成功。

2. 影响胚胎帘。苏联防雹办法在美国某些地方实施中显得不大成功^[10],这引起了专门的研究。除了上述疑义外,有人已明确指出,前边办法对称之为原型超级单体冰雹云是无效的^[10]。这就是说在具有强上升气流的原型超级单体雹云中,用过量撒播办法只能使人工胚胎随强烈上升气流迅速进到云砧里,而不可能争食成雹含水量。于是, Foote 等人根据只有经历胚胎帘的粒子才会成功地长成冰雹的设想,提出了影响胚胎帘的撒播原理。这只是一个基于结构观测的设想,还没有实践。不过,这类有一定观测分析的设想还是有益的,因为有时过量撒播的失败正是缺乏对云体类型和结构的细致分析。

3. 爆炸影响原理。我国群众性防雹试验常用的爆炸作业,独具风格,并取得了一定的防雹效果^[13]。国外有人从空腔原理或爆炸引起冰晶化来部分地解释爆炸防雹作用。但我们认为这不是主要原因。据根我们几年观测和实验说明,爆炸对云雾和降水是有一定影响的。在室内实验中我们看到了爆炸波扰动气流的现象。炮击对流云体试验表明:炮击云体顶部可以促进云消,炮击云体下部可以促进短时内云体发展,证明爆炸对上升气流有影响。爆炸影响降水试验也表明:在一定条件下可以促进未降水云体降水或加强已降水云体的降水量,并引起降水雨滴谱加宽、加浓并出现第二极大等现象。在此基础上,我们用雷达观测了炮击作业时的冰雹云体,发现在合适时机和部位进行炮击,出现雹云云顶降低、强度减弱及炮击区产生明显穹窿等现象。由此,我们认为爆炸有可能影响冰雹云,它起着—个初始触发作用,一方面它可以直接扰动垂直气流,另一方面由于与垂直气流处于不稳定平衡状态的降水粒子,在此扰动时间里可造成粒子的大量集中下落,它们的拖带作用在云中及云下将加强下沉气流。在像冰雹云这样的不稳定层结条件下,已经产生的下沉气流将维持并加强,特别是液态水滴的蒸发吸热将促进下沉运动,进而促使云体消亡。在尚未形成大雹块的雹云中,这一作用有可能抑制冰雹的形成。

需要指出的是,苏联采用的过量撒播办法大多采用强爆炸力的炮弹发射,因此爆炸影响不容忽视。过量撒播理论的提出者在 1965 年试验总结^[13]中提到,在取得明显效果试验中,所用碘化银剂量小于理论计算值,作业后看到明显效果的时间远小于冰晶化起作用时间。可见,在这些作业中除了碘化银作用外,还可能存在着爆炸的作用,最近几年苏联已开始有人注意这一问题了^[14]。在美国国家冰雹研究试验中采用了苏联的过量撒播原理,但没有采用强烈爆炸的高射炮弹携带碘化银,这可能是未能取得显明效果的原因之一。

4. 人造下沉气流的影响。我国大跃进年代和以后的人工降水过程中,就已注意到大量投掷盐粉或其他下沉物质时,经常可造成人为下沉气流并导致对流云云消和有云洞出现等现象。近年来国外也有人研究采用人造下沉气流、利用不稳定层结造成对流云体消

1) 黄美元、元雪巧,关于我国人工防雹效果的统计分析(尚未发表)。

亡,并研究运用于防雹上的可能性^[14]。这种设想基于在不稳定层结条件下,人为地制造强烈初始下沉运动有益于抑制冰雹。制造人造下沉气流的办法有:利用大口径炮弹爆炸及其大量碎片飞溅时对气流的拖带、高浓度大剂量气溶胶粒子(如水泥、沙子、水藻等)的集中播撒、喷气飞机近于垂直地向上飞行等等。目前这方面还处在原理性试验阶段。

防雹原理的深入研究是人工防雹进一步发展的关键之一。从当前看来,一种趋势是在更多地认识各种冰雹云的结构和冰雹形成过程的基础上,具体研究过量撒播理论的应用方法和条件,以期取得更好的效果。另一种趋势是探索新的防雹原理。看来,怎样更好地认识和利用雹云中不稳定层结和成雹的特殊条件是大家很注意的课题,爆炸作用值得在这方面进一步深入探讨。

人工防雹的效果

在防雹效果评定方法上世界各国不尽相同,难以细致比较,但十多年来的防雹结果还是令人鼓舞的。表1所列的各国防雹效果概况说明,大多数都取得了明显的正效应,一般防雹后达到雹情减少20—80%的效果^[15],大多超过了自然变化范围。我国各地群众性人工防雹的多年实践也表明,在不少情况下不论从云的宏观观测、物理效果检验,还是统计效果检验都看到了减少雹灾的结果。一些多年坚持防雹工作的县(见表1),虽然它们的防雹火力并没有覆盖全部面积,却都在多年统计中获得了减少雹灾50%左右的结果。炮击的作业效果在火力密集的局部区域更为突出,如昔阳县大寨公社(约60平方公里)防雹前平均每年受灾面积约为4千亩,防雹后八年基本无灾。又如灵邱县冰雹窝子的史庄公社,防雹13年雹灾减少80%,等等。

苏联公布资料认为防雹效果显著,据1967年前的资料认为防雹5—6年来各地雹灾减少70—90%,防雹费用与受益之比为1:10左右。近年公布了苏联高山地球物理研究所和中央高空气象台等单位分别在北高加索、格鲁吉亚等九个地区,从1968到1972的五年间,共对7800个雹源进行了3480次作业,每年保护区约为3万多平方公里,历年效果为减少雹灾80%左右^[16]。

美国德克萨斯和南、北达科他等州若干地方进行多年的飞机在云下播撒催化剂作业,也获得了雹灾减少20—48%的效果^[17]。此外,加拿大、法国、阿根廷、肯尼亚、瑞士、奥地利和南非采用不同办法,经过多年试验也大多获得了正效果,成功率在20—70%不等。

应该看到,人工防雹不都是成功的,我们暂且不计明显的防雹组织不好、作业不当、偶尔失误或无确切资料的人为感觉等等因素,在表1中我们也看到,美国国家冰雹研究试验随机作业三年,却仅获得减少雹灾7%的不明显结果^[18];还有阿根廷地面燃烧碘化银在气团内部天气时,造成增加冰雹灾害100%的危害。Atlas^[19]还指出瑞士地面燃烧碘化银造成冰雹增多66%的后果。在我国也有防雹几年从统计上说不清防雹效果的例子。

因此应该认为,我们对冰雹过程和人工防雹的认识和实践还很不够,所以在作业中一定会出现一些失败和教训。有些不成功的试验是很值得我们分析研究的。如,对一些强烈超级单体防雹的困难,在某些地区一次强雹云所造成的灾害却占了全年损失的主要部分,所以防止这类雹灾具有重大意义,而目前我们对解决这一问题尚缺少办法。又如表中

表1 人工防雹效果总表

地 区	原 理	作 业 方 式	防 雹 面 积 (平方公里)	效 果 检 验 方 式	效 果	作 业 年 代	注
中国山西昔阳	爆炸	三七高炮和土炮群	1,800	作业前9年与作业后8年 受灾面积统计对比	受灾面积减少 47%	1969—1976	引自[5]火力区 未遭复盖全部 面积
中国甘肃岷县	爆炸	各种土炮群	约 2,000	作业前12年、作业后5年 受灾面积统计对比	受灾面积减少 52%	1970—1974	同上
中国山西灵邱	爆炸	各种土炮群	约 2,00	作业前11年、作业后13年 受灾面积统计对比	受灾面积减少 67%	1962—1974	同上
苏联北高加索等 九个地区	过量撒播 撒播强化剂	强爆炸的高炮或火箭将强 化剂送入冰雹生长区 从飞机上发射无弹爆炸火 箭播撒强化剂,飞机在云 下上升气流区播撒强化剂 升入云中	平均约 30,000 试验区 12,750 作业区 6,000	作业前后受灾面积对比 与附近区域对比 雷达参量对比	平均灾情减少约 80%	1968—1972	引自[16]文
美国国家冰雹研 究试验(NHRF)	撒播强化剂	飞机在云底播撒	共若干郡	随机试验,共 57 个雹日, 作业日为 27 个,进行随机 统计	仅减少灾情 7% 增加降水 5%	1972—1974	引自[10]文
美国(德克萨斯 和得、北达科他 州)	撒播强化剂	飞机在云底播撒	70,000	作物损失对比 保险费对比 雷达特征对比等	雹灾减少 20—48%	1—15 年不等	引自[17]文
法 国	撒播强化剂的预 先催化	地面燃烧 AgI, 靠上升气 流带入云中	4,000	对比灾情与保险费交付	减少 20%	1967 年前	引自[15]文
阿 根 庭	同上	类同上项	4,000	对比作业和自然受灾面积	雹面过程减少 70% 与园内部增加 100%	1959—64	同上
片 尼 亚	爆炸	不带 AgI 的爆炸火箭	12—15	与非保护区损失对比	损失显著减少	1963—1967	同上
奥 地 利	爆炸	防雹火箭	57	与非保护区及过去年代对 比	损失显著减少,可达 50— 60%	1967 年前	同上
瑞 士	撒播强化剂同时 爆炸作业	飞机在 4000—5000 米撒播 火箭向云中发射	750	农业工作者主观估计	在 200 平方公里面积检验, 雹灾减少 50—70%	1957—63	同上
加 拿 大	撒播强化剂	地面予先燃烧 AgI, 飞机 撒播	2,000	作业前后统计对比	雹灾减少 50—70%	1967 年	同上
南 非	撒播强化剂	飞机在云顶撒播	53	作业前后作物损失对比	雹灾减少 23%—40%	共 4 年半	引自[17]文

所列地面催化效果较差,甚至出现负效果。这可能是作用原理不清晰,作业盲目性太大造成。今后,我们应该在人工防雹试验的同时,加强对冰雹云内部结构观测、冰雹形成和防雹原理的研究。由于不同种类冰雹云结构及其冰雹形成过程不同,因此人工防雹原理和方法也应有所区别,最好效果检验时也采用分类统计,以检验我们对不同种类冰雹云的认识深度,只有这样才能深化我们对冰雹和防雹规律的认识。

参 考 资 料

- [1] K. A. Browning and F. H. Ludlam, Airflow in convection storms, *Q. J. K. M. S.* 1962, vol. 88, No. 376, pp. 117—135.
- [2] 王昂生、黄美元, 冰雹与人工防雹. 物理, 1975, 第四卷, 第1期, 第14—20页.
- [3] Staff members and participants NHRE, Air motion and radar echo evolution in a multicell hailstorm, *Preprints Ninth Conference on Severe Local Storms*, 1975, pp. 436—443.
- [4] K. A. Browning and F. H. Ludlam, Radar analysis of a thunderstorm, Tech. Note No. 5, Imperial College, London, 1960.
- [5] B. J. Mason, *The Physics of Cloud*, Second edition, 1971, Clarendon Press, Oxford, p. 671.
- [6] Г. К. Сулаквелидзе, Ливневые Осадки и Град, *Гидрометеосиздат*, 1967, Л.
- [7] K. A. Browning, Airflow and precipitation trajectories with severe local storms which travel to the right of winds, *J. Atmo. Sci.*, 1963 vol. 20, pp. 535—545.
- [8] K. A. Browning and G. B. Foote, Airflow and hail growth in supercell storms and some implications for hail suppression, NCAR, NHRE Tech Report, No. 75/1, p. 75, 1975. 5.
- [9] Г. С. Бартишвили, Некоторые особенности образования града в симметричных облаках. *Труды ВГИ*, вып 21, 1972, стр 20—31.
- [10] USCAR and NCAR, Annual Reprot, Fiscal year 1975. National Hail Research Exprimint, pp. 34—41.
- [11] 新华社记者述评, 防雹抗灾人定胜天, 人民日报, 1975年7月17日.
- [12] 大气物理研究所三室原理组, 爆炸影响降水的观测分析, 大气科学, 1976年, 第1期, 第62—67页.
- [13] Г. К. Сулаквелидзе, Результаты работ Кавказской противоголодовой экспедиции 1965Г, *Труды ВГИ*, Вып7, 1966.
- [14] Н. Ш. Виблашвили, Х. М. Калов, А. Н. Ковальчук, В. И. Кампановский и В. Т. Хоргуани, О возможности разрушения конвективных облаков искусственно инициированными нисходящими потоками, *Труды ВГИ*, Вып 25, 1973, стр 44—51.
- [15] Г. К. Сулаквелидзе и В. Ф. Лапчева, Обзор работ по воздействию на градовые процессы, *Труды ВГИ*, Вып 13, 1969.
- [16] И. И. Бурцов, Состояние и перспективы развития исследований градовых процессов, результаты противоголодовых работ в СССР в 1968—1972 ГГ, *Труды ВГИ*, Вып 28, 1974, стр 4—23.
- [17] D. Atlas, The paradox of hail suppression Science, 1977, vol. 195, No. 4274, pp. 139—145.