第38卷 第1期 气 象 学 报 Vol. 38, No. 1
1980年3月 ACTA METEOROLOGICA SINICA Mar., 1980

冰雹云物理发展过程的一些研究*

王昂生 黄美元 徐乃璋 徐华英**

（中国科学院大气物理研究所）

提 要

本文包括近年来我们在冰雹云物理研究几个方面的工作，即冰雹云单体生命史、云体併合与雹云形成、雹云和环境条件关系、冰雹云物理分类、冰雹云闪电观测分析和人工防雹的某些研究。

文章扼要地给出了上述研究的主要结果。

冰雹是一种严重的灾害性天气，依据我国实际需要[1,2]和国际上这一领域的动向[3-6]，近几年来，我们从事了冰雹云单体生命史、云体併合与雹云形成、雹云和环境条件关系、冰雹云物理分类、冰雹云闪电观测分析以及人工防雹原理和效果等方面的研究。现将主要结果介绍如下。

一、冰雹云单体生命史的若干研究

近年来，根据我们对山西省昔阳县的冰雹云和其它对流云的宏观、闪电和雷达等观测研究，得到了冰雹云单体生命史的一些特征。

1．跃增

在研究冰雹云和其它对流云（如雷雨云）的差别时，首先在云的外观上，而后在闪电观测上，发现冰雹云主要单体在降雹之前，云的某些参量常有短时急速增长，尤以闪电频数增长更为突出[1,7]。详细的雷达观测证实，回波顶高和强度在降雹前也有明显的急速增长[8]。冰雹云具有的云参量的短时急速增长，我们称之为“跃增”。它反映了冰雹云内物理特征量短时急骤变化并形成冰雹的特点。

图1是近几年我们在昔阳地区取得的一些冰雹云(图1上)和过境雷暴（图1下）的闪电频数N(次/5分)随时间(T)的演变图。图中只画出了雹云突出的跃增部分。由图可见，雷雨云很少有这种急速增长特点。

因此，雷雨云和冰雹云这两种强烈对流云体，在电跃增特点上差异显著，这一点已成为识别冰雹云的重要特征之一[7]。

冰雹云雷达回波的顶高和强度的急速增长，也可以在比较专门进行的雹云形成观测中发现[8]。图2是其中一个实例，由图可见，1973年8月8日冰雹云，在13时正至13时20分期间，顶高增长约7公里，强度大为增强，这是其它云体不多见的。1977年7

* 本文于1979年元月18日收到，于1979年7月收到修改稿。

** 参加工作的还有中国科学院大气物理研究所王学宽、郑双治、洪延超、赵小宁等同志。

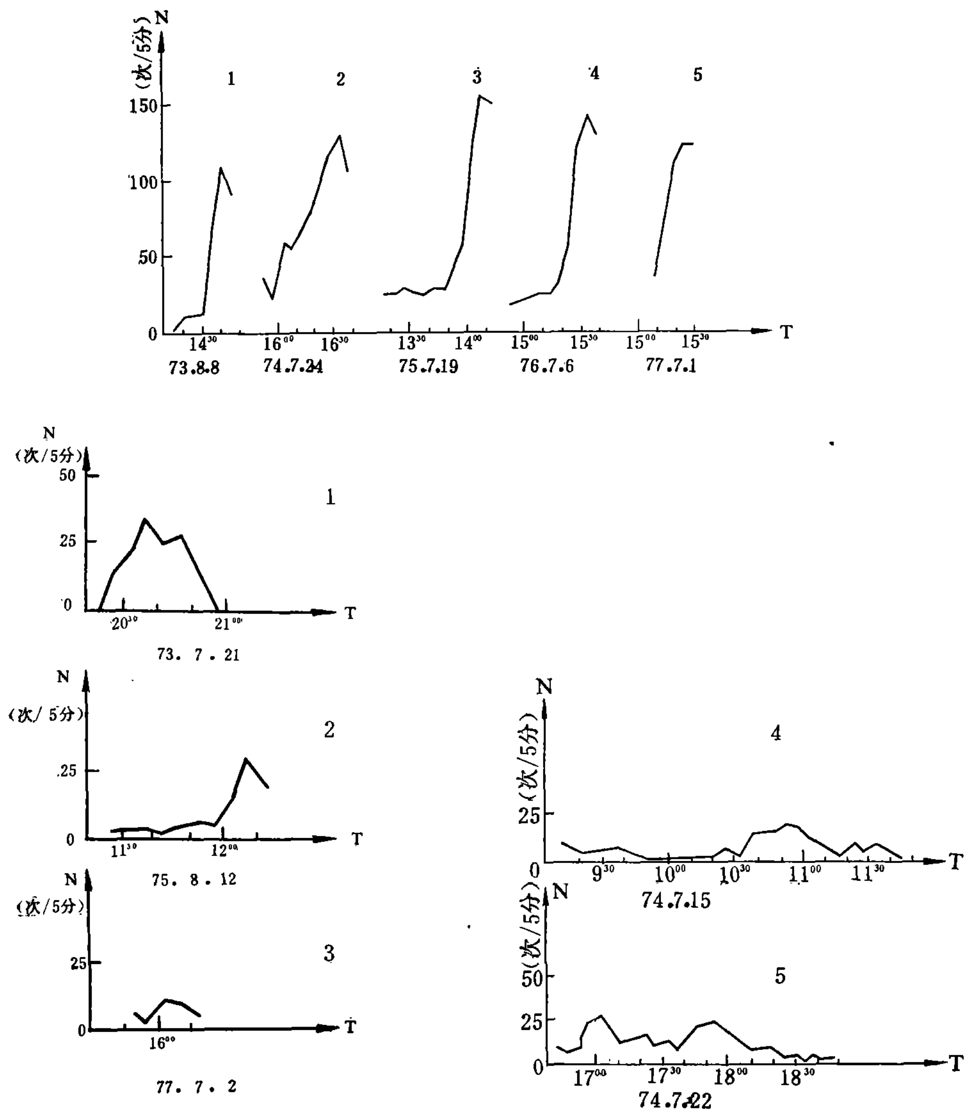

图 1　昔阳冰雹云(上图)和过境雷暴(下图)的闪电频数(N)随时间(T)的演变图

月 14 日冰雹云早期的专门观测表明，冰雹云在 11 时 45 分至 12 时正的一刻钟内，回波顶突然增长约 6 公里，云体顶高与不同衰减档(如 0、20 和 30 分贝）的回波顶高增长趋势相似。分析表明，降雹前的云参量跃增与冰雹在云中的形成关系甚大[8]。

就回波顶高跃增与闪电频数跃增关系而言，我们发现，常常是回波跃增先于闪电。其中强区增长最为明显，而且作用更大[7,9]。从图 2 的例子可见，闪电的突发性增长，正是在回波激烈变化之后，特别是强回波区跨入低温区后，闪电活动就很快加强了。这表明，云体水汽凝成物场的跃增可能是闪电活动频繁的先导[7]。最近，国外的个例研究也获得了类似的结果[10]。

2．酝酿

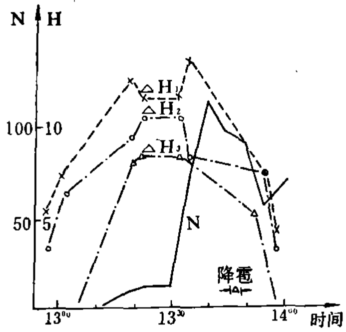

图 2 1973 年 8 月 8 日冰雹云雷达回波和闪电随时间演变图(图中 ΔH_1、ΔH_2 和 ΔH_3 各为衰减 0、22.5 和 40.5 分贝的回波顶高，N 为闪电频数(次/5 分)；H为云顶高度(公里))

冰雹形成过程是比较迅速的，但它仍有一个从达到成雹条件到形成冰雹并降下的阶段，我们称之为“酝酿期”。跃增后期雹云较强，回波上部跨入冰化区(通常以 $-20°C$ 为界)，使云体进入成雹阶段。但是对相当数量的雹云来说，雹云并不是进入成雹阶段就迅速降雹，而是要经历约 20 分钟的酝酿期然后再降雹的。酝酿阶段初期，云体往往还在增长，但随着对流层顶或高层逆温影响及云体浮力的限制，云体增长减慢。但是由于跃增增长，已使云体上部具有丰富的水汽并进入环境低温区，所以这类云体具有最良好的成雹条件。由于在酝酿期里，云水转化迅速，电化过程和潜热释放加快，所以此时云物理要素变化激烈，突出的闪电跃增就出现了。强盛云体的相对稳定阶段是酝酿期中后期的特点，这是成雹最有利时机。在图 2 和[8]文等实例中，可以看到，当较强回波顶高超过 8—9 公里后随即进入酝酿期；云顶达到最高处附近，就开始转为相对稳定的最有利于成雹的阶段。过去，在有的国外文献中[4]曾强调冰雹可以在 3—5 分钟的短时期内迅速形成，这就要求，冰雹云的冰雹生长区含水量必须在 10—20 克/米^{3}以上。但这种条件在雹云中并不常见。若依据我们上述存在酝酿期的观点，那末云中只要有 2—3 克/米^3 的含水量就可以满足了。这种含水量条件和冰雹生长时间是与大多数中等强度或较弱的冰雹云实际情况比较一致的。“酝酿期”的存在为识别雹云及实施人工影响冰雹云提供了可行的依据。也为在并非苛刻的条件下多数雹云形成冰雹的事实给予了合理的解释。

3．降雹

我们在大量的观测中注意到，相当多的冰雹云在地面出现降雹前后，冰雹云的回波顶高、回波强度和闪电频数都有明显下降。在图 2 个例中，我们可以看到这一现象。在[1,7,8]文中也有类似实例。这一现象正好像“跃增”的相反现象，它们正好构成了形成冰雹的云物理参量峰区的锐升和锐降边。这表明，冰雹云的降雹常常是导致云体消亡的动力作用，而降水(雹)拖带则是造成云体崩溃的重要因子。

4．雹云单体生命史的五个阶段

对昔阳地区冰雹云的云物理研究中，我们得到了如图 3 所示的雹云单体生命史的五个阶段。除了上述的跃增、酝酿、降雹三个阶段之外，我们把发生跃增增长之前的云体阶段称为“发生”阶段；把降雹结束以后的阶段称为“消亡”阶段。虽然冰雹云中各类雹云的单体变化很大，强弱不一，但上述几个阶段却基本上是共有的，所以大体上反映了冰雹云物理演变的特征。以上雹云单体生命史的五个阶段，对本文分类研究的弱单体、多单体和传播雹云等几类雹云的单体情况基本适用，仅在强单体雹云生命史中，由于其结构的特殊性，而出

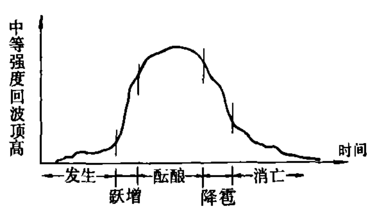

图 3 雹云单体生命史五阶段示意图

现了持续酝酿期与稍后降雹期交混在一起的情况。这里提出的“跃增”和“酝酿”阶段是云体突发增长和最强烈的时期，前者为后者创造了条件，致使酝酿期具备很强的上升气流、丰富的水汽和适宜的低温，构成了冰雹云生命史中最有利成雹的阶段。

二、云体併合与冰雹云形成

冰雹云跃增阶段的回波高度、强度和闪电活动的激烈变化总是和某些突发性的云物理过程有关。就几年来昔阳地区的观测研究表明，单体併合是云体跃增的重要原因之一，尤其是新生单体併合及强回波区併合更为突出。根据我们观测，下列三类形式併合较为常见：

1. 射流併合

处在云体强上升气流柱附近的单体，由于射流性上升气流（以弱回波区为标志）影响，挟卷单体併合，形成冰雹云。如昔阳县在 1976 年 7 月 12 日，由于射流作用导致云体强区併合，曾造成强烈降雹。

2. 追赶併合

同一移向的两个单体，由于种种原因（如前一单体受地形等影响，移速减慢等）使前者移动减慢，后者逐渐追上，并且两单体之间逐渐形成环流，导致云体併合，併合形成冰雹云。1977 年 8 月 14 日昔阳就有此类实例。

3. 指状併合

当一个较强的母云（也可能是冰雹云）降水（或雹）时，将在飑锋区激起新生单体；在新生单体迅速发展时，母-子两单体可能在边界处併合，由于子单体强烈，往往在母体这一侧形成外伸指状，并在指根附近降雹。1975 年 7 月 14 日和 1976 年 7 月 22 日在昔阳观测到了实例。

三类併合都表明，气流是导致併合的关键因素，併合造成了云体动力性的突发增长。我国山西、甘肃、北京和新疆的云物理研究者都注意到这一现象，并认为云体併合是形成雹云的重要原因之一。

三、冰雹云和环境条件的某些关系

近年来，我们的研究表明：冰雹云的回波厚度、闪电频数与降雹现象有密切的关系。统计表明，冰雹云愈厚、闪电活动愈频繁则愈易降雹，特别是强回波区作用突出。除了云体自身条件外，我们注意到环境低温对冰雹形成作用很大，特别是云内条件与温度环境的配置关系。

研究表明，较强回波跨入低温区（特别是自然成冰区）是这里成雹的重要配置条件。以图 2 所示的 1973 年 8 月 8 日为例，这一天环境自然成冰区（$-20°C$ 层以上高层）在 7 公里（海拔高度约 8 公里）附近。当回波未进入低温层以前的一个小时里，没有闪电出现；当回波顶跨入 $-20°C$ 层 10 分钟后，云中加速水化，并开始出现闪电；当强回波区跨入 $-20°C$ 层之后十几分钟，闪电频数陡增，其后不久就降了冰雹。统计研究指出：较强云水区跨入云中自然成冰区，是冰雹云成雹的重要条件，在 42 次雹云中，有 95% 符合这个条件；而 45 次雷雨云中，有 84% 达不到这个条件。

研究表明：达到上述云物理条件的重要因素之一，是环境降温（特别是高空降温）。当云层条件相同时，$-20°C$ 层的环境降温，将使云中自然成冰区增大，有益于冰雹形成。我们把昔阳 1970 年—1977 年的 87 个降雹日的 $-20°C$ 层及降雹灾情点在图 4 里，由图可见，在 6 月 15 日到 8 月 25 日的主要冰雹季节里，凡比较重的雹灾日，$-20°C$ 层高度都有明显的降低。反之，无灾雹日在 $-20°C$ 层则较高。在每一年的 $-20°C$ 层中，几乎都是最强雹灾日处于当年最低处。近八年里，最严重的 1976 年 7 月 12 日雹灾日，正处于本图最低处，即 $-20°C$ 层为 450 毫巴，它与弱雹日的 $-20°C$ 竟可差达 120 毫巴。由此可见，环境降温对冰雹形成关系甚大。

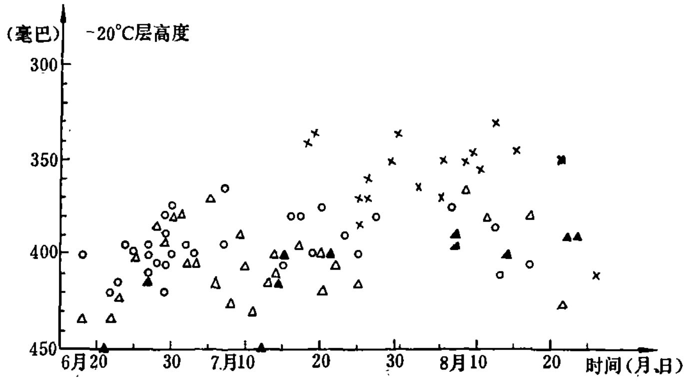

图 4　昔阳 1970—1977 年降雹日环境 $-20°C$ 层高度与地面灾情关系图
（图中分别以▲、△、○和×表示地面受灾面积为万亩、千亩、百亩和无灾）

此外，云层区环境风切变也与冰雹云有密切关系。我们对昔阳地区 42 个冰雹云的分析表明：比较强烈的冰雹云多出现在中等强度的环境风切变条件下，切变值多在 3—4 米秒$^{-1}$公里$^{-1}$；大多数较弱的冰雹云是发生在较弱的风切变环境中，平均值为 2.2 米秒$^{-1}$公里$^{-1}$；适与国外近年来研究结果相近[11]。一些研究个例表明，十分强烈的切变风场环境，并不利于冰雹形成，比如，1977 年 8 月 11 日达到 6.4 米秒$^{-1}$公里$^{-1}$的强切变风场，虽然造成了昔阳地区罕见的大风灾害，但是过分倾斜（主要单体与水平面夹角约为 40°）的云体不利于大冰雹在云中的形成，因而只降下了尺度很小的弱冰雹。

四、冰雹云物理分类的研究

象人们研究冰雹过程和人工防雹初期把积雨云分成雷雨云和冰雹云一样，今天已经开始认识到冰雹云自身也存在不同的成雹机制，这是与它们的物理特征及结构差别分不开的。要试图有效地人工影响冰雹云，就必须分别认识不同类别雹云的特征和结构，并有的放矢地进行人工影响才会成功。利用同一方法，对不同雹云影响的失利后果[2,5]已告诫了人们：必须重视冰雹云的物理分类。近年来，国外 Marwitz J. D.[11] 及 Chisholm, A. J.[12]已对雹云分类提出了初步看法，但也存在一些明显的缺陷。

为此，我们对 1975—1977 年昔阳地区 42 个冰雹云进行了云物理特征及结构研究[13]，得到下述四类雹云：

1. 强单体雹云

它基本是由一个大单体所控制，强烈阶段的雷达回波，具有一个向移动方向伸出的“前悬回波”，其下是强烈上升气流形成的“弱回波区”，弱回波区后紧挨着回波主体部分是近乎直立的“回波墙”。这类雹云常由两支对峙相切的上升和下沉气流构成骨架，在相当长的时间内，维持准稳态结构。所以，降雹常常比较强烈。

2．弱单体雹云

它是由一个主要单体构成的。单体对云体起支配作用,雹云结构多呈近似对称柱状。弱单体雹云常局地生消，与局地热力及地形作用明显有关。它移速较慢，降雹时间短，范围小且比较弱。弱单体雹云尺度较小，生命史短。

3．传播雹云

它是由两个以上的单体组成，其中，每个单体都常经历初生、发展、成熟和消亡几个阶段。新生单体在雹云移向前部出现，老单体则在后侧消亡。各单体之间联系密切，同一时刻，各单体处于不同的发展阶段，云体按传播方式移动。由于这类雹云传播特点是与有组织的上升气流引导有关，所以常常比较强烈而持续。

4．多单体雹云

这是一种由多个小单体组成的雹云，单体各自比较独立地发生、发展至消亡，没有传播现象，地面降雹区分散，一般降雹强度较弱。

对 42 个雹云研究表明(参见表 1)：多单体雹云出现频繁，共 20 次，占 47.6%；弱单体雹云占 33.3%；强单体和传播雹云则较少，分别占 12.0% 和 7.1%。虽然弱单体和多单体雹云出现频繁(约 80%)，但灾情较轻（约占 15%)；而强单体和传播雹云出现较少（约 20%)，但成灾所占的百分比很大（约占 85%)。鉴于不同雹云的云物理差异，我们认为，采用同一种办法进行人工影响是难以成功的，必须依据不同类型雹云特点，采用不同人工影响原理和方法，才能取得良好的效果。

表 1　各类雹云降雹情况统计表

项目 / 雹云分类	三年出现		K (%)	k (%)	平均过程
	次数	概率 (%)			降雹时间 ΔT(分)
强单体	5	12.0	82.4	87.8	57
传播雹云	3	7.1	4.4	7.9	65
弱单体	14	33.3	7.4	2.8	15
多单体	20	47.6	5.8	1.5	21

注：K 为分类雹云造成的成灾面积与各类雹云成灾面积的百分比，k 为对应单次平均值的百分比。

五、冰雹云的闪电研究

采用我们研制的 SJ-1 型闪电计数仪[14]，五年里共观测了 98 个风暴过程。研究闪电频数随时间的演变表明[9]，冰雹云比雷雨云闪电频繁且延续时间长，它们在统计上具有明显的差别，图 5 给出了雷雨云(A)、弱冰雹云(B)和强烈冰雹云(C)的典型个例，它们差异十分明显。表 2 列出了 98 次风暴过程的三类云体闪电平均特征参量[9]，也证实了上述差异。在三类风暴的闪电活动中，强烈冰雹云持续时间最长（约 3.4 小时),且单位时间内的闪电活动最频繁。

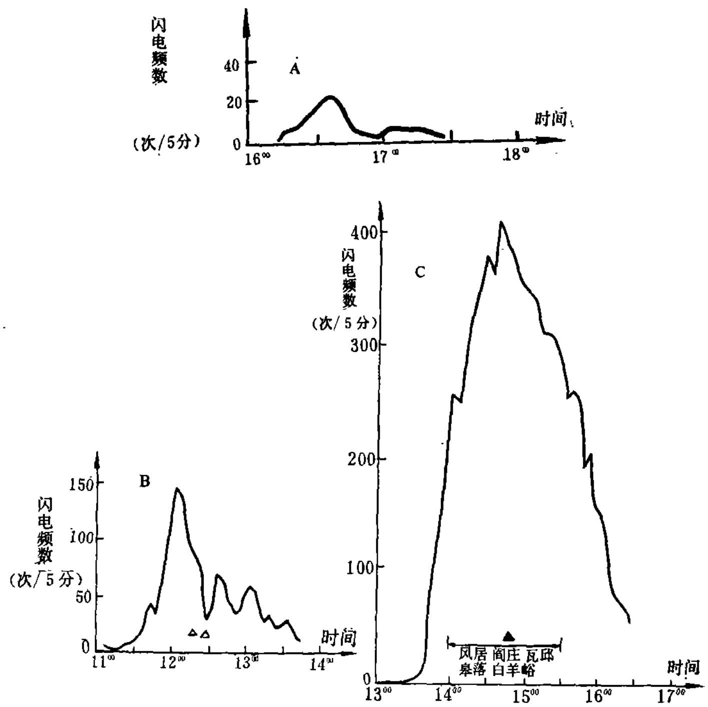

图 5　不同类型云体闪电频数随时间演变特征
(A. 1974 年 7 月 20 日（十四道岩）过境雷雨云；B. 1976 年 7 月 17 日（西沟）弱冰雹云；C. 1976 年 7 月 12 日（西沟）强冰雹云)

表 2　不同风暴闪电频数随时间演变的平均参量

项目 / 云类	五年风暴 总数	平均峰值 $N_{峰}$ (次/5分)	平均前沿陡度 η (次/5分·分)	频数大于50次/5分的平均时间 t (分)	平均闪电活动时间 T (小时)
雷 雨 云	65	48	2.3	16	1.7
弱 冰 雹 云	22	145	5.4	74	2.8
强 冰 雹 云	11	206	7.8	136	3.4

由于冰雹形成具有剧烈的相变过程，所以与雹云的跃增及酝酿期相配合，雹云闪电频数随时间演变中有一个明显的“峰区”（参见图 1，图 2 和图 5)。它的特点是：1）闪电频数有一个突然增长的“跃增”；2）闪电频数达到很高的值，一般超过 100 次/5 分；3）较高频数的闪电活动能维持一定时间，构成“峰区”。这些特点是一般雷雨云所没有的。分析指出，这个闪电峰区与冰雹降落前的冰雹形成过程密切相关。研究表明，利用上述闪电特征指标，可以从雷雨云里识别出冰雹云。5 年统计的识别正确率为 84%[9]。这样，上述工作既检验了群众经验“拉磨雷常有冰雹”是有一定依据的，又提供了识别冰雹云的一种实用方法[7]。

分析研究还表明，闪电的发展和云的发展（如云厚、云的强弱等）以及环境温度场密切相关。在浓积云阶段，一般云内没有闪电；当云顶部伸展到自然成冰高度以后，明

显地开始出现闪电活动，但次数还很少；当强回波区升到自然成冰高度以后，闪电次数急剧增多，并出现闪电"峰区"；降雹产生后，闪电次数迅速下降。由此可见，云中水汽凝成物的冰化过程，是产生闪电的一个重要原因，即成雹过程促进了闪电过程的发展，而闪电过程的急剧发展，则可能是冰雹形成的一种标志。

六、人工防雹的一些研究

为了深入探讨人工防雹的一些重要问题，主要进行了爆炸影响冰雹过程和降水的原理研究以及效果检验分析。

我们通过爆炸影响上升气流的摸拟试验[15]，炮击影响云体降水[16]、炮击对流云试验[15]和爆炸影响冰雹云的雷达观测[17]等研究表明：在一定的条件下，爆炸对云和降水是有某种影响的。综合试验结果，我们提出了爆炸影响对流云发展的一个物理设想，即：强烈而集中的爆炸产生的冲击波扰动或改变了云中局部上升气流，改变了原来云中的云水粒子状态，在爆炸高度以下，将诱发出下沉气流。不稳定层结将使下沉空气不断获得负的浮力，加上拖带、降水粒子蒸发等作用，就可能引起有组织的下沉气流发展，从而会破坏云的自然发展过程，也就破坏了冰雹形成过程，可能有助于抑制冰雹增长。

在统计研究了昔阳县雷暴和冰雹概况[18]、地面降雹分析[19]及国内若干地方雹情分析的基础上，进行了人工防雹的效果检验[20,21]。结果表明，国内一些地方（如昔阳、灵邱和岷县等）的防雹效果在统计上是可信的，说明这些地方人工防雹取得了一定效果(以县为单位，防雹后受灾面积减少约 50%)。但另外一些地方，虽然灾情减小了，但统计上还不能说明是可信的，尚待进一步工作。

参 考 文 献

[1] 王昂生、黄美元，冰雹与人工防雹，物理，**4** (1975)，№1，14—20.

[2] 王昂生、黄美元，冰雹和防雹研究述评，大气科学，**2** (1978)，№1，76—84.

[3] Сулаквелидзе, Г. К. и Лапчева, В. Ф., Обзор работ по воздействию на градовые процессы, *Труды ВГИ*, вып 13, 1969.

[4] Сулаквелидзе, Г. К., Ливневые Осадки и Град, Гидрометеоиздат, 1967.

[5] Atlas, D., The present and future of hail suppression. Second WMO Scientific Conf. on Weather Modification, WMO-№443, 1976, 207—216.

[6] Burtsev, I. L. Hail Suppression. Second WMO Scientific Conf. on Weather Modification, WMO-№443, 1976, 217—222.

[7] 王昂生、黄美元、王学宽、段长麟，防雹时识别雷雨云和冰雹云的闪电观测，科学通报 1976 年，第 12 期，546—549.

[8] 王昂生、赵小宁、康玉霞、洪延超、徐乃璋，昔阳地区冰雹云形成过程的一些特征，大气科学(待发表)。

[9] 中国科学院大气物理研究所云雾物理研究室，昔阳地区风暴闪电五年观测结果，全国人工影响天气科学技术会议，1978年2月，南宁。

[10] Медалиев, Х. Х. и др, Образование и разветие грозовых явлений в естественных условиях и приактивной воздействии, Атмосферное Электричество, с 107—114, Гидрометеоиздат, 1976, л.

[11] Marwitz, J. D., The structure and motion of severe hailstorms. part Ⅰ. Ⅱ. Ⅲ. *J. Appl. Met.* **11** (1972), №1, 166—201.

[12] Chisholm, A. J., Alberta hailstorms, *Meteor. Monogr*, **14** (1973), №36.

[13] 中国科学院大气物理研究所云雾物理研究室原理组，昔阳地区冰雹云物理研究，全国人工影响天气科学技术会议，1978年2月，南宁.

[14] 中国科学院大气物理研究所云雾物理研究室， SJ-1 型闪电计数仪(同上会议)。

[15] 中国科学院大气物理研究所云雾物理研究室原理组，爆炸影响云发展过程的原理研究，(同上会议)。

[16] 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，第一期，62—67.
[17] 中国科学院大气物理研究所云雾物理研究室原理组，爆炸影响冰雹云的雷达研究，全国人工影响天气科学技术会议，1978年2月，南宁。
[18] 中国科学院大气物理研究所、昔阳县气象局，昔阳雷暴和冰雹的概况(同上会议)。
[19] 中国科学院大气物理研究所、昔阳县气象局，昔阳县地面降雹分析（同上会议）。
[20] 中国科学院大气物理研究所、昔阳县气象局，昔阳县防雹效果的统计检验(同上会议)。
[21] 黄美元、亢雪巧，关于我国人工防雹效果的统计分析，大气科学， 2 (1978)，№2，124—130.

SOME RESEARCH ON THE DEVELOPMENT OF HAIL-CLOUD

Wang Ang-sheng Huang Mei-yuan Xu Nai-zhang Xu Hua-ying

(Institute of Atmospheric Phsyics, Academia Sinica)

Abstract

This article includes some partial workes, that is basic research on hail cloud physics and hail suppression by us during the recent eight years. It is that life-history of hail cloud cell, combination of cloud and formating of hail cloud, relation between hail cloud and environmential conditions, classify of hail cloud physics, lightning observation and analysis of hail cloud, and some research of hail suppression.

The important results above research brief have given in this papar.