

# 冰雹云“酝酿”期研究

王昂生 赵小宁

赵国庆

(中国科学院大气物理研究所)

(山西省气象局)

## 提 要

本文提出了冰雹云单体生命史中“酝酿”期的概念、现象和事实。文章还指出了“酝酿”期的特征和物理意义。

## 一、概 论

自从三十年前 Byers<sup>[1]</sup> 等提出雷暴三阶段生命史的著名论点以来, Weikmann 和 Densen 在六十年代又提出冰雹云生命史四阶段的原则性论点<sup>[2]</sup>, 近年来进而有人提出一类冰雹云单体演变四阶段论点<sup>[3]</sup>。根据我国冰雹云物理过程的研究, 王昂生等<sup>[4]</sup>提出了冰雹云单体演变的五阶段论点。我们从冰雹云观测到的云参量(如不同强度的回波顶高、闪电频数等)峰区特征, 提出了除“发生”和“消亡”以外的“跃增”、“酝酿”和“降雹”三个重要阶段<sup>[4,5]</sup>。本文将对冰雹云“酝酿期”作深入研究。

就冰雹在冰雹云中形成的问题来说, 虽有 Сулаквелидзе 等<sup>[6]</sup>提出的“累积带”理论和 Browning<sup>[6]</sup> 提出的循环增长之假说, 但人们对冰雹形成过程及其特征认识还是相当不够的。有人认为冰雹在累积带增长十分迅速, 4—5 分钟就可长成 2—3 厘米直径的冰雹<sup>[2]</sup>, 相应要求防雹作业条件很严格, 从判断降雹危险性、确定雹源位置、发布作业命令直到火箭高炮发射必须在 2 分钟内完成<sup>[7]</sup>。这种理论不仅对防雹识别和作业要求极高, 而且还苛求形成冰雹的含水量条件高达 20—30 克/米<sup>3</sup>以上, 这在冰雹云中也是很少观测到的。这表明上述观点并不十分符合实际。因此, 对冰雹形成问题还应深入研究。如果本文论述的“酝酿期”成立, 冰雹就可以在冰雹云中常观测到的几克/米<sup>3</sup>含水量条件下长成; 此外, 单体雹云具有 20 分钟左右的“酝酿期”, 也为识别雹云和防雹作业提供了合理时段<sup>[8]</sup>。

## 二、冰雹云酝酿期的个例分析

虽然冰雹云形成过程比较迅速, 但是它仍有一个从达到成雹条件到形成并降下冰雹的过程。昔阳的初步观测表明<sup>[4,5]</sup>: 自冰雹云内较强云水区达到自然冰化温度开始, 到地

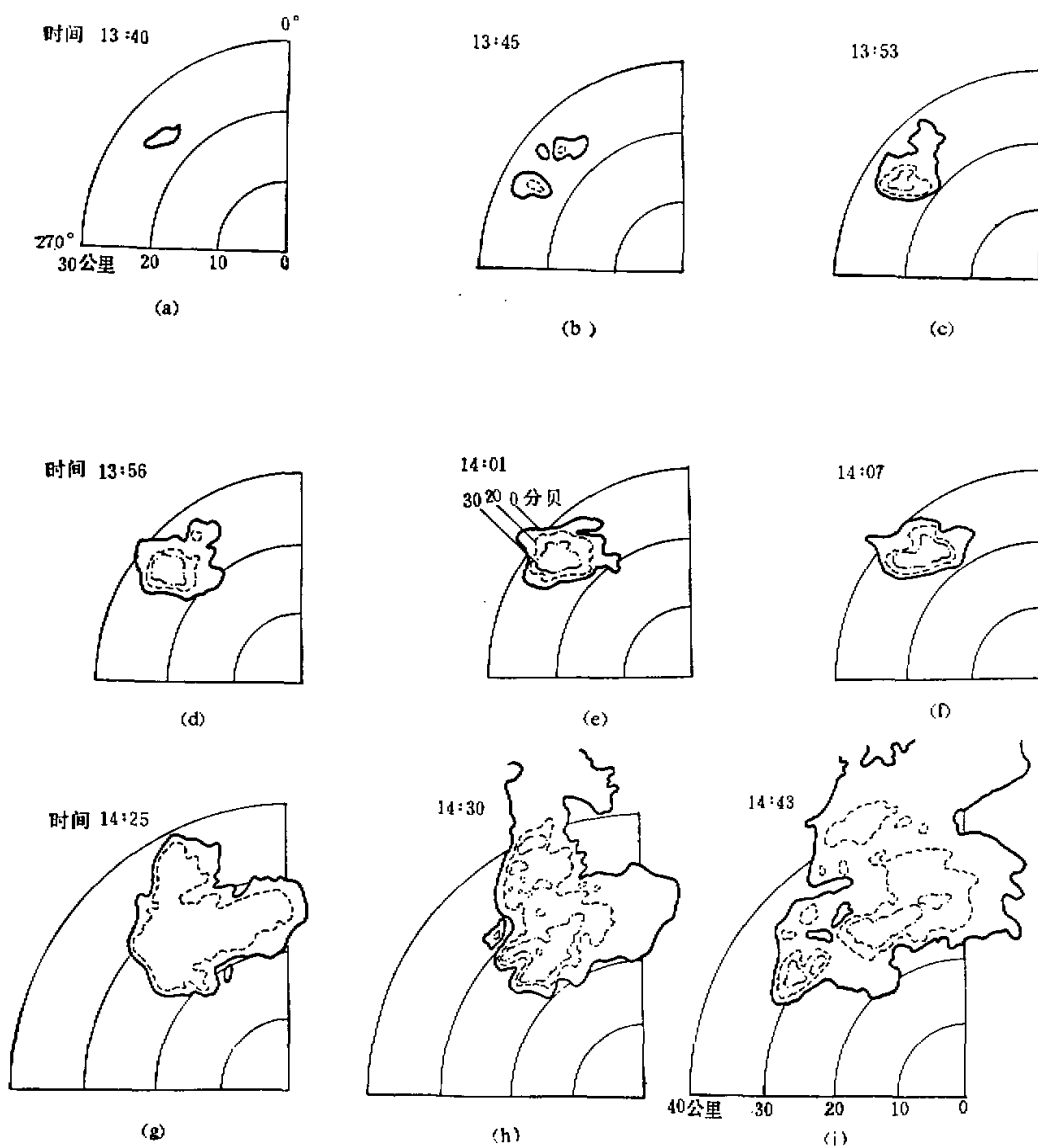


图1 1978年7月22日昔阳冰雹云雷达回波的8°仰角PPI素描图例。

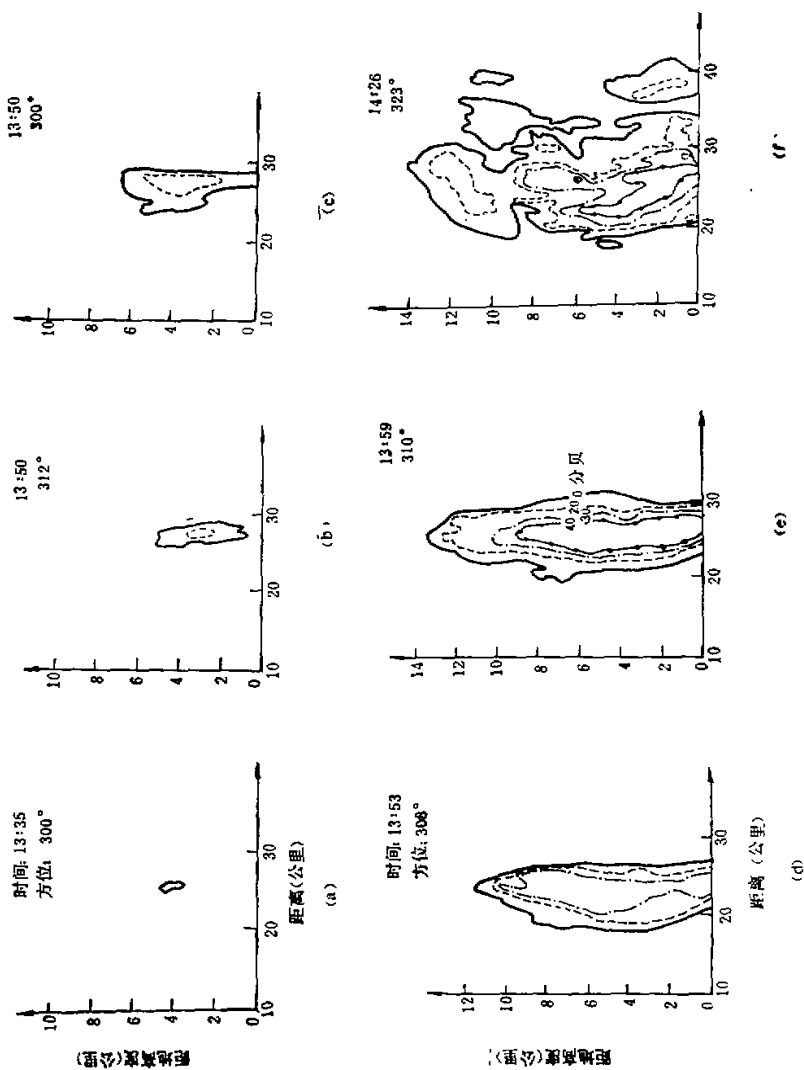


图 2 1978 年 7 月 22 日普阳冰雹云不同时刻的雷达回波 RHI 素描图例。

面出现冰雹(包括降落中的增长、融化、升华等)约有 20 分钟左右的特殊时段,而这一时段具有自身的特点,并与其它阶段有所不同。王昂生等认为<sup>[4]</sup>:这是冰雹形成的酝酿阶段,是冰雹形成的关键时期,称为冰雹云的“酝酿期”。我们把对流云体  $Z_e = 5 \times 10^3$  毫米/米<sup>3</sup>的较强回波区顶部跨入  $-20^\circ\text{C}$  温度层作为云体大量出现冰化现象的标志<sup>[9]</sup>,从这个时刻起到冰雹开始降至地面止,为冰雹云的“酝酿期”。下面我们以 1978 年 7 月 22 日为例进行分析。

这是一次典型单体雹云生消过程。这块雹云出现在雷达站西北 20—30 公里的昔阳县城关一带。图 1 给出了 7 月 22 日冰雹云生命史的  $8^\circ$  仰角素描图,绘出了自单体初生直至降雹结束的 PPI 资料;图 2 绘出了对应图 1 的不同时刻雷达回波距离高度显示图。由两图可见,雷达站  $300^\circ$  方位 25 公里附近,在 13 时 36 分以前云体已有发展,但并不迅速;只是在 45—50 分几个小单体并合(图 1b, c 和图 2b, c)前后,云体演变才加速。由于对流发展和低层辐合作用,13 时 53 分前几个小单体已在  $305^\circ$  方向 25 公里处并成一较强回波,中心超过 30 分贝;同时短短几分钟内,回波顶急骤跃增约 5 公里达到 11.5 公里,强度亦超过 30 分贝,水平尺度也明显增长。这迅速增长演变反映了雹云跃增阶段的特点,此时云体强回波区已跃入自然成冰区,云体进入酝酿阶段。

按照本文的定义,这个单体的酝酿期约自 13 时 52 分至 14 时 10 分,共历时 18 分钟。综合图 1 和图 2 资料可以看到:酝酿期以前的跃增期以回波垂直和水平尺度明显增长为特征(参见图 1b, c 和图 2b, c, d);酝酿期后的降雹期则以回波迅速扩展、削弱和分裂为特征(参见图 1g, h 和图 2f)。与它们不同,我们不难从图 1d, e, f 和图 2d, e 中可以看出:在冰雹云酝酿期中,回波水平尺度变化不大,但强回波区却在扩展、云体愈趋结实;回波垂直尺度虽仍有一些增长但逐渐达到稳定的最大值,强区加强并超过 40 分贝,云体十分密实直立。这些特征反映出:在酝酿期里,继续加强的入云气流所带来的更多水汽并不像跃增期那样主要用于云体水平或垂直尺度增长方面,而是在相近水平或垂直尺度条件下,加强着云体回波强区并扩展强区;这就意味着酝酿期里,入流水汽易于转换成较大粒子,云中粒子易于冰化且冰雹生长也大为加速。

从这个例子的几个阶段对比可以看到,在整个单体生命史中,酝酿期对冰雹增长具有最有利的条件。在这个时期里具有生命史中最强的上升气流,使云体垂直最旺盛;这时云水最强区上部跨入  $-20^\circ\text{C}$  以上自然成冰区最厚,最易于冰化过程及冰雹增长;这时入流水汽最易于转化为大粒子,造成高含水量区。因此,这个实例说明单体生命史中酝酿期最利于形成冰雹。

### 三、冰雹云酝酿期与雷雨云分析

深入分析冰雹云与雷雨云的异同有助于进一步认识酝酿期。首先我们分析一些达到酝酿期而降雹的实例。图 3 是 1978 年 7 月 22 日(左图)和 1977 年 7 月 14 日(右图)两次雹云回波顶高随时间演变的资料。由图可见,两个雹云较强回波区(30 分贝)顶部跨入环境  $-20^\circ\text{C}$  层至地面降雹出现的酝酿区各为 18 和 24 分钟。分析表明,酝酿期前夕,回波多有明显的垂直增长,特别是强回波区增长,冰雹云酝酿期大多具有 1978 年 7 月 22 日个

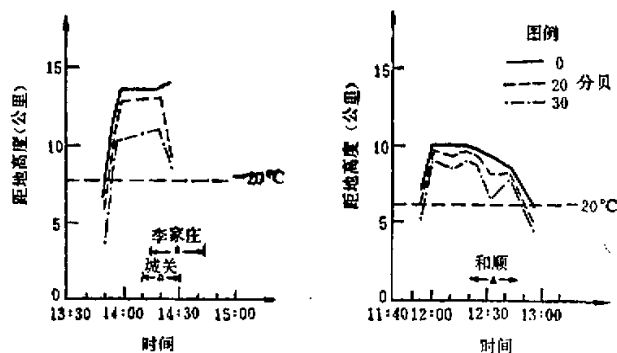


图3 具有酝酿期的两次雹云回波顶高随时间演变图。

左图: 1978年7月22日。右图: 1977年7月14日。

例特点,此期回波结构密实、强区增强迅速、云顶逐趋稳定,使云体具有成雹的良好条件。实例分析表明,酝酿条件充分的对流云体均可产生降雹。

1976年8月16日的雹云是一个很有意思的例子<sup>[4]</sup>。当天云体在14时45分至15时25分间,回波顶已达6—8公里,但维持少变,云体结构不严实且强度较弱,一直未降雹,故系雷雨云。但在15时25分前后,云体突然辐合加强,垂直增长使云体进入酝酿期,28分钟后地面降雹。这表明:当对流云体未达到酝酿条件时,未出现降雹;一旦达到这一条件后不久(这几个例子约为20分钟),云体就降下冰雹。

雷雨云资料分析表明,它们大多达不到酝酿期条件;即使个别达到,其滞留时间也很短(常在几分钟以内)难以成雹;或云体太弱,能具备酝酿期条件的空间太小而未降雹。图4给出了1978年7月27日两个较强雷雨云回波顶高随时间的演变情况。由图可见云体结构比较松散,且未出现酝酿期,一直未能降雹。这类现象说明:达不到成雹酝酿期的对流云,难以产生冰雹。

全面分析昔阳地区1975—1978年的观测资料表明:上述观点基本上是正确的,即酝

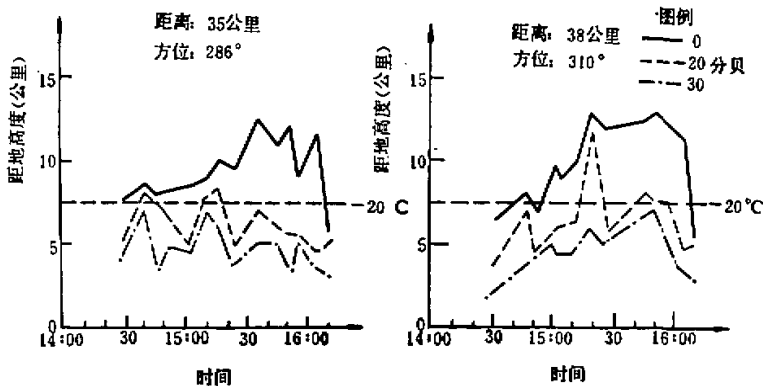


图4 1978年7月27日两个雷雨云单体回波顶高随时间演变图。

酿期是冰雹形成的关键时期。昔阳地区九次有完整资料的冰雹云酝酿期分析表明, 这里的雹云酝酿期一般约在 15—30 分钟之间, 平均为 23 分钟。雷雨云一般达不到这个条件, 个别达到酝酿条件的强雷雨也因跨过自然冰化层的层次太薄或时间太短 (小于 10 分钟) 而夭折, 不能造成地面降雪。

#### 四、冰雹云酝酿期的特征

对昔阳地区近几年来资料的普遍分析, 可归纳冰雹云酝酿期具有如下特征:

**1. 回波顶高继续增长** 从上述资料中, 我们可以看到, 在雹云酝酿阶段开始时, 常常由于跃增作用的影响而具有顶高继续增长的特征。但是由于各种抑制因素 (如云上的对流层顶阻碍、降水粒子大量增加的拖滞等) 的影响, 所以增长逐渐减弱。在图 3 中, 我们可以看到酝酿初期明显增长的现象。正是由于这些垂直增长作用, 不仅使云体达到冰化条件, 而且把更大量的云水物推至高层, 为冰雹形成提供了良好条件。

**2. 回波强区继续并合** 云体回波并合是雹云动力性增长的重要因素之一, 当云体进入酝酿期后, 并合的特点表现为回波强区继续并合, 使云体更为发展成熟。除了昔阳 1977 年 7 月 14 日、1978 年 7 月 22 日已给出的例子外, 1976 年 8 月 16 日, 1976 年 7 月 12 日, 1975 年 7 月 14 日和 1973 年 8 月 8 日等次雹云均可看到这类现象。1978 年 8 月 18 日雹云也很典型, 那天, 虽然在雷达站北北西方位 50 公里处两个单体已于 16 时 25—30 分开始并合, 但云体的强烈发展还是在 16 时 48—55 分 30 分贝以上强区合并前后; 由于强区并合促进, 17 时 11 分于李家庄公社一带降了冰雹。

**3. 云体增长逐渐减缓趋于稳定** 雹云单体进入酝酿阶段后, 增长的云体受到对流层顶约束和云中逐渐增多的云水粒子拖带作用等的影响, 垂直和水平尺度增长减小, 逐渐进入相对稳定阶段, 这一特征已在图 1, 2, 3 中清楚可见。

图 3 实际资料表明, 酝酿期相对稳定阶段正是云体最强烈阶段, 此时十分有利于冰雹增长。如图所示, 这段时间, 由于发展雹云的积极因素与阻止发展因素相互作用、相对平衡, 此时雹云回波顶高维持在最大值附近, 回波结构十分结实, 跨入  $-20^{\circ}\text{C}$  层的云回波厚度亦达峰值, 这都反映出这是雹云中最为利于冰雹增长的时段, 为较快成雹奠定了基础。

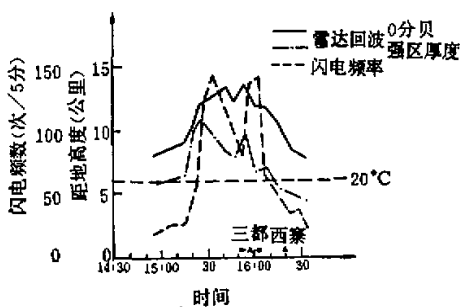


图 5 1976 年 7 月 6 日雷达回波顶高和闪电频数随时间演变图。

**4. 闪电跃增** 强回波区与自然冰化层的恰当配置对闪电产生和加强关系密切<sup>[10]</sup>, 大量资料表明酝酿成雹期具有合适的条件, 促进了云中电化过程的急剧增长<sup>[5,9,11]</sup>。图 5 是 1976 年 7 月 6 日的一次实例。资料表明, 15 时以前全增益回波早已跨入  $-20^{\circ}\text{C}$  层, 但因强回波区尚未跨入低温区, 故冰化的水成物有限, 闪电活动甚少; 当 15 时 04 分强回波区跨入  $-20^{\circ}\text{C}$  层之后, 云中冰化过程迅速加强, 十几分钟后, 闪电频数急骤跃增。从图上可见闪电跃增是在回波跃增之后, 可以认为雹云酝酿期初是促成闪电跃增的有益条件。与其它分析研究类似<sup>[5,9]</sup>, 我们认为冰雹云单体酝酿期不仅是形成冰雹的最有利时期, 而且也是云内物理要素激烈变化的时期, 相变过程和闪电激增就是现象之一。

## 五、酝酿期物理过程的初步讨论

在对流云体生命史中, 云内上升气流起着云体生消的支配作用。当云体上升气流发展时, 由于它输送水汽, 支托云水粒子增长等作用, 促进云体增强。当诸如发展期云体并合等动力、热力作用造成跃增之后, 促进云体上部进入低温区, 同时支托了大量云水粒子, 为酝酿期创造了冰雹增长的良好条件。

冰雹云单体酝酿期是冰雹长成的关键时期。由于此时含水量丰富的回波强区跨入自然成冰区, 在强烈上升气流支托和低温环境的影响, 粒子迅速增长, 冰化及冰化起电过程加速, 于是回波强度加强、云体结构密实且出现频繁的闪电活动。这段时期里, 云体具有生命史中最佳的成雹条件—强烈的上升气流支托、丰富的含水量和合适的环境低温等, 并且此时它们处于恰当的配合状态。

当粒子长大到一定程度时, 一方面由于拖带作用, 另一方面由于对流层顶及高层大风的压抑作用, 阻碍了云内上升气流的继续加强, 致使回波顶增长变缓、云体顶部变平或拉出庞大的云砧。云砧的拉出不仅同对流层顶及高层大风的压抑作用有关, 而且同流场的低层辐合及高层辐散场的配置有关。强烈的上升气流把周围的湿热空气卷入云中, 垂直气流随高度增大, 在中上部达到最大, 以后减弱向两侧辐散, 这种气流分布易于形成含水量“累积区”, 可以造成粒子在云中上下滚翻增长。可以认为, 雹云拉出云砧的过程可能是冰雹云成雹酝酿期出现相对稳定的一种表征, 也就是冰雹增长的重要阶段。正是大量水成物跨入低温区(特别是自然成冰区), 使更多的粒子达到了良好的成雹条件, 从而进行着激烈的冰化过程。这一过程不仅增加了冰雹的胚胎, 而且加速了冰雹增长过程。

近代云物理研究<sup>[12]</sup>表明: 足够的含水量和相当低的温度十分有利于起电和闪电形成, 这些条件也正是冰雹增长的重要条件。云中水汽凝成物的多少对于在同样条件下电荷分离和聚集来说有直接影响; 一般来说, 水成物愈多, 即回波愈强愈厚则愈有利于闪电出现。Mason 的理论计算<sup>[12]</sup>认为, 冻结云滴在软雹表面破碎及冰晶从软雹表面弹回最有利于冰雹云产生放电, 这些冰相过程可以在 10 分钟内迅速形成 3000 伏/厘米的强电场并引起放电, 同时可以在 20 秒内恢复并再次放电, 也就是说可以造成频繁的闪电活动。由此可推论, 回波顶的跃增必然导致闪电的跃增, 实际资料也证实了这一点<sup>[5,9,9]</sup>。

随着云体内粒子的不断累积、上升气流愈来愈难支托住粒子, 直到垂直气流支托不住云水粒子时, 粒子群就崩溃性地降落下来。这就导致最后削弱或破坏上升气流, 使强回波

顶区迅速下陷,逐渐失去成雹条件,从而成为单体酝酿期结束的标志。

总之,当冰雹云单体发展到酝酿阶段时,云内较强的上升气流已经形成,大量的水汽和雹胚粒子被带到自然冰化区,由于这里具有冰雹形成和增长合适环境,所以从冰雹形成的物理过程方面考虑,这一阶段是雹云单体生命史中最有利于冰雹增长的时机。

## 六、结 语

本文在对山西省昔阳地区冰雹云物理过程研究的基础上,提出了冰雹云单体生命史里“酝酿期”的概念。根据 1973—1978 年的雷达和闪电等资料分析表明:在冰雹云酝酿期中,单体具有强烈的上升气流、丰富的水量、很低的环境温度,使大量云水粒子进入自然冰化区而达到良好的成雹条件,所以这一阶段是冰雹增长的最有利时机。

分析表明,昔阳雹云单体酝酿期一般约为 15—30 分钟,平均为 23 分钟,过短的酝酿条件难以产生地面降雹。冰雹可以在普通雹云的含水量和气流等条件下形成,而不需要苛刻条件。这就更符合多数雹云情况。同时,本文分析研究也表明人工防雹里的识别和作业有一个比较合理的时段,这也符合多数识别雹云及防雹作业的情况。

## 参 考 文 献

- [1] Byers H. R. and Braham, J. R. R., The thunderstorm. 1949. p287.
- [2] Сулаквелидзе Г. К.; Ливневые Осадки и Град. Гидрометеоздат. 1967.
- [3] Browning K. A., Fankhauser J. C. et. al.; Structure of an evolving hailstorm, Part V. Synthesis and Implications for hail growth and hail suppression. *Mon. Wea. Rev.* **104** (1976). No5. P603—610.
- [4] 王昂生等,昔阳地区冰雹云形成过程的一些特征,大气科学,第 4 卷,第 2 期,186—194, 1980.
- [5] 王昂生、黄美元、徐华英、徐乃璋等,冰雹云物理和人工防雹的若干基础研究,中国气象学会 1978 年年会大会报告,1978 年 12 月,邯郸.
- [6] Browning K. A.; Airflow and precipitation trajectories with severe local storms which travel to the right of winds, *J. Atmo. Sci.*, **20** (1963). p535—545.
- [7] Сулаквелидзе Г. К. и Лапчева В. Ф., Обзор работ по воздействию на градовые процессы. ВГИ, Вып 13, 1969.
- [8] 黄美元、王昂生等编著,人工防雹导论,科学出版社,204 页,1980 年.
- [9] 王昂生、黄美元、王学宽、段长麟,防雹中识别冰雹云的闪电观测,科学通报,1976 年第 12 期,546—549.
- [10] 王昂生、黄美元、段长麟、郑双治,冰雹云中闪电、雷达回波、温度配置和降雹的相互关系. 全国人工影响天气科学技术会议,1978 年 2 月,南宁.
- [11] 中国科学院大气物理研究所云物理学研究室原理组编著,冰雹和人工防雹,科学出版社,1979 年,96 页.
- [12] J. B. 梅森著,中国科学院大气物理研究所译,云物理学,科学出版社,1978 年,677 页.

## AN INVESTIGATION FOR THE "BREWING" TERM OF HAIL-CLOUD

Wang Ang-sheng   Zhao Xiao ning

*(Institute of Atmospheric Physics,  
Academia Sinica)*

Zhao Guo-qing

*(Bureau of Meteorology,  
Province Shanxi)*

### Abstract

The concept, phenomenon and fact of "brewing" term during a cell life time of hail-cloud have been raised in this paper. The characteristic and physical significance of "brewing" term are indicated.