

爆炸影响对流云发展过程的原理研究

黄美元、徐华英、王昂生、何珍珍、陈英仪、徐乃璋等*

(中国科学院大气物理研究所)

用爆炸方法进行人工防雹是我国的一个特点,且已有很长历史了,近十年来爆炸方法在群众性试验中进一步广泛采用,出现了利用空炸炮、火箭和高炮等爆炸手段。根据某些地方多年防雹资料的初步分析^[1,2],用爆炸方法进行人工防雹是有一定效果的。然而爆炸究竟对云有什么作用?它对冰雹形成过程会有什么影响?国外有人试图用“空腔作用”造成软雹^[3]来解释爆炸影响冰雹云的作用,也有人提出爆炸引起过冷水的冻结作用^[4]。但我国大量人工防雹试验指出,爆炸可以迅速引起降水,出现云洞,云体消散或转向等现象^[5,6,7],这些现象不能用上述国外已有想法来解释。

为了探讨爆炸防雹原理,从1972年开始我们先后进行了几个方面的室内和野外实验,以明确爆炸对对流云可能具有的物理作用,并在此基础上进一步研究这些物理作用在人工防雹等过程中的价值。

一、爆炸影响上升气流的模拟实验

我们考虑对流云是空气不断上升形成和维持的,爆炸作用可能影响上升气柱,从而改变了对流云的发展过程。在我们的模拟实验中采用点燃的上升烟柱作为上升气柱,利用小土炮对烟柱进行轰击,观测轰击后烟道运动情况。

采用燃烟模拟上升气流必须满足相似条件,主要是几何相似和动力相似。对于云中上升气流柱来说,气柱的垂直尺度比水平尺度大一个量级。在实验中烟柱宽为0.5和1.0厘米,烟柱长为15和30厘米,长宽的比值为30,所以气柱与烟柱在几何上基本相似。

对于云中和云下对流活动,考虑有外力作用时,垂直方向 Z 的运动方程可写为

$$\frac{\partial w}{\partial t} + w \frac{\partial w}{\partial Z} = g \frac{T'}{T} + k \frac{\partial^2 w}{\partial Z^2} + F \quad (1)$$

式中 w 是垂直方向运动速度, t 是时间, g 是重力加速度, T 和 T' 分别是环境温度和云内外温差, k 是湍流交换系数, F 是外力。

对于用烟柱来模拟气柱的定常流场来说,主要是两个无因次参数,即惯性力与粘性力之比的雷诺 Re 数,以及惯性力与浮力之比的弗罗得 Fr 数,这两个参数在大气中的对流气柱和实验中的烟柱的数值见表1。

由表1可见 Fr 数在实验和大气中同量级,雷诺数都远大于1,粘性项可以忽略,可以认为烟柱流场和气柱流场基本相似。

1979年4月14日收到修改稿。

* 参加过本工作的还有:陈章昭、杨蕴玉、洪延超、郑双治、郝京甫、张大林、赵小宁。

表 1 气柱和烟柱参量表

		H (米)	w (米/秒)	k (米 ² /秒)	T' (°C)	Re	Fr
大气对流气柱		1000	5	50	0.5	100	1.2
烟	单根	0.15	0.4	0.2×10^{-4}	33	3000	1.1
柱	艾堆	0.30	0.7	0.2×10^{-4}	49	10000	1.0

在方程(1)中,还有两个无因次参数,一个是惯性力与非定常力之比的斯脱罗哈夫 St 数,利用这个参数,可以通过爆炸实验确定的非定常变化时间,推算出大气中爆炸引起非定常变化的时间。还有一个参量是惯性力与外力之比,在我们讨论的问题中,为简单起见,把爆炸对气柱的作用看作为一种外力,并且认为,爆炸产生冲击波,冲击波经过时的超压将以力的形式作用于气流中的单位质量空气,这种力将以超压梯度力表示,即 $\frac{1}{\rho} \frac{\Delta P}{\Delta H}$,

式中 P 为超压, ρ 为空气密度。这样惯性力与爆炸力之比为 $\frac{w^2}{H} \bigg/ \frac{P}{\rho H} = \frac{w^2 \rho}{P}$, 称这无因次参量为爆炸作用的欧拉数,用 E 来表示。

我们实验的目的是建立满足几何相似和运动相似的烟柱,研究爆炸对烟柱的影响,通过实验确定使烟柱有明显变化的临界超压(爆炸产生冲击波所造成的)以及在临界超压影响下烟柱变化维持的时间。

实验是在室内进行的,点燃艾条产生烟道,用装黑火药 1—2 克的小土炮作爆炸源,不同距离上冲击波强度(超压)可根据实验来确定。用电影摄影机拍摄爆炸前后的烟道。分析烟道中特征点的运动,决定烟柱的速度,实验结果是:

(1) 炮击后 0.2—0.3 秒,在爆炸波的作用下出现烟道摆动和上升速度减弱现象,1 秒之后烟道恢复到原来直上状态和运动速度。所以斯脱罗哈夫数 $St = 0.5 - 1.3$ 。

(2) 对于单根艾条燃烟(其中 $H = 15$ 厘米, $w = 40$ 厘米/秒, $T' = 33^\circ\text{C}$),冲击波最大超压大于 2 克/厘米² 时可以出现烟道摆动现象。对于艾堆燃烟(其中 $H = 30$ 厘米, $w = 70$ 厘米/秒, $T' = 49^\circ\text{C}$)产生摆动的临界超压应大于 7 克/厘米²,所以相应的爆炸作用的欧拉数 E 分别为 0.8 和 0.7。

根据相似原理(即相同的 St 数和 E 数)可以推出当大气中气柱的速度在 3 米/秒以下时,用一般强度的爆炸(其冲击波的最大超压不小于 54 克/厘米²)就能影响气柱,但对于 10 米/秒以上的气柱,必须用强爆炸(其冲击波的最大超压要大于 600 克/厘米²)才能影响它。

(3) 临界超压大于 3 克/厘米² 时,冲击波从上向下影响单根艾条燃烟,观测到能使烟柱上升速度减小 20—30% 的抑制上升气流效应。

另外,根据 $St = \frac{w\tau}{H}$,得到大气中气柱受爆炸后非定常变化时间 $\tau = \frac{St \cdot H}{w}$,由实验得 $St = 0.3 - 1.3$,求得气柱的 τ 为 100—260 秒,即 2—4 分钟左右。可见,在云中或云下爆炸时,对气流的影响可能维持几分钟的时间,这样的时间可以对云内过程产生影响。也就是说,前一炮爆炸的影响还没有消失时,下一炮的爆炸影响已经接上来了,因此连续的炮击将对气柱产生连续不断的影响,气流在这样长时间内受到影响,必然对云内过程有明

显的作用。

二、炮击影响降水^[7]

为了研究炮击对云和降水的影响,我们首先对人工防雹试验中经常发现的并且比较便于观测的炮击后促进降水的现象即“炮响雨落”进行实验。

1973年至1974年利用三七高炮对16块对流云体进行了44次炮击,在炮击前后进行了雨滴谱的测量,初步获得了炮击影响降水的下述结果:

1. 炮击促进了未降水对流云产生降水 对13次未降水对流云作业,其中10次在炮击后即产生了降水。一般炮击后1—2分就见到个别雨滴,4—5分就测到大批雨滴,根

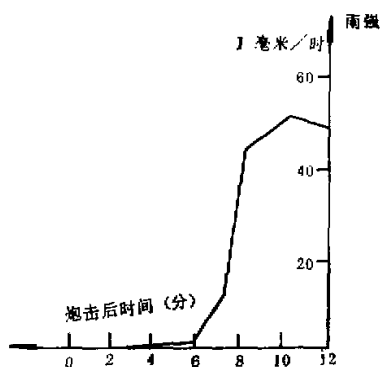


图1 炮击促进未降水对流云降水一例

据雨滴末速估计,它们应从云的中下部位落下。图1是其中一例,这是1973年7月28日15点36分对未降水浓积云作业后,雨强随时间的演变。图1和雨滴谱资料分析表明炮击后3分钟出现1—2毫米雨滴,6分钟以后降水强度陡增。

2. 炮击增强了已降水云的降水 “炮响雨落”的现象也反映在炮击已降水对流云造成雨的阵性加大方面。在31次降水云体试验资料里有26次可以分析,其中21次在炮击后观测到雨滴总浓度和雨强增大。由雨滴谱的连续观测表明,炮击后各种大小的雨滴

浓度一般都增长,特别是1—2毫米的雨滴明显增多,然后减少或回到原有谱形;同时也多次观测到炮击后出现了雨滴谱的第二峰值;在已观测资料里,约有80%的作业出现上述现象。图2是炮击影响雨滴谱变化的一例。这是1974年8月21日17时48分35秒炮击前后的雨滴谱变化。炮前雨强很小,滴谱无明显第二峰值,炮击后0.5分大小雨滴普遍增多,出现第二峰值,2分钟后谱进一步加宽,这时雨强达最大,6分以后雨强减小,谱形回到原来无第二峰值的状态。

为了对比对流云与高层云炮击的影响,还对降水性高层云进行了炮击实验,炮击影响虽不如对流云强度变化那么大,炮击后雨滴谱也出现第二峰值等现象。由于层状云降水一般稳定少变,很少有双峰,因而这些现象更进一步说明炮击的影响。

从以上的观测资料中看到了炮击影响云和降水的现象。炮击促进了未降水对流云的降水,影响是迅速的,雨从云的下部降下,炮击已降水的云体时,迅速增强了雨强和浓度,并影响了谱形。影响的雨滴,部分是来自云中,而另一部分可能是来自云下降水空间。这些现象表明,炮击的作用是迅速的,可能是通过动力作用造成云中或云下降水区里气流某些变化而发生降水;初步的理论计算表明,只要爆炸能改变上升气流,就可以使云中已有的降水提前降落或短时间内降水增大,并在炮击后2—3分以后地面雨滴谱发生改变;第二峰值的出现启示着炮击可能也致使某些小滴并合及大滴破碎,造成与炮击有某种联系

的1—2毫米大小的雨滴短时剧增。

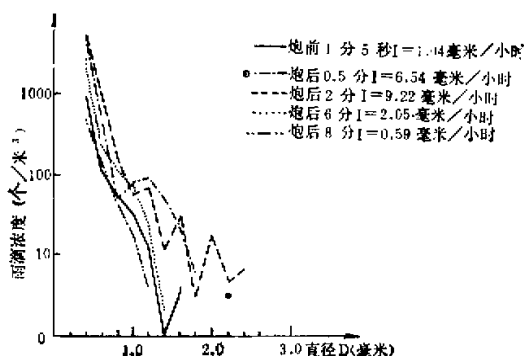


图2 炮击影响雨滴谱形演变一例(1974年8月21日,浓积云)

三、炮击对流云试验

分析炮击后云外形的变化也是探讨爆炸影响云与降水的一个途径。为此,我们在1973、1974两年利用三七高炮对发展中的对流云进行射击。地面采用照相、电影摄影、经纬仪和固定角度的云体外形素描以及炮瞄测距仪等进行云变化的宏观观测。

从两年十三次炮击厚度约在1—3公里的中、小积云云头的试验中,大多出现了不同程度的云泡消散现象。例如74年7月16日,炮前已出现特征较为清楚的三个云泡A、B、C,炮击云泡为云体后侧的云头C。我们选取B云泡为对比云泡,从B云泡的仰角读数(图3)可以看出,在炮击前处于单调下降,计算它的下降速度约1.0米/秒,炮击后此对比

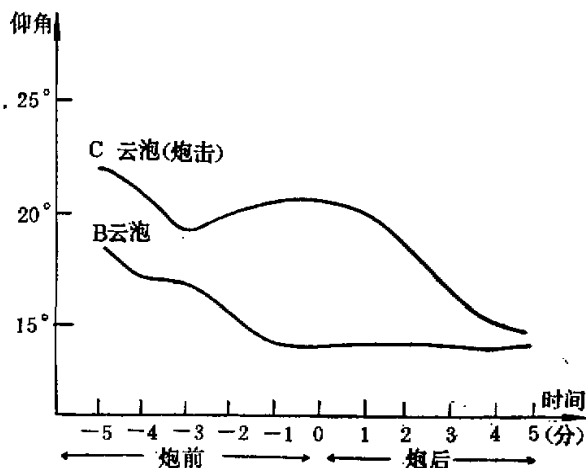


图3 炮击前后对流云泡的高度(仰角)演变一例

云泡B处于稳定少变，而炮击的云泡C从炮击前持续5分钟的上升速度（约0.9米/秒），在炮击后立即变为下降，其下降速度约3.3米/秒。从两个云泡的对比可以发现炮击云泡C在炮击后不再继续向上发展，也不趋于稳定少变，而立即变为下降，其转折时间正好和炮击时间相对应。

另外我们还观测到74年7月19日的一个个例，在弹头入云部位（箭头所指之处）炮后2分出现一个宽度百米的缺口（见图4），炮后3分演变为一个结构清楚的窟窿，炮后3.5分此窟窿逐渐消失。这是炮击对云结构局部影响的另一种形式。

又如73年7月26日，炮击了云的中上部，炮击后云体猛涨但结构很松散，这是一般自然变化中很难见到的现象。

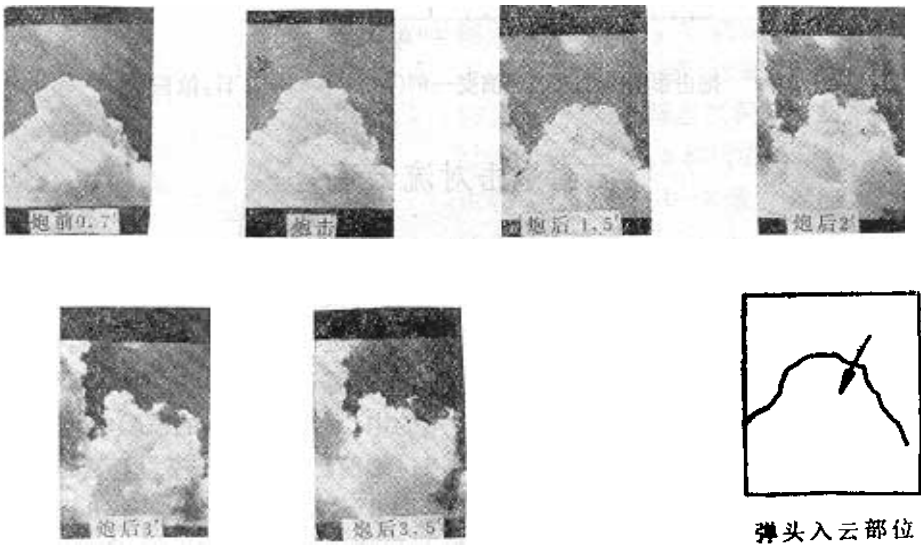


图4 炮击对云结构的局部影响一例

综上所述，炮击后出现云消现象已多次被观测到，看来决非都是巧合。一般打云头有利于云消，这可能是炮击抑制其上升气流所造成的。

四、爆炸影响冰雹云的雷达观测研究

为了进一步研究爆炸影响冰雹云的动力性作用，1975—1977年我们结合山西省昔阳县人工防雷试验，用雷达观测研究了爆炸影响强雷暴（大多数为冰雹云）的作用^[8]。观测方法一般是，冰雹云移近作业炮点时，雷达加密观测，当防雷指挥部决定对该云炮击作业时，同时通知炮点和雷达站，这时雷达对云的炮击部位尽可能进行连续观测，以记录炮击前后云的变化。三年来，对炮击作用有较完整观测的有11次（其中10次为冰雹云），各次炮击和雷达等观测简况如表2所示。

由表可见，在11次雷达对强雷暴云的炮击观测中，除2次外，有9次看到下述现象：

1. 在炮击部位出现了回波窟窿、空洞或弱区。它们的水平尺度为从回波上可辨起（约1公里）到3—4公里。窟窿最先在爆炸层（2—4公里高度）出现，并且一般在爆炸后迅速

表 2 爆炸影响冰雹云雷达观测简表

序 号	日 期	炮击时间	炮击弹量 (发)	主要回波特征及参量演变情况
1.	75.7.14	18 ¹⁵⁻⁴⁰ 主要在前10分钟内射击	234 85	炮击部位出现明显窟窿,最大水平尺度达4—5公里,高度在3公里层以下,出现至消亡长于15分钟,两部雷达都观测到此现象,回波顶高下降1.6公里,云体减弱,上游有冰雹,炮后下游无雹。
2.	75.8.11	22 ⁰⁰⁻¹⁵	28	炮击部位短时出现小回波窟窿。
3.	76.7.6	15 ^{30-16²⁰} 15 ^{40-16²⁰} 主要在前15分钟内射击	75 45	炮击部位出现明显窟窿,水平尺度约3公里,回波顶高度下降约5公里,云体减弱,解除冰雹云警报。
4.	76.7.10	19 ⁰³⁻¹⁰	66	城关雷达发现炮击部位有窟窿,西沟雷达在19 ¹⁵ 观测到此回波强区裂成碎块,回波减弱。
5.	76.7.11	12 ²⁵⁻⁴⁵	67	炮击部位见回波缺口,强区分裂。
6.	76.7.12	14 ^{20-15⁰⁰}	56	城关雷达观测似有小窟窿,不确切。
7.	76.7.22	15 ³⁷⁻⁵² 前半段时间猛烈射击	200	炮击部位出现窟窿,以后扩展至水平尺度约5—6公里,炮击后回波顶陡降约6公里,降雹明显减弱,云体逐渐分裂。
8.	77.6.25	18 ³⁰⁻⁴⁰	60	炮击区回波减弱,出现凹区,云顶下降3—4公里。
9.	77.6.29	12 ³⁷⁻⁴⁹	31	炮击区出现窟窿,尺度约2—3公里,附近有降雹,本站无降雹。
10.	77.6.29	17 ⁰³⁻³⁰ 主要集中于前10分钟射击	174	炮击区云顶明显下陷3—4公里,强区减弱出现凹陷区,周围有雹,炮点附近无雹。
11.	77.7.1	16 ³⁵⁻⁴²	40	未见异常现象。

(约几分钟)可辨,存在时间最长超过15分钟。



图 5 炮击前雹云回波
左 PPI 右 RHI

例如1976年7月22日15时30分左右有一块冰雹云移经14道岩炮点(距雷达站约20公里),由图5可见,云体的PPI剖面边沿光滑,从RHI上看似为对称雹云,云体结构严实,炮点上空附近无空洞。从15点37分起炮点进行炮击作业,共发射炮弹200发,弹着点多数在3公里附近爆炸。猛烈炮击后5分钟,开始在仰角3°的PPI回波上出现凹区,7分钟后在RHI上(见图6a)出现明显窟窿。它起始于3公里层,向下略扩展,尺度

仅 1—2 公里,炮击影响除反映在无衰减回波外,在较强回波区也有反映,到 15 时 54 分—55 分,在扩展移动的原炮击区部位(回波以每分钟 $1/3$ 公里速度向东北扩展移动),窟窿在扩大,运动使它略呈倾斜。窟窿区水平尺度约 5—6 公里(见图 6b),与此同时,云体开始明显减弱,在 15 分钟内云体顶高下降了 6 公里,回波窟窿上边下垂的悬挂物表示着云体下沉拖带较强,较多云水粒子在下降,加速着云体消亡。

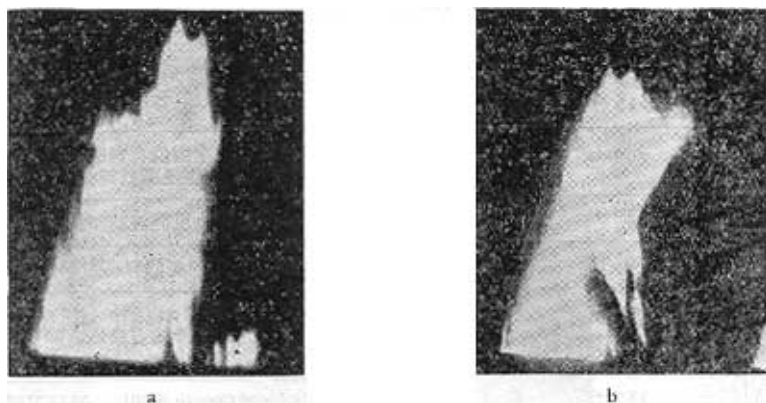


图 6 猛烈炮击后的 RHI 回波窟窿

2. 有七次看到炮击后回波顶高下降,云体减弱,强区分裂等现象,其中 5 次顶高下降自 1.6 公里到 6 公里。例如 1977 年 6 月 29 日有一冰雹云,从 17 时 02 到 05 分的 RHI 剖面上看,云的顶部比较平坦,自 14—32 公里距离内云顶部在 10 公里上下,17 时 05 分开始炮击 174 发炮弹,作业后 5 分钟回波就有所下降,到 17 时 14—16 分时,炮点附近(距离为 20 公里一带)云顶普遍下陷,云顶下降 3—4 公里,在几公里以外,云顶仍维持原高度。这天周围有降雹,但炮点附近无雹。这种炮击后看到降雹减弱或解除冰雹云警报的共有 5 次。

另外还发现,炮击云体有组织上升气流区、反射率梯度大的回波墙和强回波区时影响效果较好,射击弹量多而集中,上述作用较明显。

从以上现象可以看到,爆炸对云体的直接影响造成爆炸区云水粒子迅速下落,从而在爆炸高度首先出现回波窟窿或弱区,这现象出现迅速,但一般维持时间较短(几分钟),表明这一作用只是一种初始触发机制。爆炸之后,窟窿多向下扩展,有时可见下垂式倒悬回波流光,有时窟窿可扩展至云底,但向上扩展很少。这表明爆炸的触发作用可引起降水粒子 and 气流的下降运动,正是由于这些作用造成了比窟窿现象晚些呈现的云体顶部下陷、云体减弱、降雹终止等现象。

五、爆炸影响云发展的物理设想

从多年的野外观测分析中我们认为:垂直气流是对流云体的骨架,对于云的发展和衰亡,云中降水的形成和崩溃,起着很重要的作用。上升气流的起因与环境大气和近地层的热力和动力等因素密切相关,但上升气流的发展和衰减又与云内微物理过程不可分割,

它们相互影响、相互制约。如果人工影响了云内上升气流,其后果必然影响到云中微物理过程;反过来,微物理过程又将影响云中垂直运动。如此循环反复,最后使云的整个发展过程得到改变。

通过以上实验和试验我们可以提出爆炸影响对流云发展的物理设想(见图 7) 由于爆炸产生的冲击波以及爆炸后高浓度碎片和其他粒子高速向四周飞散,扰动或改变了云中原来的上升气流。在爆炸高度以上,受到的影响主要是促进上升气流,但由于重力场和热力场的作用只能在一定条件下才可以引起云顶向上发展的效果。爆炸高度以下,将诱发出下沉气流。由于扰动了上升气流,破坏了原来云中存在降水粒子落速与上升气流的关系。如果原来降水粒子末速与上升速度是平衡的,由于扰动破坏了运动平衡,粒子作向下运动;如果原来降水粒子在向上运动,由于减弱了上升气流甚至转变为下沉气流,粒子转向下降。降水粒子的下降拖带了空气的下沉,再加上水滴下沉时的蒸发,不稳定层结使下沉空气不断获得负的浮力,因此就可能引起较有组织的下沉气流的发展,从而破坏了云的自然发展过程,或者提早产生不强烈的降水、降雪现象,或者使雷雨云、冰雹云得不到进一步的形成和发展。

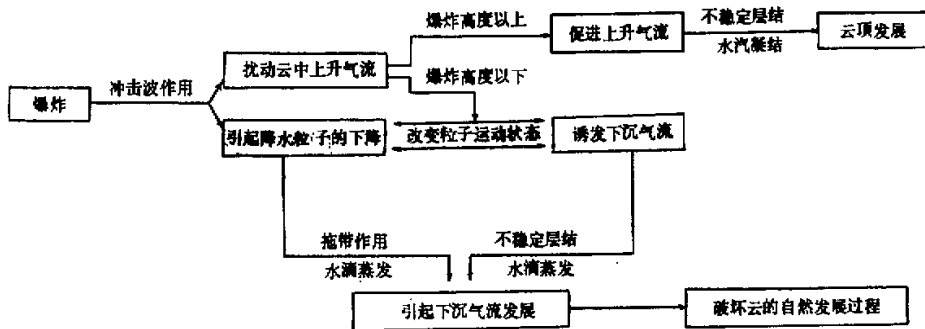


图 7 爆炸影响对流云的物理设想

根据这个物理设想,爆炸的作用可能在积状云中比在层状云中要大,因为在积状云中层结较不稳定,云中垂直气流强烈而水平尺度较小。在积状云中下沉气流的发展,往往可以使整个云崩溃,而对层状云,局地下沉气流的产生,对云只能有局部的影响。

根据这个物理设想,爆炸的作用可能在已经形成降水粒子的对流云中比没有降水粒子的对流云要大。特别是在有含水量累积区的云中比无累积区的云中要大,因为大量集中的降水粒子的下沉,可能“压灭”或严重影响云中原有的上升气流。

根据观测,对流云中上升气流速度随高度呈抛物线分布,在这样的情况下,根据上述物理设想,在最大上升速度处进行爆炸作业,其作用可能最为显著,因为在最大上升气流的上面积聚了大批降水粒子,被上升气流阻挡在那里。如果通过爆炸作业,一定时间内扰动或改变了那里的上升气流,这些积聚了的降水粒子将向下运动,由于在此高度以下的上升气流逐渐减小,再也阻挡不住向下运动的降水粒子,从而破坏了云的自然发展过程。

因此可以有这样的看法,只要爆炸强度足够,爆炸对积状云发展的破坏作用,在浓积

云中可能比淡积云要大,在雷雨云中可能比浓积云要大,而在冰雹云中可能是最显著的了。另外根据上述物理设理,在对流云中进行爆炸作业,在一定条件下还可以促进云的发展。如在云的中下部位进行爆炸作业,特别是在水汽来源比较充沛,大气层结很不稳定的情况,爆炸诱发出来的上升气流可能得到进一步发展。

显然,这个物理设想是初步的,设想中的某些过程需要深入研究,要进行必要的定量估计。

本课题的研究是在顾震潮教授领导下开始的,作者以感激之情深深地怀念着他。

参 考 资 料

- [1] 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,第2卷(1978年),第二期。
- [2] 王昂生、黄美元,冰雹和防雹研究述评,大气科学,第2卷(1978年),第一期,第76—84页。
- [3] O. Vittori, Preliminary note on the effects of pressure waves upon hailstorms, *Nubila*, 1960, No. 1, p 34—52.
- [4] G. G. Goyer, Mechanical effects of a simulated lightning discharge on the water droplets of Old Faithful Geyser, *Nature*, June, 26, 1965, p. 1302—1304.
- [5] 中央气象局研究所编,全国人工降水防雹科技座谈会报告选编(下),1973年,343页。
- [6] 大气物理研究所云务物理研究室原理组,冰雹与人工防雹,科学出版社,1979。
- [7] 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,1978年,第一期,第62—67页。
- [8] 大气物理所三室原理组,爆炸影响冰雹云的雷达研究,全国人工影响天气科技会议,1978,南宁。

STUDIES OF INFLUENCE ON DEVELOPMENT OF CONVECTIVE CLOUDS BY EXPLOSION

Huang Mei-yuan et al.

(Institute of Atmospheric Physics, Academia Sinica)

ABSTRACT

A series of experiments of physical influence on development of convective clouds by explosion have been described in this paper. Based on these experiments and observations a physical hypothesis of influence on convective clouds by explosion has been proposed. It has been found out that explosion has influence on updraft, the movement of cloud and precipitation particles. And in unstable atmosphere it could lead to strong downdraft and eventually destroy or change the prior natural processes of the development of convective clouds.