

关于爆炸防雷方法的理论依据 和技术要领的探讨

许焕斌 王思微

(北京应用气象研究所)(气象科学研究院)

提 要

本文分析了我国“37”高炮防雷及苏联的防雷效果,基本的看法是:在防雷效果中,爆炸作用是一个相当重要的因素。我们根据爆炸产生的力学效应和润滑效应,以及冰雹在雹云中增长轨迹有集结于沿雹云移向上相对环境水平风速为零的近域内的现象,对爆炸防雷方法的技术要领提出一些建议。

一、前 言

自1973年以来,广泛使用了“37”高炮对雹云进行爆炸和引晶的方法进行防雷。八十年代初,一批基于统计检验和物理核査的防雷效果报告已经发表,总的来说,认为“37”高炮防雷是有效果的。苏联人宣布他们的防雷效果达到60—90%,其方法除《云》式火箭外,皆伴有爆炸。为此,我们从效果分析入手,结合有关爆炸产物的气象效应和冰雹增长运行规律方面的研究结果,探讨了爆炸防雷的理论依据和技术要领,希望为爆炸引晶方法的科学化作一点努力。

二、关于防雷的效果

1. 我国防雷的情况

表1给出了内蒙、新疆等地区的防雷情况。

2. 苏联的防雷效果

表2^[9]给出了1984年在苏联的10个地区的防雷效果,减少雹灾58—100%。

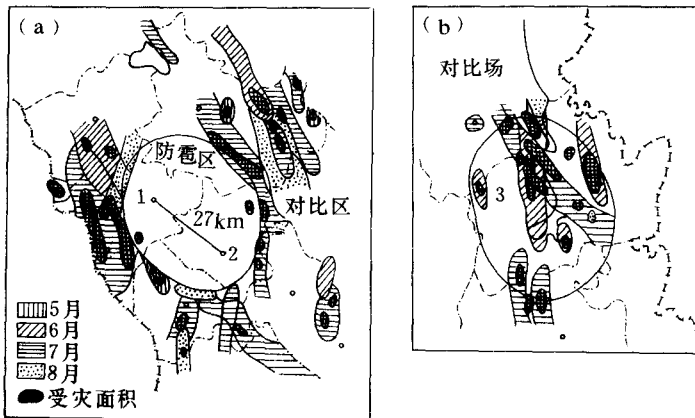
图1给出了摩尔达维亚地区1968年的防雷区和对比区内雹击带分布的个例。

表 1 各地“37”高炮爆炸、引晶防雷效果

序号	地区	年代	检验方法	检验项目	效 果	作者
1	内蒙昭盟	1973—1978 (6年)	统计检验扣除历史变化	雹日	1. 弱成灾雹日减少 75% 2. 雹日等级下降, 强雹日降为中雹日, 中雹日降为弱雹日	杨得宇 ^[1]
2	新疆昭苏	1974—1980 (7年)	统计检验	雹日	1. 雹日平均减少 31%, 显著水平 0.01 2. 大雹日减少 48%, 显著水平 0.01 3. 降 2 厘米以上的大雹作业无效	李大钧 ^[2]
				降雨	增加 25%	
				降雹时间	增长 23% (1.2 分钟), 显著水平 0.01	
3	甘肃永登	1973—1978 (6年)	统计检验	降雹次数	1. 对降雹危险性指标 $P \leq 0.35$, 增加 41% 2. $0.35 < P < 0.55$ 减少 66.7% 3. $P \geq 0.35$ 减少 30.2%	陈立祥 ^[3]
4	四川冕宁	1973—1976 (4年)	统计检验	粮油产量	减少损失 78.6% 显著水平 0.01	周和生 ^[4]
				雹灾区长度	显著变短 显著水平 0.01	
				强回波高度	显著降低 显著水平 0.01	
5	甘肃平凉	1974—1976 (3年)	个例物理分析	回波移动	移速显著忽然变慢, 有转向对比不明显	杨颂禧等 ^[5]
				强回波下沉	回波顶高急速下降	
				回波衰弱	比自然衰减速度快一倍	
				雹云消散	加速雹云消散	
6	山西昔阳	1969—1976 (8年)	统计检验	受灾面积	有效 46.6 (≤ 41.6 不显著)	黄美元 ^[6]
7	山西昔阳	1973—1974	个例物理分析	降雨	炮响雨落, 炮击后 1.5—6 分钟内产生降雨变化, 现象是: ① 未出现降水的浓积云和积雨云发生降雨; ② 已降雨的云, 降雨强度加大, ③ 雨潜变宽, 出现双峰	黄美元等 ^[7]
				雷达回波	炮击后, 回波消弱, 回波顶高下陷, 强区分裂	
8	内蒙河套平原	1983—1985 (3年)	统计检验	受灾面积	平均减少 89.9%, 显著水平; 秩和检验小于 0.01—0.05 多事件检验, 小于 0.0005—0.008	王千元 ^[8]

表2 苏联1984年的防雷结果^[9]

地区	防护面积 (千公顷)	防护的农作物	防雷技术工具	防雷效果 (%)	年平均降水量 (毫米)
摩尔达维亚	1970	葡萄, 谷物, 果园, 烟草	16部雷达, 193个火箭发射器, 《云》式, 《阿拉桑》式火箭	58	520
乌克兰奥捷斯 卡亚省	285	同上	2部雷达, 20个火箭发射器, 《云》 和《阿拉桑》火箭	98	500
乌克兰克里米 斯亚省	430	葡萄, 谷物, 果园	4部雷达, 50个火箭发射器, 《云》式和《阿拉桑》式火箭	87	400
克拉斯诺达尔 斯克地区	770	谷物, 果园 经济作物	6部雷达, 48门高炮《埃里勃鲁士》 炮弹	93	750
北高加索	712	同上	7部雷达, 50门高炮《埃里勃鲁士》炮弹	97	500
格鲁几亚	1087	葡萄, 果园	5部雷达, 84个火箭发射器, 28门高炮 《阿拉桑》, 《埃里勃鲁士》炮弹	74	500
亚美尼亚	1075	同上	10部雷达, 48门高炮《埃里勃鲁士》炮 弹	100	350
阿塞拜疆	1220	葡萄, 棉花, 果园, 烟草	12部雷达, 76门高炮《埃里勃鲁士》炮 弹	90	250
乌孜别克斯坦	670	棉花, 葡萄, 果园	7部雷达, 41个火箭发射器和高炮 《云》式火箭, 《埃里勃鲁士》炮弹	100	450
塔吉克斯坦	670	棉花, 葡萄, 烟草, 果园	6部雷达, 33个火箭发射器和高炮 《云》式, 《阿拉桑》火箭, 《埃里勃鲁士》 炮弹	90	650

图1 摩尔达维亚1968年防雷区,对比区和对比场的作物受灾面积分布图^[10]

地名: 1. Корнешты 2. Калараш 3. Кридуляны

综合来看,我国和苏联用爆炸引晶方法,不论是用统计检验,还是用个例物理分析,对防雹和雹云都表现出多方面的效果,而且效果表现十分相似。

3. 爆炸引晶方法

从引晶作用的观点来看,存在着不少问题,综合起来有以下几点。

(1) Сулаквилдзэ^[11]认为,在爆炸引晶方法中,对强对流云播散量比估算量要低,而产生作用的时间又比理论预计的时间快得多;影响的范围比用平流和湍流估计的大得多。这说明单用物质粒子的微物理作用难以理解所得到的效果。

(2) 大气所,兰州高原大气所,苏联高山地球物理所,所报导的爆炸对云作用的影响效果,看来也难以用播散物的粒子微物理作用来解释。

(3) 内蒙气象局的防雹工作者指出,炮弹带不带、带多少碘化银,对防雹的效果无明显差异。

(4) 苏联和我国的防雹效果,在统计上都超过50%,有的高达90%以上。一般认为播撒方法难以抑制强冰雹过程,而强冰雹又可造成80%以上的雹灾,因而人们怀疑有50%的效果。但苏联20多年来的防雹效果一直在60—90%。这样的效果用气候变化来否定是不太容易的。

(5) 根据苏联防雹区和对比区内雹击带的分布(图1是一个例子)来看,有几个突出的现象:

i) 雹击带有的在防雹区边沿中止,有的转向。

ii) 防护区内的降雹面积显著减小,但在防护区边沿,形成大面积降雹区,降雹频率也增高了。这说明防雹措施只改变降雹分布,消雹作用不明显。

iii) 防雹火力点离防雹区边界只有10公里左右,降雹很少深入到边界之内。这说明爆炸引晶起作用的时间在10分钟左右,再扣除冰雹从云中降落到地面的时间,约5分钟。催化剂在这么短的时间内以争食过冷水的方式来减少冰雹尺度是很困难的。

(6) Сулаквилдзэ 提出的用播撒方法增加雹胚与自然雹胚争食过冷水,以减少冰雹的大小。由于过冷水供应有两种方式,一是过冷水量一定,没有补充;二是过冷水以一定的量由下而上不断地补充。一般认为前者用竞争雹胚方式可能奏效,而对后者表示怀疑。

三、数值模拟

为了论证竞争胚胎的假设,我们设计了一个一维时变过冷水消耗模式。

1. 模式结构

(1) 给定抛物线型上升气流结构,最大上升气流位于模式计算的起点;

(2) 在某一个计算层,有上升气流 w_j ,而处于该层的冰雹有大有小,但其质量加权平均速度等于 w_j ,为此求出冰雹群的谱分布斜率: $\lambda_j = \left(\frac{4g\rho_l}{3C_D\rho_a} \right) \left(\frac{\Gamma(4.5)}{6w_j} \right)^2$; 由 λ_j 在给定谱分布截

距 n_0 情况下,算出该层的冰雹体积比含量 $A_i = \left(\frac{\pi\rho_{ice}}{\rho_a\lambda_j^3} \right)$; 其中 ρ_l, ρ_a, g, C_D 分别是冰雹密度,空

气密度,重力加速度和阻力系数, Γ 为 Gamma 函数;

(3)过冷云水供应量(C_w)是给定的,其上一层 $C_{w_{j+1}}$ 与 C_{w_j} 的关系为: $C_{w_{j+1}} = C_{w_j} - (P_{C_w}/\rho_a)\Delta z/w_j$ 。过冷雨水 C_R 也是给定的,且有关系式: $C_{R_{j+1}} = C_{R_j} - (P_{R_w}/\rho_a)\Delta z/w_j$,其中 P_{C_w} 和 P_{R_w} 为云水和雨水的变化率, Δz 是垂直计算步长。

(4)冰雹的增长,考虑了干、湿增长, A_i 随时间的变化为: $A_i^{j+1} = A_i^j + (P_{IH}/\rho_a)\Delta t$, P_{IH} 为冰雹量变化率。至于降雹,是在计算起点层 $j=1$ 的 $A_{i,j=1}$ 增大以后,其落速 v_i 大于 $w_{j=1}$ 时,在 Δt 时间内落到 $j=1$ 层以下的降雹量为: $S_I = (A_{i,j=0} \times \rho_a) \times d_{Iz}$, $d_{Iz} = (v_i - w_1)\Delta t$, v_i 是格点 1 处的冰雹末速。

(5)当有引晶播撒时,冰核使云滴和雨滴晶化。由于云滴浓度高达 10^5 /升,雨滴的浓度为 10^0 /升,冰雹的浓度为 10^{-3} /升;而引晶的目标是使雹胚浓度增加 100 倍左右,但能迅速形成雹胚的只能是过冷雨滴的冻结。因而播撒使 C_R 减少,而对云水量影响不大。如果雨水中有 α 部冻结成冻雨,则冻雨量为 $A_S = \alpha C_R$,雨含量变为 $C'_R = (1 - \alpha)C_R$, A_S 的分布式为: $N_{A_S} = N_{R0}(e^{-A_S^0} - e^{-A_S^0})$ 。

(6)冻雨的增长也为干、湿生长方式, A_S 随时间的变化和降落与冰雹相似。

2. 模式计算结果

表3 模拟试验结果

序号	ITEX*	冰雹谱截距	雨谱截距	云水量	雨水量	MDF*	雨水冻结份数	自然降雹量	人工降雹量
1	1	3.0E-3	0.08	0.005	0.005	1	0.3	0.16	0.0
2	1	3.0E-3	0.08	0.005	0.005	0	/	0.21	0.0
3	1	1.5E-3	0.08	0.01	0.01	1	0.6	0.089	0.0
4	1	1.5E-3	0.08	0.01	0.01	0	/	0.873	0.0
5	0	3.0E-3	0.08	0.005	0.005	0	/	13.55	0.0
6	0	3.0E-3	0.08	0.005	0.005	1	0.3	3.696	33.91
7	0	3.0E-3	0.08	0.005	0.005	1	0.6	3.330	26.24
8	0	3.0E-3	0.08	0.005	0.005	1	0.9	3.119	22.24

* ITEX=1代表过冷水固定;MDF=1,代表人工增加雹胚

表3列出了8个算例,分析此表得出以下几点:

(1)在固定过冷云、雨水含量下(ITEX=1),序号2,4可看出降雹量为0.21,0.87cm。

(2)ITEX=1情况下,由播撒使一部分雨水冻结,结果使降雹量减少,冻雨降不下来,见序号1,3。这说明播撒可以起到防雹作用。

(3)对于不断有自下而上的过冷水供应时(ITEX=0),降雹量可多达13.55cm,见序号5。

(4)在 ITEX=0时,经播撒的序号5,降雹量由13.55降到序号6或7,或8的3.70,3.33和3.12cm,播撒可以减少冰雹的降落,但冻雨形成的雹胚可以长成大雹。在计算中长大后的冻雨分布斜率可以小于冰雹分布谱的斜率,而冻雨的浓度则比冰雹大10—10²倍,即使考

虑零度层以下冻雨融化率较高,也会显著地增加总的降雹量。

数值模拟的结果说明,苏联的播撒理论只对固定过冷水量的雹云播撒可能实现防雹,对于连续供应过冷水的雹云,播撒使雨冻结成雹胚成了人工造雹。

综合效果分析和数值模拟的结果表明,单由引晶形成竞争雹胚的方式难以解释所报导的效果,更难以解释苏联廿多年来高达60—90%的效果。考虑到爆炸的作用时间短,传播速度快,以及伴随爆炸而观测到的雹击带转向,回波衰落,炮响雨落等现象,很像是对气流和粒子运动有动力学的作用。这一点已为我国和苏联的不少学者所注意,并采取了多种方法来研究爆炸的气象效应。

四、爆炸的气象效应

1. 爆炸的气象效应

(1)力学效应^{[12],[7]}。定点序列爆炸,可以在炸点周围产生一个附加的等效压力场,当爆炸位置与气流场配置适当时,可以在100米范围内的气流由3米/秒左右制动到零,即爆炸对气流有阻尼作用,这表现为气流减弱或增加稳定度,抑制对流的发展,有可能使云衰弱和转向。

(2)润滑效应^{[13],[14]}。爆炸产生的声波可以进入降水粒子运动边界层,引起边界层内的动量交换,推动边界层底层气流加快,推动绕流分离点后移,改变绕流流型,减小阻力,使粒子运动加速下落,这可以用来解释炮响雨落,回波下沉,改变降雹分布等。

2. 冰雹增长轨迹的特征^[5]

在具有水平风切变的环境中发展起来的雹云,存在着一个沿雹云移向相对水平风速等于零的线(以下简称零线),形成大雹的冰雹增长轨迹,总是围绕着零线旋进长大,轨迹离零线越近,冰雹长得越大,一旦离开这条线,不是被吹出云外就是降落到地面。特别是对强冰雹云,水平风切变值相当大时,出发地离零线位置的远近有小的差别,冰雹的终极尺寸会相差甚大。

3. 力学效应和润滑效应

可以改变气流,也可以使冰雹粒子落速加大,但由于这两个作用发生的影响在弱上升气流区较明显,作用的范围也不大,必须针对雹云物理规律和冰雹增长轨迹的特点而施行,零线的前端是可供形成大雹的雹胚出发地(它可由探空或测风和雷达观测来确定),这里是施行防雹作业的合适地方。

五、关于爆炸防雹的技术要领的建议

根据以上的论述,可以提出几条有关爆炸防雹方法的技术要领的建议,它们是:

1. 高炮布点。爆炸的气象效应主要是阻尼气流和润滑大降水粒子的下落,附加压力和

声振动的作用是场性质的,起作用快。如云中已有冰雹,相对落速为15米/秒,从4000米高处落至地面约需5分钟,而冰雹云移速一般是每小时40—50公里,在这段时间内云可前进4公里左右。所以高炮作业点,应选在防护区上游5公里左右处。

2. 高炮作业应对准雹云主上升气流区前沿零线位置,采取定点(区)速射,上升气流区位置由雹云前拱形黑云底来判断,而零线高度由探空测得的环境风场和雷达判定的回波移动速度来确定。

3. 高炮应首先在防护区外沿连成网,即使采用定点(区)速射,高炮的门数也应以能控制整个雹云主上升气流的前沿区而决定,由于雹云路径的变化,炮网应适当地宽于雹云尺度。

4. 需配备雷达、探空和通讯指挥设施。由于高炮防雹作业需要知道零线位置,需要判断雹云,需组织炮网分区定点速射。为了准确、及时、协同、可靠、节约,没有一套设备系统是不行的。

六、结 语

根据我国和苏联多年来防雹效果的分析,以及对苏联防雹物理模式的数值模拟论证,说明用单一的成冰核播撒作用难以理解一些重要的效果表现,而爆炸作用又能起重要作用。为此结合我国关于爆炸引起的气象效应的理论研究结果,以及冰雹增长轨迹规律的数值模拟结果,提出了爆炸防雹方法的理论依据和技术要领的建议,以供防雹试验研究者在设计和施行爆炸方法时参考或验证。

最后,还需着重说明二点:1. 爆炸作用的二个效应,虽然可以在防雹试验结果中看到反映,但是仍然需要经过实验来验证。这项实验只要仔细推敲实验方案是可以推行的。但是建立一套专门的实验设备和测试手段的费用是十分昂贵的。进行实验的要求是:力学效应的实验要有一支惯性气流;而润滑效应要能对毫米大小的粒子进行阻力或运动变化的测量;还需要研究模拟爆炸装置等。列题进行这类基本实验研究是必要的。2. 从数值模拟的结果来看,对没有连续的过冷水供应的雹云来说,靠消耗云中已有过冷水,成冰核播撒使已存在的雨滴冻结,可以抑制大雹的生长而冻雨又不致于长成冰雹;可是当有连续不断地自下而上供应过冷水时,播撒形成的冻雨成为大批雹胚,在充足的过冷水条件下迅速长大成冰雹,而这种情况通常是强雹云,播撒是有害的。如何估计过冷水供应的状态,估计的可靠性涉及到播撒的结果是难以掌握的。为此,“37”炮弹带不带碘化银又是一个需要研究试验的问题。

参 考 文 献

- [1] 杨得宇,林西高炮防雹的效果分析(三),内蒙气象局,油印本,1983年。
- [2] 李大钧,新疆昭苏北部1974—1980年防雹试验结果,雹云物理会议论文,兰州,1982年。
- [3] 陈立祥,甘肃省人工防雹试验效果分析报告,雹云物理会议论文,兰州,1982年。
- [4] 周和生等,高炮防雹试验效果的统计分析,四川省气象局,油印本,1982年。
- [5] 杨颂禧等,高炮效果的初步分析,中国科学院,高原大气物理研究所,油印本,1982年。
- [6] 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,2,124—130,1978。

- [7] 黄美元,王昂生等,人工防雹导论,170—176,科学出版社,1980年。
- [8] 王千元,内蒙古河套平原高炮防雹效果分析,内蒙气象局,油印本,1987年。
- [9] Вурцев, И. И., Противградные работы в СССР, Гидрометеоздат, 1985.
- [10] Воронов Г. С. и Т. Д., Исследования и Искусственные воздействия на градовые процессы, Труды VIII, Всесоюзной конференции по физики облаков и активным Воздействиям, 379—390, 1970.
- [11] Сулаквидзе, Г. К., Результаты работ кавказской противоградовой экспедиции в 1965г. ВГИ. Труды, Выпуск 7, 1966.
- [12] 许焕斌,关于爆炸影响气流的力学效应,气象,10,26—29,1979.
- [13] 许焕斌、王思微,关于声振动对球形降水粒子运动边界层和运动状态的影响,气象学报,4,431—439,1984.
- [14] 许焕斌、王思微,关于爆炸或声振动对降水粒子运动状态的影响—湍流比拟作用和条件,气象科学技术集刊,9, 93—97,气象出版社,1985年。
- [15] 许焕斌,王思微,不同流型雹云中大雪运行轨迹的数值模拟,气象科学研究院院刊,4,2,1989.

A STUDY ON THE THEORETICAL BASES AND TECHNOLOGICAL GISTS FOR HAIL SUPPRESSION BY EXPLOSION

Xu Huanbin

(Beijing Applied Meteorological Institute)

Wang Siwei

(Academy of Meteorological Science, SMA)

Abstract

After the analysis of effective facts reported by scientists of China and USSR in the experiments of hail suppression, an obvious impression has been built. This point is that the explosive effect may play an important role except that of ice—crystallization by seeding. Therefore, the research of explosion effects on the meteorological phenomena has been emphasized in China and USSR. Some important results of this study can be enumerated as follows: 1. The force effect on the airflow at the surrounding of explosion point which may damp the airflow at the speed of 3—4 m/s to zero. 2. The lubrication effect on the motion regime of precipitation particle in the air which may lead on to the increase of fallspeed of hailembryo. 3. There is a region within the hailcloud where the hailstone's travelling trajectories of large hailstones in the growth processes appear to concentrate, and the relatively horizontal wind speed is equal to zero in the direction of hailcloud motion. From above, the technological gists of hail suppression by the method of explosion have been suggested briefly.