

## 当前外场防雷试验的若干情况

王 雨 曾

(气象科学研究院)

### 提 要

本文主要根据最近几次国际人工影响天气会议文集及有关资料,介绍了苏联、美国、中国以及许多欧洲国家的外场防雷试验情况、防雷作业方法与效果评估方法,特别是冰雹落地动能统计法。

对于防雷作业来说,取得成功的关键是及时、准确地确定播撒部位和作业时机。

冰雹是我国和世界上许多地方经常出现的一种自然灾害,它对农业、交通、城市建筑等都可能造成很大危害。尤其对农业生产危害最大,因而引起各国政府与人民的重视,并付出很多人力、物力进行试验研究。本文主要根据最近几次国际人工影响天气会议(如第4次WMO人工影响天气会议)文集及有关资料编写出来的,仅供参考。

### 一、国内外防雷概况

为抑制冰雹的危害,一些国家很早就开展了人工影响冰雹云的尝试,但较大规模的外场防雷试验还是第二次世界大战以后,特别是60年代苏联防雷成功的报导,才引起世界各国的广泛注意。20多年来,苏联、美国、法国、瑞士、意大利、西班牙、联邦德国、保加利亚、阿根廷等30多个国家开展了人工防雷试验。下面简要介绍有关国家防雷试验的概况。

#### 1. 苏联的防雷试验

苏联是一个多雹灾国家,特别在高加索、格鲁吉亚、摩尔达维亚等地,平均年降雹日最高可达8—10天。从50年代后期起,苏联对冰雹产生的条件、雹击带的尺度、雹云的雷达回波特征以及冰雹的微物理结构等,进行了系统的野外观测和研究。1961年开始在格鲁吉亚阿拉善谷地使用火箭携带碘化银进行催化雹云的防雷试验。20多年来,结

果十分令人鼓舞。防雷保护区面积从1968年的22880km<sup>2</sup>扩大到1984年的88870km<sup>2</sup>。平均每年递增3810km<sup>2</sup>。苏联10个地区17年(1968—1984)资料统计表明,防雷效果达80%以上。每年使农作物免受雹灾损失上亿美元,苏联科学家认为,这样一个长期的统计结果可以说明苏联防雷技术方法是有效的。

由于国民经济发展的需要,苏联的防雷作业范围逐年扩大。在水文气象环境监督委员会人工影响天气局的领导下,全国有防雷人员7000多人,87个防雷队,每队由60人左右组成,配有雷达、高炮或火箭、无线电联络设备及交通工具。为保护1000—1200km<sup>2</sup>面积,一般需要5—7门高炮或10—12个火箭施放点,每次作业发射18—30发炮弹或3—6枚火箭。对超单体雹暴需要上百发炮弹或十多支火箭。每发炮弹或火箭内含50—300g催化剂,成核率为10<sup>12</sup>/g(-10℃)。作业后,效果监测人员立即乘直升飞机或汽车调查冰雹的落区、大小、数密度以及受灾范围、程度、农作物种类等。使用这些资料来估计作业效果和检查作业是否正确。

#### 2. 美国、瑞士等国的防雷试验

美国政府和一些地方政府开展了防雷试验研究。1975—1979年在堪萨斯州进行云顶播撒碘化银试验,雹灾减少了39%;1970

—1976年在得克萨斯州使用飞机进行云底播撒催化剂,防雹效果达48%,北达科他州通过历史资料对比分析,防雹试验区播撒期间(1968—1984)年平均雹灾损失比非播撒期间(1948—1960年)减少29%;而美国政府在科罗拉多州东北部进行3年(1972—1974)防雹试验(NHRE),这个试验采用苏联的播撒原理,从飞机上向云中发射携带碘化银(含97g)的火箭,并先后投入包括双波长雷达和多普勒雷达在内的8部雷达和11架飞机,却只获得了减少雹灾7%的没有显著性差异的结果。

1986年美国人工影响天气协会关于人工影响天气能力的声明中指出,虽然通过分析地面降雹的差异,一般可评估出防雹作业能减少雹灾20—50%,但对雹云内部物理状况了解甚少,还没有掌握防雹作业的科学环节。作业的实施过程是很重要的,取得作业成功的关键是及时、准确地确定播撒部位。

瑞士、法国与意大利于1977—1981年在三国交界的地区(约1000km<sup>2</sup>)共同用苏联人工防雹技术进行联合试验。试验区北部与南部分别由法国、意大利负责观测与试验,由设在瑞士机场的指挥部统一指挥,机场有一部10cm雷达和一部3cm雷达供指挥部使用。试验区内每4km<sup>2</sup>设有一个测雹板架,架上装有5块测雹板,每块为35×35×2(cm<sup>3</sup>)。另外,还有14个固定测雹仪器点和流动取样车,各仪器点及取样车上装有雨雹分离器和取样设备,收集雹样和水样进行化学分析,利用自动吸收光谱测定法,检测银含量。

作业工具:主要采用苏联“Oblako”火箭(每只装84g AgI,射高达8400m)和Moldavian型火箭(射高5000m)进行随机防雹试验,其试验程序为:

(1) 每天09时瑞士气象局发布天气预报。

(2) 每天12—21时规定为试验单元。雷达从12—21时开机观测,若发现60km范围内(以雷达为中心) $Z > 30\text{dBz}$ 时就通知有关作业点进行试验准备。

(3) 根据雷达观测指挥中心的命令,作业点发射火箭。当 $Z \geq 55\text{dBz}$ 时进行随机试验,试验是否进行,由抽签决定,即50%为随机播撒日,50%为不播撒日(即不作业)。

(4) 试验后,防雹人员立即收集雹击过的测雹板,检查冰雹的落区、大小及数密度等情况。

按照预定的5%的置信度,未能显示出播云单体与不播撒单体之间有什么显著差异。

### 3. 意大利的人工防雹试验

意大利除了与邻国联合开展防雹试验研究外,国内也在大规模地开展防雹试验。如:

(1) 维琴查防雹试验中心。这个中心包括维琴查试验区和维罗纳控制区等11000多km<sup>2</sup>,属罗马防雹公司领导,主要采用地面燃烧碘化银和飞机携带火箭进行防雹作业。

该区设有气象观测站、雷达站、无线电传真图、卫星云图接收设备,50个雨量点、300个测雹板点及2架携带火箭的作业飞机,400户农民协助观测提供降雹资料。

1977—1979年测雹板资料分析表明,单位面积(m<sup>2</sup>)的冰雹落地动能,试验区比控制区减少5—27%,冰雹质量减小12%。1977—1979年平均受灾面积比1970—1976年平均受灾面积减少35—57%。

(2) 波罗涅塞防雹试验区。该区是由当地农民防雹协会组织,是盛产水果的经济作物区。全区配备冰雹收集器、闪电频谱仪、测雹板及3cm雷达一部。

该区主要采用火箭进行防雹作业,每支火箭内装10g或8g AgI,火箭飞行最大高度为3200m,全区共有500个火箭发射点。

防雹协会根据天气预报和雷达观测站提供的情报与当地空军机场联系,进行作业或准备。国外人工防雹效果统计见附表。

### 4. 我国的人工防雹试验

在60—70年代,我国大量使用土炮、土火箭为主进行人工防雹作业,由于缺乏科学指导,不仅不利于人工影响天气试验研究的发展,同时也出现了一些伤亡事故。80年代

附表 国外人工防雹效果统计表

国 名	作业年代	防雹面积 (km <sup>2</sup> )	防雹效果	作业原理与方法
苏联	1968—1984	88870	平均80%	过量催化
美国(NHRE)	1972—1974	18750	7%	播 撒
堪萨斯(州)	1975—1979	15600	39%	云顶播撒
得克萨斯(州)	1970—1976	3200	48%	云顶播撒
法 国	1965—1981	70000	40—45%	提前催化
意大利	1970—1979	11000	35—57%	提前催化
西班牙	1972—1983	5000	20—26%	播 撒
联邦德国	1980—1984	12700	50%	云顶播撒
保加利亚	1972—1984	14400	55—60%	过量催化
匈牙利	1976—1984	1500	50—55%	过量催化
瑞 士	1977—1981	1000	不明显	火箭播撒
南 非	4年半		23—40%	云顶播撒
阿根廷	1959—1964	4000		
肯尼亚	1963—1967		损失显著减少	爆 炸

以来,各地采用高炮、火箭(JBR-56)、雷达、高频电话等较现代化的设备进行指挥、作业,普遍受到政府和群众的支持,认为高炮防雹对保护农业生产起到积极作用。全国有20个左右的省级政府每年共拨出大约2000万元人民币支持人工影响天气事业的发展。

我国从80年代以来,人工防雹有了一定进展,具体表现为:(1)防雹武器的更换;(2)探测手段和通讯设备的现代化,有的地区配备了3cm雷达或人工影响天气专业雷达,配备了高频电话;(3)由于得到专业人员的指导,加速了作业的针对性,减少了盲目性;(4)甘肃、内蒙、新疆等地对冰雹和雹云物理进行多项综合观测,取得了一定的资料。对雹云的宏观特征和冰雹微物理结构有了进一步的了解。有待解决的问题是:有些地方,每年投资不少,但由于受到一些条件的限制,却没有详细的现场作业及降雹记录;有的地方虽配备了3cm雷达,却没有充分发挥作用,很少取得雹云回波照片,即使取得了雷达回波资料,也是很零散的,很少有降雹过程的完整资料;有雷达资料缺对应的地面资料,有地面资料(雹谱资料等)又缺雷达资料。等等,不一而足。

## 二、效果评价方法

人工防雹试验的效果统计与评价是人工防雹最复杂的问题之一。目前世界上已有几

种估计方法:

### 1. 雹灾损失对比法

苏联防雹作业是实用性的,采用历史对比和地区对比法。每年从国家保险公司获得作业区和对比区的雹灾面积资料( $S_0$ 和 $S_k$ )、作业区与对比区的10年以上雹灾平均面积( $\bar{S}_0$ ,  $\bar{S}_k$ )。假定 $S_m$ 为防雹前农作物受灾面积最小的一年,用历史损失最小值与当年损失对比,即

$$E = \frac{S_m}{S_0}$$

当 $E > 1$ 时,防雹有效的可能性较大, $E$ 越大,可信度越高。

### 2. 落地冰雹动能统计法

瑞士等三国联合试验虽然没有获得明显的正效果,但三国的科学家认为,使用冰雹动能统计法比“受灾面积”更为科学,因为选用了与雹灾损失、雹块数目、大小和能量有关的单体冰雹动能作为统计评价的基本检查量。

$$E = \int_{t_0+5}^{t_g} \iint_{\text{单位面积}} E_0 dx dy dt$$

其中, $t_0$ 为满足播云判据的起始时间,5分钟表示考虑播撒催化剂之后要达5分钟才能在地面见效。 $t_g$ 为播撒终止后20分钟。单位

面积指强回波中心区域 (45—55dBz)。E<sub>0</sub> 是冰雹动能流, 可用雷达回波反射率 Z 换算, 也可由测雹板或雹谱资料中计算出来, E<sub>0</sub> 的单位: J·m<sup>-2</sup>·s<sup>-1</sup>。

冰雹落地时, 其受到的空气阻力 f 和雹块受到的重力 F 平衡, 即有

$$f = F = P - A - f = m \frac{dV}{dt} \quad (1)$$

当冰雹为圆球体时, 且浮力 A 忽略不计, 可推出冰雹落地末速 V 为:

$$V = \left( \frac{4\rho_d g D}{3C_d \rho_a} \right)^{1/2} = V_0 D^{1/2} \quad (2)$$

使用地面测雹板, 测得冰雹落地动能为 E' (单个冰雹), 有

$$\begin{aligned} E' &= \frac{1}{2} m V^2 = \frac{1}{2} \times \frac{\pi \rho_d D^3}{6} \\ &\quad \times \frac{4\rho_d g D}{3C_d \rho_a} \\ E' &= \frac{\pi \rho_d^2 g}{9C_d \rho_a} D^4 \quad (3) \end{aligned}$$

单位面积上 (m<sup>2</sup>) 落地冰雹动能 E<sub>T</sub> 为:

$$\begin{aligned} E_T &= \sum_{i=1}^p E_i = \frac{\pi \rho_d^2 g}{9C_d \rho_a} \sum_{i=1}^p n_i D_i^4 \\ &= K \sum_{i=1}^p n_i D_i^4 \quad (4) \end{aligned}$$

K 随地区而不同, 与当时的空气密度、阻力系数、雹块密度等有关。ρ<sub>d</sub> 为雹块密度 (g·cm<sup>-3</sup>); g 为重力加速度 (cm·s<sup>-2</sup>); ρ<sub>a</sub> 为空气密度 (g·cm<sup>-3</sup>); C<sub>d</sub> 为阻力系数; n<sub>i</sub> 为第 i 档雹块数; D<sub>i</sub> 为第 i 档雹块直径 (mm)。在北京, 若 ρ<sub>d</sub> = 0.9、ρ<sub>a</sub> = 1.11 × 10<sup>-3</sup>, g = 980.0, C<sub>d</sub> = 0.6, 则有 K = 4.16 × 10<sup>-6</sup>; 在瑞士 K = 4.58 × 10<sup>-6</sup>; 意大利, K = 4.15 × 10<sup>-6</sup>, 在加拿大阿尔伯塔, K = 4.31 × 10<sup>-6</sup>。

通过雹谱资料或测雹板资料的计算得到的冰雹动能, 不仅有利于估算农作物的受灾程度, 而且有助于作业效果的检验。

防雹效果用播撒与不播撒两种情况下检

验量的平均值 (期望值) 之差来确定; 也可用作业区与对比区的冰雹动能的平均值之差来评估。

法、意、保加利亚、联邦德国、西班牙、瑞士等国近年在防雹试验区大量使用测雹板, 不仅用来测定冰雹落地动能, 统计对比防雹效果, 而且能够获取冰雹物理特性资料, 以便深入开展对冰雹和雹云的研究。

### 3. 双重因子估计法

为了估计抑制冰雹作业的经济效益, 联邦德国、保加利亚、加拿大、南非等国根据保险资料估计效果。

联邦德国对一个充分大的面积的每一个雹季, 使用一个双重因子 R 估计防雹效果。

$$R = \frac{i}{I} / \frac{j}{J}$$

式中 i 为作业区实际付给的保险费, I 为作业区作物总的保险费; j 为对比区实际付给的保险费, J 为对比区作物总的保险费。

正式开展防雹试验前 10 年的两区实际支付保险费以及作物每年的总保险费已统计好。对比区和实验区紧靠, 相关性较好。

使用结果: R 减少, 从平均为 0.293 减少到 0.144。防雹经济效果达 55%。

## 三、一些意见与看法

1. 20 多年来, 一些与生产实际相结合的人工防雹试验多数取得了一定的经济效益。这些成果向人们表明, 人类经过努力, 是可以减少雹灾的。但是我们还不能不看到人工防雹尚处在试验阶段, 很多理论不够成熟, 还没有充分认识雹云和影响雹云的机制。因此, 我们在重视成功经验时, 必须充分注意不成功的教训。然而, 在 60—70 年代, 人们忽视了认识和改造自然的差距, 没有认真总结不成功的经验。最近 10 年, 又过份夸大了不成功的作用, 忽视了一些与实际相结合的成功的事例, 这些现象不利于人工防雹试验的发展。

2. 在探讨和研究人工影响天气的过程中, 我们往往需要从理论研究、实验室研究和初步的野外试验过渡到较大范围的野外

试验。因为对将来的一次野外试验的结果,我们无法预先准确地计算出来。正如工业上发展一种新工艺过程一样,需要进行多次反复的实践。所以人工防雹必须积极开展野外观测与实验研究,不能以几次试验不成功而停步不前。

3.在冰雹云的研究中,目前还缺乏直接有效的探测手段,雷达观测到的回波与云中物理状态之间的联系,只能由地面资料来分析推断,因此,必须有较详细的地面资料与雷达回波资料。从资料分析的角度来看,目前任何先进的雷达,资料搜集得再完好,也只是完成了工作的一半,另一半是地面实况资料,它包括降雹、降雨量、雹谱、冰雹切片以及天气现象等,所以无论美国、苏联或西欧各国都没有忽视地面实况资料。

4.综观各国的试验情况,今后人工防雹试验不能忽视爆炸的作用。苏联在1965年防雹试验总结中提到,所用的AgI量小于理论计算值,作业后看到明显效果的时间小于冰晶起作用的时间,可见,在防雹作业中除AgI作用外,还可能存在着爆炸的作用。今后我们是否可以设想,强爆炸加催化同时在胚胎帘与上升气流区进行人工影响。

5.从国外一些试验来看,地区不同,试验效果也可能不同。我国地域辽阔,要根据各地具体条件开展防雹试验。从苏、美、西欧各国试验来看,催化弱冰雹云有减少雹灾的作用,对强大的超单体作用不大,还有可能增加冰雹。因此,必须从风暴分类观测

着手,在了解云底温度,冰雹胚胎类型,风暴类型的基础上,对各种不同风暴采取不同的试验方法。要加强冰雹微物理结构的探测,更要注意雹云微物理过程与云动力学过程的相互作用,提高冰雹落点预报的水平。

6.作业时机的选择。外场试验表明,当雹云处于生长发展时期,及时作业可望取得良好结果;当雹云成熟或已开始降雹,即使进行过量催化,也难抑制或减少灾害。

从雷达与现场观测资料分析来看,雹云从生成、发展到成熟过程中有一个跃变阶段,如雷达回波顶高、强度在短时间内突然上升、加强,闪电频数明显跃增等现象。外场防雹人员根据这些现象,提出在雹云发展到跃变阶段时,及时进行作业的设想。但及时将催化剂送入冰雹生长区有一定困难,故提出提前进行作业的设想,并根据各地具体情况,确定提前作业的指标。当雹云发展达到或超过指标时,及时作业。如:联邦德国防雹试验区的作业指标为,雷达回波强度  $Z \geq 30\text{dBz}$ , 云顶高度  $H \geq 7610\text{m}$ ; 西班牙  $Z \geq 30\text{dBz}$ ,  $H > 6000\text{m}$ ; 苏联格鲁吉亚  $Z \geq 34\text{dBz}$ ; 希腊、保加利亚  $Z \geq 35\text{dBz}$ ; 南斯拉夫  $Z \geq 45\text{dBz}$ ; 瑞士  $Z \geq 55\text{dBz}$  等。

目前人工防雹工作尽管存在一些异议,但若干成功实例正展示着人们可以控制雹灾的未来,它的巨大的经济利益和社会利益要求我们持热心的客观态度,推动这项科学试验研究工作健康地向前发展。

(参考文献略)

## The current status of hail suppression experiment in the field

Wang Yuzeng

(Academy of Meteorological Science)

### Abstract

The recent status of hail suppression in Soviet Union, United States, China, and many countries in Europe are presented, based on the results published in the international weather modification conferences. The methods of hail suppression operation and evaluation of hail prevention effects, especially the statistical method of kinetic energy of hail fall to the ground are also involved in the paper.

Timing and correct placement of seeding material and time of seeding are particularly critical to successful suppression.