

## 防雹经济效益的初步评估

黄庚 朱立亚 俞香仁 陈慈雨 李广亮 段学信

(中国气象科学研究院, 北京 100081) (河南省商丘地区气象局, 476000)

### 提 要

通过对商丘地区雷暴次数与雹灾面积的历史资料作回归统计分析, 得出: 防雹3年(1990—1992年)中雹灾面积平均每年减少48万亩, 相对减少80%, 投入与产出比为1:25。

**关键词:** 高炮防雹 效果检验 经济效益

### 引 言

春秋之间, 我国不少地区都遭受到不同程度的冰雹袭击, 尤其是中纬度内陆地区; 处于中原腹地的河南商丘地区, 平均年降雹3.4次, 受灾60万亩。应用三七高炮施放 AgI 进行人工防雹作业, 是国内广泛采用的防雹手段, 其防雹效果如何? 是人们普遍关心的问题。本文根据历史及试验期的资料, 对商丘防雹作初步的评估分析与检验。

### 1 概况

商丘地区位于114°49'—116°39'E, 33°43'—34°52'N, 海拔30—70m, 地处豫东平原, 全区面积10586km<sup>2</sup>, 耕地1700多万亩, 属温带季风气候。冰雹是该地区的主要自然灾害之一, 平均每年降雹3.4次, 成灾60万亩; 仅1988年5月2日一次冰雹, 成灾279.3万亩, 损失7亿元。1990—1992年, 气象部门与保险公司联合开展防雹试验, 试验是防雹与农作物统筹保险同时并举分头并进, 全区有5个县参加试验。有20门三七高炮参加防雹试验, 试验作业由地区指挥部根据雷达资料通过高频电话或有线电话统一指挥, 炮点设置雨量筒、冰雹取样筒, 随时收集资料。

3年来, 对20个天气系统进行试验作业, 以炮点统计, 作业148门次, 用 AgI 弹6100多

发, 保护了农作物少受雹灾; 农作物统筹保险按每亩0.5—1.0元作为风险基金, 专款专用, 3年集资700万元, 作为灾后理赔及资助防雹工作。

### 2 资料的选择

选用资料列于表1。表中,  $x_i$  为商丘地区逐年雷暴次数,  $z_i$  为相应时间的降雹次数,  $y_i$  为相应的受灾面积; 1971—1989年为防雹前的历史资料, 1990—1992年为防雹试验期资料。

年雷暴次数: 指一年内气簿上雷暴总次数。一日内辖区8县市气簿—1上, 有一次以上雷暴记为一次。

年降雹次数: 指一年内辖区内降雹总次数。一日内有一地点以上的降雹或同一雹云系统一天以上的降雹计为一次, 如1988年5月2日这次降雹从2日至3日, 下了3阵, 也记为一次。

年受灾面积: 指一年内辖区内雹灾面积的总和。

$r_{xy}, r_{xz}$  分别为  $x$  与  $y$ ,  $x$  与  $z$  这两对变量的相关系数;  $S_x, S_y, S_z$  分别为  $x, y, z$  变量的标准差;  $S_{xy}, S_{xz}$  分别为  $x$  与  $y, x$  与  $z$  两对变量的协方差。

表1 商丘地区雷暴次数( $x_i$ )、受灾面积( $y_i$ /万亩)、降雹次数( $z_i$ )回归分析表

年	$x_i$	$y_i$	$z_i$	A	A <sup>2</sup>	B	B <sup>2</sup>	C	C <sup>2</sup>	A·B	A·C
1971	50	33.26	2	-6.1	37.21	-26.74	715.02	-1.42	2.02	163.12	8.66
1972	59	60.60	3	2.9	8.41	0.60	0.36	-0.42	0.18	1.74	-1.22
1973	63	72.25	3	6.9	47.61	12.25	150.06	-0.42	0.18	84.53	-2.90
1974	52	57.85	5	-4.1	16.81	-2.15	4.62	1.58	2.50	8.82	-6.48
1975	65	78.12	4	8.9	79.21	18.12	328.33	0.58	0.34	161.27	5.16
1976	68	83.90	5	11.9	141.61	23.90	571.21	1.58	2.50	284.41	18.80
1977	49	34.10	3	-7.1	50.41	-25.90	670.81	-0.42	0.18	183.89	2.98
1978	51	20.10	4	-5.1	26.01	-39.90	1592.01	0.58	0.34	203.49	-2.96
1979	46	12.51	2	-10.1	102.01	-47.47	2255.31	-1.42	2.02	479.65	14.34
1980	62	55.20	3	5.9	34.81	-4.80	23.01	-0.42	0.18	-28.32	-2.48
1981	47	20.91	2	-9.1	82.81	-39.09	1528.02	-1.42	2.02	355.72	12.92
1982	48	5.17	3	-8.1	65.67	-54.83	3006.32	-0.42	0.18	444.12	3.40
1983	53	5.60	2	-3.1	9.61	-54.40	2959.36	-1.42	2.02	168.64	4.40
1984	67	91.36	5	10.9	118.81	31.36	983.44	1.58	2.50	341.82	17.22
1985	71	120.65	7	14.9	222.01	60.65	3678.42	3.58	12.82	903.69	53.34
1986	48	35.30	3	-8.1	65.61	-27.70	610.09	-0.42	0.18	200.07	3.40
1987	53	50.09	2	-3.1	9.61	9.90	98.21	-1.42	2.02	30.69	4.40
1988	69	297.30	5	12.9	166.41	237.30	56311.29	1.58	2.50	3061.17	20.38
1989	45	5.70	2	-11.1	123.21	-54.30	2948.49	-1.42	2.02	602.73	15.76
Σ	1066	1139.97	64		1407.79		78434.14		36.70	7651.25	169.12
平均	56.1	60.00	3.4		S <sub>x</sub> <sup>2</sup> 78.21		S <sub>y</sub> <sup>2</sup> 4357.46		S <sub>z</sub> <sup>2</sup> 2.04	S <sub>xy</sub> 425.074	S <sub>xz</sub> 9.40
					S <sub>x</sub> 8.84		S <sub>y</sub> 66.01		S <sub>z</sub> 1.43		
1990	54	16.90	5								
1991	64	14.50	4								
1992	50	4.51	6								
Σ	168	35.91	15								
平均	56.0	12.00	5.0								

注:表中  $A = x_i - \bar{x}_n, B = (y_i - \bar{y}_n)^2, C = (z_i - \bar{z}_n)^2$

从  $x, y, z$  变量的相互关系来看,  $x$  与  $z$  的相关系数  $r_{xz} = 0.744, r_{0.001} = 0.693, r_{xz} > r_{0.001}$ , 相关显著度高;  $x$  与  $y$  两变量的相关系数  $r_{xy} = 0.728, r_{xy} > r_{0.001}$ , 次之; 而  $z$  与  $y$  的相关系数  $r_{zy} = 0.608$ , 显著度为 0.01, 不如前两对变量的灵敏度高。为此, 选择  $x$  与  $z, x$  与  $y$  分别作为统计变量, 来统计、分析商丘的防雷效果。

### 3 资料的处理与分析

把商丘 1971—1992 年与冰雹有关的雷暴、受灾面积、降雹次数等作为变量, 按回归分析步骤进行统计和分析, 列于表 1。

#### 3.1 雷暴次数与降雹次数的关系

由表 1 有:  $S_{xz} = 9.40, S_x^2 = 78.21, S_x = 8.84, S_z = 1.43, \bar{x}_n = 56.1, \bar{z}_n = 3.4, n = 19,$

$k = 3, r_{xz} = \frac{S_{xz}}{S_x \cdot S_z} = 0.744$ , 其自由度  $\nu = n - 2 = 17$ , 查相关系数表得  $r_{0.001} = 0.693, r_{xz} > r_{0.001}$ ,  $x, z$  两变量相关性好。其回归系数  $a, b$  为:  $b = \frac{S_{xz}}{S_x^2} = 0.12, a = \bar{z}_n - b\bar{x}_n = -3.3$ , 则回归方程为

$$\bar{z}_k = b x_k + a = 0.12x - 3.3 \quad (1)$$

由方程(1)估算防雷试验期的降雹次数:

$$1990: x_k = 64, \bar{z}_k = 0.12 \times 64 - 3.3 = 3.18$$

$$1991: x_k = 64, \bar{z}_k = 0.12 \times 64 - 3.3 = 4.38,$$

$$1992: x_k = 50, \bar{z}_k = 0.12 \times 50 - 3.3 = 2.70$$

$$\Delta \bar{z}_k = \bar{z}_k - \bar{z}_k = 5.0 - 3.42 = 1.58$$

防雷后 3 年比防雷前 19 年, 平均每年增加降雹 1.58 次, 即防雷试验期间, 自然降雹次数

并无减少,反而增加了1.58次/年,换句话说人工防雷并没有使商丘的降雹次数减少。

### 3.2 雷暴次数与受灾面积的关系

由表1得:  $S_{xy} = 425.07, S_x^2 = 78.21, S_x = 8.84, S_y = 66.01, \bar{x}_n = 56.1, \bar{y}_n = 60.0, n = 19, k = 3, \therefore r_{xy} = \frac{S_{xy}}{S_x \cdot S_y} = 0.728$ , 由自由度  $\nu = n - 2 = 17$ , 查相关系数表得:  $r_{0.001} = 0.693, r > r_{0.001}$ , 显著度超过 0.001,  $x_i, y_i$  两变量相关性好。

$$\therefore b = \frac{S_{xy}}{S_x^2} = 5.435,$$

$$a = \bar{y}_n - b\bar{x}_n = -244.6,$$

$\therefore$  其回归预报方程

$$\hat{y} = a + bx = 5.435x - 244.6 \quad (2)$$

由方程(2)估算防雷试验期的减灾面积(万亩):

1990年:

$$x_k = 54, y_k = 16.9, \Delta y_k = y_k - \hat{y} = -32.0$$

1991年:

$$x_k = 64, y_k = 14.5, \Delta y_k = y_k - \hat{y} = -89.0$$

1992年:

$$x_k = 50, y_k = 4.51, \Delta y_k = y_k - \hat{y} = -23.0$$

$\therefore \Sigma \Delta y_k = 144.0$ , 3年减少受灾面积144万亩, 相对减少了  $\Sigma \Delta y_k / \Sigma y_k = 144/180 = 80\%$ 。

综上所述表明: 商丘防雷试验期间, 自然降雹次数并未减少, 还稍有增加, 而由冰雹引起的受灾面积却大为减少, 相对减少了80%。

## 4 效果检验

冰雹是一种小概率事件, 自然变差大, 而人工防雷又是一种难以控制的试验, 其试验效果常会淹没在自然变差之中。因此其效果检验要求显著性灵敏度高, 有长期的试验数据, 这才有利于剔除自然、人为因素的影响。

### 4.1 效果的数理检验

#### 4.1.1 正态分布函数的检验

为检验商丘地区雷暴次数  $x_i$ 、受灾面积  $y_i$ 、降雹次数  $B_i$  各自的整体分布, 利用柯尔莫哥洛夫函数分别加以检验。

假设  $H_0: x_i$  服从正态分布, 按检验步骤作检验表2。

表2 商丘地区逐年雷暴次数( $x_i$ )分布函数检验计算表

序号	年	$x_i$	$x_i - \bar{x}_n$	$(x_i - \bar{x}_n)^2$	$F_n(x_i)$	$r(x_i)$	$F(x_i)$	$d(x_i)$
1	1989	45	-11.1	123.21	0.0000	-1.2557	0.1016	0.1046
2	1979	46	-10.1	102.01	0.0526	-1.1425	0.1266	0.0744
3	1981	47	-9.1	82.81	0.1053	-1.0294	0.1516	0.0463
4	1982	48	-8.1	65.61	0.1579	-0.9163	0.1798	0.0219
5	1986	48	-8.1	65.61	0.2105	-0.9163	0.1798	0.0307
6	1977	49	-7.1	50.41	0.2632	-0.8032	0.2109	0.0523
7	1971	50	-6.1	37.21	0.3158	-0.6900	0.2451	0.0707
8	1978	51	-5.1	26.01	0.3684	-0.5769	0.2820	0.0864
9	1974	52	-4.1	16.81	0.4211	-0.4638	0.3214	0.0997
10	1983	53	-3.1	9.61	0.4737	-0.3507	0.3629	0.1108
11	1987	53	-3.1	9.61	0.5263	-0.3507	0.3629	0.1634
12	1972	59	2.9	8.41	0.5789	0.3281	0.6286	0.0497
13	1980	62	5.9	34.81	0.6316	0.6674	0.7477	0.1161
14	1973	63	6.9	47.61	0.6842	0.7805	0.7824	0.0982
15	1975	65	8.9	79.21	0.7368	1.0068	0.8430	0.1062
16	1984	67	10.9	118.81	0.7895	1.2330	0.8912	0.1027
17	1976	68	11.9	141.61	0.8421	1.3462	0.9169	0.0688
18	1988	69	12.9	166.41	0.8947	1.4593	0.9278	0.0331
19	1985	71	14.9	222.01	0.9474	1.6855	0.9541	0.0067
$\Sigma$		1066		1407.79				
平均		56.1		$S_x^2$ 78.21				
				$S_x$ 8.84				

由经验分布函数

$$\lim_{n \rightarrow \infty} P\{\sqrt{n} \sup_x |F_n(x) - F(x)| < y = k(y) = \begin{cases} \sum_{k=-\infty}^{\infty} (-1)^k e^{-2k^2 y^2} & (y > 0) \\ 0 & (y \leq 0) \end{cases} \quad (3)$$

令  $\alpha = 0.80$  时,查柯尔莫哥洛夫检验表得:相应于  $K(y_{0.80}) = 1 - \alpha$  的  $y_n = 1.074$ ,由表 3 得:  $D_{MAX}(x) = 0.1634$ ,  $\sqrt{n} D_{MAX}(x) = \sqrt{19} \times 0.1634 = 0.7124$ ,显然  $\sqrt{n} D_{MAX}(x) < y_{0.80} = 1.074$ ,因此接受  $H_0$ :商丘地区雷暴次数  $x_i$  服从正态分布。

同理对受灾面积  $y_i$ 、降雹次数  $B_i$  作正态分布检验(表略),得  $D_{MAX}(y) = 0.2020$ ,  $\sqrt{n} D_{MAX}(y) = 0.8805$ ;  $D_{MAX}(B) = 0.1413$ ,  $\sqrt{n} D_{MAX}(B) = 0.6159$ ,都小于  $y_{0.80}$ ,都通过正态分布函数的检验,即商丘地区的雷暴次数、降雹次数、受灾面积服从正态分布。

#### 4.1.2 多次事件的 $t$ 检验

每一次防雷试验都可获得一个效果评价,或正效果或负效果,一年或多年后评价其总效果,常用试验的平均效果来评估它的总体效果,用  $t$  检验法,

$$t = \frac{\Delta \bar{y}_k}{\sqrt{V(\Delta y)}}$$

$$\therefore \Delta \bar{y}_k = \frac{\sum \Delta y_k}{k} = -48.0,$$

$$V(\Delta y) = \frac{1}{n-2} (1 - r^2),$$

$$\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y}_n)^2 \left[ \frac{1}{k} + \frac{1}{n} + \frac{(\bar{x}_k - \bar{x}_n)^2}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x}_n)^2} \right] = 837.0014$$

$$\therefore t = \frac{\Delta \bar{y}_k}{\sqrt{V(\Delta y)}} = -1.6591.$$

由自由度  $\nu = n - 2 = 17$ ,查  $t$ -分布数值表,其单边检验,  $t_{-0.05} = -1.740$ ,  $t_{-0.06} = -1.6586$ ,  $t < t_{-0.06}$ ,单边显著度超过 0.06。商丘防雷试验平均每年减少受灾面积 48 万亩的可

信度为 94%,而自然偶发性因素的概率为 6%,肯定了商丘 3 年防雷试验的总效果。

#### 4.2 外场试验的物理检验

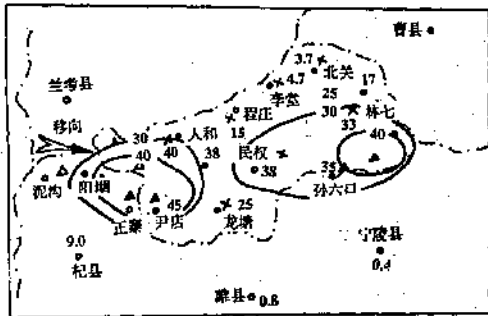
开展防雷试验后,从冰雹的降落地点、受灾情况、受灾面积及雷达回波的演变,都显示出防雷的作用来,常形成以作业炮点为中心,灾情向远处递增的情况,在远处受灾而在射程控制范围内安然无事。因而各乡争立炮点,乡民抱怨“把雹子赶到俺们这里”的事时有发生。1991 年 7 月 19 日是一防雷作业个例。

19 日下午 2 时,在民权西北部出现孤立的积云,不足 25dBz;15 时民权县西北部有闪电,民权提前申请空域;15 时 40 分回波强度 40dBz,高 15km,衰减 30dBz 后高 10km,Cb 云移近人和射程内,开始作业;15 时 45 分连成带状回波,横跨杞县、民权两县,强中心在两县交界处,51.9dBz,高 17.9km,次强回波 48dBz,高 15km,云带宽 25—30km,长 150km,回波密实陡立、中间粗,雹云特征明显,移向偏东,移速  $35\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$ ,此时程庄、龙塘、城关等炮点也加入作业,随后李堂、北关、林七等炮点也先后按指挥部指定的方位、高度进行大剂量集中火力作业。据人和、龙塘高频电话反映:作业时雷声隆隆不断,沉闷,闪电很乱,风大雨急,雨水冰凉,炮点附近未见雹粒。作业后回波强度迅速减弱,尤其是高度下降得更快;16 时强度为 40dBz,高 13km,块状,减弱趋势,雷阵雨回波。16 时 30 分,回波移至民权东部,在其西南侧又有新的发展,45dBz,高 13.5km,林七炮点向南作业,直至远离高炮射程,16 时 40 分停止炮击。

这次防雷作业从 15 时 40 分—16 时 40 分,间断作业 1 小时,7 门高炮用 AgI 高炮弹 381 发。据事后调查,这次冰雹降了两个时段,第一段在 15 时 45 分—48 分,地点在杞县的泥沟至民权的尹店,不连续,一个地点降 1—2 分钟,杞县的泥沟、阳甄、西寨 3 乡受灾 7.5 万亩,雹大如玻璃球(2cm)小如黄豆,乡民抱怨民权把雹子赶至本地;民权的人和、尹店两乡受轻

灾。第二时段16时45—48分,在民权东部的孙六口到林七乡南部,雹大如棟豆(花生米般)小如黄豆。民权4乡受灾共3.0万亩,除人和乡距离较近外(离炮点约3km),其余灾区都在高炮射程之外,在保护控制区内无灾,作业后都形成强降雨(见附图)。

类似7月19日的防雹作业,3年中每一次作业,不仅保护区内未受灾,其下游也受到一定程度的影响,使受灾面积大为减少(如表2所示),3年里未出现大雹灾,即使降雹次数比防雹前增加了1.6次/年,受灾面积却比以前减少了48万亩/年,显示出高炮防雹作用。



附图 1991年7月19日冰雹、雨量分布图  
△,冰雹 ×,炮位 箭头:雹云移向

## 5 经济效益

### 5.1 人工防雹的经济效益

商丘地区防雹试验3年,减少雹灾面积144万亩,按减少损失一成约20kg/亩计算,可减少粮食损失2880万kg,如粮价0.5元/kg折合人民币1440万元。

开展防雹试验,购置高炮、AgI 炮弹、高频电话、气象仪器、人员工资等计57.5万元,投入与产出比为1:25。经济、社会效益较好。

### 5.2 保险公司自身经济效益

农险是保险公司的薄弱的要扶持的险种,利微赔付率高,难以开展和扩大。1990年后,按照互助互利,以丰补歉,国家适当给予

扶持的原则,开展防雹与农作物统筹保险的试验,按实际的亩数,每亩0.5—1.0元作为风险基金,支持防雹,节余归己。有防有赔,双保险,农民乐于参加。

表3列出防雹前后理赔数据;防雹前6年,商丘地区保险公司农业保险累计收入2874万元,其中结转支持农险的拨款1477万元,实收1397万元,赔款1126万元,赔付率达80.6%;1990—1992年,防雹试验后3年,仅农作物统筹保险一项就为农险增收700万元,赔款17.5万元,为防雹投资60万元,保险公司自身在该试验中投入与产出比为1:3。

表3 商丘保险公司农险理赔表

年	收费/元·亩 <sup>-1</sup>	保险费/万元	赔款/万元	赔付率/%
1984		32.7	2.9	9
1985		114.2	37.3	33
1986		304.9	71.7	24
1987		637.2	139.8	23
1988		817.6	609.2	7.5
1989		537.4	265.5	27
结转		1477.0		
Σ		1397.0	1126.4	80.6
1990	0.5	51.0	7.9	13.7
1991	0.6	125.0	107.2	85.8
1992	1.0	524.0	60.8	11.6
Σ		700.0	175.0	25.0

## 6 小结

本文用数理和物理方法阐述了商丘地区的防雹效果,表明防雹和农作物统筹保险是一项对当地工农业、对气象和保险部门有益的实验,主要成效有:

6.1 高炮防雹作业对雹云有抑制作用,减轻受灾程度,增加降雨,3年试验中未出现大的风雹灾害,受灾面积从防雹前的平均每年60万亩减少到防雹后的每年12万亩,3年共减少受灾面积144万亩,折合人民币1440万元,投资57.5万元,投入与产出比为1:25。

6.2 3年农作物统筹保险增加保险费700万元,赔款与支援防雹235万元,保险公司自身的投入与产出比为1:3。

6.3 跨行业的协作,取长补短,相互促进,有利于本行业的发展,有利于社会主义建设。

由于试验时间短,资料的历史不算长,上述分析仅仅是初步的,显得粗糙,更严格的科学评估,有待于进一步的试验和细致的工作。

### 参考文献

1 中国科学院. 常用数理统计方法. 北京: 科学出版社, 1980.

2 黄美元, 王昂生. 人工防雹导论. 北京: 科学出版社, 1980.

3 叶家东, 范蓓芬. 人工影响天气的数学方法. 北京: 科学出版社, 1982.

4 王雨增, 王文东. 潢城4年防雹经济效益初步分析. 气象, 1990, 16(7): 25—27.

## Evaluation of Economic Benefits of Hail Suppression Experiment in Shangqiu Area, Henan Province

Huang Geng Zhu Liya Yu Xiangren

(Chinese Academy of Meteorological Science, Beijing 100081)

Chen Ciyu Li Guangliang Duan Xuexin

(Shangqiu Meteorological Office, Henan Province 476000)

### Abstract

Hail suppression experiment have been conducted in Shangqiu area, Henan provice for three years(1990—1992). Data of the historical thundstorm and hail damage areas in the experimental period were applied to the analysis of the results. It is shown that the hail damaged farmland was decreased by 0.48 million Mu per year. The ratio of investment to benefits is 1:25. All experiments have obtained financial support from the insurance companys.

**Key Words:** hail suppression by anti-aircraft gun evaluation economic benefit