

王雨曾 郝青

(中国气象科学研究院,北京 100081)

提 要

除使用地面冰雹资料(即冰雹动能、质量、降雹强度等)外,还选用了反映雹云变化的雷达回波参量等10个物理参量,作为作业效果的检验量,检验防雹效果。结果表明:高炮作业后雷达回波顶高、强度及30dbz强回波顶高显著地比作业前小;作业区比未作业区冰雹动能、冰雹质量、冰雹动能通量、质量通量、最大冰雹直径、数密度以及降雹持续时间也有明显减小。

关键词: 防雹效果 雷达回波 参量 检验

前 言

三十多年来,以数学统计为基础的统计分析方法广泛应用于人工影响天气领域。在统计防雹效果方面,有的选用降雹日数、受灾面积作为统计变量,有的采用作物产量及经济价值、支付的保险金的变化来分析防雹效果。一般来说,用受灾面积这个量比较能反映防雹效果,而作物产量及经济价值常与其它因素有关。

数学统计对比方法虽然可以说明效果,但由于这种方法只考虑最后结果,不考虑云与降雹变化的物理过程,难以进一步认识冰雹云和提高人工防雹的作业效果。

为了提高对雹云变化规律的认识,促进人工防雹工作的发展,在雹云处于发展阶段时,就进行高炮作业,用观测作业前后雹云雷达回波变化和通过观测冰雹大小、数密度、计算冰雹落地动能等有关参量,估算防雹作业效果与冰雹造成灾害的程度。

1 雷达回波参量

含有碘化银的炮弹在云中爆炸后,可能

有两种机制(即引晶与爆炸)起作用。本文主要根据引晶原理(并不排除爆炸的影响)估算冰晶凝华与碰并(冻)增长时间和雹云雷达回波的变化情况。

1.1 作业效果的时间界线的估算

1.1.1 设碘化银炮弹在0℃层附近爆炸(0℃层高度为3200—5000m),碘化银粒子随上升气流到成雹区(约8000m处)需要4—8分钟(按一维模式计算,0℃层附近上升气流速度:10—14m·s⁻¹)。

1.1.2 在云中,冰晶尺度较小时,主要是凝华作用,随着尺度加大,它的作用迅速减小,碰并(冻)作用加大,在半径达到60μm以上时,凝华作用相对碰并(冻)作用来说,可以忽略不计,即冰晶增长到60μm,需要7—10分钟;从60μm碰并(冻)到半径为5mm的冰雹,需要1—7分钟。

1.1.3 根据满城、张家口20次冰雹过程资料统计,雹云从跃增(或发展阶段到降雹)平均需时26分钟。

根据上述估算,初步确定以作业停止后

25分钟为界估计高炮作业效果,超过25分钟的,不参与效果统计检验。事实上,本文提供的17次资料,平均为16分钟,远小于25分钟。

1.2 参量分析效果的尺度界线

设每次高炮作业后回波参量在25分钟内发生明显变化的为正,即回波顶高降低1km以上(即 $\geq 1\text{km}$),回波强度减少10dbz($\geq 10\text{dbz}$);在25分钟内没有发生明显变化甚至顶高升高,强度增强了就为负(即作业无效),超过25分钟,回波参量无论发生什么变化,都不能肯定是作业的影响,即不参与效果统计检验。

1.3 资料处理

根据1986—1990年满城雷达(在无阻挡的条件下获得的)回波资料与高炮作业时间,初步统计了有高炮作业时间记录和作业前后

对应的雷达回波参量记录的资料,详见表1a、b、c。

从表1a看出,有3次作业,雷达回波在25分钟内没有发生明显变化,有5次不能肯定是作业的影响,有14次作业,雷达回波顶高发生了明显变化,即作业有效次数为14次,作业总次数为22,即

$$y_1 = 14/22 = 63.6\%$$

从表1b可见,在20份资料中,有14次作业的回波强度发生了明显变化,有3次没有发生明显变化,另外3次无法肯定,其防雹效果:

$$y_2 = 14/20 = 70\%$$

从表1c可知,在13份资料中,有10次作业的强回波区顶高发生了明显变化,有2次没有发生明显变化,另外1次无法肯定,其防雹效果:

表1a 1986—1990年满城雷达回波顶高及高炮作业时间表

年月日	作业前		高炮作业时间	作业后		$H_1 - H_2$	差值符号
	雷达回波顶高 $H_1(\text{km})$	雷达观测时间		回波顶高 $H_2(\text{km})$	雷达观测时间		
1986.7.5	12.3	23:15	23:30	10.0	23:30	2.3	+
1986.7.7	10.0	20:35	20:45	8.0	20:45	2.0	+
1988.7.20	11.0	17:18	17:30	9.0	17:30	2.0	+
1986.8.8	13.7	21:10	21:50	9.5	21:50	4.2	无
1986.8.9	13.5	20:40	20:53	11.5	20:53	2.0	+
1986.8.31	11.9	19:00	19:40	8.1	19:40	3.8	无
1986.9.1	9.8	17:13	17:37	9.4	17:37	0.4	-
1986.9.19	11.5	19:19	19:32	8.0	19:32	3.5	+
1987.6.29	11.1	15:20—15:30	15:55	8.2	15:55	2.9	+
1987.7.14	9.8	19:50	20:00	9.1	20:00	0.7	-
1988.9.3	10.4	8:15—8:30	9:00	4.8	9:00	5.6	无
1989.6.30	11.4	15:05	15:20	9.6	15:20	1.8	+
1989.8.29	9.9	2:54—2:59	3:20	7.8	3:20	2.1	+
1990.5.29	9.8	19:50—20:10	20:16	7.8	20:16	2.0	+
1990.5.29	10.7	20:40	21:14	9.2	21:14	1.5	+
1990.7.16	11.4	18:30	18:45	9.0	18:45	2.4	+
1990.7.16	13.0	18:25—18:30	18:46	9.1	18:46	3.9	+
1990.7.28	12.5	3:05—3:08	3:45	11.4	3:45	1.1	无
1990.7.31	12.8	18:45	19:05	5.4	19:05	7.4	+
1990.8.1	12.5	20:12—20:32	20:51	9.5	20:51	3.0	+
1990.8.1	13.5	20:26	20:51	8.7	20:51	4.8	+
1990.8.7	12.9	17:50	18:03	13.5	18:03	-0.6	-

表 1b 1986-1990 年满城雷达回波强度及高炮作业时间表

年月日	作业前		高炮作业时间	作业后		$P_1 - P_2$	差值符号
	P_1 雷达回波强度 (dbz)	雷达观测时间		P_2 回波强度 (dbz)	雷达观测时间		
1986.7.5	43	23:17	23:40	25	18	+	
1986.7.7	35	20:35	20:45	25	10	+	
1986.7.20	30	17:29	17:35	15	15	+	
1986.8.8	48	21:10	21:50	25	23	无	
1986.8.9	48	22:00	22:15	30	18	+	
1986.8.31	45	19:30	19:55	30	15	+	
1986.9.19	40	19:58	20:10	30	10	+	
1987.6.29	45	15:30	15:55	35	10	+	
1987.7.14	40	19:50	20:00	50	-10	-	
1988.9.3	50	08:30	09:00	35	15	无	
1990.5.29	45	19:50	20:11	40	5	-	
1990.5.29	40	20:40	21:02	30	10	+	
1990.6.8	45	18:21-18:31	18:51	20	25	+	
1990.6.8	40	17:55-18:15	18:45	30	10	无	
1990.7.16	45	18:25-18:30	18:41	35	10	+	
1990.7.16	40	18:25-18:30	18:45	30	10	+	
1990.7.29	30	03:20	03:45	40	-10	-	
1990.7.31	40	18:45	19:05	30	10	+	
1990.8.1	40	20:32	20:51	30	10	+	
1990.8.1	40	20:26	20:51	30	10	+	

表 1c 满城高炮作业前后 30dbz 回波顶高变化统计表

年月日	作业前		高炮作业时间	作业后		$H_1 - H_2$	差值符号
	30dbz 回波顶高 H_1	雷达观测时间		30dbz 回波顶高 H_2	雷达观测时间		
1987.6.29	8.1	15:30	15:55	6.5	1.6	+	
1988.9.3	8.5	8:30	9:00	7.0	1.5	无	
1989.6.30	7.4	15:05	15:21	5.5	1.9	+	
1989.8.29	10.2	0:46	1:01	8.0	2.2	+	
1990.5.29	9.5	19:45	20:02	4.8	4.7	+	
1990.5.29	8.5	20:45	21:14	7.9	0.6	-	
1990.6.8	10.6	17:52-17:59	18:20	9.3	1.3	+	
1990.7.16	10.4	18:29	18:40	9.0	1.4	+	
1990.7.16	10.6	18:25	18:37	8.4	2.2	+	
1990.7.29	7.1	3:28	3:45	5.9	1.2	+	
1990.7.31	8.3	18:45	19:05	3.8	4.5	+	
1990.8.1	6.0	20:25-20:32	20:51	4.5	1.5	+	
1990.8.7	10.5	17:50-17:56	18:02	11.3	-0.8	-	

$$y_3 = 10/13 = 77\%$$

1.4 效果检验

采用符号检验法检验作业前后雷达回波参量的变化。

1.4.1 在 22 对回波顶高的数据中,有 5 对无法确定符号,余下 17 对数据中,有 3 对差

值为负,14 对为正,即 $n = 17, n_+ = 14, n_- = 3$,查符号检验表得 $r = 4$,显著性水平为 0.05。

1.4.2 在 20 对回波强度的数据中,除无法肯定的外,余下 17 对中,有 3 对差值为负,14 对差值为正,即 $n = 17, n_+ = 14, n_- = 3$,查表

得 $r=4, n_+ < 4$, 其显著性水平为 0.05。

1.4.3 在 13 对 30dbz 强回波顶高的数据中, 10 对差值符号为正, 1 对无法肯定, 2 对差值为负, 即 $n=12, n_+=10, n_-=2$, 查表得 $r=2$, 其显著性水平为 0.05。

2 落地冰雹动能与地面降雹强度

2.1 冰雹落地动能与动能通量公式

单位面积 (m^2) 上冰雹落地动能为 (E_T) ($J \cdot m^{-2}$), 有

$$E_T = k \sum_{i=1}^n n_i D_i^4$$

其中,

$$k = \frac{\pi \rho_i^2 g}{8 C_{D1} \rho}$$

在北京地区, $k=4.16 \times 10^9$ 。 n_i 为第 i 档雹块数。 D_i 为第 i 档雹块直径 (mm)。

冰雹动能通量 \dot{E} ($J \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$) 则为

$$\dot{E} = \frac{\pi \rho V_0^3}{12 \times 10^9} \times (4.5) 1 N_0 \lambda^{-5.5}$$

$$\dot{E} = E_T / \Delta t$$

Δt 为降雹持续时间, N_0, λ 为谱参量。

2.2 冰雹质量与质量通量公式

单位面积 (m^2) 上落地冰雹质量为 M_T

($kg \cdot m^{-2}$), 则有:

$$M_T = \sum_{i=1}^n n_i m_i = 0.47 \times 10^{-6} \sum_{i=1}^n n_i D_i^3$$

落地冰雹质量通量 \dot{M}_T ($kg \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$) 为

$$\dot{M}_T = 26.6 \times 10^{-6} N_0 \lambda^{-4.5}$$

$$\dot{M}_T = M_T / \Delta t$$

2.3 计算结果

表 2 是计算结果。表 2 中的各平均值是 11 次降雹过程中有关值的算术平均值。降雹当天满城有关炮点进行了高炮防雹作业。表 2 表明, 作业区各物理量相对未作业区明显减小。

3 效果检验

3.1 秩和检验

从表 2 可见, 在 11 次高炮作业中, 有一次作业地区的冰雹动能, 动能通量与质量比未作业区大, 而平均冰雹动能、动能通量与质量却发生了明显变化, 作业区相对未作业区平均冰雹动能减少 81%, 冰雹质量减少 78%, 冰雹动能通量减少 59%。

表 2 地面冰雹特征参量统计表

取样时间	最大冰雹直径 D_{max} (mm)		数密度 (N) (个/ m^3)		动能 (E_T) (J/m^2)		动能通量 (\dot{E}_T) ($J/m^2 \cdot s$)		冰雹质量 (M_T) (kg/m^2)		冰雹质量通量 (\dot{M}_T) ($kg/m^2 \cdot s$)		降雹持续时间 (秒)	
	S_1	S_2	S_1	S_2	S_1	S_2	S_1	S_2	S_1	S_2	S_1	S_2	S_1	S_2
1987.6.29	36	23	240	324	60.7	15.6	0.101	0.033	0.325	0.114	2.8×10^{-4}	1.7×10^{-4}	690	600
1987.7.14	11	15	336	432	10.6	24.3	0.0588	0.1013	0.121	0.229	6.7×10^{-4}	9.6×10^{-4}	160	240
1987.8.23	17	12	699	296	26.1	4.7	0.0543	0.0392	0.2132	0.0592	4.4×10^{-4}	4.3×10^{-4}	480	120
1988.9.3	21	13	400	391	36.5	9.0	0.0760	0.0375	0.286	0.161	6.0×10^{-4}	3.4×10^{-4}	480	240
1989.6.30	17	11	385	389	28.4	5.2	0.0846	0.0290	0.2336	0.0728	7.8×10^{-4}	4.0×10^{-4}	300	180
1989.7.13	11	9	144	224	3.1	2.1	0.025	0.018	0.039	0.032	3.3×10^{-4}	2.7×10^{-4}	120	120
1989.8.28	21	15	895	523	76.2	18.2	0.1270	0.0607	0.620	0.189	10.0×10^{-4}	5.2×10^{-4}	690	360
1990.5.29	23	15	1148	736	55.51	22.89	0.0920	0.0480	0.562	0.248	9.4×10^{-4}	5.1×10^{-4}	480	300
1990.7.16	35	11	1448	368	217.6	7.39	0.242	0.0280	2.416	0.083	31.0×10^{-4}	3.0×10^{-4}	790	270
1990.8.8	17	13	448	336	33.32	12.2	0.079	0.068	0.281	0.088	6.7×10^{-4}	4.9×10^{-4}	420	180
1990.9.13	30	17	2208	432	115.3	5.86	0.2359	0.0250	1.098	0.082	7.3×10^{-4}	3.4×10^{-4}	540	240
平均	22	14	758	396	66.3	11.6	0.1079	0.0445	0.565	0.123	8.67×10^{-4}	4.35×10^{-4}	453	259
相对减少	36.4%		47.8%		81%		59%		78%		50%		42.8%	

采用成对试验的秩和检验,查单边检验(符号)表中11对这一行 $\alpha=0.002$ 时 $T_\alpha=2$,现观测值的负秩和 $|T_{n1}|=2$ (指动能与质量两项),所以在 $\alpha=0.002$ 的显著水平下认为满城高炮作业后作业区的冰雹动能与冰雹质量相对未作业区显著减小。

冰雹动能通量的观测值的负秩和 $|T_{n1}|=5$,其显著性水平 $\alpha=0.005$ 。

从表2看出,有2次作业区的降雹强度大于未作业区。按上述方法得负秩和 $T=7$,查表知 $\alpha=0.009$,所以在 $\alpha=0.009$ 的显著水平下,作业后作业区的降雹强度比未作业区明显减小,其平均值相对减少50%。

在11次降雹过程中,有1次作业区的最大冰雹直径大于未作业区;有3次作业区的冰雹数密度大于未作业区,其余的均小于未作业区。采用成对试验的秩和检验,查单边检验(符号)表,当 $\alpha=0.002$ 和 $\alpha=0.02$ 时, T_α 分别为3和9.5,所以在 $\alpha=0.002$ 和 $\alpha=0.02$ 显著水平下,作业后作业区的最大冰雹直径和数密度比未作业区显著减小,其平均值相对减少36.4%和47.8%。

从表2中的降雹持续时间知道,有2次作业区与未作业区的持续时间相同,另有1次作业区大于未作业区,其余8次均小于未作业区,按秩和检验方法得 $|T_{n1}|=3$,查表知 $\alpha=0.002$,所以,在 $\alpha=0.002$ 显著水平下,作业区降雹持续时间比未作业区显著减小,其平均值相对减少42.8%。

3.2 t 检验

采用t检验以检验作业区与未作业区参量差异的显著性。在人工防雹效果检验中,t检验要求检验是具有或近似具有正态分布。

3.2.1 物理参量分布正态性检验

采用柯尔莫哥洛夫检验法,先由样本给出经验分布函数 $F_n(x_0)$,然后用样本统计量 (\bar{x}, S) 近似代替相应的总体参量,作 $\tau_i = \frac{x_i - \bar{x}}{S}$,从分布表查取相对应的理论分布函数 $F(x)$,找出 $F_n(x_0)$ 与 $F(x_i)$ 之间最大差值(绝对值)。

$$D_n(x) = S_{n,p} |F_n(x_0) - F(x_i)|$$

我们近似认为 $\sqrt{n} D_n$ 的分布为 $K(y)$,而 $K(y)$ 为已知(由已知附表查出附表略)。在给定置信水平下,由 $K(y)=1-\alpha$ 找出 y_α ,然后比较 $\sqrt{n} D_n$ 与 y_α ,若 $\sqrt{n} D_n < y_\alpha$,属正态分布。

$$\bar{x}_1 = 1.5707 \quad S_1 = 0.5003 \quad n_1 = 11$$

$$D_n(x) = 0.3965 \quad S_1^2 = 0.2503$$

表3(略)分别列出未作业区与作业区冰雹动能分布函数检验计算结果。

$$\sqrt{n} D_n(x) = \sqrt{11} D_n(x) = 1.315$$

取 $\alpha=0.05$ 查表得 $y_\alpha=1.36$

$$\sqrt{n} D_n < y_\alpha$$

所以,1987—1990年满城未作业地区冰雹落地动能遵从对数正态分布。

3.2.2 两个样本平均数之差的显著性检验

在样本是正态分布的前提下,小样本的检验可用t检验。

$x'_i(F_T)$:冰雹动能($J \cdot m^{-2}$) $S_2^2=0.1092$, $t=2.253$, t 服从自由度 $\gamma=n_1+n_2-2=20$ 的t分布。给定显著度 $\alpha=0.025$,查t分布表得,

$$t_{20} = 2.086 \quad t > t_{20}$$

即作业地区冰雹动能平均值相对未作业

地区的减少量是显著的,单边检验显著度超过 0.025,满城防雹作业是有效的。

采用上述方法也可以对冰雹动能通量、冰雹质量以及降雹强度进行正态分布检验和 t 检验,这里不再重复。

从上述 10 个参量的检验结果得到,作业前后或作业区与未作业区比较,雹云回波参量和降雹参量的变化明显,在 $\alpha=0.002-0.05$ 显著水平下,10 个参量的平均值相对减少 61%。

4 结果讨论与分析

4.1 在防雹效果的检验方面,本文采用了 10 个物理参量进行对比分析,并对 10 个物理参量的变化进行了检验,检验结果表明:高炮作业后雷达回波顶高、强度及 30dbz 强回波顶高显著地比作业前小,作业效果分别为 63.6%、70% 及 77%,其显著性水平为 0.05;高炮作业区比未作业区落地冰雹动能、冰雹质量、冰雹动能通量与降雹强度分别减少了 81%、78%、59% 及 50%;最大冰雹直径、数密度以及降雹持续时间分别减少了 36.4%、47.8% 和 42.8%,其显著性水平超过 0.02。通过这些物理参量的变化表明,1986—1990 年满城防雹试验是成功的,防雹效果是显著的,10 个参量的平均值相对减少 61%。

4.2 瑞士、法国、意大利以及加拿大等国选用与雹块大小、数密度有关的物理量——冰雹落地动能(E)作为基本检验量,计算结果表明,冰雹动能 $E \geq 15 \text{ J} \cdot \text{m}^{-2}$,农作物就要遭到损失。从表 2 看出,有 4 次作业区降雹成灾,其动能值(E)为 $15.6-22.9 \text{ J} \cdot \text{m}^{-2}$ 。根据当地实况调查,这 4 次降雹,作业区的灾情不重,属轻灾范围,1986—1990 年满城县共遭

受 8 次雹灾,从农作物损失程度看,比较轻,不像满城周围各县,不仅受(雹)灾面积大,而且灾情十分严重,满城自 1986 年以来,基本上没发生严重的冰雹灾害,这与本文采用与冰雹和冰雹云基本特征有关的 10 个物理参量进行效果检验与分析,其结果是一致的。

4.3 根据炮点与雷达观测记录,1987 年 7 月 14 日与 1990 年 5 月 29 日都是在炮点附近开始降雹后才进行高炮作业(其原因:因有班机过境,不让提前作业),其结果,炮点及其附近降雹更严重。这个结果表明,在冰雹云成熟——降雹阶段进行猛烈作业,爆炸影响冰雹云的作用相对催化来说更为明显,因为冰雹云成熟后,催化基本上不起作用,只有爆炸阻止冰雹云向前发展,促使冰雹提前降落。

4.4 本文只列举了 11 个高炮作业日。有很多作业日作业后,作业区没有降雹,无法从冰雹落地动能(或质量)进行分析,如 1989 年 5 月 28 日满城作业区上空黑沉沉的,云呈悬球状,磨雷声不断,回波强度达 50dbz 以上,经过猛烈炮击后,满城作业区及其下游地区未见冰雹,只见降雨,而在作业区的上游——易县管头与完县清醒、王家庄、隘门口一带降雹成灾,因此,实际效果比此处统计的效果大。

4.5 本文除了使用地面雹谱资料(主要根据冰雹大小、数密度及降雹持续时间 3 个单参量资料,推导出冰雹动能、质量、通量等复合参量),还选用了反映雹云变化的回波参量,把防雹效果与降雹特征和造成降雹的云的变化特征联系起来,物理意义明确,有利于提高效果检验的可信度。

参考文献(略)

(下转第 61 页)

Research on Multi-Physical Parameters Examining Hail Suppression Results

Wang Yuzeng Yu Qing

(Chinese Academy of Meteorological Science, Beijing 100081)

Abstract

The results of hail suppression have been examined based on the data of hail cloud radar echo and the characteristics of the falling hailstones.

The values of radar echo top height, intensity and 30dbz strong echo height of hailcloud after the anti-aircraft gun operation are remarkably less than that of before the operation.

The maximum diameter, number density, duration of hailfall, kinetic energy, masses, kinetic energy fluxes and mass fluxes of hailstone in the operation area less than that of the contrast area.

Key Words: hail suppression results radar echo parameter examination