

# 山东地区人工防雹用弹量的估算<sup>①</sup>

陈文选

(山东省气象科学研究所, 济南 250031)

## 提 要

利用常规探空资料计算各地特征高度, 采用 711 雷达雹云观测资料估算雹云中雹源含水量, 从而得出每个作业点一次防雹作业用弹量的近似计算公式, 并将计算结果与实际作业情况进行了对比。该方法可适用于山东地区人工防雹作业中用弹量的估算。

关键词: 人工防雹 711 雷达 常规探空 用弹量

## 引 言

冰雹是影响山东的主要气象灾害之一, 为抗灾减灾, 山东省自 1987 年开始, 先后有 16 个市(地)、88 个县(市)开展了高炮人工防雹工作, 取得了明显的社会、经济效益。正确估算作业用弹量, 是作业成功、减少不必要浪费的重要因素。利用文献 [1] 给出的方法进行估算, 存在以下几个问题: (1) 各地一般无实时探空资料; (2) 计算 0℃ 层小冰雹质量时未考虑每日 0℃ 层高度的变化; (3) 雹源含水量以绝热含水量代替。笔者对山东地区人工防雹作业中用弹量的估算进行了探讨, 得到了一种利用常规探空资料、711 雷达实时观测资料估算作业用弹量的方法, 在实际应用中取得了较好的效果。

### 1 用常规探空资料计算特征高度

冰雹生长的主要源地是大量过冷却水滴组成的含水量累积区, 所以又称雹源。过冷却水滴的温度在 0℃ 以下, 但当温度太低, 如低于 -35℃ 时, 过冷却水滴大多冻结, 也不能形成冰雹。所以, 0~ -30℃ 是冰雹生长的主要舞台。因此, 将 0℃、-30℃ 称为特征温度, 它们对应的高度称为特征高度。

特征高度可由探空资料求取。因各地一般没有常规探空业务, 如果加放探空耗费大量人力、物力。我们利用省气象台网络实时获取目标站常规探空资料, 利用插值方法处理得到雹云所在地的特征高度。此种方法既经济又简便, 日常作业中完全能满足工作需要。具体作法是: (1) 从省台网络中获取山东附近 7 个常规探空站(如表 1) 08 时或 20 时规定层 TTAA、特性层 TTBB 报告; (2) 将原始报文经计算机自动译报处理, 得到各规定层、特性层温、压、高度值; (3) 经插值求出特征温度对应的气压, 由最靠近的规定层和压高公式求出 0℃、-30℃ 的特征高度; (4) 用“最优权重插值方法”求取山东范围内任意给定点的特征高度  $H$ , 即:

$$H = \frac{\sum_{j=1}^7 \frac{d_j^{-2}}{7} H_j}{\sum_{j=1}^7 d_j^{-2}} \quad (1)$$

其中  $H_j$  为第  $j$  个目标站的某个特征高度值,  $d_j$  为给定地理位置到第  $j$  个目标站的距离。由于选站范围较小, 在南、北纬度差较小情况下,  $d_j$  可直接由经、纬度坐标计算得出。

<sup>①</sup> 山东省气象局 95 攻关课题资助。

表1 各探空站一览

站名	区站号	纬度	经度	海拔高度
北京	54511	39°48'	116°28'	33m
济南	54823	36°41'	116°59'	53m
邢台	53798	37°04'	114°30'	78m
锦州	54337	41°08'	121°07'	70m
大连	54662	38°54'	121°38'	98m
成山头	54776	37°24'	122°41'	48m
青岛	54857	36°04'	120°20'	75m

## 2 雹云判别指标

冰雹是一种发展猛烈、突发性很强的局地性强对流天气，降雹前后雹云的顶高及下降速度变化很大。文献[2]根据济南711雷达1976~1987年6~8月探测的191块雹云统计得出山东地区冰雹云的判别指标，雹云判别率达85%以上。具体作法是根据雷达观测雹云的形状、移向、移速、强度、衰减时云厚度变化、变化趋势及回波高度等确定各要素的指数值，将其求和得到雹云判别综合指数BB，即：

$$BB = S + C + V + Q + H + F + G \quad (2)$$

若  $BB < 5$  为非雹云； $BB > 5$  为发展雹云； $BB > 7$  为成熟雹云。

## 3 用弹量计算公式

目前人工防雹均以“有效竞争”作为设计的科学基础，即通过人为向雹云中冰雹生长部位（即雹源）播撒大量冰雹胚胎，与自然雹胚争食冰雹赖以增长的过冷水，使云中冰雹个数大量增加，尺度变小，在下落至地面时能够完全融化，从而达到减少雹灾的目的。

目前我国防雹作业使用的三七高炮炮弹，其AgI在-16℃时的成核率一般为  $1.05 \times 10^{13}$  个·g<sup>-1</sup>，而这些粒子中大约只有万分之一可以和过冷水滴碰并冻结成冰雹胚胎<sup>[3]</sup>，即人工雹胚形成概率为  $10^{-4}$ ，所以1g AgI能形成人工雹胚的个数，即雹胚成核率为  $\gamma = 1.05 \times 10^9$  个·g<sup>-1</sup>。设Y为三七炮弹AgI含量(g)，V是雹源体积，M为作业发射炮弹数，则人工胚胎浓度  $N = \gamma \cdot Y \cdot M/V$ ；又  $N = W/q$ ，W为云中雹源含水量(g·

m<sup>-3</sup>)，q为云中0℃层高度上落地后不成灾（我们设全部化为水）的小冰雹质量。由  $W/q = \gamma \cdot Y \cdot M/V$  得到用弹量M的计算公式：

$$M = W \times V / (g \times Y \times \gamma) \quad (3)$$

梅森等人的研究指出<sup>[4]</sup>，若冰雹是球形的，冰雹降落时半径随高度的变化为：

$$R_0^{7/4} - R_g^{7/4} = 1.20 \times 10^{-6} (z_0 - z_g) \quad (4)$$

其中  $R_0$ 、 $R_g$  分别为0℃层和落地时的冰雹半径(cm)， $z_0$  为降雹当日0℃层高度(cm)， $z_g$  为海拔高度。设冰雹落地时全部融化为水，则0℃层冰雹半径为：

$$\begin{aligned} R_0 &= (1.20 \times 10^{-6})^{4/7} \times (z_0 - z_g)^{4/7} \\ &= 4.14 \times 10^{-4} \times (z_0 - z_g)^{4/7} \end{aligned} \quad (5)$$

取冰雹密度为  $0.8 \text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ ，则0℃层小冰雹质量为：

$$\begin{aligned} g &= 4/3 \times 3.14 \times R_0^3 \times 0.8 \\ &= 3.35 \times R_0^3 \\ &= 2.377 \times 10^{-10} \times (z_0 - z_g)^{12/7} \end{aligned} \quad (6)$$

若  $\Delta Z$  为以 km 为单位的  $z_0 - z_g$ ， $V_{\text{km}}$  以 km<sup>3</sup> 为单位的雹源体积，此时式(3)变为：

$$\begin{aligned} M &= W \times 10^9 \times V_{\text{km}} / (2.377 \times 10^{-10} \times \\ &(\Delta Z \times 10^5)^{12/7} \times Y \times \gamma) = 10.79 \\ &\cdot W \cdot V_{\text{km}} \cdot (\Delta Z)^{-12/7} / Y \end{aligned} \quad (7)$$

由式(7)可知，只要求得雹源体积  $V_{\text{km}}$  及雹源含水量W，即可求出作业用弹量M。

## 4 雹源体积与含水量

在雷达回波上，冰雹的生长源地对应的是强的回波区。我们将此强回波区看作“雹源”，通过以下方法估算雹源体积和雹源含水量。

当雹源强中心距炮位10km时，对准雷达强中心自30dBz开始，按5dBz间隔依次进行等分贝衰减，当回波顶高不再下降或下降很小时，设此时回波强度为  $N_0$  dBz，回波顶、底高分别为  $H_T$ 、 $H_B$ ，回波区平均宽度D。此强回波区即为“雹源”。由于冰雹生长的主要舞台为0~-30℃，所以取雹源体厚度  $H =$

$(H_T, H_{-30})_{\min} - (H_B, H_0)_{\max}$  其中  $H_0, H_{-30}$  分别为  $0^\circ\text{C}$ 、 $-30^\circ\text{C}$  温度层对应的高度,由式(1)求取。因雹源是云中强上升气流区,可将其近似看作圆柱体,以  $D$  作为雹源平均直径用圆柱体体积公式求取雹源体:

$$V_{\text{km}} = 3.14 \times (D/2)^2 \times H$$

$$= 0.785 \times D^2 \times H \quad (8)$$

雹源含水量采用 711 雷达定量估算方法。设雹源内最强回波强度为  $N_1$ , 则雹源内平均回波强度  $N = (N_0 + N_1)/2$ , 强回波区距雷达站距离为  $r$  km, 由以下两式<sup>[5]</sup> 可求出雷达等效反射因子  $Z(\text{mm}^6 \cdot \text{m}^{-3})$ 、平均含水量  $W(\text{g} \cdot \text{m}^{-3})$ :

$$Z = 0.0041r^2 \times 10^{0.1N} \quad (9)$$

$$W = 0.00344Z^{4/7} \quad (10)$$

综合以上两式可得到雹源含水量  $W$  的近似计算公式:

$$W = 1.488 \times 10^{-4} \times r^{8/7} \times 10^{0.05714N} \quad (11)$$

表 2 列出了根据式 (11) 计算的不同距离(雹源距雷达站的距离)各雷达分贝数对应的液态含水量的值。

表 2 不同距离  $r$  / km 各分贝数 / dBz 对应的液态含水量 ( $\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ )

$r$	30dBz	35dBz	40dBz	45dBz	50dBz	55dBz
10	0.11	0.21	0.40	0.77	1.49	2.87
20	0.24	0.46	0.88	1.70	3.28	6.43
30	0.38	0.73	1.40	2.70	5.22	10.08
40	0.52	1.01	1.95	3.76	7.25	14.00
50	0.67	1.30	2.51	4.85	9.36	18.07
60	0.83	1.60	3.09	5.97	11.53	22.26
70	0.99	1.91	3.69	7.12	13.75	26.54
80	1.15	2.23	4.30	8.30	16.02	30.92
90	1.32	2.55	4.92	9.49	18.32	35.38
100	1.49	2.87	5.54	10.70	20.67	39.90

## 5 实例分析与讨论

①1995 年 6 月 24 日济阳县人工防雹办公室组织的一次高炮防雹作业,自当日 07 时各站探空资料内插得到  $0^\circ\text{C}$  高度  $H_0 = 4.4\text{km}$ ,  $-30^\circ\text{C}$  高度为  $9.18\text{km}$ 。16 时 30 分,

雷达观测强对流云体在  $330^\circ$ , 距雷达站  $45\text{km}$ , 回波顶高  $11\text{km}$ , 最强回波强度  $45\text{dBz}$ , 达雹云指标。衰减  $35\text{dBz}$  时, 回波顶高  $8.7\text{km}$ , 底高  $5.5\text{km}$ , 回波宽度  $6\text{km}$ 。则雹源体厚度为  $3.2\text{km}$ , 体积  $V_{\text{km}}$  为  $90.4\text{km}^3$ ; 雹源体平均回波强度为  $40\text{dBz}$ , 含水量  $W$  为  $2.2\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ , 计算用弹量  $M$  为 177 发。此次作业实际用了 185 发三七炮弹, 未遭冰雹袭击。

②1996 年 7 月 5 日 14 时 40 分, 济阳雷达站发现一强回波自西北方向向南移动并逐渐加强。15 时 20 分, 回波移至  $270^\circ$ , 距雷达站  $25\text{km}$  处。此时回波顶高达  $13\text{km}$ , 强回波中心强度  $50\text{dBz}$ , 达雹云指标。衰减  $40\text{dBz}$  后, 回波顶高已不再下降, 此时回波顶高  $9\text{km}$ , 底高  $3.5\text{km}$ , 回波平均宽度  $6\text{km}$ , 当日  $0^\circ\text{C}$  高度为  $4.9\text{km}$ ,  $-30^\circ\text{C}$  高度为  $10\text{km}$ 。则雹源体厚度为  $4.1\text{km}$ , 体积  $V_{\text{km}}$  为  $115.8\text{km}^3$ ; 雹源体平均回波强度为  $45\text{dBz}$ , 含水量  $W$  为  $2.18\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ , 计算得用弹量  $M = 176$  发, 实际作业用三七炮弹 198 发。

③由以上两例可以看出, 利用本文方法计算防雹作业用弹量, 与实际作业用弹量大致相当。因此, 可在山东地区人工防雹作业中应用。

④实际作业用弹量应略高于计算值, 从而起到适当过量催化作用, 使作业控制区基本无雹灾发生。

## 参考文献

- 1 王雨增. 人工防雹实用技术. 北京: 气象出版社, 1994.
- 2 李连银. 用雷达回波参量变化分析高炮人工防雹效果. 气象, 1996, 22 (9): 26~30.
- 3 Sinclair, P. C. et al. Hailstorm modification Proceedings of the International conference on cloud physics, August 26~30, 1968, Toronto, Canada, 789~794.
- 4 B J. 梅森. 云物理学. 北京: 科学出版社, 1978.
- 5 北京气象学院高级进修部. 云、降水物理和人工影响天气文集, 1995, 油印本.

# A Calculation Method of Amount of Shells Using in the Hail Suppression in Shandong

Chen Wenxuan

(Shandong Research Institute of Meteorology, Jinan 250031)

## Abstract

Based on sounding and echoes from 711 radar the feature altitude and the water contents in the hail growth zone were calculated. In every operating point, a calculation formula for calculating the amount of shells using in the hail suppression can be gained. The calculated result and the actual operating condition were compared. The method could fitted calculating the amount of shells using in the hail suppression in Shandong regoin.

**Key Words:** hail suppression    sounding balloon    711 radar    amount of shells