

# 火箭增雨作业部位和催化剂量的确定<sup>①</sup>

李红斌<sup>1</sup> 周德平<sup>2</sup> 濮文耀<sup>1</sup>

(1. 辽宁省大连市人工影响天气办公室 116001; 2. 中国气象局沈阳大气环境研究所)

## 提 要

讨论了采用新一代多普勒雷达指挥火箭增雨作业时,对大连地区不同类型云催化时目标云选择、催化潜力判断、催化时机把握、催化部位确定的技术思路和方法。

关键词: 火箭增雨 催化部位 催化剂量

## 引 言

近年随着我国人影事业的发展,增雨火箭以它射程远、播撒高度高、催化成核率高、核化速度快、播撒路径长等特点<sup>[1]</sup>迅速在全国得到发展,规模不断扩大。目前,火箭对积云作业在我国许多地区得到应用,特别在新疆、湖北等地,火箭对积云防雹、增雨作业取得了一定成果<sup>[2,3]</sup>,但火箭对不同类型云增雨催化时作业的仰角、方位角及用弹量的确定目前还是个未解决的重要问题。火箭增雨作业不仅适合于一定范围的积云,更适合范围宽广的层状云和积层混合云<sup>[4]</sup>。火箭作业只有在科学选择作业时机、确定合适的部位和适宜的用弹量才能发挥其高效作用,减少经济损失和浪费。

我们采用多普勒雷达实时监测,通过雷达指标判别、探空资料和弹道曲线参数等确

定增雨火箭作业的发射仰角、方位角。在线源扩散理论的基础上,将稳定性降雨云系看作均质大气,导出了用弹量的计算公式。过去对积云增雨作业用弹量计算时只考虑了动力催化,计算的结果数值偏大,因此,在综合考虑了动力催化与静力催化基础上,其计算结果更具有实际操作参考价值。

## 1 催化技术分析 & 作业参数的确定

### 1.1 目标云选择和判别

通过对大连地区 2003 年 22 次降雨过程的多普勒雷达观测资料进行统计分析,选择强度在 25dBz 以上,顶高在 8km 以上的对流回波,或强度在 15dBz 以上,顶高在 4~8km 的层状云(积层混合云)降雨回波为准作业对象。若积云回波发展为带状或有规则排列,平均强度在 25dBz,或强度在 35dBz 以上,面积在 10km×10km 以上,顶高在 8km 以上的

<sup>①</sup> 资助课题:大连市科委科研项目“火箭增雨流动作业技术指挥系统的研究”。

孤立对流回波,并向作业点有效射程内移动发展,可判断为具有作业潜力对象,进入射程后可随时作业。

积云催化时机可选择在云体发展初期<sup>[5]</sup>;层状云和积层混合云作业选择在云体降水发展旺盛阶段<sup>[4]</sup>。统计分析大连地区多普勒雷达回波特征结果,当积云初始降雨回波出现 6~20min,回波强度 $\geq 25\text{dBz}$ ,顶高 $\geq 8\text{km}$ ,  $-\Delta H \geq 3.0\text{km}$  时可进行催化;层状云回波 $\geq 15\text{dBz}$ ,顶高 $\geq 5\text{km}$ ,  $-\Delta H \geq 1.5\text{km}$  时开始催化;积层混合云当回波强度 $\geq 20\text{dBz}$ ,顶高 $\geq 5.5\text{km}$ ,  $-\Delta H \geq 2.0\text{km}$  时进行催化。

### 1.2 作业部位

根据中国气象科学研究院的二维积云时变模式计算结果,积云最佳催化部位在云中上升气流最大值附近、回波中心部位效果较好<sup>[6]</sup>,作业高度在云体温度 $-10^\circ\text{C}$ 所在高度;层状云、积层混合云催化部位宜高,一般选择在云体温度 $-10 \sim -20^\circ\text{C}$ 所在高度<sup>[5]</sup>。并结合火箭性能特点,火箭入云播撒点和催化剂播撒路线要使催化剂能在云中充分活化,提高成核率。因此,要使催化剂能达到有效作业部位,必须确定好火箭作业的发射方位角和仰角。

#### 1.2.1 火箭发射方位角的确定方法

##### (1)层状云方位角的确定

根据播云方向的数值试验<sup>[4]</sup>表明,逆风播撒其有效面积、有效时段、增雨比率均最小;顺风不利于提高增雨效率;垂直与 $45^\circ$ 交角播云方案产生的增雨效益相当。由此表明,播云线与风向垂直并不是惟一选择。对系统性层状云可将作业站点有效射程内的高空风向与雷达站相应的高空探空风向近似于同向,设其与雷达之间交角为 $\theta$ ,则火箭发射的方位角为:

$$\theta \pm (45^\circ \sim 90^\circ)$$

因此,对层状云增雨作业应沿云的移动方向左右两侧 $45^\circ \sim 90^\circ$ 间发射,可增大播撒有效面积和有效时段<sup>[4]</sup>。

(2)积状云(积层混合云)方位角的确定  
方位角的确定主要利用雷达站距离-方位图。根据雷达站给出的作业区坐标来换算出火箭发射点的方位角。并由雷达、作业点及作业云投影所组成的平面三角形(见图1),计算出作业点距作业云的水平距离<sup>[3]</sup>。

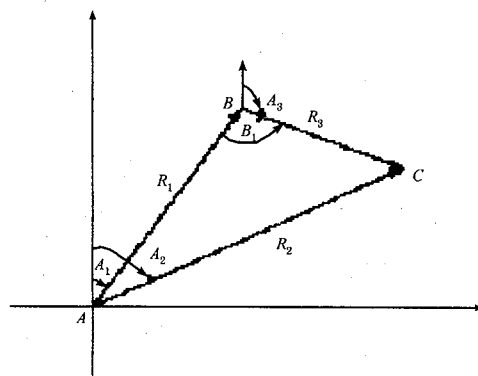


图1 雷达站距离-方位图

A点为雷达站, B点为作业站点, C点为目标云。

$$R_3 = \sqrt{R_1^2 + R_2^2 + 2R_1R_2\cos(A_1 - A_2)}$$

(作业点距目标云的水平距离)

$$B_1 = \arccos\left[\frac{R_1^2 + R_3^2 - R_2^2}{2R_1R_3}\right]$$

其中, $A_1$ :作业站点和雷达站之间交角; $A_2$ :目标云在地面上的投影和雷达站之间交角; $A_3$ (火箭发射方位角) $= 180^\circ + A_1 - B_1$ ,即可确定方位角 $A_3$ <sup>[3]</sup>。

#### 1.2.2 火箭发射仰角的确定方法

火箭发射仰角是目标云作业部位高度,计算出的作业点与目标云水平距离 $R_3$ 及火箭弹道飞行参数而确定。对于火箭,考虑其催化剂播撒高度和水平距离,计算时还要考虑雷达站与作业点的海拔高度差,将雷达所测的云体作业部位高度换算到云体相对作业点的高度,结合火箭弹道轨迹(图2)即可查得火箭发射仰角。统计分析大连地区降雨云,均属于冷云或混合性云降水。因此,层状云作业仰角的确定,应考虑静力催化效果,并结合 AgI 在 $-10^\circ\text{C}$ 层催化速度快、核化率高

等特点,可将作业高度选择在-10~-20℃层之间;而对流云作业仰角的确定,重点考虑了动力催化效果,作业高度选择在0~-5℃之间,在云的较低高度播撒,催化剂可随着上升气流的上移逐渐核化。

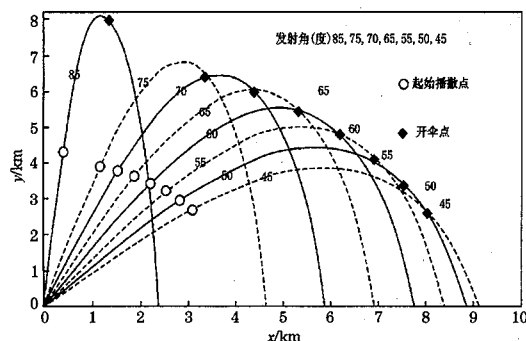


图2 WR-1B型火箭弹道曲线示意图

### 1.3 作业剂量

根据近年飞机增雨作业期间机载 PMS 探测结果,辽宁省春夏季降水性层状云中的冰雪晶粒子平均浓度为 3~5 个/升;积层混合云中为 8~10 个/升。参考这一探测结果,在确定催化剂量时,取其平均值作为参考依据。

#### 1.3.1 层状云播撒剂量的确定

##### (1) 云中有效催化体积

假设层状云、积层混合云为均质大气。并将图 2 中起始播撒点至开伞点之间的播撒轨迹视为直“线源”,长度为  $L$ ,  $\alpha$  为  $L$  与水平面  $XOY$  的夹角。 $D$  为线源的水平扩散半宽, $H$  为线源的扩散厚度,由层状云、积层混合云播撒催化扩散的数值模拟<sup>[7]</sup>可将播云有效区域近似看作如图 3 所示(图 3 中  $X$ 、 $Y$  表示水平方向, $Z$  为垂直方向),则一个线源所能扩散的空间体积表达式为:

$$V = \text{水平面上线源扩散的投影面积} \times \text{扩散厚度} = (L \cos(\alpha \times 2D) + \pi D^2) \times H \quad (1)$$

其中: $L$  的取值与火箭发射仰角  $\beta$ 、高空风速及播撒时间有关,  $D$ 、 $H$  的值分别取决于水平、垂直扩散效率和催化剂的有效扩散时间  $T$ (约为 90 分钟)。根据汪宏宇等<sup>[8]</sup>(1997)

对辽宁省人工增雨作业催化剂扩散的数值模拟分析,水平扩散系数取为常数 ( $K_y = 100 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ ),垂直扩散系数采用指数形式 ( $K_z(z) = K_z(z_1) \frac{z}{z_1} \exp[-\rho(z - z_1)/h]$ , 式中各参数的意义及取值同文献<sup>[8]</sup>)。

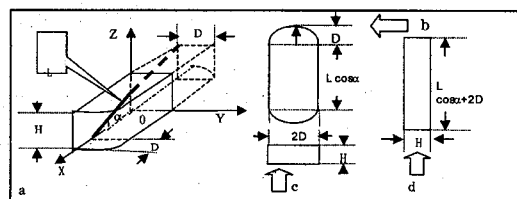


图3

(a)线源扩散在第一象限的范围示意,(b)XOY 平截面视图,(c)YOZ 平截面视图,(d)XOZ 平截面视图

结合大连地区实际作业经验,层状云、积层混合云作业高度宜在 4~6km,火箭作业可采用发射角为 45°~65°,因此,  $L \cos \alpha$  的取值约 3~5km,  $2D$  值约为 3~6km,  $H$  值 0.3~0.5km。由式(1)即可得出一枚 WR-1B 型火箭弹催化剂在云中扩散的体积  $V$  大约在 15~40km<sup>3</sup> 之间。

##### (2) 播撒剂量

为了提高层状云(积层混合云)的降水效率,云内的冰晶浓度宜增加到 20~100 个/升<sup>[4]</sup>。大连地区产生降雨性层状云和积层混合云所需的催化剂按辽宁省平均情况估算(设实际播撒中催化剂的有效成核率比实验室小两个量级),设对层状云作业,冰晶浓度应由 4 个/升增加到 20 个/升,则每次各角度发射的用弹量应为:

##### ① 层状云催化剂量

$$\begin{aligned} & \frac{\text{在有效扩散体积内催化所需增冰晶数}}{\text{每枚火箭弹的成核数}} \\ &= \frac{(20-4)(\text{个/升}) \times V(\text{km}^3)}{[(1.8 \times 10^{15})(\text{个/克}) \times 10(\text{克/枚})] / 100} \\ &= \frac{(20-4) \times 10^3 \times V \times 10^9}{(1.8 \times 10^{15} \times 10) / 100} \quad (2) \end{aligned}$$

当  $V$  取值 15~30km<sup>3</sup> 时,由式(2)计算得到用弹量是 1.3~2.7(枚)。故作业时,每次可沿风的移动方向两侧 45°~90°之间分别发射 1~3 枚火箭。

## ②积层混合云催化剂量

$$\frac{(50-9) \times 10^3 \times V \times 10^9}{(1.8 \times 10^{15} \times 10) / 100} \rightarrow 3.4 \sim 7.6 (\text{枚}) \quad (V$$

取值  $15 \sim 40 \text{ km}^3$  时)

结合大连实际作业经验,可对积云泡<sup>[4]</sup>每次发射 4~8 枚火箭。

## 1.3.2 积状云播撒剂量的确定

## (1)云中有效催化体积

首先将整个积云云体近似看作是圆柱体,催化剂的有效扩散体积为整个云体中温度介于  $-5 \sim -20^\circ\text{C}$  所在高度部分。设这一部分云体厚度为  $H_c$ ,直径(水平尺度)为  $D_c$ ,则有效催化体积  $V_c$  近似为:

$$V_c = \frac{1}{4} \pi D_c^2 H_c$$

## (2)催化剂量

对积云进行催化,要求在  $-10^\circ\text{C}$  层冰核数浓度大于  $10^2 \sim 10^3$  个/L<sup>[4]</sup>。实际操作中以增加 100 个/升为例(考虑动力和静力催化效果),若对面积为  $10 \text{ km} \times 10 \text{ km}$  的孤立积云作业,则所需催化剂量  $Q_c$  为(因为对流云的垂直尺度较层状云大得多,所以 AgI 在云中被光解的程度较层状云中小得多,故假设实际催化剂的有效成核率比实验室小一个量级):

$$Q_c = \frac{100 \times 10^3 \times V_c \times 10^9}{(1.8 \times 10^{15} \times 10) / 100} = 0.0556 V_c$$

结合大连实践经验,对尺度为  $10^2 \text{ km}^2$  的孤立积云单体增雨作业时,火箭每次可对强中心部位下方,扇型发射增雨火箭弹 5~6 枚。

## 2 参数确定技术方法在实践中的应用

对大连地区 2004 年 12 次较大范围增雨作业进行了雷达跟踪观测,作业中应用了该参数确定技术方法,均取得了较好的增雨效果。

以 6 月 25 日的一次稳定性降雨天气过程为例,06 时 59 分雷达 PPI 强度图(图略)显示,位于旅顺区和金州区一带上空出现了较大范围的降雨回波,各作业点射程内的回

波强度在  $15 \sim 20 \text{ dBz}$ ,且以  $10 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$  的速度向东北方移动。根据雷达作业判别指标,由作业参数确定方法,对三个作业点的作业仰角、方位角和用弹量进行量化确定。作业点分别接到指令:仰角  $48^\circ, 180^\circ, 2$  枚,实施了火箭发射。作业 10 分钟后,站点雨量逐渐密集,雨滴增大。雷达 PPI 上显示,旅顺区作业云回波结构变得密实,强度增强为  $25 \text{ dBz}$ 。根据指标判断,仍存在较大的增雨潜力,30 分钟后,指挥中心做出旅顺区两个作业点实施再次作业的指令:仰角  $50^\circ, 180^\circ \sim 225^\circ, 3$  枚。08 时左右,雷达 PPI 上回波强度增强为  $30 \sim 35 \text{ dBz}$ ,雨量继续加大。这次作业影响区内 6 小时降雨量为  $10 \sim 17 \text{ mm}$ ,对比区雨量仅有几毫米,增雨效果明显。

最明显的一次是 6 月 16 日对积层混合云的作业。在 13~20 时的第一时段南部的旅顺、大连和金州三个火箭作业点进行了反复两次作业;23 时,又分别在旅顺、大连、金州、瓦房点和普兰店的莲山同时进行作业,共发射火箭弹 25 枚。影响区和非作业区对比,增雨效果十分显著。

## 3 结 语

在 2004 年大连地区开展的火箭增雨作业中,采用该技术方法指导作业,根据雨量分布图进行直观对比分析得出:取得较好作业效果的有 10 次,占 83%;两次增雨效果不理想。其中一次,作业后站点雨量减小,回波减弱。分析失败原因,火箭作业车没及时赶到作业点,错过了最佳作业时机所致。

**致谢:**该科研课题的研究得到了游来光研究员的指导和帮助,在此深表诚挚谢意!

## 参考文献

- 1 航天工业总公司四院 41 所. 增雨防雹火箭作业系统, 2000.
- 2 施文全,李斌. 利用雷达指挥 WR-1B 型火箭进行防雹作业的方法. 气象,1996,22(7):52~56.
- 3 唐仁茂,扬维军,王斌等. 夏季对流云火箭增雨技术初步研究. 应用气象学报,2001,12(增刊).
- 4 人工影响天气岗位培训教材. 北京:气象出版社,2002.

- 5 李大山主编. 人工影响天气现状与展望. 北京:气象出版社, 2002.
- 6 王斌, 唐仁茂, 扬维军. 积云数值模拟在火箭外场试验设计中的应用. 中国气象局科教司, 人工影响天气(十二), 1999:32.
- 7 余兴, 王小玲, 戴进. 过冷层状云中飞机播云有效区域的模拟研究. 气象学报, 2002, 60(2):205~214.
- 8 汪宏宇, 刘万军. 人工增雨催化剂扩散数值模拟. 辽宁气象, 1997, (2):31~32.

## The Determination of Catalyzing Points and Project Quantity in Rocket Rain Enhancement

Li Hongbin<sup>1</sup> Zhou Deping<sup>2</sup> Pu Wenyao<sup>1</sup>

(1. Dalian Weather Modification Office, 116001; 2. Institute of Atmospheric Environment, CMA)

### Abstract

Doppler radar data is used in rocket rain enhancement. The methods such as, the target clouds choice, catalyzing potential estimation, catalyzing opportunity identification and catalyzing points determination are discussed. Within trajectory curve parameter, the projecting elevation, azimuth angle and projecting quantity are discussed, too.

**Key Words:** rocket rainfall enhancement catalyzing point catalyzing quantity method and application