

# 火箭增雨作业中雷达和 3S 技术的应用

李红斌 濮文耀 张殿刚 于世秀

(大连市人工影响天气办公室,大连 116001)

**摘要** 为了提高作业的科学性,采用新一代多普勒雷达和 3S 技术指挥火箭车适时科学流动作业,在分析当地天气特点、雷达回波特征以及充分运用现有的人工影响天气技术的基础上,运用多普勒雷达指挥作业对不同类型云进行催化时目标云的选择、催化潜力判断、时机把握、催化部位的确定等关键问题进行了研究。提出了包括雷达监测、判别指标、作业参数生成和效果反馈分析等内容的新一代火箭增雨作业技术方法,并运用 3S 技术对作业车辆实时定位跟踪,适时调整,科学指挥火箭车流动作业的技术思路。

**关键词** 火箭 增雨 3S 技术

## 引言

我国在 20 世纪 80 年代已有火箭在小范围内应用于增雨和防雹。随着人影事业的发展,近几年火箭增雨防雹在全国迅速发展,方兴未艾。其中以 WR-1B 等新型火箭为代表,在人工防雹、增雪方面都有不同规模的应用,尤其在北方许多地区应用广泛。但采用雷达和 3S(RS, GIS, GPS) 技术指挥火箭增雨流动作业技术方法的研究目前我国还是一个新课题。本文是大连市科委下达的关于“火箭增雨流动作业指挥系统的研究”科研课题的重要组成部分。通过雷达实时跟踪观测和指标自动判别,确定作业目标云,结合火箭作业参数和性能特点量化输出催化部位、用弹量及射击方式;应用 3S 技术适时指挥火箭车跟踪目标云流动作业,克服了过去人为主观判断指挥派车和靠肉眼观测实施作业的问题,大大提高增雨效率,可充分开发空中云水资源。

## 1 大连地区降水天气特征

### 1.1 地形与气候

大连位于辽东半岛南端,地处西风带与南方系统活动交界处,又西濒渤海,夏季主要降水系统西风槽经渤海移到大连上空时,强度减弱,降水减小或消失,因此,造成大连地区降水量偏少,缺水严重,干旱

频繁。但有时处于太平洋副热带高压外围边缘,盛行西南暖湿气流,有利降雨云的产生,或偶有气旋北上,带来南方大量暖湿空气,容易产生较强对流云,有利于人工催化增雨。

### 1.2 多普勒雷达回波特征

对大连地区 2003 年 6~10 月份过程降水量在 5 mm 以上的 22 个例多普勒雷达观测资料进行统计分析表明,大连地区主要降水云系有两类:层状云和积层混合云。混合云降水概率大于层状云,孤立的积云降水仅有两例。

分别对积云(混合云)14 个例和层状云 8 个例的多普勒雷达回波统计分析不难看出:积云结构多为块状、带状或有规则排列,水平尺度几公里到几十公里,强度在 20 dBz 以上,平均顶高在 8 km 以上,并随季节发生变化。大连地区积云降水主要集中在 8、9 月,强度在 35 dBz 以上,通常生成在午后到夜间。从生成到发展回波强度和水平尺度由小增大,成熟阶段回波强度和水平尺度达最大值,并维持一段时间,减弱消散阶段回波强度和水平尺度由大到小并消散。

表 1 大连 2003 年 6~10 月多普勒雷达回波平均特征值

	回波强度/dBz	云顶高/km	负温层厚/km	0℃层高/km
积云	20	>12	5~6	>4~5
层状云	10	4~12	4	4~5

大连市科委关于“火箭增雨流动作业指挥系统的研究”科研课题资助

作者简介:李红斌,女,1963 年生,工程师,从事人工影响天气研究,Email:lh52337389@163.com

收稿日期:2003 年 12 月 16 日;定稿日期:2004 年 1 月 14 日

层状云降水回波,在 PPI 上表现为大范围片絮状均匀结构,稳定少动,强度在 10 dBz 以上;在 RHI 上,回波均匀,顶部平坦,顶高 4~12 km(如表 1 所示)。常有水平 0 °C 层亮带(图 1,见图版 2)。大连地区层云降水各季都可出现,主要集中在 4~6 月。降水多发生在夜间到次日凌晨。

对速度场分析发现,积云产生降水时,速度场表现为低层明显辐合流场,高层为明显水平辐散(图 2,见图版 2),且速度场变化快,速度值较大;层状云降水时速度场上通常出现一个通过本站的 S 型零速度线(图 3,见图版 2),风向随高度顺时针变化,出现暖平流。

对速度谱宽分析发现,积云的速度谱宽值梯度较大,普宽值变化范围在 0.12~4.4 m/s 之间;层状云速度谱宽小,变化范围在 0.3~3.0 m/s 之间,回波越强,其值越大。

## 2 不同类型云的催化技术

### 2.1 作业工具

采用的催化工具是 WR-1B 新型 AgI 烟剂火箭,具有射程远(8 km)、播撒高(8 km)、成核率高(在 -10 °C 成核率  $1.8 \times 10^{16}$  个)、核化速度快(5 min)、播撒路径长(5 km)等特点<sup>[1]</sup>。针对积云发展迅速、移动快、云体发展高等特征,在催化作业方面比高炮有更优越的性能;对范围宽广的层云催化,试验效果与飞机增雨作业相近<sup>[2]</sup>。使用起来更安全、便利和高效。

### 2.2 目标云的判别和选择

选择有向强对流回波发展的初始阵雨回波或云层发展加厚的层状云降雨回波为催化对象<sup>[3]</sup>。通过多普勒雷达资料统计分析,选择强度在 20 dBz 以上,顶高在 6 km 以上的阵雨回波和强度在 10 dBz 以上,顶高在 4~12 km 的层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 25 dBz;或强度在 35 dBz 以上,面积在 10 km × 10 km 以上,顶高在 8 km 以上的孤立对流回波,并向作业点范围内移动发展,可选择为具有作业潜力的对象,进入射程随时作业。

### 2.3 作业部位

根据中国气象科学研究院人工影响天气中心研制的二维积云时变模式计算结果可知,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>[4]</sup>,作业高度在云体温度 -10 °C 所在高度;层云催化部位宜高,一般选择在云体温度 -4 °C ~ -20 °C 所在高度<sup>[3]</sup>。

结合火箭性能特点,火箭入云开伞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,发挥增雨作用。

### 2.4 作业时机选择

根据上述模式分析结果,积云催化时间可选择在云体发展初期进行催化<sup>[4]</sup>;层云催化时间选择在云体降水发展旺盛阶段<sup>[3]</sup>。当积云初始降雨回波出现 6~20 min,回波强度  $\geq 20$  dBz,顶高  $\geq 6$  km 时进行催化效果较好;层状云回波  $\geq 12$  dBz,顶高  $\geq 5$  km 时开始催化。

通过雷达实时跟踪观测,当目标云进入火箭点有效作业范围时,根据火箭弹道参数,由计算机迅速确定火箭发射的仰角、方位角、用弹量及射击方式,并通知火箭点进行作业。

### 2.5 作业剂量

对流云人工催化要达到动力催化效果,人工冰核浓度应达到 300~500 个/L<sup>[5]</sup>。而 WR-1B 型火箭每弹中装有 10 g AgI 催化剂,在 -10 °C 时冰核数可达  $1.8 \times 10^{16}$  个。若作业对象为体积 100 km<sup>3</sup> 的对流云体,需 3~5 枚火箭可使云中冰核达 300~500 个/L。结合大连多年实践经验和每次作业云的尺度及强度等特征:对流星用弹量选择 3~5 枚/次;层状云催化人工冰核浓度应达到 20 个/L<sup>[5]</sup>,对有效射程内层状云作业需 2~3 枚/次,扇型发射。

## 3 作业技术方法

### 3.1 作业指挥

利用雷达实时跟踪观测和对比作业判别指标,机器自动确定和量化输出作业参数;采用 3S 技术、计算机自动化数据处理和灵活多样的通讯手段,科学指挥火箭车跟踪目标云流动作业,可收到有效可行的指挥效果。

作业预警:通过一台可以调用 MICAPS 产品的微机实时分析气象资料,结合当地气象台短期预报对全区未来 24 h 天气预测,作出降水落区预报。对降水落区内的旱涝及水库水位进行综合分析,最终做出本次增雨作业区域预警。

作业布局:根据天气系统的来向、路径、降水性质以及本次增雨工作重点(农业抗旱、水库蓄水和城

区绿化)初步确定各作业点。采用3S技术定时、定位、准确、直观监测到火箭车位置,结合雷达实时跟踪观测判断目标云回波未来3h的移向、移速及发展演变,确定各火箭车进点时间,通知车辆出发时间和所到作业站点。

**雷达监测:**指挥中心通过GPS卫星定位系统和GIS地理信息系统实时监测火箭车所在位置,当车辆到达作业站点后,雷达开始进行加密跟踪观测,并对作业有效范围内目标云雷达回波进行作业指标判别对比,判断是否可作业,确定催化剂量、催化部位及作业方式等作业参数。并将目标云情况适时通知作业点,指挥作业人员进入发射准备。

### 3.2 作业参数的确定

**火箭发射方位角的确定方法:**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,计算出作业点距作业云的水平距离<sup>[6]</sup>。

**火箭发射仰角的确定方法:**火箭发射仰角由雷达探测的目标云作业部位高度和作业点与目标云水平距离以及火箭弹道曲线确定。计算时要将雷达和探空资料所确定的云体作业部位高度换算到云体相对作业点的高度<sup>[6]</sup>。

①层云仰角计算方法:由层云最佳催化高度、火箭入云开伞点和催化剂水平播撒距离综合分析得:

$$\theta_1 = \arctg[(h_3 - \Delta h) / R_3] \quad (1)$$

$$h_3 = \max(h_1, h_2), h_1 = h_{-15}^{[4]}$$

$$h_2 = h_{\text{云顶}}, h_3 \leq 4 \text{ } ^\circ\text{C}, \Delta h = h_{\text{站海拔}} - h_{\text{云海拔}}$$

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

其中, $\theta$ :火箭发射的仰角, $h$ :高度(km), $R_3$ :作业点与目标云之间的水平距离(km), $R_2$ :作业点与雷达站之间的水平距离(km), $R_1$ :目标云与雷达站之间的水平距离(km), $A_1$ 、 $A_2$ :雷达站、作业点及目标云构成三角形的两个内角。

②积云仰角计算方法:由积云最佳催化高度、火箭入云开伞点和催化剂水平播撒距离综合分析得:

$$\theta_2 = \arctg[(h_{-10} - \Delta h) / R_3] \quad (2)$$

## 4 作业效果的雷达观测及反馈分析

### 4.1 雷达观测作业效果分析

在发射火箭后,雷达应继续紧密监测目标云的

变化。若作业效果有效,通常雷达观测作业云回波会有一个加强过程<sup>[2]</sup>。例如,2003年8月22日受副高外围云系和高空槽东移共同影响,23:23(北京时间)雷达回波发现瓦房店测站以西有一范围6km×16km的对流云带,回波强度35~40dBz,顶高在12km以上(图略)。对应速度场低层为气旋式辐合流场。指挥中心请示后通知瓦房店3个火箭点立即增雨作业,共发射火箭14枚。作业15min后,雷达观测到作业云回波加强为40~45dBz,范围增大,回波边缘明显清晰(图略);对应的速度场低层水平气旋式辐合增强(图略)。同时发现速度谱宽和面积也增大。我们将影响区与非作业区降雨量对比估算,增雨效率达26%。

若作业效果不理想或目标云仍有较大潜力,可通知作业点进行第二次作业准备,并根据上述步骤指挥作业点进行再次催化作业,以求更好的增雨效果。

### 4.2 采用3S技术和雷达实时指挥火箭车流动作业

通过雷达实时跟踪观测,采用GPS卫星定位和GIS卫星遥感系统判断各火箭车与催化目标云的相对位置。当作业结束后,一方面雷达监测作业效果,同时观测作业区内是否有新生成或迅速发展的可作业潜力云,立刻判断其未来的发展移动,及时调整火箭车布点,适时指挥相关车辆跟踪目标云到达有效射程范围内作业点,等候作业指令。

3S技术与雷达探测技术在指挥火箭增雨流动作业中的充分结合与应用,即实现机动灵活,合理布局,科学指挥作业,又实现了指挥中心对全市作业车辆的统一科学部署,指挥协同作业,从而有效开发空中云水资源,提高增雨效率。

## 5 结语

火箭车增雨流动作业是目前大连市抗旱减灾工作的主要手段。本文根据当地实际情况,应用多普勒雷达和3S技术指挥火箭增雨流动作业所涉及的各方面技术问题进行了初步探讨,得出如下要点:

(1)大连地形气候特点形成了大连地区年均降水偏少,缺水严重,干旱频繁。但有时处于太平洋副高外围或偶有气旋北上,容易产生降雨云,有利于人工催化增雨。

(2)多普勒雷达资料统计分析,大连地区主要降水云系有两类:层状云和积层混合云,积层混合云降

水概率大于层状云。

(3) 当积云回波  $\geq 20$  dBz, 顶高  $\geq 6$  km, 负温层厚  $\geq 3$  km; 或强度  $\geq 35$  dBz, 面积在  $10 \text{ km} \times 10 \text{ km}$  以上, 顶高  $\geq 8$  km 的孤立对流回波, 随时准备作业; 当层云回波  $\geq 12$  dBz, 顶高  $\geq 6$  km 的降雨回波, 可作业。

(4) 积云最佳催化部位在云中上升气流最大值附近, 高度在云体温度  $-10$  °C 左右所在高度; 层云催化选择在云层中上部, 在云体温度  $-4 \sim -20$  °C 所在高度。

(5) 雷达实时跟踪观测, 根据各项作业判别指标和火箭弹道参数, 迅速确定火箭发射的仰角、方位角和用弹量, 指挥作业点进行作业。

(6) 作业后, 雷达继续监测催化结果, 决定是否进行二次作业。同时运用 3S 技术实时监测火箭车位置, 跟踪目标云, 适时调整作业点, 指挥火箭车科学流动作业。

(7) 由于大连地区多普勒雷达投入使用时间较短, 观测资料样本少, 统计分析的各项指标尚有局限性, 将在今后的试用中不断补充和修正, 并随着新一代多普勒雷达数值产品的进一步开发应用, 为该系提供更充分和优化的技术指标。

#### 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. 西安: 航天工业总公司四院 41 所, 1995
- 2 张存, 周毓荃. 人工影响天气优化技术研究. 北京: 气象出版社, 2000
- 3 李大山(主编). 人工影响天气现状与展望. 北京: 气象出版社, 2002
- 4 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. 见: 中国气象局科教司编. 人工影响天气(十二). 北京: 中国气象局, 1999
- 5 章澄昌. 人工影响天气岗位培训教材. 北京: 气象出版社, 2002
- 6 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): 58 - 64

## Application of Radar and SSS Technology to Rain Enhancement Operation

Li Hongbin Pu Wenyao Zhang Diangang Yu Shixiu

(Dalian Weather Modification Office, Liaoning Province, Dalian 116001)

**Abstract:** In order to improve operation scientifically, new-type Doppler radar and SSS (RS, GIS, GPS) technology are used in rain enhancement to command the rocket vehicle in real time and flexibly. Based on the analysis of local weather characteristics, radar echo features and the up-to-date technology, discussed are some crucial issues relevant to the utilization of Doppler radar in cloud seeding such as the choice of target clouds, the estimation of catalyzing potential, identification of catalyzing opportunity and the determination of catalyzing points, etc. An new technical operation method is presented, including rocket monitoring, index identification, operational parameter formation and effectiveness feedback, etc., and a technical procedure was proposed, in which SSS technology was adopted to trace and control operation vehicles in real time and scientifically.

**Key words:** rocket, rain enhancement, RS, GIS, GPS

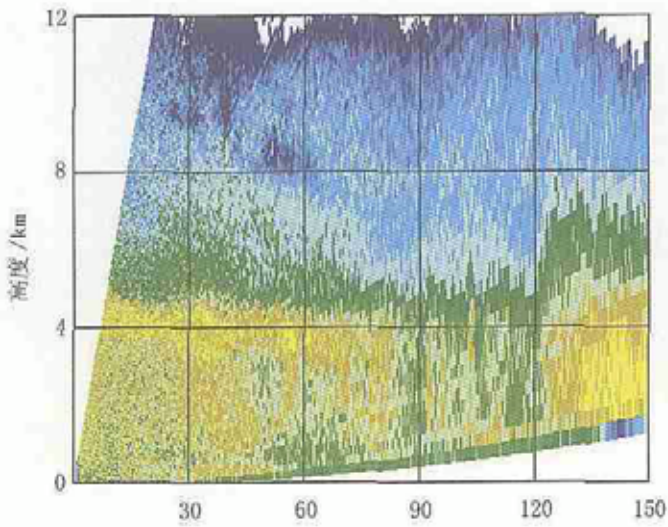


图1 2003年6月23日02:57RHI强度图  
(方位角194°, 距离150 km)

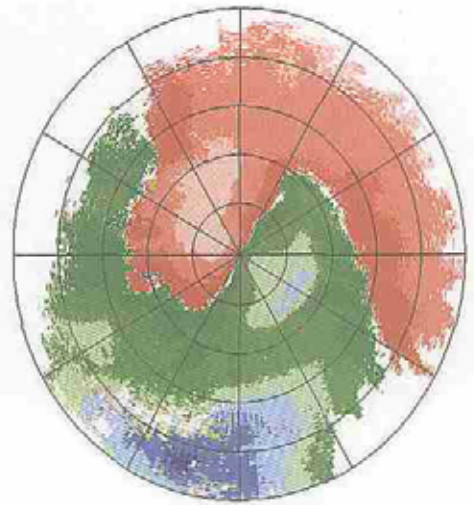


图3 2003年6月20日14:49PPI速度图  
(仰角0.5°, 距离150 km)

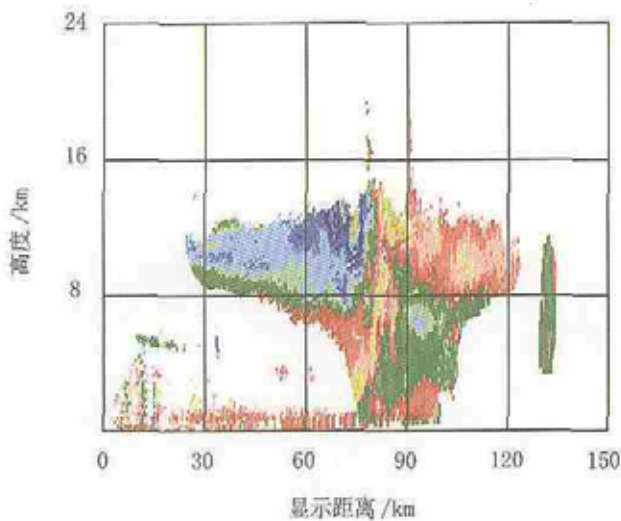


图2 2003年6月20日15:02RHI速度图  
(方位角40.71°, 距离150 km)

