

文章编号:1673-8411 (2014) 03-0085-05

火箭人工增雨作业中应注意的一些技术问题

徐冬英

(湖南省人工影响天气领导小组办公室, 湖南 长沙 410007)

摘 要:根据火箭增雨作业的原理对催化剂播撒量、成核率与火箭飞行速度和高度的关系进行分析;确定作业目标、时机和部位、作业火箭用量;对增雨效果、火箭播云对环境的影响进行评估。

关键词:人工增雨防雹火箭;播云;催化剂;效果评估

中图分类号:P48

文献标识码:A

Some Technique Problems in the Artificial Precipitation Enhancement Operation by Rockets

Xu Dong-ying

(Hunan Province Weather Modification Leading Group Office, Changsha Hunan,410007)

Abstract: Based on the principle of artificial precipitation enhancement operation, the relationship between catalyst amount for diffusion, nucleation rate and rocket flight speed and height were analyzed to determine the operation target, timing and position, the number of rockets and to evaluate the influence of precipitation enhancement effect and the rocket cloud seeding.

Key Words: rockets for the precipitation enhancement and hail suppression, cloud seeding, catalyst, effectiveness evaluation

1 前言

人工影响天气是千百年来人类期盼改变生存环境的美好愿望,也是近几十年迅速发展的一门学科和应用技术。其科学活动始于 1946 年美国科学家谢弗尔(J.S.Schaefer)和冯古乃特(B.Vonnegut)的伟大发现。前者在从事过冷却水滴的冻结研究时,发现作为制冷剂的干冰可促使过冷却水滴降至 -39°C 时自发冻结,随即又成功地进行了飞机在冷云中播撒干冰的试验。与此同时,后者研究了冰晶的核化作用,选取类似冰晶的碘化银晶体作为冰核试验取得成功。正是由于他们的科学贡献,开创了现代人工影响天气的新纪元,使得人工影响天气事业在近几十年内取得长足进步。

陆地上空气中的水汽主要是由洋面上蒸发的水汽流动带来的,而各国的地理位置和地形地貌特征决定了其自然降水的不均衡性。我国是山地多于平

原的国家,水资源相对匮乏,要解决水资源短缺的问题,除解决水资源配置和南水北调调节系统建设、完善水利设施、节约用水外,积极、合理开发空中云水资源,凸显重要。

人工增加降水是以人工措施来弥补自然降水环节和过程的不足,促进降水环节跨越阈值,使降水过程得以继续;或者加强自然降水的环节和过程,使自然降水效益增加。目前比较容易实施的方法是利用人工冰核来增加云中的冰晶,以增加冷云降水;或增补一些大的吸湿性冰核来增加暖云中的云滴,以促进暖云降水。

研究表明,自然降水量只占云中水汽含量的 40%左右,合理开发空中的水资源可以促进水汽系统的循环效率,实现局地降水增加,有利于农业和国民经济的发展。

本文依据新型火箭(以 WR-98 火箭为例)的设计和播云原理,对其在人工增加冷云降水作业需注

收稿日期:2014-06-19

作者简介:徐冬英(1964-),女,工程师,主要从事人工影响天气管理工作。

意的一些技术问题进行了探讨。

2 火箭播云原理

目前,我国进行人工增雨作业的工具具有飞机、高炮和火箭。飞机播云始于上世纪 50 年代。飞机播云的优点是播撒时可将催化剂播撒到预定云层,故其命中率高,具有对给定云体进行大量作业的能力;缺点是费用高,在恶劣天气条件下飞行作业有潜在危险,而且一般小型飞机的飞行高度难以到达目标云层。利用飞机进行增雨作业必须向空中航行管理部门申报使用空域和机场,时间和区域都受到制约,而时间关系到作业时机,尤其对于对流云。高炮播撒催化剂只能产生点播撒,且射高不够,成核率低,作业面小,需大量布点。火箭播云与飞机相似,同属线性播撒,但费用较低;较之高炮,有操作简便,易于流动作业等特点。现行火箭因受成本制约,只能实现沿抛物线轨迹播撒。如果能够合理布置固定和机动作业点,可以实现全天候、全区域覆盖作业。

火箭播云的原理是利用火箭作运载工具,将催化剂送到所需的高度进行播撒,使人工冰核直接进入可播云层,冰核在云中核化后形成冰晶,冰晶经过凝华增长、碰并增长和破碎、繁生,从而增加降水。WR-98 火箭的播云原理如图 1 所示,不同发射角的弹道曲线如图 2 所示。

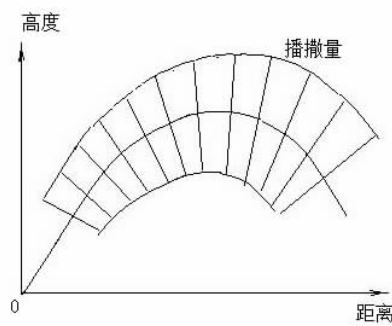


图 1 播云原理图

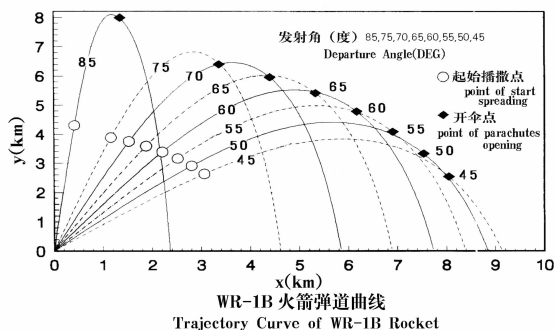


图 2 火箭弹道示意图

2.1 催化剂播撒量的计算

由图 1 可知,火箭播撒催化剂量随高度和时间的增加而增大,显然播撒量是时间 t 的函数,设 t 时刻的播撒量为 q ,则

$$q=f(t) \quad (1)$$

如果催化剂被制成内孔形药柱,设药柱内孔半径为 R_0 ,外径为 R ,药柱长 L ,催化剂的燃烧速度为 \dot{r} ,起播点时间为 t_0 ,可知 q 的关系式为

$$q=2\pi L(R_0+\dot{r}t)\dot{r} \quad (t_0 \leq t \leq t_{\text{end}} = \frac{R-R_0}{\dot{r}}) \quad (2)$$

而在时间 dt 内的播撒量 dq 为

$$dq=2\pi L\dot{r}(R_0+\dot{r}t)dt$$

那么在 t 时刻的已播撒量 Q 为

$$Q = \int_{t_0}^t (2\pi L\dot{r}(R_0+\dot{r}t))dt = (2\pi L\dot{r}R_0(t-t_0) + \pi L\dot{r}^2(t^2-t_0^2)) \quad (t_0 < t \leq t_{\text{end}}) \quad (3)$$

由式(3)很容易计算出在 t 时间内共播撒了多少催化剂。根据弹道表即可知道这些催化剂播撒到了什么地方。显然,式(3)中没有考虑火箭飞行高度和飞行速度对燃速 r 的影响,但是试验证明,其影响可以忽略不计。

2.2 火箭的飞行弹道、速度与催化剂成核率的关系

目前的增雨防雹火箭是无控制系统的,为简化起见,假设火箭按自由飞行体在推力无偏斜、无风条件下运动,这样可得到火箭在垂直平面飞行的运动方程为(假设火箭的迎角 $\alpha=0$)

$$\begin{cases} M \frac{dv}{dt} = F - X - Mg \sin \theta \\ Mv \frac{d\theta}{dt} = -Mg \cos \theta \\ \frac{dx}{dt} = v \cos \theta \\ \frac{dy}{dt} = v \sin \theta \end{cases} \quad (4)$$

式中 F 为推力; M 为质量; g 是重力加速度; θ 是弹道倾角(发射角)。图 2 系根据上述方程计算并经过靶场试验数据修正得出的,表 1 给出了经过修正的 WR-98 火箭的弹道参数。以发射角 70° 为例,其飞行高度、速度与距离的关系如图 3 所示(图中给出的数字为火箭飞行高度),由图可见在火箭飞行到最高阶段,火箭的飞行速度相对较低,因此,在这一区段内播撒催化剂是比较有利的,催化剂的成核率较高。

表 1 WR-98 火箭弹道表(海平面)

发射角	最高点 Y/X*	发射角	最高点 Y/X	发射角	最高点 Y/X
45	4100/6180	60	5900/5280	74	7200/3230
47	4350/6120	62	6120/4990	76	7340/2820
50	4720/6000	64	6320/4800	78	7600/2430
52	4970/5850	66	6530/4410	80	7900/2110
54	5200/5630	68	6720/4150	82	8000/1410
56	5450/5530	70	6890/3840	85	8090/1090
58	5680/5370	72	7050/3520		

*Y 表示最高点的纵坐标,X 表示最高点的横坐标。

WR-98 火箭播云使用的冷云催化剂是 BR-98-Y,其在不同温度条件下的成核率是不一样的,图 4 为中国气象科学研究院人影中心在等温温室中测得的结果。由图可见,催化剂的成核率与温度密切相关,温度在-7℃ 以下成核率均在 10^{15} 以上,变化不大;而在-3℃,则成核率很小。这就给播撒提出了明确的要求:播撒高度至少应在温度低于-5℃ 的云

层,否则按静力催化理论就是无效作业。

3 火箭人工增雨作业应注意的问题

当前,火箭增雨是通过携带和释放 AgI 晶核影响冷云降水过程来实现的。通常我们把能够增加自然降水效果的人工增雨叫做静力催化;而把增强云的发展以生成更大、更多降水云的人工增雨叫做动力催化,用火箭进行人工增雨具有两者的作用。火箭直接在作业云层播撒催化剂是启动冷云降水或提高冷云降水效果的静力催化;通过播撒的人工冰核使云中的过冷水大量冻结,放出的冻结潜热加热云体,使之变强,促进空气上升和下沉的运动加剧,以改变云层的水平和垂直尺度来增加降水,这就是动力催化,也就是我们所说的催化诱发降水机制。

3.1 作业前的资料准备

由于火箭人工增雨作业主要催化的云体部位是冷性的,掌握和应用探空资料十分重要。因为探空资料描述了大气层的结构状态,给出了大气温度、湿度、风速等随高度的分布廓线,根据廓线可分析出对流凝结高度、零度层高度等反映大气层结构状态的重要特征参数,作为直接用于火箭冷云催化的客观判据,确定可播负温度区-5~-15℃ 的相应高度。

卫星云图和雷达资料是预测大的天气系统降水分布、含水量分布的系统资料,据此可以选择作业区域。

对于通信条件差且无雷达、探空资料的地方,当天温度为-6℃ 的云层高度 $H_{-6℃}$ 可用当地早晨 8 时地面百叶箱测得的温度 t_s ,由下式近似计算

$$H_{-6℃} = \frac{t_s + 6}{0.6} \times 100(m)$$

(5)

以此为基点,高度每增加 100m,温度约降低 0.6℃,反之,高度降低 100m,则温度约增高 0.6℃。

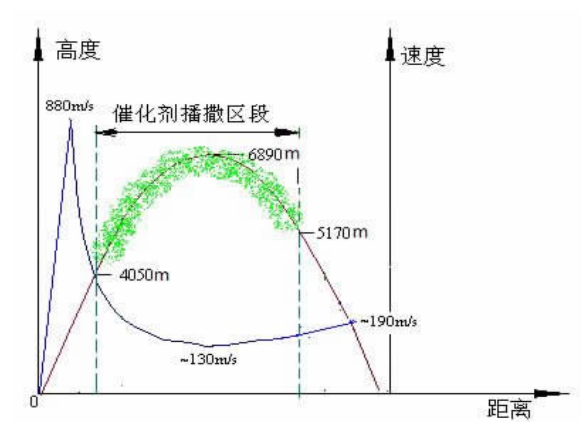


图 3 火箭飞行过程中的高度、速度与距离关系图

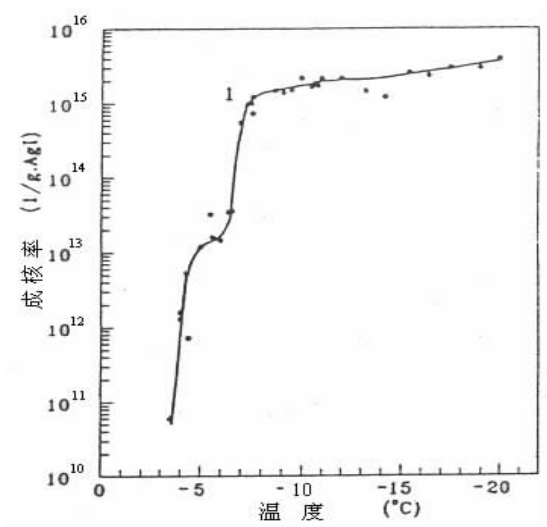


图 4 BR-91-Y 的成核率与温度的关系

由此可初步估算出当天各温度层的高度。

3.2 作业目标、作业时机和作业部位的确定原则

对于增加各种冷云降水,均可使用火箭进行作业。考虑到火箭的覆盖范围和增雨作业后的效果,通常应选择含水量丰富的云作为目标云(绝热含水量大于 $2\text{g}/\text{m}^3$), 0°C 层以上云厚至少大于 3km 、水平尺度在 10km 以上的云系,以保证作业后能够产生有效降水。

把握作业时机十分重要,对于层状云应选择云系发展比较旺盛的时机;对于积状云应满足降雨的云层条件(云量大于 3 成,云距作业点 5km 以内云顶高度大于 4km ,云底高度不小于 1km)。

作业部位应选择在云中 0°C 层以上的负温度层,把人工晶核播撒在 -5°C 层以上含水量大的云区。

3.3 作业高度和作业方位的确定原则

火箭携带的冷云催化剂 80% 以上都在弹道顶点以下 2km 范围内播撒,而在此弹道段火箭的飞行速度较低,所以催化剂的成核率高。为了充分发挥播撒效果,最佳作业高度应将火箭的起播点选择在 0°C 层以上的负温度区。

按作业云厚度确定时(设云顶高度为 $h_1\text{km}$,云底高度为 $h_2\text{km}$),火箭飞行的顶点高度选取在 $(h_1-1)\text{km}$ 处为宜;考虑到火箭的飞行安全,发射角不能小于 50° ,最佳发射角应在 $50^\circ\sim 70^\circ$ 之间选取。作业高度确定后查火箭弹道表即知发射角。值得注意的是当发射角不能满足低云层作业时,首先应保证发射角不能低于 50° ,宁可让火箭弹道部份在云顶上飞行播撒,以策安全。并且由于气流的运动和播撒冰核的下沉仍能起到一定的催化作用。

作业方位应选择垂直于云移动方向前端含水量大的负温区或逆云移动方向前端播云区。需要强调的是,火箭播云因其所携带的催化剂量大,成核率高,对大尺度云系作业,应选择扇形发射方式,即火箭枚与枚之间间隔 5° 发射;若不能做到,则应间隔 5 分钟发射,以规避局部过量催化,影响增雨效果。

固定工位作业还应关注云的作业部位与发射点之间的距离,必须考虑火箭能够到达目标云的作业部位,始可作业。此外,作业时还应根据高空的风速和风向来修正火箭的发射角。

3.4 作业火箭用量计算

WR-98 火箭所用催化剂在 $-7.5\sim -20^\circ\text{C}$ 的成核率为 $10^{15}/(\text{g}\cdot\text{AgI})$ 量级,由于云中过饱和度不均,其

成核率要减少一个量级,加之播撒时不能保证所有催化剂都播撒到 -7°C 以下的负温区,假设只有 30% 的活化率,故催化剂播撒的有效成核率 $n=0.3\times 10^{14}/(\text{g}\cdot\text{AgI})$,而每枚 WR-98 火箭携带的 AgI 含量 $m=10\text{g}$,则每枚 WR-98 火箭产生的有效人工晶核为 $10\text{g}\times 0.3\times 10^{14}/\text{g}=3\times 10^{14}$ 个人工晶核。按照催化作业火箭用量公式

$$Q=\frac{1.2VNq}{nm} \quad (6)$$

计算需用火箭枚数 Q 。式中 V 为播撒云的体积(m^3); N 为人工引晶浓度,一般取 $N=10^4/\text{m}^3$; q 为播撒云的绝热含水量(g/m^3)。因此,依据播撒云的体积 V 及其绝热含水量 q 可以求得 WR-98 火箭的用量如下

$$Q=\frac{1.2\times 10^4 Vq}{3\times 10^{14}}=4\times 10^{-11} Vq \quad (7)$$

4 火箭人工增雨效益评估问题

评估火箭人工增雨效益是一项重要而又复杂的工作,这里不可能详细讨论。假设自然降水量为 y_0 ,而人工增雨作业后的降水量为 y ,则人工增雨的效果可表示为

$$\text{绝对效果} \quad E=y-y_0 \quad (8)$$

$$\text{或 相对效果} \quad R=\frac{y-y_0}{y_0}\times 100\% \quad (9)$$

当然, y 和 y_0 是不可能同时测量的,这就给评估带来相当大的困难,因为现代科技水平对自然降水还无法作出准确的定量预测。因此,真正意义上的绝对效果评估在一个相当长的时期内是很难作出的。所谓天有不测风云,自然降水的时空变化实在是太大、太快,存在着极大的不稳定性 and 不确定性。但人工增雨的科学基础是毋庸置疑的,只要方法得当,肯定会产生显著效果。如前所述,火箭人工增雨是静力催化和动力催化的综合反映,这里仅依据静力催化理论,以播撒人工冰核来增加降水,换一种思路来探讨火箭增雨作业的效果和效益。

既然人工增加降水是以播撒人工冰核来实现的,我们即可按催化剂的成核能力来估算增加降水。如前所述,作业时选择的目标云含水量丰富,具有很大的增水潜力,则可认为人工引晶增加降水不会影响自然降水的总量,而且可将人工引晶引起的动力催化效果并入自然降水,这样可以偏保守地评估火箭作业增雨的效果和效益。

设单枚火箭有效成核率为 n , x 个冰核形成 1g 降水, 每吨降水价值 Y 元, 一枚火箭价值 R 元(含运输、管理、作业和设备折旧费), 则每枚火箭用于人工增雨的产出/投入比 r

$$r = \frac{nY}{xR \times 10^6} \quad (10)$$

假设火箭播云过程中, 每个有效冰核均能形成冰晶, 但冰晶在形成水滴过程中会发生碰并或蒸发, 因此可能 $2 \sim 3$ 个冰晶生成 1 滴水, 若每 $500 \sim 1000$ 滴水重 1g 。以 WR-98 火箭为例, 其有效成核率为 3×10^{14} , 这样我们就可以得到每枚 WR-98 火箭的降水量为

$$w = \frac{3 \times 10^{14}}{(2 \sim 3) \times (500 \sim 1000) \times 10^6} = (1.0 \sim 3.0) \times 10^5 (\text{t})$$

即每枚火箭增加降水 10 万吨 \sim 30 万吨。显然, 增水量与云中含水量有关。

设每吨水 0.5 元, 每枚火箭 2800 元, 由式(10)计算得到每枚火箭的产出/投入比为

$$r = \frac{(1.0 \sim 3.0) \times 10^5 \times 0.5}{2800} \approx 18 \sim 53$$

这一数字与目前的预测结果比较接近。如前所说, 这里没有考虑火箭增雨的动力催化效果, 如果把动力催化的效果计入, 则增雨效果和效益会大一些。

5 火箭播云对环境的影响问题

目前, 火箭播云采用的都是 BR-91-Y 焰剂, 通过燃烧方法播撒。焰剂的主要成分为高氯酸铵 (NH_4ClO_4)、酚醛树脂、碘化银 (AgI), 以及碘化钾 (KI)、铜盐等; 其中 NH_4ClO_4 是氧化剂, 酚醛树脂是粘合剂, AgI 用于产生冰核。焰剂燃烧产生一种多相气溶胶物质, 主要成分有 KCl , 以及 AgI 、 CuI 和 KI 等; 气体成分有 HCl 、 H_2O 、 CO_2 、 N_2 等。

就现有的焰剂燃烧生成物来看, 对环境的影响, 尤其是生态影响不大。柯朴(Cooper)和鸠利(Jolly), 以及克莱(Klein)都曾对 AgI 的化学络合物进行过生态效应检验, 他们的结论是: 播云使用的 AgI 对水生或陆生生物群落, 无论是当时还是很多年以后, 都没有作用, 或作用很小。

6 结束语

利用火箭进行人工增雨作业, 较之飞机作业受到的限制要少; 与高炮作业比较, 携带的催化剂量

大、成核率高、发射高度高、射程远, 且操作简便、易于流动作业、安全可靠。配合我国研制成功的小型机动天气雷达, 火箭人工增雨作业将更加便捷、高效。

随着我国科学技术的不断发展, 气象探测技术和播云技术也将进一步发展, 气象业务系统建设进一步加强, 我国的人工影响天气事业将会呈现更加美好的前景。

参考文献:

- [1] 李大山. 人工影响天气现状与展望 [M]. 北京: 气象出版社, 2002.
- [2] 陈光学. 火箭人工影响天气技术 [M]. 北京: 气象出版社, 2007.
- [3] 美国土木工程师协会. 播云增雨指南 [M]. 牟海省等译. 中国气象局科教司, 1997.
- [4] 洪延超. 云降水物理和人工影响天气研究进展和思考 [J]. 气候与环境研究, 2012, (6): 951-967.
- [5] 黄光明. 人工影响天气技术方法探讨 [J]. 中国西部科技, 2008, (30): 43-45.
- [6] 夏松亭. 现代人工影响天气的发展历史与启示 [J]. 山东气象, 2007, (3): 65-67.
- [7] 李淑日. 人工影响天气会不会污染环境 [J]. 中国减灾, 2012, (6): 48.
- [8] 潘庆湘. 人工影响天气简介 [J]. 山东气象, 1987, (2): 58-60.
- [9] 蔡杏尧. 火箭人工增雨效果评价系统的设计 [J]. 广东气象, 2010, (1): 51-53.
- [10] 游积平. 广东省人工增雨作业指挥系统的设计 [J]. 广东气象, 2006, (1): 61-63.
- [11] 苏春芹. WR 型增雨防雹火箭作业技术要点及效果 [J]. 广西气象, 2001, 22 (3): 49-50.
- [12] 杨立洪. 利用雷达资料量化人工增雨作业参数 [J]. 广东气象, 2009, (1): 55-56.
- [13] 薛斌. 增雨作业火箭可催化性分析 [J]. 广西气象, 2006, 27 (S3): 95-97.
- [14] 骆坚. 利用天气雷达指挥人工增雨作业一例 [J]. 广西气象, 2005, 26 (2): 185-187.
- [15] 吴兑. 关于人工增雨的一些国内外概况 [J]. 广东气象, 2005, (1): 29-33.
- [16] 何飞. 2012 年桂西北一次地面人工增雨作业天气条件的分析和捕捉 [J]. 气象研究与应用, 2013, 34 (1): 55-59.
- [17] 郭洪权. 一次利用雷达回波开展的人工防雹作业指挥分析 [J]. 气象研究与应用, 2010, 31 (1): 45-47.
- [18] 罗华明. 2011 年大运会开、闭幕式人工消雨服务保障 [J]. 广东气象, 2010, (3): 39-41.