

增雨防雹火箭弹催化剂播撒技术的对比研究

王文韬¹ 贾烁¹ 王大旺² 刘永德³

(1 中国华云气象科技集团公司, 北京 100081; 2 中国气象局上海物资管理处, 上海 200050;

3 北方特种能源集团西安庆华公司, 西安 710025)

摘要: 介绍了HY-1A型增雨防雹火箭弹较传统型增雨防雹火箭弹在催化剂播撒技术方面所做的技术创新, 增雨防雹火箭弹催化剂由原来的线性播撒方式改进为体播撒。将线性播撒和体播撒的催化剂扩散分别近似为线源扩散和瞬时点源扩散, 基于解析解计算公式近似估算两种播撒方式的催化剂扩散有效区域半径, 进而估算有效区域体积。对比发现, 给定浓度阈值时, 体播撒的催化剂扩散有效区域体积为线性播撒的3.6~7.2倍, 且体播撒的催化剂扩散有效区域持续时间较线性播撒持续时间更长。线性播撒和体播撒方式的火箭弹有不同适用对象, 后续可进一步改进优化催化剂播撒技术。

关键词: 催化剂播撒技术, 线性播撒, 体播撒, 催化剂扩散有效区域

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2018.06.011

Comparative Study in Catalyst Seeding Technology of Rocket for Rain Enhancement or Hail Suppression

Wang Wentao¹, Jia Shuo¹, Wang Dawang², Liu Yongde³

(1 China Huayun Meteorological Technology Group Corporation, Beijing 100081

2 Shanghai Supply and Delivery Division of China Meteorological Administration, Shanghai 200050

3 The Northern Special Energy Group Corporation Xian Qinghua Company, Xi'an 710025)

Abstract: This paper discusses the HY-1A rocket, an innovation in catalyst seeding technology. We compare the HY-1A rocket with traditional rockets which are used for rain enhancement or hail suppression. With the HY-1A rocket, the linear seeding mode of the catalyst is replaced by a spatial seeding mode. The diffusion of the catalyst which is released using the linear seeding mode and spatial seeding mode were approximated as linear source diffusion and instantaneous point source diffusion, from the HY-1A and traditional rockets, respectively. Based on the analytical solution formula of the two diffusion modes, the radius of effective region by catalyst diffusion and the volume of the effective region resulting from the two kinds of seeding modes were estimated. When comparing a given threshold of concentration, the volume of the effective region as a result of the catalyst diffusion by spatial seeding was 3.6-7.2 times greater, and the effective region from spatial seeding was larger for longer, than from linear seeding. A rocket with linear seeding mode or spatial seeding mode could apply different seeding objects, and subsequently we could improve and optimize rocket seeding techniques.

Keywords: seeding technology of catalyst, linear seeding, spatial seeding, effective region by catalyst diffusion

0 引言

人工影响天气(以下简称“人影”)作业是指在有利的天气条件下,利用飞机、火箭、高炮和焰炉等作业工具将一定剂量的云凝结核、冰核、制冷剂等催化剂送入云中,改变云的宏微观结构,从而达到增加降水或消雹减灾的目的^[1-3]。在强大的作业需求下,我国人影规模已跃居世界第一。

增雨防雹火箭弹,是指通过火箭发射装置将催

剂播撒到云中,通过催化剂的作用使雹云、降水云的微物理结构产生变化而达到增雨防雹的一种民用火箭弹^[4]。目前,我国增雨防雹火箭弹主要用于冷云催化作业,所含催化剂为AgI人工冰核。如何在合适的时机将适量的催化剂送入云体合适的部位成为增雨防雹火箭弹播撒技术的关键^[5]。产生降水的层状云(积层混合云)适宜的冰晶浓度为20~100个/L^[6],通常认为,在静力催化条件下,增雨作业催化剂用量为向作业云中引入 $10^4 \sim 10^5$ 个/m³冰核^[7]。若冰核数浓度小于这个数值,则不能充分利用云中过冷水,催化效率较低,若冰核数浓度大于这个数值,则会带来反效果,抑制降水的产生。当前人影业务作业中,增雨防雹作

收稿日期: 2018年6月1日; 修回日期: 2018年10月18日
第一作者: 王文韬(1986—), E-mail: 386766300@qq.com
通信作者: 贾烁(1991—), E-mail: jia91shuo@163.com

业的催化剂用量导致冰核数浓度普遍小于这一数值，但有研究给出催化播撒初期小范围内冰核数浓度又远超这个数值。

在一定的背景环境场下，改进播撒作业方式充分地利用云中过冷水，可以提高降水效率。本文提出新型增雨防雹火箭弹在催化剂播撒方式方面的创新，将传统线性播撒火箭弹与新型播撒的火箭弹在播撒后一定时长的有效催化影响区域进行对比分析和讨论，为增雨防雹火箭弹更好地应用于不同类型的催化云体提高作业效率提供一定的理论依据。

1 增雨防雹火箭弹催化剂播撒技术发展现状与创新

1.1 传统增雨防雹火箭弹播撒技术

常用的增雨防雹火箭弹主要有WR-98型、BL-1A型和RYI-6300型等。火箭弹通常由四部分组成，即发动机、播撒舱、伞舱（或自毁装置）和尾翼^[8]。火箭弹播撒催化剂的过程一般为：接收点火信号，在推进剂的作用下，火箭弹升空，焰剂延期点火具在预定时间后点燃催化剂，沿着火箭飞行轨迹播撒AgI气溶胶，为目标云提供适量的人工冰核，从而达到增雨、消雹的效果。

火箭弹中催化剂的起始播撒时间和催化剂燃烧持续播撒时间固定，通过控制火箭架发射仰角调节火箭弹到达的高度和催化剂开始播撒的高度。目前常用火箭弹的播撒时间为15~30 s，最大射高在6~8 km，携带含AgI催化剂180~720 g/枚，催化剂成核率量级为 10^{11} 个/g^[9]。

传统增雨防雹火箭弹，催化剂在火箭箭体内部燃烧，沿火箭飞行轨迹方向播撒催化剂，播撒后在空中形成一条长长的线状AgI气溶胶带，这种播撒方式称为线性播撒（图1a）。

1.2 HY-1A型增雨防雹火箭弹播撒技术

不同于传统火箭弹的催化剂线性播撒方式，HY-1A型增雨防雹火箭弹催化剂采用体播撒，其载荷舱（播撒器）总共携带48个催化剂子弹，沿火箭轴向列成8排，每排6个。当火箭弹在推进剂作用下升至一定高度（可人为设定）后，播撒器沿垂直于弹体方向发射第一排催化剂子弹，子弹以不低于40 m/s的速度离开舱体，分离的同时子弹中的催化剂被点燃，燃烧所产生的高温使催化剂中的AgI等晶体升华为AgI气溶胶，播撒时间为6~9 s。播撒器在第一排子弹发射后2.7 s，开始发射第二排子弹，第二排子弹以同样的方式燃烧播撒人工冰核，如此重复进行直到第八排子弹燃烧结束，从而完成催化剂播撒。

每个子弹携带含AgI高效催化剂6.2 g（成核率为 7.554×10^{12} 个/g），子弹飞行燃烧经过的空间就会形成1个AgI气溶胶带，每一排子弹就会在空中形成6个AgI气溶胶带，6个AgI气溶胶带在空中经过湍流扩散将形成一个范围更大的区域。催化剂子弹在垂直飞离火箭弹的同时，仍保持原火箭弹弹道的飞行惯性，在这个惯性作用下，子弹燃烧产生的AgI气溶胶同样会继续沿火箭弹弹道向前飞行一段距离。

HY-1A型增雨防雹火箭弹是沿垂直于弹道方向发射装有催化剂的子弹，子弹飞行过程中播撒催化剂，每排子弹在空间形成6条线状AgI气溶胶带，将这种播撒方式称为立体播撒，简称体播撒（图1）。

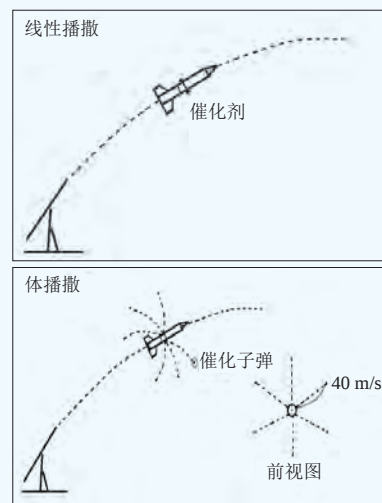


图1 线性播撒与体播撒对比示意图

Fig. 1 A comparison of linear seeding mode and spatial seeding mode

2 不同播撒方式催化剂扩散的对比分析

申亿铭^[10]基于湍流的梯度输送理论，提出了层状云及对流云中线性源催化剂扩散的理论模式^[11]和点源催化剂扩散的理论模式^[12-13]。

周毓荃等^[14]给出了线源扩散计算的解析解，设播撒线同y轴一致且无穷长，则线源的解析解为

$$q(x, y, z, t) = \frac{Q}{4\sqrt{\pi^2 k_H k_V t^2}} \cdot e^{-\frac{[x-x_0-u(t-t_0)]^2}{4k_H(t-t_0)}} \cdot e^{-\frac{[z-z_0-w(t-t_0)]^2}{4k_V(t-t_0)}}, \quad (1)$$

式中， Q 为单位长度上的催化剂量（单位：个/m），即源强； q 为催化剂浓度（单位：个/m³）； u ， w 分别为 x ， z 轴上的分风速； k_H ， k_V 分别为水平湍流交换系数和垂直湍流交换系数（单位：m²/s）。

带有催化剂的高炮弹，发射到云中爆炸后，催化剂被迅速分散到一个较小的球形空间（ dx ， dy ， dz ）范围内，在湍流作用下不断向四周扩散，视作瞬时点源。设在初始时刻 $t=t_0$ 时， x_0 ， y_0 ， z_0 处播撒初始

总量 Q （源强，冰核，单位：个），给定初始条件和边界条件，瞬时点源的数值解析解^[14]为

$$q(x, y, z, t) = \frac{Q}{8 \cdot \sqrt{\pi^3 k_H^2 k_V (t-t_0)^3}} \cdot e^{-\frac{[x-x_0-u(t-t_0)]^2}{4k_H(t-t_0)}} \cdot e^{-\frac{[y-y_0-v(t-t_0)]^2}{4k_H(t-t_0)}} \cdot e^{-\frac{[z-z_0-w(t-t_0)]^2}{4k_V(t-t_0)}}, \quad (2)$$

式中， Q 为源强（单位：个）； q 为催化剂浓度（单位：个/ m^3 ）； u, v, w 分别为 x, y, z 轴上的分风速； k_H, k_V 分别为水平湍流交换系数和垂直湍流交换系数（单位： m^2/s ）。

2.1 线性播撒催化剂扩散有效区域

2.1.1 线性播撒催化剂扩散有效区域半径

采用线性播撒的火箭弹播撒的催化剂构成一条直线，如果不考虑播撒时间的差别，可视作瞬时线源^[10]。

对前述线源扩散计算的解析解公式（1）进行变换，假设催化云层为静风（ $u=0, w=0$ ），已知线源源强 Q ，给定催化剂浓度阈值 q ，选择合适的水平湍流交换系数 k_H 和垂直湍流交换系数 k_V ，可以得到催化作业后 t 时间的水平扩散宽度（ $x-x_0$ ）和垂直扩散宽度（ $z-z_0$ ）构成的椭圆方程

$$(x-x_0)^2 + (k_H/k_V)(z-z_0)^2 = 4k_H(t-t_0) \cdot \ln \frac{Q}{q \cdot 4\pi \cdot t \cdot \sqrt{k_H k_V}}. \quad (3)$$

首先估算线源源强 Q ，传统增雨防雹火箭弹催化剂含量取720 g，成核率为 10^{11} 个/g，火箭弹播撒催化剂时的平均速度取200 m/s，播撒时长取30 s，求得线源源强 1.2×10^{10} 个/m。

考虑层状云、积云和积层混合云等不同情况，水平湍流交换系数和垂直湍流交换系数分为70和35 m^2/s 、140和70 m^2/s 两种情况，这里假设水平扩散范围（ x 轴方向）和垂直扩散范围（ z 轴方向）近似相等，即水平湍流交换系数和垂直湍流交换系数相等，分别考虑：1）水平湍流交换系数和垂直湍流交换系数均为35 m^2/s ；2）水平湍流交换系数和垂直湍流交换系数均为70 m^2/s 的情况。这样，式（3）可进一步简化，推出线性播撒催化剂扩散有效区域半径（ $r_{\text{线}}$ ）近似为

$$r_{\text{线}} = \sqrt{2k_H(t-t_0) \cdot \ln \frac{Q}{q \cdot 4\pi \cdot t \cdot k_H}}. \quad (4)$$

分别考虑催化剂浓度阈值 q 个取 10^4 和 10^3 个/ m^3 的催化剂扩散有效区域，估算一段时间（10，30，60，90，120 min等）后的催化剂扩散有效区域半径。

1）当水平湍流交换系数和垂直湍流交换系数均

为35 m^2/s 时，将源强（ $Q=1.2 \times 10^{10}$ 个/m）、扩散时长（ $t=600, 1200, 1800, 2400$ s）、湍流交换系数（ $k_H=35$ m^2/s ）及催化剂浓度阈值（ $q=10^4$ 个/ m^3 ）代入公式（4）求得不同时间后的催化剂扩散有效区域半径（表1）。

表1 线性播撒时不同浓度阈值对应的催化剂扩散有效区域半径随时间的变化

Table 1 The radius of linear seeding effective diffusion region corresponding to different concentration thresholds and their changes with time

时间/s	催化剂扩散有效区域半径/m ($q=10^4$ 个/ m^3)	催化剂扩散有效区域半径/m ($q=10^3$ 个/ m^3)
600	252.253	400.4250
1200	262.7523	512.3045
1800	229.0623	585.3164
2400	147.0673	639.1112
3000		680.9690
3600		714.5050
5400		782.6304
7200		819.5662
9000		836.0804
10800		837.2583

2）当水平湍流交换系数和垂直湍流交换系数均为70 m^2/s 时，将源强（ $Q=1.2 \times 10^{10}$ 个/m）、扩散时长（ $t=600, 1200$ s）、湍流交换系数（ $k_H=70$ m^2/s ）及催化剂浓度阈值（ $q=10^4$ 个/ m^3 ）代入公式（4）求得不同时间后的催化剂扩散有效区域半径（表1）。

3）当水平湍流交换系数和垂直湍流交换系数均为35 m^2/s 时，将源强（ $Q=1.2 \times 10^{10}$ 个/m）、扩散时长（ $t=600, 1200, 1800, 2400, 3000, 3600, 5400, 7200, 9000, 10800$ s）、湍流交换系数（ $k_H=35$ m^2/s ）及催化剂浓度阈值（ $q=10^3$ 个/ m^3 ）代入公式（4）求得不同时间后的催化剂扩散有效区域半径（表1）。

4）当水平湍流交换系数和垂直湍流交换系数均为70 m^2/s 时，将源强（ $Q=1.2 \times 10^{10}$ 个/m）、扩散时长（ $t=600, 1200, 1800, 2400, 3000, 3600, 5400, 7200, 9000, 10800$ s）、湍流交换系数（ $k_H=70$ m^2/s ）及催化剂浓度阈值（ $q=10^3$ 个/ m^3 ）代入公式（4）求得不同时间后的催化剂扩散有效区域半径（表1）。

分析上述计算结果，得到：1）催化剂浓度阈值 q 取 10^4 个/ m^3 ，当湍流交换系数为35 m^2/s 时，催化剂扩散20 min时有效区域半径最大，为262.7523 m，扩散50 min后浓度阈值 $q < 10^4$ 个/ m^3 ；当湍流交换系数为70 m^2/s 时，催化剂扩散10 min时有效区域半径最

大, 同样为262.7523 m, 扩散30 min后浓度阈值 $q < 10^4$ 个/ m^3 ; 2) 催化剂浓度阈值 q 取 10^3 个/ m^3 , 当湍流交换系数为 $35 \text{ m}^2/\text{s}$ 时, 催化剂扩散160 min时有效区域半径最大, 为838.0111 m (表中未列出), 之后达到浓度阈值的有效区域半径逐渐减小, 扩散460 min后浓度阈值 $q < 10^3$ 个/ m^3 ; 当湍流交换系数为 $70 \text{ m}^2/\text{s}$ 时, 催化剂扩散80 min时有效区域半径最大, 同样为838.0111 m (表中未列出), 之后达到浓度阈值的有效区域半径同样逐渐减小, 扩散230 min后浓度阈值 $q < 10^3$ 个/ m^3 。

综上, 给定线源源强时, 选定浓度阈值的催化剂扩散有效区域最大半径是定值; 湍流交换系数越大, 给定浓度阈值的有效区域半径更快达到最大, 之后达到浓度阈值的有效区域半径逐渐减小; 湍流交换系数越大, 给定浓度阈值的有效区域持续时间越短。

2.1.2 线性播撒催化剂扩散有效区域体积

线性播撒催化剂时, 催化剂沿火箭弹弹道方向播撒, 为便于计算, 将催化剂的分布空间按一个圆柱体进行分析, 则催化剂的扩散体积 V 计算公式如下:

$$V_{\text{线}} = \pi \times r_{\text{线}}^2 \times v_{\text{弹}} \times t_{\text{线}}, \quad (5)$$

式中, $V_{\text{线}}$ 为线性播撒催化剂扩散体积 (单位: m^3); $r_{\text{线}}$ 为线性播撒催化剂扩散半径, 这里考虑静风条件下基于湍流扩散求得的AgI气溶胶扩散半径 (单位: m); $v_{\text{弹}}$ 为火箭弹播撒催化剂时的飞行速度 (单位: m/s), 正常情况下火箭弹在播撒时, 已经转入被动段飞行, 飞行速度为一个缓慢变化的变量, 为方便计算此处取火箭弹播撒过程中的平均飞行速度; $t_{\text{线}}$ 为线性播撒催化剂的持续时间 (单位: s)。

根据前面取不同催化剂浓度阈值时计算的线性播撒催化剂扩散有效区域半径, 分别取 $q = 10^4$ 个/ m^3 和 $q = 10^3$ 个/ m^3 浓度阈值下的催化剂扩散有效区域最大半径, 即 $r_{\text{max}} = 262.7523 \text{ m}$ 和 $r_{\text{max}} = 838.0111 \text{ m}$ 。

利用公式 (5), $v_{\text{弹}}$ 取 200 m/s , $t_{\text{线}}$ 为 30 s , 将上述求得的浓度阈值下的催化剂扩散有效区域最大半径分别代入, 求得催化剂浓度阈值为 $q = 10^4$ 个/ m^3 时, 每枚线性播撒火箭弹的扩散有效区域体积最大为 $1.3 \times 10^9 \text{ m}^3$; 催化剂浓度阈值为 $q = 10^3$ 个/ m^3 时, 每枚线性播撒火箭弹的扩散有效区域体积最大为 $1.32 \times 10^{10} \text{ m}^3$ 。

2.2 体播撒催化剂扩散有效区域

2.2.1 体播撒单排子弹燃烧播撒近似

HY-1A型增雨防雹火箭弹采用体播撒, 每枚火箭弹向四周发射8次圆周排列的8排子弹, 每次发射一排共6个含AgI催化剂的子弹, 每个子弹沿垂直于弹道方向飞行, 在火箭弹飞行速度、子弹发射初速、重力和风阻的共同影响下, 单个子弹形成的通道比较复杂。

为简化计算, 只考虑子弹发射初速度和重力的影响, 单排6个子弹形成的截面近似为6个子弹沿弹道垂直方向最远距离或终点所构成, 形状如图2所示。

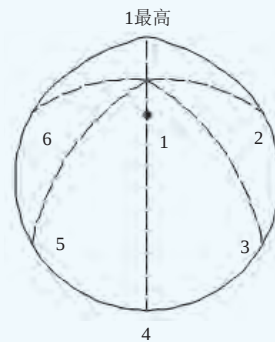


图2 单排子弹播撒截面轮廓

Fig. 2 Seeding cross section profile of single-row bullets

单个子弹的飞行距离

$$l = v_{\text{子}} \times t_{\text{子}} + 1/2 \times g \times t_{\text{子}}^2, \quad (6)$$

式中, l 为子弹飞行距离 (单位: m); $v_{\text{子}}$ 为子弹发射初速 (单位: m/s); $t_{\text{子}}$ 为子弹燃烧时间 (单位: s); g 为重力加速度常量 (单位: m/s^2); 当 $v_{\text{子}} \times t_{\text{子}}$ 与 $1/2 \times g \times t_{\text{子}}^2$ 方向一致时, g 取正值, 反之取负值。

将 $v_{\text{子}} = 40 \text{ m/s}$, $t_{\text{子}} = 6 \text{ s}$, $g = 9.8 \text{ m/s}^2$ 代入 (6) 式中得到以下数值: $l_1 = 80 \text{ m}$ (最高点距离), $l_{2, 6} = 216 \text{ m}$, $l_{3, 5} = 365 \text{ m}$, $l_4 = 420 \text{ m}$ 。

2.2.2 体播撒催化剂扩散有效区域半径

HY-1A型增雨防雹火箭弹每次发射每排6个子弹, 每个子弹播撒催化剂的时间为 6 s , 每排6个子弹播撒催化剂的路径长度在 $80 \sim 420 \text{ m}$ 之间, 可将每个子弹播撒催化剂的过程近似为线源。但同火箭弹线性播撒催化剂的路径相比较短, 且主要考虑每个子弹射出并播撒的催化剂在垂直于火箭弹方向的扩散, 所以将每个子弹播撒的催化剂视作瞬时点源。

将前述给定初始条件和边界条件的瞬时点源的数值解析解 (2) 式进行变换, 假设催化云层为静风 ($u=0$, $w=0$), 已知点源源强 Q , 给定催化剂浓度阈值 q , 选择合适的水平湍流交换系数 k_H 和垂直湍流交换系数 k_V , 可以得到催化作业后 t 时间的水平扩散宽度 ($x-x_0$)、($y-y_0$) 和垂直扩散宽度 ($z-z_0$) 构成的椭球体方程

$$(x-x_0)^2 + (y-y_0)^2 + (k_H/k_V)(z-z_0)^2 = 4k_H(t-t_0) \cdot \ln \frac{Q}{q \cdot 8\sqrt{\pi^3 k_H^2 k_V}(t-t_0)^3} \quad (7)$$

首先估算点源源强 Q , HY-1A型增雨防雹火箭弹每个子弹含 6.2 g 高效催化剂, 成核率为 7.554×10^{12} 个/g, 所以源强 $Q = 4.68 \times 10^{13}$ 个。假设每个子弹点源的

位置在各自子弹播撒路径的中点处，除视作点源的每个子弹的初始位置不同，其余参数均一致。

考虑层状云、积云和积层混合云等不同情况，水平湍流交换系数和垂直湍流交换系数分为70和35 m²/s，140和70 m²/s两种情况，这里假设水平扩散范围（x轴、y轴方向）和垂直扩散范围（z轴方向）近似相等，即水平湍流交换系数和垂直湍流交换系数相等，分别考虑：1）水平湍流交换系数和垂直湍流交换系数均为35 m²/s；2）水平湍流交换系数和垂直湍流交换系数均为70 m²/s的情况。这样，式（7）可进一步简化，推出体播撒催化剂扩散有效区域半径（ $r_{\text{体}}$ ）近似为

$$r_{\text{体}} = \sqrt{\frac{4k_{\text{H}}(t-t_0)}{3} \cdot \ln \frac{Q}{q \cdot 8 \sqrt{\pi^3 k_{\text{H}}^3 (t-t_0)^3}}} \quad (8)$$

分别考虑催化剂浓度阈值 q 取 10^4 和 10^3 个/m³的催化剂扩散有效区域，估算一段时间（10，30，60，90，120 min等）后的催化剂扩散有效区域半径。

1）当水平湍流交换系数和垂直湍流交换系数均为35 m²/s时，将源强（ $Q=4.68 \times 10^{13}$ 个/m）、扩散时长（ $t=600, 1200, 1800, 2400, 3000, 3600, 5400$ s）、湍流交换系数（ $k_{\text{H}}=35$ m²/s）及催化剂浓度阈值（ $q=10^4$ 个/m³）代入公式（8）求得不同时间后的催化剂扩散有效区域半径（表2）。

2）当水平湍流交换系数和垂直湍流交换系数均为70 m²/s时，将源强（ $Q=4.68 \times 10^{13}$ 个/m）、扩散时长（ $t=600, 1200, 1800, 2400, 3000$ s）、湍流交换系数（ $k_{\text{H}}=70$ m²/s）及催化剂浓度阈值（ $q=10^4$ 个/m³）代入公式（8）求得不同时间后的催化剂扩散有效区域半径（表2）。

3）当水平湍流交换系数和垂直湍流交换系数均为35 m²/s时，将源强（ $Q=4.68 \times 10^{13}$ 个/m）、扩散时长（ $t=600, 1200, 1800, 2400, 3000, 3600, 5400, 7200, 9000, 10800$ s）、湍流交换系数（ $k_{\text{H}}=35$ m²/s）及催化剂浓度阈值（ $q=10^3$ 个/m³）代入公式（8）求得不同时间后的催化剂扩散有效区域半径（表2）。

4）当水平湍流交换系数和垂直湍流交换系数均为70 m²/s时，将源强（ $Q=4.68 \times 10^{13}$ 个）、扩散时长（ $t=600, 1200, 1800, 2400, 3000, 3600, 5400, 7200, 9000, 10800$ s）、湍流交换系数（ $k_{\text{H}}=70$ m²/s）及催化剂浓度阈值（ $q=10^3$ 个/m³）代入公式（8）求得不同时间后的催化剂扩散有效区域半径（表2）。

分析上述计算结果，得到：1）催化剂浓度阈值 q

表2 体播撒时不同浓度阈值对应的催化剂扩散有效区域半径随时间的变化

Table 2 The radius of spatial seeding effective diffusion region corresponding to different concentration thresholds and their changes with time

时间/s	催化剂扩散有效区域半径/m ($q=10^4$ 个/m ³)		催化剂扩散有效区域半径/m ($q=10^3$ 个/m ³)	
	$k_{\text{H}}=k_{\text{V}}=35$ m ² /s	$k_{\text{H}}=k_{\text{V}}=70$ m ² /s	$k_{\text{H}}=k_{\text{V}}=35$ m ² /s	$k_{\text{H}}=k_{\text{V}}=70$ m ² /s
600	314.9720	374.4200	404.5735	518.7823
1200	374.4200	404.8850	518.7823	649.4778
1800	398.9948	379.1050	593.8131	728.3920
2400	404.8850	308.1661	649.4778	781.5020
3000	397.5610	158.0748	693.1209	818.3590
3600	379.1051		728.3920	843.6609
5400	249.6300		801.6025	872.4184
7200			843.6609	851.3724
9000			865.5196	790.4954
10800			872.4184	688.6140

取 10^4 个/m³，当湍流交换系数为35 m²/s时，催化剂扩散40 min时有效区域半径最大，为404.8850 m，扩散110 min后浓度阈值 $q<10^4$ 个/m³；当扩散系数为70 m²/s时，催化剂扩散20 min时有效区域半径最大，同样为404.8850 m，扩散60 min后浓度阈值 $q<10^4$ 个/m³；2）催化剂浓度阈值 q 取 10^3 个/m³，当湍流交换系数为35 m²/s时，催化剂扩散180 min时有效区域半径最大，为872.4184 m，之后达到浓度阈值的有效区域半径逐渐减小，扩散500 min后浓度阈值 $q<10^3$ 个/m³；当湍流交换系数为70 m²/s时，催化剂扩散90 min时有效区域半径最大，同样为872.4184 m，之后达到浓度阈值的有效区域半径同样逐渐减小，扩散310 min后浓度阈值 $q<10^3$ 个/m³。

综上，给定点源源强时，选定浓度阈值的催化剂扩散有效区域最大半径是定值；湍流交换系数越大，给定浓度阈值的有效区域半径更快达到最大，之后达到浓度阈值的有效区域半径逐渐减小；湍流交换系数越大，给定浓度阈值的有效区域持续时间越短。

2.2.3 体播撒催化剂扩散有效区域体积

前面已经分别计算出6个子弹燃烧播撒催化剂的长度分别为以下4种情况： $l_1=80$ m（最高点距离）， $l_{2,6}=216$ m， $l_{3,5}=365$ m， $l_4=420$ m。考虑每个子弹射出并播撒的催化剂在垂直于火箭弹方向的扩散，所以将每排射出的6个子弹燃烧播撒催化剂视作瞬时点源。前一部分利用解析解计算公式计算出每个子弹点源源强，选定浓度阈值（ $q=10^4$ 个/m³和 $q=10^3$ 个/m³）的催化剂扩散有效区域最大半径分别为404.8850和872.4184 m。

不同于看作线源播撒的火箭弹催化剂扩散有效

区域的估算,将每个子弹播撒催化剂视作位于播撒路径中点的瞬时点源,其催化剂扩散有效区域近似为球体,单排6个子弹催化扩散有效区域必然有重叠。所以考虑每个子弹点源的位置及给定浓度阈值的催化剂扩散有效区域最大半径,估算单排6个子弹催化剂扩散有效区域的最大球体半径。

1) 催化剂浓度阈值为 $q=10^4$ 个/ m^3 时,扩散有效区域最大半径为404.8850 m,四种子弹燃烧播撒路径 $l_1=80$ m(最高点距离), $l_{2,6}=216$ m, $l_{3,5}=365$ m, $l_4=420$ m,考虑 $l_1=80$ m(最高点距离)和 $l_4=420$ m近似求出子弹射出播撒截面半径为250 m,再加上扩散有效区域最大半径,所以单排6个子弹形成的扩散有效区域最大球体半径约为654.8850 m。

2) 催化剂浓度阈值为 $q=10^3$ 个/ m^3 时,扩散有效区域最大半径为872.4184 m,四种子弹燃烧播撒路径 $l_1=80$ m(最高点距离), $l_{2,6}=216$ m, $l_{3,5}=365$ m, $l_4=420$ m,考虑 $l_1=80$ m(最高点距离)和 $l_4=420$ m,近似求出子弹射出播撒截面半径为250 m,再加上扩散有效区域最大半径,所以单排6个子弹形成的扩散有效区域最大球体半径约为1122.4184 m。

体播撒时,单排6个子弹播撒催化剂的最大扩散有效体积计算公式为

$$V_{\text{体}}=4\pi/3 \times r_{\text{体}}^3 \quad (9)$$

将不同浓度阈值下的扩散有效区域最大球体半径代入(式9),分别求得最大扩散体积: $q=10^4$ 个/ m^3 时, $V_{\text{体}}=1.1759 \times 10^9 m^3$; $q=10^3$ 个/ m^3 时, $V_{\text{体}}=5.9202 \times 10^9 m^3$ 。

每枚火箭共发射8排子弹,每排子弹射出燃烧播撒催化剂6 s,之后间隔2.7 s发射下一排子弹,直至全部发射播撒完毕。同线性播撒火箭弹,飞行速度取200 m/s,每排子弹的燃烧播撒时间为6 s,与上面估算的单排子弹形成的扩散有效区域最大球体半径进行比较,每排子弹形成的催化剂扩散有效区域互相没有重叠,所以可认为每枚体播撒火箭弹的扩散有效区域体积为8倍的 $V_{\text{体}}$,即 $q=10^4$ 个/ m^3 时, $8V_{\text{体}}=9.4071 \times 10^9 m^3$; $q=10^3$ 个/ m^3 时, $8V_{\text{体}}=4.7361 \times 10^{10} m^3$ 。

2.3 线性播撒和体播撒催化剂扩散有效区域对比

线源源强一定,选定浓度阈值的催化剂扩散有效区域最大半径是定值。将线性播撒催化剂扩散有效区域近似为圆柱体,利用线源解析解公式估算出一定浓度阈值的扩散有效区域最大半径后,代入线性播撒扩散体积计算公式,求得催化剂浓度阈值 $q=10^4$ 个/ m^3 时,每枚线性播撒火箭弹的扩散有效区域体积最大为 $1.3 \times 10^9 m^3$;催化剂浓度阈值 $q=10^3$ 个/ m^3 时,每枚线性播撒火箭弹的扩散有效区域体积最大为 $1.32 \times 10^{10} m^3$ 。

点源源强一定,选定浓度阈值的催化剂扩散有效区域最大半径是定值。将体播撒中每个子弹播撒催化剂近似为瞬时点源,利用瞬时点源的解析解公式估算出一定浓度阈值的扩散有效区域最大半径,然后将每排子弹播撒催化剂形成的扩散有效区域近似为球体,推出其扩散有效区域的最大球体半径:当 $q=10^4$ 个/ m^3 时,扩散有效区域最大球体半径约为654.8850 m;当 $q=10^3$ 个/ m^3 时,扩散有效区域最大球体半径约为1122.4184 m。每排子弹形成的催化剂扩散有效区域互相没有重叠,所以可认为每枚体播撒火箭弹的扩散有效区域体积为8倍的 $V_{\text{体}}$,即 $q=10^4$ 个/ m^3 时, $8V_{\text{体}}=9.4071 \times 10^9 m^3$; $q=10^3$ 个/ m^3 时, $8V_{\text{体}}=4.7361 \times 10^{10} m^3$ 。

同线性播撒线源源强相比,体播撒中每个子弹播撒催化剂形成的点源源强相对较大,同样的催化剂浓度阈值时,体播撒的扩散有效区域最大半径较大。取同样的催化剂浓度阈值 $q=10^4$ 个/ m^3 ,每枚线性播撒火箭弹的扩散有效区域最大体积为 $1.3 \times 10^9 m^3$,每枚体播撒火箭弹的扩散有效区域最大体积为 $9.4071 \times 10^9 m^3$,体播撒的扩散有效区域体积约为线性播撒的7.2倍;取催化剂浓度阈值 $q=10^3$ 个/ m^3 ,每枚线性播撒火箭弹的扩散有效区域最大体积为 $1.32 \times 10^{10} m^3$,每枚体播撒火箭弹的扩散有效区域最大体积为 $4.7361 \times 10^{10} m^3$,体播撒的扩散有效区域体积约为线性播撒的3.6倍。

2.4 线性播撒和体播撒催化剂扩散有效区域持续时间对比

两种播撒方式对应线源和点源催化剂扩散,分析不同浓度阈值对应的催化剂扩散有效区域半径随时间的变化(表3)。源强一定时,湍流交换系数越大,给定浓度阈值的有效区域半径更快达到最大,之后达到浓度阈值的有效区域半径逐渐减小,所以给定浓度阈值的有效区域持续时间越短。

湍流交换系数一定(取 $35 m^2/s$),取催化剂浓度阈值 $q=10^4$ 个/ m^3 时,线性播撒的线源源强较小,扩散50 min后催化剂浓度阈值 $q<10^4$ 个/ m^3 ;体播撒的点源源强较大,扩散110 min后催化剂浓度阈值 $q<10^4$ 个/ m^3 。取催化剂浓度阈值 $q=10^3$ 个/ m^3 时,线性播撒的线源源强较小,扩散460 min后催化剂浓度阈值 $q<10^3$ 个/ m^3 ;体播撒的点源源强较大,扩散500 min后催化剂浓度阈值 $q<10^3$ 个/ m^3 。综上分析,湍流交换系数一定,体播撒的点源源强比线性播撒的线源源强更大,给定浓度阈值的扩散有效区域持续时间也更长。

2.5 讨论

通过上述分析总结, HY-1A型火箭弹的催化剂成核率高于传统火箭弹,所以取较大的催化剂浓度阈

表3 不同播撒方式给定浓度阈值的催化剂扩散有效区域的持续时间

Table 3 The duration of effective diffusion region corresponding to different concentration thresholds resulting from different seeding modes

		线性播撒		体播撒	
		达到扩散有效区域最大半径的时间/min	扩散有效区域持续时间/min	达到扩散有效区域最大半径的时间/min	扩散有效区域持续时间/min
$q=10^4$ 个/ m^3	$k_H=k_V=35$ m ² /s	20	50	40	110
	$k_H=k_V=70$ m ² /s	10	30	20	60
$q=10^3$ 个/ m^3	$k_H=k_V=35$ m ² /s	160	460	180	500
	$k_H=k_V=70$ m ² /s	80	230	90	310

值 ($q=10^4$ 个/ m^3) 时, 由于传统火箭弹线性播撒的源强较小, 所以与HY-1A型火箭弹体播撒的点源相比扩散有效区域半径较小; 若取较小的催化剂浓度阈值 ($q=10^3$ 个/ m^3) 时, 经过较长时间的扩散, 线性播撒的扩散有效区域半径同体播撒的点源相差不大。

线性播撒的传统火箭弹播撒路径较长, 催化剂扩散主要依靠垂直湍流交换系数形成有一定垂直高度的线状播撒区域, 上述估算过程假设水平湍流交换系数和垂直湍流交换系数相等, 估算的扩散有效区域半径偏大。若提高线性播撒的催化剂成核率, 则利用线源解析估算出扩散有效区域最大半径可达到体播撒点源扩散同样的大小, 但可能会导致刚开始扩散时催化剂浓度值偏大, 这可能会对催化剂发挥作用起到反效果。

体播撒方式的HY-1A型火箭弹, 每个子弹射出 (射向不同方向) 时燃烧播撒催化剂, 类似立体播撒。考虑子弹射出播撒催化剂的长度有限, 近似为瞬时点源, 估算扩散有效区域体积时将其近似为球体, 每排子弹扩散一段时间后的扩散有效区域会重叠, 扩散有效区域实际持续时间会更长。

3 结论

1) 不管线源还是瞬时点源, 源强一定, 选定浓度阈值的催化剂扩散有效区域最大半径是定值; 湍流交换系数越大, 给定浓度阈值的有效区域半径更快达到最大, 之后达到浓度阈值的有效区域半径逐渐减小; 湍流交换系数越大, 给定浓度阈值的有效区域持续时间越短。

2) 传统火箭弹线性播撒, 其源强与HY-1A型火箭弹体播撒的源强相比较小, 体播撒中每个子弹播撒催化剂形成的点源源强相对较大, 所以给定催化剂浓度阈值的扩散有效区域最大半径较大, 给定浓度阈值的扩散有效区域持续时间也更长。

3) 传统线性播撒火箭弹, 源强较小, 催化剂扩散有效区域最大半径较小, 较适合垂直发展不太旺

盛、增雨潜力一般的层状云或积层混合云; 采用体播撒方式的HY-1A型火箭弹, 其催化剂成核率较高, 催化剂扩散有效区域最大半径较大, 子弹射出播撒催化剂的扩散有效区域呈球体, 可以充分利用云层过冷水, 较适合于垂直发展旺盛、增雨潜力较强的积雨云或者应用于防雹增雨的强对流云; 若是可以增加子弹射出播撒催化剂的长度, 则其应用效果会更好。此外, 体播撒方式的单枚火箭弹催化剂带来较多的人工冰核, 催化有效区域持续时间较长, 单次作业发射的火箭弹减少, 相应可以降低人影作业空域对航路产生的影响。

致谢: 特别感谢中国气象科学研究院的胡志晋老师关于线源扩散和点源扩散计算, 以及两种播撒方式催化剂扩散情况的近似方面给予的指导和建议。

参考文献

- [1] Bruinjtjes R T. A review of cloud seeding experiments to enhance precipitation and some new prospects. Bulletin of the American Meteorological Society, 1999, 80(5): 805-820.
- [2] 李大山, 章澄昌, 许焕斌, 等. 人工影响天气现状与展望. 北京: 气象出版社, 2002.
- [3] 国家人工影响天气协调会议办公室, 中国气象局应急减灾与公共服务司, 中国气象局人工影响天气中心. 人工影响天气 (2016年). 郭学良, 杨军, 章澄昌. 大气物理与人工影响天气 (下). 北京: 气象出版社, 2010.
- [4] 盛裴轩, 毛节泰, 李建国, 等. 大气物理学. 北京: 北京大学出版社, 2003.
- [5] 胡志晋. 层状云人工增雨机制、条件和方法的探讨. 应用气象学报, 2001, 12(增刊): 10-13.
- [6] 章澄昌. 人工影响天气概论. 北京: 气象出版社, 1992.
- [7] 马官起, 任宜勇, 王金民, 等. 增雨防雹火箭作业系统实用教材. 北京: 气象出版社, 2008.
- [8] 中国气象局科技发展司. 人工影响天气岗位培训教材. 北京: 气象出版社, 2002.
- [9] 申亿铭. 云中催化剂的扩散. 北京: 气象出版社, 1994.
- [10] 申亿铭. 对流云中点源爆炸催化剂的扩散问题. 气象学报, 1983, 41(4): 415-425.
- [11] 申亿铭. 碘化银炮弹在过冷层状云中爆炸后催化剂的扩散问题. 气象科学技术集刊(2). 北京: 气象出版社, 1982.
- [12] 申亿铭. 飞机播撒催化剂的叠加效应. 南京气象学院学报, 1983, 2: 239-246.
- [13] 周毓荃, 朱冰. 高炮、火箭和飞机催化扩散规律和作业设计的研究. 气象, 2014, 40(8): 965-980.