

碘化银核化过程的数值模拟研究^{* 1}

刘诗军

胡志晋 游来光

(山东省气象科学研究所, 济南, 250031)

(中国气象科学研究院, 北京, 100081)

摘 要

根据 DeMott 等给出的不同成核机制下 AgI 成核效率的实验结果, 通过数值模拟的方法, 研究了 AgI 粒子在云室、层状云和对流云中的核化过程。通过对云室的模拟, 发现云滴浓度和云雾持续时间是造成不同云室检测的 AgI 成核率相差悬殊的主要原因。数值试验结果表明 AgI 的成核方式在层状云和对流云中有很大不同: 层状云中 AgI 主要以接触冻结、浸没冻结等慢核化过程为主, 而对流云中则以凝结冻结过程为主。

关键词: 碘化银, 核化过程, 数值模拟, 云室试验。

1 引 言

碘化银成冰过程十分复杂, 碘化银粒子以各种方式成冰的能力同它的大小、化学组分和表面状态有关。现在一般认为碘化银粒子同其他冰核一样以 4 种不同的方式核化成冰: 凝华, 凝结—冻结, 接触核化, 浸没冻结^[1]。凝华核化在冰面过饱和条件下即能进行, 但所需克服的势垒最大, 所以在同样温度条件下凝华核化要求的粒子比冻结核化的大。凝结—冻结核化是在水面过饱和条件下碘化银粒子上凝结的水膜或水斑冻结成冰。水膜厚度仅为几个分子到 10 nm。从势垒和核化条件、核化速率来看, 这一核化方式最易出现。接触核化是碘化银粒子同云滴或雨滴碰撞使云滴雨滴冻结成冰。这一过程的速率决定于碰撞机率和碰撞后冻结的机率。直径为 0.02~0.2 μm 的碘化银粒子同云滴的碰撞主要通过布朗碰并, 其速率决定于粒子的大小、云滴的直径和数浓度。经计算, 在云滴直径为 20 μm , 浓度为 500 cm^{-3} 时, 直径为 0.02 μm 的粒子的碰撞率仅为 $8 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$, 直径为 0.2 μm 的仅为 $1.0 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$, 即在 1 min 内相应地只有 5% 和 0.06% 被碰撞。被碰撞的这部分粒子在一定的温度下只有一部分按一定的冻结概率形成冰晶。浸没冻结是浸没有碘化银

粒子的云(雨)滴在一定温度下产生的冻结。碘化银粒子可能通过凝结核化成云滴或者同云滴碰并而当时未导致冻结而浸没在云滴中, 它们的冻结成冰概率同温度有关。一些实验指出在同样温度下接触冻结的概率比浸没冻结的高^[2]。必须指出同一碘化银粒子在不同的环境条件(温、湿、云)下会优先通过某一种核化方式成冰, 也就是说同一种催化剂在不同的环境条件下, 例如, 碘化银在层状云和对流云中, 会有不同的核化方式和成冰率。各种碘化银催化剂的成冰率一般是在云室里检测的, 不同的云室具有不同的温、湿、云等环境条件, 它们的检测结果具有很大的差异, 因此很难用来比较不同催化剂的成冰性能。由于温度的检测和控制比较容易, 而对湿度的检测和控制比较难, 一般云室都可以给出气溶胶成冰率同温度的关系。对于自然界的大气冰核, 其成冰率随温度降低呈指数增大, 这一结果是在湿度为水面饱和时(云室内有稳定云雾)获得的。进一步的检测表明大气冰核成冰率同对冰面的过饱和度(相对湿度)成指数关系, 而与温度的关系不显著^[3]。对于碘化银催化剂一般云室也是给出了与温度的关系, 但由于对湿度和云雾等其他条件监测不足, 其结果很难相互比较, 更难恰当地运用到实际的云环境作业中去。面对催化剂具有几种可能活化机制的复

* 初稿时间: 2003 年 10 月 14 日; 修改稿时间: 2004 年 3 月 24 日。

资助课题: 自然科学基金课题(49675247)、国家“九五”攻关项目“农业气象灾害防御研究”(96-020-05)和科技部社会公益研究专项资金项目(2001DIB20104)。

作者简介: 刘诗军, 男, 1971 年生, 硕士, 高级工程师, 现在山东省气象科学研究所工作。Email: liushijun_sd@163.com

杂性,成冰率检测有两个主要的选择,即:模拟法和作用机制法。在 20 世纪 70 和 80 年代人们研制了各种装置分别测量和研究各种核化方式,以便在适当条件下,叠加各种核化方式的测量结果以计算成核率,这就是作用机制法^[4]。模拟法试图在一个仪器中再造特定的大气条件,观测形成冰晶的数目,这在技术上有很大的困难。90 年代 DeMott 等^[5]在美国科罗拉多州立大学(CSU)取得突破性进展,建立了动力云室,可以模拟大气中上升气流的慢膨胀冷却过程,并能调控云室内的水汽和气溶胶。利用这一云室,DeMott 等^[6]研究了不同尺度碘化银催化剂复合气溶胶在不同温、湿、云条件下的成冰速率,并分辨出不同机制所起的作用(表 1)。他归纳得出的碘化银粒子的各种机制核化成冰的速率同环境温、湿、云的关系式虽然在数值上可能有较大误差,但在物理上是合理的,并有较好的实验数据支持,因而是可用的,也是目前唯一的。本文试图将上述试验综

合结果应用到数值模拟中去,帮助了解碘化银在不同云室、外场不同云型和不同播撒方式下的成冰机制和速率。

2 数值模拟方法

DeMott(1995)给出了 AgI 催化剂气溶胶在不同环境条件下的凝华、凝结—冻结、接触冻结、浸没冻结以及凝结的核化速率,分别用 F_{dep} , F_{cdf} , F_{ctf} , F_{imf} 和 F_{imd} 来表示。它们都是温度(T)和水汽过饱和度(水面的 S_w 和冰面的 S_i)的函数(表 1)。这些方程都是在 T 和 S 以一定速率变化时在动力云室中测得的,在数值模式应用可以采用以下两种方式

$$F = F(T, S) \quad (1)$$

$$F = F(T_0, S_0) +$$

$$\int_0^t \left(\frac{\partial F}{\partial T} \cdot \frac{\partial T}{\partial t} + \frac{\partial F}{\partial S} \cdot \frac{\partial S}{\partial t} \right) dt \quad (2)$$

表 1 DeMott 等(1995)得出的 AgI 不同核化机制的核化效率

Table 1 The AgI nucleation rate given by DeMott (1995)

核化机制	AgI-AgCl(0.03 μm)	AgI-AgCl-4NaCl(0.03 μm)	条件
凝 华	$D_{\text{dep}} = a(S_i - 0.65S_w - 5)^b$		$T < -5\text{ }^\circ\text{C}$ $S_w > -8\%$
	$a = 5.02 \times 10^5$ $b = 1.493$	$a = 5.86 \times 10^5$ $b = 1.346$	
	$D_{\text{dep}} = a(S_i)^b$		$S_w < -8\%$
接触冻结	$F_{\text{dep}} = 1 - \exp(-4\pi r_d^2 D_{\text{dep}})$ $D_{\text{ctf}} = a(S_i - 0.055)^b$ $a = 1.198 \times 10^{12}$ $b = 1.98$		$S_i > 0.055$
	$F_{\text{ctf}} = 1 - \exp(-4\pi r_d^2 D_{\text{ctf}})$		
浸没冻结	$F'_{\text{ctf}} = F_{\text{scav}} F_{\text{ctf}}$ $F'_{\text{imf}} = p[T_0^{-1}(T+l)]^m$ $p = 0.0337$ $l = 5$ $m = 3.2$ $T_0 = -10\text{ }^\circ\text{C}$		$T < -5\text{ }^\circ\text{C}$
	$F'_{\text{imf}} = F_{\text{imf}}(F_{\text{imc}} + F_{\text{imd}})$		
凝结冻结	$D_{\text{cdf}} = a[T_0^{-1}(T+d)]^b(S_w)^c$ $a = 2.36 \times 10^9$ $b = 4.836$ $c = 2$ $d = 3$ $T_0 = -10\text{ }^\circ\text{C}$		$T < -5, -6\text{ }^\circ\text{C}$ $S_w > 0\%$
	$F_{\text{cdf}} = 1 - \exp(-4\pi r_d^2 D_{\text{cdf}})$		
凝 结	$F_{\text{imd}} = a(S_w)^b$ $a = 0.025$ $b = 2.0$	$a = 3.54 \times 10^{11}$ $b = 4.730$ $c = 2$ $d = 6$	

对于某一 T, S 不变的环境, 如等温云室, 我们可以采用式(1)。对于一般的情况则必须采用式(2)。式(2)中的 T_0, S_0 为 AgI 播入时的环境条件, 以后环境以 $\frac{\partial T}{\partial t}$ 和 $\frac{\partial S}{\partial t}$ 的速率不断变化。如果数值模拟的环境变化速率同试验的一致, 那么应用式(2)是不成问题的。如果模式同试验的变化速率不一致, 应用中就会有一定误差。由于表 1 所示的关系式是大量不同变化速率的实验的综合结果, 所以采用式(2)是合理的。

在模式中我们考虑了 AgI 气溶胶粒子的核化过程对水汽(Q_v)、云水(Q_c)、冰晶量和数浓度(Q_i, N_i)的作用。由于核化产生的水成物初始质量极小($10^{-10} g$ 的数量级), 其相变潜热量也很小, 可以忽略。具体方程组如下

$$\frac{\delta Q_v}{\delta t} = -N_{aer} \left(\frac{\partial F_{dep}}{\partial t} + \frac{\partial F_{cdf}}{\partial t} + \frac{\partial F_{imd}}{\partial t} \right) Q_0 \quad (3)$$

$$\frac{\delta Q_c}{\delta t} = \left[N_{aer} \frac{\partial F_{imd}}{\partial t} - N_{aer} (F_{scav} F_{ctf} + F_{scav} \cdot (1 - F_{ctf}) F_{imf}) - N_{aim} \frac{\partial F_{imf}}{\partial t} \right] Q_0 \quad (4)$$

$$\frac{\delta N_i}{\delta t} = N_{aer} \left[\frac{\partial F_{dep}}{\partial t} + \frac{\partial F_{cdf}}{\partial t} + F_{scav} F_{ctf} + F_{scav} \cdot (1 - F_{ctf}) F_{imf} \right] + N_{aim} \frac{\partial F_{imf}}{\partial t} \quad (5)$$

$$\frac{\delta Q_i}{\delta t} = \frac{\delta N_i}{\delta t} \cdot Q_0 \quad (6)$$

$$\frac{\delta N_{aer}}{\delta t} = -N_{aer} \left(F_{scav} + \frac{\partial F_{dep}}{\partial t} + \frac{\partial F_{cdf}}{\partial t} + \frac{\partial F_{imd}}{\partial t} \right) \quad (7)$$

$$\frac{\delta N_{aim}}{\delta t} = N_{aer} [F_{scav} (1 - F_{ctf}) (1 - F_{imf}) + \frac{\partial F_{imd}}{\partial t}] - N_{aim} \frac{\partial F_{imf}}{\partial t} \quad (8)$$

式中 $\frac{\delta}{\delta t}$ 表示同 AgI 核化有关的源汇项, N_{aer}, N_{aim} 为 AgI 气溶胶及其被包含在云滴中的比数浓度, F_{scav} 为云滴对 AgI 气溶胶的捕获率, Q_0 为核化产生的冰晶或云滴的初始质量。

当 AgI 气溶胶以 N_{seed} 的数浓度播入温度为 T_0 , 湿度为 S_0 的大气或云时, $F_0 = F(T_0, S_0)$ 的部分迅速核化, 引起有关物理量的初始变化以及形成的初始气溶胶(悬浮的和在云滴中的)浓度为

$$\delta Q_{v0} = -N_{seed} (F_{dep0} + F_{cdf0} + F_{imd0}) Q_0 \quad (9)$$

$$\delta Q_{c0} = N_{seed} F_{imd0} Q_0 \quad (10)$$

$$\delta N_{i0} = N_{seed} (F_{dep0} + F_{cdf0}) \quad (11)$$

$$\delta Q_{i0} = \delta N_{i0} Q_0 \quad (12)$$

$$\delta N_{aer0} = N_{seed} [1 - (F_{dep0} + F_{cdf0} + F_{imd0})] \quad (13)$$

$$\delta N_{aim0} = N_{seed} F_{imd0} \quad (14)$$

式中下标 0 表示初始值。

3 箱模式和云室试验模拟

箱模式(Box Model)是 0 维时变模式, 箱内均匀, 各变量无空间变化, 也没有平流, 其变化仅由源汇决定, 即 $\frac{d}{dt} = \frac{\delta}{\delta t}$ 。在一般用于冰核测试的等温云室(如 Bigg 云室、CSU 云室等)中空气维持一定的温度, 又用某种方法产生云雾并维持一段时间。气溶胶样品通入这一环境并检测其生成的冰晶数浓度。大量检测表明, 同一种气溶胶样品在不同的云室中检验得出的冰晶浓度可以有数量级的差异; 在同一云室中检测的结果有的也相当分散(如文献[7]图 2 所示)。中国检测冰核和催化剂成冰率主要采用容积为 3.5 L 的小型 Bigg 型云室, 容积为 2 m³ 的中型 CSU 等温型云室以及容积为 96 m³ 的大型云室^[8]。这些云室容积不同、云滴数浓度不同、云雾维持时间不同以及其他条件(如湿度、温度分布等)的不同对其成冰检测能力有很大的影响。用数值模拟方法来研究这一问题既有学术意义又有应用价值。

在云室中可以近似地认为在一定时间内维持一定温度和一定数浓度的过冷云雾, 水汽接近于水面饱和值。即: $T = T_0, S_w = 0, N_c = N_{c0}, S_i = S_{i0} = [Q_{sw}(T_0) - Q_{si}(T_0)]/Q_{si}(T_0)$ 。式中 S_w, S_i 为相对于水面和冰面的过饱和度, N_c 为云滴数浓度。模拟上述过程显然可以采用最简单的箱模式, 由于 $S_w = 0$, 凝结—冻结为 0 ($F_{cdf} = 0$), 凝结也为 0 ($F_{imd} = 0$)。由于 S 和 T 不变, $\frac{\partial F}{\partial t} = 0$ 。即

$$N_{i0} = N_{seed} F_{dep0}$$

$$N_{aer0} = N_{seed} (1 - F_{dep0})$$

$$N_{aim0} = 0$$

$$\frac{dN_i}{dt} = N_{aer} (F_{scav} F_{ctf} + F_{scav} F_{imf} (1 - F_{ctf}))$$

$$\frac{dN_{aer}}{dt} = -N_{aer} F_{scav}$$

$$\frac{dN_{aim}}{dt} = N_{aer} F_{scav} (1 - F_{ctf}) (1 - F_{imf})$$

在这种假定下, 云室内的 AgI 气溶胶不能通过凝

结—冻结核化,而主要是凝华核化、同云滴碰并后的接触冻结核化和浸没冻结核化三种机制起作用。凝华核化是近似于瞬时的(快速核化),而接触冻结和浸没冻结都同气溶胶和云滴的碰并速率(F_{scav})成正比,其过程是渐进的(慢核化)。碰并速率同云滴浓度成正比,同气溶胶颗粒的大小成反相关。

在试验中,我们通过改变云滴浓度、环境湿度等参数来模拟不同云室的温湿条件,研究 AgI 在不同云室条件下的成核率关系,具体试验结果如下:

3.1 AgI 核化率与云滴浓度的关系

如前文所述,云滴浓度在不同云室中的变化幅度很大,从小型 Bigg 云室的几百个/ cm^3 到中型 CSU 云室的 5000 个/ cm^3 。为了模拟这种情况,我们选定云滴浓度为 50, 200, 500, 2000, 5000 个/ cm^3 , 温度为 -20°C 的 5 个个例进行研究,其结果如图 1 所示。

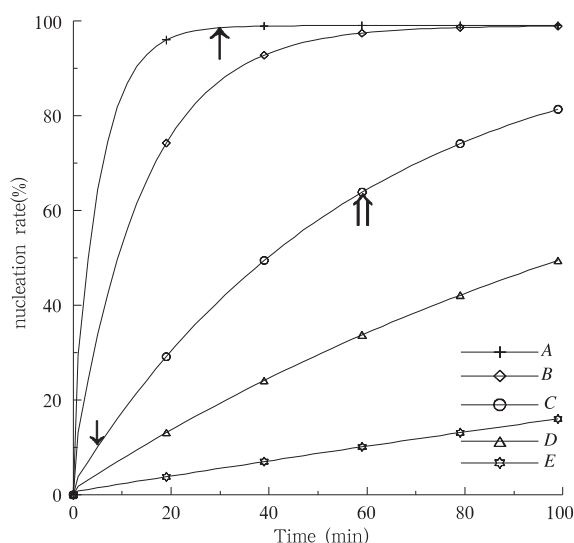


图 1 AgI 核化率随时间的演变
(曲线 A, B, C, D, E 对应的云滴浓度分别为 5000, 2000, 500, 200, 50 个/ cm^3 , 温度为 -20°C)

Fig. 1 The variation of AgI nucleation rate vs time (x—coordinate: time (minute), y—coordinate: nucleation percentage, curve A, B, C, D, E is corresponding to cloud concentration 5000, 2000, 500, 200, 50 cm^{-3} and temperature -20°C)

从图 1 中可以看出由于云滴浓度的下降,接触冻结、浸没冻结等慢核化过程的速率明显下降。在云滴浓度为 5000 个/ cm^3 的条件下,大约在 30 min 后 AgI 粒子已经全部核化,而在云滴浓度为 50 个/ cm^3 的个例中,在经过 100 min 后 AgI 核化的比率还没有超过 20%。这充分说明了云滴浓度对云室测定 AgI 成核效率的影响。在中国使用的小型 Bigg 云室中,

云滴浓度大约几百个/ cm^3 ,持续时间几分钟(图 1 中 ↓ 所示的位置),由它测得的核化率只有 10%;在具有同样温湿度条件的中型等温 CSU 云室中,其云滴浓度约为 5000 个/ cm^3 ,云雾持续时间约 0.5 h(图 1 中 ↑ 所示的位置),测得的核化率为 100%;在大型云室中云滴浓度为 500 个/ cm^3 ,云雾持续时间约 1 h(图 1 中 ↑ 所示的位置),其测得的核化率为 60%左右。这一结果与苏正军等^[8,9]利用这 3 种云室对同一种催化剂进行的成核率检测试验的结果相当一致,这说明云室中云滴浓度和云雾持续时间对冰核检测的重要性。

3.2 不同温度、湿度对 AgI 成核效率的影响

一般认为云室内的相对湿度为水面饱和,然而云雾的分布并不是完全均匀的,相对湿度在云室内的不同部位也不是完全相同的,有些地方可能过饱和,有些地方可能还没有达到饱和。针对这种情况,我们做了 AgI 核化率对相对湿度的敏感性试验。如图 2 所示,在实验中我们模拟了对水面的相对湿度从 96% 变化到 101% 时 AgI 核化率随温度变化的情况,并与 Davis 等(1973)通过实验给出的 AgI 核化率同温度的关系作了对比。从图 2 可见随着相对湿度的增加,AgI 核化所需的温度逐渐升高;在同样温度条件下,相对湿度越大,AgI 的核化率越高,AgI

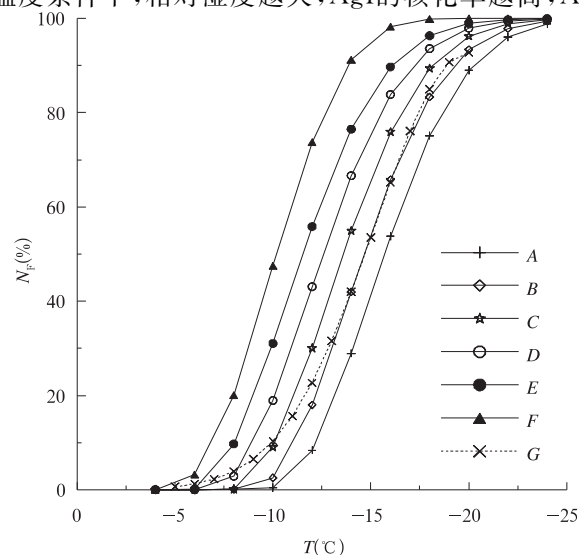


图 2 AgI 核化百分率与温度的关系
(曲线 A, B, C, D, E, F 对应的水面相对湿度分别为 96%, 97%, 98%, 99%, 100%, 101%, 曲线 G 为 Davis 等(1973 年)通过实验给出的 AgI 核化率随温度的关系
Fig. 2 The relation between AgI nucleation percentage and temperature (x—coordinate: temperature($^\circ\text{C}$), y—coordinate: nucleation percentage, curve A, B, C, D, E, F corresponding to water relative humidity 96%, 97%, 98%, 99%, 100% and 101%, curve G is the experiment result given by Davis (1973))

核化率与相对湿度的这种正相关的关系在 $-5\sim-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 之间比较明显,超过 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$,AgI 气溶胶几乎全部核化,而在温度高于 $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的区域内,AgI 的核化作用基本不会发生。Davis 的结果大体上同水面相对湿度为 $97\%\sim100\%$ 的相当。这些结果同前人关于 AgI 气溶胶核化的测量结果和通常人们对于 AgI 核化的认识一致。

3.3 AgI 成核率云室检测的数值模拟

如前文所述,由于温度的检测和控制比较容易,人们在利用云室测定 AgI 的成核率时一般给出的是水面饱和条件下(云室内有稳定云雾)成核率同温度的关系。然而由于不同类型云室内部云滴浓度和云雾持续时间不同,它们测得的 AgI 成核率差异很大。针对这种情况,根据不同类型云室的云滴浓度和云雾持续时间,我们分别作了小型 Bigg 型云室、中型等温 CSU 云室以及 96 m^3 的大型云室检测 AgI 成核率的数值试验,并给出了各自成核率同温

度的关系(图 3)。为了研究各种云室成核率随温度的相对变化并能够同前人的实验结果进行比较,我们对模拟结果进行了标准化处理。以温度低于 $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时 AgI 的成核率为各自标准,则 AgI 的相对核化率 $N_F(T)$ 可表示为

$$N_F(T) = \begin{cases} \frac{F(T)}{F(-30)} \times 100 & -30 < T \leq 0 \\ 100 & T \leq -30 \end{cases} \quad (15)$$

式中 $F(T)$ 为温度为 T 时的 AgI 的成冰率。由图 3 可见,经过标准化处理后不同云室检测的 AgI 的相对核化率随温度的变化曲线非常接近。这说明人工冰核成冰率随温度的相对变化是它本身的特性,同云室检测条件关系不大。在不同云室中只有一部分有效核被云滴碰并而形成冰晶,这部分所占的比例同云室中云滴浓度和云雾持续时间有关(图 1),而同温度的关系较小(图 3)。在温度高于 $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的区

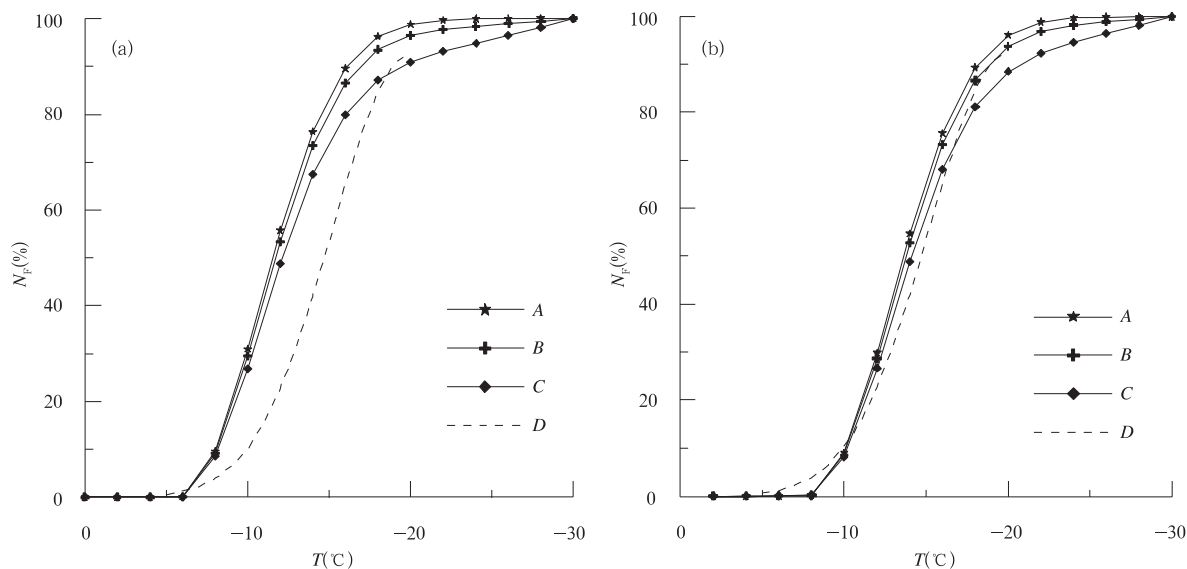


图 3 AgI 云室检测数值试验结果

(a. 云室条件(水面饱和), b. 水面相对湿度 98% 时的数值试验结果。曲线 A, B, C 分别表示 CSU 云室、 96 m^3 大型云室和 Bigg 型云室的模拟结果, 曲线 D 为 1973 年 Davis 等通过试验给出的 AgI 成核率同温度的关系曲线)

Fig. 3 The simulation results of AgI nucleation rate tested by cloud chamber

(the simulation results at water saturation condition (a) and 98% relative humidity (b). x—coordinate: temperature, y—coordinate: nucleation percentage, curve A, B, C is corresponding to CSU, 96 m^3 and Bigg cloud chamber, curve D is the experiment results given by Davis (1973))

域,不同云室检测的相对核化率基本相同,而在 $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ 到 $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$ 之间不同云室检测的相对核化率就有 $2\%\sim8\%$ 的差异,云雾浓度越高,云雾持续时间越长,云室检测到的 AgI 相对核化率越高。Davis 等 1973 年给出的 AgI 成核效率的实验结果也列在

图 3 上,它同水面相对湿度为 $97\%\sim98\%$ 时的模拟结果十分接近。

4 层状云中 AgI 核化机制

层状云系统是中国北方地区春秋季节降水的主要

来源,也是进行飞机增雨作业的首选天气系统。有关 AgI 类催化剂在这些天气系统中的作用机理、催化效率等方面的研究,无疑会加深人们对于飞机增雨作业的认识,提高作业的科学性、可靠性。然而由于受到技术条件的制约,直接的野外观测试验现在还无法进行。利用计算机模拟技术,通过使用合适的云模式来模拟 AgI 类催化剂的催化作业效果,这是目前进行这项研究工作的一种比较常用方法。一般而言,层状云系统比较稳定,水平均匀,可以用一维的方式来描述。因此,我们选用一维模式来研究 AgI 类催化剂在这类云中的作用,这一方面可以反映云内的实际情况,另一方面又可以避免采用三维模式等复杂的模拟系统所带来的其他因素的困扰,更容易分析出 AgI 类催化剂的催化机制和核化效率。

4.1 模式简介

我们选用胡志晋、严采繁等^[10]于 1986 年提出的混合相层状云模式进行这方面的模拟研究工作。该模式采用了定常的运动学框架(主要动力特征人为给定),在给定的温湿度环境条件下,模拟云中各物理量之间的相互作用。在云物理方面,模式考虑了水汽、云水、冰晶、雪晶、霰、雨水等 6 种降水物质以及它们之间的 18 种相互作用,能够反映冰晶、雪晶等冰相粒子在降水的发生、发展等方面的重要作

用,比较适合冷云降水的模拟研究。参照前面介绍的 AgI 的数值模拟方法,我们对该模式进行了改造,引入了 AgI 气溶胶粒子(N_{aer})和浸没于云滴中的气溶胶粒子(N_{aim})两个变量,加入了有关的核化的过程。通过改造,模式具备了 AgI 类催化剂的模拟能力,能够被用来研究 AgI 类催化剂对层状云系统的影响。

4.2 数值模拟方法及结果分析

在模拟试验中,为了能够反映典型的层状云系统的结构特征,我们对模式的环境场作了适当的假定,利用湿绝热温度廓线作为模式的温度层结,垂直速度分布为抛物线型,最大上升速度为 0.3 m/s,并假定温度和升速的垂直分布不随时间变化。在湿度方面,初始场在 0 °C 层以下取水面饱和,0 °C 层以上取冰面饱和,以后湿度分布由模式计算预报。在此基础上,我们进行了自然云的模拟以及 AgI 的催化试验。自然云的模拟结果与文献[10]的结果一致,它们都模拟出了层状云中云滴的增长以及液相与冰相之间的相互作用。在模拟的开始阶段,由于上升气流的抬升作用,水汽凝结形成云,到 40 min 左右,云水含量达到最大,以后由于冰相粒子的作用,云水含量逐渐减少,冰晶、雪晶、霰等冰相粒子的含量逐渐增加,大约到 200 min 后系统趋于稳定,此时各物

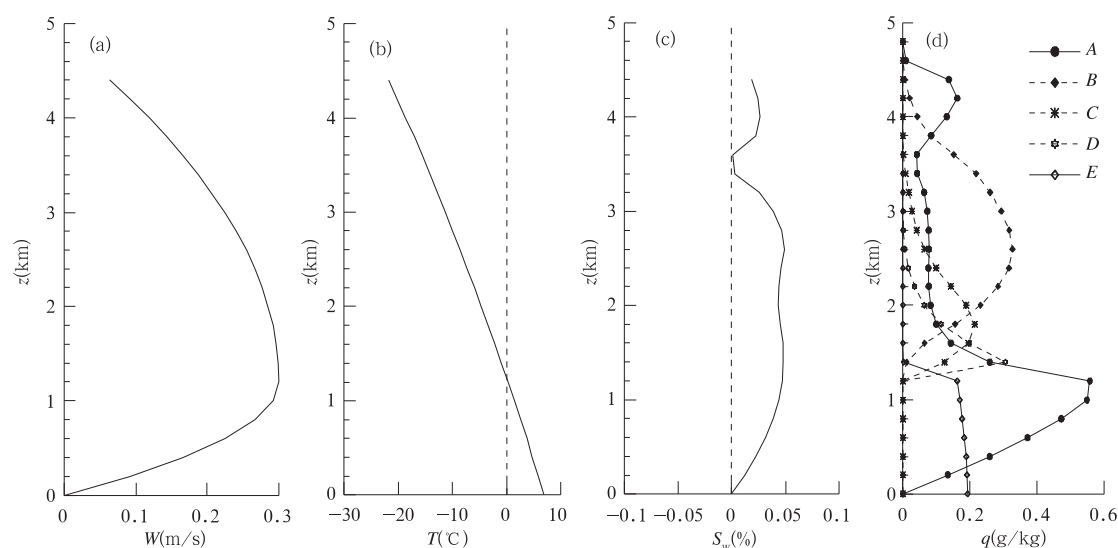


图 4 平衡后云中各物理量的垂直分布

(a, b, c, d 分别表示垂直速度、温度、水面过饱和度(相对湿度)和水成物,
曲线 A, B, C, D, E 分别表示云水、冰晶、雪晶、霰和雨水随高度的分布)

Fig. 4 The vertical distribution of physical variables in one-dimension cloud model

(a, b, c and d illustrated respectively the vertical distribution of vertical velocity, temperature, water super saturation and cloud variables. Curve A, B, C, D, E is corresponding to cloud, ice, snow, graupel and rain)

理量的垂直分布列于图 4。在催化试验方面,与传统的通过人工引晶的催化方法类似,向云中加入 AgI 同样引起了云降水量的变化,增加了降水强度(图 5)。有关云物理的基本知识以及人工引晶对云体所造成的影响等方面的内容,在此就不多作叙述,

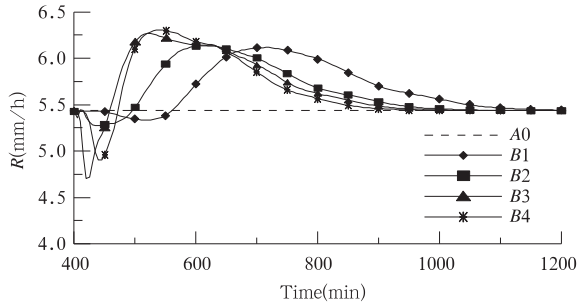


图 5 降水强度随时间的变化
(曲线 A0 为自然云条件下的雨强,曲线 B1,B2,B3, B4 分别对应播撒个例 B1,B2,B3,B4)
Fig. 5 The variation of precipitation vs time
(Curve A0 is the precipitation under nature condition, curve B1, B2, B3, B4 is corresponding to seeding case B1, B2, B3, B4 (Table 2))

下面我们将着重分析 AgI 的各种核化机制在催化过程中所起的作用。

为了能够定量地分辨出 AgI 的 4 种核化机制在催化时所起的作用,我们在模式计算过程中对每一种机制所产生的冰晶的数目进行了累加,其结果见表 2。从表 2 可见,(1)在 AgI 的 4 种成核机制中,接触冻结和浸没冻结是主要的,它们加起来约占 AgI 成核总数的 90% 以上。(2)随着播撒高度的增加,凝华、凝结冻结、接触冻结的作用逐渐增加,浸没冻结的作用逐渐减小。(3)在温度非常低的部位进行催化,其总的成核效率并不比在温度较高的部位高,同样在高度比较低的暖区进行催化,其催化效果也不比直接在冷区催化差。造成以上现象的原因可能同本例中升速较大(最大值为 30 cm/s),所在层次较厚有关。在温度非常低的部位进行催化,虽然环境条件对 AgI 成核非常有利,然而由于催化部位处于云体上部,AgI 较快被带出云顶,其作用时间比较短,总成核效率反而不高;同样,在暖区进行催化,AgI 随上升气流输运到上层更低温度处,作用时间比较长,总体催化效果反而比直接在冷区催化好。

表 2 不同个例催化实验催化效果统计*
Table 2 The seeding effect statistic in different cases

编号	高度 (格点)	温度 (℃)	剂量 (个/kg)	冰晶数 (个/kg)	凝华 (%)	凝结冻结 (%)	接触冻结 (%)	浸没冻结 (%)	总核化率 (%)	降水量 (mm)	增水量 (mm)
A1	10	-4.7	1.0×10^5	1.97×10^4	1.27	0.34	88.13	10.26	19.7	72.78	0.31
B1	3	3.7	1.0×10^6	2.13×10^5	1.19	0.38	72.53	25.90	21.3	75.55	3.08
B2	10	-4.7	1.0×10^6	1.95×10^5	1.48	0.44	87.42	10.65	19.5	75.22	2.75
B3	15	-11.3	1.0×10^6	2.49×10^5	1.75	1.17	93.05	4.04	24.9	75.56	3.09
B4	20	-18.7	1.0×10^6	2.35×10^5	2.62	2.23	94.25	0.90	23.5	75.29	2.82
C1	3	3.7	1.0×10^7	1.59×10^6	1.54	0.15	58.54	39.77	15.9	80.44	7.97
C2	10	-4.7	1.0×10^7	1.36×10^6	2.13	0.17	76.29	21.41	13.6	79.53	7.06
C3	15	-11.3	1.0×10^7	1.47×10^6	2.76	0.25	79.71	17.28	14.7	79.32	6.85
C4	20	-18.7	1.0×10^7	1.49×10^6	3.98	1.56	80.16	14.30	14.9	78.36	5.89
D1	10	-4.7	1.0×10^8	6.36×10^6	2.32	0.03	32.22	65.43	6.4	83.46	10.99

* 时间范围:400~1200 min,自然降水量为 72.47 mm。

5 对流云 AgI 核化机制

与层状云不同,对流云系统水平尺度小、空间分布不均匀,垂直运动剧烈,是造成局地灾害性天气的一种主要天气系统。对这类天气系统,人们常常利用向其中大量播撒 AgI 催化剂的办法来降低其灾害性的一面(防雹),增加其对人类有益的一面(增雨)。AgI 催化剂在这类天气系统中的作用机制是什么?是不是像层状云那样也是以接触冻结、浸没

冻结等慢核化过程为主? 这些问题都需要用数值模拟进行试验。

5.1 模式简介

我们采用中国气象科学院(CAMS)三维弹性对流云模式^[11]来进行这方面的研究工作。在开始之前,我们首先对该模式进行了改造,加入了有关的 AgI 核化部分的内容(见上文),使其具备了进行 AgI 催化模拟实验的能力。

5.2 催化模拟实验

利用 1996 年 6 月 10 日北京地区的一次冰雹过程的探空资料作为初始场,分别进行了自然云的模拟和 AgI 的催化实验。在自然云的模拟过程中,模式较好地反映了对流云的主要物理过程,模拟的雷达回波强度、结构、移动等都同实测比较一致。在自然云模拟的基础上,我们又进行了 AgI 的催化实验,分别在回波出现之前、刚出现回波(21 min)和回波出现之后的几个时段内对云体的不同部位进行催

化,并利用区域总降雨量和总降雪量作为催化效果的判据。表 3 为催化实验的效果统计,从中我们可以看出对于本次过程来说,AgI 的催化实验达到了预期的目的,在所进行的 17 次实验中,总降雨量最多增加了 70%(个例 12),总降雪量最多减少了 75%(个例 2);对于人工增雨来说,在出现雷达初始回波后的几分钟内在云体的低层进行催化效果比较好,而对于防雹来说,在雷达回波出现前后进行大范围多时次大剂量的催化可以明显的减少冰雹带来的灾害。

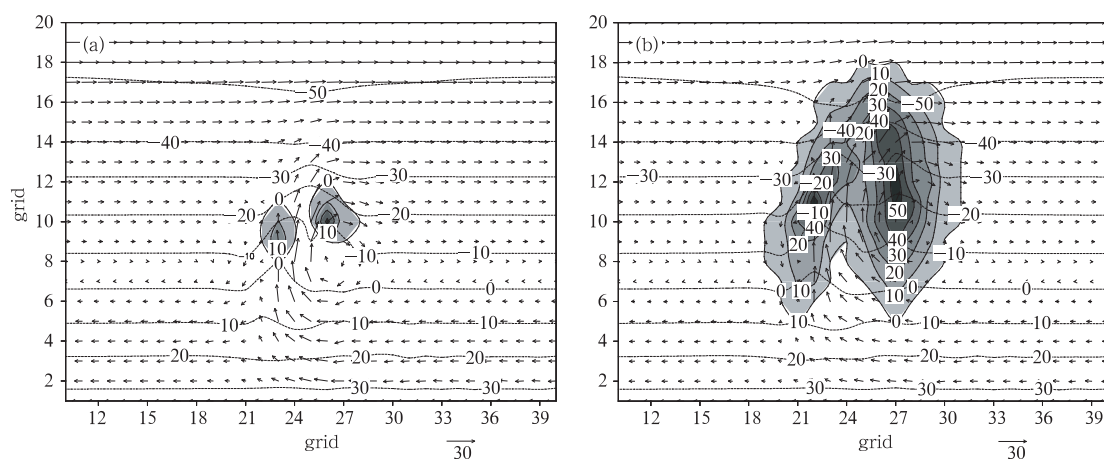


图 6 模拟 21 min(a)和 24 min(b)的雷达回波与流场分布

Fig. 6 The distribution of echo and stream after simulating 21(a) and 24(b) minutes

表 3 催化试验效果统计(对流云)

Table 3 The seeding effect statistic in convective cloud simulation research

编号	播撒范围(格点)	剂量(个/kg)	平均温度(℃)	播撒时间(min)	播撒次数	总降雨量(kt)	总降雪量(kt)
1	—	—	—	—	—	691	384
2	23~25,28~29,6~7	3.0×10^7	0.60	21	4	800	93
3	23~25,28~29,6	3.0×10^7	3.45	19	1	959	346
4	23~25,28~29,7	3.0×10^7	-2.19	19	1	875	331
5	23~25,28~29,8	3.0×10^7	-7.83	19	1	913	362
6	23~25,28~29,9	3.0×10^7	-13.46	19	1	861	354
7	23~25,28~29,6	3.0×10^7	3.45	21	1	1178	314
8	23~25,28~29,7	3.0×10^7	-2.19	21	1	1046	335
9	23~25,28~29,8	3.0×10^7	-7.83	21	1	947	346
10	23~25,28~29,9	3.0×10^7	-13.46	21	1	848	390
11	23~25,28~29,6	3.0×10^7	3.45	23	1	1137	329
12	23~25,28~29,7	3.0×10^7	-2.19	23	1	1188	315
13	23~25,28~29,8	3.0×10^7	-7.83	23	1	1087	346
14	23~25,28~29,9	3.0×10^7	-13.46	23	1	975	368
15	23~25,28~29,6	3.0×10^7	3.45	25	1	832	282
16	23~25,28~29,7	3.0×10^7	-2.19	25	1	991	285
17	23~25,28~29,8	3.0×10^7	-7.83	25	1	1043	281
18	23~25,28~29,9	3.0×10^7	-13.46	25	1	873	345

5.3 核化机制分析

图 7 为不同核化机制形成的冰晶随高度的分

布,从中我们可以看出以下几点内容:(1)在对流云中凝结冻结所起的作用是主要的,通过它形成的冰

晶数要比其他 3 种核化机制高一个量级以上。这主要是因为在对流云中存在着非常强的上升气流(本例中模拟的最大上升气流超过 30 m/s),空气的抬升冷却作用使得在对流云的某些部位维持很高的水面过饱和度,在这些部位进行催化 AgI 粒子可以通过凝结冻结作用迅速形成冰晶。而接触冻结、浸没冻结等慢核化方式的成核效率除了和云内的温度、湿度等条件有关外,还取决于 AgI 粒子的作用时间。对流云中的强上升气流使播入的 AgI 粒子很快随气流到达云外,因而极大地限制了这些核化方式的作用,这同黄燕、洪延超等^[12,13]的模拟结果一

致。(2)浸没冻结的成冰效率随高度的分布呈现明显的双峰型。AgI 通过凝结作用形成云滴,然后再随上升气流到达高处冻结形成冰晶,在对流云中其作用仅次于凝结冻结。(3)图 7 中从左到右撒播高度为 3.5~5.6 km,相应的温度为 3.4~-13.5 °C。通过比较可见,尽管播撒高度和温度差别很大,但 AgI 的成核方式却基本相同,主要成核区间都是在 4.5~8.5 km,最大值在 5.6 km(-13.5 °C),但随着播撒高度的升高,凝结核化成云滴的比率和凝结冻结核化成冰的比率都有所降低。

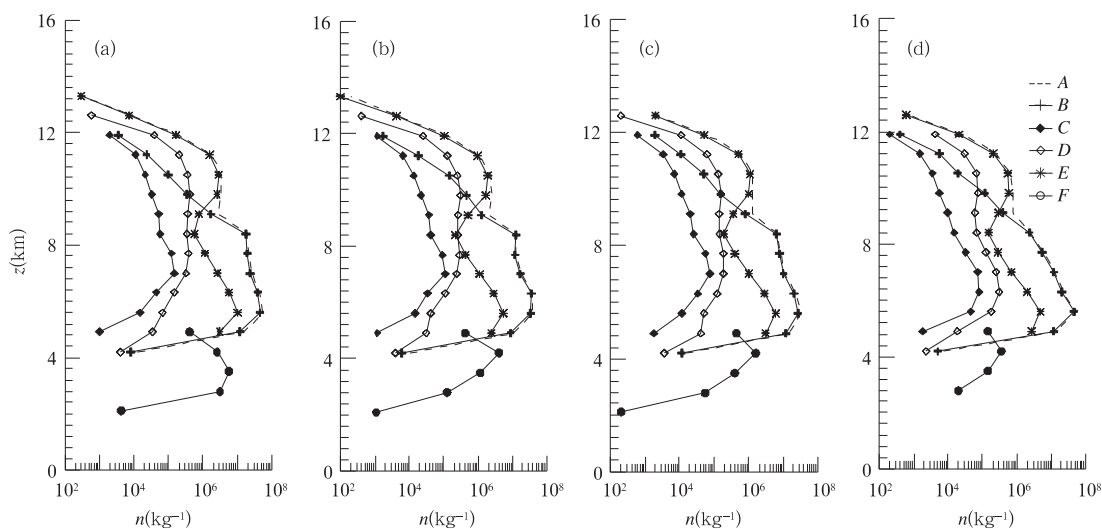


图 7 不同核化机制形成的冰晶数(n)随高度的分布

(a, b, c, d 依次为个例 003, 004, 005, 006 的结果, 曲线 A 为 AgI 形成的冰晶总数, B, C, D, E 分别对应凝结冻结、接触冻结、凝华和浸没冻结形成的冰晶数, 曲线 F 为 AgI 作为凝结核起作用的部分)

Fig. 7 The vertical distribution of ice crystal numbers produced by different mechanism (figure a, b, c, d. the experiment results of case 003, 004, 005, 006 in turn from left to right. curve A is the total ice number produced by AgI, curve B, C, D, E is corresponding to the ice number produced by condensation freezing, contact freezing, deposition and immersion freezing. curve F is the condensation part)

6 结 论

(1) 云滴浓度和云雾持续时间是造成不同云室测得的 AgI 成核率相差悬殊的主要原因。在云室条件下,水汽维持水面饱和。AgI 主要通过接触冻结和浸没冻结等慢核化过程形成冰晶,其成核速率受云滴浓度和持续时间的影响。对于云滴浓度低、云雾持续时间短的云室,其测到的 AgI 成核率远远低于 AgI 的实际成核率。

(2) AgI 成核率云室检测的数值模拟表明,尽管不同云室测得的 AgI 成核率相差悬殊,但经过标准化处理后得到的不同温度下的相对核化率却相当

接近。在温度高于 -10 °C 的区域,不同云室检测的结果基本相同,而在 -15 °C ~ -25 °C 不同云室检测的结果有 2%~8% 的差异,云雾滴浓度越高,云雾持续时间越长,云室检测到的 AgI 相对核化率越高。

(3) 在自然条件下,AgI 究竟以何种方式成核主要是由云内的实际上升气流速度、温度、湿度条件和催化剂的作用时间决定。在层状云中,由于水面过饱和度低、催化剂作用时间长,AgI 主要以接触冻结、浸没冻结等慢核化方式成冰。而在对流云中,由于上升气流比较强,云内可以维持较高的水面过饱和度,再加上催化剂在云内停留时间比较短,因而

AgI 主要以凝结冻结的方式成冰。

参考文献

- [1] Dennis A S. Weather Modification by Cloud Seeding. New York: Academic Press, 1980. 267pp
- [2] Federer B, Schneider A. Properties of pyrotechnic nucleats used in Grossversuch IV. J Appl Meteor, 1981, 20(9): 997—1005
- [3] Pruppacher H R, Klett J D. Microphysics of Cloud and Precipitation. Reidel Publishing Company, 1978. 244—245
- [4] Vali G. Review of the ice nucleation in the atmosphere. J Rech Atmos, 1985, 19:105—115
- [5] DeMott P J, Rogers D C. Freezing nucleation rates of dilute solution droplets measured between -30 and -40 °C in laboratory simulations of natural clouds. J Atmos Sci, 1990, 47: 1056—1064
- [6] DeMott P J. Quantitative descriptions of ice formation mechanisms of silver iodide—type aerosols. Atmos Res, 1995, 38: 63—99
- [7] Feng Daxiong, et al. The Study of high efficient AgI pyrotechnics and their nucleating properties. Acta Meteor Sinica, 1994, 8(3): 329—336
- [8] 苏正军, 张纪淮, 王世鸿等. AgI 核化能力的再生. 北京气象学院学报, 2001, 1:18—24
Suzhengjun, et al. Regeneration of AgI nucleation ability. Journal of Beijing Meteorological Institute(in Chinese), 2001, 1:18—24
- [9] 苏正军, 张纪淮, 关立友. 成冰核检测方法和标准分析和讨论. 北京气象学院学报, 2003, 1:6—11
Su Zhengjun, et al. Analyse and discussion on the standards and methods of the nucleation effectiveness and mechanism. Journal of Beijing Meteorological Institute (in Chinese), 2003, 1:6—11
- [10] 胡志晋, 严采繁. 层状云微物理过程的数值模拟(一)——微物理模式. 气象科学研究院院刊, 1986, 6(1): 32—52
Hu Zhijin, Yan Caipan. The numerical simulation of microphysical processes in stratiform cloud, part(I)—microphysical model. Journal of Chinese academy of meteorological science(in Chinese), 1986, 6(1):32—52
- [11] 于达维, 何观芳, 周勇等. 三维对流云催化模式及其外场应用. 应用气象学报, 2001, 12(增刊):122—132
Yu Dawei et al. Three Dimensional convective cloud seeding model and its field application. Journal of Applied Meteorological Science(in Chinese), 2001, 12 s1:122—132
- [12] 黄燕, 徐华英. 播撒碘化银粒子进行人工防雹的数值试验. 大气科学, 1994, 18(5): 612—622
Huang Yan, Xu Huaying. Numerical experiments on hail suppression by AgI seeding. Chinese Journal of Atmospheric Science (in Chinese), 1994, 18(5):612—622
- [13] 洪延超. 冰雹云形成机制和催化防雹机制研究. 气象学报, 1999, 57(1): 30—44
Hong Yanchao. Study on mechanism of hail formation and hail suppression with seeding. Acta Meteorologica Sinica(in Chinese), 1999, 57(1):30—44

THE NUMERICAL SIMULATION OF AGI NUCLEATION IN CLOUD

Liu Shijun

(*Shandong Meteorological Institute, Jinan 250031*)

Hu Zhijin You Laiguang

(*Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081*)

Abstract

Generally, the mechanism of ice-forming process by AgI can be identified as deposition, contact freezing, condensation freezing and immersion freezing. The total nucleation activity is the sum of contributions from different nucleation modes. In 1995, P. J. DeMott etc published their dynamic chamber experiment results, in which they identified the effect of the four ice-forming mechanisms and gave out the quantitative results of them. In our research, the experiments results of P. J. DeMott etc were applied in box model, one-dimension stratiform cloud model and three-dimension convective cloud model. Results show that the dominant ice-forming mechanism in different clouds is quite different and explain the reason why the nucleation rate tested by different cloud chamber is inconsistent. The detail demonstration will be given in the following part.

In box model, the nucleation process of AgI in cloud chamber was studied. Its results included the following three parts: (1) AgI nucleation activity is depended on cloud droplets concentration and cloud holding time. The cloud droplets concentration and the cloud holding time is quite different in different cloud chamber, so the nucleation rate tested by different cloud chamber is extreme variance. These results have been approved by the Bigg cloud chamber, the 2 m³ CSU cloud chamber and the 96 m³ cloud chamber. (2) Just as other experiments showed, temperature and humidity have notable effect on AgI nucleation activity. Normally, if the temperature is lower and the humidity is higher, the AgI nucleation process is often more effective. (3) Though the nucleation rates tested by different cloud chamber are different, the normalized results are quite similar.

In stratiform cloud simulation research, the one-dimension cloud model developed by Hu zhijin etc (1986) was used. In this model, water vapor, cloud water, ice crystal, snow, graupel, rain and their 18 interactive actions were considered. Besides these, variables involved AgI nucleation process have been added, and then the simulation capability of seeding AgI in stratiform cloud was obtained. By the simulation research of seeding AgI in stratiform cloud, the main nucleation modes were found. Owing to low up-draft and long resident time, contact freezing and immersion freezing play a very important role in AgI nucleation process under stratiform cloud conditions.

In convective cloud research, a three-dimension cloud model developed by CAMS was used. By the similar method, the model was modified and used to the convective cloud modified research. Results show that condensation freezing is the dominant nucleation modes in convective cloud.

In conclusion, humidity, temperature, cloud droplets concentration and cloud holding time are the main influence factors in AgI nucleation process. These factors are quite different in different cloud environment, so the dominant nucleation mechanism is different in different cloud conditions. These also explain the reason why AgI nucleation rate tested by different cloud chamber is inconsistent.

Key words: AgI, Ice nucleation, Numerical simulation, Cloud chamber.