

播撒碘化银粒子进行人工防雹的数值试验

黄 燕 徐华英

(中国科学院大气物理研究所, 北京 100029)

提 要

本文在二维完全弹性冰雹云数值模式中, 引入冰晶浓度和播撒物质 AgI 粒子的守恒方程, 建立了一个二维催化模式, 考虑了人工冰核的三种成核机制, 即凝华核化(包含凝结-冻结核化)及与云、雨滴的接触冻结核化, 模拟了几种不同冰雹云、不同催化方案下的人工防雹催化效果, 指出了防雹的最佳催化方案和适宜催化作业的冰雹云条件。

关键词: 人工防雹; 数值试验; 催化方法; 成核机制。

一、引 言

强对流云可以造成强烈的天气现象, 云中冰晶过程起了重要作用。目前人工影响天气的主要手段是播撒成冰核 (AgI 或干冰等), 人工防雹的原理就是通过播撒大量人工冰核争食云中的过冷水滴和使云体冰化, 因此, 用合理的参数化方法模拟云中冰晶的产生、生长、转化过程可以分析人工影响天气的效果和作业方案。

80 年代以来已经发表了许多冷云催化数值模拟的工作, Hsie 等^[1]在 Orville 和 Kopp^[2]的二维面对称加山地积云模式中增加了一个播撒物质 AgI 粒子的守恒方程, 以便模拟播云作用, 并考虑了碰冻过程和云冰的聚并过程。Farley 和 Orville^[3]将雹粒分为 20 档, 分别计算各档数浓度变化, 建立了一个雹分档模式, 进行催化试验, 结果表明播撒后地面降水、降雹 (特别是大雹) 减小, 而对动力过程的影响不明显。该模式中冰晶的比质量和浓度人为给定。Kopp^[4]则对冰晶浓度通过方程求解, 模拟了 AgI 播云和干冰播云的不同特点, 并将模拟结果与实际播云作业效果相比较。毛玉华等^[5]将胡志晋等^[6]的一维双参数雹云模式发展成二维, 对一例实测冰雹云 (CCOPE) 进行了人工冰晶和小水滴的播撒模拟, 证实适当播撒能消雹增雨。以上模拟或者没有详细考虑冰晶过程, 或者没有用守恒方程描述撒播物质的时空变化, 影响了模拟人工催化改变冰晶浓度的作用, 而且不能将播撒效果与播撒量 (AgI 或干冰) 直接联系起来。

本文利用孔凡铀等的三维冷云模式^[7, 8]的二维版本, 引入冰晶浓度和播撒物质的方程, 分析了三种人工冰核的成核作用, 模拟了不同环境条件下的雹暴个例播撒作用, 特别是对我国宁夏固原地区的一次降雹过程进行了不同剂量、不同时间、不同位置的催化试验, 探讨了对流云人工防雹的可行性和效果。

1993 年 6 月 3 日收到, 11 月 8 日收到修改稿。

二、二维冷对流云催化模式

1. 模式的基本结构

采用文献中[7]三维模式的二维版本, 任何物理量在 Y 方向分布均匀, 忽略地转偏向力。水物质分为五类: 水汽、云水、雨水、冰晶和霰 (雹), 通过各种微物理过程相互转移。模式预报量共有 11 个, 分别是速度 u 、 w 、位温 θ 、无量纲气压扰动 π' 及 5 个水物质的比含量 q_v 、 q_c 、 q_r 、 q_i 、 q_g , 还有冰晶比浓度 N_i 和 AgI 粒子的比含量 X_s 。下面是 N_i 和 X_s 的控制方程:

$$\frac{\partial N_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial N_i}{\partial X_j} = \frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{\rho} V_i N_i}{\partial Z} + I_{N_i} + D_{N_i}, \quad (1)$$

$$\frac{\partial X_s}{\partial t} + u_j \frac{\partial X_s}{\partial X_j} = I_{X_s} + D_{X_s}, \quad (2)$$

其中 I 、 D 分别表示冰相微物理源汇项和次网格尺度混合项; 其他量的控制方程及各项意义见文献[7]。侧边界法向速度采用辐射边界条件, 上、下边界取 $w=0$ 。初始对流由域中央附近低层位温扰动区激发, 中心最大扰动位温值可取 $1-3^\circ\text{C}$, 初始时刻令 $w=0$, q_c 、 q_r 、 q_i 、 q_g 、 N_i 和 X_s 均为 0, 由探空给出的水平均匀温、湿廓线, 求得初始环境水汽场、位温场 (本文未考虑水平平均风场)。

2. 微物理过程参数化

5 类水物质及 AgI 粒子参与暖、冷微物理过程, 包括核化、升华、自转化、碰并、冻结、融化、繁生等, 五类水成物的微物理转换率公式见文献[7, 8]。下面只列出冰晶比浓度 N_i 和播撒物质比含量 X_s 的源汇项。

模式考虑了 10 个冰晶过程, 即自然冰核活化形成冰晶 (NU_{vi}), 云水在 -40°C 时的匀质冻结形成冰晶 (HNU_{ci}), 冰晶凝华增长 (VD_{vi})、结淞增长 (CL_{ci})、自动转化 (CN_{ig}), 过冷雨滴碰冻冰晶形成霰 (FR_{ig}), 霰对冰晶的收集 (CL_{ig}), 冰晶在 0°C 层以下融化 (ML_{ic}), 以及淞附过程和大滴冻结繁生产生的次生冰晶 (MUR_{gi} 、 MUF_{gi})。这些冰晶比含量的变化过程除 CL_{ci} 外, 都改变冰晶浓度, 是冰晶比浓度 N_i 的源汇项, 本文以冰晶比含量变化率符号前面加上“ N ”来表示。冰晶浓度的源项通过比含量的转化率除以初始 (次生) 冰晶质量 m_{i0} (m'_{i0}) 得到, 对于云滴匀质冻结过程, 则冰晶浓度的源项为云滴浓度, 汇项除碰冻过程外, 均由比含量转化率除以冰晶平均质量 $\bar{m}_i$ 得到, 其中 $m_{i0} = 10^{-12} \text{ kg}$, $m'_{i0} = 10^{-11} \text{ kg}$, $\bar{m}_i = q_i / N_i$ 。各比浓度转化率的公式为

$$NNU_{vi} = NU_{vi} / m_{i0} = -6 \times 10^{-3} \frac{W}{\rho} \frac{\partial T}{\partial Z} \exp[0.6(T_0 - T)], \quad (3)$$

$$NHNU_{ci} = HNU_{ci} / \bar{m}_c = HNU_{ci} \cdot N_c / (\bar{\rho} q_c) = N_c / (\bar{\rho} \cdot 2\Delta t), \quad (4)$$

$$NVD_{vi} = \begin{cases} -VD_{vi} / \bar{m}_i = -VD_{vi} N_i / q_i, & \text{当 } S_i < 1 \text{ 时,} \\ 0, & \text{当 } S_i \geq 1 \text{ 时,} \end{cases} \quad (5)$$

$$NCN_{ig} = CN_{ig} / \bar{m}_i = N_i^2 \max \left[\left(\frac{dm_i}{dt} \right)_{cm} - C_m, 0 \right] / q_i, \quad (6)$$

$$NFR_{ig} = \frac{1}{\rho} \int_0^\infty \frac{\pi}{4} D^2 V_r(D) \bar{\rho} N_i N_r(D) dD = 2.54 N_i \bar{\rho}^{0.375} q_r^{0.875}, \quad (7)$$

$$NCL_{ig} = CL_{ig} / \bar{m}_i = CL_{ig} N_i / q_i, \quad (8)$$

$$NML_{ic} = \begin{cases} ML_{ic} / \bar{m}_i = N_i / 2\Delta t, & \text{当 } T \geq T_0 \text{ 时,} \\ 0, & \text{当 } T < T_0 \text{ 时,} \end{cases} \quad (9)$$

$$\begin{cases} NMUR_{gi} = MUR_{gi} / m'_{i0} \\ NMUF_{gi} = MUF_{gi} / m'_{i0} \end{cases} \quad (10)$$

其中 $T_0 = 273.15 \text{ K}$, $\bar{m}_c = \bar{\rho} q_c / N_c$, $C_m = 0.5 \times 10^{-10} \text{ kg/s}$ 。各冰晶比含量的转化率表达式见文献[7, 8]。

本文考虑三种 AgI 粒子的成核机制^[1, 4], 即由于布朗运动和惯性碰撞而发生在人工冰核和云、雨滴之间的接触冻结核化以及水汽在人工冰核上的凝华核化(包括凝结—冻结核化, 以下统称为凝华核化), 分别以 S_{BC} 、 S_{IC} 、 S_{BR} 、 S_{IR} 和 S_{DV} 来表示 X_s 的汇项。前一个下标表示成核方式, 后一个下标表示与人工冰核作用的水物质(云水、雨水和水汽)。模式中 X_s 的源项以一矩形空间内均匀分布的 AgI 粒子初始浓度 X_{s0} 来表示。主要假设有: AgI 粒子是单分散谱, 半径为 $0.1 \mu\text{m}$, 忽略下落末速, 平均质量 $m_s = 2.38 \times 10^{-14} \text{ g}$; 一个液滴只能捕获一个活化冰核发生接触核化; 忽略冰质粒与 AgI 粒子的碰并及 AgI 粒子的光解反活化; 所有的 AgI 粒子在 $t < -20^\circ\text{C}$ 时全部活化, 人工冰核的活化率曲线^[9]为

$$N_a(\Delta T) = \begin{cases} 0, & \text{当 } \Delta T < 5^\circ\text{C} \text{ 时,} \\ 10^3 \exp(-0.022\Delta T^2 + 0.88\Delta T - 3.8), & \text{当 } 5^\circ\text{C} \leq \Delta T < 20^\circ\text{C} \text{ 时,} \\ 1.6 \times 10^5, & \text{当 } \Delta T \geq 20^\circ\text{C} \text{ 时,} \end{cases} \quad (11)$$

其中 $N_a(\Delta T)$ 的单位是 m^{-3} , $\Delta T = T_0 - T$ 。下面分别给出 X_s 的各转化率公式(见文献[1]):

1) 云滴与 AgI 粒子的接触冻结核化 (S_{BC} , S_{IC})

$$\begin{cases} S_{BC} = -4\pi D_s X_s N_c R_c = -9.657 \times 10^{-17} X_s N_c T, \\ S_{IC} = -\pi R_c^2 X_s V_c E_{cs} N_c = -3.142 \times 10^{-16} X_s N_c, \end{cases} \quad (12)$$

2) 雨滴与 AgI 粒子的接触冻结核化 (S_{BR} , S_{IR})

$$\left. \begin{aligned}
 S_{BR} &= -4\pi D_s X_s \int_0^\infty \frac{1}{2} D_r N_{or} \exp(-\lambda_r D_r) dD_r = -2\pi D_s X_s N_{or} / \lambda_r^2 \\
 &= -2.724 \times 10^{-10} X_s \bar{\rho}^{0.5} q_r^{0.5} T, \\
 S_{IR} &= -X_s E_{rs} \int_0^\infty \frac{\pi}{4} D^2 V_r(D) N_r(D) dD_r = -2.54 E_{rs} \bar{\rho}^{0.375} X_s q_r^{0.875} \\
 &= -1.270 \times 10^{-4} \bar{\rho}^{0.375} X_s q_r^{0.875},
 \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

其中 N_c 是云滴浓度 (取为 $3 \times 10^8 \text{ m}^{-3}$), R_c 和 V_c 分别是云滴的半径和下落末速 ($R_c = 10 \text{ } \mu\text{m}$, $V_c = 1 \text{ cm/s}$), E_{cs} 和 E_{rs} 分别是云、雨滴与 AgI 粒子的碰并效率 ($E_{cs} = 10^{-4}$, $E_{rs} = 0.5 \times 10^{-4}$), D_s 是 AgI 粒子的扩散系数, $D_s = KTB$, 其中 $B = [1 + (a'd/R_s)] / 6\pi\mu R_s$, $a' = 0.9$, $d \sim R_s = 0.1 \text{ } \mu\text{m}$, $\mu = 1.81 \times 10^{-5} \text{ kg/(m} \cdot \text{s)}$, $K = 1.38 \times 10^{-23} \text{ J/K}$.

3) 水汽在人工冰核上的凝华核化 (S_{DV})

当 $q_v \geq q_{vs}$ (饱和) 时,

当 $5^\circ\text{C} \leq \Delta T \leq 20^\circ\text{C}$,

$$S_{DV} = m_s \frac{dN_{ad}(\Delta T)}{dt} = w \frac{\partial [X_s N_a(\Delta T)]}{\partial Z} / N_a(20^\circ\text{C}), \quad (14)$$

上式中的 $w \frac{\partial [X_s N_a(\Delta T)]}{\partial Z} < 0$ 时, 取 $S_{DV} = 0$;

当 $\Delta T \geq 20^\circ\text{C}$,

$$S_{DV} = m_s N_{ad}(\Delta T) = X_s N_a(\Delta T) / N_a(20^\circ\text{C}), \quad (15)$$

其中 $N_{ad}(\Delta T) = X_s / m_s N_a(\Delta T) / N_a(20^\circ\text{C})$ 是 ΔT 温度下人工冰核的凝华活化数。

由于 AgI 粒子的成核作用, 使得水成物和冰晶浓度发生变化, 相应的过程是: 云滴冻结成冰晶 (NU_{csi} , NNU_{csi}), 雨滴冻结成霰 (NU_{rsg}), 水汽在人工冰核上凝华成冰晶 (NU_{vsi} , NNU_{vsi}), 则

$$\begin{aligned}
 NU_{csi} &= q_c N_{ac}(\Delta T) / (\Delta t N_c) \\
 &= -q_c (S_{BC} + S_{IC}) N_a(\Delta T) / N_a(20^\circ\text{C}) m_s^{-1} N_c^{-1},
 \end{aligned} \quad (16)$$

$$\begin{aligned}
 NU_{rsg} &= q_r N_{ar}(\Delta T) / (\Delta t N_r) \\
 &= -q_r (S_{BR} + S_{IR}) N_a(\Delta T) / N_a(20^\circ\text{C}) m_s^{-1} N_r^{-1},
 \end{aligned} \quad (17)$$

$$NU_{vsi} = m_{io} S_{DV} m_s^{-1}, \quad (18)$$

$$NNU_{csi} = NU_{csi} / \bar{m}_c, \quad (19)$$

$$NNU_{vsi} = NU_{vsi} / m_{i0}. \quad (20)$$

其中 $N_{ac}(\Delta T)$, $N_{ar}(\Delta T)$ 分别是 ΔT 温度下云、雨滴收集的活化冰核数。这样, 方程 (1)、(2) 中的冰相微物理源汇项可表示为

$$I_{N_i} = NNU_{vi} + NHNU_{ci} + NMUF_{gi} + NMUR_{gi} + NNU_{csi} + NNU_{vsi}$$

$$-NVD_{vi} - NCN_{ig} - NFR_{ig} - NCL_{ig} - NML_{ic}, \quad (21)$$

$$I_{X_s} = -S_{BC} - S_{IC} - S_{BR} - S_{IR} - S_{DV}. \quad (22)$$

3. 数值计算方法

采用标准空间交错网格系统, 模拟域为水平 35 km, 垂直 18.5 km, 水平格距 1 km, 垂直格距 0.5 km. 为抑制声波扰动, 采用时间分离技术, 用较小时步 $\Delta\tau = 2$ s 积分声波有关项, 大时步 $\Delta t = 10$ s 积分其他项. 大时步时间差分用二阶蛙跃格式, 小时步用向前差分, 垂直差分用半隐式格式. 水平平流用四阶差分近似, 垂直方向用二阶差分近似, 其余空间差分均用二阶中央差分.

设置上边界海绵吸收层来控制声波和重力波的反射, 分别使用平衡调整和饱和凝结调整来处理冷、暖微物理过程, 见文献[7].

三、播撒试验

假设播撒物质 AgI 由火箭、飞机等直接送入云中温度 -10°C 左右、上升气流较强的区域 (一般为 $3\text{km} \times 0.5\text{km}$). 利用前面建立的二维催化模式, 试验了三个不同环境场条件下的播云效果, 分析了 AgI 粒子的成核作用, 表 1 是三个环境场的部分参数. A 例暖雨过程非常重要, 是一个强降水过程, B 例由冷云过程导致降水, 是一个弱降雪过程, C 例是由暖过程启动, 冷过程产生大量降水、降雪的强对流过程. 各例均模拟了 52 min 的积云对流过程, 其中对 1988 年 6 月 27 日发生在宁夏固原地区午后的一次降雪过程 (B 例, 见图 1) 作了比较详细的讨论.

表 1 初始环境场参数

个例	地面温度 ($^\circ\text{C}$)	0 $^\circ\text{C}$ 层高度 (km)	-40 $^\circ\text{C}$ 层高度 (km)	最大相对湿度 (%)	高湿区位置 (km)	0—10 km 层平均 温度递减率 ($^\circ\text{C}/\text{km}$)
A	26	3.3	12.6	89	1.75—2.25	5.48
B	25	2.8	9.5	80	2.50—3.00	6.50
C	21	2.1	7.8	95	1.75—2.75	7.85

1. AgI 粒子成核作用的分析

AgI 粒子撒入云中后, 随气流运动, 通过布朗运动和重力碰并与云中水成物 (云、雨滴) 接触成冰起冻结核作用, 并在 -5°C 以下, AgI 粒子被活化, 温度降低, 活化加强, 活化的 AgI 粒子起凝华核作用, 云中的水汽在其上形成冰晶. 表 2 给出了各播撒例的情况和 52 min 累计起各种冰核作用的播撒物质量 (AgI 的汇) 占总播撒量的百分比. 由表可见, 大多数的 AgI 粒子起凝华核作用. 三个不同环境条件成核率可相差几十倍, 云顶温度低的云中播撒物质的成核率高, 最冷最湿的 C 环境最高 (达 90% 以上), 较暖最干的 B 环境次之 (35%—74%), 最暖较湿的 A 环境最低 (小于 5%). 接

触核化中主要是云滴与 AgI 粒子之间的布朗运动碰并收集 (小于 0.5%), 云、雨滴的惯性碰并收集均很小 (小于 0.01%), 而雨滴的布朗运动收集机制几乎不消耗 AgI 粒子。

比较 Orville^[1]的结果, 定性是一致的。凝华 (包括凝结—冻结) 核化的作用很大, 接触核化作用很小 (0.5% 以下), 而且冷底云中 AgI 粒子的成核率比暖底云高。

2. 宁夏雷云 (B 例) 的播撒模拟

BS 例的播撒情况见表 2, 相同环

境场未播撒例 BN 作为对比。图 2 是 BN 和 BS 例 20 min 垂直剖面图。比较可见, 两者的流场基本一致 (图 2a), 主要差别是水成物场的分布: BS 例的冰相物质范围大大超过 BN 例, 且冰晶比含量 q_i 达到 0.01 g/kg (图 2b 中阴影区) 已有相当范围, 而 BN 例 q_i 均小于 0.01 g/kg , 冰晶浓度 N_i 增大到了 10^4 个/kg , BN 例的 N_i 只有 10^2 个/kg (图 2d), 同时冰晶凝华潜热释放使得 3°C 的等位温偏差 θ' 范围变大 (图 2c)。以后随着云的发展, 云中冰化程度显著提高。图 3 是 24 min 两例 $X-Z$ 剖面水成物分布, BS 例的冰质粒迅速增加, 云水则大大减少。随着降水降雹的发展, 对流不断减弱, 云中液水和霰 (雹) 含量也很快减少, 到第 52 min 模拟结束时, 云中液水和霰含量只有 0.01 g/kg , BS 例最大风速比 BN 例小 0.4 m/s , 冰质粒 (主要以冰晶云砧存在) 含量小于 BN 例, 降雹强度也小于 BN 例。

表 2 各播撒例情况及 52 min 累计 X_s 汇项百分比 (%)

播撒例	AS	AM	BS	BT	BM	BL	BP	CMS	CNS
总播撒量(g/km)	454	231	460	460	1993	102	460	409	409
播撒时间(min)	20	20	17	20	17	17	17	20	20
播撒水平格点	(17,19)	(12,24)	(17,19)	(17,19)	(12,24)	(17,19)	(14,16)	(17,19)	(17,19)
播撒高度(km)	5.25	4.75	3.75	3.75	3.75	3.75	3.75	3.75	3.75
SBC	0.4762	0.1169	0.4130	0.4565	0.2659	0.4374	0.2609	0.3912	0.4156
SIC	0.0061	0.0032	0.0052	0.0059	0.0033	0.0053	0.0033	0.0049	0.0053
SBR	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
SIR	0.0009	0.0010	0.0011	0.0030	0.0006	0.0014	0.0006	0.0009	0.0010
SDV	3.084	2.338	58.7	73.9	35.6	58.8	37.0	92.9	95.4

注: SBC, SIC 分别是由于布朗运动和重力碰撞云滴与 AgI 粒子的接触核化过程; SBR, SIR 分别是由于布朗运动和重力碰撞雨滴与 AgI 粒子的接触核化过程; SDV 是水汽在 AgI 粒子上的凝华核化过程。

图 4 给出了 BN 例和 BS 例中冰相过程总转换率 (对整个云体求和) 及地面总降水 (雹) 量的差值随时间变化曲线, 若 BS 例大, 则为正。在云发展初期 17 min 播撒作业

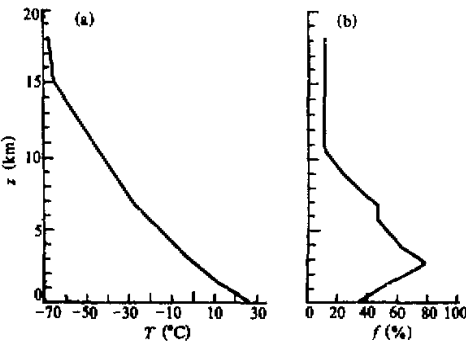


图 1 B 例温湿层结

(a) 温度, (b) 相对湿度

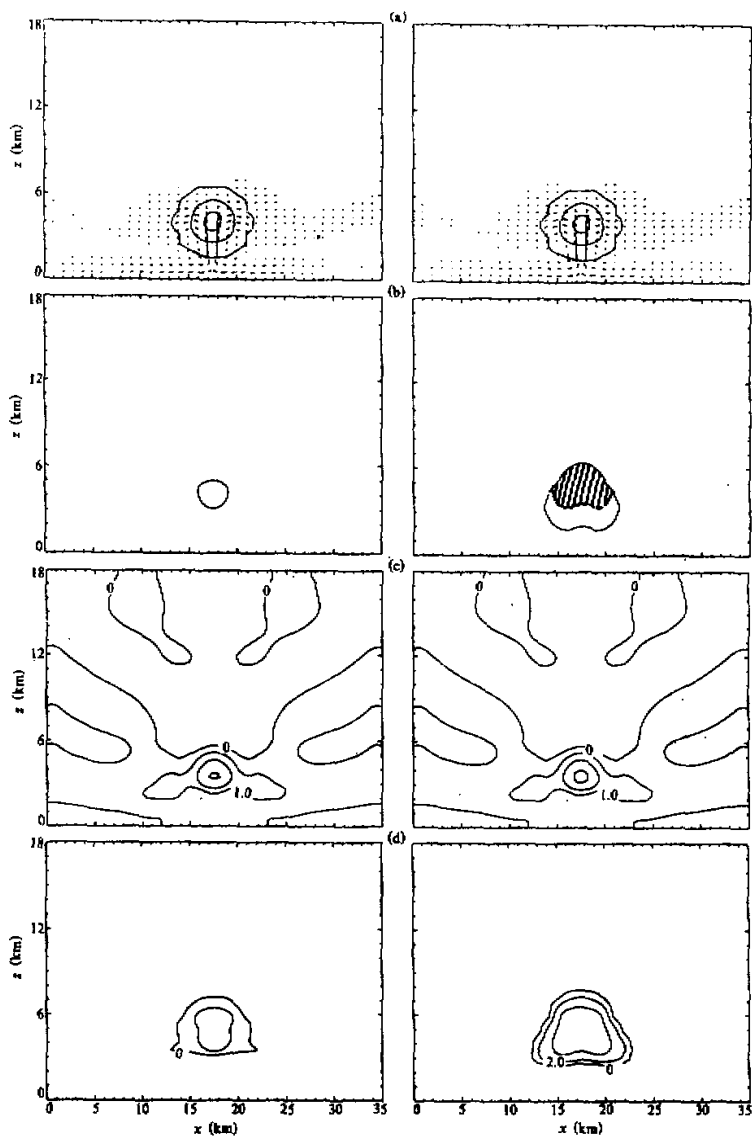


图2 BN和BS例20 min (X-Z) 剖面图

左边是BN例, 右边是BS例, (a) 风矢和 q 场, 等值线间隔 1 g/kg ; (b) $(q_t + q_g)$ 场, 间隔 1 g/kg , 阴影区域是 $q_t > 0.01 \text{ g/kg}$ 的范围, (c) θ 场, 间隔 1°C , (d) $\text{LOG}(N_d)$, 间隔2个量级 (N_d 单位: 个/ kg), (a)、(b) 中外廓线为 0.01 g/kg

后, AgI 粒子发生凝华核化, 产生大量冰晶, 由于云中存在丰富云水, 冰晶通过凝华和结淞过程 ($VD_{vi} + CL_{ci}$) 迅速长大, 随后有一部分向霰转化 (CN_{ig}), 同时大量的雨滴被人工引入的冰晶碰冻成霰 (FR_{rg}), 产生了许多初始霰胚, 霰对云水的收集

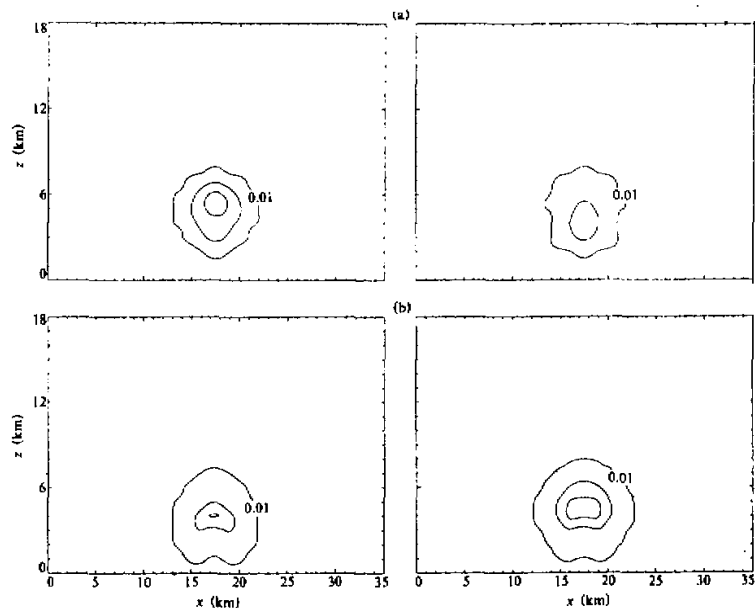
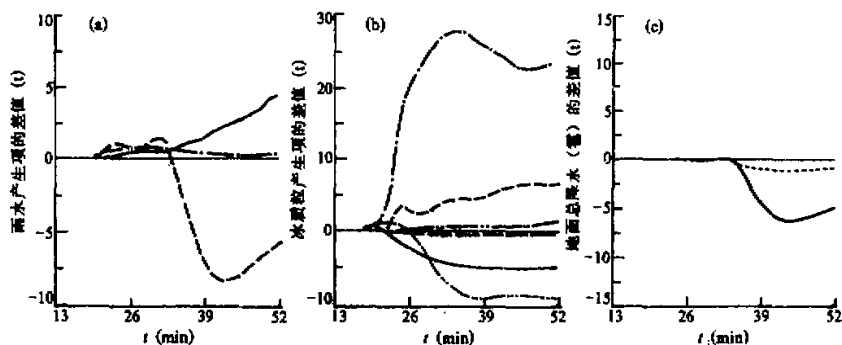
图3 BN和BS例24 min ($X-Z$) 剖面图说明同图2, (a) q_e 场, (b) $(q_l + q_s)$ 场

图4 BN和BS例冰相过程总转换率及总降水(雹)量差值的时变曲线, 若BS例大, 则为正

- | | | |
|----------------------------|----------------------------|-------------------------------|
| (a) 冰晶融化率 ML_{ic} ——— | 霰融化率 ML_{gr} - - - | 湿增长脱落雨水率 CL_{neg} - · - · - |
| (b) 雨滴碰冻率 FR_{rg} ——— | 冰晶向霰自转化率 - - - | 冰晶凝华结凇增长率 - · - · - |
| | CN_{rg} - · - · - | $VD_{vi} + CL_{ci}$ - - - |
| 霰收集云水率 CL_{cg} - · - · - | 霰收集冰晶率 CL_{ig} - · - · - | 霰收集雨水率 CL_{rg} - - - |
| (c) 总降水量 ——— | 总降雪量 - · - · - | |

(CL_{cg}) 略有增强, 云中温度的升高使得霰的湿增长脱落成雨水 (CL_{neg} , CL_{rg} 中的负值部分) 变大, 冰质粒落入暖区融化成云雨 (ML_{ic} , ML_{gr}), 使这两项变大。

26 min 以后, 随着升速的减弱和冰晶凝华、结凇过程的加强, 大量的霰粒因云

(雨) 水的不足不易长大, 雨滴的碰冻过程也减弱, 虽然冰晶自转成霰的过程仍增大, 但是霰(雹)的主要生成项(CL_{eg} 、 FR_{rg} 和 CN_{ig})的累计总和使得云中霰量减少, 导致其融化成雨的过程也减弱, 雨水含量减小。

表 3 列出了 52min 各例部分宏观特征参数值, 由表可见, BS 例播撒的结果使地面降水提前了 1min, 最大增速值减小了 1.4m/s , 但提前 1min 达到, 总降雹减少 24.3%, 总降水减少 13.8%, 地面最大降雹量和降水量分别减少了 16.7%和 2.0%, 降水效率降低, 达到了消雹效果。

表 3 52 min 各例部分宏观特征参数值

算例	峰值 $W_{\max}$ (m/s)	达到峰 值时间 (min)	地面累计 最大雨量 (mm)	地面累计 最大雹量 (mm)	52min 降水效率 (%)	降水起 始时间 (min)	降雹起 始时间 (min)	地面总 降水量 (t)	地面总 降雹量 (t)
AN	18.5	27	32.0	0.1	29.17	18	30	120.0	0.22
AS	18.3	27	31.9	0.1	27.21	18	30	114.4	0.14
AM	18.3	26	33.6	0.1	30.44	18	30	124.3	0.16
BN	19.4	25	9.9	1.8	11.42	23	24	35.4	3.7
BS	18.0	24	9.7	1.5	9.18	22	24	30.5	2.8
BT	19.4	25	9.7	1.9	9.98	23	24	33.0	3.5
BM	18.3	24	9.2	1.4	8.36	22	24	29.5	2.8
BL	18.4	25	10.0	1.5	10.63	22	24	33.8	3.1
BP	19.3	25	9.5	1.7	10.07	23	24	34.0	3.5
CMN	24.4	36	21.2	16.3	19.06	21	25	60.3	24
CMS	24.7	36	20.7	15.0	16.04	21	24	53.2	22
CNN	23.8	38	21.8	19.2	25.44	21	28	76.5	32
CNS	24.1	37	23.1	18.7	21.25	21	24	66.5	29

3. B 例不同播撒方案催化效果的比较

分析表 3, 可以看出:

BT 例的播撒时间比 BS 例推迟了 3 min。该例几乎没有影响云的动力过程, 消雹效果比 BS 例差。52 min 总降水减小了 6.8%。地面最大雨量减小了 2.0%, 总降雹减少了 5.4%, 而最大雹量却增加了 5.6%, 即云体发展较成熟时, 播撒对其作用减小, 总降雹量减小了, 但地面最大雹量却有所增加, 从消雹的角度看, 这是不可取的, 因此必须选择适宜的播撒时间。

BL 和 BM 两例具有与 BS 例相同的播撒时间和高度, 只是 BM 例的播撒范围增大为 BS 的 4 倍多, BL 的播撒强度只有 BS 的 $1/4$, 结果 BM 例总降雹量与 BS 例相同, 最大雹量减小了 0.1 mm, 该例消雹效果比 BS 略大, BL 例的最大雨量比 BN 例增大了 1%, 但消雹程度比 BS 例差。

与 BS 例相比, BP 例的播撒位置不在上升气流中心, 而是向左平移了 3km, 该例对地面降水、降雹以及动力过程影响较小, 且对播撒物质利用率较低, 说明取得明显播云效果的必要条件是合适的播撒位置——上升气流中心。

4. 不同环境条件的播撒模拟

A 例环境较暖, 0°C 层较高, 降雪量很小, 两例播撒 (AS 和 AM) 的消雹作用很小, AM 例播撒强度较低, 却获得了增雨消雹的作用, 可见较暖较弱的云较小播撒量可获增雨效果 (见表 3)。

C 环境温度较低, 上升气流中心位于云的冷区, 适宜冰质粒的增长。CMN 例考虑了繁生过程, 云中冰晶浓度较大, CNN 例反之。播撒以后, CNS 例的消雹效果比 CMS 例好, 最大雨量有所增加, 有增雨作用。52minCNS 和 CMS 例的消雹效果分别是 9.4% 和 8.3% (见表 3)。

本节分析可以看出引入人工冰核影响降水 (雹) 的过程, 在云发展初期引入播撒物质 AgI 粒子, 主要通过凝华核化过程形成大量的人工冰晶 (浓度可达 10^6 个/kg), 这些冰晶通过凝华结淞增长尺度变大, 部分冰晶转化成霰 (一般在播撒后 4 min 左右); 同时人工冰晶碰冻雨滴在雨水丰富的环境中产生大量的霰粒, 其碰并收集云水和冰晶长大, 一部分落入 0°C 层融化, 地面降水 (雹) 的时间提前或量值增加。十几分钟以后, 云中液水因冰质粒的收集消耗很多, 碰冻过程大大减弱, 大量的冰质粒争食液水, 不易长大, 对降雪起负作用; 而大量冰晶的凝华增长仍很活跃, 自转化和霰收集冰晶过程对云中霰 (雹) 的增加起正作用。这 5 个霰 (雹) 产生项 (FR_{rg} 、 CL_{rg} 、 CL_{rg} 、 CN_{ig} 、 CL_{ig}) 的累加效果 (正或负) 将会决定地面降雹的增减。在本文模拟的 9 个播撒例中, 降雹都是减小的。液水的消耗削弱了暖雨过程, 霰粒的减小减弱了融化过程, 雨水的源项减小, 降水量减小。但是对于引入较低 AgI 粒子强度的 AM 例和 BL 例, 既没有影响云的暖雨过程, 又稍增了霰 (雹) 融化成雨的能力, 降水略增强。

在上述三个环境条件下, 较干的宁夏雹云的适当播撒, 消雹效果最好, 达 16.7% (BS 例), 说明对宁夏雹云进行播撒作业可取得防雹效果。

四、结 语

本研究考虑了较详细的冰晶形成和生长过程, 用守恒方程计算冰晶浓度。为了研究实际人工防雹作业, 引入了播撒物质比含量的守恒方程, 模拟了播云作业效果。结论是:

1) AgI 主要作为凝华核 (包含凝结—冻结核) 在云中形成冰晶, 不同的环境条件中 AgI 粒子的成核率相差几十倍, 温度较冷、层结不稳定的环境中成核率高, 可达 90% 以上, 接触核化作用一般只占 0.5% 以下, 可以不考虑。

2) 播撒的时间、位置和播撒量很重要。一般在云发展初期 (15—20min)、云顶温度达 -10°C 以后、云中上升气流 ($X-Z$ 剖面, $3\text{ km} \times 0.5\text{ km}$ 的区域内) 中心播撒约 400 g/km 的 AgI 粒子会获得消雹效果。减小播撒强度, 可以获得增雨作用, 但消雹效果变差 (AM 例和 BL 例)。

3) 环境条件与播云效果关系甚大, 对环境温度低、发展初期冰晶浓度小的冰雹云进行适当位置、适当时刻、适量的播撒, 可获最佳效果。宁夏雹云的播云模拟消雹效果明显。

参 考 文 献

- [1] Hsie, E.Y., R.D. Farley and H.D. Orville, 1980, Numerical simulation on ice-phase convective cloud seeding, *J. Appl. Meteor.*, **19**, 950—977.
- [2] Orville, H.D. and F.J. Kopp, 1977, Numerical simulation of the life history of a hailstorm, *J. Atmos. Sci.*, **34**, 1596—1618.
- [3] Farley, R.D. and H.D. Orville, 1986, Numerical modeling of hailstorms and hailstorm growth: Part I. Preliminary model verification and sensitivity tests, *J. Climate Appl. Meteor.*, **25**, 2014—2036.
- [4] Kopp, F.J., 1988, A simulation of Albrecht cumulus, *J. Appl. Meteor.*, **27**, 626—641.
- [5] 毛玉华、胡志晋, 1993, 强对流云人工增雨和防雹原理的二维数值研究, *气象学报*, **51**, No.2, 184—194.
- [6] 胡志晋、何观芳, 1987, 积雨云微物理过程的数值模拟, (一) 微物理模式, *气象学报*, **45**, No.4, 467—483.
- [7] 孔凡铀、黄美元、徐华英, 1990, 对流云中冰相过程的三维数值模拟: (I) 模式建立及冷云参数化, *大气科学*, **14**, No.4, 441—453.
- [8] 孔凡铀、黄美元、徐华英, 1991, 对流云中冰相过程的三维数值模拟: (II) 繁生过程作用, *大气科学*, **15**, No.6, 78—83.
- [9] Blair, D.N., B.L. Davis and A.S. Dennis, 1973, Cloud chamber tests of generators using acetone solutions of AgI—NaI, AgI—KI and AgI—NH₄I, *J. Appl. Meteor.*, **12**, 1012—1017.

Numerical Experiments on Hail Suppression by AgI Seeding

Huang Yan and Xu Huaying

(Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029)

Abstract

A two-dimensional fully elastic numerical model of hailstorm seeding including ice crystal concentration equation and seeding material (AgI particles) equation has been developed. Three nucleation mechanisms of artificial ice nuclei are described, which are deposition nucleation (including condensation-freezing nucleation), contact freezing nucleation — Brownian and inertial impact collection due to cloud droplets and raindrops. The seeding effects on hail suppression with various hailstorms and seeding methods are discussed. Results indicate the suitable conditions for hailstorms seeding and suitable seeding method.

Key words: hail suppression; modeling experiments; seeding method; nucleation mechanism.