

盐粉催化积云降水的数值模拟

徐华英 郝京甫

(中国科学院大气物理研究所)

提 要

本文利用二维直角坐标非定常积云降水模式模拟播撒盐粉催化降水过程。播撒是在云中一个网格点中一次引入盐粉,盐粉进云后碰并云滴长大并随云中气流移动和沉降。在计算盐粉成雨的同时还计算自然成雨。

计算结果表明,在合适条件下,盐粉催化后约半小时可出现增雨,增加雨量为10%—50%,它是播撒量的几千倍。盐粉直径小的降雨效率高,但在云中生长时间长,一般采用几十微米至一百微米直径的盐粉为宜。

一、引 言

盐粉是暖云人工降水广泛采用的一种催化剂。人工降雨试验中利用飞机穿云播撒盐粉,有时取得一定的增雨效果。盐粉催化降雨的原理是清楚的,即盐粉粒子可作为大云滴,在云中通过凝结和碰并增长过程形成雨滴,增加降水。但在人工降雨试验中还要弄清楚选什么云,播撒盐粉采用多大剂量,颗粒多大,选取云的哪个部位和什么时机播撒才能获得较好的效果,以及估计盐粉催化积云降水的效果可能有多大。

六十年代初期顾震潮等提出大颗粒、大剂量、云顶播撒的催化方法,他们给定了积云内含水量和上升气流,计算单个盐粒在云中增长和运动,用出云盐水滴的大小来估计增雨效果,但由于没有考虑云的演变及云滴和盐粒增长的相互制约,有很大的局限性。

随着积云数值模式的建立,有可能计算在播撒盐粉的云中,自然成雨与引入盐粒成雨的总降水量,云中各参量也是通过积云发展中相互作用计算出来的^[1-3]。但是对于盐粉催化来讲,使用一维定常模式来模拟盐粉瞬时播撒是有问题的。如果看作拉格朗日坐标,即描述积云气团上升中云雨形成过程,就无法计算盐粒长大落出上升气团之后的增长过程。一维非定常模式可以克服这个缺点,但应注意避免夸大剂量。因为一维模式中的盐量表示云的整个横截面上平均盐含量,应比播撒区域里的盐含量小得多。

我们用二维平面对称积云降水模式^[4]来讨论盐粉催化降水。在此模式中可以用云中一个网格点上一次给定盐粉含量来模拟飞机穿云播撒。盐粉进云后随云中气流移动和扩散,并按其落速沉降,盐粒碰并云滴长大成雨同时还考虑云中自然成雨过程,能较好地模拟盐粉催化积云降雨。

1982年11月7日收到修改稿。

二、模 式

播撒的干盐粉在进云初期的凝结增长率大大超过碰并增长率。假设单个干盐粒质量为 10^{-7} 克, 相当于盐粒直径 44.5 微米, 在饱和空气中大约经过 15 分钟可以凝结长大到 100 微米(相当于 10^{-6} 克), 但要凝结长大到 200 微米约需要 6 小时, 而对于 100 微米的水滴在 0.1 克/米³ 含水量的云中碰并增长率 (0.02 微米/秒) 已超过其凝结增长率了, 即对于质量为 10^{-7} 克的干盐粒来说, 凝结增长到 100 微米以上就可以只考虑碰并增长了。因此可以认为播撒干盐粉进云后通过凝结过程含盐粒子质量迅速增加一个量级, 以后便以碰并过程增长。

在盐粉催化积云降水模式中只计算碰并增长过程, 将干盐粒通过凝结过程质量增大一个量级(即直径增大一倍多)作为初值代入模式, 并定义含盐水量为单位体积空气中以盐粒为胚胎的含盐水滴总重量, 盐粉催化成雨量即落到地面的含盐水量。在盐粉催化积云降水模式中引进了这个参量——含盐水量 L (克/克)。

飞机播撒剂量约为每公里几十公斤, 考虑通过凝结增长其质量增加一个量级, 在 500×500 米² 网格点中含盐水量为 10^{-3} 克/米³, 在计算中为了取得较明显的效果, 提高 1—2 个量级, 选用初始含盐水量为 10^{-2} 及 10^{-1} 克/米³, 盐粒的初始直径取 100 微米及 200 微米。

二维平面对称非定常积云降水数值模式^[4]考虑了盐粉催化后, 在垂直运动方程中应加上含盐水量 L 的拖带力, 在云水方程中应减去云水通过含盐水滴的碰并转成含盐水量 P_s 值, 由于雨滴和盐粒之浓度都不大, 可以不考虑它们之间的相互碰并, 即无相互转换, 这样可以写出积云运动方程:

$$\frac{du}{dt} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P'}{\partial x} + K \Delta u \quad (1)$$

$$\frac{dw}{dt} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P'}{\partial z} + g \left(\frac{T'}{\bar{T}} + 0.61 Q - M - R - L \right) + K \Delta w \quad (2)$$

式中 u, w 为水平和垂直运动速度, P' 为大气压力偏差, ρ 为空气密度, g 为重力加速度, K 为湍流交换系数, $\bar{T}$ 和 T' 分别为空气平均温度和温度偏差, Q 为比湿, M 为云水, R 为雨水。

适应于深厚对流的连续方程是

$$\frac{\partial \rho u}{\partial x} + \frac{\partial \rho w}{\partial z} = 0 \quad (3)$$

引进流函数 ϕ

$$\rho u = \frac{\partial \phi}{\partial z}, \quad \rho w = -\frac{\partial \phi}{\partial x} \quad (4)$$

定义涡度 Ω

$$\Omega = \frac{\partial \rho u}{\partial z} - \frac{\partial \rho w}{\partial x} = \frac{\partial^2 \phi}{\partial z^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} \quad (5)$$

将(1)式乘 ρ 对 z 取偏微商, (2)式乘 ρ 对 x 取偏微商, 两式相减并代入方程 (3)、(4)

和(5),略去三阶无限小量则得到涡度方程

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial uQ}{\partial x} + \frac{\partial wQ}{\partial z} = uw \frac{\partial^2 \rho}{\partial x^2} + wQ \frac{1}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial z} - 2wu \frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial \rho}{\partial z} \right)^2 - \rho g \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{T'}{\bar{T}} + 0.61Q - M - R - L \right) + K\Delta Q \quad (6)$$

根据热流入量方程对于温度偏差可以得出以下方程

$$\frac{\partial T'}{\partial t} + \frac{\partial uT'}{\partial x} + \frac{\partial wT'}{\partial z} + T' \frac{w}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial z} = (\gamma - \gamma_s)w + \frac{L}{C_p} (P_1 - P_4) + K\Delta T' \quad (7)$$

水汽守恒方程

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial uQ}{\partial x} + \frac{\partial wQ}{\partial z} + Q \frac{w}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial z} = P_4 - P_1 + K\Delta Q \quad (8)$$

云水方程

$$\frac{\partial M}{\partial t} + \frac{\partial uM}{\partial x} + \frac{\partial wM}{\partial z} + M \frac{w}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial z} = P_1 - P_2 - P_3 - P_5 + K\Delta M \quad (9)$$

雨水方程

$$\frac{\partial R}{\partial t} + \frac{\partial uR}{\partial x} + \frac{\partial wR}{\partial z} + R \frac{w}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial z} = \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial z} (\rho V_R R) + P_2 + P_3 - P_4 \quad (10)$$

式中 $\gamma = \frac{\partial \bar{T}}{\partial z}$ 为大气温度垂直递减率, γ_s 为干绝热温度递减率 ($\gamma_s = Ag/C_p$, A 为热功当量), L 为水的汽化潜热, C_p 为定压比热, V_R 为雨水群滴的下落末速度, P_1 为云水凝结量, P_4 为雨水蒸发量, P_2 为云水向雨水的自动转换量, P_3 为云水通过雨水的碰并转化为雨水量, P_5 为云水通过含盐水滴的碰并转化为含盐水量。

含盐水量方程与雨水方程类似

$$\frac{\partial L}{\partial t} + \frac{\partial uL}{\partial x} + \frac{\partial wL}{\partial z} + L \frac{w}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial z} = \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial z} (\rho V_L L) + P_5 \quad (11)$$

式中 V_L 为含盐水滴相对空气的降落速度。

根据重力碰并规律可以写出碰并增长率 P_5

$$P_5 = \frac{\pi}{4} D_L^2 E V_L M \rho N_L \quad (12)$$

式中 N_L 和 D_L 分别为盐粒浓度和直径, E 为捕获系数计算中取 $E = 1$ 。盐粒直径 D_L 可以通过含盐水量 L 和盐粒浓度 N_L 确定

$$D_L = \sqrt[3]{6L/\pi N_L \rho_L} \quad (13)$$

式中 ρ_L 为含盐水滴的密度,对于不太小的含盐水滴可以考虑 $\rho_L \approx 1$ 克/厘米³。

盐粒浓度 N_L 在整个空间无增减,只随气流运动改变在空间的分布,可以写出盐粒浓度方程:

$$\frac{\partial N_L}{\partial t} + \frac{\partial uN_L}{\partial x} + \frac{\partial wN_L}{\partial z} + N_L \frac{w}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial z} = \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial z} (\rho V_L N_L) \quad (14)$$

我们假设初始时刻大气是静止的,无云雨,大气中温湿按给定层结分布,地面为粗糙表面,上边界和侧边界保持环境之初始状态。当近地层有一小扰动,它的发展便出现了大

气中的对流和云的演变。

在云发展初期于云的中心上部一个网格点中引入盐粉,计算在云中增长和运动情况,落到地面的含盐水量 L 就是盐粉催化的雨量。模式中还计算了自然成雨过程,落到地面的雨水量 R 为自然雨量,两者之和便是播撒后的总降雨量。

三、播撒结果

在云发展初期引入盐粉,计算云与降水演变情况,与不播撒盐粉的云进行对比,分析播撒效果。

1. 播撒后降水情况

我们选取大气层结中性不稳定,下层湿度较大天气条件下(整层温度垂直递减率 $\gamma = 0.6^{\circ}\text{C}/100$ 米,相对湿度在 2 公里以下为 90%,2 公里以上为 70%,湍流交换系数为 $400 \text{ 米}^2/\text{秒}$)的一块云。这块云维持近 1 小时,云中最大含水量为 $1-2 \text{ 克}/\text{米}^3$,垂直气流最大值 $3-10 \text{ 米}/\text{秒}$,雨强最大达 $40 \text{ 毫米}/\text{小时}$ 。自然降水总量为 $20 \text{ 吨}/\text{米}$ 。在发展初期云厚不到 3 公里,水平宽度为 2 公里,在发展旺期云厚 5 公里以上,水平宽度为 4 公里。

云发展到 6 分钟时,在云中心一个网格点中引入盐粉,参加碰并过程的初始直径为 200 微米,含盐水量 $0.1 \text{ 克}/\text{米}^3$ 。图 1 为盐粒碰并云滴长大形成的全云总盐水量及降落到地面上的累积含盐水量随时间的演变。由图可见盐粒碰并增长率较高,播撒盐粒后 15 分钟(即云发展到 21 分钟时)云内总盐水量达 250 公斤/米,增加了一个量级,又经过 13 分钟(即 34 分钟)达 2.5 吨/米,增加了两个量级。降落到地面累积含盐水量出现较晚,但发展很快。大约播撒盐粒后 20 分钟地面上才开始出现累积含盐水量,云发展到 44 分钟以后降落到地面的累积含盐水量超过云中总含盐水量,到 60 分钟时降落到地面的累积含盐水量已达 7.6 吨,超过初始含盐水量的 300 倍,而此时云中含盐水量不到地面累积含盐水量的 $1/6$,可见含盐水量转成地面降水的效率

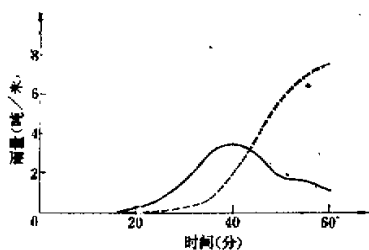


图 1 云内及地面上累积含盐水量的演变

实线: 云中含盐水量

虚线: 地面累积含盐水量

是不低的。我们将降落到地面的累积含盐水量称为播撒雨量。

含盐水量是从云水转换得来的,含盐水量的增加必然造成云水量减少,自然成雨量也就减少了。图 2 为播撒与不播撒情况雨量的演变。由图可见播撒后自然雨量(地面累积降雨量)减少了,而与播撒雨量相加之总雨量可高于不播撒的雨量。由图中不播撒雨量与播撒的总雨量之比的曲线可见,在播撒后先出现雨量比减少,后期雨量比增加,最大雨量比为 1.20,即最大雨量增加率为 20%,到降雨最终时刻总雨量增加率维持在 15% 左右,增加雨量为 $3.1 \text{ 吨}/\text{米}$ 。

2. 另一块云的播撒情况

另外选取了一块大气层结比较稳定(下层 $\gamma = 0.6^{\circ}\text{C}/100$ 米,上层为 $0.5^{\circ}\text{C}/100$ 米,相对湿度下层 0.8,上层 0.7, $K = 250 \text{ 米}^2/\text{秒}$)的云,这块云也维持约 1 小时,最大云厚

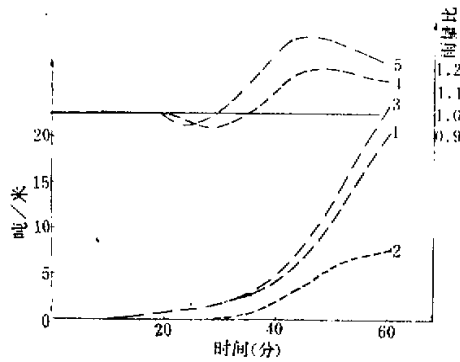


图2 雨量的演变

(积云 I, 撒盐 200 微米, 0.1 克/米^3)

- 线 1: 不播撒
 线 2: 盐雨
 线 3: 总雨
 线 4: 撒盐与不播撒之雨量比
 线 5: 另一自动转换率下之雨量比。

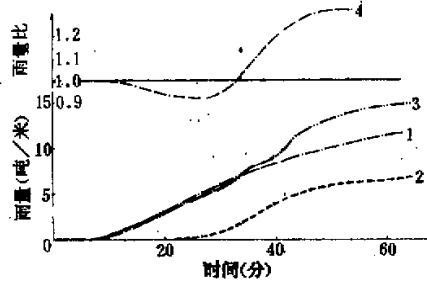


图3 雨量的演变

(积云 II, 撒盐 200 微米, 0.1 克/米^3)

图例同图 2

2.5 公里, 云中含水量大约有一半时间在 1 克/米^3 以上, 最大值近 1.6 克/米^3 , 与上例差不多。上升气流最大为 2.2 米/秒 , 大部分时间为 $1-2 \text{ 米/秒}$, 较上例弱。最大雨强达 6 毫米/小时 , 也比上例小得多。采用的初始含盐水量也是 0.1 克/米^3 , 盐粒直径 200 微米。图 3 为播撒云与不播撒云雨量的演变, 与上例类似, 大约 30 分钟以后才出现播撒云的雨强和雨量加大。雨量增加率达 30%, 而增加雨量不到 2 吨/米, 较上例小。

可见气流弱、降雨量小的云, 在相同播撒条件下, 雨量增加率要相对大一些, 但增加雨量却要小一些。然而增雨的过程相似, 即增雨都主要出现在播撒后 30 分钟以后。

3. 播撒量及粒子大小对降水的影响

我们对上述积云 I 将播撒剂量减小一个量级即 0.01 克/米^3 进行了计算。图 4 为雨量比的演变。由图可见剂量减小 10 倍, 最大雨量比从 1.20 降至 1.04, 总雨量比从 1.15 降

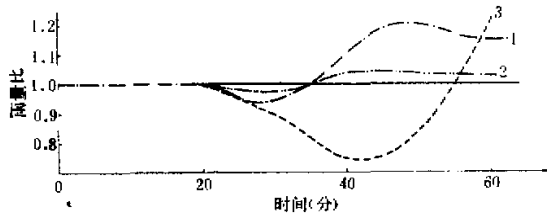


图 4 雨量比的演变

线 3: 撒盐 100 微米, 0.1 克/米^3
 线 1: 撒盐 200 微米, 0.1 克/米^3
 线 2: 撒盐 200 微米, 0.01 克/米^3

至 1.03, 可见剂量减小 10 倍, 雨量增加量减小 5 倍。因此减小剂量后单位播撒物的增雨量, 即播撒效率要提高一些, 但增加雨量要小得多。对积云 I 播撒剂量相同, 初始粒子直径减小一半即 100 微米, 相当于粒子数增加 8 倍。由于粒子数增加碰并率提高, 但粒子小出云成雨较晚, 增雨效果也出现较晚。由图 4 可见, 初始直径 200 微米的在 34 分开始出现增雨, 而 100 微米的全到 55 分才开始出现增雨, 这时虽然云已减弱而雨量还迅速加大, 4 分钟后就超过 200 微米的雨量, 但这时云已渐消, 不能形成较大的雨量。

4. 由以上计算结果看来, 对于生命史较长的云, 播撒直径较小的盐粉, 雨量可有较大的增加。为此我们将积云 II 当发展到 36 分钟时, 在云的中心部位 1×1.5 公里范围内增加温度 1°C , 在 36 分以后云又一次发展, 这块云维持 1 小时 36 分钟, 最大云厚 3.0 公里, 云的最大含水量 1.6 克/米^3 , 最大上升气流速度 3.7 米/秒 , 最大雨强 10.2 毫米/小时 , 均比积云 II 大得多。初始盐粒直径取 100 微米, 初始含盐量分别取 0.1 克/米^3 和 0.01 克/米^3 , 图 5 为播撒与不播撒雨量比随时间的演变。由图可见播撒剂量为 0.1 克/米^3 的雨量从 53 分钟开始增大, 到 96 分钟最大增加雨量 4.7 吨/米, 雨量增加率为 52%, 而播撒剂量为 0.01 克/米^3 的雨量从 43 分钟开始增加, 最大增加雨量 1.6 吨/米, 雨量增加率为 19%。

由此可见, 对于维持时间较长的云, 播撒直径 100 微米的盐粉可以获得显著的增雨效果。在这种云中播撒 100 微米盐粉 0.01 克/米^3 的增加雨量与播撒 200 微米盐粉 0.1 克/米^3

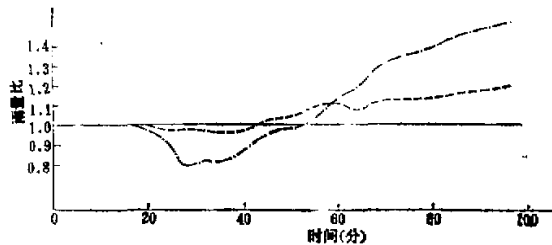


图 5 雨量比的演变

(积云 III)

点划线: 撒盐 100 微米, 0.1 克/米^3
 虚线: 撒盐 100 微米, 0.01 克/米^3

的增加雨量差不多。因此小颗粒盐粉播云的剂量可以少些,但也只对持续时间一个多小时的云才有效。

5. 自然降水生成率与播撒效果

在本模式中云中自然降水生成率是用参数化方法计算的,包括云滴之间碰并成雨滴以及雨滴碰并云滴而长大两部分,前者称自动转换,在本模式的计算中用 Berry 随机碰并理论得到的自动转换率 A 。Simpson 模式中更改 Berry 自动转换公式中的两个系数,得到另一个自动转换率 A' 。对于相同的初始云滴浓度和离散度当含水量在 0.2—1.0 克/米³时, $A'/A = 0.71-0.72$,即自动转换率 A' 要小一些。

图 2 中曲线 5 为积云 I 自动转换率取 A' 时的播撒(取 200 微米, 0.1 克/米³)与不播撒雨量之比,由图可见其最大雨量增加率达 34% (自动转换率为 A 时为 20%)。最终雨量增加达 22% (A 时为 15%) 增加雨量为 4 吨/米 (A 时为 3.1 吨/米)。

这里不讨论云雨自动转换率如何选取,但从以上计算可见,较小的自动转换率会有较大的播撒效果。由于前面计算中所取的自动转换率 A 较大,可以认为给出的播撒效果偏低。

6. 播撒云宏观特征变化不大,播撒云的含水量在撒盐后略减小,这是由于盐粒碰并转移了一部分云水造成的。云中最大上升气流在云发展阶段略低于不播撒云,而当云消散阶段又高于不播撒云,这反映云中水量改变对气流的拖带作用。

四、小 结

1. 撒盐后盐粒在云中增长,大约要经历半个多小时,在地面上才会出现降水增加。因此撒盐时间应适当早些。

2. 播撒直径较小的盐粉在云中增长的时间长,而降雨效率要高得多。因此对于生命史较长的云可采取较小颗粒播撒。一般取盐粒直径几十微米至 100 微米为宜。

3. 盐粉催化增雨可能提高雨量百分之十至五十或者说增加雨量为播撒量的几千倍。如考虑雨滴破碎,雨量增加率和增加雨量均会有显著提高,但增雨的时间还会后延。

参 考 文 献

- [1] Kiazura, G. E. and Todd, C. J., A model of hygroscopic seeding in cumulus cloud, *J. Appl. Meteor.*, 17, 1758—1768, 1978.
- [2] Johnson, D. B., Hygroscopic seeding of convective clouds, seventh conference on inadvertent and planned weather modification, 134—135, 1979.
- [3] 胡志晋、蔡利株,积云暖雨过程及其盐粉催化的参数化数值模拟,大气科学,3 卷 4 期,1979.
- [4] 徐华英、李桂忱、郝京甫,积云降水过程数值模拟研究(待发表)。

NUMERICAL SIMULATION OF CLOUD SEEDING WITH SALT PARTICLES IN CUMULUS CLOUDS

Xu Huaying Hao Jingfu

(*Institute of Atmospheric Physics, Academia Sinica*)

Abstract

A two-dimensional, time-dependent slab model of cumulus cloud has been used for simulating the rain-formation process of cloud seeding with salt particles. The growth and movement of salt particles seeded into a grid interval of cloud are considered. The results indicate that under suitable conditions the rain can be enhanced about 30 min after cloud seeding with salt particles, the rate of rain enhancement is 10%—50%, it is thousands times greater than seeding amount of salt particles. For a given amount of salt seeding, the smaller the salt particles used for seeding, the greater the precipitation is. However, the onset of the increased precipitation will be later. It has been found that the suitable diameters of salt particles for seeding are within 30—100 μ .