

内蒙古中西部层状云中飞机播撒催化 剂扩散过程的数值模拟*

银 燕

(内蒙古气象科学研究所)

提 要

文章利用自由大气中扩散方程的解析解,对内蒙古中西部春夏季层状云中飞机播撒催化剂的扩散过程进行了数值模拟。在计算过程中考虑了催化剂质点下落速度和湍流系数不同时对扩散的影响,并对结果进行了比较。

引 言

人工影响冷云和降水的基本原理就是将催化剂引入自然云中,促使其核化、繁生,逐步增大形成降水云,从而达到激发或增大降水的目的。因此,在实际作业时,不仅要选准有催化潜力的云,确定使用的催化剂,还要知道催化剂在云中的扩散机制、扩散速度和扩散范围,以及催化剂浓度的时间分布和变化。1992年世界气象组织关于人工影响天气现状的声明中确定了冷云催化的5个程序,其中第3项就是关于催化剂的输送和扩散问题。

实验研究云中催化剂的扩散困难较大:一是云中催化源位置的确定;二是环境条件的同步观测,即对影响催化剂各种因子的同步观测(包括天气形势、风、温等主要气象因子,及大气稳定度、湍流强度、催化剂质点间的相互作用、云滴对催化剂质点的捕获效应和可能的相态变化等);三是催化剂质点的取样问题;等等。因此,目前研究云中催化剂扩散的主要方法,无论国内还是国外,都以理论研究为主。国外从50年代就开始了这方面的研究。苏联学者

最早提出了计算过冷云中干冰形成的冰晶区的扩散公式,到六七十年代先后对面源和线源的扩散问题进行了研究。进入八十年代,对对流云中的垂直线源扩散和对流云底的水平线源研究较多,相继建立了各种理论模式。国内申亿铭等对过冷层状云中飞机播撒催化剂的扩散问题及不同播撒源的情况进行了讨论。本文在他们工作的基础上,对我区中西部地区过冷层状云中飞机播撒催化剂的扩散进行分析。

1 层状云中扩散方程及其解

自由大气中的扩散方程为

$$\begin{aligned} \frac{\partial q}{\partial t} + u \frac{\partial q}{\partial x} + v \frac{\partial q}{\partial y} + w \frac{\partial q}{\partial z} \\ = \frac{\partial}{\partial x} K_x \frac{\partial q}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} K_y \frac{\partial q}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial z} K_z \frac{\partial q}{\partial z} \end{aligned} \quad (1)$$

式中 q 为扩散物质浓度, u , v 和 w 分别代表 x , y 和 z 轴上的分风速, K_x , K_y 和 K_z 分别为 x , y 和 z 轴上的湍流系数, t 为时间。

在层状云中一般水平风速具有若干米/秒的量级,而上升速度只有若干厘米/秒或十分之几厘米/秒大小,故后者可以忽略。催化剂质点以及所形成的小冰晶,当其

* 国家自然科学基金资助项目

尺度达到一定大小时,都具有明显的下沉速度,因此,在计算中应予以考虑。在作业时播撒线是与水平风向垂直的,即飞机飞行路线与 y 轴相合,而与 x 轴成直角,同时,催化剂的播撒是均匀的,这样 $v \frac{\partial q}{\partial y}$ 项也可以消掉。除此,还假定大气是各向同性的,故 $K_x = K_y = K_z$ 。通过上述简化,并考虑质点的下沉作用,则上式变为

$$\frac{\partial q}{\partial t} + u \frac{\partial q}{\partial x} - w \frac{\partial q}{\partial z} = K \left(\frac{\partial^2 q}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 q}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 q}{\partial z^2} \right) - \alpha N_c q \quad (2)$$

就一般情况而言,催化剂质点在云中的扩散过程中有可能遇到云滴,且被后者捕获。这种捕获会减少部分催化剂质点,故在方程(2)中补充云滴捕获项,于是层状云中完整的扩散方程为

$$\frac{\partial q}{\partial t} + u \frac{\partial q}{\partial x} - w \frac{\partial q}{\partial z} = K \left(\frac{\partial^2 q}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 q}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 q}{\partial z^2} \right) - \alpha N_c q \quad (3)$$

式中 α 为云滴捕获系数, $\alpha = K_B + K_T$, K_B 和 K_T 分别代表在布朗运动和湍流扩散作用下的云滴捕获系数, N_c 为云滴浓度。其中

$$K_B = (RT)(3kN)^{-1} [R_d^{-1} + R_c^{-1} + 0.9L(R_d^{-2} + R_c^{-2})] (R_d + R_c)$$

$$K_T = (4v/3)(R_d + R_c)^3$$

$$L = (k\pi^{\frac{1}{2}})(2P\rho_a)^{-\frac{1}{2}}$$

式中 R 为通用气体常数, T 为温度, k 为空气粘滞系数, N 为阿优伽德罗常数, P 为气压, L 为空气分子自由程, ρ_a 为空气密度, R_d 和 R_c 分别代表播撒粒子和云滴半径, v 为横截流线的风速梯度。

在给定如下初始条件

$$\left. \begin{aligned} t=0 \text{ 时, } q &= Q' \delta(x) \delta(y) \delta(Z-H) \\ z=0 \text{ 时, } q &= 0 \\ \sqrt{x^2 + y^2 + z^2} \rightarrow \infty, q &= 0 \end{aligned} \right\} (4)$$

(式中 Q' 为点源的核生成率; $\delta(x)$ 、 $\delta(y)$ 和 $\delta(Z-H)$ 为 Dirac 函数, H 为源高,即飞机播撒高度)对方程(3)求解,得到点源解,然后沿 y 轴对 q 积分,则可求得过冷层状云

和层积云中飞机播撒催化剂问题的无限线源解析解,即

$$q = \frac{Q}{4\pi kt} e^{-\frac{w^2 t}{4k} - \frac{w(Z-H)}{2k} - \frac{(x-ut)^2}{4kt}} \left[e^{-\frac{(z-H)^2}{4kt}} - e^{-\frac{(z+H)^2}{4kt}} \right] \cdot e^{-\alpha N_c t} \quad (5)$$

Q 为单位线源核生成率。

如果催化剂质点尺度很小,其下沉速度可以忽略时,上式可简化为

$$q = \frac{Q}{4\pi kt} e^{-\frac{(x-ut)^2}{4kt}} \left[e^{-\frac{(z-H)^2}{4kt}} - e^{-\frac{(z+H)^2}{4kt}} \right] e^{-\alpha N_c t} \quad (6)$$

一般地说,在同一气压下含水量愈大,云滴浓度愈大,时间愈长,捕获效应愈大,但在催化剂的一定尺度范围内可以不考虑云滴对催化剂质点的捕获作用,这时方程(3)的解为

$$q = \frac{Q}{4\pi kt} e^{-\frac{w^2 t}{4k} - \frac{w(Z-H)}{2k} - \frac{(x-ut)^2}{4kt}} \left[e^{-\frac{(z-H)^2}{4kt}} - e^{-\frac{(z+H)^2}{4kt}} \right] \quad (7)$$

冰晶的末速度用下式来求得

$$w = 1.15 \times 10^2 \left(\frac{Td}{P} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (8)$$

式中 T 为温度, P 为气压, d 为质点直径。

对于直径为 0.1、0.2 和 0.3 毫米, $P = 700\text{hPa}$ 及 $T = 259\text{K}$ 的近似球形冰晶,计算的下落速度分别为 0.07、0.1 和 0.12 米/秒。

2 计算结果及分析

利用公式(5)、(6)、(7),我们计算了催化剂为 IS-5 和 AgI 丙酮溶液时产生冰晶的扩散情况。

2.1 IS-5 产生冰晶在云中的扩散情况

我们选取 1992 年 5 月 11 日在包头固阳到巴盟海流图的一次作业为例进行计算。作业时间为 19:54—22:38,播撒高度为 3000—4000 米,播撒层温度 -2 — -7C ,高空 2000—4000 米为层积云,4000—5000 米为蔽光高层云,航速为 276 公里/小时,播撒 IS-5 催化剂 25 公斤,播撒时间 40 分钟。用当日 19 时海流图探空

和测风资料计算得播撒层高度湍流系数为 $K = 29.5 \text{ 米}^2/\text{秒}$, 风速 $u = 7.2 \text{ 米}/\text{秒}$ 。取 IS-5 的成核率为 10^{13} 个/克。图 1(a)(b)

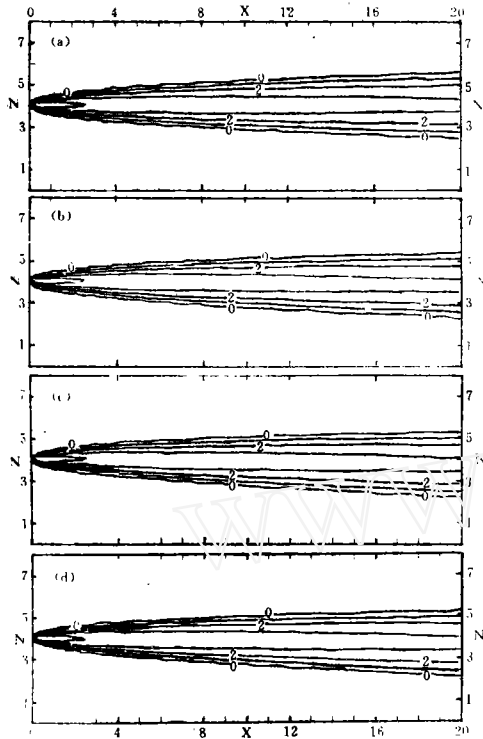


图 1 冰晶浓度空间分布垂直剖面图

横坐标为水平方向扩散距离, 纵坐标为垂直距离, 单位均为 km; 图中等值线为冰晶浓度量级, 单位为个/升(下同)。

- (a) $w = 0.0 \text{ 米}/\text{秒}$ (b) $w = 0.07 \text{ 米}/\text{秒}$
- (c) $w = 0.1 \text{ 米}/\text{秒}$ (d) $w = 0.12 \text{ 米}/\text{秒}$

(c)(d) 分别为催化剂粒子下沉速度 $w = 0.0, 0.07, 0.1$ 和 $0.12 \text{ 米}/\text{秒}$, 且不考虑云滴捕获效应时不同时刻冰晶浓度空间分布垂直剖面图。从图中可见, 1. 当催化剂质粒很小, 不考虑其下沉作用时, 冰晶浓度等值线相对于播撒高度是对称的, 而当质粒有下沉作用时, 冰晶浓度等值线相对于播撒高度不对称, 而是略向下移, 并且下沉速度愈大, 偏对称性也愈大。但扩散的垂直厚度却没多大差别, 这主要是因为扩散是由湍流作用引起的。下沉速度的不同, 仅能引起整个扩散区向下倾斜的差异, 而对扩散范围没有影响。2. 在下风方向上播撒线近

处冰晶浓度最大(可达 10^7), 随着距离的增加, 无论在垂直方向上, 还是在水平方向上, 其浓度逐渐减小。3. 冰晶浓度等值线都应呈闭合型, 但在所计算的距离内只有一条可以看到的闭合线, 这些都是和干冰播撒结果相类似的。

图 2 是当冰晶尺度为 0.0 mm , 而 K 分别为 $29.5, 50$ 和 $70 \text{ 米}^2/\text{秒}$ 时冰晶扩散范围(以 10^6 为界)垂直剖面图。由图 2 可以看

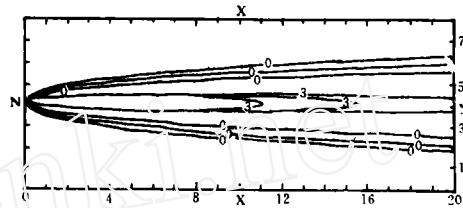


图 2 不同湍流系数情况下的冰晶范围 (实线对应 $K = 29.5 \text{ 米}^2/\text{秒}$, 虚线对应 $K = 50 \text{ 米}^2/\text{秒}$, 点划线对应 $K = 70 \text{ 米}^2/\text{秒}$), $w = 0.0 \text{ 米}/\text{秒}$

出, 湍流系数愈大, 其扩散范围也愈大(10^6 线), 而且随着距离的增加, 它们之间的差别也愈大, 说明主要由湍流系数决定扩散的范围。但也可看出, 它们之间在垂直距离上的差值比起其本身的扩散范围来说还是较小的。另外, 湍流系数愈大, 扩散速度就愈大, 造成冰晶浓度的衰减愈快(10^3 线)。

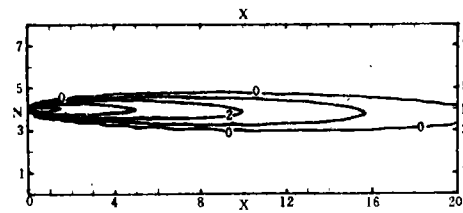


图 3 考虑云滴捕获效应时冰晶扩散范围垂直剖面图

图 3 是 $w = 0.12 \text{ 米}/\text{秒}$, 且考虑云滴捕获效应时冰晶扩散范围垂直剖面图。与图 1(d) 比较, 当考虑云滴对催化质点的捕获作用时, 不仅冰晶的数量减少, 而且冰晶扩散的垂直距离和水平范围都明显减少, 冰晶浓度等值线都呈闭合型。

公式(5)、(6)和(7)都是计算一条线源

催化剂浓度的公式,但飞机作业时每次都播撒若干条水平线源,因此,研究多条水平线源催化剂浓度的叠加效应具有实际意义。为此,在不考虑云滴对催化剂质点捕获的情况下,我们将式(7)写成对任意线源都适用的普遍公式,则有

$$q_n = \frac{Q}{4\pi kt_n} \exp\left[-\frac{w^2 t_n}{4k} - \frac{w(Z-H)}{2k} - \frac{(x_n - ut_n)}{4kt_n}\right] \exp\left[-\frac{(Z-H)^2}{4kt_n} - \frac{(Z+H)^2}{4kt_n}\right] \quad (8)$$

式中 x_n 为空间任一点距第 n 条线源初始坐标的距离,而 t_n 为该条线源的扩散时间。如令 $q_1, q_2, q_3, \dots, q_n$ 分别代表第一条至第 n 条线源催化剂的浓度,则空间任一点某一时刻的催化剂叠加浓度为

$$q_s = q_1(t_1, x_1, z) + q_2(t_2, x_2, z) + \dots + q_n(t_n, x_n, z) = \sum_{i=1}^n q_i(t_i, x_i, z) \quad (9)$$

在上面的例子中,飞机实际播撒飞行行为 4 条平行线,线间时间差为 8 分钟。用公式(9)计算得催化剂扩散范围如图 4 所示。与图 1(d)比较可见,冰晶的数量有很大增

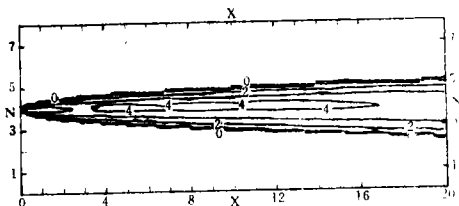


图 4 1 条播撒线叠加时冰晶浓度空间分布的垂直剖面图

加,且在每个催化剂播撒时刻都形成 10^7 以上的催化剂极大值中心。

我们还试验了播撒催化剂量由 25 公斤提高到 50 和 80 公斤时的结果,发现催化剂播撒剂量提高后,冰晶扩散的水平垂直范围及冰晶浓度都有不同程度的增加。

2.2 燃烧 AgI 丙酮溶液的扩散情况

我们选用 1994 年 5 月 2 日在乌盟达

茂旗播撒试验资料。播撒高度 5370—5500 米,播撒时航速 310 公里/小时,云底高度 2800 米,播撒时间 30 分钟,播撒层平均温度 -9.3°C 。用 1994 年 5 月 2 日 08 时呼和浩特探空资料计算得播撒层高度湍流系数为 $K=16$ 米²/秒,风速 $u=4$ 米/秒。Plooster 等确定的 AgI 丙酮发生器产生的活化率随温度的变化如图 5 所示。根据他们的

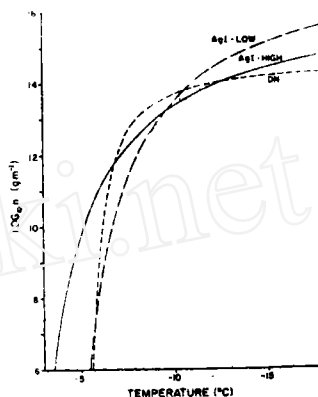


图 5 人工冰核活化率/个/克随温度变化曲线 实线: AgI—high(典型的高输出 AgI 发生器,如炮弹);长虚线: AgI—low(典型的低输出 AgI 源,如丙酮燃烧器);短虚线: DN(有机物与羟基萘)

结果,在 -9.3°C 时活化率为 10^{13} 个/克。以此作为成核率,我们计算了考虑云滴捕获效应时播撒后冰晶的空间分布,发现,其结果与图 3 中结果相接近,且冰晶浓度分布关于播撒线是上下对称的。但在 6 月份以后,播撒层平均温度常在 -7°C 以上,在此温度下,AgI 的成核率小于 10^{10} ,按照这个成核率,计算冰晶浓度的空间分布如图 6 所示。从图可见,冰晶垂直扩散范围不超过

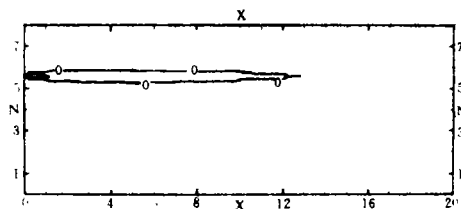


图 6 AgI 成核率为 10^{10} 个/克时冰晶空间分布垂直剖面图

600 米,且仅在很小范围内冰晶浓度稍大,

达到 10^4 , 其余绝大部分空间冰晶浓度每升只有几个。冰晶浓度分布上下是轴对称的, 这与考虑冰晶下沉作用时的分布不同。

3 初步结论

3.1 IS—5 产生的冰晶的下沉速度愈大, 冰晶最大浓度向下倾斜也愈大。

3.2 由于冰晶下沉作用的影响, 冰晶的空间扩散范围在播撒线以上所占区域小, 在播撒线以下所占区域较大。冰晶浓度等值线的间距在初始阶段较小, 随着时间的延长而逐步增大。

3.3 当下沉速度一定时, 湍流系数愈大, 扩散范围也愈大。但另一方面, 湍流系数愈大, 冰晶浓度的衰减也愈快。

3.4 当湍流系数一定而下沉速度不同时, 冰晶的垂直扩散范围基本相同。

3.5 在下风方向上(沿 x 轴方向)冰晶的水平扩散随时间呈线性增大, 时间愈长, 扩散范围愈大。

3.6 当湍流系数相同和高度一定时, 播撒量愈大(播撒线愈多), 所产生的冰晶浓度也愈大。

3.7 与 IS—5 产生的冰晶扩散情况不同, 燃烧 AgI 丙酮溶液产生的冰晶扩散图相对播撒高度呈上下轴对称, 这主要是未考虑催化剂产生冰晶的下沉作用所致。在温度高于 -7°C 时, 其扩散范围远较 IS—5 产生的冰晶扩散范围为小, 所以夏季用 IS—5 作催化剂, 效果会比 AgI 丙酮溶液好得多。

致谢 本文工作曾得到申亿铭教授的热情指导, 谨表谢忱。

(上接第 16 页) 单株产量的差异上。由此可见, 引进“北海道一号”和“牡丹”荞麦新品种是提高低产田产量的有效措施之一。

3 引种推广前景及经济效益估算

伊盟、巴盟河灌井灌春麦区复种荞麦的可行性。伊盟、巴盟春麦区小麦播种面积约 250 万亩左右, 春麦收获期一般为 7 月中旬左右, 到初霜期 9 月下旬, 还有两个多月的气候资源没能充分利用。如果种植别的粮食作物, 热量条件不能满足生长发育的需求。由于荞麦生育期短, 适应性强, 所以在春麦收获后及时播种荞麦, 正好填补这一空闲期, 可充分利用这一时期的气候资源。近几年在伊盟达拉特旗利用春麦收获后复种引进的“北海道一号”和“牡丹”荞麦获得成功, 每亩可生产荞麦 80 公斤。如果巴盟、伊盟春麦区利用 1/3 春麦田复种荞麦的话, 可增加产量 6000 余万公斤; 若全部春麦田复种荞麦, 则可增加产量近 2 亿公斤。可见其生产潜力是十分巨大的。

1992 年在研究分析伊盟地区气候资源和中低产田改造的对策基础上, 在达拉

特旗的低产田引种“北海道一号”和“牡丹”荞麦获得成功。秋天组织当地农技人员参观学习, 并把所生产的荞麦良种分发给东胜市和杭锦旗的部分地区, 推广种植面积约 3 千亩, 1994 年又在准格尔旗选择示范点两个, 到 1995 年累计推广种植面积达 5 万亩左右。

伊盟山旱区在中低产田上种植荞麦约 50 余万亩, 若普遍种植“北海道一号”和“牡丹”荞麦, 每亩可增加产量 25 公斤左右。这样总增加产量约 1000 万公斤左右, 每公斤荞麦按 1.2 元计算, 约增加收入 1200 万元。因此, 此引种项目受到当地干群的普遍重视。按照现在的推广速度, 估计再过 3 年左右, 该地区的荞麦要被“北海道一号”和“牡丹”荞麦所代替。

经过几年在伊盟等地的中低产田引种“北海道一号”和“牡丹”荞麦的实践, “牡丹”荞麦表现了较好的增产稳产性。建议有关部门尽快建立“牡丹”荞麦繁育基地, 并组织农技人员在伊盟、巴盟等地迅速推广。